



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη Μοντέλου Προβολών Αντικειμένων σε
Ακτινογραφικό Μηχάνημα Τύπου C-Arm**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Αδρακτάς

Επιβλέπων : Ηλίας Κουκούτσης,
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη Μοντέλου Προβολών Αντικειμένων σε Ακτινογραφικό Μηχάνημα Τύπου C-Arm

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Αδρακτάς

Επιβλέπων : Ηλίας Κουκούτσης,

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ηλίας Κουκούτσης
Μέλος Δ.Ε.Π
Επίκουρος

.....
Κωνσταντίνος Παπαοδυσσεύς
Μέλος Δ.Ε.Π
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Βασίλειος Λούμος
Μέλος Δ.Ε.Π
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2011

.....
Παναγιώτης Αδρακτάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Αδρακτάς, 2011

Copyright © Ηλίας Κουκούτσης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η εργασία αυτή αφορά τη βελτίωση συστήματος που στοχεύει στην επίλυση βασικών προβλημάτων, τα οποία παρουσιάζονται στην ιατρική χειρουργική διαδικασία της ασφαλίσιμης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης. Η μέθοδος υποβοήθησης βασίζεται στη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και διάταξης τρισδιάστατης ψηφιοποίησης για τη μοντελοποίηση των ήλων και την προσομοίωση της ακτινοβολίας των ακτινογραφικών μηχανημάτων.

Αρχικά γίνεται περιγραφή της ακτινοδιαγνωστικής διάταξης που χρησιμοποιείται στη χειρουργική διαδικασία της ασφαλίσιμης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης. Εξετάζεται κάθε μέρος της διάταξης αυτής και οι σπουδαιότερες χρήσεις της, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην πηγή της ακτινοβολίας και στα πιο σημαντικά μοντέλα ακτινοβόλησης παρουσιάζοντας τις πιο σημαντικές παραμορφώσεις των εικόνων που προκύπτουν από αυτές τις διατάξεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο ήλος και γίνεται μια συντομη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του. Επιπλέον γίνεται μια γενική αναφορά στην παράσταση αντικειμένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ενώ εμβαθύνουμε στις δομές παράστασης αντικειμένων και ιδιαίτερα στα πολυγωνικά μοντέλα, όπου παρουσιάζονται και τρόποι δημιουργίας. Ύστερα περιγράφεται η διαδικασία ψηφιοποίησης του ήλου και τα αποτελέσματα αυτής. Τέλος παρουσιάζονται οι βασικές αρχές για το φωτισμό και τη σκίαση αντικειμένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά μοντέλα φωτισμού και προτείνεται η χρήση συγκεκριμένης τεχνικής σκίασης.

Λέξεις/Φράσεις Κλειδιά: ασφαλιζόμενες κλειστές ενδομυελικές ηλώσεις, C-Arm, τρισδιάστατη παράσταση αντικειμένων, μοντέλα και αλγόριθμοι φωτισμού σε εικονικά αντικείμενα, τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αντικειμένων

Abstract

This thesis is about the improvement of a system, which aims at the solution of major problems, which are intrinsic in the medical surgical process of the closed locked intramedullary nailing. The assistive method is based on the use of computers and 3D scanning devices for the 3D modeling of nails and the simulation of the radiation process that takes place at radiographic machines.

Initially, the radiographic machine is described, which is used at the surgical process of closed locked intramedullary nailing. The basic parts of that device type are examined, emphasising on the X-ray sources and the most important models of radiation beam. Afterwards, the most common artifacts occurring in such radiographic images, are presented. Furthermore, different types of nails and their basic features are mentioned. Moreover, a general report on how objects are created with computers, emphasizing at the data structures used for that purpose, is made. Specifically, the polygon mesh data structure is thoroughly examined, as well as different ways of describing objects using this data structure. After that, the process of the 3D scanning of the nail and its results is described and its results are presented. Finally, the basic principles of lighting and shading of objects, as well as the most important lighting models for 3D graphics are presented.

Keywords: closed locked intramedullary nailings, C-Arm, 3D representation of objects, models and algorithms for lighting virtual objects, 3D scanning of objects

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	10
Κεφάλαιο 2: C-Arm-Πηγές ακτινοβολίας και παραμορφώσεις στις εικόνες.....	13
2.1 Περιγραφή διάταξης C-Arm	14
2.1.1 Σταθμός Εργασίας	15
2.1.2 Ενισχυτής εικόνας	15
2.1.3 Πηγές ακτινοβολίας.....	16
2.2 Χρήσεις του C-Arm	20
2.3 Μοντέλα ακτινοβολίας	21
2.3.1 Το απλό μοντέλο παραλλήλων ακτίνων	21
2.3.2 Το μοντέλο κωνικής δέσμης ακτινοβολίας	22
2.4 Παραμορφώσεις.....	24
2.4.1 Τα σφάλματα λόγω της φυσικής.....	25
2.4.2 Σφάλματα λόγω του ασθενούς	27
2.4.3 Σφάλματα λόγω του C-Arm.....	29
Κεφάλαιο 3: ήλος – τρισδιάστατη παράσταση αντικειμένων και ψηφιοποίηση.....	30
3.1 Ο ήλος - εισαγωγή	31
3.2 Τρισδιάστατη παράσταση αντικειμένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.....	33
3.3 Δομές παράστασης αντικειμένων	35
3.3.1 Το μοντέλο από πλαίσιο νημάτων (wireframe)	35
3.3.2 Το πολυγωνικό μοντέλο	36
3.3.3 Δικυβικές επιφάνειες	42
3.3.4 Υποδιαίρεση χώρου	43
3.3.5 Constructive Solid Geometry (CSG).....	45
3.4 Δημιουργία πολυγωνικών μοντέλων	46
3.4.1 Χειροκίνητος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής.....	46
3.4.2 Αυτόματος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής	48
3.4.3 Μαθηματική περιγραφή	49
3.5 Περιγραφή της διαδικασίας ψηφιοποίησης του ήλου.....	49
3.5.1 Περιγραφή της διάταξης	49
3.5.2 Βαθμονόμηση της συσκευής.....	50
3.5.3 Προετοιμασία του ήλου	50
3.5.4 Διαδικασία ψηφιοποίησης-περιγραφή λειτουργίας του ψηφιοποιητή.....	51
3.5.5 Τρισδιάστατη ανακατασκευή της εικόνας.....	51

3.6 Αποτελέσματα ψηφιοποίησης ήλου.....	51
Κεφάλαιο 4: Σκίαση τρισδιάστατων αντικειμένων	54
4.1 Εισαγωγή	55
4.2 Φυσική της ανάκλασης	55
4.3 Μοντέλο ανάκλασης του Phong	60
4.4 Αλγόριθμοι φωτισμού με βάση το μοντέλο Phong.....	63
4.4.1 Αλγόριθμος σταθερού φωτισμού	64
4.4.2 Αλγόριθμος του Gouraud	65
4.4.3 Αλγόριθμος του Phong	65
4.5 Χαρτογράφηση σκίασης ή Προβολική σκίαση (shadow mapping ή projective shadowing)	66
4.5.1 Βασική αρχή μιας σκιάς και ενός χάρτη σκίασης (shadow map)	67
4.5.2 Δημιουργία του χάρτη σκίασης (shadow map)	67
4.5.3 Σκίαση της σκηνής.....	68
4.5.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα.....	70
4.5.5 Υλοποίηση της τεχνικής «shadow mapping» σε C	70
4.6 Αλγόριθμος εύρεσης προβολής	71
Κεφάλαιο 5: Βασικά συμπεράσματα – Προτάσεις για συνέχιση της εργασίας.....	73
Βιβλιογραφία	75
Παράρτημα Α.....	78
“Main”	79
“FragmentShader”	89
“VertexShader”	90

Κεφάλαιο 1: εισαγωγή

Σε περιπτώσεις συντριπτικών καταγμάτων ανθρώπινων μακριών οστών, όπως τα οστά του μηρού και της κνήμης, οι ιατροί χρησιμοποιούν σήμερα ως μέθοδο επιλογής την τοποθέτηση μεταλλικών ήλων εντός των αντίστοιχων οστών. Πάνω στους ήλους αυτούς βιδώνονται σταθερά τα δύο θραυσμένα μέρη του οστού που έχει υποστεί κάταγμα. Η διαδικασία τοποθέτησης του ήλου στο εσωτερικό του οστού και της σταθεροποίησης των θραυσμάτων του οστού πάνω στον ήλο ονομάζεται ασφαλίσιμη κλειστή ενδομυελική ήλωση και γίνεται από ορθοπεδικούς χειρουργούς σε ειδικά εξοπλισμένα ορθοπεδικά χειρουργεία. Κρίσιμο πρόβλημα στις εγχειρήσεις του τύπου αυτού είναι η εύρεση των οπών που φέρουν οι ήλοι για την τοποθέτηση των βιδών σταθεροποίησης και η θέαση των οπών αυτών υπό την κατάλληλη γωνία, στην οποία παρουσιάζονται σαν τέλειοι κύκλοι. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα το οποίο συναντάται κατά τις επεμβάσεις των ασφαλίσιμων κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων και καθιστά την αντίστοιχη διαδικασία εξαιρετικά δύσκολη και χρονοβόρα. Η εργασία αυτή έχει σκοπό να μελετήσει βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν σε τμήματα υπάρχοντος συστήματος για την βελτίωσή του. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μοντέλα ακτινοβολίας για την προσομοίωση της λειτουργίας μηχανημάτων τύπου C-Arm, τα οποία μπορούν να κάνουν πιο αποτελεσματική τη διαδικασία εύρεσης της οπής του ενδομυελώδους ήλου. Η ψηφιοποίηση του ήλου βασίζεται στη χρήση ειδικού τρισδιάστατου ψηφιοποιητή (scanner) και αντίστοιχου λογισμικού για την παράσταση τρισδιάστατων αντικειμένων σε υπολογιστή. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών αναμένεται να βελτιωθεί το σύστημα το οποίο ήδη υπάρχει. Το τελικό σύστημα, όταν αυτό ολοκληρωθεί, αναμένεται να είναι σημαντικά οικονομικότερο σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στην αγορά. Αναλυτική παρουσίαση της έκθεσης της διπλωματικής εργασίας γίνεται στα επόμενα κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση του πρώτου βασικού εργαλείου το οποίο χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία των κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων που είναι η ακτινοδιαγνωστική διάταξη τύπου C-Arm. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο ακτινοβολίας που χρησιμοποιούν τα C-Arms καθώς και τα σημαντικότερα είδη παραμορφώσεων που εισάγονται στις εικόνες από μια σειρά παράγοντες που επιδρούν.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο ήλος που είναι το αντικείμενο το οποίο χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση των θραυσμάτων του οστού. Στη συνέχεια περιγράφονται μέθοδοι και μοντέλα παράστασης στερεών αντικειμένων σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, όπως το πολυγωνικό μοντέλο ή το wireframe μοντέλο, μελετώντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη χρήση τους. Επίσης παρουσιάζονται τεχνικές για τη δημιουργία του πολυγωνικού μοντέλου ενός αντικειμένου. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση του ήλου καθώς και εικόνες με τα αποτελέσματά της.

Στο κεφάλαιο 4 ασχολούμαστε με τη σκίαση τρισδιάστατων αντικειμένων. Αρχικά μελετάμε τους φυσικούς νόμους που διέπουν το φως και την ανάκλαση αυτού. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το πιο διαδεδομένο μοντέλο ανάκλασης/φωτισμού, το μοντέλο του Phong. Ακολουθώς γίνεται συνοπτική παρουσίαση αλγορίθμων φωτισμού. Αφού έχει ολοκληρωθεί η μελέτη των πιο βασικών αρχών για το φωτισμό αντικειμένων, παρουσιάζεται μια ικανοποιητική τεχνική για την προσθήκη σκιών σε τρισδιάστατα αντικείμενα: η τεχνική χαρτογράφησης σκιάς (shadow mapping). Τέλος

παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος εύρεσης της προβολής αντικειμένων που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο.

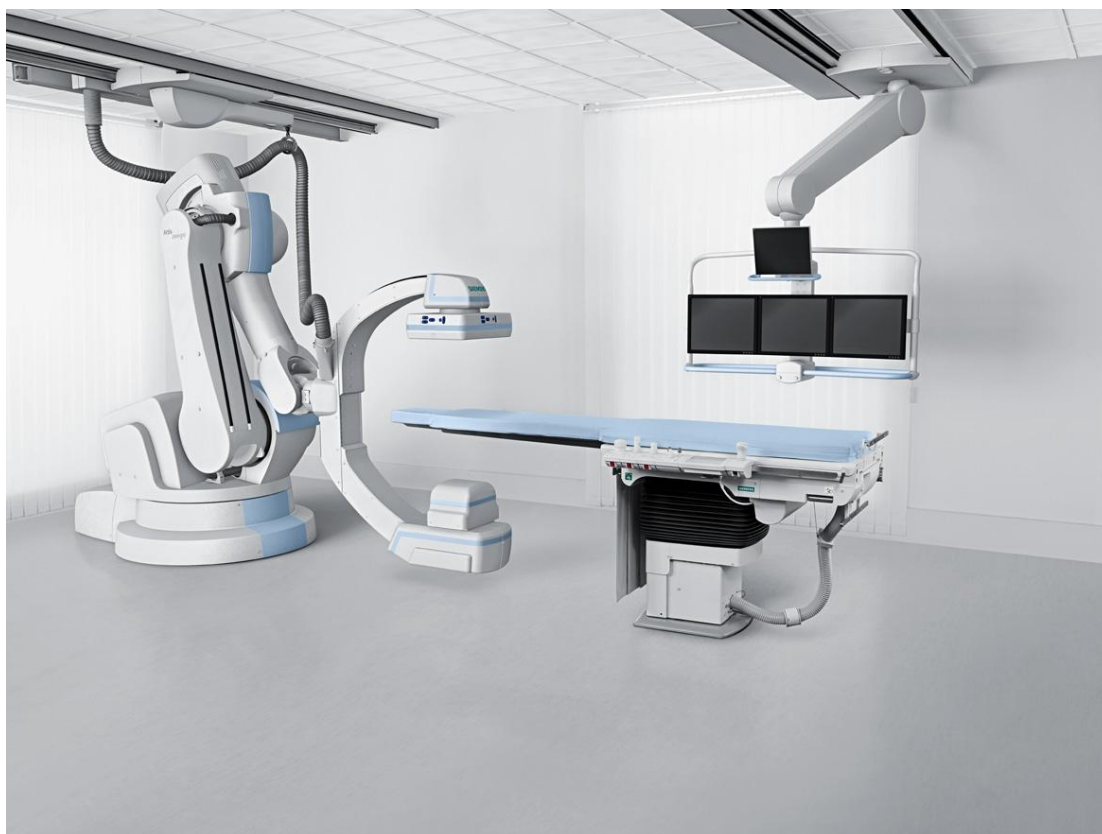
Τέλος, στο κεφάλαιο 5 παραθέτονται παρατηρήσεις και συμπεράσματα σχετικά με την εργασία, επίσης δίνονται κατευθύνσεις και προτάσεις για περαιτέρω συνέχισή της.

***Κεφάλαιο 2: C-Arm-πηγές
ακτινοβολίας και
παραμορφώσεις στις εικόνες.***

2.1 Περιγραφή διάταξης C-Arm

Η ακτινοδιαγνωστική διάταξη που χρησιμοποιείται ώστε ο γιατρός να μπορεί να εντοπίσει τη σχετική θέση του ήλου που βρίσκεται εντός του οστού, ώστε με την κατάλληλη διάτρηση να μπορέσει να τοποθετήσει σωστά τις βίδες σε αυτό, είναι η ακτινοδιαγνωστική διάταξη τύπου C-Arm. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικό να δούμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά αυτών των διατάξεων και να εξετάσουμε πώς συστηματικά τη γεωμετρία της δέσμης των ακτίνων που εκπέμπονται από την πηγή ενός τέτοιου μηχανήματος, ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να μοντελοποιήσουμε την συμπεριφορά αυτού του μηχανήματος με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το C-Arm είναι μια συσκευή απεικόνισης που χρησιμοποιεί ακτίνες X και έναν ενισχυτή εικόνας και παράγει την εικόνα του ακτινοβολούμενου σώματος σε μια οθόνη. Ο ενισχυτής εικόνας ακτίνων X δίνει το πλεονέκτημα στη συσκευή αυτή να έχει πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την απεικόνιση, με χαμηλής έντασης ακτίνες X. Έτσι ο ασθενής και το ιατρικό προσωπικό που βρίσκονται στο χώρο, δέχονται μικρότερη δόση ακτίνων X και άρα να προστατεύεται καλύτερα η υγεία τους. Επίσης με τις πολλαπλές λήψεις εικόνων που μπορούν να πραγματοποιηθούν ο γιατρός μπορεί να αντιληφθεί καλύτερα τη δομή του μέλους που ακτινοβολείται ⁽¹⁾⁽²⁾.

Η διάταξη αυτή φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 2.1: Ακτινοδιαγνωστική διάταξη C-Arm ⁽³⁾

Το C-arm αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία ⁽¹⁾:

- Το C-Arm, το οποίο αποτελεί μια διάταξη όμοια με τον λατινικό χαρακτήρα “C” και φέρει στο ένα άκρο του πηγή ακτίνων X και στο άλλο άκρο του, απέναντι από την πηγή, μια ακτινογραφική επιφάνεια στην οποία

καταγράφεται η προβολή του αντικειμένου, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στην πηγή των ακτίνων και ακτινοβολείται από την πηγή ακτίνων X. Η διάταξη αυτή έχει δυνατότητα μετακίνησης κατά τις τρεις διευθύνσεις του χώρου (άξονες x, y, z) και περιστροφής ως προς τους τρεις άξονες του χώρου.

- Το τραπέζι, πάνω στο οποίο τοποθετείται ο ασθενής ή το μέλος του ασθενούς, το οποίο έχει υποστεί το κάταγμα.
- Ο σταθμός εργασίας της διάταξης στην οποία βρίσκονται τα συστήματα χειρισμού και οι οθόνες απεικόνισης.

2.1.1 Σταθμός Εργασίας

Ένα μεγάλο μέρος της λειτουργίας της διάταξης πραγματοποιείται στο σταθμό εργασίας της οποίας τα κυριότερα χαρακτηριστικά είναι ⁽¹⁾:

- Χειριστήρια για τη μετακίνηση και σωστή τοποθέτηση των κινητών μερών της διάταξης.
- Διακόπτης ισχύος και έκθεσης στις ακτίνες X.
- Χειριστήρια για τις ακτινολογικές και ακτινοσκοπικές ρυθμίσεις.
- Καλώδια και θύρες διασύνδεσης.
- Σκληρός δίσκος και σύστημα εγγραφής οπτικών δίσκων για την αποθήκευση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων.
- Σύστημα που επιτρέπει τη διασύνδεση της διάταξης με άλλα συστήματα που περιέχουν το ιστορικό του ασθενούς.
- Λογισμικό βελτίωσης της εικόνας.
- Δυνατότητα αποθήκευσης και εναλλαγής των εικόνων στις οθόνες.
- Δύο ή περισσότερες οθόνες.

Οι διατάξεις αυτού του τύπου έχουν πολύ σημαντικές δυνατότητες και οι κυριότερες απ' αυτές είναι ⁽¹⁾:

- Η επανάληψη στη θέαση μιας σκηνής που καταγράφηκε όποτε το θελήσει ο γιατρός.
- Πολλαπλές εικόνες.
- Μεγέθυνση της εικόνας.
- Σχολιασμός των εικόνων για γρηγορότερη εύρεση.
- Θέαση του μέλους του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο.
- Τρισδιάστατη απεικόνιση.

2.1.2 Ενισχυτής εικόνας

Ο ενισχυτής εικόνας αναλαμβάνει να μετατρέψει τα φωτόνια των ακτίνων X σε ηλεκτρικό σήμα ώστε να μπορεί να γίνει η επεξεργασία του στη μονάδα εργασίας και να απεικονιστούν τα αποτελέσματα. Υπάρχουν δύο μεγέθη ενισχυτών εικόνας που χρησιμοποιούνται. Το ένα είναι 16 εκατοστών και το άλλο 22, όμως υπάρχει η τάση αντικατάστασης τους από επίπεδους αισθητήρες και ήδη κυκλοφορούν μηχανήματα

με τέτοιου είδους αισθητήρες. Το χαρακτηριστικό, που είναι σημαντικό σε έναν αισθητήρα ακτίνων X, είναι η γραμμική απόκριση σε ένα μεγάλο εύρος εντάσεων ακτινοβολίας, δηλαδή είτε έχουμε χαμηλής έντασης ακτινοβολία είτε υψηλής, η αντίθεση της εικόνας να είναι η ίδια. Ένα άλλο πλεονέκτημα των επίπεδων αισθητήρων είναι η εξαιρετική διακριτική τους ικανότητα. Γι' αυτό το λόγο έχουν επικρατήσει πλέον αυτού του τύπου οι αισθητήρες που έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση ακτίνων χαμηλότερης έντασης και άρα μικρότερη επιβάρυνση των ασθενών και των ιατρών που βρίσκονται στο χώρο, και επιπλέον προσφέρουν καλύτερη ποιότητα εικόνας. Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε έναν επίπεδο αισθητήρα έτοιμο προς τοποθέτηση. Στο πλαϊνό μέρος διακρίνονται οι υποδοχές σύνδεσης.⁽⁴⁾⁽¹⁾



Εικόνα 2.2: Επίπεδος αισθητήρας⁽⁵⁾

2.1.3 Πηγές ακτινοβολίας

Προκειμένου να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε μια αποτελεσματική μέθοδο υποβοήθησης του χειρουργού, είναι απαραίτητο να μοντελοποιήσουμε και να μελετήσουμε τη λειτουργία και τη συμπεριφορά όλων των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην ασφαλίσιμη κλειστή ενδομυελική ήλωση. Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε αναλυτικά την λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των πηγών ακτίνων X που χρησιμοποιούνται, και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα πιο σημαντικά μοντέλα ακτίνων X όπως αυτό της παράλληλης δέσμης ακτίνων και της κωνικής δέσμης. Τελικά θα δούμε τα πιο σημαντικά σφάλματα που εμφανίζονται στις εικόνες που προκύπτουν.

Η μελέτη της γεωμετρίας της δέσμης ακτινοβολίας των ακτινοσκοπικών μηχανημάτων τύπου C-arm είναι απαραίτητη ώστε να γίνουν αντιληπτές οι παραμορφώσεις που υπεισέρχονται στην εικόνα που εμφανίζεται ως αποτέλεσμα στην οθόνη της διάταξης. Συγκεκριμένα, για το ιατρικό πρόβλημα που μελετάται η μελέτη των παραμορφώσεων της οπής του ήλου είναι απαραίτητη ώστε να προσδιορισθούν τα διορθωτικά βήματα που χρειάζονται για την αντιστάθμιση των απεικονιστικών ατελιών.

Στοιχεία πηγών ακτινοβολίας

Στα ακτινογραφικά μηχανήματα που είναι διαθέσιμα αυτή τη στιγμή στην αγορά χρησιμοποιείται ένα πλήθος διαφορετικών τύπων πηγών ακτίνων X. Σε αυτή την παράγραφο θα περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας μιας τυπικής πηγής ακτίνων X και θα δούμε κάποιους διαφορετικούς τύπους που υπάρχουν στην αγορά.



Εικόνα 2.3: Πηγή ακτίνων X με έτος κατασκευής 1978 ⁽⁶⁾



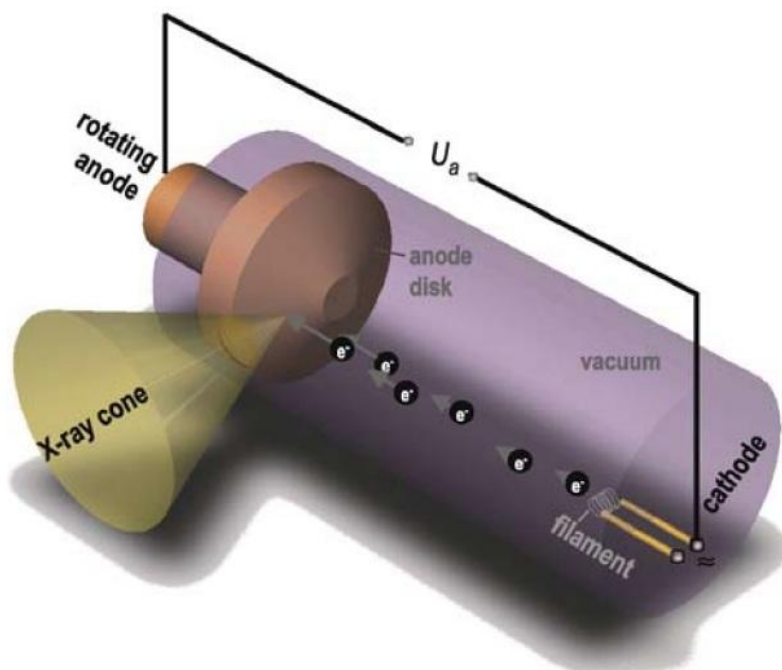
Εικόνα 2.4: Πηγή ακτίνων X με έτος κατασκευής 1980 ⁽⁶⁾



Εικόνα 2.5: Πηγή ακτίνων X με έτος κατασκευής 2002 ⁽⁶⁾

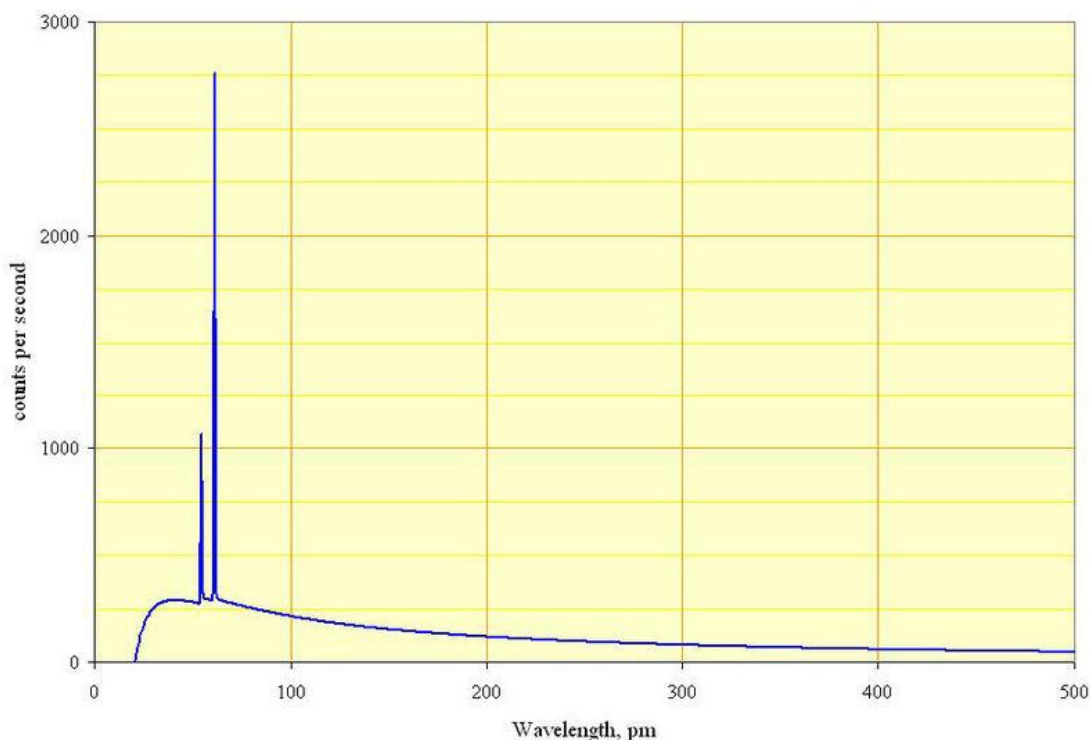
Αρχή λειτουργίας πηγής ακτίνων X:

Αρχικά υπάρχει η κάθοδος από την οποία εκπέμπονται ηλεκτρόνια, το υλικό από τα οποία μπορεί να είναι κατασκευασμένη η κάθοδος είναι: βολφράμιο, μολυβδαίνιο ή χαλκός. Στη συνέχεια η δέσμη των ηλεκτρονίων επιταχύνεται από πολύ μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από υψηλή τάση της τάξης των 30-150 χιλιάδες βολτ και φτάνουν σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Στη συνέχεια προσπίπτουν στην επιφάνεια της ανόδου όπου διεγείρουν τα άτομα του υλικού της και αυτά αποδιεγειρόμενα εκπέμπουν ακτινοβολία. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε σχηματικά το μηχανισμό δημιουργίας των ακτίνων X.⁽⁷⁾



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση πηγής ακτίνων X. Δεξιά είναι η κάθοδος εκπομπής ηλεκτρονίων τα οποία προσπίπτουν στην άνοδο που είναι το κόκκινο αντικείμενο και εκεί παράγεται η δέσμη ακτίνων X⁽⁶⁾

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυτής εξαρτάται από το υλικό της ανόδου και γι'αυτό στις πηγές ακτίνων X επιλέγεται κάποιο υλικό μεγάλου ατομικού αριθμού ώστε να δίνει τις ακτίνες που επιθυμούμε, τέτοιο υλικό, για παράδειγμα, είναι το Ρόδιο. Όμως το φάσμα που παράγεται από μια τέτοια διαταξη είναι συνεχές όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα⁽⁷⁾:



Εικόνα 2.7: Φάσμα ακτινοβολίας που προέρχεται από πηγή ακτίνων X με άνοδο από Ρόδιο ⁽⁷⁾

Γι' αυτό το λόγο τοποθετούνται φίλτρα αλουμινίου, συγκεκριμένου πάχους, στο δρόμο των ακτίνων X για να απομακρύνουν την «ανεπιθύμητη» μαλακή ακτινοβολία (μη διεισδυτική). Η σκληρότητα (διεισδυτικότητα) των ακτίνων X μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τη χρήση που πρόκειται να γίνει, ρυθμίζοντας την τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων. Όσο πιο μεγάλη είναι η τάση αυτή, τόσο πιο διεισδυτική είναι η ακτινοβολία και τόσο καλύτερη είναι η ευκρίνεια της εικόνας που προκύπτει ως αποτέλεσμα. Όμως, όσο πιο διεισδυτική είναι η ακτινοβολία, τόσο μεγαλύτεροι κίνδυνοι εγκυμονούν για την υγεία του ασθενούς, γι' αυτό το λόγο επιλέγεται η κατάλληλη ακτινοβολία, που δίνει αποδεκτό αποτέλεσμα και ταυτόχρονα δεν προκαλεί επιπλέον προβλήματα στον ασθενή. ⁽⁸⁾

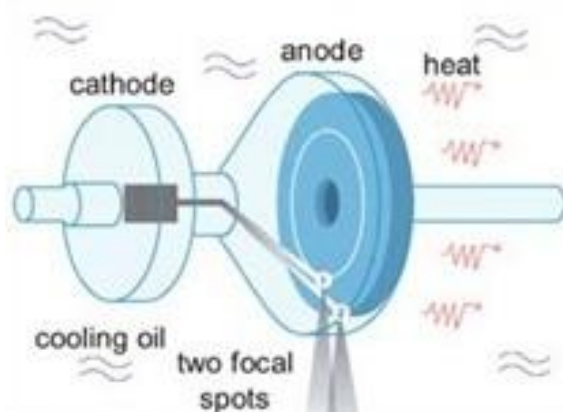
Μια βελτίωση της απλής πηγής ακτίνων X που χρησιμοποιούνταν παλιότερα έκανε ο William Coolidge. Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας τέτοιας κατασκευής δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- Χρήση ηλεκτροστατικού φακού ώστε να εστιαστεί η δέσμη των ηλεκτρονίων σε όσο το δυνατόν μικρότερη επιφάνεια στην άνοδο (τυπική διάμετρος 0,3-2 mm).
- Ειδικός σχεδιασμός για την ψύξη της ανόδου ώστε να περιορίζεται η γρήγορη φθορά της, που προκαλείται από την έντονη έκλυση θερμότητας λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης της δέσμης ηλεκτρονίων. Η ψύξη επιτυγχάνεται είτε με χρήση ψυκτικού υγρού, είτε περιστρέφοντας την άνοδο με ειδικό μηχανισμό, ώστε η δέσμη ηλεκτρονίων να μην προσπίπτει στο ίδιο σημείο συνεχώς. Για πύο αποτελεσματική ψύξη συνδυάζονται τα δύο παραπάνω τεχνάσματα και αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής της συσκευής.
- Η άνοδος είναι τοποθετημένη υπό γωνία 1-20 μοιρών και όχι κάθετα, ως προς τη δέσμη των ηλεκτρονίων, ώστε να επιτρέπεται η διαφυγή μερικών

φωτονίων ακτίνων X τα οποία εκπέμπονται κάθετα στη δέσμη των ηλεκτρονίων.

Η ισχύς μιας τέτοιας συσκευής συνήθως είναι μεταξύ 0,1 και 18 kW⁽⁷⁾.

Ακολουθεί μια σχηματική παράσταση συσκευής αυτού του τύπου και στη συνέχεια μια εικόνα πραγματικής συσκευής:



Εικόνα 2.8: Σχηματική παράσταση πηγής ακτίνων X με σύστημα ψύξης



Εικόνα 2.9: Πηγή ακτίνων X με σύστημα ψύξης.

Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις που οι ιατροί χρειάζονται εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης, άρα η πηγή των ακτίνων X πρέπει να έχει πολύ μικρό σημείο εστίασης της δέσμης των ηλεκτρονίων, τυπικά να έχει διάμετρο μικρότερη από 50μm. Σε αυτές τις συσκευές το πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί σημείο συγκέντρωσης μέχρι και 1μm. Όμως η ισχύς είναι πολύ μικρή και ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για σημείο εστίασης 10μm η ισχύς μιας τέτοιας συσκευής είναι 15-30W.

2.2 Χρήσεις του C-Arm

Τα C-arm χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς της ιατρικής, είτε σε διαδικασίες διάγνωσης, είτε σε εγχειρήσεις, είτε δε διαδικασίες θεραπείας. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε τις παρακάτω⁽⁹⁾⁽¹⁾:

- Ενδοσκοπικές μελέτες.
- Αγγειογραφικές μελέτες (περιφερειακών, κεντρικών και εγκεφαλικών αγγείων).
- Θεραπευτικές μελέτες (βιοψίες).
- Καρδιολογικές μελέτες.
- Ορθοπεδικές διαδικασίες (κλειστή ενδομυελική ήλωση, επεμβάσεις στη σπονδυλική στήλη).
- Χειρουργικές επεμβάσεις στη στοματική κοιλότητα.
- Ουρολογία
- Επεμβάσεις στον πνεύμονα

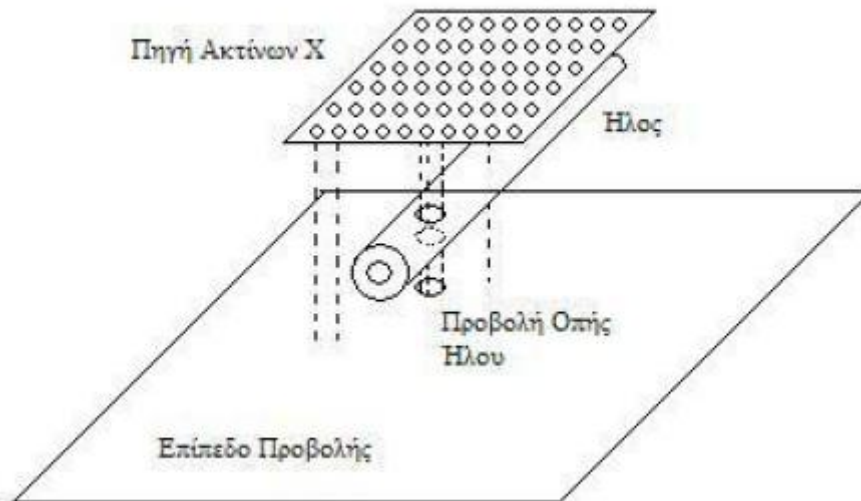
2.3 Μοντέλα ακτινοβολίας

2.3.1 Το απλό μοντέλο παραλλήλων ακτίνων

Το μοντέλο αυτό είναι το πιο απλό ως προς τη μελέτη και τη διαδικασία που θα μας δώσει την προβολή ενός αντικειμένου στην ακτινογραφική επιφάνεια. Η πηγή ακτινοβολίας είναι ένα πλέγμα όπου κάθε σημείο του είναι μια πηγή ακτίνων X, που ακτινοβολεί ακτίνες ευθύγραμμες και παράλληλες στην κάθετη του επιπέδου της ακτινογραφικής επιφάνειας της διαταξης τύπου C-arm. Λόγω του ότι όλες οι ακτίνες είναι κάθετες στην ακτινογραφική επιφάνεια, η προβολή της οπής του ήλου θα αποτυπώνεται στην ακτινογραφική επιφάνεια χωρίς καμιά παραμόρφωση, καθώς από την οπή μπορούν να περάσουν μόνο οι ακτίνες που βρίσκονται ακριβώς από πάνω του. Σε αντίθεση με την ευκολία μελέτης και υλοποίησης μιας τέτοιας δέσμης ακτίνων σε έναν υπολογιστή για τη διενέργεια προσομοιώσεων, η φυσική κατασκευή μιας τέτοιας πηγής ακτίνων είναι πολύ δύσκολη. Η δυσκολία υλοποίησης μιας τέτοιας πηγής οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους:

- Απαιτείται μεγάλη επιφάνεια πρόσπτωσης της ηλεκτρονικής δέσμης στο υλικό της ανόδου.
- Κάθε άτομο όταν εκπέμπει ένα φωτόνιο, αυτό εκπέμπεται προς οποιαδήποτε διεύθυνση και αυτό δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί.

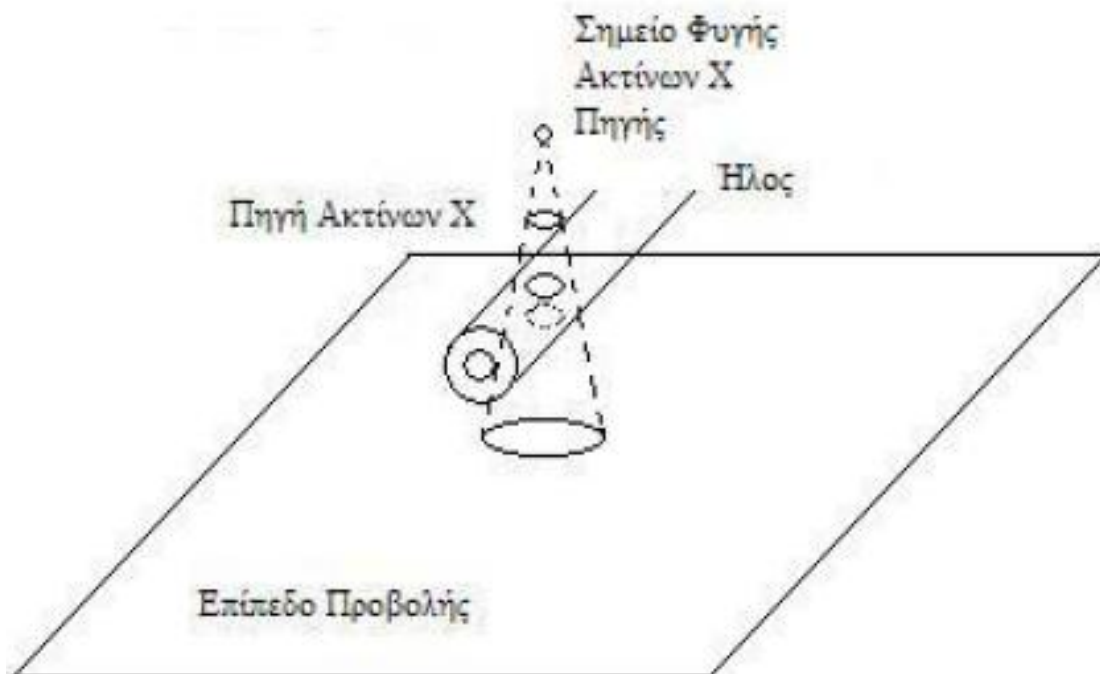
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η προβολή ενός ήλου όταν αυτό ακτινοβολείται από μια παράλληλη δέσμη ακτίνων⁽¹⁰⁾:



Εικόνα 2.10: Μοντέλο πηγής παράλληλων ακτίνων X⁽¹⁰⁾

2.3.2 Το μοντέλο κωνικής δέσμης ακτινοβολίας

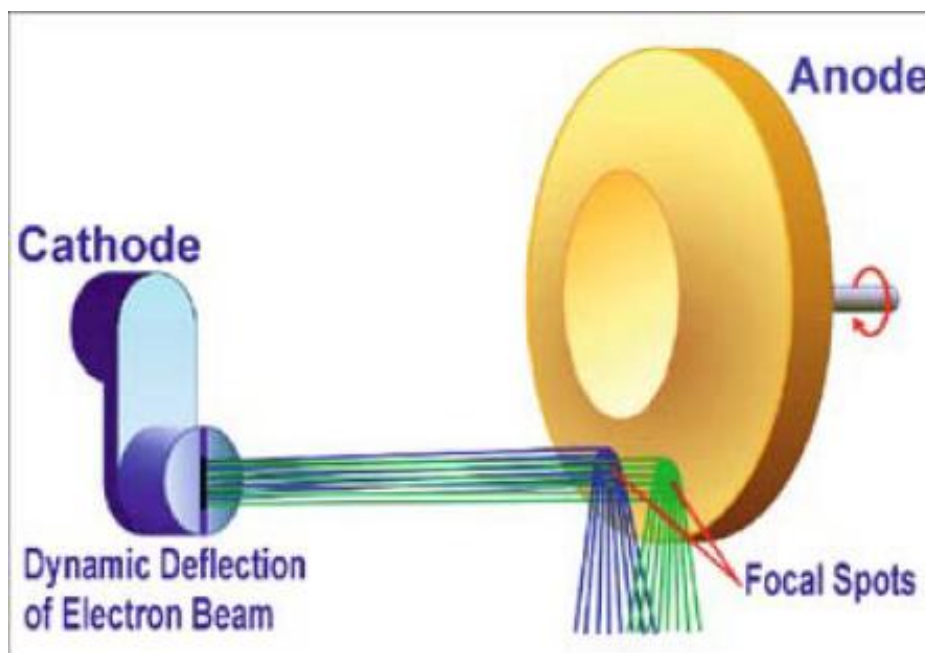
Στο μοντέλο αυτό οι ακτίνες παράγονται από ένα ή περισσότερα σημεία και διαχέονται σαν κώνος προς την ακτινογραφική επιφάνεια, δηλαδή προσπίπτουν στο αντικείμενο και την ακτινογραφική επιφάνεια όχι κάθετα αλλά υπό γωνία. Οι ακτίνες αυτές έχουν σημείο φυγής την κορυφή του κώνου που είναι και το σημείο από το οποίο εκπέμπονται. Αν έχουμε ένα σημείο ακτινοβολίας μπορούμε να δούμε στο παρακάτω σχήμα πως θα είναι μια προβολή:^{(10) (11)}



Εικόνα 2.11: Μοντέλο ακτινοβολίας συντρεχουσών ακτίνων⁽¹⁰⁾

Αυτός ο τρόπος ακτινοβολήσης του αντικειμένου εισάγει παραμορφώσεις στην προβολή του πάνω στην ακτινογραφική επιφάνεια, άρα και στην εικόνα που προκύπτει ως αποτέλεσμα, τις οποίες θα μελετήσουμε στην επόμενη παράγραφο.

Όπως είδαμε προηγουμένως, η επιφάνεια εκπομπής δεν είναι ένα σημείο αλλά είναι μία περιοχή που έχει ακτίνα της τάξης του 1mm, άρα είναι ένα σύνολο σημείων τα οποία μάλιστα δεν είναι στο ίδιο επίπεδο καθώς η άνοδος είναι υπό γωνία και επίσης πολλά ηλεκτρόνια εισχωρούν στο υλικό και άρα αυτό δεν εκπέμπει τα φωτόνια των ακτίνων X από την επιφάνεια του, αλλά από κάποιο σημείο στο εσωτερικό του υλικού. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται στην πρώτη η περιοχή εστίασης της δέσμης των ηλεκτρονίων και στη δεύτερη η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης ηλεκτρονίων:



Εικόνα 2.12: Περιοχή εστίασης ηλεκτρονικής δέσμης ⁽⁶⁾

Το μοντέλο αυτό εισάγει ακόμα περισσότερες παραμορφώσεις, λόγω των πολλών σημείων εκπομπής έχουμε έντονα φαινόμενα σκίασης με αποτέλεσμα τα όρια του ήλου και της οπής να είναι δυσδιάκριτα.

Σήμερα στην αγορά τα σύγχρονα ακτινοδιαγνωστικά μηχανήματα τύπου C-arm μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιούν το κωνικό μοντέλο ακτινοβολίας για τους παρακάτω λόγους:

- Η περιοχή εκπομπής των ακτίνων X είναι της τάξης του 1mm ή και ακόμα μικρότερη. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η απόσταση της πηγής από την επιφάνεια καταγραφής είναι της τάξης του 0,5-1m μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσέγγιση της σημειακής πηγής είναι πολύ καλή.
- Μπροστά στις πηγές ακτινοβολίας τοποθετείται συνήθως ένα κυκλικό παράθυρο το οποίο δεν επιτρέπει σε όλες τις ακτίνες να περάσουν προς το ακτινοβολούμενο αντικείμενο. Έτσι η δεσμη η οποία δημιουργείται τελικά είναι κωνική.

2.4 Παραμορφώσεις

Τα ακτινογραφικά μηχανήματα τύπου C-arm είναι σε θέση να παράξουν εικόνες υψηλής ανάλυσης δύο ή τριών διαστάσεων και έτσι είναι ένα πολύ σημαντικό βοήθημα για την διαδικασία της κλειστής ασφαλίσιμης ενδομυελικής ήλωσης. Παρ'όλα αυτά υπάρχουν πολλές παραμορφώσεις στην εικόνα που είναι συνυφασμένες με τη φύση της διαδικασίας απόκτησης της εικόνας και της ανακατασκευής της. Οι παραμορφώσεις συμβάλουν σημαντικά στην υποβάθμιση της εικόνας και μπορούν να οδηγήσουν σε λάνθασμένη εκτίμηση του ιατρού για τη θέση της οπής του ήλου.

Η διαδικασία απόκτησης της εικόνας είναι αρκετά σύνθετη και αποτελείται από πολλά στάδια, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να δημιουργεί κάποιου είδους παραμόρφωση στο τελικό αποτέλεσμα. Το πρώτο στάδιο είναι το φυσικό επίπεδο της διαδικασίας απεικόνισης με ακτίνες X και αναφέρεται στα χαρακτηριστικά της δέσμης των ακτίνων X. Η ποιότητα ενός συστήματος ακτίνων X χαρακτηρίζεται από την περιοχή εκπομπής τους στην άνοδο και από την ευθυγράμμιση της δέσμης. Η φυσική υπόσταση του σήματος που λαμβάνεται παραμένει αμετάβλητη, όμως η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας και του ακτινοβολούμενου σώματος αλλάζει τη σκληρότητα του φάσματος μιας πολυχρωματικής δέσμης. Το δεύτερο επίπεδο είναι αυτό του αισθητήρα ή ανιχνευτή. Σε αυτό το στάδιο το σήμα υποδιαιρείται από ένα πλέγμα αντιστασφοράς και ευθυγράμμισης της δέσμης και μετά μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δηλαδή τα φωτόνια των ακτίνων X ανιχνεύονται από έναν κρύσταλλο σπινθηρισμού και μετά μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα από έναν φωτοπολλαπλασιαστή ή μιά φωτοδίοδο. Το τρίτο στάδιο, το στάδιο ψηφιοποίησης στην πραγματικότητα συμβαίνει στον αισθητήρα, όμως το ξεχωρίζουμε ώστε να αντιληφθούμε καλύτερα τις πηγές των παραμορφώσεων. Σε αυτό το στάδιο το ηλεκτρικό σήμα από τη φωτοδίοδο ή τον φωτοπολλαπλασιαστή διακριτοποιείται και στη συνέχεια οι τιμές κβαντίζονται από έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα. Στο τέταρτο στάδιο της ανακατασκευής έχουμε τη δημιουργία της εικόνας από τα δεδομένα του αισθητήρα με τη χρήση αλγόριθμων ανακατασκευής. Το τελικό στάδιο είναι αυτό της επεξεργασίας και παρουσίασης της εικόνας στις οθόνες της διάταξης. Κάθε ένα από τα στάδια αυτά μπορεί να μοντελοποιηθεί και να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ώστε να έχουμε μια ακριβή άποψη για τα σφάλματα που υπεισέρχονται στην εικόνα, όμως αυτό δεν είναι στους σκοπούς της παρούσης εργασίας και μπορεί να προκύψει από περαιτέρω έρευνα πάνω σε αυτό το αντικείμενο. Η αναλυτική περιγραφή αυτής της διαδικασίας αποσκοπεί στο να γίνει κατανοητό στον αναγνώστη ότι η διαδικασία της απεικόνισης από μόνη της είναι αρκετή ώστε μια εικόνα να μην είναι πιστή αναπαράσταση του πραγματικού αντικειμένου.

Αφού είδαμε τη διαδικασία παραγωγής της εικόνας θα παρουσιάσουμε τα κυριότερα σφάλματα που εμφανίζονται σε εικόνες που έχουν ληφθεί από μηχανήματα τύπου C-Arm με κωνική δέσμη ακτινοβολίας. Τα σφάλματα αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

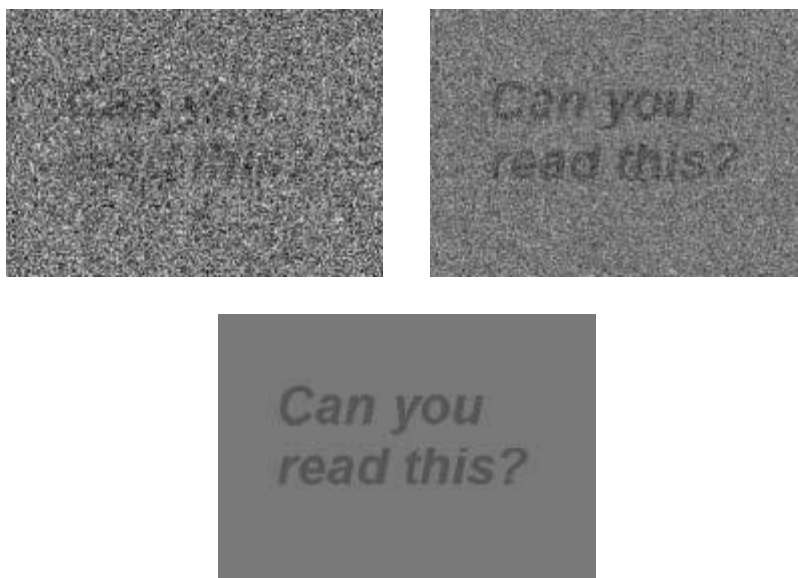
- Σφάλματα που σχετίζονται με τη φυσική.
- Σφάλματα που σχετίζονται με τον ασθενή.
- Σφάλματα που σχετίζονται με την ακτινοδιαγνωστική διάταξη. ^{(12) (13) (14) (15)}

2.4.1 Τα σφάλματα λόγω της φυσικής

2.4.1.1 Θόρυβος

Ο θόρυβος ορίζεται ως μια ανεπιθύμητη τυχαία ή μη τυχαία παρεμβολή στο σήμα της πληροφορίας που τείνει να αποκρύψει την πληροφορία του σήματος από τον παρατηρητή. Ο θόρυβος επηρεάζει τις εικόνες που παράγονται από απεικονιστικά μηχανήματα κωνικής δέσμης, μειώνοντας την ανάλυση χαμηλής αντίθεσης, γεγονός που δυσχεραίνει τη διακριση των ιστών χαμηλής πυκνότητας.

Ο θόρυβος στην παραδοσιακή προβολική ακτινογραφία οφείλεται κυρίως στην στατιστική διακύμανση της ροής των φωτονίων στο πεδίο ακτινοβολήσης και είναι γνωστός και ως κβαντική κηλίδωση. Σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα ακτίνων X ο κβαντικός θόρυβος εξαρτάται από τον αριθμό των φωτονίων που απορροφά ο ανιχνευτής, όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο μικρότερο είναι το φαινόμενο της κβαντικής κηλίδωσης. Ο αριθμός των φωτονίων είναι άμεσα συνδεδεμένος με τα mA της ηλεκτρονικής δέσμης της μονάδας παραγωγής των ακτίνων X. Μια άλλη πηγή θορύβου είναι η σκεδασμένη ακτινοβολία η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση της κύριας δέσμης ακτινοβολήσης με τα άτομα του αντικειμένου που ακτινοβολείται και το μέγεθος του εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τη θέση του αντικειμένου στο πεδίο σάρωσης. Όταν μια δέσμη ακτίνων X διαπερνά έναν ασθενή, παρουσιάζονται τρεις τυποί αλληλεπίδρασης, η συνεκτική σκέδαση, η φωτοηλεκτρική απορρόφηση και η σκέδαση Compton. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι δεν είναι στους σκοπούς αυτής της εργασίας να μελετήσουμε αναλυτικά κάθε πηγή θορύβου γι' αυτό και δεν εμβαθύνουμε στη μελέτη των σκεδάσεων. Γενικά αναφέρουμε ότι αν η ενέργεια της δέσμης των ακτίνων X είναι υψηλή τότε το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται στις συγκρούσεις είναι μικρό, επομένως και η γωνία σκέδασης είναι μικρή σε σχέση με την αρχική διεύθυνση του φωτονίου. Στα μηχανήματα τύπου C-Arm κωνικής δέσμης ακτινοβολήσης είναι αρκετά έντονο αυτό το φαινόμενο λόγω του ότι χρησιμοποιείται δέσμη χαμηλής ενέργειας.⁽¹³⁾ Στις τρεις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση του θορύβου σε μια εικόνα:



Εικόνα 2.13: Θόρυβος σε εικόνες

2.4.1.2 Σκλήρυνση της δέσμης ακτινοβολήσης

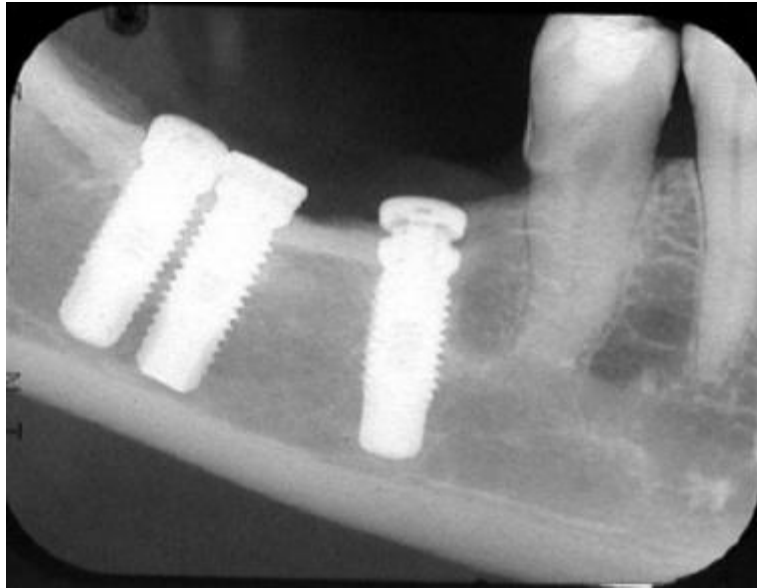
Μία δέσμη ακτίνων X στα ιατρικά ακτινογραφικά μηχανήματα αποτελείται από ακτίνες ενός μεγάλου φάσματος ενεργειών. Εξαιτίας του ότι τα συστατικά ενός ακτινοβολούμενου σώματος εξασθενούν τις χαμηλής ενέργειας ακτίνες περισσότερο από τις ακτίνες υψηλής ενέργειας, κυρίως λόγω του φαινομένου της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, μια ετερογενής δέσμη ακτίνων καθώς περνά από ένα αντικείμενο που απορροφά κάποιο ποσοστό ενέργειας της δέσμης γίνεται αναλογικά πλουσιότερη σε φωτόνια υψηλής ενέργειας και άρα περισσότερο διεισδυτική ή σκληρή. Η σκλήρυνση της δέσμης εμφανίζεται ως δύο διαφορετικά είδη παραμόρφωσης στις ανακατασκευασμένες εικόνες, η παραμόρφωση «cupping» και η εμφάνιση σκοτεινών ζωνών ή ραβδώσεων.

Οι παραμορφώσεις «cupping» εμφανίζονται όταν οι ακτίνες X που περνούν από το κέντρο ενός μεγάλου αντικειμένου γίνονται σκληρότερες σε σχέση με αυτές που περνούν από τις άκρες αυτού εξαιτίας της μεγαλύτερης μάζας που έχουν να διαπεράσουν. Επειδή η δέσμη γίνεται σκληρότερη στο κέντρο του αντικειμένου, οι συντελεστές γραμμικής εξασθένησης που προκύπτουν είναι σαν μια κούπα.

Ο δεύτερος τύπος παραμόρφωσης που σχετίζεται με τη σκλήρυνση της δέσμης είναι σκοτεινές ραβδώσεις και ζώνες μεταξύ πυκνών αντικειμένων σε μια εικόνα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ακτίνες που παίρνουν και από τα δυο μεταλλικά αντικείμενα γίνονται σκληρότερες σε σχέση με αυτές που διαπερνούν μόνο το ένα ή διαπερνούν μόνο ιστούς.^{(12) (13) (14) (15)}

Στις επόμενες δυο φωτογραφίες έχουμε ένα παράδειγμα σκλήρυνσης δέσμης:





Εικόνα 2.14: Παράδειγμα σκλήρυνσης δέσμης

2.4.1.3 Παραμόρφωση μερικού όγκου

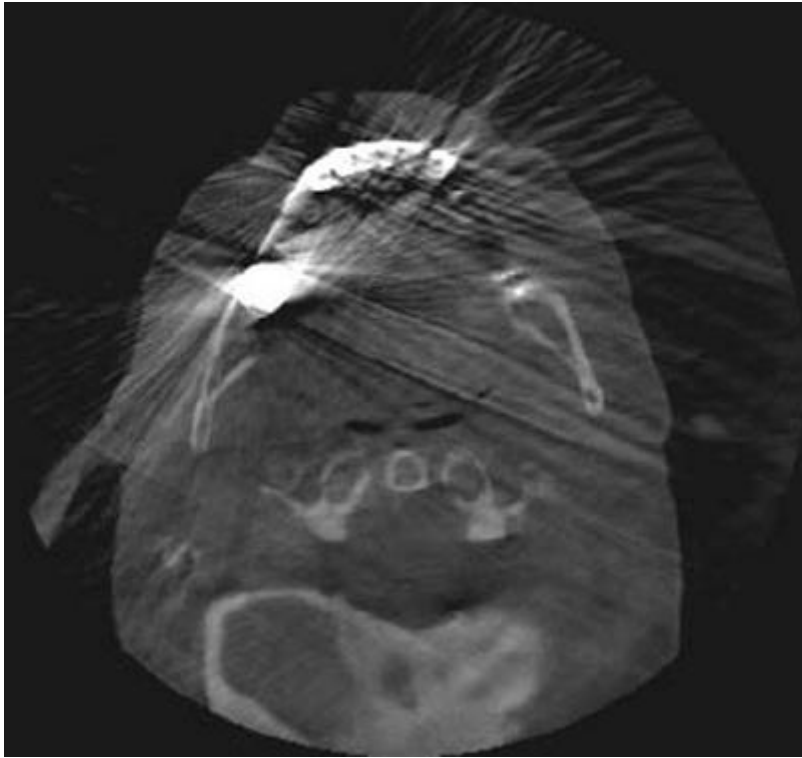
Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής που χρησιμοποιούνται υποθέτουν ότι το αντικείμενο είναι ολόκληρο εντός του πεδίου του ανιχνευτή υπό όλες τις γωνίες θέασης και ότι η εξασθένηση των ακτίνων προκαλείται μόνο από το αντικείμενο. Όταν αυτές οι συνθήκες δεν ικανοποιούνται, οι ανακατασκευασμένες εικόνες μπορεί να περιέχουν παραμόρφωση περικομμένης όψης. Αυτό συμβαίνει στα μηχανήματα τύπου C-Arm διότι μερικές ακτίνες της κωνικής δέσμης που διαπερνούν σημεία του προς ακτινοβολία μέλους, τα οποία δεν είναι στην περιοχή ενδιαφέροντος, απουσιάζουν λόγω του μικρού μεγέθους του ανιχνευτή.

Όταν δεν καλύπτεται ολόκληρος ο όγκος από τον ανιχνευτή είναι πιθανό να εμφανίζονται παραμορφώσεις σκίασης. Μια άλλη συνέπεια της παραμόρφωσης μερικού όγκου είναι ότι η πραγματικοί συντελεστές γραμμικής εξασθένησης δεν μπορούν να υπολογιστούν διότι μερικές ακτίνες X διαπερνούν άλλα κομμάτια του αντικειμένου καθώς και την περιοχή που μας ενδιαφέρει και τα δεδομένα που συλλέγονται δεν αντιπροσωπεύουν πιά την περιοχή αυτή αποκλειστικά αλλά είναι αλλοιωμένα από δομές εκτός του πεδίου θέασης. Το πρόβλημα αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό, είναι εντονότερο στα μηχανήματα με μικρό πεδίο θέασης.^{(12) (13) (14) (15)}

2.4.2 Σφάλματα λόγω του ασθενούς

2.4.2.1 Παραμορφώσεις λόγω μετάλλων

Ένα κοινό πρόβλημα στις ακτινογραφικές εικόνες είναι οι κηλίδες που δημιουργούνται από την παρουσία αντικειμένων που εξασθενούν πολύ τις ακτίνες X, δηλαδή στην περίπτωση που εξετάζουμε, του ήλου που είναι μεταλλικό αντικείμενο. Το μέταλλο του ήλου εξασθενεί πολύ την δέσμη των ακτίνων X που το διαπερνά και οι τιμές εξασθένησης των αντικειμένων που βρίσκονται πίσω από τον ήλο είναι λανθασμένα υψηλές. Κατά τη διάρκεια της ανακατασκευής της εικόνας το μεταλλικό αντικείμενο προκαλεί το φαινόμενο των φωτεινών και σκοτεινών κηλίδων προς όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα η ποιότητα της εικόνας να μειώνεται σημαντικά.



Εικόνα 2.15: Παράδειγμα παραμόρφωσης από μεταλλικό αντικείμενο

2.4.2.2 Παραμόρφωση λόγω κίνησης

Η κίνηση του ασθενούς κατά τη διαδικασία ακτινοβολήσης προκαλεί παραμορφώσεις στην εικόνα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν το μέλος του ασθενούς δεν έχει σταθεροποιηθεί σωστά. Μικρές κινήσεις προκαλούν θόλωμα και είδωλα στην εικόνα. Λόγω της πολύ υψηλής ανάλυσης που επιτυγχάνεται με μηχανήματα τύπου C-Arm κωνικής δέσμης ακόμα και η ελάχιστη κίνηση του ακτινοβολούμενου μέλους μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα της εικόνας. Στη διαδικασία της κλειστής ενδομυελικής ήλωσης το μέλος του ασθενούς στο οποίο θα εφαρμοστεί η ήλωση είναι ακινητοποιημένο οπότε αυτός ο παράγοντας δεν επιδρά. ^{(12) (13) (14) (15)}



Εικόνα 2.16: Παράδειγμα ειδώλου λόγω κίνησης

2.4.3 Σφάλματα λόγω του C-Arm

Τα σφάλματα που οφείλονται στο C-Arm τα αναφέρουμε τελευταία όχι λόγω του ότι έχουν μικρότερη επίδραση στην εικόνα, αλλά κυρίως επειδή είναι πιο σπάνιο να συμβούν διότι θεωρούμε ότι ένα νοσοκομείο ή μια κλινική που αναλαμβάνει επεμβάσεις, σαν και αυτή που εξετάζουμε, φροντίζει ώστε τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται να είναι κατάλληλα συντηρημένα και έτοιμα να αποδώσουν τις εικόνες σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους.

Ουσιαστικά τα σφάλματα που προκύπτουν εξαιτίας του C-Arm είναι σαν αυτά που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους. Για παράδειγμα, αν δεν είναι σωστά ευθυγραμμισμένη η πηγή των ακτίνων X με τον ανιχνευτή τότε θα έχουμε αποκοπή κάποιου σημαντικού σημείου του μέλους του ασθενούς καθώς είτε δε θα βρίσκεται στο πεδίο θέασης του ανιχνευτή, είτε δε θα ακτινοβολείται. Σημαντικά φαινόμενα θολώματος και σκιάσεων της εικόνας μπορούν να προκύψουν από τη μη ομοιόμορφη εκπομπή φωτονίων. Λόγω της κατασκευής της πηγής που είδαμε πριν ποτέ δε θα έχουμε μια τέλεια κωνική δέσμη, όμως όταν η πηγή λειτουργεί εντός των προδιαγραφών της θα παράγει αποδεκτά αποτελέσματα.

***Κεφάλαιο 3: ήλος –
τρισδιάστατη παράσταση
αντικειμένων και ψηφιοποίηση***

3.1 Ο ήλος - εισαγωγή

Στην κλειστή ενδομυελική ήλωση το πιο βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι ο ήλος (καρφί), διότι είναι αυτός που καλείται να σταθεροποιήσει στο κατάλληλο σημείο το θραυσμένο οστό ώστε η αποκατάσταση του κατάγματος να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη και ο ασθενής να μπορέσει να επιστρέψει στην κανονική δραστηριότητα της ζωής του όσο πιο γρήγορα γίνεται. Παρακάτω θα δούμε κάποια γενικά χαρακτηριστικά των ήλων. Στην αγορά υπάρχουν πολλοί τύποι ήλων κατασκευασμένοι από διάφορα υλικά και με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν θα αναφερθούμε αναλυτικά και με πολλή λεπτομέρεια σε κάθε τύπο ήλου καθώς αυτό είναι πέρα από τους στόχους της παρούσης εργασίας και αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι η διαδικασία ψηφιοποίησης του ήλου και όχι η κατασκευή του και οι ιατρικές ιδιότητες κάθε τύπου.⁽¹⁶⁾

Ο ήλος είναι μια μεταλλική κυλινδρική ράβδος με μήκος ανάλογο με το μήκος του θραυσμένου οστού και εισέρχεται στο οστό σε σημείο μακριά από το κάταγμα στην μυελική κοιλότητα του οστού, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες ο ήλος δεν είναι ευθύγραμμος αλλά μπορεί να έχει μια καμπύλη, ώστε να ακολουθεί τη φυσιολογική καμπύλη του εκάστοτε οστού. Υπάρχουν δυο τύποι ήλων, ο πρώτος είναι αυτός που έχει κοιλότητα στο εσωτερικό του και ο δεύτερος τύπος είναι από συμπαγές μέταλλο. Η πλειονότητα των ήλων φέρουν οπές στα δυο άκρα τους στις οποίες τοποθετούνται βίδες κάθετα ή με κάποια κλίση ως προς τον άξονα του οστού και έχουν ως σκοπό την σταθεροποίηση των θραυσμάτων του οστού πάνω στον ήλο.⁽¹⁷⁾

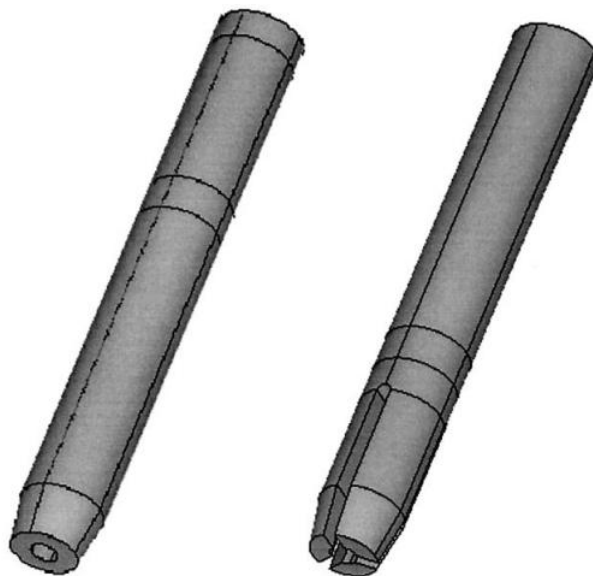


Εικόνα 3.1: Παράδειγμα ήλου που φαίνεται η κλίση που έχει⁽¹⁸⁾



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα ήλου που φαίνονται οι οπές στο μπροστινό και το πίσω μέρος του μαζί με τις βίδες

Στη σχεδίαση του μπροστινού μέρους του ήλου υπάρχουν πάλι δυο τύποι. Ο ένας είναι με αυλακώσεις και ο άλλος είναι χωρίς όπως μπορούμε να δούμε στην παρακάτω εικόνα.⁽¹⁷⁾



Εικόνα 3.3: Οι δύο διαφορετικές σχεδιάσεις για το μπροστινό τμήμα του ήλου⁽¹⁷⁾

Ο ήλος επειδή έχει ως στόχο από τη μια τη σταθεροποίηση των θραυσμάτων και από την άλλη τη μεταφορά και διαμοιρασμό των τάσεων που ασκούνται στο οστό κατά την κίνηση του ατόμου πρέπει να έχει συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες και να πληρεί κάποιες προδιαγραφές ως προς την ακαμψία και την αντοχή του. Για το λόγο αυτό έχει μεγάλη σημασία η επιλογή του υλικού κατασκευής του. Συνήθως χρησιμοποιούνται ήλοι από ανοξείδωτο ατσάλι ή από κάποιο κράμα τιτανίου. Ευέλικτοι ήλοι τιτανίου χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε κατάγματα ατόμων σε μικρή ηλικία όπως παιδιά. Από την άλλη ένας ήλος από ανοξείδωτο ατσάλι επιτυγχάνει καλύτερη σταθεροποίηση των θραυσμάτων λόγω της ελαστικότητας του. Επίσης,

έρευνες έχουν δείξει ότι το τιτάνιο έχει καλύτερη εμβιομηχανική σταθερότητα όπως αυτή μετράται από το κλείσιμο του διακένου, μεταξύ ήλου και οστού, καθώς και της διολίσθησης του ήλου. Η ανθεκτικότητα του ήλου εξαρτάται επίσης από τη διάμετρο της διατομής όπως και από το σχήμα αυτής.⁽¹⁹⁾

3.2 Τρισδιάστατη παράσταση αντικειμένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή

Η είσοδος της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών στην καθημερινή μας ζωή έχει φέρει μεγάλες αλλαγές στις συνήθειες μας και μεγάλες διευκολύνσεις σε επίπεδο καθημερινότητας αλλά και σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, καθώς πλέον υπάρχει η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς ώστε να γίνονται πειράματα εικονικά και να συλλέγονται αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, που διαφορετικά θα απαιτούσαν τεράστια οικονομική χρηματοδότηση και χρόνο από την πλευρά των ερευνητών και των επιστημόνων. Είναι βέβαιο πλέον ότι η καθημερινότητα αλλάζει όλο και περισσότερο, όσο μεγαλώνει η διείσδυση των φορητών υπολογιστών και των «έξυπνων» τηλεφώνων με υπολογιστικές δυνατότητες αρκετές ώστε ,σε συνδυασμό με τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς, να μπορεί κάποιος να κάνει σχεδόν όλες τις εργασίες ενός προσωπικού υπολογιστή οπουδήποτε και αν βρίσκεται. Ένας πολύ σημαντικός τομέας των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι ο τομέας των τρισδιάστατων γραφικών που χρησιμοποιούνται πλέον σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η βιομηχανία του κινηματογράφου τα χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει χαρακτήρες και αντικείμενα σε ταινίες κινουμένων σχεδίων αλλά και σε αληθοφανείς σκηνές ταινιών. Η βιομηχανία ηλεκτρονικών παιχνιδιών τα χρησιμοποιεί για τη δημιουργία ολόκληρων εικονικών κόσμων. Στον τομέα της χημείας χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μοντέλων των χημικών ενώσεων. Οι αρχιτέκτονες τα χρησιμοποιούν ώστε να δείχνουν τα προτεινόμενα σχέδια κτιρίων και κατασκευών στους ενδιαφερόμενους πελάτες τους. Οι μηχανικοί τα χρησιμοποιούν ώστε να σχεδιάζουν νέες συσκευές. Τελευταία έχουν αναπτυχθεί και λεπτομερή γεωλογικά μοντέλα. Τέλος, στην ιατρική χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα μοντέλα των ζωτικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος καθώς και των μελών του, επίσης χρησιμοποιούνται για την θεραπεία διαφόρων νόσων όπως η υψοφοβία. Πάνω σε αυτό το θέμα αναπτύχθηκαν με τον καιρό αλγόριθμοι και τεχνικές σχεδίασης βασικών σχημάτων, μετασχηματισμοί συστημάτων συντεταγμένων δυσδιάστατων σε τρισδιάστατα και το αντίστροφο, μοντέλα και οι δομές παράστασης αντικειμένων και εικόνων, μοντέλα και αλγόριθμοι φωτισμού, απεικόνιση υφής και αναγλύφου και άλλα θέματα με σκοπό πάντα την όσο γίνεται πιο πιστή αναπαράσταση αντικειμένων του φυσικού κόσμου στην οθόνη ενός υπολογιστή. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε περισσότερο με τα μοντέλα και τις δομές παράστασης αντικειμένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή αφού σκοπός μας είναι η ακριβής παράσταση του ήλου σε ψηφιακή μορφή, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την προσομοίωση της διαδικασίας ακτινοβολήσης ενός ήλου από μηχανήμα τύπου C-arm για την εξαγωγή μιας συλλογής εικόνων η οποία θα περιέχει όλες τις πιθανές απεικονήσεις που θα μπορεί να δώσει ένα πραγματικό C-arm.

Ένα μοντέλο περιγράφει τη διαδικασία σχηματισμού ενός αντικειμένου. Οι δύο πιο κοινί τύποι τρισδιάστατων μοντέλων είναι από τη μια τα μοντέλα που δημιουργούνται σε κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή από έναν μηχανικό ή έναν

καλλιτέχνη με τη χρήση σχεδιαστικού λογισμικού και από την άλλη τα μοντέλα που προκύπτουν από τη σάρωση των πραγματικών φυσικών αντικειμένων από ειδικούς τρισδιάστατους σαρωτές. Τέλος μοντέλα μπορούν να παραχθούν αλγοριθμικά ή με φυσικές προσομοιώσεις.⁽²⁰⁾

Τα μοντέλα αναπαριστούν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από σημεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με διάφορες γεωμετρικές οντότητες όπως γραμμές, τρίγωνα και καμπύλες επιφάνειες.

Για την αναπαράσταση των τρισδιάστατων μοντέλων έχουμε δύο κατηγορίες

1. Στερεά: αυτά τα μοντέλα ορίζουν τον όγκο του αντικειμένου που αναπαριστούν. Έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο ρεαλιστικά αλλά και πιο δύσκολα στο να δημιουργηθούν. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μη οπτικοποιημένες ιατρικές προσομοιώσεις και προσομοιώσεις μηχανικών, επίσης σε εικονικές εφαρμογές, όπως παρακολούθηση ακτίνας(ray tracing) και γεωμετρία κατασκευής στερεών (constructive solid geometry).
2. Κέλυφος/Περίβλημα: αυτά τα μοντέλα αναπαριστούν την επιφάνεια του αντικειμένου και όχι τον όγκο του. Είναι πιο εύκολη η χρήση και η εργασία με αυτά τα μοντέλα παρά με τα στερεά. Σχεδόν όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά παιχνίδια και τις ταινίες είναι τέτοιου είδους.

Ας δούμε όμως λίγο πιο αναλυτικά πως δημιουργούνται τα τρισδιάστατα γραφικά σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Αρχικά μπορούμε να πούμε ότι είναι γραφικά που χρησιμοποιούν μια τρισδιάστατη αναπαράσταση γεωμετρικών δεδομένων, που είναι αποθηκευμένα στον υπολογιστή με σκοπό την διενέργεια υπολογισμών και την απόδοση δυσδιάστατων εικόνων. Η διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατων γραφικών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι αυτό της μοντελοποίησης, το δεύτερο στάδιο είναι αυτό που το αντικείμενο τοποθετείται μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον και πιθανώς κινείται σε αυτό, και το τελευταίο στάδιο είναι αυτό της απόδοσης των προηγούμενων και της δημιουργίας της τελικής εικόνας. Επειδή εμείς θα χρησιμοποιήσουμε το τρισδιάστατο μοντέλο του ήλου για προσομοίωση, το δεύτερο στάδιο ουσιαστικά δεν είναι σημαντικό καθώς αρκεί ένα επίπεδο πάνω στο οποίο θα προβάλεται η προβολή του ήλου υπό τον κατάλληλο φωτισμό, κάτι που θα δούμε αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.⁽²¹⁾

Τα τρισδιάστατα γραφικά σε υπολογιστές αναφέρονται συνήθως ως τρισδιάστατα μοντέλα. Ένα όμως τρισδιάστατο μοντέλο είναι η μαθηματική περιγραφή ενός οποιουδήποτε τρισδιάστατου αντικειμένου. Το μοντέλο όμως δεν έχει γίνει γραφικό μέχρι να απεικονιστεί σε μια μονάδα εξόδου ενός υπολογιστή(οθόνη, εκτυπωτής). Ένα μοντέλο μπορεί να εμφανιστεί εικονικά ως μια δυσδιάστατη εικόνα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται τρισδιάστατη απεικόνιση (3D rendering) ή να χρησιμοποιηθεί σε μη γραφικό περιβάλλον για προσομοίωση και υπολογισμούς. Αυτή είναι και η χρήση που θα γίνει από το μοντέλο του ήλου που θα κατασκευάσουμε παρακάτω.^{(20) (21) (22)}

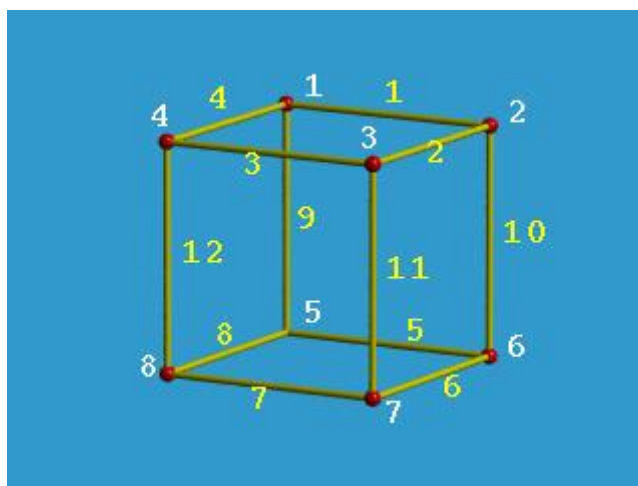
Η πιο βασική συσκευή εξόδου ενός υπολογιστή είναι η οθόνη του και αρχικά οι οθόνες ήταν μονόχρωμες με πολύ μικρή ανάλυση, άρα μικρή ακρίβεια απεικόνισης. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας έχουμε πλέον φτάσει να χρησιμοποιούμε οθόνες υψηλής ευκρίνειας με πολύ υψηλή χρωματική απόδοση που βελτιώνουν την

παρουσίαση των αποτελεσμάτων του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ενώ τώρα σιγά σιγά κάνουν την εμφάνιση τους οθόνες τρισδιάστατης απεικόνισης. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι οι οθόνες ακόμα είναι δύο διαστάσεων ενώ ο πραγματικός κόσμος στον οποίο ζούμε και κινούμαστε είναι τριών διαστάσεων, οπότε προέκυψε το πρόβλημα της παράστασης τρισδιάστατων αντικειμένων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

3.3 Δομές παράστασης αντικειμένων

3.3.1 Το μοντέλο από πλαίσιο νημάτων (wireframe)

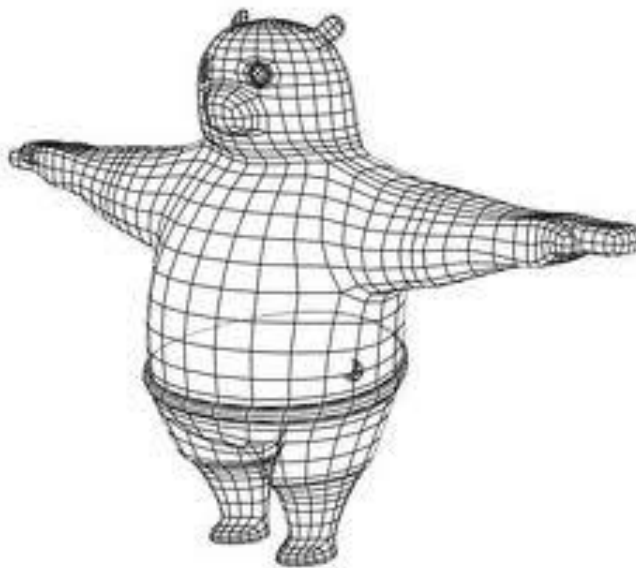
Η σχεδίαση στερεών με πλαίσιο νημάτων είναι ίσως ο πιο παλιός τρόπος σχεδίασης στερεών. Ένα πλαίσιο νημάτων αποτελείται από κορυφές και ακμές που ενώνουν γειτονικές κορυφές όπου οι ακμές μπορούν να μην είναι ευθείες αλλά καμπύλες. Στους υπολογιστές παριστάνεται από δυο πίνακες, ο ένας πίνακας είναι των κορυφών και έχει ως δεδομένα τις συντεταγμένες της κάθε κορυφής, ενώ ο δεύτερος πίνακας είναι των ακμών ο οποίος έχει ως δεδομένα τα δύο άκρα κάθε ακμής. Στο μοντέλο αυτό δεν περιέχονται δεδομένα επιφανειών, όπως η υφή και το χρώμα, και έτσι η διαδικασία οπτικοποίησης μιας τέτοιας εικόνας είναι πολύ εύκολη για το υποσύστημα γραφικών και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που δεν χρειάζεται μεγάλη λεπτομέρεια απεικόνισης. Αν χρειάζεται μεγαλύτερη λεπτομέρεια απεικόνισης, μπορεί να προστεθεί υφή στις επιφάνειες αυτόματα, μετά την διαδικασία της οπτικοποίησης του πλαισίου νημάτων. Παρακάτω έχουμε ένα παράδειγμα, πως παριστάται ένας κύβος με τους πίνακες και την οπτική απεικόνιση των δεδομένων τους, και στη δεύτερη εικόνα έναν πιο πολύπλοκο χαρακτήρα που έχει δημιουργηθεί με το «wireframe» μοντέλο.^{(23) (24)}



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα κύβου⁽²⁴⁾

<i>Vertex Table</i>				<i>Edge Table</i>		
<i>Vertex #</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>Edge #</i>	<i>Start Vertex</i>	<i>End Vertex</i>
1	1	1	1	1	1	2
2	1	-1	1	2	2	3
3	-1	-1	1	3	3	4
4	-1	1	1	4	4	1
5	1	1	-1	5	5	6
6	1	-1	-1	6	6	7
7	-1	-1	-1	7	7	8
8	-1	1	-1	8	8	5
				9	1	5
				10	2	6
				11	3	7
				12	4	8

Εικόνα 3.5: Οι πίνακες που περιέχουν τα δεδομένα περιγραφής του κύβου ⁽²⁴⁾

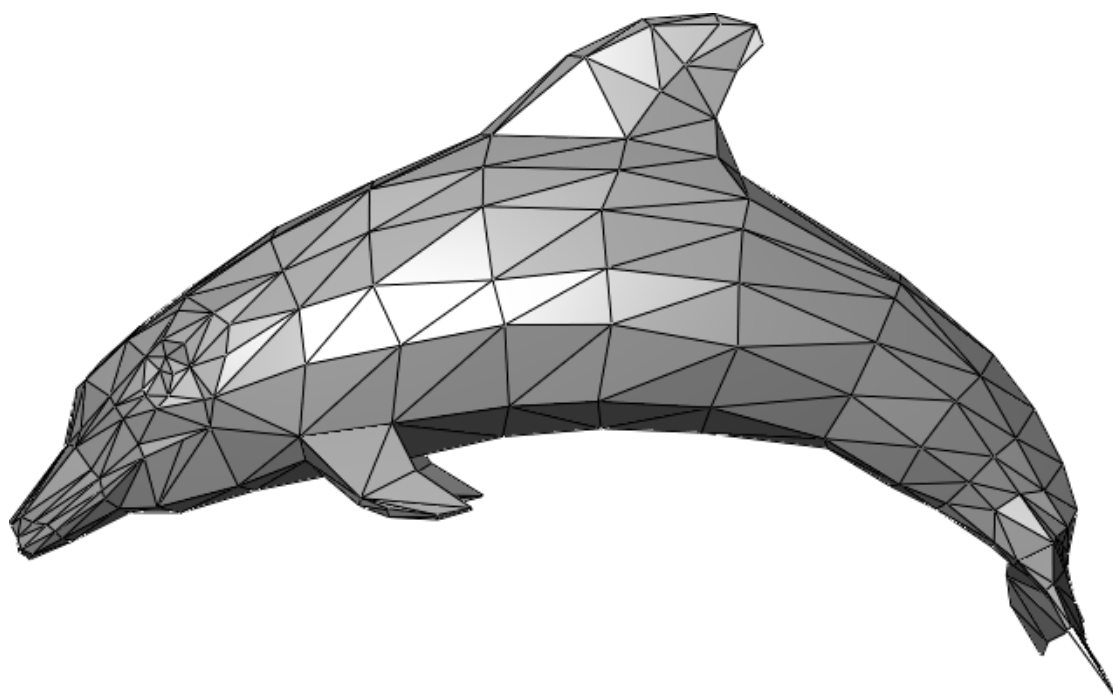


Εικόνα 3.6: Παράδειγμα μιας πιο πολύπλοκης εικόνας κατασκευασμένη με το "wireframe" μοντέλο.

3.3.2 Το πολυγωνικό μοντέλο

Αποτελείται από σημεία στον τρισδιάστατο χώρο που ονομάζονται κορυφές και ενώνονται από ευθύγραμμα τμήματα, δημιουργώντας μικρές επιφάνειες ώστε τελικά να σχηματίσουν ένα πολυγωνικό πλέγμα. Τα περισσότερα τρισδιάστατα μοντέλα

σήμερα αποτελούνται από πολύγωνα με υφή, επειδή είναι εύχρηστα και οι υπολογιστές μπορούν να οπτικοποιήσουν τα δεδομένα πολύ εύκολα. Όταν έχουμε να απεικονίσουμε αντικείμενα με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες (όπως ένας κύβος), είναι πολύ βολική η χρήση πολυγώνων, όμως όταν τα αντικείμενα είναι πιο σύνθετα (πχ έχουν καμπύλες επιφάνειες), όπου χρειάζεται ένα σύνολο πολυγώνων για την παράσταση τους, η χρήση τους γίνεται πιο δύσκολη. Έτσι, ανάλογα με το αντικείμενο και την επιθυμητή ακρίβεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός αριθμός πολυγώνων κάθε φορά, κάτι που το επιλεγεί αυτός που κάνει την ψηφιοποίηση του αντικειμένου, έχοντας πάντα υπόψη ότι χρειάζεται μεγαλύτερος αριθμός πολυγώνων ανά μονάδα επιφάνειας, όταν πρόκειται για καμπύλες επιφάνειες σε σχέση με τις επίπεδες, και ότι ο συνολικός αριθμός πολυγώνων εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου στην εικόνα. Δηλαδή ένα αντικείμενο που διακρίνεται πολύ δύσκολα λόγω του ότι καταλαμβάνει πολύ μικρό χώρο σε μια εικόνα, για λόγους οικονομίας και αποδοτικότερης χρήσης των πόρων του ηλεκτρονικού υπολογιστή, δεν χρειάζεται να είναι κατασκευασμένο με μεγάλη ακρίβεια, καθώς αυτό δε θα δημιουργήσει διάφορα στο ανθρώπινο μάτι. Τα παραπάνω βεβαία ισχύουν για τα γραφικά που δημιουργούνται με σκοπό την απλή απεικόνιση τους σε μια οθόνη και όχι για τα μοντέλα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε προσομοιώσεις και εικονικά πειράματα γιατί, σε αυτή την περίπτωση, επιδιώκεται η μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις η οποία εξαρτάται από την ακρίβεια σχεδίασης των αντικειμένων. Για την παράσταση των αντικειμένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός από τρίγωνα και άλλα απλά κυρτά πολύγωνα δεδομένου ότι αυτό μπορεί να βελτιστοποιεί την απεικόνιση του αντικειμένου.^{(25) (26)}



Εικόνα 3.7: Παράδειγμα σχεδίασης δελφινιού με πολύγωνα.⁽²⁵⁾

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από διαδικασίες που εφαρμόζονται στα πολυγωνικά πλέγματα όπως λείανση, απλοποίηση και πολλές άλλες. Δικτυακές αναπαραστάσεις, «streaming» και «progressive» πλέγματα, χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση

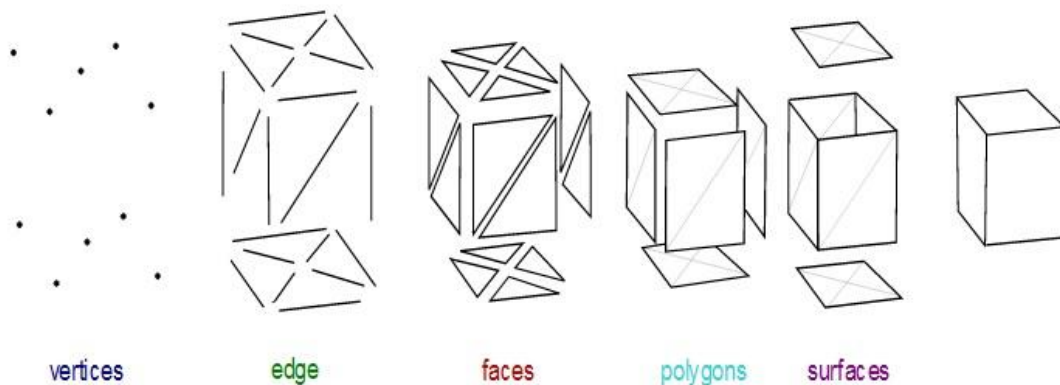
πολυγωνικών πλεγμάτων μέσω δικτύου. Υπάρχουν επίσης τα ογκομετρικά πλέγματα τα οποία διαφέρουν από τα πολυγωνικά πλέγματα στο ότι παριστούν ρητά και την επιφάνεια και τον όγκο του αντικειμένου, ενώ τα πολυγωνικά πλέγματα ορίζουν ρητά μόνο την επιφάνεια ενώ ο όγκος υπονοείται. ⁽²⁵⁾

Ένα βασικό πλεονέκτημα του πολυγωνικού μοντέλου είναι η ευκολία κατασκευής του καθώς και η μεγάλη ποικιλία αποδοτικών αλγορίθμων, που είναι διαθέσιμοι για τη δημιουργία εικόνων από πολυγωνικά μοντέλα. Οι αλγόριθμοι αυτοί δίνουν πιστές αναπαραστάσεις των αντικειμένων που έχουν σχεδιαστεί από πολύγωνα και περιλαμβάνουν αλγορίθμους φωτισμού, υψής, σκίασης κ.α. Λόγω της μεγάλης διάδοσης του πολυγωνικού μοντέλου έχουν δημιουργηθεί εξειδικευμένα κυκλώματα VLSI που υλοποιούν τους παραπάνω αλγορίθμους πιο αποδοτικά. ⁽²⁶⁾

Ένα βασικό μειονέκτημα του πολυγωνικού μοντέλου είναι η δυσκολία παράστασης πολύπλοκων αντικειμένων (π.χ. φυσικά φαινόμενα όπως η φωτιά, η κίνηση της θάλασσας, αντικείμενα με πολλές κοιλότητες κ.λπ.) καθώς και η δυσκολία μετατροπής αντικειμένων, για παράδειγμα, η αλλαγή των διαστάσεων ενός αντικειμένου ή ενός μέρους του αντικειμένου ,π.χ., μιας τρύπας αυτού. ⁽²⁶⁾

Στοιχεία πλεγμάτων μοντέλων

Τα αντικείμενα που έχουν δημιουργηθεί με πολυγωνικά πλέγματα εμπεριέχουν διάφορους τύπους στοιχείων όπως σημεία, ακμές, πλευρές, πολύγωνα και επιφάνειες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η δομή που χρησιμοποιείται για την παράσταση των πολυγωνικών μοντέλων είναι ιεραρχική. Δηλαδή κάθε αντικείμενο είναι μια λίστα επιφανειών, κάθε επιφάνεια μια λίστα πολυγώνων, κάθε πολύγωνο μια λίστα κορυφών. Συχνά αποθηκεύονται στη δομή και άλλες χρήσιμες πληροφορίες όπως τα κανονικά διανύσματα σε πολύγωνα ή κορυφές.



Εικόνα 3.8: Κορυφές (διανυσμάτων), ακμές, πλευρές, πολύγωνα, επιφάνειες, αντικείμενο ⁽²⁵⁾

Σε πολλές εφαρμογές αρκεί η αποθήκευση μόνο των σημείων, των ακμών και των πλευρών ή των πολυγώνων. Μια εφαρμογή οπτικοποίησης (renderer) μπορεί να υποστηρίξει μόνο τριγωνικές πλευρές και να δημιουργεί τα πολύγωνα από πολλά τρίγωνα. Όμως πολλές εφαρμογές οπτικοποίησης (renderers) υποστηρίζουν πολύγωνα με περισσότερες από 3 ακμές ή είναι ικανές να τεμαχίζουν τα πολύγωνα σε τρίγωνα, κατά τη διαδικασία της απόδοσης, κάνοντας εφικτή την αποθήκευση ενός πολυγωνικού πλέγματος με πολύγωνα περισσότερων των τριών ακμών.

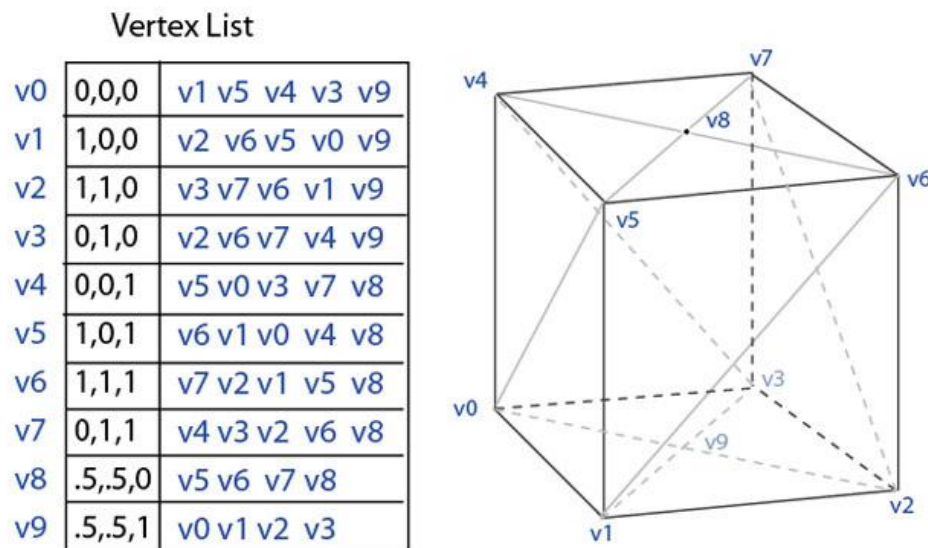
Μια κορυφή είναι ένα σημείο μαζί με άλλες πληροφορίες όπως χρώμα, κανονικό διάνυσμα και συντεταγμένες υφής. Μια ακμή είναι το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει δύο κορυφές. Μια πλευρά είναι ένα σύνολο ακμών που κλείνει, για παράδειγμα, μια τριγωνική πλευρά έχει τρεις ακμές είναι δηλαδή ένα τρίγωνο, μια τετραγωνική πλευρά έχει τέσσερις ακμές και μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε τετράπλευρο κανονικό ή μη κανονικό κ.τ.λ. Πολύγωνο είναι ένα σύνολο πλευρών, σε συστήματα που υποστηρίζουν πλευρές πολλών ακμών η έννοια της πλευράς και του πολυγώνου ταυτίζεται, ωστόσο είναι σύνηθες να υποστηρίζονται πλευρές τριών ή τεσσάρων ακμών, οπότε τα πολύγωνα δημιουργούνται από πολλές τέτοιες πλευρές. Από μαθηματικής άποψης ένα πολυγωνικό πλέγμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αδόμητο πλέγμα ή ως ένα τυχαίο γράφημα με επιπρόσθετες γεωμετρικές ιδιότητες, σχήμα και τυπολογία.⁽²⁶⁾

Παράσταση πολυγωνικών πλεγμάτων ⁽²⁵⁾

Τα πολυγωνικά πλέγματα μπορούν να παρασταθούν με διάφορους τρόπους, χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους για την αποθήκευση των κορυφών, των ακμών και των πλευρών. Οι κυριότεροι είναι:

- Πλέγμα κορυφής-κορυφής (vertex-vertex): παριστά το αντικείμενο σαν ένα σύνολο κορυφών που είναι συνδεδεμένες με άλλες κορυφές. Είναι ο πιο απλός τύπος παράστασης, αλλά δεν είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος γιατί η πληροφορία που αφορά τις ακμές και τις πλευρές είναι έμμεση, δηλαδή υπονοείται. Έτσι είναι αναγκαία η προσπέλαση των δεδομένων ώστε να φτιαχτεί μια λίστα με τις πλευρές για την οπτικοποίηση της εικόνας, επιπρόσθετα είναι δύσκολη η διεκπεραίωση διαδικασιών στις ακμές και τις πλευρές. Στα θετικά στοιχεία μπορούμε να βάλουμε το μικρό χώρο αποθήκευσης που απαιτείται και την εύκολη και αποτελεσματική μορφοποίηση των σχημάτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα πως αποθηκεύονται οι κορυφές.

Vertex-Vertex Meshes (VV)



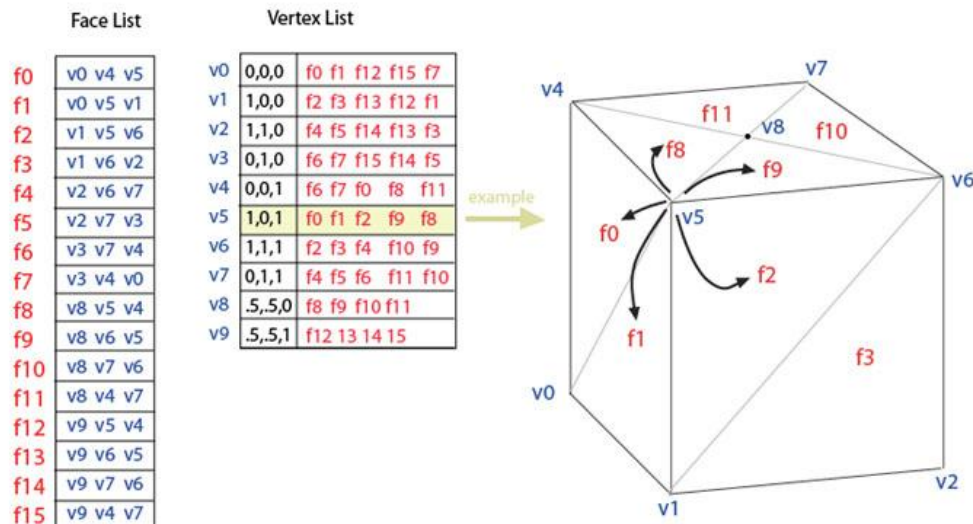
Εικόνα 3.8: Παράδειγμα αποθήκευσης ενός κύβου με πλέγμα κορυφής-κορυφής ⁽²⁵⁾

- Πλέγμα πλευράς-κορυφής (face-vertex): παριστά ένα αντικείμενο ως ένα σύνολο πλευρών και ένα σύνολο κορυφών. Είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος παράστασης αντικειμένων και είναι αποδεκτός από τα σύγχρονα υποσυστήματα γραφικών. Η βελτίωση που προσφέρει στη μοντελοποίηση αυτός ο τρόπος παράστασης σε σχέση με το πλέγμα κορυφής-κορυφής είναι, ότι επιτρέπει την άμεση αναζήτηση των κορυφών μιας πλευράς και των πλευρών που περιβάλλουν μια κορυφή.

Στη διαδικασία της οπτικοποίησης, η λίστα των πλευρών μεταφέρεται στο υποσύστημα γραφικών ως ένα σύνολο δεικτών σε κορυφές και οι κορυφές αποστέλλονται ως δομές θέσης/χρώματος. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα ότι αλλαγές στο σχήμα αλλά όχι στη γεωμετρία, μπορούν να γίνουν δυναμικά, απλά, στέλνοντας τα ενημερωμένα δεδομένα των κορυφών χωρίς να ανανεωθεί η διασύνδεση των πλευρών.

Η μοντελοποίηση απαιτεί εύκολη προσπέλαση όλων των δομών. Με το πλέγμα πλευράς-κορυφής είναι εύκολο να βρεθούν οι κορυφές μιας πλευράς. Επίσης η λίστα των κορυφών περιέχει μια λίστα πλευρών που λέει ποιες πλευρές έχουν κοινή κάθε μια κορυφή. Σε αντίθεση με το πλέγμα κορυφής-κορυφής, οι πλευρές όπως και οι κορυφές είναι σαφώς ορισμένες, άρα ο εντοπισμός γειτονικών πλευρών και κορυφών είναι άμεση. Παρόλα αυτά, οι ακμές υπονοούνται, άρα απαιτείται μια αναζήτηση για την εύρεση των πλευρών που συνορεύουν με μια συγκεκριμένη πλευρά. Άλλες διαδικασίες όπως ο χωρισμός ή η συνένωση πλευρών, πραγματοποιούνται δύσκολα με τον συγκεκριμένο τύπο παράστασης.

Face-Vertex Meshes



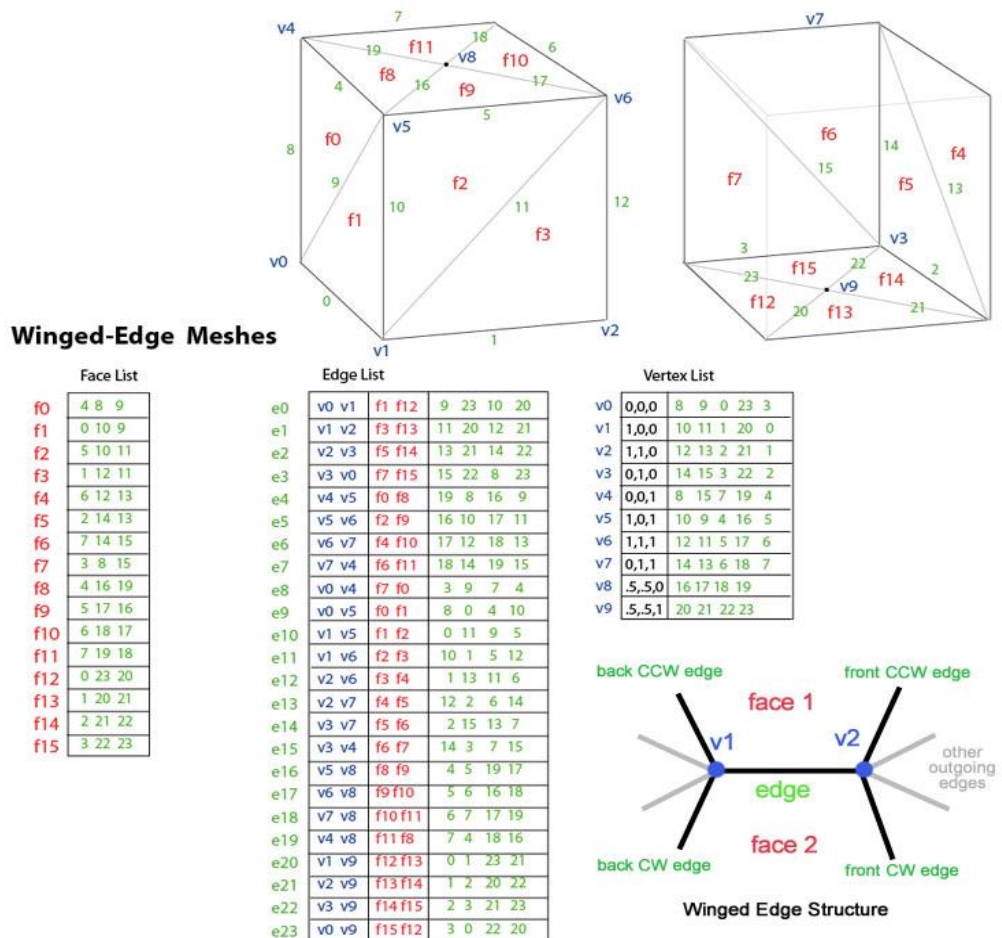
Εικόνα 3.9: Παράδειγμα αποθήκευσης ενός κύβου με πλέγμα πλευράς-κορυφής (face-vertex)⁽²⁵⁾

- Πλέγμα winged-edge: ορίζει σαφώς τις κορυφές, τις πλευρές και τις ακμές ενός πολυγωνικού πλέγματος. Αυτός ο τύπος παράστασης χρησιμοποιείται σε προγράμματα μοντελοποίησης ώστε να παρέχεται στο χρήστη η μέγιστη ευελιξία σε δυναμικές αλλαγές της γεωμετρίας του πλέγματος, επειδή οι

διαδικασίες διαχωρισμού και συνένωσης γίνονται πολύ γρήγορα. Το βασικό μειονέκτημα είναι οι μεγάλες αποθηκευτικές ανάγκες και η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω της διατήρησης πολλών δεικτών.

Το πλέγμα winged-edge διαχειρίζεται το ζήτημα της διάσχισης από ακμή σε ακμή, παρέχοντας ένα διατεταγμένο σύνολο πλευρών γύρω από μια ακμή. Για κάθε ακμή, ο αριθμός των εξερχόμενων ακμών είναι αυθαίρετος. Για να το απλοποιήσουμε αυτό, το πλέγμα αυτό παρέχει για κάθε ακμή μόνο τέσσερις γειτονικές ακμές, τις κοντινότερες κατά την ωρολογιακή και αντιωρολογιακή φορά σε κάθε άκρο. Οι υπόλοιπες ακμές μπορούν να προσπελαστούν σταδιακά. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι γειτονικές ακμές σχηματίζουν μια πεταλούδα για αυτό και ονομάστηκε έτσι ο τρόπος παράστασης. Τα συνολικά δεδομένα για μια ακμή περιλαμβάνουν δύο κορυφές (τα δύο άκρα της ακμής), δύο πλευρές (μία σε κάθε πλευρά της ακμής) και 4 ακμές.

Η διαδικασία της οπτικοποίησης ενός winged-edge πλέγματος απαιτεί τη δημιουργία μιας λίστας ευρετηρίου των πλευρών, αυτό γίνεται συνήθως μόνο όταν αλλάζει η γεωμετρία. Αυτού του τύπου τα πλέγματα είναι ιδανικά για δυναμική γεωμετρία, όπως διακρατικά μοντέλα, γιατί οι αλλαγές στο πλέγμα συμβαίνουν τοπικά.



Εικόνα 3.10: Παράδειγμα αποθήκευσης κύβου με πλέγμα “winged edge”⁽²⁵⁾

- Δυναμικά πλέγματα: τα πλέγματα winged-edge δεν είναι η μόνη παράσταση που επιτρέπει δυναμικές αλλαγές στη γεωμετρία. Μια νέα παράσταση που

συνδυάζει τον προηγούμενο τύπο πλέγματος και τα πλέγματα πλευράς-κορυφής είναι το δυναμικό πλέγμα (tender dynamic mesh), στο οποίο αποθηκεύονται οι κορυφές μιας πλευράς, οι πλευρές που «ακουμπούν» σε μια κορυφή και οι πλευρές με τις κορυφές μιας ακμής.

Αυτός ο τύπος απαιτεί ελαφρώς λιγότερο αποθηκευτικό χώρο σε σχέση με τον προηγούμενο τύπο πλέγματος και μπορεί να αποδοθεί η εικόνα απευθείας από το υποσύστημα γραφικών, καθώς η λίστα των πλευρών περιέχει ευρετήριο κορυφών.

- Εκτός από τους παραπάνω τύπους πλεγμάτων υπάρχουν και μερικά άλλα πλέγματα ειδικών σκοπών. Ένας τύπος πλέγματος είναι τα «streaming» πλέγματα, τα οποία αποθηκεύουν τις πλευρές με τέτοιο τρόπο ώστε το πλέγμα να μπορεί να μεταφερθεί σε κομμάτια. Επίσης υπάρχουν τα «progressive» πλέγματα τα οποία μεταφέρουν τα δεδομένα των κορυφών και των πλευρών με αυξανόμενη ακρίβεια. Σε αντίθεση με τα «streaming» πλέγματα αυτός ο τύπος πλέγματος δίνει αρχικά το σχήμα ολόκληρου του αντικειμένου σε χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας και στη συνέχεια, με τα επιπρόσθετα δεδομένα όπως νέες κορυφές και πολύγωνα, αυξάνεται προοδευτικά η λεπτομέρεια του πλέγματος.

Συμπερασματικά για τους διάφορους τύπους πολυγωνικών πλεγμάτων μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Όσο πιο πολύπλοκη γίνεται η παράσταση πλεγμάτων, τόσο αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων που χρειάζεται να αποθηκευτούν.
- Όσο πιο πολλά δεδομένα είναι αποθηκευμένα, τόσο πιο άμεσα γίνεται η επεξεργασία και τυχόν αλλαγές στο πλέγμα.

3.3.3 Δικυβικές επιφάνειες

Είναι επιφάνειες τρίτου βαθμού που το ακριβές σχήμα τους καθορίζεται από ένα πλέγμα 16 σημείων ελέγχου P_{ij} η γενική τους μορφή είναι:

$$E(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 F_i(u) \cdot H_j(v) \cdot \bar{P}_{ij} \quad 0 \leq u, v \leq 1$$

Οπού F , H είναι κυβικές συναρτήσεις που εξαρτώνται από τον τύπο της επιφάνειας.

Οι δικυβικές επιφάνειες είναι ένας τρόπος μοντελοποίησης των επιφανειών αντικειμένων λόγω του ότι το σχήμα τους καθορίζεται απόλυτα από τα σημεία ελέγχου \bar{P}_{ij} . Η δομή που χρειάζεται για να αποθηκεύσουμε ένα αντικείμενο που έχει παρασταθεί με τη μορφή των δικυβικών επιφανειών, είναι μια λίστα λιστών των σημείων ελέγχου, δηλαδή αφού τα σημεία ελέγχου είναι 16 για κάθε μια τέτοια επιφάνεια έχουμε ένα δυσδιάστατο πίνακα $N \times 16$.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των δικυβικών επιφανειών είναι ότι επειδή συχνά είναι ο τρόπος σχεδιασμού ενός αντικειμένου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελούν μια ακριβή παράσταση της επιφάνειας του αντικειμένου αυτού. Επίσης με τη χρήση της αναλυτικής εξίσωσης που μας παρέχουν μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την επιφάνεια, τον όγκο ή άλλα χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που παρέχουν είναι η δυνατότητα εύκολης μετατροπής του

αντικειμένου με κατάλληλη μετατόπιση των σημείων ελέγχου. Τέλος σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και ο μικρός όγκος δεδομένων που δημιουργούν.

Εκτός όμως από πλεονεκτήματα παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Εύκολα μπορούμε να αντιληφθούμε τη δυσκολία κατάλληλης επιλογής των σημείων ελέγχου ώστε να λάβουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ειδικά, όταν πρόκειται για ένα αντικείμενο που ήδη υπάρχει και θέλουμε να το ψηφιοποιήσουμε, η διαδικασία είναι δυσκολότερη σε σχέση με τον καθορισμό πολυγώνων. Επίσης δεν θα πρέπει να παραβλέψουμε τη δυσκολία στο να συσχετιστεί κατάλληλα η κάθε επιφάνεια με τις γειτονικές της, ώστε να πληρούνται οι συνθήκες συνέχειας.

Τρεις βασικοί τρόποι δημιουργίας δικυβικών επιφανειών:

1. Δημιουργία των δικυβικών επιφανειών με κατάλληλη τοποθέτηση των σημείων ελέγχου με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.
2. Ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου σε σύνολο σημείων και χρήση αυτών των σημείων ως σημεία ελέγχου.
3. Δημιουργία της επιφάνειας με περιφορά μιας κυβικής καμπύλης στον τρισδιάστατο χώρο. Ανάλογα με τη περίπτωση πολυγώνων, ορίζουμε μια κυβική καμπύλη τροχιάς και μια κυβική καμπύλη τομής της επιφάνειας. Λαμβάνουμε σημεία ελέγχου για κάθε θέση της καμπύλης τομής, καθώς αυτή μεταφέρεται, όπως ορίζει η καμπύλη τροχιάς.

Οπτικοποίηση των δικυβικών επιφανειών:

1. Σχεδίαση κυβικών καμπυλών σε τακτά διαστήματα των παραμέτρων u και v ώστε να πάρουμε ένα τρισδιάστατο πλέγμα καμπυλών ανάλογο του σχεδιασμού των ακμών ενός πολυγωνικού μοντέλου.
2. Μετατροπή των δικυβικών επιφανειών σε επίπεδα πολύγωνα και σχεδιασμός της επιφάνειας των πολυγώνων με τη μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων που είναι διαθέσιμοι για αυτό το σκοπό. ⁽²⁷⁾ ⁽²⁶⁾

3.3.4 Υποδιαίρεση χώρου

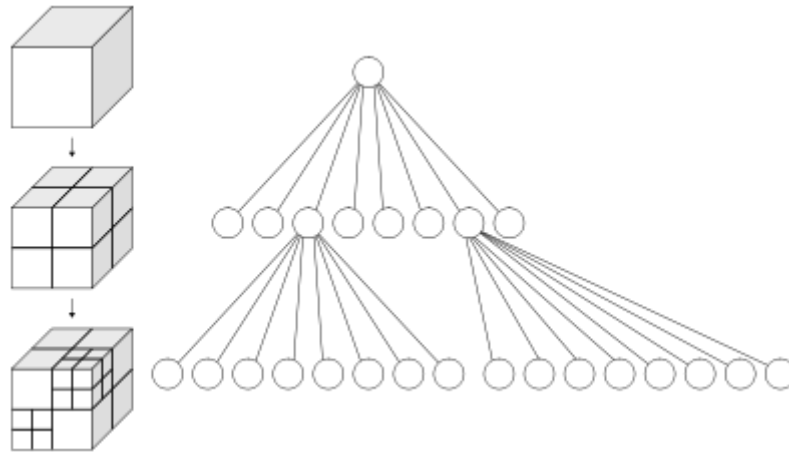
Ο δυσδιάστατος χώρος της οθόνης ψηφιοποιήθηκε διαχωρίζοντας τον σε μικρά διακριτά τετράγωνα μέρη, τα γνωστά pixels. Ανάλογα μπορούμε να ψηφιοποιήσουμε τον τρισδιάστατο χώρο σε μικροσκοπικούς διακριτούς κύβους, τα voxels. Τα voxels χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση του όγκου αντικειμένων και αποτελούν έναν τρόπο παράστασης για ορισμένες εφαρμογές, κυρίως ιατρικές. Για παράδειγμα ένας τομογράφος δίνει στοιχεία από διαδοχικές τομές του σώματος σε διαφορετικά επίπεδα. Προφανώς τα voxels μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ψηφιοποίηση οποιουδήποτε αντικειμένου εφόσον υπάρχει ο κατάλληλος αλγόριθμος ψηφιοποίησης σε voxels.



Εικόνα 3.11: Παράδειγμα κατασκευής ενός χαρακτήρα με voxels

Ένα βασικό πρόβλημα των voxels είναι ο μεγάλος όγκος δεδομένων που προκύπτει αν θέλουμε να έχουμε αυξημένη ακρίβεια. Ο όγκος των δεδομένων που απαιτείται αυξάνεται ανάλογα με τον κύβο της ακρίβειας που επιθυμούμε να έχουμε. Ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει είναι η ανάγκη κατανόησης των χαρακτηριστικών του χώρου των voxels και η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμων για την παράσταση βασικών σχημάτων. Για παράδειγμα ανάλογα με το πόσοι είναι οι άμεσοι γείτονες ενός voxel (6, 10, 20) ορίζεται η κλειστότητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου και έχει άμεση επίπτωση στους αλγορίθμους παράστασης.

Η πιο συνηθισμένη δομή δεδομένων που χρησιμοποιείται για το χώρο των voxels είναι το ομαδικό δέντρο. Αυτή είναι μια ιεραρχική δομή που αναδρομικά διαιρεί τον τρισδιάστατο χώρο σε 8 υποχώρους ώσπου να φτάσει στο επίπεδο του voxel. Η υποδιαίρεση μπορεί να σταματήσει νωρίτερα αν ένας χώρος καλύπτεται μόνο από ένα αντικείμενο ή έχει μόνο ένα χαρακτηριστικό έτσι ώστε να εξοικονομηθεί χώρος. Τα φύλλα του δένδρου περιέχουν την τιμή του χαρακτηριστικού για τον αντίστοιχο χώρο.



Εικόνα 3.12: Υποδιαίρεση του τρισδιάστατου χώρου και το αντίστοιχο οκταδικό δένδρο

Υπάρχει βέβαια και ένας οικονομικότερος σε χώρο τρόπος για την αποθήκευση των voxels. Αυτός είναι να φυλάμε στα φύλλα του δένδρου έναν δείκτη σε μια άλλη δομή που παριστάνει το αντικείμενο που περιέχεται στο αντίστοιχο τμήμα χώρου. Η διάσπαση σταματά όταν ένας κύβος περιέχει ένα μόνο αντικείμενο και τα χαρακτηριστικά του φυλάσσονται σε μια «παραδοσιακή» δομή για παράδειγμα πολυγωνική.^{(26) (28)}

3.3.5 Constructive Solid Geometry (CSG)

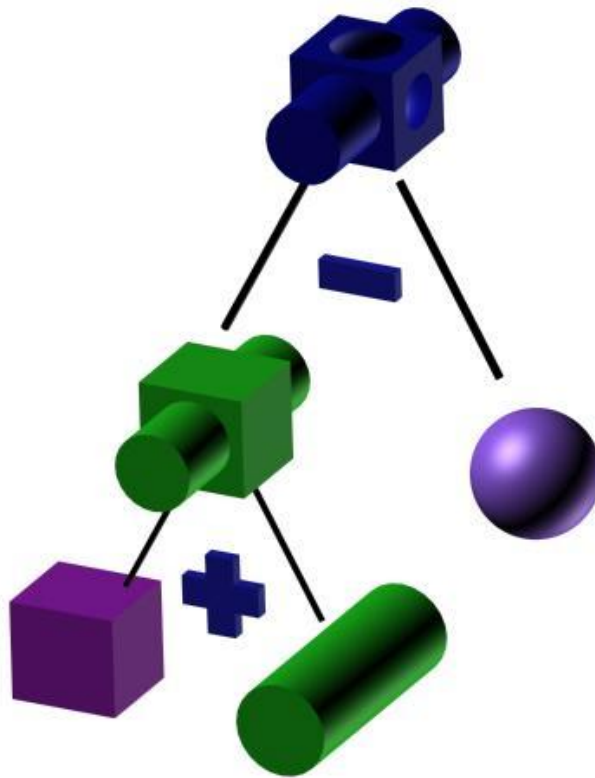
Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για τη δημιουργία μοντέλων βιομηχανικών στερεών. Η ιδέα είναι ότι αν ξεκινήσουμε από ένα σύνολο βασικών στερεών (π.χ. σφαίρα, κύλινδρος, κώνος, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο) μπορούμε να παραστήσουμε τις περισσότερες «βιομηχανικές πράξεις» πάνω σε αυτά (π.χ. συγκόλληση, τρύπημα, καλούπωμα) με τις βασικές πράξεις συνόλων (ένωση, αφαίρεση, τομή). Για να είναι αυτό δυνατό πρέπει να θεωρήσουμε τα βασικά στερεά σαν σύνολα σημείων. Έτσι για παράδειγμα η συγκόλληση δυο στερεών μπορεί να παρασταθεί με την ένωση των συνόλων των (κατάλληλα τοποθετημένων) σημείων τους, το άνοιγμα μιας τρύπας με την κατάλληλη αφαίρεση.

Στην CSG ένα αντικείμενο παριστάνεται από ένα δένδρο. Τα φύλλα του δένδρου περιέχουν βασικά στερεά και οι ενδιάμεσοι κόμβοι περιέχουν τελεστές συνόλων ή μετασχηματισμούς συντεταγμένων.

Η CSG παρέχει μια ακριβή παράσταση του όγκου ενός αντικειμένου. Η διαδικασία δημιουργίας ενός αντικειμένου και το μοντέλο παράστασης του ταυτίζονται. Εύκολα μπορούν να υλοποιηθούν αλλαγές στο αντικείμενο. Αντίστοιχες αλλαγές σε ένα πολυγωνικό μοντέλο είναι δύσκολες και χρονοβόρες.

Ένα βασικό πρόβλημα της CSG είναι το περιορισμένο σύνολο πράξεων που διαθέτει. Ένα άλλο πρακτικό πρόβλημα είναι η δυσκολία δημιουργίας εικόνων από το μοντέλο CSG. Απαιτείται πολύπλοκη και χρονοβόρα επεξεργασία και δύο από τους τρόπους που έχουν προταθεί είναι:

1. Μετατροπή του μοντέλου CSG σε voxels και χρήση κάποιας μεθόδου οπτικοποίησης για voxels.
2. Χρήση τεχνικών παρακολούθησης ακτίνας (ray tracing).^{(29) (26)}



Εικόνα 3.13: Παράδειγμα δένδρου CSG

3.4 Δημιουργία πολυγωνικών μοντέλων

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε μερικούς τρόπους δημιουργίας ενός πολυγωνικού μοντέλου. Βέβαια, δε θα πρέπει αν παραλείψουμε να πούμε ότι υπάρχει μια ευρεία γκάμα αντικειμένων έτοιμων στο διαδίκτυο, τα οποία είτε είναι διαθέσιμα δωρεάν, είτε επί πληρωμή. Αν δεν είναι δυνατή η εύρεση του αντικειμένου που χρειαζόμαστε, τότε είμαστε αναγκασμένοι να προχωρήσουμε στην ψηφιοποίηση είτε με τη χρήση χειροκίνητου ή αυτομάτου τρισδιάστατου ψηφιοποιητή, είτε με τη χρήση της μαθηματικής περιγραφής του αντικειμένου.

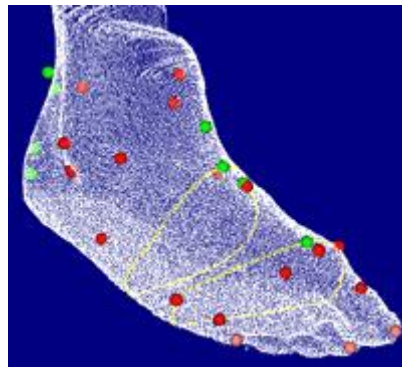
3.4.1 Χειροκίνητος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής

Η τεχνολογία του τρισδιάστατου χειροκίνητου ψηφιοποιητή βασίζεται στην τεχνολογία του δυσδιάστατου ψηφιοποιητή, δηλαδή του «ποντικιού» που χρησιμοποιούμε στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, υπάρχει ένας βραχίονας που καταλήγει σε μια ακίδα. Οι σύνδεσμοι του βραχίονα επιτρέπουν την κίνηση της ακίδας στον χώρο και επίσης είναι σε θέση να καταγράφουν τη θέση της ακίδας στο χώρο με ακρίβεια χιλιοστού. Έτσι ο χρήστης της συσκευής μπορεί με το πάτημα ενός πλήκτρου να εισάγει τη θέση της ακίδας σαν συντεταγμένες μιας κορυφής του αντικειμένου.



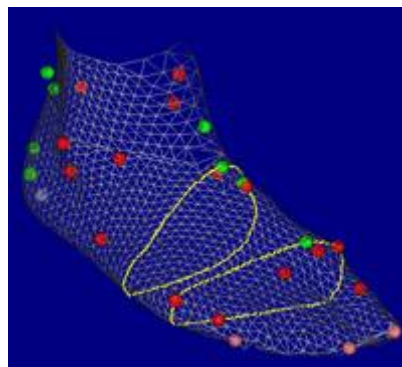
Εικόνα 3.14: Χειροκίνητος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής

Με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται ένα αρχείο που περιέχει συντεταγμένες σημείων της επιφάνειας του προς ψηφιοποίηση αντικειμένου.

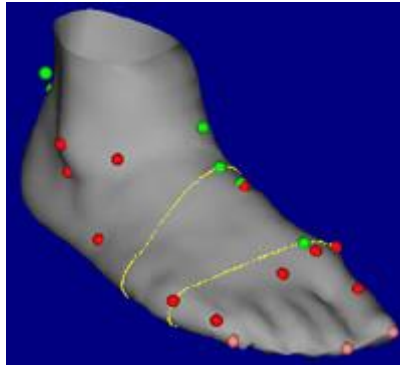


Εικόνα 3.15: Σύνολο σημείων της επιφάνειας του προς ψηφιοποίηση αντικειμένου

Στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ενώνονται τα σημεία αυτά σε πολύγωνα και το μοντέλο του αντικειμένου είναι έτοιμο να παρασταθεί σε μια οθόνη ή να χρησιμοποιηθεί για τη διενέργεια πειραμάτων και μετρήσεων.



Εικόνα 3.16: Πολυγωνικό πλέγμα του αντικειμένου



Εικόνα 3.17: Τελική εικόνα του ψηφιοποιημένου αντικειμένου

Η χρήση αυτού του ψηφιοποιητή έχει μειονεκτήματα όπως είναι ο πολύς χρόνος που απαιτείται για τη λήψη ικανοποιητικού αριθμού σημείων για την ψηφιοποίηση σύνθετων αντικειμένων, όπως επίσης και η δυσκολία ψηφιοποίησης αντικειμένων με βαθιές κοιλότητες ή εσωτερικές επιφάνειες, λόγω της αδυναμίας της ακίδας να φτάσει σε εσωτερικές επιφάνειες.

3.4.2 Αυτόματος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής

Υπάρχουν δυο τύποι τέτοιων συσκευών, ο ένας τύπος χρησιμοποιεί κάμερες και ο δεύτερος ακτίνα laser. Εδώ θα περιγράψουμε περιληπτικά τη λειτουργία της συσκευής με χρήση laser και σε επόμενη παράγραφο θα υπάρξει αναλυτική περιγραφή της διάταξης και της λειτουργίας της συσκευής με χρήση καμερών, που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση του ήλου.

Η συσκευή βασίζεται στη χρήση μετρητή απόστασης με ακτίνα laser. Το αντικείμενο τοποθετείται σε ένα δίσκο ο οποίος περιστρέφεται. Σε μια πλευρά υπάρχει ο μετρητής απόστασης με κατεύθυνση το κέντρο του δίσκου, καθώς ο δίσκος περιστρέφεται η ακτίνα laser πέφτει πάνω στο αντικείμενο και ο μετρητής απόστασης υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση από την επιφάνεια του αντικειμένου, ψηφιοποιώντας έτσι την τομή του αντικειμένου με κάποιο επίπεδο. Αλλάζοντας το ύψος του μετρητή λαμβάνονται οι τομές παράλληλων επίπεδων. Το σύνολο των σημείων που προκύπτουν με τη χρήση ειδικού λογισμικού συνθέτονται σε πολύγωνα. Όπως και με το χειροκίνητο ψηφιοποιητή η συσκευή αυτή μπορεί να ψηφιοποιήσει με ακρίβεια μόνο κυρτά αντικείμενα.⁽³⁰⁾



Εικόνα 3.18: Αυτόματος τρισδιάστατος ψηφιοποιητής με κάμερες ⁽³¹⁾

3.4.3 Μαθηματική περιγραφή

Είναι γνωστό ότι η περιστροφή ενός κύκλου γύρω από το κέντρο του δημιουργεί μια σφαίρα. Περιστρέφοντας οποιαδήποτε κλειστή επίπεδη καμπύλη γύρω από κάποιο σημείο του επιπέδου της λαμβάνουμε ένα στερεό. Αν η καμπύλη αποτελείται από διακριτά σημεία και η περιστροφή γίνεται για διακριτές γωνίες περιστροφής, τότε μπορούμε εύκολα να βρούμε τα πολύγωνα του στερεού ενώνοντας αντίστοιχα σημεία της καμπύλης σε διαδοχικές θέσεις της.

Δηλαδή μπορούμε με μαθηματικό τρόπο να δημιουργήσουμε το σχήμα των αντικειμένων, βρίσκοντας τις επιμέρους επιφάνειες από τις οποίες δημιουργούνται και συνθέτοντας τες στην τελική μορφή που παριστά το προς ψηφιοποίηση αντικείμενο. ⁽²⁶⁾

3.5 Περιγραφή της διαδικασίας ψηφιοποίησης του ήλου

3.5.1 Περιγραφή της διάταξης

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση του ήλου είναι ένας τρισδιάστατος ψηφιοποιητής με κάμερες. Η συσκευή αυτή στερεώνεται σε τρίποδο ώστε να είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης και να μπορούμε να αλλάζουμε το ύψος και τη γωνιά θέασης του αντικειμένου. Εκτός από τις δυο κάμερες, υπάρχει ένας προβολέας που προβάλλει κινούμενες γραμμές πάνω στα αντικείμενα και οι κατάλληλες θύρες για τη σύνδεση της συσκευής με ηλεκτρονικό

υπολογιστή. Συνολικά η όλη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή συνδεδεμένο με τον τρισδιάστατο ψηφιοποιητή. Ο χειρισμός του ψηφιοποιητή γίνεται μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή με εξειδικευμένο λογισμικό. Τέλος, θα πρέπει να προσθέσουμε ότι, για τη σωστή λειτουργία της διάταξης, θα πρέπει να είμαστε σε σκοτεινό δωμάτιο χωρίς πηγές φωτός ή ακόμα και σε κάποιο δωμάτιο με κλειστές κουρτίνες, έτσι ώστε να μην πέφτουν ακτίνες φωτός άμεσα πάνω στο αντικείμενο προς ψηφιοποίηση.

3.5.2 Βαθμονόμηση της συσκευής

Η συσκευή αυτή για να μπορέσει να δώσει σωστά αποτελέσματα πρέπει πριν από κάθε χρήση να βαθμονομηθεί. Η διαδικασία της βαθμονόμησης γίνεται ώστε να οριοθετηθεί ο χώρος μέσα στον οποίο θα τοποθετήσουμε το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Το αντικείμενο που χρησιμοποιούμε για τη βαθμονόμηση έρχεται μαζί με τη συσκευή και είναι μια πλάκα διαστάσεων 10*15cm περίπου η οποία έχει πάνω της στόχους και σημάδια σε κατάλληλες αποστάσεις. Τοποθετούμε λοιπόν την πλάκα αυτή με πρόσωπο προς τις κάμερες του ψηφιοποιητή σε δύο ή τρεις διαφορετικές αποστάσεις και θέτουμε τη συσκευή σε λειτουργία βαθμονόμησης. Για καλύτερα αποτελέσματα μπορούμε να επαναλάβουμε τη διαδικασία δύο φορές, αν και συνήθως μία είναι αρκετή.

3.5.3 Προετοιμασία του ήλου

Για την σωστή ψηφιοποίηση δε χρειάζεται προετοιμασία μόνο η συσκευή αλλά και το αντικείμενο, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ήλος. Αρχικά, χρειάζεται να βρούμε μια επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετήσουμε τον ήλο ώστε αυτή να μην ανακλά το φως που στέλνει ο προβολέας, διότι τότε οι κάμερες δε θα καταγράφουν σωστά τα σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου. Για αυτό το λόγο επιλέξαμε ένα χαρτόνι μαύρου χρώματος ώστε οποιαδήποτε ακτίνα φωτός δεν πέφτει πάνω στο αντικείμενο να απορροφάται και να μην ανακλάται προς τις κάμερες καταγραφής. Δεύτερο στάδιο στην προετοιμασία του ήλου είναι αυτό της οριοθέτησης της περιοχής μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε ειδικούς στόχους τους οποίους αναγνωρίζει η συσκευή ότι οριοθετούν την περιοχή του αντικειμένου. Αυτούς τους στόχους τους κολλήσαμε πάνω στο μαύρο χαρτόνι γύρω από τον ήλο σαν ένα νοητό περίγραμμα. Τέλος, έπρεπε να δούμε αν η επιφάνεια του ήλου θα μας δημιουργούσε κάποιο πρόβλημα λόγω του ότι είναι γυαλιστερή. Μετά από μια δοκιμή διαπιστώσαμε αυτό που είχαμε υποθέσει. Οι ακτίνες από τον προβολέα αντανακλώνταν από το υλικό του ήλου και οι κάμερες δεν μπορούσαν να καταγράψουν σωστά το αντικείμενο. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιήσαμε ένα υλικό ειδικό για τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αντικειμένων το οποίο όταν πέσει πάνω σε μια επιφάνεια την κάνει να φαίνεται μη γυαλιστερή και άρα να μην αντανακλά τις ακτίνες που προσπίπτουν σε αυτή. Το υλικό αυτό είναι σε σπρί και έτσι ψεκάσαμε τον ήλο. Τέλος τον τοποθετήσαμε πάνω στο χαρτόνι με τους στόχους και τα τοποθετήσαμε όλα μαζί στην περιοχή που είχαμε ορίσει με τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

3.5.4 Διαδικασία ψηφιοποίησης-περιγραφή λειτουργίας του ψηφιοποιητή

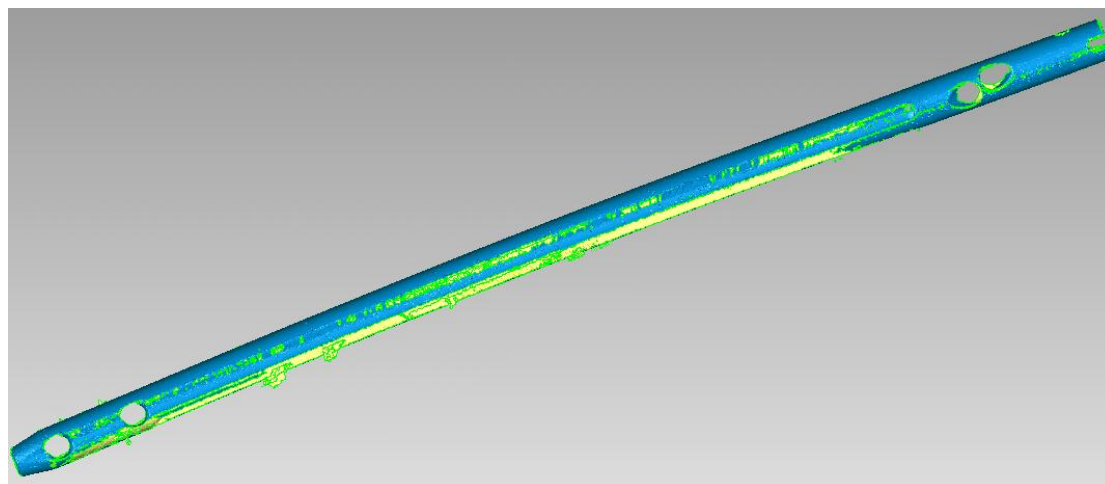
Αφού έχουν γίνει οι παραπάνω διαδικασίες της βαθμονόμησης του ψηφιοποιητή, της προετοιμασίας του ήλου και της τοποθέτησης του στο σωστό σημείο, είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσει η διαδικασία ψηφιοποίησης. Αρχικά η συσκευή εντοπίζει τους στόχους που είναι στο χαρτόνι και οριοθετούν την περιοχή του αντικειμένου. Για να θεωρηθεί επιτυχής η αναγνώριση των στόχων πρέπει να αναγνωριστεί ένας ελάχιστος αριθμός τεσσάρων στόχων. Στη συνέχεια, ο προβολέας της συσκευής προβάλλει ευθείες πάνω στο αντικείμενο τις οποίες μετακινεί και καταγράφει την αλλαγή της κλίσης τους ώστε να συγκεντρώσει και να καταγράψει σημεία των επιφανειών του αντικειμένου. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της καταγραφής ολόκληρου του αντικειμένου πρέπει να περιστρέψουμε το αντικείμενο ώστε ο ψηφιοποιητής να καταγράψει όλες τις πλευρές του. Για τον ήλο χρειάστηκε να επαναλάβουμε τη διαδικασία τέσσερις φορές περιστρέφοντάς τον γύρω από τον άξονα του. Ο τρισδιάστατος ψηφιοποιητής κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης αποθηκεύει «νέφη» σημείων. Αφού λοιπόν καταγράψουμε ολόκληρο το αντικείμενο, ακολουθεί η σύνθεση των τμημάτων του αντικειμένου και η ανακατασκευή της τελικής εικόνας.

3.5.5 Τρισδιάστατη ανακατασκευή της εικόνας

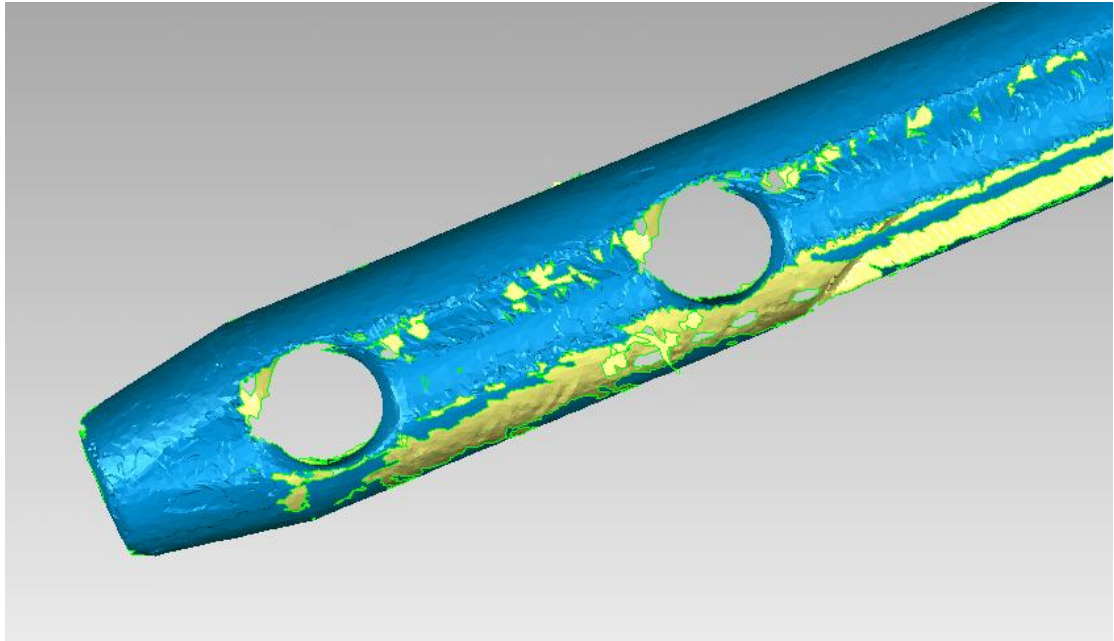
Ο ψηφιοποιητής έχει αποθηκεύσει κάθε πλευρά του αντικειμένου ως ένα νέφος σημείων σε ένα αρχείο τύπου .pf, έχουμε δηλαδή 4 αρχεία τύπου .pf. Αρχικά για κάθε ένα από τα αρχεία αυτά με ειδικό λογισμικό ενώνουμε τα σημεία μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα πολυγωνικό πλέγμα το οποίο παριστά μια πλευρά του αντικειμένου που ψηφιοποιήσαμε. Στη συνέχεια με άλλο εξειδικευμένο λογισμικό γεμίζουμε με χρώμα τα πολύγωνα που έχουν σχηματιστεί ώστε να δημιουργηθεί η επιφάνεια του αντικειμένου. Τέλος, χρειάζεται να ενώσουμε κατάλληλα τις 4 πλευρές του αντικειμένου ώστε η τελική εικόνα να ανταποκρίνεται στον ήλο, δηλαδή στο πραγματικό αντικείμενο.

3.6 Αποτελέσματα ψηφιοποίησης ήλου

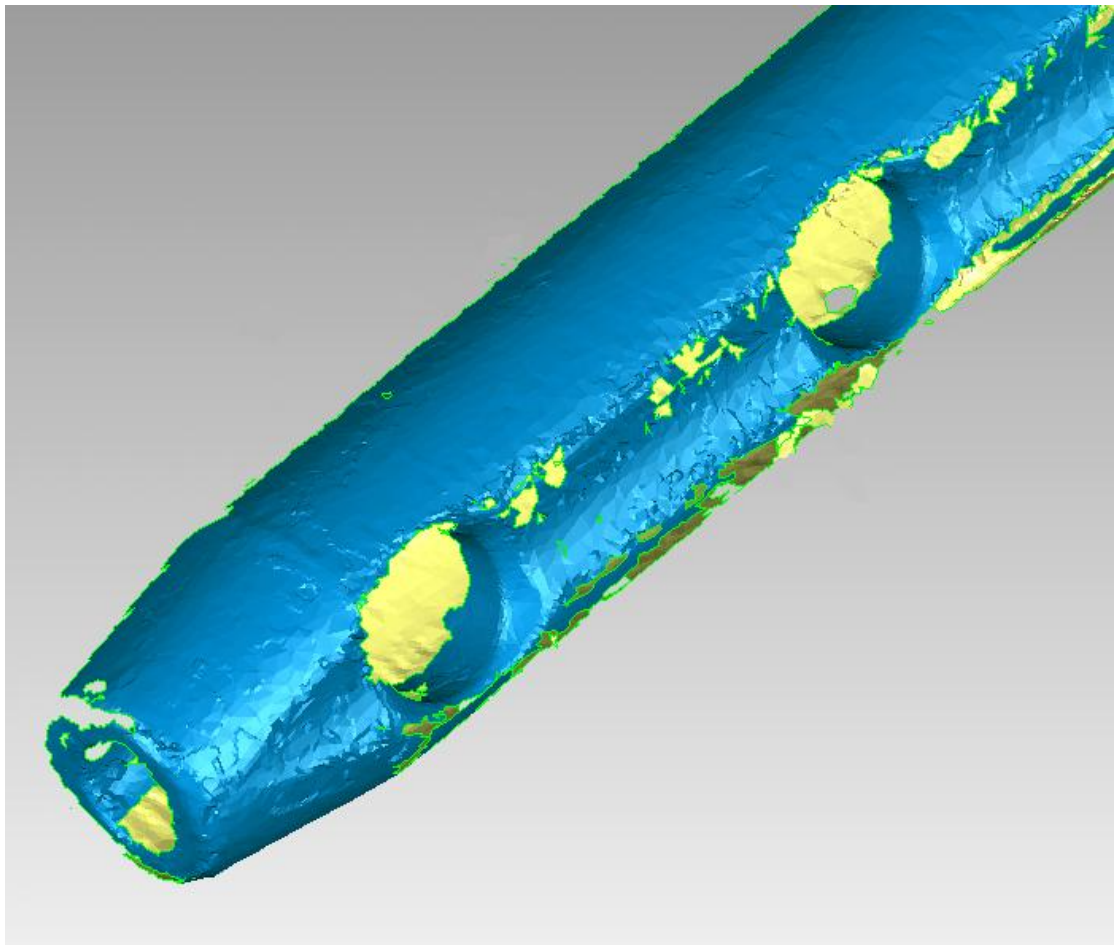
Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι οι εικόνες που ακολουθούν:



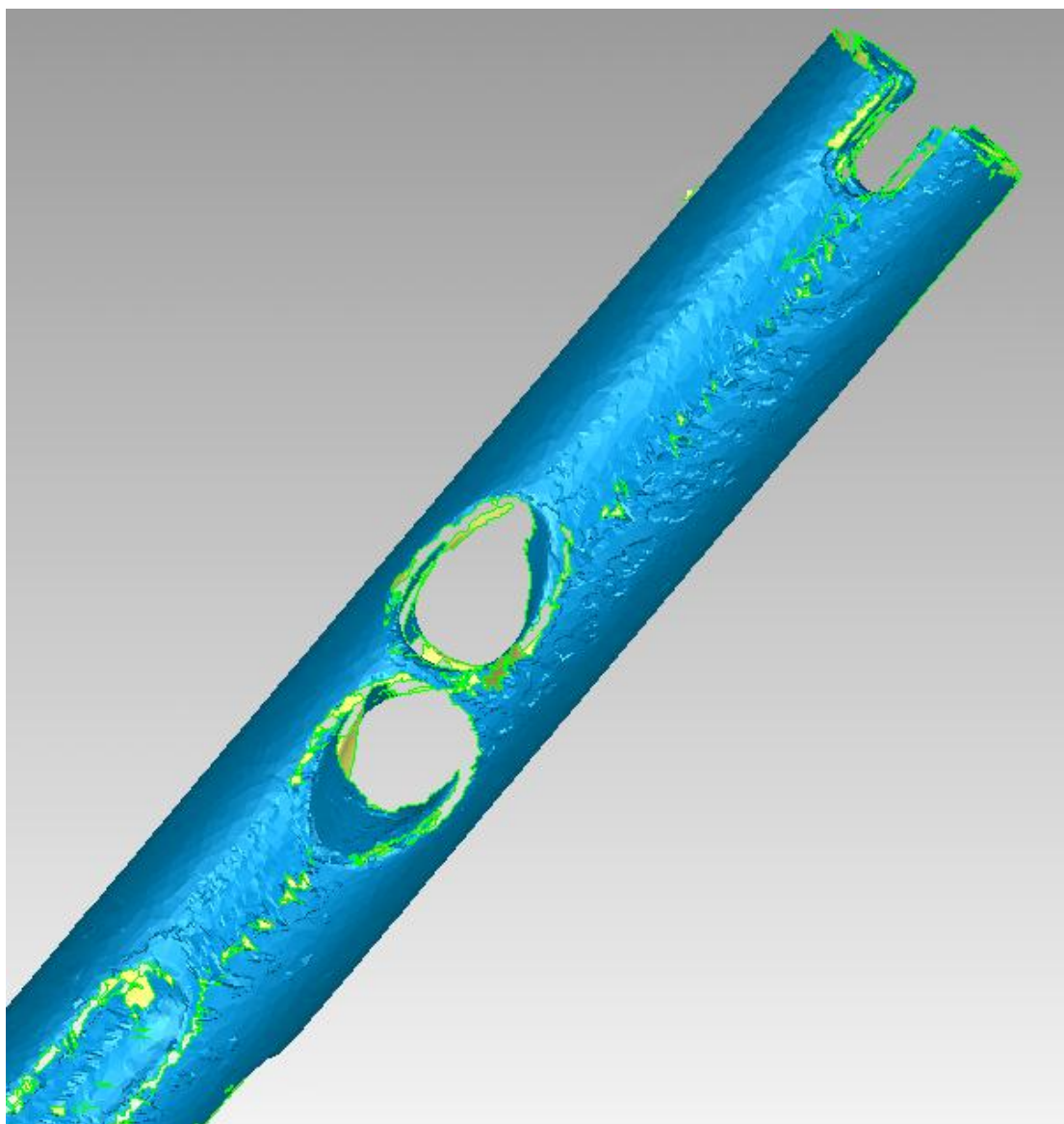
Εικόνα 3.19: Ο ψηφιοποιημένος ήλος



Εικόνα 3.20: Λεπτομέρεια του μπροστινού τμήματος του ήλου όπου διακρίνονται οι οπές που μας ενδιαφέρουν



Εικόνα 3.21: Λεπτομέρεια του μπροστινού τμήματος του ήλου απο άλλη οπτική γωνία



Εικόνα 3.22: Λεπτομέρεια του πίσω τμήματος του ήλου

Οι εικόνες αυτές έχουν προκύψει μετά από ελάχιστη επεξεργασία των δεδομένων που έχει συλλέξει ο ψηφιοποιητής. Όπως παρατηρούμε στις εικόνες 3.20 και 3.21 που είναι αυτές που μας ενδιαφέρουν, η αποτύπωση των οπών είναι αρκετά καλή. Οι επιφάνειες του ήλου από την άλλη δεν έχουν καταγραφεί λείες όπως είναι, αυτό όμως επιρεάζει ελάχιστα την εργασία που θέλουμε να κάνουμε διότι, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο έχουμε κάνει την παραδοχή ότι οι επιφάνειες του ήλου δεν είναι διαφανείς στις ακτίνες X των ακτινοδιαγνωστικών διατάξεων τύπου C-Arm λόγω της χαμηλής ενέργειάς τους.

*Κεφάλαιο 4: σκίαση
τρισδιάστατων αντικειμένων*

4.1 Εισαγωγή

Σκίαση είναι παρεμπόδιση του φωτός από κάποιο αντικείμενο· το αποτύπωμα που αφήνει το αντικείμενο αυτό πάνω σε μια επιφάνεια που βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά σε σχέση με την πηγή του φωτός λέγεται σκιά. Το χρώμα της σκιάς είναι συνήθως στην κλίμακα του γκρι. Για να δημιουργηθεί όμως η σκιά θα πρέπει να έχουμε μια φωτεινή πηγή· στην καθημερινή μας ζωή η φωτεινή πηγή που δίνει ζωή και συμβάλει στην ύπαρξη της ζωής στη γη είναι ο Ήλιος.

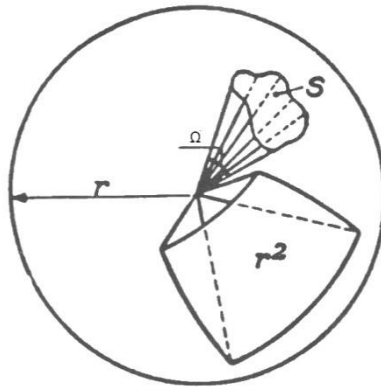
Το σύστημα που σχεδιάζουμε μπορεί να κάνει χρήση του τρισδιάστατου ψηφιοποιημένου ήλου και με τη βοήθεια τεχνικών φωτισμού και σκίασης να μας δώσει τις ζητούμενες εικόνες που θα μας έδινε ένα μηχάνημα τύπου C-Arm από την ακτινοβόληση του πραγματικού ήλου. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να μελετήσουμε τις τεχνικές φωτισμού και τα μοντέλα σκίασης ώστε να επιλέξουμε το καταλληλότερο για την εφαρμογή μας.

Η ρεαλιστική παράσταση των χαρακτηριστικών φωτισμού στα γραφικά βασίζεται στους αντίστοιχους φυσικούς νομούς, που έχουν διερευνηθεί σε βάθος και είναι αρκετά πολύπλοκοι. Αυτό που χρειαζόμαστε είναι ένα μοντέλο φωτισμού που αποτελεί μια πολύ συγκεκριμένη παράσταση αυτών των νόμων και έναν αλγόριθμο φωτισμού που να υλοποιεί το μοντέλο αυτό όσο πιο αποδοτικά γίνεται.

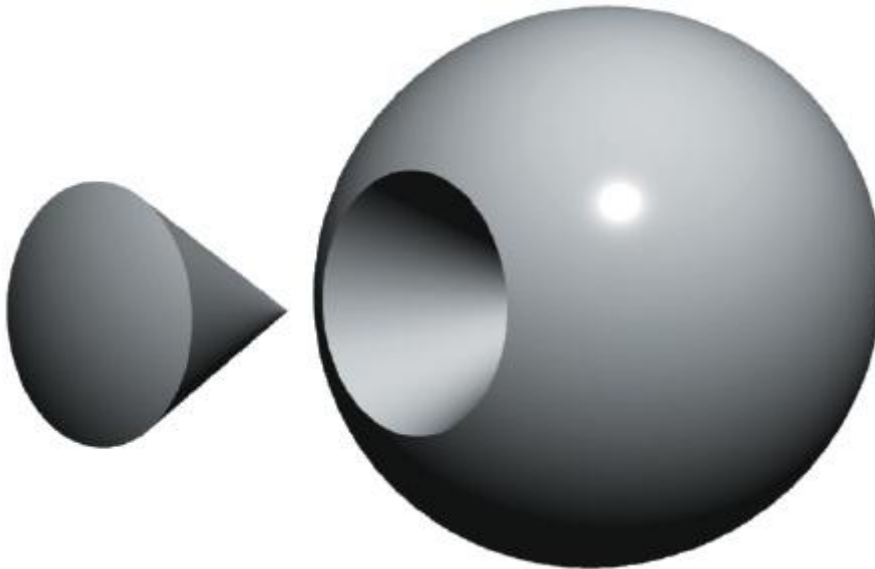
Η ανάκλαση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο μοντέλο φωτισμού για αυτό έχουμε και μοντέλα ανάκλασης. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο ανάκλασης είναι αυτό του Phong και χρησιμοποιείται στα γραφικά από τη δεκαετία του 70. Το μοντέλο του Phong είναι ένα τοπικό μοντέλο, δηλαδή, λαμβάνει υπ' όψη του μόνο τις συνιστώσες που σχετίζονται με την άμεση πρόσπτωση του φωτός μιας φωτεινής πηγής πάνω σε ένα αντικείμενο. Φυσικά υπάρχουν και πολύ πιο πολύπλοκα μοντέλα γενικού φωτισμού που λαμβάνουν υπ' όψη τους την έμμεση πρόσπτωση του φωτός πάνω σε ένα αντικείμενο, δηλαδή, ανακλάσεις από άλλα αντικείμενα και επιφάνειες που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Τέτοια μοντέλα είναι η παρακολούθηση ακτίνας (ray tracing) και το radiosity.

4.2 Φυσική της ανάκλασης

Θεωρούμε σφαίρα με κέντρο O και ακτίνα r και κώνο με κορυφή το σημείο O που είναι το κέντρο της σφαίρας. Έστω S η τομή της κωνικής επιφάνειας με την επιφάνεια της σφαίρας. Ορίζεται σαν στερεά γωνία Ω ο λόγος: $\Omega = \frac{S}{r^2}$ ⁽³²⁾



Εικόνα 4.1: Ορισμός στερεάς γωνίας⁽³²⁾



Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση της στερεάς γωνίας

Μονάδα της στερεάς γωνίας ορίζεται το στερακτίνιο sr (steradian ή sterad) και είναι η στερεά γωνία της οποίας ο αντίστοιχος κώνος τέμνει τη σφαίρα σε επιφάνεια $S = r^2$. Στην πραγματικότητα το στερακτίνιο sr είναι μονάδα χωρίς διαστάσεις διότι είναι πηλίκο επιφάνειας προς επιφάνεια: $sr = \frac{m^2}{m^2}$. Η επιφάνεια της σφαίρας έχει εμβαδόν $4 \cdot \pi \cdot r^2$ επομένως η μέγιστη στερεά γωνία είναι αυτή που ορίζεται από ολόκληρη τη σφαίρα και ισούται με $\Omega_{max} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{r^2} = 4 \cdot \pi$.

Η φωτεινή ισχύς (flux) Φ είναι η ταχύτητα εκπομπής φωτεινής ενέργειας από μια φωτεινή πηγή και μετράται σε watt (w).

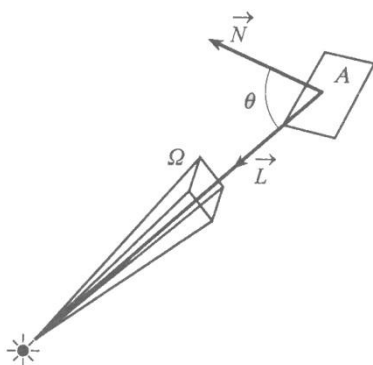
Η ένταση φωτεινής πηγής $R = d\Phi/d\Omega$ (radiant intensity) είναι η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από μια σημειακή φωτεινή πηγή ανά μονάδα στερεάς γωνίας Ω σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση και μετράται σε w/sr.

Η φωτεινή ροή (radiance) I μιας σημειακής φωτεινής πηγής είναι η ένταση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στη κατεύθυνση αυτή. Στα γραφικά συνήθως χρησιμοποιούμε τον όρο ένταση (intensity) αντί του όρου

φωτεινή ροή αφού το προηγούμενο μέγεθος R με το οποίο δημιουργείται σύγχυση δεν χρησιμοποιείται συχνά.

Παράδειγμα αν μας ενδιαφέρει η ένταση μιας φωτεινής πηγής σε σχέση με μια επιφάνεια A με κανονικό διάνυσμα (\vec{N}) το οποίο σχηματίζει γωνία θ με την κατεύθυνση ακτινοβολίας (\vec{L}) τότε με βάση και το παρακάτω σχήμα ισχύει:

$$I = dR / (dA \cdot \cos \theta) = dR / (dA \cdot \vec{N} \cdot \vec{L})$$



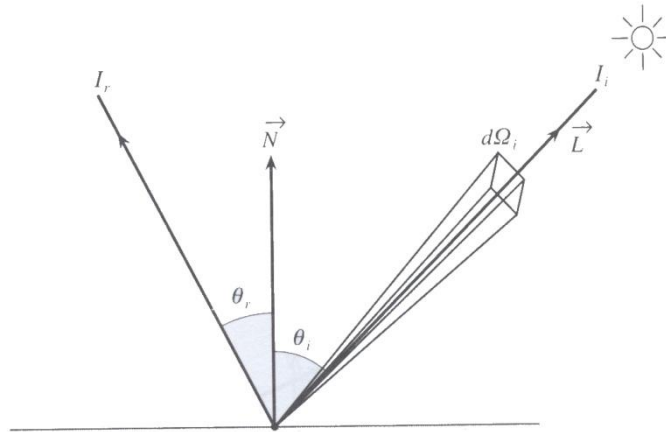
Εικόνα 4.3: Φωτεινή ροή (radiance) Φωτεινής πηγής

Η ροή προσπίπτουσας ακτινοβολίας (irradiance) E_i κάποιου σημείου μιας επιφάνειας είναι η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στην περιοχή του σημείου, $E = d\Phi/dA$, και μετράται σε w/m^2 . Για ένα σημείο μιας φωτιζόμενης επιφάνειας μπορούμε να ορίσουμε την προσπίπτουσα ένταση I_i του σημείου, κατ' αναλογία με την ένταση μιας φωτεινής πηγής, σαν τη ροή ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Την ροή τότε τη μετράμε σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση ακτινοβολίας, και ισχύει: $E_i = I_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i = I_i \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) \cdot d\Omega_i$.

Στα γραφικά μας ενδιαφέρει η σχέση του προσπίπτοντος σε μια επιφάνεια φωτός (incident light) με το ανακλώμενο σε κάποια δεδομένη κατεύθυνση φως (reflected light) και με το φως που μεταφέρεται μέσω της επιφάνειας (transmitted light). Για την εύρεση της ανακλώμενης έντασης I_r προς την κατεύθυνση παρατήρησης δεν αρκεί η τιμή της προσπίπτουσας έντασης I_i αλλά χρειάζεται και η τιμή της ροής E_i του προσπίπτοντος φωτός στο συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας. Αυτό μπορούμε να το αντιληφθούμε εύκολα αν θεωρήσουμε δυο φωτεινές πηγές που βρίσκονται στην ίδια θέση και έχουν την ίδια τιμή έντασης φωτεινής πηγής (radiant intensity) αλλά διαφορετικό μέγεθος. Αυτές θα δίνουν την ίδια τιμή I_i αλλά οι E_i θα είναι ανάλογες της στερεάς γωνίας $d\Omega_i$ που σχηματίζουν ως προς το σημείο της επιφάνειας. Ορίζουμε για αυτό τη συνάρτηση ανάκλασης BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) που συσχετίζει την ανακλώμενη ένταση I_r σε μια κατεύθυνση (π.χ. στην κατεύθυνση παρατήρησης) με την προσπίπτουσα ροή E_i από κάποια άλλη κατεύθυνση (π.χ. της φωτεινής πηγής) σαν το πηλίκο:

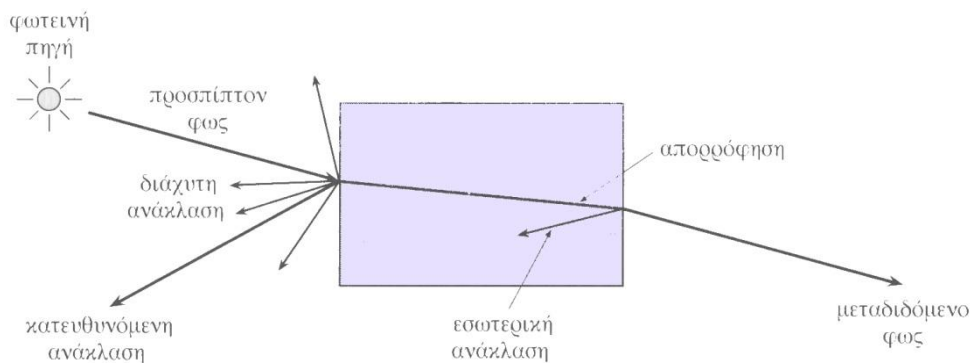
$$BRDF = \frac{I_r}{E_i}$$

Η BRDF είναι συνάρτηση των γωνιών θ_i και θ_r όπως επίσης και του μήκους κύματος λ του προσπίπτοντος φωτός και του υλικού της επιφάνειας πρόσπτωσης.



Εικόνα 4.4: Ένταση (radiance) σημείου επιφάνειας

Για την φωτεινή ενέργεια που προσπίπτει σε ένα σώμα ισχύει:
 Προσπίπτον φως = ανακλώμενο φως + διαχεόμενο φως + απορροφούμενο φως
 + μεταδιδόμενο φως

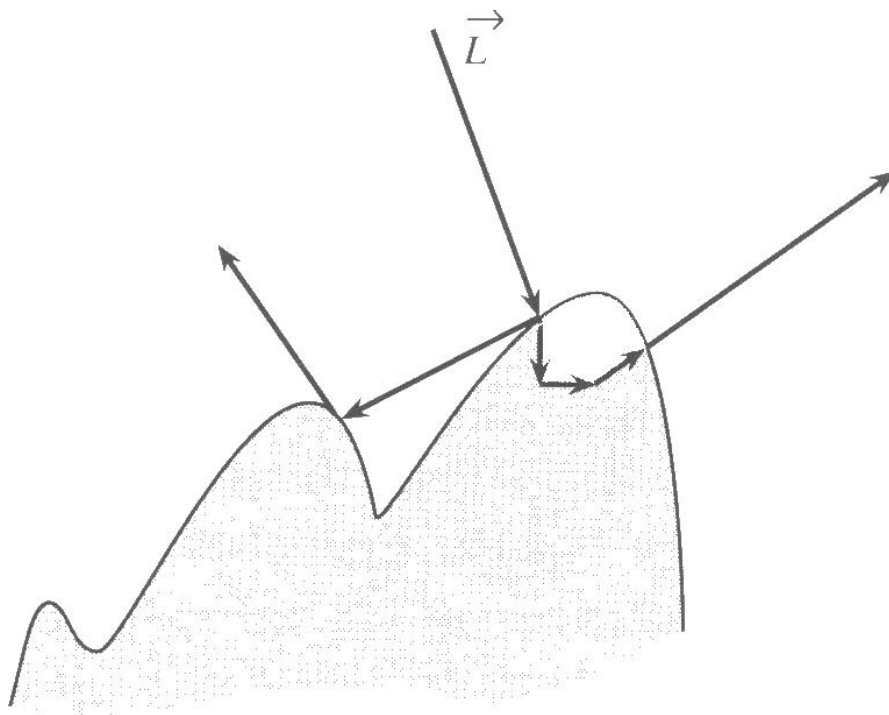


Εικόνα 4.5: Ανάλυση προσπίπτοντος φωτός

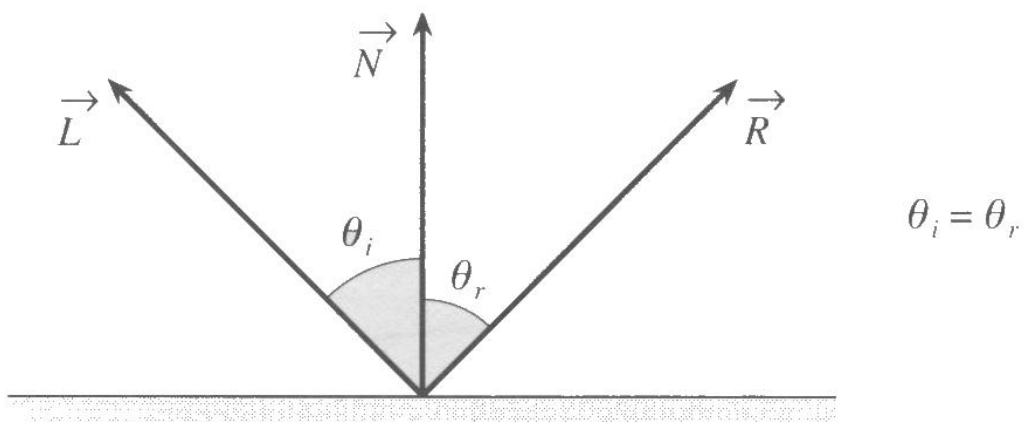
Για τις εφαρμογές στα γραφικά θεωρούμε ότι η συνάρτηση BRDF έχει 3 συνιστώσες:

- Κατευθυνόμενη ανάκλαση
- Διάχυτη κατευθυνόμενη ανάκλαση
- Ιδανική διάχυτη ανάκλαση⁽³³⁾

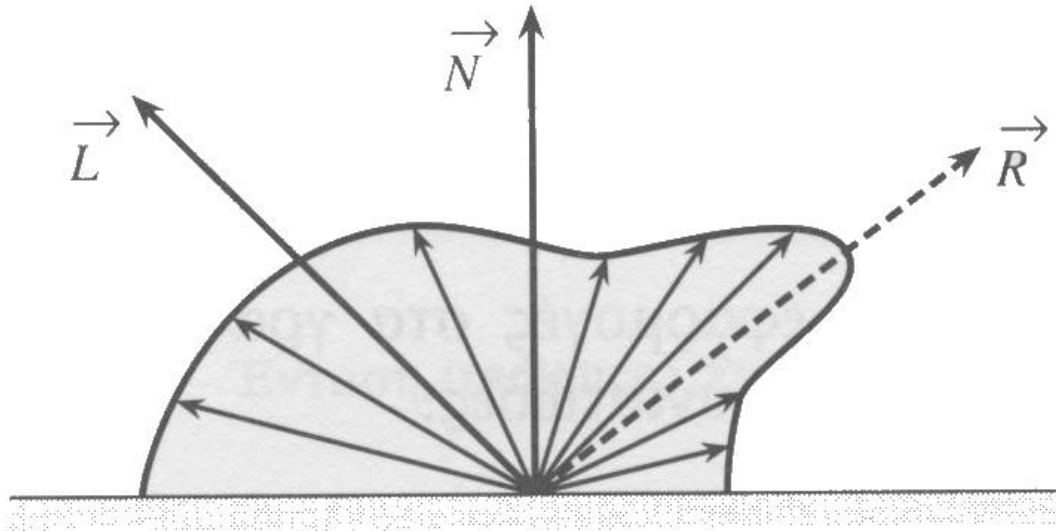
Οι δύο πρώτες συνιστώσες αφορούν άμεσες ανακλάσεις ενώ η τρίτη έμμεσες ανακλάσεις μεταξύ μικροεπιφανειών στην επιφάνεια και κάτω από την επιφάνεια του αντικείμενου (εικόνα 4.6). Η συνιστώσα κατευθυνόμενης ανάκλασης αντιστοιχεί με την ανάκλαση ενός τέλειου καθρέπτη (εικόνα 4.7). Όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια τόσο ισχυρότερη είναι κατευθυνόμενη ανάκλαση. Στην πραγματικότητα όλες οι επιφάνειες παρουσιάζουν κάποια ανωμαλία. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδρότητα τόσο πιο ισχυρή γίνεται η δεύτερη συνιστώσα της διάχυτης κατευθυνόμενης ανάκλασης. Η ανάκλαση αυτή γίνεται σε όλο το ημισφαίριο πάνω από το σημείο πρόσπτωσης, έχει όμως μεγαλύτερη ένταση όσο πλησιέστερα στο διάνυσμα της κατευθυνόμενης ανάκλασης \vec{R} (εικόνα 4.8). Τέλος η τρίτη συνιστώσα κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το ημισφαίριο (εικόνα 4.9).^{(34) (35) (36) (37)}



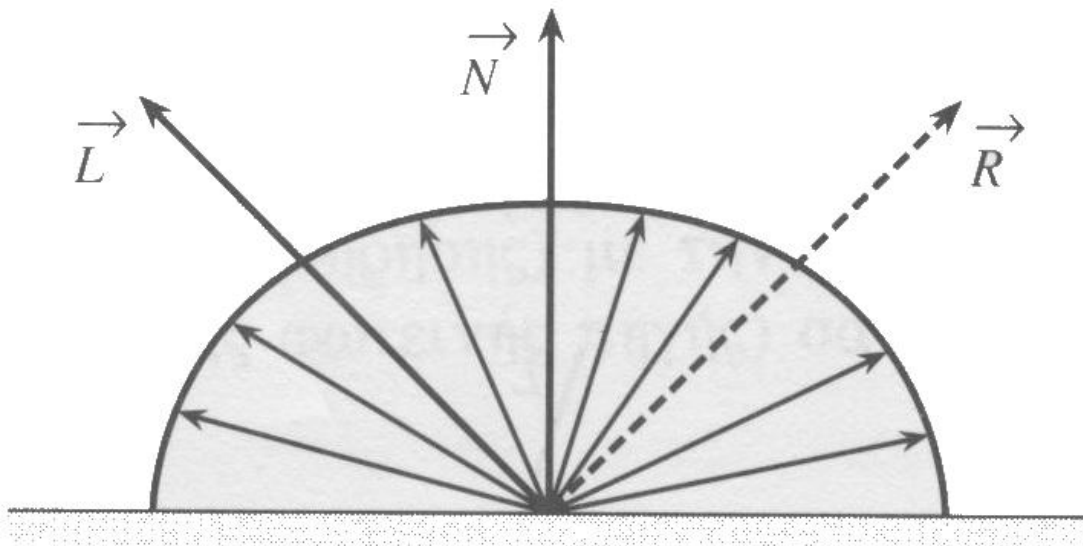
Εικόνα 4.6: Ιδανική διάχυτη ανάκλαση



Εικόνα 4.7: Συνιστώσα κατευθυνόμενης ανάκλασης



Εικόνα 4.8: Συνιστώσα διάχυτης κατευθυνόμενης ανάκλασης



Εικόνα 4.9: Συνιστώσα ιδανικής διάχυτης ανάκλασης

4.3 Μοντέλο ανάκλασης του Phong

Το μοντέλο ανάκλασης του Phong είναι ένα τυπικό μοντέλο που δίνει όμως μια καλή προσέγγιση οπτικού ρεαλισμού. Είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο σήμερα. Το μοντέλο αυτό είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των εξής τριών συνιστωσών: ⁽³⁸⁾ ⁽³⁹⁾ ⁽⁴⁰⁾ ⁽³⁴⁾

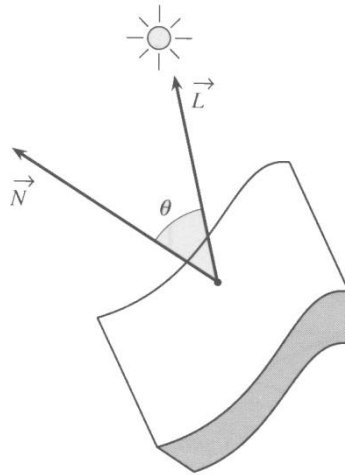
- Διάχυτη ανάκλαση.
- Κατευθυνόμενη ανάκλαση.
- Έμμεσος φωτισμός ή φωτισμός περιβάλλοντος.

Η διάχυτη συνιστώσα είναι η ιδανική διάχυτη ανάκλαση που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Για αυτήν ισχύει ο νόμος συνημιτόνου του Lambert:

$$I_d = I_i \cdot k_d \cdot \cos \theta \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq k_d \leq 1$$

όπου I_i είναι η ένταση μιας σημειακής φωτεινής πηγής και θ η γωνία της ακτίνας πρόσπτωσης \vec{L} με το κανονικό διάνυσμα \vec{N} της επιφάνειας στο σημείο πρόσπτωσης (εικόνα 4.10). Επιπλέον k_d είναι ο συντελεστής της διάχυτης ανάκλασης ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της φωτεινής ακτινοβολίας και το υλικό της επιφάνειας. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί και διαφορετικά με τη χρήση των \vec{L} και \vec{N} :

$$I_d = I_i \cdot k_d \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) \quad \text{ή} \quad I_d = I_i \cdot k_d \cdot \max(0, \vec{L} \cdot \vec{N})$$



Εικόνα 4.10: \vec{L} και \vec{N}

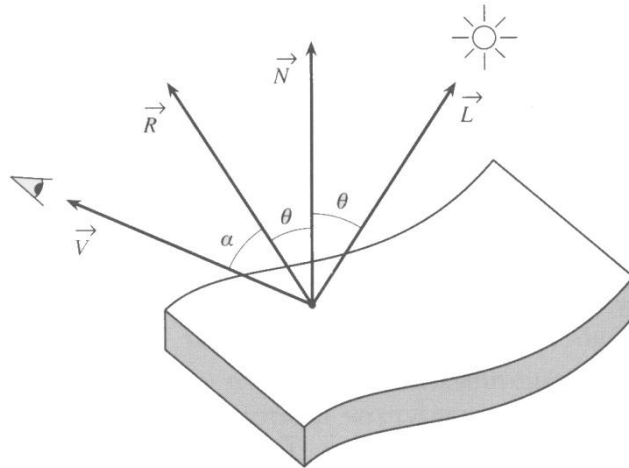
όπου τα \vec{L} και \vec{N} είναι μοναδιαία διανύσματα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η I_d είναι σταθερή για την περίπτωση επίπεδης επιφάνειας και φωτεινής πηγής στο άπειρο με θ σταθερή. Αυτά ισχύουν για μία φωτεινή πηγή, στην περίπτωση που έχουμε περισσότερες από μία φωτεινές πηγές j τότε για ένα σημείο επιφάνειας με κανονικό διάνυσμα \vec{N} έχουμε:

$$I_d = k_d \cdot \sum_j I_{i,j} \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N})$$

Η δεύτερη συνιστώσα του μοντέλου Phong, η κατευθυνόμενη ανάκλαση, ακολουθεί το νόμο του καθρέπτη. Είναι συνάρτηση της γωνίας α μεταξύ της κατεύθυνσης ανάκλασης \vec{R} και της κατεύθυνσης παρατήρησης \vec{V} (σχήμα).

$$I_s = I_i \cdot k_s \cdot (\cos \alpha)^n = I_i \cdot k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n$$

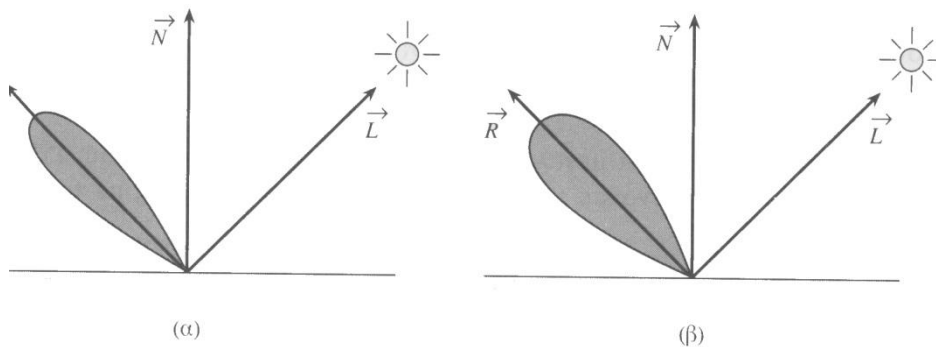
όπου τα \vec{R} και \vec{V} είναι μοναδιαία διανύσματα, το n αντιστοιχεί στην αδρότητα της επιφάνειας και $0 \leq k_s \leq 1$.



Εικόνα 4.11: Διανύσματα που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα

Κανονικά αντί του συντελεστή κατευθυνόμενης ανάκλασης k_s θα έπρεπε να έχουμε κάποια συνάρτηση $w(\theta, \lambda)$ όπου θ η γωνία πρόσπτωσης και λ το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η σημασία της συνάρτησης αυτής αναγνωρίζεται από τη συμπεριφορά του γυαλιού: όταν η γωνία θ είναι μηδενική δεν έχουμε καθόλου ανάκλαση ενώ όταν η γωνία θ είναι 90 μοίρες έχουμε ολική ανάκλαση. Για πολλά υλικά ισχύει $w(\theta, \lambda) \cong k_s$, όμως η μη εξάρτηση της συμπεριφοράς του μοντέλου από τη γωνία θ καθιστά το μοντέλο Phong μια μη αμφίδρομη συνάρτηση και είναι ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματά του.

Η κατευθυνόμενη ανάκλαση είναι υπεύθυνη για τα φαινόμενα της αντανάκλασης (highlight). Ο όρος $\cos^n a$ προσεγγίζει διαισθητικά τη διάχυση του ανακλούμενου φωτός. Η επίδραση του συντελεστή υλικού n φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μικρές τιμές του n αντιστοιχούν σε αδρά υλικά που το μέγεθος της αντανάκλασης είναι σχετικά μεγάλο ενώ μεγάλες τιμές του n αντιστοιχούν σε γυαλιστερά υλικά με μικρή και καθαρή αντανάκλαση. Το χρώμα της κατευθυνόμενης ανάκλασης είναι διαφορετικό από αυτό της διάχυτης ανάκλασης. Η απλούστερη περίπτωση είναι να θεωρήσουμε ότι η κατευθυνόμενη ανάκλαση παίρνει το χρώμα της φωτεινής πηγής. Για παράδειγμα αν ένα κόκκινο αντικείμενο φωτίζεται από μια άσπρη φωτεινή πηγή, η διάχυτη ανάκλαση έχει χρώμα κόκκινο και η κατευθυνόμενη άσπρο.



Εικόνα 4.12: Εμφάνιση αντανάκλασης (α) μεγάλο n (β) μικρο n

Με τις μέχρι τώρα δυο συνιστώσες, αντικείμενα που είναι ορατά από το σημείο παρατήρησης αλλά δεν φωτίζονται απευθείας από τη φωτεινή πηγή παριστάνονται

μαύρα καθώς το Phong είναι τοπικό μοντέλο και δεν λαμβάνει υπόψη του έμμεσο φωτισμό.

Για το λόγο αυτό εισάγεται μια τρίτη σταθερή συνιστώσα έμμεσου φωτισμού (ambient light) αγνοώντας την πραγματική πολυπλοκότητα υπολογισμών έμμεσου φωτισμού:

$$I_g = I_a \cdot k_a$$

Οπού k_a είναι ο συντελεστής έμμεσου φωτισμού με $0 \leq k_a \leq 1$ και I_a η τιμή έντασής του. Προσθέτοντας τις τρεις παραπάνω συνιστώσες έχουμε:

$$I = I_g + I_d + I_s = I_a \cdot k_a + I_i \cdot k_d \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) + I_i \cdot k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n$$

Για απλούστερους υπολογισμούς συχνά θεωρούμε ότι η φωτεινή πηγή καθώς και ο παρατηρητής βρίσκονται σε άπειρη απόσταση με συνέπεια τα διανύσματα \vec{L} και \vec{V} να έχουν σταθερή τιμή για επίπεδες επιφάνειες.

Ο έμμεσος φωτισμός θεωρείται σταθερός για όλη την εικόνα ενώ η ένταση των δυο άλλων συνιστωσών εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής πηγής. Γνωρίζουμε ότι η φωτεινότητα ενός σώματος ελαττώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης d από τη φωτεινή πηγή. Αν θεωρήσουμε τη φωτεινή πηγή στη θέση παρατήρησης και πάρουμε την απόσταση του αντικειμένου από τη θέση αυτή τότε η έκφραση $\frac{1}{d^2}$ για αντικείμενα που βρίσκονται πολύ κοντά στο κέντρο προβολής μας δίνει μεγάλες διαφορές στην ένταση φωτισμού. Γι' αυτό λαμβάνουμε μια γραμμική μείωση της έντασης με τον παράγοντα $\frac{1}{d+d_0}$. Το d_0 είναι μια σταθερά η οποία δεν επιτρέπει τη διαίρεση με μηδέν και ταυτόχρονα θέτει ένα κάτω όριο στην τιμή του d . Το διορθωμένο μοντέλο γίνεται:

$$I = I_g + I_d + I_s = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{d + d_0} \cdot (k_d \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) + k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^n)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό των διανυσμάτων που αναφέραμε προηγουμένως όπως τα \vec{N} και \vec{R} η ανάλυση τους όμως υπερβαίνει τους στόχους της παρούσης εργασίας και για αυτό δεν θα αναφερθούμε σε αυτούς παρότι ο υπολογισμός τους είναι σημαντικός για τα γραφικά σε υπολογιστές.

4.4 Αλγόριθμοι φωτισμού με βάση το μοντέλο Phong

Αφού περιγράψαμε τις βασικές γεωμετρικές αρχές της οπτικής και του φωτισμού καθώς και ενός διαδεδομένου μοντέλου φωτισμού θα εξετάσουμε αλγορίθμους φωτισμού. Τα μοντέλα φωτισμού μπορούμε να τα χωρίσουμε σε 3 κατηγορίες:

- Εμπειρικά μοντέλα (Phong)
- Μεταβατικά μοντέλα
- Αναλυτικά μοντέλα

Με βάση αυτό το διαχωρισμό οι αλγόριθμοι φωτισμού χωρίζονται σε:

- Προσθετικούς αλγορίθμους (incremental algorithms)
- Αλγορίθμους παρακολούθησης ακτίνας (ray-tracing)
- Αλγορίθμους τύπου radiosity

Η πρώτη ομάδα αλγορίθμων χρησιμοποιεί εμπειρικά μοντέλα φωτισμού σε προοπτικά προβαλλόμενες σκηνές και οι αλγόριθμοι έχουν άμεση σχέση με τις scan line μεθόδους για την παράσταση πολυγώνων και τη λύση του προβλήματος απόκρυψης. Ξεκινώντας από το σταθερό φωτισμό προχωρούμε στη φθίνουσα φωτεινότητα ανάλογα με την απόσταση από τη φωτεινή πηγή και στη συνέχεια έχουμε παρεμβολή έντασης φωτεινότητας εντός της πολυγωνικής επιφάνειας, ψευδό-διαφάνεια και παρεμβολή κανονικού διανύσματος εντός πολυγωνικής επιφάνειας. Οι βασικότεροι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας περιγράφονται στη συνέχεια αυτής της παραγράφου.^{(34) (41) (42) (43) (40)}

Η δεύτερη ομάδα παριστάνει τη μεταβατική φάση από τα εμπειρικά στα αναλυτικά μοντέλα και χρησιμοποιεί, για την καλυτέρευση των πρώτων, αποτελέσματα της οπτικής και της φυσικής. Λαμβάνει υπόψη της την επίδραση των δομών της επιφάνειας και τους αντικατοπτρισμούς. Διορθώνεται η γεωμετρία της σκηνής ώστε να υπολογίζονται σωστότερα ανακλάσεις, διαθλάσεις και σκιές. Στην εξέλιξη αυτών των αλγορίθμων έχουν συμβάλει τα παρακάτω:^{(34) (44) (45) (46) (47) (48)}

- Ανακλάσεις (reflection mapping), Blinn & Newell
- Διεσπαρμένες ανακλάσεις, Blinn
- Παραμορφώσεις και διαθλάσεις με διαφανή αντικείμενα, Kay & Greenberg
- Αναδρομική παρακολούθηση ακτίνας (recursive ray-tracing), Whitted
- Διεσπαρμένη διάθλαση, Hall & Greenberg

Στην τρίτη ομάδα ξεκινάμε με τη μέθοδο των Cook & Torrance και χρησιμοποιούμε αναλυτικά ακριβή μοντέλα για τον υπολογισμό των ανακλαστικών και λοιπών ιδιοτήτων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των φωτεινών πηγών και υλικών με τη βοήθεια μεθόδων εξαρτώμενων από το μήκος κύματος λ.⁽⁴⁹⁾

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τους βασικότερους προσθετικούς αλγορίθμους καθώς αυτοί είναι οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο μοντέλο άμεσου φωτισμού. Δηλαδή σε ένα μοντέλο που δε λαμβάνει υπόψη του τον έμμεσο φωτισμό και είναι αυτό που ταιράζει καλύτερα στη συμπεριφορά των ακτίνων X.

4.4.1 Αλγόριθμος σταθερού φωτισμού

Ο απλούστερος αλγόριθμος φωτισμού για αντικείμενα που αποτελούνται από πολυεδρικές επιφάνειες χρησιμοποιεί σταθερές φωτεινότητες επιφανειών. Δεν προβλέπεται καμιά ελάττωση φωτισμού με βάση την απόσταση της φωτεινής πηγής αλλά ούτε και κατευθυνόμενη ανάκλαση. Προβλέπει μόνο διάχυτη ανάκλαση και σταθερό έμμεσο φωτισμό. Η σημειακή φωτεινή πηγή βρίσκεται σε άπειρη απόσταση και στην κατεύθυνση του παρατηρητή (τα \vec{L} και \vec{V} συμπίπτουν) και έτσι δεν

προκύπτουν σκιές και η έκφραση $(\vec{N} \cdot \vec{L})$ είναι για κάθε επιφάνεια σταθερή. Αν ο παρατηρητής και η φωτεινή πηγή βρίσκονται στο θετικό Z άξονα τότε τα διανύσματα \vec{L} και \vec{V} έχουν τη μορφή $(0,0,1)$ και $(\vec{N} \cdot \vec{L}) = N_z$ για $\vec{N} = (N_x, N_y, N_z)$. Άρα η συνάρτηση φωτισμού γίνεται:

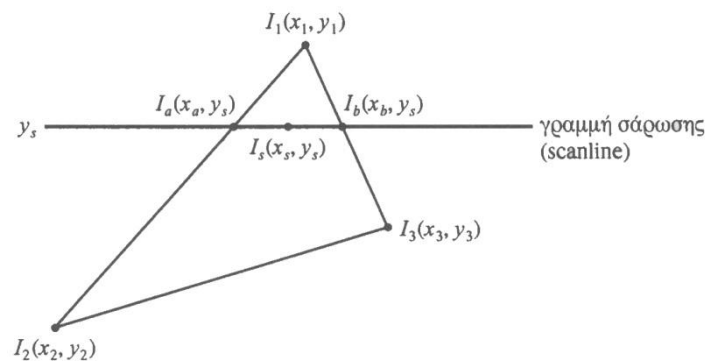
$$I = I_a \cdot k_a + I_i \cdot k_d \cdot N_z$$

Βάση του αλγορίθμου αυτού υπολογίζεται η τιμή I μια φορά για κάθε πολύγωνο και, κατά τη σάρωση, τα pixels που καλύπτει το πολύγωνο παίρνουν αυτή την τιμή. Καμπύλες επιφάνειες μπορούν να φωτιστούν αρκεί αρχικά να υπολογιστεί μια πολυγωνική προσέγγιση της επιφάνειας και στη συνέχεια να φωτιστεί κάθε πολύγωνο χωριστά.

Το μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι το ανθρώπινο μάτι έχει την ιδιότητα να αντιλαμβάνεται έντονα τις απότομες διαφορές (ασυνέχειες) φωτισμού. Έτσι τα σύνορα των πολυγώνων φαίνονται εντονότερα από ότι τα εσωτερικά σημεία τους και τονίζεται η πολυγωνική δομή του αντικειμένου.⁽³⁴⁾

4.4.2 Αλγόριθμος του Gouraud

Ο αλγόριθμος αυτός διορθώνει τον προηγούμενο υπολογίζοντας τη φωτεινότητα ενός pixel στο εσωτερικό του πολυγώνου με παρεμβολή της φωτεινότητας των κορυφών του πολυγώνου. Σε αυτόν τον scan line αλγόριθμο υπολογίζονται τα κανονικά διανύσματα στις κορυφές επί της πραγματικής επιφάνειας ή αν αυτή δεν είναι διαθέσιμη, παίρνοντας το μέσο όρο των κανονικών διανυσμάτων των πολυγώνων που γειτνιάζουν σε κάθε κορυφή. Στη συνέχεια από τα κανονικά διανύσματα υπολογίζονται με τη βοήθεια της συνάρτησης κάποιου μοντέλου φωτισμού, οι φωτεινότητες των κορυφών οι οποίες χρησιμοποιούνται με τη σειρά τους για παρεμβολή κατά μήκος των ακμών του πολυγώνου. Στο σχήμα οι φωτεινότητες I_1, I_2 και I_3 υπολογίζονται με τη χρήση του μοντέλου ενώ οι I_a, I_b και I_s υπολογίζονται με παρεμβολή.



Εικόνα 4.13: Αλγόριθμος Gouraud

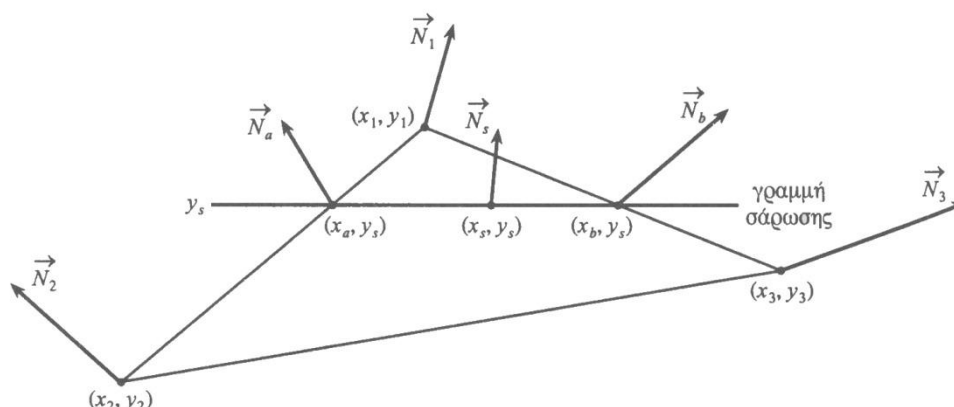
Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου Gouraud είναι καλύτερο από το σταθερό φωτισμό.^{(39) (34)}

4.4.3 Αλγόριθμος του Phong

Ο αλγόριθμος Gouraud δεν εξαλείφει όλα τα προβλήματα που υπάρχουν στους προηγούμενους αλγορίθμους. Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα είναι η συνέχεια της δεύτερης παραγωγού της φωτεινότητας με συνέπεια να υπάρχουν ασυνέχειες. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι για συγκεκριμένους προσανατολισμούς γειτονικών πολυγώνων μπορεί να υπολογιστούν κανονικά διανύσματα στις κορυφές που δεν ανταποκρίνονται στην κλίση πραγματικής επιφάνειας. Τέλος ο προηγούμενος αλγόριθμος δεν αποδίδει αρκετά καλά τις ανακλάσεις μέσα στην επιφάνεια.

Ο αλγόριθμος του Phong βελτιώνει ικανοποιητικά τα παραπάνω προβλήματα. Ο αλγόριθμος βασίζεται στη σχέση του μοντέλου του Phong. Με αυτόν τον αλγόριθμο η φωτεινότητα κάθε pixel υπολογίζεται ξεχωριστά. Τα απαιτούμενα κανονικά διανύσματα υπολογίζονται με παρεμβολή των κανονικών διανυσμάτων των κορυφών.

Ο αλγόριθμος του Phong επιτυγχάνει αρκετά καλό αποτέλεσμα και είναι μια βελτίωση του Gouraud όμως έχει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αφού έχουμε υπολογισμό της εξίσωσης του μοντέλου φωτισμού σε κάθε ένα pixel που καλύπτει ένα πολύγωνο. ^{(38) (34)}



Εικόνα 4.14: Αλγόριθμος Phong

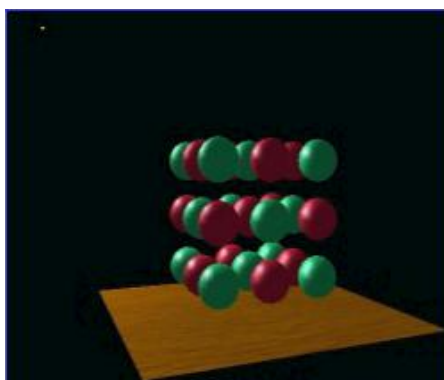
Η γραμμική παρεμβολή των κανονικών διανυσμάτων των κορυφών που γίνεται με τον αλγόριθμο του Phong μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Οι Overveld και Wyvill έδειξαν πως η τετραγωνική παρεμβολή των κανονικών διανυσμάτων έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. ⁽⁵⁰⁾

4.5 Χαρτογράφηση σκίασης ή Προβολική σκίαση (shadow mapping ή projective shadowing)

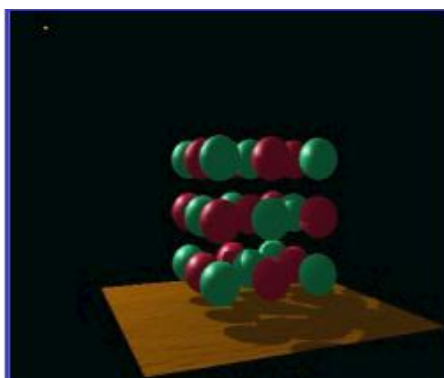
Μια διαδικασία που προτείνεται για να προσθέσουμε σκιά σε κάποιο τρισδιάστατο αντικείμενο και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στα γραφικά ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι η προβολική σκίαση (shadow mapping ή projective shadowing). Η γενική ιδέα παρουσιάστηκε το 1978 από τον Lance Williams στην εργασία του με τίτλο “Casting curved shadows on curved surfaces”. ⁽⁵¹⁾

4.5.1 Βασική αρχή μιας σκιάς και ενός χάρτη σκίασης (shadow map)

Αν κοιτάξουμε από το σημείο που βρίσκεται μια πηγή φωτός προς την κατεύθυνση που εκπέμπεται το φως, τότε όλα τα αντικείμενα που θα βλέπουμε θα είναι φωτισμένα και δεν θα βλέπουμε σκιές. Οτιδήποτε βρίσκεται πίσω από αυτά τα αντικείμενα που βλέπουμε θα είναι σκιασμένο. Αυτή είναι η βασική αρχή της δημιουργίας ενός χάρτη σκίασης. Πρώτα έχουμε οπτικοποίηση της σκηνής από την οπτική γωνία της φωτεινής πηγής και αποθηκεύεται το βάθος κάθε επιφάνειας που φαίνεται από τη θέση του φωτός. Στη συνέχεια οπτικοποιείται η ζητούμενη σκηνή από την οπτική γωνία του παρατηρητή συγκρίνοντας το βάθος κάθε σημείου που δημιουργείται με τον χάρτη που έχει δημιουργηθεί στο προηγούμενο βήμα.^{(52) (53) (51)}



Εικόνα 4.15: Εικόνα χωρίς σκίαση



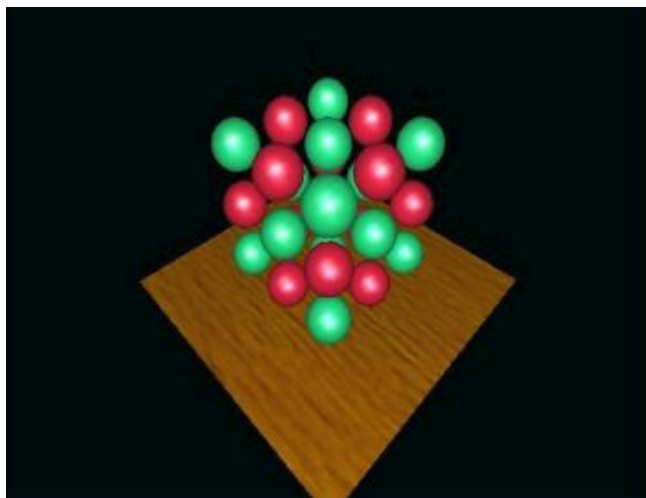
Εικόνα 4.16: Εικόνα σκιασμένη με τη τεχνική shadow mapping

4.5.2 Δημιουργία του χάρτη σκίασης (shadow map)

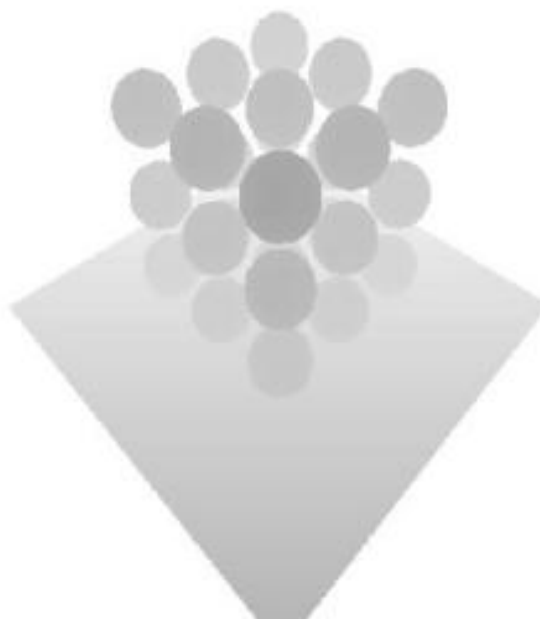
Στο πρώτο στάδιο ο αλγόριθμος κάνει την οπτικοποίηση της σκηνής από την οπτική γωνία της φωτεινής πηγής. Για μια σημειακή πηγή η εικόνα θα πρέπει να είναι μια προοπτική προβολή.

Από αυτή την οπτική απεικόνιση εξάγεται και αποθηκεύεται η σχετική απόσταση κάθε επιφάνειας από τη φωτεινή πηγή. Σε αυτή τη διαδικασία δε χρειάζεται να γίνουν άλλοι υπολογισμοί όπως ανανέωση των χρωμάτων ή υπολογισμοί της υψής, με σκοπό να εξοικονομηθούν πόροι. Αυτός ο χάρτης σκίασης αποθηκεύεται στη μνήμη του υποσυστήματος γραφικών.

Αυτός ο χάρτης πρέπει να ανανεώνεται κάθε φορά που υπάρχουν αλλαγές στη θέση της πηγής είτε στα αντικείμενα της σκηνής, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες περιπτώσεις όπως όταν αλλάζει η θέση της κάμερας. Αν έχουμε πολλαπλές πηγές φωτός τότε πρέπει να υπολογιστεί ένας χάρτης σκιάς για κάθε μια ξεχωριστά.⁽⁵¹⁾



Εικόνα 4.17: Η εικόνα απο την οπτική γωνία της φωτεινής πηγής



Εικόνα 4.18: Το βάθος κάθε επιφάνειας όπως αυτό καταγράφεται από την οπτική γωνία της φωτεινής πηγής

4.5.3 Σκίαση της σκηνής

Το δεύτερο στάδιο είναι ο σχεδιασμός της σκηνής από την οπτική γωνία του παρατηρητή με την εφαρμογή του χάρτη σκίασης. Το στάδιο αυτό υποδιαιρείται σε τρεις βασικές διαδικασίες, η πρώτη είναι η εύρεση των συντεταγμένων των αντικειμένων στο χώρο που ορίζεται από τη φωτεινή πηγή, η δεύτερη είναι ο έλεγχος που κάνει τη σύγκριση αυτών των συντεταγμένων με τις συντεταγμένες που είναι

αποθηκευμένες στον χάρτη σκίασης και τέλος είναι η σχεδίαση των αντικειμένων με άλλες περιοχές υπό σκιά και άλλες φωτεινές.^{(51) (53)}

4.5.3.1 Συντεταγμένες στο χώρο που ορίζεται από τη φωτεινή πηγή

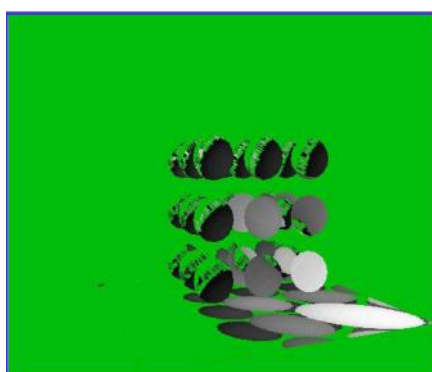
Για να συγκρίνουμε ένα σημείο με το χάρτη σκιάσεων, πρέπει να μετατραπούν οι συντεταγμένες του στο χώρο της σκηνής στις αντίστοιχες που ορίζονται από τη φωτεινή πηγή. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν πολλαπλασιασμό πινάκων.

Ο πίνακας που χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων από το σύστημα του κόσμου σε αυτό της φωτεινής πηγής είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του χάρτη σκίασης στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου.

4.5.3.2 Έλεγχος σκίασης

Αφού βρεθούν οι συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων της φωτεινής πηγής, οι τιμές x , y συνήθως αντιστοιχούν σε κάποια θέση του χάρτη σκίασης ενώ η τιμή του z αντιστοιχεί στο βάθος της επιφάνειας που αντιστοιχεί σε αυτή τη θέση.

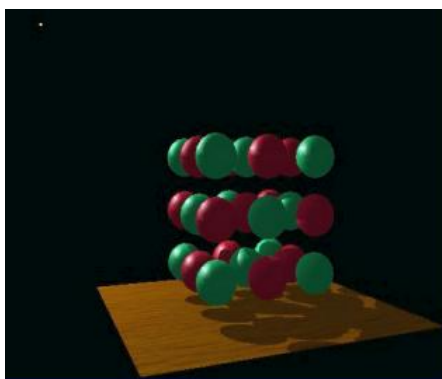
Αν η τιμή του z είναι μεγαλύτερη από την τιμή που έχει αποθηκευτεί στο χάρτη σκίασης στην αντίστοιχη θέση τότε το αντικείμενο θεωρείται ότι βρίσκεται πίσω από κάποιο άλλο αντικείμενο το οποίο παρεμποδίζει το φως και θα πρέπει να σχεδιαστεί σκιασμένο κατά τη διαδικασία της οπτικοποίησης της τελικής εικόνας. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να σχεδιαστεί φωτισμένο.⁽⁵¹⁾



Εικόνα 4.19: Με πράσινο είναι οι περιοχές που θα είναι φωτισμένες

4.5.3.3 Σχεδίαση της σκηνής

Αφού λοιπόν έχουν γίνει όλες οι συγκρίσεις τώρα πλέον γνωρίζουμε ποια σημεία είναι φωτισμένα και ποια όχι από την οπτική γωνία του παρατηρητή και είναι πλέον εύκολο για το υποσύστημα γραφικών να αποδώσει οπτικά αυτές τις πληροφορίες.⁽⁵³⁾



Εικόνα 4.20: η τελική σκιασμένη εικόνα

4.5.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα

Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε γιατί οι υπάρχουσες μέχρι τότε τεχνικές παρουσίαζαν σημαντικά προβλήματα. Για παράδειγμα η τεχνική των προβαλλόμενων επίπεδων σκιών (projected planar shadows) δουλεύει ικανοποιητικά μόνο σε επίπεδες επιφάνειες και η τεχνική του όγκου σκιών (shadow volume) έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και γενικά είναι δύσκολος ο καθορισμός του όγκου μιας σκιάς. Είναι δύσκολο με τις προϋπάρχουσες τεχνικές οποιοδήποτε αντικείμενο να σκιάζει οτιδήποτε πρέπει να σκιαστεί σε μια σκηνή. Η τεχνική αυτή είναι μια τεχνική που δε χρειάζεται να γνωρίζει ο χρήστης τη γεωμετρία της εικόνας ώστε να πετύχει τη σωστή σκίαση της σκηνής, είναι ένας αλγόριθμος που βασίζεται αποκλειστικά σε κάθε εικόνα που πρέπει να σκιαστεί. Επίσης επειδή δε χρειάζεται να κάνει συνεχώς τον υπολογισμό των χαρτών σκίασης έχει και σχετικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος από άλλες τεχνικές.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα κάθε τεχνική έχει και μειονεκτήματα τα οποία συνήθως καθορίζουν και τις εφαρμογές για τις οποίες ενδείκνυται η χρήση της. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι τα φαινόμενα επικάλυψης (aliasing) που δημιουργούνται στις τελικές εικόνες. Αυτή η αδυναμία της τεχνικής βελτιώνεται αισθητά με την εφαρμογή φιλτραρίσματος “percentage closer” το οποίο αποτελεί ουσιαστικά βελτίωση της αρχικής τεχνικής την οποία περιγράψαμε στα προηγούμενα. Η ανάλυση του χάρτη σκίασης ορίζει και την ποιότητα της σκίασης, έτσι για να αυξήσουμε την ποιότητα πρέπει να αυξήσουμε την ανάλυση αυτή όμως έτσι δημιουργείται πρόσθετο υπολογιστικό κόστος. Επίσης είναι λιγότερο ακριβής σε σχέση με την τεχνική όγκου σκιάς (shadow volume). Η τεχνική αυτή παράγει συνήθως σκιάς με έντονες ακμές, όμως και για αυτό έχουν αναπτυχθεί βελτιώσεις όπως η “Variance shadow map” και η “Smoothies” οι οποίες βελτιώνουν την αληθοφάνεια της σκίασης. Τέλος ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι το φιλτράρισμα χρωμάτων δεν έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα, κάτι το οποίο για την εφαρμογή που θα κάνουμε δεν είναι σημαντικό αφού έχουμε χρώματα μόνο στην κλίμακα του γκρι.

4.5.5 Υλοποίηση της τεχνικής «shadow mapping» σε C

Στο παράρτημα Α υπάρχει κώδικας ο οποίος υλοποιεί όσο πιο απλά γίνεται τη σκίαση αντικειμένων με την προαναφερθείσα τεχνική. Η υλοποίηση δεν έχει κάποιο προγραμματιστικό τέχνασμα πέρα από την επαναχρησιμοποίηση κάποιων μεταβλητών για οικονομία χώρου.⁽⁵⁴⁾

4.6 Αλγόριθμος εύρεσης προβολής

Εάν δεν θέλουμε να μην χρησιμοποιήσουμε τα παραπάνω μοντέλα και αλγορίθμους φωτισμού τα οποία έχουν κατασκευαστεί κυρίως για την ρεαλιστική παράσταση του αληθινού κόσμου και όχι για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ακτίνων X, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω διαδικασία ώστε να πάρουμε την προβολή του ήλου δηλαδή την εικόνα που θα δημιουργούσε ένα C-Arm. Η διαδικασία αυτή είναι απλουστευτική και το μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζεται έχει μια πολύ βασική παραδοχή για τη φύση των ακτίνων X. Θεωρεί ότι μια ακτίνα X όταν πέσει πάνω στον ήλο δεν τον διαπερνά και έτσι δε θα καταγραφεί από τον αισθητήρα της διάταξης, δηλαδή στην περίπτωση φωτισμού στο σημείο αυτό δημιουργείται σκιά. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι τα μηχανήματα τύπου C-Arm όπως είπαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούν ακτίνες σχετικά χαμηλής ενεργείας για την προστασία του ασθενή και του ιατρικού προσωπικού από τις επιβλαβείς επιπτώσεις των ακτίνων X. Έτσι ένα φωτόνιο ακτίνας X που θα προσκρούσει στον ήλο ο οποίος είναι κατασκευασμένος από μέταλλο θα σκεδαστεί σε μεγάλες γωνίες και πιθανώς να μην φτάσει στον αισθητήρα της διάταξης.

Αφού ψηφιοποιήσαμε το αντικείμενο με τη μορφή ενός πολυγωνικού πλέγματος είναι εύκολο, ανεξάρτητα από το τι πολύγωνα έχουν χρησιμοποιηθεί, να το μετατρέψουμε σε πλέγμα από πολλά τρίγωνα. Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο με τον οποίο μπορούμε να δημιουργήσουμε την προβολή ενός τριγώνου όταν αυτό ακτινοβολείται από κωνική δέσμη, έτσι ώστε με μια επαναληπτική διαδικασία να παίρνουμε τελικά την προβολή ολόκληρου του αντικειμένου που παρίσταται από πολλά τρίγωνα.

Βασική αρχή του αλγορίθμου είναι ότι, αν ένα τρίγωνο διακόπτει την κωνική δέσμη φωτός, τότε το αντικείμενο διακόπτει τη κωνική δέσμη φωτός ή εάν το σημείο τομής της φωτεινής ακτίνας και του τριγώνου είναι εντός του τριγώνου, τότε η ακτίνα διακόπτεται.

Έστω ότι έχουμε ένα τρίγωνο $AB\Gamma$ με όλες τις κορυφές του μέσα στον κώνο που δημιουργεί η φωτεινή δέσμη. Βρίσκουμε τις προβολές (A' , B' , Γ') των κορυφών (A , B , Γ) του τριγώνου πάνω σε ένα επίπεδο προβολής οπότε η σκιά δηλαδή η προβολή του τριγώνου $AB\Gamma$ είναι το $A'B'\Gamma'$.

Για να βρούμε αν το τρίγωνο $AB\Gamma$ είναι ολόκληρο μέσα στον κώνο της δέσμης ελέγχουμε αν η προβολή του δηλαδή το τρίγωνο $A'B'\Gamma'$ είναι μέσα στην κωνική τομή του κώνου και του επιπέδου προβολής. Επειδή στη περίπτωση του C-Arm το επίπεδο προβολής είναι η συσκευή ανίχνευσης των ακτίνων X και είναι κάθετο στην δέσμη των ακτίνων X, θεωρούμε για απλοποίηση της γεωμετρίας ότι η κωνική φωτεινή δέσμη προσπίπτει κάθετα στο επίπεδο προβολής, δηλαδή το επίπεδο είναι κάθετο ως προς τον άξονα του κώνου και άρα η κωνική τομή με το επίπεδο προβολής είναι ένας κύκλος. Έστω O' το κέντρο του κύκλου και A'' ένα σημείο πάνω στον κύκλο άρα το ευθύγραμμο τμήμα $O'A''$ είναι ίσο με την ακτίνα του κύκλου. Για τις προβολές A' , B' , Γ' του τριγώνου κάνουμε τον έλεγχο αν είναι εντός του κύκλου ελέγχοντας την ανισότητα $O'A' < O'A''$. Αν ισχύει, τότε το σημείο A' είναι εντός του κύκλου, αντίστοιχα πράττουμε και για τις άλλες προβολές.

Γενικά υπάρχουν τέσσερις περιπτώσεις που μπορεί να συναντήσουμε. Η πρώτη είναι και η πιο απλή και συζητήθηκε προηγουμένως όπου η προβολή του τριγώνου $AB\Gamma$ είναι ολόκληρη εντός του κύκλου της φωτεινής δέσμης. Η δεύτερη περίπτωση είναι να βρίσκεται ένα σημείο προβολής, για παράδειγμα το Γ' του αρχικού τριγώνου, εκτός του κύκλου προβολής. Σε αυτή την περίπτωση ενώνουμε τις κορυφές της προβολής και βρίσκουμε τα σημεία τομής των πλευρών του τριγώνου με τον κύκλο-προβολή της φωτεινής δέσμης. Το κομμάτι που αποτελεί σκιά του τριγώνου αποτελείται από τη μια πλευρά του τριγώνου, μέρος των άλλων δυο πλευρών που έχουν κοινή κορυφή εκτός του κύκλου προβολής της φωτεινής δέσμης και ένα τόξο του κύκλου το οποίο προκύπτει από τα σημεία τομής των δυο πλευρών του τριγώνου με τον κύκλο. Ο υπολογισμός του τόξου είναι εύκολος αν υπολογίσουμε αναλυτικά μια φορά τον κύκλο μετά από τα σημεία τομής μπορούμε να βρούμε το τόξο.

Αν τώρα έχουμε δυο σημεία της προβολής εκτός του κύκλου της φωτεινής δέσμης τότε πάλι βρίσκουμε τις πλευρές και τα σημεία τομής με τον κύκλο-προβολή της φωτεινής δέσμης. Όμοια με προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε το κομμάτι που είναι σκιά, το οποίο θα αποτελείται από ένα μέρος των δυο πλευρών του τριγώνου που έχουν κοινή κορυφή εντός του κύκλου και από το τόξο του κύκλου που βρίσκεται μεταξύ των σημείων τομής του με αυτές τις δυο πλευρές του τριγώνου.

Τέλος έχουμε την περίπτωση που ένα τρίγωνο του αντικειμένου προβολής είναι εκτός της φωτεινής δέσμης άρα δεν θα δημιουργεί σκιά στο επίπεδο προβολής.

Αφού έχουμε στο επίπεδο προβολής τις ακμές που περικλείουν τη σκιά, για να πάρουμε ολόκληρη τη σκιά, κάνουμε την παρακάτω διαδικασία.

1. Σχεδιάζουμε τις ακμές $A'B'$, $B'\Gamma'$, $\Gamma'B'$, ως ευθείες στο bitmap επίπεδο με τη βοήθεια του αλγορίθμου του Bresenham. Αυτός ο αλγόριθμος αναγνωρίζει ποια σημεία πρέπει να χρωματιστούν για τη δημιουργία μιας πολύ καλής προσέγγισης ενός ευθύγραμμου τμήματος.
2. Σαρώνουμε το επίπεδο κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω και μαυρίζουμε όλα τα τετραγωνάκια (pixel) του επιπέδου που βρίσκονται ανάμεσα σε δυο ήδη μαυρισμένα τετραγωνάκια που ανήκουν σε κάποια από τις ακμές.

Τη συγκεκριμένη διαδικασία την επαναλαμβάνουμε για κάθε τρίγωνο του αντικειμένου και το αποτέλεσμα που θα λάβουμε θα είναι η σκιά ολόκληρου του αντικειμένου. Μια βελτίωση θα ήταν να κάνουμε τη συγκεκριμένη διαδικασία μόνο για την επιφάνεια που καλύπτει ο κώνος της φωτεινής δέσμης στο επίπεδο που τοποθετείται το αντικείμενο, καθώς θεωρούμε ότι οτιδήποτε είναι εκτός του κωνικής δέσμης φωτισμού δεν καταγράφεται από έναν αισθητήρα μηχανήματος C-Arm.

***Κεφάλαιο 5: βασικά
συμπεράσματα - προτάσεις για
συνέχιση της εργασίας***

Στο παρον κεφάλαιο περιγράφονται σύντομα τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, καθώς και για τη μελλοντική συνέχιση της εργασίας αυτής.

Σχετικά με την ακτινοδιαγνωστική διάταξη τύπου C-Arm συμπεραίνουμε από ένα πλήθος βιβλιογραφικών πηγών ότι χρησιμοποιείται κωνική δέσμη ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι οι παραμορφώσεις στις εικόνες που προκύπτουν θα είναι αυτές που περιγράφηκαν εν συντομία στην παράγραφο 2.4. Όμως κάθε ακτινοδιαγνωστική διάταξη τύπου C-Arm εφαρμόζει τεχνικές απάλισης αυτών των παραμορφώσεων στα δεδομένα που συλλέγει ο αισθητήρας ώστε να παράγει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, οπότε η πρόσβαση σε μια διάταξη αυτού του τύπου και η διενέργεια μετρήσεων θα μας βοηθούσε να δούμε σε πιο βαθμό εμφανίζονται αυτές οι παραμορφώσεις στις τελικές εικόνες και αν θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην έρευνα για τη δημιουργία του συστήματος υποβοήθησης. Επίσης θα πρέπει να εξεταστεί κατά πόσο ένας ήλος είναι διαφανής ή αδιαφανής στις ακτίνες X αυτών των διατάξεων και τα δεδομένα που θα προκύψουν να εφαρμοστούν στη διαδικασία σκίασης του αντικειμένου.

Η ψηφιοποίηση του ήλου ήταν αρκετά αποτελεσματική όπως μπορούμε να δούμε και από τις εικόνες που προέκυψαν. Παρόλα αυτά υπάρχουν εμφανείς ατέλειες οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν με περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων αυτών από εξειδικευμένο λογισμικό. Αυτό που δεν μελετήσαμε αλλά είναι απαραίτητο να γίνει στο μέλλον είναι η μελέτη των παραμορφώσεων που υφίσταται ο ήλος, και κατά συνέπεια οι οπές αυτού, κατά τη διάρκεια εισαγωγής του στο οστό. Η μελέτη αυτή είναι σημαντική για τον αποκλεισμό του ενδεχομένου να δούμε μεγάλες διαφοροποιήσεις στις πραγματικές ακτινογραφίες και στα ψηφιακά στιγμιότυπα λόγω παραμόρφωσης των οπών. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να γίνουν μετρήσεις στις εικόνες που έχουν δημιουργηθεί από τη διαδικασία της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης για τη μέτρηση των διαστάσεων του ψηφιοποιημένου ήλου σε σχέση με τον πραγματικό, ώστε να εξεταστεί η ακρίβεια της διαδικασίας ψηφιοποίησης.

Η τεχνική σκίασης που προτείνεται είναι ικανοποιητική σε πολλές εφαρμογές ειδικά αν πρόκειται για σκίαση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Το τελικό σύστημα για να βασιστεί στον κώδικα του παραρτήματος θα πρέπει αυτός να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Δηλαδή να ρυθμιστούν οι αποστάσεις πηγής-αντικειμένου και αντικειμένου-επιπέδου προβολής, να καθοριστεί η φωτεινή πηγή κτλ. Θα πρέπει επίσης να γίνει μια πειραματική διαδικασία στην οποία θα διενεργηθούν ενδεδειγμένες μετρήσεις για την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής αυτής και να διαπιστωθεί η καταλληλότητα της για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εναλλακτικά αν δεν θέλουμε να προσαρμόσουμε την υπάρχουσα τεχνική στα αντικειμενικά δεδομένα της εφαρμογής μας θα μπορούσε να αναπτυχθεί μια ξεχωριστή διαδικασία εύρεσης της προβολής του ήλου βασισμένη στον αλγόριθμο της παραγράφου 4.6 και στη συνέχεια να κάνουμε τις απαραίτητες μετρήσεις.

Τέλος είναι σημαντικό να δημιουργηθεί η πλατφόρμα πάνω στην οποία θα αλληλεπιδράσουν όλοι αυτοί οι παράγοντες και θα βοηθήσουν τον ερευνητή να εξάγει συμπεράσματα ως προς την καταλληλότητα και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων και των διαδικασιών που περιγράφηκαν και προτάθηκαν σε αυτή την εργασία.

Βιβλιογραφία

1. X-ray image intensifier. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 20, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_image_intensifier.
2. Cone-beam vs traditional ct scans. *Osseonews*. [Online] [Cited: 5 17, 2011.] <http://www.osseonews.com/cone-beam-vs-traditional-ct-scans>.
3. Angiography & X-ray. *Siemens*. [Online] Siemens. [Cited: 6 5, 2011.] http://www.medical.siemens.com/webapp/wcs/stores/servlet/PSGenericDisplay~q_catalogId~e_-1~a_langId~e_-1~a_pageId~e_100408~a_storeId~e_10001.htm.
4. **Buzug, Thorsten M.** Solid State Flat-Panel Detectors. *Computer Tomography, From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2008.
5. Flat Panel Detectors: Revolutionizing X-ray Imaging. *Varian*. [Online] [Cited: 6 21, 2011.] <http://www.varian.com/dyna/comp/2004/article04.html>.
6. **Buzug, Thorsten M.** Fundamentals of X-ray Physics. *Computed Tomography, From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2008.
7. X-ray Tube. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 4 17, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_tube.
8. X-ray Imaging Systems. *Nasa*. [Online] [Cited: 5 27, 2011.] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_12/xtelescopes_systems.html.
9. **Jeff Siemerdsen, PhD.** *C-Arm Cone-Beam CT*. Baltimore : Department of Biomedical Engineering, Johns Hopkins University.
10. **Γιαννόπουλος, Φώτιος Γ.** *Σύστημα Μοντελοποίησης Ηλών για Υποβοήθηση σε Χειρουργικές Επεμβάσεις Ασφαλίσιμων Κλειστών Ενδομυελικών Ηλώσεων*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
11. X-ray concepts. *Nikonmetrology*. [Online] [Cited: 6 2, 2011.] http://www.nikonmetrology.com/products/x-ray_and_ct_inspection/x-ray_and_ct_concepts/x-ray_concept/.
12. **Mehran Yazdi, and Luc Beaulieu.** Artifacts in Spiral X-ray CT Scanners: Problems and solutions. *International Journal of Biological and Medical Sciences*. 2008, Vols. 3: 135-139.
13. **Lee, Dr. Ryan D.** *Common Image Artifacts in Cone Beam CT*. San Antonio, TX : University of Texas Health Science Center, 2008.
14. **Keat, Julia F. Barert and Nicholas.** Artifacts in CT: Recognition and Avoidance. *RadioGraphics*. Nov 2004, Vols. 24:1679-1691.
15. **Buzug, Thorsten M.** Image Quality and Artifacts. *Computed Tomography From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2008.
16. **Evaleigh, R.J.** A review of biomechanical studies of intramedullary nails. *Med. Eng. Phys.* s.l. : Elsevier Science Ltd, 1995. Vols. 17: 323-331.
17. **C.J. Wang, C.J. Brown, A.L. Yettram, P. Procter.** Intramedullary nails: some design features of the distal end. *Medical Engineering and Physics*. s.l. : Elsevier , 2003. Vols. 25: 789-794.
18. *Zimmer*. [Online] [Cited: 5 17, 2011.] <http://www.zimmerindia.com/z/ctl/op/global/action/1/id/9373/template/MP/prcat/M7/prod/y>.
19. **Angel Perez, Andrew Mahar, Charles Negus, Peter Newton, Tm Impelluso.** A computational evaluation of the effect of intramedullary nail material properties on

- the stabilization of simulated femoral shaft fractures. *Medical Engineering and Physics*. s.l. : Elsevier, 2008. Vols. 30: 755-760.
20. 3D modeling. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 4 13, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/3D_modeling.
 21. 3D computer graphics. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 4 3, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/3D_computer_graphics.
 22. 3D rendering. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 5, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/3D_rendering.
 23. Wire-frame model. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 5 10, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Wire-frame_model.
 24. Wireframe Models. [Online] [Cited: 5 10, 2011.] <http://www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs3621/NOTES/model/wireframe.html>.
 25. Polygon mesh. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 15, 2011.]
 26. **Θ. Θεοχάρης, Α. Μπεμ.** Μοντέλα και Δομές Παράστασης Αντικειμένων. *Γραφικά, Αρχές και Αλγόριθμοι*. Αθήνα : ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1999.
 27. Implicit surface. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 20, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Implicit_surface.
 28. Voxel. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 15, 2011.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Voxel>.
 29. Constructive Solid Geometry. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 5 17, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Constructive_solid_geometry.
 30. 3D scanner. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 5 29, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner.
 31. [Online] [Cited: 6 15, 2011.] http://www.tradekorea.com/product-detail/P00267354/3D_Scanner_XL3DS_L1.html.
 32. **Τοπαλής, Φ.Β.** *ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑ, Βασικές αρχές φωτομετρίας και μελέτες φωτισμού*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
 33. **al., He X.D. et.** A Comprehensive Physical Model for Light Reflection. *ACM Computer Graphics*. 1991, Vols. 25(4) pp.175-186.
 34. **Θ. Θεοχάρης, Α. Μπεμ.** Μοντέλα και αλγόριθμοι φωτισμού. *Γραφικά, Αρχές και Αλγόριθμοι*. Αθήνα : ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1999.
 35. **Foley J.D., A. van Dam, S.K. Feiner & J.F. Hughes.** *Computer Graphics, Principles and Practice*. s.l. : Addison-Wesley, 1991.
 36. **(Ed), V.H. Pitt.** *The Penguin Dictionary of Physics*. s.l. : Penguin, 1978.
 37. Reflection (Physics). *Wikipedia*. [Online] [Cited: 6 20, 2011.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_\(physics\)#cite_ref-y_0-0](http://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_(physics)#cite_ref-y_0-0).
 38. Phong shading. *Wikipedia*. [Online] [Cited: 5 25, 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Phong_shading.
 39. Phong Shading and Gouraud Shading. [Online] [Cited: 6 1, 2011.] <http://www.nbb.cornell.edu/neurobio/land/oldstudentprojects/cs490-95to96/guo/report.html#refer>.
 40. **B.T., Phong.** Illumination for Computer Generated Pictures. *Comm. ACM*. 1975, Vols. 23, pp.311-317.
 41. **J., Warnock.** *Hidden-surface Algorithm for Computer Generated Half-Tone Pictures*. Salt Lake City : Dept of Computer Science, University of Utah, 1969.
 42. **H., Gouraud.** Continuous Shading of Curved Surfaces. *IEEE Transactions on Computers*. 1971, Vols. C-20, pp.623-628.
 43. *A Solution to the Hidden Surface Problem.*, **Newell M.E., R.G. Newell & T.L.Sancha**. s.l. : ACM National Conference, 1972. pp. 443-450.

44. **Blinn J.F., M.E. Newell.** Texture and Reflection in Computer Generated Images. *Comm. ACM.* 1976, Vol. 19(10), pp. 542-547.
45. **J.F., Blinn.** Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. *ACM Computer Graphics.* 1977, Vol. 11(2), pp. 192-198.
46. **Greenberg, kay D.S.& D.P.** Transparency for Computer Synthesized Images. *ACM Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH '79).* 1979, pp. 158-164.
47. **T., Whitted.** An Improved Illumination Model for Shaded Display. *Comm. ACM.* 1980, Vol. 23(6), pp.343-349.
48. **Greenberg, Hall R.A. & D.P.** A Testbed for Realistic Image Synthesis. *IEEE Computer Graphics & Applications.* 1983, Vol. 3(8), pp.10-20.
49. **Torrance, Cook R.& K.** A reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics.* January 1982, Vol. 1(1), 7-24.
50. **Wyvill, Overveld C.W.A.M. & B.** Phong Normal Interpolation Revisited. *ACM Transactions on Graphics.* October 1997, Vol. 16(4), pp.397-419.
51. Shadow mapping. *Wikipedia.* [Online] [Cited: 6 10, 2011.]
http://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_mapping.
52. *Shadow mapping: GPU-based Tips and Techniques.* **Isidoro, John R.** San Jose, California : s.n., 20-24 March,2006.
53. *Shadow Mapping with Today's OpenGL Hardware.* **Kilgard, Mark J.** Tokyo : s.n., 2001.
54. **Sanglard, Fabien.** ShadowMapping with GLSL. [Online] [Cited: 3 17, 2011.]
<http://www.fabiensanglard.net/shadowmapping/index.php>.

Παράρτημα Α

“Main”

```
#ifdef _WIN32
#include "windows.h"
#endif

#include "GLUT/glut.h"

#ifdef _WIN32
#include "glex.h"
#endif

#include <stdio.h>

#ifdef _WIN32
// As microsoft did not maintain OpenGL after version 1.1, Windows platform need to
// go through this crap ; macosX and Linux are fine.
// This block simply retries OpenGL function needed for this example.
// I recommend to use GLEW instead of going this way. This is done this way only to
// ease beginner's compilation and portability

PFNGLACTIVETEXTUREARBPROC glActiveTextureARB;

// FrameBuffer (FBO) gen, bin and texturebind
PFNGLGENFRAMEBUFFERSEXTPROC glGenFramebuffersEXT ;
PFNGLBINDFRAMEBUFFERSEXTPROC glBindFramebufferEXT ;
PFNGLFRAMEBUFFERTEXTURE2DEXTPROC glFramebufferTexture2DEXT ;
PFNGLCHECKFRAMEBUFFERSTATUSSEXTPROC
glCheckFramebufferStatusEXT ;

// Shader functions
PFNGLCREATEPROGRAMOBJECTARBPROC glCreateProgramObjectARB ;
PFNGLUSEPROGRAMOBJECTARBPROC glUseProgramObjectARB ;
PFNGLCREATESHADEROBJECTARBPROC glCreateShaderObjectARB ;
PFNGLSHADERSOURCEARBPROC glShaderSourceARB ;
PFNGLCOMPILESHADERARBPROC glCompileShaderARB ;
PFNGLGETOBJECTPARAMETERIVARBPROC glGetObjectParameterivARB;
PFNGLATTACHOBJECTARBPROC glAttachObjectARB ;
PFNGLLINKPROGRAMARBPROC glLinkProgramARB ;
PFNGLGETUNIFORMLOCATIONARBPROC glGetUniformLocationARB ;
PFNGLUNIFORM1IARBPROC glUniform1iARB ;
PFNGLACTIVETEXTUREARBPROC glActiveTextureARB;
PFNGLGETINFOLOGARBPROC glGetInfoLogARB ;

void getOpenGLFunctionPointers(void)
{
```

```

// FBO
glActiveTextureARB =
(PFNGLACTIVETEXTUREARBPROC)wglGetProcAddress("glActiveTextureARB"
);
glGenFramebuffersEXT =
(PFNGLGENFRAMEBUFFERSEXTPROC)
wglGetProcAddress("glGenFramebuffersEXT");
glBindFramebufferEXT =
(PFNGLBINDFRAMEBUFFEREXTPROC)
wglGetProcAddress("glBindFramebufferEXT");
glFramebufferTexture2DEXT =
(PFNGLFRAMEBUFFERTEXTURE2DEXTPROC)wglGetProcAddress("glFramebu
fferTexture2DEXT");
glCheckFramebufferStatusEXT =
(PFNGLCHECKFRAMEBUFFERSTATUSSEXTPROC)wglGetProcAddress("glChec
kFramebufferStatusEXT");

//Shaders
glCreateProgramObjectARB =
(PFNGLCREATEPROGRAMOBJECTARBPROC)wglGetProcAddress("glCreatePro
gramObjectARB");
glUseProgramObjectARB =
(PFNGLUSEPROGRAMOBJECTARBPROC)wglGetProcAddress("glUseProgramO
bjectARB");
glCreateShaderObjectARB =
(PFNGLCREATESHADEROBJECTARBPROC)wglGetProcAddress("glCreateShad
erObjectARB");
glShaderSourceARB =
(PFNGLSHADERSOURCEARBPROC)wglGetProcAddress("glShaderSourceARB")
;
glCompileShaderARB =
(PFNGLCOMPILESHADERARBPROC)wglGetProcAddress("glCompileShaderAR
B");
glGetObjectParameterivARB =
(PFNGLGETOBJECTPARAMETERIVARBPROC)wglGetProcAddress("glGetObje
ctParameterivARB");
glAttachObjectARB =
(PFNGLATTACHOBJECTARBPROC)wglGetProcAddress("glAttachObjectARB");
glGetInfoLogARB =
(PFNGLGETINFOLOGARBPROC)wglGetProcAddress("glGetInfoLogARB");
glLinkProgramARB =
(PFNGLLINKPROGRAMARBPROC)wglGetProcAddress("glLinkProgramARB");
glGetUniformLocationARB =
(PFNGLGETUNIFORMLOCATIONARBPROC)wglGetProcAddress("glGetUnifor
mLocationARB");
glUniform1iARB =
(PFNGLUNIFORM1IARBPROC)wglGetProcAddress("glUniform1iARB");

}
#endif

```



```

// Expressed as float so gluPerspective division returns a float and not 0 (640/480 !=
640.0/480.0).
#define RENDER_WIDTH 640.0
#define RENDER_HEIGHT 480.0
#define SHADOW_MAP_RATIO 2

//Camera position
float p_camera[3] = {32,20,0};

//Camera lookAt
float l_camera[3] = {2,0,-10};

//Light position
float p_light[3] = {3,20,0};

//Light lookAt
float l_light[3] = {0,0,-5};

//Light mouvement circle radius
float light_mvnt = 30.0f;

// Hold id of the framebuffer for light POV rendering
GLuint fboId;

// Z values will be rendered to this texture when using fboId framebuffer
GLuint depthTextureId;

// Use to activate/disable shadowShader
GLhandleARB shadowShaderId;
GLuint shadowMapUniform;

// Loading shader function
GLhandleARB loadShader(char* filename, unsigned int type)
{
    FILE *pfile;
    GLhandleARB handle;
    const GLcharARB* files[1];

    // shader Compilation variable
    GLint result; // Compilation code result
    GLint errorLoglength ;
    char* errorLogText;
    GLsizei actualErrorLogLength;

    char buffer[400000];

```

```

memset(buffer,0,400000);

// This will raise a warning on MS compiler
pfile = fopen(filename, "rb");
if(!pfile)
{
    printf("Sorry, can't open file: '%s'.\n", filename);
    exit(0);
}

fread(buffer,sizeof(char),400000,pfile);
//printf("%s\n",buffer);

fclose(pfile);

handle = glCreateShaderObjectARB(type);
if (!handle)
{
    //We have failed creating the vertex shader object.
    printf("Failed creating vertex shader object from file: %s.",filename);
    exit(0);
}

files[0] = (const GLcharARB*)buffer;
glShaderSourceARB(
                                handle, //The handle to our shader
                                1, //The number of files.
                                files, //An array of const char * data, which
represents the source code of theshaders
                                NULL);

glCompileShaderARB(handle);

//Compilation checking.
glGetObjectParameterivARB(handle,
GL_OBJECT_COMPILE_STATUS_ARB, &result);

// If an error was detected.
if (!result)
{
    //We failed to compile.
    printf("Shader '%s' failed compilation.\n",filename);

    //Attempt to get the length of our error log.
    glGetObjectParameterivARB(handle,
GL_OBJECT_INFO_LOG_LENGTH_ARB, &errorLoglength);

    //Create a buffer to read compilation error message
    errorLogText = malloc(sizeof(char) * errorLoglength);

```

```

        //Used to get the final length of the log.
        glGetInfoLogARB(handle, errorLogLength, &actualErrorLogLength,
errorLogText);

        // Display errors.
        printf("%s\n",errorLogText);

        // Free the buffer malloced earlier
        free(errorLogText);
    }

    return handle;
}

void loadShadowShader()
{
    GLhandleARB vertexShaderHandle;
    GLhandleARB fragmentShaderHandle;

    vertexShaderHandle =
loadShader("VertexShader.c",GL_VERTEX_SHADER);
    fragmentShaderHandle =
loadShader("FragmentShader.c",GL_FRAGMENT_SHADER);

    shadowShaderId = glCreateProgramObjectARB();

    glAttachObjectARB(shadowShaderId,vertexShaderHandle);
    glAttachObjectARB(shadowShaderId,fragmentShaderHandle);
    glLinkProgramARB(shadowShaderId);

    shadowMapUniform =
glGetUniformLocationARB(shadowShaderId,"ShadowMap");
}

void generateShadowFBO()
{
    int shadowMapWidth = RENDER_WIDTH * SHADOW_MAP_RATIO;
    int shadowMapHeight = RENDER_HEIGHT * SHADOW_MAP_RATIO;

    //GLfloat borderColor[4] = {0,0,0,0};

    GLenum FBOstatus;

    // Try to use a texture depth component
    glGenTextures(1, &depthTextureId);
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, depthTextureId);

    // GL_LINEAR does not make sense for depth texture. However, next tutorial
shows usage of GL_LINEAR and PCF

```

```

        glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER,
GL_NEAREST);
        glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER,
GL_NEAREST);

        // Remove artefact on the edges of the shadowmap
        glTexParameterf( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S,
GL_CLAMP );
        glTexParameterf( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T,
GL_CLAMP );

        //glTexParameterfv( GL_TEXTURE_2D,
GL_TEXTURE_BORDER_COLOR, borderColor );

        // No need to force GL_DEPTH_COMPONENT24, drivers usually give you
the max precision if available
        glTexImage2D( GL_TEXTURE_2D, 0, GL_DEPTH_COMPONENT,
shadowMapWidth, shadowMapHeight, 0, GL_DEPTH_COMPONENT,
GL_UNSIGNED_BYTE, 0);
        glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, 0);

        // create a framebuffer object
        glGenFramebuffersEXT(1, &fboId);
        glBindFramebufferEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT, fboId);

        // Instruct OpenGL that we won't bind a color texture with the currently binded
FBO
        glDrawBuffer(GL_NONE);
        glReadBuffer(GL_NONE);

        // attach the texture to FBO depth attachment point
        glFramebufferTexture2DEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT,
GL_DEPTH_ATTACHMENT_EXT, GL_TEXTURE_2D, depthTextureId, 0);

        // check FBO status
        FBOstatus = glCheckFramebufferStatusEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT);
        if(FBOstatus != GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE_EXT)
            printf("GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE_EXT failed, CANNOT
use FBO\n");

        // switch back to window-system-provided framebuffer
        glBindFramebufferEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT, 0);
    }

void setupMatrices(float position_x, float position_y, float position_z, float
lookAt_x, float lookAt_y, float lookAt_z)
{
    glMatrixMode(GL_PROJECTION);

```

```

    glLoadIdentity();
    gluPerspective(45,RENDER_WIDTH/RENDER_HEIGHT,10,40000);
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glLoadIdentity();
    gluLookAt(position_x,position_y,position_z,lookAt_x,lookAt_y,lookAt_z,0,1
,0);
}

```

// This update only change the position of the light.

```
//int elapsedTimeCounter = 0;
```

```
void update(void)
```

```
{
```

```
    p_light[0] = light_mvnt * cos(glutGet(GLUT_ELAPSED_TIME)/1000.0);
```

```
    p_light[2] = light_mvnt * sin(glutGet(GLUT_ELAPSED_TIME)/1000.0);
```

```
    //p_light[0] = light_mvnt * cos(3652/1000.0);
```

```
    //p_light[2] = light_mvnt * sin(3652/1000.0);
```

```
}
```

```
void setTextureMatrix(void)
```

```
{
```

```
    static double modelView[16];
```

```
    static double projection[16];
```

```
    // This is matrix transform every coordinate x,y,z
```

```
    // x = x* 0.5 + 0.5
```

```
    // y = y* 0.5 + 0.5
```

```
    // z = z* 0.5 + 0.5
```

```
    // Moving from unit cube [-1,1] to [0,1]
```

```
    const GLdouble bias[16] = {
```

```
        0.5, 0.0, 0.0, 0.0,
```

```
        0.0, 0.5, 0.0, 0.0,
```

```
        0.0, 0.0, 0.5, 0.0,
```

```
    0.5, 0.5, 0.5, 1.0};
```

```
    // Grab modelview and transformation matrices
```

```
    glGetDoublev(GL_MODELVIEW_MATRIX, modelView);
```

```
    glGetDoublev(GL_PROJECTION_MATRIX, projection);
```

```
    glMatrixMode(GL_TEXTURE);
```

```
    glActiveTextureARB(GL_TEXTURE7);
```

```
    glLoadIdentity();
```

```
    glLoadMatrixd(bias);
```

```
    // concatating all matrice into one.
```

```

    glMultMatrixd (projection);
    glMultMatrixd (modelView);

    // Go back to normal matrix mode
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
}

// During translation, we also have to maintain the GL_TEXTURE8, used in the
shadow shader
// to determine if a vertex is in the shadow.
void startTranslate(float x,float y,float z)
{
    glPushMatrix();
    glTranslatef(x,y,z);

    glMatrixMode(GL_TEXTURE);
    glActiveTextureARB(GL_TEXTURE7);
    glPushMatrix();
    glTranslatef(x,y,z);
}

void endTranslate()
{
    glPopMatrix();
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glPopMatrix();
}

void drawObjects(void)
{
    // Ground
    glColor4f(0.3f,0.3f,0.3f,1);
    glBegin(GL_QUADS);
    glVertex3f(-35,2,-35);
    glVertex3f(-35,2, 15);
    glVertex3f( 15,2, 15);
    glVertex3f( 15,2,-35);
    glEnd();

    glColor4f(0.9f,0.9f,0.9f,1);

    // Instead of calling glTranslatef, we need a custom function that also maintain
the light matrix
    startTranslate(0,4,-16);
    glutSolidCube(4);
    endTranslate();

    startTranslate(0,4,-5);
    glutSolidCube(4);
    endTranslate();
}

```

```

}

void renderScene(void)
{
    update();

    //First step: Render from the light POV to a FBO, store depth values only
    glBindFramebufferEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT, fboId);
    //Rendering offscreen

    //Using the fixed pipeline to render to the depthbuffer
    glUseProgramObjectARB(0);

    // In the case we render the shadowmap to a higher resolution, the viewport
    must be modified accordingly.
    glViewport(0,0,RENDER_WIDTH *
SHADOW_MAP_RATIO,RENDER_HEIGHT* SHADOW_MAP_RATIO);

    // Clear previous frame values
    glClear( GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

    //Disable color rendering, we only want to write to the Z-Buffer
    glColorMask(GL_FALSE, GL_FALSE, GL_FALSE, GL_FALSE);

    setupMatrices(p_light[0],p_light[1],p_light[2],l_light[0],l_light[1],l_light[2]);

    // Culling switching, rendering only backface, this is done to avoid self-
    shadowing
    glCullFace(GL_FRONT);
    drawObjects();

    //Save modelview/projection matrices into texture7, also add a bias
    setTextureMatrix();

    // Now rendering from the camera POV, using the FBO to generate shadows
    glBindFramebufferEXT(GL_FRAMEBUFFER_EXT,0);

    glViewport(0,0,RENDER_WIDTH,RENDER_HEIGHT);

    //Enabling color write (previously disabled for light POV z-buffer rendering)
    glColorMask(GL_TRUE, GL_TRUE, GL_TRUE, GL_TRUE);

    // Clear previous frame values
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

    //Using the shadow shader
    glUseProgramObjectARB(shadowShaderId);

```

```

glUniform1iARB(shadowMapUniform,7);
glActiveTextureARB(GL_TEXTURE7);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D,depthTextureId);

    setupMatrices(p_camera[0],p_camera[1],p_camera[2],l_camera[0],l_camera[1
],l_camera[2]);

    glCullFace(GL_BACK);
    drawObjects();

    // DEBUG only. this piece of code draw the depth buffer onscreen
    /*
    glUseProgramObjectARB(0);
    glMatrixMode(GL_PROJECTION);
    glLoadIdentity();
    glOrtho(-RENDER_WIDTH/2,RENDER_WIDTH/2,-
RENDER_HEIGHT/2,RENDER_HEIGHT/2,1,20);
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glLoadIdentity();
    glColor4f(1,1,1,1);
    glActiveTextureARB(GL_TEXTURE0);
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D,depthTextureId);
    glEnable(GL_TEXTURE_2D);
    glTranslated(0,0,-1);
    glBegin(GL_QUADS);
    glTexCoord2d(0,0);glVertex3f(0,0,0);
    glTexCoord2d(1,0);glVertex3f(RENDER_WIDTH/2,0,0);

glTexCoord2d(1,1);glVertex3f(RENDER_WIDTH/2,RENDER_HEIGHT/2,0);
    glTexCoord2d(0,1);glVertex3f(0,RENDER_HEIGHT/2,0);

    glEnd();
    glDisable(GL_TEXTURE_2D);
    */

    glutSwapBuffers();
}

void processNormalKeys(unsigned char key, int x, int y) {

    if (key == 27)
        exit(0);
}

```



```

int main(int argc, char** argv)
{
    glutInit(&argc, argv);
    glutInitDisplayMode(GLUT_RGBA | GLUT_DOUBLE | GLUT_ALPHA |
GLUT_DEPTH);
    glutInitWindowPosition(100,100);
    glutInitWindowSize(RENDER_WIDTH,RENDER_HEIGHT);
    glutCreateWindow("GLSL Shadow mapping");

    // This call will grab OpenGL extension function pointers.
    // This is not necessary for macosx and linux
#ifdef _WIN32
    getOpenGLFunctionPointers();
#endif
    generateShadowFBO();
    loadShadowShader();

    // This is important, if not here, FBO's depthbuffer won't be populated.
    glEnable(GL_DEPTH_TEST);
    glClearColor(0,0,0,1.0f);

    glEnable(GL_CULL_FACE);

    glHint(GL_PERSPECTIVE_CORRECTION_HINT, GL_NICEST);

    glutDisplayFunc(renderScene);
    glutIdleFunc(renderScene);

    glutKeyboardFunc(processNormalKeys);

    glutMainLoop();
}

```

“FragmentShader”

```

uniform sampler2D ShadowMap;

varying vec4 ShadowCoord;

void main()
{
    vec4 shadowCoordinateWdivide = ShadowCoord / ShadowCoord.w ;

    // Used to lower moiré pattern and self-shadowing
    shadowCoordinateWdivide.z += 0.0005;
}

```

```

    float distanceFromLight =
texture2D(ShadowMap,shadowCoordinateWdivide.st).z;

    float shadow = 1.0;
    if (ShadowCoord.w > 0.0)
        shadow = distanceFromLight < shadowCoordinateWdivide.z ? 0.5 :
1.0 ;

    gl_FragColor =      shadow * gl_Color;

}

```

“VertexShader”

```

// Used for shadow lookup
varying vec4 ShadowCoord;

void main()
{

    ShadowCoord= gl_TextureMatrix[7] * gl_Vertex;

    gl_Position = ftransform();

    gl_FrontColor = gl_Color;

}

```