



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΣΥΣΧΕΤΙΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

# Μοντελοποίηση Ακτινογραφικού Συστήματος C-Arm για την υποβοήθηση σε Εγχειρήσεις Κλειστών Ενδομυελικών Ηλώσεων

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Ιωαννίδης

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  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΣΥΣΧΕΤΙΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

# Μοντελοποίηση Ακτινογραφικού Συστήματος C-Arm για την υποβοήθηση σε Εγχειρήσεις Κλειστών Ενδομυελικών Ηλώσεων

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Ιωαννίδης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Ιουνίου 2011.

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

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

.....  
Γεώργιος Καμπουράκης  
Μέλος Δ.Ε.Π.  
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2011

.....

Γεώργιος Π. Ιωαννίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών  
Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Copyright © Γεώργιος Π. Ιωαννίδης, 2011

Copyright © Παντελής Πρεντάκης, 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

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδων μοντελοποίησης ακτινογραφικών συστημάτων C-arm για την υποβοήθηση της τοποθέτησης ασφαλιζόμενων ενδομυελικών ήλων σε ορθοπεδικές χειρουργικές επεμβάσεις. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την εύρεση θέσης μακρινών οπών ενδομυελικών ήλων με χρήση ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm, διαδικασία εξαιρετικά δύσκολη, χρονοβόρα και πιθανόν επικίνδυνη για τον ασθενή λόγω της παρατεταμένης έκθεσης σε ακτινοβολία Χ. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίζεται στην εικονική αναπαράσταση της διάταξης του C-arm και του ενδομυελικού ήλου. Δημιουργείται βάση εικονικών στιγμιοτύπων του συστήματος, προκειμένου να παρέχονται κατάλληλες κατευθύνσεις στον χειρουργό ιατρό προς διευκόλυνση της εγχειρητικής διαδικασίας.

Για τον σκοπό αυτό, έγινε αναλυτική μελέτη των γεωμετρικών ιδιοτήτων των σύγχρονων ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm. Επίσης, μελετήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο αναπτυχθέν μοντέλο οι τυπικές μετακινήσεις και περιστροφές που μπορούν να εκτελέσουν τα C-arm. Ως μοντέλο εκπομπής ακτίνων Χ του ακτινογραφικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο κωνικής εκπομπής, σύμφωνα με το οποίο οι ακτίνες έχουν κοινό σημείο φυγής (κωνική ακτινοβολία). Παράλληλα, αναπτύχθηκε βελτιωμένη τριδιάστατη μοντελοποίηση του ενδομυελικού ήλου με χρήση δύο οπών.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να γίνει οδηγός για χειρουργούς ιατρούς, καθώς παρέχονται κατευθύνσεις για την εφαρμογή κατάλληλων διαδοχικών μετακινήσεων και περιστροφών του C-arm, προκειμένου να εντοπιστεί η επιθυμητή γωνία θέασης του ενδομυελικού ήλου. Μπορεί επίσης να αποτελέσει βάση για μελλοντική έρευνα και βελτίωση του υπάρχοντος μοντέλου, αφού μελετήθηκαν σύγχρονες τάσεις μοντελοποίησης φωτισμού καθώς επίσης και κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των C-arm.

## Λέξεις Κλειδιά

μοντελοποίηση τριδιάστατων αντικειμένων, εύρεση θέσης μακρινών οπών ήλων, κωνική ακτινοβολία C-arm, χειρουργικές επεμβάσεις κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων

# Abstract

The purpose of this Thesis is the development of C-arm radiography systems modeling methods for assisting in the placement of locking intramedullary nails in long-bone orthopedic surgeries. This method is applied in intramedullary nail distal interlocking screw placement by using C-arm radiological systems, a process which is difficult, time-consuming and probably dangerous for the patient due to prolonged exposure to X-ray radiation. The development of the model is based on virtual simulation of the C-arm and the intramedullary nail. A database containing virtual snapshots of the system is generated, which will assist the surgeon during the surgical procedure.

For this purpose, an in-depth study has been conducted on the typical geometric properties of modern C-arm radiography systems. Moreover, the typical translations and rotations that C-arm systems can perform have been studied and integrated in the developed model. The cone-beam projection model, according to which the rays stem from a common vanishing point (cone-beam radiation), has been used to model the C-arm X-ray emission system. At the same time, an improved three-dimensional model of the intramedullary nail has been developed by using two holes.

This method can be used as a guide for surgeons, since directions are given on the application of consecutive translations and rotations of the C-arm, in order to find the desired viewing angle of the intramedullary nail. It can also be used as a basis for future research and improvement of the current model, since modern trends in light modeling and C-arm construction features have been studied.

## Key Words

3D object modeling, distal screw placement, cone-beam C-arm radiation, closed intramedullary nailing of long-bone fractures

# Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Πολυθεματικής και Γεωσυσχετισμένης Πληροφορίας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Την επίβλεψη της εργασίας την είχε ο κ. Ηλίας Κουκούτσης, επίκουρος καθηγητής της Σχολής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κουκούτση, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε την Διπλωματική αυτή Εργασία και μου προσέφερε μία θέση στο υπό την καθοδήγησή του περιβάλλον του Εργαστηρίου, εξασφαλίζοντάς μου πρόσβαση σε γνώση και τεχνολογία και επαφή με την επιστημονική κοινότητα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Υποψήφιο Διδάκτορα Παντελή Πρεντάκη για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του, καθώς μεγάλο μέρος της προηγούμενης εργασίας στον παρόν ερευνητικό χώρο είχε υλοποιηθεί από τον ίδιο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους Υποψήφιους Διδάκτορες Γιαννόπουλο Φώτη και Ζάννο Σόλων, την ερευνητική ομάδα του κ. Κωνσταντίνου Παπαοδυσσέως αλλά και τον ίδιο προσωπικά, για την υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας αυτής.

Τέλος, και με αφορμή την ολοκλήρωση των σπουδών μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Παναγιώτη και Πωλίνα, καθώς και στην αδερφή μου, Άννα, για την κάθε είδους υποστήριξή τους, την διαρκή ενθάρρυνσή τους αλλά και την ηθική συμπαράσταση που έδειξαν κατά την διάρκεια της Διπλωματικής μου Εργασίας και των σπουδών μου γενικότερα.

# Πίνακας Περιεχομένων

<u>Πίνακας Περιεχομένων</u> .....	8
<u>Κατάλογος Σχημάτων</u> .....	11
<u>Κεφάλαιο 1</u> .....	14
<u>Εισαγωγή</u> .....	14
<u>1.1. Σκοπός της εργασίας</u> .....	14
<u>1.2. Περιγραφή της δομής της συγγραμμένης εργασίας</u> .....	15
<u>Κεφάλαιο 2</u> .....	16
<u>Σύντομη αναφορά στο ιατρικό πρόβλημα - Το πρόβλημα που προκύπτει από την κωνική εκπομπή των ακτίνων Χ</u> .....	16
<u>2.1. Εισαγωγή στο ιατρικό πρόβλημα</u> .....	16
<u>2.2. Περιγραφή ήλου</u> .....	17
<u>2.3. Περιγραφή μεθόδου εφαρμογής της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης</u> .....	17
<u>2.4. Περιγραφή διάταξης C-arm</u> .....	22
<u>2.5. Δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη διαδικασία προσδιορισμού της θέσης και της γωνίας τοποθέτησης του κοχλία στερέωσης στο άκρο του κατάγματος που βρίσκεται μακριά από το σημείο εισχώρησης του ήλου στο οστό</u> .....	23
<u>2.6. Προβλήματα που προκύπτουν από την κωνική εκπομπή των ακτίνων Χ του ακτινογραφικού συστήματος</u> .....	24
<u>Κεφάλαιο 3</u> .....	25
<u>Σύγχρονες εξελίξεις σε θέματα μοντελοποίησης φωτισμού</u> .....	25
<u>3.1. Αλγόριθμοι απόκρυψης</u> .....	25
<u>3.1.1. Αξιοποίηση παράλληλης και προοπτικής προβολής</u> .....	26
<u>3.1.2. Διαγραφή πίσω επιφανειών</u> .....	27
<u>3.1.3. Αλγόριθμοι απόκρυψης ακμών</u> .....	29
<u>3.1.4. Αλγόριθμοι Απόκρυψης Επιφανειών</u> .....	31
<u>3.1.4.1. Αλγόριθμος z-buffer</u> .....	32
<u>3.1.4.2. Ειδικές εφαρμογές z-buffer</u> .....	35
<u>3.1.4.3. Αλγόριθμοι scanline</u> .....	36
<u>3.1.4.4. Αλγόριθμοι λίστας προτεραιότητας</u> .....	37
<u>3.1.4.5. Αλγόριθμοι υποδιαίρεσης επιφάνειας</u> .....	37
<u>3.1.4.6. Σύγκριση των μεθόδων</u> .....	39
<u>3.2. Τεχνικές σκίασης</u> .....	40
<u>3.3. Διαφάνεια (transparency)</u> .....	42
<u>3.3.1. Γραμμικοί αλγόριθμοι διαφάνειας</u> .....	42
<u>3.3.2. Μη-γραμμικοί αλγόριθμοι διαφάνειας</u> .....	44
<u>3.3.2.1. Προσέγγιση με χρήση κανονικού διανύσματος</u> .....	44
<u>3.3.2.2. Προσθήκη συντελεστή διανυθείσας απόστασης</u> .....	46
<u>Κεφάλαιο 4</u> .....	48
<u>Δυσκολίες κατά την διαδικασία της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης που οφείλονται στην κατασκευή του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm</u> .....	48
<u>4.1. Μελέτη μετακινήσεων και περιστροφών του C-arm</u> .....	49
<u>4.1.1. Τυπικές μετακινήσεις και περιστροφές C-arm</u> .....	50
<u>4.1.2. Κύριοι γεωμετρικοί άξονες του C-arm</u> .....	52
<u>4.2. Προβλήματα που ανακύπτουν λόγω των κατασκευαστικών</u>	



<u>ιδιαιτεροτήτων των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm</u> .....	54
<u>4.2.1. Προβλήματα λόγω των γεωμετρικών ιδιαιτεροτήτων των C-arm</u> .....	54
<u>4.2.2. Προβλήματα λόγω των μετακινήσεων των κυρίων αξόνων του C-arm</u> .....	59
<b>Κεφάλαιο 5</b> .....	<b>62</b>
<u>Αποδοτικός τρόπος μοντελοποίησης των ήλων και του</u> <u>συστήματος εκπομπής ακτίνων Χ από C-arm, ειδικά για το</u> <u>συγκεκριμένο πρόβλημα</u> .....	62
<u>5.1. Η μέχρι τώρα εργασία</u> .....	63
<u>5.1.1. Ανάπτυξη προτύπων με συμβατικές μεθόδους</u> .....	63
<u>5.1.2. Πρώτη ανάπτυξη εικονικού μοντέλου ήλου</u> .....	65
<u>5.1.3. Προσδιορισμός των κρίσιμων καμπυλών της οπής</u> .....	68
<u>5.1.4. Μοντέλο παράλληλης προβολής</u> .....	68
<u>5.1.5. Εφαρμογή μοντέλου παράλληλης προβολής</u> .....	69
<u>5.2. Βελτιώσεις απεικόνισης του ήλου</u> .....	72
<u>5.2.1. Αναγκαιότητα προσθήκης δεύτερης οπής</u> .....	72
<u>5.2.2. Διαδικασία προσθήκης δεύτερης οπής στο εικονικό μοντέλο</u> .....	72
<u>5.3. Το σύστημα πηγής φωτός - ήλου - επιπέδου απεικόνισης</u> .....	82
<u>5.3.1. Ανακρίβεια του παράλληλου μοντέλου φωτισμού</u> .....	82
<u>5.3.2. Επισκόπηση του μοντέλου συντρεχουσών ακτίνων</u> .....	83
<u>5.3.3. Ενδελεχής εξέταση του μοντέλου της κωνικής προβολής</u> .....	84
<u>5.3.4. Υλοποίηση μοντέλου σημειακών πηγών ακτίνων Χ με κοινό σημείο</u> <u>φυγής</u> .....	87
<u>5.3.5. Η διάταξη του εικονικού συστήματος</u> .....	92
<u>5.4. Μετακινήσεις και περιστροφές του ήλου και της πηγής - Συσχέτιση</u> <u>με το πραγματικό πρόβλημα</u> .....	93
<u>5.4.1. Παραδοχές σχετικά με τις κινήσεις και τα γεωμετρικά</u> <u>χαρακτηριστικά του C-arm</u> .....	93
<u>5.4.2. Επιλογή βαθμών ελευθερίας του προβλήματος</u> .....	94
<u>5.4.3. Πρόταση βέλτιστης μετακίνησης και περιστροφής του C-arm</u> .....	97
<u>5.4.4. Μαθηματικό υπόβαθρο υλοποίησης μετακινήσεων &amp; περιστροφών</u> <u>αντικειμένου</u> .....	102
<u>5.4.5. Μετακινήσεις και περιστροφές του εικονικού ήλου</u> .....	104
<u>5.5. Προβολή τμήματος του ήλου για την παραγωγή της αναγκαίας</u> <u>εικόνας και ψηφιοποίηση της εικόνας αυτής</u> .....	107
<b>Κεφάλαιο 6</b> .....	<b>112</b>
<u>Εναλλακτική μέθοδος λύσης του προβλήματος στην περίπτωση</u> <u>που ο ήλος παριστάνεται στον υπολογιστή ως σύνολο τριγώνων</u> .....	112
<u>6.1. Επισκόπηση wire-frame μοντέλου</u> .....	112
<u>6.2. Επισκόπηση μοντελοποίησης με επιφάνειες - πολύγωνα</u> .....	113
<u>6.3. Πρόταση εναλλακτικής λύσης του προβλήματος</u> .....	114
<b>Κεφάλαιο 7</b> .....	<b>116</b>
<u>Ενδεικτική παραγωγή βάσης προτύπων με χρήση των</u> <u>αναπτυχθέντων εργαλείων</u> .....	116
<u>7.1. Γραφικό Περιβάλλον διαχείρισης εικονικού μοντέλου του ήλου</u> .....	117
<u>7.1.1. Παραμετροποίηση διαστάσεων ήλου</u> .....	118
<u>7.1.2. Παραμετροποίηση διαστάσεων C-arm</u> .....	119
<u>7.1.3. Παράμετροι παραγωγής προτύπων</u> .....	120
<u>7.1.4. Εργαλεία σχεδίασης εικονικού μοντέλου ήλου, προβολών και</u> <u>προτύπων</u> .....	120
<u>7.2. Παραγωγή ενδεικτικής βάσης προτύπων</u> .....	126

<b>Κεφάλαιο 8</b> .....	<b>128</b>
<u>Συμπεράσματα - Προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση της</u> <u>εργασίας στον συγκεκριμένο τομέα</u> .....	128
8.1. Γενικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.....	128
8.2. Ανάγκη για μελέτη και ανάλυση των προβλημάτων ακτινογραφικής εικόνας του C-arm.....	130
8.3. Πρόταση για έλεγχο της πιστότητας απεικόνισης του C-arm.....	131
8.4. Πιθανή επέκταση των αναπτυχθέντων μοντέλων.....	131
8.4.1. Περαιτέρω εξέταση μοντέλου φωτισμού.....	131
8.4.2. Μοντελοποίηση μερικής διαφάνειας.....	132
8.5. Συνδυασμένη χρησιμοποίηση δύο οπών για βελτίωση των αποτελεσμάτων της εργασίας.....	133
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>134</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τυπική εικόνα ήλου.....	17
Σχήμα 2.2: (a) Ακτινοδιαγνωστική διάταξη C-arm (b) Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού C-arm.....	22
Σχήμα 2.3: Μη ομοιόμορφη κλίση των οπών του ήλου στην ακτινογραφική εικόνα.....	24
Σχήμα 3.1: Το πρόβλημα της απόκρυψης.....	25
Σχήμα 3.2: Ακτίνες προβολής.....	26
Σχήμα 3.3: Ορατές και μη ορατές επιφάνειες.....	27
Σχήμα 3.4: Επίδραση προοπτικής προβολής στις ακτίνες προβολής.....	31
Σχήμα 3.5: Παρεμβολή Z.....	33
Σχήμα 3.6: Γραφική αναπαράσταση δεδομένων ενός z-buffer.....	34
Σχήμα 3.7: Τομή δύο αντικειμένων με επίπεδο $y = y_s$ .....	36
Σχήμα 3.8: Υπολογισμός σκιάς σε επίπεδο.....	41
Σχήμα 3.9: Χρήση NZ στη Διαφάνεια.....	44
Σχήμα 3.10: Αλληλεπίδραση του φωτός με το πλαίσιο οριοθέτησης.....	47
Σχήμα 4.1: Μηχανοκίνητη κατακόρυφη κίνηση βραχίονα.....	50
Σχήμα 4.2: "Wig-wag" κίνηση.....	50
Σχήμα 4.3: Οριζόντια κίνηση βραχίονα.....	51
Σχήμα 4.4: Περιστροφή βραχίονα γύρω από οριζόντιο άξονα.....	51
Σχήμα 4.5: Γωνιακή κίνηση C-arm.....	52
Σχήμα 4.6: Ιδανική γεωμετρική διάταξη των κύριων αξόνων του C-arm.....	55
Σχήμα 4.7: Ενδεικτική τοποθεσία οριζόντιου και γωνιακού άξονα σε πραγματικό C-arm	55
Σχήμα 4.8: Μη απεικόνιση του ήλου λόγω κακής τοποθέτησης του ήλου ως προς τον οριζόντιο άξονα.....	56
Σχήμα 4.9: Μη απεικόνιση του ήλου λόγω κακής γεωμετρικής διάταξης του γωνιακού άξονα.....	57
Σχήμα 4.10: Περιστροφή οριζόντιου (κόκκινου) και γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την "wig-wag" περιστροφή.....	59
Σχήμα 4.11: Μετατόπιση οριζόντιου (κόκκινου) και γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την μηχανοκίνητη κατακόρυφη μετατόπιση.....	59
Σχήμα 4.12: Μετατόπιση γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την μηχανοκίνητη οριζόντια μετατόπιση.....	60
Σχήμα 4.13: Περιστροφή γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την οριζόντια περιστροφή. .	60
Σχήμα 5.1: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο ήλου από C-arm.....	63
Σχήμα 5.2: Ακτινογραφικά στιγμιότυπα οπής ήλου.....	64
Σχήμα 5.3: Αναπαράσταση της εξωτερικής επιφάνειας του ήλου, καθώς και του θαλάμου της οπής.....	66
Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του ήλου, καθώς και του θαλάμου της οπής.....	66
Σχήμα 5.5: Σημειακή απεικόνιση του ήλου και του θαλάμου της οπής.....	67
Σχήμα 5.6: Πρώτο εικονικό μοντέλο ήλου.....	67
Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση του τμήματος της εξωτερικής επιφάνειας του ήλου που αντιστοιχεί στην κυρτή επιφάνεια της οπής.....	68
Σχήμα 5.8: Μοντέλο πηγής παράλληλων ακτίνων X.....	69
Σχήμα 5.9: Θάλαμος ήλου περιστραμμένος κατά $\delta\theta$ ως προς τον x-άξονα.....	69
Σχήμα 5.10: Παράλληλη προβολή των σημείων των ορίων των οπών του θαλάμου του κοχλίου στο επίπεδο προβολής.....	70
Σχήμα 5.11: Τομή των επιφανειών που οριοθετούνται από τις προβολές των ορίων των	

οπών στο επίπεδο X-Y.....	71
Σχήμα 5.12: Μορφή βάσης δεδομένων από στιγμιότυπα οπών του ήλου για διαφορετικές θέσεις του στο χώρο, με χρήση παράλληλης προβολής.....	71
Σχήμα 5.13: Λεπτομέρεια εικόνας ήλου, όπου απεικονίζονται οι δύο οπές.....	72
Σχήμα 5.14: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου πρώτης οπής και κρίσιμα σημεία τομής.....	73
Σχήμα 5.15: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου δεύτερης οπής και κρίσιμα σημεία τομής.....	74
Σχήμα 5.16: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση της δεύτερης εγκάρσιας τομής.....	74
Σχήμα 5.17: Κρίσιμα σημεία τομής εσωτερικού κυλίνδρου ήλου και δεύτερου θαλάμου.	75
Σχήμα 5.18: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση του κυλινδρικού τμήματος του θαλάμου, με τα κρίσιμα σημεία της εσωτερικής τομής.....	75
Σχήμα 5.19: Τελικό τμήμα εσωτερικού κυλίνδρου του ήλου που θα σχεδιαστεί και κρίσιμα σημεία τομής με τους δύο θαλάμους των οπών.....	76
Σχήμα 5.20: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου δεύτερης οπής και κρίσιμα σημεία τομής.....	77
Σχήμα 5.21: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση της δεύτερης εγκάρσιας τομής.....	77
Σχήμα 5.22: Κρίσιμα σημεία τομής εξωτερικού κυλίνδρου ήλου και δεύτερου θαλάμου..	78
Σχήμα 5.23: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση του κυλινδρικού τμήματος του θαλάμου, με τα κρίσιμα σημεία της εξωτερικής τομής.....	78
Σχήμα 5.24: Τελικό τμήμα εξωτερικού κυλίνδρου του ήλου που θα σχεδιαστεί και κρίσιμα σημεία τομής με τους δύο θαλάμους των οπών.....	79
Σχήμα 5.25: Κρίσιμα σημεία τομής εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου ήλου και των θαλάμων των οπών.....	80
Σχήμα 5.26: Τελική μορφή των θαλάμων του ήλου και κρίσιμα σημεία τομής.....	80
Σχήμα 5.27: Τελική μορφή βελτιωμένου εικονικού μοντέλου ήλου.....	81
Σχήμα 5.28: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο ήλου από C-arm με έμφαση στα περιγράμματα των δύο οπών του.....	82
Σχήμα 5.29: Μοντέλο πηγής αποτελούμενης από σημειακές πηγές ακτίνων X με κοινό σημείο φυγής.....	83
Σχήμα 5.30: Προσομοίωση μοντέλου κωνικής προβολής.....	84
Σχήμα 5.31: Σύγκριση κωνικού και παράλληλου μοντέλου προβολής.....	84
Σχήμα 5.32: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν πλησιάζει το επίπεδο προβολής.....	85
Σχήμα 5.33: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν απομακρύνεται από το επίπεδο προβολής.....	85
Σχήμα 5.34: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν η πηγή φωτός δεν βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σημείο συμμετρίας του.....	86
Σχήμα 5.35: Κωνική προβολή με απομακρυσμένη πηγή φωτός & αντίστοιχη παράλληλη προβολή.....	86
Σχήμα 5.36: Παράδειγμα προοπτικής προβολής σημείου P.....	88
Σχήμα 5.37: Εποπτική άποψη του αλγορίθμου υλοποίησης κωνικής προβολής.....	90
Σχήμα 5.38: Η τελική διάταξη ήλου - πηγής φωτός - επιπέδου προβολής.....	92
Σχήμα 5.39: Θέση αναφοράς του ήλου.....	96
Σχήμα 5.40: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο του ήλου, όπου απαιτείται μετακίνηση και περιστροφή του ήλου.....	97
Σχήμα 5.41: Τυχαία τοποθέτηση ήλου στο χώρο.....	99
Σχήμα 5.42: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή X-Y.....	99

Σχήμα 5.43: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή Y-Z.....	100
Σχήμα 5.44: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή X-Z.....	101
Σχήμα 5.45: Τυχαίο στιγμιότυπο των θαλάμων του ήλου.....	107
Σχήμα 5.46: Κωνικές προβολές των περιγραμμάτων του θαλάμου και σημεία τομής τους .....	108
Σχήμα 5.47: Μεσοκάθετη ευθεία κοινής χορδής και σημεία τομής.....	109
Σχήμα 5.48: Κοινή κλειστή επιφάνεια των προβολών των δύο οπών του ίδιου θαλάμου .....	110
Σχήμα 5.49: Τελική προβολή οπής ήλου.....	110
Σχήμα 5.50: Τελικό ακτινογραφικό στιγμιότυπο των δύο οπών του ήλου.....	111
Σχήμα 6.1: Παράδειγμα wire-frame μοντέλου που επιδέχεται πολλαπλές ερμηνείες....	113
Σχήμα 6.2: Παράδειγμα μοντελοποίησης αντικειμένου με πολύγωνα.....	113
Σχήμα 6.3: Κωνική προβολή τριγώνου.....	115
Σχήμα 7.1: Το γραφικό περιβάλλον διαχείρισης του αναπτυσθέντος εργαλείου.....	117
Σχήμα 7.2: Παραμετροποίηση C-argm στο γραφικό περιβάλλον.....	119
Σχήμα 7.3: Σχεδίαση εικονικού μοντέλου ήλου.....	121
Σχήμα 7.4: Εικονικό μοντέλο ήλου με διαφορετική τοποθέτηση των οπών.....	121
Σχήμα 7.5: Εικονικό μοντέλο ήλου με διαφορετική εξωτερική διάμετρο.....	122
Σχήμα 7.6: Σχεδίαση των θαλάμων οπών του ήλου στο χώρο.....	122
Σχήμα 7.7: Σχεδίαση των θαλάμων του ήλου ύστερα από μετακίνηση και περιστροφή στο χώρο.....	123
Σχήμα 7.8: Σχεδίαση των προβολών των περιγραμμάτων των θαλάμων.....	124
Σχήμα 7.9: Σχεδίαση της προβολής των οπών του ήλου.....	125
Σχήμα 7.10: Ενδεικτική βάση δεδομένων.....	127
Σχήμα 8.1: Μοντέλο πηγής, το οποίο αποτελείται από πλέγμα σημειακών πηγών ακτίνων Χ.....	132

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο θα παρουσιασθούν συνοπτικά οι στόχοι της παρούσας εργασίας, το υπό εξέταση πρόβλημα, η εργασία που έχει προηγηθεί καθώς και η δομή των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν.

### 1.1. Σκοπός της εργασίας

Η ασφαλιζόμενη κλειστή ενδομυελική ήλωση χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση συντριπτικών καταγμάτων ανθρωπίνων μακρών οστών, όπως τα οστά του μηρού και της κνήμης. Κατά τη διαδικασία αυτή, τοποθετούνται μεταλλικοί ήλοι εντός των προαναφερθέντων οστών και ασφαλίζονται σταθερά με εισαγωγή κοχλιών, οι οποίοι εισάγονται εκατέρωθεν του κατάγματος.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που συναντάται κατά τις επεμβάσεις ασφαλιζόμενων κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων είναι η εύρεση της επιθυμητής γωνίας θέασης των οπών που φέρουν οι ήλοι, στην οποία εμφανίζονται ως τέλειοι κύκλοι. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για την ορθή εισαγωγή των κοχλιών σταθεροποίησης και η δυσκολία της καθιστά την εγχειρητική διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα και επίπονη.

Στον τομέα αυτό έχουν ήδη προταθεί διάφορες υλοποιήσεις εικονικών μοντέλων για την υποβοήθηση της εγχειρητικής διαδικασίας. Στη Διπλωματική Εργασία του Φ. Γιαννόπουλου<sup>[1]</sup> παρουσιάζεται μία μοντελοποίηση του ήλου και των ακτινογραφικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται με χρήση συστήματος εκπομπής παράλληλων δεσμών ακτίνων Χ. Ωστόσο, ύστερα από κατάλληλη εξέταση, κρίθηκε ότι το παράλληλο μοντέλο φωτισμού απέχει από την πραγματικότητα και ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η εκ νέου μελέτη του μοντέλου φωτισμού που θα υλοποιηθεί.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία νέα, βελτιωμένη μέθοδος για την υποβοήθηση των εγχειρητικών διαδικασιών και την επίλυση του προβλήματος εύρεσης των οπών. Το μοντέλο βασίζεται σε μαθηματική μοντελοποίηση του ακτινογραφικού συστήματος και του ήλου με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλη επέκτασή του, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Μετά την τελειοποίησή του, το αναπτυχθέν σύστημα αναμένεται να είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα και παράλληλα αρκετά αξιόπιστο, ώστε να ενθαρρύνεται η χρήση του κατά τις εγχειρητικές διαδικασίες.

Παράλληλα, πραγματοποιείται μελέτη σε κείριους τομείς της περιοχής των Γραφικών Υπολογιστών, οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν στην ρεαλιστική υλοποίηση ενός εικονικού συστήματος, και διερευνάται κατά πόσον οι δυσκολίες που προκύπτουν οφείλονται στα χρησιμοποιούμενα μέχρι σήμερα ακτινογραφικά μηχανήματα.

## 1.2. Περιγραφή της δομής της συγγεγραμμένης εργασίας

Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

- Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται μία σύντομη εισαγωγή στο ιατρικό πρόβλημα για την καλύτερη κατατόπιση του αναγνώστη. Περιγράφεται ο ενδομυελικός ήλος, η εγχειρητική διαδικασία, το ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm, οι δυσκολίες που προκύπτουν κατά την εγχειρητική διαδικασία, καθώς και το μείζον πρόβλημα που προέκυψε σε προηγούμενες εργασίες.
- Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται σύγχρονες εξελίξεις σε θέματα μοντελοποίησης φωτισμού τα οποία έχουν άμεση συνάφεια με την ανάπτυξη του εικονικού μοντέλου, αλλά και με πιθανή μελλοντική συνέχειά του. Εξετάζονται θέματα απόκρυψης ακμών και επιφανειών, τεχνικές σκίασης και μοντελοποίηση διαφανών αντικειμένων.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ενδελεχής μελέτη των πιο χαρακτηριστικών μοντέλων ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm. Αφενός εξετάζονται οι τυπικές κινήσεις τις οποίες μπορούν να εκτελούν και αφετέρου γίνεται διερεύνηση τυχόν προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν από τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητές τους.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το πλήρες εικονικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε για την υποβοήθηση σε εγχειρητικές διαδικασίες κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη εξέταση της μέχρι τώρα εργασίας που έχει προηγηθεί στον χώρο. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εικονικό μοντέλο του ήλου, η ανεπάρκεια του μοντέλου εκπομπής παράλληλων ακτίνων X, καθώς και η πρόταση ενός εναλλακτικού μοντέλου φωτισμού που βασίζεται στην κωνική, ομοιόμορφη εκπομπή. Τέλος, γίνεται συσχέτιση του εικονικού μοντέλου με το πραγματικό πρόβλημα.
- Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται μία εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος με χρήση διαφορετικού μοντέλου τριδιάστατης απεικόνισης του ήλου και συγκεκριμένα με χρήση πολυγώνων.
- Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αναπτυχθέντα εργαλεία διαχείρισης του εικονικού μοντέλου και παράγεται μία ενδεικτική βάση προτύπων.
- Στο Κεφάλαιο 8 αναλύονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, παρουσιάζονται θέματα που χρήζουν μελλοντικής έρευνας γύρω από τα ακτινογραφικά μηχανήματα C-arm, μελλοντικές επεκτάσεις των αναπτυχθέντων μοντέλων, καθώς και πρόταση για συνδυασμένη χρήση δύο οπών για εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

## Κεφάλαιο 2

### Σύντομη αναφορά στο ιατρικό πρόβλημα - Το πρόβλημα που προκύπτει από την κωνική εκπομπή των ακτίνων Χ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύντομη αναφορά στο ιατρικό πρόβλημα, για εξοικείωση του αναγνώστη σχετικά με την πρακτική εφαρμογή η οποία θα αποτελέσει αντικείμενο υποβοήθησης του αναπτυχθέντος εικονικού μοντέλου, καθώς και για την κατανόηση της μοντελοποίησης που θα περιγραφεί σε επόμενα κεφάλαια.

Θα γίνει επίσης σύντομη αναφορά σε προηγούμενη σχετική εργασία και του βασικού προβλήματος που προέκυψε, το οποίο και αποτέλεσε το έναυσμα της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

#### 2.1. Εισαγωγή στο ιατρικό πρόβλημα

Η συνεχής προσπάθεια του ανθρώπου να ανεβάσει το βιοτικό του επίπεδο και την ποιότητα ζωής του, έχει οδηγήσει στην, ολοένα και αυξανόμενη, πρόοδο της ιατρικής επιστήμης. Η τελευταία, για να καλύψει τις ανάγκες της χρησιμοποιεί εργαλεία, τα οποία με το πέρασμα του χρόνου εξελίσσονται και πληθαίνουν.

Εστιάζοντας σε επί μέρους τομείς, γίνεται φανερή η συμβολή των εργαλείων αυτών στην ορθοπεδική, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αποκατάστασης καταγμάτων των οστών. Τα συντριπτικά κατάγματα αποτελούν ειδική κατηγορία αυτών. Συνοπτικά, συνιστανται σε θρυμματισμό τμήματος ή τμημάτων των μακρών οστών.

Η ιδιαιτερότητα αυτής της κατηγορίας των καταγμάτων αποκλείει την αντιμετώπισή τους με παραδοσιακές πρακτικές (τοποθέτηση νάρθηκα, γύψου), οι οποίες αποδεικνύονται ακόμη και επιζήμιες κατά περιπτώσεις<sup>[2][3]</sup>. Αντί αυτών προτείνεται η τοποθέτηση ενδομυελώδους ράβδου. Με αυτή τη μέθοδο, όχι μόνο προλαμβάνονται τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή των παραδοσιακών πρακτικών<sup>[4]</sup>, αλλά επιτρέπεται στον ασθενή να επιστρέψει στις δραστηριότητές του σε σύντομο χρόνο<sup>[2]</sup>. Αξιοσημείωτα είναι, τέλος, τα υψηλά ποσοστά επιτυχία της μεθόδου που ανέρχονται σε 95-98%<sup>[5]</sup>.



## 2.2. Περιγραφή ήλου

Ο ήλος είναι μια κοίλη χαλύβδινη κυλινδρική ράβδος, η οποία στο κάθε άκρο φέρει δύο ή περισσότερες οπές. Η σχεδίαση της ράβδου και οι προδιαγραφές του υλικού της ανταποκρίνονται αυστηρά στις απαιτήσεις της χρήσης για την οποία προορίζεται ο ήλος.

Συνήθως επιλέγεται σαν υλικό ανοξείδωτος χάλυβας<sup>[4]</sup>, που προσδίδει αφενός μεν την απαραίτητη αντοχή και αφετέρου μετά από κατάλληλη επεξεργασία αδρανοποιείται επιφανειακά ο ήλος για την αποφυγή ανεπιθύμητων διαβρώσεων<sup>[2]</sup>.

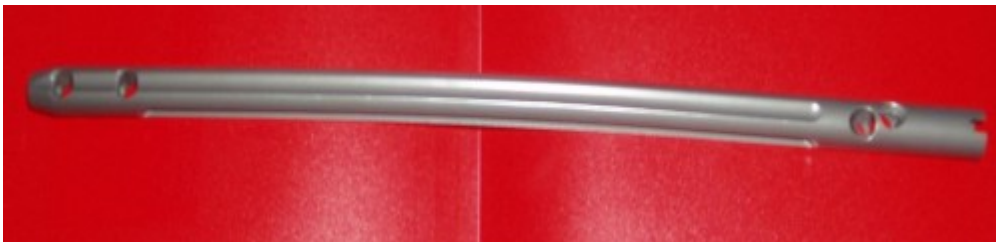
Η εξωτερική μορφή της ράβδου σχεδιάζεται έτσι ώστε να ακολουθεί την αξονική καμπυλότητα του οστού και ταυτόχρονα να προσαρμόζεται όσο το δυνατόν καλύτερα εσωτερικά στην διατομή του οστού.

Η εσωτερική κοιλότητα προσδίδει στον ήλο την απαραίτητη ευκαμψία, ώστε να επιτυγχάνεται

- η μέγιστη πλήρωση εσωτερικά του οστού και
- η δυνατότητα πλήρωσης του εσωτερικού του ήλου με τον παραγόμενο νέο μυελό από το οστό

Η κατασκευή δύο ή περισσότερων οπών σε κάθε άκρο του ήλου είναι απαραίτητη και χρησιμεύει για την τοποθέτηση κοχλιών, οι οποίες διαπερνούν το οστό και το στερεώνουν με ασφάλεια πάνω στον ήλο.

Στο ακόλουθο σχήμα εικονίζεται μια τυπική μορφή ήλου.



Σχήμα 2.1: Τυπική εικόνα ήλου

## 2.3. Περιγραφή μεθόδου εφαρμογής της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης

Η μέθοδος της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης, η οποία εφαρμόζεται για την αποκατάσταση συντριπτικών καταγμάτων μακρών οστών, ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια. Κατά τα στάδια αυτά χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα υλικά και τεχνικές καθώς και οι απαραίτητοι ιατρικοί έλεγχοι, αλλά και εργαστηριακές εξετάσεις, ώστε να εξασφαλιστούν οι απαραίτητες τιμές στους δείκτες του ασθενή και να αποφευχθούν τυχόν παρενέργειες ή επιπλοκές που δεν σχετίζονται με την ίδια την μέθοδο αλλά με την γενική κατάσταση του ασθενή. Επομένως η χειρουργική επέμβαση δεν γίνεται άμεσα αλλά όταν οι δείκτες του ασθενή βρίσκονται σε επιτρεπτά όρια.

Στη συνέχεια, θα γίνει μια περιγραφή της μεθόδου για την αποκατάσταση του συντριπτικού κατάγματος του μηριαίου οστού<sup>[4][6]</sup>, η οποία είναι η περίπτωση που εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα, ώστε να αποσαφηνιστεί και να γίνει πιο κατανοητή.

1. Μόλις γίνει η διάγνωση του κατάγματος, χορηγείται διάλυμα προκαΐνης 1% στην περιοχή του μηρού στην οποία παρουσιάζεται αιμάτωμα λόγω του κατάγματος. Με αυτόν τον τρόπο απαλλάσσεται ο ασθενής από τους πόνους, ώστε να είναι δυνατόν να γίνει πλήρης ακτινογραφικός έλεγχος.
2. Κατά το στάδιο αυτό διεξάγονται όλες οι απαραίτητες ακτινογραφίες από διαφορετικά σημεία και ύψη για να διαπιστωθεί η μορφή και η έκταση του κατάγματος. Δίδεται μεγάλη προσοχή για να διαπιστωθεί αν υπάρχει εξάρθρωση της γοφικής άρθρωσης ή και εξάρθρωση του οστού που συνδέει την κεφαλή του μηρού με το κυρίως μακρύ οστό του μηρού. Ελέγχεται επίσης η επιγονατίδα, όπου συχνά παρουσιάζονται κατάγματα.
3. Εφαρμόζεται σκελετική έλξη με την εισαγωγή ενός πείρου Steinmann στο στρογγυλό εξόγκωμα τη κνήμης και το πόδι παραμένει ακινητοποιημένο. Η σκελετική έλξη διευκολύνει το χειρουργό στη διαδικασία της αναδιάταξης, που εφαρμόζεται αργότερα και αποσκοπεί στην αποκατάσταση της ανατομικής θέσης των θραυσμάτων του οστού που έχει υποστεί κάταγμα.
4. Πραγματοποιείται ακτινογραφικός έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη διάσταση. Σε αντίθετη περίπτωση αυξάνεται η ελκτική δύναμη, η οποία ασκείται μέσω του πείρου Steinmann και επαναλαμβάνεται ο έλεγχος.
5. Καθορίζονται οι διαστάσεις του ήλου που θα χρησιμοποιηθεί με βάση τη μορφή του οστού του ασθενή (μετρήσεις από τις ακτινογραφίες).
6. Προετοιμασία για την επέμβαση. Επιλέγεται η μέθοδος αναισθησίας γενική αναισθησία ή αναισθησία των κάτω άκρων με ένεση στη σπονδυλική στήλη. Γίνεται διασωλήνωση του ασθενή, ώστε σε περίπτωση επιπλοκής να είναι δυνατή η χορήγηση μυοχαλαρωτικών.
7. Ο ασθενής, ο οποίος έχει ήδη υποστεί αναισθησία, τοποθετείται πάνω στο χειρουργικό τραπέζι και το προς επέμβαση άκρο τοποθετείται στο μηχανισμό Wittmoser.
8. Εφαρμόζεται εφελκυσμός κατά μήκος του μηρού, μέχρις ότου επιτευχθεί η επιθυμητή διάσταση στην περιοχή του κατάγματος.
9. Ελέγχεται προσεκτικά ο προσανατολισμός των θραυσμάτων του οστού, ο οποίος εξαρτάται από την θέση του ασθενή.
10. Ο ενισχυτής εικόνας τοποθετείται σε κατάλληλη θέση έτσι ώστε να επιτρέπεται ο έλεγχος της διάστασης, την οποία έχει υποστεί το μέλος, στο σημείο του κατάγματος. Στη συνέχεια σηματοδοτείται το δέρμα στο ύψος του κατάγματος.
11. Διαδικασία αναδιάταξης. Με βάση την εικόνα η οποία λαμβάνεται από τον ενισχυτή εικόνας, οι δύο δακτύλιοι της συσκευής αναδιάταξης μετακινούνται ο ένας προς τον άλλον μέχρις ότου τα θραύσματα του οστού βρεθούν ακριβώς απέναντι. Σε περιπτώσεις που παρουσιαστούν δυσκολίες εφαρμόζονται τεχνικές, όπως κάμψη του γονάτου κατά 90° και προσέγγιση του πρόσθιου τμήματος της κνήμης στο σημείο εκείνο της διάταξης στο οποίο πατάει αρχικά το πέλμα του ποδιού. Το σημείο του εκτοπισμού παρακολουθείται μέσω του ενισχυτή εικόνας. Όταν διαπιστωθεί η διόρθωση του εκτοπισμού, ελαττώνεται η δύναμη εφελκυσμού, η οποία ασκείται στο οστό και τα θραύσματα πλησιάζουν εκ νέου μεταξύ τους. Στην περίπτωση κατά την οποία το κάταγμα παρουσιάζεται πολύ κοντά στον κορμό του ασθενή, οπότε το αντίστοιχο θραύσμα κάμπτεται από έναν συγκεκριμένο τένοντα γίνεται εισαγωγή ενός μικρού ήλου, ως μοχλός, στο

εσωτερικό του θραύσματος αυτού για τη διόρθωση της θέσης του θραύσματος.

12. Δημιουργείται ένα αποστειρωμένο πεδίο πάνω από το μείζονα τροχαντήρα. Μεταξύ του χειρουργού και του ενισχυτή εικόνας απλώνεται ένα αποστειρωμένο ύφασμα σαν κουρτίνα, έτσι ώστε η τομή που θα γίνει αμέσως μετά να μη μολυνθεί από τον κινούμενο ακτινογραφικό εξοπλισμό ή/και τη συσκευή αναδιάταξης.
13. Εντοπισμός του μείζονα τροχαντήρα με τομή μήκους 2 - 3cm στην περιοχή του γλουτού, σε απόσταση 4 - 5cm πάνω από το μείζονα τροχαντήρα. Επίσης, διαρρηγνύεται κατά μήκος το πέτασμα νηματοειδών ιστών, το οποίο περικλείει και συγκρατεί εσωτερικά τους μύες του γλουτού.
14. Η άκρη του τροχαντηρίου οστού συγκρατείται από το χειρουργό, ενώ ένας τριγωνικός οβελός εισέρχεται στο μέσον του τροχαντηρίου οστού προς την πλευρά του γονάτου. Ο οβελός αυτός πρέπει να εισχωρήσει μερικά εκατοστά στο τροχαντήριο, δημιουργώντας μια σχετικά μεγάλη οπή στο οστό.
15. Από την οπή, η οποία έχει ανοιχτεί στο τροχαντήριο, εισέρχεται ένας λεπιδωτός οδηγός για τον ήλο, που παρακολουθείται με τη βοήθεια ενός άλλου οδηγού ίδιου μήκους, που τοποθετείται παράλληλα με τον πρώτο αλλά στο εξωτερικό του μηρού.
16. Μετά την εισαγωγή του οδηγού, ο οβελός αφαιρείται.
17. Με τη βοήθεια του ενισχυτή εικόνας ελέγχεται η θέση του οδηγού στο εσωτερικό της μυελικής κοιλότητας, ο οποίος, εάν απαιτείται, αφαιρείται και επανατοποθετείται, μέχρις ότου επιτευχθεί η σωστή εισαγωγή του.
18. Ο οδηγός προωθείται και στο άλλο θραύσμα του οστού και εισχωρεί στην μυελική κοιλότητά του. Η πορεία του οδηγού στο εσωτερικό της μυελικής κοιλότητας ελέγχεται με βάση την αντίσταση, την οποία αισθάνεται ο χειρουργός λόγω τριβής μεταξύ του οδηγού και του εσωτερικού τοιχώματος του οστού.
19. Αφού ο οδηγός εισέλθει στη μυελική κοιλότητα του θραύσματος, προωθείται στο εσωτερικό της, μέχρις ότου διαπεράσει μια μεταλλική μπάρα, η οποία τοποθετείται προκειμένου να δηλώσει τη θέση του χόνδρου. Η θέση του οδηγού στο εσωτερικό του οστού επιβεβαιώνεται με τη χρήση φθοροσκοπίου.
20. Μετά την επιτυχή εισχώρηση του οδηγού στο οστό, μεγεθύνεται η μυελική κοιλότητα με τη χρήση ενός εργαλείου μεγέθυνσης οπών. Η διαδικασία της μεγέθυνσης εφαρμόζεται σε περιστατικά κατά τα οποία η επιλεγμένη διάμετρος του ήλου, η οποία επιλέγεται με κριτήριο την καλύτερη σταθεροποίηση του οστού, είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο της μυελικής κοιλότητας. Επίσης, επιβάλλεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μυελική κοιλότητα παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια όσον αφορά τη διάμετρό της κατά μήκος του οστού. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητη η μεγέθυνση μόνο του στενότερου τμήματος της κοιλότητας. Ωστόσο, αν η διάμετρος της κοιλότητας στο στενότερο τμήμα της είναι αρκετά φαρδιά ώστε να δεχθεί στο εσωτερικό της ήλο κατάλληλης διαμέτρου, δεν κρίνεται απαραίτητη η διεύρυνση της κοιλότητας. Σε περίπτωση κατά την οποία η διεύρυνση της μυελικής κοιλότητας κρίνεται απαραίτητη, η διαδικασία συνεχίζεται όπως περιγράφεται στα αμέσως επόμενα. Διαφορετικά, η διαδικασία συνεχίζεται με την εισαγωγή του ήλου στην μυελική κοιλότητα.
21. Σε περίπτωση πρόσφατου κατάγματος, η μεγέθυνση της μυελικής κοιλότητας επιτρέπεται μόνο με χρήση μηχανοκίνητου εργαλείου μεγέθυνσης οπών για την αποφυγή της ρήξης τυχόν ήδη υπάρχοντων ρωγμών, οι οποίες βρίσκονται στην

περιοχή του κατάγματος και δεν είναι ορατές στις ακτινογραφίες του οστού.

22. Ένας σωληνοειδής οβελός εισέρχεται στο τροχαντήριο πάνω από τον οδηγό και η οπή, η οποία είχε αρχικά ανοιχτεί στο τροχαντήριο, διευρύνεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του οδηγού χωρίς να παρουσιαστεί αντίσταση. Ο σωληνοειδής οβελός παραμένει στη θέση αυτή, ενώ ο οδηγός αφαιρείται από το εσωτερικό του οστού.
23. Εισέρχεται στο οστό ένας οδηγός για το εργαλείο μεγέθυνσης οπών, ο οποίος έχει στρογγυλεμένη κεφαλή. Ο οδηγός αυτός προσπερνά την περιοχή του κατάγματος και εισέρχεται στο θραύσμα, το οποίο βρίσκεται μακρύτερα από τον κορμό του ασθενή. Η στρογγυλεμένη κεφαλή του χρησιμεύει στην αφαίρεση ενός κολλημένου ή σπασμένου εργαλείου μεγέθυνσης οπών από το εσωτερικό του οστού.
24. Ο σωληνοειδής οβελός αφαιρείται και διευρύνεται η μυελική κοιλότητα του οστού, χρησιμοποιώντας προοδευτικά εργαλεία μεγέθυνσης οπών αυξανόμενης διαμέτρου, σύμφωνα με το πλάτος της μυελικής κοιλότητας που προσδιορίζεται από τις ακτινογραφίες του οστού, θεωρώντας ότι στην πραγματικότητα είναι 10% μικρότερο από αυτό το οποίο μετράται στην ακτινογραφία. Η διεύρυνση της μυελικής κοιλότητας πραγματοποιείται χωρίς την εξάσκηση δύναμης εκ μέρους του χειριστή του μηχανήματος. Όταν το εργαλείο μεγέθυνσης οπών πάψει να κινείται με ευκολία στο εσωτερικό του οστού πρέπει να απομακρυνθεί από την μυελική κοιλότητα και να καθαριστούν τα αυλάκια του από σκόνη και θρύμματα οστών. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος της μυελικής κοιλότητας, η οποία είναι, συνήθως, τουλάχιστον ίση με 10mm.
25. Επιλέγεται η διάμετρος του ήλου που θα χρησιμοποιηθεί, η οποία συνήθως είναι μικρότερη κατά 1mm από τη διάμετρο του τελευταίου εργαλείου μεγέθυνσης για τη διεύρυνση της μυελικής κοιλότητας.
26. Εάν παρουσιάζεται κάποια ασυνήθιστη καμπύλωση του μηριαίου οστού, είναι επιτακτική η διόρθωση της αρχικής καμπύλης του ήλου.
27. Μετά τη διόρθωση της καμπύλης του ήλου, ο οδηγός για το εργαλείο μεγέθυνσης οπών αφαιρείται από το εσωτερικό της μυελικής κοιλότητας και εισέρχεται εκ νέου στο εσωτερικό της ο οδηγός του ήλου.
28. Ο ήλος εισέρχεται στην μυελική κοιλότητα μέσω του αντίστοιχου οδηγού.
29. Μόλις ο ήλος προσεγγίσει την περιοχή του κατάγματος ελέγχεται με τη βοήθεια του ενισχυτή εικόνας η ομαλή διείσδυσή του στο εσωτερικό του απομακρυσμένου από τον κορμό του ασθενή θραύσματος του οστού. Ο χειρουργός, αφού βεβαιωθεί για την ομαλή διείσδυση του ήλου στο εσωτερικό των θραυσμάτων, συνεχίζει με την αποπεράτωση της διαδικασίας εισαγωγής του ήλου στο εσωτερικό της μυελικής κοιλότητας.
30. Ο οδηγός του ήλου αφαιρείται και ο ήλος διεισδύει βαθύτερα στην μυελική κοιλότητα με τη βοήθεια ενός κοίλου οδηγού, μέχρις ότου το ένα άκρο του ήλου εξέρχεται κατά 1.5 - 2cm από το μείζονα τροχαντήριο.
31. Μετά την εισαγωγή του ήλου στο εσωτερικό του οστού ακολουθεί η διαδικασία σταθεροποίησής του πάνω στο οστό, με την εισαγωγή κοχλιών σταθεροποίησης στα δύο άκρα του οστού, όπου βρίσκονται οι οπές του ήλου, καθώς και σε άλλα σημεία του οστού, για τη συγκράτηση μικρότερων θραυσμάτων. Η τοποθέτηση επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας διάταξης στόχευσης, η οποία προσαρμόζεται και

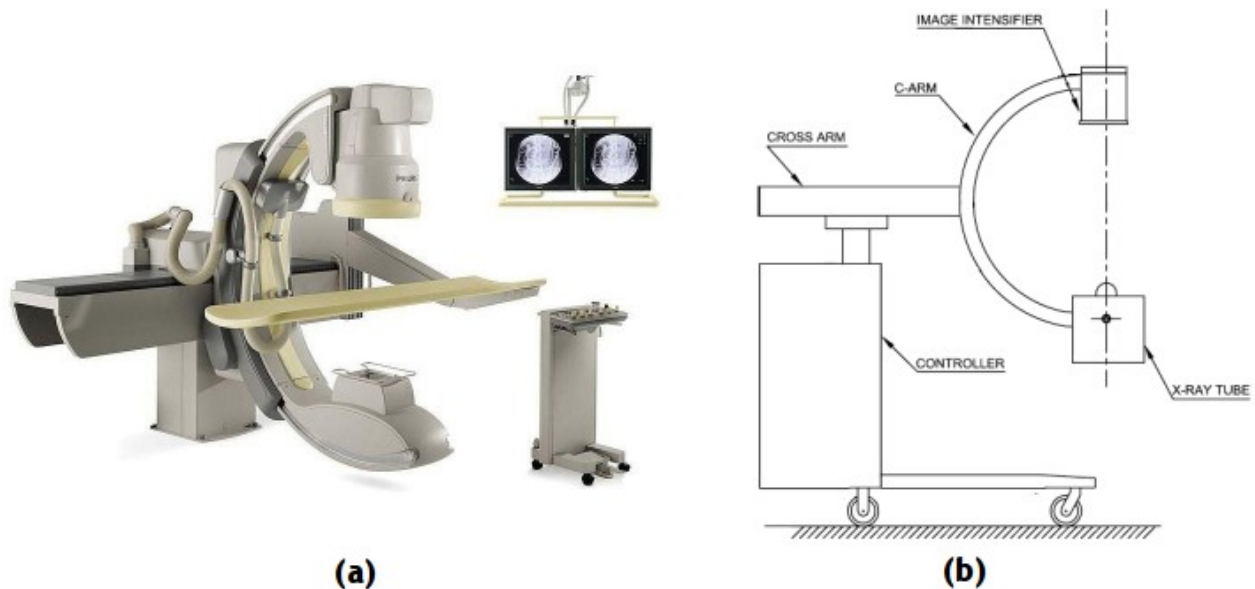
στερεώνεται στο τμήμα του ήλου το οποίο προεξέχει από την πλευρά του τροχαντηρίου με τη βοήθεια ενός κοχλίας.

32. Από τον παραπάνω οδηγό περνά αρχικά ένας οβελός, ο οποίος πραγματοποιεί τομές στο φλοιό του οστού στις θέσεις από τις οποίες θα διέλθει ο κοχλίας σταθεροποίησης.
33. Ένα δράπανο διέρχεται από τον κυλινδρικό οδηγό και ανοίγει μια οπή με διάμετρο 6mm στο οστό, προκειμένου να εισχωρήσει ο κοχλίας. Η οπή αυτή είναι διαμπερής και πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα της αντίστοιχης οπής του ήλου.
34. Εισέρχεται και βιδώνεται πάνω στο οστό και στον ήλο ένας κοχλίας σταθεροποίησης με διάμετρο 6.35mm, ο οποίος συγκρατεί το αντίστοιχο τμήμα του οστού πάνω στον ήλο. Η γωνία ανάμεσα στους άξονες του οστού και του κοχλίου είναι ίση με 130°.
35. Άκρο του οστού, που βρίσκεται κοντά στο γόνατο. Για τον προσδιορισμό της θέσης και της γωνίας της οπής χρησιμοποιείται μια διάταξη σταθεροποίησης, η οποία έχει στο ένα άκρο της μια δικάλα, στην οποία στερεώνεται το γόνατο του ασθενή και το άλλο άκρο της στερεώνεται στην ακτινογραφική διάταξη C-arm.
36. Επιδιώκεται η λήψη, με χρήση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm, μιας απεικόνισης της οπής του ήλου σαν σχεδόν τέλειου κύκλου. Με την επίτευξη αυτή, έχει προσδιοριστεί και η γωνία στην οποία πρέπει να γίνει η διάτρηση του οστού για να εισαχθούν οι κοχλίες σταθεροποίησης. Το στάδιο αυτό αποτελεί το δυσκολότερο στάδιο της διαδικασίας ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης.
37. Χρησιμοποιείται ένας οβελός, ο οποίος προσεγγίζει τη θέση υπό τη σωστή γωνία διερχόμενος από έναν κυλινδρικό οδηγό, όμοιο με αυτόν ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και στη διάταξη τοποθέτησης του κοχλίου στο άλλο άκρο του οστού και πραγματοποιείται τομή στο φλοιό του οστού στη θέση από την οποία θα διέλθει ο σταθεροποιητικός κοχλίας.
38. Με ένα δράπανο ανοίγεται οπή διαμέτρου 4.5mm, η οποία στη συνέχεια διευρύνεται με χρήση διαφορετικής κεφαλής στο δράπανο, με διάμετρο ίση με 6mm.
39. Τοποθετείται κοχλίας διαμέτρου 6.35mm και κατάλληλου μήκους, με τον οποίο επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση του θραύσματος του οστού πάνω στον ήλο.
40. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για την τοποθέτηση του δεύτερου κοχλίου σταθεροποίησης.
41. Η τομή, η οποία είχε δημιουργηθεί κοντά στο τροχαντήριο οστό, κλείνεται χωρίς περαιτέρω υποδερμική ραφή.

Χαρακτηριστικές και με αρκετή πληροφορία για τον μη ειδικευόμενο αναγνώστη σχετικές με την ιατρική διαδικασία εικόνες υπάρχουν στις ιστοσελίδες [7], [8], [9] και [10]. Οι εικόνες δεν περιελήφθησαν στο παρόν κείμενο για λόγους σχετιζόμενους με τα νομικά θέματα περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Εντούτοις, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης ενθαρρύνεται να ανατρέξει σε αυτές ή αντίστοιχες εικόνες, δεδομένου ότι διευκολύνουν σημαντικά την κατανόηση του ιατρικού προβλήματος και της φυσικής ιατρικής διαδικασίας.

## 2.4. Περιγραφή διάταξης C-arm

Η ακριβής θέση για την τοποθέτηση των κοχλιών στερέωσης ήλου - οστού, προσδιορίζεται με την ακτινοδιαγνωστική διάταξη C-arm. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται μία ακτινογραφική διάταξη C-arm<sup>[11]</sup> καθώς και ένα ενδεικτικό σχηματικό διάγραμμα (προϊόν μορφοποίησης από εικόνα του συνδέσμου [12]).



Σχήμα 2.2: (a) Ακτινοδιαγνωστική διάταξη C-arm (b) Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού C-arm

Η διάταξη C-arm αποτελείται από:

- i. έναν ελεγκτή, που αποτελεί την βάση της διάταξης
- ii. το τραπέζι όπου τοποθετείται ο ασθενής,
- iii. το βραχίονα σε μορφή “C” που περιβάλλει το τραπέζι και διαθέτει στο ένα άκρο πηγή ακτίνων X και στο άλλο άκρο έναν ενισχυτή εικόνας, μέσω του οποίου παράγεται η τελική ακτινογραφική εικόνα,
- iv. καθώς και μια ή περισσότερες οθόνες όπου προβάλλεται η ακτινογραφική εικόνα του μέλους του ασθενή.

Ο βραχίονας “C” συνδέεται στη βάση του ακτινογραφικού μηχανήματος μέσω ενός οριζόντιου τμήματος που καλείται “*cross-arm*”. Η διάταξη έχει δυνατότητα μετακίνησης ως προς τις τρεις διευθύνσεις του χώρου και περιστροφής ως προς τους τρεις άξονες του χώρου<sup>[13][14]</sup>.

## 2.5. Δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη διαδικασία προσδιορισμού της θέσης και της γωνίας τοποθέτησης του κοχλία στερέωσης στο άκρο του κατάγματος που βρίσκεται μακριά από το σημείο εισχώρησης του ήλου στο οστό

Η διαδικασία προσδιορισμού επακριβώς της θέσης και της γωνίας τοποθέτησης των κοχλίων στερέωσης στο άκρο του κατάγματος που βρίσκεται μακριά από το σημείο εισόδου του ήλου στο οστό είναι το δυσκολότερο τμήμα της συνολικής διαδικασίας αποκατάστασης του κατάγματος και κατά την διάρκειά της<sup>[15][16]</sup>, συνήθως, προκύπτουν ορισμένες δυσκολίες οι οποίες είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά.

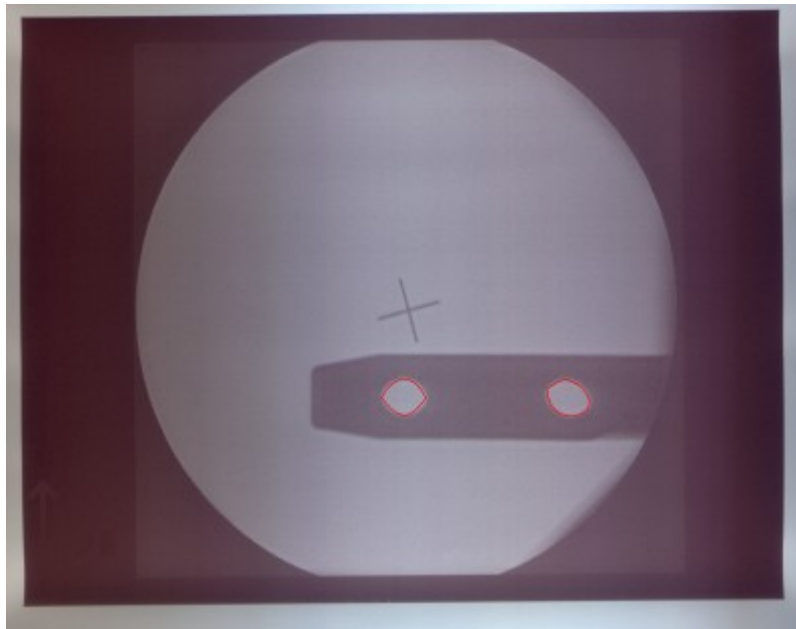
Οι κυριότερες δυσκολίες είναι οι παρακάτω:

- Ο ιατρός πρέπει να σχηματίσει στερεοσκοπική εικόνα του μη ορατού οστού του ασθενούς και του μη ορατού τμήματος του ήλου, καθώς και να εκτιμήσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη θέση στο χώρο του οστού και του ήλου. Η επιτυχία της διαδικασίας εξαρτάται από την εμπειρία του χειρουργού και τη σωστή χρήση του C-arm.
- Η οθόνη του C-arm, βρίσκεται εκτός του αποστειρωμένου μέρους του χειρουργείου και καθιστά δύσκολη την παρατήρηση της απεικόνισής της κατά τη διάρκεια της επέμβασης.
- Τα φαινόμενα σκίασης τα οποία παρουσιάζονται στην ακτινογραφική εικόνα από τις ανακλάσεις των ακτίνων Χ, οι οποίες εκπέμπονται από το C-arm λόγω της παρουσίας διαφόρων άλλων οστών αλλά και λόγω κατασκευαστικών ατελειών της πηγής ακτινοβολίας του C-arm.
- Ο ασθενής υπόκειται σε μια εξαιρετικά επίπονη διαδικασία, διότι παραμένει στο C-arm καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης. Σημειώνεται ο μέσος χρόνος για την εισαγωγή του ήλου στο εσωτερικό της μυελικής κοιλότητας και για την ασφάλισή του στο ένα άκρο του οστού είναι 45 λεπτά, ενώ ο μέσος χρόνος για τον εντοπισμό των οπών και την τοποθέτηση των κοχλίων σταθεροποίησης στο άλλο άκρο του οστού είναι 1 - 3 ώρες.
- Η πιθανή εμφάνιση προβλημάτων υγείας στον ασθενή και τον χειρουργό από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το C-arm, αν και η ποσότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εν γένει δεν είναι σημαντική<sup>[15][16][17][18][19][20]</sup>.

## 2.6. Προβλήματα που προκύπτουν από την κωνική εκπομπή των ακτίνων X του ακτινογραφικού συστήματος

Σε μία πρώτη μελέτη που είχε πραγματοποιηθεί στον χώρο αυτό<sup>[1]</sup> υλοποιήθηκε μία εικονική αναπαράσταση του προβλήματος και συγκεκριμένα ένα εικονικό ακτινογραφικό σύστημα C-arm, το οποίο εκπέμπει παράλληλες δέσμες φωτός. Εν συνεχεία λαμβάνονταν διάφορα στιγμιότυπα του ήλου στον χώρο και δημιουργείτο μία βάση προτύπων. Τελικός σκοπός ήταν η εφαρμογή αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων για το ταίριασμα των εικονικών προτύπων με στιγμιότυπα που έχουν εξαχθεί από πραγματικό C-arm και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών.

Ωστόσο, ύστερα από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε ακτινογραφικές εικόνες οι οποίες λήφθηκαν από ακτινογραφικό σύστημα C-arm, παρατηρήθηκαν στιγμιότυπα των προβολών των οπών του ήλου όπως το παρακάτω:



Σχήμα 2.3: Μη ομοιόμορφη κλίση των οπών του ήλου στην ακτινογραφική εικόνα

Παρατηρήθηκε ότι οι προβολές των δύο οπών του ήλου δεν εμφανίζονται στην ακτινογραφική εικόνα με την ίδια κλίση. Αντίθετα, η προβολή της δεύτερης (δεξιάς) οπής απεικονίζεται με σημαντικές παραμορφώσεις, γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες σε αλγορίθμους αναγνώρισης προτύπων.

Αυτές οι παραμορφώσεις προκαλούνται από σύστημα κωνικής εκπομπής ακτίνων X και όχι από παράλληλο. Κρίνεται, συνεπώς, απαραίτητη η εκπόνηση εκ νέου μελέτης του ακτινογραφικού συστήματος, θεωρώντας διαφορετικό σύστημα προβολής. Όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια, η πηγή φωτός θα θεωρηθεί ότι αποτελείται από σημειακές πηγές φωτός με κοινό σημείο φυγής, καθώς και ομοιόμορφη εκπομπή στον κώνο ακτινοβολίας.



# Κεφάλαιο 3

## Σύγχρονες εξελίξεις σε θέματα μοντελοποίησης φωτισμού

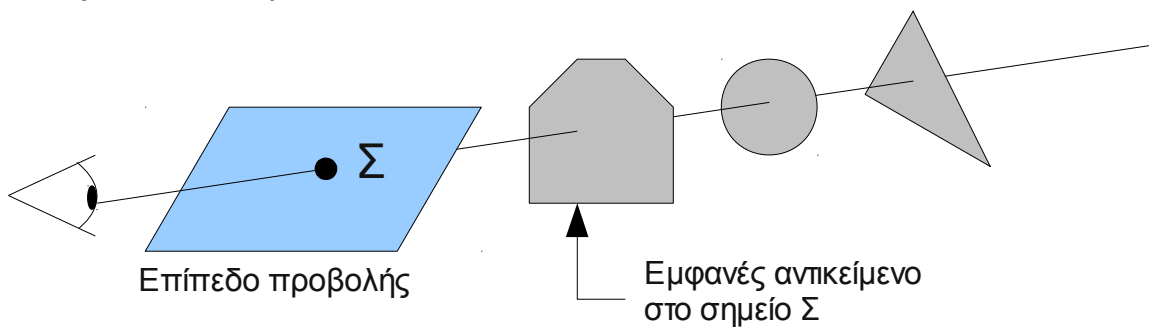
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει επισκόπηση των σύγχρονων τάσεων (*state of the art*) που επικρατούν σε θέματα μοντελοποίησης φωτισμού στα Γραφικά Υπολογιστών. Η μελέτη αυτή κρίνεται απαραίτητη για την απόκτηση μίας σφαιρικής εικόνας των σχετικών ερευνητικών περιοχών που έχουν άμεση συνάφεια με την μοντελοποίηση του παρόντος προβλήματος.

Επιλέχθηκαν να μελετηθούν περιοχές οι οποίες αφενός είναι καθοριστικές στην ανάπτυξη ενός εικονικού ακτινογραφικού συστήματος και αφετέρου μπορούν να συμβάλλουν σε μελλοντική συνέχεια της παρούσας εργασίας. Πιο αναλυτικά, στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν:

1. *Απόκρυψη επιφανειών*: για μείωση υπολογιστικού κόστους
2. *Σκίαση*: για εφαρμογή σε τριδιάστατες απεικονίσεις ενδομυελικών ήλων
3. *Διαφάνεια*: πεδίο ενδιαφέροντος σε εφαρμογές “σκληρών” ακτίνων Χ

### 3.1. Αλγόριθμοι απόκρυψης

Ένα πρόβλημα που προκύπτει κατά την απεικόνιση ενός τριδιάστατου περιβάλλοντος σε διδιάστατο επίπεδο είναι το πρόβλημα της απόκρυψης, δηλαδή η ταυτοποίηση του εμφανούς αντικειμένου σε κάθε σημείο του επιπέδου προβολής και η απόκρυψη ή αποκοπή των μη ορατών αντικειμένων. Εποπτικά, το πρόβλημα της απόκρυψης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 3.1: Το πρόβλημα της απόκρυψης

Σκοπός της απόκρυψης επιφανειών είναι η κατάλληλη προεπεξεργασία των επιφανειών και η αποκοπή των επιφανειών που δεν είναι ορατές από δεδομένο σημείο όρασης έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τυχόν υπολογιστικό κόστος στο οποίο θα υποβληθούν τα πολύγωνα της σκηνής.

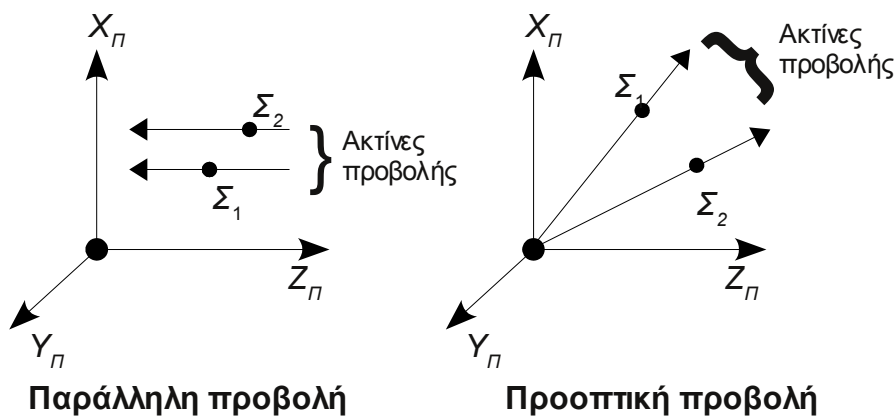
Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση αλγορίθμων απόκρυψης, οι οποίοι χωρίζονται, ανάλογα με το είδος τους, σε *αλγορίθμους απόκρυψης ακμών* (hidden line elimination) και *αλγορίθμους απόκρυψης επιφανειών* (hidden surface elimination)

Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται, αρχικά, ο τρόπος αξιοποίησης του συστήματος προβολής από τέτοιους αλγόριθμους και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες κατηγορίες αλγορίθμων απόκρυψης.

### 3.1.1. Αξιοποίηση παράλληλης και προοπτικής προβολής

Πρωτού παρουσιαστούν οι κυριότεροι αλγόριθμοι απόκρυψης, θα γίνει μία εποπτική ανασκόπηση των κυριότερων μετασχηματισμών προβολής που χρησιμοποιούνται σήμερα και ειδικά του πώς αξιοποιούνται από τους αλγόριθμους απόκρυψης. Η εξέταση αυτή κρίνεται απαραίτητη, καθώς οι αλγόριθμοι απόκρυψης χρησιμοποιούν, εκτός από την ταξινόμηση κατά τον άξονα  $Z$ , ταξινόμηση στους άξονες  $X$  και  $Y$  για να βρεθούν τα αντικείμενα που τέμνονται από μία ακτίνα προβολής.

Πιο αναλυτικά, θα παρουσιασθούν η παράλληλη και η προοπτική προβολή<sup>[21]</sup>, οι οποίες αναπαριστώνται εποπτικά στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.2: Ακτίνες προβολής

#### a) Παράλληλη προβολή

Η συνθήκη απόκρυψης είναι:

$$(x_1 = x_2) \wedge (y_1 = y_2)$$

Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση της παράλληλης προβολής η ταξινόμηση είναι εύκολη, καθώς αρκεί η ταξινόμηση των τριδιάστατων  $X$  και  $Y$  συντεταγμένων των αντικειμένων, καθώς όλες οι ακτίνες προβολής είναι παράλληλες με τον άξονα  $Z$ .

#### b) Προοπτική προβολή

Η συνθήκη απόκρυψης είναι:

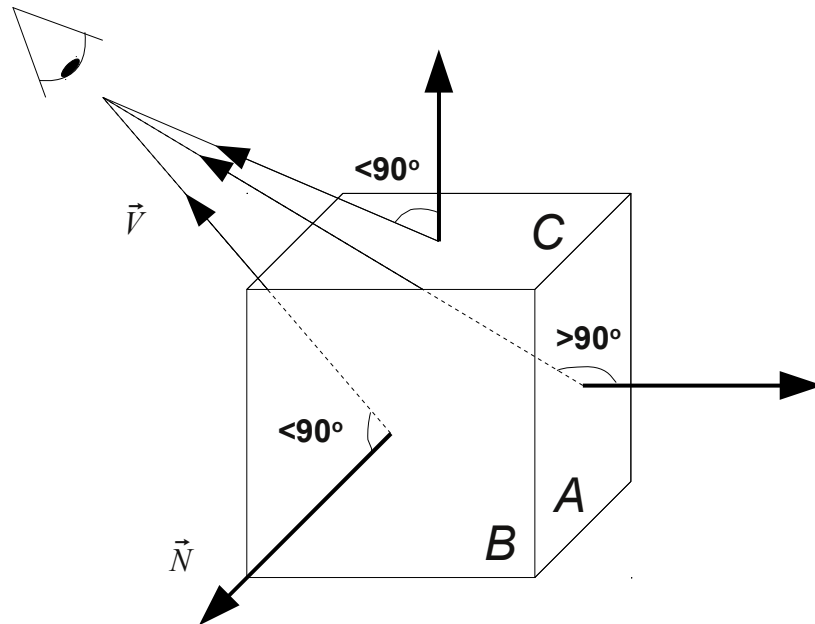
$$(x_1/z_1 = x_2/z_2) \wedge (y_1/z_1 = y_2/z_2)$$

Στην περίπτωση της προοπτικής προβολής δεν αρκεί η ταξινόμηση των τριδιάστατων  $X$  και  $Y$  συντεταγμένων των αντικειμένων. Αντίθετα, απαιτείται ο υπολογισμός δύο, υπολογιστικά ακριβών, διαιρέσεων έτσι ώστε να διερευνηθεί εάν δύο σημεία βρίσκονται πάνω στην ίδια ακτίνα προβολής. Σημειώνεται ότι οι διαιρέσεις αυτές έχουν ήδη εκτελεστεί κατά την προοπτική προβολή, καθώς οι αλγόριθμοι απόκρυψης εκτελούνται μετά την προβολή.

Κατά την προβολή, επίσης, φυλάσσεται η  $Z$  συντεταγμένη των σημείων, ώστε αν δύο σημεία ικανοποιούν την συνθήκη απόκρυψης, δηλαδή βρίσκονται πάνω στην ίδια ακτίνα προβολής, να εξάγεται με απλή σύγκριση των  $Z$  συντεταγμένων ποιο αποκρύπτει το άλλο.

### 3.1.2. Διαγραφή πίσω επιφανειών

Θεωρείται ο κύβος του ακόλουθου σχήματος.



Σχήμα 3.3: Ορατές και μη ορατές επιφάνειες

Είναι εμφανές ότι από το σημείο παρατήρησης οι επιφάνειες  $B$  και  $C$  είναι ορατές, ενώ η επιφάνεια  $A$  δεν είναι ορατή. Η επιφάνεια  $A$  ορίζεται ως *πίσω επιφάνεια*.

Έστω  $\vec{N}$  το κάθετο διάνυσμα σε μία επιφάνεια και  $\vec{V}$  το διάνυσμα παρατήρησης. Εάν η (κυρτή) γωνία που σχηματίζεται είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ$ , τότε η επιφάνεια είναι “πίσω”<sup>[22]</sup>, ενώ αν είναι μικρότερη από  $90^\circ$  είναι ορατή. Στην οριακή περίπτωση όπου τα διανύσματα  $\vec{N}$  και  $\vec{V}$  είναι κάθετα μεταξύ τους, τότε κάποιες μόνο ακμές της επιφάνειας είναι ορατές, οι οποίες όμως μπορούν να αγνοηθούν αφού είναι κοινές με κάποιες άλλες ορατές επιφάνειες.

Η κυρτή γωνία μεταξύ δύο διανυσμάτων υπολογίζεται από το εσωτερικό τους γινόμενο. Πιο αναλυτικά, επειδή:

$$\vec{V} \cdot \vec{N} = |\vec{V}| \cdot |\vec{N}| \cdot \cos(\widehat{\vec{V}, \vec{N}})$$

Τότε για την κυρτή γωνία των διανυσμάτων θα ισχύει η ισοδυναμία:

$$(\widehat{\vec{V}, \vec{N}}) < 90^\circ \Leftrightarrow \vec{V} \cdot \vec{N} > 0$$

Το πρόσημο του εσωτερικού γινομένου μπορεί να υπολογισθεί εύκολα από τις καρτεσιανές συντεταγμένες των διανυσμάτων ως εξής:

$$\vec{V} \cdot \vec{N} = V_x \cdot N_x + V_y \cdot N_y + V_z \cdot N_z$$

Ο εν λόγω αλγόριθμος εφαρμόζεται αποδοτικά όταν το περιβάλλον αποτελείται από κυρτά αντικείμενα. Ωστόσο, εάν υπάρχουν μη-κυρτά αντικείμενα, είναι απαραίτητη και η εφαρμογή ενός διαφορετικού αλγορίθμου. Παρά ταύτα, συστήνεται η εφαρμογή της διαγραφής πίσω επιφανειών, καθώς με έναν υπολογιστικά φθηνό έλεγχο αποκλείεται από περαιτέρω επεξεργασία περίπου το 50% των πολυγώνων.

Το διάνυσμα  $\vec{V}$  μπορεί να ορισθεί ως ένα διάνυσμα με αρχή το σημείο παρατήρησης  $\bar{S}$  και πέρας ένα σημείο της επιφάνειας, έστω μία κορυφή πολυγώνου  $\bar{P}$ . Συνεπώς:

$$\vec{V} = \bar{S} - \bar{P}$$

Εάν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, προκύπτει:

$$\vec{V} = -\bar{P}$$

Το κανονικό διάνυσμα  $\vec{N}$  μιας επιφάνειας μπορεί να υπολογισθεί από τρία μη συγγραμμικά σημεία της, λαμβάνοντας κατάλληλα το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων τα οποία αυτά ορίζουν. Έστω  $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$  τρεις μη συγγραμμικές κορυφές ενός πολυγώνου. Τότε:

$$\vec{N} = \vec{A} \times \vec{B} = (\bar{P}_2 - \bar{P}_1) \times (\bar{P}_3 - \bar{P}_1)$$

Σημειώνεται ότι, καθώς δεν ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα στο εξωτερικό γινόμενο ( $\vec{A} \times \vec{B} \neq \vec{B} \times \vec{A}$ ), η κατεύθυνση του  $\vec{N}$  θα είναι η αντίθετη εάν ληφθούν οι κορυφές με διαφορετική σειρά. Συνεπώς εγείρεται το ερώτημα με ποια σειρά θα ληφθούν οι κορυφές έτσι ώστε το προκύπτον διάνυσμα  $\vec{N}$  να έχει κατεύθυνση προς το εξωτερικό και όχι προς το εσωτερικό του αντικειμένου.

Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, ακολουθείται η εξής σύμβαση στα πολυγωνικά μοντέλα: κάθε πολύγωνο ορίζεται με την ακολουθία κορυφών που λαμβάνεται από μία περιφορά της περιμέτρου του με φορά *αντίθετη* από αυτή των δεικτών του ρολογιού, όταν το πολύγωνο παρατηρείται από την *εξωτερική* πλευρά του αντικειμένου στο οποίο ανήκει. Έτσι είναι δυνατή η δημιουργία δύο διανυσμάτων  $\vec{A}$  και  $\vec{B}$  από τρεις διαδοχικές, μη συγγραμμικές κορυφές.

### 3.1.3. Αλγόριθμοι απόκρυψης ακμών

Η απόκρυψη ακμών παραμένει και σήμερα ένα καίριο ζήτημα μοντελοποίησης, παρά την αυξημένη τάση για χρήση επιφανειών για την παράσταση αντικειμένων, καθώς υπάρχουν ακόμα περιπτώσεις όπου απαιτείται η παράσταση με περιγράμματα (line drawing) λόγω του χαμηλότερου υπολογιστικού της κόστους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η τοποθέτηση ή κίνηση αντικειμένων στο χώρο, όπως σε εφαρμογές συνθετικών ταινιών (animation).

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν σαν βάση αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν την εποχή των διανυσματικών οθονών, όπως για παράδειγμα οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται στις αναφορές [23] και [24]. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθεί συνοπτικά ένας γενικός αλγόριθμος κατάλληλος για *μη διαφανή αντικείμενα*<sup>[25]</sup>.

Η γενική ιδέα του αλγορίθμου είναι ότι οι ακμές ενός αντικειμένου είναι δυνατόν να κρύβονται (μερικώς ή ολικώς) από τις επιφάνειες άλλων αντικειμένων, συνεπώς είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των εμφανών τμημάτων των ακμών, τα οποία και τελικά θα εμφανιστούν στην οθόνη. Η διαδικασία αυτή εκτελείται σε δύο βήματα.

1. Διάρθρωση των ακμών όλων των αντικειμένων σε τμήματα, τα οποία είτε είναι πλήρως εμφανή είτε πλήρως μη εμφανή.
2. Για κάθε τμήμα ακμής καθορισμός εάν είναι εμφανές ή όχι.

Στη συνέχεια αναλύονται τα δύο βασικά βήματα του παρόντος αλγορίθμου.

#### a) Διάρθρωση ακμών σε εμφανή και μη εμφανή τμήματα

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται μετά τον αποκλεισμό των πίσω επιφανειών, την αποκοπή και την προβολή, επομένως μία ακμή ενδέχεται να μην εμφανιστεί στην οθόνη (επίπεδο προβολής) όταν καλύπτεται από κάποια επιφάνεια (πολύγωνο).

Στο πρώτο βήμα του αλγορίθμου καθορίζονται τα διακριτά τμήματα μιας ακμής, τα οποία είτε θα καλύπτονται εξ' ολοκλήρου από κάποιο πολύγωνο είτε δεν θα καλύπτονται και θα είναι εμφανή στην οθόνη.

Αναλυτικά:

1. Για την υπό εξέταση ακμή  $k$ , υπολογίζεται η προβολή της  $k'$  στο επίπεδο προβολής, καθώς και οι προβολές των ακμών όλων των άλλων πολυγώνων.
2. Υπολογίζονται τα σημεία τομής της  $k'$  με τις προβολές των ακμών όλων των άλλων πολυγώνων.

Δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των τομών με τις προβολές των ακμών του ίδιου επιπέδου, καθώς τέμνονται μόνο στα άκρα τους. Ωστόσο, είναι απαραίτητος με προβολές ακμών άλλων επιφανειών του ίδιου αντικειμένου, καθώς σε κοίλα αντικείμενα ελλοχεύει η πιθανότητα αυτοκάλυψης ακμών.

3. Τα  $n(k')$  σημεία τομής της  $k'$  χωρίζουν την ακμή  $k'$  σε  $n(k') + 1$  τμήματα. Κάθε ένα από αυτά τα τμήματα είναι είτε πλήρως εμφανές, είτε πλήρως κρυμμένο, γιατί το εμφανές (ή όχι) μπορεί να αλλάξει μόνο στα σημεία τομής με τις προβολές άλλων ακμών.

b) Καθορισμός ορατότητας τμημάτων

Στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου καθορίζεται για κάθε τμήμα ακμής εάν είναι εμφανές ή όχι. Ορίζεται ως  $\tau$  το υπό εξέταση τμήμα της ακμής και ως  $\tau'$  η προβολή του τμήματος στο επίπεδο προβολής. Για την διερεύνηση, αρκεί η εξέταση ενός οποιουδήποτε σημείου του τμήματος.

Αναλυτικά:

4. Επιλέγεται το μέσο  $\bar{m}'$  του  $\tau'$ , προκειμένου να εξετασθεί αν είναι εμφανές ή όχι.
5. Υπολογίζονται οι συντεταγμένες του  $\bar{m}'$ .
6. Με γνώση του  $\bar{m}'$ , των άκρων  $\bar{P}_1, \bar{P}_2$  του  $\tau$ , καθώς και των εξισώσεων που δίδουν το μοντέλο προβολής (παράλληλο, προοπτικό, κτλ), υπολογίζονται οι συντεταγμένες του αντίστοιχου μέσου  $\bar{m}$  του  $\tau$ .
7. Έστω  $\ell$  η ευθεία προβολής η οποία ορίζεται από τα σημεία  $\bar{m}$  και  $\bar{m}'$ . Στην περίπτωση της προοπτικής προβολής, η  $\ell$  διέρχεται και από το κέντρο προβολής.
8. Λαμβάνεται ένα πολύγωνο  $\pi$  με κανονικό διάνυσμα  $\vec{N}$ , προκειμένου να εξετασθεί εάν καλύπτει ή όχι το  $\tau$ . Έστω  $\bar{v}_0$  μία κορυφή του  $\pi$  και  $(\pi_i)$  το επίπεδο που ορίζεται από το  $\pi$ .
9. Υπολογίζεται το σημείο τομής  $\bar{w}$  της  $\ell$  με το  $(\pi_i)$ . Το  $\bar{w}$  χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα  $(\bar{w} - \bar{v}_0) \cdot \vec{N} = 0$ .
10. Θεωρώντας ως ευθεία διάταξης την  $\ell$ , εξετάζεται εάν το σημείο  $\bar{w}$  βρίσκεται μεταξύ των σημείων  $\bar{m}$  και  $\bar{m}'$  ή όχι.
  - i. Εάν το  $\bar{w}$  δεν βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία  $\bar{m}$  και  $\bar{m}'$ , το τμήμα  $\tau$  της ακμής  $\kappa$  δεν καλύπτεται από το  $\pi$ .
  - ii. Εάν το  $\bar{w}$  δεν βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία  $\bar{m}$  και  $\bar{m}'$ , τότε πρέπει να ελεγχθεί εάν το σημείο τομής  $\bar{w}$  είναι εσωτερικό του  $\pi$  ή όχι.
    - Εάν το  $\bar{w}$  είναι εσωτερικό του  $\pi$ , το τμήμα  $\tau$  της ακμής  $\kappa$  καλύπτεται από το  $\pi$  και επομένως αυτό δεν χρειάζεται να απεικονισθεί.
    - Εάν το  $\bar{w}$  είναι εξωτερικό του  $\pi$ , το τμήμα  $\tau$  της ακμής  $\kappa$  δεν καλύπτεται από το  $\pi$ .

Σημειώνεται ότι εάν βρεθεί ότι το τμήμα  $\tau$  της ακμής  $\kappa$  δεν καλύπτεται από το  $\pi$ , δεν διασφαλίζεται ότι το τμήμα είναι εμφανές, καθώς ενδέχεται να καλύπτεται από κάποιο άλλο πολύγωνο. Συνεπώς καθίσταται αναγκαίος ο έλεγχος της σχέσης του τμήματος  $\tau$  με όλα τα άλλα πολύγωνα.

### 3.1.4. Αλγόριθμοι Απόκρυψης Επιφανειών

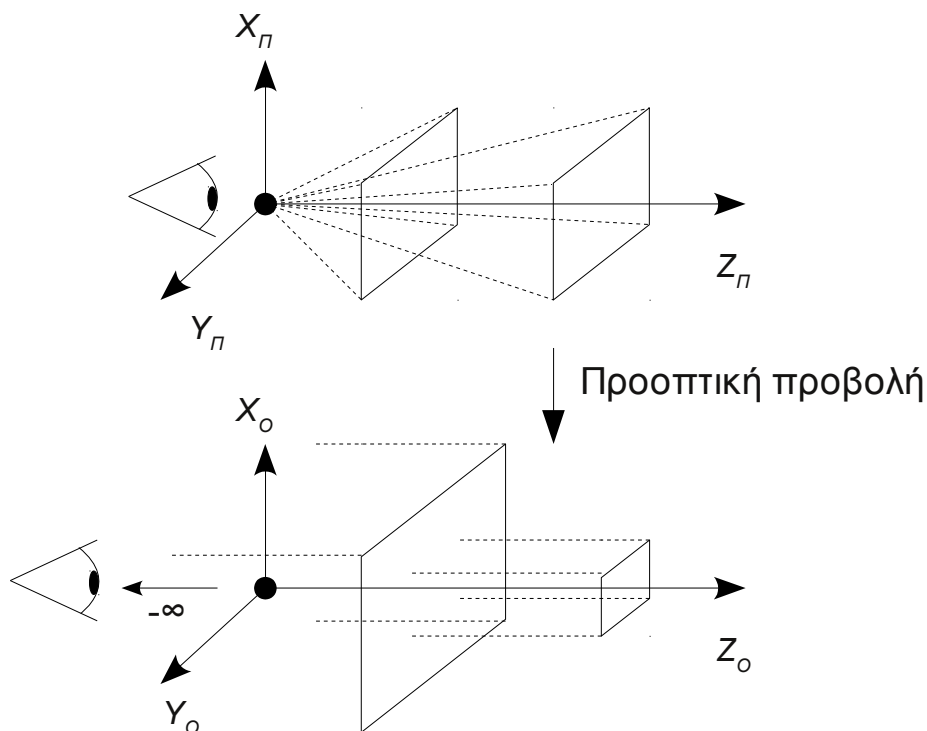
Στα τριδιάστατα Γραφικά Υπολογιστών, η *απόκρυψη κρυφών επιφανειών* (*hidden surface removal*) είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των επιφανειών και των τμημάτων επιφανειών τα οποία δεν είναι εμφανή (ορατά) από ένα συγκεκριμένο σημείο όρασης. Ένας αλγόριθμος που υλοποιεί την απόκρυψη επιφανειών καλείται *αλγόριθμος απόκρυψης επιφανειών*.

Οι αλγόριθμοι αυτοί ακολούθησαν την εμφάνιση της πλεγματικής οθόνης στα τέλη της δεκαετίας '60. Από τότε έχει αναπτυχθεί πληθώρα διαφορετικών προσεγγίσεων, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις (4) βασικές κατηγορίες:

1. Αλγόριθμος z-buffer
2. Αλγόριθμοι scanline
3. Αλγόριθμοι λίστας προτεραιότητας
4. Αλγόριθμοι υποδιαίρεσης επιφάνειας (area subdivision)

Εκ των παραπάνω, ο αλγόριθμος z-buffer είναι σήμερα ο δημοφιλέστερος<sup>[26]</sup>, λόγω της ευκολίας υλοποίησής του σε επίπεδο λογισμικού και υλικού και της καλής απόδοσής του, ιδιαίτερα για πεπλεγμένες σκηνές.

Η βασική πράξη που τελείται είναι η σύγκριση βάθους δύο στοιχείων με ίδιες συντεταγμένες  $X$  και  $Y$ . Κατά συνέπεια, είναι ιδιαίτερα βολική η εφαρμογή των αλγορίθμων μετά την προοπτική προβολή στον χώρο οθόνης, καθώς μετατρέπονται οι ακτίνες προβολής ώστε να είναι παράλληλες με τον άξονα  $Z_o$ , όπως εικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.4: Επίδραση προοπτικής προβολής στις ακτίνες προβολής

Με χρήση του μετασχηματισμού προοπτικής προβολής, απαιτείται μόνο η σύγκριση των σημείων που έχουν ίδιες  $X_0$  και  $Y_0$  συντεταγμένες. Ωστόσο, ίσες αποστάσεις στον άξονα  $Z_n$  δεν μετασχηματίζονται σε ίσες αποστάσεις στον άξονα  $Z_0$ , ενώ οι τιμές στον  $Z_0$  μεταβάλλονται ταχύτερα καθώς πλησιάζουν το επίπεδο αποκοπής (μέγιστη τιμή του  $Z_n$ ).

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν συνοπτικά οι τέσσερις κυριότερες κατηγορίες αλγορίθμων απόκρυψης, με ιδιαίτερη έμφαση στον αλγόριθμο z-buffer και στους αλγορίθμους scanline, λόγω της δημοφιλούς χρήσης τους.

#### 3.1.4.1. Αλγόριθμος z-buffer

Ο αλγόριθμος z-buffer προϋποθέτει ύπαρξη *βάθους μνήμης*<sup>[27]</sup> (z-buffer) για κάθε pixel. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- ➔ Οι τιμές χρωματισμού και βάθους ενός pixel υπολογίζονται (για τα περισσότερα σχήματα) με παρεμβολή των αντίστοιχων τιμών στις κορυφές.
- ➔ Εκτελείται έμμεση ταξινόμηση των πολυγώνων σε κάθε σημείο X-Y, κατά αύξουσα τιμή βάθους z.
- ➔ Για κάθε pixel ο z-buffer φυλάσσει την (τρέχουσα) ελάχιστη τιμή βάθους στο pixel αυτό.
- ➔ Η αρχικοποίηση όλων των τιμών του z-buffer γίνεται στο μέγιστο z (πίσω επίπεδο αποκοπής).

Ακολουθεί ψευδοκώδικας του αλγορίθμου<sup>[28]</sup>:

```
/* z-buffer algorithm */
/* Initialization: m,n are the screen dimensions */
for (x=0; x<m; x++)
    for (y=0; y<n; y++) {
        z_buffer[x,y] = f;           /* maximum depth */
        frame_buffer[x,y] = background; /* background color */
    }
}

/* Polygon processing */
for (pol=0; pol < number_of_polygons(); pol++)
    /* Process polygon scanlines ymin ... ymax */
    for (y=ymin; y<=ymax; y++) {
        /* Find using linear interpolation
        between the respective nodes,
        the intersection values with scanline y : xleft, xright
        the depth values at the intersections : zleft, zright
        the color values at the intersections : cleft, cright
        */
```



```

for (x=xleft; x<=xright; x++) {
    /* Find using linear interpolation between
       xleft and xright the depth value z and
       color value c at every pixel x,y
    */
    if (z<z_buffer[x,y]) {
        z_buffer[x,y] = z;
        frame_buffer[x,y] = c;
    }
}
}

```

### Παρατηρήσεις:

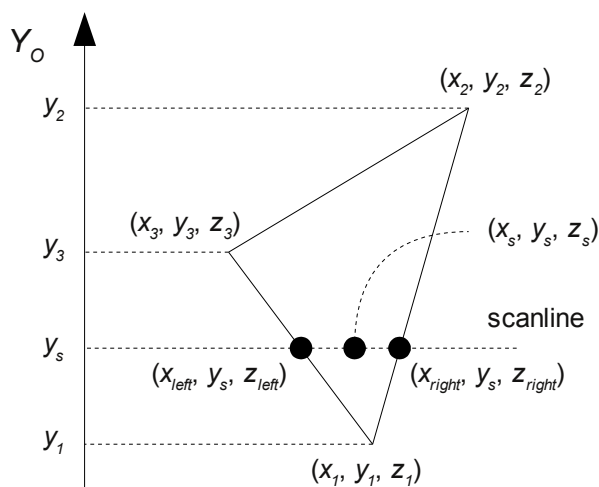
1. Οι τομές πλευρών πολυγώνου με scanlines υπολογίζονται με λίστα ενεργών πλευρών. Κατά συνέπεια, είναι δυνατή η επεξεργασία μη κυρτών πολυγώνων με πολλαπλές τομές ανά γραμμή σάρωσης.
2. Η γραμμική γραμμή μίας τιμής, (π.χ. z) στο εσωτερικό πολυγώνου υπολογίζεται με επαναληπτικές παρεμβολές ως εξής:
  - i. Υπολογισμός αντίστοιχων τιμών στις τομές του scanline y με τις πλευρές του πολυγώνου με παρεμβολή:

$$z_{\text{left}} = z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{y_s - y_1}{y_2 - y_1}$$

$$z_{\text{right}} = z_1 + (z_3 - z_1) \cdot \frac{y_s - y_1}{y_3 - y_1}$$

- ii. Υπολογισμός επιθυμητής τιμής στο υπό εξέταση pixel με παρεμβολή:

$$z_s = z_{\text{left}} + (z_{\text{right}} - z_{\text{left}}) \cdot \frac{x_s - x_{\text{left}}}{x_{\text{right}} - x_{\text{left}}}$$



Σχήμα 3.5: Παρεμβολή Z

Εύκολα προκύπτει ότι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι  $O(P \cdot S)$ , όπου:

- $P$  ο αριθμός των πολυγώνων
- $S$  ο μέσος αριθμός pixel ανά πολύγωνο

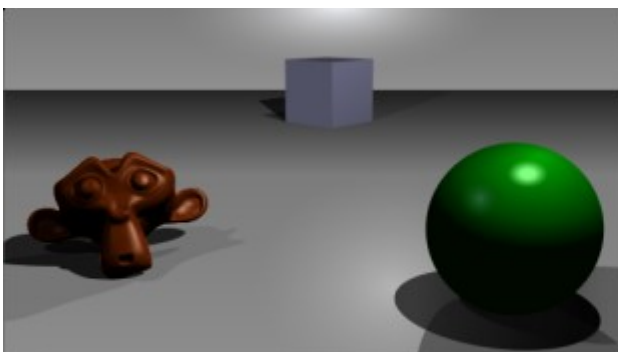
Για τυπικές σκηνές, ωστόσο, καθώς ο αριθμός των πολυγώνων αυξάνει, η επιφάνειά τους γενικά μικραίνει αντιστρόφως ανάλογα. Συνεπώς το γινόμενο  $P \cdot S$  είναι γενικά σταθερό και ανάλογο της ανάλυσης οθόνης, δηλαδή  $P \cdot S \propto m \cdot n$  (σταθερό). Στην πράξη έχει όντως διαπιστωθεί ότι η απόδοση του z-buffer έχει σταθερή απόδοση, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από την ανάλυση της οθόνης.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του z-buffer συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Ευκολία υλοποίησης σε επίπεδο υλικού ή λογισμικού.
- ✓ Δυνατότητα επεξεργασίας πολυγώνων με τυχαία σειρά, καθώς ο z-buffer αποθηκεύει το τρέχον ελάχιστο των τιμών βάθους και χρώματος.
- ✓ Δυνατότητα εφαρμογής σε μη πολυγωνικά αντικείμενα, στα οποία μπορεί να οριστεί μία συνάρτηση βάθους, για παράδειγμα σε επιφάνειες προκύπτουσες από συνδυασμός γεωμετρικών στερεών<sup>[29]</sup>.

Το κυριότερο μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι οι απαιτήσεις μνήμης, καθώς ένας καλός z-buffer απαιτεί ως 32 bits για κάθε pixel. Για μεγάλες αναλύσεις οθόνης, παραδείγματος χάριν 1024x1024, τότε απαιτούνται 4 Mbytes μνήμης. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή οι μνήμες αυτού του μεγέθους είναι πλέον φθηνές. Συνεπώς, η εύκολη υλοποίηση του αλγορίθμου, η σταθερή του απόδοση και οι φθηνές απαιτήσεις σε απαιτούμενο υλικό οδήγησαν στο να γίνει ο z-buffer ο δημοφιλέστερος αλγόριθμος απόκρυψης επιφανειών.

Τέλος, στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται μία γραφική αναπαράσταση των δεδομένων ενός z-buffer<sup>[30]</sup>. Συγκεκριμένα, οι τιμές του βάθους z αναπαριστώνται με αποχρώσεις του γκρι. Σκούρες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές του βάθους, δηλαδή κοντά στο σημείο όρασης, ενώ φωτεινότερες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές του βάθους, δηλαδή κοντά στο επίπεδο αποκοπής.



A simple three-dimensional scene



Z-buffer representation

Σχήμα 3.6: Γραφική αναπαράσταση δεδομένων ενός z-buffer

### 3.1.4.2. Ειδικές εφαρμογές z-buffer

Πέρα από την απόκρυψη επιπέδων, ο αλγόριθμος z-buffer είναι δημοφιλής και για την εφαρμογή του σε πληθώρα ειδικών εφαρμογών, δύο από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 1. Συνδυασμός εικόνων<sup>[31][32]</sup>

- Έστω οι frame και z-buffer δύο αντικειμένων  $A$  και  $B$ .
- Τα αντικείμενα  $A$  και  $B$  μπορεί να δημιουργήθηκαν χωριστά, ακόμα και με διαφορετικές τεχνικές.
- Τα αντικείμενα μπορούν να συνδυαστούν σε μία νέα σκηνή  $C$  λαμβάνοντας την “ελάχιστη τομή” των δύο z-buffers ως εξής:

```
for (x=0; x<m; x++)
    for (y=0; y<n; y++) {
        Zc[x,y] = (ZA[x,y] < ZB[x,y]) ? ZA[x,y] : ZB[x,y];
        Fc[x,y] = (ZA[x,y] < ZB[x,y]) ? FA[x,y] : FB[x,y];
    }
```

#### 2. Τοποθέτηση 3D αντικειμένων σε σκηνή<sup>[33]</sup>

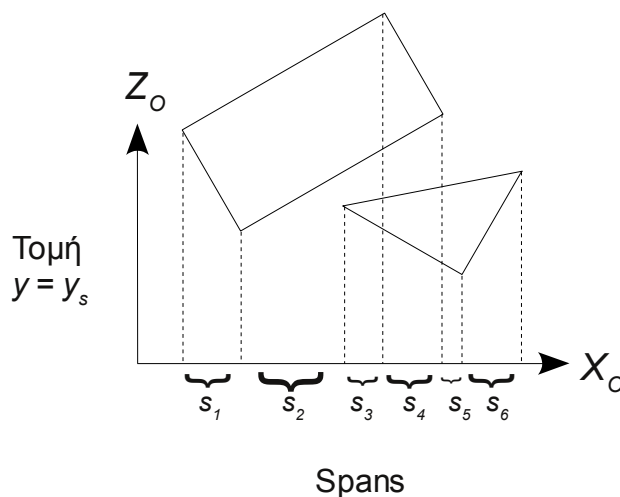
- Χρήση του z-buffer για τοποθέτηση τριδιάστατων αντικειμένων μέσα σε σκηνή, χωρίς την αλλαγή των περιεχομένων του.
- Τοποθέτηση και ελεύθερη μετακίνηση τριδιάστατου βοηθητικού πλέγματος ή 3D cursor.
- Δεν μεταβάλλονται τα περιεχόμενα z-buffer, συνεπώς ευνοείται η ελεύθερη μετακίνηση των αντικειμένων.

### 3.1.4.3. Αλγόριθμοι scanline

Οι αλγόριθμοι scanline είναι αλγόριθμοι απόκρυψης επιφανειών, οι οποίοι βασίζονται σε επεξεργασία κατά σειρά αντί για επεξεργασία κατά πολύγωνο ή κατά pixel. Τα τυπικά βήματα τέτοιων αλγορίθμων είναι τα εξής<sup>[34][35]</sup>:

1. Θεωρούνται πολυγωνικά αντικείμενα τα οποία δεν τέμνονται μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση, ο αλγόριθμος γίνεται πολύ πολύπλοκος.
2. Έστω η γραμμή σάρωσης  $y_s$ .
3. Θεωρείται επίπεδο τομής παράλληλο με το  $XZ$ , το οποίο διέρχεται από την γραμμή σάρωσης  $y_s$ .
4. Υπολογίζονται οι πολυγωνικές τομές του επιπέδου με τα πολυγωνικά αντικείμενα.
5. Προβάλλονται οι πολυγωνικές ακμές των τομών πάνω στην γραμμή σάρωσης.
6. Η γραμμή σάρωσης χωρίζεται σε τμήματα που καλούνται *span*.
7. Κάθε *span* αντιστοιχεί σε μία ορατή ακμή και χρωματίζεται με βάση το χρώμα της.
8. Εύρεση ορατής ακμής με ταξινόμηση όλων των ακμών που προβάλλονται στο *span* ως προς το βάθος  $z$ .

Ένα στιγμιότυπο του αλγορίθμου εικονίζεται παρακάτω (προϊόν μορφοποίησης από εικόνα στην αναφορά [36]):



Σχήμα 3.7: Τομή δύο αντικειμένων με επίπεδο  $y = y_s$

### Σύγκριση με αλγόριθμο z-buffer

Το κυριότερο πλεονέκτημα των αλγορίθμων scanline είναι ότι τα ορατά pixels υφίστανται επεξεργασία μόνο μία φορά, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις υψηλής ανάλυσης ή υπολογιστικά ακριβών υπολογισμών σκίασης.

Ωστόσο, η απόδοση του αλγορίθμου εξαρτάται από τον αριθμό των πολυγώνων καθώς και τον αριθμό των *span*. Καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα μίας σκηνής μειώνεται η απόδοσή του. Αντίθετα, ο *z-buffer* έχει σταθερή απόδοση ακόμα και σε σκηνές με μεγάλη πολυπλοκότητα. Καθώς τέτοιες σκηνές εμφανίζονται κατά κόρον σήμερα, προτιμάται συνήθως ο αποδοτικότερος αλγόριθμος *z-buffer* για την απόκρυψη επιφανειών.

#### 3.1.4.4. Αλγόριθμοι λίστας προτεραιότητας

- Ταξινόμηση πολυγώνων κατά βάθος και εμφάνιση με σωστή σειρά.
  - Δεν είναι δυνατή όταν εμφανίζεται αλληλοεπικάλυψη του Z άξονα ή υπάρχουν τεμνόμενα πολύγωνα.
  - Απαιτείται έλεγχος και διαμερισμός πολυγώνων για την αντιμετώπιση των αλληλεπικαλύψεων.
- Χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα και χαμηλή απόδοση για πεπλεγμένες σκηνές και για αυτό δεν είναι διαδεδομένοι.
- Λειτουργία σε δύο επίπεδα:
  - Χώρος αντικειμένων, όπου γίνεται η ταξινόμηση των αντικειμένων.
  - Χώρος εικόνας, όπου γίνεται η εμφάνιση των αντικειμένων.
- Εάν το αποτέλεσμα θεωρηθεί η ταξινομημένη λίστα, οι αλγόριθμοι αυτοί χαρακτηρίζονται ως αλγόριθμοι χώρου αντικειμένων.
- Ενδεικτικοί αλγόριθμοι:
  - Αλγόριθμος ταξινόμησης κατά βάθος<sup>[37]</sup>.
  - Αλγόριθμος BSP δένδρου<sup>[38][39]</sup>.

#### 3.1.4.5. Αλγόριθμοι υποδιαίρεσης επιφάνειας

- Αναδρομική διαίρεση επιπέδου προβολής.
  - Εάν μία περιοχή της οθόνης καλύπτεται πλήρως από ένα (1) πολύγωνο, τότε αυτή παίρνει το χρώμα του πολυγώνου.
  - Σε αντίθετη περίπτωση διαιρείται η περιοχή σε μικρότερες περιοχές και εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αναδρομικά.
  - Η αναδρομή σταματά τελικά στο μέγεθος pixel.
  - Εκμετάλλευση συνάφειας επιφάνειας (γειτονικά pixel συνήθως αναπαριστούν την ίδια επιφάνεια) στην ταυτοποίηση μεγάλων πολυγώνων σταθερού χρώματος.
- Αλγόριθμος Warnock<sup>[40]</sup>:
  - Διαίρεση περιοχής σε 4 ίσου εμβαδού περιοχές.
  - Λήξη αναδρομής εάν από ένα τμήμα διέρχεται το πολύ μία (1) ακμή πολυγώνου.
  - Έλεγχος: συγκρίσεις προβολής πολυγώνου  $P$  με περιοχή βάθους  $B$ .
  - Χρήση περιβαλλόντων ορθογωνίων γύρω από το  $P$  για μείωση υπολογιστικού κόστους. Προκύπτουν:
    - $P: (x_{\min}(P), y_{\min}(P)), (x_{\max}(P), y_{\max}(P))$
    - $B: (x_{\min}(B), y_{\min}(B)), (x_{\max}(B), y_{\max}(B))$

- Διάκριση 4 περιπτώσεων σχέσης  $P$  και  $B$ :
  - $D$ : Disjoint,  $P$  εξωτερικό της  $B$ .
  - $C$ : Contained,  $P$  εσωτερικό της  $B$ .
  - $S$ : Surrounding,  $P$  καλύπτει πλήρως της  $B$ .
  - $I$ : Intersecting,  $P$  τέμνει της  $B$ .

Για παράδειγμα, η σχέση  $D$  εξασφαλίζεται εάν ισχύει:

$$[ x_{\min}(P) > x_{\max}(B) ] \text{ ή } [ x_{\max}(P) < x_{\min}(B) ] \text{ ή } \\ [ y_{\min}(P) > y_{\max}(B) ] \text{ ή } [ y_{\max}(P) < y_{\min}(B) ]$$

Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

1. **Καμία τομή**: δεν υπάρχει κανένα πολύγωνο  $P$  το οποίο να περιέχεται στην  $B$  ή να τέμνει την  $B$ , δηλαδή ισχύει η σχέση  $D$  για όλα τα πολύγωνα της σκηνής.  
Αποτέλεσμα: στην  $B$  δίνεται το χρώμα του φόντου.
2. **Εσωτερικό πολύγωνο**: ύπαρξη μοναδικού πολυγώνου  $P$  του οποίου το περιβάλλον ορθογώνιο καλύπτεται πλήρως από την  $B$ .  
Αποτέλεσμα: στην  $B$  δίνεται αρχικά το χρώμα του φόντου και στη συνέχεια στα σημεία τα οποία καλύπτονται από το  $P$  δίνεται το χρώμα του  $P$ .
3. **Καλύπτει πολύγωνο**: ύπαρξη πολυγώνου  $P$  το οποίο καλύπτει πλήρως την  $B$  και επιπλέον:
  - ◆ δεν υπάρχουν άλλα πολύγωνα που περιέχονται στην  $B$  ή τέμνουν την  $B$
  - ◆ ή το πολύγωνο  $P$  βρίσκεται μπροστά σε σχέση με τον παρατηρητή από όλα τα άλλα πολύγωνα τα οποία επικαλύπτονται με την  $B$ .
 Αποτέλεσμα: στην  $B$  δίνεται το χρώμα του  $P$ .
4. **Τίποτα από τα παραπάνω**: εκτελείται αναδρομική διαίρεση της  $B$ .

Είναι εμφανές ότι επειδή ο αλγόριθμος τερματίζει όταν το μέγεθος της περιοχής φτάσει το μέγεθος του pixel, θα εκτελεστούν το πολύ 10 διαιρέσεις επιφανειών σε 4 επιφάνειες σε ανάλυση 1024x1024.

### 3.1.4.6. Σύγκριση των μεθόδων

Σε εργασία τους το 1974, οι Sutherland, Sproull και Schumacker<sup>[41]</sup> πραγματοποίησαν συγκριτική μελέτη δέκα (10) συνολικά αλγορίθμων απόκρυψης επιφανειών. Τα αποτελέσματα, τα οποία αφορούν τους αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Αλγόριθμος	Αριθμός Πολυγωνικών Επιφανειών		
	200	5,000	120,000
depth-sort	$0.14 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$	$71 \cdot 10^6$
z-buffer	$7.5 \cdot 10^6$	$7.5 \cdot 10^6$	$7.5 \cdot 10^6$
scan-line	$0.77 \cdot 10^6$	$2.9 \cdot 10^6$	$14 \cdot 10^6$
Υποδιαίρεση επιφάνειας	$1.6 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	$43 \cdot 10^6$

Στη σημερινή εποχή είναι συνήθεις οι τριδιάστατες σκηνές με πολύ περισσότερα από 120,000 πολύγωνα και συνεπώς γίνεται εύκολα κατανοητή η διάδοση του z-buffer, ο οποίος έχει σταθερή απόδοση, εξαρτώμενη μόνο από την ανάλυση της οθόνης.

### 3.2. Τεχνικές σκίασης

Η δημιουργία σκίασης είναι μία περιοχή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν μοντελοποιείται ένα περιβάλλον όπου υπάρχει συγκεκριμένη πηγή φωτός, πέρα από τον γενικό (ambient) φωτισμό, με συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η σκίαση γίνεται συνήθως για οπτικούς λόγους, όπως παραδείγματος χάριν για να φανερωθεί η ώρα της ημέρας, εάν πρόκειται για ήλιο. Επίσης, ανάλογα την εφαρμογή, παρέχεται η δυνατότητα να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες από την σκίαση των αντικειμένων, όπως η μοντελοποίηση που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία.

Για σημειακές πηγές φωτός μπορεί να προηγηθεί εφαρμογή αλγορίθμων απόκρυψης επιφανειών, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, με σκοπό τον προσδιορισμό των ορατών επιφανειών. Συγκεκριμένα:

- Η σημειακή πηγή φωτός τίθεται στην θέση του παρατηρητή.
- Καθορίζονται οι ορατές επιφάνειες, με εφαρμογή αλγορίθμων απόκρυψης, με αποτέλεσμα την μείωση του υπολογιστικού κόστους για την δημιουργία σκίασης.
- Οι μη ορατές επιφάνειες, οι οποίες θα βρίσκονται υπό σκιά, είναι δυνατόν να παρασταθούν κατάλληλα, για παράδειγμα με εφαρμογή καταλλήλων αλγορίθμων υφής.

Σημειώνεται ότι:

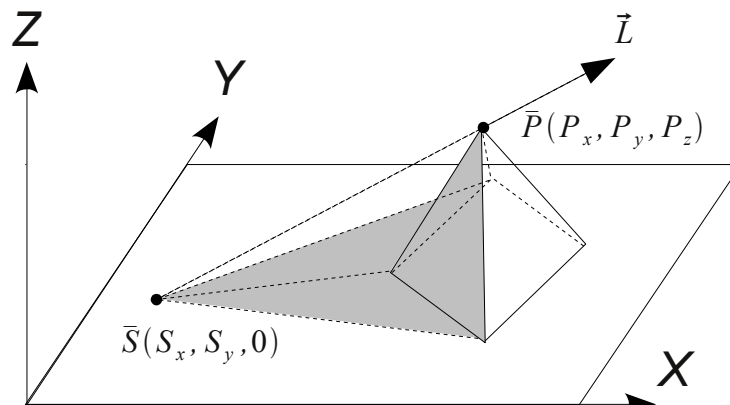
- ✓ Με στατική σκηνή και σταθερή θέση φωτεινής πηγής, οι υπολογισθείσες σκιές είναι ανεξάρτητες από την θέση του παρατηρητή.
- ✓ Εάν θεωρηθεί μοναδική σημειακή πηγή φωτός στη θέση του παρατηρητή, τότε δεν απαιτείται να γίνει υπολογισμός σκιών.

Ένας απλός τρόπος υπολογισμού της σκιάς ενός ή πολλαπλών αντικειμένων που βρίσκονται πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια, παρατίθεται παρακάτω<sup>[42]</sup>:

- Θεωρείται σημειακή φωτεινή πηγή.
- Η σημειακή πηγή μπορεί να είναι τοποθετημένη είτε σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου είτε στο άπειρο.
- Για να υπολογισθεί η σκιά του αντικειμένου, αρκεί ο υπολογισμός της προβολής του αντικειμένου στο επίπεδο.
- Για να βρεθεί η προβολή του αντικειμένου, αρκούν να υπολογισθούν μόνο οι προβολές των κορυφών του στο επίπεδο, ανάλογα με το μοντέλο φωτισμού που χρησιμοποιείται.
- Εάν η πηγή θεωρηθεί στο άπειρο με κατεύθυνση  $\vec{L}=(l_x, l_y, l_z)$  , τότε λαμβάνεται η παράλληλη προβολή των κορυφών του αντικειμένου στο επίπεδο με κατεύθυνση προβολής  $\vec{L}$  .
- Αντίθετα, εάν η πηγή θεωρηθεί σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου, λαμβάνεται η (προοπτική) προβολή των κορυφών ως προς την σημειακή πηγή φωτός.



Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η δημιουργία σκίασης ενός αντικειμένου στο επίπεδο XY, όταν θεωρείται σημειακή πηγή φωτός στο άπειρο. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται το μοντέλο παράλληλου φωτισμού, οπότε οι προβολές όλων των κορυφών υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 3.8: Υπολογισμός σκιάς σε επίπεδο

Στο παραπάνω σχήμα προβάλλεται η κορυφή  $\bar{P}$  του πολυγώνου στο επίπεδο, οπότε και προκύπτει το σημείο  $\bar{S}$  στο επίπεδο. Είναι εμφανές ότι τα σημεία  $\bar{P}$  και  $\bar{S}$  ανήκουν σε ευθεία παράλληλη με το διάνυσμα  $\vec{L}$ , το οποίο είναι η κατεύθυνση της σημειακής πηγής στο άπειρο. Συνεπώς, ορίζουν ένα διάνυσμα συγγραμμικό με το  $\vec{L}$  ως εξής:

$$\bar{P} - \bar{S} = \lambda \vec{L}$$

Καθώς γνωρίζουμε ότι η z συντεταγμένη του  $\bar{S}$  είναι μηδέν, δηλαδή ισχύει  $S_z = 0$ , λαμβάνεται η z συντεταγμένη της παραπάνω εξίσωσης:

$$P_z - 0 = \lambda \cdot I_z \Rightarrow \lambda = \frac{P_z}{I_z}$$

Έτσι υπολογίζονται οι συντεταγμένες του  $\bar{S}$  ως εξής:

$$S_x = P_x - \frac{P_z}{I_z} \cdot I_x \quad \text{και} \quad S_y = P_y - \frac{P_z}{I_z} \cdot I_y$$

Σε αντίθετη περίπτωση όπου η πηγή δεν θεωρείται σε άπειρη απόσταση, κάθε κορυφή του τριγώνου θα προβληθεί με διαφορετικό τρόπο στο επίπεδο, με σημείο αναφοράς την σχετική της θέση ως προς την σημειακή πηγή φωτός. Συγκεκριμένα:

- Έστω  $\bar{Q}$  η πεπερασμένη θέση της σημειακής πηγής στο χώρο.
- Για κάθε γωνία  $\bar{P}$  του πολυγώνου ορίζεται το διάνυσμα  $\vec{L} = \bar{Q} - \bar{P}$ .
- Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν, ωστόσο με διαφορετικό διάνυσμα  $\vec{L}$  για κάθε κορυφή του πολυγώνου.

Σε περίπτωση που αλληλοσκιάζονται τα αντικείμενα, δημιουργείται στο επίπεδο το αποτέλεσμα της επικάλυψης των σκιών τους.

### 3.3. Διαφάνεια (transparency)

Στην επιστημονική περιοχή της οπτικής, ένα υλικό ορίζεται *διαφανές* όταν επιτρέπει την διέλευση του φωτός μέσα από αυτό. Η αντίστοιχη φυσική ιδιότητα ονομάζεται *διαφάνεια*. Η ιδιότητα αυτή έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας στην περιοχή των Γραφικών Υπολογιστών, όπου διεξάγονται έρευνες γύρω από τη ρεαλιστική αναπαράσταση των διαφανών αντικειμένων.

Παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες εικόνες που δημιουργούνται με τους υπάρχοντες αλγόριθμους δίνουν την αίσθηση της διαφάνειας, αρκετές από αυτές δεν είναι την αναπαριστούν με πειστικό τρόπο, για δύο κυρίως λόγους<sup>[43]</sup>:

- a) Η ένταση του φωτός που μεταδίδεται μέσα από τα αντικείμενα, δεν είναι ανάλογη με την ποσότητα του υλικού μέσα από το οποίο πρέπει να διέλθει, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.
- b) Η εικόνα που εμφανίζεται πίσω από τα αντικείμενα δεν είναι παραμορφωμένη όπως θα προέκυπτε με φυσικό τρόπο όταν το φως διαθλάται καθώς διέρχεται από υλικό με διαφορετική πυκνότητα.

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν απλοί αλγόριθμοι οι οποίοι μοντελοποιούν την φωτεινή ένταση με απλό, αποδοτικό και ρεαλιστικό τρόπο. Δεν θα γίνει εστίαση σε αλγόριθμους διάθλασης, καθώς το φαινόμενο αυτό δεν απαντάται συχνά στις υπό μελέτη εφαρμογές ακτίνων Χ.

Για τον καθορισμό του πώς θα μεταβληθεί η φωτεινή ένταση μιας *εικόνας φόντου* (*background image*) είναι χρήσιμη η εξέταση ενός πραγματικού διαφανούς αντικειμένου. Συνήθως είναι δυνατή η παρατήρηση μέσα από τα περισσότερα τμήματα ενός αντικειμένου και η καθαρή θέαση του φόντου υπό πλήρη ή σχεδόν πλήρη ένταση φωτός. Μόνο γύρω από τις ακμές, από όπου το φως θα πρέπει να διαπεράσει περισσότερο υλικό και μεγεθύνονται οι συνέπειες της διάθλασης, παρατηρείται μειωμένη ένταση του διερχόμενου φωτός.

#### 3.3.1. Γραμμικοί αλγόριθμοι διαφάνειας

Τα διαφανή υλικά μπορούν να μοντελοποιηθούν με απλό τρόπο εισάγοντας μόνο μία γραμμική συνάρτηση υπολογισμού έντασης, η οποία περιγράφεται στα ακόλουθα βήματα, που προτάθηκαν από τους Newell, Newell & Sancha<sup>[37]</sup>:

1. Σχεδιάζεται και αποθηκεύεται η εικόνα φόντου.
2. Η εικόνα του διαφανούς αντικειμένου σχεδιάζεται πάνω από την εικόνα φόντου.  
Εισάγεται ένα σταθερό βάρος  $t$ , με  $0 \leq t \leq 1$ , για τον συνδυασμό της υπολογιζόμενης, με κάποιο μοντέλο φωτισμού, έντασης  $I_0$  του αντικειμένου με την ένταση  $I_B$  του όπισθεν αντικειμένου, δηλαδή εάν το αντικείμενο ήταν πλήρως αδιαφανές.
3. Η φωτεινή ένταση της εικόνας ακολουθεί την εξής γραμμική προσέγγιση:

$$I = t \cdot I_B + (1 - t) \cdot I_0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

Όπου:

- $I$  = φωτεινή ένταση της τελικής εικόνας
- $I_B$  = αποθηκευμένη φωτεινή ένταση της τρέχουσας εικόνας φόντου
- $t$  = παράγοντας διαφάνειας (0 έως 1) του αντικειμένου, όπου:
  - $t = 0$ , όταν το αντικείμενο είναι πλήρως αδιαφανές
  - $t = 1$ , όταν το αντικείμενο είναι πλήρως διαφανές (αόρατο)

Το  $t$  ονομάζεται *παράγοντας διαφάνειας*<sup>[44]</sup>. Η εν λόγω μέθοδος προσαρμόζει αποδοτικά την εικόνα φόντου με το αντικείμενο που σκιάζεται για την παραγωγή του επιθυμητού συνδυασμού.

Ο γραμμικός αλγόριθμος προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα. Λόγω της απλότητάς του, είναι μία εύκολη προσθήκη σε κάποιον αλγόριθμο ομαλής σκίασης. Η αύξηση στον χρόνο επεξεργασίας εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το πόσος χρόνος απαιτείται για την ανάγνωση της αποθηκευμένης εικόνας φόντου.

Σε ένα πολύ απλό περιβάλλον, το οποίο, για παράδειγμα, αποτελείται από μία απλή πηγή φωτός τοποθετημένη στη θέση του παρατηρητή, αυτή η μοντελοποίηση μπορεί να είναι επαρκής. Δυστυχώς, αυτός ο απλός αλγόριθμος δεν αναπαριστά με ακρίβεια τις οπτικές ιδιότητες των πραγματικών υλικών με αποτέλεσμα να προκύπτουν γρήγορα πολλά προβλήματα, ειδικά όταν ο παράγοντας διαφάνειας είναι υψηλός ή οι φωτεινές πηγές βρίσκονται σε θέσεις διαφορετικές από τη θέση του παρατηρητή.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του προαναφερθέντος γραμμικού αλγορίθμου παρουσιάζεται στην εικόνα 1 (figure 1) της δημοσίευσης [43]. Η εικόνα δεν περιλήφθηκε στο παρόν κείμενο για λόγους σχετιζόμενους με τα νομικά θέματα περί πνευματικής ιδιοκτησίας.

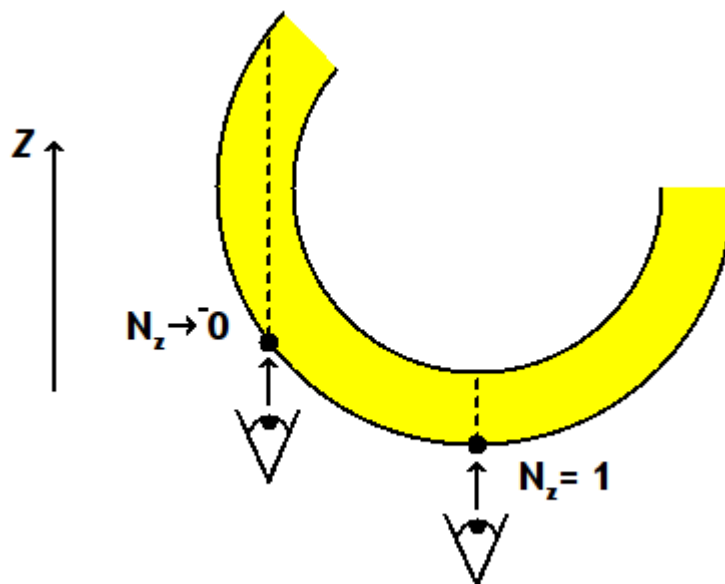
### 3.3.2. Μη-γραμμικοί αλγόριθμοι διαφάνειας

Το κυρίαρχο πρόβλημα που εντοπίζεται στη χρήση απλών αλγορίθμων διαφάνειας είναι το αποτέλεσμα του ελέγχου του παράγοντα διαφάνειας με χρήση γραμμικών συναρτήσεων, ο οποίος κρίνεται ανεπαρκής σε καμπυλόγραμμες επιφάνειες. Σε ιδανική περίπτωση, ο βαθμός διαφάνειας πρέπει να εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού μέσα από την οποία θα πρέπει να διέλθει το φως.

#### 3.3.2.1. Προσέγγιση με χρήση κανονικού διανύσματος

Μία πρώτη προσέγγιση για τις καμπυλόγραμμες επιφάνειες θα ήταν η διασφάλιση της μείωσης του παράγοντα διαφάνειας κοντά στις ακμές.

Για κενό (εσωτερικά) διαφανές αντικείμενο έχει παρατηρηθεί<sup>[44]</sup> ότι η μία ακτίνα φωτός που το διαπερνά συναντά ποσότητα υλικού του αντικειμένου η οποία έχει αντίστροφη σχέση με την  $N_z$  συντεταγμένη του μοναδιαίου κανονικού διανύσματος του αντικειμένου στο αντίστοιχο σημείο, όπως εικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.9: Χρήση  $N_z$  στη Διαφάνεια

Με τον τρόπο αυτό, η προσέγγιση της διαφάνειας επιτυγχάνεται με μη-γραμμικό υπολογισμό του παράγοντα διαφάνειας, ο οποίος προτάθηκε από τους Kay και Greenberg<sup>[43]</sup>:

$$t = t_{min} + (t_{max} - t_{min}) \cdot [1 - (1 - |N_z|)^p]$$

Όπου:

- $t$  = παράγοντας διαφάνειας (0 έως 1) του τρέχοντος pixel του αντικειμένου
- $t_{max}$  = μέγιστος παράγοντας διαφάνειας οποιουδήποτε σημείου του αντικειμένου
- $t_{min}$  = ελάχιστος παράγοντας διαφάνειας οποιουδήποτε σημείου του αντικειμένου
- $N_z$  = Z-συντεταγμένη του μοναδιαίου κανονικού διανύσματος του αντικειμένου στο αντίστοιχο σημείο

- $p$  = εκθέτης διαφάνειας

Από τη χρήση του μοντέλου εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Με μία τυπική τιμή του εκθέτη διάθλασης  $p$  σε 2 ή 3, παράγεται μία σχετικά σταθερή διαφάνεια πάνω από τις περισσότερες επιφάνειες του αντικειμένου, ενώ ο παράγοντας διαφάνειας μειώνεται γρήγορα στο μηδέν κοντά στις ακμές της εικόνας.
- Ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, η διαφάνεια τελικά ελέγχεται από την κατεύθυνση της επιφάνειας, ως προς την γωνία θέασης.
- Διάφορες εκθετικές τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση υλικών διάφορων τύπων. Για παράδειγμα:
  - Για λεπτό γυαλί, μία λεπτή γραμμή μικρής διαφάνειας κατά μήκος της ακμής μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες εκθετικές τιμές.
  - Αντίθετα, μικρότερη εκθετική τιμή θα χρησιμοποιηθεί για γυαλί μεγαλύτερου πάχους.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του προαναφερθέντος μη-γραμμικού αλγορίθμου παρουσιάζεται στην εικόνα 2 (figure 2) της δημοσίευσης [43]. Η εικόνα δεν περιλήφθηκε στο παρόν κείμενο για λόγους σχετιζόμενους με τα νομικά θέματα περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Εντούτοις, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης ενθαρρύνεται να ανατρέξει σε αυτή (ή αντίστοιχες εικόνες), δεδομένου ότι διευκολύνει σημαντικά την κατανόηση της ποιοτικής διαφοράς μεταξύ των προτεινόμενων γραμμικών και μη-γραμμικών αλγορίθμων.

### 3.3.2.2. Προσθήκη συντελεστή διανυθείσας απόστασης

Με χρήση του απλού μη-γραμμικού αλγορίθμου που παρουσιάστηκε προκύπτουν δύο βασικά προβλήματα κατά την τριδιάστατη απεικόνιση:

- i. *Έλλειψη αντικειμενικότητας*: η ένταση του φωτός που εξέρχεται από το διαφανές υλικό δεν συσχετίζεται με την απόσταση την οποία έχει διανύσει το φως μέσα στο διαφανές υλικό.
- ii. *Όξυνση ακμών*: ο παράγοντας διαφάνειας στις ακμές των αντικειμένων είναι τόσο μικρός με αποτέλεσμα οι ακμές να εμφανίζονται πολύ φωτεινές και οξυμένες κατά την ανακατασκευή τους. Το πρόβλημα γίνεται πιο σοβαρό σε ιατρικά δεδομένα, λόγω των απότομων κλίσεων που παρουσιάζουν οι ανθρώπινοι ιστοί και τα όργανα.

Ένας αλγόριθμος αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων προτάθηκε από τους Yuhui, Jinzhu, Fangfang & Dazhe<sup>[45]</sup>. Η κεντρική ιδέα είναι ο περιορισμός των υπό εξέταση αντικειμένων σε ένα πλαίσιο ή κουτί οριοθέτησης (*bounding box*). Ως αποτέλεσμα, η ταχύτητα δειγματοληψίας και ανασύνθεσης της εικόνας αυξάνεται δραματικά, καθώς περιορίζεται μόνο εντός του πλαισίου οριοθέτησης, αποκόποντας την εξωτερική πληροφορία.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής είναι οι εικόνες ιατρικών δεδομένων, από τις οποίες μόνο τα δύο τρίτα ή λιγότερο αποτελούν χρήσιμη πληροφορία, καθώς περιλαμβάνουν πληροφορίες για ανθρώπινους ιστούς και όργανα, ενώ από το υπόλοιπο ένα τρίτο δεν μπορεί να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία, καθώς περιέχεται αέρας, κτλ.

Το ελάχιστο πλαίσιο οριοθέτησης επιλέχθηκε να είναι αξονικά ευθυγραμμισμένο, δηλαδή ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με τις ακμές του παράλληλες στους τρεις καρτεσιανούς άξονες. Με τον τρόπο αυτό, διατηρείται η ταχύτητα των υπολογισμών, ενώ επιτυγχάνεται μία ικανοποιητική οριοθέτηση των υπό εξέταση δεδομένων, με μικρές αποκλίσεις.

Ο υπολογισμός του πλαισίου μπορεί να επιτευχθεί με χρήση τριδιάστατων αλγορίθμων σάρωσης γραμμής (3D scan-line algorithms). Λόγω της απλής γεωμετρίας της μεθόδου, ο χρόνος προεπεξεργασίας, ο υπολογισμός των τομών και οι απαιτήσεις μνήμης είναι στο ελάχιστο.

Ο αλγόριθμος συνοψίζεται στα εξής βήματα:

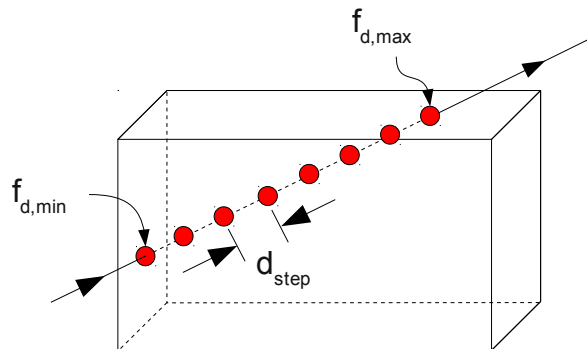
1. Επιλέγεται το αντικείμενο προς επεξεργασία.
2. Το αντικείμενο οριοθετείται από ένα αξονικά ευθυγραμμισμένο πλαίσιο οριοθέτησης.
3. Για μία ακτίνα φωτός, υπολογίζονται οι τομές της με το πλαίσιο οριοθέτησης και εξάγεται η κοντινότερη, προς την πηγή φωτός, απόσταση  $f_{d,min}$  και η μακρινότερη  $f_{d,max}$ .
4. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν στα μη-γραμμικά μοντέλα διαφάνειας, εισάγεται κατάλληλος διορθωτικός παράγοντας, ο *συντελεστής διανυθείσας απόστασης*, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$t = t_{min} + (t_{max} - t_{min}) \cdot \frac{d_{step}}{f_{d,max} - f_{d,min}} \cdot [1 - (1 - |N_z|)^p]$$

Όπου:

- $f_{d,max}$  είναι η μακρινότερη απόσταση τομής του φωτός με το πλαίσιο οριοθέτησης
- $f_{d,min}$  είναι η κοντινότερη απόσταση τομής του φωτός με το πλαίσιο οριοθέτησης
- $d_{step}$  είναι το τρέχον εμπρόσθιο βήμα του φωτός
- Τα υπόλοιπα μεγέθη όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση του φωτός με το πλαίσιο οριοθέτησης. Η εικόνα αποτελεί προϊόν μορφοποίησης της εικόνας 2 από την δημοσίευση [45].



Σχήμα 3.10: Αλληλεπίδραση του φωτός με το πλαίσιο οριοθέτησης

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ανακατασκευής εικόνων με και χωρίς την χρήση του συντελεστή διόρθωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 1 (figure 1) της δημοσίευσης [45]. Η εικόνα δεν περιλήφθηκε στο παρόν κείμενο για λόγους σχετιζόμενους με τα νομικά θέματα περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Εντούτοις, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης ενθαρρύνεται να ανατρέξει σε αυτή (ή αντίστοιχες εικόνες), δεδομένου ότι διευκολύνει σημαντικά την κατανόηση του συντελεστή διανυθείσας απόστασης.

## Κεφάλαιο 4

### Δυσκολίες κατά την διαδικασία της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης που οφείλονται στην κατασκευή του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm

Από την μελέτη που έχει προηγηθεί, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το δυσκολότερο στάδιο της διαδικασίας ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης αποτελεί ο προσδιορισμός της γωνίας στην οποία πρέπει να γίνει η διάτρηση του οστού για να εισαχθούν οι κοχλίες σταθεροποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται όταν γίνει λήψη, με χρήση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm, μιας απεικόνισης των οπών του ήλου σαν σχεδόν τέλειων κύκλων.

Το στάδιο αυτό εμφανίζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω της προαναφερθείσας δυσκολίας που παρουσιάζει, και για αυτό το λόγο έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό η ανάπτυξη εικονικών μοντέλων του συγκεκριμένου προβλήματος, με σκοπό την υποβοήθηση των χειρουργών κατά την εγχειρητική διαδικασία.

Ωστόσο, πέρα από την ανάπτυξη εικονικών μοντέλων για την αντιμετώπιση των δυσκολιών που παρουσιάζονται, κρίνεται εξίσου σημαντική και η μελέτη των παραγόντων που ενδεχομένως συμβάλλουν στις δυσκολίες αυτές. Με τον τρόπο αυτό, επιχειρείται η αντιμετώπιση της ίδιας της αιτίας του προβλήματος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν οι τυπικές κινήσεις και οι κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των ακτινογραφικών μηχανημάτων και θα διερευνηθεί το κατά πόσον τα παραπάνω προκαλούν προβλήματα κατά την εύρεση της επιθυμητής γωνίας θέασης του οστού κατά την εγχειρητική διαδικασία.



## 4.1. Μελέτη μετακινήσεων και περιστροφών του C-arm

Τα σύγχρονα μοντέλα των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm διαθέτουν πληθώρα διαφορετικών κινήσεων και περιστροφών. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι η πλειονότητα των σύγχρονων μοντέλων διαθέτει πέντε (5) ανεξάρτητες αρθρώσεις και κατά συνέπεια διαθέτει πέντε (5) βαθμούς ελευθερίας.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των τυπικών αξόνων περιστροφής παρουσιάζεται στην εικόνα 2 (figure 2) της δημοσίευσης [46]. Η εικόνα δεν περιλήφθηκε στο παρόν κείμενο για λόγους σχετιζόμενους με τα νομικά θέματα περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Εντούτοις, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης ενθαρρύνεται να ανατρέξει σε αυτή (ή αντίστοιχες εικόνες), δεδομένου ότι διευκολύνει σημαντικά την κατανόηση των τυπικών αξόνων μετακινήσεων και περιστροφών των σύγχρονων ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm.

Οι μετακινήσεις των μεμονωμένων αρθρώσεων έχουν ως αποτέλεσμα τις εξής κινήσεις του C-arm:

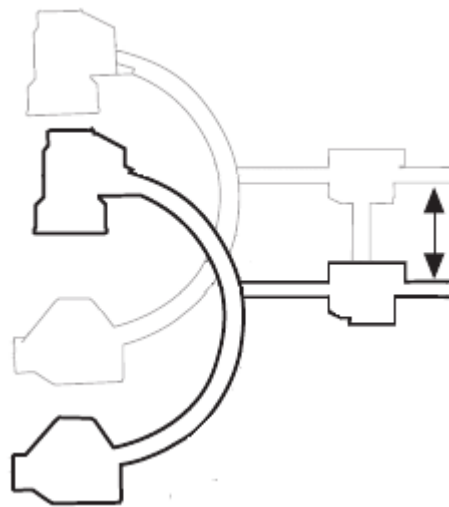
- Άρθρωση 1: Γραμμική κατακόρυφη μετατόπιση κατά τον άξονα  $z_0$ , η οποία μεταβάλλει το ύψος του βραχίονα “C”. Παράμετρος: μήκος  $z_{off}$ .
- Άρθρωση 2: Περιστροφή γύρω από τον άξονα  $z_0$ , η οποία επίσης καλείται “wig-wag”, παράλληλη στο  $x-y$  επίπεδο του βασικού συστήματος συντεταγμένων. Παράμετρος: γωνία  $\theta_{wig}$ .
- Άρθρωση 3: Γραμμική οριζόντια μετατόπιση για την προσαρμογή του μήκους του βραχίονα. Παράμετρος: μήκος  $x_{off}$ .
- Άρθρωση 4: Περιστροφή του βραχίονα “C” γύρω από το κέντρο γύρω από το κέντρο του βραχίονα. Παράμετρος: γωνία  $\theta_{rad}$ .
- Άρθρωση 5: Γωνιακή περιστροφή για την περιστροφή του βραχίονα “C” επί του επιπέδου που ορίζεται από το “C”. Παράμετρος: γωνία  $\theta_{orb}$ .

#### 4.1.1. Τυπικές μετακινήσεις και περιστροφές C-arm

Στις επόμενες παραγράφους εικονίζονται και περιγράφονται αναλυτικότερα οι τυπικές μετακινήσεις και περιστροφές των σύγχρονων ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm. Όλες οι εικόνες αποτελούν προϊόν μορφοποίησης από εικόνες του εγχειριδίου [13].

##### a) Μηχανοκίνητη κατακόρυφη κίνηση βραχίονα (vertical column operation)

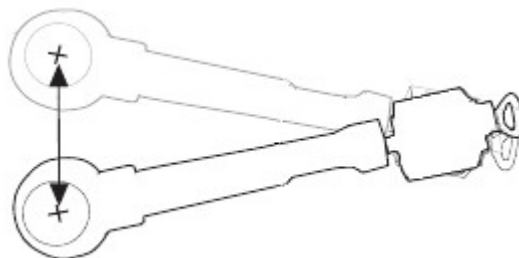
Το οριζόντιο “cross-arm” τμήμα του C-arm και κατά συνέπεια και ο βραχίονας “C” του ακτινογραφικού συστήματος μπορούν να πραγματοποιήσουν περιορισμένες κατακόρυφες επεκτάσεις.



Σχήμα 4.1: Μηχανοκίνητη κατακόρυφη κίνηση βραχίονα

##### b) “Wig-wag” κίνηση

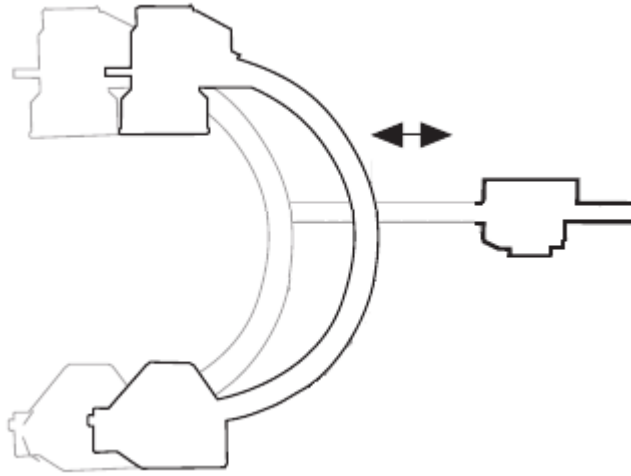
Το cross-arm και ο βραχίονας “C” μπορούν να εκτελέσουν περιορισμένες περιστροφές γύρω από κατακόρυφο άξονα, περιστροφή γνωστή ως “wig-wag”.



Σχήμα 4.2: “Wig-wag” κίνηση

c) Μηχανοκίνητη οριζόντια κίνηση Βραχίονα (horizontal cross-arm)

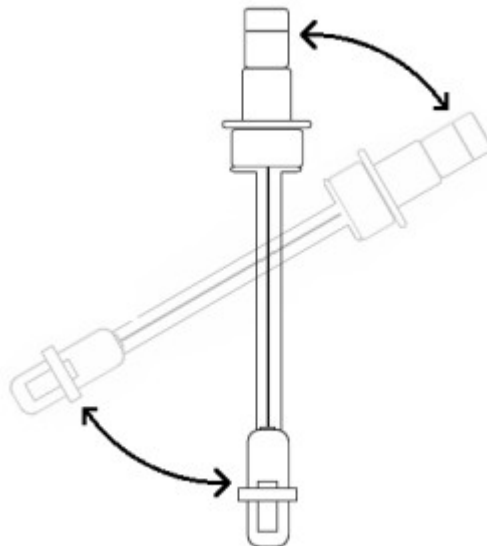
Ο οριζόντιος άξονας του C-arm και κατά συνέπεια και ο βραχίονας “C” του ακτινογραφικού συστήματος μπορούν να πραγματοποιήσουν περιορισμένες οριζόντιες επεκτάσεις.



Σχήμα 4.3: Οριζόντια κίνηση Βραχίονα

d) Ακτινική περιστροφή (radial rotation)

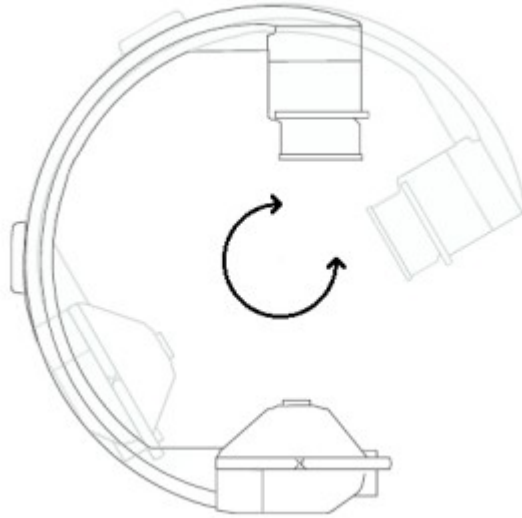
Ο εξωτερικός βραχίονας “C” του C-arm μπορεί να περιστραφεί ως προς τον οριζόντιο “cross-arm” άξονα του ακτινογραφικού μηχανήματος.



Σχήμα 4.4: Περιστροφή βραχίονα γύρω από οριζόντιο άξονα

e) Γωνιακή κίνηση (orbital rotation)

Ο εσωτερικός βραχίονας του C-arm μπορεί να περιστραφεί ως προς άξονα ο οποίος τέμνει κάθετα το επίπεδο που ορίζεται από την διάταξη “C” του ακτινογραφικού μηχανήματος.



Σχήμα 4.5: Γωνιακή κίνηση C-arm

Σημειώνεται, τέλος, ότι αρκετά μοντέλα ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm διαθέτουν τροχούς στην βάση τους και ως συνέπεια καθίσταται εύκολη η ελεύθερη μετακίνησή τους στο χώρο.

#### 4.1.2. Κύριοι γεωμετρικοί άξονες του C-arm

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι τυπικές κινήσεις και περιστροφές ενός C-arm πραγματοποιούνται με αναφορά ένα σύνολο κυρίων αξόνων, οι οποίοι σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του C-arm. Οι βασικοί άξονες είναι οι εξής:

- **Οριζόντιος άξονας περιστροφής**, ο οποίος είναι ο οριζόντιος άξονας που ορίζεται από “cross-arm” τμήμα της ακτινογραφικής διάταξης. Η μηχανοκίνητη οριζόντια μετατόπιση του βραχίονα ακολουθεί τον εν λόγω άξονα και η ακτινική περιστροφή πραγματοποιείται γύρω από αυτόν.
- **Άξονας γωνιακής περιστροφής** ή “γωνιακός” άξονας, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τον βραχίονα “C”. Η γωνιακή περιστροφή πραγματοποιείται γύρω από τον εν λόγω άξονα.
- **Κατακόρυφος άξονας περιστροφής**, ο οποίος είναι ο κατακόρυφος άξονας που ορίζεται από το σημείο στήριξης του “cross-arm” στην βάση της ακτινογραφικής διάταξης. Η μηχανοκίνητη κατακόρυφη μετατόπιση του βραχίονα ακολουθεί τον εν λόγω άξονα και η “wig-wag” περιστροφή πραγματοποιείται γύρω από αυτόν.

Γίνεται εμφανές ότι οι προαναφερθέντες άξονες δεν είναι κατ' ανάγκην σταθεροί στον χώρο, αλλά ενδέχεται να μεταβάλλονται ανάλογα με τις κινήσεις που εκτελεί ο βραχίονας του C-arm. Πιο αναλυτικά:

a) Μετακινήσεις και περιστροφές κατακόρυφου άξονα

Ο κατακόρυφος άξονας ορίζεται σε σημείο πάνω στην βάση του C-arm, επομένως γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι παραμένει σε σταθερή θέση στο χώρο, εκτός εάν γίνει μετακίνηση όλης της βάσης του C-arm, με χρήση των τροχών που διαθέτει. Σε κάθε άλλη περίπτωση, δεν υπόκειται σε μετακινήσεις ή περιστροφές.

b) Μετακινήσεις και περιστροφές οριζόντιου άξονα

Ο οριζόντιος άξονας ορίζεται με βάση το οριζόντιο “cross-arm” τμήμα του C-arm, επομένως θα υπόκειται στις μετακινήσεις ή περιστροφές που υποβάλλεται το cross-arm. Συγκεκριμένα:

- Η κίνηση “wig-wag” εγείρει την περιστροφή του οριζόντιου άξονα ως προς τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής του C-arm.
- Η μηχανοκίνητη κατακόρυφη κίνηση του βραχίονα προκαλεί την κατακόρυφη μετακίνηση του οριζόντιου άξονα.

c) Μετακινήσεις και περιστροφές γωνιακού άξονα

Ο γωνιακός άξονας είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τον βραχίονα “C”, ο οποίος στηρίζεται επί του “cross-arm” τμήματος του C-arm. Γίνεται φανερό ότι ο γωνιακός άξονας θα υπόκειται σε όλες τις μετακινήσεις ή περιστροφές που υπόκειται και ο οριζόντιος άξονας του C-arm, καθώς και:

- Οριζόντια μετακίνησή του λόγω της μηχανοκίνητης οριζόντιας προσαρμογής του μήκους του βραχίονα.
- Περιστροφή ως προς τον οριζόντιο άξονα κατά την εκτέλεση “ακτινικών” περιστροφών, δηλαδή περιστροφών του βραχίονα “C” ως προς τον οριζόντιο άξονα του C-arm.

## **4.2. Προβλήματα που ανακύπτουν λόγω των κατασκευαστικών ιδιαιτεροτήτων των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm**

Από την μελέτη που έχει προηγηθεί, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το δυσκολότερο στάδιο της διαδικασίας ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης αποτελεί ο προσδιορισμός της γωνίας στην οποία πρέπει να γίνει η διάτρηση του οστού για να εισαχθούν οι κοχλίες σταθεροποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται όταν γίνει λήψη, με χρήση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm, μιας απεικόνισης των οπών του ήλου σαν σχεδόν τέλειων κύκλων.

Ένας σημαντικός παράγοντας στον οποίο πιστεύεται ότι μπορεί να αποδοθεί ένα σημαντικό τμήμα της δυσκολίας που προκύπτει κατά την εγχειρητική διαδικασία είναι ο τρόπος κατασκευής των ίδιων των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm. Ειδικότερα, στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάδειξη των κατασκευαστικών ιδιαιτεροτήτων των C-arm, οι οποίες μπορούν να αλλοιώσουν σε σημαντικό βαθμό την διαδικασία εντοπισμού της επιθυμητής εκείνης θέσης του C-arm, στην οποία οι οπές του ήλου εμφανίζονται στην ακτινογραφική επιφάνεια ως τέλειοι κύκλοι.

Επισημαίνεται ότι όλες οι εικόνες της παρούσας ενότητας αποτελούν προϊόντα μορφοποίησης εικόνων του εγχειριδίου [13].

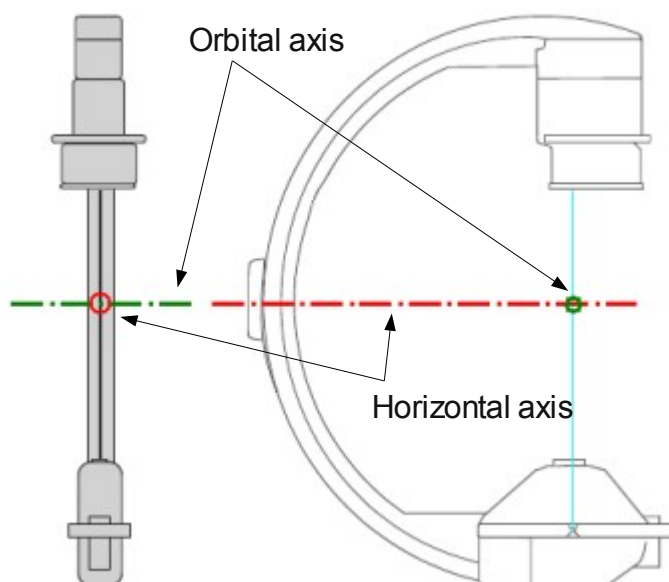
### **4.2.1. Προβλήματα λόγω των γεωμετρικών ιδιαιτεροτήτων των C-arm**

Όπως επισημάνθηκε στην ενότητα 4.1.2, ένα ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm χαρακτηρίζεται από τρεις (3) κύριους άξονες, γύρω από τους οποίους εκτελούνται οι περιστροφές του βραχίονα “C”, δηλαδή ο γωνιακός άξονας, ο οριζόντιος άξονας και ο κατακόρυφος άξονας. Εξετάζεται επίσης, λόγω της γεωμετρικής σημασίας του, ο άξονας ο οποίος διέρχεται από το σημείο φυγής των σημειακών πηγών παραγωγής ακτίνων Χ και τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής. Ο άξονας αυτός θα αναφέρεται ως “άξονας πηγής - επιπέδου προβολής”.

Ο γωνιακός και ο οριζόντιος άξονας διέρχονται από το επίπεδο που ορίζεται από τον βραχίονα “C” και συνεπώς η κάθετη απόστασή τους από την θέση του ήλου είναι μικρή, σε σχέση με τις διαστάσεις του C-arm. Με αυτόν τον τρόπο, η θέση του ήλου ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά το βαθμό δυσκολίας που θα αντιμετωπίσει ο χειρουργός κατά την εύρεση της επιθυμητής θέσης του C-arm, στην οποία οι προβολές των οπών του ήλου εμφανίζονται στην ακτινογραφική επιφάνεια ως τέλειοι κύκλοι.

Σε ένα ιδανικό ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm κριτική σημασία έχει η διάταξη και η τομή των κυρίων αξόνων του. Συγκεκριμένα, θα ήταν αναμενόμενο ο οριζόντιος “cross-arm” άξονας του C-arm να τέμνει κάθετα τον άξονα γωνιακής περιστροφής και μάλιστα το σημείο τομής να ανήκει πάνω στον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής.

Κάτωθι εικονίζεται ένα παράδειγμα ενός ιδανικού C-arm, το οποίο εμφανίζει τα προαναφερθέντα τέλεια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Εικονίζονται ο οριζόντιος (horizontal) άξονας (κόκκινο χρώμα), ο άξονας γωνιακής (orbital) περιστροφής (πράσινο χρώμα) και ο άξονας πηγής - επιπέδου προβολής (γαλάζιο χρώμα).

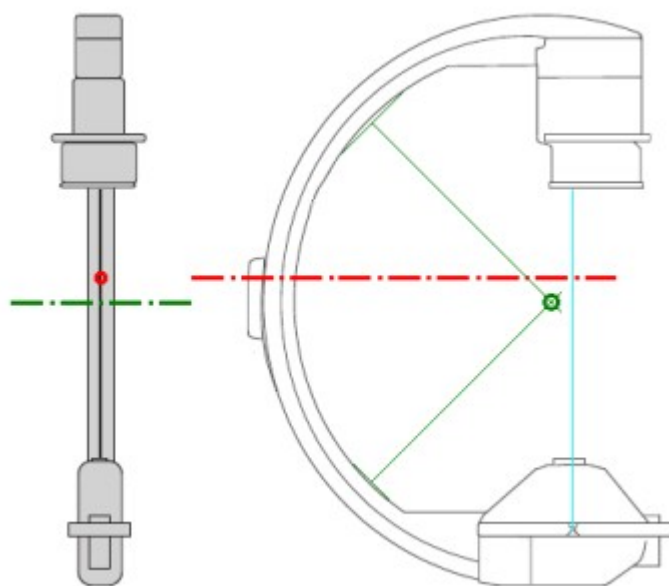


Σχήμα 4.6: Ιδανική γεωμετρική διάταξη των κύριων αξόνων του C-arm

Καθίσταται εμφανές ότι, διαθέτοντας ένα C-arm με τέλεια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το σημείο τομής των τριών απεικονιζόμενων αξόνων θα ήταν το ιδανικό σημείο τοποθέτησης του ήλου, καθώς η ακτινική και γωνιακή περιστροφή του βραχίονα “C” θα εκτελείτο γύρω από εκείνο το σημείο και κατά συνέπεια γύρω από τον ήλο.

Εντούτοις, σε ένα πραγματικό ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm δεν υφίστανται συνήθως όλες οι επιθυμητές γεωμετρικές ιδιότητες, αλλά παρατηρούνται γεωμετρικές ατέλειες οι οποίες δύνανται να εισάγουν δυσκολίες στην εύρεση της επιθυμητής γωνίας θέασης του ήλου, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα ενδεικτικής τοποθέτησης των κύριων αξόνων ενός πραγματικού C-arm.



Σχήμα 4.7: Ενδεικτική τοποθεσία οριζόντιου και γωνιακού άξονα σε πραγματικό C-arm

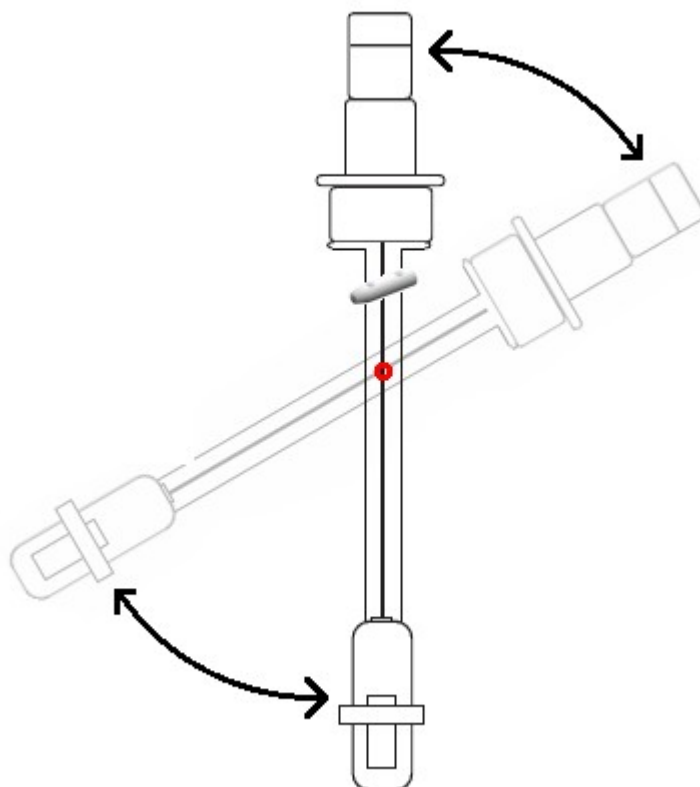
Το κέντρο των γωνιακών περιστροφών έχει ευρεθεί με γεωμετρικό τρόπο, δηλαδή ορίστηκε ως η τομή των μεσοκαθέτων δύο χορδών του κυκλικού τμήματος του “C”. Όπως εικονίζεται παραπάνω, ο άξονας των γωνιακών περιστροφών (πράσινος):

- Είναι ασύμπτωτος οριζόντιο “cross-arm” άξονα περιστροφής (κόκκινος).
- Είναι επίσης ασύμπτωτος με τον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής (γαλάζιος).

Παρατηρείται, συνεπώς, μία γεωμετρία όπου δεν υπάρχει κατ' ανάγκην κοινό σημείο τομής των τριών κυρίων αξόνων και ενδεχομένως δεν υπάρχει κοινό σημείο τομής του γωνιακού άξονα είτε με τον οριζόντιο άξονα είτε με τον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής. Η ιδιαίτερη γεωμετρία του C-arm δύναται να εισάγει πρακτικούς περιορισμούς στην διαδικασία εύρεσης της επιθυμητής γωνίας θέασης του ήλου, καθώς η πραγματική θέση των αξόνων περιστροφών είναι διαφορετική από την αναμενόμενη.

Κατά την εγχειρητική διαδικασία ο χειρουργός σχηματίζει μία στερεοσκοπική εικόνα του ήλου, τοποθετεί κατάλληλα το C-arm, λαμβάνει ακτινογραφικές εικόνες και, κρίνοντας από το πώς εμφανίζονται οι προβολές των οπών του ήλου στην ακτινογραφική επιφάνεια, αποφασίζει τον τρόπο και την γωνία περιστροφής του C-arm. Ωστόσο, η κακή τοποθέτηση των αξόνων περιστροφής σε σχέση με την θέση του ήλου πιθανών να αλλοιώσει την στερεοσκοπική περιστροφή που έχει σχηματίσει ο χειρουργός και κατά συνέπεια να αλλοιωθεί και η προβολή των οπών στην ακτινογραφική εικόνα.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται μία συνηθισμένη μέθοδος τοποθέτησης του C-arm στον χώρο και πώς μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμούς εύρεσης της επιθυμητής γωνίας θέασης.



Σχήμα 4.8: Μη απεικόνιση του ήλου λόγω κακής τοποθέτησης του ήλου ως προς τον οριζόντιο άξονα



Όπως φαίνεται, το C-arm έχει τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ως προς τον ήλο, έτσι ώστε:

- ο ήλος να βρίσκεται πάνω στον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής (γαλάζιος)
- ο ήλος να βρίσκεται κοντά στην ακτινογραφική επιφάνεια

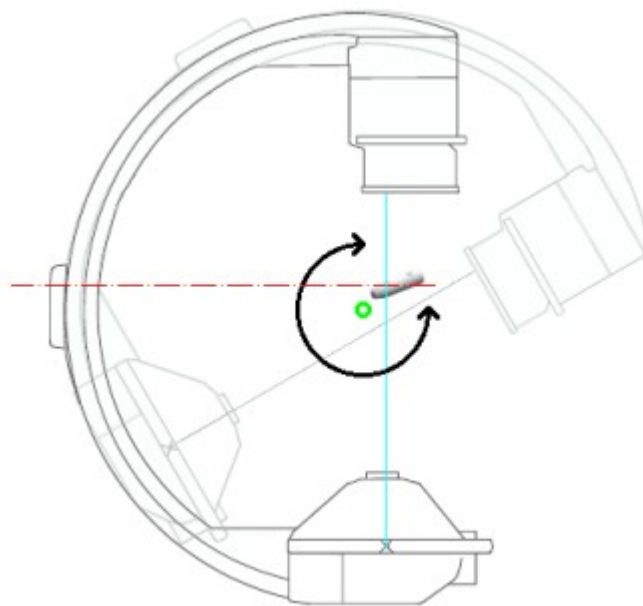
με σκοπό τον περιορισμό των πιθανών παραμορφώσεων που μπορούν να εισαχθούν από την κωνική εκπομπή ακτίνων X κατά την προβολή των οπών στην ακτινογραφική εικόνα. Οι παραμορφώσεις που οφείλονται στο κωνικό μοντέλο φωτισμού θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Κατά την αρχική κατακόρυφη θέση του C-arm, ο χειρουργός το έχει εστιάσει στις οπές του ήλου, παρατηρεί ότι εμφανίζονται ως ελλείψεις στην ακτινογραφική επιφάνεια και με βάση το σχήμα τους κρίνει ότι θα πρέπει να στρέψει τον βραχίονα C-arm κατά τον οριζόντιο άξονα περιστροφής.

Ωστόσο, στην εν λόγω τοποθέτηση προκύπτουν προβλήματα επειδή η σχετική τοποθέτηση του ήλου είναι πολύ κοντά στην ακτινογραφική επιφάνεια και κατά συνέπεια αποκτά μία αισθητή απόσταση από τον οριζόντιο άξονα περιστροφής. Έτσι, όταν ο χειρουργός περιστρέψει τον βραχίονα του C-arm, θα χαθεί η αρχική απεικόνιση του ήλου, όπως εικονίζεται παραπάνω. Μάλιστα, εάν η απόσταση του ήλου από τον οριζόντιο άξονα του C-arm είναι μεγάλη σε σχέση με την απόστασή του από την ακτινογραφική επιφάνεια, τότε αρκεί μία περιστροφή λίγων μοιρών για να χαθεί η απεικόνιση.

Ως αποτέλεσμα, η κακή τοποθέτηση του C-arm εισάγει πρακτικούς περιορισμούς στην περιστροφή του βραχίονα. Αντίθετα, εάν η θέση του ήλου συνέπιπτε με τον οριζόντιο άξονα, θα ήταν δυνατή η περιστροφή του βραχίονα κατά 360° ως προς τον οριζόντιο άξονα, χωρίς να χαθεί η εστίαση της σπής.

Αντίστοιχα, ανακύπτουν προβλήματα και λόγω της κακής γεωμετρικής διάταξης που ενδέχεται να παρουσιάσει ο άξονας γωνιακής περιστροφής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα απώλειας απεικόνισης.



Σχήμα 4.9: Μη απεικόνιση του ήλου λόγω κακής γεωμετρικής διάταξης του γωνιακού άξονα

Στην εικόνα αυτή, ο ήλος τοποθετήθηκε στο σημείο τομής του οριζόντιου άξονα με τον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής. Έτσι, αφενός να περιορίζονται οι παραμορφώσεις που εισάγονται λόγω της κωνικής πηγής φωτός και αφετέρου να διατηρείται η απεικόνιση του ήλου στην ακτινογραφική επιφάνεια για οποιαδήποτε περιστροφή του βραχίονα “C” γύρω από τον οριζόντιο “cross-arm” άξονα.

Παρά ταύτα, και στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται προβλήματα κατά την ρύθμιση της θέσης του βραχίονα, αυτή τη φορά λόγω της σχετικής θέσης του άξονα γωνιακής περιστροφής ως προς τους υπόλοιπους άξονες. Συγκεκριμένα, επειδή ο ήλος δεν βρίσκεται πάνω στον άξονα γωνιακής περιστροφής (πράσινος), η αρχική απεικόνισή του στην ακτινογραφική επιφάνεια χάνεται καθώς ο βραχίονας του C-arm περιστρέφεται γύρω από τον γωνιακό άξονα. Προκύπτουν, λοιπόν, επιπλέον περιορισμοί όσον αφορά τις περιστροφές που μπορούν να εκτελεστούν προκειμένου να εντοπιστεί η επιθυμητή γωνία θέασης του ήλου.

Επιπροσθέτως, εφόσον ο άξονας γωνιακής περιστροφής είναι ασύμβατος τόσο με τον οριζόντιο άξονα (κόκκινος) όσο και με τον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής (γαλάζιος), δεν υπάρχει κάποιο σημείο πάνω στους τελευταίους άξονες στο οποίο να μπορεί να τοποθετηθεί ο ήλος ώστε να μην προκύψουν οι παραπάνω δυσκολίες. Πέρα από τα παραπάνω, η τοποθέτηση του ήλου σε σημείο εκτός του άξονα πηγής - επιπέδου προβολής δεν προτείνεται, καθώς εισάγονται παραμορφώσεις στην απεικόνιση των οπών στην ακτινογραφική επιφάνεια λόγω των παραμορφώσεων που εισάγονται από την κωνική εκπομπή ακτινοβολίας.

Από την παραπάνω μελέτη εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η γνώση των θέσεων των κύριων αξόνων είναι σημαντική, καθώς γύρω από αυτούς εκτελούνται οι περιστροφές του βραχίονα του C-arm.
- Η τοποθέτηση του ήλου σε σημείο που δεν ανήκει σε άξονα περιστροφής οδηγεί σε απώλεια της απεικόνισής του στην ακτινογραφική επιφάνεια ύστερα από μία δεδομένη γωνία περιστροφής.
- Η τοποθέτηση του ήλου συστήνεται να γίνει πάνω στον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις και σκιάσεις.
- Το ιδανικό σημείο τοποθεσίας του ήλου θα ήταν ένα σημείο στο οποίο τέμνονται κάθετα μεταξύ τους ο οριζόντιος άξονας, ο άξονας γωνιακής περιστροφής και ο άξονας πηγής - επιπέδου προβολής.
- Στα πραγματικά ακτινογραφικά μηχανήματα δεν παρουσιάζεται η επιθυμητή γεωμετρία των βασικών αξόνων, δηλαδή ενδέχεται ορισμένοι νοητοί άξονες να μην διέρχονται από τα αναμενόμενα σημεία.
- Συμπερασματικά, η κακή γεωμετρική διάταξη μπορεί να οδηγήσει σε παρακώλυση της διαδικασίας εύρεσης της επιθυμητής γωνίας θέασης του ήλου, λόγω της απώλειας της απεικόνισής του ήλου μετά από περιστροφή του βραχίονα του C-arm.

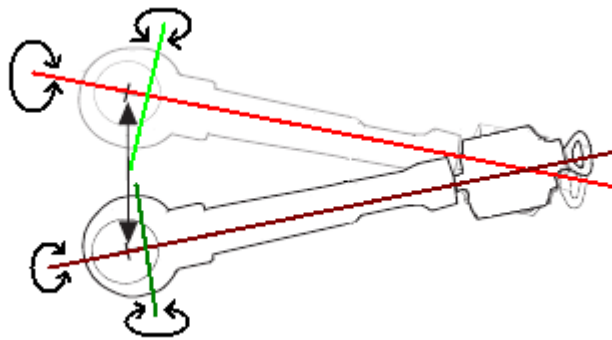
Κρίνεται συνεπώς απαραίτητη η πρότερη μελέτη των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm, πριν από μία εγχειρητική διαδικασία, καθώς οι γεωμετρικές ατέλειες που μπορεί να παρουσιαστούν εισάγουν προβλήματα κατά την διαδικασία προσαρμογής της θέσης του βραχίονα ως προς τον ήλο.

#### 4.2.2. Προβλήματα λόγω των μετακινήσεων των κυρίων αξόνων του C-arm

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη η μελέτη των προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν σε περίπτωση που δεν ληφθούν υπ' όψιν οι μετακινήσεις που υφίστανται οι κύριοι άξονες του C-arm κατά τις μεταφορές και τις περιστροφές του C-arm. Σκοπός είναι ο καλύτερος έλεγχος των παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν την σχετική θέση του ήλου ως προς τους κύριους άξονες του C-arm και τελικά ο περιορισμός των δυσκολιών που μπορούν να παρουσιαστούν κατά την εγχειρητική διαδικασία, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

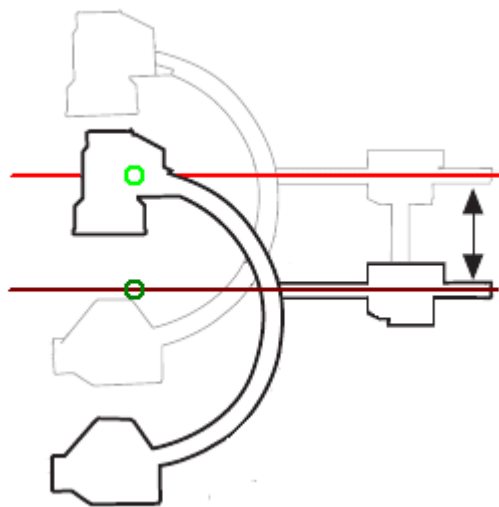
Όπως έχει αναφερθεί, διάφορες κινήσεις του C-arm μετακινούν κύριους άξονες της διάταξης. Πιο αναλυτικά:

1. Η “wig-wag” περιστροφή περιστρέφει τον οριζόντιο και τον γωνιακό άξονα περιστροφής



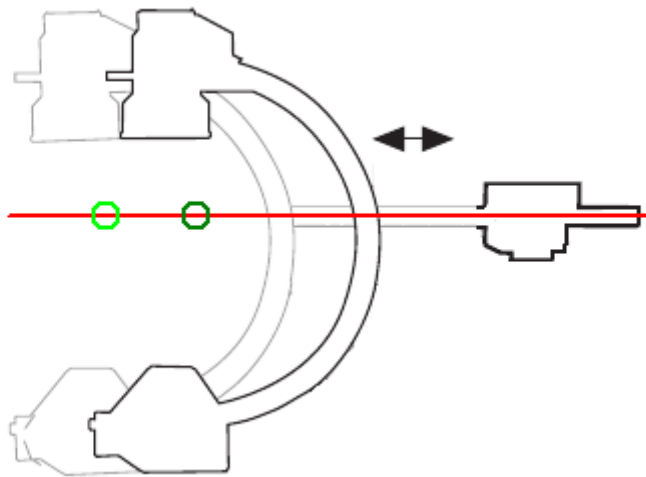
Σχήμα 4.10: Περιστροφή οριζόντιου (κόκκινου) και γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την “wig-wag” περιστροφή

2. Η μηχανοκίνητη κατακόρυφη μεταφορά μετακινεί τον οριζόντιο και τον γωνιακό άξονα περιστροφής κατά τον κατακόρυφο άξονα.



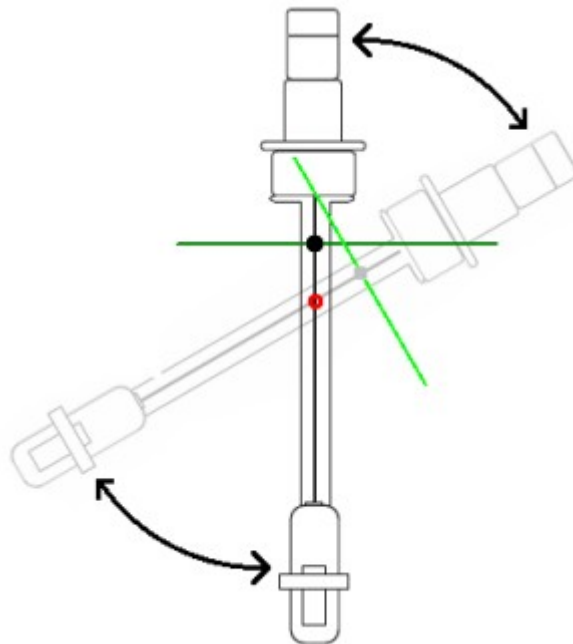
Σχήμα 4.11: Μετατόπιση οριζόντιου (κόκκινου) και γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την μηχανοκίνητη κατακόρυφη μετατόπιση

3. Η μηχανοκίνητη οριζόντια μεταφορά μετακινεί τον γωνιακό άξονα περιστροφής κατά τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 4.12: Μετατόπιση γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την μηχανοκίνητη οριζόντια μετατόπιση

4. Η περιστροφή γύρω από τον οριζόντιο άξονα περιστρέφει και τον γωνιακό άξονα περιστροφής.



Σχήμα 4.13: Περιστροφή γωνιακού (πράσινου) άξονα κατά την οριζόντια περιστροφή

Όλες οι προαναφερθείσες κινήσεις, όπως εικονίζεται, μεταβάλλουν με κάποιο τρόπο την θέση των βασικών αξόνων του C-arm και ειδικότερα του οριζόντιου άξονα και του άξονα περιστροφής. Συνεπώς, αλλάζει και η σχετική θέση του ήλου ως προς τους άξονες αυτούς.

Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά την περιστροφή του βραχίονα του C-arm έτσι ώστε η σχετική θέση των αξόνων να μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο που να ελαχιστοποιεί τις δυσκολίες που τυχόν θα ανακύψουν στην συνέχεια.

Συστήνεται, μάλιστα, η σειρά των κινήσεων να είναι τέτοια ώστε όσο εξελίσσονται οι κινήσεις που θα πραγματοποιηθούν στο C-arm τόσο λιγότεροι άξονες να μετακινούνται. Σκοπός μίας τέτοιας στρατηγικής είναι:

- ✓ Με κάθε ανανέωση της νοητής στερεοσκοπικής εικόνας που σχηματίζει ο χειρουργός να περιορίζονται σταδιακά οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος.
- ✓ Περιορίζεται ο κίνδυνος της σοβαρής αλλοίωσης της νοητής στερεοσκοπικής εικόνας λόγω κάποιας απρόβλεπτης μετακίνησης ενός άξονα, με βάση τον οποίο είχε προηγηθεί μετακίνηση ή περιστροφή, ειδικά εάν απαιτηθεί εκ νέου κίνηση ως προς αυτόν.

Παραδείγματος χάριν, συστήνεται πρώτα η εκτέλεση των “wig-wag” κινήσεων του C-arm για λόγους ευθυγράμμισης των αξόνων με τις οπές του ήλου, στην συνέχεια οι μηχανοκίνητες οριζόντιες ή κατακόρυφες μετακινήσεις, έπειτα η περιστροφή ως προς τον οριζόντιο άξονα και τέλος η γωνιακή περιστροφή. Με τον τρόπο αυτό η θέση ενός άξονα παραμένει ακίνητη εάν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε περιστροφή ως προς αυτόν.

Επισημαίνεται ότι η μετακίνηση των αξόνων θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και κατά την ανάπτυξη εικονικών μοντέλων του ακτινογραφικού συστήματος C-arm. Πιο αναλυτικά, η μοντελοποίηση των μεταφορών και περιστροφών δεν θα πρέπει να υλοποιείται ελεύθερα ως προς τους σταθερούς άξονες x-y-z του χώρου, αλλά να λαμβάνεται κατάλληλη μέριμνα για τυχόν μετακίνηση των βασικών αξόνων αναφοράς.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι προαναφερθείσες δυσκολίες που εισάγονται από τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες του C-arm καθώς και οι μετακινήσεις στις οποίες υφίστανται οι άξονες δημιουργούν δυσκολίες στην μετάφραση μίας επιθυμητής κίνησης του C-arm, η οποία μπορεί να αποτελεί συμπέρασμα ενός εικονικού μοντέλου, σε μία ελέγξιμη (μετρήσιμη) κίνηση του πραγματικού C-arm.

## Κεφάλαιο 5

### Αποδοτικός τρόπος μοντελοποίησης των ήλων και του συστήματος εκπομπής ακτίνων Χ από C-arm, ειδικά για το συγκεκριμένο πρόβλημα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την μοντελοποίηση των ήλων καθώς και του συστήματος εκπομπής ακτίνων Χ από C-arm, με απώτερο στόχο την υποβοήθηση του εντοπισμού της θέσης των οπών του ήλου κατά τη διαδικασία της ασφαλιζόμενης κλειστής ενδομυελικής ήλωσης.

Εν συντομία, η μεθοδολογία που παρουσιάζεται έχει ως σκοπό την λήψη στιγμιότυπων των οπών του ήλου σε διάφορες θέσεις του τρισδιάστατου χώρου. Συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί τα εξής:

- Τριδιάστατο μοντέλο του ήλου στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στην απομακρυσμένη άκρη του όπου εντοπίζονται οι δύο οπές που μας ενδιαφέρουν.
- Μοντέλο κωνικής πηγής φωτισμού και προβολής τριδιάστατων σχημάτων ή αντικειμένων σε διδιάστατο επίπεδο.
- Κωνική προβολή των οπών του ήλου στο διδιάστατο επίπεδο.
- Μετακίνηση και περιστροφή του ήλου στον τριδιάστατο χώρο, με κάθε δυνατό τρόπο και σε συμφωνία με τις τυπικές κινήσεις των C-arm.

Με χρήση των παραπάνω εργαλείων δημιουργείται μία βάση δεδομένων που αποτελείται από στιγμιότυπα των οπών του ήλου για διάφορες θέσεις του ήλου στον τριδιάστατο χώρο. Η θέση αναφοράς είναι η θέση στην οποία μία τουλάχιστον εκ των οπών του ήλου εμφανίζεται σαν τέλειος κύκλος στην ακτινογραφική εικόνα. Στη θέση αναφοράς αναμένεται και η δεύτερη οπή να εμφανίζεται σαν τέλειος κύκλος, ωστόσο ενδέχεται να έχουν εισαχθεί ελαφρές παραμορφώσεις λόγω του κωνικού μοντέλου προβολής του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm.

Κατά την διάρκεια της επέμβασης, η αναφορά στην προαναφερθείσα βάση και η σύγκριση της ακτινογραφικής εικόνας με τα στιγμιότυπα της βάσης δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε έναν πολύ ακριβή προσδιορισμό της απόκλισης του ήλου από την θέση αναφοράς. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας την απόκλιση του στιγμιότυπου της βάσης δεδομένων το οποίο παρουσιάζει το καλύτερο ταίριασμα με την ακτινογραφία των οπών, είναι αμέσως γνωστή η μετατόπιση και η περιστροφή του ήλου που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί, ως προς τους τρεις άξονες, η οποία τελικά οδηγεί στην θέαση της μία τουλάχιστον οπής ως τέλειου κύκλου στην ακτινογραφική εικόνα. Αναμένεται επίσης η μοντελοποίηση της δεύτερης οπής να συμβάλλει στον εντοπισμό του στιγμιότυπου της βάσης που ανταποκρίνεται πληρέστερα στην πραγματικότητα και κατά συνέπεια στον ακριβέστερο προσδιορισμό της απόκλισης του ήλου από την θέση αναφοράς.

## 5.1. Η μέχρι τώρα εργασία

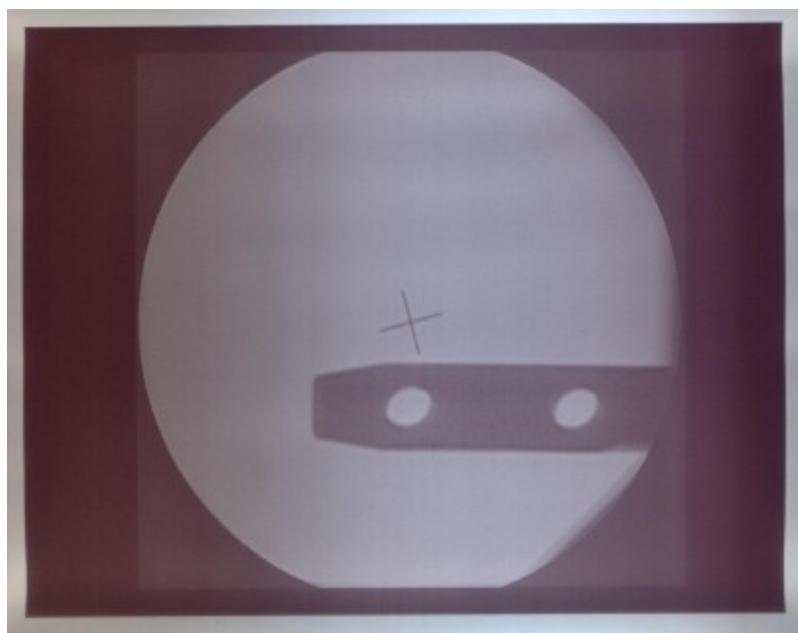
Πρωτού παρουσιαστεί ο αποδοτικός τρόπος μοντελοποίησης των ήλων και του συστήματος εκπομπής ήλων και του συστήματος εκπομπής ακτίνων Χ από C-arm που υλοποιήθηκε, θα προηγηθεί εκτενής αναφορά σε παλαιότερες εργασίες που έχουν ήδη λάβει χώρα στη μοντελοποίηση του ακτινογραφικού συστήματος<sup>[1]</sup>, εξετάζοντας τα αποτελέσματά τους και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

### 5.1.1. Ανάπτυξη προτύπων με συμβατικές μεθόδους

Ο όρος “συμβατικές μέθοδοι” αναφέρεται σε μεθόδους χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, είτε με απευθείας χρήση ιατρικού εξοπλισμού με χρήση ευρέως διαθέσιμου εξοπλισμού. Επιλέχθηκε αρχικά λόγω την ευκολίας της σύγκρισης των στιγμιότυπων στη βάση δεδομένων με τις ακτινογραφικές εικόνες του ήλου. Χρησιμοποιήθηκε ο ακτινογραφικός και ο φωτογραφικός τρόπος.

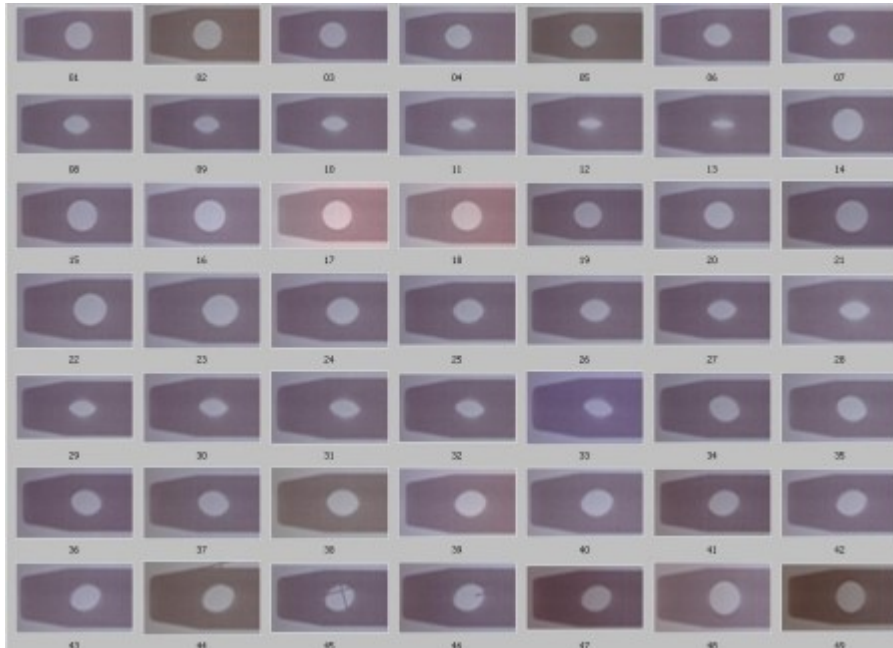
#### a) Ανάπτυξη βάσης στιγμιότυπων με ακτινογραφικό τρόπο

Μία πρώτη προσέγγιση για ανάπτυξη προτύπων επιχειρήθηκε με λήψη ακτινογραφικών εικόνων του ήλου σε διάφορες θέσεις στο χώρο. Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό ακτινογραφικό σύστημα C-arm και μία τυπική ακτινογραφική εικόνα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.1: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο ήλου από C-arm

Έτσι λοιπόν, λαμβάνοντας ακτινογραφικές εικόνες όπως η παραπάνω για διάφορες θέσεις του ήλου, δημιουργήθηκε μία πιλοτική βάση στιγμιότυπων, η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.2: Ακτινογραφικά στιγμιότυπα οπής ήλου

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ευκολία στη σύγκριση μεταξύ των στιγμιότυπων της βάσης και της ακτινογραφικής εικόνας του ήλου, καθώς και τα δύο υπό σύγκριση αντικείμενα απεικονίζονται σε ακτινογραφικές εικόνες. Ωστόσο η μέθοδος αυτή κρίθηκε αναποτελεσματική, καθώς παρουσιάστηκαν τα εξής προβλήματα:

- Η έκθεση των συμμετεχόντων σε ακτινοβολία κατά την δημιουργία της βάσης στιγμιότυπων. Η συχνή επανάληψη της λήψης στιγμιότυπων από ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm αποδεικνύεται επικίνδυνη για τους συμμετέχοντες στη διαδικασία αυτή.
- Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων ήλων. Η δημιουργία μιας βάσης στιγμιότυπων είναι προσαρμοσμένη σε ένα συγκεκριμένο τύπο ήλου, δηλαδή με συγκεκριμένο πάχος, διατομή και διάμετρο. Κατά συνέπεια, τα στιγμιότυπα διαφορετικών τύπων ήλων, οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις προαναφερθείσες ιδιότητες, δημιουργούν διαφορετικά στιγμιότυπα για μία ορισμένη θέση στο χώρο.
- Η διαθεσιμότητα του ιατρικού εξοπλισμού. Για τη λήψη ακτινογραφικών στιγμιότυπων με χρήση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm, αποτελείται δέσμευση του ιατρικού εξοπλισμού, πράγμα το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου της περιορισμένης διαθεσιμότητας του εξοπλισμού. Πέρα από τα παραπάνω, τα C-arm διατηρούνται σε αποστειρωμένα χειρουργεία, επομένως δεν είναι πάντα εύκολη η πρόσβαση και η χρήση τους.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την επικινδυνότητα της μεθόδου λόγω της έκθεσης σε ακτινοβολία, τις ενδεχόμενες παραμορφώσεις που εισάγουν τα ακτινογραφικά μηχανήματα C-arm, την μικρή διαθεσιμότητα του ιατρικού εξοπλισμού, αλλά και την αδυναμία της επαναχρησιμοποίησης των βάσεων για διαφορετικούς τύπους ήλων, η εκτενής παραγωγή βάσεων δεδομένων με χρήση C-arm κρίνεται ως μη πρακτική.



## b) Ανάπτυξη προτύπων με φωτογραφικό τρόπο

Η μέθοδος αυτή προέκυψε ως εναλλακτική της μεθόδου όπου έγινε χρήση ακτινογραφικών εικόνων. Συγκεκριμένα, επιχειρήθηκε η χρήση φωτογραφικού εξοπλισμού για την απομόνωση της οπής του ήλου, σε διάφορες θέσεις του χώρου. Παρά ταύτα, η μέθοδος αυτή εγκαταλείφθηκε για τους εξής λόγους:

- Απαιτείται ειδικός μηχανολογικός εξοπλισμός για την μετατόπιση και την περιστροφή της φωτογραφικής μηχανής ή του ήλου, διασφαλίζοντας την ακρίβεια της γωνίας θέασης της οπής του ήλου.
- Απαιτούνται ειδικές συνθήκες φωτισμού, έτσι ώστε να εξαλειφθούν τυχόν φαινόμενα σκίασης που είναι δυνατό να επηρεάσουν την ποιότητα των ληφθέντων στιγμιότυπων και κατά συνέπεια να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την απόκλιση του ήλου από την θέση αναφοράς.
- Απαιτείται, τέλος, έρευνα για να αποδειχθεί ότι η μέθοδος ανάπτυξης στιγμιότυπων με φωτογραφικό τρόπο μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία να μπορούν να συγκριθούν με ακτινογραφικές εικόνες που έχουν παραχθεί από ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm.

Συμπερασματικά, με δεδομένη την αναξιοπιστία των συμβατικών τρόπων ανάπτυξης προτύπων, προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης ενός εικονικού μοντέλου απεικόνισης του ακτινογραφικού συστήματος με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Σημειώνεται επίσης ότι με την συμβατική ανάπτυξη προτύπων δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι τυπικές κινήσεις των C-arm, με συνέπεια να παρουσιάζονται δυσκολίες κατά την μετάφραση των επιθυμητών κινήσεων σε ελέγξιμες κινήσεις του C-arm.

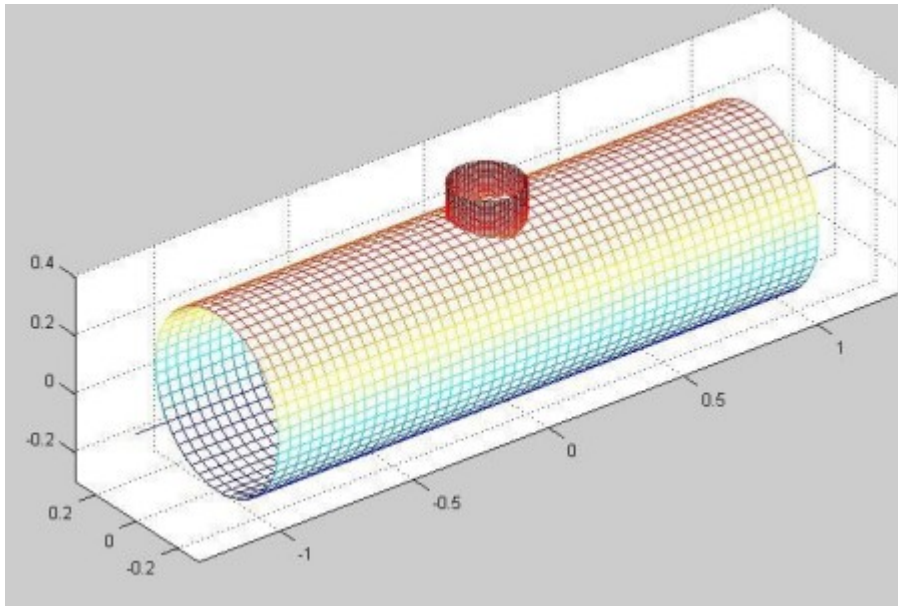
### **5.1.2. Πρώτη ανάπτυξη εικονικού μοντέλου ήλου**

Ένα πρώτο εικονικό μοντέλο απεικόνισης του ήλου καθώς και του ακτινογραφικού συστήματος C-arm με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, υλοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab, το οποίο διαθέτει δυνατότητα ανάπτυξης εικονικών τριδιάστατων εικονικών αναπαραστάσεων αντικειμένων<sup>[47]</sup>.

Η πρώτη προσέγγιση του ήλου εξέτασε το γενικό περίγραμμα της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή:

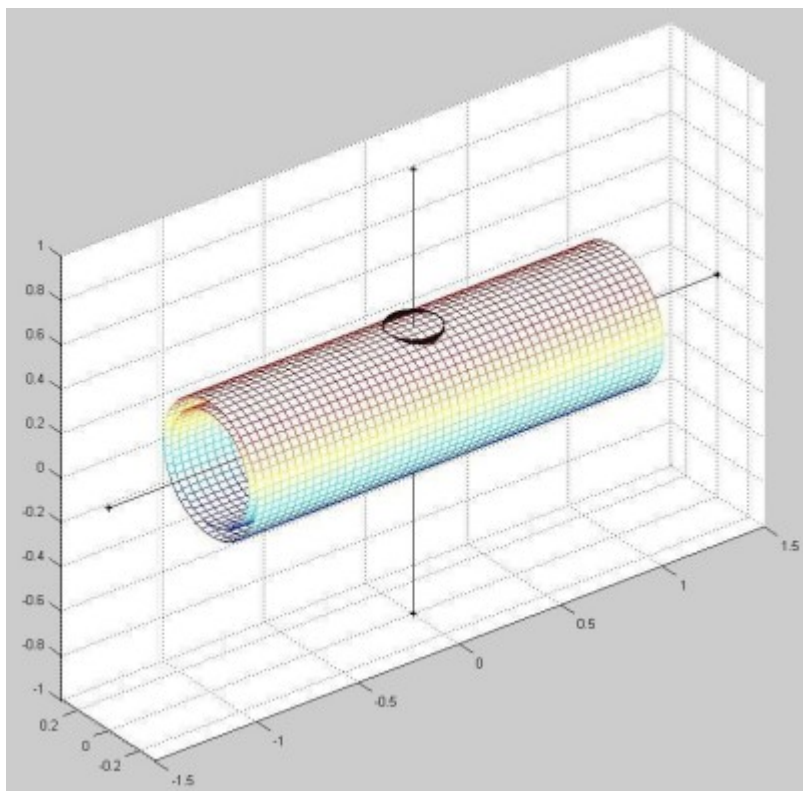
1. Την εξωτερική επιφάνεια του ήλου, η οποία αναπαρίσταται από έναν κύλινδρο.
2. Τον θάλαμο της οπής του ήλου που είναι εγγύτερα στο άκρο του, ο οποίος επίσης αναπαρίσταται από έναν κύλινδρο.

Με τον τρόπο αυτό, μοντελοποιήθηκε ένας κύλινδρος ο οποίος αναπαριστά τον ήλο και ένας δεύτερος κύλινδρος, κάθετος στον διαμήκη άξονα του πρώτου κυλίνδρου, ο οποίος αναπαριστά τον θάλαμο της πρώτης οπής. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



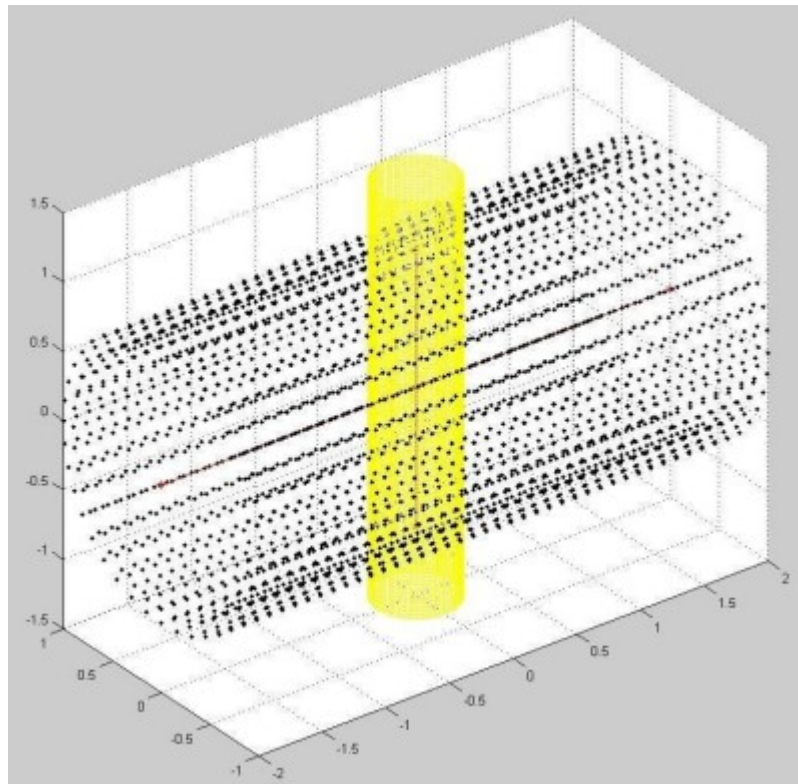
Σχήμα 5.3: Αναπαράσταση της εξωτερικής επιφάνειας του ήλου, καθώς και του θαλάμου της σπής

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε ένας δεύτερος κύλινδρος ο οποίος αναπαριστά τον εσωτερικό θάλαμο του ήλου. Είναι εμφανές ότι ο διαμήκης άξονάς του ταυτίζεται με τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου που αναπαριστά την εξωτερική επιφάνεια του ήλου και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του ήλου, καθώς και του θαλάμου της σπής

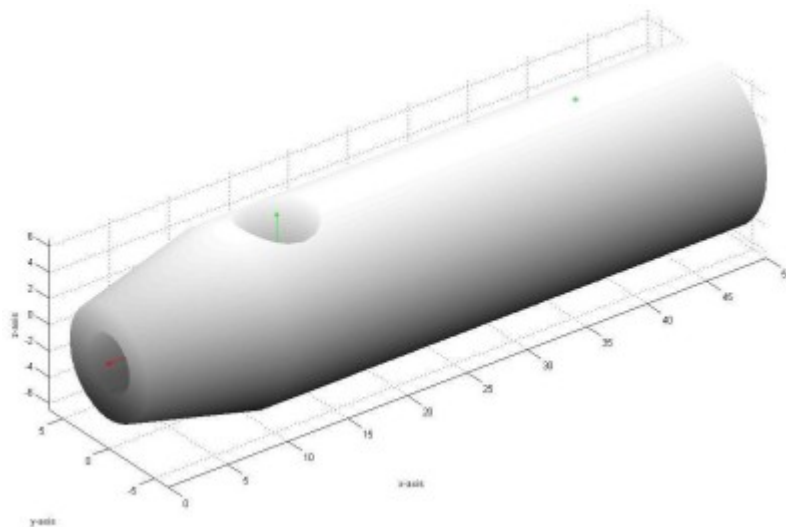
Οι παραπάνω απεικονίσεις του ήλου γίνεται με την συνάρτηση *surf* του περιβάλλοντος Matlab, η οποία σχεδιάζει επιφάνειες πάνω από γειτονικά πλέγματα σημείων. Ωστόσο, στη βάση του το μοντέλο αποτελείται από ένα σύνολο πεπερασμένων σημείων, τα οποία απεικονίζονται, μαζί με τον θάλαμο της οπής σε κίτρινο χρώμα, στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.5: Σημειακή απεικόνιση του ήλου και του θαλάμου της οπής

Είναι εμφανές ότι η πυκνότητα των προαναφερθέντων σημείων επηρεάζει και την ακρίβεια της αναπαράστασης των κυλινδρικών επιφανειών και κατά συνέπεια την τελική ακρίβεια των στιγμιοτύπων που θα παραχθούν.

Με την προσθήκη της μύτης του ήλου, για ορθότερη αναπαράσταση και χρήση κατάλληλων συναρτήσεων σκίασης των επιφανειών, προέκυψε η τελική εικόνα του πρώτου εικονικού μοντέλου του ήλου:

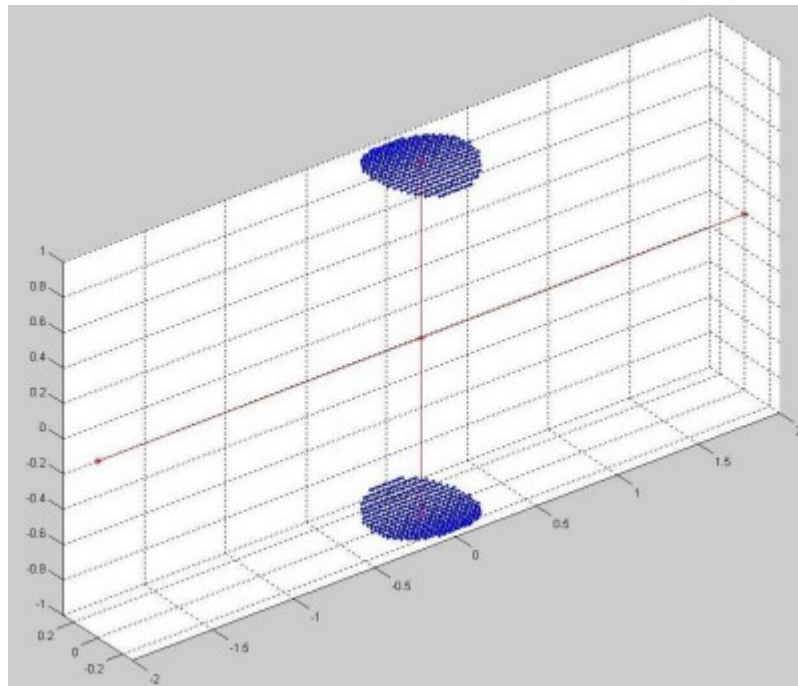


Σχήμα 5.6: Πρώτο εικονικό μοντέλο ήλου

Σημειώνεται ότι όλες οι διαστάσεις του ήλου είναι πλήρως παραμετροποιήσιμες, συνεπώς μπορεί να υλοποιηθεί το εικονικό μοντέλο οποιουδήποτε τύπου ήλου.

### 5.1.3. Προσδιορισμός των κρίσιμων καμπυλών της οπής

Με χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε προηγουμένως προσδιορίστηκε η τομή των δύο κρίσιμων κυλίνδρων, δηλαδή του κυλίνδρου που αναπαριστά την εξωτερική επιφάνεια του ήλου και του κυλίνδρου που αναπαριστά τον θάλαμο της οπής, όπου αναμένεται να εισέλθει κατάλληλος κοχλίας για την ασφάλιση του ήλου και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:



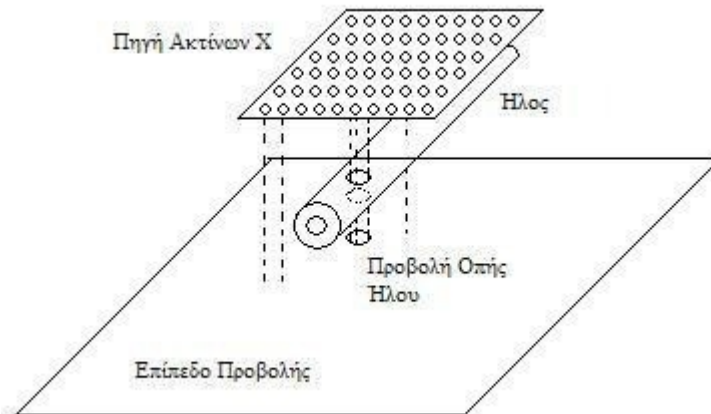
Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση του τμήματος της εξωτερικής επιφάνειας του ήλου που αντιστοιχεί στην κυρτή επιφάνεια της οπής

Με τον προσδιορισμό της τομής της εξωτερικής επιφάνειας του ήλου και του θαλάμου της οπής, ουσιαστικά προσδιορίστηκαν η κρίσιμη καμπύλη του άνω και κάτω εξωτερικού περιγράμματος της οπής του ήλου.

### 5.1.4. Μοντέλο παράλληλης προβολής

Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι η προβολή των κρίσιμων επιφανειών που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα πάνω σε ένα επίπεδο προβολής και η λήψη της τομής τους θα δώσει ένα αποτέλεσμα που είναι ισοδύναμο με την εικόνα της οπής η οποία λαμβάνεται από το ακτινογραφικό μηχάνημα.

Για την υλοποίηση της εν λόγω προβολής, επιλέχθηκε αρχικά το μοντέλο της παράλληλης προβολής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η πηγή ακτινοβολίας είναι ένα πλέγμα, κάθε σημείο του οποίου αποτελεί μία ξεχωριστή σημειακή πηγή ακτινοβολίας. Κάθε μία από αυτές τις σημειακές πηγές εκπέμπει μία δέσμη ακτίνων  $X$  απόλυτα ευθύγραμμη, κάθετη στο επίπεδο το οποίο σχηματίζει η πηγή και κάθετη στο επίπεδο προβολής και αποτελεί την ακτινογραφική επιφάνεια του ακτινογραφικού μηχανήματος. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



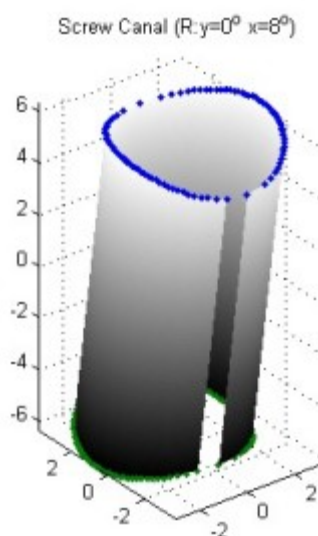
Σχήμα 5.8: Μοντέλο πηγής παράλληλων ακτίνων X

Με χρήση αυτού του μοντέλου, η προβολή μιας καμπύλης στο επίπεδο προβολής εκφυλίζεται στην παράλληλη προβολή της πάνω στο επίπεδο αποκόπτοντας την συντεταγμένη Z. Εάν  $(X_0, Y_0, Z_0)$  είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου στο χώρο και  $(X_{proj}, Y_{proj})$  οι συντεταγμένες του σημείου που προβάλλεται στο επίπεδο, τότε οι τελευταίες προκύπτουν ως εξής:

$$\begin{aligned} X_{proj} &= X_0 \\ Y_{proj} &= Y_0 \end{aligned}$$

### 5.1.5. Εφαρμογή μοντέλου παράλληλης προβολής

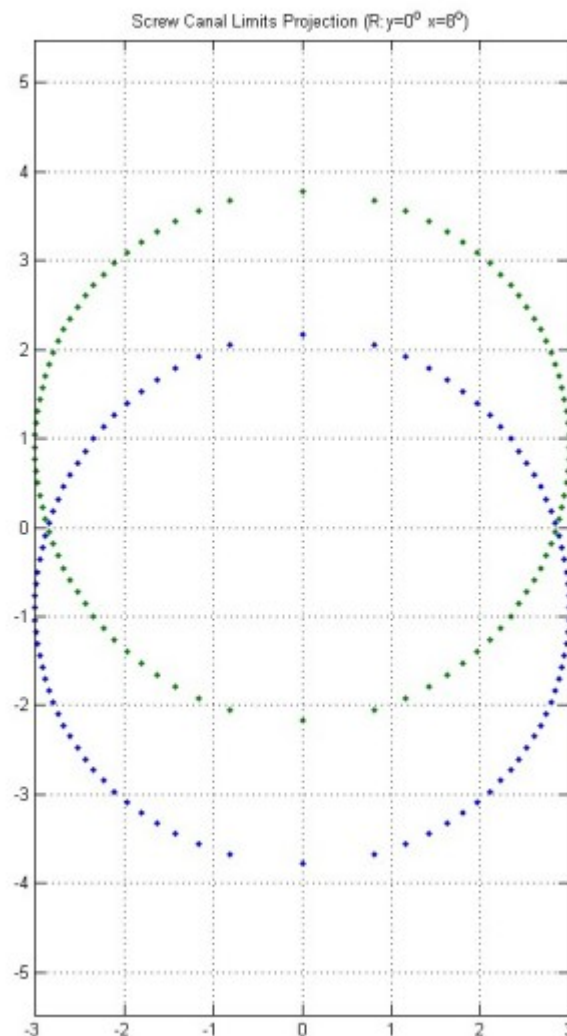
Με χρήση των παραπάνω, εφαρμόστηκε το μοντέλο της παράλληλης προβολής για εξαγωγή μίας βάσης προτύπων. Αρχικά, απομονώθηκε ο θάλαμος της οπής του ήλου και το κρίσιμο εξωτερικό του περίγραμμα και υλοποιήθηκαν κατάλληλες συναρτήσεις ώστε να του δίνει ελεύθερη περιστροφή στο χώρο, κατά τους τρεις άξονες διεύθυνσης. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ο θάλαμος σε στροφή  $8^\circ$  ως προς τον x-άξονα και με μηδενική περιστροφή ως προς τους άλλους άξονες του χώρου:



Σχήμα 5.9: Θάλαμος ήλου περιστραμμένος κατά  $8^\circ$  ως προς τον x-άξονα

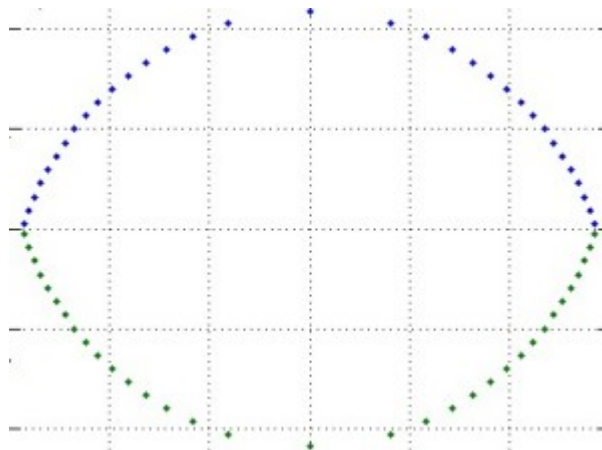
Δεν υλοποιήθηκαν συναρτήσεις που να επιτρέπουν την ελεύθερη μετατόπιση του θαλάμου στο χώρο, καθώς στο παράλληλο μοντέλο προβολής η τριδιάστατη μετατόπιση του θαλάμου δεν επηρεάζει την τελική προβολή του, παρά μόνο η τυχούσα περιστροφή του.

Τα όρια της οπής απομονώνονται και προβάλλονται στο επίπεδο ως εξής:



Σχήμα 5.10: Παράλληλη προβολή των σημείων των ορίων των οπών του θαλάμου του κοχλία στο επίπεδο προβολής

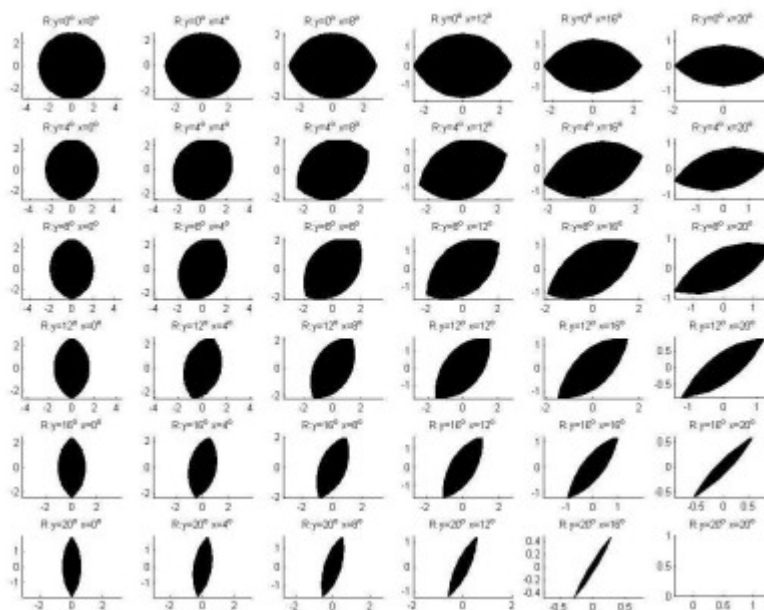
Από το σχήμα αυτό εξάγεται μόνο η κλειστή επιφάνεια, η οποία αποτελεί την τομή των επιφανειών, οι οποίες οριοθετούνται από τα περιγράμματα των προβολών των οπών πάνω στο επίπεδο προβολής X-Y, με χρήση μεθόδων ανίχνευσης ακμών.



Σχήμα 5.11: Τομή των επιφανειών που οριοθετούνται από τις προβολές των ορίων των οπών στο επίπεδο X-Y

Στη συνέχεια, με χρήση μεθόδων κατάτμησης εικόνων, απομονώνεται το εσωτερικό της επιφάνειας αυτής από την υπόλοιπη εικόνα, η οποία τελικά αποτελεί μία αναπαράσταση της εικόνας της οπής η οποία εμφανίζεται στην ακτινογραφική εικόνα ενός ακτινογραφικού μηχανήματος που κάνει χρήση παράλληλης πηγής φωτισμού.

Με επανάληψη της παραπάνω μεθόδου στρέφοντας τον ήλο ως προς τους τρεις άξονες του χώρου μπορεί να προκύψει μία βάση δεδομένων η οποία αποτελείται από στιγμιότυπα της οπής, με δεδομένη την απόκλιση τους από τους άξονες περιστροφής. Στην περίπτωση που αυτό το μοντέλο είναι ακριβές, ένας χειρουργός μπορεί να βοηθηθεί συγκρίνοντας την ακτινογραφική εικόνα της οπής με την βάση δεδομένων, να εντοπίσει το πρότυπο το οποίο ταιριάζει καλύτερα με την ακτινογραφική εικόνα και τελικά να εξάγει την απόκλιση με την οποία θα πρέπει να περιστρέψει το ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm προκειμένου ο ήλος να έρθει στην θέση αναφοράς. Μία ενδεικτική βάση δεδομένων έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 5.12: Μορφή Βάσης δεδομένων από στιγμιότυπα οπών του ήλου για διαφορετικές θέσεις του στο χώρο, με χρήση παράλληλης προβολής

## 5.2. Βελτιώσεις απεικόνισης του ήλου

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει παρουσίαση των βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εικονικό μοντέλο του ήλου. Συγκεκριμένα:

1. Θα επανεξετασθεί ο πραγματικός ήλος.
2. Θα εξετασθεί η αναγκαιότητα προσθήκης της δεύτερης οπής.
3. Θα παρουσιασθεί η μέθοδος προσθήκης της δεύτερης οπής.
4. Θα παρουσιασθεί το τελικό εικονικό μοντέλο.

### 5.2.1. Αναγκαιότητα προσθήκης δεύτερης οπής

Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.1.2, στο αρχικό εικονικό μοντέλο του ήλου υλοποιήθηκε μόνο μία εκ των δύο οπών, καθώς ο στόχος της μοντελοποίησης ήταν τουλάχιστον μία οπή να εμφανίζεται στο επίπεδο απεικόνισης ως τέλειος κύκλος, όταν ο ήλος θα βρίσκεται στην θέση αναφοράς. Εντούτοις, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο ήλος συνήθως φέρει δύο οπές σε κάθε άκρη του και ειδικά στην άκρη ενδιαφέροντος, όπως απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 5.13: Λεπτομέρεια εικόνας ήλου, όπου απεικονίζονται οι δύο οπές

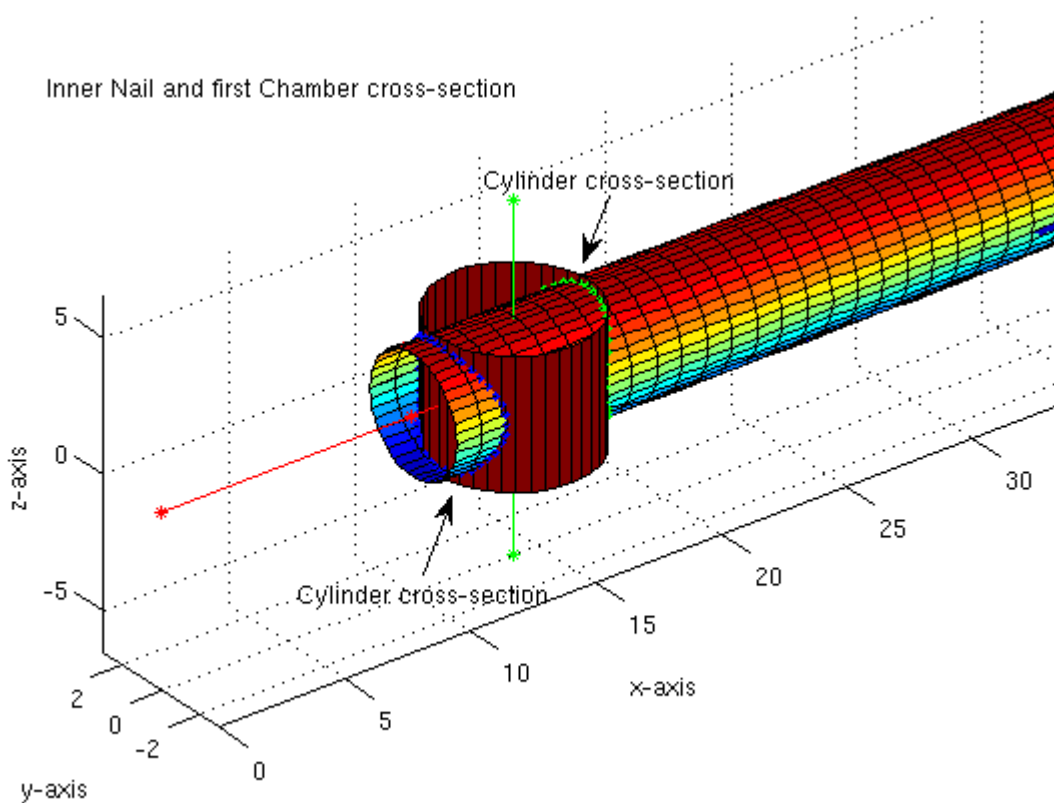
Προκειμένου να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν ακριβέστερη εικονική αναπαράσταση του ήλου, αλλά και της προβολής του μοντέλου αυτού στο επίπεδο προβολής, κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη και της δεύτερης οπής στο εικονικό μοντέλο. Απώτερος σκοπός της εν λόγω βελτίωσης είναι και η παρουσίαση της προβολής της δεύτερης οπής στο επίπεδο απεικόνισης, έτσι ώστε η τελική απεικόνιση να πλησιάζει πληρέστερα την πραγματική ακτινογραφική εικόνα που θα παραχθεί από το ακτινογραφικό μοντέλο C-arm.

### 5.2.2. Διαδικασία προσθήκης δεύτερης οπής στο εικονικό μοντέλο

Από τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη της δεύτερης οπής στον ήλο. Προκειμένου η διαδικασία αυτή να υλοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, απαιτείται να προηγηθεί η εις βάθος μελέτη του αρχικού εικονικού μοντέλου του ήλου και ειδικά της διαδικασίας με την οποία υλοποιήθηκε η πρώτη οπή καθώς και ο θάλαμός της.

Αρχικά μελετάται η τομή του κυλίνδρου της πρώτης οπής με τον εσωτερικό κύλινδρο του ήλου, η οποία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:





Σχήμα 5.14: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου πρώτης οπής και κρίσιμα σημεία τομής

Με δεδομένες τις διαστάσεις των άνωθεν κυλίνδρων:

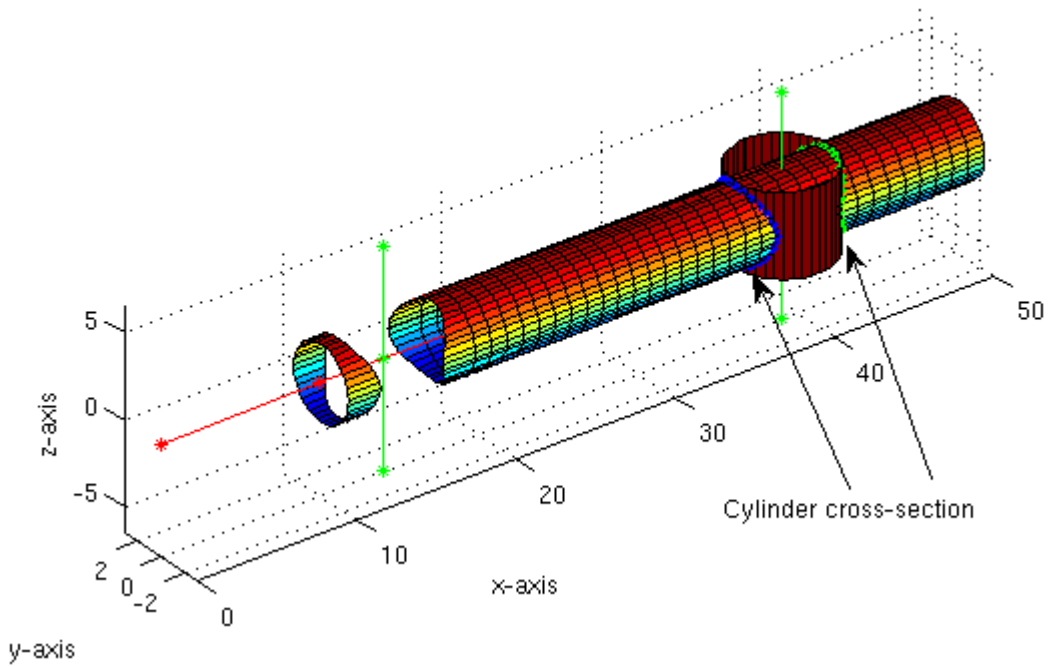
1. Πραγματοποιείται μία εγκάρσια τομή (cross-section) στον εσωτερικό κύλινδρο, μήκους ίσο με την διάμετρο του θαλάμου. Το τμήμα αυτό απομακρύνεται.
2. Γίνεται η εύρεση των κρίσιμων σημείων τομής του εσωτερικού κυλίνδρου και του θαλάμου, τα οποία απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα.
3. Εν τέλει, με γνώση των κυλινδρικών τμημάτων και των κρίσιμων σημείων τομής μπορούμε να σχεδιάσουμε τα μη-κυλινδρικά τμήματα του εσωτερικού κυλίνδρου τα οποία προκύπτουν από την κυλινδρική τομή με τον θάλαμο της οπής.

Ανάλογη μέθοδος εφαρμόζεται και για τον εξωτερικό κύλινδρο του ήλου. Με αυτήν την διαδικασία είναι δυνατή η προσθήκη μίας δεύτερης οπής στο εικονικό μοντέλο του ήλου, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

**a) Αποκοπή τμήματος του εσωτερικού κυλίνδρου του ήλου**

Αρχικά προσδιορίζεται το οπίσθιο τμήμα του εσωτερικού κυλίνδρου ήλου, τμήμα του οποίου θα πρέπει να αποκοπεί, καθώς και ο κύλινδρος που ορίζει τον θάλαμο της δεύτερης οπής, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:

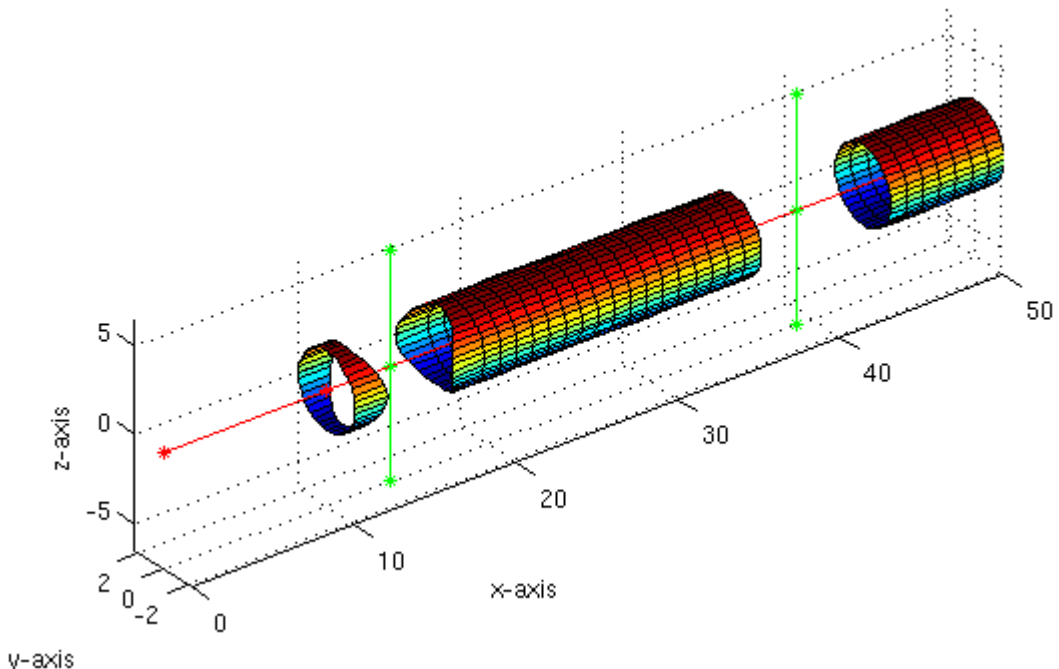
Inner Nail and second Chamber cross-section



Σχήμα 5.15: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου δεύτερης οπής και κρίσιμα σημεία τομής

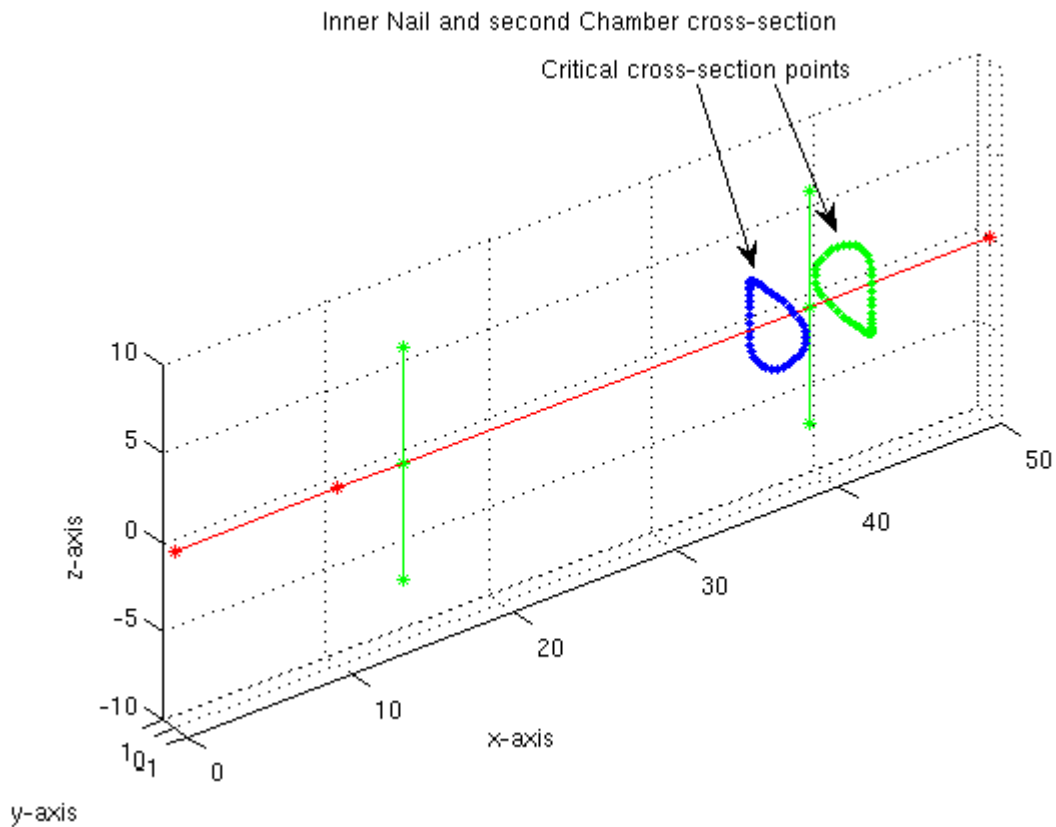
Εν συνεχεία πραγματοποιείται μία εγκάρσια τομή στον εσωτερικό κύλινδρο του ήλου, μήκους ίσο με την διάμετρο του θαλάμου της οπής. Το τμήμα αυτό απομακρύνεται.

Inner Nail and second Chamber cross-section



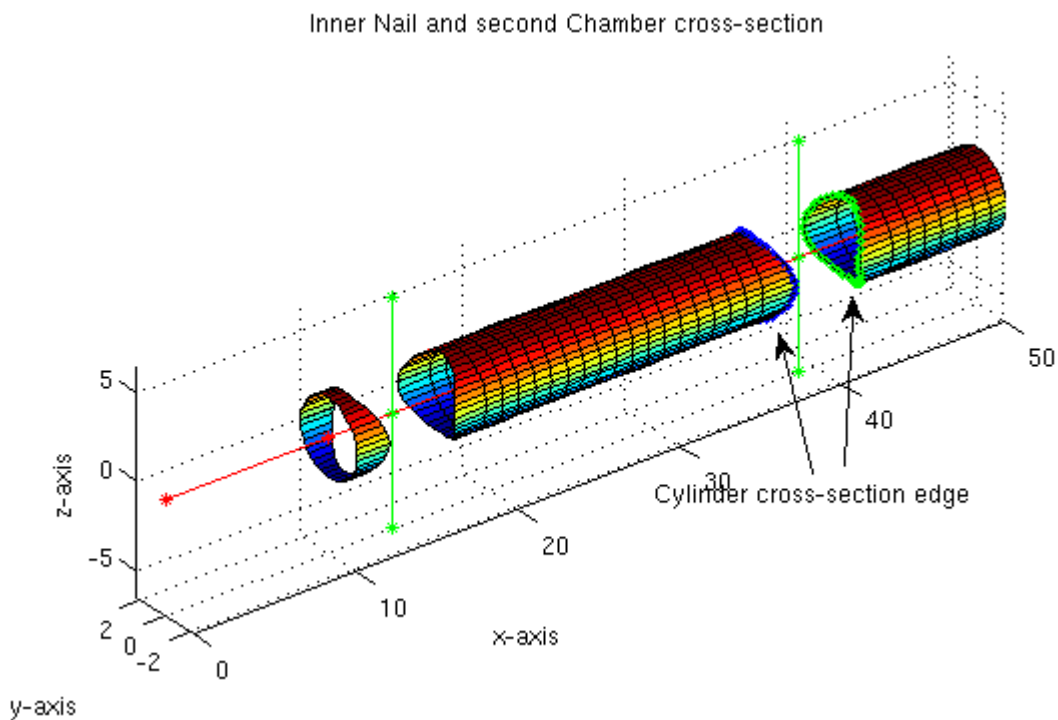
Σχήμα 5.16: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση της δεύτερης εγκάρσιας τομής

Έπειτα απομονώνονται τα κρίσιμα σημεία της τομής του εσωτερικού κυλίνδρου του ήλου με τον θάλαμο της δεύτερης οπής:



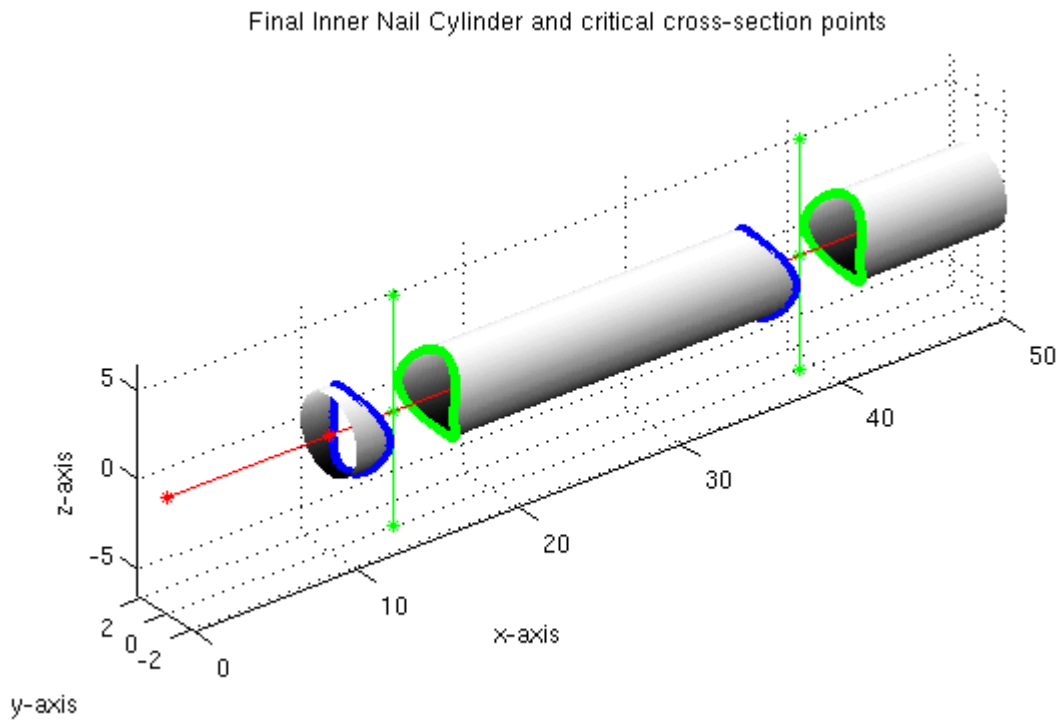
Σχήμα 5.17: Κρίσιμα σημεία τομής εσωτερικού κυλίνδρου ήλου και δεύτερου θαλάμου

Και τέλος συνδυάζοντας το τμήμα του κυλίνδρου που απέμεινε με τα άνωθεν κρίσιμα σημεία, προκύπτει το τελικό τμήμα του εσωτερικού κυλίνδρου που θα σχεδιαστεί:



Σχήμα 5.18: Εσωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση του κυλινδρικού τμήματος του θαλάμου, με τα κρίσιμα σημεία της εσωτερικής τομής

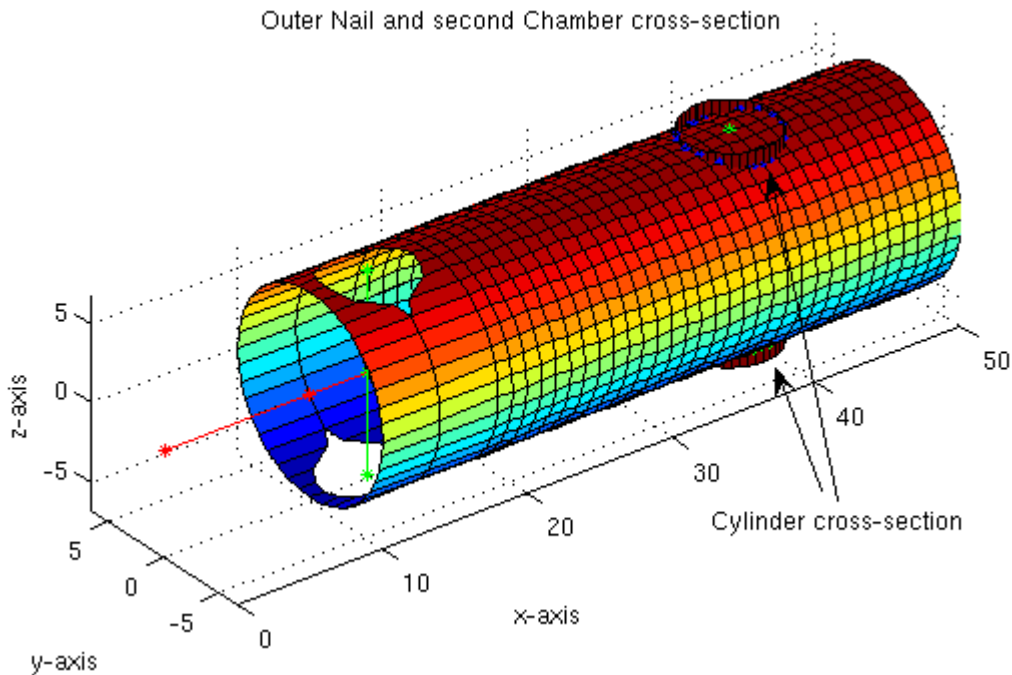
Και εφαρμόζοντας κατάλληλη σκίαση για καλύτερη αναπαράσταση, προκύπτει το τελικό εσωτερικό τμήμα του ήλου που θα σχεδιαστεί:



Σχήμα 5.19: Τελικό τμήμα εσωτερικού κυλίνδρου του ήλου που θα σχεδιαστεί και κρίσιμα σημεία τομής με τους δύο θαλάμους των οπών

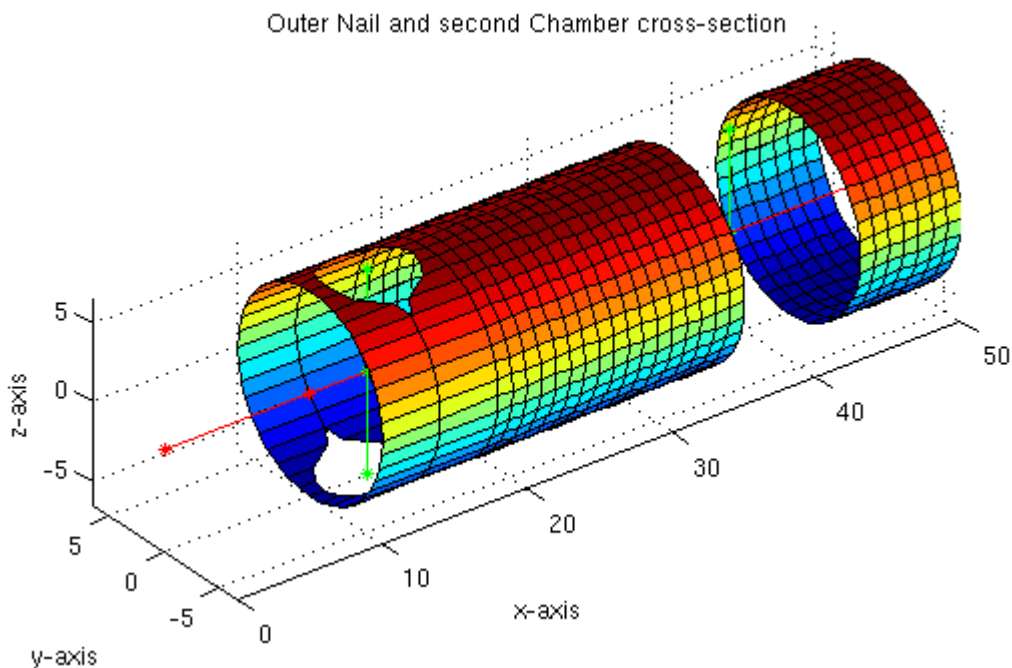
b) Αποκοπή τμήματος του εξωτερικού κυλίνδρου του ήλου

Με ανάλογο τρόπο, προσδιορίζεται το οπίσθιο τμήμα του εξωτερικού κυλίνδρου ήλου, τμήμα του οποίου θα πρέπει να αποκοπεί, καθώς και ο κύλινδρος που ορίζει τον θάλαμο της δεύτερης οπής, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



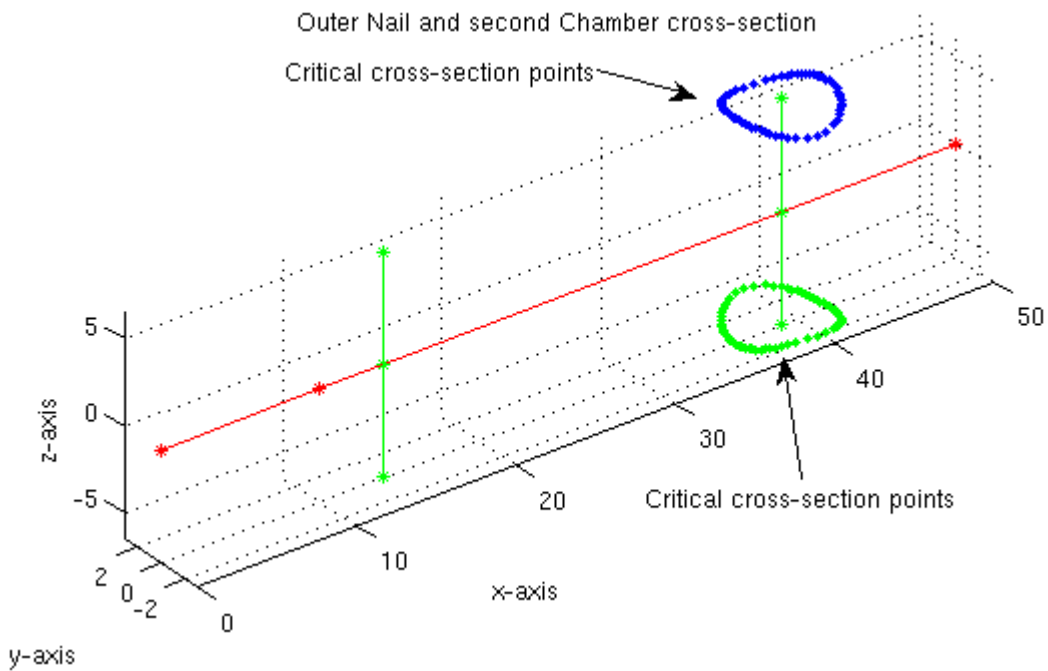
Σχήμα 5.20: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου, κύλινδρος θαλάμου δεύτερης οπής και κρίσιμα σημεία τομής

Ομοίως, πραγματοποιείται μία εγκάρσια τομή στον εξωτερικό κύλινδρο του ήλου, μήκους ίσο με την διάμετρο του θαλάμου της οπής. Το τμήμα αυτό απομακρύνεται.



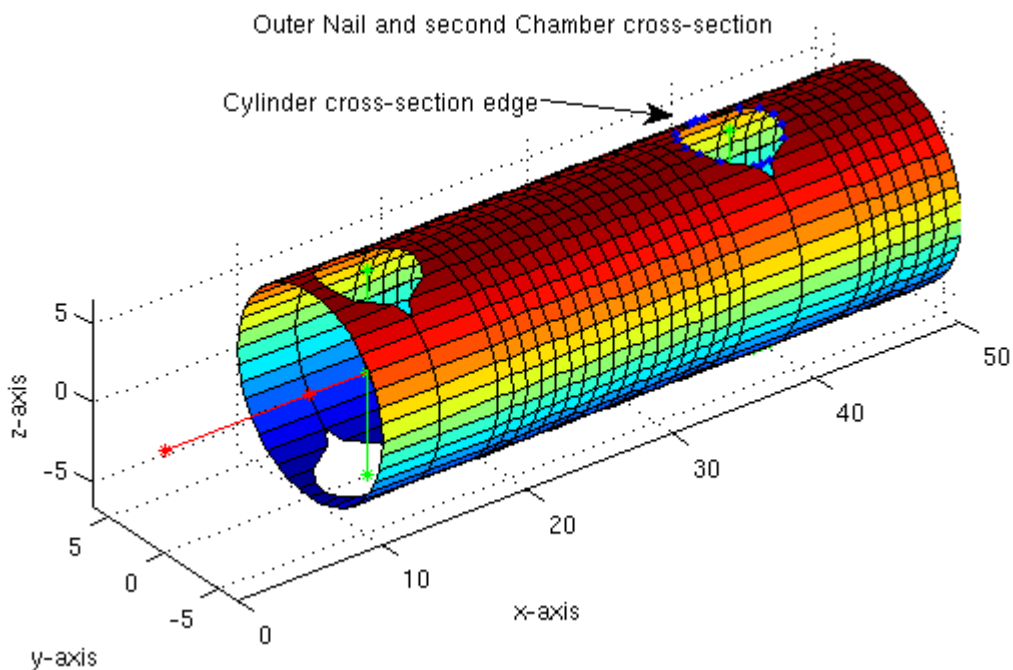
Σχήμα 5.21: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση της δεύτερης εγκάρσιας τομής

Εν συνεχεία απομονώνονται τα κρίσιμα σημεία της τομής του εξωτερικού κυλίνδρου του ήλου με τον θάλαμο της δεύτερης οπής:



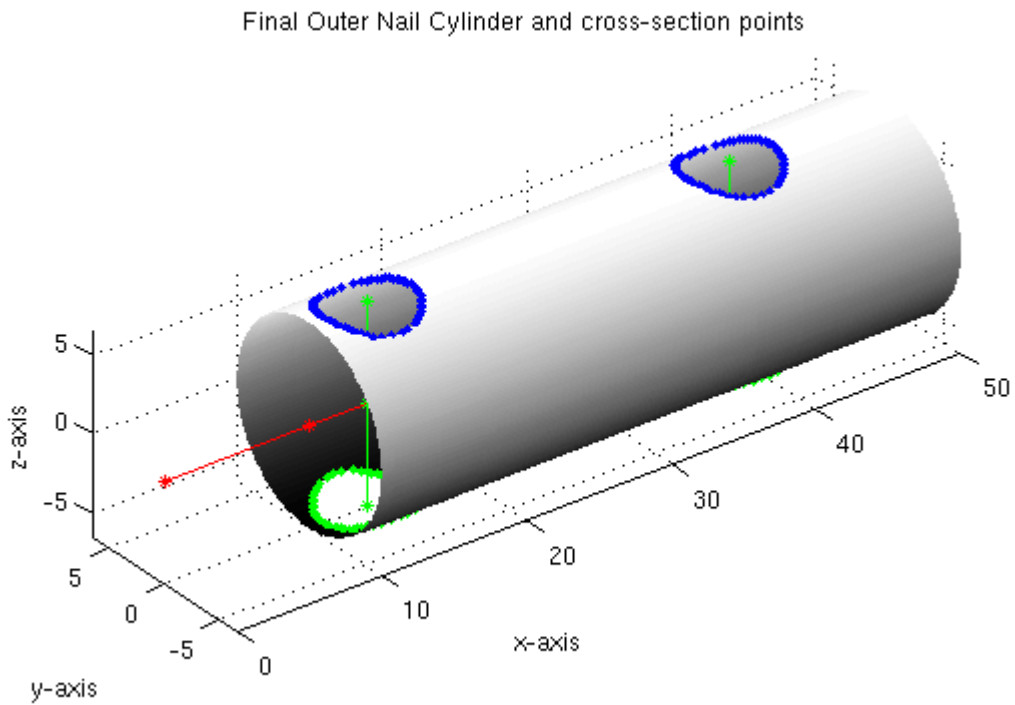
Σχήμα 5.22: Κρίσιμα σημεία τομής εξωτερικού κυλίνδρου ήλου και δεύτερου θαλάμου

Και τέλος, με ανάλογο τρόπο, συνδυάζοντας το τμήμα του κυλίνδρου που απέμεινε με τα άνωθεν κρίσιμα σημεία, προκύπτει το τελικό τμήμα του εσωτερικού κυλίνδρου που θα σχεδιαστεί:



Σχήμα 5.23: Εξωτερικός κύλινδρος ήλου μετά την απομάκρυνση του κυλινδρικού τμήματος του θαλάμου, με τα κρίσιμα σημεία της εξωτερικής τομής

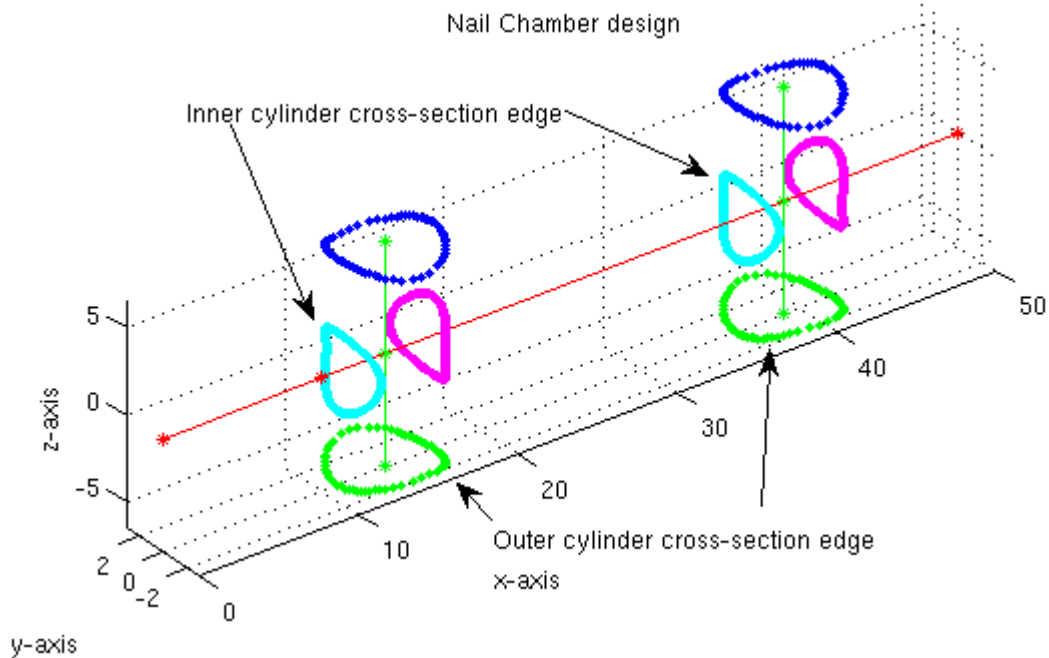
Και εφαρμόζοντας κατάλληλη σκίαση για καλύτερη αναπαράσταση, προκύπτει το τελικό εξωτερικό τμήμα του ήλου που θα σχεδιαστεί:



Σχήμα 5.24: Τελικό τμήμα εξωτερικού κυλίνδρου του ήλου που θα σχεδιαστεί και κρίσιμα σημεία τομής με τους δύο θαλάμους των οπών

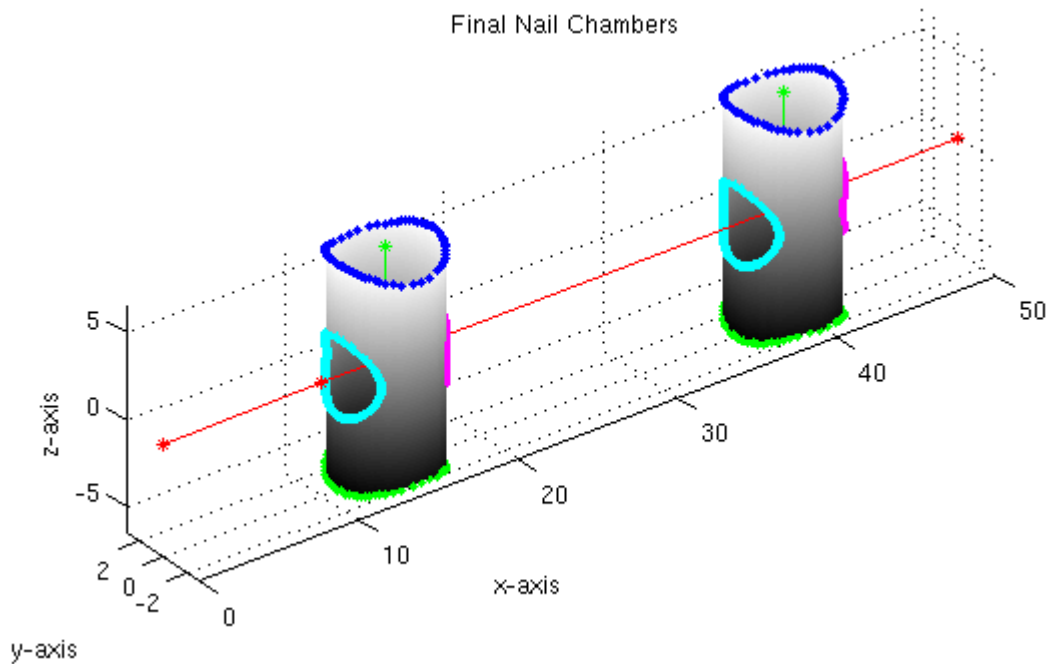
### c) Σχεδίαση θαλάμου οπής ήλου

Το τελικό βήμα είναι η σχεδίαση του θαλάμου της δεύτερης οπής του ήλου. Για τη σχεδίαση του θαλάμου, θα χρησιμοποιηθούν ως οδηγό τα κρίσιμα σημεία τομής του θαλάμου των οπών με τον εσωτερικό και τον εξωτερικό κύλινδρο του ήλου.



Σχήμα 5.25: Κρίσιμα σημεία τομής εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου ήλου και των θαλάμων των οπών

Συνεπώς, με τμηματική σχεδίαση των θαλάμων, προκύπτει το τελικό μοντέλο των θαλάμων του ήλου:



Σχήμα 5.26: Τελική μορφή των θαλάμων του ήλου και κρίσιμα σημεία τομής

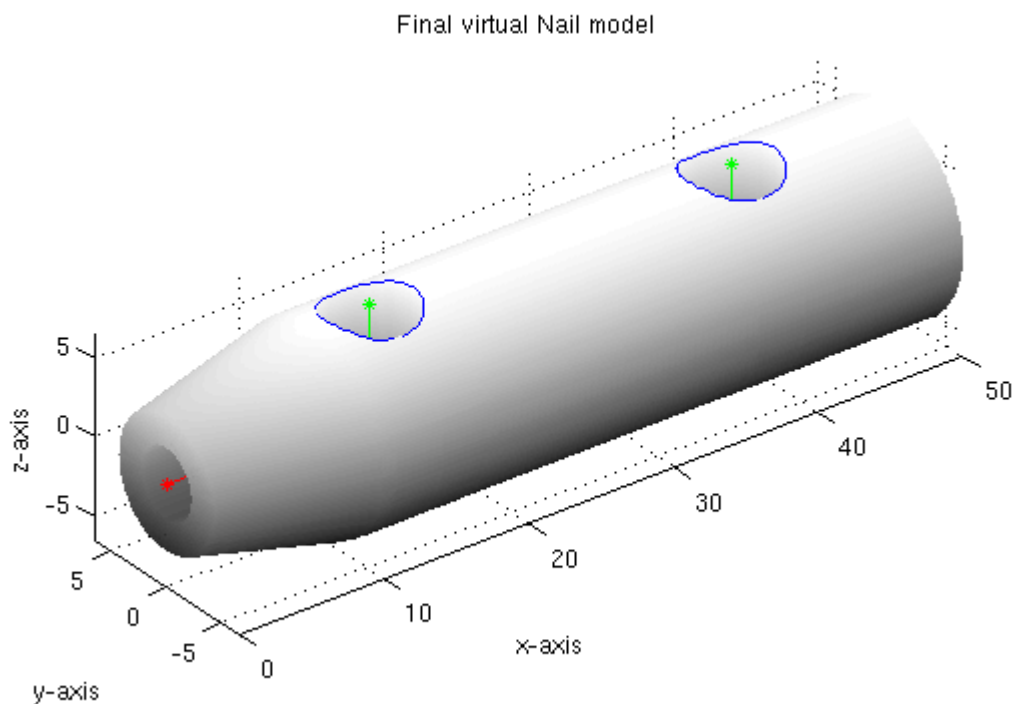


d) Τελική μορφή βελτιωμένου εικονικού μοντέλου ήλου

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, δηλαδή:

- Τον εσωτερικό θάλαμο του ήλου με τις δύο τομές του με τους θαλάμους των οπών
- Τον εξωτερικό θάλαμο του ήλου με τις δύο τομές του με τους θαλάμους των οπών
- Τους θαλάμους των οπών του ήλου
- Την εμπρόσθια μύτη του ήλου, η οποία είναι ήδη υλοποιημένη από προηγούμενη εργασία

λαμβάνεται το τελικό εικονικό μοντέλο του ήλου, το οποίο παρουσιάζεται, μαζί με τα κρίσιμα σημεία τομής με τους θαλάμους, στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.27: Τελική μορφή βελτιωμένου εικονικού μοντέλου ήλου

Σημειώνεται ότι, όπως όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του ήλου, έτσι και η θέση της δεύτερης οπής είναι παραμετροποιήσιμη. Κατά συνέπεια, μπορεί να υλοποιηθεί το μοντέλο οποιουδήποτε ήλου με μία ή δύο οπές.

### 5.3. Το σύστημα πηγής φωτός - ήλου - επιπέδου απεικόνισης

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει παρουσίαση της μοντελοποίησης του ακτινογραφικού συστήματος C-arm που υλοποιήθηκε για την υποβοήθηση σε εγχειρήσεις κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων. Συγκεκριμένα:

1. Θα εξετασθεί η αντιστοιχία της αναπαράστασης στα πραγματικά δεδομένα με χρήση του παράλληλου μοντέλου φωτισμού.
2. Θα ακολουθήσει επισκόπηση και ενδελεχής εξέταση του προτεινόμενου μοντέλου κωνικού φωτισμού.
3. Θα παρουσιασθεί ο αλγόριθμος υλοποίησης του κωνικού μοντέλου φωτισμού.
4. Θα παρουσιασθεί το τελικό σύστημα πηγής - ήλου - επιπέδου απεικόνισης.

#### 5.3.1. Ανακρίβεια του παράλληλου μοντέλου φωτισμού

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 5.1.5, η αρχική ανάπτυξη του εικονικού μοντέλου του ακτινογραφικού συστήματος C-arm βασίστηκε στο παράλληλο μοντέλο φωτισμού, σύμφωνα με το οποίο κάθε μία από τις σημειακές πηγές εκπέμπει μία δέσμη ακτίνων  $X$  απόλυτα ευθύγραμμη, κάθετη στο επίπεδο το οποίο σχηματίζει η πηγή και κάθετη στο επίπεδο προβολής και αποτελεί την ακτινογραφική επιφάνεια του ακτινογραφικού μηχανήματος.

Εντούτοις, μία ενδελεχής εξέταση των ακτινογραφικών στιγμιότυπων σε συνδυασμό με τις σύγχρονες εξελίξεις σε θέματα μοντελοποίησης φωτισμού, οδηγούν στο πιθανό συμπέρασμα ότι το παράλληλο μοντέλο φωτισμού δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα ακτινογραφικό στιγμιότυπο του ήλου από ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm, όπου έχει δοθεί έμφαση με κόκκινο χρώμα στα περιγράμματα των δύο οπών του:



Σχήμα 5.28: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο ήλου από C-arm με έμφαση στα περιγράμματα των δύο οπών του

Στην συγκεκριμένη τοποθεσία ο διαμήκης άξονας του ήλου είναι παράλληλος στον άξονα  $Ox$ , και ο ήλος έχει περιστραφεί ελαφρώς ως προς τον διαμήκη άξονά του, ενώ δεν υπάρχουν περιστροφές ως τους υπόλοιπους άξονες περιστροφής. Συνεπώς, αναμένεται οι δύο οπές του ήλου να εμφανιστούν στην ακτινογραφική εικόνα ως δύο ίδιες ελλείψεις στην ακτινογραφική εικόνα, οι οποίες έχουν τους άξονες  $Ox$  και  $Oy$  ως άξονες συμμετρίας.

Εξετάζοντας την απεικόνιση της αριστερής, όπως εμφανίζεται στο άνωθεν σχήμα, οπής παρατηρείται ότι συμφωνεί με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Εξετάζοντας, ωστόσο, την απεικόνιση δεξιά οπή, παρατηρείται μία σημαντική απόκλιση σε σχέση την απεικόνιση της αριστερής οπής. Συγκεκριμένα, η δεξιά οπή εμφανίζεται στην ακτινογραφική εικόνα περιστραμμένη και ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $Oz$ , γεγονός που αποκλίνει από την αναμενόμενη συμπεριφορά του παράλληλου μοντέλου φωτισμού.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν:

- Τα αποτελέσματα ακτινογραφικών εικόνων όπως η παραπάνω
- Τις σύγχρονες τάσεις που ακολουθούνται κατά την υλοποίηση του φωτισμού σε ακτινογραφικά μηχανήματα C-arm

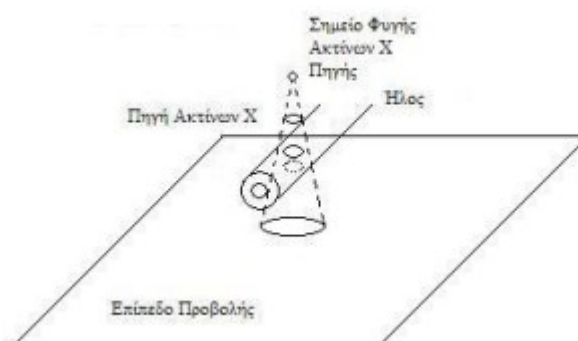
κρίνεται απαραίτητη η αντικατάσταση του μοντέλου παράλληλων ακτίνων και η αντικατάστασή του με κάποιο άλλο μοντέλο, και συγκεκριμένα του μοντέλου συντρεχουσών ακτίνων, όπως αναλύεται εν συνεχεία.

Επισημαίνεται ότι το παράλληλο μοντέλο φωτισμού ήδη χρησιμοποιείται στην υποβοήθηση άλλων ιατρικών εφαρμογών, όπως οι τομογραφία με χρήση του C-arm<sup>[48]</sup> (C-arm tomography).

### 5.3.2. Επισκόπηση του μοντέλου συντρεχουσών ακτίνων

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, η σύγχρονη τάση που ακολουθείται κατά την εικονική μοντελοποίηση του φωτισμού προσεγγίζει το μοντέλο συντρεχουσών ακτίνων  $X$  με σημεία φυγής. Το ίδιο μοντέλο εφαρμόζεται και σε αρκετούς τύπους ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm, όπως παρουσιάζεται στα αντίστοιχα τεχνικά εγχειρίδια<sup>[13][14]</sup>. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην θεώρηση ότι η πηγή ακτινοβολίας εκπέμπει δέσμες ακτίνων  $X$ , οι οποίες δεν είναι παράλληλες, ούτε ακτινικά παραγόμενες.

Συγκεκριμένα για το παρόν πρόβλημα, θεωρήθηκε ότι τα ακτινογραφικά μηχανήματα ακολουθούν το μοντέλο των σημειακών πηγών με κοινό σημείο φυγής, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:

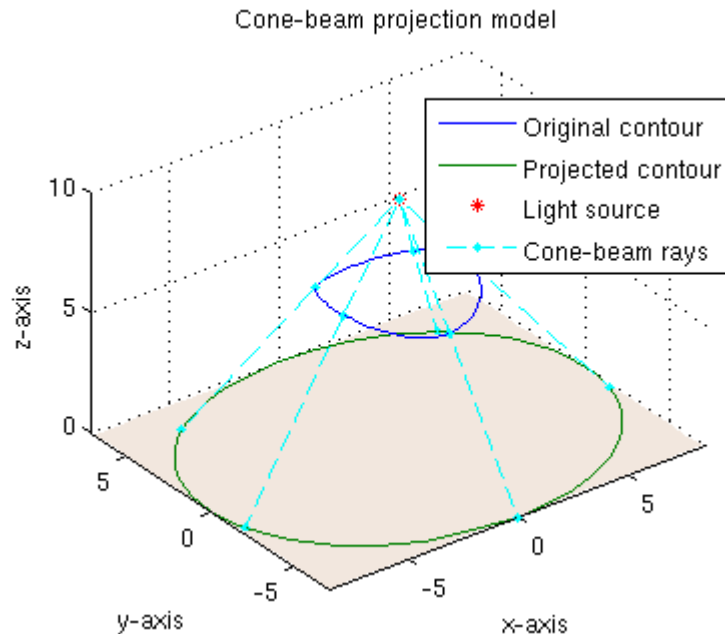


Σχήμα 5.29: Μοντέλο πηγής αποτελούμενης από σημειακές πηγές ακτίνων  $X$  με κοινό σημείο φυγής

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι ακτίνες  $X$  δεν προσπίπτουν κάθετα στο υπό εξέταση αντικείμενο αλλά διαχέονται σε κώνο, ο οποίος έχει κορυφή το σημείο φυγής των ακτίνων  $X$ . Με αυτήν την μέθοδο επιτυγχάνεται ουσιαστικά μία αποτελεσματική προσέγγιση του μοντέλου της σημειακής πηγής.

### 5.3.3. Ενδελεχής εξέταση του μοντέλου της κωνικής προβολής

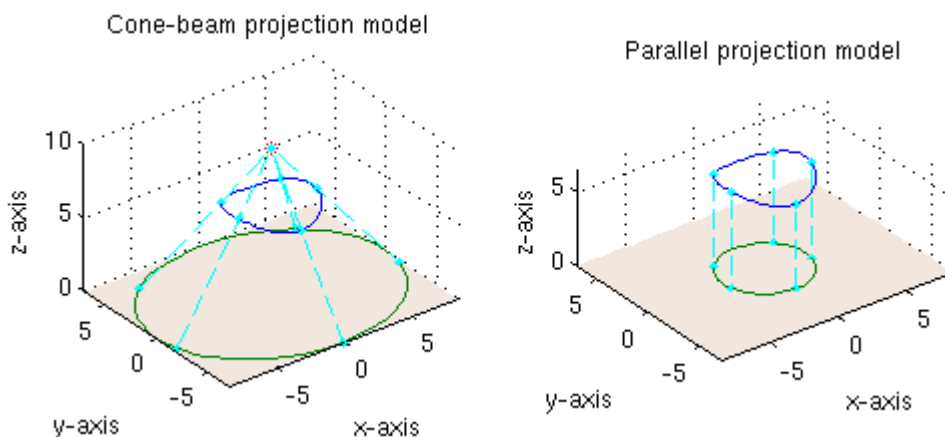
Η προσομοίωση του μοντέλου της κωνικής προβολής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.30: Προσομοίωση μοντέλου κωνικής προβολής

Εξετάζοντας σε βάθος το μοντέλο αυτό, προκύπτει ότι εισάγονται παραμορφώσεις στην εικόνα που λαμβάνεται στο επίπεδο προβολής και κατά συνέπεια και στην εικόνα της οπής του ήλου στην ακτινογραφική εικόνα. Συγκεκριμένα:

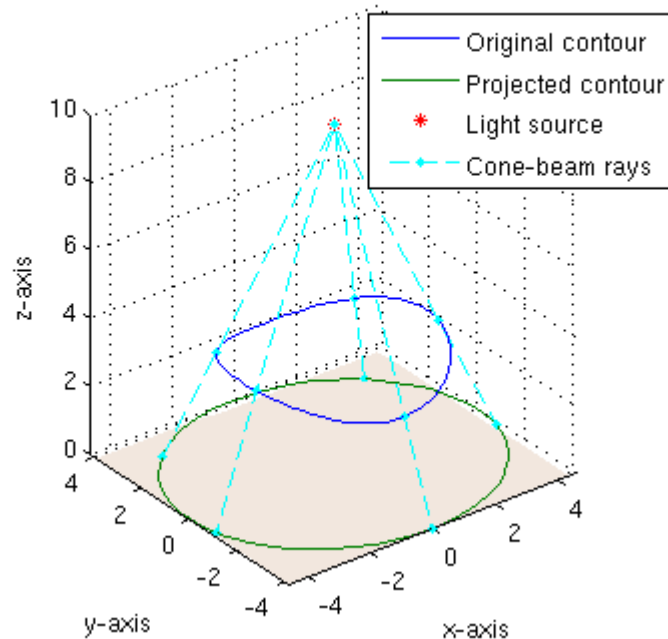
1. Υποθέτοντας ότι ένα αντικείμενο βρίσκεται στην επιθυμητή θέση αναφοράς, η κωνική προβολή του είναι συνήθως μεγεθυμένη σε σχέση με την αντίστοιχη παράλληλη προβολή, όπως εικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 5.31: Σύγκριση κωνικού και παράλληλου μοντέλου προβολής

2. Η κωνική προβολή ενός αντικειμένου εμφανίζει μικρότερη παραμόρφωση όσο το αντικείμενο πλησιάζει το επίπεδο προβολής.

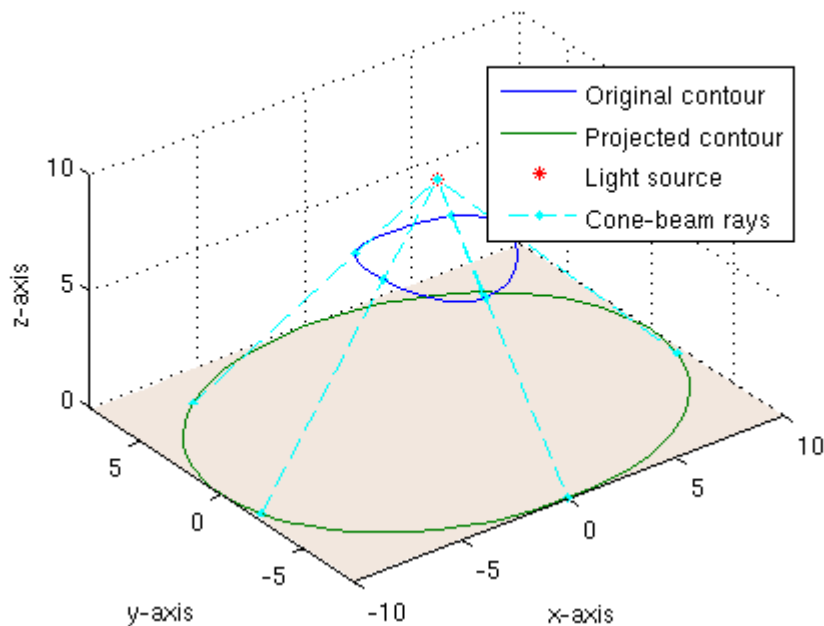
Cone-beam projection model - Contour closer to the projection plane



Σχήμα 5.32: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν πλησιάζει το επίπεδο προβολής

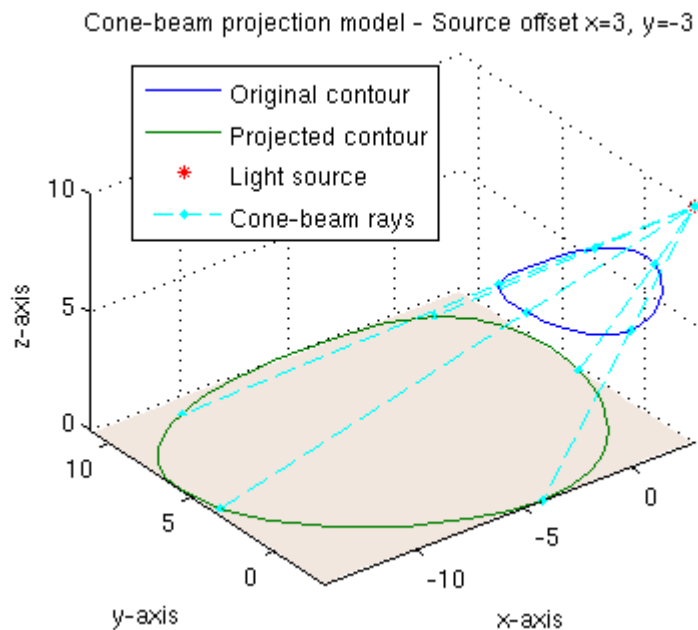
3. Αντίθετα, η κωνική προβολή ενός αντικειμένου εμφανίζει μεγαλύτερη παραμόρφωση όσο το αντικείμενο απομακρύνεται από το επίπεδο προβολής.

Cone-beam projection model - Contour close to the source



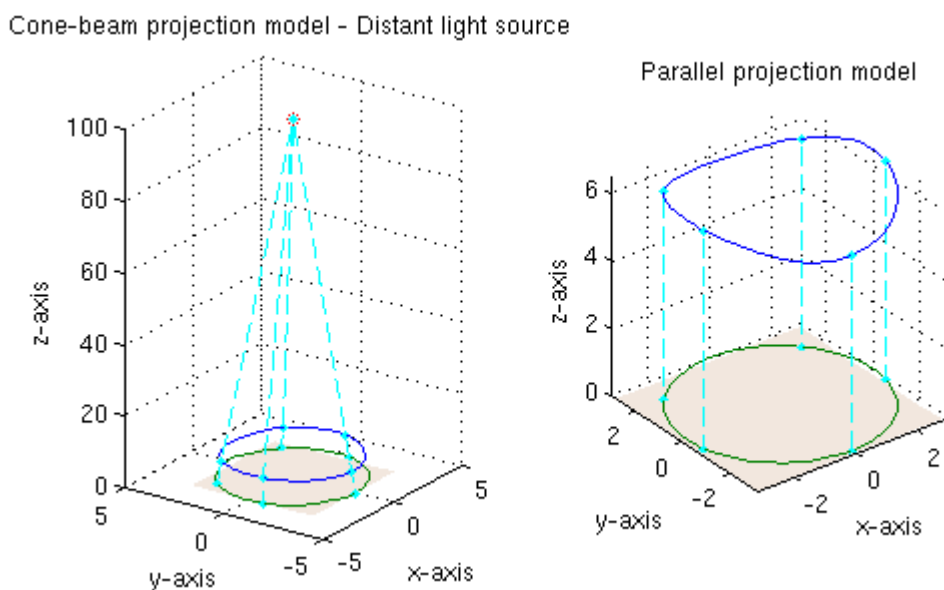
Σχήμα 5.33: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν απομακρύνεται από το επίπεδο προβολής

4. Τέλος, σημειώνεται ότι πλέον έχει σημασία και η μετατόπιση του αντικειμένου στον τριδιάστατο χώρο, εκτός από την περιστροφή του ως προς τους τρεις άξονες. Συγκεκριμένα, η θέση του αντικειμένου ως προς την πηγή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την κωνική προβολή του.



Σχήμα 5.34: Κωνική προβολή αντικειμένου όταν η πηγή φωτός δεν βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σημείο συμμετρίας του

Σημειώνεται ότι όταν η απόσταση της πηγής φωτός από το αντικείμενο είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την απόσταση της πηγής φωτός από το επίπεδο προβολής, η κωνική προβολή προσεγγίζει το μοντέλο της παράλληλης προβολής, με μικρές βέβαια παραμορφώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η τυχούσα ακτίνα φωτός που ορίζεται από την πηγή φωτός και ένα σημείο του αντικειμένου πέφτει στο επίπεδο προβολής υπό γωνία σχεδόν κάθετη σε αυτό. Παρατίθεται παρακάτω μία τέτοια περίπτωση μαζί με το παράλληλο μοντέλο για εύκολη σύγκριση.



Σχήμα 5.35: Κωνική προβολή με απομακρυσμένη πηγή φωτός & αντίστοιχη παράλληλη προβολή

### 5.3.4. Υλοποίηση μοντέλου σημειακών πηγών ακτίνων $X$ με κοινό σημείο φυγής

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η υλοποίηση του μοντέλου σημειακών πηγών ακτίνων  $X$ , με κοινό σημείο φυγής. Για την ευκολότερη επισκόπηση του αλγορίθμου και την κατανόησή του, λαμβάνονται οι εξής παραδοχές:

- Το επίπεδο προβολής θεωρείται ότι είναι παράλληλο στο επίπεδο  $xOy$ , δηλαδή η περιγράφεται από την εξίσωση:

$$z = z_p$$

- Οι σημειακές πηγές ακτίνων  $X$ , με κοινό σημείο φυγής μπορούν να μοντελοποιηθούν ως μία σημειακή πηγή με θέση στο κοινό σημείο πηγής. Θεωρείται ότι έχει τις συντεταγμένες:

$$[x_s, y_s, z_s]$$

Επιπλέον, θα βρίσκεται “πάνω” από το επίπεδο προβολής, δηλαδή  $z_s > z_p$ .

- Το τυχόν σημείο στο χώρο, του οποίου αναζητείται το ίχνος της προβολής του στο επίπεδο προβολής, έχει τις συντεταγμένες

$$[x_0, y_0, z_0]$$

Επιπλέον δεν έχει νόημα να ταυτίζεται με την σημειακή πηγή φωτός ή να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με αυτήν, έτσι ώστε να μπορεί να προβληθεί πάνω στο επίπεδο αναφοράς. Επιπροσθέτως, θεωρείται ότι δεν μπορεί να βρίσκεται “κάτω” από το επίπεδο προβολής. Ισχύει, δηλαδή:

$$z_p \leq z_0 < z_s$$

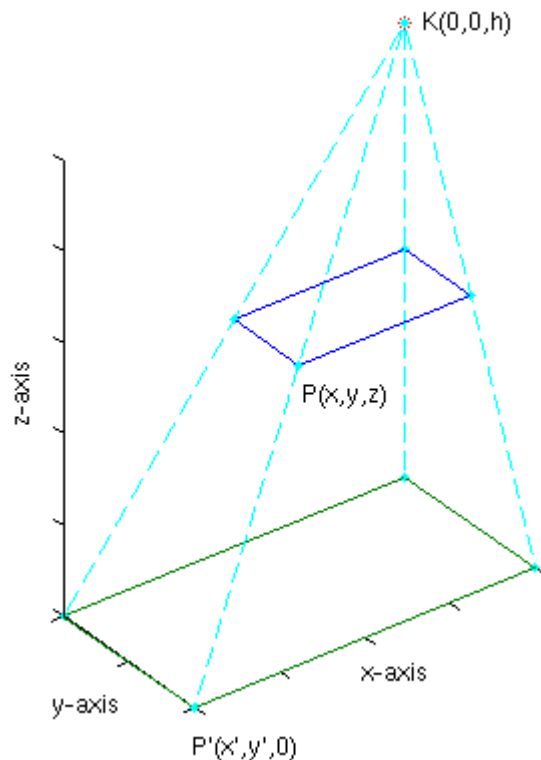
Είναι εμφανές ότι οι άνωθεν παραδοχές δεν παραβιάζουν την γενικότητα του προβλήματος, απλώς το οριοθετούν μέσα σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς.

a) Προσέγγιση με όμοια τρίγωνα

Ένα τριδιάστατο αντικείμενο προβάλλεται σε ένα επίπεδο ( $\pi$ ) (επίπεδο προβολής) από ένα σημείο  $K$  (κέντρο, ή σημείο όρασης). Θεωρείται η περίπτωση  $K(0,0,h)$  και με επίπεδο ( $\pi$ ) το  $z = 0$ . Αν το σημείο  $P(x,y,z)$  απεικονίζεται στο  $P'(x',y',0)$ , από τα όμοια τρίγωνα του σχήματος προκύπτει ότι<sup>[49]</sup>:

$$\frac{x'}{h} = \frac{x}{h-z}$$

και άρα  $x' = \frac{hx}{h-z}$ . Ομοίως  $y' = \frac{hy}{h-z}$ . Επομένως ο μετασχηματισμός είναι:



Σχήμα 5.36: Παράδειγμα προοπτικής προβολής σημείου P

$$x' = \frac{hx}{h-z}, \quad y' = \frac{hy}{h-z}, \quad z' = 0$$

και είναι μη γραμμικός.

Με χρήση ομογενών συντεταγμένων ζητείται το  $(x,y,z,1)$  να απεικονίζεται στο  $(x',y',0,1)$ . Έτσι, ο μετασχηματισμός γράφεται:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{hx}{h-z} \\ \frac{hy}{h-z} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{h-z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h}{h-z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$



Η γενικότερη περίπτωση προκύπτει με απλούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων, οι οποίοι υπεισέρχονται στις σχέσεις αναλογίας που εξάγονται από τα όμοια τρίγωνα. Συγκεκριμένα:

- Εάν το επίπεδο προβολής είναι σε ύψος  $z = z_p$ , τότε έπεται  $\frac{x'}{h-z_p} = \frac{x}{h-z}$ , καθώς μεταβάλλεται μόνο η σχετική απόσταση μεταξύ σημείου οράσεως και επιπέδου προβολής.
- Εάν το σημείο όρασης είναι το  $K(x_k, y_k, h)$ , τότε έπεται  $\frac{x' - x_k}{h} = \frac{x - x_k}{h - z}$ , με μεταφορά των αξόνων από το  $(0,0,0)$  στο  $(x_k, 0, 0)$ .

Με επαλληλία προκύπτει  $\frac{x' - x_k}{h - z_p} = \frac{x - x_k}{h - z} \Rightarrow x' = x_k + \frac{h - z_p}{h - z}(x - x_k)$ .

Ομοίως  $y' = y_k + \frac{h - z_p}{h - z}(y - y_k)$ .

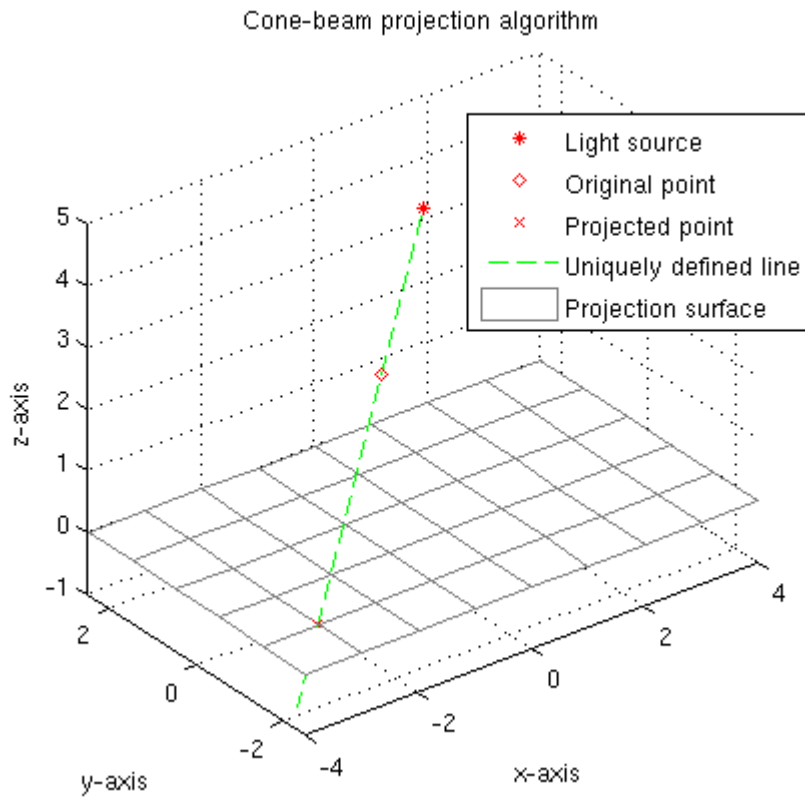
Επομένως ο μετασχηματισμός της γενικής περίπτωσης είναι:

$$x' = x_k + \frac{h - z_p}{h - z}(x - x_k), \quad y' = y_k + \frac{h - z_p}{h - z}(y - y_k), \quad z' = z_p$$

και είναι μη γραμμικός.

b) Προσέγγιση με αναλυτικές εξισώσεις

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται εποπτικά στο παρακάτω σχήμα και περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 5.37: Εποπτική άποψη του αλγορίθμου υλοποίησης κωνικής προβολής

Με τις παραπάνω παραδοχές, τα σημεία  $[x_s, y_s, z_s]$  (πηγή φωτός) και  $[x_0, y_0, z_0]$  (τυχόν σημείο) ορίζουν μοναδική ευθεία ( $\epsilon$ ), η οποία περιγράφεται από τις ακόλουθες παραμετρικές εξισώσεις:

$$x(t) = x_s + t(x_0 - x_s)$$

$$y(t) = y_s + t(y_0 - y_s)$$

$$z(t) = z_s + t(z_0 - z_s)$$

Η ευθεία αυτή τέμνει το επίπεδο προβολής σε ένα μοναδικό σημείο  $[x_1, y_1, z_1]$ , με  $z_1 = z_p$ . Αυτό το σημείο είναι το σημείο του επιπέδου προβολής πάνω στο οποίο προβάλλεται το τυχόν σημείο  $[x_0, y_0, z_0]$ , με αναφορά την σημειακή πηγή φωτός  $[x_s, y_s, z_s]$ .

Η ευθεία ( $\epsilon$ ) θα τέμνει το επίπεδο προβολής  $z = z_p$  αν και μόνο αν:

$$\begin{aligned} z(t) &= z_p \\ \Leftrightarrow z_s + t(z_0 - z_s) &= z_p \\ \Leftrightarrow t &\equiv t_0 = \frac{z_p - z_s}{z_0 - z_s} \end{aligned}$$

γνωρίζοντας ότι  $z_0 \neq z_s$  εκ παραδοχής.

Έτσι, αντικαθιστώντας το  $t_0$  στις παραμετρικές εξισώσεις  $x(t)$  και  $y(t)$  της ευθείας ( $\epsilon$ ), προκύπτουν οι συντεταγμένες του σημείου προβολής:

$$x_1 = x(t_0) = x_s + \frac{z_p - z_s}{z_0 - z_s} (x_0 - x_s)$$

$$y_1 = y(t_0) = y_s + \frac{z_p - z_s}{z_0 - z_s} (y_0 - y_s)$$

Τελικά, οι συντεταγμένες του σημείου προβολής προκύπτουν:

$$\left[ x_s + \frac{z_p - z_s}{z_0 - z_s} (x_0 - x_s), y_s + \frac{z_p - z_s}{z_0 - z_s} (y_0 - y_s), z_p \right]$$

Όπως αναμενόταν, προέκυψε το αποτέλεσμα με το αντίστοιχο της προσέγγισης με τα όμοια τρίγωνα, θέτοντας  $x_s = x_k$ ,  $y_s = y_k$ ,  $z_s = h$ .

Εκτελώντας τον αλγόριθμο αυτόν επαναληπτικά, μπορεί να προκύψει η κωνική προβολή ενός οποιουδήποτε συνόλου σημείων.

### 5.3.5. Η διάταξη του εικονικού συστήματος

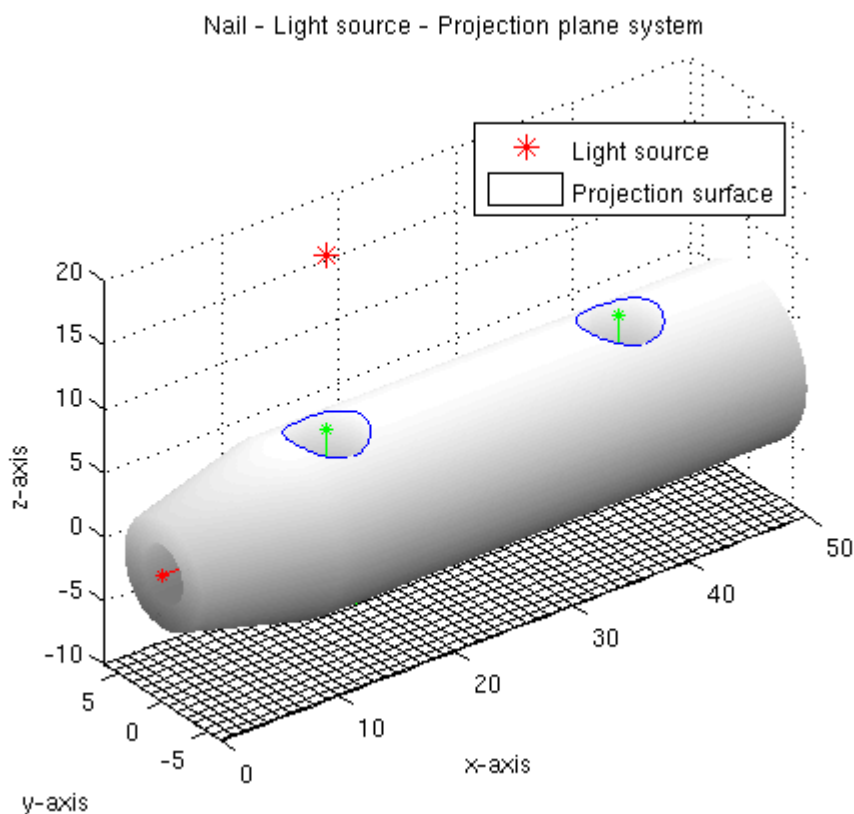
Έχοντας εξετάσει, στις αμέσως προηγούμενες ενότητες:

- το εικονικό μοντέλο του ήλου, στο οποίο προστέθηκε η δεύτερη οπή για βελτίωση της ανταπόκρισής του με τα πραγματικά δεδομένα.
- το μοντέλο φωτισμού, το οποίο και αντικαταστάθηκε με το κωνικό μοντέλο προβολής, αντί του παράλληλου μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε εξ' αρχής
- την υλοποίηση του μοντέλου κωνικής προβολής σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab

με συνδυασμό των παραπάνω προκύπτει η τελική διάταξη του μοντελοποιημένου ακτινογραφικού συστήματος, το οποίο αποτελείται από:

- Το εικονικό μοντέλο του ήλου
- Μία πηγή φωτός
- Ένα επίπεδο προβολής

το οποίο εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.38: Η τελική διάταξη ήλου - πηγής φωτός - επιπέδου προβολής

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστεί πώς το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βάσης στιγμιοτύπων με σκοπό την υποβοήθηση σε εγχειρήσεις κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων.

## 5.4. Μετακινήσεις και περιστροφές του ήλου και της πηγής - Συσχέτιση με το πραγματικό πρόβλημα

Στην παρούσα ενότητα θα μελετηθεί η αντιμετώπιση του προβλήματος των μετακινήσεων και περιστροφών του ήλου και της πηγής. Συγκεκριμένα, θα ενσωματωθούν οι μελετηθείσες στην ενότητα 4.1 κινήσεις των C-arm, σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες όπου δεν λήφθηκαν υπ' όψιν.

1. Θα ληφθούν κατάλληλες παραδοχές για την γεωμετρία των C-arm.
2. Θα καθοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας του μοντελοποιημένου συστήματος και συγκεκριμένα ποιες παράμετροι του προβλήματος θα αφεθούν ελεύθερες και ποιες θα δεσμευθούν σε συγκεκριμένες τιμές.
3. Θα προταθεί η βέλτιστη κίνηση του ακτινογραφικού μηχανήματος για την επίλυση του προβλήματος.
4. Θα παρουσιασθεί το μαθηματικό υπόβαθρο του τρόπου υλοποίησης των μετακινήσεων και περιστροφών ενός αντικειμένου.
5. Θα καθοριστούν οι ακριβείς δυνατές μετακινήσεις και περιστροφές του ήλου, με γνώμονα την άμεση συσχέτιση του εικονικού μοντέλου με το πραγματικό πρόβλημα.

### 5.4.1. Παραδοχές σχετικά με τις κινήσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του C-arm

Πρωτού υλοποιηθούν οι δυνατότητες μετακινήσεων και περιστροφών του εικονικού συστήματος, κρίνεται απαραίτητη η λήψη παραδοχών σχετικά τις κινήσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακτινογραφικού συστήματος που θα μοντελοποιηθεί.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την μελέτη που προηγήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με τις τυπικές κινήσεις ενός C-arm, των κατασκευαστικών τους ιδιαιτεροτήτων καθώς και των προβλημάτων που ανακύπτουν λόγω των μη-ιδανικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, θα ληφθούν οι εξής παραδοχές:

- Για να διατηρηθεί η γενικότητα του μοντέλου και η δυνατότητα εφαρμογής σε όσο το δυνατόν περισσότερα C-arm διαφορετικών τύπων, θα μοντελοποιηθούν οι τυπικές δυνατότητες κινήσεων - περιστροφών οι οποίες μελετήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.
- Το C-arm θεωρείται ότι παρουσιάζει τέλεια γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως προς τους κύριους άξονές του. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι:
  - ο οριζόντιος “cross-arm” άξονας
  - ο άξονας γωνιακής περιστροφής
  - και ο άξονας που διέρχεται από το κοινό σημείο φυγής των σημειακών πηγών εκπομπής ακτίνων X και τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής (άξονας πηγής - επιπέδου προβολής)

τέμνονται και οι τρεις στο ίδιο σημείο και κάθετα ανά δύο.

Η τελευταία παραδοχή μπορεί να μην είναι η ιδανική επιλογή, όσον αφορά τον βαθμό ακρίβειας με την οποία γίνεται η αναπαράσταση των πραγματικών ακτινογραφικών μηχανημάτων, ωστόσο επιλέγεται ως εφελθτήριο του εικονικού μοντέλου. Η ανάπτυξη θα γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι εύκολη η μελλοντική επέκταση του μοντέλου.

#### 5.4.2. Επιλογή βαθμών ελευθερίας του προβλήματος

Έχοντας μελετήσει τις δυνατότητες μετακίνησης και περιστροφής του βραχίονα του C-arm, είναι πλέον δυνατή η επιλογή των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, δηλαδή των παραμέτρων που θα έχουν πλήρη ελευθερία κίνησης και περιστροφής. Όπως έχει αναφερθεί, η διάταξη του προβλήματος αποτελείται από:

- Την σημειακή πηγή φωτός, δηλαδή πολλές σημειακές πηγές φωτός με κοινό σημείο φυγής.
- Το εικονικό μοντέλο του ήλου, δηλαδή την εικονική απεικόνιση του άκρου ενδιαφέροντος με τις δύο οπές.
- Το επίπεδο προβολής, στο οποίο αναμένεται να ληφθούν οι προβολές των οπών του εικονικού μοντέλου του ήλου.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δυνατότητες κινήσεων του C-arm και έχοντας ως σκοπό:

1. να επιτευχθεί η άμεση χρήση της μοντελοποίησης του ακτινογραφικού συστήματος
2. το μοντέλο να είναι εύκολο κατά την χρήση του από τον μέσο χρήστη
3. να υπάρχει η δυνατότητα αναπαραγωγής όλων των δυνατών περιπτώσεων τοποθέτησης του ήλου στο χώρο, με αναφορά στις κινήσεις του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm
4. από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εικονική διάταξη να εξάγονται άμεσα συμπεράσματα για χρήση σε πραγματικό χρόνο

επιλέχθηκε να διατηρηθεί σταθερή ως προς περιστροφές η μοντελοποίηση του ακτινογραφικού συστήματος και αντίθετα να υπάρχει πλήρης ελευθερία ως προς τις μετακινήσεις και τις περιστροφές του ήλου.

Στην συνέχεια θα μελετηθούν αναλυτικότερα τα τμήματα της διάταξης που θα διατηρηθούν σταθερές και αυτές που θα υποβάλλονται σε μετακινήσεις.

#### a) Διάταξη πηγής φωτός - ακτινογραφικής επιφάνειας

Η διάταξη αυτή επιλέγεται να διατηρηθεί σταθερή, με εξαίρεση ορισμένες προδιαγραφές. Πιο ειδικά:

- Η αρχή των αξόνων  $(0,0,0)$  λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς της συνολικής διάταξης και ορίζεται ως το σημείο στο οποίο τέμνονται μεταξύ τους και κάθετα ο οριζόντιος άξονας περιστροφής και ο άξονας της γωνιακής περιστροφής. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, το σημείο αυτό ανήκει και στον νοητό άξονα που διέρχεται από το σημείο φυγής της πηγής φωτός και πέφτει κάθετα στην ακτινογραφική επιφάνεια προβολής.

Η επιλογή αυτή ενδέχεται να μην είναι η βέλτιστη ιατρική επιλογή, ωστόσο επιλέγεται γιατί βοηθά στην ανάπτυξη του εικονικού μοντέλου, για λόγους που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Το σύστημα αναφοράς αναμένεται να βελτιωθεί σε επόμενη μορφή της παρούσας εργασίας.

- Η πηγή φωτός θεωρείται σημειακή με συντεταγμένες  $(0,0,z_s)$  και  $z_s > 0$ . Πέρα από την δυνατότητα μεταβολής του ύψους της σε σχέση με το σημείο αναφοράς. Η εκπομπή φωτός θεωρείται ότι γίνεται με κωνικό τρόπο και η εκπομπή φωτός είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση του κώνου ακτινοβολίας.
- Το επίπεδο προβολής θεωρείται παράλληλο στο επίπεδο  $xOy$  και τοποθετείται σε μεταβλητό βάθος  $z_p < 0$ . Η μαθηματική εξίσωσή του, δηλαδή, είναι η  $z = z_p$ .

#### b) Διάταξη εικονικού μοντέλου ήλου

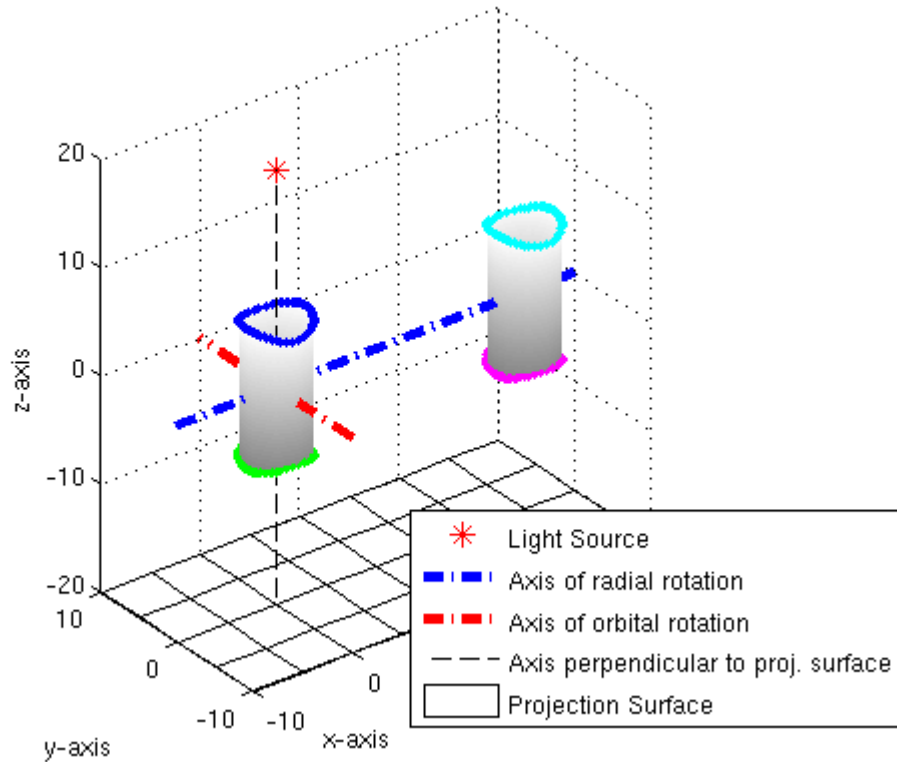
Στο εικονικό μοντέλο του ήλου παρέχεται η δυνατότητα πλήρων μετακινήσεων και περιστροφών. Συγκεκριμένα:

- Ως θέση αναφοράς του ήλου ορίζεται η θέση κατά την οποία:
  - το βαρύκεντρο του θαλάμου της πρώτης οπής βρίσκεται στο σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$ ,
  - ο άξονας συμμετρίας του θαλάμου της πρώτης οπής ταυτίζεται με τον άξονα που διέρχεται από την πηγή φωτός και τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής,
  - και ο διαμήκης άξονας του ήλου ταυτίζεται με τον άξονα  $xOx'$ .

Είναι εμφανές ότι στη θέση αυτή η πρώτη οπή του ήλου εμφανίζεται στην ακτινογραφική εικόνα ως τέλειος κύκλος. Πέραν τούτου, ο οριζόντιος άξονας περιστροφής του C-arm καθώς και ο άξονας της γωνιακής περιστροφής διέρχονται από το βαρύκεντρο της πρώτης οπής. Η θέση αναφοράς του ήλου παρουσιάζεται σε επόμενο σχήμα.

- Ως επιθυμητή θέση του ήλου ορίζεται μία οποιαδήποτε περιστροφή του ήλου ως τον κατακόρυφο άξονα  $zOz'$ . Στην περίπτωση αυτή, η πρώτη οπή του ήλου εξακολουθεί να εμφανίζεται ως τέλειος κύκλος στην ακτινογραφική εικόνα, απλώς αλλάζει η θέση της δεύτερης οπής στο χώρο. Ως εκ τούτου, όλες οι περιστροφές ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $zOz'$  είναι επιθυμητές θέσεις του ήλου.
- Ο ήλος διαθέτει την δυνατότητα μετακίνησης σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου και περιστροφής ως προς οποιοδήποτε άξονα του χώρου.

### Nail Chambers - Position of Reference



Σχήμα 5.39: Θέση αναφοράς του ήλου

Από τα παραπάνω εξάγεται ότι έχει υλοποιηθεί το δυικό ακτινογραφικό σύστημα, όπως αυτό ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκε να μείνει σταθερό στο χώρο το ακτινογραφικό σύστημα και αντίθετα να δοθεί πλήρης ελευθερία κινήσεων στον ήλο, ενώ στο πραγματικό πρόβλημα ο ήλος παραμένει σταθερός και το ακτινογραφικό σύστημα C-arm υποβάλλεται σε μετακινήσεις και περιστροφές. Με τρόπο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, θα δοθούν στον ήλο συγκεκριμένες δυνατότητες μετακίνησης και περιστροφής έτσι ώστε τα αποτελέσματα να εφαρμόζονται άμεσα στο πραγματικό ακτινογραφικό σύστημα C-arm.



### 5.4.3. Πρόταση βέλτιστης μετακίνησης και περιστροφής του C-arm

Στην παρούσα ενότητα θα προηγηθεί μελέτη του τρόπου μετακίνησης και περιστροφής του C-arm με γνώμονα:

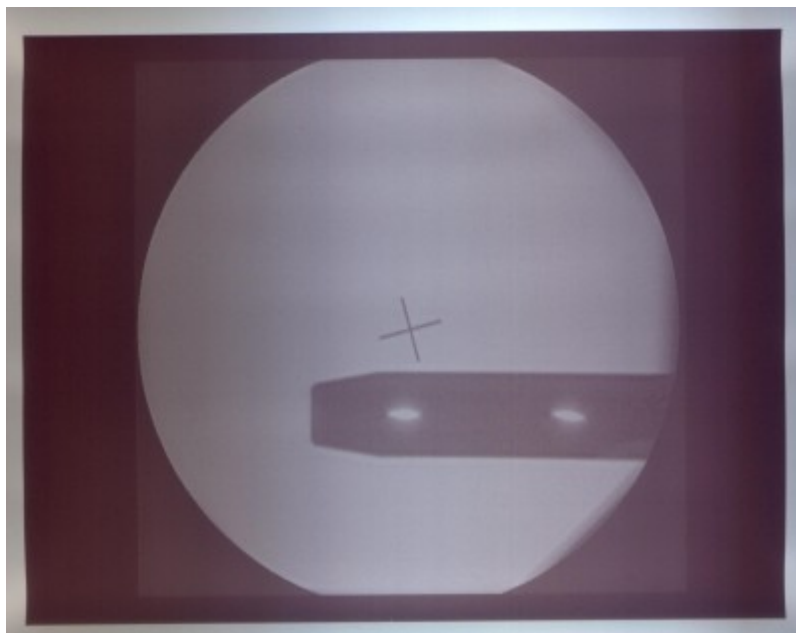
- Τις δυνατότητες των κινήσεων που διαθέτουν τα σύγχρονα μοντέλα C-arm
- Την ελαχιστοποίηση των ακτινογραφικών εικόνων που θα χρειαστεί να ληφθούν, προκειμένου να μειωθεί η έκθεση των συμμετεχόντων σε επιβλαβή ακτινοβολία.

#### a) Πρώτη τοποθέτηση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm

Η πρώτη τοποθέτηση του ακτινογραφικού συστήματος C-arm γίνεται εμπειρικά με αναφορά το σημείο όπου πιστεύεται ότι βρίσκεται η οπή του ήλου. Το μηχάνημα μετακινείται στο χώρο με τη βοήθεια των τροχών που διαθέτει. Αφού έρθει στην επιθυμητή θέση, οι τροχοί του C-arm “κλειδώνονται” στη θέση αυτή, καθώς η περαιτέρω μετακίνηση ολόκληρου του συστήματος αφενός δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια χιλιοστού και αφετέρου μπορεί να αλλοιώσει την διαδικασία εντοπισμού της ορθής θέσης της οπής.

#### b) Μετακίνηση οπής στο κέντρο προβολής

Στη συνέχεια, λαμβάνεται η πρώτη ακτινογραφία από το ακτινογραφικό μηχάνημα. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στην επόμενη ακτινογραφική εικόνα.



Σχήμα 5.40: Ακτινογραφικό στιγμιότυπο του ήλου, όπου απαιτείται μετακίνηση και περιστροφή του ήλου

Στο παραπάνω ακτινογραφικό στιγμιότυπο γίνεται φανερό ότι το ακτινογραφικό μηχάνημα θα πρέπει να υποβληθεί σε κατάλληλη περιστροφή, έτσι ώστε οι οπές του να εμφανιστούν στην ακτινογραφική εικόνα ως τέλειοι κύκλοι.

Ωστόσο, είναι επίσης εμφανές ότι η πρώτη (αριστερή) οπή του ήλου, η οποία είναι η οπή

ενδιαφέροντος, δεν είναι ακριβώς κάτω από το κέντρο της ακτινογραφικής εικόνας, το οποίο σημειώνεται κατάλληλα με ένα “X”. Το σημείο αυτό είναι το σημείο στο οποίο προσπίπτει κάθετα η ακτινοβολία από την πηγή φωτός του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm. Το σημείο αυτό μας ενδιαφέρει για τους εξής λόγους:

- Σύμφωνα με το μοντέλο της κωνικής προβολής που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, στο σημείο αυτό αναμένεται να εμφανιστούν στην ακτινογραφική εικόνα οι ελάχιστες παραμορφώσεις που μπορούν να προκύψουν από την σχετική θέση του ήλου ως προς την πηγή φωτός.
- Το γεωμετρικό κέντρο, στο οποίο συμπίπτουν οι τρεις σημαντικοί άξονες του C-arm (οριζόντιος περιστροφής, γωνιακής περιστροφής, άξονας πηγής και επιπέδου προβολής), αποτελεί ιδανικό σημείο τοποθέτησης του βαρύκεντρου του θαλάμου της πρώτης οπής, καθώς απαιτούνται μόνο δύο περιστροφές του C-arm έτσι ώστε ο ήλος να βρεθεί στην επιθυμητή θέση, ως προς το ακτινογραφικό σύστημα, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Συμπερασματικά, μετά την λήψη μίας ανάλογης ακτινογραφικής εικόνας ακολουθούν οι εξής ενέργειες:

1. Ο βραχίονας C-arm μετακινείται κατάλληλα στο χώρο έτσι ώστε το κέντρο της οπής να διέρχεται από τον κάθετο άξονα πηγής φωτός - ακτινογραφικού επιπέδου. Συγκεκριμένα, η κίνηση θα γίνει σε κυλινδρικές συντεταγμένες  $r$ - $\theta$ - $z$  ως εξής:
  - I. Πραγματοποιείται η απαραίτητη περιστροφική κίνηση “wig-wag” κατά την γωνιακή διεύθυνση  $\theta$ .
  - II. Πραγματοποιείται οριζόντια και κατακόρυφη μηχανοκίνητη μετακίνηση του βραχίονα - διευθύνσεις  $r$  και  $z$  - έτσι ώστε το βαρύκεντρο να συμπέσει με το προαναφερθέν γεωμετρικό “κέντρο”, το οποίο είναι το σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$ .
2. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η κατάλληλη περιστροφή του βραχίονα ακτινογραφικού μηχανήματος, έτσι ώστε οι οπές του ήλου να εμφανιστούν στην επόμενη ακτινογραφική εικόνα ως τέλειοι κύκλοι, όπως θα περιγραφεί παρακάτω.

Οι άνωθεν κινήσεις είναι ιδιαίτερα περιορισμένες, ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν απαιτούνται κινήσεις ή περιστροφές μεγάλου εύρους, καθώς ο ήλος βρίσκεται σε θέση σχετικά κοντά στην επιθυμητή κατά την πρώτη τοποθέτηση του C-arm.

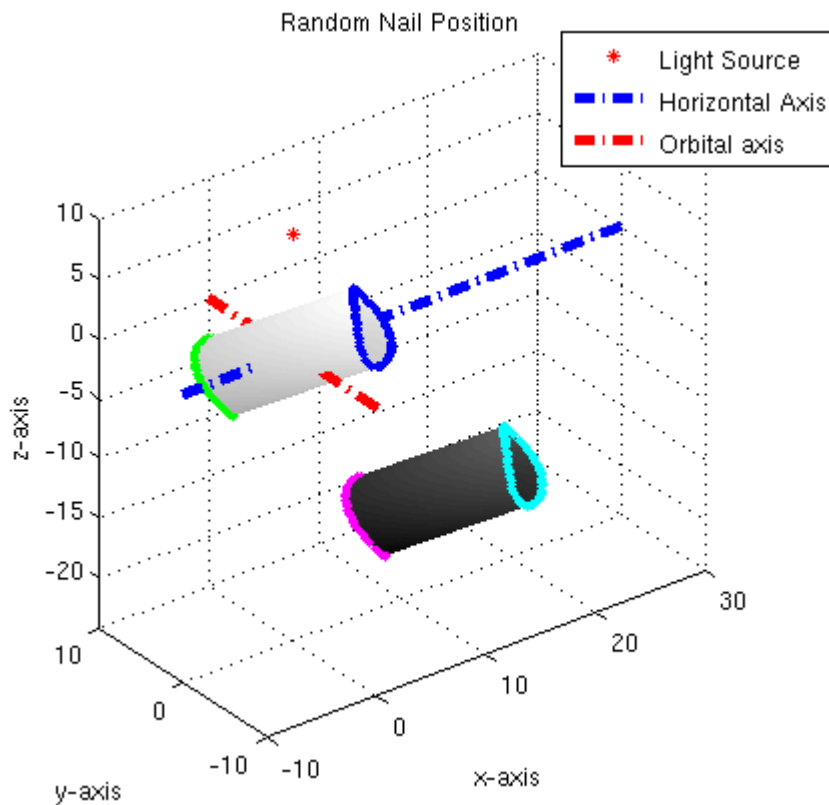
### c) Περιστροφή βραχίονα ως προς τους δύο άξονες περιστροφής

Με δεδομένο το ότι το βαρύκεντρο του θαλάμου της πρώτης οπής ταυτίζεται με το σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$ , δηλαδή το γεωμετρικό κέντρο τομής των αξόνων ενδιαφέροντος, ακολουθεί το τελευταίο βήμα που είναι η περιστροφή του βραχίονα C-arm ως προς:

- τον οριζόντιο “cross-arm” άξονα
- τον άξονα της γωνιακής περιστροφής

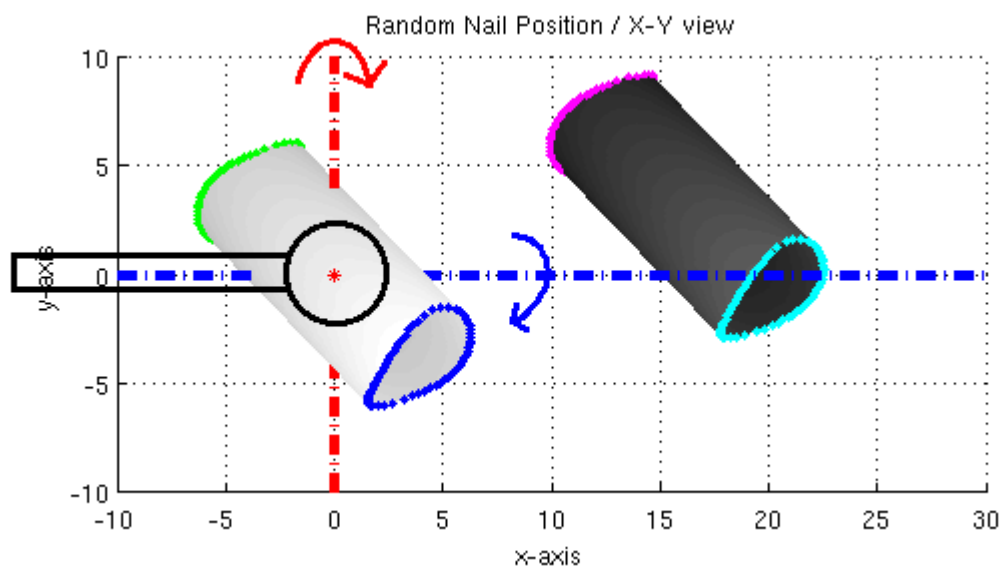
Ειδικότερα, για την κατανόηση των κινήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν, παρουσιάζεται ένα τυχαίο στιγμιότυπο του ήλου στο χώρο καθώς και οι δύο

προαναφερθέντες άξονες, για αναφορά. Ο άξονας των X θεωρείται ο οριζόντιος άξονας και ο άξονας των Y ο άξονας των γωνιακών περιστροφών.



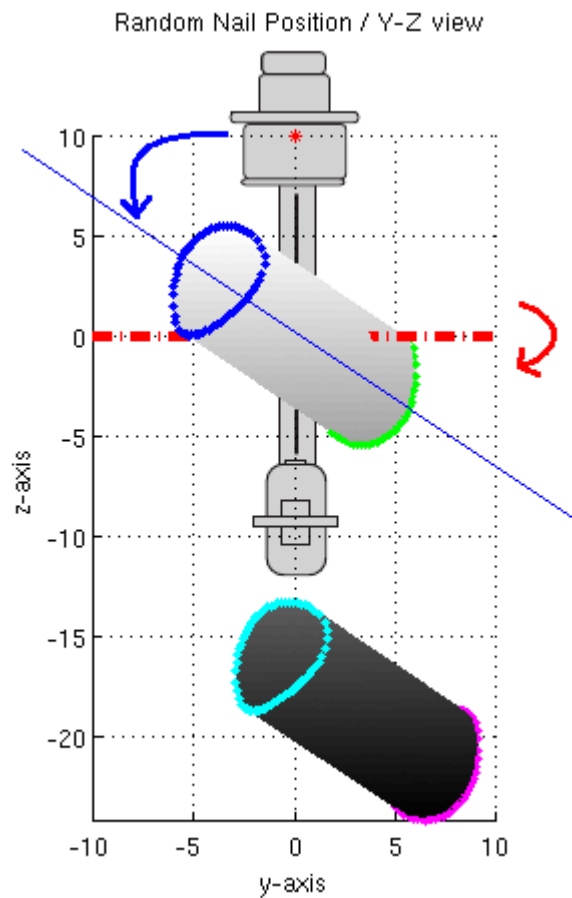
Σχήμα 5.41: Τυχαία τοποθέτηση ήλου στο χώρο

Στην X-Y προβολή εμφανίζεται μία κάτοψη του άνωθεν στιγμιότυπου, όπου φαίνεται επισκοπικά οι επιθυμητές περιστροφές του βραχίονα του C-arm.



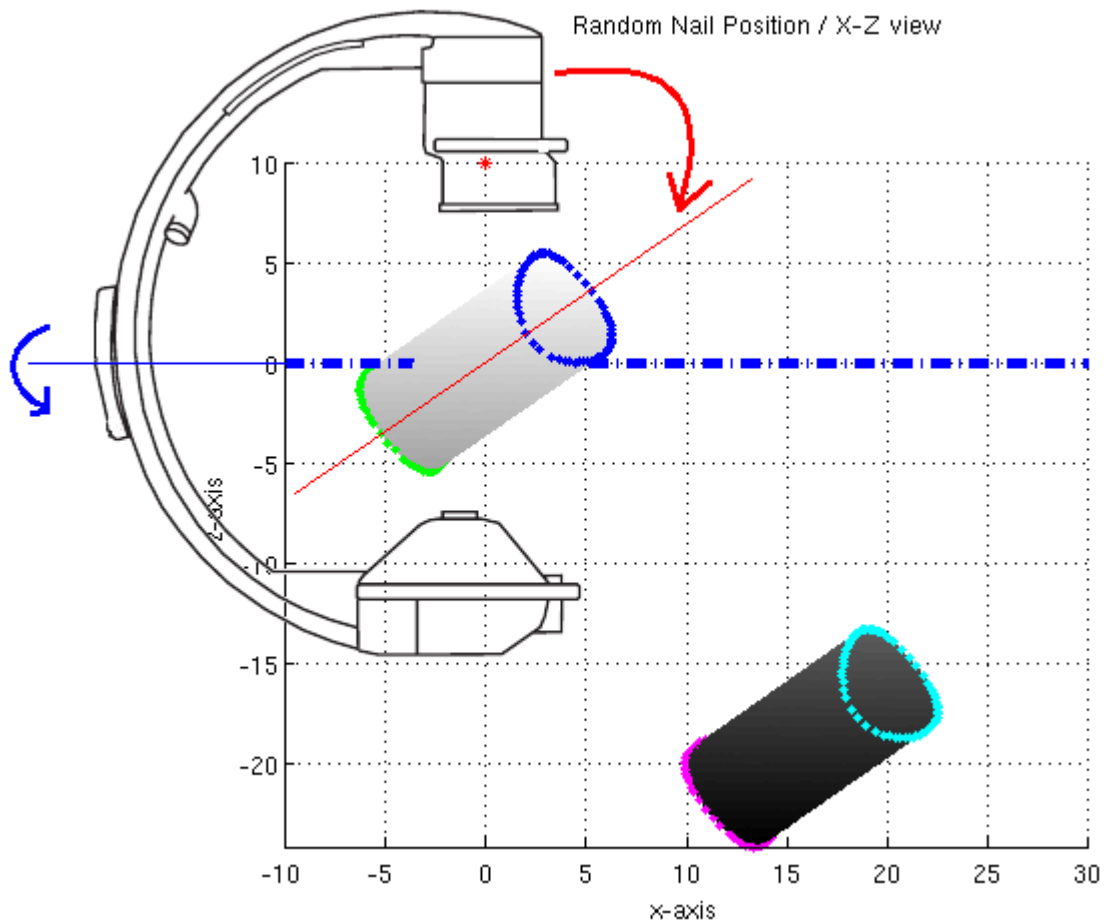
Σχήμα 5.42: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή X-Y

Στην Y-Z προβολή παρουσιάζεται η περιστροφή γύρω από τον οριζόντιο άξονα περιστροφής που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί.



Σχήμα 5.43: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή Y-Z

Στην X-Z προβολή παρουσιάζεται η περιστροφή γύρω από τον γωνιακό άξονα περιστροφής που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί.



Σχήμα 5.44: Τυχαία τοποθέτηση ήλου - Προβολή X-Z

Συνδυασμένες οι δύο παραπάνω περιστροφές του βραχίονα φέρουν το C-arm στην επιθυμητή θέση, ώστε οι οπές του ήλου να εμφανιστούν στην ακτινογραφική εικόνα ως τέλειοι κύκλοι.

Σημειώνεται ότι οι δύο περιστροφές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να πραγματοποιηθούν με οποιαδήποτε σειρά. Αυτό συμβαίνει καθώς:

- Κατά την οριζόντια περιστροφή του εξωτερικού βραχίονα ως προς τον οριζόντιο άξονα περιστρέφεται και ο εσωτερικός και κατά συνέπεια περιστρέφεται και ο άξονας της γωνιακής περιστροφής, αλλά και διατηρείται η τυχούσα γωνιακή περιστροφή που ενδέχεται να είχε πραγματοποιηθεί νωρίτερα.
- Κατά την γωνιακή περιστροφή δεν επηρεάζεται ο οριζόντιος άξονας περιστροφής.

Έχοντας μελετήσει την πρόταση για την βέλτιστη μετακίνηση και περιστροφή του C-arm, είναι πλέον δυνατό να οριστούν οι μετακινήσεις και περιστροφές του ήλου στο εικονικό μοντέλο, αφού προηγηθεί η παρουσίαση του απαραίτητου μαθηματικού υποβάθρου.

#### 5.4.4. Μαθηματικό υπόβαθρο υλοποίησης μετακινήσεων & περιστροφών αντικειμένου

Η μετατόπιση ενός σημείου και κατ' επέκταση ενός αντικειμένου ως προς τους τρεις άξονες μεταφοράς καθώς και η περιστροφή του ως προς τους άξονες περιστροφής  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ , υλοποιήθηκαν με χρήση πινάκων μετασχηματισμών<sup>[50]</sup>. Σημειώνεται ότι:

- Κάθε σημείο του χώρου θα περιγράφεται από ένα  $4 \times 1$  διάνυσμα  $(x, y, z, w)^T$  πραγματικών αριθμών με  $w \neq 0$ , δηλαδή με τετράδες ομογενών συντεταγμένων. Δύο τετράδες ομογενών συντεταγμένων παριστάνουν το ίδιο σημείο εάν η μία μεταφέρεται στην άλλη με τη βοήθεια ενός πολλαπλασιασμού με έναν παράγοντα διάφορο του μηδενός, δηλαδή  $(x, y, z, w)^T$  και  $(tx, ty, tz, tw)^T$  με  $t \neq 0$  παριστάνουν το ίδιο σημείο, με βασική παράσταση  $(x/w, y/w, z/w, 1)^T$ .
- Θα χρησιμοποιηθεί το δεξιόστροφο τριδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, δηλαδή το σύστημα X-Y-Z ακολουθεί τον κανόνα του δεξιόστροφου κοκλίου.
- Ως θετική στροφή νοείται η στροφή που είναι αντίθετη της κίνησης των δεικτών του ρολογιού, δηλαδή η μαθηματική θετική στροφή.

Στη συνέχεια γίνεται η παρουσίαση των πινάκων μετασχηματισμού που θα χρησιμοποιηθούν. Σημειώνεται ότι οι πίνακες που θα παρουσιασθούν εφαρμόζονται από δεξιά προς τα αριστερά, δηλαδή κατά τον μετασχηματισμό  $A_3 \cdot A_2 \cdot A_1$ , θα εφαρμοστεί πρώτος ο μετασχηματισμός  $A_1$ , μετά ο μετασχηματισμός  $A_2$  και τέλος ο μετασχηματισμός  $A_3$ .

##### a) Μεταφορά σημείου

Η μεταφορά του σημείου  $\bar{P} \in \mathbb{R}^3$  με ομογενείς συντεταγμένες  $(x/w, y/w, z/w, 1)^T$  κατά το διάνυσμα  $\vec{d}$  με καρτεσιανές συντεταγμένες  $(d_x, d_y, d_z)^T$  επιτυγχάνεται με τον πίνακα

$$T(\vec{d}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Έτσι το σημείο  $\bar{P}$  μεταφέρεται στη θέση  $\bar{P}' = (x+d_x, y+d_y, z+d_z, 1)^T$  επειδή

$$T(\vec{d}) \cdot [x, y, z, 1]^T = [x+d_x, y+d_y, z+d_z, 1]^T$$

##### b) Περιστροφή σημείου

Οι πίνακες  $R_x$ ,  $R_y$  και  $R_z$  για στροφές γύρω από τους άξονες X, Y, και Z αντίστοιχα ορίζονται ως εξής:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Υπενθυμίζεται ότι για τις περιστροφές αυτές το σημείο αναφοράς είναι η αρχή των αξόνων  $(0,0,0,1)^T$ . Σε περίπτωση που απαιτείται περιστροφή ως προς άξονα  $R$ , ο οποίος είναι παράλληλος με έναν εκ των  $X, Y, Z$  (έστω με τον άξονα  $X$ ) και βρίσκεται σε απόσταση που καθορίζεται από το διάνυσμα  $\vec{v}$ , θα πρέπει πρώτα να ταυτιστεί ο άξονας  $R$  με τον άξονα  $X$ . Τα ακόλουθα βήματα που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του ζητούμενου πίνακα μετασχηματισμού είναι:

1. Μεταφορά του  $R$  κατά διάνυσμα  $-\vec{v}$  ώστε να συμπίσει με τον άξονα των  $X$ . Βασικός πίνακας μετασχηματισμού:  $T(-\vec{v})$
2. Στροφή ως προς τον άξονα των  $X$  κατά γωνία  $\theta$ . Βασικός πίνακας μετασχηματισμού:  $R_x(\theta)$
3. Επαναφορά του  $R$  στην αρχική του θέση μεταφέροντάς τον κατά διάνυσμα  $\vec{v}$ . Βασικός πίνακας μετασχηματισμού:  $T(\vec{v})$

Ο ζητούμενος μετασχηματισμός  $M$  προκύπτει ως σύνθεση των παραπάνω βασικών μετασχηματισμών:

$$M = T(\vec{v}) \cdot R_x(\theta) \cdot T(-\vec{v})$$

Οι άνωθεν πίνακες μετασχηματισμού υλοποιούνται με χρήση της συνάρτησης **makehgtform** του περιβάλλοντος Matlab. Συγκεκριμένα:

- $M = \text{makehgtform}('translate', [tx \ ty \ tz])$ , επιστρέφει έναν πίνακα μετασχηματισμού  $M$  ο οποίος πραγματοποιεί μετακίνηση ως προς τον  $x$ -άξονα κατά  $tx$ , ως προς τον  $y$ -άξονα κατά  $ty$  και ως προς τον  $z$ -άξονα κατά  $tz$ .
- $M = \text{makehgtform}('xrotate', t)$ , επιστρέφει έναν πίνακα μετασχηματισμού  $M$  ο οποίος πραγματοποιεί περιστροφή γύρω από τον  $x$ -άξονα κατά  $t$  radians.
- $M = \text{makehgtform}('yrotate', t)$ , επιστρέφει έναν πίνακα μετασχηματισμού  $M$  ο οποίος πραγματοποιεί περιστροφή γύρω από τον  $y$ -άξονα κατά  $t$  radians.
- $M = \text{makehgtform}('zrotate', t)$ , επιστρέφει έναν πίνακα μετασχηματισμού  $M$  ο οποίος πραγματοποιεί περιστροφή γύρω από τον  $z$ -άξονα κατά  $t$  radians.

#### 5.4.5. Μετακινήσεις και περιστροφές του εικονικού ήλου

Όπως έχει γίνει φανερό, η μοντελοποίηση του ακτινογραφικού συστήματος που αναπτύχθηκε αποτελεί το δυικό σύστημα του πραγματικού προβλήματος, δηλαδή το ακτινογραφικό σύστημα πηγής φωτός και επιπέδου προβολής διατηρείται σταθερό και ο ήλος μετακινείται και περιστρέφεται ελεύθερα, ενώ στην πραγματικότητα το ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm είναι το στοιχείο της διάταξης που υπόκειται σε μετακινήσεις και περιστροφές.

Σε προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε μία πρόταση συγκεκριμένων τρόπων μετακίνησης του C-arm, έτσι ώστε να βρεθεί στην επιθυμητή θέση όπου οι προβολές των οπών του ήλου εμφανίζονται στην ακτινογραφική εικόνα ως τέλειοι κύκλοι.

Εφόσον στο εικονικό μοντέλο ο ήλος είναι το στοιχείο της διάταξης που υπόκειται σε μετακινήσεις, οι κινήσεις που προτάθηκαν για την μετακίνηση του C-arm θα εφαρμοστούν στο εικονικό μοντέλο του ήλου *σε αντίστροφη σειρά*. Συγκεκριμένα:

- ➔ Ο ήλος σχεδιάζεται αρχικά στην θέση αναφοράς, όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως, δηλαδή το βαρύκεντρο του θαλάμου της πρώτης οπής ταυτίζεται με το σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$  και ο διαμήκης άξονάς του ταυτίζεται με τον άξονα  $xOx'$ .
- ➔ Στον ήλο εφαρμόζεται μία διαδοχική σειρά κινήσεων ίδιες με αυτές που μπορεί να εκτελέσει το ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm, οπότε παράγεται τελικά ένα τυχαίο στιγμιότυπό του στο χώρο.
- ➔ Εάν αναγνωριστεί το εν λόγω τυχαίο στιγμιότυπο σε ένα πραγματικό πρόβλημα, τότε ένα ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm μπορεί να εκτελέσει τις συγκεκριμένες μετακινήσεις και περιστροφές, σε αντίστροφη σειρά, και τελικά να έρθει σε τέτοια θέση όπου οι οπές του ήλου εμφανίζονται στην ακτινογραφική εικόνα ως τέλειοι κύκλοι.

Για το ακτινογραφικό σύστημα λαμβάνονται οι εξής παραδοχές:

- Ο άξονας των  $X$  θεωρείται ο οριζόντιος άξονας περιστροφής “cross-arm” του C-arm.
- Ο άξονας των  $Y$  θεωρείται ο άξονας γωνιακής περιστροφής του C-arm, δηλαδή ο άξονας που είναι κάθετος στο επίπεδο “C” του βραχίονα.
- Οι προαναφερθέντες άξονες τέμνονται στο σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$ , το οποίο έχει οριστεί ως σημείο αναφοράς.
- Ο κατακόρυφος άξονας περιστροφής, ο οποίος προσομοιώνει την περιστροφή “wig-wag” είναι ένας άξονας παράλληλος στον άξονα των  $Z$ , και διέρχεται από τον άξονα των  $X$  σε δεδομένη απόσταση από το κέντρο  $(0,0,0)$ , η οποία καθορίζεται από τις προδιαγραφές του C-arm.
- Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η πηγή φωτός είναι στο σημείο  $(0,0,z_s)$  και το επίπεδο προβολής έχει εξίσωση  $z=z_p$ , με  $z_p < 0 < z_s$ .



Στον ήλο εφαρμόζονται οι εξής μετασχηματισμοί:

1. Ο ήλος σχεδιάζεται στην αρχική θέση αναφοράς, όπου η πρώτη οπής του ήλου εμφανίζεται στο ακτινογραφικό επίπεδο προβολής ως τέλειος κύκλος.
2. Εφαρμόζεται πρώτα (τυχαία) περιστροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $zOz'$ , ο οποίος ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του θαλάμου της πρώτης οπής. Η περιστροφή αυτή προφανώς δεν επηρεάζει την προβολή της πρώτης οπής στην ακτινογραφική επιφάνεια και δεν αντιστοιχεί, εν γένει, σε κάποια κίνηση του C-arm. Εφαρμόζεται για να εξασφαλίσει την τυχαιότητα της τοποθεσίας της δεύτερης οπής στο χώρο, στην περίπτωση που ο ήλος βρίσκεται σε κάποια επιθυμητή θέση αναφοράς.

Υπενθυμίζεται ότι οι επιθυμητές θέσεις αναφοράς είναι όλες οι θέσεις τοποθέτησης του ήλου όπου το βαρύκεντρο του πρώτου θαλάμου ταυτίζεται με το κέντρο  $(0,0,0)$  και ο άξονας συμμετρίας του θαλάμου τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής. Η θέση της δεύτερης οπής έχει ενδιαφέρον μόνο για την διαδικασία αναγνώρισης του προτύπου της βάσης δεδομένων σε σύγκριση με το πραγματικό στιγμιότυπο, καθώς οι μετακινήσεις και περιστροφές του ήλου γίνονται με γνώμονα την πρώτη οπή.

3. Εφαρμόζεται περιστροφή γύρω από τον άξονα  $yOy'$ . Η περιστροφή αυτή αντιστοιχεί στην γωνιακή περιστροφή του βραχίονα του C-arm. Η γωνιακή περιστροφή, όπως έχει παρουσιαστεί, δεν επηρεάζει κανέναν από τους υπόλοιπους άξονες περιστροφής ή μετακίνησης και για αυτό το λόγο εφαρμόζεται πρώτη στο μοντέλο του ήλου και, κατά συνέπεια, θα είναι η τελευταία περιστροφή του πραγματικού C-arm που θα πραγματοποιηθεί για την τελική τοποθέτησή του.
4. Εφαρμόζεται περιστροφή γύρω από τον άξονα  $xOx'$ . Η περιστροφή αυτή αντιστοιχεί στην περιστροφή του βραχίονα του C-arm γύρω από τον οριζόντιο άξονα περιστροφής. Η κίνηση αυτή περιστρέφει και τον άξονα γωνιακής περιστροφής, ωστόσο η περιστροφή αυτή έχει ήδη εφαρμοσθεί στον εικονικό ήλο.

Στο σημείο αυτό, το βαρύκεντρο του θαλάμου της πρώτης οπής εξακολουθεί να βρίσκεται στο σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$ .

5. Στη συνέχεια το βαρύκεντρο απομακρύνεται από το σημείο  $(0,0,0)$  με χρήση κυλινδρικών μετακινήσεων και περιστροφών. Στην αρχή εφαρμόζεται μετακίνηση (translation) ως προς τους άξονες  $x$  και  $z$  του χώρου. Οι μετακινήσεις αυτές αντιστοιχούν στην μηχανοκίνητη οριζόντια και κατακόρυφη, αντίστοιχα, κίνηση του βραχίονα του C-arm η οποία πραγματοποιείται για να φέρει το βαρύκεντρο της οπής του ήλου στην επιθυμητή θέση.

Οι μετακινήσεις αυτές επηρεάζουν τον οριζόντιο και γωνιακό άξονα περιστροφής, ωστόσο οι αντίστοιχες περιστροφές έχουν ήδη εφαρμοσθεί στο εικονικό μοντέλο.

6. Τέλος, εφαρμόζεται περιστροφή ως προς κατακόρυφο άξονα, παράλληλο στον άξονα  $zOz'$  και ο οποίος τέμνει κάθετα τον οριζόντιο άξονα περιστροφής στο σημείο  $(x_w,0,0)$ . Ο άξονας αυτός μοντελοποιεί τον κατακόρυφο άξονα όπου στηρίζεται ο βραχίονας του C-arm στη βασική διάταξη και η κίνηση αυτή είναι εμφανώς η μοντελοποίηση της “wig-wag” κίνησης, η οποία και είναι η πρώτη που εφαρμόζεται στο C-arm για την σωστή τοποθέτηση της θέσης του ήλου στο χώρο.

Η περιστροφή “wig-wag” περιστρέφει όλους τους άξονες των προαναφερθέντων κινήσεων, ωστόσο ο άξονας της εν λόγω περιστροφής δεν επηρεάζεται από άλλες μετακινήσεις ή περιστροφές, και για αυτό το λόγο εφαρμόζεται τελευταίος.

Θεωρείται ότι δεν θα χρειαστούν άλλες μετακινήσεις του ακτινογραφικού μηχανήματος με χρήση των τροχών, καθώς η εμπειρική πρώτη τοποθέτησή του θα είναι σε τέτοια θέση που οι περιορισμένες προαναφερθείσες κινήσεις αρκούν για να έρθει ο βραχίονας του C-arm στην επιθυμητή θέση.

Μετά την αναγνώριση του προτύπου της βάσης δεδομένων που αντιστοιχεί στο πραγματικό πρόβλημα, οι μετακινήσεις και περιστροφές του βραχίονα του C-arm θα πραγματοποιηθούν με την αντίθετη σειρά από την οποία εφαρμόστηκαν στο εικονικό μοντέλο του ήλου.

Συνοπτικά, οι παράμετροι που απαιτούνται για την παραγωγή στιγμιότυπων είναι η εξής:

- $\theta_z$  - Αρχική περιστροφή ως προς τον άξονα  $zOz'$  του πρώτου θαλάμου για τυχαία τοποθέτηση της δεύτερης οπής στο χώρο. Δεν αποτελεί κίνηση του C-arm και παράγει μία ισοδύναμη επιθυμητή θέση. Πραγματοποιείται ώστε να καλύπτονται όλες οι περιπτώσεις των επιθυμητών θέσεων του ήλου. Πίνακας μετασχηματισμού  $R_z(\theta_z)$  .
- $\theta_{orb}$  - Γωνιακή περιστροφή του C-arm - Περιστροφή ως προς τον άξονα  $yOy'$ . Πίνακας μετασχηματισμού  $R_y(\theta_{orb})$  .
- $\theta_{rad}$  - Ακτινική περιστροφή του C-arm - Περιστροφή ως προς τον άξονα  $xOx'$ . Πίνακας μετασχηματισμού  $R_x(\theta_{rad})$  .
- $x_{off}$  - Μηχανοκίνητη οριζόντια μετακίνηση του βραχίονα, ως προς τον άξονα  $xOx'$ .  $T([x_{off}, 0, 0])$
- $z_{off}$  - Μηχανοκίνητη κατακόρυφη μετακίνηση του βραχίονα, ως προς τον άξονα  $zOz'$ . Πίνακας μετασχηματισμού  $T([0, 0, z_{off}])$  . Πολλαπλασιάζοντας τον πίνακα αυτό με τον πίνακα της οριζόντιας μετακίνησης, προκύπτει ο πίνακας μετασχηματισμού  $T([x_{off}, 0, z_{off}])$  .
- $x_w$  - Απόσταση του κατακόρυφου άξονα περιστροφής της “wig-wag” κίνησης από το κέντρο  $(0,0,0)$ . Ο άξονας είναι παράλληλος στον  $zOz'$  και διέρχεται από το  $(x_w, 0, 0)$ .
- $\theta_{wig}$  - Γωνία περιστροφής ως προς τον παραπάνω άξονα. Μοντελοποιεί την “wig-wag” περιστροφική κίνηση του C-arm. Εφόσον ο άξονας δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων  $(0,0,0)$ , ακολουθώντας την μαθηματική μέθοδο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο πίνακας μετασχηματισμού προκύπτει  $T([x_w, 0, 0]) \cdot R_z(\theta_{wig}) \cdot T([-x_w, 0, 0])$

Ο τελικός πίνακας μετασχηματισμού προκύπτει:

$$M = T([x_w, 0, 0]) \cdot R_z(\theta_{wig}) \cdot T([-x_w, 0, 0]) \cdot T([x_{off}, 0, z_{off}]) \cdot R_x(\theta_{rad}) \cdot R_y(\theta_{orb}) \cdot R_z(\theta_z)$$

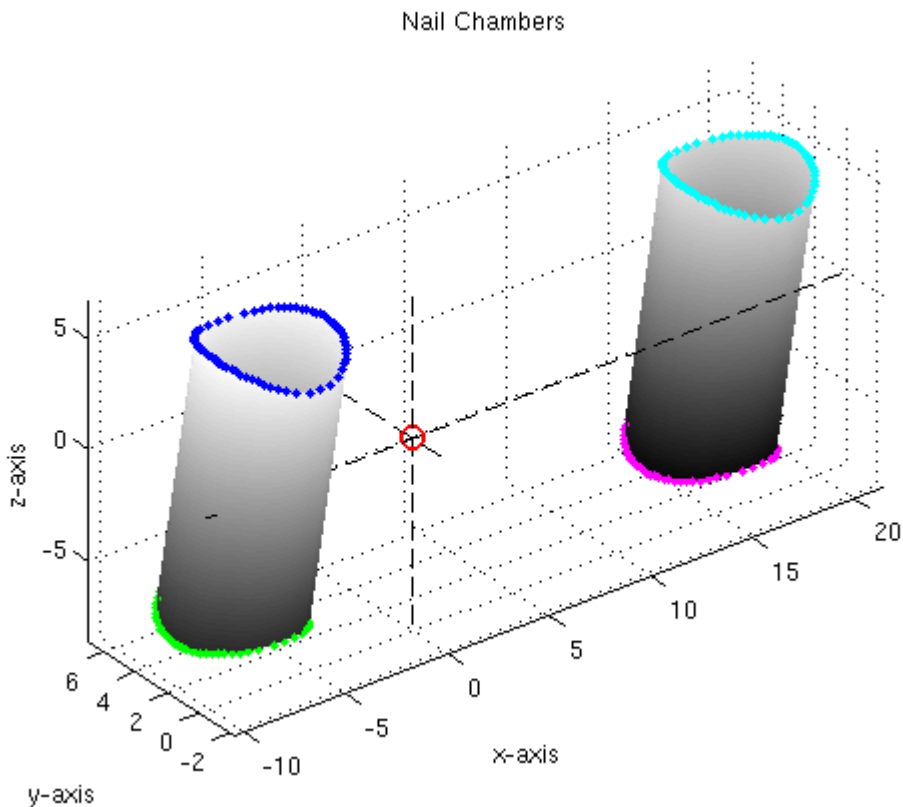
Ο πίνακας αυτός εφαρμόζεται στις συντεταγμένες του αρχικού στιγμιότυπου και προκύπτει το τελικό στιγμιότυπο του ήλου στον χώρο.

## 5.5. Προβολή τμήματος του ήλου για την παραγωγή της αναγκαίας εικόνας και ψηφιοποίηση της εικόνας αυτής

Το εικονικό μοντέλο του ακτινογραφικού συστήματος, το οποίο κατασκευάστηκε σύμφωνα με την μέθοδο που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, διαθέτει την δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής στο χώρο ως προς τους τρεις άξονες, αλλά με τρόπο που είναι σύμφωνος με τις συνήθεις δυνατότητες μετακινήσεων των σύγχρονων C-arm. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στην καλύτερη ανταπόκριση του μοντέλου με το πραγματικό πρόβλημα της εγχειρητικής διαδικασίας, καθώς μπορεί να δημιουργηθεί ένα οποιοδήποτε στιγμιότυπο του ήλου στο χώρο.

Από το μοντέλο απομονώνεται οι θάλαμοι όπου θα εισέλθουν οι κοχλίες κλειδώματος του ήλου, οι οποίοι περιγράφονται ως προς τους τρεις άξονες του χώρου και αποτελούν το τμήμα του ήλου που θα προβληθεί στην επιφάνεια προβολής.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι θάλαμοι του ήλου σε μία τυχαία θέση στο χώρο:



Σχήμα 5.45: Τυχαίο στιγμιότυπο των θαλάμων του ήλου

Οι παράμετροι μετακινήσεων και περιστροφών είναι οι εξής:

Γωνιακή περιστροφή	15°	Οριζόντια μετακίνηση	-7 mm	Wig-wag περιστροφή	-0.1°
Ακτινική περιστροφή	5°	Κατακόρυφη μετακίνηση	0	Περιστροφή 2 <sup>ης</sup> οπής γύρω από Oz	5°

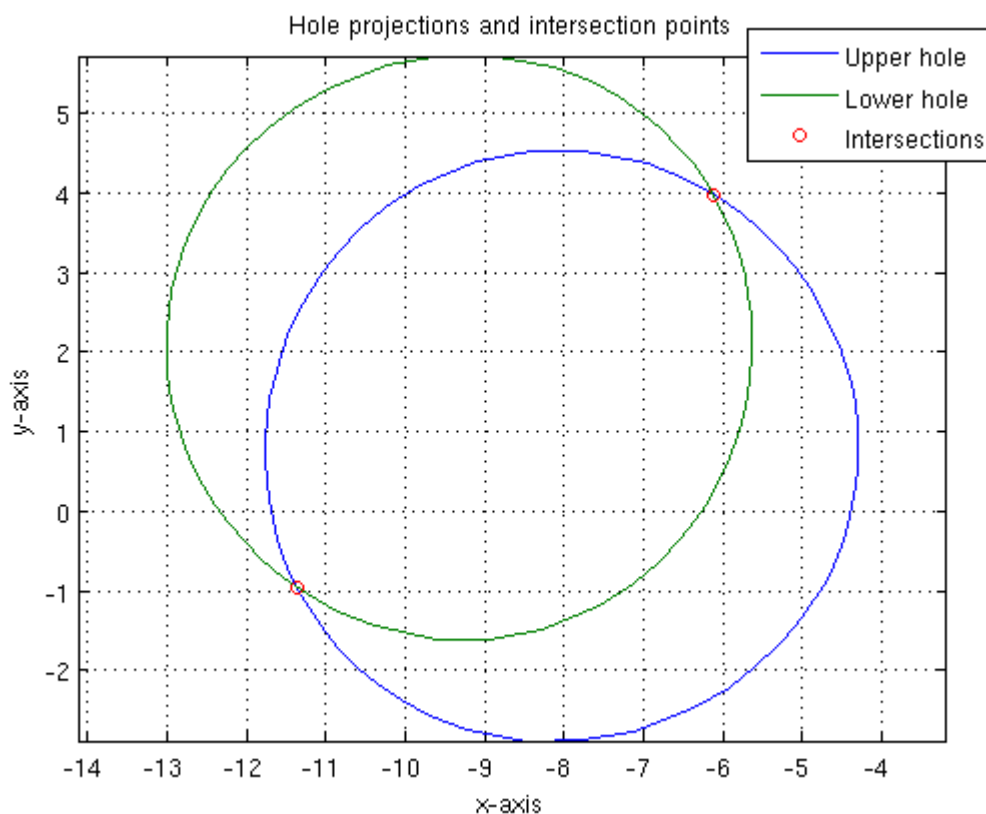
Ο άξονας περιστροφής της wig-wag κίνησης απέχει 660mm από το  $(0,0,0)$ , δηλαδή διέρχεται από το  $(660,0,0)$ , η πηγή απέχει 1m από το επίπεδο  $xOy$ , ενώ το επίπεδο προβολής είναι σε βάθος -240mm.

Λόγω της δυνατότητας μετακινήσεων και περιστροφών του θαλάμου, είναι δυνατή η λήψη οποιουδήποτε στιγμιότυπου των θαλάμων και, κατ' επέκταση, του ήλου στο χώρο. Εν συνεχεία, από τους δύο θαλάμους του ήλου απομονώνονται τα περιγράμματα των δύο οπών τους, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση της διαδικασίας απεικόνισης του πρώτου θαλάμου, ωστόσο η ίδια διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για την εξαγωγή της απεικόνισης και του δεύτερου θαλάμου.

Όπως έχει αναφερθεί, το σύστημα φωτισμού των ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm μπορεί να μοντελοποιηθεί από το μοντέλο συντρεχουσών ακτίνων με κοινό σημείο φυγής. Με αυτό το δεδομένο, η προβολή ενός σημείου στο επίπεδο προβολής εξάγεται με εφαρμογή του αλγορίθμου κωνικής προβολής ο οποίος έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα.

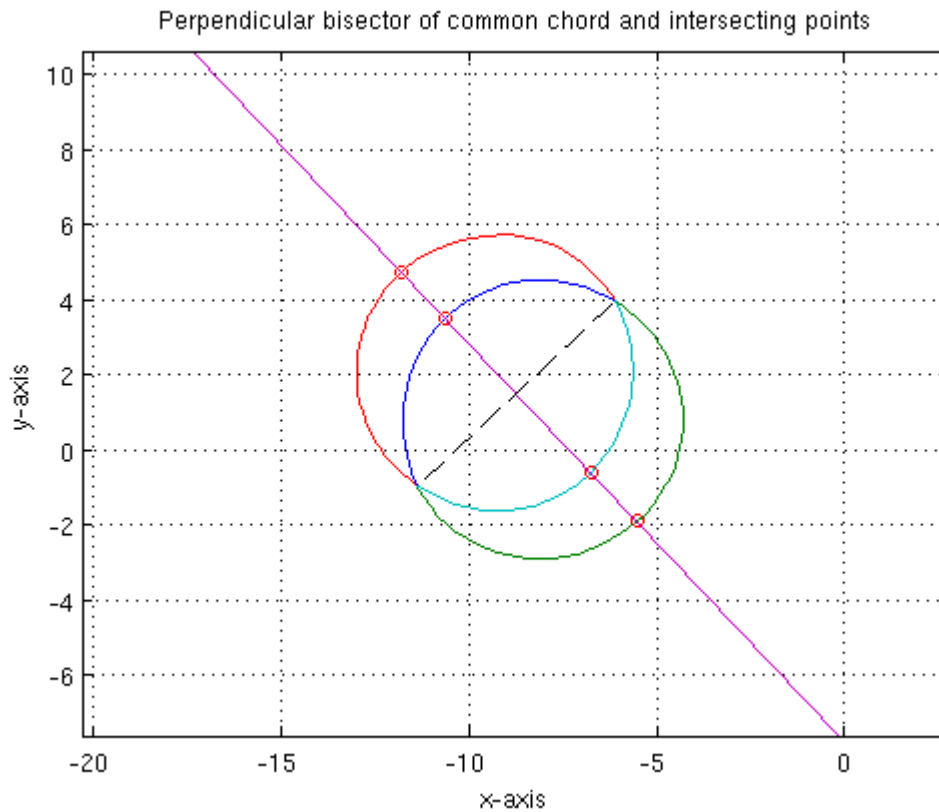
Έχοντας απομονώσει τα περιγράμματα των δύο οπών του ενός θαλάμου του ήλου, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της κωνικής προβολής και λαμβάνεται η προβολή των περιγραμμάτων στο επίπεδο προβολής, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.46: Κωνικές προβολές των περιγραμμάτων του θαλάμου και σημεία τομής τους

Με χρήση αλγορίθμου εντοπισμού σημείων τομής καμπύλων λαμβάνονται τα σημεία στα οποία οι εν λόγω προβολές τέμνονται μεταξύ τους. Εφόσον οι καμπύλες προκύπτουν από κωνικές προβολές κύκλων, θα είναι στην γενική μορφή τους ελλειψοειδής και κατά συνέπεια κυρτές καμπύλες, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τελικά κανένα, ένα (1) ή δύο (2) σημεία τομής των εν λόγω προβολών. Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε ότι οι δύο προβολές έχουν δύο σημεία τομής, ενώ οι υπόλοιπες περιπτώσεις θα καλυφθούν στην συνέχεια.

Έχοντας ως δεδομένα τα δύο σημεία τομής των δύο κλειστών καμπύλων, λαμβάνονται πλέον τέσσερις (4) διαφορετικές καμπύλες και αναζητούνται εξ' αυτών οι δύο καμπύλες οι οποίες οριοθετούν την κοινή κλειστή επιφάνεια των δύο προβολών. Η διαδικασία εντοπισμού των δύο καμπύλων που οριοθετούν την κοινή κλειστή επιφάνεια παρουσιάζεται εποπτικά στο επόμενο σχήμα.



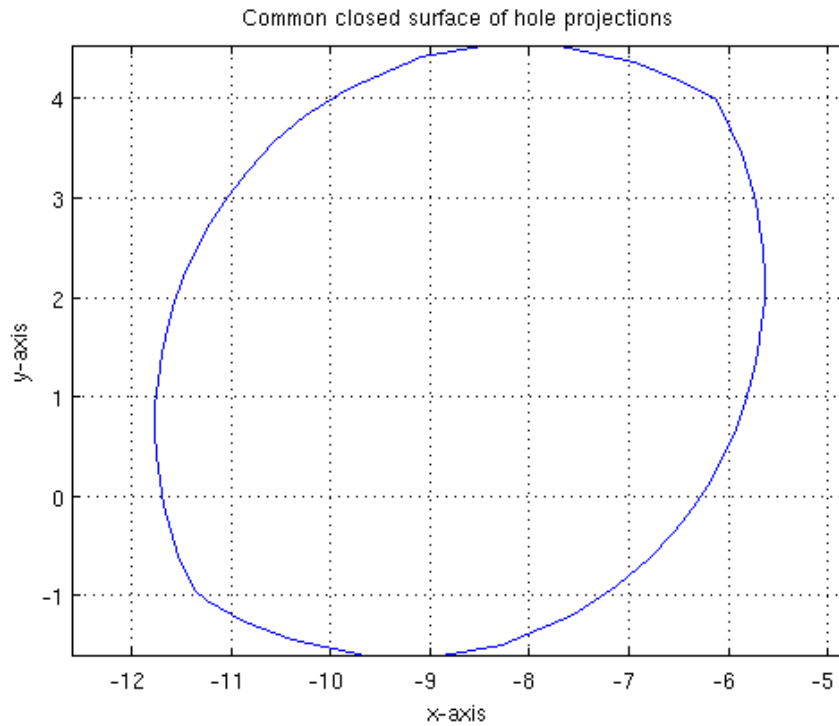
Σχήμα 5.47: Μεσοκάθετη ευθεία κοινής χορδής και σημεία τομής

Όπως γίνεται εμφανές, για τον εντοπισμό των δύο καμπύλων οι οποίες οριοθετούν την κοινή κλειστή επιφάνεια θα αξιοποιηθεί μία απλή γεωμετρική ιδιότητα και συγκεκριμένα η γεωμετρική διάταξή τους στο χώρο. Πιο αναλυτικά, αρχικά ορίζεται και σχεδιάζεται η μεσοκάθετος της κοινής χορδής των προβολών των δύο περιγραμμάτων.

Στη συνέχεια λαμβάνονται τα τέσσερα σημεία τομής της μεσοκαθέτου με τις προβολές των δύο περιγραμμάτων. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται το μοναδικό σημείο τομής της μεσοκαθέτου με κάθε μία από τις τέσσερις διαφορετικές καμπύλες που προκύπτουν, μετά την τομή των δύο περιγραμμάτων.

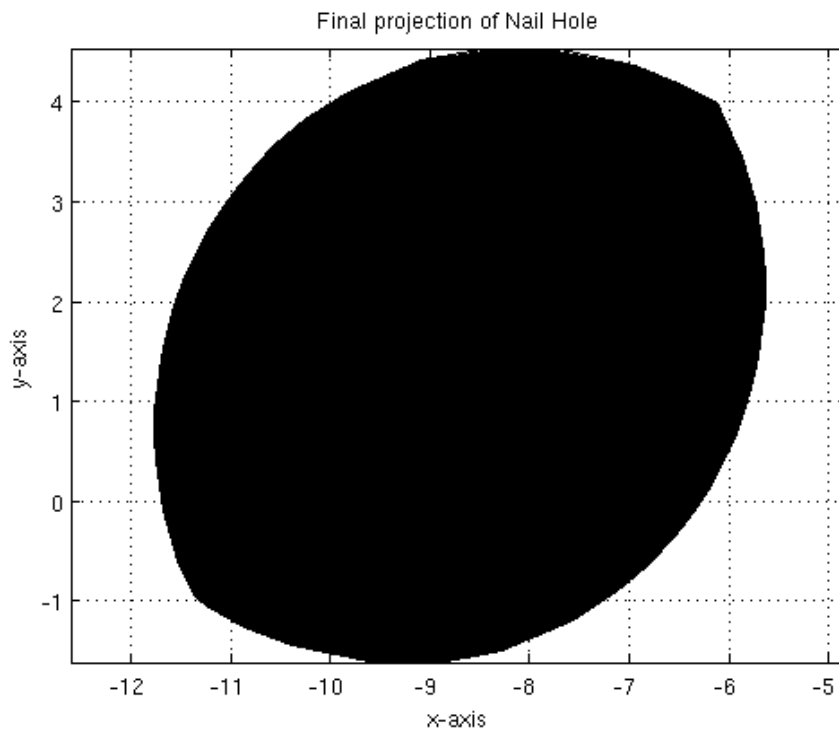
Τα σημεία τομής της μεσοκαθέτου με τις καμπύλες διατάσσονται κατά αύξουσα τετμημένη (συντεταγμένη στον x-άξονα) ή τεταγμένη (συντεταγμένη στον y-άξονα), σε περίπτωση που η μεσοκάθετος προκύψει παράλληλη στον y-άξονα. Γίνεται εμφανές ότι τα δύο “εσωτερικά” σημεία, δηλαδή το δεύτερο και το τρίτο από την διατεταγμένη τετράδα, ανήκουν στις δύο καμπύλες που οριοθετούν την κλειστή κοινή επιφάνεια των δύο περιγραμμάτων και κατά συνέπεια γίνεται πλέον η ταυτοποίηση των δύο ζητούμενων καμπύλων.

Έχοντας απομονώσει τις δύο ζητούμενες καμπύλες, προκύπτει η κοινή κλειστή επιφάνεια των δύο περιγραμμάτων.



Σχήμα 5.48: Κοινή κλειστή επιφάνεια των προβολών των δύο οπών του ίδιου θαλάμου

Και με χρήση της συνάρτησης γεμίματος διδιάστατων πολυγώνων *fill* του περιβάλλοντος Matlab, χρωματίζεται η κοινή κλειστή επιφάνεια και εξάγεται το τελικό πρότυπο της οπής.

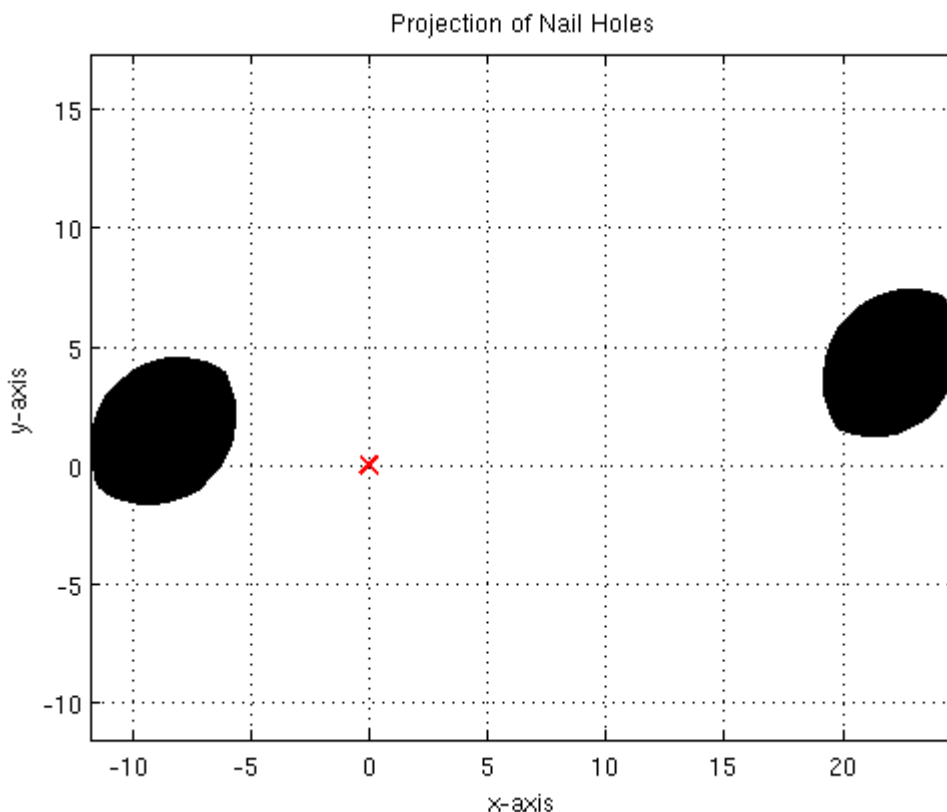


Σχήμα 5.49: Τελική προβολή οπής ήλου

Η εικόνα αυτή αποτελεί την εικόνα της οπής, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο του ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm για την δεδομένη θέση του ήλου στο χώρο, με δεδομένο ότι η πηγή ακτίνων X του C-arm εκπέμπει ακτίνες με κωνικό τρόπο και με τέτοιο τρόπο που οι ακτίνες παρουσιάζουν κοινό σημείο φυγής.

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι στην περίπτωση που οι προβολές των δύο περιγραμμάτων δεν παρουσιάζουν σημεία τομής ή παρουσιάζουν ακριβώς ένα (εφάπτονται), τότε είτε δεν θα παρουσιάζουν κοινή κλειστή επιφάνεια είτε ο ένας θα εμπεριέχεται πλήρως μέσα στον άλλο. Με απλή σύγκριση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών των συντεταγμένων τους μπορεί να εξαχθεί εύκολα ποια από τις δύο περιπτώσεις έχει προκύψει.

Η διαδικασία η οποία παρουσιάστηκε ακολουθήθηκε για μία οπή του ήλου. Εφόσον το βελτιωμένο εικονικό μοντέλο του ήλου διαθέτει δύο οπές, είναι δυνατή η επανάληψη της διαδικασίας και για την δεύτερη οπή, έτσι ώστε να εξαχθεί η συνδυασμένη προβολή των δύο οπών. Με τον τρόπο αυτό, αφενός το εξαχθέν πρότυπο ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα και αφετέρου βελτιώνεται η ικανότητα διαχωρισμού διαφορετικών μεταξύ τους προτύπων, τα οποία φαινομενικά θα ήταν πανομοιότυπα χωρίς την γνώση της προβολής της δεύτερης οπής.



Σχήμα 5.50: Τελικό ακτινογραφικό στιγμιότυπο των δύο οπών του ήλου

Ο κώδικας σε περιβάλλον Matlab, με τον οποίο υλοποιούνται οι διεργασίες που περιγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο, δεν παρατίθεται λόγω του μεγάλου όγκου σε έντυπο κείμενο (περίπου 3500 γραμμές κώδικα). Ωστόσο, είναι διαθέσιμος για τον ενδιαφερόμενο αναγνώστη.

# Κεφάλαιο 6

## Εναλλακτική μέθοδος λύσης του προβλήματος στην περίπτωση που ο ήλος παριστάνεται στον υπολογιστή ως σύνολο τριγώνων

### 6.1. Επισκόπηση wire-frame μοντέλου

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε η προτεινόμενη μοντελοποίηση του ενδομυελικού ήλου με χρήση wire-frame μοντέλου (“συρμάτων”). Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω<sup>[51]</sup>:

- Το σχήμα ενός αντικειμένου ορίζεται από ένα σύνολο σημείων (κορυφές) και ένα σύνολο ακμών.
- Οι ακμές, είτε ευθείες γραμμές είτε καμπυλόγραμμες, συνδέουν ζευγάρια σημείων.

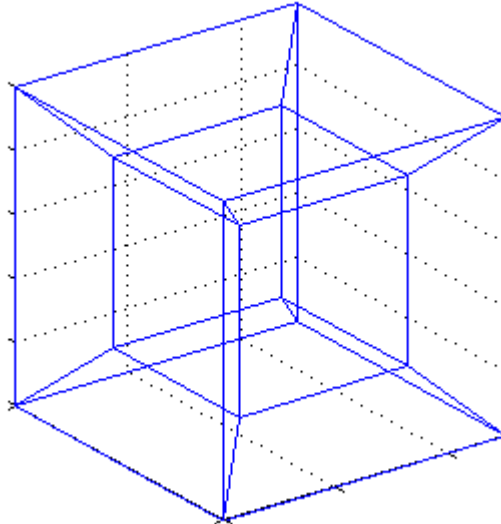
Η εν λόγω μέθοδος μοντελοποίησης επιλέχθηκε καθώς προσφέρονται τα εξής πλεονεκτήματα:

- ✓ Ευκολία κατασκευής
- ✓ Οικονομία χρόνου και απαιτήσεων μνήμης
- ✓ Δυνατότητα μοντελοποίησης στερεών αντικειμένων
- ✓ Συχνή χρήση για προεπισκόπηση αντικειμένων σε ένα διαδραστικό περιβάλλον

Ωστόσο παρουσιάζονται και τα εξής μειονεκτήματα:

- x Η αναπαράσταση τείνει να μην είναι ρεαλιστική.
- x Ασάφεια σχημάτων. Τα πολύπλοκα μοντέλα παρουσιάζουν συνήθως δυσκολία στην ερμηνεία τους από τον άνθρωπο.
- x Συνήθως δεν είναι δυνατή η χρήση εργαλείων φωτορεαλιστικής απεικόνισης (photo realistic rendering).
- x Απουσία δυνατότητας υπολογιστικού προσδιορισμού πληροφορίας που σχετίζεται με ιδιότητες μάζας (όπως όγκος, μάζα, αδράνεια, κτλ) και της τομής μεταξύ δύο όψεων που ανήκουν σε μοντέλα που επικαλύπτονται.
- x Δεν υπάρχει βεβαιότητα ότι ο ορισμός του μοντέλου είναι σωστός, υπολογίσιμος ή κατασκευάσιμος.





Σχήμα 6.1: Παράδειγμα wire-frame μοντέλου που επιδέχεται πολλαπλές ερμηνείες

## 6.2. Επισκόπηση μοντελοποίησης με επιφάνειες - πολύγωνα

Για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα wire-frame μοντέλα, αναπτύχθηκε μία εναλλακτική μοντελοποίηση αντικειμένων, η μοντελοποίηση με επιφάνειες (surface model). Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι τα εξής<sup>[51]</sup>:

- Επιφάνεια: περιοχή οριοθετημένη από αναγνωρίσιμη περίμετρο.
- Στα Γραφικά Υπολογιστών, είναι μία περιοχή μέσα στην οποία κάθε θέση ορίζεται μέσω μίας μαθηματικής μεθόδου.
- Αντιμετώπιση της ασάφειας σε ένα wire-frame μοντέλο.

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή και ως αναπαράσταση με χρήση πολυγώνων. Ένα παράδειγμα αυτής της μοντελοποίησης εικονίζεται παρακάτω<sup>[52]</sup>:



Σχήμα 6.2: Παράδειγμα μοντελοποίησης αντικειμένου με πολύγωνα

### 6.3. Πρόταση εναλλακτικής λύσης του προβλήματος

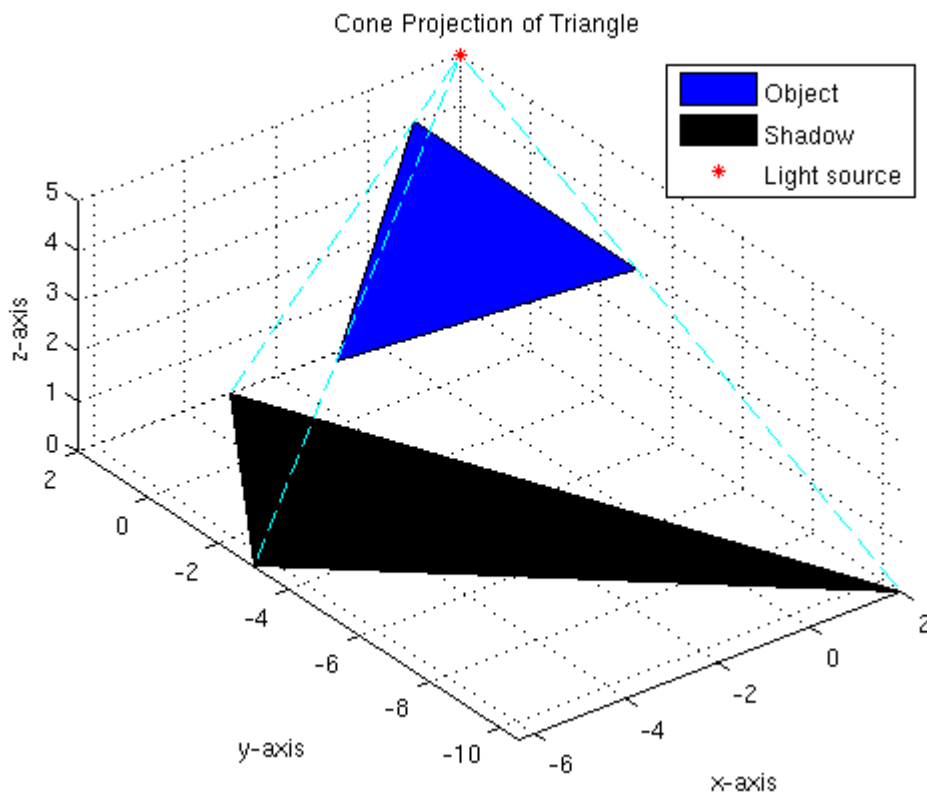
Η αναπαράσταση ενός αντικειμένου με πολύγωνα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως παρουσιάστηκε, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας εφαρμογής μοντέλων σκίασης. Καθώς τα πολύγωνα καθορίζονται οριοθετούνται πλήρως από την περίμετρό τους, καθίσταται δυνατός ο ορισμός μίας περιοχής από όπου δεν μπορούν να διέλθουν ακτίνες φωτός, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα μοντέλο σκίασης.

Πιο αναλυτικά, η εναλλακτική λύση ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Όλο το επίπεδο προβολής θεωρείται αρχικά “λευκό”.
2. Δημιουργία της αναπαράστασης του ήλου ως ένα σύνολο πολυγώνων και συγκεκριμένα τριγώνων, καθώς αποτελούν τα πιο απλά πολύγωνα και οποιοδήποτε πολύγωνο μπορεί να χωριστεί σε τρίγωνα.
3. Προεπεξεργασία των δεδομένων και δημιουργία ενός συνόλου τριγώνων. Κάθε τρίγωνο στον χώρο περιγράφεται πλήρως από τις συντεταγμένες των τριών κορυφών του.
4. Επιλέγεται ένα τρίγωνο και λαμβάνονται οι προβολές των τριών κορυφών του στο επίπεδο προβολής, με κέντρο όρασης την σημειακή πηγή φωτός.
5. Στο επίπεδο προβολής έχουν ορισθεί τρία σημεία, τα οποία οριοθετούν ένα τρίγωνο, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως η σκιά του αρχικού τριγώνου, ως προς την σημειακή πηγή φωτός. Κατά συνέπεια η περιοχή που οριοθετείται από τα σημεία αυτά μπορεί να σκιασθεί με “μαύρο” χρώμα, το οποίο αναπαριστά την σκιά του αρχικού τριγώνου.
6. Εκτελώντας τα βήματα (4) και (5) και με υπέρθεση των σκιών όλων των τριγώνων που απαρτίζουν το εικονικό μοντέλο του ήλου, προκύπτει τελικά η σκίαση του ήλου ως σύνολο στην επιφάνεια προβολής, ως προς την σημειακή πηγή φωτός.
7. Οι προβολές των οπών του ήλου εμφανίζονται στην επιφάνεια προβολής ως φωτεινές κλειστές επιφάνειες, καθώς δεν υπήρχε κάποια τριγωνική επιφάνεια στην ενδιάμεση απόσταση, ώστε να εμποδίσει την διέλευση των ακτίνων φωτός. Αυτές οι φωτεινές επιφάνειες απομονώνονται και δημιουργείται ένα πρότυπο.

Με την επαναληπτική εκτέλεση της διαδικασίας για διάφορες θέσεις του ήλου στον χώρο δημιουργείται τελικά μία βάση προτύπων.

Η σκίαση μιας τριγωνικής επιφάνειας παρουσιάζεται ενδεικτικά στην επόμενη εικόνα:



Σχήμα 6.3: Κωνική προβολή τριγώνου

Μία εικονική αναπαράσταση του ήλου μπορεί να εξαχθεί με χρήση τριδιάστατου χωρικού σαρωτή (3D scanner), ο οποίος ανακατασκευάζει το αντικείμενο με τριγωνικές επιφάνειες<sup>[53]</sup>.

Σημειώνεται ότι την παρούσα χρονική περίοδο (Ιούνιος 2011) ένας ενδομυελικός ήλος υποβάλλεται σε τριδιάστατη σάρωση στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο με σκοπό την εξαγωγή της τριδιάστατης αναπαράστασής του με χρήση τριγωνικών επιφανειών. Μετά την ολοκλήρωση της σάρωσης, θα γίνει η υλοποίηση της εναλλακτικής λύσης που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο σε μελλοντική εργασία από την ομάδα του εργαστηρίου (δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας).

Από την παραπάνω μελέτη προκύπτει ότι το πολυγωνικό μοντέλο είναι προτιμότερο για την τριδιάστατη αναπαράσταση αντικειμένων, καθώς η μοντελοποίηση γίνεται με σαφή και βέβαιο τρόπο, ενώ αντιμετωπίζεται με αποτελεσματικό τρόπο η ασάφεια που εμφανίζεται στα wire-frame μοντέλα. Υπό ειδικές συνθήκες, ωστόσο, είναι δυνατή η χρήση και των wire-frame μοντέλων για την αξιοποίηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων του προβλήματος, όπως στο παρόν πρόβλημα, όπου με χρήση του wire-frame μοντέλου εξάγεται το περίγραμμα των θαλάμων των οπών του ήλου. Τονίζεται επίσης ότι όταν δεν δίνεται από τον κατασκευαστή το πολυγωνικό μοντέλο του ήλου, παρά μόνον οι διαστάσεις του, τότε η επιβάλλεται η κατ' αρχήν μοντελοποίηση του ήλου με χρήση wire-frame και στη συνέχεια η εφαρμογή αλγορίθμων οι οποίοι χωρίζουν το μοντέλο σε τριγωνικές επιφάνειες.

# Κεφάλαιο 7

## Ενδεικτική παραγωγή βάσης προτύπων με χρήση των αναπτυχθέντων εργαλείων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν οι τεχνικές και οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί εύκολη και αποδοτική διαχείριση των αναπτυχθέντων εργαλείων με τελικό σκοπό την παραγωγή στιγμιότυπων και βάσεων προτύπων. Απώτερος στόχος είναι η χρήση των παραχθειςών βάσεων δεδομένων στην αναγνώριση στιγμιότυπων που προκύπτουν από πραγματικές εγχειρητικές διαδικασίες.

Πιο αναλυτικά, η γενική διαδικασία παραγωγής μιας βάσης προτύπων είναι η εξής:

- Ο ήλος σχεδιάζεται αρχικά στην θέση αναφοράς, δηλαδή το βαρύκεντρο του θαλάμου της πρώτης οπής ταυτίζεται με το σημείο αναφοράς  $(0,0,0)$  και ο άξονας συμμετρίας του θαλάμου να τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής. Στην γενικότερη περίπτωση μιας τυχούσας επιθυμητής θέσης, η δεύτερη οπή μπορεί να έχει οποιαδήποτε τοποθεσία στο χώρο.
- Στον ήλο εφαρμόζεται μία διαδοχική σειρά μετασχηματισμών, οπότε και παράγεται ένα τυχαίο στιγμιότυπό του στο χώρο. Οι μετασχηματισμοί αυτοί δεν είναι τυχαίοι, αλλά γίνονται με γνώμονα τις αντίστοιχες κινήσεις που μπορεί να εκτελέσει ένα ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm.
- Οι οπές του στιγμιότυπου προβάλλονται στο επίπεδο προβολής και δημιουργείται το αντίστοιχο πρότυπο.
- Επαναλαμβάνοντας την ανώτερη διαδικασία για διάφορες θέσεις του ήλου στο χώρο δημιουργείται τελικά μία βάση προτύπων.
- Κατά την διεξαγωγή μίας πραγματικής εγχειρητικής διαδικασίας, λαμβάνονται, με χρήση ακτινογραφικού μηχανήματος C-arm, ακτινογραφικές εικόνες των προβολών των οπών του ήλου στην ακτινογραφική επιφάνεια. Τα περιγράμματα των προβολών των δύο οπών δύναται να απομονωθούν και να προωθηθούν στην βάση προτύπων για αναγνώριση του προτύπου με το οποίο παρουσιάζεται το βέλτιστο ταίριασμα.
- Έπειτα, εξάγονται οι παράμετροι μετακίνησης και περιστροφής που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του επιλεχθέντος προτύπου και τελικά οι ίδιες κινήσεις εφαρμόζονται στο C-arm, με αντίστροφη σειρά, έτσι ώστε να έρθει στην επιθυμητή θέση όπου οι προβολές των οπών θα εμφανίζονται στην ακτινογραφική επιφάνεια ως τέλειοι κύκλοι.

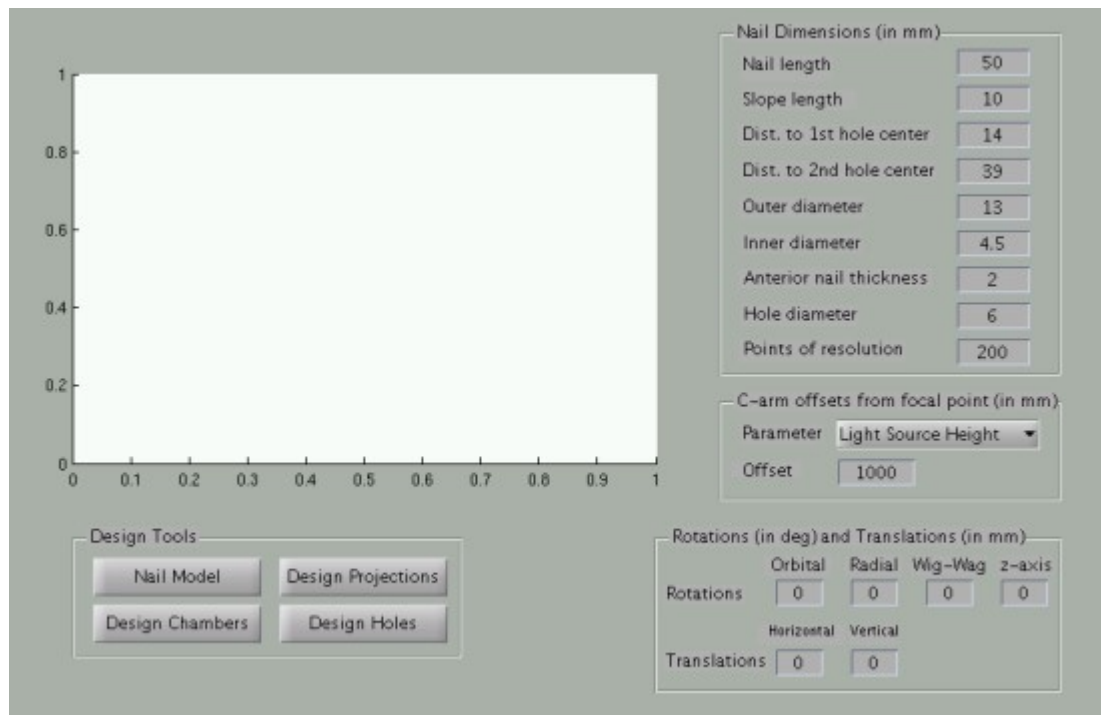
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν:

1. Ένα Γραφικό Περιβάλλον (GUI) παραγωγής εικονικών μοντέλων του ήλου καθώς και των αντίστοιχων στιγμιότυπων.
2. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα παραγωγής βάσης προτύπων.

## 7.1. Γραφικό Περιβάλλον διαχείρισης εικονικού μοντέλου του ήλου

Η υλοποίηση του εικονικού μοντέλου του ήλου και η παραγωγή προτύπων έγινε με χρήση συναρτήσεων (functions) και σεναρίων (scripts) του περιβάλλοντος Matlab. Ωστόσο, η διαχείριση των αναπτυχθέντων εργαλείων μέσω γραμμής εντολών και της επεξεργασίας αρχείων είναι χρονοβόρα και μη-φιλική στον μέσο χρήστη.

Για την εύκολη διαχείριση του εικονικού μοντέλου του ήλου, υλοποιήθηκε ένα γραφικό περιβάλλον (GUI) ως διεπαφή του χρήστη με το εργαλείο παραγωγής προτύπων, το οποίο παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 7.1: Το γραφικό περιβάλλον διαχείρισης του αναπτυχθέντος εργαλείου

Το γραφικό περιβάλλον διαθέτει τα εξής εργαλεία διαχείρισης:

1. Παραμετροποίηση διαστάσεων ήλου.
2. Παραμετροποίηση διαστάσεων C-arm.
3. Παράμετροι παραγωγής προτύπων.
4. Εργαλεία σχεδίασης εικονικού μοντέλου ήλου, προβολών και προτύπων.

Επίσης διαθέτει ειδικό χώρο όπου δύναται να σχεδιάζονται τριδιάστατα μοντέλα στο χώρο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα προαναφερθέντα εργαλεία διαχείρισης.

### 7.1.1. Παραμετροποίηση διαστάσεων ήλου

Στο πλαίσιο “Nail Dimensions (in mm)” διατίθενται κατάλληλες επιλογές οι οποίες μπορούν να παραμετροποιηθούν από τον χρήστη έτσι ώστε το εικονικό μοντέλο του ήλου να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης των ακόλουθων διαστάσεων του ήλου.

1. Μήκος ήλου, το οποίο μετράται από την μύτη του.
2. Οριζόντιο μήκος εμπρόσθιου κεκλιμένου τμήματος.
3. Απόσταση του κέντρου της πρώτης οπής από την μύτη του ήλου.
4. Απόσταση του κέντρου της δεύτερης οπής από την μύτη του ήλου.
5. Διάμετρος εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του ήλου.
6. Διάμετρος εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του ήλου.
7. Εμπρόσθιο πάχος ήλου. Το μέγεθος αυτό σε συνδυασμό με τα οριζόντιο μήκος του κεκλιμένου επιπέδου και τις διαμέτρους της εσωτερικής και εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του ήλου καθορίζουν πλήρως το κεκλιμένο επίπεδο στο εμπρόσθιο τμήμα του ήλου.
8. Διάμετρος των οπών του ήλου.
9. Ανάλυση σημείων του κύκλου. Το μέγεθος αυτό είναι καθαρός αριθμός και δεν εκφράζει κάποια διάσταση του ήλου, αποτελεί απλώς την ακρίβεια με την οποία θα γίνει η αναπαράσταση και η απομόνωση των καμπυλόγραμμων τμημάτων του ήλου.

Όλα τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία αναφέρονται σε πραγματικές διαστάσεις του ήλου, εκφράζονται σε χιλιοστά του μέτρου (millimeters). Σημειώνεται επίσης ότι η επιλογή των διαστάσεων του ήλου που εισάγονται από τον χρήστη έγινε με κριτήριο το να είναι εύκολα μετρήσιμα μεγέθη και συνεπώς να μην απαιτούνται περαιτέρω μετατροπές ή υπολογισμοί από τον άνθρωπο, ενώ οι απαραίτητες μετατροπές πραγματοποιούνται εσωτερικά από το πρόγραμμα. Τιοιουτοτρόπως, επιταχύνεται η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων, καθώς δεν είναι απαραίτητο να γίνουν υπολογισμοί από τον χρήστη, αλλά και ελαττώνεται η παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα στην διαδικασία υπολογισμών, παράμετρος που μπορεί να επιφέρει σφάλματα στους υπολογισμούς.

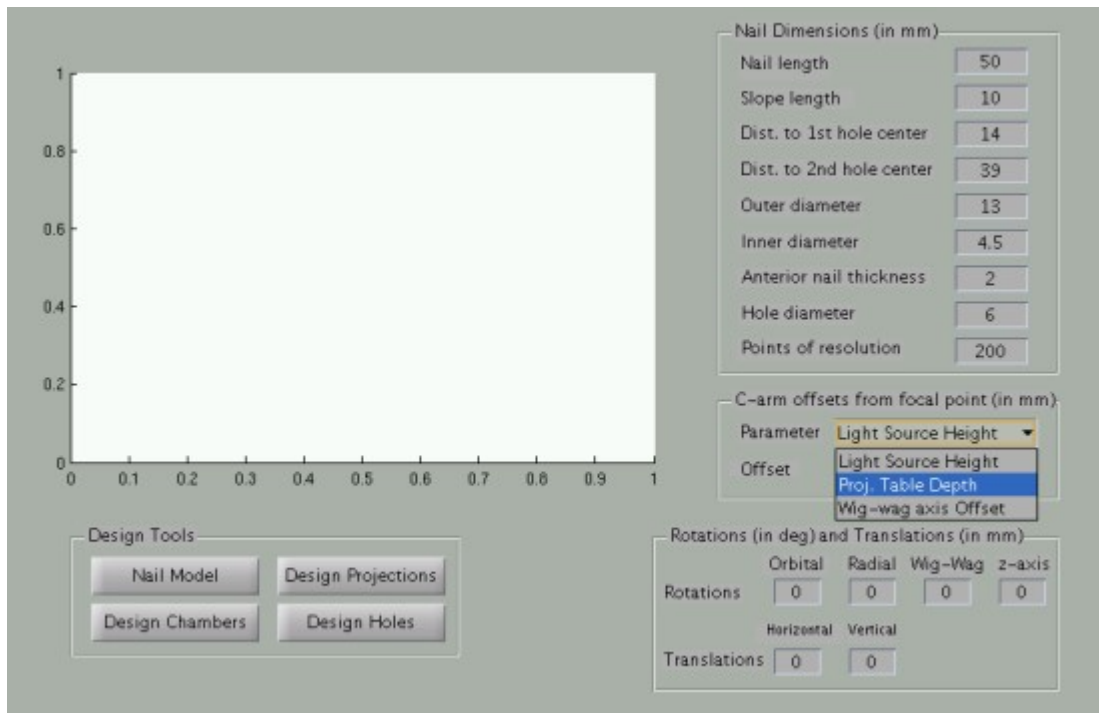
Για παράδειγμα, επιλέχθηκε να γίνεται εισαγωγή από τον χρήστη των διαμέτρων των κυλινδρικών επιφανειών του ήλου και όχι των ακτίνων, καθώς η διάμετρος μπορεί να μετρηθεί με χρήση ενός κοινού παχύμετρου. Όταν εισαχθεί η διάμετρος μιας κυλινδρικής επιφάνειας, η διάμετρος μετατρέπεται εσωτερικά σε ακτίνα και τελικά η ακτίνα προωθείται στις συναρτήσεις μοντελοποίησης, καθώς το μέγεθος αυτό είναι πιο χρήσιμο κατά τους διάφορους υπολογισμούς.

Τέλος, επισημαίνεται ότι έχει ληφθεί πρόνοια έτσι ώστε σε περίπτωση που ο χρήστης εισάγει μη-θετική τιμή, μη-πεπερασμένη ή μη αριθμητική τιμή σε κάποιο από τα πεδία διαστάσεων, οι οποίες είναι μη αποδεκτές, τότε γίνεται επαναφορά της αμέσως προηγούμενης έγκυρης τιμής του εν λόγω πεδίου.

### 7.1.2. Παραμετροποίηση διαστάσεων C-arm

Στο πλαίσιο “C-arm offsets from focal point (in mm)” διατίθενται κατάλληλες επιλογές οι οποίες μπορούν να παραμετροποιηθούν από τον χρήστη έτσι ώστε οι διαστάσεις του C-arm να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης των ακόλουθων διαστάσεων του C-arm.

1. Ύψος πηγής από το κεντρικό σημείο  $(0,0,0)$ , όπου είναι το σημείο τομής του κατακόρυφου άξονα που διέρχεται από την πηγή και τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής και του οριζόντιου άξονα. Από αυτό το σημείο διέρχεται επίσης και ο άξονας της γωνιακής περιστροφής.
2. Βάθος επιπέδου προβολής από το κεντρικό σημείο  $(0,0,0)$ .
3. Απόσταση κατακόρυφου άξονα περιστροφής wig-wag από το κεντρικό σημείο  $(0,0,0)$ .



Σχήμα 7.2: Παραμετροποίηση C-arm στο γραφικό περιβάλλον

Όλα τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία αναφέρονται σε πραγματικές διαστάσεις του C-arm, εκφράζονται σε χιλιοστά του μέτρου (millimeters).

Με ανάλογο τρόπο, έχει ληφθεί πρόνοια έτσι ώστε σε περίπτωση που ο χρήστης εισάγει μη-πεπερασμένη ή μη αριθμητική τιμή σε κάποιο από τα πεδία, οι οποίες είναι μη αποδεκτές, τότε να γίνεται επαναφορά της αμέσως προηγούμενης έγκυρης τιμής του εν λόγω πεδίου.

### 7.1.3. Παράμετροι παραγωγής προτύπων

Στο πλαίσιο “Rotations (in deg) and Translations (in mm)” διατίθενται κατάλληλες επιλογές οι οποίες μπορούν να παραμετροποιηθούν από τον χρήστη σχετικά με την παραγωγή προτύπων προβολών των οπών του ήλου. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης των ακόλουθων παραμέτρων:

1. Γωνία γωνιακής περιστροφής του εσωτερικού βραχίονα του C-arm (orbital).
2. Γωνία ακτινικής περιστροφής του εξωτερικού βραχίονα του C-arm (radial), δηλαδή περιστροφής γύρω από τον οριζόντιο “cross-arm” άξονα.
3. Γωνία περιστροφής “wig-wag” του βραχίονα του C-arm γύρω από τον κατακόρυφο άξονα στον οποίο στερεώνεται ο οριζόντιος άξονας στην βάση του C-arm.
4. Απόσταση μηχανοκίνητης οριζόντιας περιστροφής του βραχίονα.
5. Απόσταση μηχανοκίνητης κατακόρυφης περιστροφής του βραχίονα.
6. Γωνία περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα των z. Υπενθυμίζεται ότι η κίνηση αυτή δεν αντιστοιχεί σε κίνηση του C-arm, αλλά δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης του θαλάμου της δεύτερης οπής οπουδήποτε στο χώρο, σε σχέση με την θέση της πρώτης οπής. Η γωνία αυτή δεν επηρεάζει την θέση του θαλάμου της πρώτης οπής, αλλά επηρεάζει το τελικό πρότυπο μέσω της θέσης του θαλάμου της δεύτερης οπής. Κατά την αναγνώριση του προτύπου και την μετέπειτα μετακίνηση του C-arm, δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστεί μία τέτοια κίνηση.

Όλα τα παρακάτω μεγέθη τα οποία αναφέρονται σε μετακινήσεις εκφράζονται χιλιοστά του μέτρου (millimeters), ενώ τα μεγέθη τα οποία αναφέρονται σε γωνίες περιστροφής εκφράζονται σε μοίρες (degrees).

Υπενθυμίζεται ότι οι ανωτέρω μετασχηματισμοί εφαρμόζονται στον ήλο, για την παραγωγή ενός προτύπου, ωστόσο αντιστοιχούν πλήρως σε κινήσεις του C-arm που μπορούν να εφαρμοσθούν στην πραγματική περίπτωση που αντιστοιχεί στο παραγόμενο πρότυπο, ώστε να έρθει το C-arm στην επιθυμητή θέση.

Τέλος, σημειώνεται ότι και στην προκειμένη περίπτωση έχει ληφθεί πρόνοια έτσι ώστε σε περίπτωση που ο χρήστης εισάγει μη-πεπερασμένη ή μη αριθμητική τιμή σε κάποιο από τα πεδία, οι οποίες είναι μη αποδεκτές, τότε τα πεδία να επαναφέρονται στην μηδενική τιμή.

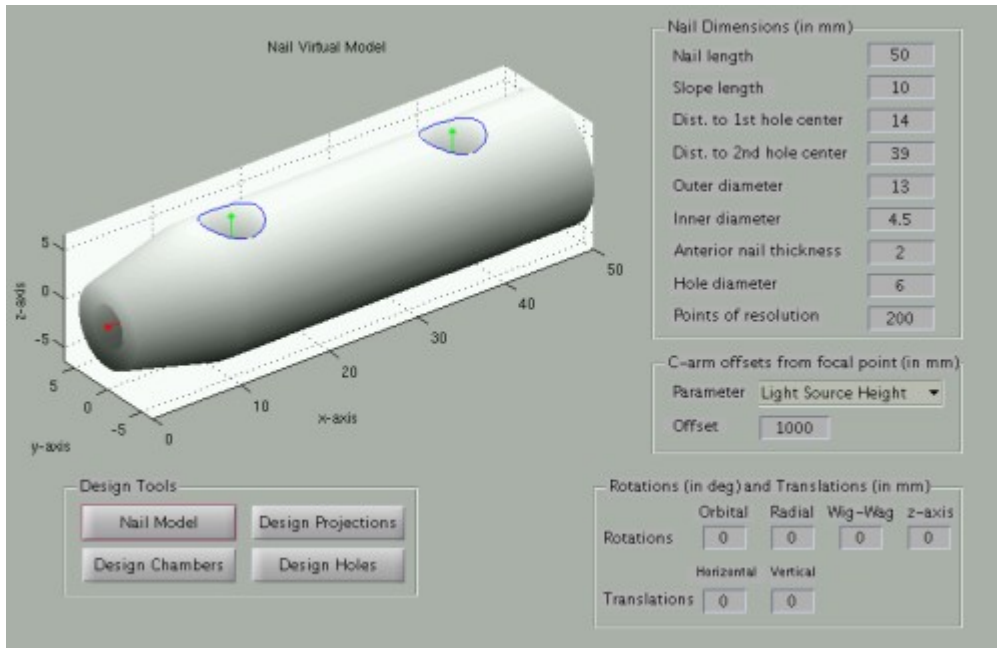
### 7.1.4. Εργαλεία σχεδίασης εικονικού μοντέλου ήλου, προβολών και προτύπων

Στο πλαίσιο “Design Tools” διατίθενται κατάλληλες επιλογές σχετικά με τη σχεδίαση του εικονικού μοντέλου, των προβολών και την παραγωγή προτύπων προβολών των οπών του ήλου, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.



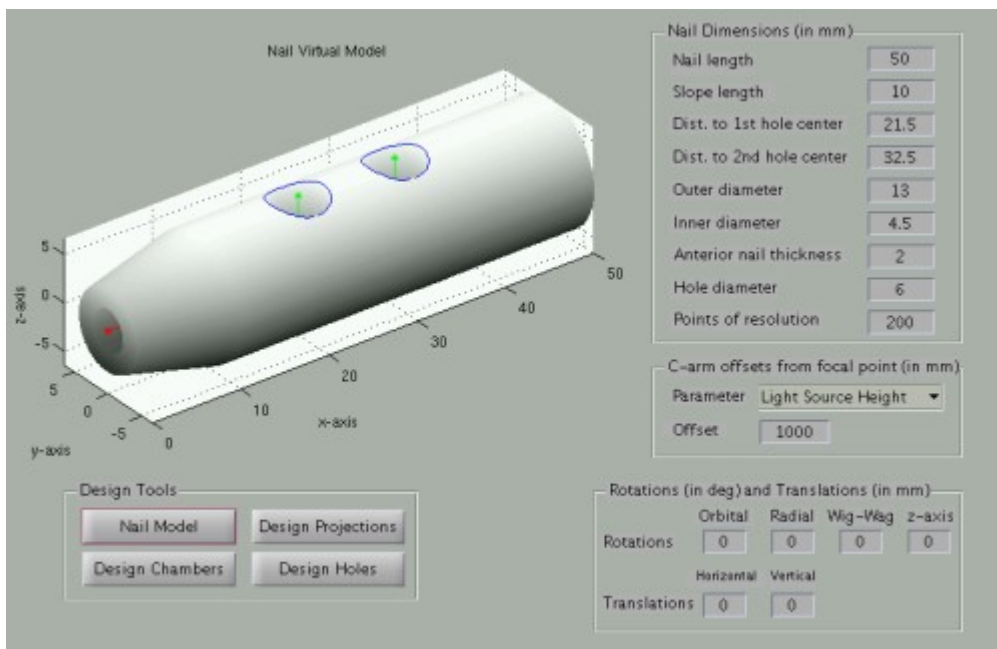
### a) Σχεδίαση Εικονικού Μοντέλου Ήλου

Με την επιλογή “Nail Model” σχεδιάζεται το εικονικό μοντέλο του ήλου, με διαστάσεις όπως έχουν οριστεί στο πλαίσιο “Nail Dimensions”, όπως εικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 7.3: Σχεδίαση εικονικού μοντέλου ήλου

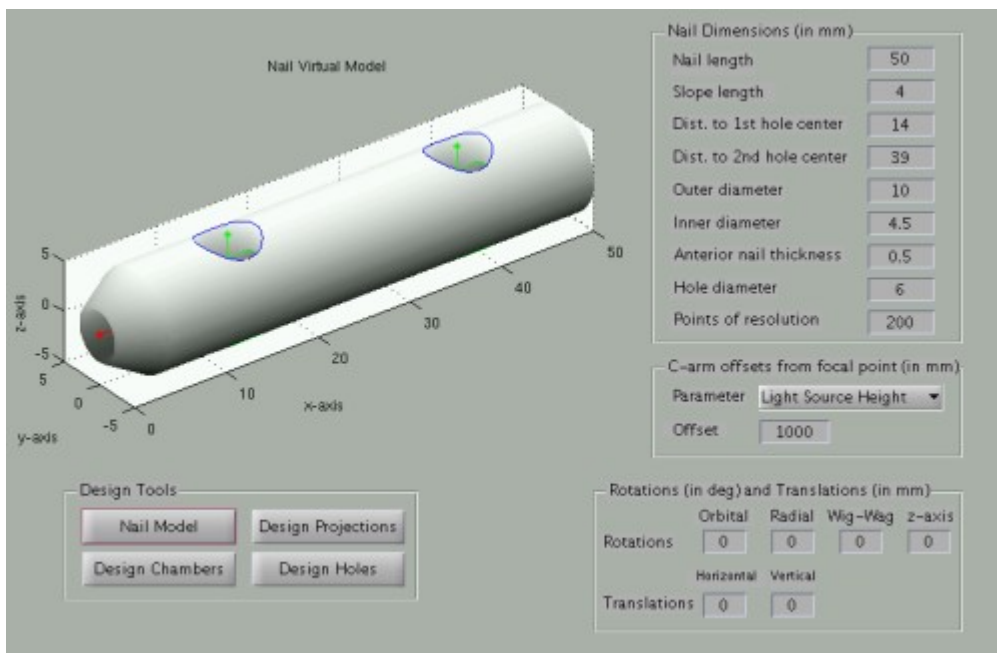
Το εικονικό μοντέλο ενημερώνεται σε τυχόν μεταβολές των διαστάσεων του ήλου. Για παράδειγμα, σε πιθανή μεταβολή της θέσης των οπών του ήλου, το εικονικό μοντέλο ενημερώνεται κατά την επανασχεδίασή του.



Σχήμα 7.4: Εικονικό μοντέλο ήλου με διαφορετική τοποθέτηση των οπών

Το εικονικό μοντέλο επίσης ενημερώνεται, κατά την επανασχεδίασή του, και κατά την μεταβολή πολλαπλών παραμέτρων. Για παράδειγμα, μεταβάλλοντας το εμπρόσθιο πάχος

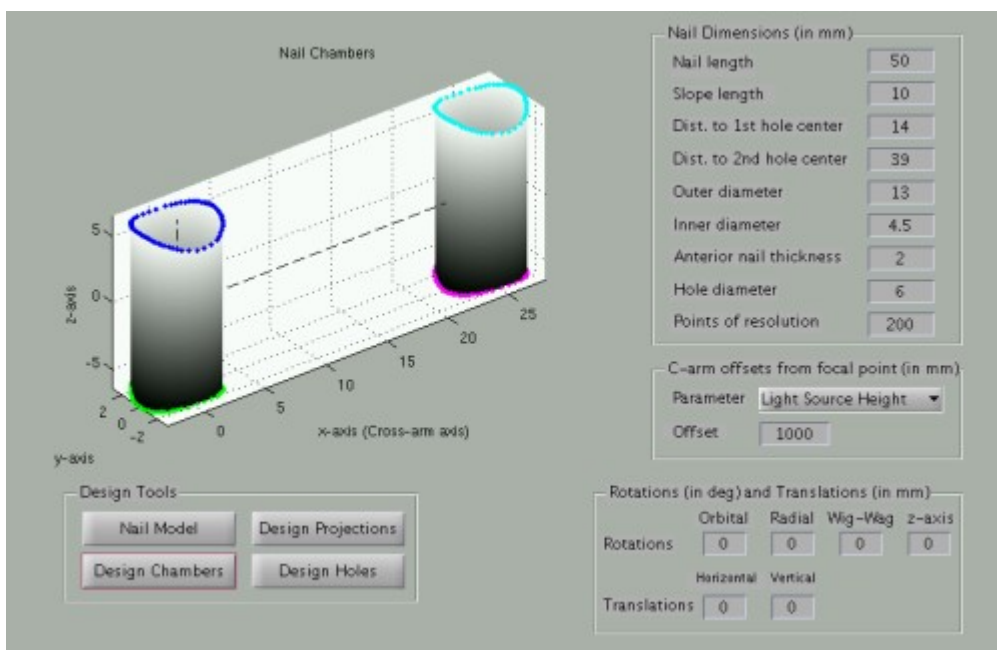
και την διάμετρο της εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας, προκύπτει το παρακάτω εικονικό μοντέλο.



Σχήμα 7.5: Εικονικό μοντέλο ήλου με διαφορετική εξωτερική διάμετρο

#### b) Σχεδίαση θαλάμων οπών του ήλου

Με την επιλογή “Design Chambers” απομονώνονται τα άνω και κάτω περιγράμματα των θαλάμων του ήλου και σχεδιάζονται στον τριδιάστατο χώρο. Μαζί με τα περιγράμματα, σχεδιάζονται, για εποπτικούς λόγους, τόσο η παράπλευρη επιφάνεια των θαλάμων του ήλου όσο και το κέντρο αναφοράς  $(0,0,0)$  και οι άξονες x-y-z, όπως εικονίζεται παρακάτω.

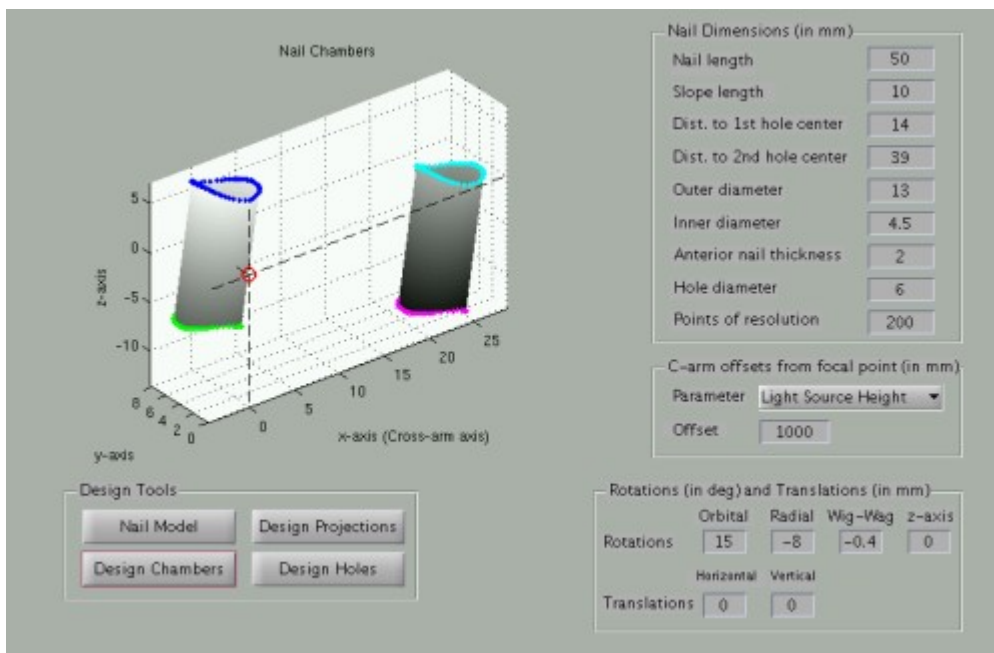


Σχήμα 7.6: Σχεδίαση των θαλάμων οπών του ήλου στο χώρο

Υπενθυμίζεται ότι οι εν λόγω άξονες έχουν ιδιαίτερη γεωμετρική σημασία και συγκεκριμένα:

- Ο άξονας των  $x$  είναι ο οριζόντιος άξονας περιστροφής του βραχίονα.
- Ο άξονας των  $y$  είναι ο άξονας γωνιακής περιστροφής του βραχίονα.
- Ο άξονας των  $z$  είναι ο κατακόρυφος άξονας που διέρχεται από την πηγή και τέμνει κάθετα το επίπεδο προβολής του ήλου.

Η τριδιάστατη σχεδίαση των θαλάμων του ήλου στο χώρο ενημερώνεται με την μεταβολή των παραμέτρων μεταφοράς και περιστροφής. Κάτωθι εικονίζεται ένα παράδειγμα στιγμιότυπου του ήλου το οποίο έχει υποβληθεί σε μεταφορά και περιστροφή στο χώρο.

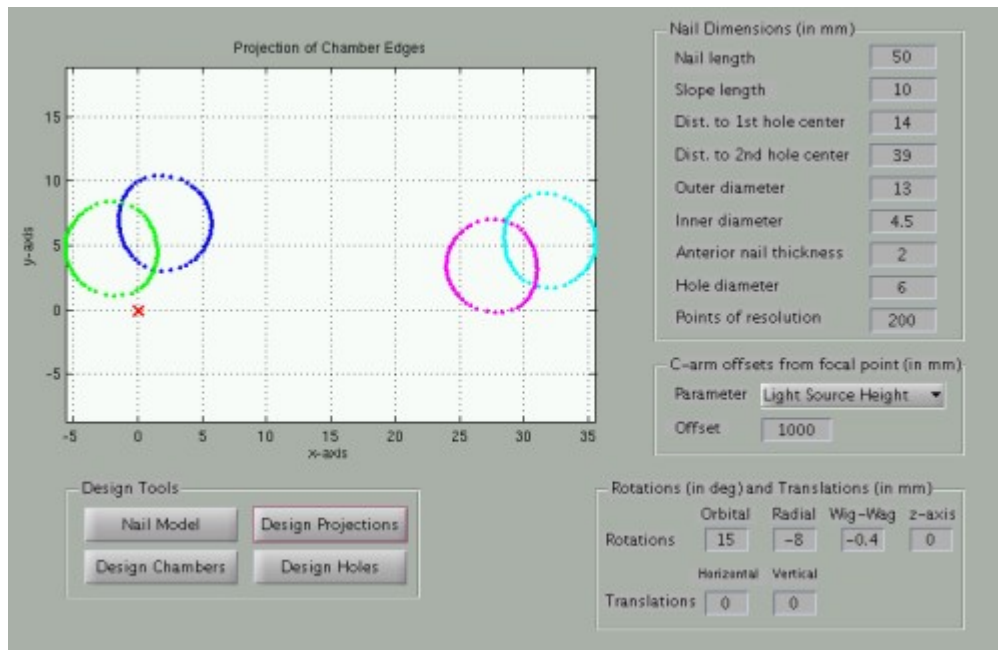


Σχήμα 7.7: Σχεδίαση των θαλάμων του ήλου ύστερα από μετακίνηση και περιστροφή στο χώρο

Είναι εμφανές ότι με τη σχεδίαση των θαλάμων στο χώρο, μεταβαλλομένων των παραμέτρων μεταφοράς και περιστροφής του ήλου, επιτυγχάνεται μία αποτελεσματική εποπτική εικόνα της μεταφοράς και περιστροφής του παραχθέντος προτύπου, αλλά και του πώς απαιτείται να μετακινηθεί ή να περιστραφεί το C-arm, ώστε να βρεθεί στην επιθυμητή θέση. Επιπροσθέτως, η σχεδίαση των αξόνων καθώς και η σημείωση του κέντρου αναφοράς  $(0,0,0)$ , συμβάλλει θετικά στην απόκτηση της εν λόγω εποπτικής εικόνας.

### c) Σχεδίαση προβολών περιγραμμάτων θαλάμων ήλου

Με την επιλογή “Design Projections” απομονώνονται τα άνω και κάτω περιγράμματα των θαλάμων του ήλου, προβάλλονται στο επίπεδο προβολής σύμφωνα με το μοντέλο κωνικής προβολής και σχεδιάζεται η διδιάστατη προβολή τους. Μαζί με τις προβολές σχεδιάζεται, για εποπτικούς λόγους, και η προβολή της πηγής, η οποία εν προκειμένω περιγράφεται από το σημείο  $(0,0)$ . Παράδειγμα της προβολής των περιγραμμάτων των θαλάμων του τελευταίου σχήματος δίνεται παρακάτω.



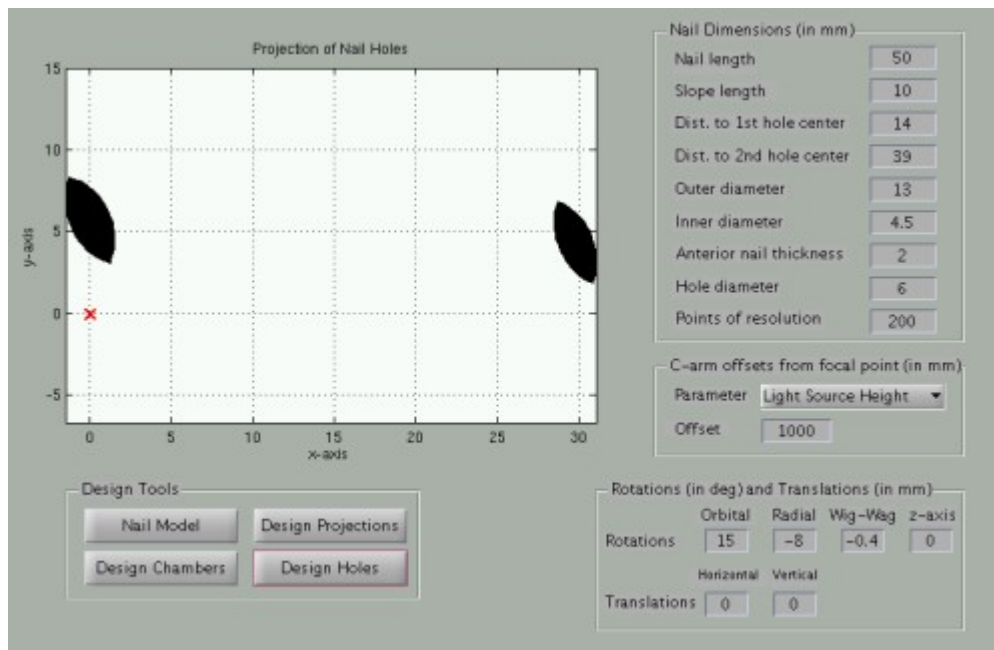
Σχήμα 7.8: Σχεδίαση των προβολών των περιγραμμάτων των θαλάμων

### d) Σχεδίαση προβολών οπών ήλου

Με την επιλογή “Design Holes” σχεδιάζεται η κοινή κλειστή επιφάνεια που προκύπτει από την τομή των προβολών των άνω και κάτω περιγραμμάτων των θαλάμων του ήλου στο επίπεδο προβολής. Σχεδιάζεται, δηλαδή, η προβολή των οπών του ήλου ως προς την πηγή εκπομπής φωτός. Είναι εμφανές ότι δεν θα σχεδιαστεί τίποτα εάν δεν υπάρχει κοινή κλειστή επιφάνεια των δύο περιγραμμάτων ενός θαλάμου. Μαζί με τις προβολές σχεδιάζεται, για εποπτικούς λόγους, και η προβολή της πηγής, η οποία εν προκειμένω περιγράφεται από το σημείο  $(0,0)$ .

Σημειώνεται ότι η σχεδίαση αυτή αποτελεί το τελικό πρότυπο το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί στην βάση προτύπων.

Παράδειγμα της προβολής των περιγραμμάτων των θαλάμων του τελευταίου σχήματος δίνεται παρακάτω.



Σχήμα 7.9: Σχεδίαση της προβολής των οπών του ήλου

Καταληκτικά, με την υλοποίηση του γραφικού περιβάλλοντος διαχείρισης του εικονικού μοντέλου του ήλου, έχει επιτευχθεί:

- ✓ Η εύκολη παραμετροποίηση του ήλου, εισάγοντας σε πεδία τις διαστάσεις του ήλου, ενώ επελέγησαν διαστάσεις που προκύπτουν με απλή μέτρηση του ήλου.
- ✓ Η άμεση απεικόνιση του εικονικού μοντέλου του ήλου με χρήση απλών κουμπιών.
- ✓ Η απόκτηση στερεοσκοπικής εικόνας για την θέση των προτύπων στο χώρο σε σχέση με την επιθυμητή θέση αναφοράς, με τη σχεδίαση της θέσης των θαλάμων στο χώρο.
- ✓ Η άμεση επίβλεψη των προβολών των περιγραμμάτων των θαλάμων στην επιφάνεια προβολής και του τελικού στιγμιότυπου που δημιουργείται.

## 7.2. Παραγωγή ενδεικτικής βάσης προτύπων

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει παραγωγή μίας ενδεικτικής βάσης προτύπων, έτσι ώστε να παρουσιασθεί αλλά και να γίνει πλήρως αντιληπτή η συσχέτιση των αναπτυχθέντων εργαλείων με το πραγματικό πρόβλημα.

Για να γίνει πλήρως κατανοητό το πρόβλημα, η επιλογή των διαστάσεων του εικονικού C-arm θα γίνει με βάση τις διαστάσεις ενός πραγματικού C-arm και συγκεκριμένα το ακτινογραφικό μηχάνημα το οποίο παρατίθεται στην βιβλιογραφική πηγή [13].

### Διαστάσεις ήλου

- Μήκος ήλου: 50mm
- Οριζόντιο μήκος κεκλιμένου επιπέδου: 10mm
- Απόσταση κέντρου πρώτης οπής από μύτη ήλου: 14mm
- Απόσταση κέντρου δεύτερης οπής από μύτη ήλου: 22mm
- Ακτίνα εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας: 6.5mm
- Ακτίνα εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας: 2.25mm
- Εμπρόσθιο πάχος ήλου: 2mm
- Ακτίνα εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας: 2.25mm
- Ανάλυση σημείων: 200

### Διαστάσεις C-arm

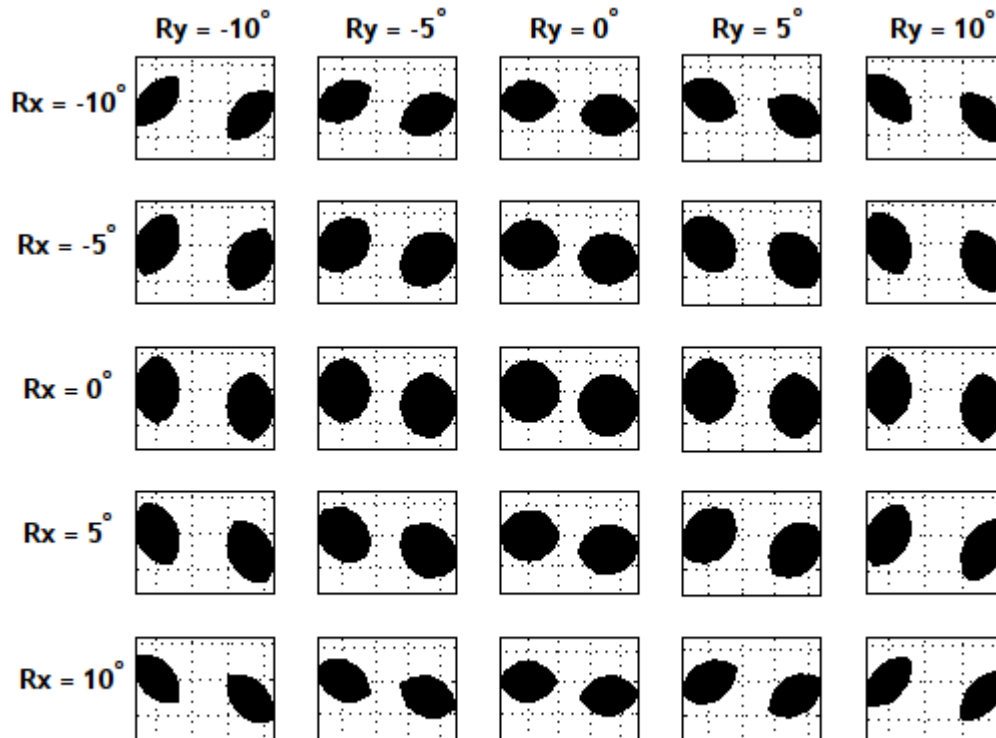
- Απόσταση κέντρου φυγής φωτεινής πηγής από οριζόντιο άξονα: 596.9mm
- Απόσταση ακτινογραφικού επιπέδου προβολής από οριζόντιο άξονα: 393.7mm
- Απόσταση κατακόρυφου άξονα “wig-wag” περιστροφής από κέντρο φυγής φωτεινής πηγής: περίπου 1250mm

Η βάση προτύπων θα παραχθεί με τις εξής παραμέτρους μετακίνησης και περιστροφής:

- Σταθερές παράμετροι
  - Οριζόντια μεταφορά: 0mm
  - Κατακόρυφη μεταφορά: 0mm
  - Περιστροφή wig-wag: 0°
- Μεταβαλλόμενες παράμετροι
  - Γωνιακή περιστροφή: -10°, -5°, 0°, 5°, 10°
  - Ακτινική περιστροφή: -10°, -5°, 0°, 5°, 10°

Σημειώνεται ότι η θέση της δεύτερης οπής στο χώρο, στη θέση αναφοράς, είναι επί του άξονα  $xOx'$ .

Η αποθήκευση των στιγμιοτύπων αυτών σε μια βάση δεδομένων, είναι δυνατόν να βοηθήσει το χειρουργό στη διαδικασία εντοπισμού της οπής του ήλου κατά τη χειρουργική επέμβαση. Κάτωθι εικονίζεται η παραγόμενη ενδεικτική βάση προτύπων, όπου με  $R_x$  έχει σημειωθεί η γωνία ακτινικής περιστροφής, δηλαδή ως προς τον οριζόντιο άξονα, και με  $R_y$  έχει σημειωθεί η γωνία γωνιακής περιστροφής.



Σχήμα 7.10: Ενδεικτική βάση δεδομένων

Στην παραπάνω βάση προτύπων, είναι εμφανές ότι στην θέση αναφοράς  $R_x=0^\circ$ ,  $R_y=0^\circ$  οι οι οπές του ήλου εμφανίζονται ως τέλειοι κύκλοι στο επίπεδο προβολής.

Επισημαίνεται ότι η διαδικασία, η οποία ακολουθήθηκε στην παράγραφο αυτή για την εξαγωγή στιγμιοτύπων των δύο οπών ενός ήλου υπό διαφορετικές γωνίες θέασης και για τη δεδομένη πηγή ακτινοβολίας του C-arm, είναι δυνατόν να επεκταθεί και για άλλες μεταφορές ή περιστροφές του ήλου στον χώρο, για διαφορετικά μοντέλα ήλων, για διαφορετικά μοντέλα C-arm, καθώς επίσης και για άλλες πηγές ακτινοβολίας, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις.

## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα - Προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση της εργασίας στον συγκεκριμένο τομέα

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, καθώς και προτάσεις για συνέχιση της εργασίας αυτής. Σε επόμενες ενότητες αναλύονται εκτενέστερα συγκεκριμένα θέματα, τα οποία εμφανίζουν έντονο ενδιαφέρον περαιτέρω έρευνας.

#### 8.1. Γενικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας

Το κυρίαρχο πρόβλημα που συναντάται κατά τις επεμβάσεις ασφαλιζόμενων κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων είναι η εύρεση της επιθυμητής γωνίας θέασης των οπών που φέρουν οι ήλοι, στην οποία εμφανίζονται ως τέλειοι κύκλοι. Αυτή η δυσκολία αφενός καθιστά το σύνολο της εγχείρησης εξαιρετικά χρονοβόρο και αφετέρου προκαλεί την ψυχοσωματική καταπόνηση του ασθενούς.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος κρίνεται σημαντική η ανάπτυξη βάσης δεδομένων προτύπων με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, διότι προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- ✓ Ευελιξία, καθώς παρέχεται εύκολη παραμετροποίηση για διαφορετικούς τύπους ήλων και ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm.
- ✓ Άμεση εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με τις επιθυμητές κινήσεις του C-arm, καθώς το ταίριασμα των ακτινογραφικών εικόνων με την βάση προτύπων γίνεται με χρήση αυτοματοποιημένων αλγορίθμων.
- ✓ Αποφυγή έκθεσης σε ακτινοβολία, καθώς δεν απαιτείται χρήση πραγματικών ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm, αλλά αντίθετα μοντελοποιούνται.
- ✓ Απουσία ανάγκης για δέσμευση ιατρικού εξοπλισμού και ειδικών συνθηκών για την ανάπτυξη εικονικών προτύπων.
- ✓ Οικονομικότερη επιλογή σε σχέση με τους αντίστοιχους υπάρχοντες εξοπλισμούς.

Υπάρχουσες προσεγγίσεις που έχουν επιχειρηθεί για την λύση του προβλήματος έκαναν χρήση μοντέλου εκπομπής παράλληλων δεσμών ακτίνων Χ. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν ανταποκρινόταν στην πραγματικότητα, αλλά αποτελούσε μία απλουστευμένη προσέγγισή της. Καθώς ο τρόπος εκπομπής ακτίνων Χ από τους διάφορους τύπους ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm εισάγει παραμορφώσεις στην ακτινογραφική εικόνα που λαμβάνεται, κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη προσέγγισης με ένα διαφορετικό μοντέλο φωτισμού.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτείνεται το μοντέλο φωτισμού συντρεχουσών ακτίνων, το οποίο βασίζεται στην θεώρηση ότι η πηγή ακτινοβολίας εκπέμπει δέσμες ακτίνων Χ, οι οποίες δεν είναι παράλληλες, ούτε ακτινικά παραγόμενες. Συγκεκριμένα, οι πηγές φωτός θεωρήθηκαν σημειακές με μοναδικό κοινό σημείο φυγής, ενώ η εκπομπή των ακτίνων Χ θεωρήθηκε ομοιόμορφη σε όλο τον κώνο εκπομπής. Με χρήση του μοντέλου αυτού επιτεύχθηκε εισαγωγή παραμορφώσεων στις προβολές των οπών στο επίπεδο προβολής, καθώς το παραγόμενο αποτέλεσμα εξαρτάται πλέον και από τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις του ήλου στον χώρο. Συγκρίνοντας το



παράλληλο και το κωνικό μοντέλο προβολής με ακτινογραφικές εικόνες του ήλου εξαγόμενες από ακτινογραφικό μηχάνημα C-arm, προέκυψε ότι το προτεινόμενο κωνικό μοντέλο προβολής προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.

Μεγάλη προσοχή δόθηκε στις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των σύγχρονων μοντέλων C-arm. Από την μελέτη που έγινε, προέκυψε ότι είναι αναγκαία η υλοποίηση των μετακινήσεων και περιστροφών του εικονικού μοντέλου του ήλου έχοντας ως αναφορά τις τυπικές κινήσεις που μπορούν να εκτελέσουν τα C-arm.

Στις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των C-arm αποδίδεται, επίσης, ένα σημαντικό ποσοστό των δυσκολιών που προκύπτουν κατά τις εγχειρητικές διαδικασίες. Πιο αναλυτικά, τα ακτινογραφικά μηχανήματα C-arm δεν παρουσιάζουν, εν γένει, τέλειες γεωμετρικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να παρακωλύεται η διαδικασία εύρεσης της επιθυμητής γωνίας θέασης του ήλου, λόγω της απώλειας της απεικόνισης του ήλου μετά από συγκεκριμένες περιστροφές του βραχίονα του C-arm. Απαιτείται, συνεπώς, εκτεταμένη έρευνα στις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των εκάστοτε μοντέλων C-arm, για την καλύτερη αξιοποίησή τους σε μελλοντικές υλοποιήσεις της εργασίας.

Καθώς η εφαρμογή προορίζεται για άτομα που δραστηριοποιούνται στον χώρο της Ιατρικής Επιστήμης και κατά συνέπεια δεν είναι εξοικειωμένοι με χρήση πολύπλοκων προγραμμάτων, υλοποιήθηκε ένα γραφικό περιβάλλον (GUI) προκειμένου να διευκολυνθεί η χρήση του αναπτυχθέντος μοντέλου. Πραγματοποιώντας ενδεικτικές παραγωγές προτύπων με χρήση γραφικού περιβάλλοντος και με χρήση γραμμής εντολών, παρατηρήθηκε ότι η πρώτη μέθοδος είναι σαφώς πιο αποτελεσματική. Επομένως, παροτρύνεται η έρευνα σε θέματα που άπτονται της περιοχής της Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Υπολογιστή για την βελτίωση του γραφικού περιβάλλοντος και την αποτελεσματικότερη χρήση του.

Τέλος, από μελέτη που έγινε σε εναλλακτικές μεθόδους μοντελοποίησης του ήλου, προέκυψε ότι μια ενδεχόμενη μοντελοποίηση με χρήση τριγωνικών επιφανειών μπορεί να προσφέρει εναλλακτική λύση του προβλήματος με άμεση προβολή του ήλου στην επιφάνεια προβολής. Η προσέγγιση αυτή είναι επιθυμητή, καθώς μπορούν επίσης να εφαρμοστούν διάφορες ιδιότητες (παραδείγματος χάριν, μοντελοποίηση μερικής διαφάνειας) οι οποίες δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν σε wire-frame μοντελοποιήσεις.

Συνολικά, ενθαρρύνεται η περαιτέρω έρευνα και συνέχιση της παρούσας εργασίας, προκειμένου να κατασκευαστεί ένα βιομηχανικό πρωτότυπο του προτεινόμενου συστήματος.

## 8.2. Ανάγκη για μελέτη και ανάλυση των προβλημάτων ακτινογραφικής εικόνας του C-arm

Οι κινήσεις και οι περιστροφές στις οποίες υποβάλλεται το εικονικό μοντέλο του ήλου έχουν αναπτυχθεί ως προς ένα σύστημα αναφοράς το οποίο αποτελείται από τρεις άξονες, τον άξονα οριζόντιας περιστροφής, τον άξονα γωνιακής περιστροφής και τον άξονα πηγής - επιπέδου προβολής, οι οποίοι τέμνονται κάθετα μεταξύ τους σε ένα σημείο που λαμβάνεται ως αρχή των αξόνων (βλ. Ενότητα 5.4.2). Όλες οι κινήσεις μετρώνται με βάση το *εικονικό σύστημα αναφοράς* και αυτές καταγράφονται στην βάση προτύπων, ως συνοδευτικές πληροφορίες.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει είναι η επιλογή ενός τελικού συστήματος συντεταγμένων ως προς το οποίο θα παρουσιασθούν οι πληροφορίες στον χειριστή του C-arm, ώστε να πραγματοποιηθούν σωστά οι επιθυμητές κινήσεις. Απαιτείται, δηλαδή, ένας μετασχηματισμός συντεταγμένων ως προς ένα *πραγματικό σύστημα αναφοράς*, το οποίο θα είναι εύκολα κατανοητό και αντιληπτό από τον χειριστή του C-arm.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το πραγματικό σύστημα συντεταγμένων εξαρτάται ουσιαστικά από το σύστημα αναφοράς του ίδιου του C-arm, δηλαδή την στάθμη αναφοράς που λαμβάνεται για κάθε μετρήσιμη κίνηση. Για παράδειγμα, απαιτείται να διερευνηθεί σε ποια θέση θεωρείται ότι ο βραχίονας βρίσκεται σε μηδενική κατακόρυφη μετατόπιση, η οποία ενδέχεται να είναι στην χαμηλότερη δυνατή θέση. Στην περίπτωση αυτή, δεν έχει νόημα να δοθεί αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση στον χειριστή του C-arm, καθώς θα πρέπει να προηγηθεί μία κατάλληλη μετατόπιση του επιπέδου αναφοράς.

Είναι εμφανές ότι υπάρχει δυσκολία στην έκφραση της επιθυμητής μετακίνησης του C-arm σε μετρήσιμες διαδοχικές κινήσεις του C-arm, διότι:

- Σε διαφορετικά μοντέλα C-arm ενδέχεται να υλοποιούνται διαφορετικά συστήματα αναφοράς. Συνεπώς, εάν μία κίνηση είναι μετρήσιμη, απαιτείται ο προσδιορισμός του σημείου αναφοράς της.
- Ορισμένες κινήσεις ενδέχεται να μην είναι μετρήσιμες, οπότε και καθίσταται αδύνατη η εφαρμογή του αναπτυχθέντος εργαλείου στο συγκεκριμένο C-arm, λόγω της κατασκευής του.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι, προκειμένου να αναπτυχθεί ένα βιομηχανικό πρότυπο, είναι απαραίτητη η μελέτη κάποιων τυπικών ακτινογραφικών μηχανημάτων C-arm και η ανάπτυξη κατάλληλης μεθοδολογίας προσαρμοσμένης στο C-arm για την ευθυγράμμιση του άξονα της κωνικής εκπομπής ακτίνων X με τον άξονα της οπής του ήλου. Θα πρέπει, βέβαια, να ληφθούν υπ' όψιν και οι κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες που ενδέχεται να εμφανίζουν τα C-arm, οι οποίες μπορούν να παρακωλύσουν την διαδικασία εύρεσης της επιθυμητής γωνίας θέασης του ήλου, όπως παρουσιάσθηκε στο κεφάλαιο 4. Το συγκεκριμένο θέμα αφήνεται για περαιτέρω μελέτη σε μελλοντική εργασία.

### **8.3. Πρόταση για έλεγχο της πιστότητας απεικόνισης του C-arm**

Κατά τη λήψη ακτινογραφιών έχει θεωρηθεί ότι δεν εισάγονται επιπλέον παραμορφώσεις πέρα από αυτές που οφείλονται στο μοντέλο κωνικής προβολής του C-arm. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή έρευνας πάνω στον έλεγχο πιστότητας απεικόνισης του C-arm, δηλαδή εάν στην πραγματικότητα εμφανίζονται ή όχι επιπλέον παραμορφώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να παρακωλύσουν την διαδικασία αναγνώρισης προτύπων.

Μία προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου είναι με χρήση ακτινογραφιών αναφοράς, οι οποίες τοποθετούνται σε μετρημένη θέση ως προς το C-arm. Πραγματοποιείται λήψη ακτινογραφιών και ελέγχεται εάν παράγονται πιστά αντίγραφα. Εάν λαμβάνεται αντίγραφο του αντικειμένου χωρίς σοβαρές παραμορφώσεις, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν εισάγονται επιπλέον παραμορφώσεις από τα ακτινογραφικά μηχανήματα.

Αντιθέτως, εάν παρατηρηθούν επιπλέον παραμορφώσεις στην ακτινογραφική εικόνα, τότε δημιουργούνται προβλήματα κατά την αναγνώριση προτύπων, δηλαδή το ταίριασμα εικονικών προτύπων και πραγματικών προβολών που έχουν ληφθεί από το C-arm. Στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητη η άρση των παραμορφώσεων με χρήση ακτινογραφίας αντικειμένων αναφοράς και ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Πιο αναλυτικά, απαιτείται η υλοποίηση μοντέλου το οποίο προσθέτει στα εικονικά πρότυπα τις πιθανές παραμορφώσεις που δημιουργούνται από το ακτινογραφικό σύστημα, εάν είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση των σχετικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η ανάπτυξη ενός μοντέλου παραμορφώσεων μπορεί να είναι γενική, ώστε να καλύπτει πληθώρα ακτινογραφικών μηχανημάτων, ή ειδική για το εκάστοτε C-arm.

### **8.4. Πιθανή επέκταση των αναπτυχθέντων μοντέλων**

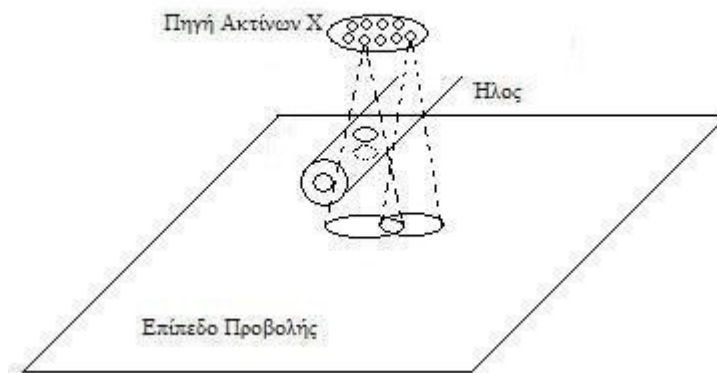
Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθούν προτάσεις για πιθανές επεκτάσεις των αναπτυχθέντων μοντέλων. Ενθαρρύνεται η σχετική έρευνα στους προτεινόμενους τομείς, έτσι ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα η πραγματικότητα.

#### **8.4.1. Περαιτέρω εξέταση μοντέλου φωτισμού**

Το σύστημα εκπομπής ακτίνων Χ του ακτινογραφικού συστήματος C-arm θεωρήθηκε ότι αποτελείται από σημειακές πηγές φωτός με κοινό σημείο εκπομπής και ομοιόμορφη εκπομπή ακτίνων σε όλη την έκταση του κώνου ακτινοβολίας.

Ωστόσο, ενθαρρύνεται η περαιτέρω έρευνα στο μοντέλου φωτισμού που ενσωματώνεται στο εικονικό μοντέλο. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εξέταση εάν οι δέσμες ακτίνων Χ εμφανίζουν κοινό σημείο φυγής ή αποτελούνται από σύνολα δεσμών με διαφορετικά σημεία φυγής. Συστήνεται, επίσης, να μελετηθεί κατά πόσον είναι δυνατή η διάταξη των σημείων φυγής σε μία επιφάνεια στον χώρο.

Από το σχήμα που ακολουθεί γίνεται κατανοητό ότι στο μοντέλο αυτό, η πηγή ακτίνων Χ αποτελείται από ένα πλέγμα σημείων, κάθε σημείο του οποίου λειτουργεί ως σημειακή πηγή ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπει ακτίνες Χ υπό μορφή κώνου.



Σχήμα 8.1: Μοντέλο πηγής, το οποίο αποτελείται από πλέγμα σημειακών πηγών ακτίνων Χ

Με χρήση του προαναφερθέντος μοντέλου, εισάγονται περισσότερες αλλοιώσεις στην εικόνα σε σχέση με το μοντέλο που υλοποιήθηκε. Το μοντέλο αυτό προσεγγίζει τη μορφή της σημειακής πηγής ακτινοβολίας με ευρεία περιοχή εκπομπής ακτίνων Χ. Λόγω των πολλαπλών σημειακών πηγών ακτινοβολίας που απαρτίζουν το πλέγμα της πηγής και του τρόπου με τον οποίο αυτά εκπέμπουν ακτίνες Χ, δημιουργούνται έντονα φαινόμενα σκίασης, τα οποία καθιστούν τα όρια της οπής του ήλου δυσδιάκριτα και ασαφή, αλλοιώνοντας σημαντικά τα χαρακτηριστικά της λαμβανόμενης από την ακτινογραφική διάταξη εικόνας. Κατά συνέπεια, είναι αναγκαίο να μελετηθεί κατά πόσον ένα τέτοιο μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα.

#### 8.4.2. Μοντελοποίηση μερικής διαφάνειας

Μία δεύτερη περιοχή που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η χρήση μοντέλου “σκληρών” ακτίνων Χ οι οποίες κατά ένα μέρος διαπερνούν το μεταλλικό κράμα.

Ως “σκληρές” ακτίνες Χ αναφέρονται οι ακτίνες Χ οι οποίες φέρουν την μεγαλύτερη ενέργεια, ενώ οι μικρότερης έντασης ακτίνες αναφέρονται ως “μαλακές” ακτίνες Χ. Ο διαχωρισμός μεταξύ “σκληρών” και “μαλακών” ακτίνων Χ δεν είναι σαφώς καθορισμένος. Τυπικά, οι “σκληρές” ακτίνες Χ είναι εκείνες που φέρουν ενέργεια μεγαλύτερη των 10 keV<sup>[54]</sup>, περίπου.

Έχει παρατηρηθεί ότι μικρά πάχη μεταλλικού κράματος είναι μερικώς διαφανή σε “σκληρές” ακτίνες Χ μικρού μήκους κύματος. Για παράδειγμα, σκληρές ακτίνες Χ μπορούν να διαπεράσουν στρώμα χάλυβα πάχους έως και 5 mm<sup>[55]</sup>. Ένα τέτοιο πάχος θα μπορούσε να παρουσιασθεί στα χείλη των οπών του ενδομελικού ήλου, ο οποίος κατασκευάζεται συνήθως από ανοξείδωτο αλουμίνιο (βλ. ενότητα 2.2).

Γίνεται φανερό ότι η πραγματική παραγόμενη εικόνα του C-arm ενδέχεται να διαφέρει από τα εικονικά πρότυπα στα σημεία όπου οι ακτίνες διαπερνούν μεταλλικά στρώματα λεπτού πάχους. Τέτοια φαινόμενα μπορούν να παρουσιασθούν στις παρυφές των οπών του ήλου. Συνεπώς, ενθαρρύνεται περαιτέρω έρευνα στην πιθανή ανάγκη μοντελοποίησης μερικής διαφάνειας του υλικού, η οποία μπορεί να αναπτυχθεί με μεθόδους που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.3.

Στην περίπτωση που απαιτηθεί η υλοποίηση μερικής διαφάνειας, θα πρέπει επίσης να ελεγχθεί εάν υπάρχει μη ομοιογενής λοβός εκπομπής των ακτίνων Χ και αν έχει νόημα να

εξετασθεί. Για παράδειγμα, ενδέχεται η εκπομπή ακτίνων  $X$  να είναι μεγαλύτερης έντασης κοντά στον άξονα συμμετρίας του λοβού, οπότε η μερική διαφάνεια να παρατηρείται μόνο σε εκείνες της περιοχές.

### **8.5. Συνδυασμένη χρησιμοποίηση δύο οπών για βελτίωση των αποτελεσμάτων της εργασίας**

Η επέκταση του εικονικού μοντέλου του ήλου με προσθήκη της δεύτερης οπής έγινε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η συνδυασμένη προβολή τους στην επιφάνεια προβολής για βελτίωση των αποτελεσμάτων της εργασίας. Συγκεκριμένα, η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο οπές, η οποία οφείλεται στο μοντέλο κωνικής εκπομπής ακτίνων  $X$ , μπορεί να βοηθήσει στην ακριβέστερη εύρεση της χωρικής τοποθέτησης του ήλου και επομένως των αξόνων των οπών. Συνεπώς, κρίνεται ενδιαφέρον να ερευνηθεί εάν με εφαρμογή μίας μετρικής, η οποία συνδυάζει την διαφοροποίηση των δύο προτύπων από τις προβολές, μπορούν να εξαχθούν καλύτερα αποτελέσματα από την περίπτωση που εξετάζεται μία οπή μόνο.

## Βιβλιογραφία

- [1] Φ. Γ. Γιαννόπουλος, “Σύστημα μοντελοποίησης ήλων για υποβοήθηση σε χειρουργικές επεμβάσεις ασφαλισμών κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων,” MSc Thesis, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα, 2009.
- [2] G. Küntscher, “The Küntscher Method of Intramedullary Fixation,” *J Bone Joint Surg Am*, τόμ. 40, σελ. 17-26, 1958.
- [3] Η. Λαμπίρης και Δ. Γιαννίκας, “Συνδυασμένα κατάγματα του μηριαίου,” *Αρχαία Ελληνικής Ιατρικής*, τόμ. 19(3), σελ. 270-279, 2002.
- [4] J. Böhler, “Closed intramedullary nailing of the femur,” *Clin. Orthop. Relat. Res.*, τόμ. 60, σελ. 51-68, Sep-Oct 1968.
- [5] Γ. Κούλαλης, “Ψευδαρθρώσεις - Οστικά Ελλείμματα,” παρουσιάστηκε στο 2ο Πανελλήνιο Σεμινάριο για την σταδιακή επιμήκυνση άκρων με ολισθαίνοντα οστικά μοσχεύματα, Ορθοπαιδική Κλινική Π.Γ.Ν., Ιπποκράτειο Θεσσαλονίκης, Ελλάδα, 23-24 Σεπτεμβρίου 1995. Διαθέσιμο: <http://www.diavlos.gr/orto96/ortowww/ikoulal.htm>
- [6] I. Kempf, A. Grosse και G. Beck, “Closed locked intramedullary nailing. Its application to comminuted fractures of the femur,” *J Bone Joint Surg Am*, τόμ. 67, σελ. 709-720, Jun 1985.
- [7] J. Hochfelder. (2011, Ιουν 15). *New York Injury Cases Blog*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <http://www.newyorkinjurycases.com/hochfelder-report/upper-leg-injuries/>
- [8] R. W. J. Carter. (2011, Ιουν 15). *Patient's Falls Result in Hip and Femur Fractures and Surgery; Northern Virginia Nursing Home Settles*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <http://www.nursing-home-neglect.com/patients-falls-result-in-hip-and-femur-fractures-and-surgery-northern-virginia-nursing-home-settles>
- [9] S. T. Canale και J. H. Beaty. (2011, Ιουν 15). *Intramedullary Nailing of Femoral Shaft Fractures*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <http://www.proceduresconsult.com/medical-procedures/intramedullary-nailing-of-femoral-shaft-fractures-OR-procedure.aspx>
- [10] Various Contributors. (2011, Ιουν 15). *Femoral Fracture Fixation Surgery: Intramedullary Nail - Animation*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <http://www.doereport.com/generateexhibit.php?ID=14545>
- [11] Glitzy queen00. (2011, Ιουν 15). *Wikipedia: Philips Fixed II Screening Suite*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Philips\\_II.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Philips_II.jpg)
- [12] Philips Healthcare. (2011, Ιουν 28). *Philips HF C-arm brochure*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: [http://www.healthcare.philips.com/pwc\\_hc/in\\_en/products/xray/assets/valuesegment/docs/Philips%20HF%20C-arm%20brochure.pdf](http://www.healthcare.philips.com/pwc_hc/in_en/products/xray/assets/valuesegment/docs/Philips%20HF%20C-arm%20brochure.pdf)
- [13] *Series 9800 mobile c-arm operator's guide*, OEC Medical Systems, Inc., 384 Wright Brothers Dr, Salt Lake City, Utah 84116 801/328-9300, 1998, σελ. 4.7-4.21. Available at: <http://202.106.73.19/download/machine/DSA/OEC9800/operation/9800%20C-Arm%20Guide.pdf>.
- [14] *Series 9400*, OEC-DIASONICS, 384 Wright Brothers Drive, Salt Lake City, Utah 84116, U.S.A., 1992. .
- [15] Anastopoulos G. MD και συν., “Distal Locking of Tibial Nails A New Device to

- Reduce Radiation Exposure,” *Clin. Orthop. Relat. Res.*, τόμ. 466(1), σελ. 216-220, Ιαν 2008.
- [16] G. M. Whatling και L. D. M. Nokes, “Literature review of current techniques for the insertion of distal screws into intramedullary locking nails,” *Injury*, τόμ. 37, σελ. 109-119, Feb 2006.
- [17] P. E. Levin, R. W. J. Schoen και B. D. Browner, “Radiation exposure to the surgeon during closed interlocking intramedullary nailing,” *J Bone Joint Surg Am*, τόμ. 69, σελ. 761-766, Jun 1987.
- [18] M. E. Miller, M. L. Davis, C. R. MacClean, J. G. Davis, B. L. Smith και J. R. Humphries, “Radiation exposure and associated risks to operating-room personnel during use of fluoroscopic guidance for selected orthopaedic surgical procedures,” *J Bone Joint Surg Am*, τόμ. 65, σελ. 1-4, Jan 1983.
- [19] R. Sanders, K. J. Koval, T. DiPasquale, G. Schmelling, S. Stenzler και E. Ross, “Exposure of the orthopaedic surgeon to radiation,” *J Bone Joint Surg Am*, τόμ. 75, σελ. 326-330, Mar 1993.
- [20] N. Suhm, P. Messmer, I. Zuna, L. A. Jacob και P. Regazzoni, “Fluoroscopic guidance versus surgical navigation for distal locking of intramedullary implants. A prospective, controlled clinical study,” *Injury*, τόμ. 35, σελ. 567-574, Jun 2004.
- [21] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, “Προοπτικός μετασχηματισμός,” από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 294.
- [22] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, “Διαγραφή Πίσω Επιφανειών,” από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 296-299.
- [23] L. G. Roberts, “Machine Perception of Three Dimensional Solids,” Lincoln Laboratory, MIT, Cambridge, MA, USA, TR 315, Ιουν 1963.
- [24] A. Appel, “Some Techniques for Shading Machine Renderings of Solids,” από *Proceedings of Spring Joint Computer Conference*, Atlantic City, NJ, USA, 1968, σελ. 37-45.
- [25] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, “Αλγόριθμοι Απόκρυψης Ακμών,” από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 299-304.
- [26] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, “Αλγόριθμοι Απόκρυψης Επιφανειών,” από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 306-308.
- [27] E. Catmull, “A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces,” PhD Thesis, Dept of Computer Science, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA, 1974.
- [28] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, “Αλγόριθμος z-buffer,” από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 308-310.
- [29] J. R. Rossignac και A. A. G. Requicha, “Depth Buffering Display Techiques for Constructive Solid Geometry,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, τόμ. 6(9), σελ. 29-39, 1986.
- [30] -Zeus-. (2011, Ιουν 25). *Wikipedia: Graphical representation of what a Z buffer looks like*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Z\\_buffer.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Z_buffer.svg)
- [31] T. Porter και T. Duff, “Compositing Digital Images,” *ACM Computer Graphics*, τόμ. 18(3), σελ. 253-259, 1984.
- [32] T. Duff, “Compositing 3D Rendered Images,” *ACM Computer Graphics*, τόμ. 19(3), σελ. 41-44, 1985.
- [33] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner και J. F. Hughes, *Computer Graphics, Principles and Practice*, Addison - Wesley, Boston, MA, USA, 1991.
- [34] W. J. Bouknight, “A Procedure for the Generation of Three-Dimensional Half-Tones Computer Graphics Presentations,” *Communications of ACM*, τόμ. 13(9), σελ. 527-536, 1970.

- [35] G. S. Watkins, "A Real Time Visible Surface Algorithm," PhD Thesis, Dept of Computer Science, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA, 1970.
- [36] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, "Αλγόριθμοι Scanline," από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 311-313.
- [37] M. E. Newell, R. G. Newell και T. L. Sancha, "A Solution to the Hidden Surface Problem," *Proc. ACM National Conference 1972*, τόμ. 1, σελ. 443-450, 1972.
- [38] H. Fuchs, Z. M. Kedem και B. F. Naylor, "On visible surface generation by a priori tree structures," από *ACM SIGGRAPH '80 Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, 1980, σελ. 124-133.
- [39] H. Fuchs, G. D. Abram και E. D. Grant, "Near real-time shaded display of rigid objects," από *ACM SIGGRAPH '83 Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, 1983, σελ. 65-72.
- [40] J. Warnock, "A Hidden - Surface Algorithm for Computer Generated Half - Tone Pictures," Dept of Computer Science, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA, TR 4-15, 1969.
- [41] I. E. Sutherland, R. F. Sproull και R. A. Schumacker, "A Characterization of Ten Hidden Surface Algorithms," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, τόμ. 6(1), σελ. 1-55, March 1974.
- [42] J. F. Blinn, "Me and My (Fake) Shadow," *IEEE Computer Graphics and Applications*, τόμ. 8(1), σελ. 82-86, 1988.
- [43] D. S. Kay και D. P. Greenberg, "Transparency for Computer Synthesized Images," *ACM Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH '79)*, τόμ. 1, σελ. 158-164, 1979.
- [44] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, "Διαφάνεια (Transparency)," από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 383-384.
- [45] L. Yuhui, Y. Jinzhu, H. Fangfang και Z. Dazhe, "A development of nonlinear transparency display algorithm," παρουσιάστηκε στο , Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5486675&isnumber=5486627>, Μαρ 2010.
- [46] N. Binder, L. Matthäus, R. Burgkart και A. Schweikard, "A robotic C-arm fluoroscope," *Int J Med Robot*, τόμ. 1, σελ. 108-116, Sep 2005.
- [47] *Matlab documentation*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2011. Available at: <http://www.mathworks.com/help/techdoc/index.html>.
- [48] C. Schretter, C. Neukirchen, M. Bertram και G. Rose, "Correction of some time-dependent deformations in parallel-beam computed tomography," από *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*, Paris, France, 2008, σελ. 764-767.
- [49] Ν. Καδιανάκης και Σ. Καρανάσιος, "Προοπτική Προβολή," από *Γραμμή Άλγεβρα, Αναλυτική Γεωμετρία και Εφαρμογές, 3η έκδοση*, Αυτοέκδοση, Αθήνα, 2003, σελ. 293-294.
- [50] Θ. Θεοχάρης και Α. Μπεμ, "Παραδείγματα Τρισδιάστατων Μετασχηματισμών," από *Γραφικά, Αρχές & Αλγόριθμοι*, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα, 2007, σελ. 110-111.
- [51] S. Suriati. (2011, Ιουν 21). *Geometric Modeling*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: [http://gmm.fsksm.utm.my/~suriati/scg4323/Geometric\\_modeling.pdf](http://gmm.fsksm.utm.my/~suriati/scg4323/Geometric_modeling.pdf)
- [52] Inductiveload. (2011, Ιουν 21). *Suzanne, a primitive in the 3D modelling program Blender*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Suzanne.svg>
- [53] F. Bernardini και H. E. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline," *Comput. Graph. Forum*, τόμ. 21(2), σελ. 149-172, 2002.
- [54] G. Holman και S. Benedict. (1996, Σεπτ 23). *Hard X-Rays - Solar Flare Theory*



*Educational Web Pages*. [Ηλεκτρονικό]. Διαθέσιμο:

<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/xray.htm>

- [55] H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon, W. White και R. Falcone, “Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction,” *Phys. Rev. Lett.*, τόμ. 71, σελ. 2725-2728, Oct 1993.