

B1.1. Εφαρμογές ΤΠΕ στην αρχαιολογία - από την ψηφιακή ανασκαφή στη μελέτη, εκπαίδευση, διάχυση

Η πλήρης ψηφιακή αποτύπωση πολιτιστικών αντικειμένων και μνημείων αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία. Εξαρτάται τόσο από τη φύση του αντικειμένου που αποτυπώνεται όσο και από το στόχο της ίδιας της αποτύπωσης. Η διαδικασία περιλαμβάνει τις επιμέρους ενέργειες της τριδιάστατης (3Δ) ψηφιοποίησης, της επεξεργασίας και αποθήκευσης, της αρχειοθέτησης και διαχείρισης, της αντιγραφής, αναπαραγωγής και προβολής τριδιάστατων ψηφιακών δεδομένων.

Για να μιλήσει κανείς για 3Δ ψηφιοποίηση και 3Δ εικόνες θα πρέπει να έχει μια κατανόηση της στερεοσκοπικής όρασης και οπτικής αντίληψης. Η στερεοσκοπική όραση (στερεοσκοπική υπό την έννοια της αντίληψης των στερεών) είναι η διαδικασία στην οπτική αντίληψη που οδηγεί στην κατανόηση του στερεοσκοπικού βάθους. Με τη σειρά του, το στερεοσκοπικό βάθος είναι η αίσθηση του βάθους που προκύπτει από τη συγχώνευση δύο διαφορετικών προβολών του κόσμου στα δύο οπτικά αισθητήρια. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών προβολών, δηλαδή των δύο δισδιάστατων εικόνων στα μάτια, η οποία είναι το αποτέλεσμα της διαφορετικής θέσης των ματιών καλείται διοφθαλμική ανομοιότητα. Το γεγονός ότι αυτή η ανομοιότητα ερμηνεύεται από τον εγκέφαλο ως βάθος ανακαλύφθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα Charles Wheatstone κατά το 1838. Η έρευνά του άνοιξε ένα νέο τομέα έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης που έχει αποδώσει σημαντικά αποτελέσματα στον τρόπο που αποθηκεύουμε, επεξεργαζόμαστε, προβάλλουμε και αναπαράγουμε εικόνες του φυσικού μας κόσμου.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί το γενικό εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζονται περιεκτικά οι σύγχρονες τεχνολογίες και τεχνικές τριδιάστατης ψηφιοποίησης. Η παρουσίαση αυτή αφορά στις τεχνολογίες τόσο από πλευράς υλικού όσο και από πλευράς τεχνικών και λογισμικού.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται μετά την τριδιάστατη ψηφιοποίηση και πριν τις διαδικασίες προβολής. Η παρουσίαση αυτή αφορά στις σύγχρονες τεχνολογίες και τεχνικές καθώς και στα διεθνή πρότυπα και πρακτικές που εφαρμόζονται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται περιεκτικά ένας από τους σημαντικότερους τομείς τεχνολογιών τριδιάστατων εικόνων είναι αυτός που αφορά στην απεικόνιση και αναπαραγωγή τους είτε σε ψηφιακή είτε σε φυσική μορφή. Ο τομέας αυτός είναι που δίνει και πάλι ζωή στα ψηφιακά αντικείμενα, είτε για λόγους εκπαίδευσης, είτε για λόγους ψυχαγωγίας και διασκέδασης, είτε για της δημιουργία προσωπικών εμπειριών. Αν όλες οι άλλες τεχνολογίες σχετίζονται με την είσοδο των δεδομένων και την επεξεργασία τους στον ψηφιακό κόσμο των υπολογιστών, οι τεχνολογίες απεικόνισης και αναπαραγωγής σχετίζονται με την έξοδό τους από τον ψηφιακό κόσμο και την παρουσία τους στον κόσμο των ανθρώπινων αισθήσεων και εμπειριών.

Γεώργιος Παυλίδης
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Διευθυντής Ερευνών ΕΚ-Αθηνά

Πίνακας Περιεχομένων

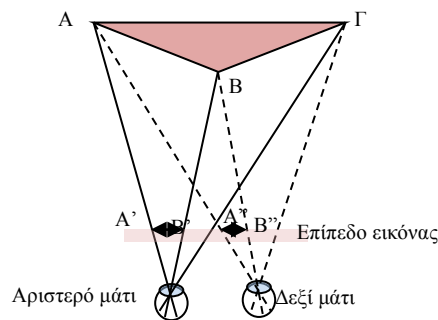
ΜΕΡΟΣ Ι. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ 3Δ ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ.....	4
2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	6
3. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ 3Δ ΕΙΚΟΝΕΣ	9
4. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	21
ΜΕΡΟΣ ΙΙ. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	22
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	23
3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	27
4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ	30
5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ	31
6. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕΣΑΙΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.....	32
7. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.....	35
8. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	36
9. ΤΕΧΝΙΚΕΣ 3Δ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΚΑΝΟΥΝ ΧΡΗΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ ΛΕΙΖΕΡ.....	37
9.1. <i>Τριγωνισμός ακτίνων λέιζερ</i>	38
9.2. <i>Λέιζερ πεδίου (αποστάσεων)</i>	40
10. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ	41
10.1. <i>Σχήμα από δομημένο φωτισμό</i>	41
10.2. <i>Σχήμα από σιλουέτα</i>	41
10.3. <i>Σχήμα από στέρεο-φωτογράφιση</i>	43
10.4. <i>Σχήμα από βίντεο/κίνηση</i>	43
10.5. <i>Σχήμα από φωτοσκίαση</i>	44
10.6. <i>Σχήμα από φωτομετρία</i>	44
10.7. <i>Σχήμα από μεταβλητή εστίαση</i>	44
10.8. <i>Σχήμα από σκιά</i>	45
10.9. <i>Σχήμα από υφή</i>	45
10.10. <i>Φωτογραμμετρία</i>	46
11. ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ	47
12. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ	48
13. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	49
14. ΣΥΛΛΗΨΗ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	49
15. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	50
16. ΑΝΑΦΟΡΕΣ	52
ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΑΡΧΕΙΟΘΕΤΗΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ....	56
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	56
2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	56
2.1. <i>Το αποθηκευτικό μέσο</i>	56
3. ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ	63
3.1. <i>Διατάξεις διασύνδεσης αποθηκευτικών μέσων</i>	63
4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ 3Δ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	64
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ 3Δ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	68
6. ΤΥΠΟΙ ΑΡΧΕΙΩΝ 3Δ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	70
7. ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ, ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗ 3Δ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ..	73
7.1. <i>Διαχείριση τριδιάστατων ψηφιακών δεδομένων</i>	74
7.2. <i>Τριδιάστατα δεδομένα, πολυμεσικές βάσεις δεδομένων και διαδίκτυο</i> .76	

7.3.	Μεταδεδομένα.....	78
7.4.	Αυτόματη εξαγωγή μεταδεδομένων βάσει περιεχομένου	79
7.5.	Εισαγωγή στο MPEG-7.....	80
7.6.	Ψηφιακοί περιγραφείς και η λειτουργία τους.....	81
7.7.	Περιγραφείς τριδιάστατων εικόνων	81
8.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	86
ΜΕΡΟΣ IV. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ, ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....		88
1.	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	88
2.	ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ 3Δ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	89
2.1.	Οθόνες καθοδικών ακτίνων (CRT- Cathode Ray Tube).....	91
2.2.	Οθόνες υγρών κρυστάλλων LCD, TFT	92
2.3.	Οθόνες PLASMA.....	95
2.4.	Προβολικά συστήματα (Projectors).....	96
3.	ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ.....	99
4.	ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ	103
5.	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ 3Δ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	105
6.	ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 3Δ ΕΙΚΟΝΩΝ	108
6.1.	Παρουσίαση 3Δ αντικειμένων στο διαδίκτυο.....	108
6.2.	Εικονικά μουσεία.....	109
6.3.	Εικονικά μνημεία και πόλεις.....	110
7.	ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	111
7.1.	Εφαρμογές και χρήσεις της Εικονικής Πραγματικότητας.....	116
8.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	119

Μέρος I. Εισαγωγή

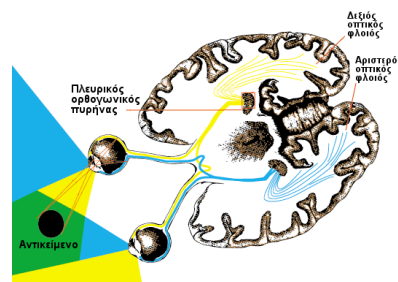
1. Εισαγωγή στην 3Δ οπτική αντίληψη

Μια σημαντική προϋπόθεση για να έχει νόημα αυτό το ταξίδι είναι η αναγνώριση ότι οι τριδιάστατες εικόνες αποτελούν «αντικείμενο» αντιληπτό από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Πώς, όμως είναι δυνατή η αντίληψη των τριών διαστάσεων του χώρου με δεδομένο ότι το ανθρώπινο σύστημα όρασης διαθέτει δύο αισθητήρια που καταγράφουν δισδιάστατες προβολές του κόσμου που παρατηρούν;



Εικόνα 1. Στερεοσκοπική όραση στον άνθρωπο

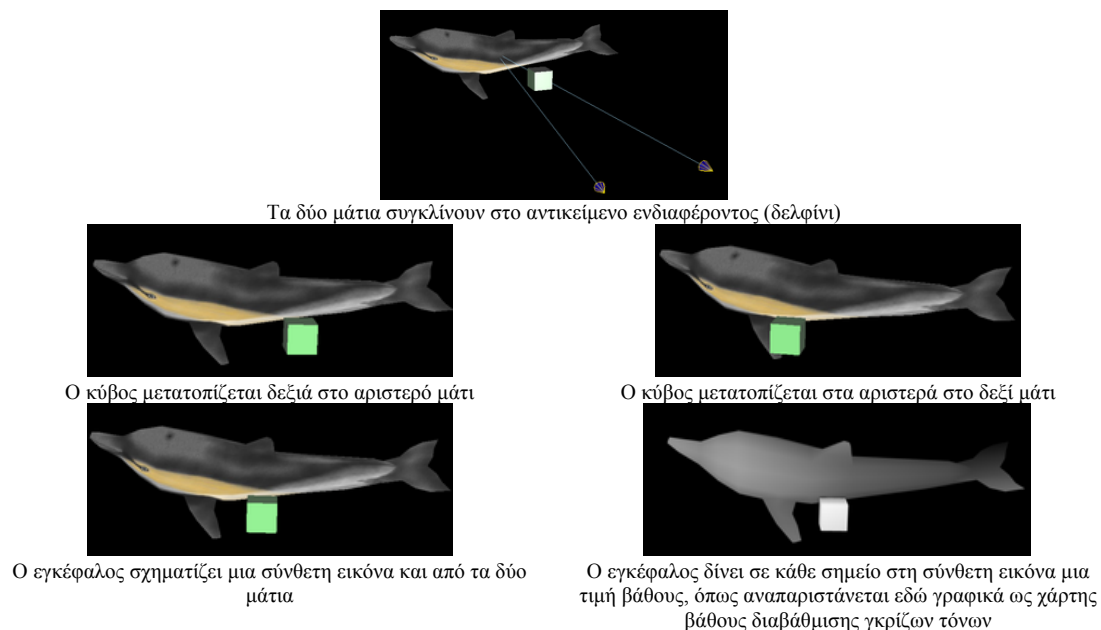
Η εντύπωση της τρίτης διάστασης στην ανθρώπινη όραση προκύπτει από το γεγονός ότι το δεξί και το αριστερό μάτι βλέπουν διαφορετικές εικόνες εξαιτίας της διαφορετικής γωνίας θέασης κάθε ματιού. (Εικόνα 1: Η γραμμή $A'B'$ φαίνεται μακρύτερη στο αριστερό μάτι από ότι η $A''B''$ φαίνεται στο δεξί). Η «παραμόρφωση» αυτή των σημείων στη δεξιά και αριστερή εικόνα καλείται συνήθως διοφθαλμική ανομοιότητα (binocular disparity) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διαφοράς στην απόσταση του παρατηρητή από τα παρατηρούμενα σημεία στο φυσικό κόσμο.



Εικόνα 2. Η οδός των οπτικών σημάτων από τα μάτια στον εγκέφαλο

Η στερεοσκοπική όραση, σύμφωνα με τα όσα είναι γνωστά σήμερα, αποτελεί διεργασία που πραγματοποιείται στον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου (Εικόνα 2) σε διοπτικά κύτταρα, τα οποία έχουν αισθητηριακά πεδία σε διαφορετικές οριζόντιες θέσεις για καθένα μάτι. Τα κύτταρα αυτά είναι ενεργά μόνο όταν το ερέθισμα είναι στη «σωστή» θέση και στα δύο μάτια, οπότε λειτουργούν ως αισθητήρια του διαχωρισμού. Όταν ένας παρατηρητής εστιάζει την προσοχή του σε ένα αντικείμενο, τότε τα μάτια συγκλίνουν έτσι ώστε το αντικείμενο να εμφανίζεται στο κέντρο του αμφιβληστροειδούς και στα δύο μάτια. Άλλα αντικείμενα, γύρω από το αντικείμενο ενδιαφέροντος εμφανίζονται μετατοπισμένα σε σχέση με αυτό. Στο παράδειγμα που

ακολουθεί στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται αυτή η διαδικασία [1]. Στο παράδειγμα, το βασικό αντικείμενο είναι το δελφίνι, το οποίο παραμένει στο κέντρο των δύο εικόνων των ματιών, ενώ ο κύβος που αποτελεί δευτερεύον αντικείμενο παρουσιάζεται σε διαφορετική θέση σε κάθε μάτι.



Εικόνα 3. Παράδειγμα της διαδικασίας οπτικής αντίληψης στον άνθρωπο

Λόγω της διαφορετικής θέσης κάθε ματιού, κάθε μάτι λαμβάνει μια διαφορετική προοπτική της σκηνής οδηγώντας σε διαφορετικές εικόνες. Υπό κανονικές συνθήκες, οι δύο αυτές εικόνες εμφανίζονται ως μία μέσω του φαινομένου που ονομάζεται *μοναδικότητα της όρασης* (singleness of vision). Εάν οι εικόνες είναι σημαντικά διαφορετικές τότε μπορεί να γίνονται αντιληπτές διαδοχικά και οι δύο εικόνες, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως *διοφθαλμικός ανταγωνισμός* (binocular rivalry).

Η στερεοσκοπική όραση είναι ένα εκπληκτικό φαινόμενο, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι η δυνατότητα αυτή που εκλαμβάνεται ως δεδομένη στον καθένα μας μπορεί να υλοποιηθεί με τεράστιο υπολογιστικό κόστος σε υπολογιστικά συστήματα. Στη σύγχρονη τεχνολογία των υπολογιστών, η στερεοσκοπική ρομποτική όραση ή η στερεοσκοπική όραση υπολογιστών είναι ειδικός τομέας της όρασης υπολογιστών. Συχνά χρησιμοποιείται στη ρομποτική για τον εντοπισμό εμποδίων στην πορεία ενός ρομπότ. Προσομοιώνοντας τη λειτουργία του ανθρώπινου συστήματος στερεοσκοπικής όρασης, η στερεοσκοπική ρομποτική όραση χρησιμοποιεί δύο κάμερες που λαμβάνουν εικόνα από την ίδια σκηνή ταυτόχρονα. Οι κάμερες βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ του όση και τα μάτια. Με χρήση υλικού και λογισμικού οι δύο εικόνες συγκρίνονται και πραγματοποιείται μετατόπισή τους (η μία πάνω στην άλλη) για τον εντοπισμό ομοιοτήτων. Το ποσοστό μετατόπισης καλείται *ανομοιότητα* ή *απομάκρυνση* (disparity). Το ποσοστό αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης των αντικειμένων.

Η όραση και η λειτουργία της καθώς και η τεχνητή όραση με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και οι εφαρμογές και χρήσεις της αποτελούν από μόνες τους ένα ειδικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης και μάλιστα σε διεπιστημονικό επίπεδο και δε θα ήταν δυνατό να αναπτυχθούν περισσότερο στα πλαίσια της παρούσας εισαγωγικής παρουσίασης. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι όσα αναπτύσσονται στη συνέχεια προϋποθέτουν ότι τα αποτελέσματα χρήσης των τεχνολογιών τριδιάστατων εικόνων

έχουν ως απόλυτο κριτή τον άνθρωπο-παρατηρητή και συνεπώς υφίστανται τους νόμους και κανόνες που διέπουν την όραση.

Έτσι, με δεδομένο ότι έχουμε τον παρατηρητή με τη συγκεκριμένη δυνατότητα στερεοσκοπικής όρασης, το επόμενο βήμα θα ήταν να εξετάσουμε το παρατηρούμενο φαινόμενο, τον τριδιάστατο δηλαδή κόσμο μας και το τι μπορούμε να εξάγουμε από τη μαθηματική θεώρηση και μοντελοποίησή του.

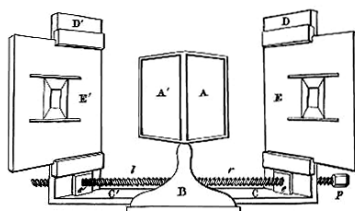
Ο τριδιάστατος χώρος είναι το αντιληπτό φυσικό σύμπαν στο οποίο κατοικούμε. Ονομάζεται τριδιάστατος γιατί αποτελείται από τρεις διαστάσεις. Οι τρεις αυτές διαστάσεις καλούνται συνήθως μήκος, πλάτος και ύψος, αν και οποιεσδήποτε τρεις διαστάσεις που βρίσκονται σε καθετότητα μπορούν να αποτελέσουν τις τρεις αυτές διαστάσεις. Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενες παραγράφους, οι εικόνες που βλέπουμε είναι δισδιάστατες χωρίς την τρίτη διάσταση, τη διάσταση του «βάθους». Αντίθετα, μια τριδιάστατη (3Δ) εικόνα, όπως αυτές που βλέπουμε σε συσκευές σαν το View Master, καθοδηγούν το ανθρώπινο σύστημα όρασης στο να αντιλαμβάνεται μια ψευδαίσθηση του βάθους (δηλαδή, της τρίτης διάστασης). Στη Φυσική, ο 3Δ κόσμος μας αποτελεί τμήμα ενός τετραδιάστατου (4Δ) χωροχρόνου, που καλείται χώρος Minkowski (θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Einstein). Η ιδέα πίσω από τον 4Δ χωροχρόνο είναι ότι ο χρόνος είναι υπερβολικά-ορθογώνιος σε κάθε μια από τις τρεις χωρικές διαστάσεις. Στα Μαθηματικά, η Καρτεσιανή (αναλυτική) γεωμετρία περιγράφει κάθε σημείο στον 3Δ χώρο μέσω της χρήσης τριών συντεταγμένων. Ορίζονται τρεις άξονες συντεταγμένων, ο καθένας κάθετος προς τους άλλους, που συναντώνται στο σημείο που ορίζεται ως η αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Ο συνήθης συμβολισμός τους είναι x , y , z . Σε σχέση με αυτούς τους άξονες, η θέση ενός σημείου στον 3Δ χώρο δίδεται ως μια διατεταγμένη τριπλέτα πραγματικών αριθμών, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε πραγματικός αριθμός να καθορίζει την απόσταση του σημείου από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων κατά μήκος του αντίστοιχου άξονα, ή την απόσταση του σημείου από το επίπεδο που ορίζεται από τους άλλους δύο άξονες. Άλλες δημοφιλείς μέθοδοι περιγραφής της θέσης ενός σημείου στον 3Δ χώρο περιλαμβάνουν τη χρήση κυλινδρικών και σφαιρικών συντεταγμένων, αν και στην πραγματικότητα μπορούν να οριστούν άπειροι δυνατοί τρόποι περιγραφής. Ένας άλλος μαθηματικός τρόπος θεώρησης του 3Δ χώρου μπορεί να εντοπιστεί στη γραμμική άλγεβρα, όπου η ιδέα της ανεξαρτησίας είναι σημαντική. Στην τεχνική ορολογία της γραμμικής άλγεβρας, ο χώρος είναι τριδιάστατος εξαιτίας του ότι κάθε σημείο του μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός γραμμικού συνδυασμού τριών ανεξάρτητων διανυσμάτων. Με βάση αυτή τη θεώρηση, ο χωροχρόνος είναι 4Δ λόγω του γεγονότος ότι η θέση ενός σημείου στο χρόνο είναι ανεξάρτητη της θέσης του στο χώρο. Ο 3Δ χώρος έχει κάποιες ιδιότητες που τον διαχωρίζουν από χώρους άλλων διαστάσεων. Έχει, για παράδειγμα, τη μικρότερη δυνατή διάσταση στην οποία είναι εφικτό το δέσιμο μιας ίνας σε κόμπο [2]. Πολλοί από τους φυσικούς νόμους, όπως διάφοροι νόμοι αντιστρόφων τετραγώνων εξαρτώνται από τη διάσταση τρία [3]. Η αντίληψη του 3Δ χώρου από τον άνθρωπο θεωρείται ότι διδάσκεται κατά τη διάρκεια της νηπιακής ηλικίας μέσω υποσυνείδητων διεργασιών και είναι στενά δεμένη με την εναρμόνιση της λειτουργίας ματιού-χεριού. Η οπτική ικανότητα αντίληψης του κόσμου σε τρεις διαστάσεις καλείται αντίληψη του βάθους.

2. Σύντομη ιστορική αναδρομή

Για ένα μεγάλο διάστημα της ιστορίας του ανθρώπου τεχνικές λύσεις σύλληψης και παρουσίασης εικόνων βασίζονταν σε δύο διαστάσεις. Οι κυριότεροι λόγοι γι' αυτό δεν ήταν τόσο σχετιζόμενοι με την έλλειψη θεωρητικού υποβάθρου για την εξήγηση

και διαχείριση 3Δ εικόνων όσο η έλλειψη τεχνολογικών λύσεων που θα ικανοποιούσαν τις μεγεθυμένες απαιτήσεις που εισάγουν οι 3Δ εικόνες. Έτσι, μόνο μετά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα αρχίζουμε να έχουμε τεχνολογικές λύσεις και να αναπτύσσονται νέες και περισσότερο εξειδικευμένες θεωρίες και μεθοδολογίες για τις 3Δ εικόνες.

Η πρώτη στερεοσκοπική οθόνη επινοήθηκε το 1833 από τον Sir Charles Wheatstone, ο οποίος πειραματιζόταν αρχικά με απλά στερεοσκοπικά σχέδια, αρκετά χρόνια πριν την επινοήση της φωτογραφίας. Αργότερα, οι δύο αυτές τεχνολογίες συνδυάστηκαν για τη δημιουργία του στερεοσκοπίου.



Εικόνα 4. Στερεοσκόπιο Wheatstone. Στο στερεοσκόπιο χρησιμοποιούνταν καθρέφτες υπό γωνία (Α) για την προβολή σχεδίων (Ε) στου θεατή

Το 1844 ο Sir David Brewster δημιούργησε το πρωτότυπο στερεοσκόπιο (ονομάστηκε αρχικά Brewster Stereoscope) που αποτέλεσε το πρότυπο για τη δημιουργία πολλών παραλλαγών στερεοσκοπίων και οδήγησε στη δημιουργία του προϊόντος ευρείας κατανάλωσης με το όνομα View Master (μέσα 20^{ου} αι.). Μια νεότερη έκδοση του στερεοσκοπίου του Wheatstone που κατασκευάστηκε το 1859 από τον Oliver Wendell Holmes, η οποία ονομάστηκε Holmes Stereo Viewer, αποτέλεσε τον κοινότερο τύπο στερεοσκοπίου από το 1881 έως το 1939.



Εικόνα 5. Στερεοσκόπιο Brewster [4]



Εικόνα 6. Στερεοσκόπιο Holmes [5]

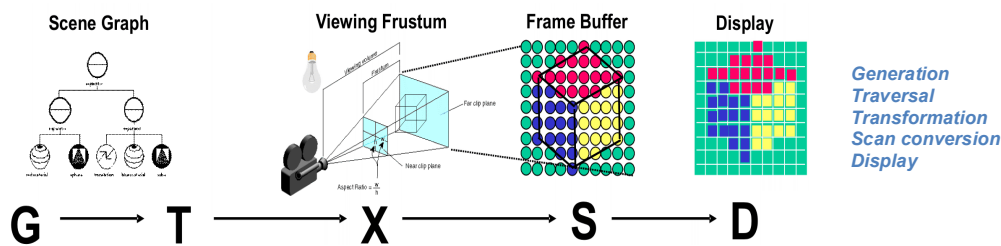
Με την έλευση του 20^{ου} αιώνα και την αναβάθμιση του ρόλου του θετικών επιστημών στη ζωή των ανθρώπων, παρουσιάζεται μια μεγάλη τεχνολογική άνθιση. Η άνθιση αυτή δεν άφησε ανέγγιχτο και τον τομέα των εικόνων και πιο συγκεκριμένα των 3Δ εικόνων. Σημαντικά βήματα στην εξέλιξη αυτή που παρουσιάζουν μεγάλο ιστορικό ενδιαφέρον για την τεχνολογία των 3Δ εικόνων αναφέρονται επιγραμματικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

Το 1929 ο *Edward Link* κατασκευάζει τον πρώτο απλό μηχανικό *εξομοιωτή πτήσης* για την εκπαίδευση πιλότων. Περίπου δύο δεκαετίες αργότερα, το 1946 κατασκευάζεται ο *πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής* (ENIAC). Στη δεκαετία του 1950 ο *Morton Heilig* επινοεί το «*σινεμά του μέλλοντος*» έναν κινηματογράφο που περικυκλώνει το θεατή με αισθήσεις φτιαγμένες από μηχανές και υπόσχεται να μεταφέρει τους θεατές σε μια άλλη διάσταση. Το 1956 από το «*σινεμά του μέλλοντος*» προκύπτει το *Sensorama*, το οποίο παρέχει στους θεατές του μια βόλτα με μοτοσυκλέτα στους δρόμους του Μανχάταν με χρήση 3Δ γραφικών,

στερεοσκοπικού ήχου και συσκευών δόνησης. Στο χώρο αυτό, ο χρήστης μπορούσε να νοιώσει τον αέρα και να μυρίσει αρώματα της πόλης, όπως γιασεμί και ιβίσκο.

Η δεκαετία του 1960 σηματοδοτεί την πρώιμη έρευνα και ανάπτυξη τόσο της θεωρίας για την τεχνολογία 3D εικόνων όσο και των πρώιμων εφαρμογών, περιορισμένη αποκλειστικά σε ακαδημαϊκούς και στρατιωτικούς χώρους. Το 1961 οι *Comeau και Bryan* (εταιρεία *Philco*) κατασκευάζουν την πρώτη προσαρμοζόμενη στο κεφάλι οθόνη (*Head Mounted Display - HMD*) με την ονομασία *Headsight TV Surveillance System* με ανίχνευση κίνησης του κεφαλιού για την απομακρυσμένη παρακολούθηση επικίνδυνων καταστάσεων. Το 1963 ο *Ivan Sutherland* εισάγει στη χρήση λογισμικού υπολογιστών για τη σχεδίαση, παρέχοντας αλληλεπιδραστικά γραφικά με την εφαρμογή *Sketchpad*, όπου στο υλικό διεπαφής μεταξύ χρήστη και υπολογιστή προστίθεται ελαφρύ στυλό για επιλογή αντικειμένων, παράλληλα με το πληκτρολόγιο. Το 1967 ο *Fred Brooks* επηρεασμένος από την εργασία του *Sutherland*, ξεκινάει το *project GROPE* με στόχο την ανάπτυξη τεχνολογίας χρήσης απτικής αλληλεπίδρασης για να βοηθήσει τους βιοχημικούς να «αισθανθούν» τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μορίων πρωτεΐνης.

Κατά τη δεκαετία του 1970 δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη ενός προτύπου τρόπου ανάπτυξης και εργασίας και προέκυψε το *graphics workflow* (Εικόνα 7) που ακολουθείται μέχρι και σήμερα. Η έρευνα προχώρησε κυρίως μέσω της χρηματοδότησης για ανάπτυξη εφαρμογών για στρατιωτικές προσομοιώσεις και τη σχεδίαση αυτοκινήτων.



Εικόνα 7. Τυπική ροή εργασιών για γραφικά

Το 1972 η εταιρεία *Atari* προσφέρει στο ευρύ κοινό αλληλεπιδραστικά γραφικά πραγματικού χρόνου, με το παιχνίδι *Pong*, ενώ παράλληλα συγκεντρώνει πολλούς μελλοντικούς πρωτοπόρους της Εικονικής Πραγματικότητας (*Alan Kay, Fisher, Bricken, Foster, Laurel, Walser, Robinett και Zimmerman*).

Κατά τη δεκαετία του 1980 ανθεί η ανάπτυξη σημαντικών αλγορίθμων οπτικής αναπαράστασης και η βελτίωση της ποιότητας των γραφικών για να καλύψουν τις ανάγκες της βιομηχανίας του κινηματογράφου.

Τη δεκαετία του 1990 γίνεται ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών και αλγορίθμων αναπαράστασης με ιδιαίτερη εστίαση του ερευνητικού ενδιαφέροντος σε θέματα όπως *animation*, πρόσκτηση 3D δεδομένων (μοντελοποίηση και 3D σάρωση), εφαρμογή νόμων της Φυσικής, μη-φωτορεαλιστική απόδοση, μοντελοποίηση μη-στερεών σωμάτων (π.χ. υγρά) και προσομοίωση κίνησης.

Από το 2000 και μέχρι σήμερα, τα θέματα που περιλαμβάνονται στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών 3D εικόνων αφορούν σε:

- Τεχνικές 3D ψηφιοποίησης υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης με ταυτόχρονη δυνατότητα πρόσκτησης γεωμετρικών και χρωματικών δεδομένων

- Υψηλού επιπέδου φωτορεαλιστική απόδοση (Εικόνα 8) που αγγίζει πλέον επίπεδα όπου δύσκολα διαχωρίζεται μια συνθετική εικόνα από μία πραγματική
- Ενοποίηση των ερευνητικών περιοχών της όρασης υπολογιστών (computer vision) και των γραφικών
- Κατασκευή υλικού (καρτών) γραφικών με υψηλές επιδόσεις και ικανότητες προβολής φωτορεαλιστικών τριδιάστατων γραφικών σε πραγματικό χρόνο

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι περισσότερες εξελίξεις στο χώρο των 3D εικόνων προέκυψαν τελικά από τις ανάγκες της βιομηχανίας κινηματογράφου, στρατιωτικών εφαρμογών, καθώς και εφαρμογών ευρείας κατανάλωσης (κυρίως παιχνίδια).

Η έρευνα και ανάπτυξη στο χώρο των τεχνολογιών 3D εικόνων είναι ολοένα και περισσότερο επιταχυνόμενη. Με την πλήρη επικράτηση των προσωπικών υπολογιστών και την σημαντική επένδυση ειδικευμένων εταιρειών στην κατασκευή υλικού και λογισμικού για την παροχή ολοένα και καλύτερων ποιοτικά 3D εικόνων σε πραγματικό χρόνο, αρχίζει να διαφαίνεται πλέον ένα *τριδιάστατο μέλλον* που βαδίζει ολοταχώς προς μια *πλήρως εμπυθιστική εικονική πραγματικότητα*.



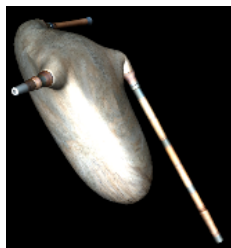
Εικόνα 8. Παράδειγμα φωτορεαλιστικής απόδοσης 3D γραφικών

3. Τι είναι οι 3D εικόνες

Τριδιάστατες εικόνες είναι, γενικά, εικόνες που εμπεριέχουν πληροφορία τριδιάστατης δομής του χώρου που εικονίζουν. Η 3D δομή μπορεί να περιγράφεται με διάφορους τρόπους, είτε με τη χρήση 3D συντεταγμένων (σε οποιοδήποτε σύστημα), είτε με τη χρήση πληροφορίας βάθους παράλληλα με τη χρήση κλασικής δισδιάστατης εικονογράφησης. Έτσι, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται, η στερεοσκοπική ή τριδιάστατη εικονογράφηση αναφέρεται είτε στην αποτύπωση και απεικόνιση πραγματικής τριδιάστατης γεωμετρίας και υφής, είτε στην αποτύπωση και δημιουργία της ψευδαίσθησης του βάθους. Η ψευδαίσθηση του βάθους στο ανθρώπινο σύστημα όρασης δίνεται μέσω της προβολής διαφορετικών εικόνων σε κάθε οπτικό αισθητήριο (μάτι).

Γενικά, 3D εικόνες μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους: είτε με 3D ψηφιοποίηση (γνωστή και ως σάρωση), είτε με 3D σχεδίαση με χρήση ειδικού λογισμικού. Έτσι, διακρίνουμε δύο τύπους 3D εικόνων αντίστοιχα, αυτές του

φυσικού κόσμου και αυτές του τεχνητού, οι οποίες (τελευταίες) καλούνται συνήθως και 3D γραφικά. Οι μεν 3D εικόνες φυσικού κόσμου αποτελούν προϊόν 3D ψηφιοποίησης, οι δε 3D τεχνητές εικόνες αποτελούν προϊόν 3D μοντελοποίησης. Στην Εικόνα 9 δίνονται μερικά παραδείγματα 3D εικόνων από ψηφιοποίηση (α, β, γ) και από μοντελοποίηση (δ, ε, στ) αντίστοιχα.



(α)



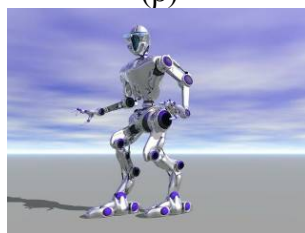
(β)



(γ)



(δ) [6]



(ε) [7]



(στ) [8]

Εικόνα 9. Παραδείγματα 3D εικόνων: (α)-(γ) προϊόντα 3D ψηφιοποίησης, (δ)-(στ) προϊόντα 3D μοντελοποίησης (γραφικά)

Τα βασικά χαρακτηριστικά των 3D εικόνων και γραφικών είναι, επιγραμματικά, τα εξής:

- Οι 3D εικόνες περιέχουν πληροφορία που αφορά στη δομή και στην υφή των αντικειμένων
- Μια 3D εικόνα δεν είναι ένας πίνακας από pixels αλλά μια συλλογή από τριδιάστατα αντικείμενα η οποία προβάλλεται στην οθόνη με τη χρήση κάποιων αλγορίθμων και μετασχηματισμών
- Τα 3D γραφικά δημιουργούνται εξ' αρχής με τη βοήθεια υπολογιστή μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται 3D μοντελοποίηση. Όταν πρόκειται για 3D εικόνες απαιτείται τουλάχιστον εκ των υστέρων χρήση υπολογιστή
- Οι 3D εικόνες αποτελούν ιδιαίτερο πεδίο έρευνας των ψηφιακών πολυμέσων με στόχο την απόδοση ρεαλιστικών ψηφιακών εικόνων με όσο το δυνατό μεγαλύτερη πιστότητα και ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο

Πλήθος από εφαρμογές 3D εικόνων υπάρχουν σήμερα, αλλά και σχεδιάζονται για το μέλλον. Στην κορυφή των εφαρμογών αυτών βρίσκονται τα σύγχρονα παιχνίδια για υπολογιστές ή για ειδικές «παιχνιδομηχανές» (π.χ. Sony Playstation, Microsoft Xbox, Nintendo Wii, κοκ). Η βιομηχανία των παιχνιδιών είναι σήμερα μια πολύ επικερδής βιομηχανία με κέρδη που ξεπερνούν αυτά του κινηματογράφου, ο οποίος μαζί με την τηλεόραση ακολουθεί στις εφαρμογές 3D εικόνων. Εν συνεχεία υπάρχουν εφαρμογές σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), στην οπτική αναπαράσταση δεδομένων (π.χ. χημικών ενώσεων), στο βιομηχανικός σχεδιασμός (π.χ. prototyping, reverse engineering), στην Ιατρική (π.χ. ογκομετρική αναπαράσταση τομογραφιών), σε προσομοιώσεις (π.χ. δυναμική των ρευστών), στην Εικονική Πραγματικότητα (π.χ. διαδραστικές 3D περιηγήσεις) και στην οπτική αναπαράσταση πολιτιστικής κληρονομιάς και στα εικονικά μουσεία.

Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης των 3Δ εικόνων είναι η ευχέρεια παρεμβάσεων από το χρήστη, μέσω χειρισμών όπως:

- Οι δομικές παρεμβάσεις, δηλαδή η εισαγωγή, αφαίρεση, μετακίνηση και παραμόρφωση των τριδιάστατων αντικειμένων
- Η φωτισμός και η σκίαση (shading) αντικειμένων και χώρου
- Η χαρτογράφηση, δηλαδή αντιστοίχιση μιας εικόνας στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Η χαρτογράφηση υφής (texture mapping) δίνει σε γεωμετρικά αντικείμενα την υφή (εμφάνιση) κάποιου υλικού
- Διαφόρων τύπων οπτικές αποδόσεις (rendering), δηλαδή η μετατροπή του μοντέλου σε μια εικόνα ή εικονοσειρές με την επιθυμητή ανάλυση, βάθος χρώματος και μέγεθος

Γενικά οι τεχνολογίες απεικόνισης 3Δ εικόνων διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με απώτερο στόχο την ενοποίησή τους στο μέλλον. Οι τεχνολογίες αυτές είναι από τη μία πλευρά αυτές που αφορούν σε *απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο* (π.χ. σε εφαρμογές όπως παιχνίδια) και από την άλλη αυτές που αφορούν στη *βέλτιστη φωτορεαλιστική απόδοση* (π.χ. σε εφαρμογές αρχιτεκτονικής σχεδίασης). Στην πρώτη κατηγορία, οι τεχνολογίες στοχεύουν με «τεχνάσματα» και βέλτιστες υλοποιήσεις ειδικών αλγορίθμων σε υλικό για την πραγματοποίηση των στόχων. Παράλληλα, η πρόοδος του υλικού γραφικών (επιταχυντές 3Δ γραφικών) επιτρέπει σήμερα την εκτέλεση δαπανηρών υπολογισμών που απαιτούνται για το σωστό φωτισμό και χρωματισμό πολύπλοκων επιφανειών σε πολύ γρήγορους ρυθμούς. Ως αποτέλεσμα, η ποιότητα των απεικονιζόμενων γραφικών που την προηγούμενη δεκαετία θεωρούνταν κινηματογραφική, μπορεί να επιτευχθεί σε πραγματικό χρόνο σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή. Η ολοένα διογκούμενη λίστα από δυνατότητες των σημερινών επιταχυντών γραφικών περιλαμβάνει:

- Υπολογισμούς σκίασης σε κάθε pixel
- Γεωμετρικούς μετασχηματισμούς
- Πολλαπλά «περάσματα» χρώματος (lightmaps, detail textures)
- Μεγάλο δυναμικό εύρος παλέτας (48-128 bits per pixel - bpp)
- Απεικόνιση ανάγλυφου (πληροφορία υφής)
- Εξομάλυνση επιφανειών και γραμμών
- Έξυπνη απόκρυψη περιττών επιφανειών
- Προγραμματιζόμενα εφέ (Shaders)

Στη δεύτερη κατηγορία τεχνολογιών είναι αυτές που αφορούν σε φωτορεαλιστική απόδοση. Στόχος των τεχνολογιών αυτών είναι η πιστή προσομοίωση μοντέλων φωτισμού και κίνησης που συνεπάγεται υψηλό υπολογιστικό κόστος. Η απαίτηση για μεγάλη υπολογιστική ισχύ αντιμετωπίζεται συνήθως με συστοιχίες υπολογιστών τα λεγόμενα *rendering farms*. Στην ουσία ο στόχος των τεχνολογιών στην κατηγορία αυτή είναι η απόδοση μιας 3Δ σκηνής με «ρεαλιστικό» τρόπο, έτσι ώστε να επιτευχθούν υψηλής ποιότητας αισθητικά αποτελέσματα όπως:

- Φωτισμός
- Φωτοσκίαση
- Αντανάκλασεις φωτός
- Ανάγλυφες επιφάνειες και διαμόρφωση υφής
- Τεχνητή απόδοση υγρών και αερίων

Οι αλγόριθμοι φωτορεαλιστικής απόδοσης είναι στην πραγματικότητα προσομοιωτές της διάδοσης και διάχυσης του φωτός μέσα σε ένα διακριτό τριδιάστατο περιβάλλον. Ένας από τους πιο σύγχρονους αλγορίθμους φωτορεαλισμού με την ονομασία *ray*

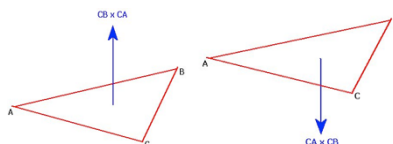
tracing βασίζεται στην παρακολούθηση της διαδρομής που ακολουθεί μέσα στην 3Δ σκηνή μία δέσμη φωτός από μια συνθετική πηγή στο χώρο καθώς ανακλάται από τα 3Δ αντικείμενα της σκηνής. Παραδείγματα αποτελεσμάτων φωτορεαλιστικής απόδοσης 3Δ εικόνων φαίνονται στην Εικόνα 10 όπου παρουσιάζονται παραδείγματα από τη βιομηχανία του κινηματογράφου και του αυτοκινήτου καθώς και από την αρχιτεκτονική.



Εικόνα 10. Παραδείγματα φωτορεαλιστικής απόδοσης 3Δ γραφικών

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός τριδιάστατου αντικειμένου είναι τρία:

1. Η γεωμετρία ή γεωμετρικό πλέγμα (συνήθως καλείτε wireframe). Η γεωμετρία περιγράφεται μέσω ενός πίνακα από τρίγωνα (ή στη γενική περίπτωση από πολύγωνα) στα οποία τα δομικά στοιχεία είναι δύο:
 - Κάθε τρίγωνο έχει τρεις κορυφές που ονομάζονται vertices. Για κάθε κορυφή αποθηκεύουμε τις τρεις συντεταγμένες του (x, y, z) στο χώρο
 - Κάθε τρίγωνο έχει μια πλευρά που θεωρείται εξωτερική και μια εσωτερική. Ο καθορισμός της πλευράς γίνεται με τη χρήση ενός διανύσματος κάθετου προς την επιφάνεια (normal vector), όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



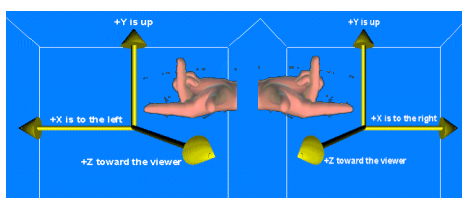
Εικόνα 11. Κορυφές οργανωμένες αριστερόστροφα και δεξιόστροφα. Με την υπολογισμό του εξωτερικού γινομένου των διανυσμάτων $CB \times CA$ ή $CA \times CB$ εντοπίζεται η εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια του αντικειμένου

2. Η πληροφορία υφής (texture). Η πληροφορία υφής δεν πρέπει να συγχέεται με την έννοια της υφής που δίνουμε γενικά για την αίσθηση που μας δίνεται κατά την επαφή μας με αντικείμενα. Σχετίζεται με την χρωματική πληροφορία στην επιφάνεια των αντικειμένων και όχι με άλλες επιφανειακές ιδιότητες που γίνονται αντιληπτές με την αφή. Η υφή ενός 3Δ αντικειμένου αποθηκεύεται συνήθως σε μία ή περισσότερες

δισδιάστατες εικόνες (χάρτες υφής – texture maps) με αντίστοιχη πληροφορία χαρτογράφησης των εικόνων αυτών πάνω στο 3Δ αντικείμενο (δηλαδή πληροφορίες ταύτισης της θέσης του κάθε χρώματος πάνω στο 3Δ αντικείμενο).

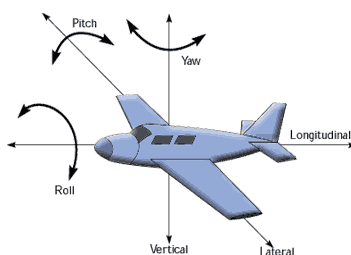
3. Ο τρόπος με τον οποίο η επιφάνεια του 3Δ αντικειμένου συμπεριφέρεται όταν ακτινοβολείται από εικονικές πηγές φωτός (rendering). Εδώ έχουμε ιδιότητες όπως ανακλαστικότητα ή η διαφάνεια, ιδιότητες δηλαδή που επιδρούν στο ποσοστό μεταβολής του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια του 3Δ αντικειμένου.

Στην πράξη, οι μεθοδολογίες διαχείρισης και επεξεργασίας 3Δ εικόνων προϋποθέτουν μια σειρά από συμβάσεις και υποθέσεις. Μια από τις σημαντικότερες είναι αυτή που αφορά στην επιλογή του συστήματος συντεταγμένων. Έτσι, μπορούμε να γίνει χρήση είτε ενός δεξιόστροφου είτε ενός αριστερόστροφου συστήματος συντεταγμένων το οποίο πρέπει να ακολουθείται καθ' όλη τη διάρκεια διαχείρισης των 3Δ εικόνων μας. Η ενδιάμεση μεταβολή του συστήματος οδηγεί σε μη αποδεκτά αποτελέσματα και αποτελεί, πολύ συχνά, παράγοντα παρουσίας σφαλμάτων σε πρακτικές εφαρμογές υλοποίησης λογισμικών εργαλείων διαχείρισης 3Δ εικόνων. Μια σχηματική αναπαράσταση των δύο συστημάτων δίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Σχηματική παράσταση του αριστερόστροφου (αριστερά) και δεξιόστροφου (δεξιά) καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων που εφαρμόζονται στην τεχνολογία των 3Δ εικόνων

Όλες οι μορφές επεξεργασίας που είναι δυνατό να υποστεί ένα 3Δ αντικείμενο μπορούν πάντοτε να αναχθούν σε τρεις βασικές μεταβολές οι οποίες δεν είναι άλλες από τη μετατόπιση, την περιστροφή και την κλιμάκωση. Κάθε 3Δ αντικείμενο έχει στον εικονικό 3Δ χώρο στον οποίο ανήκει 6 βαθμούς ελευθερίας, 3 ως προς τη θέση (x, y, z) ή (longitudinal, lateral, vertical) και 3 ως προς τον προσανατολισμό (pitch, roll, yaw), όπως εικονίζονται στην Εικόνα 13.

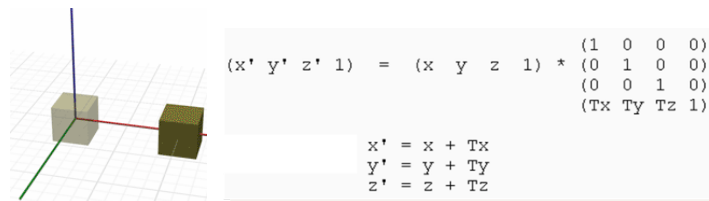


Εικόνα 13. Σχηματική παράσταση των βαθμών ελευθερίας ενός 3Δ αντικειμένου σε ένα 3Δ χώρο

Με τη χρήση απλών μαθηματικών, οι βασικές μεταβολές που μπορεί να υποστεί ένα 3Δ αντικείμενο είναι οι εξής:

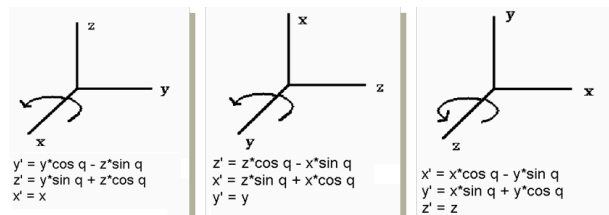
- **Μετατόπιση:** Είναι η μετακίνησή του αντικειμένου στον 3Δ χώρο από την τρέχουσα θέση του προς οποιαδήποτε άλλη θέση. Η μετατόπιση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με τη χρήση διανυσματικής αναπαράστασης της θέσης και της εφαρμογής πολλαπλασιασμού πινάκων. Στην Εικόνα 14 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της μετατόπισης ως προς έναν άξονα και δίνονται

οι μαθηματικές εκφράσεις υπολογισμού της νέας θέσης μετά από μια διαδικασία μετατόπισης του αντικειμένου από την αρχική θέση (x, y, z) στην τελική θέση (x', y', z') . Τα μεγέθη T_x, T_y, T_z καθορίζουν το μέτρο της μετατόπισης σε καθέναν από τους 3 άξονες.



Εικόνα 14. Αναπαράσταση της μετατόπισης ως προς έναν άξονα και η γενική μαθηματική έκφραση υπολογισμού της νέας θέσης

- **Περιστροφή:** Αναφέρεται στην περιστροφή του αντικειμένου γύρω από κάποιον ή κάποιους από τους τρεις άξονες. Στην απλούστερη μορφή τους, οι περιστροφές αυτές περιγράφονται με τη βοήθεια ημιτόνων και συνημιτόνων των εμπλεκόμενων γωνιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Στην εικόνα αυτή, η αρχική θέση του αντικειμένου ορίζεται από τις συντεταγμένες (x, y, z) ενώ η νέα θέση υπολογίζεται στις συντεταγμένες (x', y', z') μετά τη μεταβολή που εισάγει η περιστροφή κατά μια γνωστή γωνία q .



Εικόνα 15. Αναπαράσταση της περιστροφής γύρω από κάθε άξονα και η γενική μαθηματική έκφραση υπολογισμού για την κάθε περίπτωση

- **Κλιμάκωση:** Αναφέρεται στην παραμόρφωση του σχήματος του 3D αντικειμένου που μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή του λόγου διαστάσεών του με ταυτόχρονη μεταβολή του όγκου του. Σε κάθε περίπτωση η κλιμάκωση μπορεί να εφαρμόζεται σε κάθε άξονα ξεχωριστά ή και στους τρεις ταυτόχρονα. Η γενική μαθηματική μορφή υπολογισμού του αποτελέσματος της κλιμάκωσης δίνεται στην Εικόνα 16, όπου οι νέες θέσεις κάθε σημείου του αντικειμένου (x', y', z') μετά την κλιμάκωση κατά S_x, S_y, S_z αντίστοιχα υπολογίζονται μέσω πολλαπλασιασμού πινάκων.

$$(x' \ y' \ z' \ 1) = (x \ y \ z \ 1) * \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

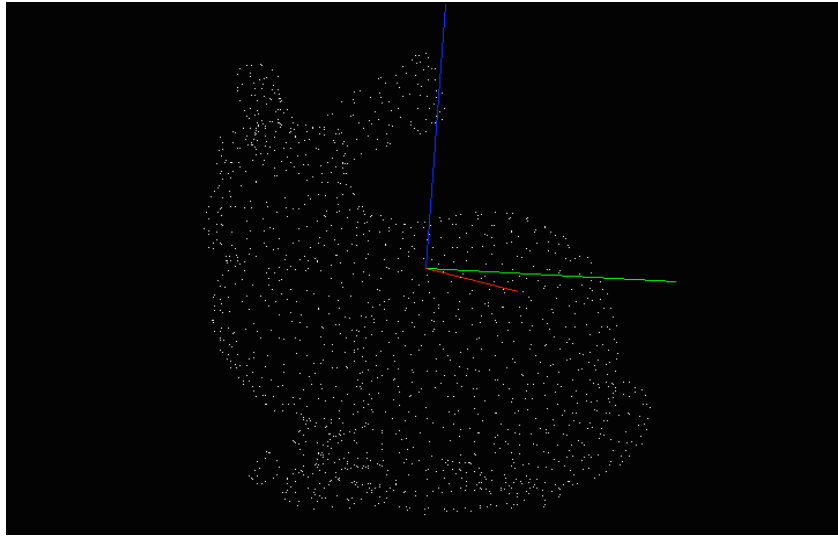
$$\begin{aligned} x' &= x * S_x \\ y' &= y * S_y \\ z' &= z * S_z \end{aligned}$$

Εικόνα 16. Γενική μαθηματική έκφραση υπολογισμού της κλιμάκωσης

Ως προς τις λογικές αναπαραστάσεις των 3D εικόνων θα μπορούσαμε να διακρίνουμε πέντε βασικές μορφές που απαντώνται σήμερα:

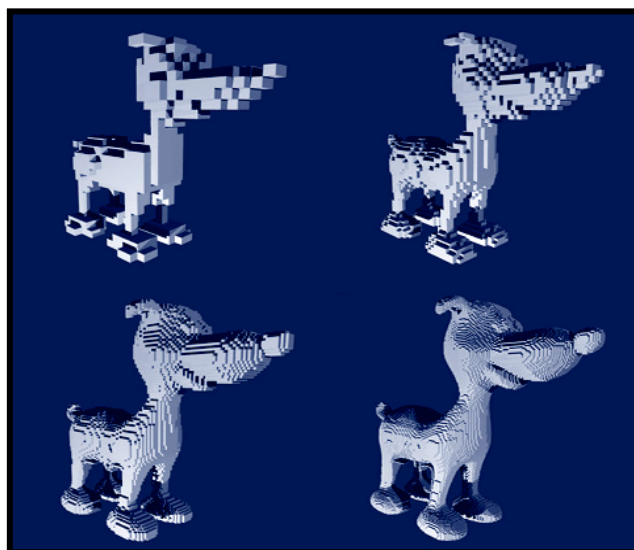
1. **Νέφος Σημείων (Point Cloud – Vertices):** Ορίζεται ως ένα σύνολο σημείων που μοιράζονται το ίδιο 3D καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε σημείο φέρει την πληροφορία που το τοποθετεί σε μία συγκεκριμένη θέση

μέσα στον 3Δ χώρο. Η πληροφορία αυτή αποτελείται από τρεις διαφορετικές τιμές, μία για κάθε άξονα (x , y , z). Ένα τυπικό νέφος σημείων εικονίζεται στην Εικόνα 17.



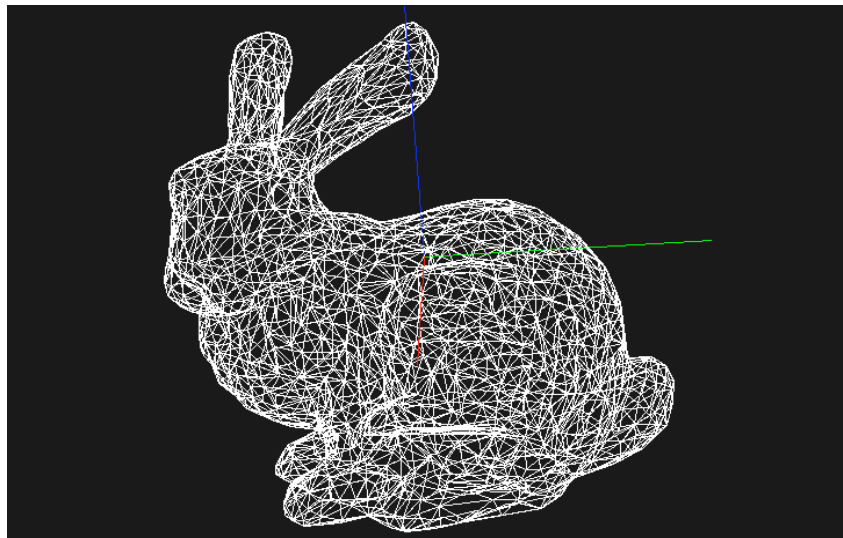
Εικόνα 17. Τυπική απεικόνιση νέφους σημείων

2. *Ογκομετρικά στοιχεία (Volumetric Pixels ή Voxels)*: Αποτελεί μια αντιστοιχία του τρόπου περιγραφής των 2Δ εικόνων. Η μονάδα περιγραφή αντί του γνωστού pixel είναι το voxel, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τριδιάστατο pixel. Κάθε ογκομετρικό στοιχείο, αναπαριστά έναν κύβο σε ένα διακριτό τριδιάστατο χώρο. Εφαρμόζεται κυρίως για απεικόνιση ιατρικών δεδομένων, όπου δεν υπάρχει μόνο επιφανειακή πληροφορία αλλά και εσωτερική πληροφορία για όλο τον όγκο του παρατηρούμενου αντικειμένου. Ανάλογα με το μέγεθος του «στοιχειώδους» ογκομετρικού στοιχείου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των 3Δ αντικειμένων, διακρίνονται άλλοτε αναπαραστάσεις με έντονη παραμόρφωση και άλλοτε αναπαραστάσεις με πολύ υψηλό επίπεδο ανάλυσης, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18. Παράδειγμα επίπτωσης χρήσης διαφορετικού μεγέθους ογκομετρικών στοιχείων για την περιγραφή του ίδιου 3Δ αντικειμένου

3. *Τριγωνικό Πλέγμα (Triangulated Mesh)*: Είναι η μέθοδος περιγραφής της επιφανειακής γεωμετρίας μέσω της χρήσης τριγώνων που καλύπτουν όλη την επιφάνεια. Το ερώτημα που εγείρεται αυθόρμητα είναι «γιατί τρίγωνα;». Η απάντηση βρίσκεται στο γεγονός ότι τα τρίγωνα είναι το μικρότερο 2Δ γεωμετρικό σχήμα με το χαρακτηριστικό να ορίζουν πάντα μία επίπεδη περιοχή σε έναν τριδιάστατο χώρο και, επιπρόσθετα, ένα οποιοδήποτε τριδιάστατο σχήμα μπορεί να προσεγγισθεί με μεγάλη ακρίβεια με κάποιο πλήθος τριγώνων μεταβλητού ή μη εμβαδού. Η μορφή αυτή αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνική για την περιγραφή 3Δ αντικειμένων με χρήση υπολογιστή. Ένα παράδειγμα αντικειμένου στη μορφή τριγωνικού πλέγματος δίνεται στην Εικόνα 19.



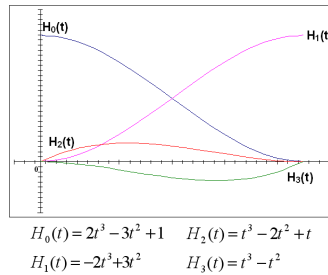
Εικόνα 19. Παράδειγμα 3Δ αντικειμένου στη μορφή τριγωνικού πλέγματος

Μια γενίκευση της μορφής αυτής αποτελεί η μορφή του πολυγωνικού πλέγματος (polygonal mesh), η οποία περιλαμβάνει την περιγραφή της 3Δ γεωμετρίας με τη χρήση πολυγώνων. Σε κάθε περίπτωση η χρήση της μίας ή της άλλης μορφής εμπεριέχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που θα πρέπει να σταθμίζονται για την κάθε ειδική περίπτωση εφαρμογής. Σήμερα, σύγχρονες εφαρμογές 3Δ μοντελοποίησης υποστηρίζουν μια υβριδική μορφή περιγραφής με ταυτόχρονη παρουσία τριγώνων και πολυγώνων στο πλέγμα, βελτιστοποιώντας την προσέγγιση της πραγματικής 3Δ γεωμετρίας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αποθηκευτικού χώρου.

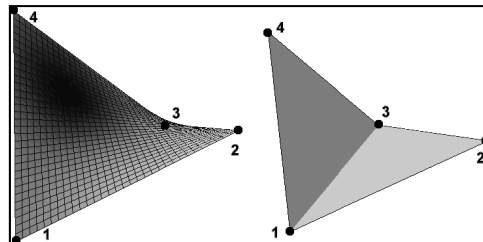
4. *Παραμετρικές αναπαραστάσεις*: Αποτελούν έναν απολύτως μαθηματικό τρόπο περιγραφής 3Δ αντικειμένων και είναι εφικτές κυρίως μέσω της χρήσης καμπυλών τύπου *basic-splines*:

$$p(t) = (2t^3 - 3t^2 + 1)p_0 + (t^3 - 2t^2 + t)m_0 + (2t^3 - 3t^2)p_1 + (t^3 - t^2)m_1, t \in [0,1]$$

Οι όροι της παραπάνω σχέσης αναπαρίστανται γραφικά στην Εικόνα 20 ενώ το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου περιγραφής σε μια απλή 3Δ επιφάνεια φαίνονται στην Εικόνα 21. Στο παράδειγμα αυτό είναι εμφανές ότι από μια τριγωνική περιγραφή στην οποία απαιτούνται οι συντεταγμένες όλων των σημείων μεταβαίνουμε σε μια πολύ ομαλή καμπύλη επιφάνεια που προσεγγίζει την επιφάνεια του πλέγματος και δημιουργεί για πολύ πιο ομαλή αναπαράσταση του 3Δ αντικειμένου.

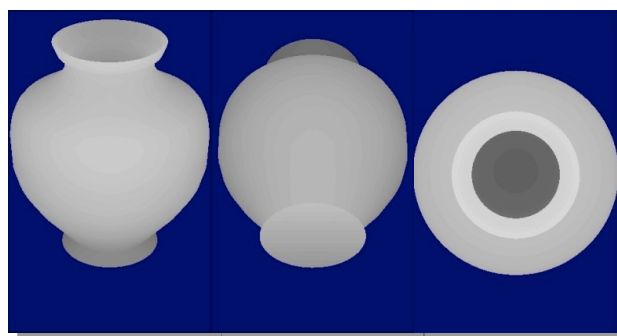


Εικόνα 20. Γραφικές παραστάσεις των συστατικών μιας καμπύλης τύπου spline που χρησιμοποιείται για την παραμετρική περιγραφή 3Δ αντικειμένων



Εικόνα 21. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου παραμετρικής περιγραφής 3Δ γεωμετρίας

5. *Χάρτης βάθους (depth map)*: Αποτελεί τεχνική χρήσης φωτοσκίασης για την τεχνητή απόδοση της τρίτης διάστασης. Στην τεχνική αυτή (συνήθως) τα σημεία που αντιστοιχούν σε θέση του 3Δ χώρου που είναι κοντά στο θεατή απεικονίζονται περισσότερο φωτεινά ενώ αυτά που είναι μακρύτερα πιο σκούρα. Η μέθοδος αυτή δεν είναι ικανοποιητική μέθοδος περιγραφής 3Δ γεωμετρίας παρά μόνο απεικόνισης αυτής, αφού ο χάρτης βάθους σχετίζεται πάντοτε με μια συγκεκριμένη θέση και γωνία θέασης και όχι με την πραγματική γεωμετρία του 3Δ αντικειμένου. Είναι μια μέθοδος που προσομοιάζει τον τρόπο που το ανθρώπινο σύστημα στερεοσκοπικής όρασης αντιλαμβάνεται την τρίτη διάσταση. Ένα παράδειγμα χάρτη βάθους για τρεις διαφορετικές τοποθετήσεις αντικειμένου δίνεται στην Εικόνα 22.

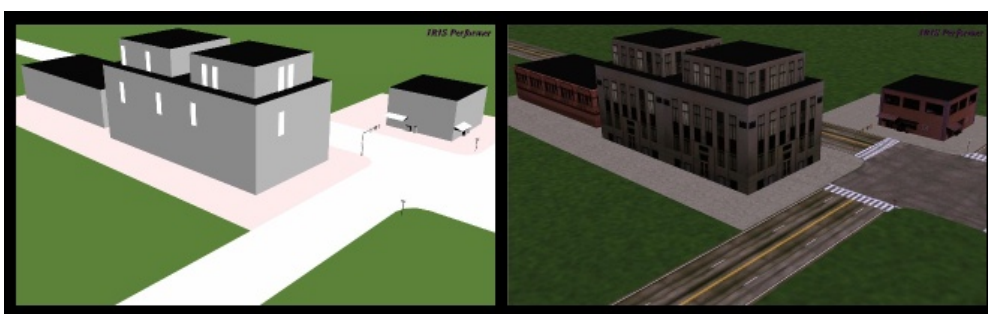


Εικόνα 22. Παράδειγμα χάρτη βάθους 3Δ αντικειμένου από διάφορες γωνίες θέασης

Ολοκληρώνοντας τα εισαγωγικά περί των 3Δ εικόνων και του τρόπου περιγραφής και αναπαράστασής τους με χρήση ψηφιακών τεχνολογιών ακολουθούν κάποιες συμπληρωματικές πληροφορίες που αφορούν στον τρόπο χαρτογράφησης της υφής στη γεωμετρία καθώς και κάποιες από τις πιο σημαντικές τεχνικές απλοποίησης μιας 3Δ εικόνας για την αποδοτικότερη αποθήκευση ή μετάδοσή της.

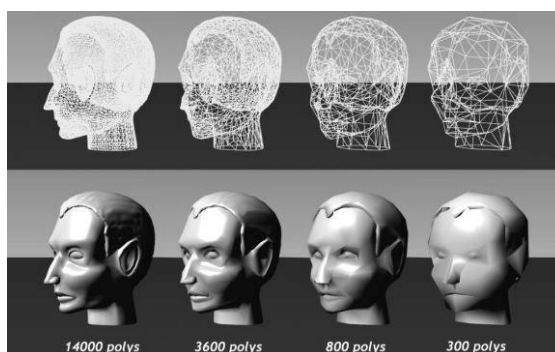
Η διαδικασία της χαρτογράφησης υφής (texture mapping) είναι η διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζεται υφή (texture) πάνω σε 3Δ αντικείμενο, έτσι ώστε να δοθεί πιο

ρεαλιστική απεικόνιση του υλικού από το οποίο αποτελείται το αντικείμενο. Έτσι, για παράδειγμα, για να φανεί ότι ένα 3D αντικείμενο είναι κατασκευασμένο από μάρμαρο, χρησιμοποιούμε φωτογραφία του ή μια γενική φωτογραφία μαρμάρου ως πληροφορία υφής. Στην 3D ψηφιοποίηση η υφή του 3D αντικειμένου καταγράφεται ταυτόχρονα με τη γεωμετρία του και αποθηκεύεται είτε σε ανεξάρτητη μορφή (ως φωτογραφία) είτε σε συνδεδεμένη με τη γεωμετρία μορφή. Έτσι, η διαδικασία χαρτογράφησης της υφής αυτής ακολουθεί, συνήθως τις προδιαγραφές που δίνονται από το σύστημα ψηφιοποίησης. Ειδικότερη στην 3D μοντελοποίηση, η χρήση της υφής αποσκοπεί στην *απόδοση ρεαλισμού* αλλά και στην προσέγγιση χαρακτηριστικών κάποιων επιφανειών που με κλασική μοντελοποίηση θα ήταν πολύ δύσκολο να επιτευχθούν. Σε μερικές δε περιπτώσεις μπορεί να βοηθήσει στην *απλοποίηση της γεωμετρικής πληροφορίας*, αφού προάγει σημαντικά την φωτορεαλιστική αναπαράσταση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



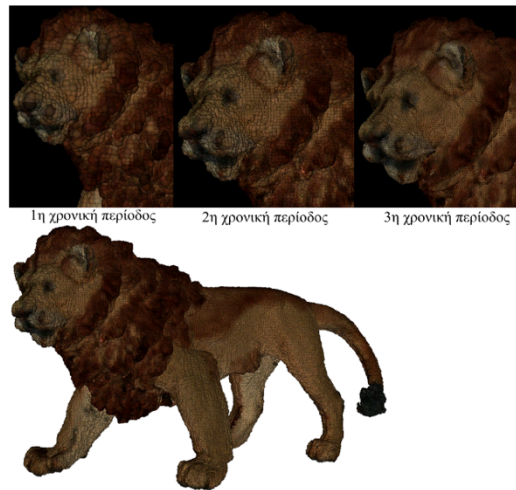
Εικόνα 23. Αναπαράσταση 3D μοντελοποιημένου χώρου πριν και μετά την προσθήκη της υφής

Όταν στόχος είναι η αναπαράσταση με ρεαλισμό πολύπλοκων χώρων, όπως πόλεις, μνημεία, δάση, απαιτείται να ενσωματώσουμε πολύ λεπτομερή μοντέλα. Αυτό αυτόματα συνεπάγεται μεγάλη *σπατάλη πόρων*, διότι, κατά την παρουσίαση, πολλά από αυτά τα μοντέλα φαίνονται από μακριά ή από συγκεκριμένες οπτικές γωνίες και δεν είναι αισθητή η λεπτομέρειά τους. Η λύση στο πρόβλημα αυτό της διαχείρισης πόρων δίνεται κατά βάση με δύο τρόπους: είτε με τη χρήση μοντέλων *πολλαπλών αναλύσεων*, είτε την *αντικατάσταση γεωμετρικής πληροφορίας* από πληροφορία υφής (απλή εικόνα/φωτογραφία). Ο πρώτος από τους δύο αυτούς τρόπους οδηγεί, στην πράξη, στην επιλεκτική απεικόνιση διαδοχικά απλούστερων εκδόσεων του ίδιου 3D αντικειμένου όσο αυτό απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Η επιλογή της ανάλυσης του μοντέλου μπορεί να υπολογισθεί από την περιοχή που καλύπτει το αντικείμενο στην εικόνα (Μικρότερο προβαλλόμενο αντικείμενο ➔ μικρότερη ανάλυση μοντέλου). Ένα παράδειγμα χρήσης της μεθόδου αυτή δίνεται στην Εικόνα 24, όπου το ίδιο 3D αντικείμενο παρουσιάζεται σε τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις γεωμετρίας που κυμαίνονται από τη χρήση 300 έως 14.000 πολυγώνων.



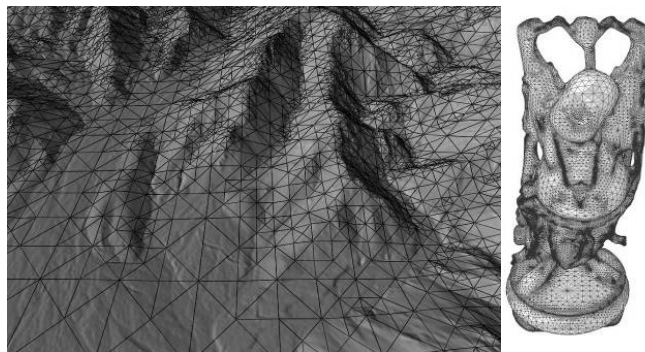
Εικόνα 24. Παράδειγμα χρήσης πολλαπλών αναλύσεων περιγραφής 3D αντικειμένων

Μια άμεση και απολύτως επιθυμητή επίπτωση της χρήσης πολλαπλών αναλύσεων εικονίζεται στην Εικόνα 25, όπου δίνεται ένα παράδειγμα μετάδοσης μιας 3Δ εικόνας μέσα από ένα δίκτυο. Είναι εμφανές ότι υπάρχει μια πρώτη αναπαράσταση του αντικειμένου από τις πρώτες χρονικές στιγμές, η οποία είναι συνήθως χαμηλής ποιότητας, και ότι σε διαδοχικές χρονικές στιγμές επιτυγχάνεται συνεχής βελτίωση του μεταδιδόμενου μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η εμπειρία της παρουσίασης 3Δ εικόνων μέσα από δίκτυα επικοινωνιών αφού ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει πολύ γρήγορα μια πρώτη αναπαράσταση του αντικειμένου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προοδευτική μετάδοση είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται σε κάθε μορφή μετάδοσης πολυμεσικών δεδομένων ανεξαρτήτως διαστάσεων.



Εικόνα 25. Προοδευτική μετάδοση 3Δ εικόνας

Ένας άλλος τρόπος βελτιστοποίησης της χρήσης των διαθέσιμων πόρων (είτε υπολογιστικοί, είτε αποθηκευτικοί, είτε δικτυακοί) είναι μέσω της χρήσης πολλαπλών αναλύσεων γεωμετρίας εντός της περιγραφής ενός 3Δ αντικειμένου. Πρακτικά αυτό σημαίνει να χρησιμοποιούνται μεγάλα τρίγωνα σε περιοχές γεωμετρίας με μικρές μεταβολές. Έτσι, προκύπτουν 3Δ εικόνες στις οποίες οι λεπτομέρειες περιγράφονται με ένα πυκνό νέφος σημείων ή με μικρά πυκνά διατεταγμένα τρίγωνα, ενώ οι περιοχές χωρίς λεπτομέρειες περιγράφονται με αραιό νέφος σημείων ή με πολύ μεγάλα τρίγωνα. Μια από τις κυριότερες εφαρμογές αυτής της τεχνικής γίνεται στην απεικόνιση μεγάλων γεωγραφικών περιοχών όπου η ύπαρξη μεγάλων ομαλών τμημάτων είναι πολύ πιθανή. Στην Εικόνα 26 φαίνονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης πολλαπλών αναλύσεων στη γεωμετρία 3Δ αντικειμένων.



Εικόνα 26. Πολλαπλές αναλύσεις εντός της γεωμετρικής περιγραφής 3Δ αντικειμένων

Κλείνοντας ένα εισαγωγικό κεφάλαιο περί των τεχνολογιών 3D εικόνων δε θα πρέπει να παραλείψουμε τις δυνατότητες που παρέχονται σήμερα για τον προγραμματισμό εφαρμογών είτε παρουσίασης είτε χρήσης 3D εικόνων. Στον κορμό των εφαρμογών σήμερα βρίσκονται έξι βασικές ομάδες υλοποιήσεων ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθούν:

1. Υπάρχει η κατηγορία εφαρμογών που βασίζεται στην Ανοικτή Βιβλιοθήκη Γραφικών ή όπως είναι ευρέως γνωστή την Open Graphics Library [9]-[12] (*OpenGL*). Η OpenGL είναι ένα πρωτόκολλο προγραμματισμού εφαρμογών ή *API* (Application Programming Interface) ειδικευμένο στα 3D γραφικά, δηλαδή ένα σύνολο (βιβλιοθήκη) έτοιμων συναρτήσεων λογισμικού που βοηθούν στη σχεδίαση και το χειρισμό 3D γραφικών σε υπολογιστή. Από τα πλεονεκτήματα της χρήσης της OpenGL αναφέρονται κυρίως ότι είναι διαδεδομένη σε όλες τις μεγάλες πλατφόρμες (Silicon Graphics, Apple, Unix, Linux, Windows), υποστηρίζεται σε επίπεδο *hardware* από όλες τις γνωστές κάρτες γραφικών, είναι αρκετά ισχυρή και μας επιτρέπει να ένα μεγάλο εύρος εργασιών σε 3D εικόνες με μοναδικό περιορισμό την υπάρχουσα υπολογιστική ισχύ.
2. Η δεύτερη κατηγορία εφαρμογών βασίζεται στο πρότυπο *DirectX – Direct3D* [13]-[15], το οποίο αποτελεί δημιουργία της Microsoft και είναι διαθέσιμο μόνο για συστήματα που λειτουργούν με *Microsoft Windows*. Αποτελεί τη βάση για τα γραφικά στις παιχνιδομηχανές της Microsoft (XBOX, XBOX 360) και διατίθεται σε υλοποίηση σε *hardware* στις σύγχρονες κάρτες γραφικών.
3. Η Τρίτη κατηγορία εφαρμογών βασίζεται στην πρότυπη γλώσσα προγραμματισμού Virtual Reality Modeling Language [9],[16]-[19] (*VRML*), η οποία είναι γλώσσα προγραμματισμού και μοντελοποίησης εικονικής πραγματικότητας και έχει δημιουργηθεί για την περιγραφή τριδιάστατων διαδραστικών κόσμων και αντικειμένων για χρήση στον Παγκόσμιο Ιστό.
4. Η Java 3D [9],[18]-[22] είναι ένα περιβάλλον ανάπτυξης 3D γραφικών για την πλατφόρμα της γνωστής γλώσσας προγραμματισμού Java. Η Java 3D εκτελείται πάνω σε πλατφόρμες είτε OpenGL είτε Direct3D. Σε σύγκριση με άλλες παρόμοιες λύσεις που βασίζονται στις παραπάνω πλατφόρμες έχει το πλεονέκτημα ότι υλοποιεί προγραμματιστικά μια πραγματικά αντικειμενοστραφή θεώρηση. Κάθε σκηνή δομείται σαν ένα δέντρο που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία για τη σύνθεση και απεικόνισή της. Συμπληρωματικά, η Java 3D παρέχει υποστήριξη ήχου οδηγώντας έτσι σε ολοκληρωμένες διαδραστικές εφαρμογές πολυμέσων.
5. Η X3D [9],[23],[24] αποτελεί ένα πρότυπο ISO. Βασίζεται σε XML για την αναπαράσταση 3D γραφικών και αποτελεί τον φυσικό διάδοχο της γλώσσας VRML, περιλαμβάνοντας επεκτάσεις της VRML (π.χ. Humanoid Animation, NURBS, GeoVRML κλπ.), τη δυνατότητα κωδικοποίησης σκηνής με σύνταξη XML καθώς και την ελεύθερη σύνταξη της VRML. Στο πρότυπο ορίζονται διάφορα προφίλ (σύνολα επεκτάσεων) για διαφορετικούς σκοπούς, όπως το X3D Core, το X3D Interchange, το X3D CAD, το X3D Geospatial και το X3D Immersive. Ένα υποσύνολο της X3D, η XMT-A, παραλλαγή της XMT, που ορίζεται στο πρότυπο MPEG-4 Μέρος 11, σχεδιάστηκε για να παρέχει σύνδεση μεταξύ της X3D και 3D περιεχόμενου από αρχεία MPEG-4 (BIFS).
6. Το πρότυπο MPEG-4/BIFS [9],[25]-[28] είναι το πρώτο που αντιμετωπίζει πολυμεσικά δεδομένα ως σύνολο από οπτικοακουστικά αντικείμενα, τα οποία μπορούν να απεικονίζονται, επεξεργάζονται και μεταφέρονται αυτόνομα. Η γλώσσα περιγραφής μιας δυναμικά μεταβαλλόμενης σκηνής στο MPEG-4

καλείται Binary Format for Scenes (BIFS). Η BIFS δανείστηκε πολλά χαρακτηριστικά από τη VRML με το σημαντικό πλεονέκτημα ότι υποστηρίζει λειτουργία streaming δεδομένων, δηλαδή τη σχεδίαση μιας σκηνής καθώς τα δεδομένα που την περιγράφουν καταφθάνουν μέσω κάποιου δικτύου. Η γλώσσα περιγράφει 2Δ αντικείμενα καθώς και αντικείμενα για animation προσώπων και σωμάτων και 3Δ αντικείμενα.

4. Αναφορές

- [1] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Stereo_vision, latest visit 11 Jan. 2008
- [2] Dale Rolfson, Knots and Links, Publish or Perish, Berkeley, 1976, ISBN 0-914098-16-0
- [3] Brian Greene, The Fabric of the Cosmos, Random House, New York, 2003, ISBN 0-375-72720-5
- [4] Online at <http://home.centurytel.net/s3dcor/Brewster/Brewster.htm>, latest visit 10 Jan. 2008
- [5] “Stereoscope” Wikipedia, online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope>, latest visit 11 Aug. 2006
- [6] Online at <http://j.webring.com/t/3D-Graphics-Wallpaper-Ring>, latest visit 10 Jan. 2008
- [7] Online at <http://www.programmersheaven.com/download/23363/download.aspx> latest visit 10 Jan. 2008
- [8] Online at <http://www.studiowinter.com/graphics/index.html>, latest visit 10 Jan. 2008
- [9] A. Walsh, M. Bourges-Sevenier, Core Web 3D, Prentice Hall PRT, ISBN 0-13-085728-9, 2001
- [10] D. Shreiner, M. Woo, J. Neider, T. Davis, OpenGL programming guide, Fifth edition, Addison-Wesley, ISBN 0-321-33573-2, 2006.
- [11] Online at <http://opengl.org/>, latest visit May 2008
- [12] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Opengl>, latest visit May 2008
- [13] Online at <http://directx.org/>, latest visit May 2008
- [14] Online at <http://msdn.microsoft.com/en-us/directx/default.aspx>, latest visit May 2008
- [15] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/DirectX>, latest visit May 2008
- [16] Online at <http://www.w3.org/MarkUp/VRML/>, latest visit May 2008
- [17] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Vrml>, latest visit May 2008
- [18] A. Ames, D. Nadeau, J. Moreland, VRML 2.0 Sourcebook, Second edition, John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [19] J. Hartman, J. Wernecke, The VRML 2.0 Handbook, Addison-Wesley, ISBN 0-201-47944-3, 1996.
- [20] Online at <https://java3d.dev.java.net/>, latest visit May 2008
- [21] H. Sowizral, K. Rushforth, M. Deering, The Java 3D API Specification, Second Edition, Addison-Wesley, ISBN 0-201-71041-2, 2000
- [22] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Java3d>, latest visit May 2008
- [23] Online at <http://www.web3d.org/x3d/>, latest visit May 2008
- [24] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/X3d>, latest visit May 2008
- [25] ISO/IEC 14496-11, Coding of audio-visual objects, Part 11: Scene description and Application engine (BIFS, XMT, MPEG-J)
- [26] Online at <http://www.chiariglione.org/MPEG/technologies/mp04-bifs/index.htm>, latest visit May 2008
- [27] Online at <http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-4/mpeg-4.htm>, latest visit May 2008
- [28] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Mpeg-4>, latest visit May 2008

Μέρος II. Ψηφιοποίηση σε τρεις διαστάσεις

1. Εισαγωγή

Η επιθυμία αποτύπωσης αντικειμένων και σχημάτων με οπτικά μέσα χρονολογείται από τις αρχές του 19ου αιώνα. Στην ίδια χρονική περίοδο συναντούμε τις ρίζες της φωτογραφικής τέχνης. Από τότε η τεχνολογία αποτύπωσης με οπτικά μέσα έχει προχωρήσει με ραγδαίους ρυθμούς. Αυτή την τεχνολογική εξέλιξη την βιώνουμε πλέον καθημερινά.

Ένας τυπικός σαρωτής εγγραφών αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι του καθώς επιτρέπει την γρήγορη και αποτελεσματική ψηφιοποίηση οποιουδήποτε εγγράφου. Ας εξετάσουμε τώρα την ιδέα της ψηφιοποίησης για αντικείμενα τριών διαστάσεων. Η διαδικασία πρόσκτησης τριδιάστατων (3Δ) δεδομένων από φυσικά αντικείμενα αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα και μάλιστα όταν η γεωμετρική τους πολυπλοκότητα ξεπερνά αυτή κάποιων πρότυπων αντικειμένων (όπως σφαίρες, πυραμίδες, κύβοι). Η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών μετρικών διατάξεων κατάφεραν να καθιερώσουν μια συνεχώς εξελίξιμη αγορά *τριδιάστατων συστημάτων ψηφιοποίησης ή σαρωτών*. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την καταγραφή γεωμετρικής και χρωματικής πληροφορίας που φέρουν τα φυσικά αντικείμενα μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Οι αρχές λειτουργίας τους βασίζονται στην εφαρμογή γεωμετρικών αξιωματικών και συναρτήσεων. Πρότυπα ακαδημαϊκά αλλά και εμπορικά συστήματα επιδιώκουν να δώσουν απάντηση στην 3Δ αποτύπωση, το καθένα από τη δική του σκοπιά, κάνοντας *συγκεκριμένες παραδοχές*. Το μεγάλο ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας εστιάζεται στην ανάλυση των μεθόδων ψηφιοποίησης αλλά και στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων με αποδοτικότερους ρυθμούς και τρόπους. Η ανάπτυξη των 3Δ σαρωτών είναι αποτέλεσμα συλλογικής δουλειάς επιστημόνων από διαφορετικά ερευνητικά πεδία, όπως είναι αυτά της όρασης υπολογιστών, των τριδιάστατων γραφικών, της μηχανολογίας, των μετρήσεων με ηλεκτρονικά αισθητήρια, της φωτογραμμετρίας και, φυσικά (πίσω από όλα αυτά), των μαθηματικών. Βασικό ρόλο στην αύξηση της δημοτικότητας των 3Δ σαρωτών παίζει η δραματική βελτίωση των υπολογιστών στον τομέα των τριδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης τριδιάστατης γεωμετρίας σε πλατφόρμες χαμηλού κόστους βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση των λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας τριδιάστατων μοντέλων που δημιουργούν οι σαρωτές. Απώτερος σκοπός όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου σάρωσης σε συνδυασμό με υψηλής πιστότητας αποτελέσματα. Μέχρι σήμερα, μόνο κάποιες *φωτογραφικές μέθοδοι* προσεγγίζουν την ιδέα *σάρωσης-με-το-πάτημα-ενός-πλήκτρου*. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ιδιαίτερη αυξημένη γεωμετρική ακρίβεια, εφαρμόζονται, τις περισσότερες φορές, τεχνικές σάρωσης με ακτίνες λέιζερ¹.

Σε οποιαδήποτε πάντως περίπτωση, η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας αλλά και του εξοπλισμού 3Δ ψηφιοποίησης θα πρέπει να ακολουθεί μια λογική

¹ Το λέιζερ (Laser εκ του Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) είναι μια διαδικασία παραγωγής ακτινοβολίας επικεντρωμένης σε πολύ στενό εύρος ζώνης και ελεγχόμενης έντασης. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, η ανίχνευση φωτός που παράγεται με αυτό τον τρόπο είναι αρκετά απλή με τη χρήση οπτικών αισθητήρων (π.χ. φωτογραφικές μηχανές ή βιντεοκάμερες)

στρατηγικού σχεδιασμού κατά τον οποίο πρέπει να ληφθούν υπόψη μια σειρά από κριτήρια όπως παρουσιάζει ο Πίνακας I.

Πίνακας I. Τα 9 βασικά κριτήρια για την ορθή επιλογή μεθόδου 3Δ ψηφιοποίησης

A/A	Κριτήριο
1	Κόστος της μεθόδου (εξοπλισμός, κλπ)
2	Υλικό κατασκευής του αντικειμένου ψηφιοποίησης
3	Μέγεθος του αντικειμένου ψηφιοποίησης
4	Φορητότητα του εξοπλισμού
5	Ακρίβεια και ανάλυση του συστήματος μέτρησης
6	Ανάγκη για αποτύπωση χρώματος
7	Παραγωγικότητα της μεθόδου
8	Απαιτήσεις εξειδίκευσης
9	Συμβατότητα προϊόντων με διεθνή πρότυπα

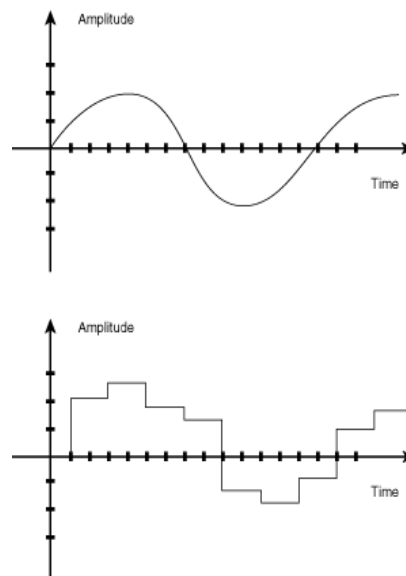
Στην πραγματικότητα η διαδικασία 3Δ σάρωσης χαρακτηρίζεται μάλλον σύνθετη, και εμπλέκει μια ακολουθία διαφορετικών διαδικασιών που αναλύονται σε βάθος στις επόμενες παραγράφους.

2. Ορισμός της τριδιάστατης ψηφιοποίησης

Ψηφιοποίηση είναι η αναπαράσταση ενός αντικειμένου, μιας εικόνας, ενός εγγράφου ή ενός σήματος μέσω ενός συνόλου διακριτών σημείων ή δειγμάτων. Το αποτέλεσμα είναι γνωστό ως ψηφιακή αναπαράσταση ή πιο ειδικά, μια «ψηφιακή εικόνα» για ένα αντικείμενο ή μια «ψηφιακή μορφή» για ένα σήμα. Έτσι, κάθε ψηφιακή αναπαράσταση καλείται γενικά ένα ψηφιακό σήμα και έχει ως γνώρισμα ότι δεν περιγράφεται από κάποια συνεχή μαθηματική συνάρτηση αλλά αποτελείται από μια ακολουθία αριθμών.



Εικόνα 27. Σήματα καπνού: ένα απλοϊκό ψηφιακό σήμα



Εικόνα 28. Αναλογικό σήμα και αντίστοιχο ψηφιακό σήμα μετά από ψηφιοποίηση

Στην Εικόνα 1 φαίνεται μια γνωστή και απλοϊκή μορφή «ψηφιακού» σήματος του οποίου χρήση έκαναν οι ιθαγενείς της Αμερικής για να επικοινωνούν μεταξύ τους σε μεγάλες αποστάσεις. Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ψηφιοποίησης,

όπου ένα αναλογικό ημιτονοειδές σήμα ψηφιοποιείται και παράγεται ένα αντίστοιχο ψηφιακό σήμα.

Τα αναλογικά σήματα είναι συνεχώς μεταβαλλόμενα, τόσο στο πλήθος των δυνατών τιμών σε καθορισμένη χρονική στιγμή όσο και στο πλήθος των σημείων σήματος μέσα σε μια χρονική περίοδο. Αντίθετα, τα ψηφιακά σήματα είναι διακριτά και στα δύο αυτά χαρακτηριστικά, έτσι, η ψηφιοποίηση μπορεί να οδηγήσει, ουσιαστικά, σε μια προσέγγιση του σήματος που αναπαριστά. Η ψηφιακή αναπαράσταση δεν εμπεριέχει απαραίτητα απώλεια «πληροφορίας» μιας και το αρχικό αναλογικό σήμα συνήθως περιλαμβάνει τόσο πληροφορία όσο και «θόρυβο» (δηλ. πληροφορία που δεν είναι «χρησιμοποιήσιμη»).

Ένα ψηφιακό σήμα μπορεί να αναπαρίσταται από μια ακολουθία από αριθμούς. Η ψηφιοποίηση πραγματοποιείται μέσω της ανάγνωσης ενός αναλογικού σήματος σε τακτά χρονικά διαστήματα και την αντικατάσταση της τιμής του με έναν αριθμό περιορισμένης ακρίβειας. Κάθε τέτοια ανάγνωση καλείται ένα δείγμα.

Η ακολουθία των ακεραίων που αποτελεί το ψηφιακό σήμα μπορεί να μετατραπεί και πάλι σε αναλογικό σήμα που προσεγγίζει το αρχικό αναλογικό σήμα. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός καλείται μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό (Digital to analog conversion ή DA conversion) σε αντίθεση με την ψηφιοποίηση που καλείται μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to digital conversion ή AD conversion). Δύο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν πόσο ακριβής είναι αυτή η προσέγγιση του αρχικού αναλογικού σήματος που επιτυγχάνεται: ο ρυθμός δειγματοληψίας (δηλαδή ο σταθερός ρυθμός με τον οποίο λαμβάνουμε δείγματα του συνεχούς αρχικού αναλογικού σήματος) και η ανάλυση της μέτρησης (το πλήθος των bits) που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των αριθμών του ψηφιακού σήματος.

Ο όρος ψηφιοποίηση είναι αντίστοιχος και χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τη «σάρωση» (scanning) αναλογικών πηγών, όπως εκτυπωμένες φωτογραφίες ή κασέτες ήχου και βίντεο. Η ψηφιοποίηση είναι ο βασικός τρόπος για την αποτελεσματική αποθήκευση πολυμεσικών δεδομένων σε μορφή κατάλληλη για αποθήκευση, επεξεργασία και μετάδοση μέσω υπολογιστών. Ο όρος ψηφιοποίηση χρησιμοποιείται επίσης κάποιες φορές για να περιγράψει την εισαγωγή δεδομένων σε βάσεις δεδομένων. Ενώ η χρήση του όρου σε αυτή την περίπτωση είναι τεχνικά λανθασμένη, προέρχεται από την αρχική ορθή χρήση του όρου για την περιγραφή μέρους των διαδικασιών που εμπλέκονται στη μετατροπή αναλογικής πληροφορίας σε ψηφιακή αναπαράσταση πριν την εισαγωγή σε βάση δεδομένων.

Σήμερα, σχεδόν όλη η μουσική που υπήρχε γραμμένη σε αναλογικά μέσα έχει ψηφιοποιηθεί. Επίσης πάνω του 10% των ταινιών που αναφέρονται στη διαδικτυακή πύλη ταινιών Internet Movie Database (imdb.com) έχουν ψηφιοποιηθεί σε DVD. Παράλληλα, σύμφωνα με την πηγή "Scan This Book!" του New York Times (Μάιος 2006), περίπου 5% των κειμένων σε έντυπη μορφή έχουν ψηφιοποιηθεί έως το 2006. Παλιότερα βιβλία ψηφιοποιούνται συνεχώς και εφαρμόζεται οπτική αναγνώριση χαρακτήρων (Optical Character Recognition – OCR) από ακαδημαϊκές και δημόσιες βιβλιοθήκες, ιδρύματα και εταιρείες όπως το Google².

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της σημαντικής ανάπτυξης νέων τεχνολογιών στον τομέα της ψηφιοποίησης, κατέστη δυνατή η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας αντικειμένων του πραγματικού κόσμου. Έτσι, μπορούμε πλέον να πραγματοποιήσουμε ψηφιοποίηση πολύτιμων αντικειμένων με πολιτιστική αξία, ή να αντιγράψουμε αντικείμενα για να δημιουργήσουμε πρότυπα ή καλούπια για περαιτέρω αναπαραγωγή, ή ακόμη μπορούμε να ψηφιοποιήσουμε αντικείμενα για να τα χρησιμοποιήσουμε στην

² "Google Checks Out Library Books", Press release, December 14, 2004

παραγωγή διαδραστικών εφαρμογών αλλά και ταινιών ή εκπαιδευτικών βίντεο. Στον πυρήνα όλων των νέων αυτών τεχνολογιών βρίσκεται η δυνατότητα μέτρησης και αποθήκευσης συντεταγμένων των σημείων της επιφάνειας των πραγματικών αντικειμένων σε ψηφιακή μορφή.

Η ποικιλία των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των τριδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου έχει οδηγήσει σε μια άστοχη φιλονικία για το αν τελικά η 3Δ ψηφιοποίηση, ως έννοια, ανήκει στις γεωδαιτικές μελέτες ή στην φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών. Βλέποντας όμως το θέμα από την πλευρά του χρήστη το αποτέλεσμα είναι αυτό που μετράει ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε [1].

Γενικότερα, ως 3Δ σαρωτή θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει 3Δ συντεταγμένες από μία δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, η οποία πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο)
- Επιταχύνει τη διαδικασία, ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο
- Δύναται (άλλοτε και άλλοτε όχι) να διακρίνει χρωματική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας σε συνδυασμό με την τριδιάστατη γεωμετρία της

Ο τρόπος χρήσης μια τέτοιας συσκευής είναι [1]:

- είτε σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση
- είτε πάνω σε κάποιον κλασικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα
- είτε σε παρόμοιες μεταφερόμενες βάσεις
- είτε εν πτήση όταν πρόκειται για τοπογραφικές εφαρμογές

Η σάρωση ενός αντικειμένου είναι πολλές φορές το εύκολο τμήμα μιας εργασίας ψηφιοποίησης. Η δημιουργία πιστών τριδιάστατων αναπαραστάσεων αντικειμένων που αποτελούνται από ακανόνιστες επιφάνειες απαιτούν συνήθως πολύ χρόνο και εργασία. Η τριδιάστατη σάρωση είναι ένα σημαντικό νέο εργαλείο για την τεκμηρίωση. Χωρίς αμφιβολία οι τριδιάστατοι σαρωτές ταιριάζουν απόλυτα σε εφαρμογές μετρήσεων ανώμαλων επιφανειών και πιθανότατα να είναι και η καλύτερη διαθέσιμη μέθοδος την παρούσα στιγμή. Ωστόσο η αμιγής και μόνο συλλογή δεδομένων δεν είναι επαρκής. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας τριδιάστατου μοντέλου είναι πολλές φορές πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο σάρωσης [2].

Η 3Δ ψηφιοποίηση αποτελεί, στις μέρες μας, ένα αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης πολύτιμων δεδομένων όπως αυτών της πολιτιστικής κληρονομιάς. Προσφέρει δυνατότητες καταγραφής αρχιτεκτονικών δημιουργιών, αρχαιολογικών ευρημάτων, ιστορικών μνημείων και μνημείων τέχνης σε όλη την κλίμακα μεγθών, υλικών κατασκευής και πολυπλοκότητας γεωμετρικής δομής. Η επικράτηση των 3Δ σαρωτών τα τελευταία χρόνια έχει επιφέρει την αύξηση του ενδιαφέροντος στη χρήση 3Δ μοντέλων σε πλήθος μελετών αλλά και εφαρμογών. Την ίδια στιγμή η αύξηση στις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων αλλά και επεξεργασίας 3Δ εικόνων επιτρέπουν στο μέσο χρήστη να έχει πρόσβαση σε υψηλού επιπέδου υλικοτεχνική υποδομή και να διαθέτει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ για την προβολή του μεγάλου όγκου δεδομένων τριδιάστατης πληροφορίας που εμπλέκεται.

Τα κίνητρα για την 3Δ ψηφιοποίηση είναι πολλά:

- Η καταγραφή ιστορικών κτηρίων, τοποθεσιών και αντικειμένων για ανακατασκευή ή αναπαλαίωση σε περιπτώσεις που έχουν υποστεί καταστροφές από φωτιές, σεισμούς, πλημμύρες, πολέμους ή, όπως, είναι φυσικό από διάβρωση.
- Η δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού για ερευνητές, μαθητές αλλά και το ευρύ κοινό.
- Η εικονική ανακατασκευή αρχιτεκτονικών συνόλων, ιστορικών μνημείων και αντικειμένων που πλέον δεν υπάρχουν ή υπάρχουν μερικώς.
- Η εικονική 3D αναπαράσταση αρχιτεκτονικών, μνημείων και αντικειμένων με επιλογές επανόρθωσης και ανάπλασης τμημάτων του 3D μοντέλου.
- Η εικονική 3D απόδοση ολόκληρων περιοχών.
- Η ανάλυση κατασκευαστικών και επανορθωτικών τεχνικών.
- Η αναπαράσταση χώρων από οπτικές γωνίες που είναι αδύνατον να πραγματοποιηθούν στον πραγματικό κόσμο εξαιτίας των μεγεθών ή της θέσης.
- Η αλληλεπίδραση με τα αντικείμενα (σε εικονικό περιβάλλον) χωρίς το φόβο για φθορές ή ζημιά.
- Οι πολλαπλές διαδραστικές εφαρμογές προβολής, π.χ. εικονικός τουρισμός και εικονικά μουσεία.
- Η κατασκευή ρεαλιστικών 3D μοντέλων που μπορούν να βοηθήσουν ουσιαστικά στη μελέτη αντικειμένων από απόσταση, καθώς και στη διεύρυνση του πλήθους ατόμων που μπορούν να μελετήσουν ταυτόχρονα κάθε αντικείμενο.
- Η συγκέντρωση και παρουσίαση όλων των πληροφοριών που απαιτούνται για την τεκμηρίωση μέσω μίας «τριδιάστατης» βάσης δεδομένων.

Στην πραγματικότητα κάθε ένα από τα παραπάνω κίνητρα καθορίζει και ένα πλήθος απαιτήσεων. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- Η γεωμετρική ακρίβεια που επιτυγχάνεται
- Η δυνατότητα αποτύπωσης λεπτομερειών
- Ο αποδιδόμενος φωτορεαλισμός
- Το χαμηλό κόστος της μεθόδου
- Η φορητότητα της μεθόδου ψηφιοποίησης
- Η προσαρμοστικότητα στο αντικείμενο και στις συνθήκες
- Τα μεγέθη πληροφορίας που φέρουν τα τριδιάστατα μοντέλα
- Ο χρόνος ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης
- Η εξειδίκευση προσωπικού και η τεχνική υποστήριξη

Η σειρά προτεραιότητας των απαιτήσεων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Διαφορετική σημασία θα είχε ο φωτορεαλισμός σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης πήλινων αρχαιολογικών αντικειμένων και διαφορετική στην δημιουργία ενός εικονικού μουσείου. *Μέχρι σήμερα, μπορούμε να πούμε πως δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί κάποιο εμπορικό σύστημα σάρωσης που να καλύπτει τις απαιτήσεις όλων των περιπτώσεων.* Για μικρά και μεσαίου³ μεγέθους αντικείμενα, οι σαρωτές ακτίνων λέιζερ μπορούν να προσφέρουν λεπτομερή τριδιάστατα μοντέλα. Από την άλλη όμως, καθώς είναι σχετικά νέα τεχνολογία, και καθώς ο αντίστοιχος εξοπλισμός δεν παράγεται σε μεγάλες ποσότητες, το κόστος των σαρωτών παραμένει υψηλό και η διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα [3].

³ Από μερικά εκατοστά (το μέγεθος των κοσμημάτων) έως και μερικά μέτρα (το μέγεθος ενός ανθρώπου ή ενός αγάλματος).

3. Ανασκόπηση τεχνολογιών τριδιάστατης ψηφιοποίησης

Σήμερα, η τεχνολογία για την 3D ψηφιοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης με πληθώρα προσεγγίσεων, μεθόδων και τεχνικών. Την τελευταία δεκαετία έκανε την εμφάνισή της στην αγορά μια πληθώρα από εμπορικά συστήματα, ως αποτέλεσμα της διάχυσης της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε κατά την έρευνα των προηγούμενων είκοσι περίπου χρόνων. Η έρευνα όμως στο χώρο συνεχίζεται τόσο στο επίπεδο των βελτιώσεων όσο και στο επίπεδο της δημιουργίας νέων συστημάτων, τα οποία κάνουν την εμφάνισή τους μέρα με τη μέρα.

Η ανάλυση των αναγκών και των απαιτήσεων για την εξειδικευμένη 3D ψηφιοποίηση οδηγεί, όπως αναμένεται, στην ανάλυση των χαρακτηριστικών των θεμάτων ψηφιοποίησης. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων είναι τρία και σχετίζονται με τη μορφολογική τους πολυπλοκότητα και την ποικιλία στα κατασκευαστικά υλικά από τα οποία αποτελούνται:

- Μέγεθος και σχήμα (Εικόνα 29)
- Πολυπλοκότητα επιφάνειας (Εικόνα 30)
- Ποικιλία υλικών κατασκευής (Εικόνα 31)



Εικόνα 29. Μορφολογική πολυπλοκότητα: Μέγεθος και Σχήμα



Εικόνα 30. Μορφολογική πολυπλοκότητα: Επίπεδο λεπτομέρειας



Εικόνα 31. Ποικιλία υλικών κατασκευής

Μετά τη μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων, ακολουθεί η ανάλυση των παραγόντων που είναι δυνατό να επηρεάσουν την επιλογή μεθόδου και συστήματος 3D ψηφιοποίησης. Οι παράγοντες αυτοί επιγραμματικά είναι οι εξής:

- Επιφανειακές ιδιότητες
 - Διαφάνεια
 - Ανακλαστικότητα
 - Δημιουργία περίθλασης
 - Χρώμα-υφή
- Επιπρόσθετοι περιορισμοί
 - Μέγεθος και θέση
 - Προσβασιμότητα
 - Προστασία και θέματα ασφαλείας

Αν επιχειρούσαμε να ταξινομήσουμε τις σύγχρονες μεθόδους 3D ψηφιοποίησης θα μπορούσαμε αρχικά να καταλήξουμε σε ένα διαχωρισμό δύο ομάδων με βάση τη χρήση ή όχι του φωτός ως ενεργό στοιχείο κατά τη διαδικασία της μέτρησης.



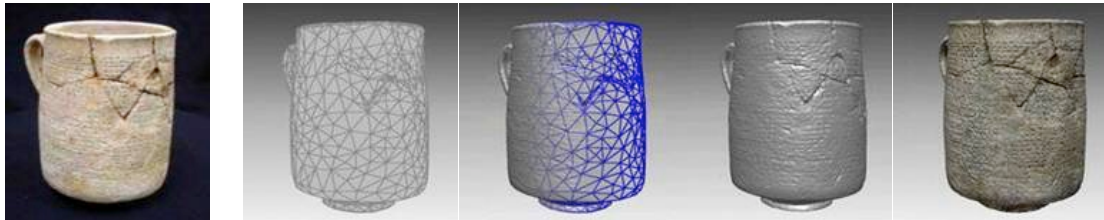
Εικόνα 32. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών 3D ψηφιοποίησης με βάση τη χρήση φωτός

Έτσι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32, υπάρχουν τεχνικές που δεν απαιτούν (ή δεν προϋποθέτουν) τη χρήση φωτός, όπως οι τοπογραφικές μετρήσεις, διάφορες εμπειρικές τεχνικές μετρήσεων και τα συστήματα μέτρησης με επαφή. Από την άλλη, υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες τεχνολογιών που κάνουν χρήση του φωτός, αυτές που χαρακτηρίζονται ως ενεργητικές και αυτές που χαρακτηρίζονται ως παθητικές. Η «ενεργητικότητα» της μεθόδου σχετίζεται εδώ με το εάν το σύστημα ψηφιοποίησης παράγει το φως το οποίο στη συνέχεια ανιχνεύει. Έτσι οι μέθοδοι που απλά βασίζονται στο φωτισμό του περιβάλλοντος ονομάζονται απλά «παθητικές». Από την άλλη οι τεχνολογίες που περιλαμβάνουν ειδικές πηγές φωτός (ή γενικά φωτισμού) το οποίο στη συνέχεια ανιχνεύουν ονομάζονται «ενεργητικές».

Σε κάθε περίπτωση 3D ψηφιοποίησης, υπάρχουν συγκεκριμένα βήματα ή διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την επιτυχή ολοκλήρωση της συνολικής εργασίας. Τα βήματα αυτά επιγραμματικά είναι τα εξής (Εικόνα 33):

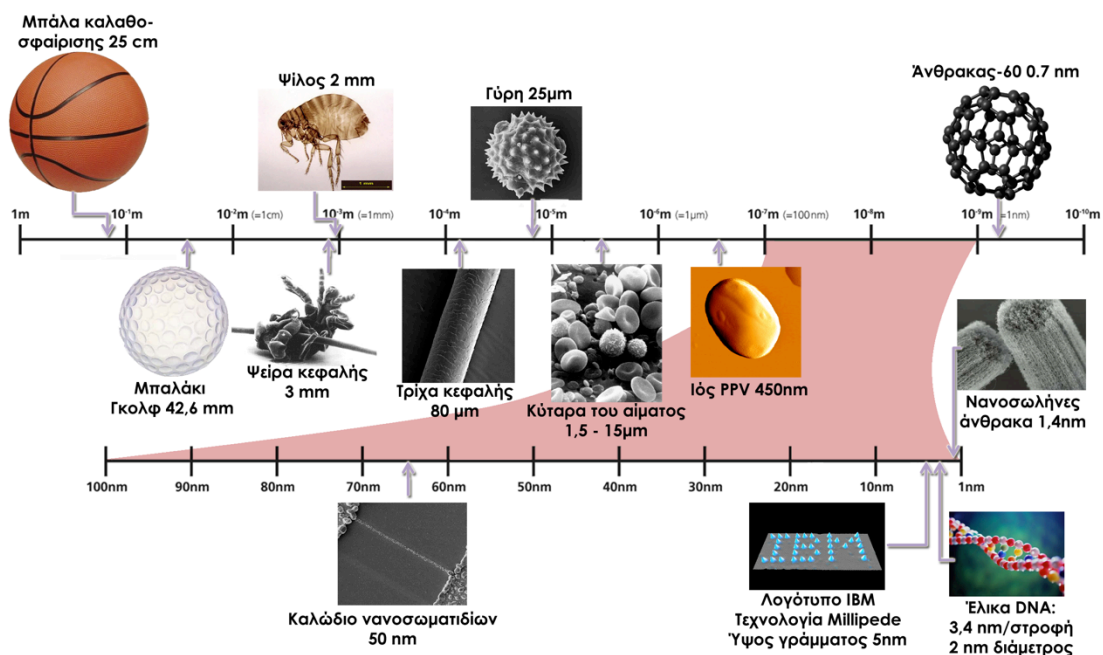
- Πρόσκτηση δεδομένων γεωμετρίας και υφής

- Φιλτράρισμα δεδομένων (θόρυβος, κλπ)
- Ομαδοποίηση και οργάνωση δεδομένων
- Ευθυγράμμιση και ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων
- Δημιουργία πολυγωνικού πλέγματος
- Απλοποίηση πολυγωνικού πλέγματος



Εικόνα 33. Αναπαράσταση βασικών βημάτων της συνολικής διαδικασίας της 3Δ ψηφιοποίησης

Είναι πρακτικά δύσκολο να καταλογογραφηθούν πλήρως όλα τα διαθέσιμα συστήματα και μέθοδοι. Στην ανασκόπηση που ακολουθεί γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης των μεθόδων τριδιάστατης ψηφιοποίησης με βάση το μέγεθος των αντικειμένων προς ψηφιοποίηση, από το μικροσκοπικό επίπεδο έως το επίπεδο πολύ μεγάλων αντικειμένων, και γίνεται μια εισαγωγή στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Παράλληλα, γίνεται σύνδεση με τα άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά (επιφανειακές ιδιότητες αντικειμένου και πολυπλοκότητα γεωμετρίας) που παίζουν ρόλο τόσο στην καταλληλότητα μιας μεθόδου ψηφιοποίησης όσο και στην αποτελεσματικότητα της τεχνολογικής λύσης. Στην Εικόνα 34 παρατίθεται ένα συγκριτικό σχηματικό διάγραμμα μεγεθών γνωστών μας αντικειμένων για την καλύτερη εποπτεία του πεδίου εφαρμογής της ψηφιοποίησης. Αναλυτική περιγραφή και συγκεκριμένη αναφορά σε στοιχεία από την Εικόνα αυτή γίνεται κατά την περιγραφή των αντιστοίχων μεθόδων στις παραγράφους που ακολουθούν.



Εικόνα 34. Συγκριτικό γράφημα διαστάσεων γνωστών αντικειμένων

4. Τεχνικές ψηφιοποίησης μικροσκοπικών αντικειμένων

Σήμερα, είναι δυνατή η σύλληψη τριδιάστατης πληροφορίας σε πάρα πολύ μικρή κλίμακα. Τεχνικές όπως η *Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης* [1] (*Atomic Force Microscopy*) και η *Μικροσκοπία Ηλεκτρονίων Στερεοσκοπικής Σάρωσης* [5] (*Stereo Scanning Electron Microscopy*) μας επιτρέπουν να αναγνωρίσουμε και να καταγράψουμε χαρακτηριστικά σε κλίμακα μερικών δεκάδων νανομέτρων (nm). Άλλες τεχνικές, όπως η *Συνεστιακή Μικροσκοπία* [6] (*Confocal Microscopy*) και η *Παρεμβολομετρία Ανίχνευσης Λευκού Φωτός* [7] (*White Light Scanning Interferometry*) παρέχουν ανάλυση της κλίμακας μερικών εκατοντάδων nm. Το μειονέκτημα που υπάρχει στη χρήση τέτοιων μεθόδων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης είναι ότι αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιοποίηση πολύ μικρών επιφανειών, τυπικά μικρότερων του ενός τετραγωνικού χιλιοστού (<1 mm²).

Το εύλογο ερώτημα στο σημείο αυτό θα ήταν εάν υπάρχει, πραγματικά, κάποια πρακτική αξία στη χρήση τέτοιων τεχνικών και εξοπλισμού για την ψηφιοποίηση. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό μπορεί άλλοτε να είναι θετική, άλλοτε αρνητική και πολλές φορές υποθετική. Όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της «απόλυτης» αποτύπωσης τότε σαφέστατα υπάρχει μια εφαρμογή. Για συγκεκριμένα αντικείμενα τα μικροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανείας είναι δυνατό να είναι πολύ σημαντικά. Η πληροφορία γι' αυτά μπορεί να βοηθήσει διαδικασίες όπως έλεγχος κατάστασης και αυθεντικότητας, μέθοδος δημιουργίας, κ.ο.κ.

Από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η τεχνική της *Μικροσκοπίας Ηλεκτρονίων Στερεοσκοπικής Σάρωσης* (*Stereo Scanning Electron Microscopy*) είναι μάλλον περιορισμένης εφαρμογής σε χώρους όπως αυτός της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην τεχνική αυτή, τα δείγματα πρέπει να εισαχθούν σε ειδικούς χώρους υπό συνθήκες κενού και απαιτείται ειδική προετοιμασία, συνήθως επικάλυψη με μέταλλο. Έτσι, η τεχνική μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις *καταστρεπτικές τεχνικές* και είναι, συνεπώς, ακατάλληλη για εφαρμογή στη γενική περίπτωση αντικειμένων που απαιτείται να παραμείνουν αμετάβλητα κατά την ψηφιοποίηση. Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις όπως θραυσμάτων κεραμικών, απολιθωμάτων ή γυάλινων αντικειμένων, όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική.

Η τεχνική της *Συνεστιακής Μικροσκοπίας* (*Confocal microscopy*) είναι κυρίως «βιολογική τεχνική» και δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως *φθορισμός*. Δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για *ημιδιάφανα αντικείμενα* και επιτρέπει την καταγραφή εσωτερικής πληροφορίας. Θα μπορούσε να είναι περιορισμένης χρήσης στην παρατήρηση διάφανων αντικειμένων. Επίσης, είναι δυνατή η σκιαγράφηση επιφάνειας π.χ. για την ψηφιοποίηση επιφανειακής υφής, έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι μια τεχνική που *δε στηρίζεται στην επαφή* με τα αντικείμενα.

Τη σκιαγράφηση επιφάνειας μπορεί επίσης να παρέχει και η τεχνική της *Παρεμβολομετρίας Ανίχνευσης Λευκού Φωτός* (*White Light Scanning Interferometry*) και μάλιστα με σημαντικά μικρότερο κόστος. Εμπορικά συστήματα αυτής της κατηγορίας επιτρέπουν τη μέτρηση τριδιάστατων επιφανειών σε κλίμακα κάτω του μm και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επισταμένη μελέτη επιφανειών. Η τεχνική είναι *χωρίς επαφή* και δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη επιφανειακή προετοιμασία.

Η τεχνική *Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης* (*Atomic Force Microscopy*) είναι η νεότερη στην κατηγορία των τεχνικών μικροσκοπικής κλίμακας και, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα εμπορικά συστήματα, είναι ακόμη στη φάση σημαντικής ανάπτυξης. Η

βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη χρήση ενός πολύ μικρού μετρητικού συστήματος, με μέγεθος που δεν ξεπερνά τα δέκα άτομα, το οποίο πλησιάζει πολύ κοντά στη μετρούμενη επιφάνεια *χωρίς όμως να υπάρχει επαφή*. Ενδοατομικές δυνάμεις έλκουν το σύστημα προς τη μετρούμενη επιφάνεια. Το μικροσκόπιο μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα μέτρησης στην κίνησή του κατά μήκος και πλάτος πάνω στη μετρούμενη επιφάνεια και να ρυθμίσει την απόστασή του από αυτήν μέσω της μέτρησης της δύναμης έλξης που ασκείται. Με τον τρόπο αυτό η μέτρηση της επιφάνειας επιτυγχάνεται μέσω της μέτρησης ελκτικής δύναμης. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια (απαιτώντας, βέβαια, ιδιαίτερη επιδεξιότητα χειρισμού) που μπορεί να φτάσει κάτω του ενός νανόμετρου (<1 nm) σε ειδικές περιπτώσεις.

Είναι, βέβαια, σημαντικό να κατανοηθεί η κλίμακα μεγεθών για την οποία γίνεται λόγος στις παραγράφους που προηγήθηκαν. Για το λόγο αυτό δόθηκε η ενδεικτική συγκριτική απεικόνιση χαρακτηριστικών αντικειμένων γνωστών μεγεθών από 1 m έως 1 μm (Εικόνα 34). Στα 25 περίπου cm υπάρχει η μπάλα καλαθοσφαίρισης ενώ στα 0,1 nm υπάρχουν μεμονωμένα άτομα. Από διάφορες μελέτες, εργασίες και ερευνητικά έργα σε πανευρωπαϊκό επίπεδο είναι γνωστό ότι η ανάκτηση πληροφορίας στην κλίμακα του μm για αντικείμενα μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη. Με τη χρήση τεχνικών όπως αυτών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, γίνεται δυνατή η μετάβαση στην κλίμακα των 100 nm και ακόμη πιο κάτω. Το εύλογο, βέβαια, ερώτημα θα ήταν αν υπάρχει κάτι στην κλίμακα αυτή που να είναι ενδιαφέρον. Στις κλίμακες αυτές ανακτάται η μικροϋφή μιας επιφάνειας, ή η τραχύτητά της, η οποία είναι δυνατό να έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική μορφή του αντικειμένου. Μεταβολές στην τραχύτητα της επιφάνειας θα μπορούσαν να είναι χαρακτηριστικές για την κατάσταση της επιφάνειας (π.χ. διάβρωση). Η απάντηση είναι ότι, πράγματι, στη μικροκλίμακα υπάρχει σημαντική πληροφορία.

Ποια είναι, όμως, τα μειονεκτήματα των τεχνικών αυτών;

- μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές, μόνο, επιφάνειες ή μικρά δείγματα από τα πραγματικά αντικείμενα
- είναι πολύ σύνθετες και απαιτούν γνώσεις, εξειδίκευση και επιδεξιότητα
- ενώ ο εξοπλισμός είναι μεταφερόμενος απαιτούνται ιδιαίτερα ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία)

Όλα αυτά καταδεικνύουν το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μια διαδικασία ψηφιοποίησης ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η μικροδομή της επιφάνειας αντικειμένων έχει σημαντική πληροφορία να δώσει τόσο για τη σωστή απεικόνιση όσο και τον έλεγχο της κατάστασής του.

5. Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων

Με τον όρο «*μικρά αντικείμενα*» νοούνται αντικείμενα διαστάσεων έως 10x10x10 cm. Στην κατηγορία αυτή οι αδιαμφισβήτητα προτιμητέες τεχνικές είναι αυτές που βασίζονται σε συστήματα *τριγωνοποίησης ακτίνων laser (laser triangulation)*. Υπάρχει σήμερα μια πληθώρα τέτοιων, εμπορικά διαθέσιμων, συστημάτων και είναι μια απολύτως βαθιά διαδικασία για ένα εξειδικευμένο εργαστήριο που σχετίζεται με το χώρο της τριδιάστατης όρασης να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή.

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή: μια σημειακή πηγή laser σημαδεύει την επιφάνεια προς μέτρηση και ανιχνεύεται από έναν οπτικό αισθητήρα. Καθώς το laser μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, συναντά διαφορετικά ύψη. Αυτά τα μεταβαλλόμενα ύψη αλλάζουν την ανάκλαση του laser στον οπτικό αισθητήρα. Αν και το σύστημα αυτό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, τα περισσότερα συστήματα

βασίζονται σε εμπειρική βαθμονόμηση με χρήση προτυποποιημένων διαβαθμίσεων ύψους για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στο επιφανειακό ύψος και της θέσης της ακτίνας. Με δεδομένο ότι η προς μέτρηση περιοχή περιορίζεται σε 10x10x10cm τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν μια ακρίβεια μέτρησης της τάξης μερικών μm. Παρόλα αυτά, εάν η επιφάνεια του αντικειμένου είναι μεγαλύτερη, τότε η ακρίβεια μέτρησης μειώνεται, και μάλιστα πολλές φορές σημαντικά.

Τέτοια συστήματα είναι χρήσιμα για τη μέτρηση αντικειμένων όπως νομίσματα και μετάλλια, εγχάρακτες ή ανάγλυφες ταμπέλες και μικρά αντικείμενα χρυσοχοΐας. Το κόστος τους μπορεί να κυμαίνεται από πολύ οικονομικές έως απαγορευτικές επιλογές και είναι άλλοτε φορητά, άλλοτε μεταφέρσιμα και άλλοτε σταθερά.

6. Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή απαντώνται τα πιο ενδιαφέροντα αντικείμενα, και όπου διατίθενται οι περισσότερες τεχνικές ψηφιοποίησης. Τα αντικείμενα είναι διαστάσεων άνω των 10 cm και μπορεί να φτάνουν έως και 1 - 2 m. Εδώ μπορεί να περιληφθούν ακόμη και αγάλματα φυσικού μεγέθους.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές «δομημένου φωτισμού». Η λειτουργία τους βασίζεται σε μια επέκταση της αρχής της τριγωνοποίησης. Η διαφορά είναι ότι η σημειακή πηγή έχει πλέον αντικατασταθεί από ένα δισδιάστατο μοτίβο φωτός, το οποίο προβάλλεται στην προς μέτρηση επιφάνεια. Διάφορες είναι οι μέθοδοι παραγωγής αυτού του μοτίβου φωτός, άλλοτε με τη συμβολή φωτός από πηγή laser και άλλοτε με απλή προβολή του μοτίβου με φωτογραφική μέθοδο. Συνήθως γίνεται χρήση ενός μοτίβου, το οποίο μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για να επιτευχθεί η συνολική μέτρησή του. Υπάρχουν όμως και τεχνικές που χρησιμοποιούν πολλαπλά μοτίβα καθώς και τεχνικές Μοιρέ. Το σημαντικό, όμως, σημείο εδώ είναι ότι με οποιονδήποτε τρόπο και εάν παράγονται τα μοτίβα φωτός η διαδικασία ανίχνευσης και ανάλυσής τους είναι η ίδια.

Ένα σύνθετο μοτίβο δεν αποτελείται από δύο απλές καταστάσεις τύπου on/off αλλά, τις περισσότερες φορές, από ημιτονοειδείς μεταβάσεις. Το σημαντικό είναι ότι καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης όπου παρατηρούνται τα μέγιστα των μοτίβων οδηγώντας σε βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού σε τμήμα μικρότερο ενός κροσσού συμβολής του μοτίβου. Εμπορικά συστήματα είναι ικανά να επιτύχουν ακρίβεια μέτρησης περί το 1/100 των διαστημάτων μεταξύ των κροσσών του μοτίβου. Έτσι εάν το διάκενο αυτό είναι για παράδειγμα 1 cm τότε η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης του 0,1 mm. Τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε μία από δύο βασικές αρχές λειτουργίας: είτε με χρήση μετασχηματισμού *Fourier*, είτε με χρονική μετατόπιση φάσης. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματα και τους υποστηρικτές της. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα βασίζονται στη χρονική μετατόπιση φάσης, καθώς η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί σημαντικά σε ερευνητικό επίπεδο και είναι σε μερικές περιπτώσεις ευκολότερη στην εφαρμογή της έναντι της άλλης μεθόδου.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνικών στην κατηγορία αυτή είναι ότι σε γενικές γραμμές η ακρίβειά τους είναι κλιμακούμενη. Αυτό σημαίνει ότι τείνουν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μικρά από ότι τα μεγάλα αντικείμενα. Για τα περισσότερα συστήματα το χαρακτηριστικό αυτό είναι συνυφασμένο με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Περιορισμοί στην ακρίβειά τους πηγάζουν από το γεγονός ότι μια ψηφιακή εικόνα του μοτίβου φωτός έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό ορίζεται από την ανάλυση που παρέχει το οπτικό αισθητήριο που χρησιμοποιεί

το εκάστοτε σύστημα και το βάθος χρώματος με το οποίο ψηφιοποιείται η εικόνα. Βασικά, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των εικονοστοιχείων στον οπτικό αισθητήρα τόσο καλύτερη η ανάλυση και τόσο μικρότερο μπορεί να είναι το διάκενο μεταξύ των κροσσών του μοτίβου για δεδομένο μέγεθος αντικειμένων. Καθώς η ακρίβεια των συστημάτων είναι στενά δεμένη με το μέγεθος των κροσσών του μοτίβου, μικρότεροι κροσσοί οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης καθώς το βάθος χρώματος ψηφιοποίησης μεγαλώνει γίνεται όλο και μεγαλύτερη η ικανότητα διαχωρισμού σημείων εντός του κροσσού οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας.

Πολλά από τα συστήματα της κατηγορίας εφαρμόζουν την τεχνική τμηματικής ψηφιοποίησης για μεγάλες επιφάνειες (για μεγαλύτερη ακρίβεια) και στη συνέχεια χρησιμοποιούν λογισμικά για συνένωση των τμηματικών σαρώσεων. Φυσικά και εδώ υπάρχουν όρια και η διαδικασία απαιτεί περισσότερο χρόνο ψηφιοποίησης.

Άλλοι σημαντικοί περιορισμοί αυτών των μεθόδων, καθώς και κάθε οπτικού συστήματος που βασίζεται σε διασκορπισμό φωτός από μια επιφάνεια είναι:

- Συνήθως αποτυγχάνουν στη μέτρηση σκούρων ή μαύρων αντικειμένων. Η απολύτως συμβατή προς αυτά επιφάνεια μέτρησης είναι μια ομαλή λευκή επιφάνεια χωρίς αντανάκλασεις. Έτσι καθίστανται καλή επιλογή για τα περισσότερα από τα έργα γλυπτικής.
- Τις περισσότερες φορές, τα γυαλιστερά αντικείμενα με ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Σήμερα, βέβαια, υπάρχουν ειδικές τεχνικές που αντιμετωπίζουν και το πρόβλημα αυτό. Στη γενική όμως περίπτωση, δεν είναι δυνατή η μέτρηση αντικειμένων με υψηλή ανακλαστικότητα ή διάφανων αντικειμένων.
- Η ύπαρξη μοτίβων ή σημαδιών στην επιφάνεια όπως για παράδειγμα ζωγραφική πάνω σε κεραμικά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστημα οδηγώντας σε καταστάσεις ασάφειας εντοπισμού των προβαλλόμενων μοτίβων.
- Επιφάνειες με μεγάλη γκάμα καμπυλοτήτων μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα. Πολύ απότομες ακμές μπορεί επίσης να εισάγουν δυσκολίες.
- Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι παράγουν αυτό που καλείται «νέφος σημείων» και όχι ολοκληρωμένες επιφάνειες. Στα παραγόμενα δεδομένα δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των σημείων, η οποία πρέπει να οριστεί στη συνέχεια.

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενσωματωθούν και άλλες τεχνικές, μία εκ των οποίων γνωρίζει σημαντική άνθηση τα τελευταία χρόνια και δεν είναι άλλη από την ολογραφία με χρήση υπολογιστών (*computer aided holography*) [8]-[16]. Η ολογραφία είναι ήδη ώριμη (φτάνει τα 50 περίπου χρόνια της), αλλά δεν έχει ακόμη καταφέρει να αποδώσει τους καρπούς της, τουλάχιστον σε εμπορικό επίπεδο. Έτσι η ολογραφία παραμένει ακόμη σε επίπεδο ερευνητικής ή πολύ ειδικής χρήσης. Παρουσιάζεται ως μια πολύ ακριβή, τεχνικά πολύπλοκη μέθοδος με μη σημαντικά αποτελέσματα, λίγο-πολύ ως ένα αξιοπερίεργο. Αυτό όμως αρχίζει να αλλάζει. Μερικά από τα προβλήματα που σχετίζονται με την ολογραφία είναι η απαίτηση για χρήση υγρών χημικών για την έκθεση των εικόνων και οι σημαντικοί περιορισμοί στη δυνατότητα απεικόνισης. Η ολογραφία με χρήση υπολογιστών δίνει μια παράπλευρη λύση σε όλα αυτά τα προβλήματα. Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή: ο λόγος για τον οποίο βλέπουμε αντικείμενα είναι γιατί το φως ανακλάται πάνω τους. Το φως έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες: ένταση, συχνότητα και φάση. Μια ασπρόμαυρη εικόνα αναπαριστά μόνο την ένταση. Μια έγχρωμη εικόνα αναπαριστά τις δύο πρώτες ιδιότητες, ένταση και συχνότητα. Μόνο το ολόγραμμα μπορεί να συλλάβει και να αναπαραστήσει και τις τρεις ιδιότητες. Το φως που προέρχεται από διαφορετικά

σημεία του αντικειμένου έχει διανύσει διαφορετικό μήκος αποστάσεων και έχει, συνεπώς, διαφορετική φάση. Έτσι, η πληροφορία της τριδιάστατης δομής του αντικειμένου βρίσκεται στη φάση. Με έλεγχο της φάσης του φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι όλη η πληροφορία φάσης στο ολόγραμμα προέρχεται από το αντικείμενο, που σημαίνει ότι θα έχουμε καταγράψει τη συνολική πληροφορία τριδιάστατης μορφής του αντικειμένου. Κατά την απεικόνιση, το ολόγραμμα εμφανίζει παράλλαξη, δηλαδή βλέπουμε ένα τριδιάστατο αντικείμενο και εάν μετακινήσουμε τη θέση όρασής του φέρνουμε άλλα τμήματα της επιφάνειάς του στο οπτικό μας πεδίο. Ακριβώς όπως θα γινόταν εάν το αντικείμενο είχε φυσική παρουσία.

Δύο είναι οι προσεγγίσεις στην ολογραφία με υπολογιστές με σημαντικές προοπτικές στη σύλληψη και απεικόνιση τριδιάστατων αντικειμένων:

- η ψηφιακή ολογραφία και
- η τεχνητά δημιουργημένη ολογραφία (μέσω υπολογιστή)

Ψηφιακή ολογραφία (*digital holography*) είναι η διαδικασία της καταγραφής ολογράμματος με οπτικά αισθητήρια και η αποθήκευσή του σε υπολογιστή. Στη διαδικασία δεν εμπλέκεται πλέον κάποιο χημικό υγρό. Η προοπτική της μεθόδου είναι πολύ μεγάλη. Επειδή η εικόνα μπορεί να αποκατασταθεί μέσω λογισμικού είναι δυνατή η εξαγωγή του τριδιάστατου σχήματος με μαθηματικές μεθόδους. Τα ψηφιακά ολογράμματα είναι δυνατό να απεικονιστούν με δύο τρόπους:

- Ως πραγματικά ολογράμματα με όλες τις ιδιότητες παράλλαξης των τυπικών ολογραμμάτων, μέσω της «εγγραφής» των δεδομένων των ολογραμμάτων σε μια συσκευή που ονομάζεται χωρικός διαμορφωτής φωτός (*spatial light modulator*) και με τον φωτισμό τους είτε με φως από laser είτε με φως από σημειακή πηγή λευκού φωτός
- Μέσω του υπολογισμού της κυματομορφής από το ολόγραμμα εντός του υπολογιστή και στη συνέχεια υπολογισμού της εικονικής αναπαράστασής του σε οθόνη υπολογιστή με τυπικές μεθόδους απεικόνισης τριδιάστατων γραφικών

Πέραν του σημαντικού πλεονεκτήματος της μαθηματικής αναπαράστασης των δεδομένων ενός ψηφιακού ολογράμματος, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η δυνατότητα αντιγραφής και αναπαραγωγής του. Από τη στιγμή που ένα ολόγραμμα κατασκευάζεται έχει πλέον τη μορφή ψηφιακών δεδομένων. Στη γενική περίπτωση είναι δυνατή η μετάδοσή του ή ακόμη και η επεξεργασία του (π.χ. κλιμάκωση). Μπορούμε να δανειστούμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων από το χώρο της ψηφιακής μουσικής. Από τη στιγμή που έχουμε τη μουσική σε ψηφιακή μορφή είναι δυνατή η επεξεργασία της, η αλλαγή της μορφής δεδομένων, η αποστολή της μέσω e-mail, η εγγραφή της σε CD, η μεταφόρτωση μέσω διαδικτύου, η μετάδοση μέσω ψηφιακού ραδιοφώνου, κ.ο.κ. Παρόμοια ευελιξία παρέχεται και από το ψηφιακό ολόγραμμα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών ολογραμμάτων είναι ότι βασίζεται στη χρήση φωτός laser, το οποίο αποτελεί πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που αποθηκευθεί ένα ψηφιακό ολόγραμμα αντικειμένου σήμερα και η διαδικασία επαναληφθεί αργότερα, είναι δυνατή η απόλυτη ταύτιση μεταξύ των ολογραμμάτων. Το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου laser HeNe δεν πρόκειται να μεταβληθεί με το πέρασμα του χρόνου (παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μέθοδο συγκριτικής μελέτης αντικειμένων στο πέρασμα του χρόνου).

Τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα (με χρήση υπολογιστών) (*Computer generated holograms*) είναι στην ουσία η άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Για τη δημιουργία τους γίνεται σύλληψη τριδιάστατων δεδομένων και στη συνέχεια

ακολουθεί προσομοίωση της διαδικασίας δημιουργίας ολογράμματος εντός ενός υπολογιστή. Έχοντας υπολογίσει πώς θα είναι το ολόγραμμα, η διαδικασία προχωρά στην τελική κατασκευή του ολογράμματος. Πρόσφατες πρόοδοι στην τελευταία αυτή διαδικασία, ειδικότερα στη *λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam lithography)* [17], δίνουν πλέον αυτή τη δυνατότητα και σε αρκετά μεγάλη κλίμακα – έως και αρκετά μέτρα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που δεν έχει, με την τυπική έννοια, ολογραφηθεί. Η ποιότητα αποκατάστασης είναι εξαιρετική καθώς τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα μπορούν να έχουν πλήρη πληροφορία χρώματος.

Γιατί, λοιπόν, δεν είναι γεμάτος ο κόσμος μας με τεχνητά ολογράμματα; Υπάρχουν, βέβαια, μερικά αλλά στην πλειοψηφία τους είναι ειδικές εφαρμογές και ειδικευμένες τεχνικές υλοποιήσεις. Η συγκεκριμένη επιστήμη είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης. Οι οπτικοί αισθητήρες (CCD) δεν είναι ακόμη ικανοποιητικά μεγάλης ανάλυσης για την πραγματική σύλληψη του τεράστιου όγκου οπτικών δεδομένων που απαιτούνται. Αυτό, βέβαια, πρόκειται να αλλάξει. Όλη η εμπορική πίεση στην περαιτέρω ανάπτυξη με χρήση πυριτίου (silicon) οδηγεί σε όλο και περισσότερη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών υλικών, σε όλη την κλίμακα των βιομηχανικών κατασκευών. Προφανώς και η συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει σημαντικά οφέλη από την ανάπτυξη αυτή.

Εάν εξετάσουμε τη μέθοδο σε μεγάλο βάθος χρόνου μπορούμε να πούμε ότι η ολογραφία τεχνητά δημιουργημένων ολογραμμάτων φαίνεται σήμερα να είναι η απόλυτη λύση όχι μόνο για την ψηφιοποίηση, αλλά και την αποθήκευση και απεικόνιση.

Τέλος, μία ακόμη τεχνική που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τα αντικείμενα της μεσαίας κλίμακας είναι η *τομογραφία* [18]. Τομογραφία είναι η διαδικασία συλλογής τριδιάστατων ογκομετρικών δεδομένων από σειρά δισδιάστατων εικόνων τομών. Η μέθοδος βρίσκει σήμερα μεγαλύτερη εφαρμογή στην ιατρική και την αεροδιαστημική. Είναι ικανή για υψηλή ακρίβεια, ειδικά για μικρά αντικείμενα. Το βασικό πλεονέκτημά της έγκειται στην ικανότητα σύλληψης και αναδημιουργίας εσωτερικής πληροφορίας. Η πλέον διαδεδομένη μορφή της εκφράζεται με τη *χρήση ακτίνων X*, όπου γίνεται χρήση ενός πομπού ακτίνων X χαμηλής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και *μέθοδοι οπτικής και ακουστικής τομογραφίας*, αλλά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης σε σχέση με την τομογραφία ακτίνων X. Η τομογραφία όταν εφαρμόζεται σε ανθρώπους βασίζεται στο ότι το σώμα των ανθρώπων παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς το υλικό, π.χ. κόκκαλα, μύες, υγρά, αέρια, κλπ. Καθένα από τα υλικά αυτά απορροφά μέρος των ακτίνων X σε διαφορετικό ποσοστό, και συνεπώς, καθώς οι ακτίνες διατρέχουν το σώμα προκύπτει εικόνα χαρακτηριστική της διαδρομής που διανύθηκε και των υλικών που συναντήθηκαν. Για το λόγο αυτό η τομογραφία ακτίνων X ανθρώπινου σώματος θεωρείται πλούσια σε πληροφορία. Γενικά, όμως, δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο για άλλες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα για τα πολιτιστικά αντικείμενα. Υπάρχουν εξαιρέσεις, αλλά παίρνοντας για παράδειγμα τα αγάλματα, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση στα εσωτερικά υλικά και, έτσι, η τομογραφία μπορεί να συλλάβει μικρά ποσοστά πληροφορίας. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ανοίγματος σαρκοφάγων.

7. Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή αναφερόμαστε σε αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 m (μπορεί να φτάνουν τα 100 m). Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων

αντικειμένων, υπάρχει γενικά μια έλλειψη μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Στο τέλος της κλίμακας το πρόβλημα ανάγεται σε τεχνικές ψηφιοποίησης αρχιτεκτονικών συνόλων, αστικών περιοχών και ανοικτών χώρων.

Εδώ υπάρχουν δύο βασικές οικογένειες μεθόδων:

- Στην πρώτη οικογένεια, οι μέθοδοι βασίζονται στην *ιδέα του «οπτικού radar»*. Στην απλούστερη περίπτωση μια πηγή εκπέμπει ακτίνες laser, οι οποίες είναι διαμορφωμένες είτε κατά πλάτος είτε κατά συχνότητα. Η ακτίνα ανακλάται από το στόχο προς μέτρηση και ανιχνεύεται από το σύστημα μέτρησης. Με εξέταση της κατάστασης διαμόρφωσης της ακτίνας που ανιχνεύεται είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε για να διανυθεί η αντίστοιχη απόσταση της ακτίνας από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στο δέκτη. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός στον αέρα, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως *συστήματα «χρόνου πτήσης» (time of flight)*. Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και διαδοχικής σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης τριδιάστατης σκηνής. Οι καλύτερες τεχνικές έχουν ακρίβεια περί τα 5 mm για αποστάσεις λειτουργίας από μερικά μέτρα έως και μερικά χιλιόμετρα. Το προφανές μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για σύστημα που βασίζεται σε σημεία, δηλαδή αποτελούν μια μεγέθυνση των συστημάτων τριγωνοποίησης και συνεπώς απαιτείται σημαντικός χρόνος για τη συλλογή του συνόλου των απαιτούμενων δεδομένων.
- Στη δεύτερη οικογένεια μέτρησης μεγάλων αντικειμένων ανήκουν τεχνικές *φωτογραμμετρίας*. Η βασικότερη των τεχνικών αυτών είναι η γνωστή *«καθοδηγούμενη στερεο-φωτογραμμετρία»*. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς, τα οποία ορίζονται στην επιφάνεια των προς μέτρηση αντικειμένων και λαμβάνεται τουλάχιστον ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετικές γωνίες. Μέσω της ταύτισης των σημείων αναφοράς, είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, καθίσταται δυνατή η ανάκτηση πληροφορίας τριδιάστατης γεωμετρίας με τη μέτρηση απόστασης από το επίπεδο λήψης των φωτογραφιών. Η μέθοδος δίνει, προφανώς, καλύτερα αποτελέσματα όταν στα αντικείμενα ή, γενικά, στη σκηνή υπάρχουν επίπεδες επιφάνειες με λίγα σημεία αναφοράς.

8. Σύγχρονες τεχνικές τριδιάστατης ψηφιοποίησης

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε μια προσπάθεια συγκέντρωσης και παρουσίασης με συνοπτικό τρόπο των βασικών σύγχρονων τεχνολογικών δυνατοτήτων για την επιτυχή 3D ψηφιοποίηση αντικειμένων ανάλογα με το μέγεθός τους που αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την επιλογή μεθοδολογίας ψηφιοποίησης. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της αρχής λειτουργίας των σημαντικότερων τεχνικών 3D ψηφιοποίησης ανεξάρτητα από το πεδίο εφαρμογής τους. Η ταξινόμηση στην παρουσίασή τους ακολουθεί την εξής κατηγοριοποίηση:

- Τεχνικές που κάνουν χρήση ακτίνων λέιζερ
 - Τριγωνοποίηση λέιζερ
 - Λέιζερ πεδίου (αποστάσεων)
- Φωτογραφικές τεχνικές
 - Σχήμα από – δομημένο φωτισμό, σιλουέτα, στέρεο-φωτογράφιση, κίνηση, φωτομετρία, εστίαση, σκιά, φωτοσκίαση, υφή

- Φωτογραμμετρία
 - Ολογραφία
 - Τοπογραφικές τεχνικές και εμπειρικές τεχνικές
 - Τεχνικές επαφής με το αντικείμενο

Ο Πίνακας II συγκεντρώνει τις τεχνικές 3Δ ψηφιοποίησης που αναπτύσσονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Πίνακας II. Τεχνικές 3Δ ψηφιοποίησης

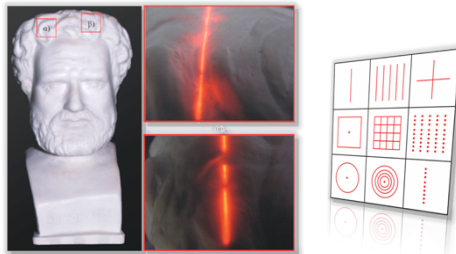
Τριγωνισμός λέιζερ	Βασίζεται στην παραγωγή ακτίνων λέιζερ, την προβολή τους στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου, την ανίχνευσή τους μέσω οπτικού αισθητηρίου και τη χρήση της μεθόδου τριγωνοποίησης για την εξαγωγή 3Δ πληροφορίας [1]-[3], [19]-[23]
Λέιζερ πεδίου	Βασίζεται στην παραγωγή ακτίνων λέιζερ, την προβολή τους στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου, την ανίχνευσή τους μέσω οπτικού αισθητηρίου και την εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας μέσω της μέτρησης του χρόνου πτήσης της ακτίνας από την πηγή στο αντικείμενο και πίσω στον ανιχνευτή [23]-[28]
Σχήμα από δομημένο φωτισμό	Βασίζεται στην προβολή μοτίβου φωτισμού στην επιφάνεια αντικειμένου, την οπτική ανίχνευσή του και την εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας από τις παραμορφώσεις του μοτίβου στην επιφάνεια του αντικειμένου [29]-[56]
Σχήμα από σιλουέτα	Βασίζεται σε πολλαπλή φωτογραφική αποτύπωση από διαφορετικές γωνίες και εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας μέσω της μετρούμενης σιλουέτας [57]-[66]
Σχήμα από στερεο-φωτογράφιση	Βασίζεται στην εφαρμογή των κανόνων της στερεοσκοπικής όρασης για την εξαγωγή πληροφορίας βάθους σε ζεύγος φωτογραφιών του αντικειμένου [67],[68]
Σχήμα από βίντεο/κίνηση	Παραλλαγή της τεχνικής στερεο-φωτογράφιση όπου τη θέση ζεύγους φωτογραφιών έχουν διαδοχικά καρέ του βίντεο που λαμβάνεται [69],[70]
Σχήμα από φωτοσκίαση	Βασίζεται σε πολλαπλή φωτογράφιση από την ίδια θέση και υπό μετακινούμενη πηγή φωτισμού. Η 3Δ γεωμετρία εξάγεται μέσω τεχνικών επεξεργασίας εικόνων με γνωστή τη θέση της πηγής φωτός [71]
Σχήμα από φωτομετρία	Βασίζεται σε πολλαπλή φωτογράφιση από την ίδια θέση και υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού με ταυτόχρονη χρήση αντικειμένων αναφοράς [72]-[74]
Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση	Βασίζεται σε πολλαπλή φωτογράφιση με διαδοχική μεταβολή του επίπεδου εστίασης για την εξαγωγή χάρτη βάθους [75],[76]
Σχήμα από σκιά	Βασίζεται στη δημιουργία κινούμενης σκιάς γνωστού αντικειμένου στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου και εφαρμογή τεχνικών αντίστοιχων με την τεχνική σχήμα από δομημένο φωτισμό για την εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας [77]
Σχήμα από υφή	Βασίζεται στην αναγνώριση μικροδομών υφής που επαναλαμβάνονται στην επιφάνεια του αντικειμένου και στην εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας από τον εντοπισμό των μετασχηματισμών στη μικροδομή για την κάλυψη όλου του αντικειμένου [78]
Φωτογραμμετρία	Βασίζεται σε πολλαπλή φωτογράφιση με χρήση σημείων αναφοράς και την εφαρμογή κανόνων της οπτικής για την εξαγωγή 3Δ γεωμετρίας [79]-[86]
Ολογραφία	Βασίζεται στην αρχή της ολογραφικής αποτύπωσης (συμβολή ακτίνων λέιζερ) για την αποτύπωση 3Δ γεωμετρίας αντικειμένων [8]-[16]
Τοπογραφικές και εμπειρικές τεχνικές	Βασίζονται σε χρήση τοπογραφικών μεθόδων και συσκευών καθώς και απλών μετρητικών διατάξεων για την ημι-αυτόματη αναδημιουργία 3Δ γεωμετρίας [83],[86]
Συστήματα επαφής	Βασίζονται στη συνεχή επαφή με το μετρούμενο αντικείμενο και την αναγωγή της επαφής σε 3Δ θέση και γεωμετρία μέσω συνεχούς ανίχνευσης της θέσης του αισθητηρίου επαφής [87]

9. Τεχνικές 3Δ ψηφιοποίησης που κάνουν χρήση ακτίνων λέιζερ

Κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι ότι κάνουν χρήση ακτίνων λέιζερ. Σε κάθε συσκευή 3Δ ψηφιοποίησης αυτής της κατηγορίας υπάρχει μια πηγή ακτίνων λέιζερ και ένας οπτικός ανιχνευτής με σκοπό την ανίχνευση της παραγόμενης ακτίνας πάνω στο αντικείμενο που ψηφιοποιείται.

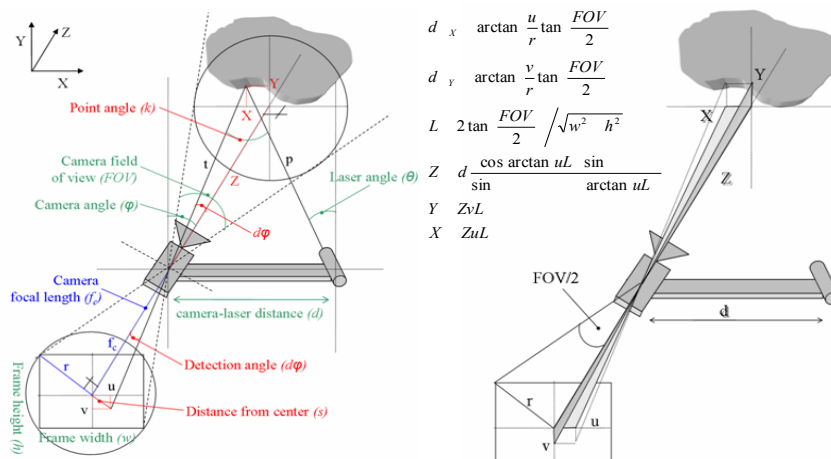
9.1. Τριγωνισμός ακτίνων λέιζερ

Οι τεχνικές της κατηγορίας αυτής βασίζονται στην παραγωγή και προβολή πάνω στο μετρούμενο αντικείμενο γνωστού μοτίβου που δημιουργείται από την πηγή ακτίνων λέιζερ. Το μοτίβο αυτό μπορεί να είναι από ένα σημείο μέχρι και πολλαπλά σημεία ταυτόχρονα ή γεωμετρικά σχήματα όπως ευθύγραμμα τμήματα, όπως φαίνεται γραφικά στην Εικόνα 35. Παράλληλα στη συσκευή σάρωσης υπάρχει και ένας ψηφιακός οπτικός ανιχνευτής (μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή) που ανιχνεύει την ακτίνα πάνω στο αντικείμενο. Με δεδομένο το γνωστό σχήμα της ακτίνας και το μήκος κύματος (και συνεπώς το χρώμα) της ακτίνας είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης από το αντικείμενο με χρήση του νόμου των ημιτόνων στα τρίγωνα που δημιουργούνται. Στην Εικόνα 36 δίνεται σχηματικό παράδειγμα της αρχής λειτουργίας της τριγωνοποίησης λέιζερ καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αποστάσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται δεδομένη η γνώση των χαρακτηριστικών του οπτικού ανιχνευτή και των οπτικών χαρακτηριστικών του (π.χ. βάθος πεδίου, εστιακή απόσταση, κοκ) για να είναι δυνατοί οι εν λόγω υπολογισμοί.

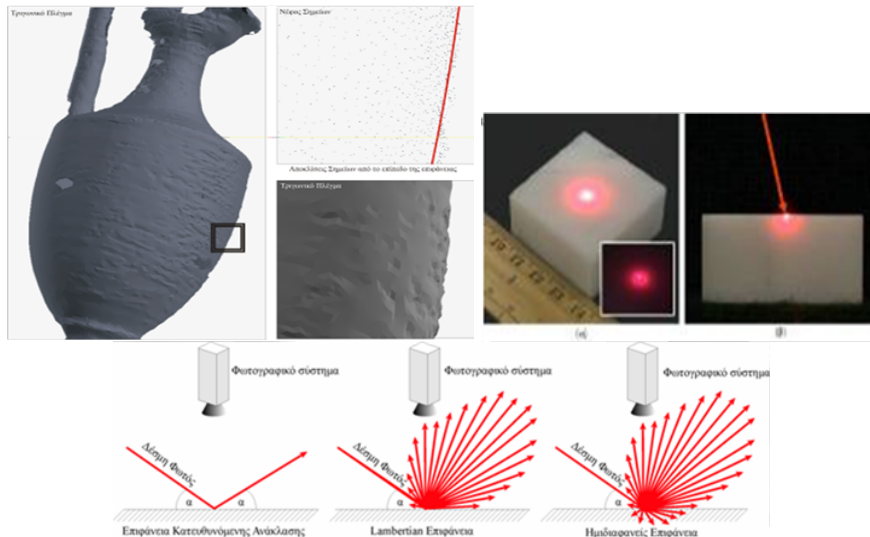


Εικόνα 35. 3D ψηφιοποίηση με τριγωνισμό ακτίνων λέιζερ

Εξαιτίας των ιδιοτήτων του φωτός, των επιφανειακών ιδιοτήτων του μετρούμενου αντικείμενου καθώς και των χαρακτηριστικών του οπτικού αισθητήρα, υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί και προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Έτσι, επιφάνειες με κρυσταλλική δομή (όπως του μαρμάρου) δημιουργούν διάθλαση και διάχυση του φωτός και δημιουργούν προβλήματα στην ορθή ανίχνευση του λέιζερ ή εισάγουν απροσδιοριστία στην ακρίβεια της μέτρησης. Επίσης, τα χαρακτηριστικά των οπτικών του ανιχνευτή σε συνδυασμό με περιβαλλοντικές συνθήκες, το φωτισμό του περιβάλλοντος και πιθανές εξωτερικές παρεμβολές (π.χ. δονήσεις του συστήματος από εξωτερικούς παράγοντες) μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση θορύβου στη μέτρηση.

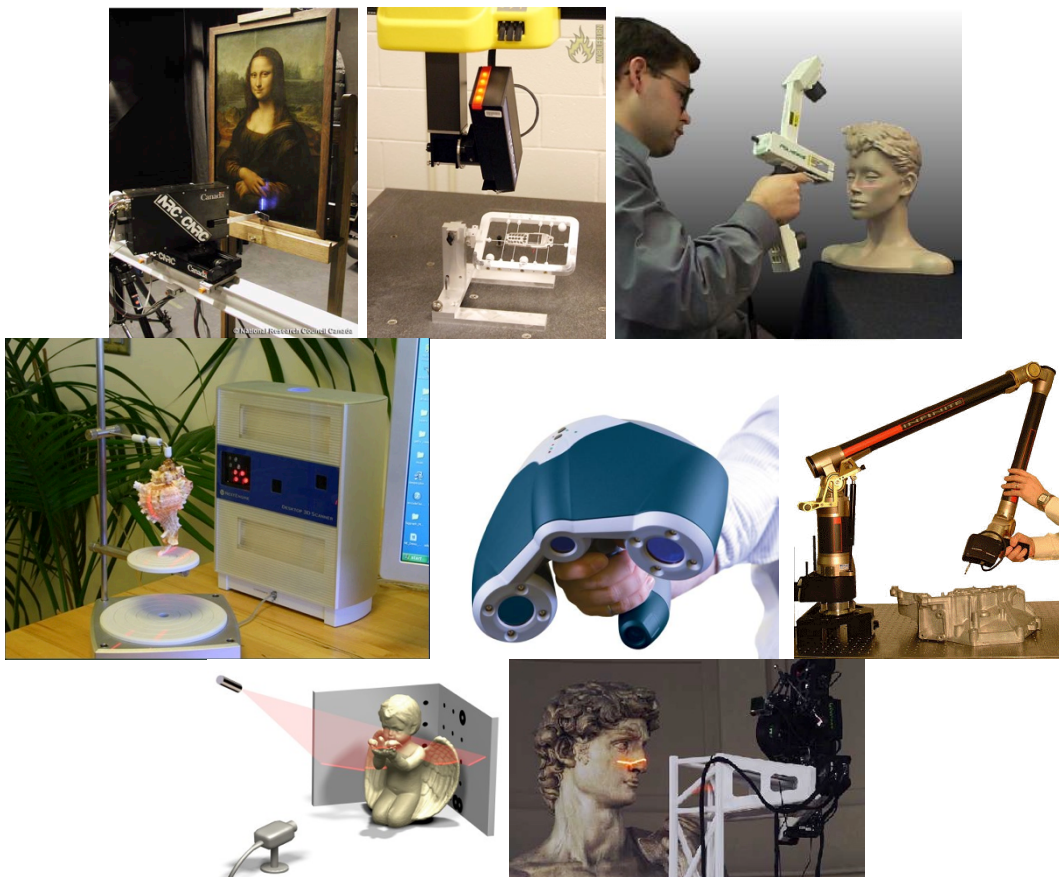


Εικόνα 36. Αρχή λειτουργίας της τριγωνοποίησης λέιζερ και μαθηματικές σχέσεις υπολογισμών



Εικόνα 37. Προβλήματα που συναντούμε κατά την 3Δ ψηφιοποίηση με την τεχνική της τριγωνοποίησης ακτίνων λέιζερ

Συνοπτικά, στην Εικόνα 37 παρουσιάζονται γραφικά βασικά προβλήματα που επιδρούν στην απόδοση της τεχνικής τριγωνοποίησης ακτίνων λέιζερ. Τέλος, στην Εικόνα 38 παρουσιάζονται διάφορα σύγχρονα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης που βασίζονται στην τεχνική αυτή.



Εικόνα 38. Διάφορα σύγχρονα συστήματα 3Δ ψηφιοποίησης που βασίζονται στην τεχνική της τριγωνοποίησης ακτίνων λέιζερ

9.2. Λείζερ πεδίου (αποστάσεων)

Οι τεχνικές της κατηγορίας αυτής βασίζονται στην αρχή λειτουργίας του Radar. Για το λόγο αυτό οι συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία αυτή ονομάζονται συχνά LiDAR ή σαρωτές χρόνου πτήσης (time of flight). LiDAR (Light Detection and Ranging) είναι μια οπτική τεχνολογία που μετρά τις ιδιότητες διαδιδόμενου φωτός για την εύρεση αποστάσεων και άλλων πληροφοριών σε απομακρυσμένα αντικείμενα. Η ευρύτερη διαδεδομένη μέθοδος καθορισμού αποστάσεων χρησιμοποιεί παλμούς λέιζερ. Όπως και η τεχνολογία των radar, η οποία κάνει χρήση ραδιοκυμάτων αντί φωτός, η απόσταση αντικειμένου υπολογίζεται μέσω της μέτρησης του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής και της λήψης του παλμού. Η τεχνολογία έχει εφαρμογές στην αρχαιολογία, γεωγραφία, γεωλογία, σεισμολογία, δορυφορική ή απομακρυσμένη παρακολούθηση και ατμοσφαιρική φυσική. Ειδικές μορφές της τεχνικής απαντώνται σε μεθόδους όπως ALSM (Airborne Laser Swath Mapping) και μέτρηση υψομέτρου με λέιζερ. Παραλλαγή της ονομασίας, LADAR (Laser Detection and Ranging), χρησιμοποιείται συχνότερα σε στρατιωτικές εφαρμογές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το λέιζερ που χρησιμοποιείται βρίσκεται εκτός του οπτικού φάσματος, στο εγγύς υπέρυθρο, όπου οι επιπτώσεις του περιβαλλοντικού φωτισμού είναι σημαντικά μειωμένοι. Στην Εικόνα 39 παρουσιάζονται δύο τυπικοί 3D σαρωτές λέιζερ πεδίου και το αποτέλεσμα της 3D ψηφιοποίησης ενός αρχαιολογικού χώρου.



Εικόνα 39. Σαρωτές λέιζερ πεδίου και αποτέλεσμα 3D σάρωσης ενός αρχαιολογικού χώρου



Εικόνα 40. Δείγμα έγχρωμου νέφους σημείων από την 3D ψηφιοποίηση αστικής περιοχής

Στην Εικόνα 40 παρουσιάζονται ένα παραδείγματα 3Δ έγχρωμου νέφους σημείων που προέκυψε από την 3Δ ψηφιοποίηση αστικών περιοχών στην πόλη της Ξάνθης στα πλαίσια επίδειξης 3Δ σαρωτών πεδίου κατά το Διεθνές Συνέδριο “Imaging Culture” το 2006 [88].

10. Φωτογραφικές τεχνικές

Στις τεχνικές αυτές συγκαταλέγονται μέθοδοι που χρησιμοποιούν οπτικό αισθητήρα (φωτογραφική μηχανή) για την αποτύπωση αντικειμένων υπό φυσικές ή ειδικές συνθήκες φωτισμού. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αλλά και διαφορετικές ιδέες για την εφαρμογή των νόμων της οπτικής οι οποίες οδηγούν τελικά στην πρόσκτηση της 3Δ γεωμετρίας και υψής από ένα αντικείμενο. Από αυτές, παρατίθενται, στις παραγράφους που ακολουθούν, οι περισσότερο σημαντικές και διαδεδομένες σήμερα.

10.1. Σχήμα από δομημένο φωτισμό

Η τεχνική συνίσταται στην προβολή χαρακτηριστικού μοτίβου φωτός πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου που μετράται. Η εξαγωγή της πληροφορίας της επιφανειακής γεωμετρίας γίνεται μέσω των παραμορφώσεων του μοτίβου όπως αυτές ανιχνεύονται από οπτικό σύστημα ανίχνευσης και αναλύονται με ειδικό λογισμικό σε υπολογιστή. Στις τεχνικές αυτές υπάρχουν πάμπολλες παραλλαγές ως προς το μοτίβο που προβάλλεται, οι οποίες μπορεί να συνίστανται τόσο σε διαφοροποίηση στα σχήματα και χρώματα όσο και στην επιλογή απλού φωτός ή λέιζερ. Η χαρτογράφηση της υψής πάνω στη γεωμετρία γίνεται μέσω της λήψης επιπρόσθετων φωτογραφιών υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41. Ένας σαρωτής λέιζερ πεδίου και αποτέλεσμα 3Δ σάρωσης ενός αρχαιολογικού χώρου

10.2. Σχήμα από σιλουέτα

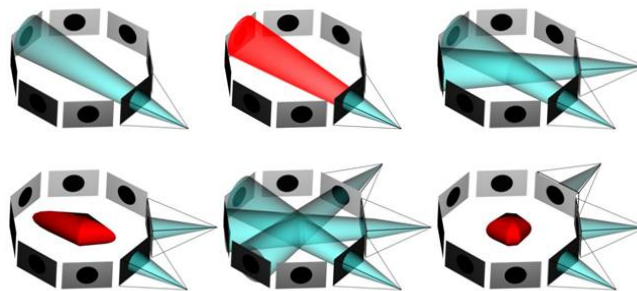
Η τεχνική σχήμα-από-σιλουέτα βασίζεται στην πολλαπλή φωτογράφιση του μετρούμενου αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες, συνήθως μέσω της περιστροφής του γύρω από το νοητό άξονα συμμετρίας του (χωρίς όμως αυτό να είναι υποχρεωτικό). Η τεχνική εγγυάται την ανάκτηση της γεωμετρίας της επιφάνειας ενός αντικειμένου μέχρι το σημείο που η γεωμετρία αυτή είναι ορατή στις σιλουέτες του αντικειμένου που φωτογραφίζεται. Για να είναι δυνατή η εξαγωγή της σιλουέτας του μετρούμενου αντικειμένου, πραγματοποιείται αρχικά φωτογράφιση

υπό ειδικές συνθήκες φωτισμού κατά τις οποίες φωτίζεται το φόντο και παραμένει σκοτεινό το αντικείμενο. Η χαρτογράφηση της υφής πάνω στη γεωμετρία γίνεται με επιπρόσθετες φωτογραφίες υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού (Εικόνα 42).



Εικόνα 42. Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής σχήμα-από-σιλουέτα

Όταν η τεχνική πραγματοποιείται με τη χρήση περιστρεφόμενης τράπεζας τότε η εξαγωγή γεωμετρίας γίνεται με διαδικασία ανάλογη αυτής που εικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43. Διαδοχικά βήματα επεξεργασίας για τη δημιουργία του 3Δ μοντέλου

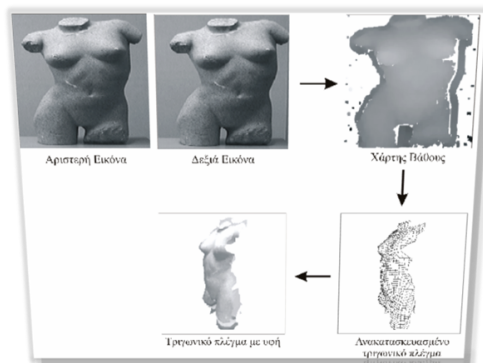
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι η *ευκολία* εφαρμογής και η υψηλή *παραγωγικότητα*, η ταυτόχρονη αποτύπωση *γεωμετρίας* και *υφής*, ενώ στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η *χαμηλή ακρίβεια* και η *κακή εκτίμηση κοιλοτήτων*. Στην Εικόνα 44 παρουσιάζονται παραδείγματα από διάφορα μικρά αντικείμενα, όπου φαίνεται τόσο η γεωμετρία (με μονοχρωματική γκριζα απεικόνιση) όσο και το τελικό 3Δ μοντέλο με τη χαρτογραφημένη υφή.



Εικόνα 44. Δείγματα 3Δ αντικειμένων από ψηφιοποίηση με τη μέθοδο σχήμα από σιλουέτα

10.3. Σχήμα από στέρεο-φωτογράφιση

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής είναι η ίδια με αυτή της στερεοσκοπικής όρασης, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται εξαγωγή της επιφανειακής γεωμετρίας μετρούμενου αντικείμενου από ζεύγη εικόνων (στέρεο-ζεύγη). Στη διαδικασία λαμβάνονται φωτογραφίες από γνωστές οπτικές γωνίες και σχετικές θέσεις και μπορεί να εφαρμοστεί είτε με δύο φωτογραφικές μηχανές, είτε με μία και μετακίνησή της. Στην Εικόνα 45 δίνεται μια αναπαράσταση της διαδικασίας ανάκτησης 3Δ γεωμετρίας υπό τη μορφή χάρτη βάθους (depth map) από ένα ζεύγος φωτογραφιών. Από το χάρτη βάθους προκύπτει η τρίτη διάσταση των σημείων στην εικόνα που αποτελεί τη σύνθεση των δύο φωτογραφιών και κατά συνέπεια δημιουργείται το τριδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας που αντιστοιχεί.



Εικόνα 45. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική της στερεοσκοπικής φωτογράφισης

10.4. Σχήμα από βίντεο/κίνηση

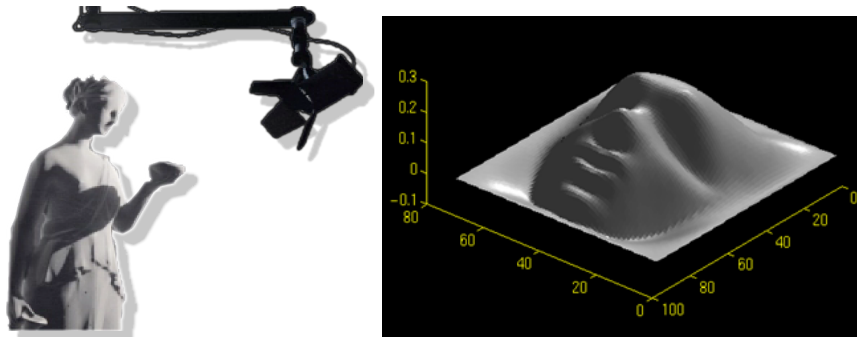
Μια παραλλαγή της τεχνικής σχήμα από στερεο-φωτογράφιση αποτελεί η τεχνική σχήμα από βίντεο ή κίνηση. Η φωτογράφιση αντικαθίσταται από λήψη βίντεο με κίνηση της κάμερας μπροστά στο αντικείμενο και κατά μήκος της επιφάνειάς του. Βασική προϋπόθεση είναι το αντικείμενο να βρίσκεται σε απόλυτη ηρεμία και να μην περιλαμβάνει κινούμενα μέρη. Μια αναπαράσταση της διαδικασίας δίνεται στην Εικόνα 46.



Εικόνα 46. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από βίντεο

10.5. Σχήμα από φωτοσκίαση

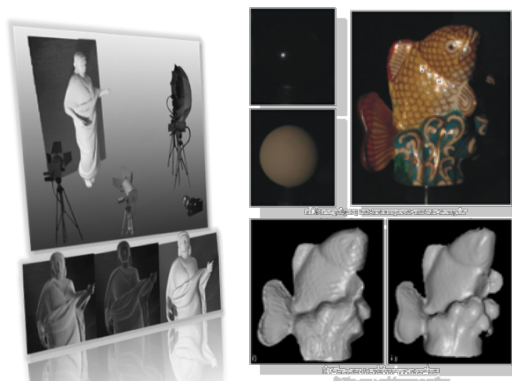
Η τεχνική προϋποθέτει τη φωτογραφική αποτύπωση αντικειμένων υπό την ίδια οπτική γωνία κάτω από συνθήκες φωτισμού που δημιουργεί *κινούμενη πηγή φωτισμού* (Εικόνα 47).



Εικόνα 47. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από φωτοσκίαση

Η κίνηση της πηγής φωτισμού δημιουργεί μεταβλητή φωτοσκίαση στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου και έτσι, πληροφορία γεωμετρίας μπορεί να εξαχθεί με τη χρήση πολλαπλών φωτογραφιών και την παρατήρηση της μεταβολής της φωτοσκίασης (λόγω των γνωστών θέσεων της πηγής φωτισμού).

10.6. Σχήμα από φωτομετρία



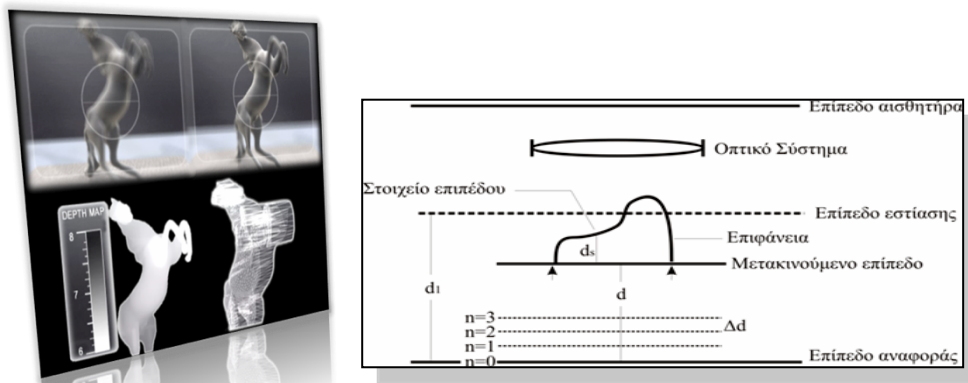
Εικόνα 48. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από φωτομετρία

Μια παραλλαγή της μεθόδου σχήμα από φωτοσκίαση αποτελεί η τεχνική σχήμα από φωτομετρία. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, οι φωτογραφίες καταγράφουν το μετρούμενο αντικείμενο *υπό μία οπτική γωνία και υπό διαφορετικές γνωστές συνθήκες φωτισμού* (Εικόνα 48). Γίνεται *ταυτόχρονη καταγραφή αντικειμένων αναφοράς* (πρότυπα αντικείμενα όπως σφαίρες) με γνωστή επιφανειακή υφή και μέγεθος για την ορθή εξαγωγή των γεωμετρικών αλλά και χρωματικών χαρακτηριστικών.

10.7. Σχήμα από μεταβλητή εστίαση

Η τεχνική αυτή υλοποιείται ως επαναληπτική μέθοδος κατά την οποία πραγματοποιείται φωτογράφιση του μετρούμενου αντικειμένου *υπό συνεχή μετακίνηση του επίπεδου εστίασης* (Εικόνα 49). Η τεχνική οδηγεί, έμμεσα, στη

δημιουργία χάρτη βάθους μέσω της γνώσης της θέσης του επιπέδου εστίασης για κάθε φωτογραφία που λαμβάνεται. Η τεχνική βρίσκει πιο συχνά εφαρμογή σε μετρήσεις με οπτικά ηλεκτρονικά μικροσκόπια όπου το βάθος πεδίου είναι πολύ μικρό και μια μικρή διαφοροποίηση του σημείου εστίασης επηρεάζει δραματικά το ποια σημεία της επιφάνειας του μετρούμενου αντικειμένου παρουσιάζονται εστιασμένα σε κάθε φωτογραφία.



Εικόνα 49. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από μεταβλητή εστίαση

10.8. Σχήμα από σκιά

Παραλλαγή της μεθόδου σχήμα από δομημένο φωτισμό αποτελεί η τεχνική σχήμα από σκιά. Στην τεχνική αυτή γίνεται εκμετάλλευση των παραμορφώσεων της σκιάς που ρίχνει γνωστό αντικείμενο στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου, υπό συνθήκες κίνησης της πηγής φωτισμού (Εικόνα 50).



Εικόνα 50. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3Δ ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από σκιά

10.9. Σχήμα από υφή

Η τεχνική αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια εφαρμογή της επεξεργασίας δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων και πιο συγκεκριμένα του τομέα τμηματοποίησης και ανάλυσης προτύπων. Κατά την τεχνική αυτή πραγματοποιείται αναγνώριση μικρών δομικών στοιχείων επιφανειακής υφής (texels) και γίνεται προσπάθεια ανακατασκευή όλης της επιφάνειας με χρήση των δομικών αυτών texels και απλών μετασχηματισμών. Οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι που καθορίζουν, τελικά, την εξαγόμενη γεωμετρία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική είναι εξαιρετικά περιορισμένης εμβέλειας

εφαρμογών, αφού προϋποθέτει την ύπαρξη μικροδομών στην επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου όπως φαίνεται στο παράδειγμα στην Εικόνα 51

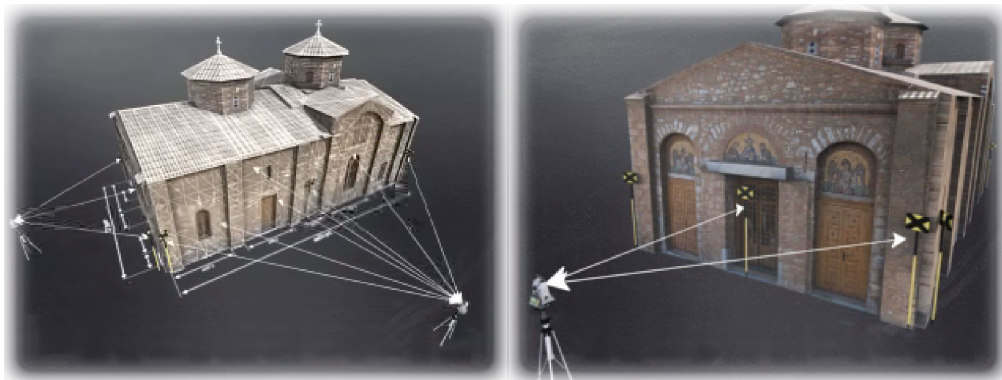


Εικόνα 51. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3D ψηφιοποίησης με την τεχνική σχήμα από υφή

10.10. Φωτογραμμετρία

Η φωτογραμμετρία είναι η Τέχνη, η Επιστήμη και η Τεχνική που σκοπό έχει την εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας φυσικών αντικειμένων και του περιβάλλοντος μέσω των διαδικασιών της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων και άλλων πρότυπων Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και φαινομένων.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της τεχνικής ανάλογα με την εφαρμογή αλλά ανεξαρτήτως της περίπτωσης η φωτογραμμετρία αποτελεί ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο 3D αποτύπωσης και βασίζεται στους νόμους της οπτικής και της προβολικής γεωμετρίας. Η ταυτόχρονη αποτύπωση γεωμετρίας και υφής είναι εγγενής στην τεχνική, μια και η φωτογραμμετρία βασίζεται σε μετρήσεις πάνω στην ίδια την εικόνα. Υπάρχουν δυνατότητες μονοσκοπικής ή στερεοσκοπικής, συγκλίνουσας ή πολυεικονικής, επίγειας ή εναέριας φωτογραμμετρίας. Στην Εικόνα 52 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας.



Εικόνα 52. Ορθοαναγωγή εικόνας από φωτογραφία με χρήση φωτογραμμετρίας

Στην Εικόνα 53 δίνεται ένα παράδειγμα μιας από τις σημαντικότερες ενέργειες κατά τη διαδικασία της φωτογραμμετρίας, η *ορθοαναγωγή* μιας φωτογραφίας, δηλαδή η «παραμόρφωσή» της κατά τέτοιο τρόπο ώστε να «διορθώνεται» η παράλλαξη του 3D χώρου και να προκύπτει μια ορθή προβολή των αντικειμένων που εμφανίζονται στην αρχική φωτογραφία.

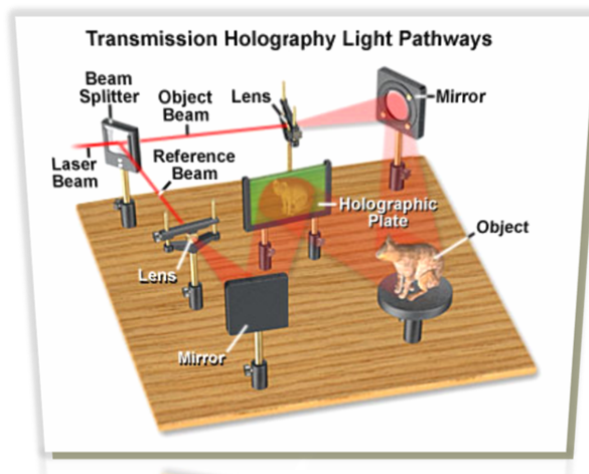


Εικόνα 53. Ορθοαναγωγή εικόνας από φωτογραφία με χρήση φωτογραμμετρίας

Η φωτογραμμετρία εφαρμόζεται κυρίως σε εφαρμογές 3Δ αποτύπωσης μνημείων, αρχιτεκτονικών συνόλων, αστικών περιοχών αλλά και ανοικτών χώρων.

11. Ολογραφία

Ολογραφία είναι η επιστήμη της δημιουργίας ολογραμμάτων. Αποτελεί μια προωθημένη μορφή φωτογράφισης κατά την οποία γίνεται καταγραφή σε τρεις διαστάσεις. Ο τρόπος που καθιστά δυνατή αυτή την φωτογράφιση βασίζεται στη δυνατότητα αποτύπωσης τόσο του πλάτους (ένταση) όσο και της φάσης (διαφορά) του φωτός που ανακλάται από το μετρούμενο αντικείμενο.



Εικόνα 54. Αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της ολογραφικής αποτύπωσης

Στην Εικόνα 54 παρουσιάζεται γραφικά η αρχή λειτουργίας της ολογραφικής αποτύπωσης ενός αντικειμένου. Στην τεχνική αυτή, δημιουργείται δέσμη λέιζερ η οποία διαχωρίζεται σε δύο τμήματα μέσω ειδικών οπτικών. Το ένα τμήμα ακολουθεί πορεία προς τον ανιχνευτή των ακτίνων και αποτελεί το σήμα αναφοράς. Το άλλο τμήμα οδηγείται μέσω οπτικών στο μετρούμενο αντικείμενο στο οποίο ανακλάται προς τον ανιχνευτή, όπου και συναντά το σήμα αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό στον ανιχνευτή δημιουργείται συμβολή των δύο οπτικών σημάτων και κατά συνέπεια καταγράφεται πληροφορία τόσο της επιφανειακής υφής όσο και της γεωμετρίας του μετρούμενου αντικειμένου μέσω της εκτίμησης της διαφοράς φάσης που ανιχνεύεται μεταξύ των δύο οπτικών σημάτων. Η τεχνική αυτή θεωρείται ότι αποτελεί την καλύτερη δυνατή λύση που μπορούμε να εφαρμόσουμε για την 3Δ αποτύπωση από πλευράς ανάλυσης και ακρίβειας της μέτρησης. Παρόλα αυτά είναι ιδιαίτερα ακριβή

και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, ενώ το αντίστοιχο λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων καθώς και το υλικό των υπολογιστών που απαιτούνται είναι ιδιαίτερα υψηλών προδιαγραφών. Πρέπει να τονιστεί ότι η ολογραφία γνωρίζει άνθιση τόσο στον τομέα της ψηφιοποίησης όσο και στον τομέα της αποθήκευσης αλλά και προβολής δεδομένων, όπου έχουν αρχίσει να παρουσιάζονται κάποιες πρότυπες λύσεις εξοπλισμού με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

12. Τοπογραφικές τεχνικές και εμπειρικές τεχνικές

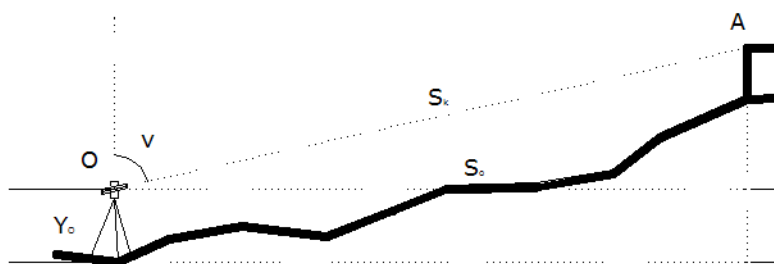
Κατά τη διαδικασία της 3Δ αποτύπωσης μνημείων, αρχιτεκτονικών συνόλων και αστικών περιοχών με τις εμπειρικές τεχνικές, λαμβάνονται με «χειροκίνητο» τρόπο μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών επιφανειακών σημείων (Εικόνα 55). Οι συντεταγμένες ορίζονται σε ένα σύστημα συντεταγμένων που καθορίζεται πάνω σε επίπεδη επιφάνεια του μετρούμενου αντικειμένου.



Εικόνα 55. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στις εμπειρικές τεχνικές 3Δ ψηφιοποίησης

Η τεχνική είναι απλή, παραγωγική, φορητή και χαμηλού κόστους. Από την άλλη, είναι χαμηλής ακρίβειας και αρκετά απαιτητική σε χρόνο παρουσίας στο πεδίο. Εφαρμόζεται με επιτυχία σε μνημεία ή αρχιτεκτονικά με μικρή επιφανειακή πολυπλοκότητα, ή όταν υπάρχει απαίτηση αποτύπωσης για την παραγωγή τομών.

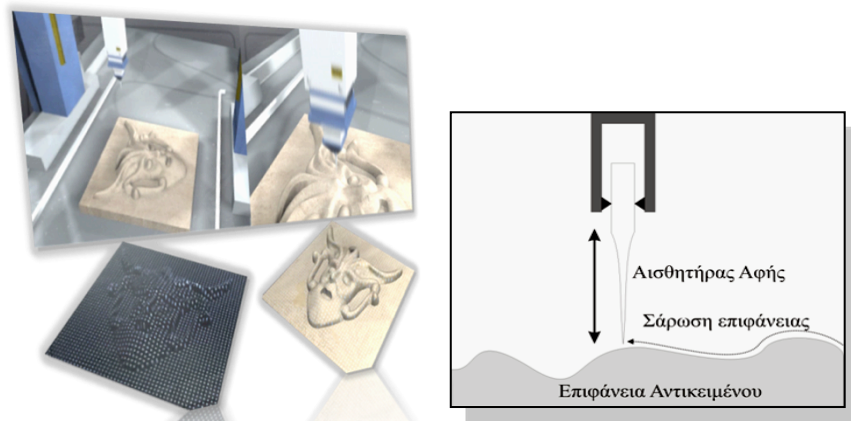
Οι τοπογραφικές τεχνικές υλοποιούν ένα 3Δ σύστημα συντεταγμένων μέσω της χρήσης περίπλοκων συσκευών υψηλής ακρίβειας μέτρησης (Εικόνα 56). Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούν κυρίως ένα γεωδαιτικό σταθμό (Total Station), συσκευή για τη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων χαρακτηριστικών σημείων στην επιφάνεια, οι οποίες μετατρέπονται εν συνεχεία σε συντεταγμένες του αρχικά ορισμένου συστήματος συντεταγμένων. Το βασικό πλεονέκτημα των τεχνικών είναι η υψηλή ακρίβεια και αντικειμενικότητα της μέτρησης. Δεν είναι απλώς αξιόπιστες αλλά παρέχουν έναν εύκολο τρόπο επεξεργασίας των μετρήσεων. Αν και οι τεχνικές αυτές απαιτούν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα παραμονής στο χώρο των μετρήσεων, είναι οι μόνες που μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύ απαιτητικές περιπτώσεις, όπως όταν υπάρχει σημαντική μορφολογική πολυπλοκότητα και δυσκολίες πρόσβασης. Θεωρούνται γενικά οι ιδανικές τεχνικές για την παραγωγή μοντέλων υψηλής ακρίβειας μέχρι μια κλίμακα περί το 1:50 και μικρότερη.



Εικόνα 56. Τοπογραφικές μετρήσεις

13. Τεχνικές επαφής με το αντικείμενο

Οι τεχνικές της κατηγορίας προϋποθέτουν συνεχή επαφή με το αντικείμενο κατά τη σάρωση. Τα συστήματα σάρωσης με επαφή διαθέτουν ευαίσθητα αισθητήρια επαφής τα οποία ερχόμενα σε επαφή με τα μετρούμενα αντικείμενα αποθηκεύουν το γεγονός της επαφής. Ταυτόχρονα, το σύστημα είναι βαθμονομημένο σε ένα σύστημα συντεταγμένων με γνωστές θέσεις αναφοράς και συνεπώς έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει τη θέση του αισθητηρίου επαφής στο χώρο. Οι τεχνικές αυτές εξασφαλίζουν πολύ υψηλή ακρίβεια μέτρησης αλλά η προϋπόθεση της επαφής με τον αντικείμενο αποτελεί πολλές φορές ανασταλτικό παράγοντα εφαρμογής (π.χ. σε περιπτώσεις ψηφιοποίησης πολύτιμων αντικειμένων όπου απαγορεύεται η επαφή). Στην Εικόνα 57 δίνεται γραφική αναπαράσταση της τεχνικής και η αρχή λειτουργίας της.



Εικόνα 57. Αναπαράσταση της διαδικασίας 3D ψηφιοποίησης με επαφή

14. Σύλληψη κίνησης

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η 3D ψηφιοποίηση κινούμενων αντικειμένων, όπως το ανθρώπινο σώμα ή πρόσωπο, εφαρμόζονται ειδικές τεχνικές ψηφιακής καταγραφής της φυσικής κίνησης. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται είτε σε οπτικά είτε σε μη-οπτικά συστήματα. Συγκεκριμένα οι τεχνικές σε κάθε κατηγορία είναι οι εξής:

- Οπτικά συστήματα
 - *Παθητικά σημεία*: η τεχνική προϋποθέτει την τοποθέτηση σημειακών στόχων πάνω στο κινούμενο αντικείμενο και την παρακολούθησή τους μέσω πολλαπλών οπτικών αισθητηρίων (φωτογραφικών μηχανών)
 - *Ενεργά σημεία (LEDs)*: παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου αλλά με χρήση ενεργών φωτεινών στόχων, π.χ. LEDs, τα οποία μπορεί να εκπέμπουν φως στην περιοχή του ορατού ή του υπέρυθρου
 - *Ενεργά σημεία χρονικά διαμορφωμένα (ID)*: παραλλαγή της μεθόδου των ενεργών σημείων με τη διαφορά ότι ο ρυθμός με τον οποίο ανάβουν και σβήνουν οι φωτεινοί στόχοι μεταβάλλεται στο χρόνο με γνωστό προκαθορισμένο τρόπο
 - *Ημι-παθητικά σημεία (IR LEDs)*: παραλλαγή της τεχνικής παθητικών σημείων όπου οι σημειακοί στόχοι ανακλούν φως μόνο σε συγκεκριμένο φάσμα (π.χ. στο υπέρυθρο) ώστε να εξασφαλίζεται η ανίχνευσή τους ανεξάρτητα συνθηκών του περιβάλλοντος
- Μη οπτικά συστήματα

- *Αδρανειακά (αισθητήρες)*: τα συστήματα αυτά κάνουν χρήση αδρανειακών αισθητηρίων για την κατανόηση της κίνησης και την καταγραφή των θέσεων στο χώρο
- *Μηχανικά (γωνίες συνδέσμων)*: τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν τεχνικές μέτρησης γωνιών σε συνδέσμους του κινητού αντικειμένου που έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλονται και να αλλάζουν τη θέση του αντικειμένου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα λεγόμενα:
 - Exo-skeleton systems
- *Μαγνητικά*: τα μαγνητικά συστήματα βασίζονται στη μέτρηση της σχετικής μαγνητικής ροής 3 ορθογωνίως τοποθετημένων πηνίων

Στην Εικόνα 58 φαίνονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνικών σύλληψης 3Δ κίνησης για την περίπτωση του ανθρώπινου σώματος και για την περίπτωση των εκφράσεων του ανθρώπινου προσώπου.



Εικόνα 58. Μέθοδοι 3Δ σύλληψης κίνησης

15. Παραδείγματα-εφαρμογές

Στην Εικόνα 59 παρουσιάζονται παραδείγματα 3Δ μοντέλων που δημιουργήθηκαν με 3Δ έγχρωμη ψηφιοποίηση με τη χρήση τεχνικών τριγωνοποίησης λέιζερ και σχήμα-από-σιλουέτα.



Εικόνα 59. Παραδείγματα 3Δ μοντέλων από ψηφιοποίηση αντικειμένων

Στην Εικόνα 60 παρουσιάζονται παραδείγματα 3Δ μοντέλων που δημιουργήθηκαν με 3Δ έγχρωμη ψηφιοποίηση μνημείων με τη χρήση τεχνικών λέιζερ πεδίου, φωτογραμμετρίας και εμπειρικών τεχνικών. Τέλος, στην Εικόνα 61 παρουσιάζονται παραδείγματα 3Δ μοντέλων που δημιουργήθηκαν με 3Δ έγχρωμη ψηφιοποίηση αστικών περιοχών και ανοικτών χώρων με τη χρήση τεχνικών λέιζερ πεδίου, φωτογραμμετρίας και εμπειρικών τεχνικών.



Εικόνα 60. Παραδείγματα 3Δ μοντέλων από ψηφιοποίηση μνημείων



Εικόνα 61. Παραδείγματα 3Δ μοντέλων ανοικτών χώρων και αστικών περιοχών

16. Αναφορές

- [1] W. Boehler, A. Marbs, "Scanning for Cultural Heritage Recording", *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop*, (Corfu, Greece), 2002.
- [2] A. Marbs, "Experiences with Laser Scanning at i3mainz", *Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording'*, pp.110-114, CIPA, (Corfu, Greece), 2002.
- [3] J-A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin, M. Rioux, "Active 3D sensing", *SCUOLA NORMALE SUPERIORE PISA, Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali*, 2000.
- [4] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_Force_Microscopy, latest visit May 2008.
- [5] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope, latest visit May 2008.
- [6] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_Microscopy, latest visit May 2008
- [7] J. Wyant, "White light Interferometry", available online at: http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/pdf/meeting_papers/whitelightinterferometry.pdf, latest visit June 2008.
- [8] D. Gabor, "Microscopy by recorded wavefronts", *Proceedings of the Royal Society*, B, 64, pp. 446-469, 1949.
- [9] Y.N. Denisyuk, "On the reflection of optical properties of an object in a wave field of light scattered by it", *Doklady Akademii Nauk SSSR* 144, pp. 1275-1278, 1962.
- [10] E. Leith, J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory". *J. Opt. Soc. Am.* 52, pp. 1123-1130, 1962.
- [11] N. Phillips, D. Porter, "An advance in the processing of holograms", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, p. 631, 1976.
- [12] H. Smith, "Principles of holography", Wiley, ISBN 978-0471803416, 1976.
- [13] Online at http://www.holowiki.com/index.php/Main_Page, latest visit May 2008.
- [14] U. Schnars, W. Jüptner, "Digital Holography". Springer, ISBN: 978-3-540-21934-7, 2005.
- [15] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>, latest visit June 2008.
- [16] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_holography, latest visit June 2008.
- [17] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_lithography, latest visit May 2008.
- [18] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Tomography>, latest visit June 2008.
- [19] B. Curless, M. Levoy, "Better optical triangulation through spacetime analysis", *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision*, p.987, 1995.
- [20] M. Rioux, "Digital 3-D Imaging: Theory and Applications", SPIE Proceedings, Videometrics III, International Symposium on Photonic and Sensors and Controls for Commercial Applications, (Boston, USA), pp. 2-15, 1994.
- [21] F. Arnaoutoglou, A. Koutsoudis, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Towards a Versatile Handheld 3D Laser Scanner", *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, (Nicosia, Cyprus), Oct. 30 – Nov. 4, 2006.
- [22] N. Tsirliganis, G. Pavlidis, A. Koutsoudis, D. Papadopoulou, A. Tsompanopoulos, K. Stavroglou, Z. Loukou, C. Chamzas, "Archiving Cultural Objects in the 21st Century", *Elsevier Journal of Cultural Heritage*, Vol. 5, Is. 4, pp. 379-384, 2004.
- [23] G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Methods for 3D Digitization of Cultural Heritage", *Elsevier Journal of Cultural Heritage*, Vol. VIII 1, 2007.
- [24] W. Boehler, A. Marbs, "3D Scanning Instruments", *Proceedings Of The CIPA WG 6 International Workshop, "On Scanning For Cultural Heritage Recording"*, (Corfu, Greece), 2002.
- [25] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight, latest visit June 2008
- [26] Online at http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_range_finder, latest visit June 2008
- [27] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/LIDAR>, latest visit June 2008
- [28] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Creating Internet Friendly 3D Tours Using 3D Range Scanner Data", *3D Colour Laser Scanning Conference*, (UCL London, UK), 2008.
- [29] Salvi, J., Pages, J., Battle, J., "Pattern codification strategies in structured light systems", *PR* (37), No. 4, pp. 827-849, April 2004.
- [30] J. L. Posdamer, M. D. Altschuler, "Surface measurement by space-encoded projected beam systems", *Computer Graphics and Image Processing*, 18 (1), pp.1-17, 1982.
- [31] S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda, "Range imaging system for 3-D object recognition", *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, pp. 806–808, 1984.
- [32] M. Trobina, "Error model of a coded-light range sensor", *Technical report, Communication Technology Laboratory*, ETH Zentrum, Zurich, 1995.

- [33] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, "A low cost 3D scanner based on structured light", in *A. Chalmers, T.-M. Rhyne (Eds.), EG 2001 Proceedings*, Vol. 20(3), Blackwell Publishing, pp. 299–308, 2001.
- [34] D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir, "Range imaging with adaptive color structured light", *Pattern analysis and machine intelligence*, 20 (5), pp. 470–480, 1998.
- [35] J. Gühring, "Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components", *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, 4309, pp. 220–231, 2001.
- [36] O. Hall-Holt, S. Rusinkiewicz, "Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects", *The 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. II: 359–366, 2001.
- [37] M. Maruyama, S. Abe, "Range sensing by projecting multiple slits with random cuts", *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15 (6), pp. 647–651, 1993.
- [38] N. G. Durdle, J. Thayoor, V. J. Raso, "An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk", *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, pp. 874–877, 1998.
- [39] J. Salvi, J. Batlle, E. Mouaddib, "A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement", *International Journal of Pattern Recognition Letters* (19), pp. 1055–1065, 1998.
- [40] E. M. Petriu, Z. Sakr, H.J.W. Spoelder, A. Moica, "Object recognition using pseudo-random color encoded structured light", *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement technology Conference*, Vol. 3, pp.1237–1241, 2000.
- [41] P. Lavoie, D. Ionescu, E. Petriu, "A high precision 3D object reconstruction method using a color coded grid and nurbs", *Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Processing*, (Venice, Italy), pp. 370–375, 1999.
- [42] L. Zhang, B. Curless, S. M. Seitz, "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming", *Int. Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, (Padova, Italy), 2002.
- [43] C. Chen, Y. Hung, C. Chiang, J. Wu, "Range data acquisition using color structured lighting and stereovision", *Image and Vision Computing*, 15, pp. 445–456, 1997.
- [44] E. M. Petriu, T. Bieseman, N. Trif, W. S. McMath, S. K. Yeung, "Visual object recognition using pseudo-random grid encoding", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1617–1624, 1992.
- [45] H. J.W. Spoelder, F. M. Vos, E. M. Petriu, F. C. A. Groen, "Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization", *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 49 (6), pp. 1331–1336, 2000.
- [46] P. Griffin, L. Narasimhan, S. Yee, "Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition", *Pattern Recognition* 25 (6), pp. 609–616, 1992.
- [47] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, J. Nissanov, "Structured light using pseudorandom codes", *Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20 (3), pp. 322–327, 1998.
- [48] B. Carrihill, R. Hummel, "Experiments with the intensity ratio depth sensor", in *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 32, Academic Press, pp. 337–358, 1985.
- [49] T. Miyasaka, K. Kuroda, M. Hirose, K. Araki, "High speed 3-D measurement system using incoherent light source for human performance analysis", *Proceedings of the 19th Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, (Amsterdam, The Netherlands), pp. 65–69, 2000.
- [50] G. Chazan, N. Kiryati, "Pyramidal intensity-ratio depth sensor", Technical report 121, Center for Communication and Information Technologies, Department of Electrical Engineering, Technion, Haifa, Israel, Oct. 1995.
- [51] J. Tajima, M. Iwakawa, "3-D data acquisition by rainbow range finder", *International Conference on Pattern Recognition*, pp. 309–313, 1990.
- [52] T. Sato, "Multispectral pattern projection range finder", *Proceedings of the Conference on Three-Dimensional Image Capture and Applications II*, Vol. 3640, SPIE, (San Jose, USA), pp. 28–37, 1999.
- [53] C. Wust, D.W. Capson, "Surface profile measurement using color fringe projection", *Machine Vision and Applications* 4, pp. 193–203, 1991.
- [54] E. Horn, N. Kiryati, "Toward optimal structured light patterns", *Image and Vision Computing* 17 (2), pp. 87-97, 1999.
- [55] J. Salvi, J. Pagès, J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems", *Pattern Recognition*, Vol. 37, Is. 4, pp. 827-849, 2004.

- [56] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, "A low cost 3D scanner based on structured light", in *A. Chalmers, T.-M. Rhyne (Eds.), EG 2001 Proceedings*, Vol. 20(3), Blackwell Publishing, pp. 299–308, 2001.
- [57] S. Tosovic, R. Sablatnig, M. Kampel, "On combining shape from silhouette and shape from structured light", in *H. Wildenauer and W. Kropatsch, (Eds.), Proc. of 7th Computer Vision Winter Workshop*, pp. 108-118, 2002.
- [58] A. Laurentini, "The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16 No.2, pp.150-162, 1994.
- [59] R. Sablatnig, S. Tosovic, M. Kampel, "Next View Planning for Shape from silhouette", in *Drbohlav O., (Ed.), Proc. of 8th Computer Vision Winter Workshop 2003*, (Valtice, Czech Republic), pp.77-82, 2003.
- [60] A. Baumberg, A. Lyons, R. Taylor, "3D S.O.M. – A commercial software solution to 3D scanning", *Eurographics Partner Event - Vision, Video, and Graphics 2003*. (Bath, UK), 2003.
- [61] M. Potmesil, "Generating Octree Models of 3D Objects from their Silhouettes in a Sequence of Images", *CVGIP* 40, pp. 1-29, 1987.
- [62] H Noborio, S Fukuda, S Arimoto, "Construction of the octree approximating three-dimensional objects by using multiple views", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.10, pp.769-782, 1988.
- [63] N. Ahuja, J. Veenstra, "Generating Octrees from Object Silhouettes in Orthographic Views", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 137-149, 1989.
- [64] Y. Matsumoto, H. Terasaki, K. Sugimoto, T. Arakawa, "A Portable Three-dimensional Digitizer", *First International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, p. 197, 1997.
- [65] H.P.A. Lensch, W. Heidrich, H.P. Seidel, "A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching", *Graphical Models*, Vol. 63, Is. 4, pp. 245 – 262, 2001.
- [66] A. Laurentini, "The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.2, pp.150-162, 1994.
- [67] D. Scharstein, R. Szeliski. "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 47, No 1-3, pp. 7-42, 2002.
- [68] M. Bertozzi, A. Broggi, G. Conte, A. Fascioli, "Stereo-Vision System performance analysis", *Enabling Technologies for the PRASSI Autonomous Robot*, ENEA, (Rome, Italy), ISBN 8882860248, pp. 68-73, 2002.
- [69] A. Chiuso, H. Jin, P. Favaro, S. Soatto, "MFm: 3-D Motion and Structure from 2-D Motion Causally Integrated Over Time: Implementation", *In Computer Vision - ECCV 2000, D. Vernon ed., Lect. Notes in Computer Science*, pp. 734-750, 2000.
- [70] L. Van Gool, F. Defoort, M. Pollefeys, R. Koch, M. Proesmans, M. Vergauwen, "Special Lecture: 3D Modeling for Communications", *Computer Graphics International*, (Hannover, Germany), p. 482, 1998.
- [71] R. Zhang, P.-S. Tsai, J. E. Cryer, M. Shah, "Shape from Shading: A Survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, No. 8, 1999.
- [72] C.-Y. Chen, R. Klette, C.-F. Chen, "3D Reconstruction Using Shape from Photometric Stereo and Contours", *Image and Vision Computing*, 2003.
- [73] R. Basri, D. Jacobs, I. Kemelmacher, "Photometric Stereo with General, Unknown Lighting", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 72, No. 3, pp. 239-257, 2006.
- [74] A. Hertzmann, S. M. Seitz, "Shape and Materials by Example: A Photometric Stereo Approach", *Proceedings of CVPR 2003, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003.
- [75] Y. Y. Schechner, "Depth from Defocus vs. Stereo: How different really are they?", *International Journal of Computer Vision* 89, pp. 141-162, 2000.
- [76] P. Favaro, "Shape from Focus/Defocus", *Washington University Department of Electrical Engineering Electronic Signals and Systems Research Lab*, 2002, online <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/24286/http:zSzzSzee.wustl.eduzSz-favazSzDFDTutorial.pdf/shape-from-focus-defocus.pdf>
- [77] J.-Y. Bouguet, P. Perona, "3D Photography on your desk", in *Proc. Of the Int. Conf. On Computer Vision*, (Bombay, India), 1998.
- [78] D.A. Forsyth, "Shape from texture without boundaries", *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision*, Part III, ISBN:3-540-43746-0, pp. 225-239, 2002.
- [79] K. Hanke, P. Grusenmeyer "Architectural Photogrammetry: Basic theory, Procedures, Tools", *Tutorial of Architectural Photogrammetry*, (Corfu, Greece), 2002.

- [80] A. Streilein, F.A. van den Heuvel, "Potential and limitation for the 3D documentation of cultural heritage from a single image", *Proceedings XVII CIPA International Symposium*, (Brazil), 1999.
- [81] Online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>, latest visit June 2008
- [82] Online at <http://www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/wgv/intro.htm>, latest visit June 2008
- [83] E. Livieratos, "Empiric, Topographic or Photogrammetric recording? Answers to properly phrased questions", *Proceedings of the congress, "Terrestrial Photogrammetry and Geographic Information Systems for the documentation of the National Cultural Heritage"*, (Thessaloniki, Greece), 1992.
- [84] V. Tsioukas, P. Patias, "Low Cost 3D Visualization and Measuring 'Tool' in the Service of Archaeological Excavations, Computer Applications and Quantitative Methods", in *Archaeology Conference, 'The Digital Heritage of Archaeology'*, (Heraklion, Greece), 2002.
- [85] G. Pavlidis, N. Tsirliganis, D. Tsiafakis, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, "3D digitization of monuments: the case of Mani", *Third International Conference of Museology*, (Mytilene, Greece), 2006.
- [86] G. Pavlidis, D. Tsiafakis, V. Tsioukas, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, "Preservation of Architectural Heritage through 3D digitization", *Special Issue of the International Journal of Architectural Computing (IJAC) in Cultural Heritage*, Is. 02, Vol. 5, pp. 221-237, 2007.
- [87] M. Nashman. , T. Hong. , W. Rippey. , M. Herman, "An Integrated Vision Touch-Probe System for Dimensional Inspection Tasks", *Proceedings of the SME Applied Machine Vision '96 Conference*, (Cincinnati, USA), 1996.
- [88] F. Guerra and associates, "3D range scanning demonstration", *International Conference 'Imaging Culture'*, (Xanthi, Greece), 2006.

Μέρος III. Αποθήκευση, αρχειοθέτηση, διαχείριση, ανάκτηση

1. Εισαγωγή

Η πλήρης τριδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση είναι μια πολυδιάστατη διαδικασία. Περιλαμβάνει εργασίες που ξεκινούν με την τριδιάστατη (3Δ) ψηφιοποίηση και συνεχίζονται με εργασίες που αφορούν στην αποθήκευση, διαχείριση, δεικτοδότηση και προβολή του τριδιάστατου ψηφιακού υλικού. Περιλαμβάνει, δηλαδή, εργασίες που αφορούν όλο τον κύκλο ζωής του ψηφιακού περιεχομένου. Γενικά, πέντε είναι οι βασικές εργασίες που μπορούν να διακριθούν σε μια διαδικασία ψηφιακής αποτύπωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 62. Όλες αυτές οι εργασίες έχουν τις δικές τους ξεχωριστές απαιτήσεις για νέους αλγορίθμους, λογισμικό και συσκευές.



Εικόνα 62. Πλήρης τριδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση

Αντικείμενο των παραγράφων που ακολουθούν αποτελούν οι ενέργειες εκείνες που ακολουθούν την 3Δ ψηφιοποίηση εκτός της προβολής, δηλαδή, οι ενέργειες της επεξεργασίας και αποθήκευσης, αρχειοθέτησης περιγραφής, διαχείρισης και ανάκτησης 3Δ δεδομένων που δημιουργήθηκαν από 3Δ ψηφιοποίηση.

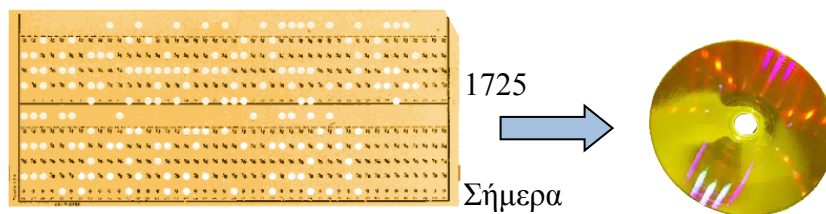
2. Αποθήκευση δεδομένων

Ένα σύστημα αποθήκευσης αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αποτελείται σε γενικές γραμμές από τα εξής στοιχεία:

- Αποθηκευτικό μέσο
- Οδηγός αποθηκευτικού μέσου
- Μονάδες διασύνδεσης
- Διάταξη διασύνδεσης

2.1. Το αποθηκευτικό μέσο

Η αποθήκευση δεδομένων με τη σύγχρονη μορφή της έχει μια ιστορία που χρονολογείται από το 1725 (Εικόνα 63).



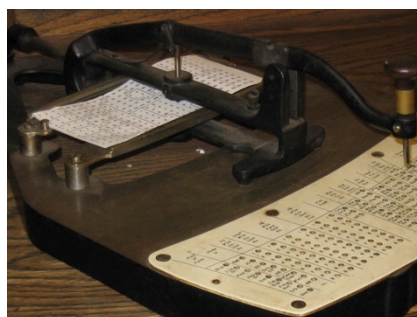
Εικόνα 63. Αποθηκευτικά μέσα από το 1725 έως σήμερα

Αρχικά εμφανίστηκαν μηχανικά μέσα αποθήκευσης. Κατά το 1725 οι *Basile Bouchon* και *Jean-Baptiste Falcon*, δημιούργησαν μια πρώτη μορφή διάτρητων καρτών (σε ρολό, Εικόνα 64) για χρήση σε μηχανικούς αργαλειούς. Το 1801 ο *Joseph Marie Jacquard* βελτίωσε τη μέθοδο και πάλι για την ίδια χρήση.



Εικόνα 64. Ρολό διάτρητων καρτών για χρήση σε μηχανικούς αργαλειούς

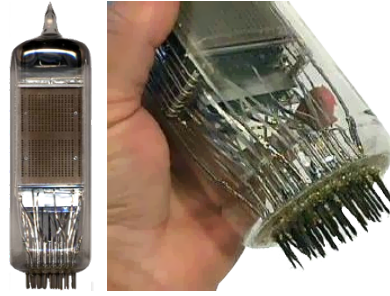
Κατά τα μέσα του 1800 ο *Charles Babbage* εισάγει τη χρήση καρτών για τον έλεγχο μηχανικών υπολογιστών, ενώ το 1890 ο *Herman Hollerith* κάνει χρήση διάτρητων καρτών σε δημοσκόπηση των ΗΠΑ για να πραγματοποιήσει υπολογισμούς (Εικόνα 65).



Εικόνα 65. Η μηχανή του Hollerith για υπολογισμούς σε δημοσκόπηση των ΗΠΑ

Το 1896 πάλι ο *Herman Hollerith* ιδρύει την εταιρεία *Tabulating Machine Company* η οποία στη συνέχεια μετονομάστηκε σε *Computing Tabulating Recording Corporation* από την οποία προέκυψε τελικά η εταιρεία *International Business Machines (IBM)*. Η *IBM* προώθησε την κατασκευή και χρήση καρτών έως 1950, με μια παραγωγή που μετρούσε τα 10 εκατομμύρια κάρτες ημερησίως (μέτρηση 1937).

Κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1900 έχουμε την εμφάνιση των ηλεκτρονικών μέσων αποθήκευσης. Κατά το 1946 η εταιρεία *RCA* ανέπτυξε τις λυχνίες *Selectron* (Εικόνα 66), οι οποίες αποτελούν μια αρχική μορφή μνήμης για υπολογιστές και ήταν μεγέθους 25 εκατοστών με μια χωρητικότητα 4096 bits (512 bytes).



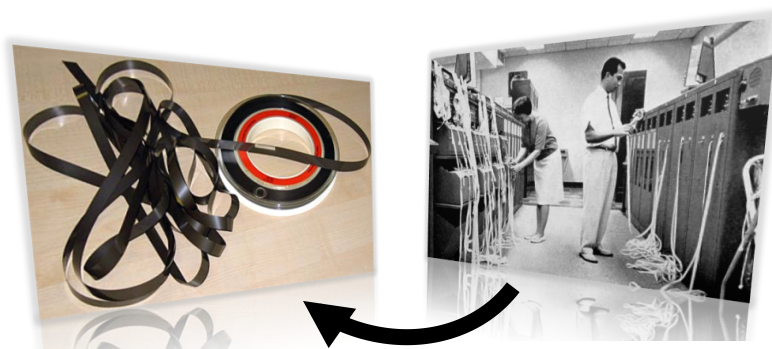
Εικόνα 66. Λυχνία Selectron: Η πρώτη μορφή ηλεκτρονικού μέσου αποθήκευσης

Από τη δεκαετία του 1950 παρουσιάζονται τα μαγνητικά μέσα αποθήκευσης και συγκεκριμένα μια πρώτη μορφή υλοποίησής του από την IBM ως *μαγνητικές ταινίες* (Εικόνα 67). Η χωρητικότητά τους αντιστοιχούσε σε 10.000 κάρτες σε μία ταινία και ήταν πολύ δημοφιλείς μέχρι τα μέσα του 1980.



Εικόνα 67. Μαγνητική ταινία: Η πρώτη μορφή μαγνητικού μέσου αποθήκευσης

Οι μαγνητικές ταινίες γνώρισαν μεγάλης αποδοχής και κατά τις δεκαετίες 1960-1970 πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση (Εικόνα 68) των διάτρητων καρτών από μαγνητικές ταινίες στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που ακολουθήθηκε από σημαντική πτώση των τιμών στα μαγνητικά μέσα. Ήταν η εποχή που έγινε η εμφάνιση των πρώτων οθονών.



Εικόνα 68. Αντικατάσταση διάτρητων καρτών με μαγνητικές ταινίες

Κατά το 1963 η εταιρεία Philips κατασκεύασε την Κασέτα (Compact Cassette, Εικόνα 69) η οποία αποτέλεσε πολύ δημοφιλές μέσο αποθήκευσης κατά τη δεκαετία του 1970. Πολλά από τα υπολογιστικά συστήματα που δημιουργήθηκαν εκείνη την εποχή αλλά και λίγο αργότερα, όπως ZX Spectrum, Commodore 64, Amstrad CPC βασίζονταν στη χρήση αυτού του μέσου για την αποθήκευση δεδομένων και προγραμμάτων. Μια κασέτα 90 λεπτών είχε χωρητικότητα 700 KB έως 1 MB. Μια σύγκριση με σύγχρονα αποθηκευτικά μέσα δίνει χαρακτηριστικά ότι ένα DVD αντιστοιχεί σε αποθηκευτικό χώρο 4500 κασετών, οι οποίες χρειάζονται 281 ημέρες για την ανάγνωσή τους.



Εικόνα 69. Τυπική κασέτα μαγνητικής ταινίας

Κατά το 1969 η IBM κατασκευάζει τη Δισκέτα (floppy disk, Εικόνα 70), η οποία αρχικά ήταν μόνο ανάγνωσης 8 ιντσών και με χωρητικότητα 80 KB. Το 1973 η δισκέτα αποκτά χωρητικότητα 256 kB και γίνεται επανεγγράφιμη, ενώ το 1976 εμφανίζονται δισκέτες 5¼ ιντσών των 110 kB, το 1982 δισκέτες των 3½ ιντσών με 264 kB και το 1987 δισκέτες όμοιες με τις σημερινές 1.44 MB. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκαν δισκέτες με χωρητικότητα 250 MB.



Εικόνα 70. Τυπική κασέτα μαγνητικής ταινίας

Κατά το 1956 η IBM κατασκεύασε το σύστημα 305 RAMAC με χωρητικότητα μέχρι 4.4 MB, η οποία θεωρούνταν τεράστια ποσότητα πληροφορίας την εποχή εκείνη. Το σύστημα αποτελούνταν από 50 μαγνητικούς δίσκους των 24 ιντσών, οι οποίοι ήταν η πρώτη μορφή «σκληρών δίσκων». Η εταιρεία κατασκεύασε περισσότερα από 1000 συστήματα έως το 1961 και τα ενοικίαζε με τεράστιο μηνιαίο κόστος.



Εικόνα 71. Το σύστημα 305 RAMAC: πρώτη μορφή σκληρού δίσκου

Σήμερα, το αποθηκευτικό μέσο με την ονομασία «Σκληρός δίσκος» (Εικόνα 72) ένα από τα μέσα με την ευρύτερη χρήση και γνωρίζει μια συνεχή ανάπτυξη τόσο ως προς τη χωρητικότητα όσο και ως προς την ταχύτητα λειτουργίας και το όλο και μικρότερο μέγεθος κατασκευής. Ένας σκληρός δίσκος χωρητικότητας 500 GB ισοδυναμεί με 120.000 φορές περισσότερα δεδομένα από τον πρώτο σκληρό δίσκο IBM 305 RAMAC.



Εικόνα 72. Εσωτερική όψη ενός σύγχρονου σκληρού δίσκου

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1950 σηματοδοτείται η εμφάνιση των οπτικών μέσων αποθήκευσης. Το 1958 επινοήθηκε η τεχνολογία των Laserdisc (Εικόνα 73), ενώ το 1972 πραγματοποιείται η πρώτη επίδειξη των videodisc τα οποία γίνονται εμπορικό προϊόν το 1978. Οι πρώτοι αυτοί οπτικοί δίσκοι ήταν μόνο για δεδομένα video και εικόνες με σημαντικά υψηλότερη ποιότητα από ότι στις κασέτες VHS.



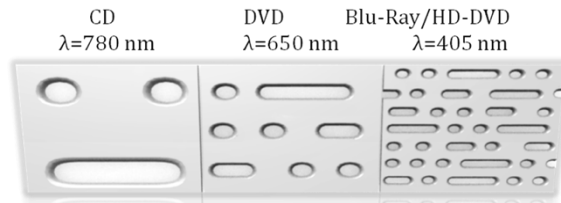
Εικόνα 73. Συγκριτική φωτογραφία Laserdisc και CDROM

Έτσι, σηματοδοτήθηκε η έναρξη μιας εποχής συνεχούς ανάπτυξης των οπτικών μέσων αποθήκευσης η οποία απέδωσε αρχικά κατά το 1979 το Compact disc (CD-Audio, CD-ROM) από τις εταιρείες SONY και Philips, αργότερα το DVD (Digital Versatile Disc), το DVD υψηλής χωρητικότητας HD-DVD (High Definition DVD) και BD (Blu-Ray Disc), ενώ στα μελλοντικά πρότυπα προστίθενται λύσεις όπως η ολογραφική εγγραφή σε HVD (Holographic Versatile Disc). Όλα αυτά σε πλαστικούς δίσκους διαμέτρου 12 εκατοστών (Εικόνα 74).



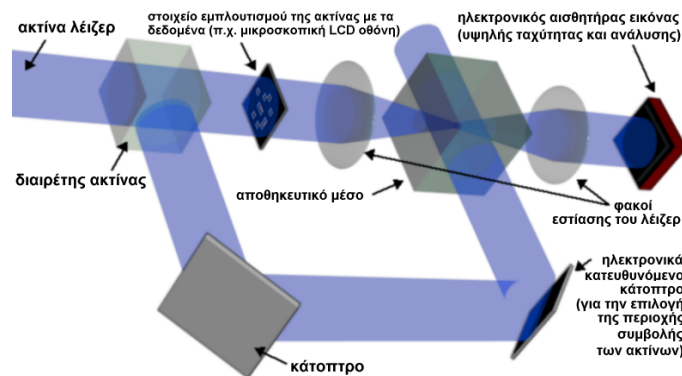
Εικόνα 74. Διάφοροι τύποι οπτικών δίσκων (από αριστερά, CD, DVD, HD-DVD, Blu-Ray Disc)

Η αύξηση της χωρητικότητας με ταυτόχρονη διατήρηση της διάστασης του μέσου πραγματοποιήθηκε με τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο στον τομέα των λέιζερ και συγκεκριμένα στην επίτευξη κατασκευής πηγών λέιζερ με μικρότερο μήκος κύματος (ή μεγαλύτερη συχνότητα, με ταυτόχρονη μετάβαση από κόκκινο χρώμα σε κυανό), όπως φαίνεται γραφικά στην Εικόνα 75.



Εικόνα 75. Επίδραση της μεταβολής του μήκους κύματος του λέιζερ στην πυκνότητα εγγραφής δεδομένων σε οπτικό μέσο αποθήκευσης

Την πιο σύγχρονη τεχνολογική λύση για την επίτευξη αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων αποτελεί η ολογραφική αποθήκευση. Βασίζεται στη συμβολή κυμάτων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (από πηγή λέιζερ) και η αρχή λειτουργίας της απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 76.



Εικόνα 76. Αρχή λειτουργίας της ολογραφικής αποθήκευσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα οι οπτικοί δίσκοι που χρησιμοποιούνται αποτελούν τεχνολογικά τα μέλη τριών γενεών ενώ η επερχόμενη τέταρτη γενιά θα περιλαμβάνει λύσεις που βασίζονται στην ολογραφία, σε ειδικές χημικές αντιδράσεις, σε τεχνολογίες φθορισμού σε σιδηρομαγνητική μοριακή οπτική αποθήκευση και σε οπτικά εγγύς πεδίου με σημαντική αύξηση της χωρητικότητάς τους (π.χ. Tapestry Media στα 300 GB - 1.6 TB, Holographic Versatile Disc στα 3.9 TB, Protein-coated Disc στα 50-240 GB και TeraDisc ως 3D optical storage disc περίπου στα 5 TB).

Μια ενδιάμεση υβριδική τεχνολογία που επίσης αναπτύχθηκε ήταν αυτή των μαγνητο-οπτικών μέσων αποθήκευσης (Εικόνα 77) κατά τα τέλη του 1980. Στα μέσα αυτά πραγματοποιείται μαγνητική εγγραφή και οπτική ανάγνωση μέσω του μαγνητοοπτικού φαινομένου Kerr [1]. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα γνωστά MiniDisc.



Εικόνα 77. Μαγνητο-οπτικά μέσα αποθήκευσης

Από το 1967 και έπειτα κάνει την εμφάνισή της μια ακόμη οικογένεια αποθηκευτικών μέσων: τα αποθηκευτικά μέσα στερεάς κατάστασης (Εικόνα 78). Το 1967 κατασκευάζεται η μνήμη ROM (Read Only Memory) η οποία στη συνέχεια οδήγησε στην κατασκευή της EEPROM (Electrically Erasable Programmable

ROM) το 1983, από την οποία τελικά προήλθε κατά το 1984, η γνωστή *Flash memory*. Η οικογένεια αυτή αποθηκευτικών μέσων παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μεγάλη αντοχή, μικρές ενεργειακές απαιτήσεις, μικρό βάρος, υψηλή ταχύτητα και αθόρυβη λειτουργία, ενώ στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγονται το υψηλό σχετικό κόστος και η σχετικά μικρή χωρητικότητα.



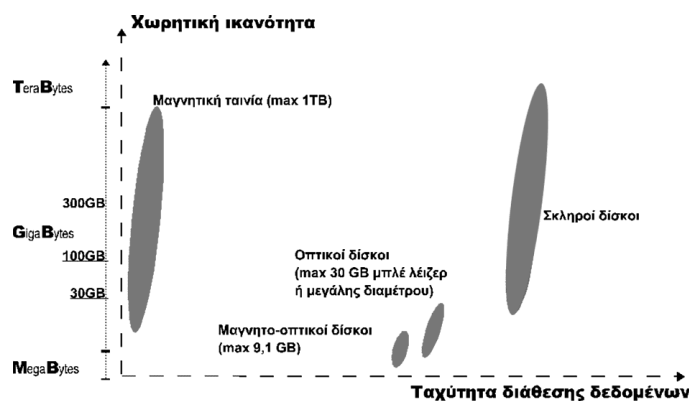
Εικόνα 78. Αποθηκευτικά μέσα στερεάς κατάστασης

Στην Εικόνα 79 παρουσιάζεται μια σύγκριση αποθηκευτικών μέσων από την πρώτη μορφή τους τη διάτρητη κάρτα έως την πλέον σύγχρονη ολογραφική αποθήκευση.



Εικόνα 79. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων ως προς την ολογραφική αποθήκευση (HVD)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που αποτελεί σημείο αναφοράς στις διάφορες τεχνολογίες αποθηκευτικών μέσων αποτελεί η ταχύτητα πρόσβασης που παρέχει το μέσο. Στην Εικόνα 80 παρουσιάζεται συγκεντρωτικό διάγραμμα της χωρητικής ικανότητας σε σχέση με την ταχύτητα διάθεσης δεδομένων σε κάθε μία από τις γνωστές τεχνολογίες αποθηκευτικών μέσων.



Εικόνα 80. Γράφημα χωρητικότητας μέσου προς ταχύτητα διάθεσης δεδομένων

3. Μονάδες διασύνδεσης αποθηκευτικών μέσων

Μια σημαντική παράμετρος κατά την επιλογή και χρήση αποθηκευμένων ψηφιακών μέσων είναι ο τρόπος διασύνδεσής τους με το σύστημα επεξεργασίας δεδομένων (π.χ. υπολογιστής). Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών διασύνδεσης αποθηκευτικών μέσων υποστηρίζοντας διαφορετικές οικογένειες μέσων και με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες διασύνδεσης περιλαμβάνουν:

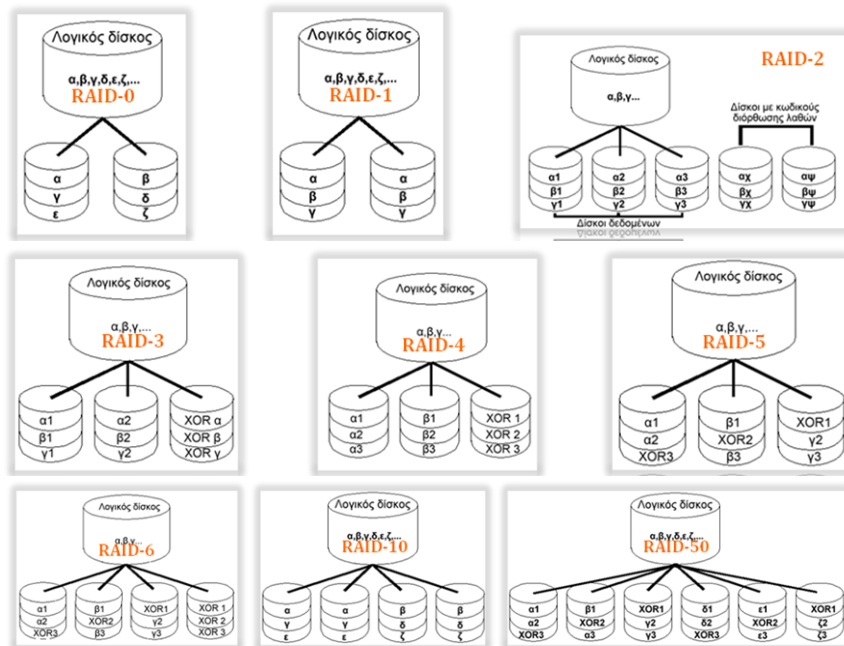
- USB, έκδοση 2 με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων 480 Mbps
- Firewire (IEEE 1394), έκδοση b με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων 800 Mbps
- IDE/ATA, έκδοση Ultra-ATA 133 με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων περί το 1 Gbps
- SATA με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων περί τα 2.5 Gbps
- SCSI, έκδοση SA-SCSI με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων περί τα 6 Gbps
- Fiber Channel (FC) με ταχύτητα μεταγωγής δεδομένων περί τα 4 Gbps σε αποστάσεις έως και 10 km

Η επιλογή συστήματος διασύνδεσης είναι συνδεδεμένη με την επιλογή του ίδιου του μέσου, αφού τις περισσότερες φορές το μέσο έχει ήδη προδιαγεγραμμένο τον τρόπο διασύνδεσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε περιπτώσεις όπου το μέσο πρέπει να είναι απομακρυσμένο από το σταθμό επεξεργασίας ή τον εξυπηρετητή και όταν η ταχύτητα πρόσβασης στα δεδομένα είναι πολύ υψηλών απαιτήσεων.

3.1. Διατάξεις διασύνδεσης αποθηκευτικών μέσων

Στις τεχνολογίες διασύνδεσης αποθηκευτικών μέσων συμπεριλαμβάνονται και ειδικές διατάξεις διασύνδεσης που έχουν στόχο την ασφάλεια των ψηφιακών δεδομένων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος διασφάλισης των δεδομένων σήμερα είναι αυτός της δημιουργίας συστοιχιών σκληρών δίσκων όπου με την τεχνική της δημιουργίας πλεονάζουσας πληροφορίας επιτυγχάνεται η αυτόματη δημιουργία αντιγράφων των δεδομένων με δυνατότητες ανάκτησης σε περίπτωση προβλήματος. Οι συστοιχίες αυτές ονομάζονται κοινώς Redundancy Array of Independent Disks ή απλώς RAID. Η τεχνική αυτή υποστηρίζεται από σκληρούς δίσκους των τεχνολογιών ATA, SATA, SCSI, SA-SCSI, FC. Οι περισσότερο διαδεδομένες διατάξεις διασύνδεσης είναι οι ακόλουθες (Εικόνα 81):

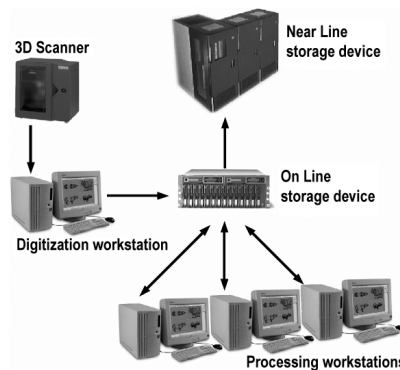
- RAID-0: υψηλή ταχύτητα, μέτρια ασφάλεια
- RAID-1: χαμηλή ταχύτητα, πολύ υψηλή ασφάλεια
- RAID-2: πολύ χαμηλή ταχύτητα, πολύ υψηλή ασφάλεια
- RAID-3: χαμηλή ταχύτητα, υψηλή ασφάλεια
- RAID-4: υψηλή ταχύτητα, υψηλή ασφάλεια
- RAID-5: υψηλή ταχύτητα, υψηλή ασφάλεια
- RAID-6: χαμηλή ταχύτητα, πολύ υψηλή ασφάλεια (= RAID-5 + RAID-4)
- RAID-10: υψηλή ταχύτητα, πολύ υψηλή ασφάλεια (= 2 RAID-0 κατά RAID-1)
- RAID-50: χαμηλή ταχύτητα, πάρα πολύ υψηλή ασφάλεια (= 2 RAID-5 σε διάταξη RAID-0)



Εικόνα 81. Διάφορες διατάξεις διασύνδεσης σκληρών δίσκων

4. Αποθήκευση 3Δ ψηφιακών δεδομένων

Τα δεδομένα που παράγονται με τη διαδικασία της τριδιάστατης ψηφιοποίησης είναι συνήθως υπό μορφή μεγάλων ψηφιακών αρχείων, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται και από το μέγεθος του ψηφιοποιημένου θέματος και την ανάλυση της ψηφιοποίησης [2]-[6]. Μια γραφική αναπαράσταση της χαρακτηριστικής ροής δεδομένων κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας τριδιάστατης ψηφιοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 82.



Εικόνα 82. Τυπική ροή δεδομένων σε ένα εργαστήριο ψηφιοποίησης

Το πρωτογενές υλικό της ψηφιοποίησης που αποδίδεται από τον εξοπλισμό τριδιάστατης ψηφιοποίησης (τριδιάστατοι σαρωτές), στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι διαθέσιμο σε format αρχείων που αναγνωρίζεται μόνο από το συγκεκριμένο λογισμικό του σαρωτή και αποθηκεύεται αρχικά σε τοπικό σκληρό δίσκο του τερματικού σταθμού ψηφιοποίησης. Κατόπιν, αυτό το πρωτογενές υλικό πρέπει να συλλεχθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία, προκειμένου να παραχθεί το προσδοκώμενο αποτέλεσμα, ανάλογα με την εφαρμογή. Λίγο πολύ, οι διαδικασίες που περιλαμβάνονται μετά από το τέλος της τριδιάστατης σάρωσης είναι:

- Αποθήκευση του πρωτογενούς υλικού για λόγους αρχειοθέτησης. Οι συνοδευτικές πληροφορίες μεταδεδομένων είναι υποχρεωτικές. Σε αυτή τη

φάση, τα στοιχεία είναι είτε σε μια ιδιόκτητη είτε σε τυποποιημένη μορφή. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δυνατότητες μετασχηματισμού σε άλλους τύπους δεδομένων, προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγάλη διάρκεια ζωής

- Δημιουργία μιας ενοποιημένη μορφής δεδομένων από το πρωτογενές υλικό, αντιπροσωπευτικής του ψηφιοποιημένου θέματος. Μεταδεδομένα θα πρέπει να περιλαμβάνονται στη μορφή αυτή, καθώς και δυνατότητες μετατροπής σε άλλες μορφές ψηφιακών δεδομένων
- Μετατροπή των αρχείων σε μορφές κοινά αποδεκτές για 3D εικόνες (π.χ. 3DS). Η αποθήκευση στη μορφή αυτή θα πρέπει και πάλι να περιλαμβάνει μεταδεδομένα. Ειδική μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται ώστε να μπορούν να αντιμετωπιστούν μελλοντικές αναβαθμίσεις υλικού και λογισμικού
- Περαιτέρω μετατροπή σε τύπους αρχείων με βάση ειδικές ανάγκες συγκεκριμένης εφαρμογής (π.χ. VRML για το Διαδίκτυο).

Σε συνάρτηση με την εφαρμογή, τα εμπλεκόμενα μεταδεδομένα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές ομάδες [7]-[9].

- Περιγραφικές πληροφορίες για το θέμα, όπως παρέχονται από το χρήστη (π.χ. μια περιγραφή του σχήματος)
- Πληροφορίες για τη διαχείριση των δεδομένων (π.χ. έλεγχος έκδοσης)
- Αλγοριθμική περιγραφή για τα δεδομένα (π.χ. περιγραφείς ή descriptors), για λόγους περιγραφής βάσει περιεχομένου και αυτόματη σημασιολογική αναζήτηση

Εν συνεχεία, η επιλογή συσκευής που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση των τεράστιου, συνήθως, όγκου ψηφιακών δεδομένων που προκύπτουν από την 3D ψηφιοποίηση, κατευθύνεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρόνος πρόσβασης δεδομένων: αναφέρεται στο χρόνο που καταναλώνεται για την πρόσβαση στα δεδομένα
- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από και προς τη μνήμη του υπολογιστή: αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μεταφέρονται τα δεδομένα από και προς τη μνήμη του υπολογιστή
- Πολλαπλή πρόσβαση: αναφέρεται στη δυνατότητα ή απαίτηση για την πολλαπλή και ταυτόχρονη πρόσβαση από πολλούς χρήστες
- Χωρητικότητα: αναφέρεται στη χωρητικότητα του μέσου αποθήκευσης
- Συχνότητα χρήσης: αναφέρεται στις απαιτήσεις συχνής χρήσης
- Διάρκεια του μέσου και των δεδομένων: αναφέρεται στη διάρκεια ζωής του αποθηκευτικού μέσου (εξαρτώμενη από τον τύπο και τον κατασκευαστή) και την απαιτούμενη διάρκεια ζωής των δεδομένων
- Συνθήκες αποθήκευσης και λειτουργίας: αναφέρεται σε ειδικές συνθήκες που είναι δυνατό ή επιβάλλονται να προταθούν
- Κόστος ανά μονάδα χωρητικότητας: αναφέρεται στο πραγματικό κόστος του συστήματος καθώς και το κόστος συντήρησης ανά μονάδα χωρητικότητας

Με στόχο τη διατήρηση μιας ψηφιακής συλλογής για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, θα πρέπει να ακολουθούνται οι προδιαγραφές που τίθενται από τους κατασκευαστές των αποθηκευτικών μέσων που επιλέγονται. Κατάλληλος χειρισμός και προστασία του μέσου είναι δύο σημαντικότεροι παράγοντες για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής του μέσου και, κατά συνέπεια, και της αποθηκευμένης πληροφορίας.

Μια καλή πρακτική για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της ψηφιακής πληροφορίας είναι η εφαρμογή μέτρων περιοδικών ελέγχων και δημιουργίας

αντιγράφων σε νεότερους τύπους του μέσου. Παρόλα αυτά, λόγω της πραγματικά φρενήρους ανάπτυξης του υλικού των υπολογιστών, τόσο οι συσκευές αποθήκευσης όσο και τα αποθηκευτικά μέσα καθίστανται ετεροχρονισμένα πριν ακόμη φτάσουν την ημιζωή τους. Έτσι, η μετάβαση δεδομένων σε δοκιμασμένες νέες λύσεις αποτελεί την καλύτερη πρακτική. Ο Πίνακας I δείχνει μερικά από τα χαρακτηριστικά των σημερινών αποθηκευτικών μέσων.

Πίνακας I. Χαρακτηριστικά των σημερινών αποθηκευτικών μέσων

Criteria	Score (max is better)				
	5	4	3	2	1
Capacity	Tape	HDD(**)	Rem.	DVD, M/O	CD, FDD, Flash
Data transfer rate	HDD	Rem.	DVD, CD, Flash	Tape, M/O	FDD
Data access time	Flash	HDD	Rem.	DVD, CD, FDD, M/O	Tape
Storage device cost	Tape, M/O	Rem.	HDD	DVD, CD	FDD, Flash
Cost / MB (Storage Unit)	DVD	Tape	HDD	Rem., CD, M/O, FDD	Flash
Re-writeability	HDD, Rem.	M/O, Tape	Flash, FDD	CD/DVD-RW	CD/DVD-R
Reliability	M/O, HDD, Rem.	DVD, CD	Tape	Flash, FDD	
Fields resistance	DVD, CD	Flash, M/O	HDD	Rem.	FDD, Tape
Portability	Flash	FDD, DVD, CD, Rem.	HDD, M/O	Tape	
Lifespan	HDD, DVD, CD, M/O	Rem, Tape		Flash	FDD
Sensitivity (*)	Flash	M/O	Tape, FDD	HDD, Rem.	CD, DVD

(*) Storage medium sensitivity to frequent and careless use

(**) Table Legend:

Tape	Magnetic tape
HDD	Hard disc drive
Rem	Removable hard magnetic disc
M/O	Magneto-Optical
FDD	Removable floppy magnetic disc
DVD	Digital Versatile Disc
CD	Compact Disc
Flash	Solid state flash memory

Οι απαιτήσεις αποθήκευσης που σχετίζονται με την 3Δ ψηφιοποίηση ανήκουν σε ένα εκτεταμένο πλαίσιο ψηφιακής αποθήκευσης και αρχειοθέτησης που σχετίζεται με τη διαχείριση των δεδομένων καθ' όλη την πορεία των εργασιών της αποτύπωσης. Δύο είναι οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη για την επιτυχή επιλογή τεχνική λύσης για την αποθήκευση:

- Ο πρώτος παράγοντας σχετίζεται με τον όγκο των δεδομένων που εμπλέκονται και εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας της ψηφιοποίησης, το μέγεθος του θέματος που ψηφιοποιείται και το πλήθος των χαρακτηριστικών που ψηφιοποιούνται (π.χ. 3Δ γεωμετρία, χρωματική πληροφορία στο ορατό ή σε μη-ορατό φάσμα, ογκομετρική πληροφορία, κοκ.). Η συχνότητα δειγματοληψίας της ψηφιοποίησης καθορίζει και το επίπεδο λεπτομέρειας που αποτυπώνεται. Εάν για παράδειγμα στόχος είναι η αποτύπωση λεπτομερειών σε τάξη μεγέθους του 1 mm στην επιφάνεια του αντικειμένου, τότε η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να συλλαμβάνει τουλάχιστον δείγματα ανά 1 mm (ακολουθώντας το νόμο δειγματοληψίας του Nyquist), λαμβάνοντας έτσι μια τουλάχιστον μέτρηση κάθε 0.5 mm. Κατά συνέπεια, 3Δ ψηφιοποίηση μιας επιφάνειας με εμβαδό 1 m² χρησιμοποιώντας συχνότητα δειγματοληψίας 0.5 mm και προς του δύο

άξονες (X, Y) παράγει 4.000.000 δείγματα. Το πλήθος των δειγμάτων ισούται με το πλήθος των 3Δ κορυφών (vertices) που καθορίζουν κάθε σημείο στο νέφος σημείων που παράγεται κατά τη σάρωση και αντιπροσωπεύει το πρωτογενές 3Δ ψηφιακό υλικό. Μια 3Δ κορυφή (vertex) περιγράφεται από τρεις πραγματικούς αριθμούς που περιγράφουν μια θέση σε 3Δ καρτεσιανό χώρο. Με δεδομένο ότι ένας πραγματικός αριθμός απαιτεί συνήθως 64 bits ή 8 bytes για να παρασταθεί, συνεπάγεται ότι ο αποθηκευτικό χώρος που απαιτείται για την αποθήκευση του πρωτογενούς ψηφιακού υλικού που προκύπτει από την 3Δ ψηφιοποίηση της γεωμετρίας μιας επίπεδης επιφάνειας 1 m² που έχει ψηφιοποιηθεί με δειγματοληψία κάθε 0.5 mm (X και Y), είναι $8 \times 3 \times 4.000.000$ (bytes x διάσταση x δείγματα) = 96.000.000 bytes (περίπου 92 Mbytes).

- Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας για την επιλογή κατάλληλου ψηφιακού μέσου αποθήκευσης είναι το πλήθος χρηστών που θα έχουν πρόσβαση στα δεδομένα καθώς και ο τρόπος που τα δεδομένα αυτά θα είναι διαθέσιμα. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος χρηστών που αιτούνται πρόσβασης στα δεδομένα τόσο περισσότερο προσαρμοστική πρέπει να είναι η λύση. Όσο περισσότερο επείγουσα η πρόσβαση, τόσο περισσότερο γρήγορο πρέπει να είναι το μέσο. Με βάση αυτή την παρατήρηση, μια επιλογή αποσπώμενου μέσου θα ήταν κατάλληλη για σπάνια πρόσβαση από 1 έως 5 χρήστες κάθε φορά. Από την άλλη πλευρά, επιλογές on-line ή near-line αποθήκευσης είναι περισσότερο κατάλληλες για συχνή δικτυακή πρόσβαση

Περαιτέρω, στην περίπτωση κατά την οποία η επιλογή του συστήματος αποθήκευσης δεν περιορίζει την κατά λάθος διαγραφή δεδομένων, μια επιπρόσθετη επιλογή συστήματος δημιουργίας αντιγράφων είναι επιτακτική. Η επιλογή αυτή μπορεί είτε να βασίζεται στην ίδια τεχνολογία είτε σε διαφορετική.

Η αποθήκευση 3Δ ψηφιακών δεδομένων εισάγει ειδικές απαιτήσεις κατά την ψηφιακή αποτύπωση αλλά και στη συνέχεια. Είναι, βέβαια, δυνατό να προταθούν τυπικά συστήματα και μεθοδολογίες για την ικανοποίηση των ειδικών αυτών απαιτήσεων:

- *Φάση σύλληψης και αποθήκευσης του πρωτογενούς ψηφιακού υλικού:* Κατά τη φάση αυτή, παρουσιάζεται ένας τεράστιος όγκος δεδομένων που κινείται από τη συσκευή ψηφιοποίησης προς το σύστημα αποθήκευσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση σκληρού δίσκου είναι ικανοποιητική, όταν συνοδεύεται και από δεύτερο σκληρό δίσκο (με τα ίδια χαρακτηριστικά), ο οποίος θα παρέχει δυνατότητες αντιγράφων ασφαλείας κατά προτίμηση σε συνδεσμολογία RAID-1. Σήμερα, η οικονομικότερη επιλογή αποθήκευσης κατά τη φάση αυτή είναι η χρήση DVD (το οποίο είναι ένα μέσο με ικανοποιητικά χαρακτηριστικά πρόσβασης, διάρκειας ζωής και χαμηλού κόστους).
- *Φάση επεξεργασίας του πρωτογενούς υλικού:* Κατά τη φάση αυτή το πρωτογενές υλικό υφίσταται επεξεργασία για την παραγωγή μιας πλήρους 3Δ αναπαράστασης του θέματος. Αυτό επιβάλλεται γιατί συνήθως μια συσκευή 3Δ ψηφιοποίησης δε συλλαμβάνει το θέμα με μία μόνο σάρωση αλλά με σειρά σαρώσεων από διαφορετικές θέσεις και γωνίες, ψηφιοποιώντας ένα μικρό τμήμα της συνολικής επιφάνειας κάθε φορά. Έτσι, στη φάση αυτή πρέπει να γίνει μια ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων. Ως αποτέλεσμα, το μέγεθος του τελικού παραγόμενου αρχείου μπορεί να αυξηθεί κατά πολλά Gigabytes. Για παράδειγμα, η 3Δ ψηφιοποίηση του αγάλματος του Michelangelo "David" οδήγησε στη δημιουργία ενός 3Δ μοντέλου 2

δισεκατομμυρίων πολυγώνων με αντίστοιχο όγκο δεδομένων 48 Gigabytes [10]. Ακόμη και εάν αυτά τα μεγέθη φαντάζουν πλέον μικρά για τα μοντέρνα συστήματα αποθήκευσης, οι υπολογιστές που μπορούν να επεξεργαστούν ένα τέτοιο όγκο δεδομένων στη μνήμη τους κατατάσσονται ακόμη στην κατηγορία των υπερ-υπολογιστών. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές. Πρέπει να σημειωθεί ότι η φάση αυτή είναι η περισσότερη απαιτητική για ισχύ τόσο από την πλευρά του υπολογιστή όσο και από την πλευρά του χρήστη.

- *Φάση διανομής του ψηφιακού προϊόντος:* Η φάση αυτή σχετίζεται με τον τρόπο διανομής ή διάχυσης του 3D ψηφιακού προϊόντος. Στην περίπτωση κατά την οποία το προϊόν θα διανεμηθεί στο κοινό μέσω του Διαδικτύου και μέσω γραμμής υψηλής ταχύτητας, τότε η επιλογή της δικτυακής αποθήκευσης είναι συνήθως κατάλληλη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει γραμμή μετάδοσης υψηλής ταχύτητας μια περισσότερο κατάλληλη μέθοδος είναι η χρήση οπτικών μέσων (CD/DVD-ROMs). Σε κάθε περίπτωση, προτείνεται να εφαρμοστεί τεχνική συμπίεσης δεδομένων για τη σημαντική ελάττωση του όγκου δεδομένων, την οικονομία αποθηκευτικού χώρου και τη μείωση του χρόνου μετάδοσης. Επιπλέον, συμπληρωματικά με τη διανομή ψηφιακών αντιγράφων του προϊόντος, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής φυσικών 3D αντιγράφων με τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών (3D εκτύπωση - printing/milling).

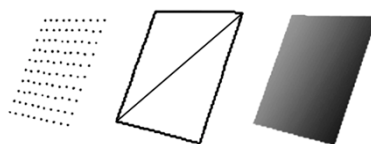
5. Περιγραφή των 3D ψηφιακών δεδομένων

Η βασικότερη λειτουργία των συσκευών τριδιάστατης σάρωσης είναι η ψηφιακή καταγραφή της γεωμετρίας κάποιου αντικειμένου. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με πάρα πολλούς τρόπους, οι περισσότεροι από τους οποίους όμως έχουν σαν αποτέλεσμα την καταγραφή των τριδιάστατων συντεταγμένων πολλών μεμονωμένων σημείων που ανήκουν στην επιφάνεια του αντικειμένου της ψηφιοποίησης. Αυτά τα μεμονωμένα τριδιάστατα σημεία αποτελούν το πρωτογενές προϊόν της τριδιάστατης ψηφιοποίησης και είναι γνωστά ως νέφος σημείων (point cloud). Αναλόγως των απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής, τα σημεία αυτά είτε χρησιμοποιούνται ως έχουν, είτε γίνονται η πρώτη ύλη για την παραγωγή μιας μεγάλης σειράς δευτερογενή προϊόντων.

Για τις περισσότερες εφαρμογές τριδιάστατης απεικόνισης, η οπτική πληροφορία που προσφέρει το νέφος σημείων από μόνο του συνήθως δεν επαρκεί, όσο πυκνό και αν είναι, αφού αυτό που απεικονίζεται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι ένα πλήθος κουκκίδων. Η οπτική απόδοση του νέφους σημείων εφαρμόζονταν ευρέως στην απαρχή των τριδιάστατων γραφικών μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπου οι επιδόσεις των ηλεκτρονικών υπολογιστών ήταν ακόμα πολύ χαμηλές για να απεικονίσουν κάτι περισσότερο. Την εποχή εκείνη είχαν εφευρεθεί διάφορα τεχνάσματα που στόχο είχαν να διευκολύνουν το χρήστη στην κατανόηση της οπτικής πληροφορία του νέφους σημείων. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά ήταν η κλιμάκωση της φωτεινότητας ή του μεγέθους των σημείων, ανάλογα με την απόστασή τους από το επίπεδο προβολής τους (οθόνη). Στην εποχή μας όμως, η ισχύς των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι σε θέση να διαχειριστεί πολύ πιο πολύπλοκες γραφικές αναπαραστάσεις και έτσι η τριδιάστατη απεικόνιση του νέφους σημείων αυτού καθ'εαυτού δεν έχει νόημα παρά μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις, όπως είναι για παράδειγμα αυτή της πραγματικού χρόνου απεικόνισης πολύπλοκων και λεπτομερή θεμάτων. Σήμερα, στις περισσότερες εφαρμογές τριδιάστατης

απεικόνισης, γίνεται χρήση του τριγωνικού πλέγματος (triangular mesh) το οποίο είναι σε θέση να παρέχει στο χρήστη πολύ περισσότερη οπτική πληροφόρηση απ' ότι το νέφος σημείων, ακόμα και στην πιο απλή του μορφή της «συρμάτινης κατασκευής» (wire frame).

Η Εικόνα 83 παρουσιάζει μια επίπεδη επιφάνεια σε 3Δ χώρο με τη μορφή νέφους σημείων, τριγωνικού πλέγματος και φωτοσκιασμένης επιφάνειας, ενώ η Εικόνα 84 παρουσιάζει μια αναπαράσταση 3Δ αντικειμένου αντίστοιχα ως νέφος σημείων, τριγωνικό πλέγμα και φωτοσκιασμένο στερεό.



Εικόνα 83. Περιγραφή μιας επίπεδης επιφάνειας σε 3Δ χώρο ως σημεία (νέφος 100 σημείων), ως τρίγωνα και ως φωτοσκιασμένη επιφάνεια



Εικόνα 84. Εικονική αναπαράσταση 3Δ αντικειμένου ως νέφος σημείων, πλέγμα τριγώνων και φωτοσκιασμένο στερεό

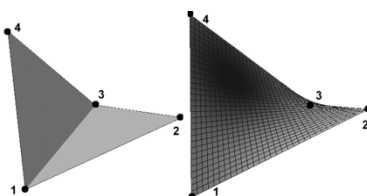
Το τριγωνικό πλέγμα είναι το κυριότερο παράγωγο του πρωτογενούς υλικού της τριδιάστατης σάρωσης, δηλαδή του νέφους σημείων, και προκύπτει από τη διαδικασία της τριγωνοποίησης. Κατά τη διαδικασία αυτή, όλα τα τριδιάστατα σημεία, που συλλέχθηκαν από την τριδιάστατη σάρωση, ενώνονται με όλους τους γείτονές τους σχηματίζοντας έτσι ένα πλέγμα τριγώνων, το οποίο περιγράφει τις επιφάνειες του ψηφιοποιημένου αντικειμένου. Η επιπρόσθετη πληροφορία της τριγωνοποίησης, δηλαδή ποια σημεία ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας τρίγωνα, μπορεί να αποθηκευτεί είτε ως συμπληρωματική της πληροφορίας των τριδιάστατων συντεταγμένων των σημείων, ορίζοντας ποια τρία σημεία απαρτίζουν κάθε τρίγωνο του πλέγματος, είτε ανεξάρτητα από αυτή, εκφράζοντας τις τριδιάστατες συντεταγμένες των τριγώνων του πλέγματος. Η περιγραφή του τριγωνικού πλέγματος με άμεσο ορισμό των τριδιάστατων συντεταγμένων των τριγώνων, η οποία είναι γνωστή και ως «ακατέργαστη» (RAW), είναι η πιο ακατέργαστη και ασύμφορη μορφή περιγραφής του πλέγματος και έχει σταματήσει να χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια.

Οι ανάγκες του τριγωνοποιημένου νέφους σημείων σε χώρους ψηφιακής αποθήκευσης σαφώς είναι πολύ πιο μεγαλύτερη από αυτή του μη τριγωνοποιημένου, αφού εκτός από τις συντεταγμένες των σημείων αποθηκεύεται και η μεταξύ τους διασύνδεση. Ωστόσο, οι αυξημένες απαιτήσεις σε αποθηκευτικούς χώρους του τριγωνοποιημένου νέφους σημείων, μπορούν κάλλιστα να αντισταθμιστούν από την πληρότητα της τριδιάστατης απεικόνισης του θέματος, όπως επίσης και από τη δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας των δεδομένων για μείωση του όγκου τους, μέσω τεχνικών απλοποίησης της γεωμετρίας. Η περιγραφή και απεικόνιση της τριδιάστατης μορφής κάποιου θέματος, κάνοντας χρήση τριγωνικού πλέγματος, είναι πολύ πιο αποδοτική σε σχέση με την αντίστοιχη του νέφους σημείων, αφού η περιγραφή εκτεταμένων επίπεδων επιφανειών μπορεί να επιτευχθεί με πολύ λιγότερη πληροφορία απ' ότι περιγράφοντάς τη με νέφος σημείων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση χρήσης τριγωνικού πλέγματος, η επιφάνεια μιας πλευρά ενός κύβου μπορεί να περιγραφεί και να απεικονιστεί στο χώρο μόνο με τέσσερα σημεία που σχηματίζουν δύο τριδιάστατα τρίγωνα. Στην περίπτωση περιγραφής της με νέφος σημείων, ακόμα και τα 100

σημεία θα ήταν λίγα ώστε να αποδώσουν σωστά, δηλαδή με την ίδια οπτική πυκνότητα, την επιφάνεια της πλευράς του κύβου, απαιτώντας από το χρήστη να σχηματίσει την εικόνα της εγκεφαλικά.

Εκτός από το τριγωνικό πλέγμα, έχουν κάνει την εμφάνισή τους και άλλες μορφές περιγραφής τριδιάστατης γεωμετρίας, που στόχο έχουν την όσο το δυνατό πιο αποδοτική περιγραφή της γεωμετρίας κάποιου θέματος. Η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι η περιγραφή της γεωμετρίας κάνοντας χρήση παραμετρικών επιφανειών που περιγράφονται από καμπύλες γραμμές τύπου Basic-Spline. Οι παραμετρικές επιφάνειες παρέχουν τη δυνατότητα περιγραφής ομαλών καμπύλων επιφανειών μέσω πολύ λίγων σημείων ελέγχου. Αντιθέτως, η ρητή περιγραφή μιας καμπύλης επιφάνειας, κάνοντας χρήση κοινού τριγωνικού πλέγματος, θα απαιτούσε πολύ περισσότερα σημεία για την περιγραφή της, χωρίς εν τέλη να είναι αυτά αρκετά για την ομαλή απεικόνισή της καμπύλης. Μέσω ειδικού λογισμικού είναι δυνατή η κωδικοποίηση κάποιου τριγωνικού πλέγματος ή και του ίδιου του νέφους σημείων σε παραμετρικές καμπύλες, επιφέροντας έτσι σε μεγάλο πλήθος περιπτώσεων αξιολογή μείωση των δεδομένων περιγραφής της τριδιάστατης γεωμετρίας [11]-[15].

Στην Εικόνα 85 παρουσιάζεται πώς μια απλή επιφάνεια μπορεί να αναπαρασταθεί από σημεία και παραμετρικές επιφάνειες. Όπως είναι εμφανές η παραμετρική περιγραφή οδηγεί σε πιο ομαλές αναπαραστάσεις των επιφανειών.



Εικόνα 85. Περιγραφή μιας επιφάνειας μέσω τεσσάρων σημείων κορυφών και παραμετρική περιγραφή επιφάνειας

6. Τύποι αρχείων 3Δ δεδομένων

Ο τρόπος με τον οποίο περιγράφεται η γεωμετρία κάποιου αντικειμένου και οι επιπλέον πληροφορίες σχετικά με αυτή, όπως για παράδειγμα οι συντεταγμένες που ορίζουν τη θέση της υψής σε σχέση με τη γεωμετρία, καθορίζονται από τη φόρμα του αρχείου αποθήκευσης της πληροφορίας αυτής.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι τύποι αρχείων για την αποθήκευση τριδιάστατων θεμάτων αριθμούν περί τους 40, ενώ ο αριθμός τους συνεχώς αυξάνεται. Ένας γενικός διαχωρισμός που μπορεί να γίνει έτσι ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία επιλογής της πιο κατάλληλης λύσης, είναι αυτός μεταξύ των αρχείων όπου η πληροφορία αποθηκεύεται στη μορφή κειμένου και των αρχείων όπου η πληροφορία αποθηκεύεται σε δυαδική μορφή. Η αποθήκευση της πληροφορίας που αφορά την περιγραφή ενός θέματος σε τρεις διαστάσεις, όταν υλοποιείται σε μορφή κειμένου καταλαμβάνει πολύ περισσότερο αποθηκευτικό χώρο απ' ότι θα καταλάμβανε σε δυαδική μορφή, για το λόγο ότι οι αριθμοί που δηλώνουν τις τριδιάστατες συντεταγμένες της πληροφορίας εκφράζονται με χαρακτήρες, δηλαδή κείμενο αναγνώσιμο από τον άνθρωπο, με συνέπεια ένας αριθμός να καταλαμβάνει τόσα byte αποθηκευτικού χώρου όσα είναι τα ψηφία του. Για παράδειγμα ο αριθμός 255 δυαδικά εκφράζεται με 1 Byte (ή 8 bit – '1111111'), ενώ όταν εκφράζεται σε μορφή κείμενο απαιτεί 3 byte (3 χαρακτήρες), καταλαμβάνοντας έτσι 3 φορές περισσότερο αποθηκευτικό χώρο

Πέρα από τον παραπάνω βασικό διαχωρισμό, από τον οποίο εξαρτάται το μέγεθος του απαιτούμενου αποθηκευτικού χώρου, η επιλογή της φόρμας με την οποία θα

υλοποιηθεί η αποθήκευση της ψηφιοποιημένης πληροφορίας είναι καθοριστική τόσο για τη βιωσιμότητα της πληροφορίας αυτής, όσο και για τη συμβατότητά της με τα διάφορα πακέτα λογισμικού. Επίσης, εξίσου καθοριστικός για την επιλογή του τύπου αρχείου αποθήκευσης, είναι και ο τρόπος με τον οποίο περιγράφεται η τριδιάστατη γεωμετρία κάποιου θέματος, διότι η υποστήριξη κάποιων εξελιγμένων χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα οι παραμετρικές επιφάνειες, μπορεί να μην απαντάται σε κάποιους τύπους αρχείων. Για τους παραπάνω λόγους, η αποκλειστική χρήση κάποιου μη διαδεδομένου τύπου αρχείου πρέπει να αποφεύγεται, αφού είναι πιθανό στο μέλλον να σταματήσει η υποστήριξή του και να εξαφανιστεί. Αντιθέτως, η μετατροπή και αποθήκευση της πληροφορίας σε περισσότερους του ενός κοινά αποδεκτούς τύπους αρχείων και η περιοδική μετανάστευσή της σε πιο σύγχρονους, αποτελεί μια εγγυημένη λύση διατήρησής της.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του αρχείου αποθήκευσης του τελικού προϊόντος της τριδιάστατης σάρωσης, για λόγους αρχειακής αποθήκευσης, είναι τα εξής:

- Δυναμική αποθήκευση της πληροφορίας για μείωση του όγκου των δεδομένων.
- Περιγραφή των τριδιάστατων επιφανειών τουλάχιστον με πολύγωνα. Επιθυμητή είναι η υποστήριξη παραμετρικών επιφανειών, έτσι ώστε μέσω του κατάλληλου λογισμικού να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση των δεδομένων.
- Τουλάχιστον από ένα ζεύγος συντεταγμένων για κάθε τριδιάστατο σημείο της γεωμετρίας, για την εφαρμογή μιας ή περισσότερων εικόνων υφής.
- Δυνατότητα αναγνώρισης από δημοφιλή εφαρμογές του είδους, όπως για παράδειγμα λογισμικό τριδιάστατης μοντελοποίησης και κίνησης, φωτορεαλιστικής απόδοσης, μετατροπής σε άλλους τύπους αρχείων (format) και λοιπά.

Όσον αφορά τη χρήση των δεδομένων αυτών σε εφαρμογές ειδικού τύπου, όπως είναι για παράδειγμα η προβολή μέσω του διαδικτύου και η πραγματικού χρόνου, διαδραστική παρουσίασή της, συνιστάται η επιπλέον μετατροπή της σε μορφές αρχείων περισσότερο κατάλληλες για τις εφαρμογές αυτές. Τα βασικά κριτήρια επιλογής αρχείου αποθήκευσης που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για εφαρμογές τέτοιου είδους, εν μέρη περιγράφηκαν παραπάνω. Παρόλα αυτά, οι ιδιαίτερες απαιτήσεις της τριδιάστατης απεικόνισης πραγματικού χρόνου και η πιθανή μεταφορά της πληροφορία μέσω του διαδικτύου, ή κάποιου άλλου αργού δίαυλου επικοινωνίας, προτρέπουν στη χρήση ειδικών τύπων αρχείων με τα εξής ιδιαίτερα χαρακτηριστικά:

- Επίπεδο λεπτομέρειας (LOD-Level of Detail) συνεχόμενο ή προκαθορισμένο. Το χαρακτηριστικό αυτό αφορά την τριδιάστατη απεικόνιση του θέματος σε πραγματικό χρόνο και σχετίζεται με την ποσότητα των πολύγωνων που περιγράφουν το θέμα (λεπτομέρεια), κάθε φορά που αυτό αποδίδεται γραφικά στην οθόνη του Η/Υ, ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου από τη θέση της ιδεατής κάμερας και κατά συνέπεια της επιφάνειας που αυτό καταλαμβάνει στην οθόνη του Η/Υ. Έτσι, όσο πιο μικρή είναι η επιφάνεια που καταλαμβάνει το θέμα στην οθόνη του υπολογιστή, τόσο λιγότερη είναι η οπτική πληροφορία που μπορεί να αποδοθεί σε αυτή και συνεπώς τόσο πιο απαραίτητη είναι η χρήση λιγότερων πολύγωνων για την οπτική απόδοσή του θέματος. Η τεχνική αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη οπτική απόδοση της τριδιάστατης σκηνής και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ιδεατών περιπάτων.
- Βαθμιαίο φόρτωμα και απεικόνιση της πληροφορίας. Αφορά την έκφραση της πληροφορίας με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη μεταφόρτωσή της, όσο χρονοβόρα και αν είναι αυτή, να καθιστάτε εφικτή η απεικόνιση ολόκληρου

του θέματος ακόμα και από τα πρώτα στάδια της διαδικασίας. Με την τεχνική αυτή, η απόδοση του θέματος στην αρχή είναι χονδρική και με το χρόνο, καθώς γίνονται διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα, αποκτά σταδιακά όλο και περισσότερη λεπτομέρεια.


- Συμπίεση και κωδικοποίηση της πληροφορίας για περαιτέρω μείωση του όγκου που καταλαμβάνει και συνεπώς του όγκου που πρέπει να μεταφερθεί μέσω του διαδικτύου.
- Μηχανισμούς διασφάλισης της πνευματικής ιδιοκτησίας των δεδομένων, μέσω υδατογραφίας ή άλλων τεχνικών, και περιορισμού της χρήσης τους μόνο για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό (π.χ. μόνο για τη θέαση μέσω κάποιου συγκεκριμένου λογισμικού).

Ο Πίνακας II παρουσιάζει συγκεντρωτικά τους πιο διαδεδομένους τύπους αρχείων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση 3D εικόνων μαζί με τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους. Ο Πίνακας III παρουσιάζει ένα παράδειγμα των διαφορετικών μεγεθών αρχείου που είναι δυνατό να προκύψουν από την επιλογή συγκεκριμένου τύπου αρχείου αποθήκευσης. Δώδεκα τύποι αρχείων χρησιμοποιήθηκαν για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου 3D μοντέλου (1.087.716 τρίγωνα). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μέγεθος αρχείου διαφοροποιείται πολύ σημαντικά από τη μία μορφή στην άλλη. Στον Πίνακα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ταξινομημένα σε αύξουσα σειρά μεγέθους αρχείου. Τα ίδια 3D δεδομένα μπορούν απολύτως αντίστοιχα να περιγραφούν με 22 Mbytes (3DS format) και με 229 Mbytes (DXF format).

Πίνακας II. Διάφοροι τύποι αρχείων 3D εικόνων και τα χαρακτηριστικά τους

File Type	Storage mode	Description of 3D data	Texture coordinates	Adoption	Level of detail	Progressive loading	Compression	Security
3D Studio (3DS)	Binary	Triangles	Yes	High	No	No	No	Medium
3D Studio ASCII (ASC)	Text	Triangles	Yes	High	No	No	No	None
3D Studio Max ASCII (ASE)	Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
3D Studio Max (MAX)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
Alias FBX (FBX)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium-High	No	No	No	Medium
AOFF (GEO)	Text	Triangles	No	Low	No	No	No	None
AutoCAD (DXB, DXF)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	No	High	No	No	No	None
Caligari true space (COB)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium	No	No	No	None
CINEMA 4D (C4D)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium	No	No	No	None
DirectX (X)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
Electric Image (FACT)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium	No	No	No	None
Imagine (IOB)	Binary	Triangles	Yes	Low	No	No	No	None
Initial Graphics Exchange Specific (IGS)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	No	Low	No	No	No	None
ISO G-Code (ISO, NC)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	No	Low	No	No	No	None
LightWave3D (LWO, LW)	Binary	Triangles	Yes	High	No	No	No	None
Maya ASCII (MA)	Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
Maya ASCII (MB)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
Metacreation Metastream (MTS)	Binary	Triangles	Yes	Low	Yes	Yes	Yes	Medium
Nendo (NDO)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Low	No	No	No	None
NGRAIN (NGN, NGW)	Binary	Voxels	No	Low	No	No	Yes	Good
Object File Format (OFF)	Text	Triangles	No	Low	No	No	No	None
OpenFlight (FL T)	Binary	Triangles	Yes	Medium	Yes	No	No	None
Open Inventor (IV)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium/Low	Yes/No	Yes/No	Yes/No	None/Medium
Polygon Model (PLY)	Binary/Text	Triangles	Yes	Medium	No	No	No	None
POV-Ray RAW Triangle Format (RAW)	Text	Triangles	No	Medium	No	No	No	None
Power Render Object (PRO)	Binary	Triangles	Yes	Medium	No	No	No	None
Points File (PTS)	Text	Voxels	No	Low	No	No	No	None
Extended raw triangles (RAX)	Text	Τρίγωνα	Yes	Low	No	No	No	None
Rhinoceros (3DM)	Binary	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
Shockwave 3D (W3D)	Binary	Triangles Parametric surfaces	Yes	Medium	Yes (minimal)	Yes (minimal)	No	None
Softimage (XSI)	Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium	No	No	No	None
Stereo Lithography (STL)	Binary/Text	Triangles	No	Medium	No	No	No	None
Stripe (OBJF)	Text	Triangles	Yes	Medium	No	No	No	None
Universal 3D (U3D)	Binary	Triangles	Yes	High (expected)	Yes	Yes	Yes	None
Viewpoint (VPP)	Binary	Triangles	Yes	Low	Yes	Yes	No	Medium
Virtual Reality Modelling Language (WRL)	Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	Yes (minimal)	Yes (minimal)	Yes (gzip)	None
Wavefront (OBJ)	Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	High	No	No	No	None
X3D (X3D)	Binary/Text	Triangles & Parametric surfaces	Yes	Medium/High (expect.)	Yes (minimal)	Yes (MPEG4)	Yes	Medium
XGL (XGL)	Text	Triangles	Yes	Low	No	No	No	None

Πίνακας III. Πειραματική επιβεβαίωση της επίπτωσης της επιλογής τύπου αρχείου αποθήκευσης στον αποθηκευτικό χώρο

	<i>Triangles: 1087716</i>	
	File type	Size (MB)
	3DS	22
	LWO	27
	COB	38
	OBJ	38
	OFF	38
	PLY	42
	PEO	69
	RAW	76
	X	90
	WRL	125
	ASC	130
	DXF	229

7. Βέλτιστες πρακτικές στη διαχείριση, πρόσβαση και ανάκτηση 3Δ δεδομένων

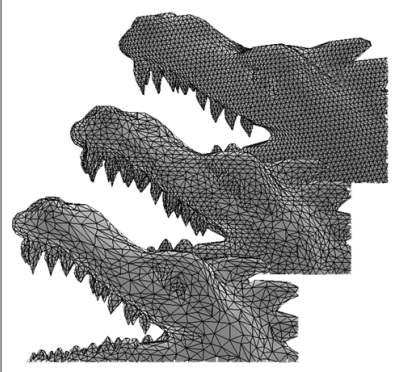
Τα ακατέργαστα δεδομένα που παράγονται κατά την τριδιάστατη ψηφιοποίηση συνήθως είναι πολλά ανεξάρτητα αρχεία, τα οποία βρίσκονται στον τοπικό σκληρό δίσκο του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά τις περισσότερες φορές είναι αναγνώσιμα μόνο από το συγκεκριμένο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση, καθιστώντας τα έτσι σχεδόν άχρηστα για άλλες εφαρμογές. Αυτά τα ακατέργαστα δεδομένα αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή μιας μεγάλης σειράς καινούργιων δεδομένων, εξίσου ογκώδη και πολύπλοκων, τα οποία με τη σειρά τους δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο τη σωστή διαχείριση της παραγόμενης από τη σάρωση πληροφορίας. Αν δε δοθεί η πρέπουσα προσοχή στη διαχείριση του τεράστιου όγκου πληροφορίας που παράγεται κατά την τριδιάστατη ψηφιοποίηση κάποιου θέματος ή κάποιας συλλογής θεμάτων, είναι πιθανό να προκληθεί μεγάλη σύγχυση τόσο στην πρόσβαση της πληροφορίας αυτής, όσο και στην ανάκτησή της, καθιστώντας τη ουσιαστικά άχρηστη.

Για την εξασφάλιση της εύχρηστης αρχειοθέτησης της πληροφορίας, πρέπει να καταστρωθεί η κατάλληλη στρατηγική διαχείρισής της. Συνήθως, μετά την ψηφιοποίηση τα πρωτογενή δεδομένα πρέπει να συγκεντρωθούν και να τροποποιηθούν, ώστε να δώσουν το αποτέλεσμα που απαιτείται από την κάθε εφαρμογή. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ενέργειες που απαιτούνται μετά το πέρας της διαδικασίας της τριδιάστατης ψηφιοποίησης κάποιου θέματος είναι:

- Η αποθήκευση του πρωτογενούς υλικού για αρχειακούς λόγους, το οποίο υποχρεωτικά πρέπει να συνοδεύεται από τα κατάλληλα μεταδεδομένα.
- Η επεξεργασία του πρωτογενούς υλικού για την παραγωγή μίας ενιαίας φόρμας, αντιπροσωπευτικής του ψηφιοποιημένου θέματος. Η αποθήκευσή της θα πρέπει υποχρεωτικά να συνοδεύεται από μεταδεδομένα επίσης.
- Η μετατροπή του τελικού προϊόντος από το 2ο στάδιο σε τύπους αρχείων που έχουν καθιερωθεί στην βιομηχανία των τριδιάστατων γραφικών. Η αποθήκευση με μεταδεδομένα και εδώ δεν πρέπει να παραλείπεται.
- Η περαιτέρω μετατροπή για τις ανάγκες της τελικής εφαρμογής (π.χ. μείωση της ανάλυσης και μετατροπή σε ιδικό τύπου αρχείου για προβολή μέσω του διαδικτύου). Ένα παράδειγμα τέτοια επεξεργασίας θα μπορούσε να είναι η απλοποίηση της 3Δ γεωμετρίας με στόχο την ελάττωση των απαιτήσεων για αποθηκευτικό χώρο με ταυτόχρονη μείωση του όγκου πληροφορίας όταν δεν

απαιτείται από την εφαρμογή, όπως ο Πίνακας III παρουσιάζει. Στον Πίνακα αυτό, το αρχικό 3D μοντέλο απλοποιείται σε δύο βήματα λαμβάνοντας ένα ενδιάμεσο στάδιο για λόγους σύγκρισης. Το πείραμα επαναλαμβάνεται για διάφορους τύπους αρχείων αποθήκευσης και στον Πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται τόσο ως προς το πλήθος των τριγώνων που προκύπτουν όσο και το μέγεθος του αρχείου αποθήκευσης.

Πίνακας III. Η απλοποίηση γεωμετρίας ως διαδικασία ελάττωσης του απαιτούμενου αποθηκευτικού χώρου

	<i>Geometry accuracy</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
	<i>Triangles used</i>	108588	54294	10859
	File Type	Size (MB)	Size (MB)	Size (MB)
	3DS	2	1	0.2
	OFF	3	1.5	0.3
	OBJ	3.5	2	0.4
	X	8	4	0.8
	RAW	6.5	3.5	0.8
	ASC	12	6	1.2
	DXF	23	11.5	2.3

7.1. Διαχείριση τριδιάστατων ψηφιακών δεδομένων

Η διαχείριση των δεδομένων που παράγονται από την τριδιάστατη καταγραφή κάποιου θέματος, προϋποθέτει την ακολουθία αποφάσεων που αφορούν τόσο τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η διαχείριση τους όσο και στον τρόπο με τον οποίο αυτά θα περιγραφούν. Η διαχείριση των δεδομένων εξαρτάτε από τον τρόπο που αυτά δημιουργούνται και τροφοδοτούνται στη συλλογή, όπως για παράδειγμα τον τύπο του αρχείου, τη συνοδευτική τεκμηρίωσή της πληροφορίας και τους όρους με τους οποίους θα γίνει διαθέσιμη (πχ. δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας κλπ.)

Ο τρόπος με τον οποίο μορφοποιείται η πληροφορία, δηλαδή σε τι τύπο μέσου είναι αποθηκευμένη, με ποιο τύπο αρχείου, αν είναι συμπιεσμένη η κωδικοποιημένη και λοιπά, καθορίζει άμεσα τη φορητότητά της, τόσο σε επίπεδο τεχνικο-μηχανικού εξοπλισμού, όσο και σε επίπεδο λογισμικού.

Η περιγραφή/τεκμηρίωση που συνοδεύει τα δεδομένα της ψηφιακής συλλογής προσδιορίζεται με άλλες δυο κατηγορίες. Η πρώτη είναι αυτή που αφορά τον τρόπο με τον οποίο δημιουργήθηκαν τα δεδομένα και πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα εγχειρίδιο χρήσης, απαιτήσεις σε λογισμικό κλπ. Η δεύτερη κατηγορία αφορά την τεκμηρίωση των ίδιων των δεδομένων με πληροφορία σχετικά με το περιεχόμενό τους, όπως περιγραφή του αντικειμένου, προέλευση κλπ. η οποία χρησιμεύει στον διαχωρισμό του αντικειμένου από το πλήθος μιας συλλογής. Η πληροφορία τεκμηρίωσης της δεύτερης κατηγορίας είναι γνωστή με τον όρο μεταδεδομένα και θα γίνει εκτενέστερη αναφορά παρακάτω.

Οι όροι χρήσης της πληροφορίας σχετίζονται με τους περιορισμούς που τυχόν θέτει ο προμηθευτής του αρχειακού υλικού, λόγω πνευματικών δικαιωμάτων κλπ. Η διασφάλιση της ορθής χρήσης και η τήρηση των όρων που θέτει ο προμηθευτής της συλλογής είναι εφικτή μέσω μεθόδων «υδατοσήμανσης» (watermarking) αλλά και διαχείρισης των δικαιωμάτων πρόσβασης στα δεδομένα. Για παράδειγμα ένα τμήμα μιας συλλογής κάποιου μουσείου μπορεί να είναι ελεύθερα προσβάσιμο από όλους, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της να είναι προσβάσιμο μόνο μέσω συνδρομής.

Η φυσική αποθήκευση της πληροφορίας είναι επίσης ένα σημαντικό μέρος της διαχείρισής της, αφού από αυτή εξαρτώνται τόσο η καλή λειτουργικότητα του ψηφιακού αρχείου, όσο και η μακροζωία του. Η φυσική αποθήκευση της πληροφορίας περιλαμβάνει διαδικασίες όπως:

1. Περιοδικούς ελέγχους πληρότητας, λειτουργικότητας και συνοχής των πόρων του ψηφιακού αρχείου.
2. Ανανέωση των φυσικών μέσων στα οποία είναι αποθηκευμένο το αρχείο. Για την αποφυγή απώλειας δεδομένων λόγω ασταθούς συμπεριφοράς του μέσου ή υπέρβασης του χρόνου ζωής του.
3. Μετανάστευση των δεδομένων σε πιο σύγχρονα αποθηκευτικά μέσα. Για την αποφυγή ασυμβατότητας μεταξύ παλιού και νέου τεχνικομηχανικού εξοπλισμού.
4. Δημιουργία πολλαπλών αντιγράφων τα οποία θα αποθηκεύονται σε πολλαπλές τοποθεσίες. Για την αποφυγή ολικής ή μερικής απώλειας του αρχείου σε περίπτωση μεγάλης καταστροφής (π.χ. από φωτιά, σεισμό κλπ.).

Εκτός από τα δεδομένα της ψηφιοποίησης, ανάλογης διαχείρισης χρήζει και το λογισμικό που χρησιμοποιείται τόσο για την παρουσίαση της πληροφορίας, όσο και για τη διαχείρισή της. Το ίδιο απαραίτητη με τη μετανάστευση των δεδομένων σε σύγχρονα αποθηκευτικά μέσα, είναι και η μετανάστευσή τους σε σύγχρονο λογισμικό, το οποίο μπορεί να σημαίνει από μια απλή μετατροπή τους σε αρχεία νέου τύπου, έως και την εκ νέου δημιουργία του λογισμικού που σχετίζεται με την προβολή και διαχείριση του συγκεκριμένου τύπου δεδομένων. Μια δεύτερη λύση της μετανάστευσης σε πιο σύγχρονα περιβάλλοντα λογισμικού, είναι αυτή της εξομοίωσης του παλιού περιβάλλοντος λειτουργίας στο νέο.

Η διαιώνιση της πληροφορίας σίγουρα μπορεί να εξασφαλιστεί με τη χρήση μέσων αποθήκευσης με μεγάλη αντοχή στη φυσική φθορά του χρόνου. Ωστόσο, η χρησιμότητά της πληροφορίας αυτής είναι αδύνατο να εξασφαλιστεί με τον τρόπο αυτό, αφού η ραγδαία εξέλιξη της υλικοτεχνικής υποδομής και υποδομής λογισμικού μπορεί να καταστήσει κάποιο είδος αποθηκευτικού μέσου ή κάποια δομή δεδομένων μη συμβατή και απροσπέλαστη, σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από το μέσο όρο ζωής του αποθηκευτικού μέσου. Στην πράξη, ένας πενταετής με εξαετής κύκλος αποτελεί το μέσο χρονικό περιθώριο πριν τη μετανάστευση των δεδομένων σε αποθηκευτικό μέσο νέας τεχνολογίας. Ανάλογα με τον όγκο των δεδομένων, η μετανάστευση τους μπορεί να διαρκεί από λίγους μήνες μέχρι και όλη την περίοδο της παραμονής τους σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο, αποτελώντας έτσι μια ακατάπαυστη διαδικασία ενταγμένη στις ενέργειες της καθημερινής διαχείρισής των δεδομένων [16],[17].

Εξίσου σημαντική είναι η τήρηση κάποιων προδιαγραφών για την ψηφιακή αποθήκευση των δεδομένων. Οι προδιαγραφές αυτές θα πρέπει τουλάχιστον να συμβαδίζουν με αντίστοιχες που έχουν θεσπιστεί από κοινοπραξίες που ασχολήθηκαν είτε με το ίδιο θέμα είτε με κάτι παραπλήσιο. Όσον αφορά τις μουσειακές εφαρμογές, αν και προς το παρόν δεν έχει παρουσιαστεί κάποιο κοινώς αποδεκτό πρότυπο για την ψηφιακή αποθήκευση των τριδιάστατων ψηφιακών μοντέλων, μπορεί να τηρηθεί μια παραλλαγή του προτύπου αποθήκευσης εικόνων που έχει θεσπιστεί από την κοινοπραξία εικόνων μουσείων τέχνης AMICO (Art Museum Image Consortium) [18]. Για παράδειγμα, τα αρχεία πρέπει να αποθηκεύονται με όνομα αρκετά περιγραφικό για την ταυτότητά των δεδομένων που περιέχουν και επιπλέον, το όνομα αυτό να αποτελείται μόνο από λατινικούς χαρακτήρες, χωρίς τους (* ? / # < >: | \ “ κενό) για λόγους συμβατότητας μεταξύ των διάφορων λειτουργικών συστημάτων.

7.2. Τριδιάστατα δεδομένα, πολυμεσικές βάσεις δεδομένων και διαδίκτυο

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση του τεράστιου όγκου πληροφορίας που παράγεται από τη διαδικασία της τριδιάστατης ψηφιοποίησης μιας συλλογής θεμάτων, ή κάποιου πολύπλοκου θέματος που απαιτεί πολλαπλές σαρώσεις και συλλογή δεδομένων από διάφορες συσκευές, είναι τα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων ή οι κοινός γνωστές βάσεις δεδομένων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης βάσεων δεδομένων για την οργάνωση της παραγόμενης πληροφορίας, έγκεινται τόσο στην εύκολη και αυτοματοποιημένη διαχείρισή της πληροφορίας αυτής, όσο και στην εύκολη και γρήγορη πρόσβαση και ανάκτησή της.

Το αρχείο που εξάγεται από τη διαδικασία της σάρωσης κάποιου θέματος θα μπορούσε ορθώς να θεωρηθεί ως μια βάση δεδομένων, στην οποία βρίσκεται αποθηκευμένη η πληροφορία που περιγράφει στο χώρο τη μορφή του ίδιου του θέματος, η διαχείρισή της ωστόσο απαιτεί μια πιο γενική βάση δεδομένων, η οποία θα περιέχει πληροφορίες που αφορούν τα δεδομένα της ψηφιοποίησης και όχι τα ίδια τα δεδομένα της ψηφιοποίησης. Σε μια βάση δεδομένων διαχείρισης της πληροφορίας που παράγεται από την τριδιάστατη σάρωση, είναι εφικτό να βρίσκονται αποθηκευμένα τόσο τα ίδια τα δεδομένα της σάρωσης, όσο και η πληροφορία που αφορά αυτά. Αυτή η πρακτική ωστόσο αποφεύγεται, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις οι απαιτήσεις σε γρήγορους (On-Line) αποθηκευτικούς χώρους είναι αρκετά αυξημένες. Η πιο κοινή πρακτική είναι η χρήση της βάσης δεδομένων να περιορίζεται στην αποθήκευση της πληροφορίας για τα δεδομένα της ψηφιοποίησης, ενώ τα ίδια δεδομένα της ψηφιοποίησης να αποθηκεύονται κάπου χωριστά και να συνδέονται μέσω κάποιου τρόπου συσχετισμού τους.

Τι είναι όμως μια βάση δεδομένων και με ποιο τρόπο επιτυγχάνεται αυτή η ευχρηστία στη διαχείριση, πρόσβαση και ανάκτηση της αποθηκευμένης πληροφορίας;

Μια βάση δεδομένων δεν είναι τίποτα περισσότερο από μια ειδική δομή δεδομένων, η οποία σε συνδυασμό με το κατάλληλο λογισμικό, σύστημα διαχείρισης της δομής αυτής, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί για την αδιαφανή και ενιαία αποθήκευση, διαχείριση και επεξεργασία οποιουδήποτε είδους πληροφορίας. Τα διαθέσιμα είδη βάσεων δεδομένων που συναντάμε σήμερα παρουσιάζουν διαφορές τόσο στον τρόπο που διαχειρίζονται την πληροφορία, όσο και στις δυνατότητες αποθήκευσης-περιγραφής, πρόσβασης και ανάκτησής της.

Ο πιο διαδεδομένος και ευρέως χρησιμοποιημένος τύπος είναι αυτός των σχεσιακών βάσεων δεδομένων, όπου η πληροφορία οργανώνεται σε πίνακες λογικά κερματισμένους σε γραμμές και σε στήλες. Η κάθε γραμμή χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της πληροφορίας που αφορά μια εγγραφή, ενώ η κάθε στήλη ορίζει τη λογική θέση (κελί του πίνακα) στην οποία αποθηκευτούν τα ξεχωριστά τμήματα της πληροφορίας αυτής. Ο όρος «σχεσιακός» αφορά την ιδιότητα διασύνδεσης πολλών πινάκων μέσω σχέσεων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η περιγραφή πολύπλοκης πληροφορίας. Ωστόσο, παρά την αποδεδειγμένα αξιοπρεπή απόδοση των σχεσιακών βάσεων σε εφαρμογές γραφείου, η χρήση τους σε εφαρμογές πολυμέσων, όπου η πληροφορία είναι πιο ασαφής και πολύ πιο ευμετάβλητη, παρουσιάζει αδυναμίες οι οποίες δύσκολα μπορούν να αντιμετωπιστούν. Για παράδειγμα η συνεχή μεταβολή της δομής δεδομένων, για την άμεση φιλοξενία επιπλέον πληροφορίας, που απαιτείται σε εφαρμογές περιγραφής τριδιάστατων βάσεων δεδομένων (τριδιάστατης μοντελοποίησης), είναι σχεδόν ανέφικτη με τη χρήση σχεσιακών βάσεων δεδομένων.

Λύση στο πρόβλημα διαχείρισης δυναμικά μεταβαλλόμενης και πολύπλοκης πληροφορίας προσφέρουν οι αντικειμενοστραφείς βάσεις δεδομένων και κάποιες τεχνικές συνδυασμού σχεσιακών βάσεων δεδομένων με πιο ευέλικτες μορφές έκφρασης της πληροφορίας, όπως αυτή της γλώσσας περιγραφής XML (eXtensible Markup Language) η οποία αποτελεί την πιο δημοφιλή λύση.

Οι αντικειμενοστραφείς βάσεις δεδομένων είναι σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διαχειρίζονται την πληροφορία ως ανεξάρτητα αντικείμενα, τα οποία μπορεί είτε να ανήκουν σε κάποια ομάδα με κοινές ιδιότητες και μεθόδους επεξεργασίας, είτε να αποτελούν εξαίρεση κληρονομώντας κάποιες ιδιότητες από συγγενείς ομάδες, ενώ ταυτόχρονα να παρουσιάζουν μοναδικές ιδιότητες που δεν εμφανίζονται σε άλλα αντικείμενα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της αντικειμενοστραφούς έκφρασης της πληροφορίας και της χρήσης αντικειμενοστραφών βάσεων δεδομένων είναι: η απροβλημάτιστη αποθήκευση και διαχείριση πολύπλοκων δομών δεδομένων, η εύκολη κατανομή σε πολλαπλά συστήματα τόσο της ίδιας της πληροφορίας, όσο και του έργου που σχετίζεται με αυτή, όπως επίσης και η άμεση ένταξή τους σε λογισμικό που έχει αναπτυχθεί με κάποια αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού (C++, Java και άλλες). Σε εφαρμογές που εμπλέκονται πολύπλοκες και δυναμικές δομές δεδομένων, οι αντικειμενοστραφείς βάσεις δεδομένων αποτελούν μια πολύ καλή λύση η οποία όμως προϋποθέτει την εξορισμού έκφραση της πληροφορίας σε αντικείμενα, αφού η μετατροπή μιας κοινής σχεσιακής βάσης δεδομένων σε αντικειμενοστραφή είναι ανούσια. Έτσι στην περίπτωση που είδη χρησιμοποιείται μια σχεσιακή βάση δεδομένων, η μετατροπή της σε αντικειμενοστραφή για τον περαιτέρω εμπλουτισμό της με πιο πολύπλοκα δεδομένα δε συνιστάτε. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να γίνει συσχετισμός των πεδίων της σχεσιακής βάσης με αρχεία XML, τα οποία προσφέρουν την επιπλέον απαιτούμενη δομή δεδομένων για την περιγραφή πολύπλοκης πληροφορίας σε ιεραρχημένη δομή. Η πρακτική αυτή επιτρέπει την επέκταση μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων, χωρίς την ανάγκη επανασχεδιασμού ούτε του τρόπου με τον οποίο περιγράφεται η μέχρι τώρα διαθέσιμη πληροφορία, αλλά ούτε και του λογισμικού που διαχειρίζεται αυτή. Η επιπλέον πληροφορία που εισάγεται μέσω της XML αποτελεί προέκταση της σχεσιακής βάσης δεδομένων, ενώ το λογισμικό που τη διαχειρίζεται είναι ανεξάρτητο από αυτό που διαχειρίζεται την κύρια σχεσιακή βάση.

Εκτός από τις κλασικές σχεσιακές και αντικειμενοστραφή βάσεις δεδομένων υπάρχουν και οι αντικειμενοσχεσιακές. Μια αντικειμενοσχεσιακή βάση δεδομένων δεν είναι τίποτα περισσότερο από μια κοινή σχεσιακή, η οποία όμως συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό διαχείρισης το οποίο την κάνει να συμπεριφέρεται ως μια βάση δεδομένων μερικώς αντικειμενοστραφή. Το λογισμικό αυτό παρεμβάλλεται μεταξύ του χρήστη και της σχεσιακής βάσης δεδομένων και μεταφράζει τα αντικειμενοστραφή αιτήματα του χρήστη σε κοινά σχεσιακά αιτήματα, ικανά να τα διαχειριστεί η σχεσιακή βάση δεδομένων, ανταποδίδοντας του στη συνέχεια την αναμενόμενη αντικειμενοστραφή απάντηση. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των αντικειμενοσχεσιακών βάσεων δεδομένων βρίσκεται στην ταχύτητα απόκρισής τους, η οποία, ειδικά σε πολύπλοκες δομές δεδομένων, εμφανίζεται πολύ πιο μικρή από την αντίστοιχη μιας αμιγώς αντικειμενοστραφούς βάσης δεδομένων. Ωστόσο πλεονεκτήματα όπως η ευκολία χρήσης τους και η υποστήριξή τους από μεγάλες εταιρίες κατασκευής σχεσιακών βάσεων δεδομένων, έχουν συμβάλει στη μεγάλη αποδοχή τους από το αγοραστικό κοινό. Παρόλα αυτά, όσο και να εξελιχθεί η τεχνολογία αυτή ποτέ δε θα καταφέρει να αποδώσει όπως μια καθαρά αντικειμενοστραφή λύση.

Ο Πίνακας IV συγκεντρώνει τα πιο διαδεδομένα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων με τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας IV. Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων βάσεων δεδομένων

Characteristics	Object-oriented data-bases	Relational databases	Object-relational databases
Complexity of data model	High	Low	Depends on vendor
User-definable data types	Supported	Not supported	Not supported
Management of various versions of the same data	Supported	Not supported	Not supported
Application Programming Interface (API)	Object-oriented programming languages	4 th generation programming languages	3 rd and 4 th generation programming languages
Data inheritance	Supported	Not supported	Depends on vendor
Polymorphism	Supported	Not supported	Depends on vendor

Μια νέα δυνατότητα σήμερα είναι να επιλεγεί μια εξ' ολοκλήρου XML βάση δεδομένων. Οι βάσεις δεδομένων αυτού του τύπου καλούνται Native-XML και αποθηκεύουν και διαχειρίζονται εξ' ολοκλήρου XML δεδομένα ακολουθώντας ένα ιεραρχικό μοντέλο περιγραφής. Οι XML βάσεις δεδομένων βασίζονται σε ένα σχήμα που περιγράφει το δέντρο ιεραρχιών της πληροφορίας και τον τρόπο που αυτό δομείται και μπορεί να δεχτεί XML δεδομένα και να χειριστεί ερωτήματα σε μορφή XML. Αν και υπάρχουν διαθέσιμα σημαντικά εμπορικά συστήματα βάσεων δεδομένων που διατείνονται ότι παρέχουν ένα διάφανο τρόπο χειρισμού XML βάσεων δεδομένων, στην πράξη παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα και ασυμβατότητες που καθιστούν τις λύσεις λιγότερο «ελκυστικές». Συμπληρωματικά, μιας και οι Native-XML λύσεις είναι σήμερα κατά κύριο λόγο βασισμένες σε λογισμικό ανοικτού κώδικα, υπάρχει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σχετικό με το συνολικό κόστος της επένδυσης. Ένα τα δεδομένα είναι ή μπορούν να περιγραφούν μέσω ενός ιεραρχικού μοντέλου τότε οι λύσεις Native-XML βάσεων δεδομένων φαίνεται σήμερα να είναι οι πιο «ελκυστικές».

7.3. Μεταδεδομένα

Η μεγαλύτερη ίσως πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά τη δημιουργία μιας ψηφιακής συλλογής είναι ο μηχανισμός μέσω του οποίου θα καταστούν τα δεδομένα της προσβάσιμα στον τελικό αποδέκτη. Ο μηχανισμός αυτός είναι ο χαρακτηρισμός της πληροφορίας για την οργανωμένη ένταξή της σε ευρετήρια και πίνακες περιεχομένων και υλοποιείται με τη χρήση των μεταδεδομένων.

Τα μεταδεδομένα μπορούν να χαρακτηριστούν ως δεδομένα για τα δεδομένα και αναλόγως της εφαρμογής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη σχετίζεται με τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης και αφορούν πληροφορίες σχετικά με το αντικείμενο όπως τις αντιλαμβάνεται αυτός, για παράδειγμα μια περιγραφή για το τι περιέχουν τα δεδομένα. Η δεύτερη σχετίζεται με διαχειριστικά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της έκδοσης των δεδομένων, τον τύπο τους κλπ. Πιο συγκεκριμένα, το περιεχόμενο και η οργάνωση των μεταδεδομένων που αφορούν τις δύο παραπάνω κατηγορίες, πρέπει να συμβαδίζει με τη βασική μορφή που καθορίζουν κάποια κοινά πρότυπα, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Στην περίπτωση των μουσείων, οι πληροφορίες που πρέπει να συνοδεύουν ένα έκθεμα καθορίζονται από το εννοιολογικό μοντέλο αναφοράς CIDOC [19]. Το μοντέλο αυτό είναι ικανό να περιγράψει πληροφορίες που αφορούν την ταυτότητα, κατοχή και

τοποθέτηση κάποιου μουσειακού εκθέματος, όπως επίσης και πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά, αλλά και ιστορικά γεγονότα που σχετίζονται με αυτό. Παρόλα αυτά όμως, το πρότυπο CIDOC είναι ανίκανο να εκφράσει από μόνο του πληροφορίες που σχετίζονται με τα δεδομένα από την ψηφιοποίηση κάποιου θέματος. Εντούτοις, η ανοιχτή του αρχιτεκτονική επιτρέπει την ενσωμάτωση σχημάτων περιγραφής περισσότερο προσανατολισμένα στα ψηφιακά δεδομένα πολυμέσων, όπως αυτό του MPEG-7 [20].

Η τρίτη κατηγορία αφορά δεδομένα που σχετίζονται με την αυτόματη μαθηματική περιγραφή του αρχαιακού αντικειμένου. Τα μεταδεδομένα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούν στην αναζήτηση και ταξινόμηση βάση του ίδιου του περιεχομένου και όχι κάποιας περιγραφής στηριζόμενης στον ανθρώπινο παράγοντα. Στην περίπτωση των τριδιάστατων αντικειμένων, η περιγραφή του ίδιου του περιεχομένου επιτυγχάνεται βάση ιδικού λογισμικού, το οποίο αναλύοντας τη γεωμετρία του ψηφιοποιημένου θέματος εξάγει πληροφορίες σχετικά με αυτή. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν διάφορα τοπολογικά χαρακτηριστικά της τριδιάστατης γεωμετρίας, όπως είναι για παράδειγμα αυτό της καμπυλότητάς της. Ο πιο διαδεδομένος και κοινά αποδεκτός τρόπος εξαγωγής και χρήσης αυτής της πληροφορίας είναι αυτός που ορίζει το πρότυπο MPEG-7 στο οποίο γίνεται εκτενή αναφορά παρακάτω.

7.4. Αυτόματη εξαγωγή μεταδεδομένων βάσει περιεχομένου

Ένας καλός τρόπος ανάδειξης των πλεονεκτημάτων της χρήσης αυτόματης περιγραφής της πληροφορίας, είναι αυτός της παρουσίασής της μέσω μιας εφαρμογής στην οποία όλοι έχουν κάποια εμπειρία. Η εφαρμογή αυτή είναι οι μηχανές αναζήτησης του Internet, οι οποίες είναι ένας μηχανισμός ανάκτησης ψηφιακής πληροφορίας από μια εκτενή βάση δεδομένων.

Σήμερα το Internet αναμφίβολα αποτελεί το καλύτερο μέσω για την εύρεση αλλά και τη διάδοση πληροφορίας. Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια αχανή βιβλιοθήκη όπου δεν υπάρχουν κανόνες για το τρόπο οργάνωσης του περιεχομένου της. Ο τεράστιος όγκος πληροφορίας που είναι διαθέσιμος στο Internet αποτελεί μια άριστη πηγή πληροφόρησης, η οποία όμως χωρίς τα κατάλληλα εργαλεία θα ήταν πολύ δύσκολο να αξιοποιηθεί. Τα εργαλεία αυτά είναι οι μηχανές αναζήτησης, οι οποίες δημιουργούν ευρετήρια μεγάλων τμημάτων του διαδικτύου, ενώ παράλληλα παρέχουν στους χρήστες τους τα κατάλληλα εφόδια για την αναζήτηση των ευρετηρίων αυτών.

Οι περισσότερες μηχανές αναζήτησης τυπικά παρέχουν τη δυνατότητα να ψάξουμε τα περιεχόμενά τους βάση λέξεων κλειδιών, που εισάγει ο χρήστης σε μια φόρμα αναζήτησης. Εισάγοντας μια λέξη ή μια φράση στη μηχανή αναζήτησης, αυτή ανευρίσκει σε ποιες σελίδες εμφανίζεται η συγκεκριμένη λέξη ή φράση και τις παρουσιάζει. Ωστόσο οι πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο δεν περιορίζονται μόνο σε κείμενα αλλά περιέχονται και σε πολλά άλλα μέσα, (π.χ. μουσική & ήχοι, φωτογραφίες, βίντεο, τριδιάστατα μοντέλα κλπ.) στα οποία η αναζήτηση βάση κάποιας λέξης κλειδί, δεν είναι εφαρμόσιμη εξ αρχής. Για τις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν μηχανές αναζήτησης οι οποίες είναι προσανατολισμένες στην αναζήτηση ειδικών μορφών δεδομένων, όπως είναι οι εικόνες, η μουσική κλπ. Μέχρι και σήμερα, οι περισσότερες από αυτές τις ειδικές μηχανές αναζήτησης εκμεταλλεύονται το γεγονός πως τέτοιου είδους δεδομένα συνοδεύονται από έγγραφη περιγραφή, είτε ενσωματωμένη μέσα στο ίδιο το αρχείο, είτε προσαρμοσμένη στο όνομα του αρχείου, είτε προσαρμοσμένη στην ιστοσελίδα που φιλοξενεί τα δεδομένα αυτά. Αυτή η μέθοδος αναζήτησης όμως δεν είναι αρκετά αποτελεσματική, διότι το

περιεχόμενο της έγγραφης λεκτικής περιγραφής που συνοδεύει μια μη λεκτική μορφή πληροφορίας βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα. Αυτό συνεπάγεται πως εάν τα μη λεκτικά δεδομένα συνοδεύονται από μια λανθασμένη περιγραφή, τότε αυτά δε πρόκειται να εμφανιστούν ποτέ σε μια ενδεχόμενη αναζήτησή τους στο διαδίκτυο. Για να χαρακτηριστεί μια μηχανή αναζήτησης αποτελεσματική στην αναζήτηση μη λεκτικών μορφών δεδομένων, όπως εικόνες ή ήχους κλπ., θα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με μηχανισμούς οι οποίοι θα την καθιστούν ικανή να ερευνά βασιζόμενη σε μη λεκτικά στοιχεία, από το περιεχόμενο της ίδιας της πληροφορίας και όχι κάποιας έγγραφης συνοδευτικής περιγραφής. Τέτοιες έξυπνες μηχανές αναζήτησης θα είναι δυνατόν να βρουν ένα μουσικό κομμάτι βάση κάποιου σκοπού που θα σφυρίζουμε στο μικρόφωνο του Η/Υ μας.

Το πρόβλημα που εμφανίζεται στην υλοποίηση μιας τόσο έξυπνης μηχανής αναζήτησης, είναι η χρονοβόρα και απαιτητική, τόσο σε μνήμη και επεξεργαστική ισχύ, όσο και σε εύρος δικτύου, αποκωδικοποίηση και αναγνώριση της δυσνόητης ακολουθίας ψηφιακών στοιχείων (bits) από τα οποία αποτελείται η ψηφιακή πληροφορία. Ο μηχανισμός μέσω του οποίου θα γίνει εφικτή η αναζήτηση μη λεκτικών ψηφιακών δεδομένων βάση του περιεχομένου τους, είναι μέσω της ψηφιακής περιγραφής τους βάση κάποιων κανόνων θεσπιζόμενοι από κάποιο κοινό πρότυπο. Αυτό το πρότυπο έχει ήδη δημιουργηθεί, είναι το MPEG-7 το οποίο υποδεικνύει τα εργαλεία περιγραφής των ψηφιακών δεδομένων, τους βασικούς ψηφιακούς περιγραφείς (Digital Descriptors) και τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύεται η παραγόμενη από τους ψηφιακούς περιγραφείς πληροφορία.

7.5. Εισαγωγή στο MPEG-7

Το πρότυπο του MPEG-7 [21],[22] πρωτοπαρουσιάστηκε από την ομάδα ιδικών κινούμενων εικόνων (Moving Pictures Expert Group) και έναντι των προηγούμενων MPEG προτύπων (MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4) τα οποία απευθύνονται στην κωδικοποιημένη αναπαράσταση οπτικοακουστικού περιεχομένου, το MPEG-7 επικεντρώνεται στην αναπαράσταση πληροφορίας περί του περιεχομένου, παρά για το ίδιο το περιεχόμενο. Στόχος του MPEG-7 είναι να προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο εργαλείων για την περιγραφή πολυμεσικού -μη λεκτικού- περιεχομένου, τα οποία θα βοηθήσουν στην κατηγοριοποίηση, αναζήτηση και ανάκτηση αντίστοιχης μορφής δεδομένων.

Το MPEG-7 καθορίζεται από ένα σύνολο από ψηφιακούς περιγραφείς (descriptors) και σχήματα περιγραφής (description schemes), μέσω των οποίων καθιστάτε εφικτή η περιγραφή του ψηφιακού περιεχομένου μη λεκτικής πληροφορίας όπως ήχοι, εικόνες, βίντεο τριδιάστατα μοντέλα κλπ. Για κάθε τύπο πληροφορίας υπάρχουν και οι αντίστοιχοι βασικοί περιγραφείς οι οποίοι συνδυαζόμενοι μεταξύ τους παράγουν πιο σύνθετους περιγραφείς. Ωστόσο, σε περίπτωση που οι υπάρχων περιγραφείς και ο συνδυασμός τους (σχήματα περιγραφής) δεν ικανοποιούν τις ανάγκες χαρακτηρισμού του περιεχομένου μιας μη λεκτικής πληροφορίας, τότε υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστεί ένας νέος τύπος περιγραφής, μέσω της γλώσσας ορισμού περιγραφής (Description Definition Language – DDL) που προβλέπει πρότυπο του MPEG-7 και συντάσσεται κατά τα πρότυπα της γλώσσας XML.

Η παραγόμενη πληροφορία που προκύπτει από τους περιγραφείς συντάσσεται, σύμφωνα με πρότυπα που ορίζει το MPEG-7, ακολουθώντας τη δομή της DDL και είναι συνυφασμένη με τα δεδομένα τα οποία περιγράφει. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται γρήγορη και αποτελεσματική αναζήτηση πολυμεσικών δεδομένων, σύμφωνη με τα κριτήρια που έχει θέσει ο χρήστης της μηχανής αναζήτησης και όχι

αυτός που δημοσίευσε, με τυχόν λάθος λεκτική περιγραφή, την πληροφορία στο διαδίκτυο.

7.6. Ψηφιακοί περιγραφείς και η λειτουργία τους

Όπως προαναφέραμε, οι ψηφιακοί περιγραφείς είναι τα εργαλεία που παρέχει το MPEG-7 για την περιγραφή των περιεχομένων μιας μη λεκτικής μορφής δεδομένων. Είναι αλγόριθμοι που αναγνωρίζουν και κωδικοποιούν τις ιδιότητες των πληροφοριών που κρύβονται μέσα σε ένα πολυμεσικό αρχείο. Για κάθε τύπο αρχείου υπάρχουν και οι αντίστοιχοι περιγραφείς οι οποίοι ανιχνεύουν τα ειδικά χαρακτηριστικά της πληροφορίας. Κατά συνέπεια οι περιγραφείς χωρίζονται ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας που περιγράφουν, άλλοι είναι για τον ήχο, άλλοι για την εικόνα, άλλοι για το βίντεο και άλλοι για τα τριδιάστατα μοντέλα.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της εικόνας έχουμε περιγραφείς για τα χρώματα, για την υφή και για τα σχήματα που εμφανίζονται στην εικόνα, ενώ αν έχουμε να κάνουμε με κινούμενη εικόνα (βίντεο) τότε προστίθενται και οι περιγραφείς της κίνησης. Για τον ήχο αντίστοιχα υπάρχουν περιγραφείς για το φάσμα του ήχου, τις βασικές αρμονικές του, κλπ. Αντίστοιχα εργαλεία υπάρχουν και για την περιγραφή τριδιάστατων αντικειμένων, κάποια από τα οποία έχουν τις ρίζες τους στους περιγραφείς σχημάτων για εικόνες και επεκτείνονται από τις δύο στις τρεις διαστάσεις. Με τους περιγραφείς τριδιάστατων σχημάτων θα ασχοληθούμε στο επόμενο κεφάλαιο όπου και παρουσιάζετε με ευκολονόητο τρόπο η αρχή λειτουργίας τους.

7.7. Περιγραφείς τριδιάστατων εικόνων

Είναι προφανές πως το σχήμα ενός τριδιάστατου μοντέλου σαν έννοια είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο από τη θέση του στον χώρο, τον προσανατολισμό του και την τριγωνοποιημένη αναπαράστασή του. Για παράδειγμα, το τριδιάστατο μοντέλο ενός αυτοκινήτου δεν παύει να αναπαριστά ένα αυτοκίνητο, ανεξάρτητα αν αυτό σχηματίζεται από 100 ή 10.000 πολύγωνα, ή αν η μεγαλύτερή του πλευρά έχει μέγεθος εκατό μονάδων και είναι παράλληλη με τον άξονα X. Ως εκ τούτου, ένα εργαλείο για την περιγραφή τριδιάστατων μοντέλων θα πρέπει να είναι ανεπηρέαστο από τους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς θέσης, μεγέθους και προσανατολισμού, όπως επίσης και από την οποιοδήποτε μορφή τριγωνοποιημένης αναπαράστασης του μοντέλου (π.χ. αριθμό πολυγώνων, ομαλότητα των άκρων κλπ.).

Τι γίνεται όμως στην περίπτωση αρθρωτών αντικειμένων, δηλαδή αντικειμένων που η μορφή τους σχηματίζεται από περισσότερα του ενός αντικειμένων με θέση πάντα σχετική αλλά ποτέ σταθερή με το κύριο σώμα τους; Για παράδειγμα ένα ανθρωπόμορφο τριδιάστατο μοντέλο αποτελείται από διάφορα μέλη, τα οποία έχουν την ιδιότητα να περιστρέφονται ελεύθερα σε όλους τους άξονες. Λόγω της ιδιότητας του αυτής ωστόσο, αν το δίποδο ανθρωπόμορφο μοντέλο παριστά κάποιο τετράποδο η περιγραφή του σε καμιά περίπτωση δε θα πρέπει να ταυτιστεί με αυτή ενός τετράποδου. Η σημασιολογική έννοια είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μορφή του σχήματος και στις περιπτώσεις αρθρωτών αντικειμένων η ασταθής μορφή τους μπορεί να οδηγήσει ευκολότερα μια «έξυπνη» μηχανή αναζήτησης σε λανθασμένα συμπεράσματα.

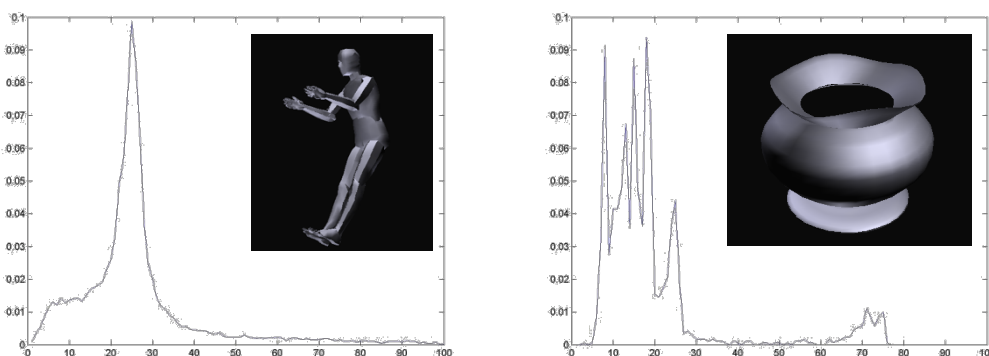
Όσο και αν η αναγνώριση αντικειμένων δείχνει μια απλή διαδικασία για τον ανθρώπινο εγκέφαλο, για έναν Η/Υ είναι μια διαδικασία που απαιτεί διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με αυτή για τα μη αρθρωτά και στερεά αντικείμενα. Στην

περίπτωση των στερεών αντικειμένων ένας καθολικός περιγραφέας επαρκεί για την περιγραφή του σχήματος. Ωστόσο όταν πρόκειται για αρθρωτά αντικείμενα, συμπληρωματικά πρέπει να γίνεται χρήση και τοπικών περιγραφέων για την διάκριση τυχών στάσεων του αντικειμένου. Προηγούμενη έρευνα για την ανάκτηση δεδομένων βάση σχήματος, έδειξε πως οι καθολικοί περιγραφείς πληρούσαν τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Είχαν λογικό μέγεθος, υποστήριζαν απλές στον υπολογισμό μετρήσεις ομοιότητας και έτσι επέτρεπαν αποτελεσματική έρευνα πολύ μεγάλων βάσεων δεδομένων.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στον καθορισμό των απαιτούμενων προσόντων που πρέπει να διαθέτει ένας περιγραφέας τριδιάστατων μοντέλων (3D Shape Descriptor – 3D SD). Έτσι, τα κριτήρια για να θεωρηθεί επιτυχημένος ένας 3D SD έχουν ως εξής:

- Ο 3D SD πρέπει να περιγράφει ένα τριδιάστατο μοντέλο βασισμένος στις επιφάνειές του και όχι στον όγκο του. Με αυτόν τον τρόπο καλύπτονται περιπτώσεις αντικειμένων με ανοιχτές επιφάνειες, των οποίων ο όγκος είναι μηδενικός. Για παράδειγμα, ένα πανί το οποίο σχηματίζεται από ένα παραμορφωμένο δισδιάστατο πλέγμα πολυγώνων δεν έχει μετρήσιμο όγκο.
- Όταν μεγεθύνεται, περιστρέφεται ή μετακινείται ένα αντικείμενο, τότε η περιγραφή του, παρά τις διαφορές μεγεθύνσεις και Ευκλείδειους μετασχηματισμούς, θα πρέπει να παραμένει αμετάβλητη.
- Ένας 3D SD πρέπει να δίνει την ίδια περιγραφή για αρθρωτά αντικείμενα σε οποιαδήποτε στάση και να βρίσκονται.

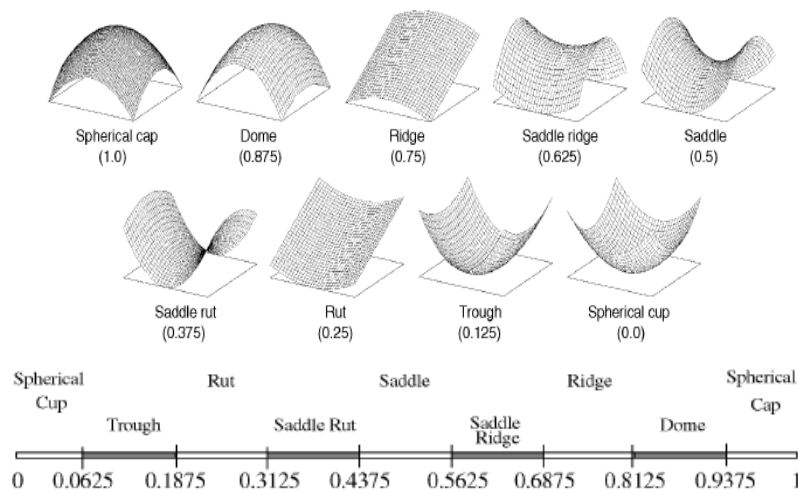
Ο 3D SD που προτείνεται από την ομάδα Moving Pictures Experts Group εκπληρώνει όλα τα παραπάνω κριτήρια. Ονομάζεται *3D Shape Spectrum Descriptor (3D SSD)* [23] και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην έκφραση των τοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του τριδιάστατου σχήματος. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει το ιστόγραμμα των τιμών των δεικτών σχήματος (shape index) του αντικειμένου, όπως φαίνεται στο παράδειγμα στην Εικόνα 86.



Εικόνα 86. Παραδείγματα ιστογράμματος δεικτών σχήματος (shape index)

Ο δείκτης σχήματος του αντικειμένου (shape index – **SI**), είναι μια έννοια που συστήθηκε από τον J. Koenderik [24] και καθορίζεται σαν συνάρτηση των δυο κύριων καμπυλοτήτων. Ο SI είναι ένα τοπικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό μιας τριδιάστατης επιφάνειας, το οποίο εκφράζεται σαν τη γωνιακή συντεταγμένη της πολικής αναπαράστασης του διανύσματος της κύριας καμπυλότητας. Παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και δεν ορίζεται για επίπεδες επιφάνειες. Ο SI αποτελεί την κλίμακα μέτρησης μη επίπεδων στοιχειωδών σχημάτων όπως είναι τα κοιλώματα (SI = 0), οι αυλακώσεις (SI=0.25), τα σαμάρια (SI=0.5), οι ράχες (SI=0.75) και τα κυρτώματα (SI = 1) και είναι ανεπηρέαστος από διάφορους Ευκλείδειους μετασχηματισμούς και

κλιμακώσεις. Στην Εικόνα 87 παρουσιάζονται βασικές επιφάνειες και ο αντίστοιχος δείκτης σχήματος καθώς και η κλίμακα χαρακτηρισμού επιφανειών που προκύπτει πειραματικά.



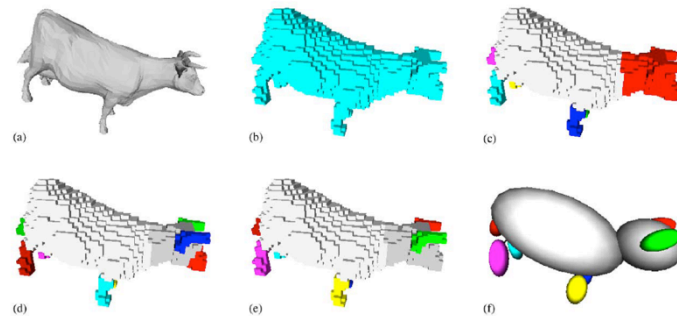
Εικόνα 87. Διάφορα σχήματα και ο αντίστοιχος δείκτης σχήματος

Κατά συνέπεια, ο 3D SSD καθορίζεται ως η κατανομή του SI πάνω σε ολόκληρο το αντικείμενο. Αυτό υλοποιείται διαβαθμίζοντας ομοιόμορφα το φάσμα των τιμών που παίρνει ένας SI (από 0 μέχρι 1) και προσθέτοντας σε κάθε βαθμίδα το σχετικό εμβαδόν του κάθε πολυγώνου του μοντέλου με παραπλήσια SI τιμή. Για παράδειγμα, αν έχουμε ένα τρίγωνο του οποίου το εμβαδόν αντιστοιχεί στο 2% του συνολικού εμβαδού του μοντέλου και η SI τιμή του είναι ίση με 0.22, τότε στη βαθμίδα όπου ανήκει η τιμή 0.22 προσθέτουμε 2%. Σε περίπτωση που το τρίγωνο βρίσκεται σε επίπεδη περιοχή, όπου όπως προαναφέραμε το SI δεν ορίζεται, τότε το ποσοστό του εμβαδού του προστίθεται σε μια ειδική θέση μόνο για τις επίπεδες επιφάνειες. Παρομοίως, στην περίπτωση όπου το πολύγωνο βρίσκεται στα όρια του μοντέλου, δηλαδή έχει τουλάχιστον μια πλευρά την οποία δεν μοιράζεται με κανένα άλλο πολύγωνο του αντικειμένου, η εκτίμηση της κύριας καμπυλότητας για το πολύγωνο αυτό είναι ανακριβής και γι' αυτό το λόγω το εμβαδόν του προστίθεται σε μια θέση που είναι μόνο για τέτοιου είδους πολύγωνα. Αυτό γίνεται για όλα τα πολύγωνα του μοντέλου και συνεπώς έως ότου καλυφθεί το 100% του εμβαδού του.

Ωστόσο, πριν εφαρμοστούν τα παραπάνω απαιτείται ειδική προετοιμασία του μοντέλου. Καταρχήν, για να μην επηρεάζεται ο 3D SSD από τις διάφορες τοπολογικές αναπαραστάσεις του μοντέλου και τυχόν λάθη τοπολογίας, θα πρέπει να εφαρμοστεί στο αρχικό μοντέλο ένα φίλτρο κανονικοποίησης. Επίσης, ανωμαλίες στο SI φάσμα του αντικειμένου, προκαλούνται από πολύγωνα με δυσανάλογα μεγέθη, ή πολύγωνα τα οποία ανήκουν στην ίδια επιφάνεια αλλά κοιτούν στην αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την πλειοψηφία, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σαν τρύπες. Έτσι, για την αποφυγή τυχόν ανωμαλιών στο φάσμα του αντικειμένου, θα πρέπει πριν την εφαρμογή του 3D SSD, το μοντέλο να εξομαλύνεται με την τεχνική της εισαγωγής σημείου στο μέσο της κάθε πλευράς των πολυγώνων του και με την εφαρμογή ενός φίλτρου εξομάλυνσης (low-pass filter) στις συντεταγμένες του κάθε σημείου. Αυτό συντελεί στο να δημιουργηθούν ομαλές επιφάνειες με μεγάλο αριθμό μικρών τριγώνων όπου ο 3D SSD αποδίδει καλύτερα.

Όλα τα παραπάνω συντελούν στην υλοποίηση ενός «εύρωστου» περιγραφέα τριδιάστατων μοντέλων, ο οποίος αντεπεξέρχεται με ευκολία στο δύσκολο έργο της αναζήτησης τριδιάστατων μοντέλων.

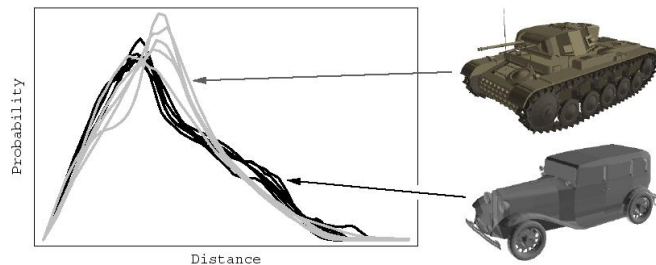
Ένας νεότερος περιγραφέας 3D εικόνων που προστέθηκε στο πρότυπο MPEG-7 είναι ο *Perceptual 3D Shape Descriptor (P3DSD)* [25]. Ο περιγραφέας αυτός βασίζεται στην αποσύνθεση της 3D πληροφορίας σε δομική μορφή βασικών στερεών ελλειψοειδών μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία, όπως φαίνεται γραφικά στην Εικόνα 88.



Εικόνα 88. Διαδοχική απλοποίηση γεωμετρίας στη μορφή απλών ελλειψοειδών

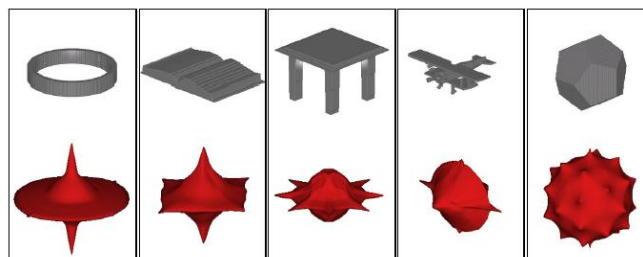
Άλλοι περιγραφείς 3D δεδομένων που έχουν προταθεί από ερευνητές είναι οι ακόλουθοι:

- *Shape Distributions* [26]: Υπολογίζει τις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ τυχαίων σημείων στην επιφάνεια και δημιουργεί γραφήματα για συγκρίσεις (Εικόνα 89).



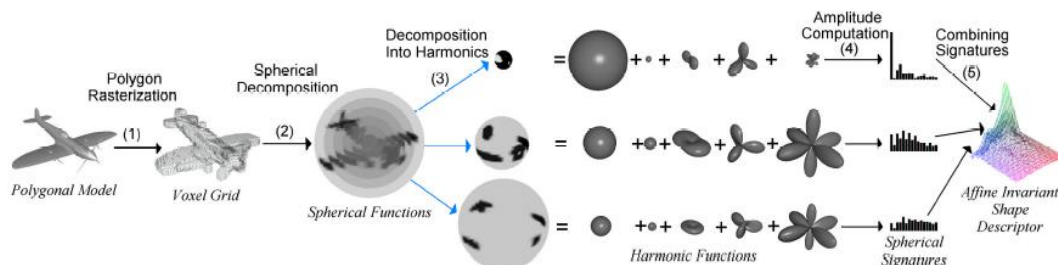
Εικόνα 89. Γραφήματα πιθανότητας-απόστασης που υπολογίζει ο Shape Distributions

- *Reflective Symmetry Descriptor* [27]: Στηρίζεται στην εύρεση συμμετρίας για όλα τα επίπεδα συμμετρίας από το κέντρο βάρους του 3D αντικειμένου. Οδηγεί στη δημιουργία νέων 3D προτύπων εικόνων (Εικόνα 90) μέσω των οποίων μπορεί να γίνει ταυτοποίηση ή σύγκριση αγνώστων αντικειμένων.



Εικόνα 90. Παραδείγματα λειτουργίας του Reflective Symmetry Descriptor

- *Spherical Harmonics* [28]: Βασίζεται στην αποσύνθεση 3Δ μοντέλων σε πλήθος συναρτήσεων ορισμένων πάνω σε ομόκεντρες σφαίρες με τελικό στόχο τη δημιουργία ενός ιστογράμματος πλάτους τιμών που αποτελεί την ψηφιακή υπογραφή του μοντέλου. Στην Εικόνα 91 δίνεται γραφικά ένα παράδειγμα εξαγωγής των σφαιρικών αρμονικών για ένα απλό 3Δ μοντέλο.



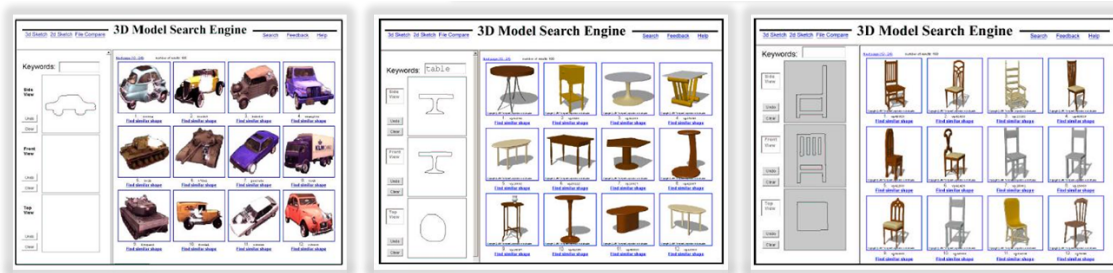
Εικόνα 91. Παράδειγμα εξαγωγής των Spherical Harmonics από ένα 3Δ μοντέλο

- *Skeletal Graph* [29]: Βασίζεται στην αναγνώριση βασικών «γραμμών» σχήματος ενός 3Δ μοντέλου και στη δημιουργία ενός γραμμικού σχεδίου που να εκφράζει τον εικονικό σκελετό του μοντέλου (Εικόνα 92).



Εικόνα 92. Παράδειγμα δημιουργίας Skeletal Graph

Κλείνοντας το τμήμα για την εξαγωγή περιγραφών 3Δ εικόνων, αναφέρουμε ότι ο λόγος που ο τομέας αυτός βρίσκεται σε σημαντική άνθιση και διαρκή ανάπτυξη είναι ότι στα μεταδεδομένα που παράγονται με τον τρόπο αυτό βασίζονται όλες οι τεχνικές ανάκτησης βάσει περιεχομένου που δημιουργούνται για να υποστηρίξουν την αναζήτηση πληροφορίας του μέλλοντος. Στα βασικότερα σενάρια εφαρμογής της ανάκτησης βάσει περιεχομένου περιλαμβάνονται τόσο η αναζήτηση βάσει δείγματος, ταυτοποίηση αγνώστου δείγματος, ταξινομήσεις με βάση την ομοιότητα σε γεωμετρία και υφή, ταυτοποίηση και ταξινόμηση από σκαρίφημα (Εικόνα 93), κοκ. Η συνεισφορά όλων αυτών των τεχνολογιών στην περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας αναζήτησης και ανάκτησης στο διαδίκτυο του μέλλοντος και στο σημασιολογικό ιστό προβλέπεται ότι θα είναι καίρια και για το λόγο αυτό ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και τεχνικών.



Εικόνα 93. Παραδείγματα ανάκτησης βάσει σκαριφήματος 3Δ εικόνας

8. Αναφορές

- [1] Online at: http://en.wikipedia.org/wiki/Kerr_effect.
- [2] Albert S. Hoagland, "Information Storage: Yesterday, Today and Tomorrow" *Magnetic Disk Heritage Center (MDHC)*, 2002.
- [3] A. M. Przybyla, G. Huth, "Preparing for the Worst: Managing Records Disasters" *The University of the State of New York*, 2004.
- [4] P.G. Hulme, "Mass storage the options", *International Broadcasting Convention*, 1996.
- [5] T. Schwarz, "Magnetic Tape as the Mass Storage Medium", *IEEE-NASA MSS Conference 2000*, online at: <http://romulus.gsfc.nasa.gov/msst/conf2000/VG/C04VG.PDF>
- [6] M. Leonhardt, "Future Directions for Recording Technologies", *THIC Meeting at StorageTek*, 2003, online at: <http://www.thic.org/pdf/Jul03/stk.mleonhardt.030722.pdf>.
- [7] H. Heslop, S. Davis, A. Wilson, "An Approach to the Preservation of Digital Records", *National Archives of Australia*, 2002.
- [8] "Cedars Guide to Digital Collection Management", *The Cedars Project*, 2002, online at: <http://www.leeds.ac.uk/cedars/guideto/collmanagement/>
- [9] B.S. Manjunath, P. Salembier, T. Sikora, "Introduction to MPEG – 7", JOHN WILEY & SONS, LTD.
- [10] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Shade, D. Fulk, "The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues", *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, ISBN 1-58113-208-5, pp. 131-144, 2000.
- [11] D. Santa Cruz, "Compression Of 3d Models With NURBS" *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*.
- [12] D. Santa-Cruz, T. Ebrahimi, "Compression of parametric surfaces for efficient 3D model coding", *Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, vol. 4671, pp. 280-291, 2002, online at: <http://ltswww.epfl.ch/~dsanta>
- [13] D. Shikhare, S. Bhakar, S. P. Mudur, "Compression of Large 3D Engineering Models using Automatic Discovery of Repeating Geometric Features", *Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference*, pp. 233 - 240, ISBN:3-89838-028-9, 2001.
- [14] B. Curless, M. Levoy, "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images", *Proc. SIGGRAPH '96*, 1996, online at: <http://graphics.stanford.edu/papers/volrange/volrange.pdf>
- [15] G. Turk, M. Levoy, "Zippered Polygon Meshes from Range Images", *In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, pp. 311-318, 1994, online at: <http://graphics.stanford.edu/papers/zipper/zipper.pdf>
- [16] "Digital Recordkeeping" *National Archives Of Australia*, Exposure Draft, 2004.
- [17] O. Sandstå, "Tertiary Storage in Digital Video Archives", PhD Thesis, NTNU 2004:112, ISBN 82-471-6445-0.
- [18] "Art Museum Image Consortium Data Specification", *Art Museum Image Consortium*, 1999, online at: www.amico.org
- [19] N. Crofts, M. Doerr, T. Gill, S. Stead, M. Stiff, "Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model", ICOM/CIDOC CRM Special Interest Group, 2003, online at: <http://cidoc.ics.forth.gr>
- [20] J. Hunter, "Combining the CIDOC CRM and MPEG-7 to Describe Multimedia in Museums", *Museums on the Web*, 2002, online at: http://metadata.net/harmony/MW2002_paper.pdf
- [21] B.S. Manjunath, P. Salembier, T. Sikora, "Introduction to MPEG – 7", John Wiley & Sons, Ltd.
- [22] J. Martinez (Eds.), "MPEG-7 Overview", *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11N6828*, 2004, online at: <http://www.chiariglione.org/MPEG/standards/mpeg-7/mpeg-7.htm>
- [23] T. Zaharia, F. Preteux, M. Preda, "The 3D shape spectrum descriptor", *ISO/IEC MPEG/M5242*, 1999.
- [24] J. Koenderik, "Solid Shape", MIT Press, 1990.
- [25] D. H. Kim, I. K. Park, I. D. Yun, S. U. Lee, "A New MPEG-7 Standard: Perceptual 3-D Shape Descriptor", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3332, 2005.
- [26] R. Osada, T. Funkhouser, B. Chazelle, D. Dobkin, "Shape Distributions", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 807-832, October 2002.
- [27] M. Kazhdan, B. Chazelle, D. Dobkin, A. Finkelstein, T. Funkhouser, "A Reflective Symmetry Descriptor", *European Conference on Computer Vision*, pp. 642-656, 2002.
- [28] M. Kazhdan, T. Funkhouser, "Harmonic 3D Shape Matching", *SIGGRAPH Technical Sketches*, p. 191, 2002.

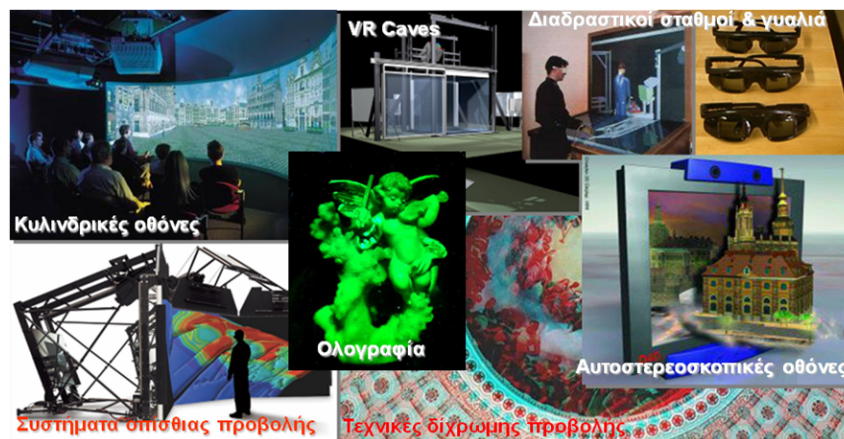
- [29] H. Sundar, D. Silver, N. Gagvani, S. Dickenson, "Skeleton based shape matching and retrieval", *Proc. shape modeling international*, pp 130-139, 2004.

Μέρος IV. Απεικόνιση, αναπαράσταση και εφαρμογές

1. Απεικόνιση τριδιάστατων εικόνων

Ο τομέας της απεικόνισης τριδιάστατων (3D) εικόνων καθώς και οι εφαρμογές τους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς στον κύκλο εργασιών που σχετίζονται με 3D εικόνες. Περιλαμβάνει αλγορίθμους, μεθόδους και τεχνολογίες με σκοπό την επιτυχή παρουσίαση 3D εικόνων. Στο παρόν άρθρο γίνεται μια προσπάθεια συγκεντρωτικής παρουσίασης των σχετιζόμενων αυτών τεχνολογιών και δίνεται μια εισαγωγή στην Εικονική Πραγματικότητα που αποτελεί το κομβικό σημείο συνάντησης και συνδυασμού όλων των τεχνολογιών 3D εικόνων με στόχο την καλύτερη δυνατή εξομοίωση της πραγματικότητας.

Οι απεριόριστες δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης της ψηφιοποιημένης πληροφορίας, αλλά και η χαμηλού κόστους μαζική διάθεση και αναπαραγωγή της, αποτελούν, ίσως, τα πιο τρανταχτά επιχειρήματα για την υπεροχή της ψηφιακής καταγραφής έναντι κάθε μορφής αναλογικής καταγραφής. Σήμερα, η κυριαρχία της ψηφιακής καταγραφής είναι προφανής σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με την πιο πρόσφατη αυτή της ψηφιακής καταγραφής εικόνας, κινούμενης και μη, μέσω των ψηφιακών φωτογραφικών και κινηματογραφικών μηχανών. Στο μέλλον, η κυριαρχία της ψηφιακής καταγραφής αναμένεται να εξαπλωθεί κατά μια διάσταση επιπλέον, δηλαδή στον τομέα της τρίτης διάστασης, προσφέροντας έτσι στον τελικό αποδέκτη μια πληρέστερη περιγραφή της καταγεγραμμένης πληροφορίας. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια είναι η χρήση των κατάλληλων εργαλείων τόσο για την καταγραφή όσο και για την προβολή της πληροφορίας αυτής.



Εικόνα 94. Σύγχρονες μέθοδοι απεικόνισης 3D εικόνων

Στο παρόν άρθρο γίνεται αναφορά στους δυνατούς τρόπους απεικόνισης τριδιάστατης πληροφορίας, όπως επίσης και στις μορφές και τους τρόπους ανάπλασης και αναπαραγωγής της.

2. Πρακτικές και τεχνικές λύσεις απεικόνισης 3Δ εικόνων

Το προϊόν που παράγεται είτε με μοντελοποίηση είτε με τριδιάστατη ψηφιοποίηση κάποιου θέματος είναι η μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας του, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από επιπλέον πληροφορίες, όπως είναι για παράδειγμα το χρώμα του αντικειμένου. Ο τεράστιος όγκος των δεδομένων της ψηφιακής 3Δ περιγραφής κάποιου θέματος, για να καταστεί κατανοητή από τους περισσότερους, θα πρέπει να παρουσιαστεί με κάποιο τρόπο, ο οποίος θα είναι ικανός να αποδώσει την πληροφορία έτσι όπως την αντιλαμβάνεται καλύτερα ο άνθρωπος. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος παρουσίασης της πληροφορίας αυτής, είναι αυτός της οπτικής αναπαράστασής της μέσω των διάφορων τεχνολογικών λύσεων απεικόνισης ψηφιακής πληροφορίας. Η συσκευή απεικόνισης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην οπτική απόδοση της πληροφορίας, αφού από αυτή θα εξαρτηθεί πως θα παρουσιαστούν τα δεδομένα. Όσο πιο φωτορεαλιστική είναι η παρουσίαση των δεδομένων της τριδιάστατης περιγραφής κάποιου θέματος, τόσο πιο εύκολα ο χρήστης θα αντιληφθεί την πληροφορία που εκφράζουν τα δεδομένα αυτά. Ωστόσο, εκτός από τον τεχνολογικό εξοπλισμό απεικόνισης, η φωτορεαλιστική οπτική απόδοση κάποιου 3Δ θέματος εξαρτάται και από το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση των δεδομένων που περιγράφουν το θέμα αυτό.

Έτσι, για να γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο η ψηφιακά αποθηκευμένη πληροφορία, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μετατροπή της σε μια μορφή αναγνωρίσιμη από αυτόν. Αυτό επιτυγχάνετε μέσω των συσκευών εξόδου του ηλεκτρονικού υπολογιστή που είναι προσανατολισμένες στην επικοινωνία ανθρώπου-υπολογιστή. Μια από αυτές είναι και η οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, στην οποία μπορεί να γίνει προσωρινά η οπτική παρουσίαση της ψηφιακής πληροφορίας.

Η οπτική αναπαράσταση της αποθηκευμένης πληροφορίας έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης μέχρι να καταλήξει στην έγχρωμη οθόνη που όλοι μας γνωρίζουμε σήμερα. Κατά τη δεκαετία του 1950 ήταν εφικτή μόνο μέσω πάμπολλων λυχνιών και εκτυπώσεων, ενώ η οπτική αναπαράσταση ψηφιακής πληροφορίας σε οθόνη διαδόθηκε κατά τη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, το μόνο που ήταν σε θέση να απεικονίσουν οι οθόνες αλλά και οι υπολογιστές της δεκαετίας του 70 ήταν μονόχρωμο κείμενο και γραφικά χαμηλής ανάλυσης. Σήμερα βέβαια, τόσο οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές όσο και οι οθόνες τους, είναι σε θέση να απεικονίσουν από απλό μονόχρωμο κείμενο μέχρι και έγχρωμα γραφικά πολύ υψηλής ευκρίνειας και για το λόγο αυτό η χρήση τους έχει επεκταθεί σε εφαρμογές πολύ πιο πέρα από τη συγγραφή κειμένων και τη διαχείριση εταιρικών βάσεων δεδομένων.

Η πιο κοινότυπη συσκευή απεικόνισης ψηφιακών δεδομένων από κάποιο Η/Υ ανέκαθεν ήταν η κοινή οθόνη καθοδικού σωλήνα, ωστόσο η σύγχρονη τεχνολογία έχει να επιδείξει μια ευρεία γκάμα προϊόντων ηλεκτρονικής παρουσίασης ψηφιακής πληροφορίας, η οποία έχει ως στόχο την κάλυψη των ιδιαίτερων απαιτήσεων της κάθε εφαρμογής. Τεχνολογίες όπως αυτή των υγρών κρυστάλλων (LCD) αλλά και των προβολικών τεχνολογίας Digital Light Processor (DLP) ήδη παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις σύγχρονες συσκευές απεικόνισης, ενώ στο πολύ κοντινό μέλλον η τεχνολογία του καθοδικού σωλήνα, που μας εξυπηρετούσε τα τελευταία 70 χρόνια, πρόκειται να αποσυρθεί οριστικά. Ποιες, όμως, είναι οι διαθέσιμες τεχνολογίες απεικόνισης και ποια είναι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της καθεμιάς; Πριν εξετάσουμε την κάθε τεχνολογία απεικόνισης ξεχωριστά, θα ήταν σκόπιμο να παρουσιάσουμε κάποια γενικά στοιχεία που είναι κοινά σε όλες της συσκευές απεικόνισης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα οποία είναι:

1. Το **μέγεθος** της οθόνης, το οποίο μετράται σε ίντσες και εκφράζει το μέγεθος της διαγωνίου του πλαισίου απεικόνισης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή τόσο μεγαλύτερη είναι και η εικόνα που παρουσιάζεται στην οθόνη. Συνεπώς, όσο αυξάνεται το μέγεθος της απεικόνισης τόσο αυξάνεται και η απόσταση από την οποία μπορεί αυτή να καταστεί αντιληπτή και έτσι η πληροφορία είναι εφικτό να παρουσιαστεί σε μεγαλύτερο κοινό από την ίδια συσκευή απεικόνισης.
2. Ο **λόγος των πλευρών** μιας οθόνης, εκφράζεται με το λόγο δύο αριθμών $X:Y$ και αφορά στην αναλογία μεγέθους μεταξύ της οριζόντιας και κατακόρυφης πλευράς της οθόνης. Οι πιο κοινές αναλογίες είναι αυτές των 4:3, 16:10 και 16:9. Σύμφωνα με έρευνες, το οπτικό πεδίο του ανθρώπου προσεγγίζεται καλύτερα από την αναλογία 16:9 και για το λόγο αυτό οι περισσότερες σύγχρονες οθόνες είναι κατασκευασμένες στην αναλογία αυτή.
3. Η **ανάλυση** της οθόνης, εκφράζει το πλήθος των εικονοστοιχείων οθόνης σε μια ίντσα οριζόντιας ή κάθετης κατεύθυνσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση μιας οθόνης τόσο ευκρινέστερη και ξεκούραστη είναι μια εικόνα στο ανθρώπινο μάτι. Τυπικές τιμές αναλύσεων είναι τα 72 dpi (dots per inch) ή τα 96 dpi. Στις σύγχρονες οθόνες γίνεται σημαντική προσπάθεια αύξησης της ανάλυσης για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας και έχουν αναφερθεί οθόνες με αναλύσεις άνω των 150 dpi. Με απλούς υπολογισμούς η εύρεση της ανάλυσης μιας οθόνης εκφράζεται τελικά ως εξής:

$$dpi = \frac{W}{d} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_w}\right)^2}$$

όπου W η μέγιστη οριζόντια ανάλυση οθόνης σε pixel

d η διαγώνιος της οθόνης σε ίντσες

λ_h η κάθετη συνιστώσα της αναλογίας διαστάσεων της οθόνης

λ_w η οριζόντια συνιστώσα της αναλογίας διαστάσεων της οθόνης

Έτσι, για παράδειγμα, σε μια οθόνη 24 ιντσών με μέγιστη ανάλυση 1600x1200 pixel αναλογία 16:10, η ανάλυση σε dpi (ή ppi – pixels-per-inch) υπολογίζεται ως:

$$dpi = \frac{1600}{24} \sqrt{1 + \left(\frac{10}{16}\right)^2} = 78.617$$

4. **Βάθος χρώματος**, εκφράζεται σε bit ανά pixel (bpp) και αφορά στο μέγιστο πλήθος χρωμάτων που μπορεί να απεικονίσει η συσκευή. Τα χρώματα που είναι εφικτό να αποδοθούν από μια συσκευή απεικόνισης, είναι ο αριθμός δύο υψωμένος στη δύναμη των bpp που χαρακτηρίζουν τη συσκευή αυτή. Έτσι όταν στα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας συσκευής απεικόνισης αναφέρεται πως αυτή είναι ικανή να αποδώσει βάθος χρώματος 24 bpp, εννοείται πως είναι εφικτό να αποδοθούν $2^{24}=16.777.216$ διαφορετικά χρώματα. Παρόλο που ο άνθρωπος δεν είναι σε θέση να ξεχωρίσει ούτε καν το ένα δέκατο από αυτά όταν παρουσιάζονται ταυτόχρονα στην ίδια εικόνα, τα 24 bpp αποτελούν τη βάση στις σύγχρονες έγχρωμες συσκευές απεικόνισης.
5. Η **φωτεινότητα** μιας οθόνης μετριέται σε lumens ή σε cd/m^2 και εκφράζει τη μέγιστη ένταση φωτός που εκλύεται από τη συσκευή απεικόνισης ή τη μέγιστη φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας.
6. Η **αντίθεση** της οθόνης, εκφράζεται ως λόγος $X:I$ και αφορά σε διαφορά στη φωτεινότητα μεταξύ του πιο φωτεινού και του πιο σκοτεινού pixel που η οθόνη απεικονίζει. Όσο πιο μεγάλο είναι το X τόσο πιο μεγάλη είναι η

αντίθεση της οθόνης και κατά συνέπεια τόσο πιο «ζωηρά» εμφανίζονται τα χρώματα και οι διαβαθμίσεις της φωτεινότητας.

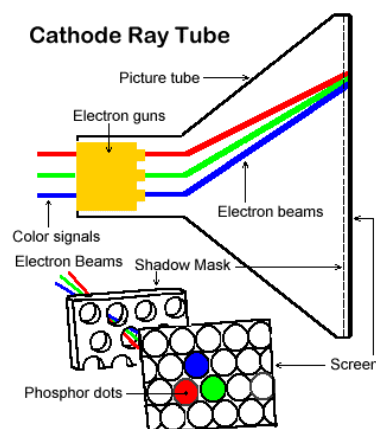
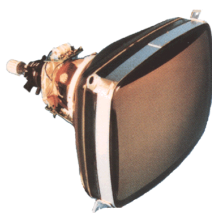
7. Η **συχνότητα ανανέωσης** της οθόνης, εκφράζεται σε Hz και εκφράζει πόσες φορές ανανεώνεται η απεικόνιση στην οθόνη σε ένα δευτερόλεπτο. Τιμές από 75 Hz και πάνω είναι οι πλέον αποδεκτές, κυρίως για λόγους εργονομίας, αφού η συχνότητα αυτή αποτελεί ένα κατώφλι κάτω από το οποίο είναι πιθανό πολλοί άνθρωποι να δουν την ανανέωση της οθόνης ως ένα «τρεμούλιασμα» (flickering) στην εικόνα.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι κοινά για όλες τις συσκευές απεικόνισης και για το λόγο αυτό δε γίνεται αναφορά σε αυτά ονομαστικά. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες τεχνολογίες απεικόνισης που είναι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα και θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη δυνατότητά τους για παρουσίαση τριδιάστατων θεμάτων.

2.1. Οθόνες καθοδικών ακτίνων (CRT- Cathode Ray Tube)

Η τεχνολογία οθονών CRT ανακαλύφθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1920 από τον Karl Ferdinand Braun και ήταν μια παραλλαγή του σωλήνα ακτίνων X του Crooke [1]. Οι σημερινές οθόνες CRT βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με αυτές της δεκαετίας του 1920, ενώ η πολύχρωμη εξέλιξή τους τις έχει καταστήσει ως μια από τις πιο διαδεδομένες και συμφέρουσες λύσεις ηλεκτρονικής απεικόνισης, ενώ το εύρος των εφαρμογών που κάνουν χρήση της τεχνολογίας αυτής είναι τεράστιο, καλύπτοντας τόσο τις οικιακές μας ανάγκες όσο και τις επαγγελματικές.

Αρχή λειτουργίας: Η εικόνα στις οθόνες CRT σχηματίζεται με τον εξής τρόπο: μια δέσμη ηλεκτρονίων, η λεγόμενη ακτίνα καθόδου, εστιάζεται και κατευθύνεται από ηλεκτρομαγνήτες σε μια μεγάλη γυάλινη επιφάνεια επιστρωμένη με φώσφορο, την οθόνη, όπου βρίσκεται η άνοδος. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και πέφτουν πάνω στα μόρια του φωσφόρου με πολύ μεγάλη ταχύτητα, αναγκάζοντάς τα έτσι να εκπέμπουν φως. Αυτό συμβαίνει πάρα πολλές φορές το δευτερόλεπτο με την ακτίνα να σαρώνει όλη την επιφάνεια της οθόνης από δεξιά προς τα αριστερά και από πάνω προς τα κάτω. Αναλόγως με αυτό που πρέπει να απεικονιστεί, η δέσμη ηλεκτρονίων καθώς σαρώνει την επιφάνεια της οθόνης αλλάζει ένταση με αποτέλεσμα, κάπου να εκλύεται λιγότερο και κάπου αλλού περισσότερο φως, σχηματίζοντας έτσι την εικόνα που πρέπει να παρουσιαστεί (Εικόνα 95).



Εικόνα 95. Τυπικά οθόνη τύπου CRT, ο καθοδικός σωλήνας και η αρχή λειτουργίας του⁴

Πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζουν πολύ καλή χρωματική απόδοση και για το λόγω αυτό αποτελούν απαραίτητο εργαλείο σε εφαρμογές γραφικών.
- Επιδεικνύουν πολύ γρήγορους ρυθμούς ανανέωσης της εικόνας, με αποτέλεσμα να αποτελούν μια άριστη λύση για εφαρμογές κινούμενης εικόνας, όπως για παράδειγμα τα παιχνίδια και η επεξεργασία βίντεο. Λόγω αυτής της ιδιότητάς τους, είναι εφικτή η έγχρωμη στερεοσκοπική, πραγματικά τριδιάστατη, απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος (shutter glasses) στα οποία θα αναφερθούμε αργότερα.
- Μπορούμε να τις παρακολουθούμε ακόμα και από 89 μοίρες απόκλιση από την κατακόρυφο του επίπεδου της οθόνης, χωρίς να εμφανίζονται αλλοιώσεις στα χρώματα ή στη φωτεινότητα της απεικόνισης.

Μειονεκτήματα:

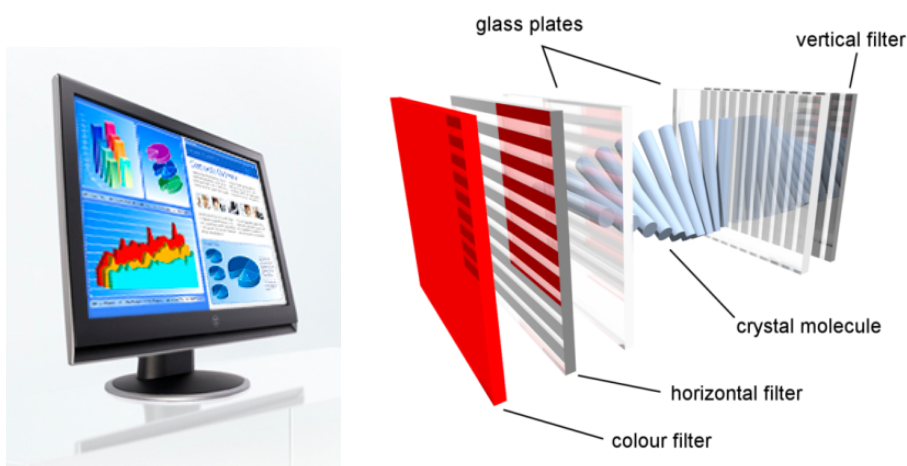
- Όσο αυξάνεται το μέγεθος της οθόνης τους τόσο αυξάνεται ο όγκος και το βάρος τους.
- Καταναλώνουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα μια οθόνη των 19 ιντσών καταναλώνει γύρω στα 160 Watt ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανάλωση είναι και αυτή ανάλογη με το μέγεθός τους. Η μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται και σε μεγαλύτερη έκκλιση θερμότητας.
- Η κατασκευή αλλά και η απόσυρσή τους επιβαρύνουν το περιβάλλον πολύ περισσότερο από κάποιες άλλες τεχνολογίες απεικόνισης, λόγω της μεγάλης ποσότητας μόλυβδου που περιέχουν στο κρύσταλλο της οθόνης.
- Παρουσιάζουν αυξημένη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- Παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην απεικόνιση, ιδιαίτερα στα άκρα της οθόνης, η διόρθωση των οποίων απαιτεί περαιτέρω ηλεκτρονικό εξοπλισμό που αυξάνει το κόστος.
- Χαμηλή ευκρίνεια απεικόνισης, κυρίως σε κακής ποιότητας οθόνες, λόγω της αδυναμίας σωστής εστίασης της ακτίνας ηλεκτρονίων.
- Το ωφέλιμο μέγεθος της απεικόνισης είναι αρκετά μικρότερο από το μέγεθος της οθόνης που ανακοινώνει ο κατασκευαστής. Για παράδειγμα μια οθόνη CRT των 17 ιντσών έχει ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης λίγο μεγαλύτερη από 15 ίντσες.
- Είναι ευπαθείς και παρουσιάζουν σχετικά μικρή διάρκεια ζωής, συνήθως οι κατασκευαστές εγγυώνται περί τις 20.000 ώρες καλής λειτουργίας.

2.2. Οθόνες υγρών κρυστάλλων LCD, TFT

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων βασίζονται στην ανακάλυψη του υγρού κρυστάλλου που έκανε το 1888 ο αυστριακός βοτανολόγος Friedrich Reinitzer. Ωστόσο η πρώτη πειραματική συσκευή ηλεκτρονικής απεικόνισης με τη βοήθεια υγρών κρυστάλλων έγινε από την εταιρία RCA το 1968 και από τότε μέχρι σήμερα η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη έχει καταστήσει τις οθόνες υγρών κρυστάλλων ως το μεγαλύτερο αντίπαλο των οθονών τεχνολογίας CRT [2].

Αρχή λειτουργίας: Το βασικό δομικό στοιχείο μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων είναι ο υγρός κρύσταλλος. Όσο και αν ακούγεται οξύμωρο, αφού ένας κρύσταλλος ποτέ δε θα μπορούσε να χαρακτηριστεί υγρός, υπάρχουν κάποια υλικά στη φύση τα οποία βρίσκονται σε μια ενδιάμεση κατάσταση, δηλαδή δεν μπορούν να θεωρηθούν ούτε υγρά αλλά ούτε στερεά. Από τη μια τα μόριά τους μπορούν να κινηθούν ελεύθερα όπως τα υγρά, ενώ από την άλλη ο προσανατολισμός τους παραμένει ο ίδιος, όπως τα

στερεά. Λόγω της μοριακής τους δομής, οι υγροί κρύσταλλοι έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν την πόλωση του φωτός που περνά από μέσα τους, ανάλογα με το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται σε αυτούς. Συνεπώς, εσωκλείοντας ένα στρώμα υγρών κρυστάλλων μεταξύ δύο φίλτρων οριζόντιας/κάθετης πόλωσης του φωτός, είναι εφικτό να ελεγχθεί η ποσότητα του φωτός που θα περάσει τη διάταξη αυτή, ανάλογα με το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο στρώμα των υγρών κρυστάλλων. Μια οθόνη υγρών κρυστάλλων δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα τέτοιο «σάντουιτς» πολωτικών φίλτρων και υγρών κρυστάλλων. Επειδή όμως οι υγροί κρύσταλλοι δεν εκπέμπουν φως, οι οθόνες υγρών κρυστάλλων φωτίζονται από κάποια εξωτερική πηγή φωτός, η οποία στην περίπτωση των οθονών υγρών κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται στους Η/Υ, είναι μια μικρή λάμπα φθορίου πίσω από τα στρώματα φίλτρων/κρυστάλλων, η οποία συνοδεύεται από μια επιφάνεια διάχυσης του φωτός για την ισόποση κατανομή της φωτεινότητας σε όλη την επιφάνεια της οθόνης. Η εικόνα σχηματίζεται ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο που αναπτύσσεται στους υγρούς κρυστάλλους, είτε από ένα πλέγμα μικροσκοπικών ηλεκτροδίων στις οθόνες τύπου LCD, οι οποίες έχουν ήδη ξεπεραστεί και η παραγωγή τους έχει περιοριστεί στο ελάχιστο, είτε από μια συστοιχία ημιαγωγών (τρανζίστορ) στις οθόνες τύπου TFT, οι οποίες αποτελούν την πλέον αποδεκτή πρόταση απεικόνισης με τη βοήθεια υγρών κρυστάλλων (Εικόνα 96).



Εικόνα 96. Τυπική οθόνη τύπου LCD (TFT) και η αρχή λειτουργίας της⁵

Πλεονεκτήματα:

- Μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια λιγότερη έκλυση θερμότητας από τη συσκευή στο περιβάλλον. Μια οθόνη TFT των 15 ιντσών καταναλώνει περί τα 35 Watt ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η κατανάλωση μιας αντίστοιχης CRT κυμαίνεται γύρω στα 90.
- Εκπέμπουν πολύ λίγη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Μικρό βάρος και πολύ μικρός όγκος. Χαρακτηρίζονται κυρίως από το πολύ μικρό τους πάχος, που σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να συγκριθεί με αυτό ενός κάδρου.
- Δεν παρατηρείται τρέμουλο στην εικόνα τους, αφού αυτή δεν σχηματίζεται από μια ακτίνα που σαρώνει την επιφάνεια της οθόνης πολλές φορές το δευτερόλεπτο. Αντιθέτως η εικόνα που σχηματίζεται παραμένει ως έχει μέχρι αυτή να ανανεωθεί με κάποια καινούργια.

⁵

http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_display

- Δεν παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα. Η ευθεία γραμμή απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή. Η ιδιότητα αυτή, όπως θα δούμε παρακάτω, επέτρεψε την κατασκευή οθονών τριδιάστατης στερεοσκοπικής απεικόνισης, οι οποίες επιτρέπουν σε έναν ή και περισσότερους χρήστες να αντιληφθούν πραγματικό βάθος, χωρίς τη χρήση ειδικών γυαλιών ή άλλων συσκευών.
- Η ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης είναι ίση με το μέγεθος της οθόνης. Για παράδειγμα, μια οθόνη CRT 17 ιντσών το μέγιστο μέγεθος απεικόνισης που μπορεί να επιτύχει είναι μεταξύ 15 και 16 ίντσες, ενώ σε μια αντίστοιχη TFT αυτό είναι ίσο με 17 ίντσες.
- Κατασκευάζονται από οργανικά υλικά περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι κατασκευαστές εγγυώνται περί τις 50.000 ώρες καλής λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής των οθονών υγρών κρυστάλλων καθορίζεται από τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα φθορισμού που παρέχει το απαιτούμενο φως για την ανάγνωση τους. Αν μετά από 50.000 ώρες ο λαμπτήρας αυτός πάψει να λειτουργεί και αντικατασταθεί με καινούργιο, τότε η διάρκεια ζωής της οθόνης παρατείνεται για άλλες 50.000 ώρες καλής λειτουργίας.

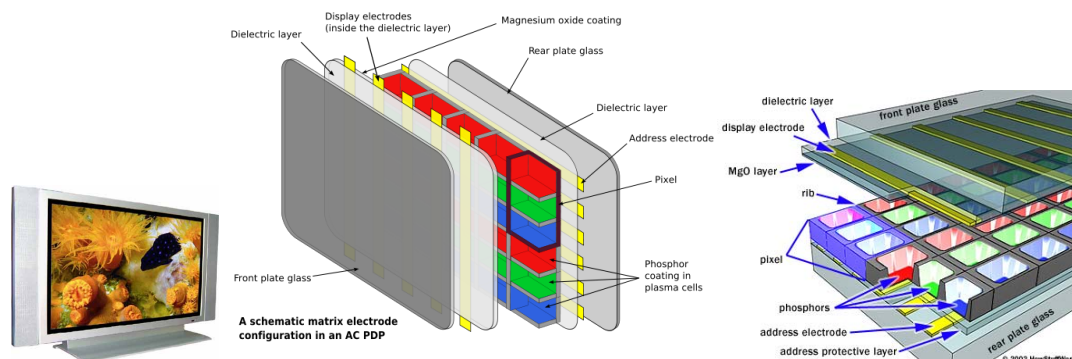
Μειονεκτήματα:

- Εύθραυστες και ευαίσθητες σε κοινά καθαριστικά γυάλινων επιφανειών, με τα οποία πολλοί συνήθιζαν να καθαρίζουν τις οθόνες τύπου CRT.
- Υποστηρίζουν μόνο μια ανάλυση απεικόνισης. Για να αποδοθεί σωστά η απεικόνιση μεγαλύτερης ή μικρότερης ανάλυσης, εφαρμόζεται ανάλογα μεγέθυνση ή σμίκρυνση από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της οθόνης, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η καθαρότητα και η ευκρίνεια της απεικόνισης.
- Περιορισμένο εύρος θέασης τους. Αν και οι περισσότερες σύγχρονες οθόνες τύπου TFT έχουν βελτιωθεί αρκετά σε αυτό τον τομέα, παρόλα αυτά, δεν είναι λίγες αυτές που η παρακολούθησή τους από μεγάλη γωνία παρουσιάζει προβλήματα, όπως αλλοιώσεις τόσο στα χρώματα, όσο και στην φωτεινότητα της απεικόνισης.
- Κακή χρωματική απόδοση και μικρή αντίθεση, ειδικά στα μοντέλα χαμηλού κόστους. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη της τεχνολογίας των οθονών αυτού του τύπου επικεντρώνεται σε αυτό ακριβώς το πρόβλημα.
- Μεγάλος χρόνος απόκρισης / μικρός ρυθμός ανανέωσης της εικόνας, δηλαδή, χρόνος που απαιτείται μέχρι να αλλάξει χρώμα ή φωτεινότητα ένα εικονοστοιχείο της οθόνης, με αποτέλεσμα σε εφαρμογές που υπάρχει έντονη κίνηση να παρουσιάζονται είδωλα και άλλες παρενέργειες. Στις σύγχρονες οθόνες υγρών κρυστάλλων ωστόσο τέτοια φαινόμενα δεν είναι και τόσο συχνά, αφού είναι αρκετά γρήγορης απόκρισης (κάτω από τα 12 χιλιοστά του δευτερολέπτου) και έτσι η χρήση τους για εφαρμογές με έντονη κίνηση δε παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. Παρόλα αυτά όμως, η στερεοσκοπική έγχρωμη απεικόνιση σε μια απλή (2D) οθόνη υγρών κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας ειδικά γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος, είναι ακόμα αδύνατη.

2.3. Οθόνες PLASMA

Η ηλεκτρονική απεικόνιση τεχνολογίας πλάσματος ήταν μια εφεύρεση του πανεπιστημίου του Illinois της Αμερικής ήδη από το 1964. Η βασική ιδέα ήταν η κατασκευή μιας συσκευής απεικόνισης η οποία θα αποτελούνταν από ένα πίνακα πολύ μικρών λαμπτήρων Νέον, έναν για κάθε εικονοστοιχείο. Έτσι το 1967 κατασκευάστηκε στο εργαστήριο η πρώτη χρηστική συσκευές απεικόνισης με ανάλυση 16 X 16 εικονοστοιχεία και χρώματος πορτοκαλί [3]-[5]. Από τότε μέχρι σήμερα, η εξέλιξη έχει καταστήσει την τεχνολογία πλάσματος ικανή τόσο για την απεικόνιση εικόνων υψηλής ευκρίνειας, όσο και για την ρεαλιστική απόδοση των χρωμάτων, ενώ την ίδια στιγμή θεωρείται μια από τις καλύτερες λύσεις για την κατασκευή επίπεδων και λεπτών οθονών μεγάλου μεγέθους.

Αρχή λειτουργίας: Η εικόνα στις οθόνες πλάσματος σχηματίζεται από χιλιάδες μικροσκοπικούς λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι σε διατεταγμένες τριάδες διαφορετικού χρώματος ορίζουν ένα εικονοστοιχείο (pixel). Κάθε ένας από τους λαμπτήρες αυτούς είναι ένας γυάλινος θάλαμος, του οποίου οι πέντε από τις έξι πλευρές είναι επιστρωμένες με φωσφορο χρώματος κόκκινου, πράσινου ή μπλε, ενώ η έκτη πλευρά είναι διάφανη με προσανατολισμό την ορατή επιφάνεια της οθόνης. Οι θάλαμοι αυτοί περιέχουν ένα μείγμα ευγενών αερίων (Νέον και Ξένον) υπό χαμηλή πίεση. Όταν διοχετευτεί σε αυτούς τους θαλάμους ηλεκτρική ενέργεια υπό υψηλή τάση, τότε τα ευγενή αέρια διεγείρονται και εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία. Η εκλύομενη υπεριώδης ακτινοβολία με τη σειρά της διεγείρει τα μόρια του φωσφόρου που βρίσκεται στα τοιχώματα των θαλάμων προκαλώντας έτσι την εκπομπή φωτός του αντίστοιχου χρώματος με αυτό του φωσφόρου.



Εικόνα 97. Τυπική Plasma οθόνη και διαγράμματα της δομής της⁶

Πλεονεκτήματα:

- Μικρός όγκος και σχετικά μικρό βάρος. Χαρακτηρίζονται κυρίως από το πολύ μικρό τους πάχος, αντίστοιχο με αυτό των οθονών TFT.
- Άριστη αντίθεση, η οποία σε μερικές σύγχρονες οθόνες φτάνει και το 3000:1.
- Πολύ καλή απόδοση των χρωμάτων.
- Δεν παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα. Η ιδιότητα αυτή, όπως θα δούμε παρακάτω, επέτρεψε την κατασκευή οθονών τριδιάστατης στερεοσκοπικής απεικόνισης, οι οποίες επιτρέπουν σε έναν ή και περισσότερους χρήστες να αντιληφθούν πραγματικό βάθος, χωρίς τη χρήση ιδικών γυαλιών ή άλλων συσκευών.
- Η ωφέλιμη περιοχή απεικόνισης είναι ίση με το μέγεθος της οθόνης.

⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_display, <http://electronics.howstuffworks.com/plasma-display.htm>

- Σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Σε ορισμένα μοντέλα είναι αντίστοιχη με αυτή των οθονών TFT, δηλαδή γύρω στις 50.000 ώρες λειτουργίας.
- Μεγάλο μέγεθος. Στην αγορά κυκλοφορούν οθόνες πλάσματος με μέγεθος 65 ιντσών και άνω.
- Προσφέρουν πεδίο θέασης 170 μοιρών και δεν παρουσιάζουν αλλοιώσεις στην εικόνα όταν αυτή παρατηρείται υπό μεγάλη γωνία σε σχέση με την κατακόρυφο στο επίπεδο της οθόνης.
- Γρήγορη απόκριση σε κινούμενη εικόνα.

Μειονεκτήματα:

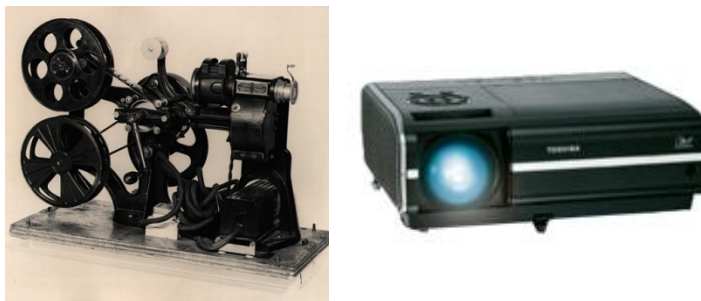
- Υποστηρίζουν μόνο μια ανάλυση απεικόνισης. Για να αποδοθεί σωστά η απεικόνιση μεγαλύτερης ή μικρότερης ανάλυσης, εφαρμόζεται ανάλογα μεγέθυνση ή σμίκρυνση από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα της οθόνης, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η καθαρότητα και η ευκρίνεια της απεικόνισης.
- Η ανάλυση τους σε σχέση με το μέγεθός τους είναι μικρή.
- Σε στατικές εικόνες, όπου ένα εικονοστοιχείο διατηρεί το ίδιο χρώμα για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρουσιάζεται το φαινόμενο της τοπικής καταστροφής του εικονοστοιχείου. Έτσι όταν απεικονίζεται στην ίδια θέση της οθόνης η ίδια εικόνα ή αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να παρουσιαστεί μόνιμη βλάβη σε εκείνη την περιοχή. Για το λόγο αυτό η χρήση των οθονών πλάσματος με H/Y δε συνιστάται.
- Η διάρκεια ζωής τους μειώνετε δραματικά όταν λειτουργούν στο μέγιστο της φωτεινότητάς τους. Μετά το πέρας της διάρκειας ζωής της μια οθόνη αυτού του τύπου δεν είναι επισκευάσιμη και συνεπώς καθίσταται άχρηστη.
- Ακριβότερες ακόμα και από τις αντίστοιχες οθόνες υγρών κρυστάλλων. Ωστόσο σε μεγέθη μεγαλύτερα των 32 ιντσών η διαφορά στην τιμή εξισορροπείται, αφού οι παραγωγή μεγάλου μεγέθους οθονών υγρών κρυστάλλων είναι ακόμα ακριβή.

2.4. Προβολικά συστήματα (Projectors)

Η ιστορία των προβολικών συστημάτων ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα με αυτή του σινεμά. Το 1896 η κατασκευαστική εταιρία του Edison ξεκίνησε την παραγωγή και εμπορική εκμετάλλευση της πρώτης συσκευής προβολής εικόνας σε μεγάλη οθόνη, το *Vitascope*, η οποία ήταν αυτή που άνοιξε την αυλαία για το σινεμά με τη μορφή που τον γνωρίζουμε σήμερα [6].

Παρά την πολύχρονη παρουσία των προβολικών συσκευών στο σινεμά, η προβολή ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας άργησε πάρα πολύ να εμφανιστεί. Η κυριότερη αιτία της καθυστέρησης αυτής, ήταν η έλλειψη της τεχνολογίας σχηματισμού της εικόνας. Οι πρώτες προσπάθειες προβολής ηλεκτρονικά παραγόμενης εικόνας έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1940, με την τοποθέτηση ενός φακού τύπου Fresnel μπροστά από μια κοινή οθόνη τηλεόρασης. Με τη βοήθεια του φακού αυτού, επιτεύχθηκε η μεγεθυμένη προβολή της εικόνας σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια με αρκετά ικανοποιητική ποιότητα. Η διάταξη αυτή αποτέλεσε τον προπάτορα της ηλεκτρονικής προβολής και έδειξε πώς είναι εφικτό να προβληθεί μια ηλεκτρονικά παραγόμενη εικόνα. Έτσι, τη δεκαετία του 1980 έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά τα πρώτα αμιγή προβολικά συστήματα, τα οποία δεν ήταν τίποτα περισσότερο από ένα κλειστό κουτί με μια οθόνη CRT πολύ υψηλής φωτεινότητας, της οποίας η εικόνα προβάλλονταν εκτός της συσκευής μέσω ενός παραθύρου με τους

απαραίτητους φακούς. Ακολουθώντας τις εξελίξεις της τεχνολογίας, η εφαρμογή νέων τεχνολογιών απεικόνισης, όπως αυτή των οθονών υγρών κρυστάλλων, κατέστησε την ηλεκτρονική προβολή αρκετά οικονομική ώστε να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για οικιακή χρήση.



Εικόνα 98. Σύστημα προβολής του χθες⁷ και του σήμερα

Αρχή λειτουργίας: Η βασική αρχή λειτουργίας των προβολικών συστημάτων είναι πολύ απλή, αφού ο βασικός τους σκοπός έγκειται στο να μεγεθύνουν και να εστιάσουν την παραγόμενη εικόνα σε μια επίπεδη λευκή επιφάνεια λίγα μέτρα μακριά από τη συσκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των κατάλληλων φακών για τη μεγέθυνση και την εστίαση μιας πολύ φωτεινής εικόνας, η οποία σχηματίζεται εντός της προβολικής συσκευής.

Μέχρι πρότινος, η εικόνα σχηματιζόταν από τρεις πολύ φωτεινές οθόνες καθοδικού σωλήνα των 9 ιντσών, μια για κάθε ένα βασικό χρώμα (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ωστόσο η κάθε οθόνη απαιτούσε τα δικά της οπτικά προβολής. Λόγο της ιδιαιτερότητας αυτής, το κόστος κατασκευής και απόκτησης αυτών των συσκευών ήταν αρκετά υψηλό, ενώ ταυτόχρονα η τοποθέτηση και ρύθμισή τους αποτελεί μια δύσκολη και χρονοβόρο διαδικασία.

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία απεικόνισης που χρησιμοποιείται σήμερα στις συσκευές προβολής χαμηλού κόστους, είναι αυτή της μικροσκοπικής διαφανούς οθόνης υγρών κρυστάλλων, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πολύ ισχυρής πηγής φωτός (προβολέα Ξένον) και των οπτικών προβολής της εικόνας. Το χαμηλό κόστος των οθονών υγρών κρυστάλλων, σε συνδυασμό με το μικρό τους μέγεθος και βάρος, επέτρεψε τη δημιουργία φορητών προβολικών συστημάτων χαμηλού κόστους, ικανά να αντεπεξέλθουν τόσο στην προβολή δεδομένων από ηλεκτρονικό υπολογιστή, όσο και σε εφαρμογές οικιακής διασκέδασης.

Το 1987 η εταιρία Texas Instruments, μετά από δεκάχρονη σχετική έρευνα, παρουσίασε την τεχνολογία DMD (Digital Micromirror Device – Συσκευή Ψηφιακών Μικροκαθρεφτών) η οποία αποτελεί σήμερα την πιο εμπορικά επιτυχημένη λύση ηλεκτρονικής προβολής [7],[8]. Η τεχνολογία DMD πείρε το όνομά της από τον τρόπο που λειτουργεί, κατά τον οποίο η τετράγωνη επιφάνεια ενός μικροεπεξεργαστή (DLP Digital Light Processor – Ψηφιακός Επεξεργαστής Φωτός) είναι καλυμμένη με χιλιάδες ελεγχόμενους μικροσκοπικούς καθρέφτες. Οι καθρέφτες αυτοί είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε όταν δε περνά ηλεκτρικό ρεύμα από τους αγωγούς ελέγχου τους, είναι προσανατολισμένοι προς μια κατεύθυνση, ενώ όταν διέρχεται ρεύμα από τους αγωγούς, οι καθρέφτες προσανατολίζονται κατά 20 μοίρες προς την αντίθετη κατεύθυνση. Κατά τον τρόπο αυτό, σε ένα προβολικό σύστημα τεχνολογίας DLP, είναι εφικτή η δρομολόγηση του φωτός ενός προβολέα Ξένον προς τους φακούς προβολής, για την απεικόνιση οποιουδήποτε σχήματος. Όταν ο προσανατολισμός

⁷

<http://amescity.blogspot.com/2007/04/projector-in-computer-lab.html>

αυτών των καθρεφτών εναλλάσσεται πολύ γρήγορα (μέχρι και 1024 φορές) στο χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου, είναι εφικτό να ελεγχθεί η ένταση/ενέργεια του φωτός που θα προβληθεί και έτσι να αποδοθούν διάφορες αποχρώσεις. Φιλτράροντας το φως του προβολέα με τη βοήθεια πρισμάτων ή περιστρεφόμενων χρωματικών φίλτρων, η τεχνολογία DMD κατάφερε να αποδώσει πιστά εικόνες με εκατομμύρια χρώματα και να κερδίσει τον χαρακτηρισμό της πιο εμπορικά επιτυχημένης τεχνολογίας ηλεκτρονικής προβολής.

Πλεονεκτήματα:

- Μεταβλητό μέγεθος απεικόνισης, το οποίο ρυθμίζεται από την απόσταση προβολής και τους φακούς εστίασης.
- Ο οικονομικότερος τρόπος για ηλεκτρονική απεικόνιση με μέγεθος μεγαλύτερο των 40 ιντσών.
- Η οθόνη μπορεί να πάρει οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, ανάλογα με την επιφάνεια προβολής. Δυνατότητα που επιτρέπει την κατασκευή ημισφαιρικών οθονών πανοραμικής απεικόνισης.
- Ικανοποιητική απόδοση χρωμάτων και κινούμενων εικόνων.
- Οι περισσότερες συσκευές ηλεκτρονικής προβολής, κυρίως αυτές που προσανατολίζονται για εφαρμογές γραφείου και οικιακής ψυχαγωγίας, είναι ελαφριές και συμπαγείς. Καταλαμβάνουν πολύ λιγότερο χώρο ακόμα και από οθόνες CRT των 14 ιντσών, ωστόσο το πεδίο προβολής τους πρέπει να είναι ελεύθερο εν ώρα χρήσης.

Μειονεκτήματα:

- Καταναλώνουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια, η ελάχιστη τιμή κατανάλωσης κυμαίνεται κοντά στα 200 watt. Λόγω της κατανάλωσης παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας, για την απαγωγή της οποίας χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες οι οποίοι με τη σειρά τους παράγουν θόρυβο.
- Η φωτεινότητα της απεικόνισης είναι μικρή και συνήθως για να επιτευχθεί μια οπτικά ικανοποιητική απόδοση απαιτούνται ειδικές συνθήκες χαμηλού φωτισμού.
- Τόσο η γεωμετρία, όσο και η φωτεινότητα και χρωματική απόδοση της απεικόνισης, εξαρτώνται από την επιφάνεια προβολής. Για το λόγο αυτό, η χρήση ειδικών οθονών προβολής είναι σε ορισμένες περιπτώσεις απαραίτητη.
- Κατά τη λειτουργία τους ο κώνος προβολής πρέπει να είναι ελεύθερος από οτιδήποτε μπορεί να εμποδίζει την απεικόνιση. Κατά συνέπεια απαιτούν αρκετά μεγάλο χώρο κατά τη χρήση τους.
- Δύσκολη εγκατάσταση. Ειδικά συσκευών οι οποίες δεν προσφέρουν ρυθμίσεις για τη διόρθωση της προοπτικής παραμόρφωσης και απαιτείται η προβολή από γωνία με μεγάλη απόκλιση από την κατακόρυφο στο επίπεδο προβολής.
- Μεγάλο κόστος λειτουργίας, όχι τόσο λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, όσο για τη μικρή διάρκεια ζωής του προβολέα Ξένον που χρησιμοποιούν οι συσκευές τύπου LCD και DMD. Το μέσω χρονικό διάστημα στο οποίο ο λαμπτήρας αυτός θα φτάσει στο μισό της απόδοσής του, κυμαίνεται γύρω στις 2500 ώρες λειτουργίας, ενώ το κόστος αντικατάστασής του είναι υψηλό.

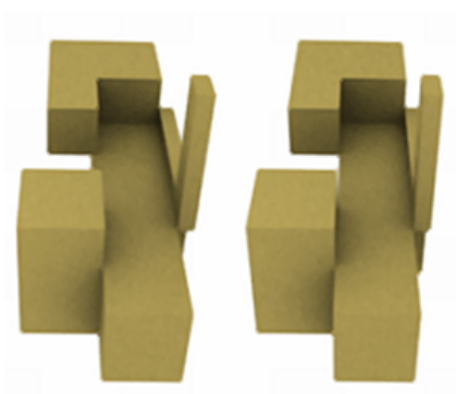
Ο Πίνακας IV παρουσιάζει συγκριτικά τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνολογιών προβολής που παρουσιάστηκαν.

Πίνακας IV. Σύγκριση μεταξύ εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών προβολής

	CRT	LCD/Plasma	DMD (DLP)
Κόστος	Μεγάλο	Μέτριο	Μέτριο - μεγάλο
Φωτεινότητα απεικόνισης (ANSI)	100 - 1500	800 - 4000	1000 - 6000
Αντίθεση X:1	100 - 30.000	250 - 2000	700 - 2000
Απόδοση χρωμάτων	Πολύ καλή	Μέτρια	καλή
Ανάλυση εικόνας	Εως πολύ μεγάλη (3200x2560)	Μέτρια έως μεγάλη (1024x768 - 1920x1080)	Μέτρια έως μεγάλη (1024x768 - 1920x1080)
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	Πολύ μεγάλη (από 600 watt τυπική ελάχιστη τιμή)	Μεγάλη (200 watt τυπική ελάχιστη τιμή)	Μεγάλη (από 200 watt τυπική ελάχιστη τιμή)
Χρόνος καλής λειτουργίας της πηγής φωτός	Πολύ μεγάλος (8000 -10000 ώρες)	Μέτριος (1500 -3000 ώρες)	Μέτριος (1500 -3000 ώρες)
Κόστος αντικατάστασης φωτεινής πηγής	Μεγάλο (700 - 3500 €)	Μέτριο (300 - 1500 €)	Μέτριο (300 - 1500 €)
Δυσκολία εγκατάστασης	Μεγάλη	Μικρή	Μικρή
Ευκολία μεταφοράς	Πολύ μικρή (μεγάλο μέγεθος και βάρος)	Μεγάλη	Μεγάλη
Ρυθμός ανανέωσης της εικόνας	Πολύ μεγάλος (ιδανικός για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος)	Μέτριος (Δεν ικανοποιεί για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος)	Μέτριος-Μεγάλος (ικανοποιεί για στερεοσκοπική απεικόνιση με χρήση γυαλιών ηλεκτρονικού διαφράγματος μόνο σε εξειδικευμένα μοντέλα)

3. Στερεοσκοπική ηλεκτρονική απεικόνιση

Ο άνθρωπος, για την αντίληψη του βάθους και της απόστασης, είναι προικισμένος με την ικανότητα της στερεοσκοπικής όρασης. Όταν παρατηρούμε κάτι και με τα δυο μας μάτια και αυτό βρίσκεται σε σχετικά κοντινή απόσταση, τότε είμαστε σε θέση να αντιληφθούμε τόσο την απόστασή του από εμάς, όσο και τη θέση και μορφή του στο χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται από μια απλή για τον εγκέφαλό μας διαδικασία, κατά την οποία οι δύο σχετικά διαφορετικές δισδιάστατες εικόνες από το κάθε μας μάτι, συνδυάζονται σε μια πλήρη τριδιάστατη εικόνα του περιβάλλοντος χώρου. Όσο πιο κοντά μας βρίσκεται ένα αντικείμενο, τόσο περισσότερο μεγαλώνει η διαφορά στην οπτική γωνία παρατήρησης του από το κάθε μάτι και συνεπώς, τόσο πιο μεγάλες είναι οι διαφορές μεταξύ της εικόνας του αντικειμένου. Αντιθέτως, όταν το αντικείμενο απομακρύνεται από εμάς, οι διαφορές αυτές γίνονται ολοένα και πιο μικρές.



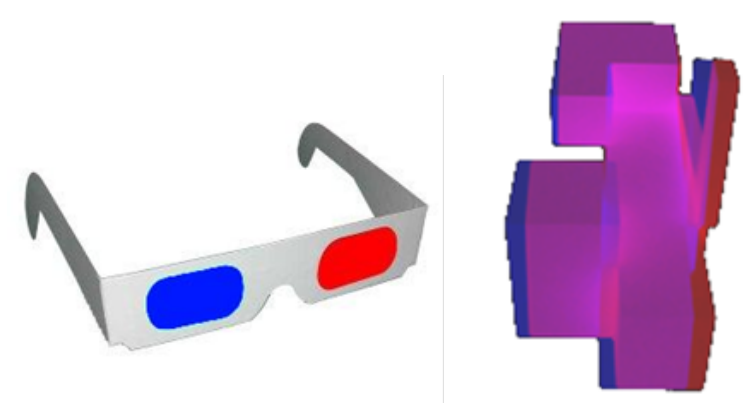
Εικόνα 99. Στέρβο-ζεύγος εικόνων

Στην Εικόνα 99 φαίνεται πώς γίνεται αντιληπτό ένα αντικείμενο από το δεξί και το αριστερό μας μάτι αντίστοιχα (δεξί και αριστερό τμήμα της εικόνας). Αν μπορέσετε να εστιάσετε με το αντίστοιχο μάτι στο αντίστοιχο τμήμα της εικόνας (κοιτάζοντας στο άπειρο μέσα από το χαρτί - όπως όταν συλλογιζόμαστε κάτι χωρίς να εστιάζουμε

το βλέμμα), τότε θα εμφανιστεί το απεικονιζόμενο σχήμα σε τρεις διαστάσεις στο κέντρο αυτής. Εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα αυτή, είναι εφικτό να αντιληφθούμε το χώρο τόσο στον υπαρκτό όσο και στον ιδεατό κόσμο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η αντίληψη του χώρου στον ιδεατό - ψηφιακό κόσμο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών απεικόνισης, οι οποίες είτε έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν στο κάθε μας μάτι μια ανεξάρτητη εικόνα, είτε έχουν τη δυνατότητα να «ζωγραφίσουν» στον πραγματικό χώρο μορφές τριών διαστάσεων.

Η πιο διαδεδομένη και οικονομική λύση τριδιάστατης απεικόνισης είναι προς το παρόν αυτή της παροχής μιας ανεξάρτητης δισδιάστατης εικόνας για κάθε μάτι. Αυτό επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους και διάφορες τεχνολογίες όπως:

Γυαλιά μπλε-κόκκινων φακών: Φορώντας ένα ζευγάρι γυαλιών με ένα μπλε και ένα κόκκινο φακό (για το δεξί και αριστερό μάτι αντίστοιχα) και παρουσιάζοντας ταυτόχρονα (με μια οποιαδήποτε συσκευή δισδιάστατης έγχρωμης απεικόνισης) την εικόνα που προορίζεται για το δεξί μάτι χρωματισμένη μπλε, ενώ αυτή για το αριστερό κόκκινη, είναι εφικτό να καταστεί η μια από τις δύο εικόνες αόρατη για το άλλο μάτι και έτσι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα της στερεοσκοπικής απεικόνισης (Εικόνα 100). Ωστόσο τα χρώματα της απεικόνισης θα είναι πολύ αλλοιωμένα, ενώ όταν ο χρήστης βγάλει τα γυαλιά από τα μάτια του θα χρειαστεί μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να αποκατασταθεί πλήρως το χρώμα στην όρασή του.



Εικόνα 100. Γυαλιά μπλε-κόκκινων φακών και αντίστοιχη ειδική εικόνα

Γυαλιά με φακούς πόλωσης: Το φως που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός, όπως τον ήλιο ή ένα λαμπτήρα, ταλαντώνεται προς όλες τις κάθετες κατευθύνσεις προς τη διεύθυνση διάδοσής του. Όταν το φως περάσει από ένα φακό πόλωσης, η ταλάντωσή του αποκτά διεύθυνση παράλληλη προς τον προσανατολισμό της πόλωσης που προκαλεί ο φακός και έτσι το φως αυτό καθίσταται *πολωμένο*. Όταν το πολωμένο φως συναντήσει ένα φακό πόλωσης, του οποίου η πόλωση είναι κάθετα προσανατολισμένη σε σχέση με αυτή του πολωμένου φωτός, τότε το φως δε μπορεί να διέλθει μέσω του φακού αυτού. Βάση αυτής της ιδιότητας του φωτός, όταν πολωθεί το φως που εκπέμπεται από δυο συσκευές προβολής, οριζόντια και κάθετα αντίστοιχα και στη συνέχεια προβληθεί στο ίδιο σημείο, τότε φορώντας ένα ζευγάρι γυαλιών με φακούς οριζόντιας και κάθετης πόλωσης, θα είμαστε σε θέση να αντιληφθούμε από το κάθε μάτι την εικόνα με την αντίστοιχη πόλωση (Εικόνα 101). Συνεπώς, προβάλλοντας τις κατάλληλες εικόνες, είναι εφικτό να αποδοθεί η επιθυμητή τρίτη διάσταση από μια δισδιάστατη προβολή. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της πρακτικής είναι πως προϋποθέτει από το θεατή να μη γέρνει το κεφάλι του δεξιά ή αριστερά, αφού η ευθυγράμμιση των πολωτικών φίλτρων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη του διαχωρισμού των εικόνων.



Εικόνα 101. Γυαλιά με αντίθετα πολωμένους φακούς και αντίστοιχη εικόνα

Γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος υγρών κρυστάλλων (LCD shutter glasses): Είναι ειδικά γυαλιά τα οποία χρησιμοποιούν για φακούς ένα ζεύγος ηλεκτρονικά ελεγχόμενων διαφραγμάτων φωτός τύπου LCD (Εικόνα 102). Τα διαφράγματα αυτά είναι μεταξύ τους συγχρονισμένα ώστε όταν το ένα είναι ανοιχτό και επιτρέπει τη διέλευση του φωτός, το άλλο να είναι κλειστό και να την εμποδίζει. Όταν αυτά τα γυαλιά λειτουργούν σε συγχρονισμό με μια οθόνη, στην οποία απεικονίζονται εναλλάξ και με ρυθμό τουλάχιστον 50 φορές το δευτερόλεπτο οι εικόνες που αναλογούν στο δεξί και αριστερό μάτι αντίστοιχα, τότε είναι εφικτό να επιτευχθεί έγχρωμη στερεοσκοπική απεικόνιση. Όταν η εναλλαγή των εικόνων γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς, τότε παρατηρείται έντονο «τρέμολο» της εικόνας, το οποίο καθιστά τη θέαση από δύσκολη έως αδύνατη. Για το λόγο αυτό, συσκευές ικανές να ανανεώνουν αυτό που απεικονίζουν με ρυθμούς ίσους ή και μεγαλύτερους των 100 Hz είναι η πιο κατάλληλη επιλογή. Τέτοιους μεγάλους ρυθμούς ανανέωσης προς το παρόν είναι ικανή να προσφέρει μόνο η τεχνολογία CRT, μέσω των οθονών καθοδικού σωλήνα και των αντίστοιχων προβολικών συστημάτων.



Εικόνα 102. Γυαλιά διαφράγματος υγρών κρυστάλλων και αντίστοιχη εικόνα

Προσαρτημένες οθόνες κεφαλής (HMD – Head Mounted Display): Είναι συσκευές που φοριούνται στο κεφάλι (Εικόνα 103), όπως διόπτρες και κράνη, οι οποίες φέρουν μια μικρή οθόνη για κάθε μάτι. Η κάθε μια από τις οθόνες αυτές είναι εφικτό να τροφοδοτηθεί με ανεξάρτητη εικόνα και έτσι να επέλθει το απαιτούμενο αίσθημα του βάθους.



Εικόνα 103. Προσαρμοζόμενη οθόνη κεφαλής

Αυτο-στερεοσκοπικές επίπεδες οθόνες πλάσματος ή TFT με ειδικές μεμβράνες: Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επίπεδων οθονών υγρών κρυστάλλων και πλάσματος, όπως αυτά της αμετάβλητης και εργοστασιακά προκαθορισμένης θέσης των εικονοστοιχείων, σε συνάρτηση με την άριστη γεωμετρία απεικόνισης που επιδεικνύουν, κατέστησαν εφικτό να συνδυαστούν οι οθόνες αυτές με μια τεχνολογική λύση τριδιάστατης απεικόνισης που μέχρι πρότινος ήταν εφαρμόσιμη μόνο σε έντυπες απεικονίσεις. Η τεχνική αυτή επέτρεψε την κατασκευή οθονών τριδιάστατης απεικόνισης, στις οποίες ο χρήστης είναι σε θέση να αντιληφθεί το βάθος χωρίς τη χρήση συμπληρωματικών εξαρτημάτων όπως τα γυαλιά ηλεκτρονικού διαφράγματος ή μπλε και κόκκινων φακών, δίνοντάς του την αίσθηση ότι κοιτά το απεικονιζόμενο θέμα μέσα από ένα παράθυρο (Εικόνα 104). Η τεχνολογία αυτή είναι παρόμοια με αυτή που συναντάμε σε διάφορα σχολικά προϊόντα όπως χάρακες κλπ., στην επίπεδη επιφάνεια των οποίων υπάρχει τυπωμένη μια εικόνα που μεταβάλλονται ανάλογα με τη γωνία θέασης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διάφανων ραβδωτών πλαστικών φίλτρων, τα οποία διαθλούν κατάλληλα την τυπωμένη εικόνα.



Εικόνα 104. Οθόνες TFT και Plasma με ειδικές μεμβράνες/φίλτρα

Η εικόνα αυτή σχηματίζεται από δύο ή περισσότερες εικόνες, ανάλογα με τις διάφορες φάσεις της κίνησης, οι οποίες είναι συμπλεγμένες μεταξύ τους, η μία μετά την άλλη, σε πολύ λεπτές λωρίδες με μέγεθος ίσο με αυτό των φακοειδών ραβδώσεων του διάφανου πλαστικού φίλτρου. Έτσι ανάλογα με τη γωνία θέασης καθίσταται ορατή μόνο η μια από τις δύο περιπλεγμένες εικόνες. Παρατηρώντας μια τέτοια περιπλεγμένη εικόνα και με τα δυο μας μάτια από κάποια απόσταση, είναι πολύ πιθανό το κάθε μάτι να βλέπει και διαφορετική φάση της εικόνας αυτής. Περιπλέκοντας κατά τον τρόπο αυτό ένα στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων, είναι εφικτό να κατασκευαστούν έντυπες τριδιάστατες απεικονίσεις. Η εφαρμογή παρόμοιας

τεχνικής σε οθόνες με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, δηλαδή αυτά που επιδεικνύουν οι οθόνες υγρών κρυστάλλων και πλάσματος, απέδωσε την αίσθηση του βάθους αρκετά ικανοποιητικά, με αποτέλεσμα να αποτελεί σήμερα μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες τριδιάστατης απεικόνισης [10].

Οθόνες ογκομετρικής απεικόνισης: Οι τεχνικές τριδιάστατης απεικόνισης που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα, βασίζονται όλες στην «εξαπάτηση» του εγκεφάλου παρουσιάζοντας στο κάθε μάτι μια ανεξάρτητη δισδιάστατη εικόνα. Ωστόσο υπάρχουν τεχνικές απεικόνισης οι οποίες είναι σε θέση να αποδώσουν πραγματικά τριδιάστατες εικόνες. Μια από αυτές είναι και η ολογραφία η οποία, αν και η παλαιότερη (σε αναλογική μορφή), θεωρείτε το μέλλον της τριδιάστατης ψηφιακής απεικόνισης. Διάφορα ερευνητικά εργαστήρια ανά τον κόσμο έχουν ήδη κατασκευάσει πρωτότυπα ψηφιακών συσκευών τριδιάστατης ολογραφικής απεικόνισης, ωστόσο η εποχή που αυτά θα είναι σε θέση να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις της αγοράς είναι ακόμα μακριά.

Προς το παρόν, οι περισσότερες εμπορικά διαθέσιμες λύσεις τριδιάστατης απεικόνισης βασίζονται σε τεχνικές πολλαπλής και ταχύτατης προβολής δισδιάστατων εικόνων, πάνω σε ημιδιαφανείς ταχύτατα περιστρεφόμενες επιφάνειες. Η τεχνική αυτή δημιουργεί την ψευδαίσθηση μιας ημιδιαφανούς, ωστόσο σταθερής, τριδιάστατης εικόνας, την οποία ο χρήστης μπορεί να την περιεργαστεί από διάφορες θέσεις, όπως ακριβώς θα έκανε και με ένα πραγματικό τριδιάστατο αντικείμενο [12].



Εικόνα 105. Οθόνες ογκομετρικής απεικόνισης

Άλλη μια λύση είναι αυτή της ταχύτατης εναλλασσόμενης προβολής δισδιάστατων εικόνων πάνω σε μια στοιβα από παραλληλόγραμμα ηλεκτρονικά διαφράγματα φωτός υγρών κρυστάλλων στο μέγεθος οθόνης. Ένας βίντεο προβολέας, ο οποίος βρίσκεται σε συγχρονισμό με τα ηλεκτρονικά διαφράγματα, προβάλλει με μεγάλη ταχύτητα πάνω στο καθένα από αυτά μια αλληλουχία εικόνων, η κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί και σε μια τομή του τριδιάστατου θέματος. Με την τεχνική αυτή είναι εφικτό να αποδοθεί αρκετά ικανοποιητικά η τρίτη διάσταση, παρά τον περιορισμένο αριθμό επιπέδων βάθους που καθορίζουν τα ηλεκτρονικά διαφράγματα φωτός [12].

4. Οδηγίες για την επιλογή συσκευής ηλεκτρονικής απεικόνισης

Οι παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή της πιο κατάλληλης συσκευής απεικόνισης ψηφιακών δεδομένων, που αφορούν την τριδιάστατη περιγραφή διαφόρων θεμάτων υπαρκτών και μη, είναι:

- Πλήθος ταυτόχρονων θεατών: Ο αριθμός των ανθρώπων που θα παρακολουθούν ταυτόχρονα την παρουσίαση, παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της οθόνης
- Πιθανότητα ή απαίτηση για στερεοσκοπική απεικόνιση ώστε ο θεατής να έχει πραγματική αντίληψη του βάθους
- Απαιτούμενο επίπεδο διαδραστικότητας: για παράδειγμα αν θα επιτρέπεται στο χρήστη να μετακινείται κατά βούληση μέσα στο χώρο ή αν θα είναι απλός θεατής μιας συγκεκριμένης διαδρομής μέσω ιδεατής κάμερας. Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη συσκευή η οποία θα παρέχει τις εικόνες στη μονάδα προβολής, η οποία στην περίπτωση της προκαθορισμένης πορείας μπορεί να ένα απλό βίντεο ή DVD player χαμηλού κόστους, ενώ στην περίπτωση της ελεύθερης μετακίνησης στον τριδιάστατο χώρο μπορεί να είναι ένα πανάκριβος υπερ-υπολογιστής ή ακόμη και συστοιχία συνδεδεμένων υπολογιστών με πολύ υψηλό κόστος.
- Κόστος

Παρακάτω παρατίθενται τα συστήματα προβολής που είναι διαθέσιμα στην αγορά (Πίνακας V), ανάλογα με το μέγεθος της εικόνας που μπορούν να αποδώσουν και κατά συνέπεια το μέγεθος του κοινού στο οποίο αποσκοπούν.

Πίνακας V. Συσκευές ηλεκτρονικής απεικόνισης

Τύπος	Μέγιστο μέγεθος οθόνης (ίντσες)	Μέγιστη ανάλυση εικόνας	Απόδοση βάθους	Απαιτήσεις φωτισμού	Πηγή εικόνας	Φορητότητα	Κόστος
Digital cinema projector	Κινηματογράφου	2048 X 1080	Με δύο πολωμένους προβολείς. Με LCD γυαλιά. Με μπλε και κόκκινα γυαλιά.	Μέτριες	DVI. VGA. SVideo. Composite. RGB-BNC	Μέτρια	>50.000€
Data/ Home cinema projector	30 - 220	1280 X 1024	Με δύο πολωμένους προβολείς. Με LCD γυαλιά. Με μπλε και κόκκινα γυαλιά.	Χαμηλός φωτισμός	DVI. VGA. SVideo. Composite.	Καλή	1000 – 30.000 €
TFT	15 - 57	1920 X 1080	Με μπλε και κόκκινα γυαλιά.	Μέτριες	DVI. VGA. SVideo. Composite.	Καλή	250 – 30.000 €
Plasma	17 – 65	1365 X 768			DVI. VGA. SVideo. Composite. RGB-BNC		2.000 – 30.000 €
CRT	15 - 34	2048 X 1536	Με LCD γυαλιά. Με μπλε και κόκκινα γυαλιά.	Πολύ χαμηλές	VGA. SVideo. Composite. RGB-BNC	Μέτρια	100 – 3000 €

Πολλές εταιρίες, κάνοντας χρήση προβολικών συστημάτων, κατασκευάζουν εξειδικευμένες διατάξεις απεικόνισης όπως: «τοίχους», «γραφεία», «δωμάτια» ή «σπηλιές» (caves), θόλους, κλπ. Τέτοιες συσκευές απεικόνισης ονομάζονται οθόνες εμπύθισης, επειδή περικλείουν έναν ή περισσότερους θεατές σε ένα εικονικό περιβάλλον. Το κόστος αυτού του είδους οθονών είναι αρκετά μεγάλο και ανάλογο με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην περίπτωση εφαρμογών όπου είναι επιθυμητή η πραγματικά τριδιάστατη απεικόνιση του θέματος, χωρίς όμως να απαιτείται η χρήση πρόσθετων βοηθημάτων αντίληψης του βάθους, συνιστάται η χρήση των

ενεργών τριδιάστατων οθονών. Οι συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι οι επίπεδες οθόνες τύπου TFT ή πλάσματος, οι οθόνες απεικόνισης όγκου (3D Volume Displays) και οι οθόνες κεφαλής (Head Mountain Displays – HMD). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου συσκευών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας VI).

Πίνακας VI. Οθόνες ενεργής τριδιάστατης απεικόνισης

Τύπος	Μέγιστο μέγεθος οθόνης (ίντσες)	Μέγιστη ανάλυση εικόνας	Απαιτήσεις φωτισμού	Πηγή εικόνας	Φορητότητα	Κόστος (€)
Επίπεδες TFT ή Plasma	50	3840 X 2400	Μέτριες	DVI. VGA.	Καλή	2.000 -30.000
3D Volume Display	20	768 X 768 X 198	Χαμηλός φωτισμός	Μέσω ειδικού περιφερειακού	Μέτρια	>40.000
HMD	Κράνος ή γυαλιά με μια μικρή οθόνη για το κάθε μάτι	1600 X 1200	Καμία	DVI. VGA. ή Μέσω ειδικού περιφερειακού	Πολύ καλή	1500 – 90.000

5. Αναπαραγωγή 3Δ δεδομένων

Μια από τις διαδικασίες διάχυσης των 3Δ εικόνων είναι η αναπαραγωγή τους με ποικίλους τρόπους. Η αναπαραγωγή μπορεί είτε να αναφέρεται σε δημιουργία πολλαπλών ψηφιακών αντιγράφων είτε σε παραγωγή υλικών 3Δ αντιγράφων από το ψηφιακό μοντέλο. Η παραγωγή ψηφιακών αντιγράφων είναι σήμερα μια πολύ απλή διαδικασία και μπορεί να γίνει σε κάθε υπολογιστή με τη χρήση συσκευών όπως CD ROM και DVD ROM, αλλά όταν απαιτείται η παραγωγή μεγάλου πλήθους αντιγράφων προτείνεται η χρήση ειδικών συσκευών δημιουργίας πολλαπλών ταυτόχρονων αντιγράφων π.χ. (DVD-towers).



Εικόνα 106. Συσκευές δημιουργίας πολλαπλών ψηφιακών αντιγράφων

Από την άλλη, η παραγωγή 3Δ υλικών αντιγράφων είναι μια σύγχρονη τεχνολογία η οποία άλλοτε βασιζόμενη σε τεχνικές απόθεσης υλικού και άλλοτε σε 3Δ σμίλευση επιτυγχάνει τη δημιουργία 3Δ «γλυπτών» που βασίζονται στα 3Δ ψηφιακά μοντέλα. Συγκεκριμένα, οι σύγχρονες τεχνικές παραγωγής υλικών αντιγράφων είναι οι εξής:

- *Συσκευές 3Δ εκτύπωσης με απόθεση υλικών:* Οι 3Δ εκτυπωτές λειτουργούν βασιζόμενοι σε διαδικασία διαδοχικής «εκτύπωσης» στρωμάτων. Η 3Δ εκτύπωση έχει σήμερα διάφορες παραλλαγές ως προς την μεθοδολογία υλοποίησής της⁸. Μια παραλλαγή της 3Δ εκτύπωσης περιλαμβάνει σύστημα εκτύπωσης inkjet. Στρώματα λεπτής σκόνης (γύψος, άμμος ή ρητίνες) επιλεκτικά συνδέονται μέσω κολλώδους υλικού από την κεφαλή inkjet

⁸

<http://www.ptonline.com/articles/200408cu3.html>

διαμορφώνοντας διαδοχικά τομές ακολουθώντας το 3Δ μοντέλο στον υπολογιστή. Η μέθοδος επιτρέπει τη δημιουργία έγχρωμων 3Δ πρωτοτύπων και είναι γρήγορη. Εναλλακτικά, οι συσκευές αυτές τροφοδοτούν με υγρά (όπως φωτοπολυμερή) από την κεφαλή τύπου inkjet για τη δημιουργία κάθε στρώματος του μοντέλου. Οι συσκευές (καλούνται Photopolymer Phase machines) αυτές χρησιμοποιούν υπεριώδεις λαμπτήρες φωτισμού πάνω στην κεφαλή για την άμεση επεξεργασία του κάθε στρώματος καθώς αυτό δημιουργείται. Από την άλλη, η μοντελοποίηση απόθεσης υλικού σε τήξη (Fused deposition modeling) είναι μια τεχνολογία που επίσης χρησιμοποιείται στην προτυποποίηση χρησιμοποιώντας ειδικό ακροφύσιο για την απόθεση λειωμένου πολυμερούς υλικού πάνω σε δομή στήριξης, ένα στρώμα κάθε φορά. Άλλη δε τεχνική χρησιμοποιεί επιλεκτική τήξη υλικού εντός κοκκώδους περιβάλλοντος για τη στήριξη εξαλείφοντας την ανάγκη για κατάλληλα υποστηρίγματα. Κάθε τεχνική έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Γενικά, μια σημαντική παράμετρος είναι η ταχύτητα, η επιλογή του υλικού και οι δυνατότητες χρωματικής εκτύπωσης⁹.



Εικόνα 107. Τυπικό δείγμα έγχρωμης 3Δ εκτύπωσης¹⁰

Η 3Δ εκτύπωση αυτής της κατηγορίας είναι πιο γρήγορη από άλλες μεθόδους, έχει χαμηλότερο κόστος, είναι εύχρηστη και ικανοποιητική για την παραγωγή πρωτοτύπων κατάλληλων κατά τη φάση της προτυποποίησης όταν η ακρίβεια σε διαστάσεις και η μηχανική αντοχή του υλικού δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η ανάλυση της εκτύπωσης υπολογίζεται με βάση το πάχος της κάθε στρώσης και τη γνωστή X-Y ανάλυση σε dpi. Τυπικές τιμές πάχους στρώματος κυμαίνονται περί τα 100 microns (0.1 mm), ενώ στη X-Y ανάλυση οι τιμές είναι ανάλογες αυτών που επιτυγχάνουν οι 2Δ εκτυπωτές laser. Τα 3Δ “pixels” εκτύπωσης κυμαίνονται σε διάμετρο περί τα 50 με 100 microns (0.05-0.1 mm). Στην Εικόνα 107 παρουσιάζεται ένα δείγμα έγχρωμης 3Δ εκτύπωσης.

- *Συσκευές 3Δ σμίλευσης*: Οι συσκευές 3Δ σμίλευσης λειτουργούν ως γλύπτες. Χρησιμοποιούν κυρίως εργαλεία διάτρησης και σμιλεύουν πάνω σε άμορφο αρχικά υλικό το αντικείμενο που αντιγράφουν από το ψηφιακό 3Δ μοντέλο του υπολογιστή που οδηγεί τη διαδικασία. Στην Εικόνα 108 φαίνεται μια συσκευή 3Δ σμίλευσης και ένα δείγμα σμιλευμένου αντικειμένου. Στην Εικόνα 109 παρουσιάζονται οι φάσεις της διαδικασίας: αρχικά υπάρχει ή δημιουργείται το 3Δ μοντέλο, στη συνέχεια «εκτυπώνεται» μέσω της ειδικής

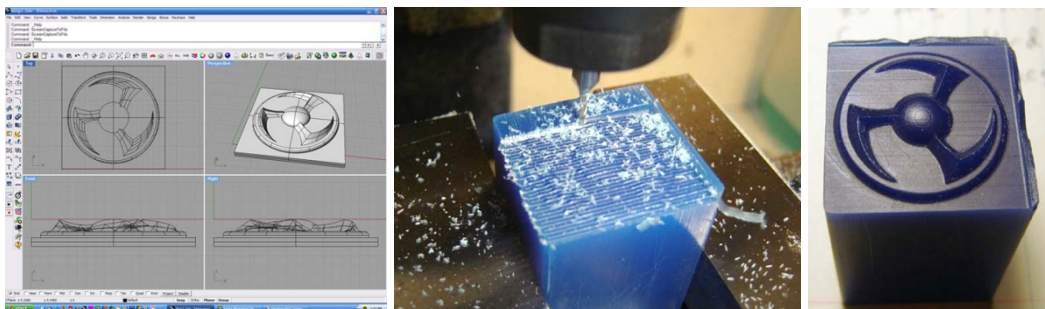
⁹ <http://wohlersassociates.com/NovDec05TCT3dp.htm>

¹⁰ <http://www.ptonline.com/articles/200408cu3.html>

συσκευής πάνω σε υλικό της επιλογής (συνήθως ρητίνες) και τέλος το υλικό καθαρίζεται και κόβεται κατάλληλα.



Εικόνα 108. Συσκευή 3D σμίλευσης και τυπικό δείγμα¹¹

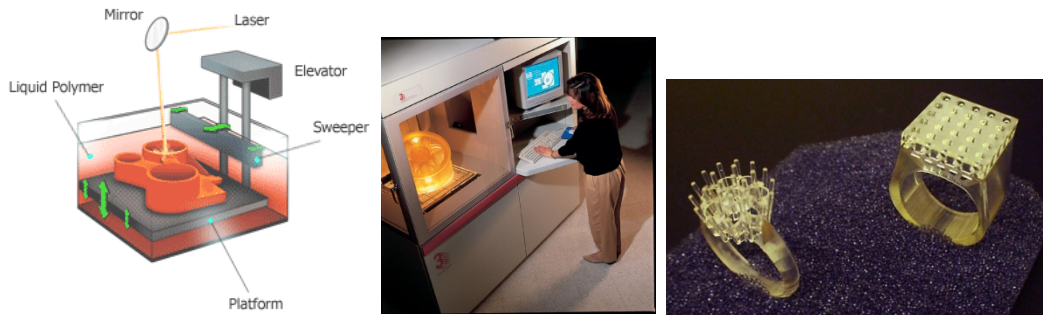


Εικόνα 109. Φάσεις της διαδικασίας 3D σμίλευσης¹²

- *Συσκευές στερεολιθογραφίας:* Η στερεολιθογραφία είναι επίσης μια κοινή τεχνική προτυποποίησης με δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και καλή επιφανειακή υφή. Μια συσκευή που υλοποιεί την στερεολιθογραφία καλείται SLA (εκ του Stereolithography Apparatus). Είναι μια μέθοδος απόθεσης υλικού στην οποία γίνεται χρήση ρευστού πολυμερούς υλικού (ρητίνη) που αντιδρά σε υπεριώδες φως και στερεοποιείται. Το 3D αντικείμενο σχηματίζεται ανά στρώμα μέσω της στερεοποίησης που προκαλεί στο πολυμερές η πηγή υπεριώδους φωτός. Καθώς η πηγή υπεριώδους φωτός (που είναι συχνά λέιζερ) εστιάζει σε συγκεκριμένη απόσταση πρέπει να κινείται ανάλογα με το στρώμα που πρέπει να στερεοποιηθεί. Το πολυμερές εγχέεται στρώμα-στρώμα πάνω στο ήδη στερεοποιημένο στρώμα και η πηγή λέιζερ απομακρύνεται (τυπικά με βήμα μεταξύ 0.05 mm έως 0.15 mm, όσο το πάχος της νέας απόθεσης υλικού) για να δημιουργηθεί το επόμενο στρώμα, κοκ. Το κάθε στρώμα υλικού καθώς στερεοποιείται κολλά στο προηγούμενο αυτομάτως. Στο τέλος της διαδικασίας το 3D αντικείμενο εμβαπτίζεται σε ειδικά χημικά για καθαρισμό και εισάγεται σε ειδικό φούρνο υπεριώδους ακτινοβολίας. Εναλλακτικά η μέθοδος μπορεί να λειτουργεί με τη χρήση λεκάνης ρευστού πολυμερούς υλικού εντός της οποίας σχηματίζεται σταδιακά το αντικείμενο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 110.

¹¹ http://www.intellecta.net/3d_milling.html

¹² <http://www.cartertools.com/3Dpath.html>



Εικόνα 110. Αρχή λειτουργίας της στερεολιθογραφίας¹³, συσκευή στερεολιθογραφίας¹⁴ και τυπικά δείγματα 3D υλικών αντιγράφων από στερεολιθογραφία¹⁵

6. Διαδραστικές εφαρμογές 3D εικόνων

Ένα από τα σημαντικότερα επακόλουθα και συνάμα πλεονεκτήματα της χρήσης 3D εικόνων και γραφικών είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδραστικών εφαρμογών με αυτά. Για την ακρίβεια, η τόσο πολυσυζητημένη Εικονική Πραγματικότητα δεν είναι παρά μια διαδραστική εφαρμογή απεικόνισης 3D εικόνων. Οι εφαρμογές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών 2D εφαρμογών. Πρώτα από όλα, η αληθοφάνεια που παρέχουν είναι σημαντικά εντονότερη αφού η δυνατότητα πλοήγησης στον εικονικό χώρο προσομοιώνει τον αληθινό κόσμο. Παράλληλα η δυνατότητα παρατήρησης αντικειμένων από οποιαδήποτε γωνία θέασης και απόσταση υπό διάφορες συνθήκες φωτισμού και περιβάλλοντος είναι γνώρισμα αυτού και μόνο τρόπου λειτουργίας. Η επίπτωση του υψηλού επιπέδου αληθοφάνειας που παρέχεται από 3D εφαρμογές στη δημιουργία εμπειριών, στην απόκτηση γνώσεων, ακόμη και στην υποβοήθηση ιατρικών μεθόδων επηρεασμού και ίασης ψυχολογικών παθήσεων είναι περισσότερο από μεγάλη. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται μερικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που αποτελούν απλά ένα δείγμα των δυνατοτήτων που δίνονται πλέον με τη χρήση τεχνολογιών 3D εικόνων.

6.1. Παρουσίαση 3D αντικειμένων στο διαδίκτυο

Η συνεχής ανάπτυξη διαδικτυακών πολυμεσικών βάσεων δεδομένων μπορεί πλέον να συμπληρωθεί και ολοκληρωθεί με τη χρήση τεχνολογιών τριδιάστατης ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης, καθώς και εφαρμογής σύγχρονων μετρητικών διατάξεων. Έτσι, οι βάσεις δεδομένων εμπλουτίζονται πλέον τόσο με πλούσιο οπτικό περιεχόμενο όσο και με τυπολογικά και φυσικοχημικά δεδομένα που μπορεί να οδηγήσουν στην εξαγωγή πολύ σημαντικών συμπερασμάτων μέσω συγκριτικής έρευνας και να συνεισφέρουν σημαντικά στην προβολή και περαιτέρω έρευνα. Έτσι, άλλοτε για λόγους ουσιαστικότερης επίδειξης, άλλοτε για ερευνητικούς σκοπούς υπάρχουν σήμερα δυνατότητες ολοκλήρωσης της εικονικής παρουσίας αντικειμένων στο διαδίκτυο, σε ένα πλαίσιο 3D απεικόνισης με επιπρόσθετη πολυμεσική πληροφορία ανάλογα με τις απαιτήσεις [18],[19].

¹³ <http://www.m2-systems.com/prototyping/stereolithography.php>

¹⁴ <http://www.stereolithography.com/sla7000.php>

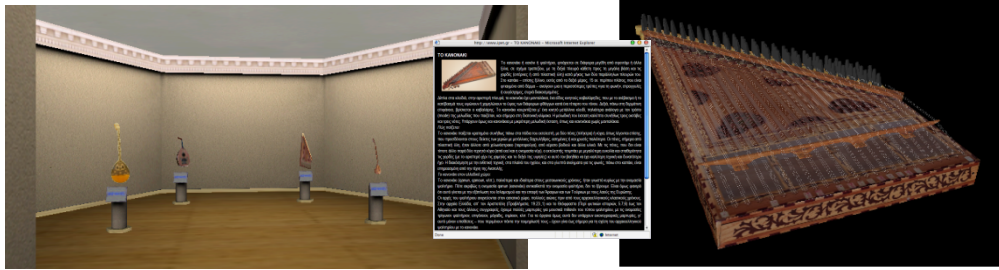
¹⁵ <http://www.centrolaser.it/en/rapid2.html>

6.2. Εικονικά μουσεία

Μια από τις σημαντικότερες διαδραστικές εφαρμογές στον τομέα του πολιτισμού μπορεί να είναι η δημιουργία εικονικών μουσείων. Τα εικονικά μουσεία είναι τριδιάστατοι χώροι, άλλοτε εικονικοί και άλλοτε αντίγραφα πραγματικών χώρων μέσα στους οποίους εκτίθενται 3D μοντέλα εκθεμάτων. Η δημιουργία των μουσείων αυτών γίνεται με βασικό γνώμονα το υψηλό επίπεδο αληθοφάνειας μέσω της διατήρησης σωστών αναλογιών αντικειμένων και χώρου καθώς και σωστής τοποθέτησης του επίπεδου των ματιών του επισκέπτη στο χώρο (εφόσον λειτουργούν ως εφαρμογές πρώτου προσώπου). Τα εκθέματα μπορεί να αποτελούν προϊόν 3D ψηφιοποίησης ή μοντελοποίησης ανάλογα με τις απαιτήσεις. Το ίδιο και ο χώρος. Με την τεχνολογία αυτή, είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών 3D αντιγράφων των πραγματικών μουσείων με την ψηφιοποίηση τόσο των κτηρίων όσο και των εκθεμάτων. Από την άλλη, είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών μουσείων μέσω αρχιτεκτονικής μοντελοποίησης σε υπολογιστή και η τοποθέτηση των εκθεμάτων ανάλογα με τις ανάγκες προβολής. Σε κάθε περίπτωση, η κίνηση στον εικονικό χώρο ακολουθεί τους κανόνες του πραγματικού κόσμου με την εφαρμογή των νόμων της φυσικής (βαρύτητα, συγκρούσεις, κλπ). Φυσικά, σε ειδικές περιπτώσεις και όταν υπάρχει ανάγκη είναι δυνατή η υπέρβαση των νόμων της φύσης αφού οι περιορισμοί τίθενται αποκλειστικά από τον προγραμματιστή του λογισμικού (π.χ. μπορεί ο επισκέπτης να πετάει ή να μεταβαίνει αυτόματα από χώρο σε χώρο ή από μουσείο σε μουσείο). Ο επισκέπτης μπορεί να αλληλεπιδρά με τα εκθέματα, να τα περιστρέψει, να δει λεπτομέρειες από όσο κοντά θέλει, να λάβει επιπρόσθετες πολυμεσικές πληροφορίες (εικόνα, ήχος, βίντεο), να δημιουργεί λίστες προτίμησης, να δημιουργεί τα δικά του εικονικά μουσεία ή συλλογές από επιλεγμένα εκθέματα. Από την πλευρά του εκθέτη, το μουσείο ή η συλλογή μπορεί να επιλέξει ποια θα είναι τα εκθέματα που θα εισαχθούν στο εικονικό μουσείο έτσι ώστε να παράγει κατά βούληση αφιερώματα ή στοχευμένες συλλογές εκθεμάτων. Τα εικονικά μουσεία μπορούν να λειτουργούν είτε τοπικά και να διανέμονται με τη μορφή οπτικού δίσκου (π.χ. DVD-ROM), είτε να λειτουργούν διαδικτυακά μέσω κάποιου λογισμικού πλοήγησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαδικτυακά εικονικά μουσεία είναι ανοικτά για το κοινό 24 ώρες τη μέρα επί 7 ημέρες την εβδομάδα. Στην Εικόνα 111 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την πλοήγηση σε εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων, ενώ στην Εικόνα 112 φαίνεται στιγμιότυπο από την είσοδο σε ειδικό χώρο εκθεμάτων, η επιλογή και πληροφόρηση για συγκεκριμένο έκθεμα, και η δυνατότητα διαδραστικής παρουσίασης του 3D εκθέματος σε υψηλή ανάλυση για μελέτη. Το εικονικό μουσείο παραδοσιακών μουσικών οργάνων βρίσκεται στο διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://www.ceti.gr/momi> [13].



Εικόνα 111. Περιήγηση στο 3D εικονικό μουσείο παραδοσιακών οργάνων



Εικόνα 112. Είσοδος σε χώρο εκθεμάτων και πληροφόρηση για συγκεκριμένο έκθεμα

6.3. Εικονικά μνημεία και πόλεις

Μια εφαρμογή 3D τεχνολογιών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η δημιουργία εικονικών πόλεων, όπου ο επισκέπτης μπορεί να «κινείται» σε 3D μοντέλα πόλεων που αποτελούν το προϊόν 3D ψηφιοποίησης. Η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την τουριστική και πολιτιστική προώθηση, είτε για γνωριμία με τον τόπο. Η τεχνολογίες 3D ψηφιοποίησης που χρησιμοποιούνται εδώ είναι συνήθως τεχνολογίες χαμηλής ανάλυσης και ακρίβειας αλλά πολύ μεγάλης παραγωγικότητας, αφού τα εμπλεκόμενα μεγέθη των θεμάτων είναι τόσο μεγάλα ώστε να καθιστούν ιδιαίτερα επίπονη τη διαδικασία ψηφιοποίησης υψηλής ακρίβειας. Με δεδομένο δε το γεγονός ότι απαιτείται να γίνει ψηφιοποίηση μεγάλης έκτασης σε μικρό χρονικό διάστημα, μέθοδοι όπως φωτογραμμετρία με τοπογραφική «υποβοήθηση» είναι οι περισσότερο ενδεδειγμένες. Όπως και στα εικονικά μουσεία, η πλοήγηση ακολουθεί το φυσικό τρόπο περιήγησης στον πραγματικό κόσμο με εφαρμογή των νόμων της φυσικής. Φυσικά κι εδώ μπορούν να δίνονται δυνατότητες όπως η πτήση όταν αυτό εξυπηρετεί τους σκοπούς της προβολής. Την τεχνολογία αυτή μπορούν να χρησιμοποιήσουν είτε οι Τοπικές Αυτοδιοικήσεις, είτε Υπουργεία, είτε σύλλογοι, είτε Εφορείες Αρχαιοτήτων, είτε τουριστικά γραφεία για να προωθήσουν τον τουρισμό μιας περιοχής και να πληροφορήσουν για την αρχιτεκτονική ενός τόπου [14],[15]. Στην Εικόνα 113 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την πλοήγηση στην εικονική παλιά πόλη της Ξάνθης που μπορεί να έχει ο καθένας μέσω του διαδικτύου στη διεύθυνση <http://671100.gr>.



Εικόνα 113. Εικονική περιήγηση στην παλιά πόλη της Ξάνθης

Αντίστοιχα, ένα παράδειγμα πλοήγησης στον εικονικό χώρο μνημείων μπορεί να δει κανείς στη διεύθυνση <http://www.ipet.gr/3d%5Fdemo/mani/>, όπου παρουσιάζονται δύο βυζαντινοί ναοί που βρίσκονται στην περιοχή της Μάνης (Εικόνα 114) [16]-[17].



Εικόνα 114. Εικονική περιήγηση εκτός και εντός μνημείου

7. Εικονική Πραγματικότητα

Τον όρο Virtual Reality (VR) εισήγαγε ο Jaron Lanier, ιδρυτής της εταιρείας VPL Research, 1989. Η VPL Research ήταν η πρώτη εταιρεία πώλησης προϊόντων Εικονικής Πραγματικότητας (ΕΠ). Άλλοι όροι που είχαν προταθεί περιλαμβάνουν την Τεχνητή Πραγματικότητα (Artificial Reality) από τον Myron Kueger στη δεκαετία του 1970, τον όρο Κυβερνοχώρος Cyberspace του William Gibson το 1984 στο βιβλίο του Νευρομάντης, ενώ τη δεκαετία του 1990 παρουσιάστηκαν οι όροι Εικονικοί Κόσμοι (Virtual Worlds) και Εικονικά Περιβάλλοντα (Virtual Environments).

Η πρωταρχική έννοια και χρήση του όρου σήμαινε την εμβυθιστική ΕΠ (Immersive Virtual Reality), όπου ο χρήστης βυθίζεται πλήρως σε ένα τριδιάστατο κόσμο που έχει αποκλειστικά δημιουργηθεί από έναν υπολογιστή χωρίς επαφή με τον πραγματικό μέσω συσκευών που παρέχουν τις αισθήσεις (Εικόνα 115). Η ΕΠ έχει πλέον μια ευρύτερη έννοια. Έτσι κατά το λεξικό Merriam-Webster Online, ΕΠ είναι «ένα τεχνητό περιβάλλον το οποίο γίνεται αντιληπτό μέσω αισθητηριακών ερεθισμάτων (όπως εικόνες και ήχοι) που παρέχονται από υπολογιστή και στο οποίο η δράση ενός χρήστη καθορίζει τι συμβαίνει εντός του περιβάλλοντος». Η Veronica Pantelidis, καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο East Carolina, αναφέρει πώς η ΕΠ είναι «μια προσομοίωση σε υπολογιστή ενός πραγματικού ή φανταστικού περιβάλλοντος με το οποίο ένας χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει ή να χειριστεί»



Εικόνα 115. Χρήστης συστήματος εμβυθιστικής Εικονικής Πραγματικότητας

Οι ιστορικές απαρχές της ΕΠ εντοπίζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ανθρώπινης ιστορίας,

- αρχικά με τη μορφή εικονογράφησης (ξεκινά πριν από 15.000 σε σπήλαια),
- στη συνέχεια με το συνδυασμό γεωμετρίας και τέχνης για τη δραματοποίηση θεατρικών έργων (5^{ος} αιώ. Αγάθαρχος ο Σάμιος),

- στο υψηλό επίπεδο 3D ρεαλισμού στα έργα τέχνης της Αρχαίας Ελλάδας και της Ρώμης με σημαντική χρήση της προοπτικής,
- στην πρακτική χρήση των κανόνων της οπτικής από την Αναγέννηση και μετά,
- στην πρώτη πανοραμική απεικόνιση (1778, *Robert Barker*, άποψη της πόλης του Εδιμβούργου 360 μοιρών σε κυκλικό δωμάτιο με διάμετρο περίπου 18 μέτρα) και την εισαγωγή του όρου *Πανόραμα* κατά το 1791,
- στην επινόηση της φωτογραφίας κατά τα μέσα του 18^{ου} αιώνα, την επινόηση της στερεοσκοπικής οθόνης κατά το 1833 από τον Wheatstone και τη δημιουργία του πρωτότυπου Viewmaster το 1844 από τον David Brewster
- στην επινόηση του πρώτου μηχανικού εξομοιωτή πτήσης για εκπαίδευση πιλότων το 1929 από τον Edward Link
- στην κατασκευή στη δεκαετία του 1950 του «*σινεμά του μέλλοντος*» από τον Morton Heilig και τη δημιουργία του Sensorama του 1956 (Εικόνα 116)



Εικόνα 116. Το Sensorama του Morton Heilig

- στην κατασκευή των πρώτων οθονών κεφαλής (HMD) το 1961 από τους Comeau και Bryan (εταιρεία Philco)
- στις πρώτες εφαρμογές αλληλεπιδραστικών 3D γραφικών και των πρώτων συσκευών αλληλεπίδρασης κατά το 1963 από τον Ivan Sutherland
- στις προσπάθειες του Fred Brooks το 1967 να δημιουργήσει περιβάλλοντα απτικής αλληλεπίδρασης για βιοχημικούς ώστε να έρχονται σε επαφή με μόρια

Έκτοτε πάμπολλες τεχνολογικές λύσεις έχουν προταθεί και δοκιμαστεί. Ο στόχος ήταν πάντοτε ένας: να δημιουργηθεί ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον 3D εικόνων πραγματικού χρόνου για την εκπαίδευση, την κατανόηση και την ψυχαγωγία.

Ας δούμε όμως τι είναι η ΕΠ. Δεν είναι τίποτε άλλο από ένα *συνθετικό κόσμο που διέπεται από ένα σύνολο κανόνων*, οι οποίοι είναι άλλοτε συμβατοί και άλλοτε όχι με τους κανόνες της πραγματικότητας. Δίνει δυνατότητες πλοήγησης και αλληλεπίδρασης, απαιτεί εξειδικευμένο υλικό (hardware) και έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (εκπαίδευση, προσομοίωση, ψυχαγωγία).

Σήμερα, οι τύποι συστημάτων ΕΠ είναι πρακτικά τέσσερις:

1. *Περιβάλλοντα εμβύθισης (immersive environments)*, όπου ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει δεδομένα από το φυσικό κόσμο και έχει οθόνη προσαρμοσμένη στο κεφάλι, ακουστικά στα αυτιά, ειδικά γάντια στα χέρια, κοκ.
2. *Περιβάλλοντα οθόνης (desktop environments)*, όπου πραγματοποιείται 3D αναπαράσταση σε οθόνη υπολογιστή
3. *Περιβάλλοντα προβολής (projected environments)*, όπου το εικονικό περιβάλλον προβάλλεται σε ένα φυσικό χώρο
4. *Ενισχυμένα περιβάλλοντα (augmented environments)*, όπου εικονικά αντικείμενα προβάλλονται πάνω στην εικόνα από τον πραγματικό κόσμο



Κάθε τύπος εισάγει τις δικές του προδιαγραφές και απαιτήσεις και έχει διαφορετικά βασικά χαρακτηριστικά από τους άλλους. Ο Πίνακας VII παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις απαιτήσεις των διαφόρων τύπων ΕΠ.

Πίνακας VII. Απαιτήσεις διαφόρων τύπων εικονικής πραγματικότητας

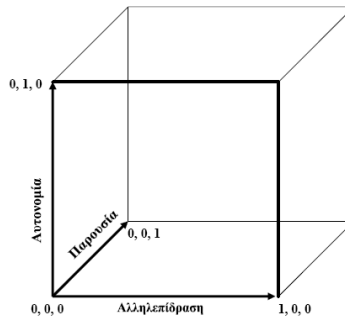
Βασικά χαρακτηριστικά	ΕΠ μη-εμβύθισης (Desktop)	ΕΠ ημι-εμβύθισης (Projection)	ΕΠ εμβύθισης (Head-coupled)
Ανάλυση	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή-Μεσαία
Κλίμακα (αντίληψη)	Χαμηλή	Μεσαία-Υψηλή	Υψηλή
Αντίληψη της κατάστασης (ικανότητα πλοήγησης)	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
Επίπεδο προσοχής	Χαμηλό	Μεσαίο	Υψηλό
Υστέρηση	Χαμηλή	Χαμηλή	Μεσαία-Υψηλή
Αίσθηση εμβύθισης	Καθόλου-Χαμηλή	Μεσαία-Υψηλή	Μεσαία-Υψηλή

Μια κατηγοριοποίηση ΕΠ πρότεινε το 1992 ο Zeltzer [20], και ονομάστηκε ταξινομήση Zeltzer. Τα κριτήρια της κατηγοριοποίησης είναι τρία:

- *Αυτονομία*: σχετίζεται με την ικανότητα των αντικειμένων του εικονικού χώρου σε δράση
- *Αλληλεπίδραση*: σχετίζεται με το ποσοστό ελέγχου που ασκεί ο χρήστης στο περιβάλλον

- *Παρουσία*: σχετίζεται με το εύρος και την πιστότητα των αισθητήριων του χρήστη που ελέγχονται από το σύστημα

Με βάση αυτά τα κριτήρια, η ταξινόμηση Zeltzer προτείνει τη σχεδίαση ενός κύβου (Εικόνα 117) με πλευρές που αντιστοιχούν στα τρία αυτά κριτήρια και την τοποθέτηση ενός δεδομένου συστήματος μέσα στον κύβο χαρακτηρισμού ανάλογα με το ποσοστό που ικανοποιεί τα εν λόγω κριτήρια.

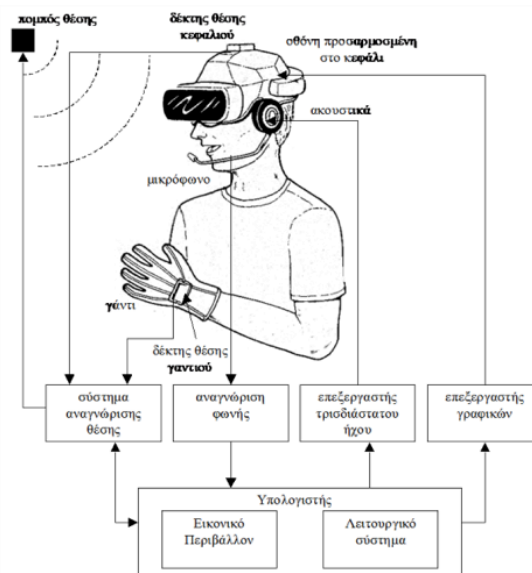


Εικόνα 117. Το σύστημα ταξινόμησης Zeltzer

Στο σημείο (1,1,1) αντιστοιχεί το απόλυτο εικονικό περιβάλλον όπου δεν είμαστε σε θέση να ξεχωρίσουμε το εικονικό από το πραγματικό κόσμο [21]. Ο ίδιο όμως ο Zeltzer διατύπωσε το ότι *δεν είναι δυνατή η προσομοίωση με πλήρη λεπτομέρεια και πολυπλοκότητα*, καθιστώντας το σημείο αυτό ένα θεωρητικό όριο.

Σε κάθε περίπτωση και σε γενικές γραμμές τα τμήματα ενός εικονικού περιβάλλοντος είναι τα εξής:

- *Χώρος σκηνικού ή γεωμετρία*: το σκηνικό που παραμένει αμετάβλητο
- *Χρήστες*: εκτελούν ενέργειες, ελέγχουν το οπτικό τους πεδίο
- *Πράκτορες ή Εικονικοί Ηθοποιοί*: οντότητες που ενεργούν ανεξάρτητα από τους χρήστες
- *Αντικείμενα*



Εικόνα 118. Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογιών στην εμβυθιστική ΕΠ

Οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν σήμερα συστήματα ΕΠ αποτελούν λύσεις τόσο σε υλικό όσο και λογισμικό. Στην Εικόνα 118 δίνεται μια γενική σχηματική αναπαράσταση των εμπλεκόμενων τεχνολογιών στην εμβυθιστική ΕΠ. Από πλευράς

υλικού απαιτούνται τεχνικές λύσεις για είσοδο δεδομένων (π.χ. γάντια αλληλεπίδρασης, αισθητήρες θέσης και γωνίας κεφαλής, κοκ – Εικόνα 119), για 3Δ απεικόνιση (π.χ. οθόνες κεφαλής – Εικόνα 120), για παραγωγή 3Δ ήχου (π.χ. ηχεία, ακουστικά) και για ανάδραση (π.χ. ανάδραση δύναμης, ανάδραση αφής, κοκ). Από πλευράς λογισμικού, απαιτούνται λύσεις σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο ανάπτυξης των εφαρμογών και στο επίπεδο εκτέλεσης.

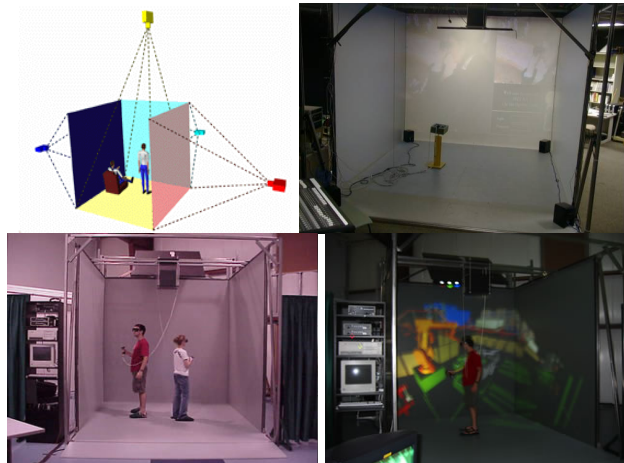


Εικόνα 119. Συσκευές εισόδου δεδομένων ΕΠ



Εικόνα 120. Συσκευές 3Δ απεικόνισης ΕΠ

Μια ειδική κατηγορία τεχνολογιών που αξίζει να αναφερθεί λόγω της εφαρμογής και χρήσης της και λόγω του ικανοποιητικού αποτελέσματος στο ευρύ κοινό είναι αυτή των CAVEs (Cave Automatic Virtual Environment). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Ιλνινόι (Σικάγο) από την ερευνητική ομάδα των Thomas DeFanti και Dan Sandin κατά το 1991, στο Electronic Visualization Laboratory και δημοσιεύθηκε το 1993 στο Διεθνές Συνέδριο SIGGRAPH [22]. Η τεχνολογία αυτή παρέχει εμπύθιση με προβολή εικόνων στους τοίχους και στο πάτωμα ενός κύβου που έχει τις διατάξεις δωματίου. Με χρήση κατάλληλων ελαφρών γυαλιών και συσκευών πλοήγησης (π.χ. joystick) είναι δυνατή η ελεύθερη κίνηση και πλοήγηση μέσα στον εικονικό χώρο που προβάλλεται μέσα στο Cave (Εικόνα 121).



Εικόνα 121. Αρχή λειτουργίας Cave, το πρώτο Cave, χρήσεις του Cave

7.1. Εφαρμογές και χρήσεις της Εικονικής Πραγματικότητας

Η ΕΠ έχει ήδη αρκετές εφαρμογές σε διάφορους τομείς αλλά δεν έχει ακόμη γνωρίσει τη διάδοση που θα μπορούσε. Ο λόγος για τον περιορισμό αυτό δεν έγκειται στην ΕΠ αυτή καθ' αυτήν αλλά στην τεχνολογία που την υποστηρίζει. Λόγω των πολύ υψηλών απαιτήσεων σε δυνατό υλικό και γρήγορο λογισμικό, η ΕΠ δεν είναι ακόμη δυνατό να εφαρμοστεί παντού. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναφέρονται επιγραμματικά τομείς στους οποίους είτε εφαρμόζεται είτε μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα η ΕΠ με πολλά οφέλη και πλεονεκτήματα.

- *Κατασκευές κτηρίων*, τόσο στη σχεδίαση όσο και στην κατασκευή και επίβλεψη της κατασκευής. Κατά τη σχεδίαση μπορεί να γίνει δημιουργία εικονικών κτηρίων με χρήση λογισμικού CAD, εποπτεία σχεδιασμού, έλεγχος λαθών και παραβλέψεων καθώς και μετατροπές στην κατασκευή και στο σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 122). Παράλληλα μπορεί να γίνει εικονική απεικόνιση της προτεινόμενης πορείας εργασιών, ώστε να καθίσταται ευκολότερη η κατανόηση της όλης κατασκευής (Εικόνα 123).



Εικόνα 122. ΕΠ στην κατασκευή κτηρίων



Εικόνα 123. ΕΠ στον έλεγχο πορείας εργασιών

- *Σχεδίαση – Design*, όπου μπορεί να γίνει προσομοίωση οποιασδήποτε καινούργιας κατασκευής με δυνατότητα αλλαγής σχεδιασμού στα αρχικά και κρίσιμα στάδια της σχεδίασης (Εικόνα 124).



Εικόνα 124. ΕΠ στη σχεδίαση

- *Μηχανική/Βιομηχανία*, όπου οδηγεί σε απλοποίηση προβλημάτων μηχανικής (engineering) σε απλά περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας με τέτοιο τρόπο ώστε ο καταναλωτής, ο μηχανικός, ο προμηθευτής, οι managers, οι τεχνικοί και οι χρήστες αλληλεπιδρούν με το προϊόν σε μεγάλη κλίμακα. Το αποτέλεσμα είναι σημαντική *μείωση κόστους* σε όλα τα επίπεδα εργασιών που σχετίζονται και *καλύτερη επικοινωνία* με τους πελάτες. Μια ειδική εφαρμογή αποτελεί η εικονική αυτοκινητοβιομηχανία, όπου τριδιάστατα γραφικά και εφαρμογές βοηθούν σχεδιαστές και μηχανικούς αυτοκινήτων να κάνουν σωστή αξιολόγηση των μαθηματικών μοντέλων των προϊόντων χωρίς να χρειάζεται να κατασκευάζουν αληθινά πρωτότυπα (Εικόνα 125).



Εικόνα 125. ΕΠ στη μηχανική και στην αυτοκινητοβιομηχανία

- *Εμπόριο*, όπου δίνεται η δυνατότητα οργάνωσης ιστοτόπων σε μορφή εμπορικών καταστημάτων. Στη σχεδίαση περιλαμβάνεται ακόμη και η σχεδίαση της μορφής του καταστήματος, των ραφιών, των ταμείων, κ.ο.κ (Εικόνα 126). Τα πλεονεκτήματα για τον πελάτη και για τους προμηθευτές, τους ιδιοκτήτες και το προσωπικό ενός τέτοιου εμπορικού καταστήματος είναι πολλαπλά. Επιγραμματικά οι σημαντικότερες δυνατότητες συνοψίζονται στα εξής:
 - Δυνατότητα συνολικής παρουσίασης προϊόντων
 - Δυνατότητα αναλυτικής παρουσίασης κάθε προϊόντος
 - Συγκριτική παρουσίαση προϊόντων
 - Εύκολη και κατανοητή πλοήγηση
 - Δραματική μείωση του κόστους του καταστήματος



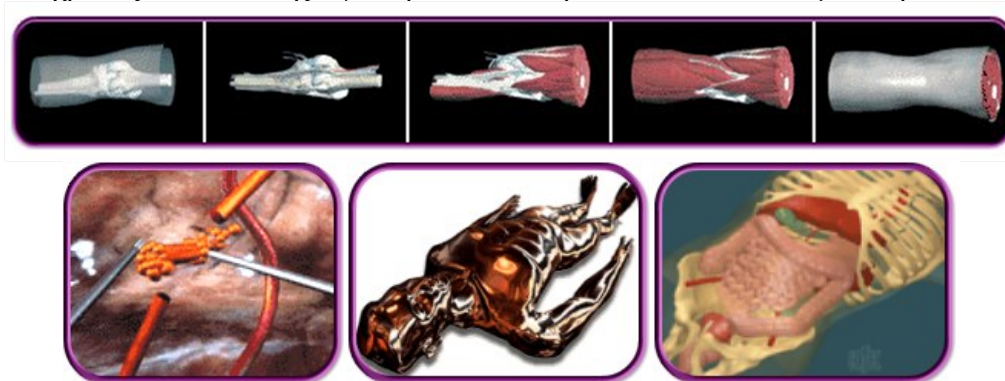
Εικόνα 126. ΕΠ στο ηλεκτρονικό εμπόριο

- *Ασφάλεια*, όπου εφαρμόζονται εικονικά περιβάλλοντα βύθισης για το στρατιωτικό τομέα, τον τομέα ασφάλειας αλλά και για τη βιομηχανία της ψυχαγωγίας (Εικόνα 127). Δίνεται η δυνατότητα για άμεση επαφή με μοντέλα και συστήματα εικονικής διαπαιδαγώγησης (προσομοιωτές και εξομοιωτές) και παρέχεται εικονική διαπαιδαγώγηση μέσω δικτύου με το πλεονέκτημα πολλαπλοί χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους.



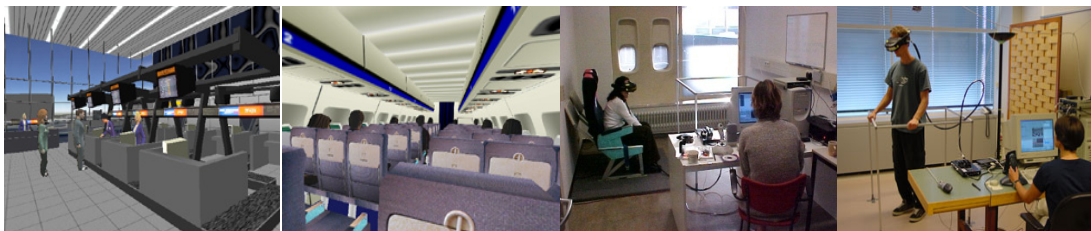
Εικόνα 127. ΕΠ στην ασφάλεια

- *Ιατρική*, όπου η ΕΠ χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στην ιατρική εκπαίδευση. Εδώ δημιουργούνται ειδικά «δωμάτια» μέσα στα οποία οι χρήστες μπορούν και αναλύουν τα διάφορα αίτια και τις επιπτώσεις των αρρωστιών. Παρέχεται εκπαίδευση των χειρουργών σε τυπικές εγχειρίσεις αλλά και στη μικροχειρουργική με δυνατότητα για εκατοντάδες εικονικές επεμβάσεις πριν την πραγματική επαφή με ασθενείς, την ελαχιστοποίηση των κινδύνων (επιπλοκές κατά την εγχείριση) και την ελαχιστοποίηση του ιατρικού σφάλματος που οφείλεται σε απειρία (Εικόνα 128). Παράλληλα επιτυγχάνεται δραματική μείωση του κόστους εκπαίδευσης, καταργούνται τα πολυέξοδα εργαστήρια, καταργούνται τα πειράματα σε ζώα και ελαττώνεται ο χρόνος εκπαίδευσης αφού η εκπαίδευση είναι πιο αποτελεσματική.



Εικόνα 128. ΕΠ στην ιατρική

- Συμβολή στην αντιμετώπιση φοβιών. Οι φοβίες είναι ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που προκαλούν το άγχος και συγκαταλέγονται στον τομέα των ψυχιατρικών ανωμαλιών. Σε έρευνα του 1998 στην Ολλανδία, 3.4% του πληθυσμού πάσχει από αγοραφοβία, 7.8% του πληθυσμού πάσχει από κοινωνική φοβία και 10.4% του πληθυσμού πάσχει από ειδικές μορφές φοβίας. Ο παραδοσιακός τρόπος αντιμετώπισης της φοβίας είναι με σωστή σταθερή και σταδιακή θεραπεία κατά την οποία οι ασθενείς υποβάλλονται σε διάφορες καταστάσεις άγχους σε σταδιακή μορφή, από τις πιο άπλες μέχρι και τις πιο δύσκολες καταστάσεις. Η χρήση της ΕΠ προσφέρει μια διαφορετική μέθοδο κατά την οποία ο ασθενής εκτίθεται σε καταστάσεις άγχους σε ένα εικονικό περιβάλλον, το οποίο είναι ασφαλές, χαμηλού κόστους και με δυνατότητα δημιουργίας καταστάσεων που είναι δύσκολο να συναντήσουμε κατά βούληση στην καθημερινή ζωή. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι η χρήση της ΕΠ έχει φέρει αποτελέσματα κυρίως στις υποφοβίες, αραχνοφοβίες, αγοραφοβίες, κλειστοφοβίες και φοβίες που αφορούν τη μετακίνηση με αεροπλάνο (Εικόνα 129).



Εικόνα 129. ΕΠ στην αντιμετώπιση φοβίας αεροπλάνου

8. Αναφορές

- [1] Gizmohighway, “The Cathode Ray Tube”, online at: <http://www.gizmohighway.com/history/crt.htm>
- [2] Online at: <http://www.howstuffworks.com/lcd.htm>
- [3] Online at: <http://www.plasmavision.com>
- [4] Online at: http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_display
- [5] “Plasma Display Panel (PDP) vs. Liquid Crystal Display (LCD)”, *Fujitsu General America Inc*, 2003, online at: <http://www.plasmavision.com/WhitePaperPlasmaVsLCD.pdf>
- [6] Online at: <http://inventors.about.com/library/inventors/bledisonvitascope.htm>
- [7] L. J. Hornbeck, “Digital Light Processing—Introduction From cathode rays to digital micromirrors: A history of electronic projection display technology”, *Texas Instruments TECHNICAL JOURNAL*, 1998.
- [8] S.-G. Kim, K.-H. Hwang, M. K. Koo, “Thin-Film Micromirror Array (TMA) for Cost-Competitive Information Display Systems”, Invited Paper, *Proc. of SID Conference*, 1999.
- [9] C. van Berkel, A. R. Franklin, J. R. Mansell, “Design and applications of multiview 3D-LCD”, *Proc. SID Eur. Display'96*, pp. 109-112, 1996.
- [10] C. van Berkel, D. W Parker, A. R Franklin, “Multiview 3D-LCD”, *SPIE proc 2653*, pp. 32-39, 1996, online at: <http://www.research.philips.com/technologies/display/3d/downloads/spie96-1463.pdf>
- [11] “DepthCube™ Technology White Paper” LightSpace Technologies Inc., 2003, online at: http://www.lightspacetech.com/DepthCube_whitepaper.pdf
- [12] G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, M. G. Giovinco, M. J. Richmond, W. S. Chun, “100 Million-voxel volumetric display” *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2002.
- [13] G. Pavlidis, D. Tsiafakis, G. Provopoulos, S. Chatzopoulos, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, “MOMI: A dynamic and internet-based 3D virtual museum of musical instruments”, *Third International Conference of Museology*, (Mytilene, Greece), 2006.

- [14] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Process Evaluation of 3D Reconstruction Methodologies Targeted to Web based Virtual Reality", *XXI CIPA International Symposium*, (Athens, Greece), 2007.
- [15] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, "Creating Internet Friendly 3D Tours Using 3D Range Scanner Data", *3D Colour Laser Scanning Conference*, (UCL London, UK), 2008.
- [16] V. Tsioukas, N. Tsirliganis, G. Pavlidis, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, E. Mpakourou, A. Mexia, "Photogrammetric Modelling Of Byzantine Churches", *CIPA 2005 - XX International Symposium*, (Torino, Italy), 2005.
- [17] G. Pavlidis, N. Tsirliganis, D. Tsiafakis, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, "3D digitization of monuments: the case of Mani", *Third International Conference of Museology*, (Mytilene, Greece), 2006.
- [18] N. Tsirliganis, G. Pavlidis, A. Koutsoudis, E. Politou, A. Tsompanopoulos, K. Stavroglou, C. Chamzas, "New Ways in Digitization and Visualization of Cultural Objects", *IEEE International Digital Signal Processing Conference DSP 2002*, (Santorini, Greece), Vol. 1, pp. 475-478, 2002.
- [19] N. Tsirliganis, G. Pavlidis, A. Koutsoudis, D. Papadopoulou, A. Tsompanopoulos, K. Stavroglou, Z. Loukou, C. Chamzas, "Archiving 3D Cultural Objects with Surface Point-Wise Database Information", *IEEE 3D Data Processing, Visualization & Transmission 3DPVT 2002*, (Padova, Italy), pp. 766-769, 2002.
- [20] D. Zeltzer, "Autonomy, interaction, and presence", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 1, Is. 1, pp. 127-132, 1992.
- [21] R.S. Kalawsky, *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Cambridge: University Press, 1994.
- [22] C. Cruz-Neira, D. Sandin, T. DeFanti, "Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", *Proceedings of SIGGRAPH 93 Computer Graphics Conference*, 1993.