



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΝΑΔΡΑΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΙΚΡΟΒΕΛΟΝΑΣ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΝΤΕΟΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ**

Ιωάννης Τσουκαράκης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2010



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ σχετικά με μικρορομποτικά συστήματα. Αναλύεται η ανάδραση θέσης μικροβελόνας η οποία είναι προσαρμοσμένη σε ένα μικρορομποτικό σύστημα. Η πληροφορία ανακτάται μέσω οπτικού μικροσκοπίου και βιντεοκάμερας τοποθετημένης επάνω από το χώρο δράσης του πειράματος.

Η εργασία πραγματεύεται θέματα τεχνολογίας λήψης εικόνας με οπτικό μικροσκόπιο, τεχνολογίας οπτικών αισθητήρων, ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου. Το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιείται έχει τη δυνατότητα μεταβολής οπτικής μεγέθυνσης (zoom) και εστίασης. Στη μία άκρη του οπτικού σωλήνα υπάρχει ισχυρός αντικειμενικός φακός ενώ στην άλλη προσαρμόστηκε η βιντεοκάμερα. Το μικροσκόπιο μεγεθύνει την άκρη της μικροβελόνας και στη συνέχεια συλλαμβάνεται η κίνησή της από τη βιντεοκάμερα. Τα στιγμιότυπα στέλνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου με κατάλληλους αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας προσδιορίζεται σε πραγματικό χρόνο η θέση και η διεύθυνση. Για να γίνει αυτό θα πρέπει η μικροβελόνα να είναι διακριτή σε σχέση με το υπόβαθρο, δηλαδή να υπάρχει εμφανής διαχωριστική γραμμή. Για να το επιτύχουμε αυτό χρωμάτισαμε την μικροβελόνα με μαύρο χρώμα οπότε καταφέραμε να έχουμε μεγάλη αντίθεση ανάμεσα σε αυτή και στο φωτισμένο υπόβαθρο. Η μικροβελόνα απέχει από το επίπεδο κίνησης του μικρορομπού περίπου 2 cm. Η απόσταση αυτή είναι ικανοποιητική έτσι ώστε το υπόβαθρο να παρουσιάζει ενιαία χαρακτηριστικά φωτός χωρίς να προσφέρει θόρυβο από τις ατέλειες της επιφάνειάς του.

Για την εύρεση θέσης και διεύθυνσης της μικροβελόνας γίνεται επεξεργασία της εικόνας ανά στιγμιότυπο. Κομβικό σημείο στην επεξεργασία είναι η επιλογή κατάλληλης τεχνικής για την εξαγωγή της ζητούμενης πληροφορίας. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές τεχνικές αλλά τελικά επιλέχθηκε ο μετασχηματισμός Hough (κυκλικός και γραμμικός) με την βοήθεια του οποίου ανιχνεύονται κύκλοι και γραμμές. Με κατάλληλη επεξεργασία των εξαγόμενων κύκλων και γραμμών υπολογίζουμε τη θέση  $(x, y)$  και τη διεύθυνση  $(\theta)$  της μικροβελόνας.

Η εφαρμογή επιλέχθηκε να αναπτυχθεί σε περιβάλλον *simulink*, για την απλοποίησή της σχεδίασης, αλλά αυτό δημιούργησε προβλήματα σχετικά με την υλοποίηση της σε πραγματικό χρόνο, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Η σχεδίαση του αλγόριθμου επεξεργασίας της εικόνας παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα (σε πραγματικό χρόνο).



*Αφιερώνεται στην οικογένειά μου*



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, Καθηγητή κ. Ε. Γ. Παπαδόπουλο για την ανάθεση του θέματος και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. κ. Π. Βαρθολομαίο για την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της εργασίας, καθώς και τον Δρ. κ. Κ. Βλάχο για την επίλυση αποριών που προέκυψαν στην πορεία υλοποίησης της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω για την συμπαράστασή της τη σύντροφό μου Χριστίνα και για την υπομονή τους τα παιδιά μου Αθηνά και Δημήτρη.





# Πρόλογος

Την τελευταία δεκαετία τα μικρορομποτικά συστήματα αποτελούν σημαντικό πεδίο έρευνας η οποία συνεχώς αυξάνεται. Αρκετοί τομείς εφαρμογής όπως η μικρο-συναρμολόγηση, η μικροβιολογία, η βιοτεχνολογία, η μικροσκοπία και η οπτοηλεκτρονική, απαιτούν σμίκρυνση των μικρορομποτικών συστημάτων για να επιτύχουν πολύ υψηλή ακρίβεια, ευελιξία και κινητικότητα. Επιπλέον, οι επιστήμονες οι οποίοι συμμετέχουν στην αναπτυσσόμενη έρευνα της νανοτεχνολογίας χρειάζονται καινούργια πρωτότυπα εργαλεία για να επιτύχουν τον χειρισμό των αόρατων σε γυμνό μάτι δειγμάτων. Εκτεταμένη έρευνα λαμβάνει χώρα για τη σχεδίαση και κατασκευή μικροεργαλείων προσαρμοσμένων πάνω σε μικρορομποτικά συστήματα. Η μελέτη της κινητικής και δυναμικής των συστημάτων αυτών αποτελεί σημαντικό μέρος της έρευνας. Επιπρόσθετα, αυξάνει η ανάγκη για τον πλήρη έλεγχο της κίνησής τους. Η μελέτη και σχεδίαση συστημάτων κλειστού βρόχου ελέγχου θέσης είναι μέρος της έρευνας για την ανάπτυξη των μικρορομποτικών συστημάτων. Ο προσδιορισμός και η ανάδραση της θέσης του συστήματος είναι απαραίτητη διαδικασία για τον έλεγχό του.



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Ευχαριστίες.....	7
Πρόλογος.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Πίνακας Πινάκων.....	15
Πίνακας Συντμήσεων.....	17
Πίνακας Εικόνων.....	19
Πίνακας Συμβόλων.....	21
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>23</b>
1.1. Σκοπός Εργασίας.....	23
1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	23
1.3. Δομή Εργασίας.....	25
<b>2. Τεχνολογία λήψης εικόνων με οπτικό μικροσκόπιο.....</b>	<b>27</b>
2.1. Εισαγωγή.....	27
2.1.1. Οπτική εικόνα (optical image).....	28
2.1.2. Συνεχής εικόνα (continuous image).....	28
2.1.3. Ψηφιακή εικόνα (digital image).....	28
2.1.4. Προβαλλόμενη εικόνα (displayed image).....	29
2.2. Μικροσκόπια.....	29
2.2.1. Οπτικά συστήματα περιορισμένης διάθλασης.....	33
2.2.2. Διακριτική ικανότητα.....	38
2.2.3. Βαθμονόμηση.....	42
2.3. Τεχνολογίες Αισθητήρων.....	43
2.3.1. Στοιχεία θεωρίας φωτός.....	44
2.3.2. Συλλογή και συσσώρευση φορτίου.....	45
2.3.3. Σάρωση της μήτρας των εικονοστοιχείων.....	46
2.3.4. Εντοπισμός φορτίου.....	48
2.3.5. Αισθητήρες CCD.....	49
2.3.6. Σύγκριση αισθητήρων.....	53
<b>3. Πειραματική διάταξη.....</b>	<b>55</b>
3.1. Μικρορομποτική πλατφόρμα και μικροβελόνα.....	56
3.2. Απαιτήσεις σχεδιασμού.....	57
3.3. Βάση και εξαρτήματα στήριξης.....	59
3.4. Μικροσκόπιο.....	60

3.4.1. Αντικειμενικός φακός .....	61
3.5. Κάμερα .....	63
3.6. Πηγή φωτός .....	65
3.7. Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου μικροσκοπίου.....	67
<b>4. Επεξεργασία και Ανάλυση Εικόνας .....</b>	<b>69</b>
4.1. Μέθοδος προσδιορισμού ακμών .....	69
4.1.1. Ακμές.....	69
4.1.2. Μοντέλα Ακμών .....	70
4.1.3. Προσδιορισμός Ακμών .....	71
4.1.4. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	72
4.2. Τεχνική ανεύρεσης γραμμών.....	73
4.2.1. Μετασχηματισμός Hough.....	73
4.2.2. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	76
4.3. Τεχνική ανεύρεσης κύκλων .....	79
4.3.1. Κυκλικός μετασχηματισμός Hough .....	79
4.3.2. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	81
<b>5. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου .....</b>	<b>83</b>
5.1. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου.....	83
5.1.1. Διεργασίες πραγματικού χρόνου.....	84
5.1.2. Χρονοδρομολόγηση διεργασιών (scheduling).....	84
5.1.3. Εξυπηρέτηση διακοπών (interrupts) .....	84
5.1.4. Επικοινωνία μεταξύ διεργασιών.....	85
5.1.5. Συγχρονισμός.....	85
5.1.6. Διαχείριση μνήμης .....	86
5.2. Υπάρχοντα Πρότυπα Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου.....	86
5.2.1. POSIX .....	86
5.2.2. Unix98 .....	87
5.2.3. EL/IX .....	87
5.2.4. μΙTRON.....	88
5.2.5. OSEK.....	88
5.2.6. Προδιαγραφές πραγματικού χρόνου για Java.....	88
5.2.7. Ada 95.....	89
5.2.8. CORBA .....	89
5.3. Υπάρχοντα Λειτουργικά Συστήματα .....	89
5.3.1. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου .....	89
5.3.2. Λειτουργικά συστήματα γενικής χρήσης.....	91
5.4. Ο πυρήνας Πραγματικού Χρόνου της <i>MathWorks</i> .....	95

5.4.1. Περιβάλλον πραγματικού χρόνου για Windows (RT Windows Target).....	95
5.4.2. Περιβάλλον πραγματικού χρόνου για PC (RT xPC Target).....	96
<b>6. Περιγραφή εφαρμογής .....</b>	<b>99</b>
6.1. Περιγραφή αλγορίθμου .....	99
6.2. Υπομονάδα κτήσης της εικόνας .....	100
6.3. Υπομονάδα επεξεργασίας της εικόνας .....	100
6.4. Υπομονάδα κτήσης χρόνου .....	102
6.5. Υπομονάδα μετατροπής .....	102
6.6. Υπομονάδα αποστολής αποτελεσμάτων.....	103
<b>7. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>105</b>
7.1. Συμπεράσματα .....	105
7.2. Μελλοντική Εργασία.....	106
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>109</b>
<b>Παράρτημα Α .....</b>	<b>113</b>
<b>Παράρτημα Β .....</b>	<b>122</b>
<b>Παράρτημα Γ.....</b>	<b>126</b>



## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών αισθητήρων CCD και CMOS. ....	53
Πίνακας 2.2: Σύγκριση απόδοσης αισθητήρων CCD και CMOS.....	54
Πίνακας 3.1: Φυσικά χαρακτηριστικά του μικρορομπότ.....	57
Πίνακας 3.2: Επιθυμητά χαρακτηριστικά κάμερας.....	59
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά αντικειμενικού φακού. ....	62
Πίνακας 3.4: Διαστάσεις αντικειμενικού φακού. ....	63
Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά κάμερας. ....	65
Πίνακας 3.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής φωτός. ....	66
Πίνακας 4.1: Τελεστές προσδιορισμού ακμών. ....	72
Πίνακας 6.1: Μορφοποίηση πακέτου δεδομένων .....	103





## Πίνακας Συντμήσεων

NA	Numerical Aperture (Αριθμητικό Ανοιγμα)
DOF	Degree Of Freedom (Βαθμός Ελευθερίας)
PSF	Point Spread Function (Σημειακή Συνάρτηση Ανάπτυξης)
OTF	Optical Transfer Function (Οπτική Συνάρτηση Μεταφοράς)
DOV	Depth Of View (Βάθος Πεδίου)
FOV	Field of View (Εύρος Πεδίου)
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
MOS	Metal Oxide Semiconductor
IC	Integrated Circuit (Ολοκληρωμένο Κύκλωμα)
fps	frame per second (καρέ ανά δευτερόλεπτο)
AC	Alternating Current (Εναλλασσόμενο Ρεύμα)
DC	Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)
POSIX	Portable Operating Systems Interface
FIFO	First In First Out
NPCS	Nonpreemptive Critical Section
CPP	Ceiling-Priority Protocol
DPC	Deferred Procedure Call
RT-FIFO	Real Time First In First Out
PC	Personal Computer (Προσωπικός Υπολογιστής)
I/O	Input/Output (Είσοδος/Εξοδος)
A/D	Analog/Digital (Αναλογικός/Ψηφιακός Μετατροπέας)
D/A	Digital/Analog (Ψηφιακός/Αναλογικός Μετατροπέας)



## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1: Οι τέσσερις τύποι εικόνας της ψηφιακής μικροσκοπίας [32].....	27
Εικόνα 2.2: Ένα απλό οπτικό σύστημα αποτελούμενο από έναν απλό φακό [32]. .....	30
Εικόνα 2.3: Τα τρία μέρη ενός λεπτού φακού.....	33
Εικόνα 2.4: Σφαιρική εκτροπή.....	34
Εικόνα 2.5: Μη συμφασική συνάρτηση psf [32].....	35
Εικόνα 2.6: Μη συμφασική συνάρτηση OTF [32]. .....	36
Εικόνα 2.7: Συμφασική συνάρτηση psf [32].....	37
Εικόνα 2.8: Συμφασική συνάρτηση OTF [32]. .....	38
Εικόνα 2.9: Μη συμφασικές συναρτήσεις psf και OTF [32].....	39
Εικόνα 2.10: Το κριτήριο διακριτικής ικανότητας του Rayleigh [32].....	40
Εικόνα 2.11: Χαρακτηριστικά μεγέθη οπτικού συστήματος.....	41
Εικόνα 2.12: Αισθητήρας στερεάς κατάστασης [12].....	43
Εικόνα 2.13: Απορρόφηση του φωτός σε πυρίτιο. Συντελεστής απορρόφησης (αριστερά), ένταση σε σχέση με το βάθος πρόσπτωσης (δεξιά) [12]. .....	45
Εικόνα 2.14: Ανάστροφα πολωμένη φωτοδίοδος και το διάγραμμα του ενεργειακού χάσματος [12]. .....	45
Εικόνα 2.15: Ανάστροφα πολωμένη δίοδος MOS και το διάγραμμα του ενεργειακού χάσματος [12]. .....	46
Εικόνα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση της σάρωσης σε αισθητήρα CCD (αριστερά) και CMOS (δεξιά) [12].....	47
Εικόνα 2.17: Χρονισμός αισθητήρων CCD (αριστερά) και CMOS (δεξιά) [12]. .....	47
Εικόνα 2.18: Περιπλεκόμενη (αριστερά) και προοδευτική σάρωση (δεξιά) [12]. .....	48
Εικόνα 2.19: Εντοπισμός φορτίου [12]. .....	48
Εικόνα 2.20: Πυκνωτής MOS [12]. .....	50
Εικόνα 2.21: CCD δύο-φάσεων. (a) τομή, (b) δυναμικού καναλιού μετά την εφαρμογή παλμών δύο φάσεων (c) $\Phi_1$ και $\Phi_2$ [12].....	51
Εικόνα 2.22: CCD τεσσάρων-φάσεων. (a) τομή, (b) δυναμικού καναλιού μετά την εφαρμογή παλμού τεσσάρων φάσεων (c) $\Phi_1$ , $\Phi_2$ , $\Phi_3$ και $\Phi_4$ [12]. .....	51
Εικόνα 2.23: Τρεις τύποι αισθητήρων CCD [12].....	52
Εικόνα 3.1: Πειραματική διάταξη. ....	55
Εικόνα 3.2: Το μικρορομπότ. ....	56
Εικόνα 3.3: Η μικροβελόνα πριν τη τοποθέτηση.....	56
Εικόνα 3.4: Αποτελέσματα εξομοίωσης. (a) Επιτάχυνση. (b) Ταχύτητα. (c) Θέση στον x-άξονα ως συνάρτηση της επενεργούμενης γωνίας [26].....	57

Εικόνα 3.5: Η βάση της πειραματικής διάταξης. ....	59
Εικόνα 3.6: Το μικροσκόπιο της Edmund Optics (16X Precision Zoom Lens). ....	60
Εικόνα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση του μικροσκοπίου. ....	61
Εικόνα 3.8: Ο αντικειμενικός φακός LWD 5X της Mitutoyo. ....	62
Εικόνα 3.9: Αρχή λειτουργίας ενός αποχρωματικού φακού. ....	62
Εικόνα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα του αντικειμενικού φακού. ....	63
Εικόνα 3.11: Η κάμερα Marlin F-146B της Allied Vision Technologies GMBH. ....	64
Εικόνα 3.12: Οπίσθια και μπροστινή όψη της κάμερας. ....	64
Εικόνα 3.13: Διαστάσεις κάμερας. ....	64
Εικόνα 3.14: Η πηγή φωτός FOI-21DC της εταιρείας TechniQuip. ....	66
Εικόνα 3.15: Διαστάσεις της συσκευής. ....	66
Εικόνα 3.16: Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μικροσκοπίου. ....	67
Εικόνα 3.17: Ρυθμιστές ταχύτητας και διεύθυνσης κινητήρων μικροσκοπίου. ....	68
Εικόνα 3.18: Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας συσκευής ελέγχου. ....	68
Εικόνα 4.1: Ιδανική (α) και Μη Ιδανική (β) Ακμή. ....	69
Εικόνα 4.2: Μονοδιάστατα συνεχή μοντέλα ακμών. ....	70
Εικόνα 4.3: Γενική μήτρα μάσκας [3x3]. ....	72
Εικόνα 4.4: Αρχική εικόνα της μικροβελόνας. ....	72
Εικόνα 4.5: Εφαρμογή των τελεστών (α) Sobel, (β) Prewitt, (γ) Roberts και (δ) Canny. ...	73
Εικόνα 4.6: $xy$ - επίπεδο (α) και $ab$ - επίπεδο (β). ....	74
Εικόνα 4.7: Διαίρεση του <i>παραμετρικού χώρου</i> για χρήση στο <i>μετασχηματισμό Hough</i> . ...	75
Εικόνα 4.8: $xy$ - επίπεδο (α) και $\rho\theta$ - επίπεδο (β). ....	76
Εικόνα 4.9: Οι ακμές της μικροβελόνας (α) και ο μετασχηματισμός Hough (β). ....	77
Εικόνα 4.10: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για $\theta=0,5^\circ$ . ....	78
Εικόνα 4.11: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για $\theta=1^\circ$ . ....	78
Εικόνα 4.12: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για $\theta=2^\circ$ . ....	79
Εικόνα 4.13: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για $\theta=4^\circ$ . ....	79
Εικόνα 4.14: $xy$ - επίπεδο (α) και $ab$ - επίπεδο (β). ....	80
Εικόνα 4.15: Κυκλικοί μετασχηματισμοί Hough μικροβελόνας για διαφορετικά $r$ (15, 20, 25, 30). ....	82
Εικόνα 5.1: Σύστημα Πραγματικού Χρόνου. ....	83
Εικόνα 5.2: Σύνδεση PC πραγματικού χρόνου (target) με PC ανάπτυξης εφαρμογής (host) ....	97
Εικόνα 6.1: Λογικό διάγραμμα εφαρμογής. ....	99
Εικόνα 6.2: Ρύθμιση παραμέτρων κάμερας. ....	101
Εικόνα 6.3: Ρύθμιση παραμέτρων στοιχείου <i>Edge Detection</i> . ....	102
Εικόνα 6.4: Ρύθμιση στοιχείου <i>Byte Pack</i> . ....	104

## Πίνακας Συμβόλων

$f$  : εστιακή απόσταση

$d_i$  : απόσταση αντικειμένου από φακό

$d_s$  : απόσταση εικόνας (ειδώλου) από φακό

$P$  : ισχύς οπτικού φακού

$M$  : μεγέθυνση οπτικού συστήματος

$NA$  : αριθμητικό άνοιγμα

$n$  : δείκτης διάθλασης

$\alpha$  : ήμισυ γωνίας ακτίνων εισερχόμενων σε αντικειμενικό φακό

$I$  : ένταση φωτός

$psf$  : σημειακή συνάρτηση ανάπτυξης μη συμφασικού φωτός

$H(q)$  : οπτική συνάρτηση μεταφοράς (OTF) μη συμφασικού φωτός

$f_c$  : οπτική συχνότητα αποκοπής

$psf$  : σημειακή συνάρτηση ανάπτυξης συμφασικού φωτός

$H(q)$  : οπτική συνάρτηση μεταφοράς (OTF) συμφασικού φωτός

$r_{Abbe}$  : απόσταση Abbe

$r_{Airy}$  : ακτίνα του δίσκου Airy

$\delta_{Rayleigh}$  : απόσταση Rayleigh

$\delta x$  : διακριτική ικανότητα μέτρησης

$E_{photon}$  : ενέργεια φωτονίου

$E_g$  : ενεργειακό χάσμα

$\Phi$  : φωτεινή ροή

$Q_{sig}$  : φορτίο σήματος

$\Delta V_{FD}$  : μεταβολή δυναμικού

$\Delta V_{OUT}$  : μεταβολή τάσης εξόδου

$A_V$  : ενίσχυση τάσης

C.G. : ενίσχυση μετατροπής

C.G.<sub>output</sub> : ενίσχυση μετατροπής εξόδου

MP : μονάδα μέτρησης εικόνας (megapixel)

K : μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας

*watts* : μονάδα μέτρησης ισχύος

*Hz* : μονάδα μέτρησης συχνότητας

*V* : μονάδα μέτρησης τάσης

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών και αποτελεί μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Σκοπός της εργασίας είναι ο έλεγχος θέσης μικροβελόνας η οποία είναι προσαρμοσμένη πάνω σε μικρορομποτική πλατφόρμα. Το μικρορομποτό έχει κυλινδρικό σχήμα και οι διαστάσεις του φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Χρησιμοποιεί δύο έκκεντρα μικρομοτέρ και η κίνησή του πραγματοποιείται ελεύθερα στο επίπεδο. Η μέγιστη ταχύτητά του είναι  $1,5 \text{ mm/s}$ . Ο έλεγχος που πραγματοποιείται μέχρι τώρα είναι ανοικτού βρόχου, με αποτέλεσμα την ύπαρξη σφάλματος κατά την κίνησή του. Για να μπορέσουμε να κλείσουμε το βρόχο ελέγχου θα χρειαστούμε πληροφορία για τη θέση της μικροβελόνας  $(x, y)$  και τον προσανατολισμό της  $(\theta)$ . Στην εργασία περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να επιτευχθεί η ανάδραση θέσης για την οδήγηση της μικροβελόνας.

Ο εντοπισμός και η σύλληψη της μικροβελόνας καθώς και η εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας (θέση, γωνία) απαιτούν το κατάλληλο σύστημα το οποίο θα μπορεί να ανιχνεύει τις μικροκινήσεις με ικανοποιητική ακρίβεια. Για να επιτευχθεί αυτό θα χρησιμοποιηθεί σύστημα οπτικού μικροσκοπίου και ψηφιακής βιντεοκάμερας. Το οπτικό μικροσκόπιο τοποθετήθηκε πάνω από το χώρο κίνησης του μικρορομποτικού συστήματος με τρόπο έτσι ώστε να επιβλέπει την κίνησή του στα όρια που έχουμε θέσει.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε προϋποθέτει την ικανοποίηση παραμέτρων απαραίτητες για την επιτυχία της. Πρώτον, η επιλογή του μικροσκοπίου, του αντικειμενικού φακού και του αισθητήρα της κάμερας, έτσι ώστε να καλύπτεται η περιοχή κίνησης του συστήματος, να λαμβάνονται με ικανοποιητικό ρυθμό τα στιγμιότυπα και να αποστέλλονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με ικανοποιητική ταχύτητα. Δεύτερον, η μέθοδος ψηφιακής επεξεργασίας έτσι ώστε τα αποτελέσματα να παρέχονται γρήγορα σε πραγματικό χρόνο. Τρίτο, το περιβάλλον πραγματικού χρόνου, το οποίο θα είναι υπεύθυνο για το συντονισμό του λογισμικού επεξεργασίας.

## 1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αυξανόμενη σμίκρυνση των μικρορομποτικών συστημάτων και η χρήση τους σε κρίσιμες εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος της θέσης τους οδήγησε την έρευνα

στην ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων που να υλοποιούν αυτή την απαίτηση. Τα τελευταία χρόνια άρχισαν να χρησιμοποιούνται οπτικοί αισθητήρες για την ανάδραση θέσης και τη δημιουργία κλειστού βρόχου ελέγχου. Η μέθοδος αυτή ορίστηκε ως οπτική οδήγηση κλειστού βρόχου μέσω ανάδρασης θέσης (visual servoing).

Η εργασία αυτή βασίστηκε στην ήδη υπάρχουσα γνώση που αποκτήθηκε στο εργαστήριο της Σχολής από τη μελέτη και κατασκευή μικρορομποτικών συστημάτων. Ένα τέτοιο σύστημα περιγράφεται στην εργασία [23] όπου και αναλύεται ο τρόπος ελέγχου του. Στην εργασία των Π. Βαρθολομαίου και Ε. Παπαδόπουλου μελετήθηκε η κινηματική ενός νέου τρόπου κίνησης βασισμένης σε δύο έκκεντρους μικροκινητήρες [27]. Το μικρορομπότ σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία με επιτυχία. Η εργασία δεν περιλαμβάνει ανάδραση θέσης ούτε και άλλη διαδικασία ελέγχου. Το πρωτότυπο πείραμα βασίστηκε στην αποθήκευση της κίνησης και στην μετέπειτα επεξεργασία της [24]. Στην επόμενη εργασία [25] μελετήθηκαν οι κεντρομόλες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο ίδιο μικρορομποτικό σύστημα και η εφαρμογή τους σε μικροχειρισμούς. Στην εργασία [26] συνεχίζεται η ανάλυση των παραγόμενων κεντρομόλων δυνάμεων και η επίδρασή τους σε εφαρμογές μικροχειρισμών. Μια πρώτη πιθανή εφαρμογή της μικρορομποτικής πλατφόρμας σε απτικό εργαλείο εξετάζεται στην εργασία των Κ. Βλάχου, Π. Βαρθολομαίου και Ε. Παπαδόπουλου [28]. Στις προηγούμενες εργασίες χρησιμοποιήθηκε ανοικτός βρόχος ελέγχου ο οποίος δεν ικανοποιεί τις ανάγκες για ακρίβεια στους μικροχειρισμούς. Η σχεδίαση κλειστού βρόχου ελέγχου για έλεγχο της άκρης μικροβελόνας προσαρμοσμένης πάνω στο μικρορομπότ επιτυγχάνεται με την ανάδραση θέσης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Στην εργασία των S. Ralis, B. Vikramaditya και B. Nelson μελετάται μια νέα προσέγγιση οπτικής οδήγησης μικροχειρισμών σε τρεις διαστάσεις [18], ενώ στην εργασία των B. Nelson, N. Παπανικολόπουλου και P. Khosla εξετάζονται αλγόριθμοι επίλυσης της δυναμικής των αισθητήρων σε συστήματα συναρμολόγησης [13]. Η παρακολούθηση της κίνησης ενός ρομπότ είναι θέμα της εργασίας των P. Hong, H. Sahli, E. Colon και Y. Baudoïn [6]. Η οπτική οδήγηση μικρορομποτικών συστημάτων χρησιμοποιεί σύστημα μικροσκοπίου και βιντεοκάμερας για να επιτύχει την ανάδραση. Στην εργασία των T. Sievens και S. Fatikow αναλύεται η παρακολούθηση της κίνησης ενός μικρορομπότ το οποίο κινείται μέσα σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [22]. Η συναρμολόγηση μικροαντικειμένων απαιτεί μικροεργαλεία τα οποία θα είναι σε θέση μέσω μικροχειρισμών να εκτελούν εργασίες με μεγάλη ακρίβεια. Η οπτική οδήγηση τέτοιων μικροεργαλείων μπορεί να υλοποιηθεί με την βοήθεια τεχνικής αναγνώρισης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του [11].

Στα πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος *MiCRoN* προτάθηκε αλγόριθμος αναγνώρισης μικροαντικειμένων με την χρήση μικροσκοπίου σε περιβάλλον



πραγματικού χρόνου [30]. Η χρήση φίλτρων προτείνεται στην εργασία των P. Li, T. Zhang και A. Pece [16] ενώ η παρακολούθηση του σχήματος του υπό παρακολούθηση αντικειμένου εξετάζεται στην εργασία των P. Li, F. Chaumette και O. Tahri [15]. Λεπτομερή παρουσίαση του μικροσκοπίου για χρήση οπτικής οδήγησης υπάρχει στο βιβλίο των M. Born και E. Wolf [2]. Επίσης το ίδιο θέμα πραγματεύεται και το βιβλίο του R. Wayne [29], ενώ το βιβλίο των Q. Wu, F. Merchant και K. Castleman περιέχει και θέματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων προερχόμενες από μικροσκόπιο [32].

Για την επεξεργασία εικόνας υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφικών αναφορών. Το 2001 κυκλοφόρησε η τρίτη έκδοση του βιβλίου W. Pratt «Digital Image Processing» στο οποίο αναλύονταν θέματα ψηφιοποίησης και επεξεργασίας εικόνων [17] ενώ με το ίδιο περιεχόμενο κυκλοφόρησε το 2002 η δεύτερη έκδοση του βιβλίου των C. Gonzalez και E. Woods. Το 1980 κυκλοφόρησε η εργασία του D. Ballard όπου γενικεύεται η χρήση του μετασχηματισμού Hough για την ανίχνευση τυχαίων σχημάτων [1]. Η εργασία των H. Wolfson και I. Ριγούτσου πραγματεύεται μια τεχνική ταυτοποίησης δειγμάτων συγκρίσιμα με αυτά μιας βάσης δεδομένων [31]. Ενδιαφέρουσα είναι επίσης και η εργασία των M. Greenspan, L. Shang και P. Jasiobedzki όπου πραγματεύεται την παρακολούθηση τροχιάς κινούμενων αντικειμένων με τη βοήθεια του φραγμένου μετασχηματισμού Hough [5]. Πληροφορίες για το μετασχηματισμό Hough μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα [33].

Σχετικά με τους οπτικούς αισθητήρες έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες τα τελευταία χρόνια. Αρκετά ενδιαφέρον είναι το βιβλίο του J. Nakamura «Image Sensors and signal processing for digital still cameras» το οποίο κυκλοφόρησε το 2006 [12]. Επίσης το 2007 κυκλοφόρησε η πέμπτη έκδοση του «The image processing handbook» του J. Russ [19]. Εκτεταμένες πληροφορίες για την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας μέσω μικροσκοπίου υπάρχουν στο βιβλίο «Microscope Image Processing» των Q. Wu, F. Merchant και K. Castleman [32].

Για το θέμα των λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου το βιβλίο «Real-Time Systems» των E. Olderog και H. Dierks πραγματεύεται το πρόβλημα του σχεδιασμού και υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος [14]. Στην εργασία αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι βασισμένοι στο Simulink και το περιβάλλον πραγματικού χρόνου (Real Time Workshop). Πληροφορίες και βοηθητικό υλικό μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα της εταιρείας κατασκευής του Matlab [34].

### 1.3. Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε τρεις βασικές ενότητες, οι οποίες είναι (α) η επιλογή

του μικροσκοπικού συστήματος, (β) η επεξεργασία της εικόνας και (γ) η μεταφορά της εφαρμογής σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται στοιχεία από τη θεωρία των οπτικών μικροσκοπιών και της τεχνολογίας λήψης εικόνων. Ποια είναι η διαδρομή της εικόνας από τον πραγματικό κόσμο μέχρι την τεχνητή αναπαραγωγή της, δηλαδή η δισδιάστατη προβολή του τρισδιάστατου κόσμου μας. Ποια είναι η επίδραση του φωτός και πως χρησιμοποιείται στο οπτικό μικροσκόπιο. Από τι αποτελείται το οπτικό μικροσκόπιο και ποια χαρακτηριστικά του έχει σημασία στην εφαρμογή μας. Επίσης αναφέρονται στοιχεία από την θεωρία των οπτικών αισθητήρων, οι εφαρμογές τους καθώς συγκριτική παράθεση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την επιβεβαίωση της μεθόδου ανάδρασης της θέσης της μικροβελόνας (συντεταγμένες στο επίπεδο και γωνία) κατά την διάρκεια της κίνησής της. Αναφέρονται με λεπτομέρεια τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, το μικροσκόπιο, ο αντικειμενικός φακός, η βάση και τα εξαρτήματα στήριξης, η κάμερα, η πηγή φωτός και το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μικροσκοπίου.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι μέθοδοι επεξεργασίας της εικόνας που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Η μέθοδος μείωσης της πληροφορίας, η μέθοδος προσδιορισμού ακμών, οι τεχνικές ανεύρεσης γραμμών και κύκλων (μετασχηματισμοί Hough),

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται γενικά χαρακτηριστικά των λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου ενώ ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο εργαλείο πραγματικού χρόνου του MATLAB, το οποίο χρησιμοποιείται στην εργασία.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 7 υπάρχουν τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία καθώς και το τι πρέπει να γίνει σε μελλοντική εργασία έτσι ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη απόδοση των επιμέρους τμημάτων του συστήματος.

Τέλος στο παράρτημα παρατίθενται η σχεδίαση της εφαρμογής σε περιβάλλον MATLAB καθώς και τα κομμάτια του πηγαίου κώδικα που υλοποιήθηκαν.

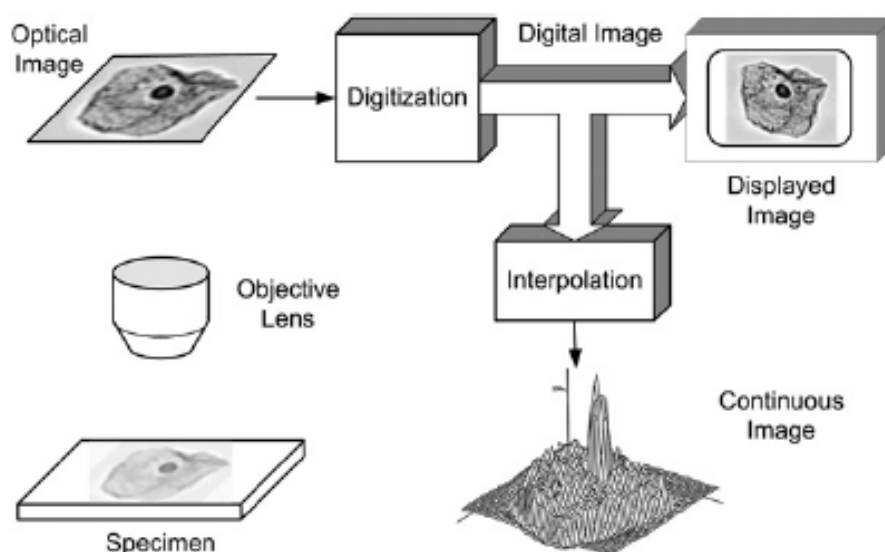
## 2. Τεχνολογία λήψης εικόνων με οπτικό μικροσκόπιο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται στοιχεία για την χρήση του μικροσκοπίου σε εφαρμογές ανάκτησης και επεξεργασίας εικόνας, όπως η παρούσα εργασία. Η επιλογή των πληροφοριών που παρουσιάζονται έγινε με κριτήριο τη στενότητα του χώρου μιας μεταπτυχιακής εργασίας αλλά και την ανάγκη για την κατανόησή της.

Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται την διαδρομή της εικόνας από τον πραγματικό κόσμο μέχρι την τελική επεξεργασία της, την επίδραση του φωτός στην σύλληψη της εικόνας, το μικροσκόπιο και τους οπτικούς φακούς που χρησιμοποιεί για να μεγεθύνει την εικόνα, τον αντικειμενικό φακό και τέλος το ψηφιακό σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης της εικόνας.

### 2.1. Εισαγωγή

Η διαδρομή που ακολουθεί μια εικόνα, από τον πραγματικό κόσμο μέχρι την τελική επεξεργασία της απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1. Στην πραγματικότητα έχουμε στην διάθεσή μας τέσσερις διαφορετικούς τύπους εικόνας, όπου καθεμιά από αυτές αναπαριστά το αντικείμενο (specimen) που βρίσκεται μπροστά από τον αντικειμενικό φακό (objective lens). Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική για την σχεδίαση



Εικόνα 2.1: Οι τέσσερις τύποι εικόνας της ψηφιακής μικροσκοπίας [32].

ενός μικροσκοπικού συστήματος επεξεργασίας εικόνας με δεδομένες απαιτήσεις. Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικότερα τα τέσσερα είδη εικόνας (optical, continuous, digital και displayed image).

### 2.1.1. Οπτική εικόνα (optical image)

Τα οπτικά στοιχεία του μικροσκοπίου είναι υπεύθυνα για την δημιουργία της οπτικής εικόνας του πραγματικού αντικειμένου πάνω στον αισθητήρα εικόνας. Η *οπτική εικόνα* είναι μια συνεχής κατανομή της φωτεινής έντασης σε μια επιφάνεια δύο διαστάσεων. Περιέχει πληροφορία για το αντικείμενο αλλά δεν είναι μια πλήρης απεικόνισή του. Στη γενική περίπτωση είναι η δισδιάστατη απεικόνιση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου και υπόκειται σε περιορισμούς σχετικά με την ακρίβεια της ανάλυσής του αλλά και το θόρυβο που εισάγεται.

### 2.1.2. Συνεχής εικόνα (continuous image)

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η *οπτική εικόνα* περιγράφεται από μία συνεχή συνάρτηση δύο χωρικών μεταβλητών. Αυτό σημαίνει ότι οι συντεταγμένες  $(x,y)$  είναι πραγματικοί αριθμοί και η ένταση του φωτός σε μία δεδομένη χωρική θέση είναι θετικός πραγματικός αριθμός. Την μαθηματική αναπαράσταση που περιγράψαμε ονομάζουμε *συνεχή εικόνα*. Πιο συγκεκριμένα είναι η αναλυτική συνάρτηση δύο πραγματικών μεταβλητών. Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε μαθηματικά εργαλεία για την ανάλυση και την σχεδίαση αλγορίθμων επεξεργασίας.

### 2.1.3. Ψηφιακή εικόνα (digital image)

Η *ψηφιακή εικόνα* δημιουργείται από τη ψηφιοποίηση της *συνεχούς εικόνας*. Η συνεχής εικόνα κβαντοποιείται με συγκεκριμένη δειγματοληψία και το αποτέλεσμα είναι μία μήτρα με θετικούς ακέραιους αριθμούς, οι οποίοι αντιστοιχούν στην ένταση του φωτός ενώ η θέση τους  $(m,n)$  αντιστοιχεί στις συντεταγμένες της εικόνας. Επίσης στην εικόνα εισάγεται τυχαίος θόρυβος. Φυσικά, λαθεμένη διαδικασία κατά την ψηφιοποίηση της μπορεί να την καταστρέψει ή και να την κάνει μερικώς άχρηστη για αναλυτική επεξεργασία. Δηλαδή, η ψηφιακή εικόνα μπορεί να μην πιστή απεικόνιση της οπτικής

εικόνας και ουσιαστικά του αντικειμένου. Επιθυμητή πληροφορία μπορεί να χαθεί κατά την ψηφιοποίηση και έτσι να αποτύχει όλη η εργασία στο σύνολό της. Από την άλλη, σωστή διαδικασία οδηγεί σε αριθμητική απεικόνιση του αντικειμένου η οποία είναι η ανάκλαση της αρχικής χωρικής κατανομής του φωτός.

Αυτό που στην πραγματικότητα επεξεργαζόμαστε σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι φυσικά η *ψηφιακή εικόνα*. Όμως η μήτρα των δειγματοληπτούμενων εικονοστοιχείων της *οπτικής εικόνας* είναι μια σχετική απεικόνιση του αντικειμένου. Η σωστή απεικόνισή του, δηλαδή η εξασφάλιση της μεταφοράς της πληροφορίας από την *οπτική εικόνα* είναι ευθύνη του χρήστη. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει πως πρέπει να μεταφερθεί όλη η πληροφορία, αλλά μόνο η χρήσιμη.

Έχουμε σημειώσει ότι ψηφιοποίηση σημαίνει την παραγωγή αντίστοιχης *ψηφιακής εικόνας* από την υπάρχουσα *οπτική εικόνα*. Από την άλλη, για να μεταβούμε από μια διακριτή σε μια συνεχή εικόνα, χρησιμοποιούμε την διαδικασία της *παρεμβολής (interpolation)*. Παρεμβάλλοντας μια *ψηφιακή εικόνα* μπορούμε να δημιουργήσουμε μια προσεγγιστική εικόνα της *συνεχούς εικόνας* (αναλυτική συνάρτηση) η οποία αντιστοιχεί στην αρχική *οπτική εικόνα*. Εάν όλα πάνε καλά, τότε η *συνεχής εικόνα*, η οποία προκύπτει από την παρεμβολή, θα είναι πιστή απεικόνιση της *οπτικής εικόνας*.

#### 2.1.4. Προβαλλόμενη εικόνα (displayed image)

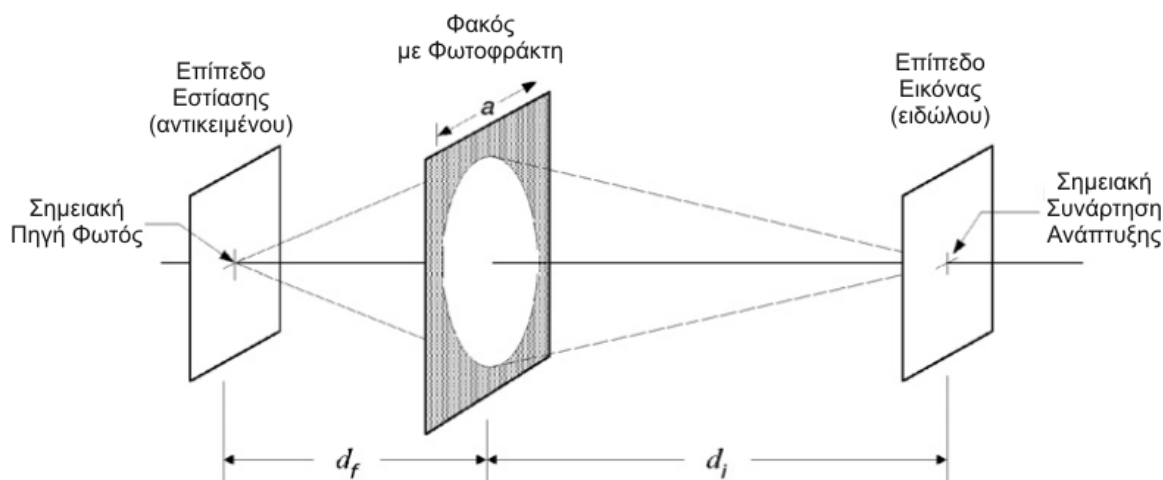
Τελικά, προτού εμφανίσουμε το αρχικό αντικείμενο ξανά, πρέπει να μετατρέψουμε την ψηφιακή εικόνα σε κατάλληλη μορφή. Το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να δει ή να ερμηνεύσει μια εικόνα η οποία υπάρχει σε ψηφιακή μορφή. Μια ψηφιακή εικόνα πρέπει να μετατραπεί σε οπτική μορφή πριν μπορέσουμε να τη δούμε. Η διαδικασία προβολής μιας εικόνας σε μια οθόνη είναι επίσης μια μορφή *παρεμβολής*, υλοποιημένη από το υλικό του συστήματος. Η οθόνη θα πρέπει να είναι ικανή να *παρεμβάλλει* την ψηφιακή εικόνα με τέτοιο τρόπο ώστε να διαφυλάξει την χρήσιμη πληροφορία.

## 2.2. Μικροσκόπια

Στο μέρος αυτό θα ασχοληθούμε με το σύστημα φακών που δημιουργεί την οπτική εικόνα. Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται ένα απλό οπτικό σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν απλό φακό. Στην πιο απλή περίπτωση ο φακός είναι ένα λεπτό κομμάτι γυαλιού, κυρτό και από τις δύο σφαιρικές του επιφάνειες. Οι ακτίνες του φωτός στο γυαλί έχουν μικρότερη ταχύτητα διάχυσης σε σχέση με τον αέρα ή το κενό. Επειδή η απόσταση που έχουν να διανύσουν οι ακτίνες πρέπει να ταξιδέψουν από παχύτερα σε λεπτότερα μέρη

του φακού, οι ακτίνες φωτός εκτρέπονται κατά μήκος του οπτικού άξονα σύμφωνα με το φαινόμενο της *διάθλασης*.

Το αποκλίνον σφαιρικό κύμα του εκπεμπόμενου φωτός από μία σημειακή πηγή στο επίπεδο του αντικειμένου διαθλάται από ένα κυρτό φακό και παράγει ένα συγκλίνον σφαιρικό κύμα. Το φως συγκλίνει και παράγει ένα μικρό σημείο στο επίπεδο της εικόνας. Η μορφή αυτού του σημείου καλείται *σημειακή συνάρτηση ανάπτυξης (point spread function – psf)*.



Εικόνα 2.2: Ένα απλό οπτικό σύστημα αποτελούμενο από έναν απλό φακό [32].

Η σημειακή συνάρτηση ανάπτυξης θα λάβει την μικρότερη δυνατή τιμή της όταν το σύστημα είναι σε κατάσταση εστίασης, δηλαδή όταν ισχύει:

$$\frac{1}{d_f} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

όπου  $f$  είναι η *εστιακή απόσταση* του φακού. Η Εξ. (2.1) είναι η *εξίσωση της οπτικής ανάκλασης*.

Η *εστιακή απόσταση* είναι μια εγγενής ιδιότητα του φακού. Είναι η απόσταση ανάμεσα στο φακό και σε κάποιο σημείο προς το επίπεδο της εικόνας όταν η σημειακή πηγή η οποία τοποθετείται στο άπειρο απεικονίζεται επικεντρωμένη σε αυτό το σημείο με ευκρίνεια, δηλαδή:

$$d_f = \infty \Rightarrow d_i = f \quad (2.2)$$

και συμμετρικά:

$$d_i = \infty \Rightarrow d_f = f \quad (2.3)$$

Η ισχύς ενός φακού,  $P$ , δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{1}{f} \quad (2.4)$$

όπου εάν η εστιακή απόσταση  $f$  είναι σε μέτρα τότε η ισχύς  $P$  είναι σε δίοπτρες. Εξ ορισμού, το *επίπεδο εστίασης* είναι εκείνο το επίπεδο από την πλευρά του αντικειμένου, όπου η σημειακή πηγή πάνω σε αυτό θα εστιαστεί στο επίπεδο της εικόνας (είδωλου) με ευκρίνεια, με δεδομένη την απόσταση  $d_i$ .

Εάν η σημειακή πηγή απομακρύνεται από την αρχική της θέση σε μία νέα θέση  $(x_0, y_0)$ , τότε και το είδωλο μετακινείται σε νέα θέση  $(x_i, y_i)$ . Τότε ισχύει:

$$x_i = -Mx_0 \quad y_i = -My_0 \quad (2.5)$$

όπου

$$M = -\frac{d_i}{d_f} \quad (2.6)$$

είναι η *μεγέθυνση* του συστήματος.

Συχνά ο αντικειμενικός φακός σχηματίζει το είδωλο απευθείας στον αισθητήρα, οπότε η διακριτική ικανότητα μέτρησης αυξάνεται από τον αισθητήρα στο αντικείμενο κατά ένα συντελεστή ο οποίος είναι ίσος της ενίσχυσης του αντικειμενικού φακού. Για παράδειγμα, εάν  $M = 100$  και το μέγεθος του εικονοστοιχείου του αισθητήρα είναι  $6,8 \mu m$ , τότε στο επίπεδο του αντικειμένου η διακριτική ικανότητα μέτρησης είναι  $6,8 \mu m / 100 = 68 nm$  (η έννοια *διακριτική ικανότητα μέτρησης* εξηγείται παρακάτω).

Οι Εξ. (2.1) και (2.6) μπορούν να μετασχηματιστούν και να δώσουν ένα σύνολο τύπων οι οποίοι είναι χρήσιμοι στην ανάλυση των οπτικών συστημάτων. Συγκεκριμένα:

$$f = \frac{d_i d_f}{d_i + d_f} = \frac{d_i}{M + 1} = d_f \frac{M}{M + 1} \quad (2.7)$$

$$d_i = \frac{fd_f}{d_f - f} = f(M + 1) \quad (2.8)$$

και

$$d_f = \frac{fd_i}{d_i - f} = f \frac{M + 1}{M} \quad (2.9)$$

Ένας πραγματικός αντικειμενικός φακός αποτελείται από ένα πολλαπλό σύστημα φακών, όμως συμπεριφέρεται όπως στην Εικόνα 2.2. Στα σύγχρονα οπτικά μικροσκόπια η απόσταση  $d_i$  είναι σταθερή και εξαρτάται από το μήκος του οπτικού σωλήνα του. Συνήθως το μηχανικό μήκος του σωλήνα, η απόσταση δηλαδή από τον αντικειμενικό φακό μέχρι το επίπεδο του ειδώλου, είναι  $160\text{mm}$ . Όμως, ανάλογα με τον κατασκευαστή φθάνει έως τα  $190\text{mm}$  ή και τα  $210\text{mm}$ . Σε κάθε περίπτωση, ισχύει  $d_i \gg d_f$  και  $M \gg 1$ , εκτός κι αν ο αντικειμενικός φακός που χρησιμοποιείται είναι χαμηλής ισχύος ( $< 10\times$ ).

Συνήθως ένας αντικειμενικός φακός χαρακτηρίζεται όχι από την εστιακή του απόσταση και τη διάμετρο του φωτοφράκτη, αλλά από την ενίσχυσή του (Εξ. (2.6)) και το αριθμητικό του άνοιγμα (*numerical aperture*),  $NA$ . Οι κατασκευαστές μικροσκοπίων συνήθως χαράσσουν την ενίσχυση και το αριθμητικό άνοιγμα πάνω στον αντικειμενικό φακό, ενώ η εστιακή απόσταση και η διάμετρος του φωτοφράκτη χρησιμοποιούνται σπάνια. Το  $NA$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NA = n \sin \alpha \approx n(a / 2d_f) \approx n(a / 2f) \quad (2.10)$$

όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης του φωτός (αέρας, λάδι, κλπ) ανάμεσα στο αντικείμενο και το φακό και  $\alpha$  είναι το μισό της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ των ακραίων ακτίνων που εισέρχονται στον αντικειμενικό φακό και προέρχονται από το αντικείμενο και ισχύει:

$$\alpha = \arctan(a / 2d_f) \quad (2.11)$$

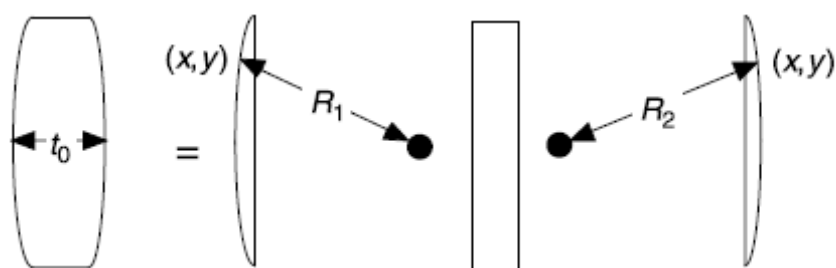
Η προσέγγιση στην Εξ. (2.10) υποθέτει μικρό άνοιγμα φωτοφράκτη και υψηλή ενίσχυση αντίστοιχα.

Σε ένα λεπτό, αμφίκυρτο φακό ο οποίος έχει διάμετρο αρκετά μικρή σε σύγκριση με την εστιακή απόσταση, οι επιφάνειες του φακού πρέπει να είναι σφαιρικές για να είναι δυνατή η μετατροπή της αποκλίνουσας σφαιρικής δέσμης σε συγκλίνουσα σύμφωνα με το φαινόμενο της διάθλασης. Επιπρόσθετα, η εστιακή απόσταση  $f$  ενός τέτοιου φακού δίνεται από την εξίσωση του κατασκευαστή του φακού:



$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.12)$$

όπου  $R_1$  και  $R_2$  είναι οι ακτίνες καμπυλότητας των πρόσθιων και οπίσθιων σφαιρικών επιφανειών του φακού (Εικόνα 2.3). Σε φακούς μεγάλης διαμέτρου το απαιτούμενο σχήμα είναι ασφαιρικό.

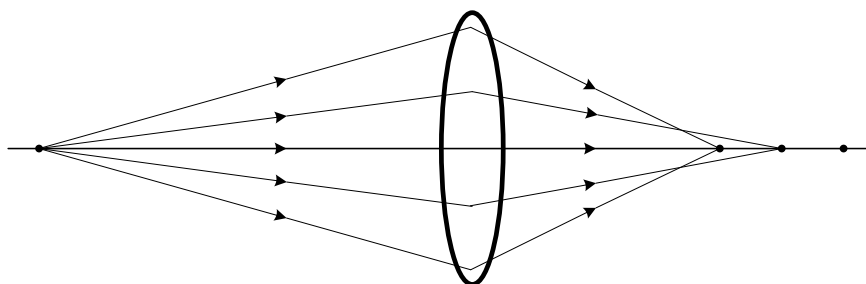


Εικόνα 2.3: Τα τρία μέρη ενός λεπτού φακού.

### 2.2.1. Οπτικά συστήματα περιορισμένης διάθλασης

Στην Εικόνα 2.2 βλέπουμε ότι ο φακός είναι παχύτερος κοντά στον άξονα σε σχέση με τα άκρα και οι ακτίνες διαθλούνται περισσότερο. Στην ιδανική περίπτωση η μεταβολή του πάχους είναι αρκετή για να μετατρέψει την προσπίπτουσα σφαιρική δέσμη σε συγκλίνουσα. Οποιαδήποτε απόκλιση της δέσμης εξόδου από τη σφαιρικότητα είναι εξ ορισμού αποτέλεσμα του *σφάλματος εκτροπής* και οδηγεί σε αύξηση της σημειακής συνάρτησης ανάπτυξης (στο επίπεδο του ειδώλου).

Στους φακούς με διάμετρο μεγάλη συγκριτικά με την εστιακή απόσταση  $f$ , η σφαιρικότητα του φακού δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει σωστά εστιασμένη δέσμη, δηλαδή όλα τα σημεία της δέσμης δεν συγκλίνουν στο ίδιο σημείο (οι ακτίνες που προσπίπτουν στο κέντρο του φακού εστιάζονται μακρύτερα από τις ακτίνες που προσπίπτουν στην περιφέρεια). Το φαινόμενο αυτό καλείται *σφάλμα σφαιρικής εκτροπής* και προκαλείται από την σφαιρική ατέλεια του φακού (Εικόνα 2.4). Υψηλής ποιότητας οπτικά συστήματα χρησιμοποιούν ασφαιρικές επιφάνειες και πολλαπλά στοιχεία για να μειώσουν την σφαιρική εκτροπή. Φυσιολογικά ο αντικειμενικός φακός είναι το κύριο οπτικό στοιχείο σε ένα μικροσκόπιο ο οποίος ορίζει την συνολική ποιότητα της εικόνας.



Εικόνα 2.4: Σφαιρική εκτροπή.

Ένα *περιορισμένης διάθλασης* οπτικό σύστημα είναι αυτό το οποίο παράγει μια συγκλίνουσα σφαιρική δέσμη όταν στην είσοδό του εισαχθεί μια αποκλίνουσα σφαιρική δέσμη από μια σημειακή πηγή και η *διακριτική του ικανότητα* περιορίζεται από την διάθλαση, φαινόμενο το οποίο σχετίζεται άμεσα με τις φυσικές ιδιότητες του φωτός. Ουσιαστικά ένα περιορισμένης διάθλασης οπτικό σύστημα είναι ένα εξιδανικευμένο σύστημα ενώ τα πραγματικά οπτικά συστήματα τείνουν σε αυτό.

Είναι προφανές ότι αυξάνοντας την ένταση της σημειακής πηγής (Εικόνα 2.2) προκαλείται μια ανάλογη αύξηση της έντασης του ειδώλου. Αυτό σημαίνει ότι ένα οπτικό σύστημα είναι γραμμικό και μπορεί να περιγραφεί από την Εξ. 2.1 ή από την *οπτική συνάρτηση μεταφοράς* η οποία είναι ο μετασχηματισμός Fourier της αναφερθείσας εξίσωσης.

### Μη συμφασικό φως

Σημαντική έννοια στην οπτική είναι το *μη συμφασικό φως* το οποίο κατανοείται ως η κατανομή των διαφορετικών σημειακών πηγών ανεξάρτητων μεταξύ τους με τυχαία φάση. Σε αυτή την περίπτωση το οπτικό σύστημα είναι γραμμικό σε σχέση με την ένταση του φωτός. Η ένταση του φωτός δίνεται από την Εξ. 2.13.

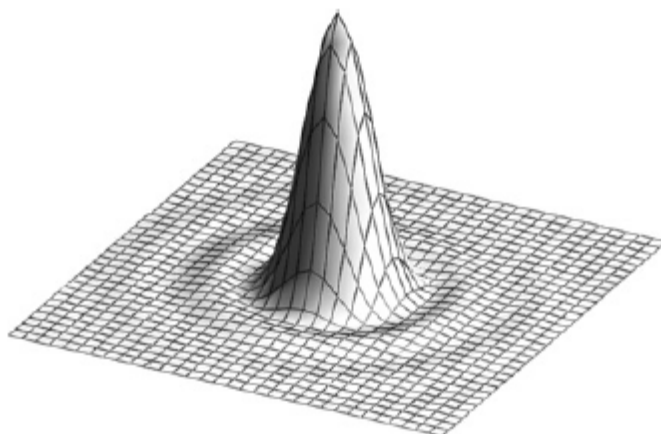
$$I = \varepsilon\mu \frac{E_0^2}{2} \quad (2.13)$$

Στη συνέχεια όταν αναφερόμαστε στο φως θα εννοούμε σημειακές πηγές στενής ζώνης. Γενικά, το φως είναι ένα σύνολο από ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαφορετικού μήκους. Τα σύγχρονα μικροσκόπια χρησιμοποιούν εκτεταμένα τα μήκη κύματος μεταξύ  $350nm$  (υπεριώδες) και  $1100nm$  (υπέρυθρο). Ο όρος *στενή ζώνη* σημαίνει ότι χρησιμοποιούμε μόνο ένα μικρό φάσμα, ίσως  $30nm$  πλάτους γύρω από ένα κεντρικό μήκος κύματος.

Το είδωλο που δημιουργείται από μία σημειακή πηγή στο επίπεδο του αντικειμένου είναι η  $psf$  (σημειακή συνάρτηση ανάπτυξης). Σε φακό με κυκλικό φωτοφράκτη διαμέτρου  $\alpha$  στον οποίο προσπίπτει μη συμφασικό φως στενής ζώνης με κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda$ , η  $psf$  έχει κυκλική συμμετρία (Εικόνα 2.5) και δίνεται από την Εξ. 2.14.

$$psf(r) = h(r) = \left[ 2 \frac{J_1\left(\pi \left[ \frac{r}{r_0} \right]\right)}{\pi \left[ \frac{r}{r_0} \right]} \right]^2 \quad (2.14)$$

όπου  $J_1(x)$  είναι η συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης. Η κατανομή της έντασης αυτής της



Εικόνα 2.5: Μη συμφασική συνάρτηση  $psf$  [32].

εξίσωσης ονομάζεται *δίσκος Airy*. Η σταθερά  $r_0$  είναι αδιάστατη και δίνεται από τη σχέση:

$$r_0 = \frac{\lambda d_i}{a} \quad (2.15)$$

όπου  $r$  είναι η ακτινική απόσταση μετρημένη από το είδωλο:

$$r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (2.16)$$

Όπως έχουμε ήδη σημειώσει, το σύστημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2 μπορεί να περιγραφεί από το μετασχηματισμό Fourier της συνάρτησης  $psf$ , η οποία καλείται *οπτική συνάρτηση μεταφοράς*. Σε φακό με κυκλικό φωτοφράκτη διαμέτρου  $\alpha$  στον οποίο

προσπίπτει μη συμφασικό φως στενής ζώνης με κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda$ , η OTF (Εικόνα 2.6) δίνεται από τη σχέση:

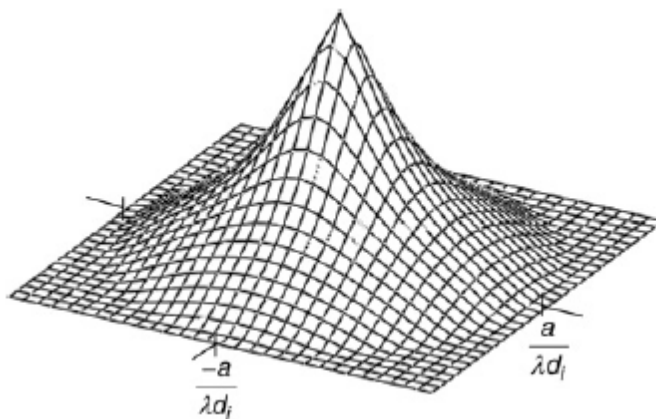
$$OTF(q) = F\{h(r)\} = \begin{cases} \frac{2}{\pi - 2} \left\{ \cos^{-1} \left[ \frac{q}{f_c} \right] - \sin \left[ \cos^{-1} \left( \frac{q}{f_c} \right) \right] \right\} & q \leq f_c \\ 0 & q \geq f_c \end{cases} \quad (2.17)$$

όπου  $q$  είναι η χωρική μεταβλητή συχνότητας μετρούμενη στο δύο διαστάσεων χώρο της συχνότητας και δίνεται από τη σχέση:

$$q = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.18)$$

όπου  $u$  και  $v$  είναι οι χωρικές συχνότητες στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  αντίστοιχα. Η παράμετρος  $f_c$  είναι η οπτική συχνότητα αποκοπής και δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{1}{r_0} = \frac{a}{\lambda d_i} \quad (2.19)$$



Εικόνα 2.6: Μη συμφασική συνάρτηση OTF [32].

### Συμφασικό φως

Μερικά μικροσκόπια λειτουργούν με συμφασικό φως (όπως οι πηγές laser). Συμφασικό φως είναι εκείνη η κατανομή των σημειακών πηγών ιδίου πλάτους που διατηρούν σταθερή τη φάση. Το φαινόμενο της διάθλασης είναι διαφορετικό με συμφασικό φως και οι συναρτήσεις  $psf$  και  $OTF$  παίρνουν διαφορετική μορφή. Το οπτικό σύστημα το οποίο δουλεύει με συμφασικό φως είναι γραμμικό στα σύνθετα πλάτη σε αντίθεση με αυτό του μη συμφασικού φωτός που είναι γραμμικό στην ένταση.

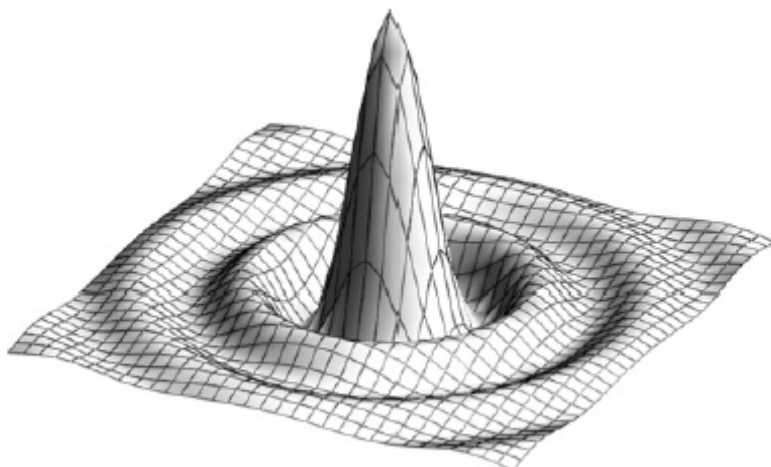
Σε φακό με κυκλικό φωτοφράκτη διαμέτρου  $\alpha$  στον οποίο προσπίπτει συμφασικό φως με μήκος κύματος  $\lambda$ , η συνάρτηση  $psf$  έχει κυκλική συμμετρία (Εικόνα 2.7) και δίνεται από τη σχέση:

$$h(r) = 2 \frac{J_1\left[\pi(r/r_0)\right]}{\pi(r/r_0)} \quad (2.20)$$

όπου  $r_0$  είναι από την Εξ. 2.15 και  $r$  από την Εξ. 2.16.

Σε φακό με κυκλικό φωτοφράκτη διαμέτρου  $\alpha$  στον οποίο προσπίπτει συμφασικό φως με μήκος κύματος  $\lambda$ , η συνάρτηση  $OTF$  (Εικόνα 2.8) δίνεται από τη σχέση:

$$H(q) = \Pi\left(q \frac{\lambda d_i}{a}\right) \quad (2.21)$$



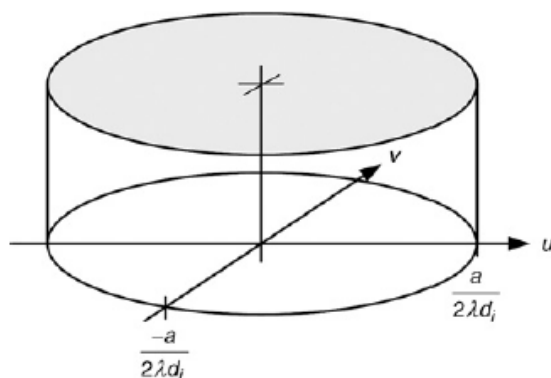
Εικόνα 2.7: Συμφασική συνάρτηση  $psf$  [32].

όπου  $q$  είναι από την Εξ. 2.18 και

$$\Pi(q) = \begin{cases} 1 & |q| < \frac{1}{2} \\ 0 & |q| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.22)$$

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι με συμφασικό φως, η συνάρτηση  $OTF$  είναι επίπεδη έξω από τη συχνότητα ανακοπής ενώ με μη συμφασικό φως μειώνεται μονοτονικά. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι η συχνότητα αποκοπής σε μη συμφασικό φως είναι

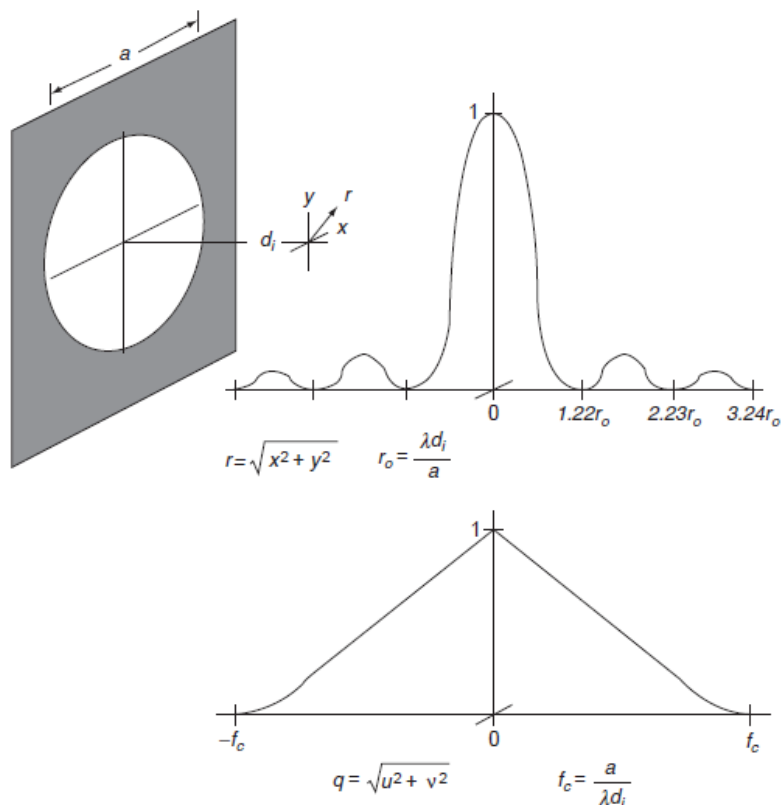
διπλάσια της συμφασικής περίπτωσης. Η Εικόνα 2.9 απεικονίζει τη σχέση ανάμεσα σε μη συμφασική συνάρτηση  $psf$  και τη συνάρτηση μεταφοράς ενός περιορισμένης διάθλασης οπτικό σύστημα με κυκλικό φωτοφράκτη.



Εικόνα 2.8: Συμφασική συνάρτηση OTF [32].

### 2.2.2. Διακριτική ικανότητα

Μια σημαντική παράμετρος του μικροσκοπίου είναι η *διακριτική του ικανότητα*, δηλαδή η ικανότητά του να αναπαράγει τα μικρά στοιχεία της εικόνας που υπάρχουν στο αντικείμενο. Ο οπτικός ορισμός της διακριτικής ικανότητας είναι η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο χωριστές σημειακές πηγές έτσι ώστε να είναι διακριτές ξεχωριστά. Δεν υπάρχει ενιαίος τρόπος για να τεκμηριώσουμε αυτή την απόσταση. Η συνάρτηση  $psf$  συνήθως υπερκαλύπτει όταν τα σημεία είναι αρκετά κοντά ενώ θα πρέπει να οριστεί η αντίθεση του συστήματος για να αναγνωριστούν με ευκρίνεια. Παρακάτω θα αναφέρουμε δύο κριτήρια σύγκρισης της διακριτικής ισχύος των οπτικών συστημάτων.



Εικόνα 2.9: Μη συμφασικές συναρτήσεις psf και OTF [32].

Σε μία καλή προσέγγιση, η διάμετρος του μισού πλάτους της κεντρικής κορυφής της συνάρτησης  $psf$  δίνεται από την απόσταση Abbe:

$$r_{Abbe} = \frac{1}{M} \lambda \frac{d_i}{a} = \lambda \frac{d_f}{a} \approx \frac{\lambda}{2NA} = 0.5 \left( \frac{\lambda}{NA} \right) \quad (2.23)$$

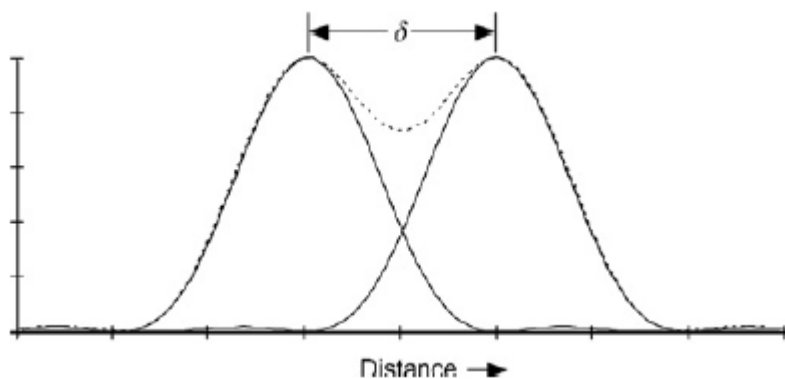
Σε φακούς με κυκλικό φωτοφράκτη, ο πρώτος κύκλος της συνάρτησης  $psf$  στο επίπεδο του ειδώλου παρατηρείται σε απόσταση ακτίνας:

$$r_{Airy} = 1.22r_0 = 0.61 \left( \frac{\lambda}{NA} \right) \quad (2.24)$$

η οποία καλείται ακτίνα του δίσκου Airy. Σύμφωνα με το κριτήριο διακριτικής ικανότητας του Rayleigh, δύο σημειακές πηγές μπορούν να είναι διακριτές εάν στο επίπεδο του ειδώλου η απόστασή τους είναι  $\delta = r_{Airy}$  (Εικόνα 2.10).

Στη μικροσκοπία είναι ευκολότερο να πραγματοποιούμε υπολογισμούς στο πεδίο του αντικειμένου αντί στο πεδίο του ειδώλου όπου υπάρχει και το πραγματικό ενδιαφέρον. Η

προβολή του αντικειμένου από τον φακό το αντιστρέφει κατά  $180^\circ$  σε κλίμακα με συντελεστή  $M$  (Εξ. 2.6). Η απόσταση των εικονοστοιχείων και η διακριτική ικανότητα μπορούν να εκφραστούν σε μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ) ενώ οι χωρικές συχνότητες σε κύκλους ανά μικρόμετρο στο επίπεδο του αντικειμένου.



Εικόνα 2.10: Το κριτήριο διακριτικής ικανότητας του Rayleigh [32].

Αφού ισχύει  $d_f \approx f$  για φακούς υψηλής μεγέθυνσης, οι παράμετροι διακριτικής ικανότητας είναι περισσότερο σημαντικοί εάν τους προσδιορίσουμε στο επίπεδο του αντικειμένου παρά στο επίπεδο του ειδώλου. Σε ένα αντικειμενικό φακό μικροσκοπίου η μη συμφασική οπτική συχνότητα αποκοπής στο επίπεδο του αντικειμένου είναι:

$$f_c = \frac{Ma}{\lambda d_i} = \frac{a}{\lambda d_i} = \frac{2NA}{\lambda} \quad (2.25)$$

η απόσταση Abbe είναι:

$$r_{Abbe} = \frac{1}{M} \lambda \frac{d_i}{a} = \lambda \frac{d_f}{a} \approx \frac{\lambda}{2NA} = 0.5 \left( \frac{\lambda}{NA} \right) \quad (2.26)$$

και η απόσταση Rayleigh είναι:

$$\delta_{Rayleigh} = 1.22r_0 = 0.61 \left( \frac{\lambda}{NA} \right) = r_{Airy} \quad (2.27)$$

Για  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  (πράσινο φως) και  $NA = 1,4$  (υψηλής ποιότητας, εμβαπτισμένος στο λάδι φακός) έχουμε  $f_c = 5,6 \text{ cycles} / \mu\text{m}$ ,  $r_{Abbe} = 0,179 \mu\text{m}$  και  $\delta_{Rayleigh} = 0,218 \mu\text{m}$ .



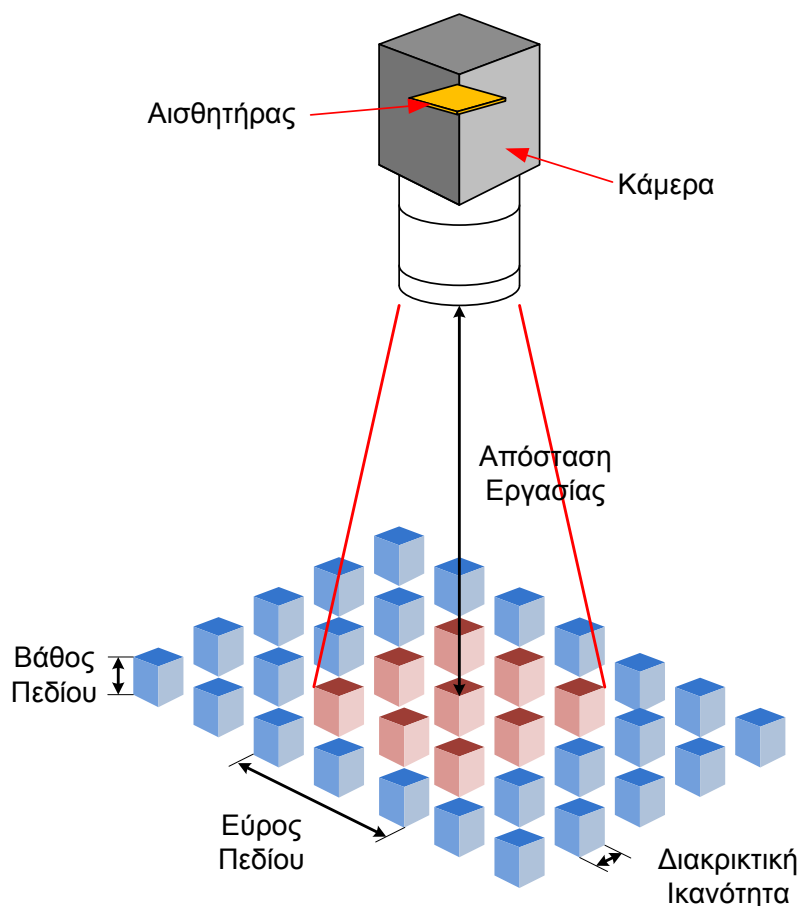
Η προηγούμενη προσέγγιση δεν ισχύει για φακούς χαμηλής ισχύος και υψηλού  $NA$  τα οποία κανονικά δεν συμβαίνουν ταυτόχρονα. Τέλος, μπορούμε να υπολογίσουμε και να συγκρίνουμε τα  $f$  και  $a$ , ή τις γωνίες  $\arctan(a/2d_f)$  και  $\arcsin(NA/n)$  για να προσδιορίσουμε το βαθμό της προσέγγισης.

Οι πραγματικοί φακοί δεν είναι περιορισμένης διάθλασης αλλά υφίστανται σφάλμα εκτροπής το οποίο κάνει τη συνάρτηση  $psf$  ευρύτερη και τη συνάρτηση  $OTF$  στενότερη. Ένα παράδειγμα ήταν η σφαιρική εκτροπή που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα σφάλματα εκτροπής σε ένα οπτικό σύστημα δεν αυξάνουν ποτέ το πλάτος της οπτικής συνάρτησης μεταφοράς.

Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι απαραίτητα για τον καθορισμό των οπτικών στοιχείων, και τα οποία είναι το *εύρος πεδίου*, η *διακριτική ικανότητα*, η *απόσταση εργασίας* και το *βάθος πεδίου*.

*Εύρος πεδίου* είναι το μέγεθος του αντικειμένου το οποίο θέλουμε να παρατηρήσουμε.

*Απόσταση εργασίας* είναι η απόσταση ανάμεσα στο μπροστινό μέρος του φακού και το αντικείμενο το οποίο παρατηρούμε.



Εικόνα 2.11: Χαρακτηριστικά μεγέθη οπτικού συστήματος.

*Βάθος πεδίου* είναι η ικανότητα του φακού να διατηρεί την επιθυμητή ακρίβεια καθώς το αντικείμενο απομακρύνεται ή πλησιάζει το φακό. Το μεγάλο βάθος πεδίου μπορεί να απλοποιήσει τους περιορισμούς στήριξης. Για να έρθει το αντικείμενο στην ονομαστική απόσταση εργασίας δεν είναι απαραίτητες κινήσεις ακριβείας. Εντούτοις ενώ ο φακός θα διατηρήσει την ακρίβεια εντός ενός συγκεκριμένου βάθους πεδίου, δεν θα διατηρήσει απαραίτητα και τη μεγέθυνση. Καμιά φορά η μεταβολή στην ενίσχυση μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε εφαρμογές οπτικής παρακολούθησης συστημάτων.

### 2.2.3. Βαθμονόμηση

Η μέτρηση φυσικών μεγεθών από εικόνα είναι συχνά απαραίτητη στην ανάλυση των αντικειμένων. Η ακρίβεια της μέτρησης επιτυγχάνεται όταν η διακριτική ικανότητα μέτρησης του εικονοστοιχείου στο επίπεδο του αντικειμένου είναι γνωστή. Η μέτρηση της φωτεινότητας σε ένα σύστημα είναι επίσης χρήσιμη και απαιτεί τη γνώση τη σχέσης ανάμεσα στη φωτεινότητα του αντικειμένου και των επιπέδων του γκρι στη ψηφιακή εικόνα.

Η διακριτική ικανότητα μέτρησης των εικονοστοιχείων στο επίπεδο του αντικειμένου μπορεί να υπολογισθεί ή να μετρηθεί. Οι υπολογισμοί απαιτούν τη γνώση της διακριτικής ικανότητας μέτρησης των εικονοστοιχείων στο επίπεδο του αισθητήρα και τη συνολική ενίσχυση των οπτικών του συστήματος (Εξ. 2.6). Συχνά μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{M_0 M_a} \quad (2.28)$$

όπου  $\delta x$  και  $\Delta x$  είναι οι ακρίβειες μέτρησης του αντικειμένου και του αισθητήρα αντίστοιχα και  $M_0$  είναι η μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού.  $M_a$  είναι η ενίσχυση των υπόλοιπων οπτικών στοιχείων του συστήματος καθώς και του προσαρμογέα της κάμερας. Συνήθως αυτό σημειώνεται στο εγχειρίδιο του μικροσκοπίου ενώ η διακριτική ικανότητα μέτρησης του αισθητήρα στο εγχειρίδιο της κάμερας.

Επίσης συχνά δεν είναι διαθέσιμα τα αριθμητικά δεδομένα όλων των στοιχείων του συστήματος. Η διακριτική ικανότητα μέτρησης του εικονοστοιχείου μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια δείγματος βαθμονόμησης. Για να γίνει αυτό απαιτείται πρόγραμμα υπολογιστή το οποίο μπορεί να διαβάσει τις συντεταγμένες του εικονοστοιχείου στο επίπεδο της

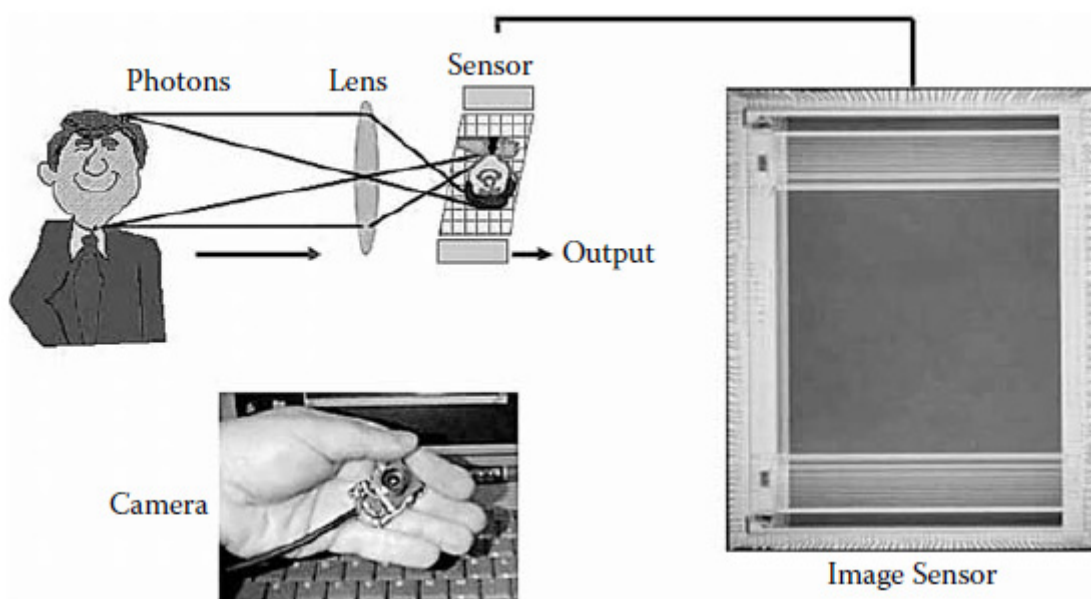
εικόνας  $(x, y)$ . Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του δείγματος βαθμονόμησης, το οποίο επίσης ψηφιοποιείται, η απόσταση δύο εικονοστοιχείων δίνεται από τη σχέση:

$$\delta x = \frac{D}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (2.29)$$

όπου  $\delta x$  είναι η διακριτική ικανότητα μέτρησης του εικονοστοιχείου,  $D$  η γνωστή διακριτική ικανότητα μέτρησης του δείγματος και  $(x_1, y_1)$  και  $(x_2, y_2)$  είναι οι θέσεις δύο εικονοστοιχείων στην εικόνα. Για περισσότερη ακρίβεια στην εκτίμηση του  $\delta x$ , τα δύο σημεία θα πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο μακριά εντός του βάθους πεδίου του μικροσκοπίου.

### 2.3. Τεχνολογίες Αισθητήρων

Μια εικόνα μπορεί να περιγραφεί ως «η μεταβολή της έντασης φωτός ή του ρυθμού της ανάκλασης ως συνάρτηση της θέσης». Δηλαδή, η κάμερα είναι μια συσκευή η οποία αποθανατίζει μια εικόνα (και ίσως την αποθηκεύει) όπου με την λέξη «αποθανατίζει» εννοούμε τη μετατροπή της πληροφορίας η οποία περιέχεται στην εικόνα σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα το οποίο μπορεί να αποθηκευθεί και να αναπαραχθεί. Στις ψηφιακές κάμερες η μετατροπή της εικόνας σε ηλεκτρικό σήμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του *αισθητήρα στερεάς κατάστασης*.



Εικόνα 2.12: Αισθητήρας στερεάς κατάστασης [12].

Ο αισθητήρας είναι ένας ημιαγωγός ο οποίος μετατρέπει την οπτική εικόνα, που δημιουργείται από ένα οπτικό σύστημα, σε ηλεκτρονικό σήμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει φως μέσα σε ένα ευρύ φάσμα, από μήκος κύματος ακτίνων-Χ μέχρι υπεριώδες, μεταβάλλοντας τη δομή του ή το υλικό το οποίο είναι ευαίσθητο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Επιπλέον, μερικοί αισθητήρες μπορούν να καταγράψουν μια εικόνα η οποία δημιουργείται από φορτισμένα σωματίδια όπως είναι τα ιόντα ή τα ηλεκτρόνια. Στην εργασία θα επικεντρωθούμε σε φώς ορατό στο ανθρώπινο μάτι, το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα σε  $380nm$  και  $780nm$ .

Για να είναι δυνατή η αναπαραγωγή μιας εικόνας με αποδεκτή διακριτική ικανότητα θα πρέπει να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός εικονοστοιχείων (pixels) τοποθετημένα σε γραμμές και στήλες. Τα εικονοστοιχεία μετατρέπουν τη προσπίπτουσα ακτινοβολία φωτός σε φορτίο (ηλεκτρόνια ή οπές, ανάλογα με τη δομή τους).

### 2.3.1. Στοιχεία θεωρίας φωτός

Όταν μια ροή φωτονίων προσπέσει πάνω σε ένα ημιαγωγό σε ενεργειακά επίπεδα τα οποία υπερβαίνουν το ενεργειακό χάσμα,  $E_g$ , δηλαδή:

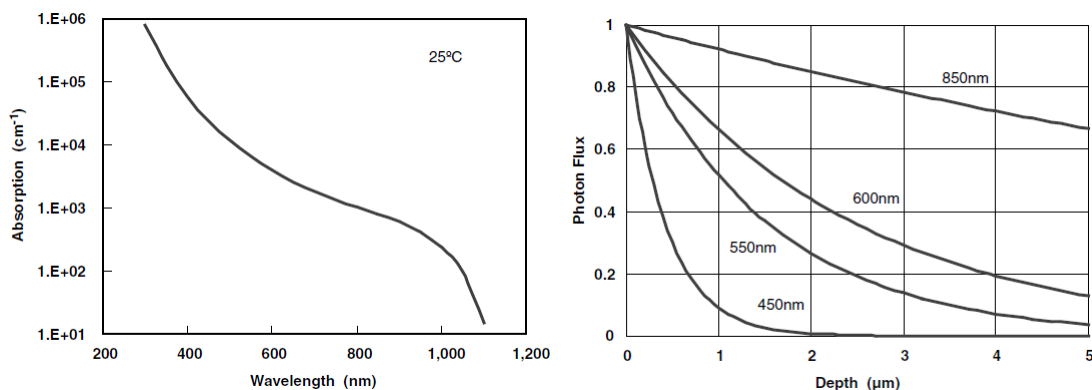
$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g \quad (2.30)$$

όπου  $h$ ,  $c$ ,  $\nu$ , και  $\lambda$  είναι αντίστοιχα η σταθερά του Planck, η ταχύτητα του φωτός, η συχνότητα του φωτός και το μήκος κύματος του φωτός, τότε ο αριθμός των φωτονίων που απορροφούνται σε μία επιφάνεια με πλάτος  $dx$  είναι ανάλογος της έντασης της ροής τους  $\Phi(x)$ , όπου  $x$  είναι η απόσταση από την επιφάνεια του ημιαγωγού. Ισχύει:

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\alpha \cdot \Phi(x) \quad (2.31)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης και εξαρτάται από το μήκος κύματος. Επιλύοντας την εξίσωση με οριακές συνθήκες  $\Phi(x=0) = \Phi_0$ , έχουμε:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (2.32)$$

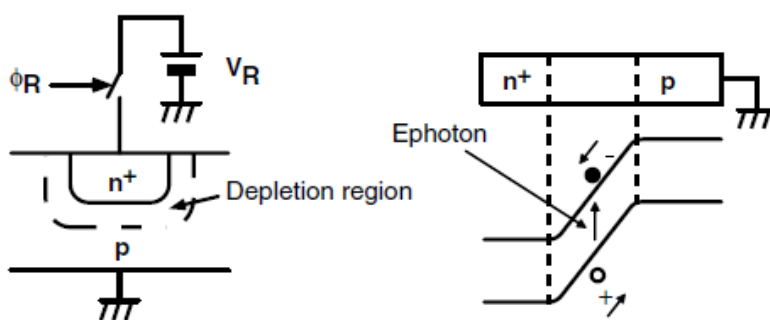


Εικόνα 2.13: Απορρόφηση του φωτός σε πυρίτιο. Συντελεστής απορρόφησης (αριστερά), ένταση σε σχέση με το βάθος πρόσπτωσης (δεξιά) [12].

Συνεπώς, η ροή φωτονίων μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από την επιφάνεια. Τα απορροφούμενα φωτόνια παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στον ημιαγωγό των οποίων η πυκνότητα ακολουθεί την Εξ. 2.32. Στην Εικόνα 2.13 φαίνεται ο συντελεστής απορρόφησης και η φωτεινή ροή.

**2.3.2. Συλλογή και συσσώρευση φορτίου**

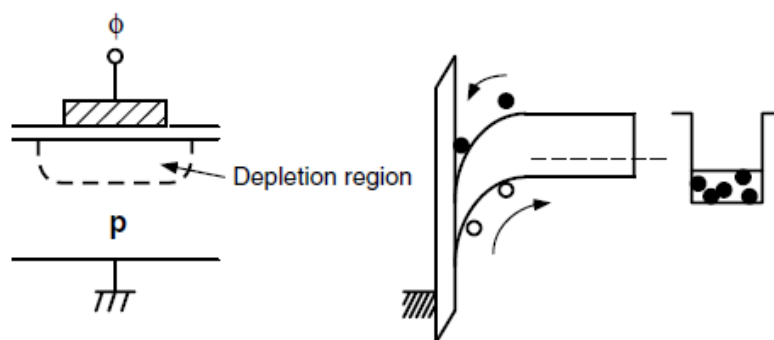
Το παραγόμενο φορτίο συλλέγεται σε ένα συσσωρευτή μέσα σε ένα εικονοστοιχείο. Στην Εικόνα 2.14 φαίνεται μια απλή φωτοδιόδος ως συσκευή συσσώρευσης φορτίου. Στο παράδειγμα αυτό η περιοχή  $p$  γειώνεται και η περιοχή  $n^+$  αρχικοποιείται σε θετική τάση,  $V_R$ . Στη συνέχεια αποσυνδέεται ενώ οι αρχικές συνθήκες παραμένουν. Τα ηλεκτρόνια τα οποία διεγείρονται από τα φωτόνια τείνουν να συσσωρευτούν στην περιοχή  $n^+$  μειώνοντας το δυναμικό της περιοχής, ενώ οι οπές ρέουν προς το γειωμένο ακροδέκτη. Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρόνια είναι οι φορείς του σήματος. Όλοι οι αισθητήρες τύπου CCD και CMOS λειτουργούν με αυτό τον τρόπο.



Εικόνα 2.14: Ανάστροφα πολωμένη φωτοδιόδος και το διάγραμμα του ενεργειακού χάσματος [12].

Ένας άλλος αισθητήρας στερεάς κατάστασης είναι η δίοδος MOS (Εικόνα 2.15). Όταν εφαρμόζεται θετικό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο της πύλης, οι ενεργειακές ζώνες καμπυλώνουν προς τα κάτω και η φορείς πλειονότητας (οπές) μειώνονται. Η απογυμνωμένη περιοχή είναι έτοιμη να δεχτεί ελεύθερα φορτία. Η δίοδος MOS είναι δομικό στοιχείο για την κατασκευή της επίστρωσης ενός CCD.

Και στις δύο περιπτώσεις τα ηλεκτρόνια τα οποία δημιουργούνται εντός της περιοχής απογύμνωσης αξιοποιούνται πλήρως ως φορείς φορτίου. Εντούτοις, μόνο ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων φτάνει στην περιοχή απογύμνωσης εξαιτίας του φαινομένου της διάχυσης.



Εικόνα 2.15: Ανάστροφα πολωμένη δίοδος MOS και το διάγραμμα του ενεργειακού χάσματος [12].

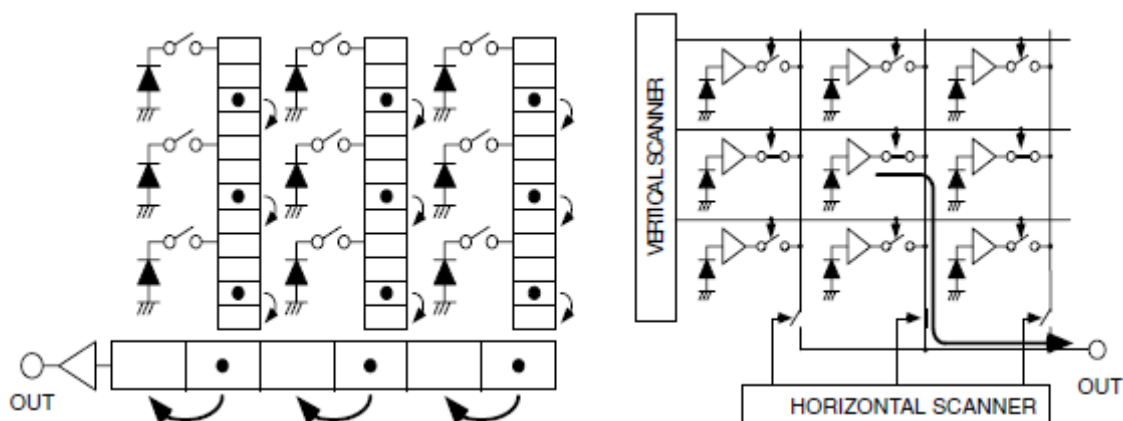
### 2.3.3. Σάρωση της μήτρας των εικονοστοιχείων

Το συσσωρευμένο φορτίο ή αντίστοιχα το σήμα δυναμικού ή ρεύματος το οποίο βρίσκεται σε κάποιο εικονοστοιχείο της μήτρας πρέπει να διαβαστεί. Τα σήματα τα οποία είναι καταμεμημένα σε μήτρα δύο διαστάσεων πρέπει να μετασχηματιστούν σε χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα. Η διαδικασία αυτή καλείται «σάρωση» και ο αισθητήρας θα πρέπει να έχει αυτή τη δυνατότητα.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να σαρωθεί μια μήτρα εικονοστοιχείων. Στην Εικόνα 2.16 (αριστερά) φαίνεται ο τρόπος σάρωσης σε ένα αισθητήρα CCD. Κάθε σήμα το οποίο αποθηκεύεται σε ένα εικονοστοιχείο φωτοδίοδου ταυτόχρονα μετατοπίζεται σε κάθετο καταχωρητή. Την επόμενη χρονική στιγμή οι καταχωρητές κάθετης σάρωσης μετατοπίζουν μια γραμμή στον οριζόντιο καταχωρητή και αυτός μεταφέρει το σήμα σε ένα ενισχυτή ο οποίος το μετατρέπει σε σήμα τάσης. Η μεταφορά με αυτό τον τρόπο προϋποθέτει υψηλής ταχύτητας ημιαγωγικές δομές.

Στην ίδια εικόνα (δεξιά) φαίνεται ο τρόπος σάρωσης σε ένα αισθητήρα CMOS. Το σήμα φορτίου μετατρέπεται σε τάση ή ρεύμα από ένα ενεργό τρανζίστορ το οποίο βρίσκεται μέσα στο εικονοστοιχείο. Κατά τη διαδικασία της σάρωσης ένα εικονοστοιχείο διευθυνσιοδοτείται επιλέγοντας γραμμή (Y) και στήλη (X) και στη συνέχεια μεταφέρεται

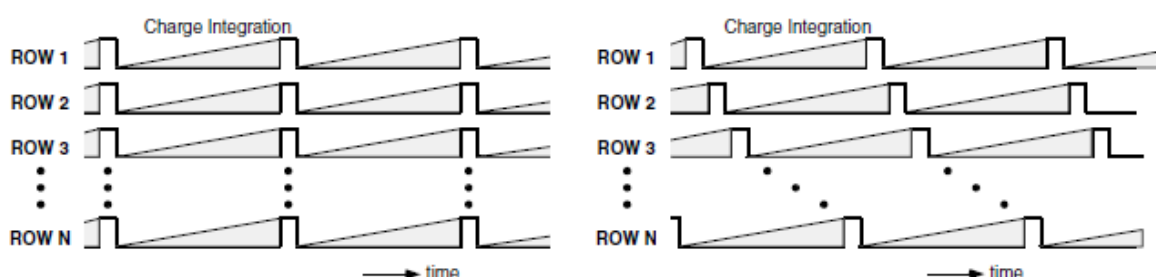
έξω. Όπως είναι φανερό ο τρόπος αυτός είναι ευέλικτος πραγματοποιώντας περισσότερα διαβάσματα σε σχέση με τον προηγούμενο.



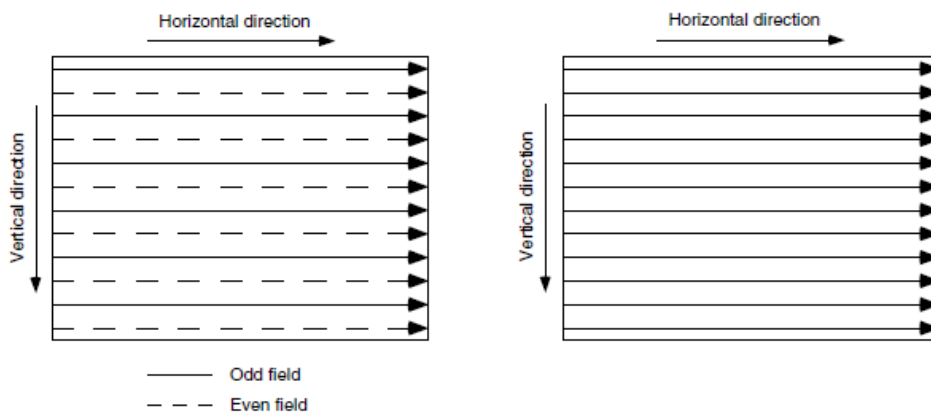
Εικόνα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση της σάρωσης σε αισθητήρα CCD (αριστερά) και CMOS (δεξιά) [12].

Οι αισθητήρες CCD και CMOS είναι τύπου ολοκλήρωσης φορτίου, δηλαδή το φορτίο σήματος σε ένα εικονοστοιχείο θα αρχικοποιηθεί πριν την διαδικασία της ολοκλήρωσης. Η διαφορά στον τρόπο σάρωσης οδηγεί σε διαφορετικούς λειτουργικούς χρόνους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17. Στον αισθητήρα CCD η αρχικοποίηση του φορτίου γίνεται όταν μεταφέρεται από τη φωτοδίοδο σε ένα κάθετο καταχωρητή την ίδια στιγμή σε ολόκληρη τη μήτρα. Εναλλακτικά, η αρχικοποίηση και το διάβασμα σε ένα αισθητήρα CMOS γίνονται γραμμή-γραμμή.

Στην Εικόνα 2.18 φαίνονται η περιπλεκόμενη και η προοδευτική σάρωση της μήτρας. Στην περιπλεκόμενη σάρωση σε κάθε χρονική σκηνή σαρώνονται οι μισές γραμμές (εναλλακτικά οι περιπτές και οι άρτιες). Κάθε κάθετη σάρωση συγκροτεί μια εικόνα «πεδίου» και σύνολο δύο πεδίων συγκροτεί ένα απλό πλαίσιο (frame) εικόνας (Εικόνα 2.18 - αριστερά). Στην προοδευτική σάρωση ξεκινάμε από τη πάνω αριστερή γωνία και πηγαίνοντας στο τέλος της γραμμής συνεχίζουμε στην επόμενη γραμμή στην αρχή της.



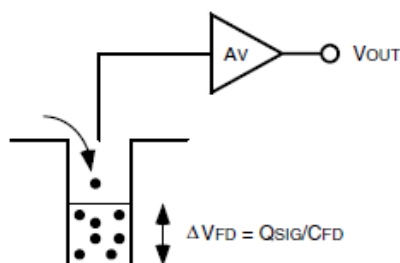
Εικόνα 2.17: Χρονισμός αισθητήρων CCD (αριστερά) και CMOS (δεξιά) [12].



Εικόνα 2.18: Περιπλεκόμενη (αριστερά) και προοδευτική σάρωση (δεξιά) [12].

### 2.3.4. Εντοπισμός φορτίου

Η αρχή εντοπισμού φορτίου είναι βασικά ταυτόσημη για τους CCD και τους περισσότερους CMOS αισθητήρες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.16, οι αισθητήρες CCD εκπληρώνουν την διαδικασία εντοπισμού σε ένα εξωτερικό ενισχυτή, ενώ ο αισθητήρας CMOS το επιτυγχάνει εσωτερικά του εικονοστοιχείου. Η Εικόνα 2.19 δείχνει ένα μοντέλο



Εικόνα 2.19: Εντοπισμός φορτίου [12].

της αρχής εντοπισμού φορτίου. Το φορτίο του σήματος,  $Q_{sig}$ , πέφτει σε ένα πηγάδι δυναμικού το οποίο παρακολουθείται από αισθητήρα τάσης. Η μεταβολή του δυναμικού,  $\Delta V_{FD}$ , η οποία προκαλείται από το φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{FD} = \frac{Q_{sig}}{C_{FD}} \tag{2.33}$$



όπου  $C_{FD}$  είναι η χωρητικότητα του πηγαδιού δυναμικού και ενεργεί ως μετατροπέας φορτίου σε τάση. Η μεταβολή της τάσης εξόδου είναι:

$$\Delta V_{OUT} = A_V \cdot \Delta V_{FD} \quad (2.34)$$

όπου  $A_V$  είναι η ενίσχυση τάσης.

Η ενίσχυση μετατροπής ( $\mu V/e^-$ ) εκφράζει την ποσότητα μεταβολής της τάσης η οποία επιτυγχάνεται από ένα ηλεκτρόνιο που προσπίπτει στο σημείο εντοπισμού του. Από την Εξ. 2.33 η ενίσχυση μετατροπής είναι:

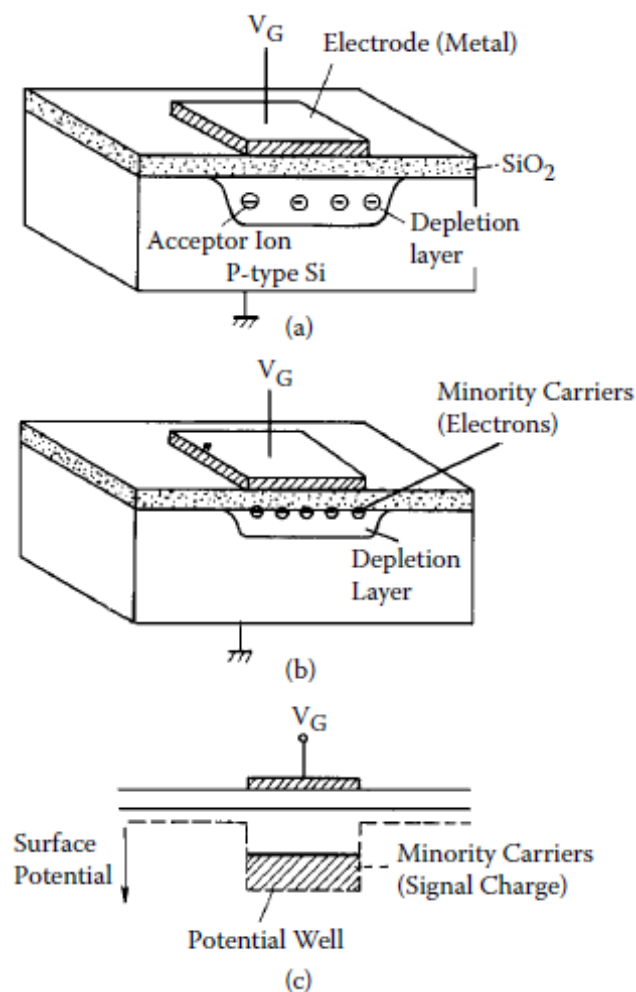
$$C.G. = \frac{q}{C_{FD}} \quad (2.35)$$

όπου  $q$  είναι το στοιχειώδες φορτίο ( $1,60218 \times 10^{19}$  C). Συνήθως η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει την ενίσχυση εισόδου και δεν μετράται άμεσα. Η ενίσχυση εξόδου επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας την ενίσχυση τάσης του σημείου εντοπισμού φορτίου με την έξοδο και δίνεται από τη σχέση:

$$C.G._{output} = A_V \cdot \frac{q}{C_{FD}} \quad (2.36)$$

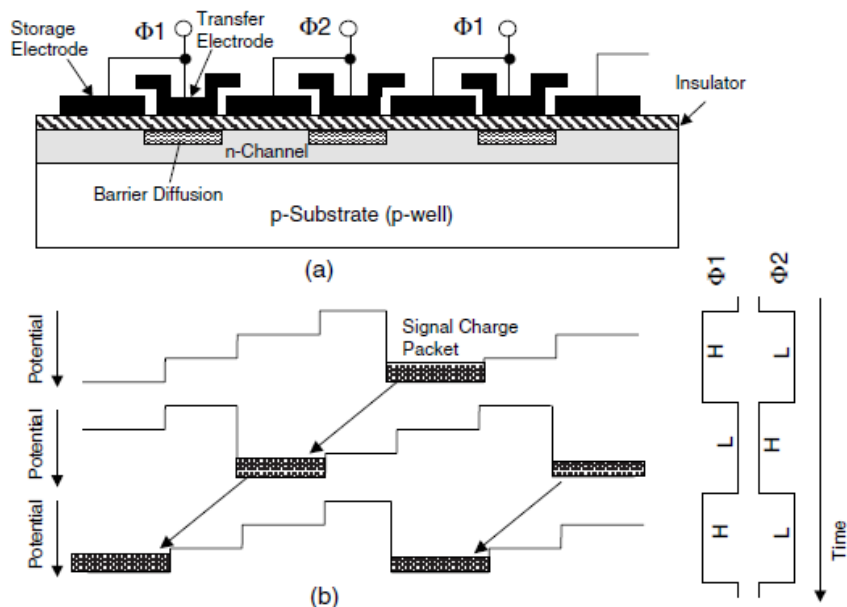
### 2.3.5. Αισθητήρες CCD

Οι αισθητήρες CCD (Charge Coupled Device) στηρίζονται στη συσσώρευση και μεταφορά ηλεκτρονίων ως φορείς φορτισμένων πακέτων μέσα στον ημιαγωγό. Δομικό στοιχείο του αισθητήρα είναι ο πυκνωτής οξειδίου του μετάλλου (MOS) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.20(a) όπου η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι η μικρότερη δυνατή. Όταν εφαρμοστεί θετικό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο μετάλλου (electrode), οι φορείς πλειονότητας (οπές) στο υπόστρωμα τύπου-p απωθούνται στην επιφάνεια του πυριτίου και μια περιοχή απογύμνωσης (depletion layer) σχηματίζεται (Εικόνα 2.20(b)). Δηλαδή ένα πηγάδι δυναμικού (potential well) για ηλεκτρόνια σχηματίζεται στην διεπαφή Si-SiO<sub>2</sub>. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ροής για να απεικονίσει την συσσώρευση και μεταφορά φορτισμένων πακέτων (Εικόνα 2.20(c)).

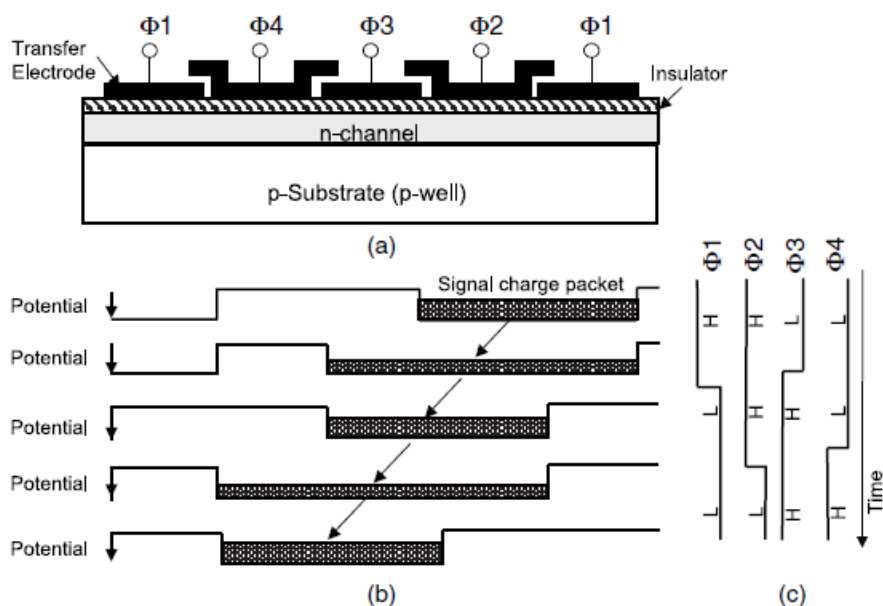


Εικόνα 2.20: Πυκνωτής MOS [12].

Σε ένα αισθητήρα CCD συνυπάρχουν πολλοί πυκνωτές MOS όπου η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι η μικρότερη δυνατή, για παράδειγμα μικρότερη από 0,1  $\mu\text{m}$ . Στους σύγχρονους αισθητήρες CCD χρησιμοποιούνται επικαλυπτόμενα ηλεκτρόδια διπλής στρώσης πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.21 και στην Εικόνα 2.22.



Εικόνα 2.21: CCD δύο-φάσεων. (α) τομή, (β) δυναμικού καναλιού μετά την εφαρμογή παλμών δύο φάσεων (c)  $\Phi_1$  και  $\Phi_2$  [12].

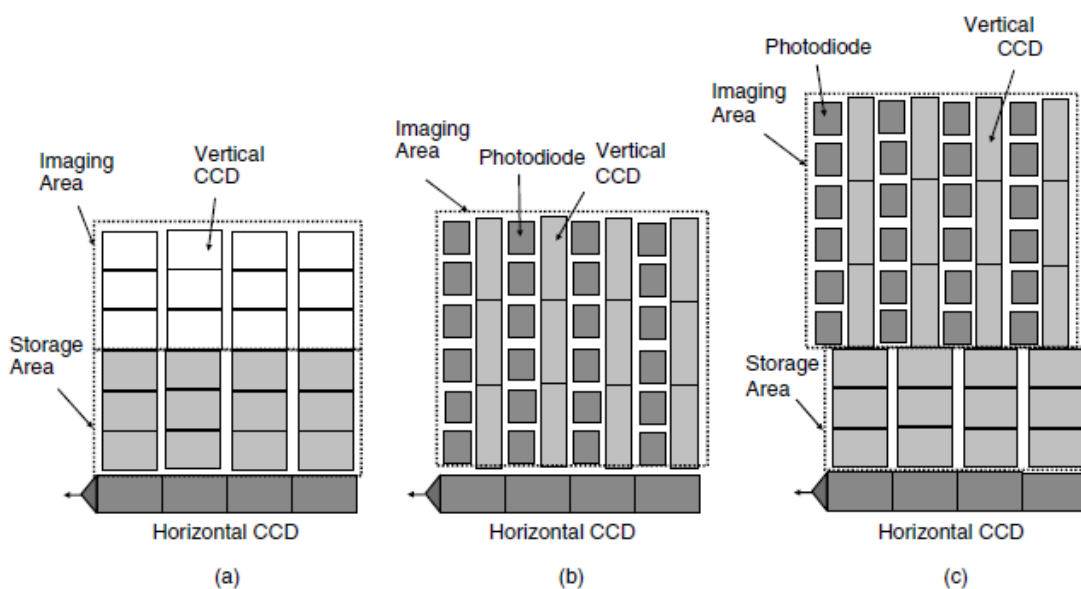


Εικόνα 2.22: CCD τεσσάρων-φάσεων. (α) τομή, (β) δυναμικού καναλιού μετά την εφαρμογή παλμού τεσσάρων φάσεων (c)  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  και  $\Phi_4$  [12].

Στην πρώτη εικόνα φαίνεται ένας αισθητήρας με οδήγηση δύο φάσεων ενώ στην δεύτερη εικόνα ο αισθητήρας οδηγείται από διαδικασία τεσσάρων φάσεων. Στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόδια του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου είναι συνδεδεμένα σε ζεύγη. Σε αυτή την περίπτωση η πυκνότητα της νόθευσης στο επίπεδο τύπου-n κάτω από το ηλεκτρόδιο του δεύτερου επιπέδου είναι μικρότερη σε σχέση με το επίπεδο κάτω από

το πρώτο ηλεκτρόδιο ως αποτέλεσμα της εμφύτευσης ιόντων τύπου-p. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μεταφερθούν φορτισμένα πακέτα εφαρμόζοντας παλμούς ρολογιού δύο φάσεων. Η ικανότητα μεταφοράς φορτίων καθορίζεται από το φράγμα δυναμικού κάτω από το ηλεκτρόδιο του δεύτερου επιπέδου (ηλεκτρόδιο μεταφοράς) και την περιοχή του ηλεκτροδίου του πρώτου επιπέδου (ηλεκτρόδιο συσσώρευσης). Οι αισθητήρες CCD δύο φάσεων είναι κατάλληλοι για μεταφορές υψηλών ταχυτήτων ακόμη κι αν η ικανότητα συσσώρευσης φορτίων είναι μικρότερη σε σχέση με τους CCD τεσσάρων φάσεων.

Στην περίπτωση των αισθητήρων τεσσάρων φάσεων, η πυκνότητα της μη καθαρότητας στο κανάλι είναι ουσιαστικά ομοιόμορφα κατανομημένη, το γειτονικό ζεύγος ηλεκτροδίων λειτουργεί ως συσσωρευτής ενώ τα άλλα δύο ως φράγμα. Η μεταφορά του φορτίου πραγματοποιείται σε παλμούς ρολογιού τεσσάρων φάσεων. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς φορτίου είναι ταχύτερος σε σχέση με τον προηγούμενο και είναι κατάλληλος για CCD μεγάλης ολοκλήρωσης.



Εικόνα 2.23: Τρεις τύποι αισθητήρων CCD [12].

Στην Εικόνα 2.23 φαίνονται τρεις τύποι αρχιτεκτονικών αισθητήρων CCD. Στην Εικόνα 2.23(a) παρουσιάζεται το διάγραμμα αισθητήρα όπου η μεταφορά των φορτίων γίνεται ανά καρτέ (frame transfer). Σε αυτή την περίπτωση ο αισθητήρας αποτελείται από την περιοχή πρόσπτωσης των φωτονίων, την περιοχή αποθήκευσης, τον καταχωρητή οριζόντιας μεταφοράς και τα κυκλώματα εξόδου. Τα ηλεκτρόνια τα οποία παγιδεύονται μέσα ή κοντά σε πηγάδια δυναμικού δημιουργούν τα πακέτα φορτίου, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρονται στους καταχωρητές κάθετης μεταφοράς. Την επόμενη χρονική στιγμή μέσω του οριζόντιου καταχωρητή μεταφέρονται στον ενισχυτή εξόδου ως τάση το ένα μετά το άλλο.

Στην Εικόνα 2.23 (b) είναι το διάγραμμα αισθητήρα όπου η μεταφορά των φορτίων γίνεται μεταξύ γραμμών. Σε αυτή την περίπτωση οι καταχωρητές κάθετης μεταφοράς λειτουργούν ως αναλογικές μνήμες εικόνων. Στιγμιαία τα φορτισμένα πακέτα μεταφέρονται στους κάθετους καταχωρητές και στη συνέχεια, μέσω του οριζόντιου καταχωρητή, στον ενισχυτή εξόδου.

Στην Εικόνα 2.23 (c) φαίνεται ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων τύπων, γνωστός ως μεταφορά καρέ-γραμμής. Ο τύπος αυτός είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενος εξαιτίας της υψηλής κατανάλωσης.

### 2.3.6. Σύγκριση αισθητήρων

Στην παράγραφο αυτή θα αναπτυχθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αισθητήρων CCD και CMOS σε σύγκριση μεταξύ τους. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν εδραιωθεί ως επικρατέστερες στις σύγχρονες εφαρμογές. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών αισθητήρων CCD και CMOS.

Χαρακτηριστικό	CCD	CMOS
Σήμα εξόδου από εικονοστοιχείο	Ηλεκτρονικό πακέτο	Τάση
Σήμα εξόδου από IC	Τάση	Bits
Σήμα εξόδου από κάμερα	Bits	Bits
Συντελεστής πλήρωσης	Υψηλός	Μέτριος
Προσαρμογή ενισχυτή	-	Μέτρια
Θόρυβος Συστήματος	Χαμηλός	Μέτριος
Πολυπλοκότητα συστήματος	Υψηλή	Μέτρια
Πολυπλοκότητα αισθητήρα	Χαμηλή	Υψηλή
Στοιχεία κάμερας	Αισθητήρας, Πολλαπλά IC υποστήριξης, Φακός	Αισθητήρας, Πιθανόν IC υποστήριξης, Φακός
Σχετικό κόστος R&D	Χαμηλό	Υψηλό
Σχετικό κόστος συστήματος	Εξαρτάται από την εφαρμογή	Εξαρτάται από την εφαρμογή

Στον επόμενο Πίνακα 2.2 που ακολουθεί, συγκρίνεται η απόδοση των δύο τεχνολογιών.

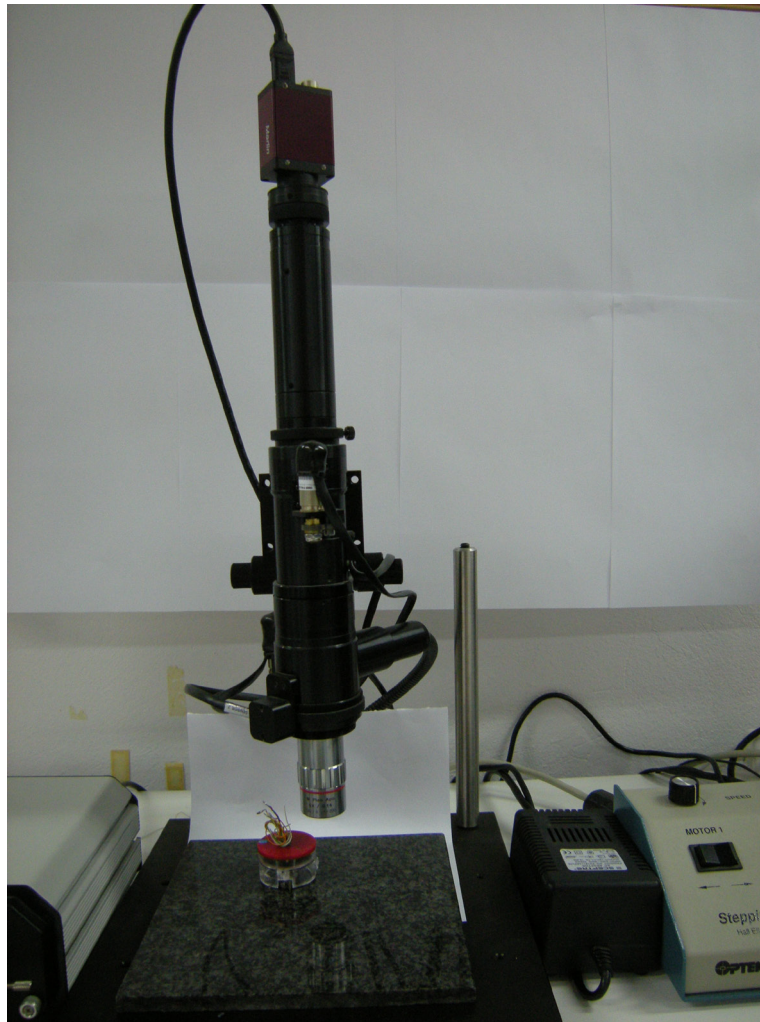
Πίνακας 2.2: Σύγκριση απόδοσης αισθητήρων CCD και CMOS.

<b>Απόδοση</b>	<b>CCD</b>	<b>CMOS</b>
Απόκριση	Μέτρια	Λίγο καλύτερη
Δυναμικό πεδίο δράσης	Υψηλό	Μέτριο
Ομοιομορφία	Υψηλή	Κάτω του μετρίου
Ομοιομορφία κλείστρου	Γρήγορη, κοινή	Χαμηλή
Ταχύτητα	Μέτρια προς υψηλή	Υψηλότερη
Παραθυροποίηση	Περιορισμένη	Υψηλή
Αντι-θάμπωμα	Υψηλό ως καθόλου	Υψηλό
Πόλωση και χρονισμός	Πολλαπλή, υψηλότερη τάση	Μονή, χαμηλή τάση

Για την υλοποίηση της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί βιντεοκάμερα με αισθητήρα CCD λόγω μικρότερου κόστους.

### 3. Πειραματική διάταξη

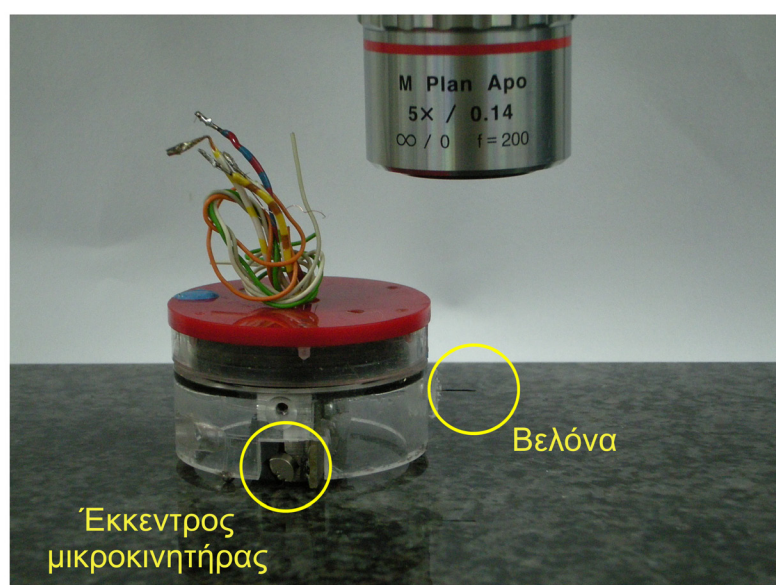
Η μικροβελόνα, διαμέτρου 250 $\mu\text{m}$ , είναι τοποθετημένη σε μικρορομπότ, το οποίο κινείται πάνω σε κομμάτι γρανίτη τοποθετημένου πάνω σε μεταλλική πλάκα από μαύρο ανοδιωμένο αλουμίνιο και επιβλέπεται από σύστημα μικροσκοπίου, αντικειμενικού φακού και βιντεοκάμερας. Η πειραματική διάταξη συμπληρώνεται από πηγή φωτός, ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μικροσκοπίου και εξαρτήματα στήριξης. Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη η οποία βρίσκεται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.



Εικόνα 3.1: Πειραματική διάταξη.

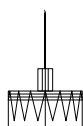
### 3.1. Μικρορομποτική πλατφόρμα και μικροβελόνα

Το μικρορομπότ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ (Εικόνα 3.2). Είναι κυλινδρικού σχήματος με φυσικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Είναι 2DOF και για την κίνησή του χρησιμοποιεί δύο έκκεντρους μικροκινητήρες τοποθετημένους στη βάση του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Τροφοδοτείται από μπαταρία 1.2V και η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει είναι  $0,5 - 1,5 \text{ mm/s}$  η οποία εξαρτάται από τη συνολική (μεταβαλλόμενη) μάζα. Στην Εικόνα 3.4 φαίνεται η εξομοίωση της κίνησής του.



Εικόνα 3.2: Το μικρορομπότ.

Στο μικρορομποτικό σύστημα τοποθετήθηκε μικροβελόνα ινσουλίνης διαμέτρου κεφαλής περίπου  $50 \mu\text{m}$ , διαμέτρου σώματος περίπου  $250 \mu\text{m}$  και μήκους  $8 \text{mm}$  (Εικόνα 3.3). Για να είναι δυνατή η τοποθέτησή της πάνω στο μικρορομπότ αφαιρέθηκε η μεγαλύτερη πλαστική βάση της και χρησιμοποιήθηκε η μεταλλική μύτη μαζί με την μικρότερη πλαστική κυλινδρική βάση. Ανοίχτηκε μία οπή στο κορμό του μικρορομπότ και μικροβελόνα μέσω της οπής συνδέθηκε με αισθητήρες δύναμης και με τη βάση (Εικόνα 3.2).

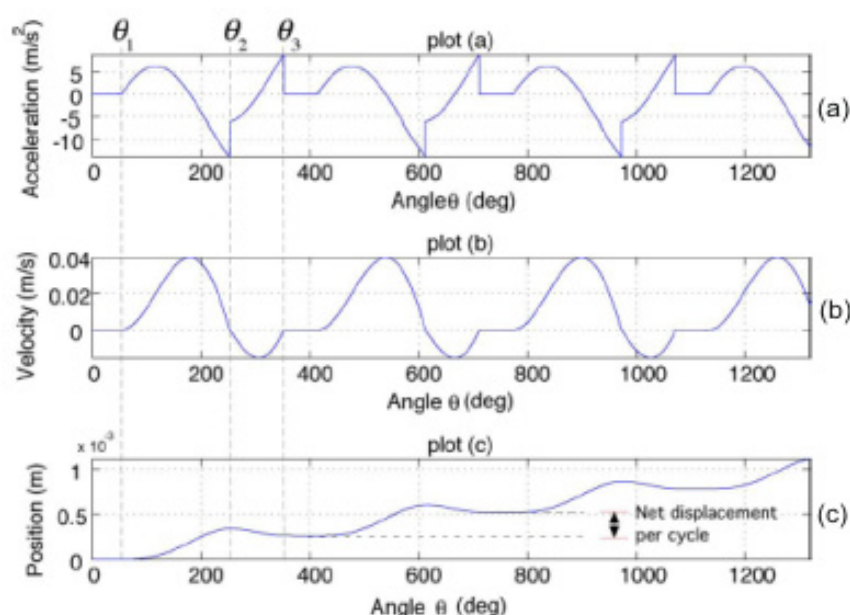


Εικόνα 3.3: Η μικροβελόνα πριν τη τοποθέτηση.



Πίνακας 3.1: Φυσικά χαρακτηριστικά του μικρορομπότ.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ακτίνα τροχιάς έκκεντρου φορτίου μικροκινητήρα	$r$	0,00177 [m]
Μάζα έκκεντρου φορτίου μικροκινητήρα	$m$	0,00021 [kg]
Μάζα μικρορομπότ	$M$	0,1 [kg]
Ακτίνα μικρορομπότ	$L$	0,04 [m]
Ύψος κέντρου μάζας	$h$	0,004 [m]
Συντελεστής τριβής	$\mu$	0,5



Εικόνα 3.4: Αποτελέσματα εξομοίωσης. (α) Επιτάχυνση. (β) Ταχύτητα. (γ) Θέση στον x-άξονα ως συνάρτηση της επενεργούμενης γωνίας [26].

### 3.2. Απαιτήσεις σχεδιασμού

Το μικρορομπότ εκτελεί κίνηση η οποία πρέπει να ελεγχθεί μέσω κλειστού βρόχου. Για την εύρεση των συντεταγμένων θέσης και της γωνίας χρησιμοποιείται το σύστημα που περιγράφηκε εισαγωγικά στην αρχή του κεφαλαίου, το οποίο πρέπει να μπορεί να ανιχνεύει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια τις μεταβολές αυτές. Το εύρος της κίνησης σχετίζεται άμεσα με το αντικείμενο στο οποίο θέλουμε να επέμβουμε με τη χρήση της μικροβελόνας. Με δεδομένο ότι μας ενδιαφέρουν τα ζωικά κύτταρα των οποίων η διάμετρος κυμαίνεται από  $10\mu\text{m}$  μέχρι  $100\mu\text{m}$  και οι διαστάσεις της μικροβελόνας είναι

αυτές που αναφέρθηκαν προηγούμενα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το εύρος του οπτικού πεδίου μέσα στο οποίο θα δουλέψουμε πρέπει να είναι:

$$FOV = 500\mu m - 1mm \quad (3.1)$$

Σημαντική παράμετρος στην επιλογή της κάμερας είναι η διακριτική ικανότητα μέτρησης. Για τις περισσότερες εφαρμογές η μέτρηση πρέπει να έχει ακρίβεια καλύτερη από  $5\mu m$  (1% για εύρος πεδίου  $FOV = 500mm$ ). Η απαιτούμενη διακριτική ικανότητα μπορεί να υπολογιστεί όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned} acc_{\min} &= \frac{err \times FOV \times res_{\min}}{2 \times w_{CCD}} \\ \Rightarrow res &\leq \frac{2 \times acc_{\min} \times w_{CCD}}{err \times FOV} \\ \Rightarrow res &\leq \frac{2 \times 5 \times 6,4 \times 1000}{5 \times 500} \quad (3.2) \\ \Rightarrow res &\leq 25,6mm \\ \Rightarrow pixel &= res / 2 = 12,8mm \end{aligned}$$

όπου :  $acc$  η ακρίβεια (σε  $\mu m$ ),

$err$  το σφάλμα,

$FOV$  το εύρος πεδίου (σε  $\mu m$ ),

$res$  η διακριτική ικανότητα (σε  $\mu m$ ) και

$w_{CCD}$  η οριζόντια διάσταση (σε  $\mu m$ )

Για τη μεγέθυνση ισχύει:

$$\begin{aligned} f &= \frac{pixel}{FOV} \\ \Rightarrow f &\leq \frac{6,4 \times 1000}{500} = 12,8 \approx 10 \quad (3.3) \end{aligned}$$

όπου  $f$  η μεγέθυνση.

Επειδή το εύρος της περιοχής μεταβάλλεται από  $500\text{mm}$  μέχρι  $1\text{mm}$ , το μικροσκόπιο πρέπει να έχει δυνατότητα να αλλάζει την εστίασή του. Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κάμερας.

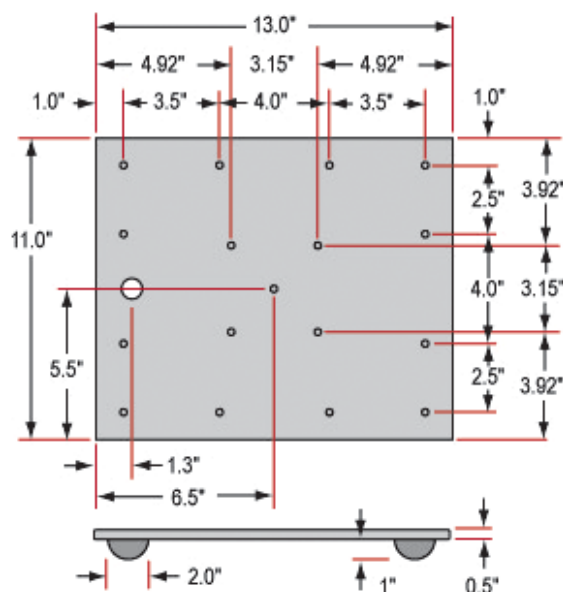
Πίνακας 3.2: Επιθυμητά χαρακτηριστικά κάμερας

Χαρακτηριστικό	
Αισθητήρας	CCD
Εικονοστοιχείο	< 12,8 mm
Ανάλυση	4+ MP
Ρυθμός Ανανέωσης	1+ fps
Πρότυπο επικοινωνίας	IEEE 1394
Συμβατότητα με RTOS	Win, Linux

### 3.3. Βάση και εξαρτήματα στήριξης

Το μικροσκόπιο και η κάμερα είναι στερεωμένα πάνω σε μεταλλική βάση από μαύρο ανοδιωμένο αλουμίνιο (Εικόνα 3.5). Οι διαστάσεις της φαίνονται στην ίδια εικόνα. Πάνω στη βάση υπάρχει ελεύθερο κομμάτι γρανίτη πολύ χαμηλής τραχύτητας (<  $5\mu\text{m}$ ) με το οποίο επιτυγχάνουμε μείωση της τριβής κατά την κίνηση του μικρορομπότ πάνω σε αυτό.

Στη μεγάλη οπή της βάσης στερεώνεται κάθετα ορθοστάτης από ανοξείδωτο χάλυβα, διαμέτρου  $3/4''$  και ύψους  $12''$ . Στην πάνω άκρη του ορθοστάτη στερεώνεται οριζόντια ορθοστάτης ίδιας διαμέτρου και μήκους  $9''$ .



Εικόνα 3.5: Η βάση της πειραματικής διάταξης.

### 3.4. Μικροσκόπιο

Το μικροσκόπιο είναι απαραίτητο για τους μικροχειρισμούς του μικρορομπότ και επακόλουθα της μικροβελόνας και θα πρέπει να είναι ικανό να ανιχνεύει ικανοποιητικά τη μετατόπιση της. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδίασης επιλέχθηκε το μικροσκόπιο της εταιρείας Edmund Optics (Εικόνα 3.6).

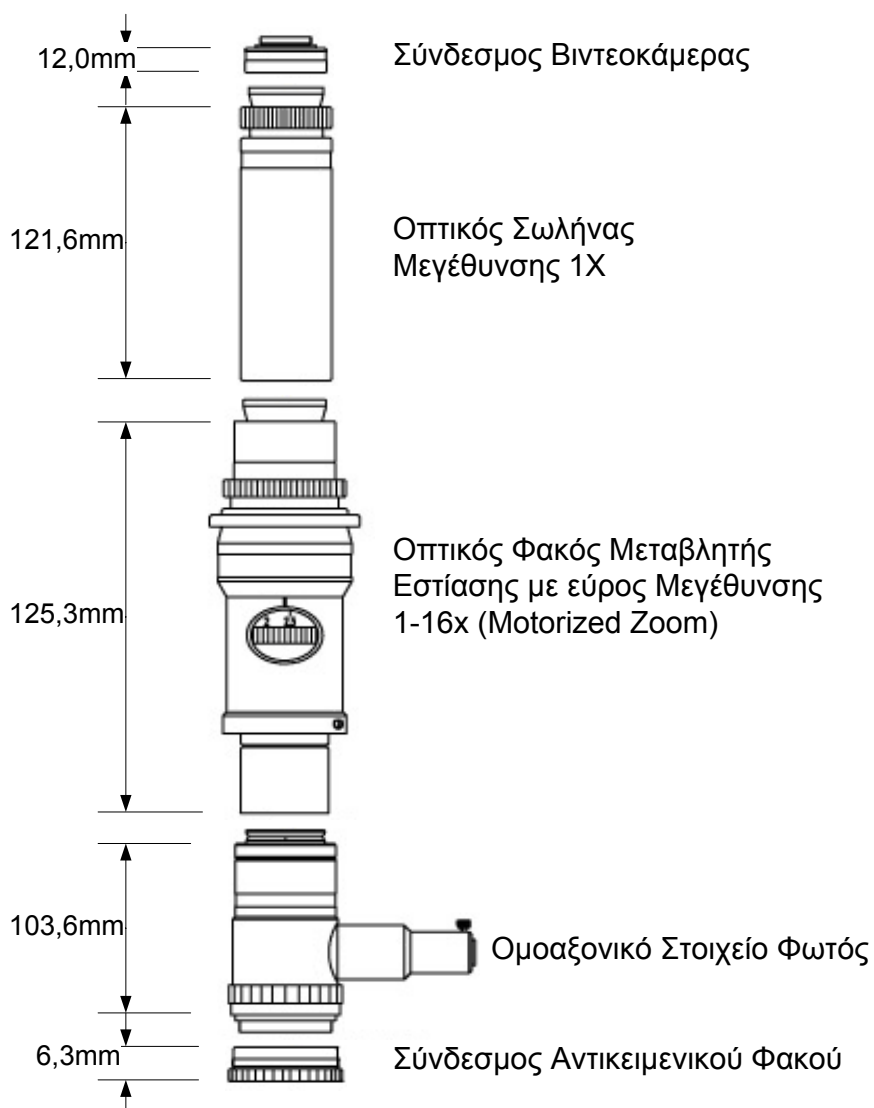


Εικόνα 3.6: Το μικροσκόπιο της Edmund Optics (16X Precision Zoom Lens).

Στην Εικόνα 3.7 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου, το οποίο αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- *Σύνδεσμος Βιντεοκάμερας*, ο οποίος χρησιμοποιείται για την στερέωση της βιντεοκάμερας και έχει μήκος  $12mm$ ,
- *Οπτικός σωλήνας μεγέθυνσης 1X*, με μήκος  $121,6mm$ ,
- *Φακός μεταβλητής εστίασης με εύρος μεγέθυνσης 1-16X*, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αυξομείωση του εύρους πεδίου της μικροβελόνας, με μήκος  $125,3mm$ ,
- *Ομοαξονικό στοιχείο φωτός*, στο οποίο συνδέεται εξωτερική πηγή φωτός, με μήκος  $103,6mm$ ,
- *Σύνδεσμος αντικειμενικού φακού*, ο οποίος χρησιμοποιείται για την στερέωση του αντικειμενικού φακού και έχει μήκος  $6,3mm$ .

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το συνολικό μήκος του συστήματος του μικροσκοπίου είναι  $368,8mm$ .



Εικόνα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση του μικροσκοπίου.

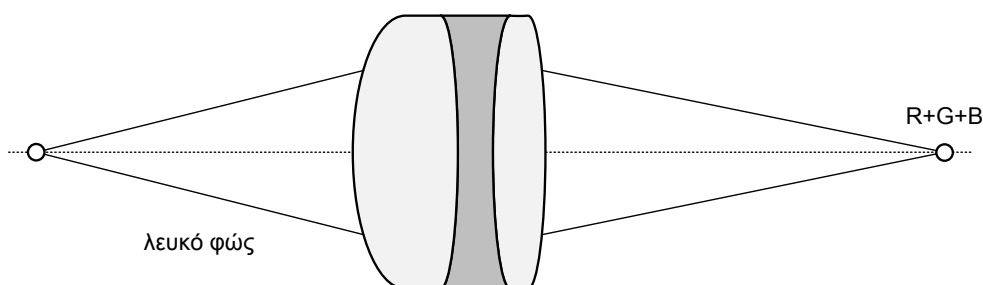
### 3.4.1. Αντικειμενικός φακός

Ο αντικειμενικός φακός που προσαρμόστηκε στο μικροσκόπιο είναι της εταιρείας Mitutoyo (Εικόνα 3.8). Ο φακός χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη διάμετρο και το μεγαλύτερο σε σχέση με άλλους, τα οποία διευκολύνουν το σχεδιασμό του. Για να διατηρηθεί μεγάλος ο αριθμητικός αριθμός (NA) και η αντίθεση στην εικόνα, ο φακός είναι



Εικόνα 3.8: Ο αντικειμενικός φακός LWD 5X της Mitutoyo.

επίπεδος αποχρωματικός. Ένας επίπεδος αποχρωματικός φακός έχει διορθωμένο χρωματικό σφάλμα απόκλισης για το κόκκινο, το μπλε και το πράσινο με αποτέλεσμα και τα τρία χρώματα να εστιάζουν στο ίδιο σημείο (Εικόνα 3.9).

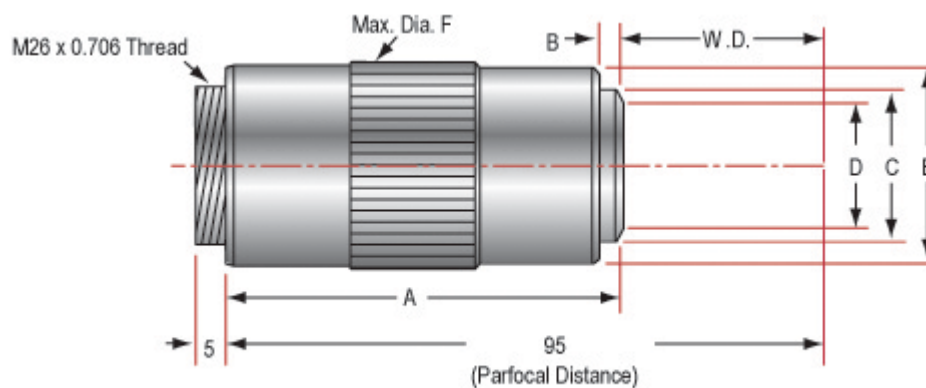


Εικόνα 3.9: Αρχή λειτουργίας ενός αποχρωματικού φακού.

Στην Εικόνα 3.8 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του αντικειμενικού φακού με τις διαστάσεις του, ενώ στον Πίνακα 3.2 αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά αντικειμενικού φακού.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ενίσχυση	5X
Αριθμητικό Άνοιγμα	0,14
Απόσταση Εργασίας (mm)	34,0
Εστιακή Απόσταση (mm)	40,0
Ισχύς (μm)	2,0
Βάθος εστίασης (μm)	14,0
Εύρος πεδίου με αισθητήρα 2/3" (mm)	1,8 x 1,32
Εύρος πεδίου με αισθητήρα 1/2" (mm)	1,28 x 0,96
Βάρος (g)	230



Units: mm

Εικόνα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα του αντικειμενικού φακού.

Στον Πίνακα 3.3 υπάρχουν οι φυσικές διαστάσεις του αντικειμενικού φακού.

Πίνακας 3.4: Διαστάσεις αντικειμενικού φακού.

Διάσταση	Τιμή
<b>A</b>	61,0 mm
<b>B</b>	1,6 mm
<b>C</b>	25,0 mm
<b>D</b>	22,0 mm
<b>E</b>	32,2 mm
<b>F</b>	34,0 mm

### 3.5. Κάμερα

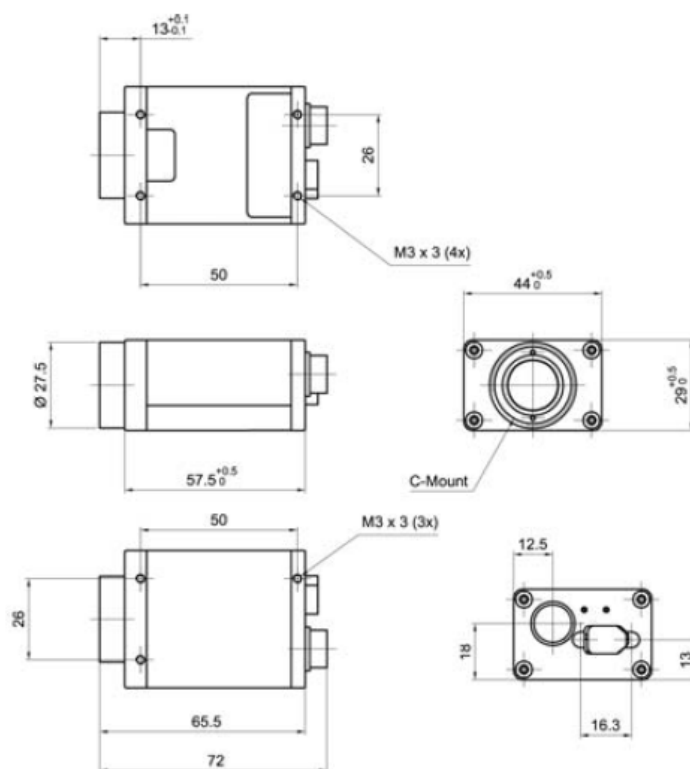
Η κάμερα του συστήματος θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ανάλυσης όπως υπολογίστηκαν προηγουμένα. Μετά από έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο επιλέχθηκε η κάμερα Marlin F-146B της εταιρείας Allied Vision Technologies (Εικόνα 3.11). Η κάμερα αγοράστηκε χωρίς αντικειμενικό φακό και προσαρμόστηκε στο πάνω μέρος του μικροσκοπίου. Ο Πίνακας 3.5 περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας. Όπως φαίνεται (Πίνακας 3.5) είναι μονόχρωμου τύπου με αισθητήρα τύπου CCD.



Εικόνα 3.11: Η κάμερα Marlin F-146B της Allied Vision Technologies GmbH.



Εικόνα 3.12: Οπίσθια και μπροστινή όψη της κάμερας.



Εικόνα 3.13: Διαστάσεις κάμερας.



Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά κάμερας.

Χαρακτηριστικό	
Αισθητήρας	CCD, τύπου 1/2"
Μέγεθος εικόνας	1280 x 960 εικονοστοιχεία (και όλα τα μικρότερα μεγέθη), μέχρι 1392 x 1040 εικονοστοιχεία
Μέγεθος εικονοστοιχείου	4,65 μm x 4,65 μm
Διακριτική ικανότητα	8 bit / 10 bit
Στήριξη φακού	Στήριξη τύπου C
Πρότυπο επικοινωνίας	IEEE 1394a IIDC v. 1.3
Ταχύτητα επικοινωνίας	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s
Ρυθμός ανανέωσης	Μέχρι 17,4
Έλεγχος ενίσχυσης	Χειροκίνητος και αυτόματος
Ταχύτητα κλείστρου	46 μs ... ~67s και αυτόματο
Τροφοδοσία	DC 8 V – 36 V μέσω του καλωδίου IEEE 1394
Κατανάλωση	< 3 watt (@ 12 VDC)
Διαστάσεις	72 mm x 44 mm x 29 mm (L x W x H)
Βάρος	< 120 g (χωρίς φακό)
Θερμοκρασία λειτουργίας	+5 ... +45° Celcius
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-10 ... +60° Celcius

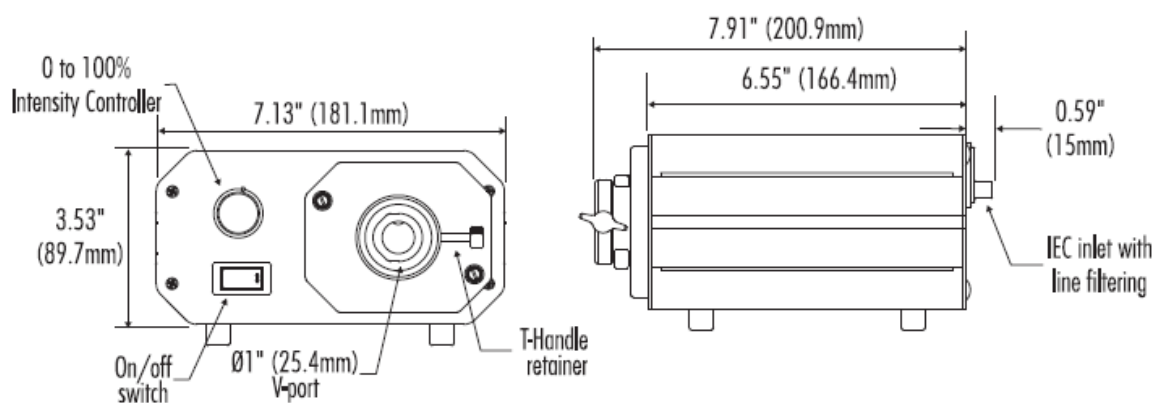
### 3.6. Πηγή φωτός

Η πηγή φωτός είναι σημαντικό στοιχείο της πειραματικής διάταξης με δεδομένο ότι το φως είναι καθοριστικός παράγοντας για την αξιόπιστη απεικόνιση του αντικειμένου στον αισθητήρα της κάμερας (στο Κεφ. 2 αναλύθηκε η επίδραση του φωτός στην ψηφιακή απεικόνιση και επεξεργασία). Βασικό χαρακτηριστικό της πηγής φωτός θα πρέπει να είναι η σταθερότητα στην ένταση του φωτός σε σχέση με τον χρόνο και η συμβατότητά της με το σύστημα του μικροσκοπίου.

Η πηγή φωτός που επιλέχθηκε είναι η FOI-21DC της εταιρείας TechniQuip (Εικόνα 3.14), η οποία χρησιμοποιεί λάμπα αλογόνου και έξοδο για οπτική ίνα. Η συσκευή έχει κύκλωμα σταθεροποίησης του φωτός και η ρύθμιση της έντασης είναι πλήρως ελεγχόμενη. Στην Εικόνα 3.15 φαίνονται οι διαστάσεις της συσκευής ενώ στον Πίνακα 3.6 υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της.



Εικόνα 3.14: Η πηγή φωτός FOI-21DC της εταιρείας TechniQuip.



Εικόνα 3.15: Διαστάσεις της συσκευής.

Πίνακας 3.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής φωτός.

Χαρακτηριστικό	
Συχνότητα λειτουργίας	60 Hz (110VAC) ή 50 Hz (220VAC)
Ισχύς	180 watts σε πλήρη ένταση φωτεινής δέσμης
Τροφοδοσία	110VAC; 220VAC
Εύρος ρύθμισης φωτός	0 ... 100%
Θερμοκρασία χρώματος λάμπας	3200K
Διάρκεια ζωής λάμπας	250 ... 10000 ώρες
Τύποι λάμπας	150 Watts, 3250 K
	150 Watts, 4200 K
	150 Watts, 3400 K

### 3.7. Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου μικροσκοπίου

Στο μικροσκόπιο που έχει επιλεγθεί πρέπει να ελέγξουμε τον οπτικό φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης (zoom) και εστίασης. Για να μπορέσουμε να αυτοματοποιήσουμε την διαδικασία ελέγχου θα χρησιμοποιήσουμε συσκευή η οποία θα έχει τη δυνατότητα να οδηγεί τους μικροκινητήρες οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι πάνω στο μικροσκόπιο. Η συσκευή που επιλέχθηκε είναι της Thales Ortem και αποτελείται από πέντε στοιχεία (Εικόνα 3.16):

- Οδηγός ελέγχου βηματικών κινητήρων (μοντέλο 30-17-70),
- Κουτί διασυνδέσεων (μοντέλο 30-17-74)
- Τροφοδοτικό (μοντέλο 30-17-32),
- Καλώδιο διασύνδεσης των δύο πρώτων στοιχείων (μοντέλο 301730-802)
- Καλώδιο διασύνδεσης του πρώτου στοιχείου με Η/Υ (μοντέλο 301730-803)

Η διασύνδεση των επιμέρους στοιχείων φαίνεται στην Εικόνα 3.18.

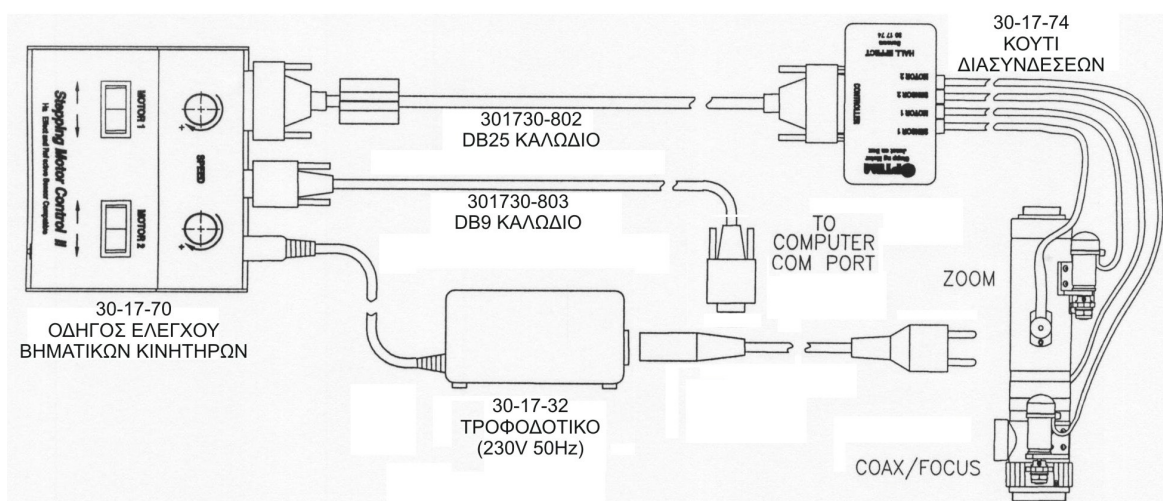


Εικόνα 3.16: Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του μικροσκοπίου.

Η συσκευή μπορεί να ελέγξει μέχρι δύο κινητήρες, με δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας και της διεύθυνσης. Το αριστερό μέρος (Motor 1) ελέγχει την κίνηση του οπτικού φακού μεταβλητής εστιακής απόστασης ενώ το δεξιό μέρος (Motor 2) ελέγχει την κίνηση του μηχανισμού εστίασης του αντικειμένου. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιεί ποτενσιόμετρα (ρύθμιση ταχύτητας) και διακόπτες (ρύθμιση κίνησης κινητήρα μπρος-πίσω). Επίσης ο έλεγχος της διαδικασίας μπορεί να γίνει και μέσω Η/Υ με κατάλληλο λογισμικό. Στην υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο χειροκίνητος τρόπος μέσω (Εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.17: Ρυθμιστές ταχύτητας και διεύθυνσης κινητήρων μικροσκοπίου.



Εικόνα 3.18: Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας συσκευής ελέγχου.

## 4. Επεξεργασία και Ανάλυση Εικόνας

Η επεξεργασία της εικόνας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

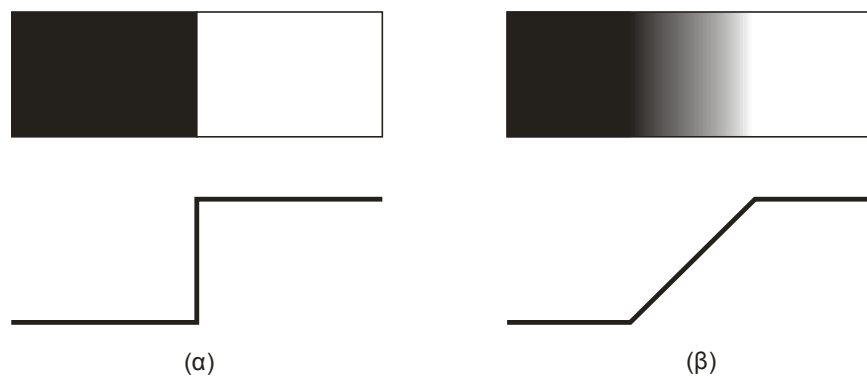
- Μέθοδος προσδιορισμού ακμών,
- Μέθοδος ανεύρεσης γραμμών,
- Μέθοδος ανεύρεσης κύκλων.

### 4.1. Μέθοδος προσδιορισμού ακμών

#### 4.1.1. Ακμές

Ο προσδιορισμός ακμών είναι θεμελιώδης τεχνική στην επεξεργασία εικόνας, στο επίπεδο των αποχρώσεων του γκρι. Οι τεχνικές ανεύρεσης γραμμών και κύκλων που ακολουθούν βασίζονται στον προσδιορισμό των ακμών.

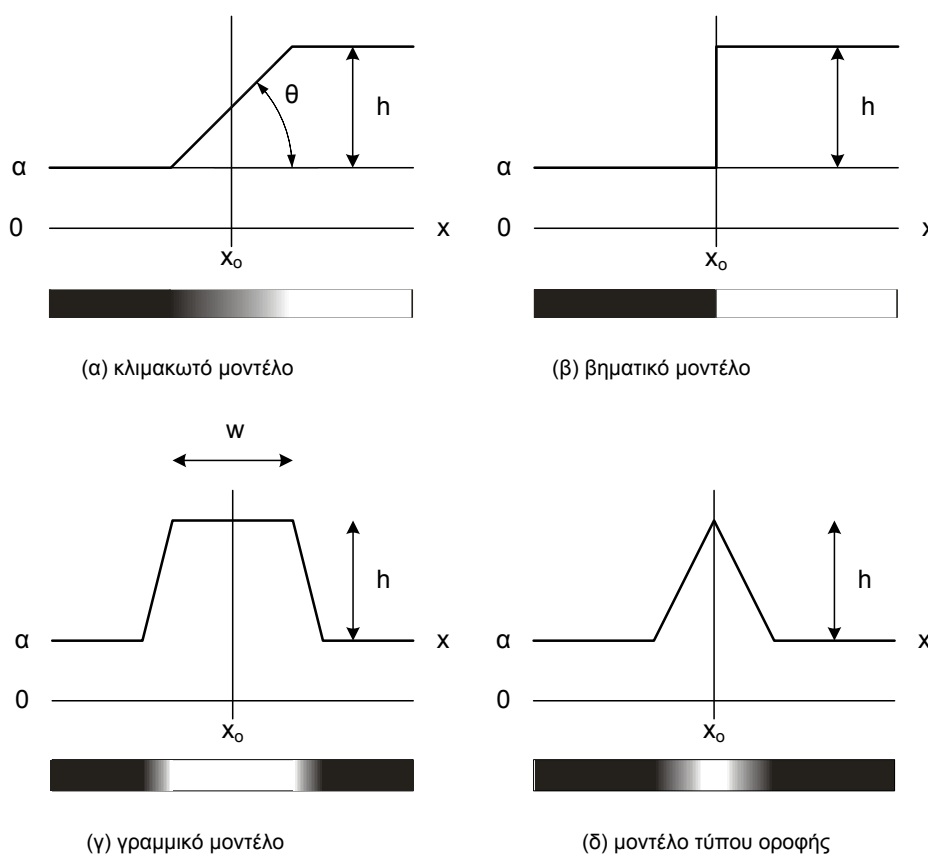
Ακμές είναι εκείνες οι περιοχές της εικόνας στις οποίες εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές της φωτεινότητας (η σημαντικότερη αιτία) ή άλλων χαρακτηριστικών όπως η πυκνότητά της, η υφή της και κυρίως η κατανομή των επιπέδων του γκρι. Οι ακμές δημιουργούνται στα σημεία που αντιστοιχούν στις οριακές επιφάνειες των αντικειμένων της απεικονιζόμενης σκηνής. Ο ορισμός δεν είναι ακριβής μαθηματικός γιατί τέτοιος δεν μπορεί να δοθεί. Τις δεχόμαστε ως περιοχές, στις οποίες η μεταβολή της φωτεινότητας ή άλλων χαρακτηριστικών είναι πολύ πιο έντονη από ότι στην υπόλοιπη εικόνα. Ιδανική ακμή είναι αυτή που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο περιοχές με απότομη μετάβαση από το ένα στο άλλο επίπεδο φωτεινότητας (Εικόνα 4.1 (α)). Στην πραγματικότητα μια ακμή χαρακτηρίζεται από ομαλή μετάβαση ανάμεσα σε δύο περιοχές με εμφανή διαφορά στη μέση τιμή των φωτεινοτήτων που τις αποτελούν (Εικόνα 4.1 (β)).



Εικόνα 4.1: Ιδανική (α) και Μη Ιδανική (β) Ακμή.

### 4.1.2. Μοντέλα Ακμών

Στην Εικόνα 4.2 φαίνονται τα μοντέλα ακμών τα οποία αναφέρονται σε συνεχή εικόνα και συσχετίζονται με την φωτεινότητα της εικόνας. Στην Εικόνα 4.2(α) φαίνεται το *μοντέλο κλίσης*, το οποίο χαρακτηρίζεται από το ύψος του  $h$ , την κλίση του  $\theta$  και τη οριζόντια συντεταγμένη  $x_0$  του μέσου σημείου της κλίσης. Εάν η γωνία  $\theta$  είναι  $90^\circ$ , τότε το μοντέλο ονομάζεται *βηματικό* (Εικόνα 4.2 (β)). Στις ψηφιακές εικόνες τέτοιου είδους ακμές παρουσιάζονται σε τεχνητά κατασκευασμένες εικόνες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ελέγχων. Στην Εικόνα 4.2(γ) παρουσιάζεται το *γραμμικό* μοντέλο ακμής το οποίο χαρακτηρίζεται από το ύψος  $h$  και το πλάτος  $w$ . Τέλος, στην περίπτωση που το πλάτος  $w$  είναι  $0$ , τότε το μοντέλο είναι τύπου *οροφής* (Εικόνα 4.2 (δ)).



Εικόνα 4.2: Μονοδιάστατα συνεχή μοντέλα ακμών.

Για να υπάρχει ακμή θα πρέπει το ύψος της να είναι μεγαλύτερο μιας εκ των προτέρων καθορισμένης στάθμης.

### 4.1.3. Προσδιορισμός Ακμών

Για τον προσδιορισμό των ακμών θεωρούμε ότι το οριακό σημείο της ακμής είναι το σημείο  $x_0$  το οποίο αναζητούμε. Ένας τρόπος για να προσδιορίσουμε το σημείο  $x_0$  είναι η χρησιμοποίηση της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου προς όλες τις κατευθύνσεις. Στις ψηφιακές εικόνες, εάν προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε παραγώγους θα έρθουμε αντιμέτωποι με δύο βασικά εμπόδια:

- Η τιμή του σήματος είναι γνωστή μόνο στα pixels της εικόνας, δηλαδή σε ένα πεπερασμένο πλήθος σημείων του πεδίου ορισμού,
- Σε κάθε pixel, η τιμή του σήματος είναι το άθροισμα της πραγματικής φωτεινότητας, του θορύβου κβάντισης, αλλά και πιθανόν και άλλου θορύβου, από τον οποίο σε μερικές περιπτώσεις έχει προσβληθεί η εικόνα.

Έτσι λοιπόν, για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις παραγώγους, προσεγγίζουμε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές. Όμως, όταν υπάρχει μικρή διακύμανση στη φωτεινότητα και στο θόρυβο, η προσέγγιση με παραγώγους είναι ευαίσθητη. Το πρόβλημα αυτό της ευαισθησίας μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας δισδιάστατες μάσκες οι οποίες προκαλούν εξομάλυνση στη μία διεύθυνση ενώ υπολογίζουν διαφορές ταυτόχρονα στην άλλη διεύθυνση. Οι ακμές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την πράξη της συνέλιξης ανάμεσα στην εικόνα και τη μάσκα:

$$g[n,m] = f[n,m] \otimes h[n,m] = \sum_{j=-J}^J \sum_{k=-K}^K h[n,m] f[-j,-k] \quad (4.1)$$

Στη βιβλιογραφία συναντάμε ένα μεγάλο πλήθος από τεχνικές ανίχνευσης των ακμών. Κάθε μία από αυτές είναι κατάλληλη για διαφορετικές εικόνες ανάλογα με τα επίπεδα θορύβου και τους ρυθμούς μεταβολής της φωτεινότητας. Επίσης διαφέρουν μεταξύ τους και στην ακρίβεια εντοπισμού της θέσης μιας ακμής στην εικόνα.

Οι τεχνικές ανίχνευσης ακμών μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη βασίζεται στην εκτίμηση της κλίσης και οι μάσκες διαφόρισης που χρησιμοποιούνται, καλούνται τελεστές κλίσης (*gradient operators*). Η δεύτερη ομάδα υπολογίζει τις παραγώγους κατά κατεύθυνση και οι μάσκες διαφόρισης είναι γνωστές ως τελεστές προσανατολισμού (*compass operators*).

Η γενική περιγραφή των μασκών ανίχνευσης ακμών διαστάσεων 3 x 3 περιγράφεται από το παρακάτω πρότυπο αρίθμησης:

$$\begin{bmatrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_5 & A_4 & A_3 \\ A_6 & A_7 & A_9 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 4.3: Γενική μήτρα μάσκας [3x3].

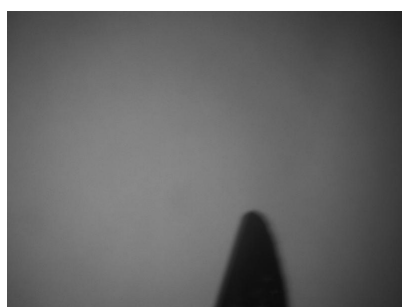
Ο αριθμός των τελεστών που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των ακμών δεν έχει όριο αφού συνεχώς με την βοήθεια πειραμάτων ανακαλύπτονται νέοι. Τέσσερις συνηθισμένοι τελεστές με καλά αποτελέσματα είναι εκείνοι των Sobel, Prewitt, Roberts και Canny οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τελεστές προσδιορισμού ακμών.

Κατεύθυνση	Τελεστής Sobel	Τελεστής Prewitt	Τελεστής Roberts	Τελεστής Canny
0°	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$
90°	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$

#### 4.1.4. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η μικροβελόνα, όπως συλλαμβάνεται από την βιντεοκάμερα



Εικόνα 4.4: Αρχική εικόνα της μικροβελόνας.

Στην επόμενη Εικόνα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των τελεστών του Πίνακα 4.1. Όλοι οι τελεστές έχουν εντοπίσει τις ακμές, με διαφορετικά όμως αποτελέσματα. Ο τελεστής Roberts (Εικόνα 4.5(γ)) ανέδειξε τις ακμές αλλά με διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή, χωρίς δηλαδή συνέχεια σε όλα τα σημεία,

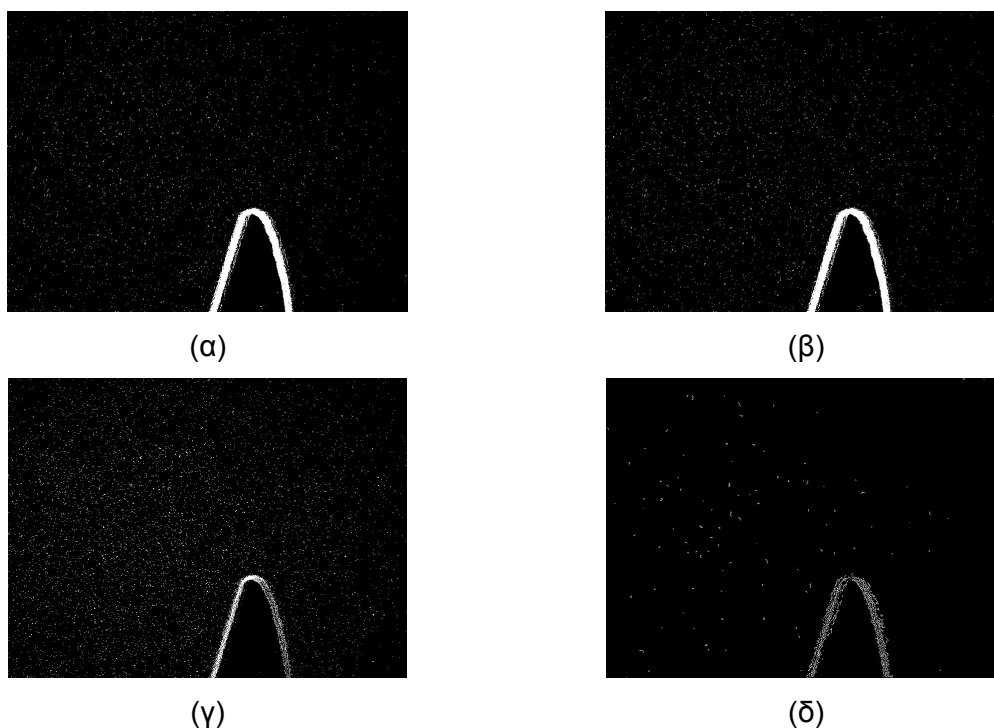


ιδιαίτερα σε αυτά που εστιάζουν με τη σκοτεινή περιοχή. Αντίθετα ο τελεστής Canny (Εικόνα 4.5 (δ)) ανέδειξε τις ακμές με ομοιόμορφο τρόπο αλλά με διασπορά της πληροφορίας. Επειδή στην συγκεκριμένη εφαρμογή μας ενδιαφέρει η ανίχνευση των ακμών με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, οι δύο τελευταίοι τελεστές δεν είναι κατάλληλοι. Οι δύο πρώτοι τελεστές εντόπισαν τις ακμές με παρόμοιο τρόπο και με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια.

## 4.2. Τεχνική ανεύρεσης γραμμών

### 4.2.1. Μετασχηματισμός Hough

Για την ανεύρεση γραμμών (ευθύγραμμων τμημάτων) και επακόλουθα της γωνίας κίνησης της μικροβελόνας θα χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Hough, ο οποίος είναι μια τεχνική εξαγωγής χαρακτηριστικών με ευρεία χρήση στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Το βασικό χαρακτηριστικό του προσδιορισμού της θέσης ευθειών με το μετασχηματισμό Hough είναι η σχέση σημείου-ευθείας.



Εικόνα 4.5: Εφαρμογή των τελεστών (α) Sobel, (β) Prewitt, (γ) Roberts και (δ) Canny.

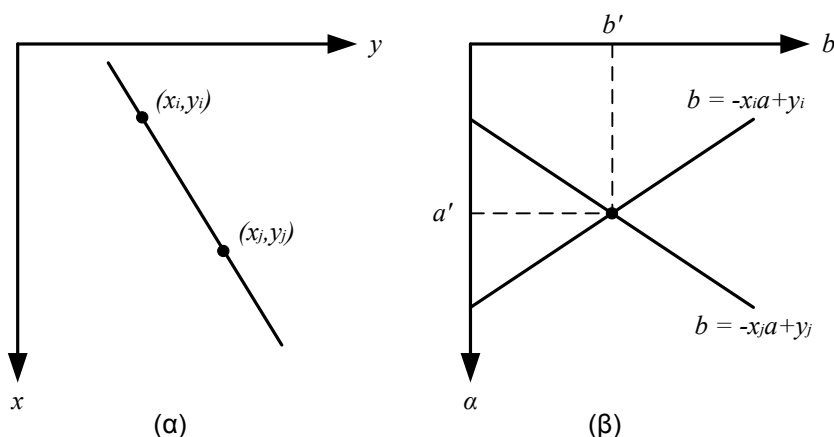
Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σημείο  $(x_i, y_j)$ , στο καρτεσιανό επίπεδο, τότε η παραμετρική εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y_i = ax_i + b \quad (4.2)$$

Όλες οι ευθείες που διέρχονται από το σημείο  $(x_i, y_i)$  για διαφορετικά  $a$  και  $b$  ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση. Εάν στη συνέχεια γράψουμε την εξίσωση ως ακολούθως:

$$b = -x_i a + y_i \quad (4.3)$$

και θεωρήσουμε το επίπεδο  $ab$  (γνωστό και ως *παραμετρικός χώρος*), τότε το σημείο  $(x_i, y_i)$  αντιστοιχίζεται σε *ευθεία*. Επιπλέον, εάν πάρουμε ένα δεύτερο σημείο  $(x_j, y_j)$ , τότε και αυτό αντιστοιχίζεται σε ευθεία η οποία τέμνει την προηγούμενη στο σημείο  $(a', b')$ . Στην πραγματικότητα όλα τα σημεία της ευθείας στο  $xy$  - επίπεδο αντιστοιχίζονται σε ευθείες στον παραμετρικό χώρο, οι οποίες τέμνονται στο σημείο  $(a', b')$ .

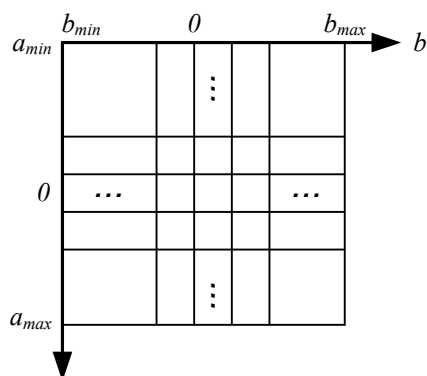


Εικόνα 4.6:  $xy$  - επίπεδο (α) και  $ab$  - επίπεδο (β).

Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η αναφερθείσα προσέγγιση.

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του *μετασχηματισμού Hough* περιλαμβάνει την διαίρεση του παραμετρικού χώρου σε *κελιά μήτρας Hough*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7, όπου  $(a_{\max}, a_{\min})$  και  $(b_{\max}, b_{\min})$  είναι οι αναμενόμενες τιμές κλίσης της ευθείας και του σημείου τομής των ευθειών. Το κελί με συντεταγμένες  $(i, j)$  και τιμή  $A(i, j)$  αντιστοιχεί στο παράθυρο μήτρας του παραμετρικού χώρου  $(a_i, b_j)$ . Αρχικά όλα τα κελιά της μήτρας έχουν τιμή 0. Στη συνέχεια, για κάθε σημείο  $(x_k, y_k)$  της αρχικής εικόνας, θέτουμε την παράμετρο  $a$  ίση με τις επιτρεπόμενες τιμές του άξονα  $a$  και βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές  $b$  λύνοντας την εξίσωση:

$$b = -x_k a + y_k \quad (4.4)$$



Εικόνα 4.7: Διαίρεση του παραμετρικού χώρου για χρήση στο μετασχηματισμό Hough.

Οι τιμές  $b$  που βρίσκονται στρογγυλοποιούνται προς την κοντινότερη επιτρεπόμενη τιμή στον άξονα  $-b$ . Στη συνέχεια για κάθε τιμή  $a_p$  η οποία οδηγεί σε λύση  $b_p$  θέτουμε:

$$A(p, q) = A(p, q) + 1 \quad (4.5)$$

Τελικά, η τιμή  $Q$  στο  $A(i, j)$  αντιστοιχίζεται σε  $Q$  σημεία του επιπέδου  $-xy$  τα οποία βρίσκονται πάνω στην ευθεία:

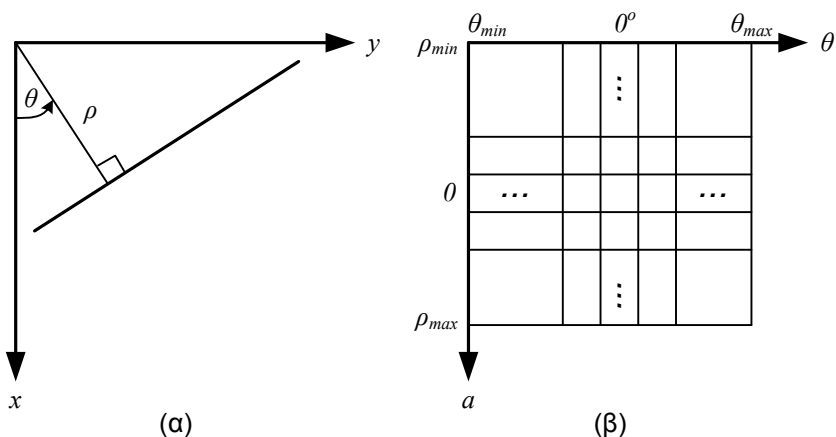
$$y = ax_i + b_j \quad (4.6)$$

Ο αριθμός των διαιρέσεων στο  $ab$  – επίπεδο καθορίζει τον αριθμό των συνευθειακών σημείων.

Ένα πρόβλημα που υπάρχει όταν χρησιμοποιούμε την Εξ. (4.2) είναι όταν η κλίση τείνει στο άπειρο όταν η ευθεία προσεγγίζει τον κάθετο άξονα. Ένας τρόπος για να υπερβούμε το πρόβλημα είναι να κάνουμε χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (4.7)$$

Η Εικόνα 4.8 απεικονίζει τη γεωμετρική ερμηνεία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην Εξ. (5.7). Η κατασκευή της μήτρας Hough με την βοήθεια της Εξ. (5.7) γίνεται όπως ήδη περιγράψαμε για την Εξ. (5.2). Σε αντίθεση όμως με την κατασκευή ευθειών γραμμών στον παραμετρικό χώρο  $a, b$  στην προηγούμενη περίπτωση, εδώ έχουμε ημιτονοειδείς καμπύλες στον χώρο  $\rho, \theta$ . Όμως, όπως και πριν, έτσι και τώρα τα  $Q$  συνευθειακά σημεία



Εικόνα 4.8:  $xy$  - επίπεδο (α) και  $\rho\theta$  - επίπεδο (β).

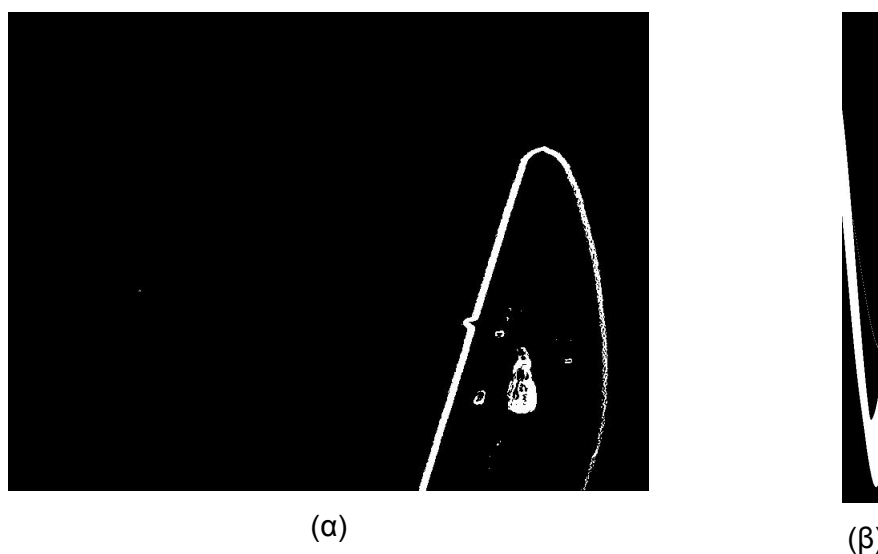
που βρίσκονται στην ευθεία  $x \cos \theta_j + y \sin \theta_j = \rho_i$  παράγουν  $Q$  ημιτονοειδής καμπύλες οι οποίες τέμνονται στα σημεία  $(\rho_i, \theta_j)$  του παραμετρικού χώρου. Αυξάνοντας τη γωνία  $\theta$  και επιλύοντας για το αντίστοιχο  $\rho$  παίρνουμε  $Q$  σημεία της μήτρας  $A(i, j)$ , τα οποία συσχετίζονται με τα κελιά  $(\rho_i, \theta_j)$ . Η Εικόνα 4.8(β) απεικονίζει την διαίρεση του παραμετρικού χώρου.

Το εύρος της γωνίας  $\theta$  είναι  $\pm 90^\circ$  σε σχέση με το άξονα  $-x$ . Κατά συνέπεια με αναφορά την Εικόνα 4.8(α), μια οριζόντια γραμμή έχει γωνία  $\theta = 0^\circ$ , και το  $\rho$  ταυτίζεται με τον θετικό ημιάξονα  $x$ . Παρόμοια, μια κάθετη γραμμή έχει γωνία  $\theta = 90^\circ$  και το  $\rho$  ταυτίζεται με τον θετικό ημιάξονα  $y$ .

#### 4.2.2. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων

Ο μετασχηματισμός Hough είναι χρήσιμος στην εφαρμογή μας γιατί με την βοήθειά του μπορούμε να εξάγουμε την ευθεία η οποία είναι η ακμή της μικροβελόνας και κατά συνέπεια τη γωνία της κλίσης της σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων στο επίπεδο. Στην Εικόνα 4.9(α) απεικονίζεται η μικροβελόνα μετά την επεξεργασία για την εύρεση των ακμών της, ενώ στην Εικόνα 4.9(β) φαίνεται ο μετασχηματισμός Hough. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, θα πρέπει να επιλέξουμε τον αριθμό των διαστημάτων στο επίπεδο  $\rho\theta$ .

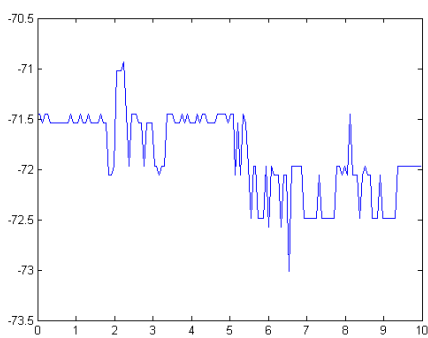
Επιλύουμε διαδοχικά για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\theta$  του παραμετρικού χώρου και της απόστασης  $\rho$ . Στα επόμενα σχήματα απεικονίζεται η μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο, για διαφορετικά  $\theta$  και  $\rho$ . Παρατηρώντας τα σχήματα βλέπουμε



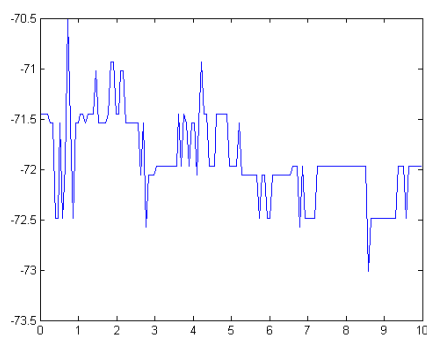
Εικόνα 4.9: Οι ακμές της μικροβελόνας (α) και ο μετασχηματισμός Hough (β).

ότι για  $\theta = 2^\circ$  και  $\rho = 2$  (Εικόνα 4.12(γ)) έχουμε την ελάχιστη δυνατή «ταλάντωση» της γωνίας της μικροβελόνας. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε  $\theta = 2^\circ$  και  $\rho = 2$ .

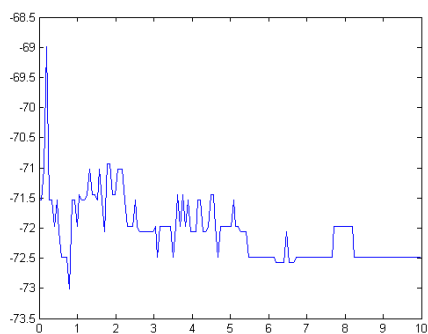
Στη συνέχεια μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε την γωνία της μικροβελόνας γνωρίζοντας την ευθεία που περνάει από την ακμή της με το μεγαλύτερο ευθύγραμμο τμήμα.



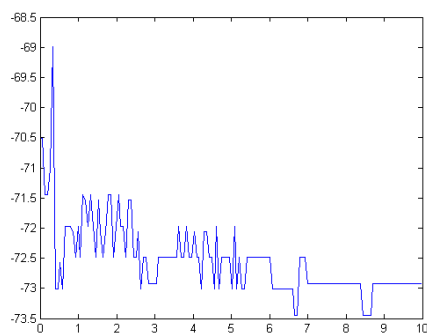
(α)  $\theta = 0,5^\circ$ ,  $\rho = 0,5$



(β)  $\theta = 0,5^\circ$ ,  $\rho = 1$

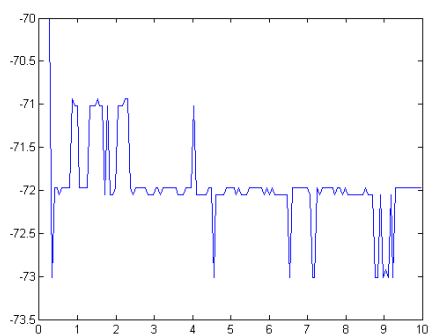


(γ)  $\theta = 0,5^\circ$ ,  $\rho = 2$

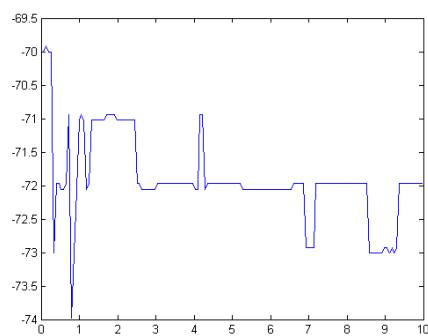


(δ)  $\theta = 0,5^\circ$ ,  $\rho = 5$

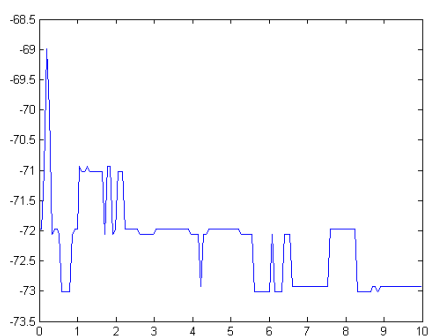
Εικόνα 4.10: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για  $\theta=0,5^\circ$ .



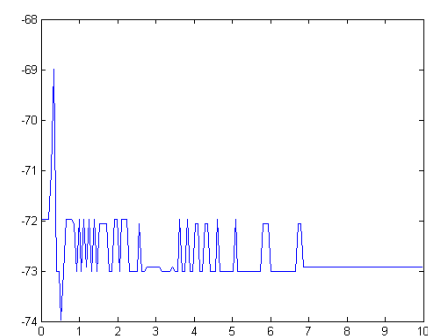
(α)  $\theta = 1^\circ, \rho = 0,5$



(β)  $\theta = 1^\circ, \rho = 1$

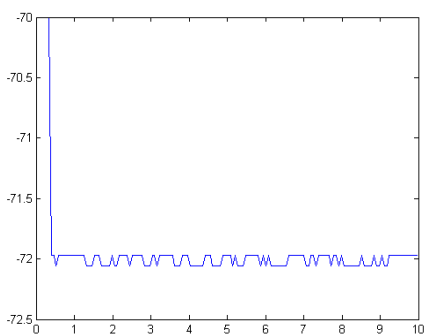


(γ)  $\theta = 1^\circ, \rho = 2$

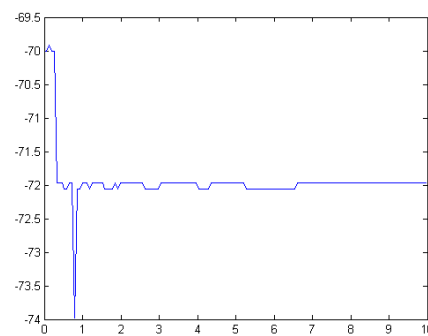


(δ)  $\theta = 1^\circ, \rho = 5$

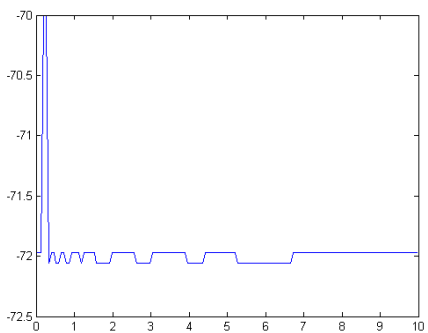
Εικόνα 4.11: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για  $\theta=1^\circ$ .



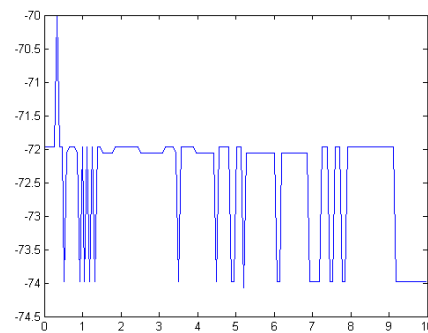
(α)  $\theta = 2^\circ, \rho = 0,5$



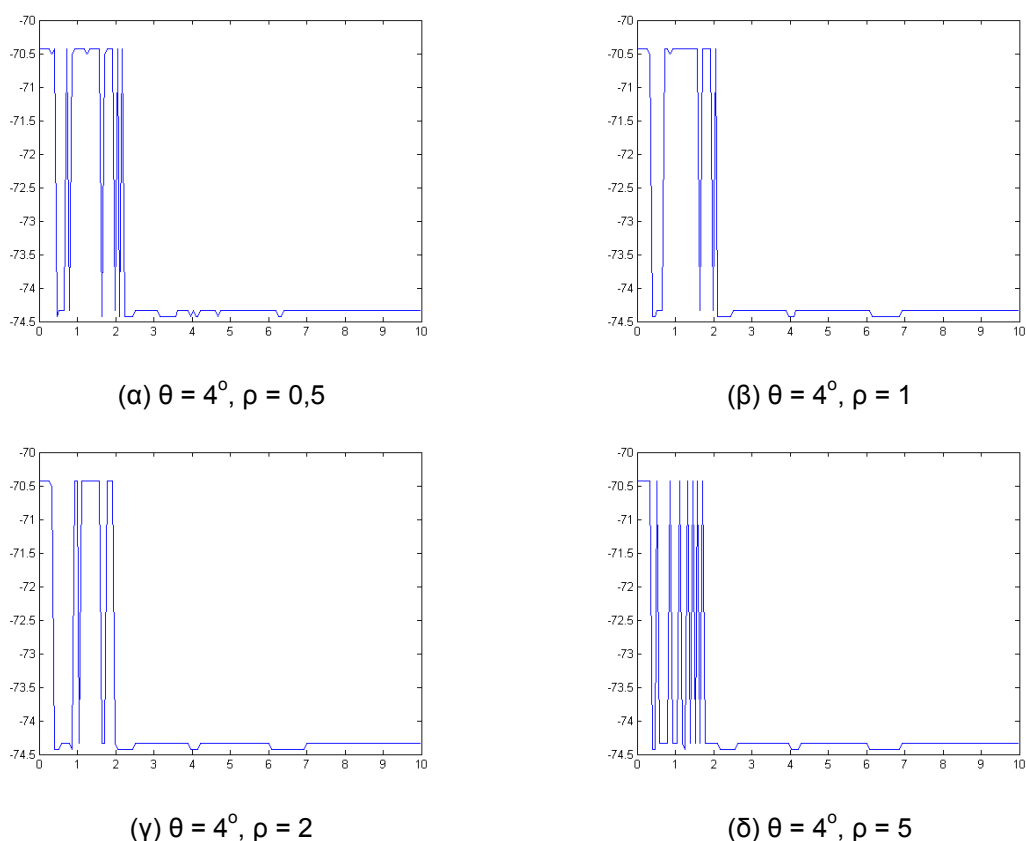
(β)  $\theta = 2^\circ, \rho = 1$



(γ)  $\theta = 2^\circ, \rho = 2$



(δ)  $\theta = 2^\circ, \rho = 5$

Εικόνα 4.12: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για  $\theta=2^\circ$ .Εικόνα 4.13: Μεταβολή της γωνίας της μικροβελόνας στο χρόνο για  $\theta=4^\circ$ .

### 4.3. Τεχνική ανεύρεσης κύκλων

Ένα χαρακτηριστικό του σχήματος της μικροβελόνας είναι ότι η άκρη της είναι κυκλική. Αυτό το χαρακτηριστικό θα χρησιμοποιηθεί για να προσδιορισθεί η θέση της. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιηθεί μια τεχνική ανεύρεσης κύκλων με την βοήθεια του *Κυκλικού Μετασχηματισμού Hough* (*Circular Hough Transform - CHT*).

#### 4.3.1. Κυκλικός μετασχηματισμός Hough

Ο κυκλικός μετασχηματισμός Hough είναι ειδική μορφή του γενικευμένου μετασχηματισμού Hough ο οποίος παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5.4.1. Ο μετασχηματισμός κύκλων στον παραμετρικό χώρο είναι απλούστερος σε σχέση με τις ευθείες γραμμές. Η εξίσωση ενός κύκλου είναι:

$$r^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 \quad (4.8)$$

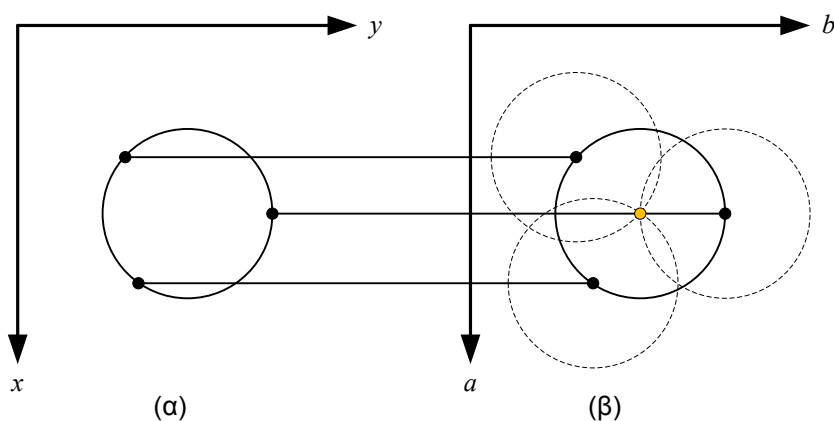
Όπως φαίνεται από την εξίσωση ο κύκλος έχει τρεις παραμέτρους,  $r$ ,  $a$  και  $b$ . Όπου  $a$  και  $b$  είναι το κέντρο του κύκλου στο επίπεδο -  $xy$  και  $r$  η ακτίνα του. Η παραμετροποίηση της προηγούμενης εξίσωσης οδηγεί στις παρακάτω εξισώσεις:

$$x = a + r \cos \theta \quad (4.9)$$

$$y = b + r \sin \theta \quad (4.10)$$

Είναι προφανές ότι ο παραμετρικός χώρος του κύκλου θα ανήκει στο  $R^3$  σε αντίθεση με αυτόν της ευθείας που ανήκει στο  $R^2$ . Ουσιαστικά, στο βαθμό που αυξάνονται οι απαιτούμενοι παράμετροι για την περιγραφή του σχήματος και κατά συνέπεια οι διαστάσεις του παραμετρικού χώρου, τότε στον ίδιο βαθμό αυξάνεται και η υπολογιστική πολυπλοκότητα του μετασχηματισμού Hough. Έτσι λοιπόν ο μετασχηματισμός Hough χρησιμοποιείται για την εύρεση σχημάτων των οποίων οι παράμετροι ανήκουν στο χώρο  $R^2$  ή το πολύ στο χώρο  $R^3$ . Για να μειώσουμε τον αριθμό των παραμέτρων του κύκλου στην εφαρμογή μας θα θεωρήσουμε ότι η ακτίνα του κύκλου είναι γνωστή, οπότε το πρόβλημα θα επιλυθεί στον χώρο  $R^2$  αναζητώντας τα  $a$  και  $b$ .

Στην Εικόνα 4.14 φαίνεται η αναπαράσταση ενός κύκλου στο επίπεδο -  $xy$  και ο μετασχηματισμός του στο επίπεδο -  $ab$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι κάθε σημείο του κύκλου αντιστοιχίζεται σε κύκλο ακτίνας  $r$  στο επίπεδο -  $ab$ . Η τομή των κύκλων στο επίπεδο -  $ab$  είναι το κέντρο του κύκλου στο χώρο -  $xy$ .



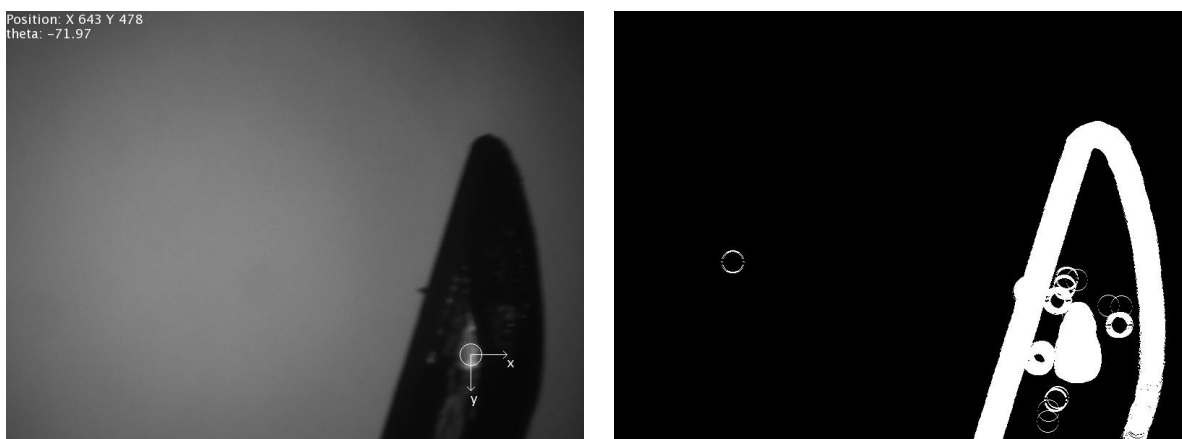
Εικόνα 4.14:  $xy$  - επίπεδο (α) και  $ab$  - επίπεδο (β).



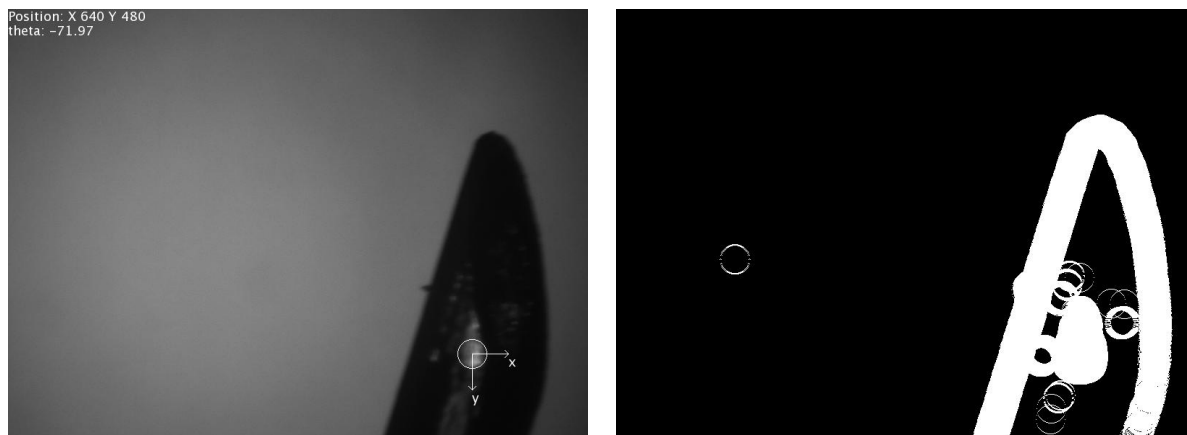
Όπως στο γενικευμένο μετασχηματισμό Hough, έτσι και στον κυκλικό μετασχηματισμό κατασκευάζουμε τη *μήτρα Hough* από την οποία εξαγάγουμε το κέντρο του κύκλου. Στον αρχικό κύκλο το κέντρο του είναι άγνωστο σε εμάς. Στόχος της τεχνικής είναι η εύρεση του κέντρου του κύκλου από τα σημεία του. Η *μήτρα Hough* περιλαμβάνει τα μετασχηματισμένα σημεία του κύκλου με τη χρήση των Εξ. (5.9) και (5.10). Ο μεγαλύτερος αριθμός είναι το κέντρο του κύκλου.

#### 4.3.2. Εφαρμογή και σύγκριση αποτελεσμάτων

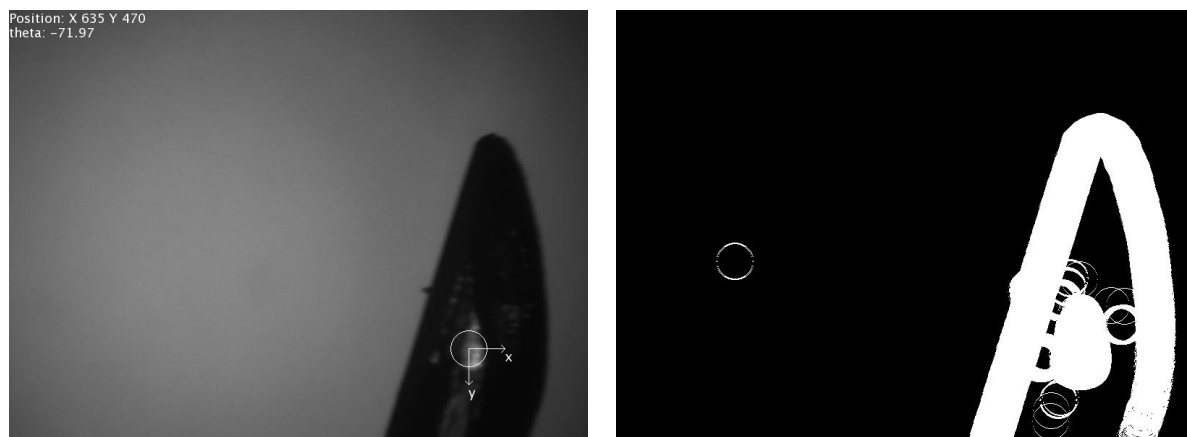
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η εφαρμογή της τεχνικής του κυκλικού μετασχηματισμού Hough στη μικροβελόνα. Για την υλοποίηση της τεχνικής προηγήθηκε η εύρεση των ακμών της μικροβελόνας (Εικόνα 4.9(α)) και στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός για διαφορετικά  $r$ . Από τα αποτελέσματα είναι προφανές ότι όσο πιο μικρό είναι το  $r$  τόσο περισσότεροι κύκλοι βρίσκονται στην εικόνα, το οποίο οδηγεί σε σφάλμα μέτρησης αφού οποιαδήποτε αλλαγή της υψής της μικροβελόνας προσθέτει φωτεινή περιοχή ικανή να ανιχνευτεί ως κύκλος. Εμπειρικά οδηγηθήκαμε σε ακτίνα  $r = 30\text{pixels}$  η οποία αντιστοιχεί σε κύκλο ο οποίος εμφανίζεται στην άκρη της μικροβελόνας.



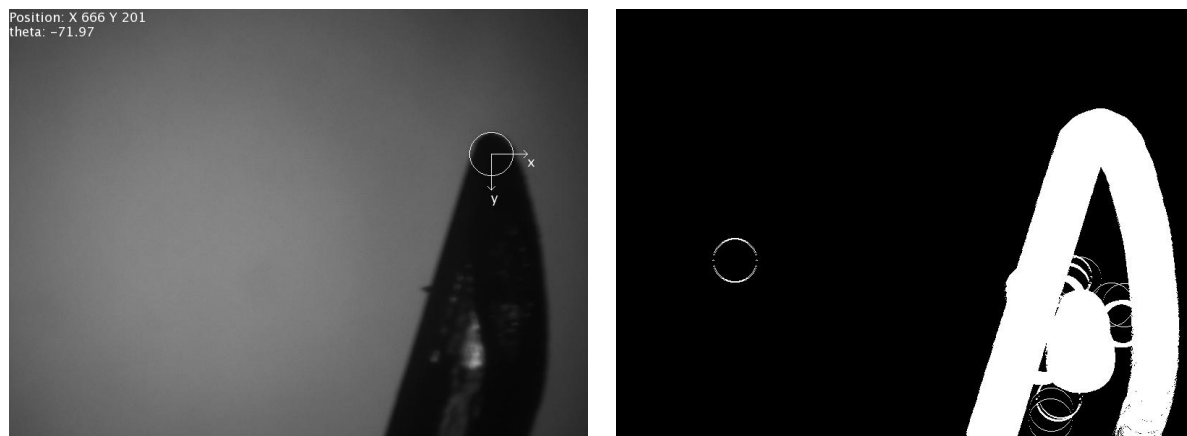
(α)



(β)



(γ)



(δ)

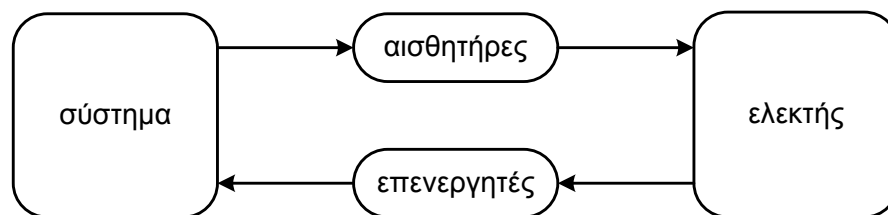
Εικόνα 4.15: Κυκλικός μετασχηματισμός Hough μικροβελόνας για διαφορετικά  $r$  (15, 20, 25, 30).

## 5. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου

### 5.1. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου

Τα συστήματα πραγματικού χρόνου είναι συστήματα τα οποία αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους παράγοντας συγκεκριμένα σήματα εξόδου ως αντίδραση σε συγκεκριμένα σήματα εισόδου. Συνήθως ένα τέτοιο σύστημα δεν επιτρέπεται να σταματάει τη λειτουργία του αλλά πρέπει να είναι συνεχώς σε κατάσταση ετοιμότητας. Στον πραγματικό κόσμο υπάρχει πληθώρα συστημάτων τα οποία αντιδρούν άμεσα.

Ένα σύστημα πραγματικού χρόνου σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι σε θέση να απαντάει σε εξωτερικά γεγονότα μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Σχεδιαστικός στόχος είναι ο έλεγχος ενός φυσικού συστήματος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο ελεγκτής να ικανοποιεί όλους τους χρονικούς περιορισμούς (Εικόνα 5.1). Το σύστημα πραγματικού χρόνου παρακολουθεί και ελέγχει το περιβάλλον του. Ο χρόνος είναι κρίσιμη παράμετρος. Το σύστημα πρέπει να αντιδράσει μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά περιθώρια.



Εικόνα 5.1: Σύστημα Πραγματικού Χρόνου.

Ένα σύστημα πραγματικού χρόνου ορίζεται ως ένα *σύστημα λογισμικού του οποίου η σωστή λειτουργία εξαρτάται από τα αποτελέσματα που παράγονται από το σύστημα και τον χρόνο στον οποίο τα αποτελέσματα παράγονται*. Υπάρχουν συστήματα «soft» και «hard». Το «hard» σύστημα πραγματικού χρόνου *πρέπει να τελειώσει την εκτέλεση μιας διεργασίας εντός συγκεκριμένης χρονικής προθεσμίας* αλλιώς οι συνέπειες θα είναι σημαντικές. Από την άλλη το «soft» σύστημα *θα ήταν καλό να τελειώσει την διεργασία εντός της προθεσμίας ενώ η μη τήρηση των χρονικών περιορισμών μπορεί να γίνει ανεκτή σε κάποιον βαθμό*. Για παράδειγμα το σύστημα ελέγχου σε ένα αυτοκίνητο θα πρέπει να ικανοποιεί απαιτήσεις πραγματικού χρόνου τύπου «soft» για τον κλιματισμό ενώ για τους αερόσακους τύπου «hard».

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά των λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου.

### 5.1.1. Διεργασίες πραγματικού χρόνου

Η *διαχείριση διεργασιών (task management)* είναι η βασική αποστολή του λειτουργικού συστήματος: η διεργασία θα πρέπει να δημιουργηθεί και να καταστραφεί ενώ το σύστημα «τρέχει». Οι διεργασίες μπορούν να αλλάζουν τα επίπεδα προτεραιοτήτων, τους χρονικούς περιορισμούς, τις ανάγκες σε μνήμη. Η διαχείριση διεργασιών σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου είναι περισσότερο κρίσιμη σε σχέση με ένα συμβατικό λειτουργικό σύστημα. Όταν δημιουργείται μια διεργασία πραγματικού χρόνου, πρέπει να έχει στη διάθεσή της όση μνήμη χρειάζεται χωρίς καθυστέρηση και η περιοχή αυτή της μνήμης να κλειδωθεί για να αποφευχθούν λανθάνουσες καταστάσεις εξαιτίας της αλληλεπικάλυψης. Η αλλαγή των χρονικών προτεραιοτήτων επηρεάζει την συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Επίσης η προβλεψιμότητα είναι σημαντική παράμετρος ενός λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου. Έτσι λοιπόν η δυναμική διαχείριση εργασιών είναι ενδεχόμενος πονοκέφαλος για ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου.

Γενικά πολλαπλές διεργασίες θα ξεκινήσουν την ίδια χρονική στιγμή και το λειτουργικό σύστημα είναι υπεύθυνο για την κατανομή των ελεύθερων πόρων.

### 5.1.2. Χρονοδρομολόγηση διεργασιών (scheduling)

Τα λειτουργικά συστήματα γενικού τύπου και τα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου διαφέρουν σημαντικά στη χρονοδρομολόγηση των διεργασιών. Χρησιμοποιούν τις ίδιες βασικές αρχές αλλά τις εφαρμόζουν με διαφορετικό τρόπο γιατί έχουν να ικανοποιήσουν διαφορετικά κριτήρια αποδόσεων. Ένα συμβατικό λειτουργικό σύστημα στοχεύει στη μέγιστη απόδοση κατά μέσο όρο, ενώ ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου στοχεύει σε αιτιοκρατική συμπεριφορά. Υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης διεργασιών αλλά μόνο μερικοί είναι πρότυποι στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι: *χρονοδρομολόγηση με στατική προτεραιότητα (fixed priority scheduling - FPS)*, *χρονοδρομολόγηση με κοντινές προθεσμίες (earliest deadline first - EDF)*, *χρονοδρομολόγηση ρυθμού (rate monotonic scheduling)*.

### 5.1.3. Εξυπηρέτηση διακοπών (interrupts)

Το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό όχι μόνο να υλοποιεί τις εργασίες σύμφωνα με ένα καθορισμένο χρονοδιάγραμμα αλλά και να εξυπηρετεί περιφερειακές συσκευές όπως χρονοδιακόπτες, κινητήρες, αισθητήρες, συσκευές επικοινωνίας, σκληροί

δίσκοι κλπ. Οι αιτήσεις εξυπηρέτησης των συσκευών πραγματοποιούνται *ασύγχρονα*, δηλαδή τη χρονική στιγμή που υπάρχει ανάγκη από τη συσκευή να πραγματοποιήσει κάποια εργασία, ενώ το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να είναι έτοιμο να τις εξυπηρετήσει. Η αίτηση για εξυπηρέτηση ονομάζεται *διακοπή*. Στα λειτουργικά συστήματα συναντούμε δύο ειδών διακοπές:

*Διακοπές υλικού*: Η περιφερειακή συσκευή θέτει κάποιο bit στο κανάλι επικοινωνίας με τον επεξεργαστή, και στη συνέχεια ο επεξεργαστής ειδοποιείται ότι υπάρχει αίτημα εξυπηρέτησης. Στη συνέχεια ο επεξεργαστής αποθηκεύει την τρέχουσα κατάσταση και μεταβαίνει στη διεύθυνση μνήμης η οποία είναι συνδεδεμένη με την συσκευή.

*Διακοπές λογισμικού*: Πολλοί επεξεργαστές έχουν εντολές οι οποίες μετατρέπουν την διακοπή υλικού σε διακοπή λογισμικού. Και σε αυτού του τύπου τη διακοπή ο επεξεργαστής μεταβαίνει σε διεύθυνση μνήμης.

Το λειτουργικό σύστημα δεν είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση του κώδικα μετά από αίτημα διακοπής. Είναι όμως υπεύθυνο για τη διασύνδεση της θέσης μνήμης με συγκεκριμένη γραμμή διακοπής και για την άμεση εξυπηρέτησή της. Φυσικά, τα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου έχουν συγκεκριμένο τρόπο υλοποίησης των διακοπών διαφορετικό από τα συμβατικά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εξυπηρέτησή τους. Αν και ο μεσολαβητής είναι έννοια αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, υπάρχει ήδη σε παλιά λειτουργικά συστήματα γραμμένα σε γλώσσα C.

#### **5.1.4. Επικοινωνία μεταξύ διεργασιών**

Σημαντική υπευθυνότητα ενός λειτουργικού συστήματος είναι η *εσωτερική επικοινωνία των επιμέρους διεργασιών*. Ο μηχανισμός είναι περίπου κοινός για όλα τα συστήματα: το λειτουργικό σύστημα δεσμεύει μνήμη για την επικοινωνία και χρησιμοποιεί συγκεκριμένα πρότυπα συγχρονισμού για να διαβάσει και να γράψει σε αυτή. Υπεύθυνο «αντικείμενο» για τη λειτουργία αυτή είναι ο *μεσολαβητής* ή ο *δίαυλος*. Ο μεσολαβητής είναι πραγματικά η καρδιά της επικοινωνίας μεταξύ εργασιών.

#### **5.1.5. Συγχρονισμός**

Η απόφαση για τη σειρά εκτέλεσης του κώδικα ανήκει στο λειτουργικό σύστημα ή στις διακοπές υλικού οι οποίες αναγκάζουν τον επεξεργαστή να μεταβεί στην ρουτίνα εξυπηρέτησής τους. Για τον χρονοδιαχειριστή του λειτουργικού συστήματος όλες οι εργασίες είναι απλώς «αριθμοί» στην χρονοσειρά και οι διακοπές συνδέονται μόνο με τις

αντίστοιχες ρουτίνες εξυπηρέτησής τους. Έτσι, ο χρονοδιαχειριστής και οι διακοπές θα ήταν επαρκώς οργανωμένες δομές σε ένα σύστημα στο οποίο όλες οι διεργασίες απλά θα εναλλάσσονταν χωρίς την ανάγκη συνεργασίας. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στις περισσότερες εφαρμογές.

Γι' αυτό τον λόγο υπάρχει η ανάγκη για *συγχρονισμό* των διαφορετικών διεργασιών όπως και της *ανταλλαγής δεδομένων* μεταξύ τους. Ο συγχρονισμός και η ανταλλαγή δεδομένων είναι συμπληρωματικές έννοιες επειδή η χρησιμότητα ανταλλαγής δεδομένων εξαρτάται από το σωστό συγχρονισμό όλων των εργασιών που εμπλέκονται στην ανταλλαγή.

### 5.1.6. Διαχείριση μνήμης

Μια ακόμη υπευθυνότητα του λειτουργικού συστήματος είναι η *διαχείριση μνήμης*: Διαφορετικές διεργασίες στο σύστημα χρειάζονται μέρος της ελεύθερης μνήμης συχνά συσχετισμένης με διευθύνσεις υλικού. Ο ρόλος του λειτουργικού συστήματος είναι : α) να δώσει σε κάθε διεργασία τη μνήμη που χρειάζεται (*κατανομή μνήμης*), β) να καταναίμει την πραγματική μνήμη σε διευθύνσεις χρησιμοποιούμενες σε διαφορετικές διεργασίες, και γ) να δράσει ανάλογα όταν μια διεργασία χρησιμοποιεί μνήμη που δεν τις έχει κατανεμηθεί. Αυτό καλείται *προστασία μνήμης*.

## 5.2. Υπάρχοντα Πρότυπα Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου

Το λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου δεν είναι προϊόν του χρήστη αλλά χρησιμεύει ως πλατφόρμα πάνω στην οποία θα κτιστούν οι εφαρμογές. Η διαθεσιμότητα προτύπων διευκολύνει την εργασία των προγραμματιστών σε μεγάλο βαθμό γιατί την απλοποιεί και επιταχύνει τον χρόνο κατασκευής νέων εφαρμογών. Δυστυχώς όμως στον κόσμο των συστημάτων πραγματικού χρόνου, η προτυποποίηση δεν είναι συστηματική εξαιτίας των πολλών και αξιόλογων χαρακτηριστικών των υπάρχοντων συστημάτων. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε μερικές προσπάθειες προτυποποίησης.

### 5.2.1. POSIX

Το POSIX (Portable Operating Systems Interface) είναι ένα πρότυπο κλήσης συναρτήσεων παρόμοιο με το συμβατικό λειτουργικό σύστημα UNIX. Το POSIX έχει χαρακτηριστικά συστήματος πραγματικού χρόνου, όπως χρονοπρογραμματισμός με

προτεραιότητες, κλείδωμα τμημάτων μνήμης από το χρήστη, σήματα πραγματικού χρόνου, βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ διεργασιών και χρονομετρητές.

Το πρότυπο καθορίζει τέσσερα διαφορετικά σύνολα για συστήματα πραγματικού χρόνου:

- *PE51 (Minimal Realtime System Profile)*. Παρέχει τις βασικές λειτουργίες για μια απλή διεργασία χωρίς να απαιτείται επέμβαση του χρήστη ή πρόσβαση σε σύστημα διαχείρισης αρχείων. Υλοποιείται σε ένα απλό επεξεργαστή με δικιά του μνήμη χωρίς σύστημα διαχείρισης μνήμης.
- *PE52 (Realtime Controller System Profile)*. Όπως το προηγούμενο με επιπλέον υποστήριξη συστήματος αρχείων και ασύγχρονη επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές.
- *PE53 (Dedicated Realtime System Profile)*. Όπως το πρώτο με επιπλέον υποστήριξη πολλαπλών διεργασιών χωρίς όμως υποστήριξη συστήματος αρχείων.
- *PE54 (Multi-Purpose Realtime System Profile)*. Υπερσύνολο όλων των προηγούμενων. Υλοποιείται σε ένα ή περισσότερους επεξεργαστές με μονάδα διαχείρισης μνήμης, υψηλών ταχυτήτων αποθηκευτικά μέσα, υποστήριξης δικτύου και συσκευών απεικόνισης.

### 5.2.2. Unix98

Το πρότυπο αυτό είναι η δεύτερη έκδοση των προδιαγραφών του απλού συστήματος UNIX και χρησιμοποιεί αρκετά στοιχεία του προτύπου POSIX. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο <http://www.unix-systems.org/unix98.html>.

### 5.2.3. EL/IX

Το πρότυπο EL/IX είναι ένα σύνολο εντολών σε διαφορετικά επίπεδα συμβατό με POSIX και ANSI C. Τα επίπεδα αυτά είναι:

- *Επίπεδο 1*. Επίπεδο συμβατό με λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου. Οι συναρτήσεις είναι διαθέσιμες για LINUX και ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα.
- *Επίπεδο 2*. Διαθέσιμο για απλές διαδικασίες Linux. Περιλαμβάνει το επίπεδο 1 και επιπρόσθετα συναρτήσεις Linux οι οποίες δεν υλοποιούνται εύκολα σε λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου.
- *Επίπεδο 3*. Διαθέσιμο για πολυδιαδικασίες Linux. Συμβατό με POSIX.
- *Επίπεδο 4*. Πλήρως συμβατό με POSIX ή Linux.

#### 5.2.4. μITRON

Το πρότυπο μITRON είναι διαθέσιμο για ενσωματωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου και στοχεύει στην προτυποποίηση μικρής κλίμακας συστημάτων, όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι συσκευές φαξ. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Άμεση διαχείριση διεργασιών,
- Συγχρονισμός διεργασιών άμεσα εξαρτώμενος από αυτές,
- Συγχρονισμός και επικοινωνία διεργασιών,
- Εκτεταμένος συγχρονισμός και επικοινωνία,
- Διαχείριση σωρού μνήμης,
- Διαχείριση χρόνου,
- Διαχείριση συστήματος,
- Υποστήριξη δικτύου

#### 5.2.5. OSEK

Το πρότυπο OSEK είναι ανοικτής αρχιτεκτονικής και χρησιμοποιείται σε κατακευκτωμένα συστήματα ελέγχου οχημάτων. Η αρχιτεκτονική του προτύπου αποτελείται από τρεις περιοχές:

- Επικοινωνία διεργασιών,
- Λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου,
- Διαχείριση διαδικτύου.

Περισσότερες πληροφορίες στο <http://www.osek-vdx.org/>.

#### 5.2.6. Προδιαγραφές πραγματικού χρόνου για Java

Οι προδιαγραφές πραγματικού χρόνου για Java δεν είναι λειτουργικό σύστημα αλλά οδηγίες κατασκευής πυρήνα για γλώσσα προγραμματισμού. Η διάκριση αυτή δεν είναι θεμελιώδης για κοινή χρήση. Μπορεί όμως να γίνει σημαντική για εφαρμογή πραγματικού χρόνου επειδή ο πυρήνας πραγματικού χρόνου πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιεί το υποκείμενο λειτουργικό σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι κώδικας πυρήνα με χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου είναι άχρηστος σε ένα γενικού τύπου λειτουργικό σύστημα.

Περισσότερες πληροφορίες στο <http://www.rti.org/>.



### 5.2.7. Ada 95

Το λειτουργικό σύστημα MaRTE είναι ένα παράδειγμα ελεύθερου λογισμικού πυρήνα πραγματικού χρόνου για ενσωματωμένα συστήματα συμβατό με POSIX. Η πλειονότητα του κώδικά του είναι γραμμένη σε Ada ενώ ο υπόλοιπος σε C και assembly.

### 5.2.8. CORBA

Το σύστημα πραγματικού χρόνου CORBA δεν είναι πραγματικός κώδικας αλλά σύνολο προδιαγραφών. Διαφορετικές υλοποιήσεις συστημάτων πραγματικού χρόνου μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν και να πετύχουν διαφορετικές συμπεριφορές. Οι επιθυμητές ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν με χρήση αυτών των προδιαγραφών.

## 5.3. Υπάρχοντα Λειτουργικά Συστήματα

### 5.3.1. Λειτουργικά Συστήματα Πραγματικού Χρόνου

Η πιο απλή λύση για την κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου είναι η αλλαγή του διανεμητή διεργασιών από χρονικό (time-sharing) σε διανεμητή βασισμένου σε προτεραιότητες (priority-based). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε μερικά σύγχρονα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου.

#### MINIX OS

Το MINIX είναι λειτουργικό σύστημα το οποίο προέρχεται από το UNIX και βασίζεται σε αρχιτεκτονική μικρού πυρήνα, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ενσωματωμένα συστήματα με περιορισμένους πόρους τα οποία τρέχουν εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων αξιοπιστίας. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

- Συμβατό με POSIX,
- Υποστήριξη δικτύου TCP/IP,
- Υποστήριξη παραθυρικού περιβάλλοντος X Window,
- Υποστήριξη διαφορετικών γλωσσών: cc, gcc, g++, perl, python, κλπ.,
- Πλήρης δυνατότητα πολλαπλών χρηστών και προγραμματισμού,
- Εκτέλεση οδηγών συσκευών ως διεργασίες χρήστη,
- Υψηλός βαθμός ανεκτικότητας σφαλμάτων

## **QNX**

Το QNX είναι βασισμένο στο UNIX και προορίζεται κύρια για ενσωματωμένα συστήματα. Βασίζεται σε μικροπυρηνική αρχιτεκτονική, δηλαδή το λειτουργικό σύστημα τρέχει με τη μορφή μικρών διεργασιών, σε αντίθεση με το μονολιθικό μοντέλο όπου το λειτουργικό σύστημα είναι ένα μεγάλο και ενιαίο πρόγραμμα. Στην περίπτωση του QNX ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να θέσει εκτός τις λειτουργίες που δεν χρειάζεται χωρίς να απαιτείται η αλλαγή ολόκληρου του λειτουργικού. Το σύστημα είναι σχετικά μικρό, ενώ ο πυρήνας του εκτελεί τέσσερις λειτουργίες: χρονοδρομολόγηση διεργασιών, επικοινωνία διεργασιών, διαχείριση διακοπών και χρονισμός. Οτιδήποτε άλλο τρέχει ως συνεργαζόμενη διεργασία του χρήστη.

## **VxWorks**

Το σύστημα VxWorks είναι αρχιτεκτονικής μονολιθικού τύπου και σχεδιάστηκε για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Πυρήνας με πολυδιεργασία (multitasking), προεκτοπισμό (preemption) και κυκλική χρονοδρομολόγηση (round-robin scheduling),
  - Προστασία μνήμης για διαχωρισμό των εφαρμογών του χρήστη από τον πυρήνα,
  - Υποστήριξη συμμετρικής πολυδιεργασίας,
  - Γρήγορη επικοινωνία διεργασιών,
  - Τοπικές και κατανεμημένες σειρές μηνυμάτων,
  - Συμβατότητα με POSIX,
  - Υποστήριξη πρωτοκόλλου IPv6,

## **REAL/IX**

Το σύστημα REAL/IX είναι και αυτό μονολιθικής αρχιτεκτονικής. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Υλοποίηση προερχόμενη από το σύστημα V και βασισμένη σε διαχείριση γεγονότων (event-driven),
- Συμβατό με το πρότυπο POSIX,
- Πυρήνας με πλήρη προεκτοπισμό,
- Υποστήριξη διακοπών,
- Δυναμική κατανομή των πόρων,
- Υποστήριξη κλειδώματος της μνήμης,
- Χρονισμός πραγματικού χρόνου,
- Διαχείριση αρχείων πραγματικού χρόνου,
- Υποστήριξη πρωτοκόλλου TCP/IP,

- Ενσωμάτωση πρωτοτύπου ONC/NFS.

### 5.3.2. Λειτουργικά συστήματα γενικής χρήσης

Μερικές φορές επιλέγουμε να τρέξουμε εφαρμογές πραγματικού χρόνου σε λειτουργικό σύστημα γενικής χρήσης. Ο λόγος που το κάνουμε αυτό είναι ότι οι χρονικοί περιορισμοί της εφαρμογής μας δεν είναι αυστηροί (hard) ενώ από την άλλη το λειτουργικό σύστημα γενικής χρήσης έχει μικρότερο κόστος και μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Στη συνέχεια θα επικεντρώσουμε στα δύο πιο διαδεδομένα λειτουργικά συστήματα γενικής χρήσης, στα Windows NT και LINUX.

#### Windows NT

Τα Windows NT περιέχουν αρκετά χαρακτηριστικά (διεργασίες, διακοπές με προτεραιότητες, διαχείριση γεγονότων) τα οποία είναι κατάλληλα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο χρονισμός και η διακριτική ικανότητα του ρολογιού είναι αρκετά και για τις πιο κρίσιμες εφαρμογές. Εντούτοις, οι μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη αποκλείουν την χρήση όταν υπάρχει περιορισμένος χώρος. Όμως ακόμη και όταν το μέγεθος δεν είναι πρόβλημα, η ελλιπής υποστήριξη σε χρονοδρομολόγηση πραγματικού χρόνου και διαχείριση των πόρων καθώς και η αδυναμία πρόβλεψης των διακοπών και της επικοινωνίας ανάμεσα στις διεργασίες, μπορεί να δημιουργεί πρόβλημα. Είναι ουσιαστικό για κρίσιμες χρονικά εφαρμογές να αποφεύγονται υπηρεσίες (διεργασίες του συστήματος) οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν μη προβλέψιμη επιμήκυνση της αναμονής (blocking). Διατηρώντας χαμηλή την ενεργητικότητα του επεξεργαστή και εφοδιάζοντας με έλεγχο αντιστροφής προτεραιοτήτων στο επίπεδο του χρήστη οι εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν με αξιόπιστη προβλεπτικότητα εκτός περιορισμών NT.

**Χρονοδρομολόγηση.** Ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης του λειτουργικού συστήματος σχεδιάστηκε για καλή απόδοση κατά μέσο όρο σε εφαρμογές κατανομής χρόνου. Δεν μας εκπλήσσει λοιπόν να υποθέσουμε ότι είναι υποδεέστερο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ας δούμε όμως τι μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα.

**Επίπεδα περιορισμένης προτεραιότητας.** Τα Windows NT υποστηρίζουν μόνο 32 επίπεδα προτεραιοτήτων. Τα χαμηλότερα (0-15) είναι για εφαρμογές με διεργασίες χρονικής κατανομής, όπου το λειτουργικό σύστημα μπορεί να ρυθμίσει τη χρονοθυρίδα μιας διεργασίας η οποία τρέχει εκτός επιπέδου προτεραιότητας έτσι ώστε να αυξήσει την ταχύτητα της διεργασίας. Τα υψηλότερα (16-31) είναι για εφαρμογές πραγματικού χρόνου

όπου το λειτουργικό σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τις προτεραιότητες των διεργασιών που τρέχουν σε αυτά τα επίπεδα.

Η ύπαρξη λίγων επιπέδων προτεραιοτήτων δεν είναι από μόνο του σοβαρό πρόβλημα ακόμη και για εφαρμογές οι οποίες θα έπρεπε να τρέχουν σε μεγαλύτερο αριθμό διακριτών προτεραιοτήτων, εάν δεν χρειαζόμαστε να κρατήσουμε υψηλά την αξιοποίηση του επεξεργαστή. Πολλές διεργασίες οι οποίες είναι πυρηνικού τύπου τρέχουν στο επίπεδο 16 το οποίο είναι πραγματικού χρόνου και θα έπρεπε να επηρεάζουν μόνο τις διεργασίες ίδιου επιπέδου. Εντούτοις, υψηλότερης προτεραιότητας διεργασίες πραγματικού χρόνου μπορούν να καθυστερήσουν τις διεργασίες του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη εφαρμογής πραγματικού χρόνου μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία στο διαχειριστή μνήμης, στο σύστημα διαχείρισης αρχείων, στη διαχείριση του δικτύου και σε άλλες.

**Διεργασίες, Χρονοδρομολόγηση διεργασιών, FIFO.** Ένα άλλο πρόβλημα των Windows NT είναι ότι δεν υποστηρίζουν FIFO τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων. Η απουσία μιας τέτοιας δυνατότητας είναι περισσότερο προβληματική σε σχέση με τον ανεπαρκή αριθμό επιπέδων διακοπών. Το λειτουργικό σύστημα χρονοδρομολογεί εξορισμού όλες τις διεργασίες σύμφωνα με ένα κυκλικό μοντέλο. Εντούτοις ένας συνδυασμός παραμέτρων μας επιτρέπει να διαλέξουμε ανάμεσα σε τεχνική FIFO και κυκλική τεχνική για την εκτέλεση μιας διεργασίας. Για παράδειγμα μια διεργασία πραγματικού χρόνου σε μια εφαρμογή η οποία έχει επίπεδο προτεραιότητας 9 χρονοδρομολογείται σύμφωνα με τεχνική FIFO ενώ ταυτόχρονα θέτουμε περιορισμούς στο χρονοδρομολογητή.

**Έλεγχος προσπέλασης πόρων.** Τα Windows NT δεν υποστηρίζουν κληρονομική προτεραιότητα. Υπάρχουν δύο δρόμοι αντιστροφής προτεραιότητας σε ένα μονοεπεξεργαστικό σύστημα χωρίς τη χρήση αυτής της τεχνικής. Εντούτοις όλα αυτά συντελούνται στο επίπεδο του χρήστη και δεν ελέγχουν πλήρως την αντιστροφή προτεραιότητας.

**Πρωτόκολλο NPCS στο επίπεδο του χρήστη.** Ο ευκολότερος τρόπος για να ξεπεραστεί η απουσία της κληρονομικής προτεραιότητας είναι να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο NPCS (NonPreemptive Critical Section). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό μια διεργασία εκτελείται μη προεκτοπιστικά όταν κρατάει οποιοδήποτε πόρο. Όταν μια διεργασία καλεί τη συνάρτηση NPCS για να απαιτήσει κάποιο πόρο, τότε η συνάρτηση αποθηκεύει την τρέχουσα προτεραιότητα της διεργασίας, θέτει την προτεραιότητα στο επίπεδο 31 και στη συνέχεια παρέχει τον πόρο στην διεργασία. Η συνάρτηση επαναφέρει την προτεραιότητα της διεργασίας όταν η διεργασία δεν κρατάει κανένα πόρο.

**Πρωτόκολλο ανώτατης προτεραιότητας.** Εναλλακτικό πρωτόκολλο είναι το πρωτόκολλο ανώτατης προτεραιότητας (CPP-Ceiling Priority Protocol). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό απαιτείται προγενέστερη γνώση των πόρων οι οποίοι αιτούνται από κάθε διεργασία. Κάθε πόρος έχει ανώτατη προτεραιότητα. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο CPP μια διεργασία η οποία κρατάει κάποιο πόρο εκτελείται στην ανώτατη προτεραιότητα όλων των πόρων που κρατάει. Χρονοδρομολογώντας όλες τις διεργασίες κάτω από τον έλεγχο του CPP σύμφωνα με την τεχνική FIFO, το πρωτόκολλο διατηρεί την διάρκεια της αντιστροφής διεργασιών φραγμένη.

**Κλήσεις καθυστερούμενων διαδικασιών.** Η διαχείριση των διακοπών στα Windows NT γίνεται σε δύο βήματα. Κάθε ρουτίνα εξυπηρέτησης μιας διακοπής εκτελείται άμεσα και είναι σύντομη. Έτσι λοιπόν η περίοδος αβεβαιότητας είναι συγκρίσιμη με αυτή των λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου. Η μη προβλεπτικότητα η οποία απορρέει από την διαχείριση των διακοπών εισάγεται στο δεύτερο βήμα. Οι οδηγοί συσκευών σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε μια ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής να θέτει σε ουρά προτεραιότητας μια διαδικασία η οποία καλείται DPC (Deferred Procedure Call) και είναι υπεύθυνη για την διαχείριση διακοπών δεύτερου βήματος. Οι διαδικασίες DPC εκτελούνται σύμφωνα με τεχνική FIFO με βαθμό προτεραιότητας χαμηλότερο από όλες τις διακοπές υλικού αλλά υψηλότερο από την προτεραιότητα του χρονοδρομολογητή. Επομένως, υψηλότερης προτεραιότητας διεργασία μπορεί να εμποδιστεί από διαδικασίες DPC οι οποίες έχουν μπει σε ουρά προτεραιότητας από διακοπές χαμηλότερης προτεραιότητας διεργασιών. Ο χρόνος εμπόδισης μπορεί να είναι σημαντικός εφόσον ο χρόνος εκτέλεσης μερικών διαδικασιών DCP μπορεί να είναι σχετικά μεγάλος (π.χ. 1ms ή και περισσότερο). Το χειρότερο είναι ότι ο χρόνος εμπόδισης δεν είναι φραγμένος.

**Κλήσεις ασύγχρονων διαδικασιών.** Τα γεγονότα θέτονται από τις διεργασίες για λόγους ειδοποίησης ή συγχρονισμού και είναι σύγχρονα. Μια διεργασία πρέπει να περιμένει για ένα γεγονός να επιδράσει και την ίδια στιγμή η διεργασία προσωρινά δεν εκτελείται. Όταν μια διεργασία θέτει ένα γεγονός σε κατάσταση σινιάλου, η διεργασία που περιμένει το γεγονός αφυπνίζεται και χρονοδρομολογείται. Ένα γεγονός των Windows NT είναι ένας αποτελεσματικός και ισχυρός μηχανισμός ειδοποίησης ή συγχρονισμού.

## RTLinux

Τα τελευταία χρόνια το Linux έχει αυξήσει την αποδοχή του από τους χρήστες εξαιτίας της μεγαλύτερης σταθερότητας που παρουσιάζει αλλά και της ανάπτυξης όλο και περισσότερων εφαρμογών. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην επέκταση που απαιτείται

να εγκατασταθεί στο Linux για να εκτελεστούν εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο η οποία καλείται RT Linux.

Το RT Linux σχεδιάστηκε για να παρέχει «hard» χαρακτηριστικά πραγματικού χρόνου στο λειτουργικό σύστημα Linux. Υποθέτουμε ότι οι εφαρμογές μπορούν να χωριστούν σε δύο τμήματα. Το τμήμα που εκτελείται σε πραγματικό χρόνο τρέχει στον πυρήνα του λειτουργικού συστήματος RT Linux ενώ το άλλο μέρος τρέχει στο Linux. Τα δύο τμήματα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενδιάμεσων μηνυμάτων FIFO οι οποίες βρίσκονται στον πυρήνα. Οι ενδιάμεσες μηνύμες καλούνται RT-FIFO (πραγματικού χρόνου) και εμφανίζονται στις διεργασίες του χρήστη ως συσκευές. Η ανάγνωση και το γράψιμο σε αυτές δεν εμποδίζεται (nonblocking).

Το RT Linux εξαλείφει το πρόβλημα του πυρήνα Linux να εμποδίζει (blocking) το ρολόι των διακοπών αντικαθιστώντας τις διακοπές υλικού με διακοπές λογισμικού. Αντί να επιτρέπεται στον διαχειριστή διακοπών του Linux να λειτουργεί άμεσα, ο πυρήνας πραγματικού χρόνου κάθεται μεταξύ αυτού και του υλικού. Έτσι λοιπόν ο πυρήνας πραγματικού χρόνου επικαλύπτει και παρακολουθεί όλες τις διακοπές. Εάν κάποια διακοπή προκαλέσει ρουτίνα πραγματικού χρόνου να εκτελεστεί, ο RT πυρήνας προεκτοπίζει το Linux, εάν τρέχει εκείνη τη στιγμή και αφήνει την διεργασία πραγματικού χρόνου να εκτελεστεί. Με αυτό τον τρόπο ο πυρήνας πραγματικού χρόνου θέτει τον πυρήνα του Linux και τις διεργασίες του χρήστη στο υπόβαθρο.

Εάν κάποια διακοπή απευθύνεται στο Linux, ο πυρήνας πραγματικού χρόνου την δρομολογεί στον πυρήνα του. Η εξομοίωση των απενεργοποιημένων διακοπών του Linux πετυχαίνεται μέσω σημαίας του πυρήνα πραγματικού χρόνου. Η σημαία τίθεται όταν το Linux ενεργοποιεί τις διακοπές και αλλάζει όταν τις απενεργοποιεί. Ο πυρήνας πραγματικού χρόνου ελέγχει τη σημαία και τη μάσκα της διακοπής όποτε προκαλείται διακοπή. Αμέσως δρομολογεί την διακοπή προς τον πυρήνα του Linux μόνο εάν η σημαία έχει τεθεί. Όσο η σημαία είναι σε κατάσταση reset, ο πυρήνας πραγματικού χρόνου βάζει σε ουρά αναμονής όλες τις διακοπές που είναι σε εκκρεμότητα για να εξυπηρετηθούν από τον πυρήνα του Linux και τις μεταβιβάζει όταν το Linux θέτει ξανά τις διακοπές.

Το κομμάτι πραγματικού χρόνου των εφαρμογών γράφεται όπως οι περισσότερες μονάδες οι οποίες φορτώνονται στον πυρήνα. Ως οντότητες, όλες οι διεργασίες πραγματικού χρόνου εκτελούνται στον πυρήνα. Οι διεργασίες κάθε μονάδας μπορούν να έχουν το δικό τους χρονοδρομολογητή.

## 5.4. Ο πυρήνας Πραγματικού Χρόνου της *MathWorks*

### 5.4.1. Περιβάλλον πραγματικού χρόνου για Windows (RT Windows Target)

Το περιβάλλον πραγματικού χρόνου για Windows χρησιμοποιεί ένα μικρό πυρήνα πραγματικού χρόνου για να εξασφαλίσει ότι η εφαρμογή εκτελείται σε πραγματικό χρόνο. Ο πυρήνας πραγματικού χρόνου εκτελείται στο επίπεδο 0 του επεξεργαστή και χρησιμοποιεί το εσωτερικό ρολόι ως κύρια πηγή χρόνου, ως εξής:

**Χρονιστής διακοπών.** Ο πυρήνας σταματάει τη διακοπή από το ρολόι του PC πριν τη λάβει το λειτουργικό σύστημα των Windows. Στη συνέχεια ο πυρήνας χρησιμοποιεί την διακοπή για να εκτελέσει τη δική του ρουτίνα εξυπηρέτησης της διακοπής. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ότι ο πυρήνας έχει τη δυνατότητα να παραχωρήσει στην εφαρμογή πραγματικού χρόνου την υψηλότερη διαθέσιμη προτεραιότητα. Είναι προφανές ότι η τεχνική αυτή αποκλείει οποιαδήποτε κλήση συνάρτησης από την βιβλιοθήκη Win32 του λειτουργικού συστήματος.

Ο πυρήνας παρέχεται με τη μορφή οδηγού ενώ για να επιτύχει ακριβή δειγματοληψία επαναπρογραμματίζει το ρολόι του PC σε υψηλότερη συχνότητα. Επειδή το ρολόι του PC είναι επίσης η κύρια πηγή χρόνου για το λειτουργικό σύστημα των Windows, ο πυρήνας στέλνει μια χρονοδιακοπή στο λειτουργικό σύστημα στον αρχικό ρυθμό διακοπών.

**Χρονοδρομολογητής.** Ο χρονιστής των διακοπών χρονίζει έναν απλό χρονοδρομολογητή ο οποίος εκτελεί την εφαρμογή. Ο αριθμός των διεργασιών είναι ίσος με τον αριθμό των δειγματοληπτούμενων περιόδων σε ένα πολυδιεργασικό (multitasking) μοντέλο. Φυσικά σε μονοδιεργασικό μοντέλο υπάρχει μόνο μία διεργασία. Ο μέγιστος αριθμός διεργασιών είναι 32 ενώ οι ταχύτερες διεργασίες έχουν υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τις λιγότερο γρήγορες. Για παράδειγμα, μια ταχύτερη διεργασία μπορεί να διακόψει μια λιγότερο γρήγορη.

Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της εφαρμογής τα δεδομένα αποθηκεύονται σε προσωρινή μνήμη. Αργότερα, τα δεδομένα ανακτώνται από την προσωρινή μνήμη από τη μονάδα «Score». Η χρονοδρομολόγηση, η αποθήκευση και μεταφορά των δεδομένων, καθώς και η εκτέλεση της εφαρμογής πραγματοποιούνται στο επίπεδο 0 του επεξεργαστή.

**Επικοινωνία με το υλικό.** Ο πυρήνας διασυνδέεται και επικοινωνεί με τις I/O πόρτες του υλικού χρησιμοποιώντας μονάδες οδηγών I/O και ελέγχει εάν είναι εγκατεστημένο το αντίστοιχο υλικό. Εάν το υλικό έχει εγκατασταθεί σωστά τότε ο οδηγός επιτρέπει στην εφαρμογή πραγματικού χρόνου να εκτελεστεί.

Για τον οδηγό μπορούμε να επιλέξουμε να έχουμε τιμές τάσης, κανονικοποιημένες τιμές από 0 μέχρι +1, κανονικοποιημένες τιμές από -1 μέχρι 1 ή ενεπεξέργαστες τιμές καταχωρητών μετατροπών A/D ή D/A. Οι οδηγοί εκτελούνται και αυτοί στο επίπεδο 0.

**Simulink external mode.** Η επικοινωνία ανάμεσα στο λογισμικό του Simulink και της εφαρμογής πραγματικού χρόνου γίνεται διαμέσου της μονάδας Simulink external mode. Η μονάδα αυτή επικοινωνεί άμεσα με τον πυρήνα πραγματικού χρόνου και χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει την εφαρμογή, να μεταβάλλει παραμέτρους και να ανακτήσει δεδομένα για να προβληθούν.

#### 5.4.2. Περιβάλλον πραγματικού χρόνου για PC (RT xPC Target)

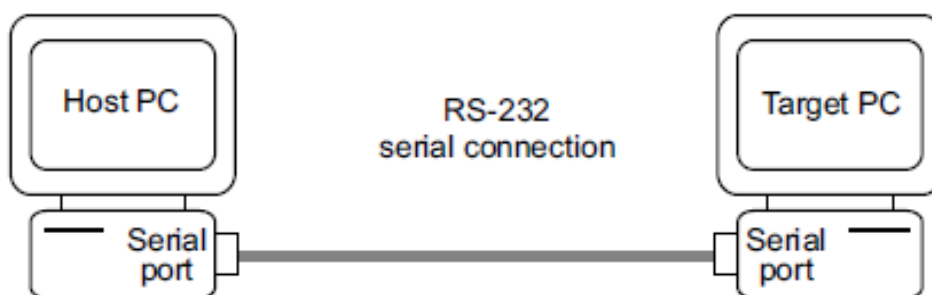
Το xPC Target της MathWorks προσφέρει λύση για σχεδιασμό πρωτότυπου, δοκιμή και ανάπτυξη συστήματος πραγματικού χρόνου το οποίο χρησιμοποιεί συμβατό PC. Είναι ένα περιβάλλον το οποίο χρησιμοποιεί PC για την εκτέλεση της εφαρμογής πραγματικού χρόνου, διαφορετικό από αυτό όπου αναπτύσσεται η εφαρμογή.

**Πυρήνας πραγματικού χρόνου.** Το λογισμικό xPC Target δεν απαιτεί κανένα λειτουργικό σύστημα να υπάρχει στο PC όπου θα εκτελεστεί η εφαρμογή. Αντί αυτού η εκκίνηση του PC γίνεται από δισκέτα η οποία περιέχει το λογισμικό του πυρήνα του xPC Target.

Η χρήση δισκέτας εκκίνησης εξαλείφει την ανάγκη για εγκατάσταση λογισμικού, μετατροπής διαμόρφωσης υπάρχοντος λογισμικού ή προσπέλασης του σκληρού δίσκου στο PC που θα εκτελεστεί η εφαρμογή. Η διευθέτηση αυτή επιτρέπει καταρχήν την ανάπτυξη της εφαρμογής πραγματικού χρόνου στο PC καθώς και τον έλεγχο της και στη συνέχεια την ελευθέρωση του PC και επιστροφή του στην κανονική χρήση. Το λογισμικό δεν εγκαθίστανται μόνιμα στο PC εκτός αν σκόπιμα εγκατασταθεί αυτούσια εφαρμογή στον σκληρό δίσκο ή σε μνήμη flash. Ο δίσκος εκκίνησης μπορεί να είναι οπτικός δίσκος (CD) ή εύκαμπτος δίσκος (floppy disk). Επίσης η εκκίνηση μπορεί να γίνει και μέσω δικτύου από άλλο απομακρυσμένο PC.

Μετά την εκκίνηση του πυρήνα, εμφανίζεται στην οθόνη μήνυμα υποδοχής με πληροφορίες για την σύνδεση ανάμεσα στο PC πραγματικού χρόνου (target) και το PC ανάπτυξης της εφαρμογής (host). Ο πυρήνας ενεργοποιεί τον φορτωτή της εφαρμογής και περιμένει για να φορτώσει την εφαρμογή από το PC ανάπτυξης. Ο φορτωτής λαμβάνει τον κώδικα, αντιγράφει τα διαφορετικά κομμάτια κώδικα στις αντίστοιχες διευθύνσεις και θέτει την εφαρμογή σε κατάσταση εκκίνησης.





Εικόνα 5.2: Σύνδεση PC πραγματικού χρόνου (target) με PC ανάπτυξης εφαρμογής (host)

Σημειώνεται ότι αφού ο επεξεργαστής τεθεί σε κατάσταση προστασίας (protected mode, 32-bit) κανένα από τα xPC Target στοιχεία δεν μπορεί να τον επαναφέρει σε πραγματική κατάσταση (real mode, 16-bit).

Η παραγόμενη εφαρμογή πραγματικού χρόνου και ο πυρήνας πραγματικού χρόνου μεταφράζονται ως εφαρμογές Microsoft Windows NT με γραμμικό μοντέλο μνήμης (flat memory model). Αυτό εξασφαλίζει πλήρη 32-bit ισχύ χωρίς χρονονοβόρους 16-bit κατακερματισμούς.

**Εφαρμογή πραγματικού χρόνου.** Η παραγωγή εφαρμογής πραγματικού χρόνου γίνεται από το υπάρχοντα μοντέλα σε Simulink και Stateflow με την χρήση των εργαλείων *Real-Time Workshop*, *Real-Time Workshop Embedded Coder*, *Stateflow Coder* και *xPC Target*. Οι εφαρμογές οι οποίες παρήχθησαν με *Real-Time Workshop* και *xPC Target* εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο σε συμβατό PC χωρίς τη χρήση επιπλέον λειτουργικού συστήματος. Οι εφαρμογές αυτές έχουν τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

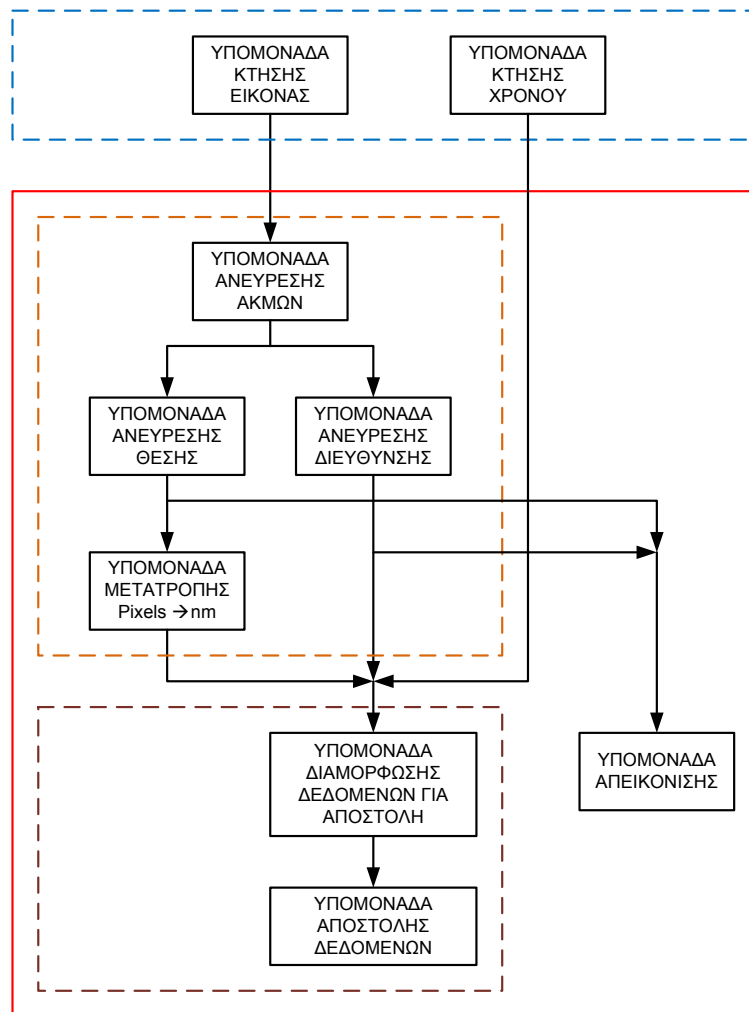
- Μοντέλο μνήμης. Η εφαρμογή μεταφράζεται ως Windows NT με γραμμικό μοντέλο μνήμης. Ο εκτελέσιμος κώδικας στη συνέχεια μετατρέπεται σε εικόνα (image) κατάλληλη για το λογισμικό xPC Target διαθέτοντας πλήρη 32-bit ισχύ.
- Χρόνος εκτέλεσης διεργασίας. Η εφαρμογή είναι ικανή για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο με υψηλή ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από τις δυνατότητες του υλικού του PC πραγματικού χρόνου.



## 6. Περιγραφή εφαρμογής

### 6.1. Περιγραφή αλγορίθμου

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη εφαρμογής πραγματικού χρόνου για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού μικροβελόνας τοποθετημένης πάνω σε μικρορομποτικό σύστημα. Τα δεδομένα για τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού θα προκύπτουν από επεξεργασία εικόνων οι οποίες θα λαμβάνονται μέσω βιντεοκάμερας. Στη συνέχεια θα αποστέλλονται στην μονάδα ελέγχου του μικρορομπού. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε σε SIMULINK (Παράρτημα Α), αλλά δεν έγινε δυνατή η μεταφορά της σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου, για λόγους οι οποίοι θα εξηγηθούν παρακάτω. Το λογικό διάγραμμα της εφαρμογής παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Λογικό διάγραμμα εφαρμογής.

## 6.2. Υπομονάδα κτήσης της εικόνας

Για την ανάκτηση της εικόνας στο περιβάλλον του SIMULINK χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη *Image Acquisition Toolbox* και στο μοντέλο εισήχθη το στοιχείο *From Video Device*. Η κάμερα που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή μας μεταδίδει την εικόνα μέσω διεπαφής *IEEE 1394 (FireWire)*. Πριν χρησιμοποιηθεί το στοιχείο *From Video Device* έπρεπε να εγκατασταθεί οδηγός ο οποίος να μπορεί να επικοινωνεί με την κάμερα και την εφαρμογή μας. Ο προμηθευτής της κάμερας έχει κατασκευάσει ένα τέτοιο οδηγό, ο οποίος όμως δεν μπορεί να συνεργαστεί με το SIMULINK. Ο μοναδικός οδηγός ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει είναι αυτός που κατασκευάστηκε από το *Carnegie Mellon University* και περιέχεται στη διανομή του MATLAB ή μπορεί να κατέβει από τον δικτυακό τόπο <http://www.cs.cmu.edu/~iwan/1394/>. Η εγκατάσταση έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες που υπάρχουν στον δικτυακό τόπο που αναφέρθηκε.

Μετά την εγκατάσταση της κάμερας και τον έλεγχο για την ορθότητα αυτής με τη χρήση του λογισμικού που παρέχεται (*1394CameraDemo.exe*), έπρεπε να ρυθμιστούν κάποιοι παράμετροι για να μπορέσει να λειτουργήσει όπως επιθυμούμε. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Video format : τέθηκε σε *800x600*,
- Block sample time : τέθηκε σε *1/7.5*, δηλαδή 7.5 δείγματα ανά δευτερόλεπτο,
- Ports mode : τέθηκε σε *one multidimensional signal*,
- Data type : τέθηκε σε *single*.

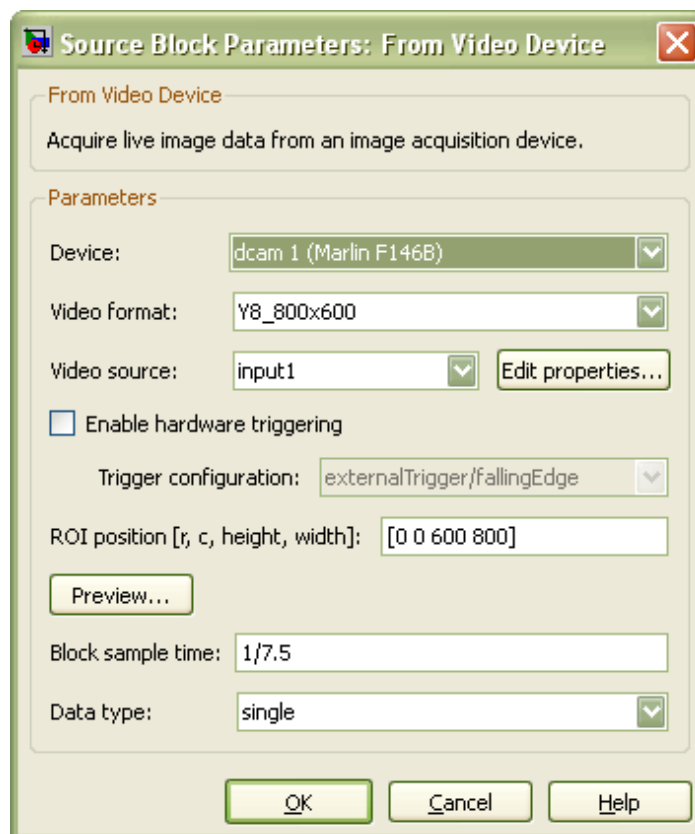
Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται η καρτέλα ρύθμισης των παραμέτρων της κάμερας.

Σημαντικό μειονέκτημα του στοιχείου της βιβλιοθήκης που χρησιμοποιήθηκε είναι η αδυναμία του να παράξει κώδικα πραγματικού χρόνου ο οποίος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε *external* κατάσταση λειτουργίας (όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο).

## 6.3. Υπομονάδα επεξεργασίας της εικόνας

Η επεξεργασία της εικόνας που παραλαμβάνεται από την προηγούμενη εφαρμογή πραγματοποιείται στην υπομονάδα *Position* (Παράρτημα Α), στα ακόλουθα βήματα:

**Υπομονάδα ανίχνευσης ακμών.** Η ανίχνευση των ακμών είναι βασικό βήμα πριν την εφαρμογή των αλγορίθμων εύρεσης θέσης και διεύθυνσης της μικροβελόνας. Σε προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε αναλυτικά η μεθοδολογία. Για την υλοποίηση της μεθοδολογίας εισήχθη στο μοντέλο το στοιχείο *Edge Detection* και η ρύθμιση των παραμέτρων έγινε σύμφωνα με την Εικόνα 6.3.



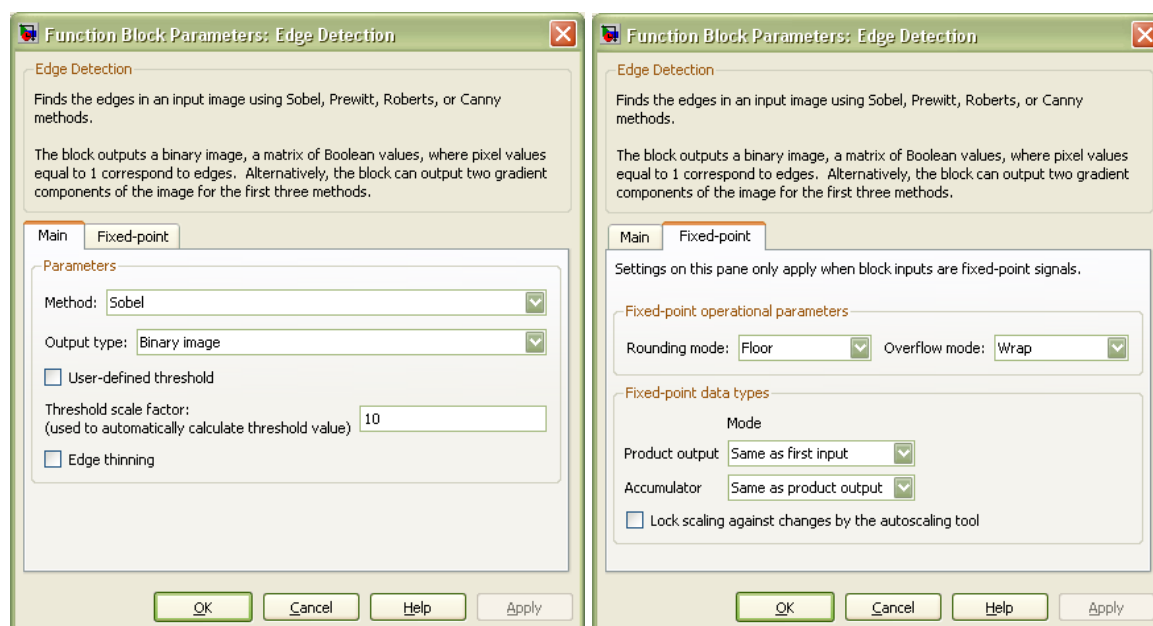
Εικόνα 6.2: Ρύθμιση παραμέτρων κάμερας

Στη συνέχεια η έξοδος του προηγούμενο στοιχείου εισάγεται παράλληλα στις υπομονάδες *Find\_XY* και *Find\_theta* (Παράρτημα Α).

**Υπομονάδα εύρεση θέσης.** Για την εύρεση της θέσης  $(x,y)$  της μικροβελόνας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ανεύρεσης κύκλων με τη χρήση του κυκλικού μετασχηματισμού Hough. Για την υλοποίηση αυτής της τεχνικής αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε C, το οποίο είναι στο αρχείο *Accumulator* (Παράρτημα Β). Η έξοδος από την υπομονάδα είναι η θέση της μικροβελόνας εκφρασμένη σε εικονοστοιχεία (pixels).

**Υπομονάδα εύρεση διεύθυνσης.** Για την εύρεση της διεύθυνσης  $\theta$  της μικροβελόνας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ανεύρεσης γραμμών με τη χρήση του μετασχηματισμού Hough. Ανιχνεύτηκε η μεγαλύτερη ακμή της μικροβελόνας και το αποτέλεσμα που πήραμε από το στοιχείο *Hough Lines1* ήταν δύο σημεία πάνω στην ευθεία. Για να υπολογίσουμε την γωνία (διεύθυνση) της ευθείας αναπτύχθηκε κώδικας σε *embedded matlab* (στοιχείο *Compute\_Angle*). Η μοναδική συνάρτηση του κώδικα

υπολογίζει την γωνία από τα δύο γνωστά σημεία της ευθείας. Η έξοδος από την υπομονάδα είναι η γωνία της μικροβελόνας σε μοίρες, σε σχέση με τον άξονα των  $x$ .



Εικόνα 6.3: Ρύθμιση παραμέτρων στοιχείου *Edge Detection*.

#### 6.4. Υπομονάδα κτήσης χρόνου

Η υπομονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για την ανάκτηση του χρόνου που έγινε η λήψη ενός στιγμιότυπου της εικόνας από την κάμερα.

#### 6.5. Υπομονάδα μετατροπής

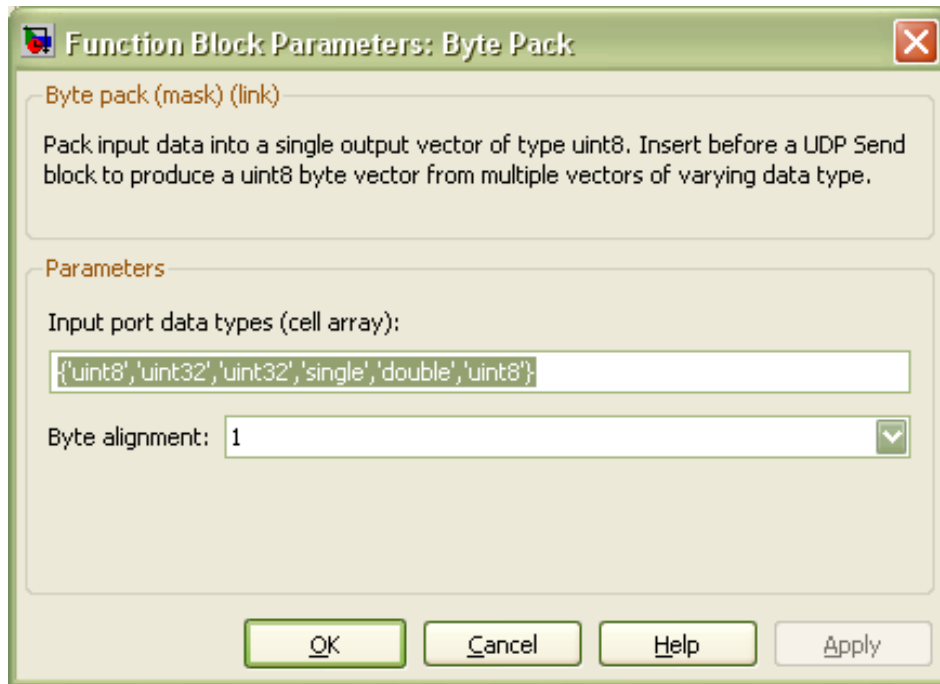
Τα δεδομένα θέσης που υπολογίστηκαν στη προηγούμενα υπομονάδα είναι αδιάστατα και χρειάζεται να μετατραπούν σε μεγέθη με πραγματικές μονάδες. Σκοπός της υπομονάδας μετατροπής είναι η μετατροπή των εικονοστοιχείων (pixels) σε  $nm$ . Με τη βοήθεια σταυρονήματος βαθμονόμησης της προμηθεύτριας εταιρείας του μικροσκοπίου ρυθμίζουμε το εύρος πεδίου να είναι  $1mm$ . Αυτό σημαίνει ότι για ανάλυση εικόνας  $800 \times 600$  εικονοστοιχείων χρειάζεται να πολλαπλασιάσουμε με μια σταθερά 1250 τα δεδομένα θέσης, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι σε  $nm$ .

## 6.6. Υπομονάδα αποστολής αποτελεσμάτων

Η υπομονάδα αποστολής των αποτελεσμάτων είναι υπεύθυνη για τη μορφοποίηση του πακέτου δεδομένων και την αποστολή μέσω σειριακής επικοινωνίας (RS232) ή μέσω δικτύου (udr). Το πακέτο δεδομένων μορφοποιείται με την βοήθεια του στοιχείου *Byte Pack* σύμφωνα με τις ρυθμίσεις της Εικόνα 6.4 και τον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Μορφοποίηση πακέτου δεδομένων

Θέση στο πακέτο	Τύπος	Περιγραφή	Τιμή
byte 1	uint8	Σήμανση αρχής πακέτου	10
byte 2	uint32	Θέση x μικροβελόνας	1250nm – 1000000μm
byte 3			
byte 4			
byte 5			
byte 6	uint32	Θέση y μικροβελόνας	1250nm – 750000μm
byte 7			
byte 8			
byte 9			
byte 10	single	Γωνία θ μικροβελόνας	-90,00° – 90,00°
byte 11			
byte 12			
byte 13			
byte 14	double	Χρόνος κτήσης εικόνας	
byte 15			
byte 16			
byte 17			
byte 18			
byte 19			
byte 20			
byte 21			
byte 22	uint8	Σήμανση τέλους πακέτου	10

Εικόνα 6.4: Ρύθμιση στοιχείου *Byte Pack*.



## 7. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 7.1. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε σαν βασικό στόχο την ανάπτυξη εφαρμογής εύρεσης θέσης και διεύθυνσης μικροβελόνας, η οποία βρίσκεται πάνω σε μικρορομπότ το οποίο κινείται με μέγιστη ταχύτητα  $1,5\text{mm/s}$ , με την χρήση μικροσκοπίου και βιντεοκάμερας. Η εφαρμογή πρέπει να εργάζεται σε πραγματικό χρόνο. Για την ανάπτυξη της εφαρμογής επιλέχθηκε κάμερα υψηλής ευκρίνειας η οποία μπορεί να στέλνει την εικόνα μέσω διασύνδεσης υψηλής ταχύτητας. Για την διασύνδεση της κάμερας με την εφαρμογή είχαμε στη διάθεσή μας λογισμικό του κατασκευαστή, καθώς και λογισμικό που αναπτύχθηκε στο *Carnegie Mellon University*, αλλά κανένα από τα δύο δεν μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες πραγματικού χρόνου με το πακέτο λογισμικού *Matlab*. Όμως, η ύπαρξη εσωτερικής γεννήτριας χρόνου στην κάμερα μας επιτρέπει να ρυθμίζουμε με ακρίβεια το ρυθμό κτήσης και αποστολής της εικόνας.

Από την αρχή της εργασίας επιλέχθηκαν ως λειτουργικό σύστημα τα *Windows XP*, λόγω της εξοικείωσης με αυτό αλλά και του εύρους των προγραμματιστικών δυνατοτήτων. Εξηγήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η δυνατότητα του συγκεκριμένου λειτουργικού συστήματος να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Επίσης, έχοντας σαν στόχο την απλοποίηση της σχεδίασης με την χρήση έτοιμων εργαλείων, επιλέχθηκε το λογισμικό πακέτο *Matlab*. Η αρχική σκέψη ήταν να σχεδιαστεί η εφαρμογή σε *Simulink*, να ελεχθεί ως προς την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου επεξεργασίας εικόνας να δίνει σωστά αποτελέσματα θέσης και διεύθυνσης και στη συνέχεια να μεταφερθεί σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου. Η μεταφορά σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου θα μπορούσε να γίνει με δύο τρόπους, είτε μέσω *Simulink* και λειτουργίας του σε *external mode* είτε παράγοντας κώδικα ο οποίος θα μπορούσε να λειτουργήσει αυτόνομα.

**Επεξεργασία εικόνας.** Ο αλγόριθμος που σχεδιάστηκε περιγράφηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Το μέγεθος της εικόνας προς επεξεργασία είναι μεγέθους  $800 \times 600$  εικονοστοιχείων με βάθος 8bit. Για να μπορέσει να λειτουργήσει ικανοποιητικά ο αλγόριθμος απαιτείται η εικόνα να έχει όσο το δυνατό μεγάλο διαχωρισμό φωτεινών και σκούρων επιφανειών. Για να αποφύγουμε το φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός από το μεταλλικό υλικό της βελόνας προχωρήσαμε σε χρωματισμό της με μαύρο χρώμα. Αυτό οδήγησε σε αύξηση της ευκρίνειας και σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δηλαδή όταν η

βελόνα κινείται σε έντονα φωτισμένη περιοχή τότε η εύρεση θέσης και διεύθυνσης είναι εύστοχη, ενώ όσο πλησιάζει σε λιγότερο φωτισμένη τότε ο αλγόριθμος δείχνει να αστοχεί υπολογίζοντας διαφορετική θέση από την πραγματική. Η αύξηση της αντίθεσης ανάμεσα σε φωτεινές και σκούρες περιοχές είναι επιθυμητή εφόσον οδηγεί σε μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων του αλγόριθμου. Η τοποθέτηση μιας ανακλώμενης επιφάνειας κάτω από τη μικροβελόνα είχε θετικά αποτελέσματα για την αύξηση της αξιοπιστίας του αλγόριθμου (το πείραμα έγινε με την τοποθέτηση ενός δίσκου DVD).

Η ύπαρξη φυσικού φωτός δεν έδειξε ότι επηρεάζει τα αποτελέσματα του αλγόριθμου επεξεργασίας της εικόνας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το φως που κατευθύνεται στη μικροβελόνα από την πηγή φωτός που έχουμε στη διάθεσή μας είναι ισχυρότερο από το φωτισμό του εργαστηρίου που υπάρχει στο χώρο.

Από τα πειράματα που έγιναν αλλάζοντας παραμέτρους των στοιχείων του μοντέλου μας οδήγησαν στην τελική μορφή και η οποία ελέγχθηκε ως προς την ταχύτητα απόκρισής της η οποία ικανοποιεί το κριτήριο λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο.

**Εφαρμογή κτήσης της εικόνας.** Η διασύνδεση της κάμερας στην εφαρμογή γίνεται μέσω στοιχείου του *Simulink* το οποίο όμως δεν έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Η λειτουργία της εφαρμογής μέσω *Simulink* επιβεβαίωσε τη δυνατότητα υπολογισμού θέσης και διεύθυνσης, όμως αυτό δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο με αποτέλεσμα να μη μπορεί στην παρούσα κατάσταση να χρησιμοποιηθεί σε κύκλωμα κλειστού βρόχου για τον έλεγχο της μικροβελόνας.

## 7.2. Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική εργασία πρέπει να προσανατολιστεί στην επίλυση του προβλήματος λειτουργίας ολόκληρης της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο. Ο αλγόριθμος επεξεργασίας της εικόνας που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον *simulink* μπορεί να μεταφερθεί σε κώδικα C (ή C++). Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από το ίδιο το περιβάλλον *matlab*. Κρίσιμο στοιχείο για την λειτουργία της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο είναι η διασύνδεση της κάμερας με αυτή. Θα πρέπει να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί αλγόριθμος κτήσης της εικόνας με τη βοήθεια του λογισμικού που παρέχει ο κατασκευαστής της κάμερας. Στη συνέχεια θα πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα μεταφοράς των εικόνων στην εφαρμογή προς επεξεργασία. Μια επίλυση του προβλήματος αυτού είναι η σχεδίαση ουράς δεδομένων η οποία θα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, προτείνεται να μεταφερθεί η εφαρμογή και σε περιβάλλον *linux* για να υπάρχει σύγκριση των δυνατοτήτων των λειτουργικών συστημάτων.

---

Βέβαια, μια άμεση επίλυση του προβλήματος είναι η μεταφορά της εφαρμογής σε ταχύτερο υπολογιστή ο οποίος δεν θα εκτελεί καμία άλλη εργασία κατά την διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής.



## Βιβλιογραφία

- [1] Ballard, D. H., "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes" *Computer Science Department, University of Rochester, Rochester, USA, October 1979 - September 1980.*
- [2] Born, M. and Wolf, E., "*Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*", Cambridge University Press, New York, USA, 2000.
- [3] Ersoy, O., "Diffraction, Fourier Optics and Imaging", *John Wiley & Sons, USA, 2007.*
- [4] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., "Digital Image Processing", *Prentice-Hall, 2<sup>nd</sup> ed., New Jersey, USA, 2002.*
- [5] Greenspan, M., Shang, L. and Jasiobedzki, P., "Efficient Tracking with the Bounded Hough Transform", *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, USA, 2004.*
- [6] Hong, P., Sahli, H. and Baudoin, Y., "Visual Servoing for Robot Navigation", *HUDEM Project, Brussels, Belgium*
- [7] Kratochvil, B., Yesin, K., Hess, V. and Nelson, B., "Design of a Visually Guided 6 DOF Micromanipulator System for 3D Assembly of Hybrid MEMS", *Institute of Robotics and Intelligent Systems, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss.*
- [8] Κοντολάτης, Ι., «Ανάδραση θέσης για την οπτική οδήγηση εξομοιωτή διαστημικού ρομπότ», *Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.*
- [9] Lee, S. and Nakamura, Y., "Image Stabilization for *In Vivo* Microscopy by High-Speed Visual Feedback Control", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 1, February 2008.
- [10] Liu W. S. J., "*Real Time Systems*", Prentice Hall, USA, 2003.
- [11] Mukundakrishnan, B., and Nelson, B., "Micropart Feature Design for Visually Servoed Microassembly", *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Fransisco, USA, April 2000.*
- [12] Nakamura, J., "Image sensors and signal processing for digital still cameras", *CRC Press, USA, 2006.*
- [13] Nelson, B., Papanikolopoulos, N. and Khosta, K. P., "Robotic Visual Servoing and Robotic Assembly Tasks", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 23-31, June 1996.

- 
- [14] Olderog, E., and Dierks, H., “*Real-Time Systems, Formal Specification and Automatic Verification*”, Cambridge University Press, New York, USA, 2008.
- [15] Peihua, L., Chaumette, F. and Tahri, O., “A Shape Tracking Algorithm for Visual Servoing”, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 2005.
- [16] Peihua, L., Zhang, T. and Pece, A., “Visual contour tracking based on particle filters”, Elsevier Science B.V., *Image and Vision Computing*, vol 21, pp 111-123, 2003.
- [17] Pratt, K. W., “Digital Image Processing”, *John Wiley & Sons*, 3<sup>rd</sup> ed., New York, USA, 2001.
- [18] Ralis, S., Vikramaditya, B. and Nelson, B., “Micropositioning of a Weakly Calibrated Microassembly System Using Coarse-to-Fine Visual Servoing Strategies”, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 23, no. 2, April 2000.
- [19] Russ, J., “The image processing handbook”, *CRC Press*, 5<sup>th</sup> ed., USA, 2007.
- [20] “*Real-Time Workshop 7, User’s Guide*”, The MathWorks, USA, 2009
- [21] “*Real-Time Windows Target 3, User’s Guide*”, The MathWorks, USA, 2009
- [22] Sievers, T. and Fatikow, S., “Visual Servoing of a Mobile Microrobot inside a Scanning Electron Microscope”, *EU Project ROBOSEM*, Oldenburg, Germany, 2001.
- [23] Vartholomeos, P., Loizou, S., Thiel, M., Kyriakopoulos, K., and Papadopoulos, E., “Control of the Multi Agent Micro-Robotic Platform MiCRoN”, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, 4-6 October, 2006.
- [24] Vartholomeos, P., Mougias, K. and Papadopoulos, E., “Driving Principles and Hardware Integration of Microrobots Employing Vibration Micromotors”, 2007.
- [25] Vartholomeos, P., Vlachos, K. and Papadopoulos, E., “On the Force Capabilities of Centripetal Force-actuated Microrobotic Platforms”, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 10-14 April, 2007.
- [26] Vartholomeos, P. and Papadopoulos, E., “Analysis and Experiments on the Force Capabilities of Centripetal-Force-Actuated Microrobotic Platforms”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, June 2008.
- [27] Vartholomeos, P. and Papadopoulos, E., “Analysis, Design and Control of a Planar Micro-robot Driven by Two Centripetal-Force Actuators”, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, USA, May 2006.
- [28] Vlachos, K., Vartholomeos, P. and Papadopoulos, E., “A Haptic Tele-Manipulation Environment for a Vibration-Driven Micromechatronic Device”, *IEEE*, 2007.

- [29] Wayne, R., “Light and Video Microscopy”, *Academic Press*, USA, 2009.
- [30] Wedekind, M., Boissenin., M., Amavasai, B. P., Caparrelli, F. and Travis, J., “Object Recognition and RT Tracking in Microscope Imaging”, *MMVL, Materials and Engineering Research Institute, Sheffiled Hallam University*, Sheffield, UK, June 2006.
- [31] Wolfson, H., “Geometric Hashing: An Overview”, *IEEE Computational Science and Engineering*, pp 10-21, October-December 1997.
- [32] Wu, Q., Merchant, F. and Castleman K., “Microscope Image Processing”, *Academic Press*, USA, 2008.
- [33] <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm>
- [34] <http://www.mathworks.com>

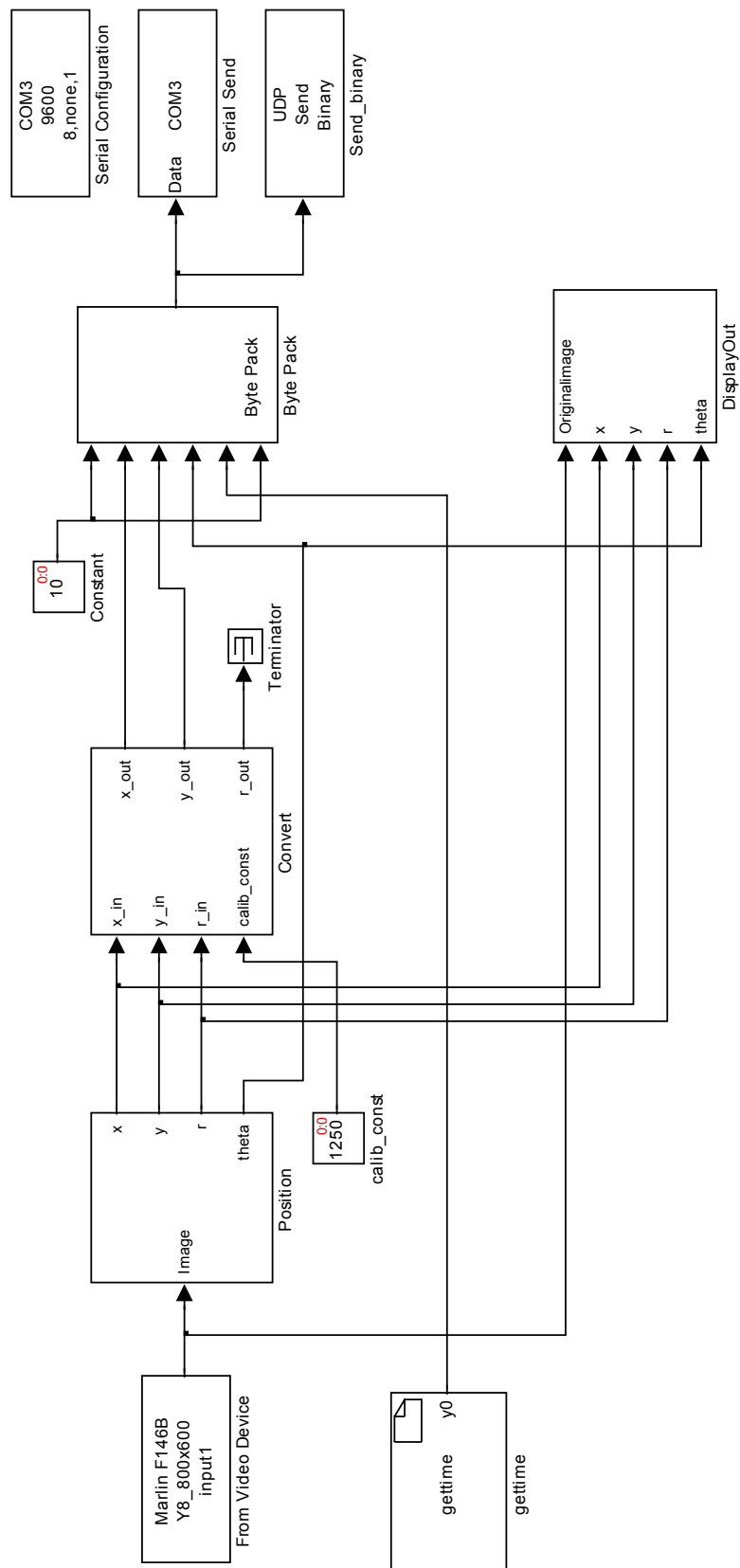




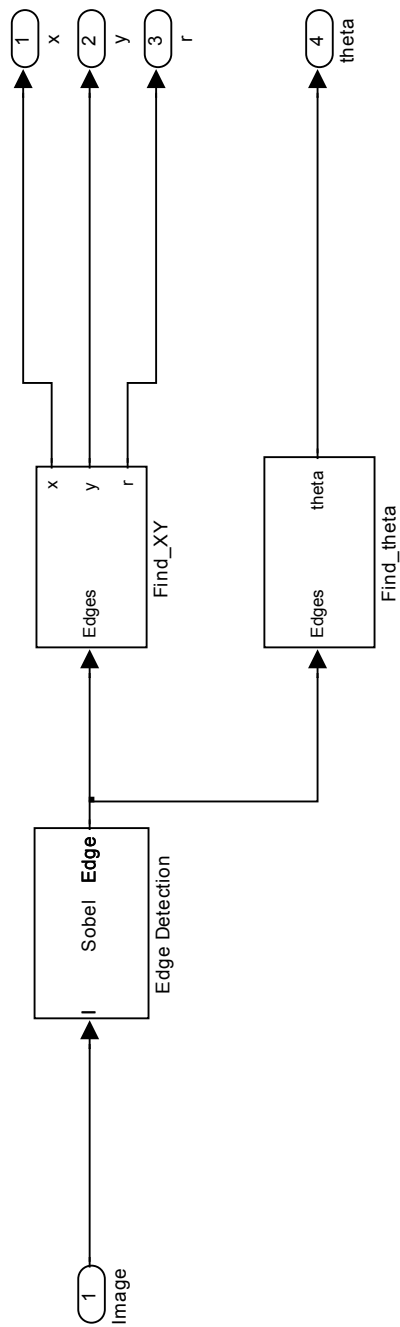
# Παράρτημα Α

Ο σχεδιασμός του συστήματος σε SIMULINK

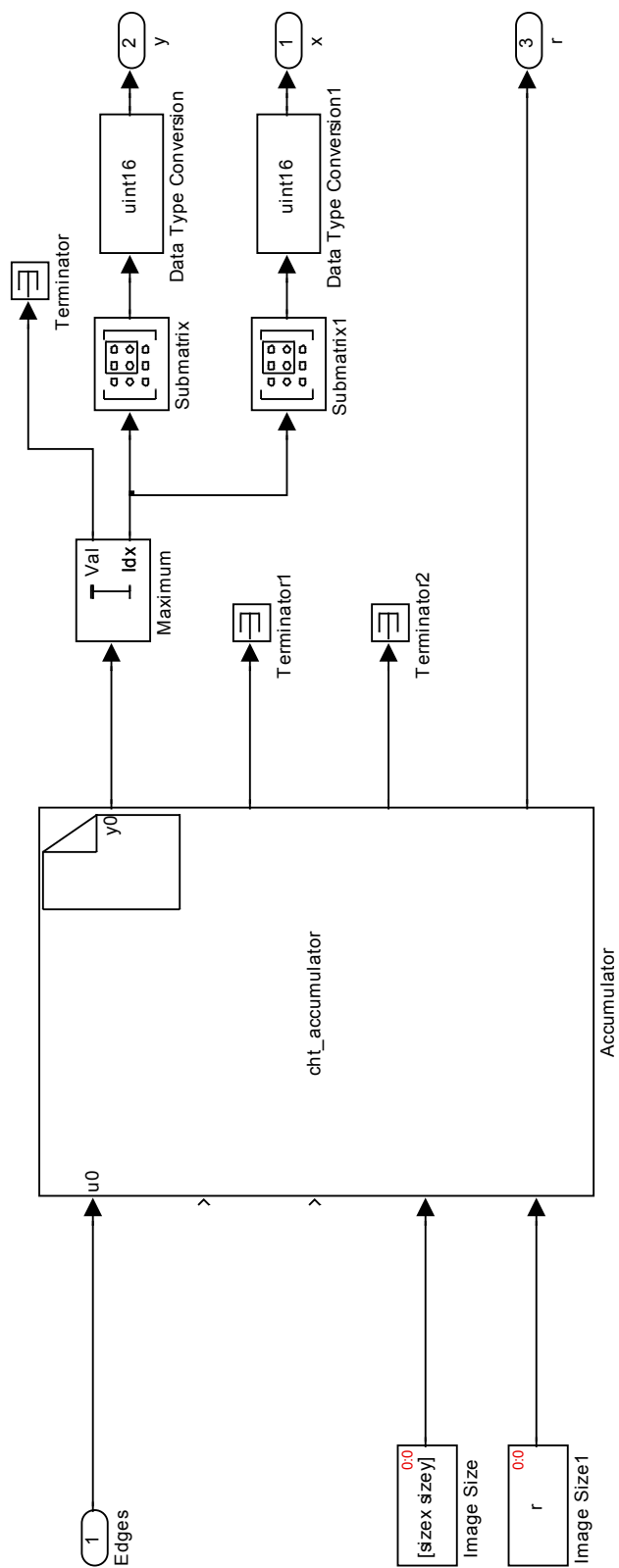
Η πρώτη σελίδα του μοντέλου



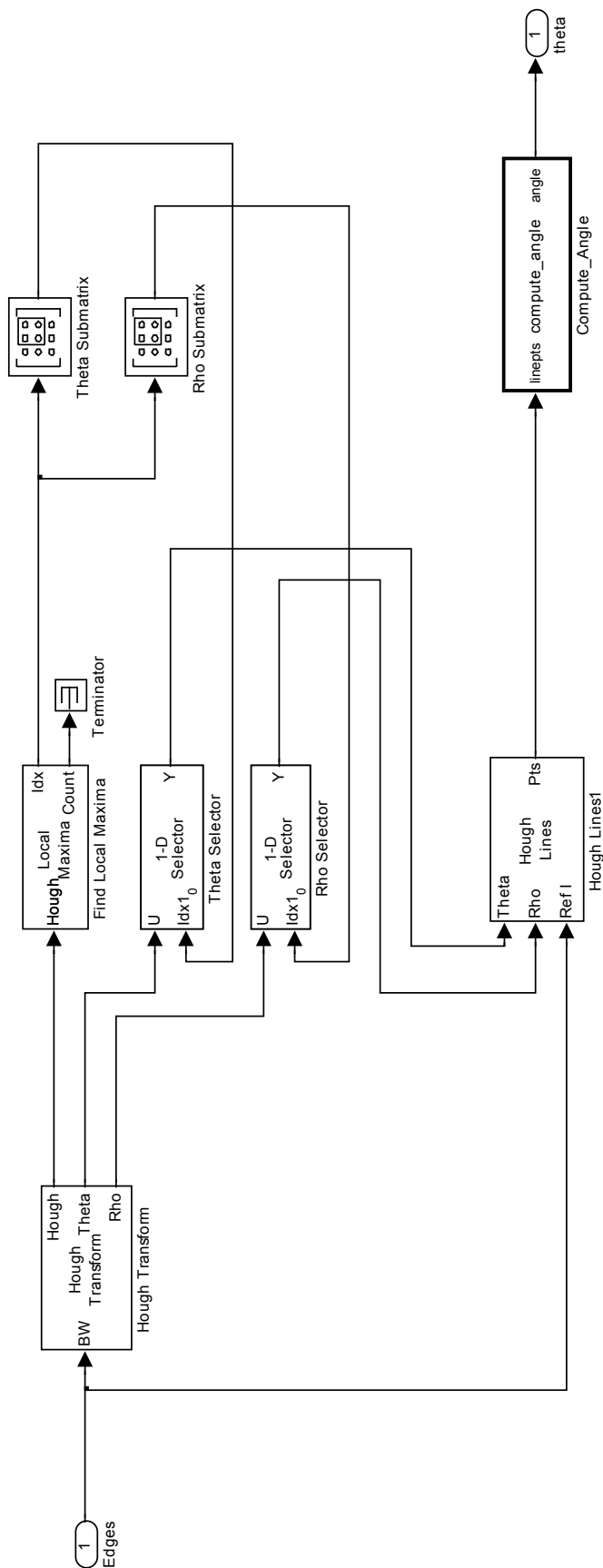
Το υποσύστημα /Position



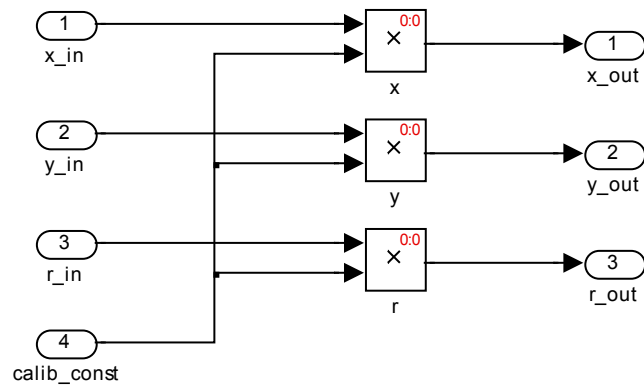
Το υποσύστημα /Position/Find\_XY



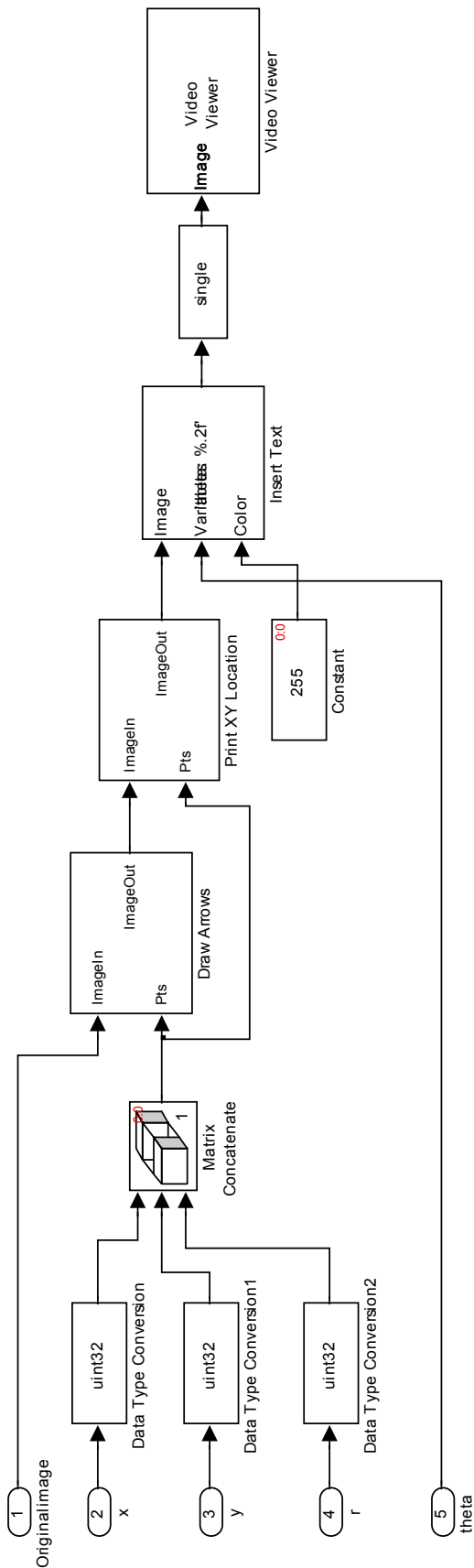
Το υποσύστημα /Position/Find\_theta



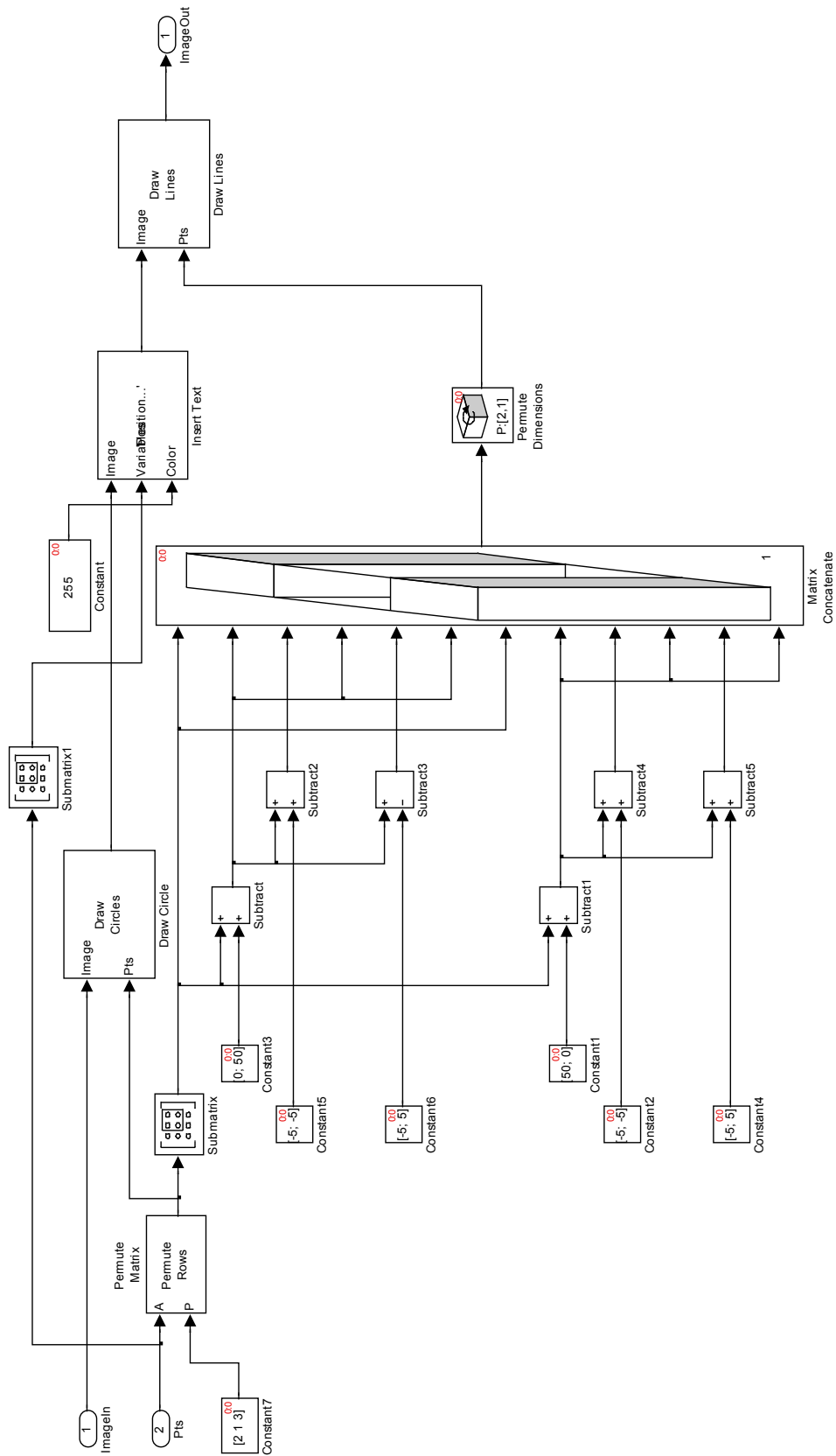
### Το υποσύστημα /Convert



Το υποσύστημα /DisplayOut

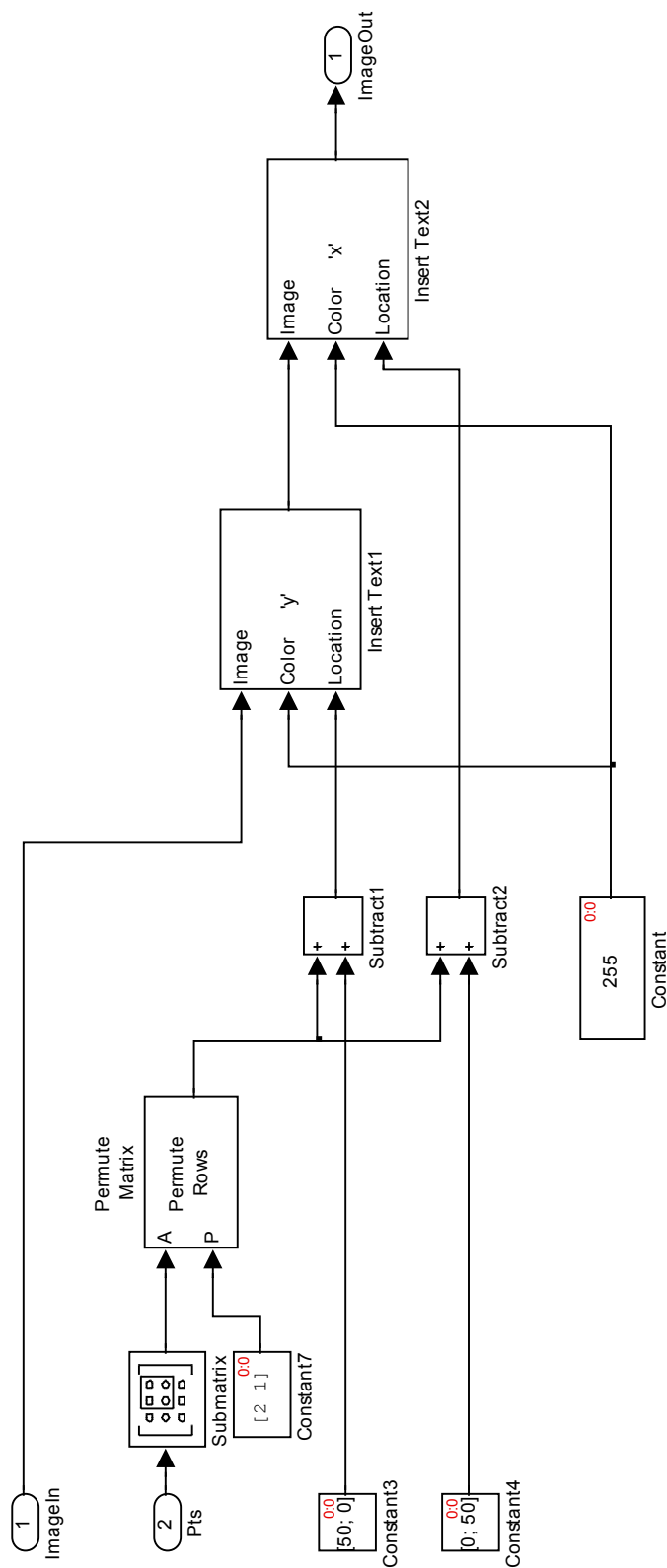


Το υποσύστημα /DisplayOut/Draw Arrows





Το υποσύστημα /DisplayOut/Print XY Location



## Παράρτημα Β

Ο αλγόριθμος *Accumulator*

```
unsigned long i,k,x0;
double *xIndex, *yIndex;
unsigned char *Image;
double *Accumulator;
unsigned long xyIndex;
double y01,y02;
double fraction;
double number;
unsigned long sizex, sizey;
double low,high;

sizex = ImageSize[0];
sizey = ImageSize[1];
r[0] = radius[0];

xIndex = malloc(sizex*sizey*sizeof(*xIndex));
memset(xIndex,0,sizex*sizey*sizeof(*xIndex));
yIndex = malloc(sizex*sizey*sizeof(*yIndex));
memset(yIndex,0,sizex*sizey*sizeof(*yIndex));
xyIndex = 0;

if(sizex==800 && sizey==600)
{
    Image      = Image800x600;
    Accumulator = Accumulator800x600;
    memset(Accumulator,0,sizex*sizey*sizeof(*Accumulator800x600));
}
else if(sizex==400 && sizey==300)
{
    Image      = Image400x300;
    Accumulator = Accumulator400x300;
    memset(Accumulator,0,sizex*sizey*sizeof(*Accumulator400x300));
}
else if(sizex==640 && sizey==480)
{
    Image      = Image640x480;
    Accumulator = Accumulator640x480;
    memset(Accumulator,0,sizex*sizey*sizeof(*Accumulator640x480));
}

/* =====
*/
/* [yIndex xIndex] = find(Image)
*/
/* =====
*/
for(i=0;i<sizey;i++)
{
    for(k=0;k<sizex;k++)
    {
        if(Image[k*sizey+i] != 0)
        {
            xIndex[xyIndex] = k;
            yIndex[xyIndex] = i;
            xyIndex++;
        }
    }
}
}
```

```
/* =====  
*/  
/* round finding routine  
*/  
/* =====  
*/  
for(i=0;i<xyIndex;i++)  
{  
    low = xIndex[i] - radius[0];  
    high = xIndex[i] + radius[0];  
    if(low < 1)  
        low = 1;  
    if(high > sizex)  
        high = sizex;  
  
    for(x0=low; x0<=high; x0++)  
    {  
        y01 = yIndex[i]-sqrt(pow(radius[0],2)-pow(xIndex[i]-x0,2));  
        y02 = yIndex[i]+sqrt(pow(radius[0],2)-pow(xIndex[i]-x0,2));  
/* =====  
*/  
        fraction=modf(y01,&number);  
        if((y01+0.5)<(number+1))  
            y01 = number;  
        else  
            y01 = number+1;  
        fraction=modf(y02,&number);  
        if((y02+0.5)<(number+1))  
            y02 = number;  
        else  
            y02 = number+1;  
/* =====  
*/  
        if((y01 < sizey) && (y01 >= 1))  
        {  
            Accumulator[(unsigned long) (y01+x0*sizey)] =  
                Accumulator[(unsigned long) (y01+x0*sizey)] + 1;  
        }  
        if((y02 < sizey) && (y02 >= 1))  
        {  
            Accumulator[(unsigned long) (y02+x0*sizey)] =  
                Accumulator[(unsigned long) (y02+x0*sizey)] + 1;  
        }  
    }  
}  
/* =====  
*/  
  
free(xIndex);  
free(yIndex);
```



## Παράρτημα Γ

Ο αλγόριθμος *Compute\_Angle*

```
function angle = compute_angle(linepts)

%Compute the angle value in degrees
yy = linepts(4)-linepts(2);
xx = linepts(3)-linepts(1);
if (yy ==0)
    angle = 90;
else
    angle = double(double(xx)/double(yy));
    angle = atan(angle);
    angle = angle*180/pi;
end
```