Κατάλογος περιεχομένων

Κεφάλαιο 1:Περίληψη....1
Κεφάλαιο 2:Εισαγωγή....4
Παράγραφος 2.1 :Μηχανική Όραση: Σύντομη Ιστορία και εφαρμογές....4
Παράγραφος 2.2 :Αναφορά στην αναγνώριση αντικειμένων....4
Παράγραφος 2.3 :Αναφορά στην στερεοσκοπία....5
Παράγραφος 2.4 :Υπολογισμός της απόστασης με μία μόνο κάμερα....6
Κεφάλαιο 3:Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνων....8
Παράγραφος 3.1 :Λήψη και αποθήκευση ψηφιακών εικόνων....9
Παράγραφος 3.2 :Χώρος χρώματος RGB....9
Παράγραφος 3.3 :Χώρος Χρώματος HSV....12
Παράγραφος 3.4 :Σχέση και αντιστοίχιση μεταξύ RGB και HSV....15
3.4.1 Αντιστοίχιση της Χροιάς (Hue)....15
3.4.2 Αντιστοίχιση της Τιμής/Φωτεινότητας (Value/Brightness)....16
3.4.3 Αντιστοίχιση του Κορεσμού (Saturation)....17
3.4.4 Παραδοχές που προκύπτουν....18
Κεφάλαιο 4:Προοπτική....19
Παράγραφος 4.1 :Οφθαλμαπάτες λόγω προοπτικής....19
Παράγραφος 4.2 :Φαινόμενο Μέγεθος, Οπτική γωνία και Σημείο Σύγκλισης....20
Παράγραφος 4.3 :Μαθηματική σχέση Φαινόμενου Μεγέθους προς Απόστασης....20
Κεφάλαιο 5:Αναγνώριση και μέτρηση του αντικειμένου....23
Παράγραφος 5.1 :Επιλογή μεθόδου αναγνώρισης του αντικειμένου....23
5.1.1 Μέθοδος αναγνώρισης σχήματος....24
5.1.2 Μέθοδος αναγνώρισης χρώματος....25
5.1.3 Επιλογή σχήματος....25
Παράγραφος 5.2 :Εύρεση του κόκκινου χρώματος στην εικόνα....26
5.2.1 Αρχική Προσπάθεια....26
5.2.2 Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε....27
5.2.3 Λειτουργία του λόγου ως όριο....29
5.2.4 Λειτουργία της Φωτεινότητας του Κόκκινου ως όριο....30
5.2.5 Μεθοδολογία επιλογής Λόγου και Φωτεινότητας για δεδομένο περιβάλλον....34
5.2.6 Ανάλυση της ανίχνευσης του αλγορίθμου....37
Παράγραφος 5.3 :Τεχνικές μείωσης του θορύβου στην ανίχνευση....39
5.3.1 Μείωση του θορύβου αφαιρώντας το μέσο όρο αυτού....39
5.3.2 Κατωφλίωση στο εμβαδόν που μετριέται από την εικόνα....40
5.3.3 Αποθήκευση μόνο του μεγαλύτερου αντικειμένου ανά εικόνα....40
5.3.4 Γέμισμα οπών στο εσωτερικό σχημάτων....41
Κεφάλαιο 6:Υπολογισμός της θέσης στο χώρο και εκτίμηση της βαλλιστικής τροχιάς με μία μόνο κάμερα....42
Παράγραφος 6.1 :Επιλογή της μεθόδου εκτίμησης της απόστασης....42
6.1.1 Στερεοσκοπία με δύο κάμερες....42
6.1.2 Στερεοσκοπία με μία κινούμενη κάμερα....43
6.1.3 Μειονεκτήματα των δύο μεθόδων στερεοσκοπίας....43
Παράγραφος 6.2 :Υπολογισμός του βάθους με μία μόνο κάμερα....44
6.2.1 Αποθήκευση του μεγέθους αναφοράς και εύρεση της απόστασης....45
Παράγραφος 6.3 :Ορισμός συστήματος συντεταγμένων και υπολογισμός της θέσης στο χώρο.46
6.3.1 Ορισμός σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων και θέση του αντικειμένου....46
6.3.2 Το ωρολογιακό σύστημα του αζιμούθιου....48
6.3.3 Η “υπόθεση του 1m”....48
6.3.4 Ορισμός και Αναγωγή στο καρτεσιανό σύστημα της κάμερας....50
Παράγραφος 6.4 :Υπολογισμός του σημείου πρόσκρουσης....51
6.4.1 Υπολογισμός της αντίστασης του αέρα....51

6.4.2 Πρόβλεψη της εξίσωσης της τροχιάς με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.....53
6.4.3 Υπολογισμός του σημείου πρόσκρουσης.....54
Κεφάλαιο 7:Προσομοίωση της ρίψης στο λογισμικό V-REP.....56
Παράγραφος 7.1 :Περίληψη των δυνατοτήτων του λογισμικού V-REP.....56
7.1.1 Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών μοντέλων.....57
7.1.2 Διαφορετικοί τρόποι προγραμματισμού στο V-REP.....60
7.1.3 Δυνατότητα προσομοίωσης αισθητήρων.....62
7.1.4 Ορισμός αρθρώσεων στο V-REP.....62
Παράγραφος 7.2 :Δημιουργία μίας προσομοίωσης στο V-REP.....63
Παράγραφος 7.3 :Σύνδεση με τη Matlab σαν εξωτερικό API.....64
Παράγραφος 7.4 :Ρίψη και αποτελέσματα.....65
7.4.1 Γραφική αναπαράσταση απόστασης και θέσης στο χώρο.....66
7.4.2 Πρόβλεψη και περιορισμοί της πρόβλεψης στο V-REP.....68
Κεφάλαιο 8:Σχεδιασμός και κατασκευή.....71
Παράγραφος 8.1 :Πρώτη έκδοση: Προτερήματα και αδυναμίες.....71
Παράγραφος 8.2 :Δεύτερη έκδοση:Προτερήματα και αδυναμίες.....72
Παράγραφος 8.3 :Τρίτη έκδοση: Προτερήματα και αδυναμίες.....76
Παράγραφος 8.4 :Ο ελεγκτής Roboteq SDC2130.....77
Κεφάλαιο 9:Συμπεράσματα και αποτελέσματα από πειράματα.....80
Παράγραφος 9.1 :Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τα πειράματα με το πραγματικό σύστημα.....80
Παράγραφος 9.2 :Συμπεράσματα.....83
Κεφάλαιο 10:Πιθανές εφαρμογές της μεθόδου αναγνώρισης βάθους.....84
Κεφάλαιο 11:Περιοχές περαιτέρω έρευνας.....86
Κεφάλαιο 12:Παράρτημα.....88
Παράγραφος 12.1 :Αλγόριθμος Ελέγχου.....88
Παράγραφος 12.2 :Αλγόριθμοι Μείωσης θορύβου στην ανίχνευση του κόκκινου.....91
Παράγραφος 12.3 :Μελέτες αντοχής μέσω του συστήματος CAD για τον ιμάντα και τις συνδέσεις με σφήνα.....92
Παράγραφος 12.4 :Μηχανολογικά σχέδια της τελευταίας έκδοσης του βραχίονα.....101
Βιβλιογραφία.....113

Κεφάλαιο 1: Περίληψη.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος μηχανικής όρασης με μία μόνο κάμερα το οποίο να αναγνωρίζει ένα αντικείμενο σε βαλλιστική τροχιά, να υπολογίζει το σημείο πρόσκρουσης του στο επίπεδο ενός ρομποτικού βραχίονα και και να το αποκρούει, φέρνοντας το άκρο του βραχίονα σε αυτό το σημείο. Επιπλέον, τα παραπάνω πρέπει να γίνονται ενώ το σύστημα χρησιμοποιεί μία μόνο ακίνητη κάμερα.

Για να γίνουν όσα αναφέρονται παραπάνω πρέπει ο αλγόριθμος να υπολογίζει τα παρακάτω:

- Να αναγνωρίζει το αντικείμενο στο χώρο μέσα από τις εικόνες που θα λαμβάνει από την κάμερα.
- Να υπολογίζει την απόσταση του αντικειμένου από την κάμερα.
- Να υπολογίζει την θέση του στο χώρο βάσει ενός συστήματος συντεταγμένων που ορίζεται με αρχή των αξόνων την ίδια την κάμερα.
- Από την ιστορία των θέσεων του αντικειμένου στο χώρο να υπολογίζει την τροχιά του και να βρίσκει το σημείο που αυτή η τροχιά τέμνει το επίπεδο του βραχίονα.

Το πιο σημαντικό από τα παραπάνω είναι ο υπολογισμός της απόστασης του αντικειμένου, αφού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κλασσικές τεχνικές στερεοσκοπίας που απαιτούν δύο ακίνητες ή τουλάχιστον μία κινητή κάμερα.

Και να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω πρέπει να γίνονται σε πολυ μικρό χρονικό διάστημα. Και αυτό γιατί στο χρόνο στον οποίο διαρκεί μία ρίψη, περίπου 1 με 2 sec, πρέπει ο αλγόριθμος να έχει παράξει αρκετά αποτελέσματα ώστε να προσεγγίσει με ικανοποιητική ακρίβεια τη πραγματική τροχιά του αντικειμένου. Η ακρίβεια της πρόβλεψης του σημείου πρόσκρουσης εξαρτάται από αυτό. Πειραματικά, φαίνεται ότι όταν αναλύονται 30 ή περισσότερα frames τότε η πρόβλεψη απέχει 5 έως 10cm από το πραγματικό σημείο πρόσκρουσης. Με πάνω από 80 frames η ακρίβεια αγγίζει τα 10 χιλιοστά.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, έχει προσαρμοστεί μία από τις μεθόδους που περιγράφει στο βιβλίο του "Binocular Vision and Ocular Motility" ο καθηγητής οφθαλμολογίας *Gunter K. von Noorden*. Σε αυτό το βιβλίο, στο κεφάλαιο που πραγματεύεται την μονόφθαλμη όραση, αναφέρει ότι ένας από τους τρόπους εκτίμησης της απόστασης έως ένα αντικείμενο είναι η σύγκριση του φαινόμενου μεγέθους του με το πραγματικό μέγεθος του βασιζόμενος σε πρότερη εμπειρία.

Αυτό καθίσταται δυνατό λόγω ενός από τους βασικούς κανόνες της προοπτικής που αναφέρει ότι:

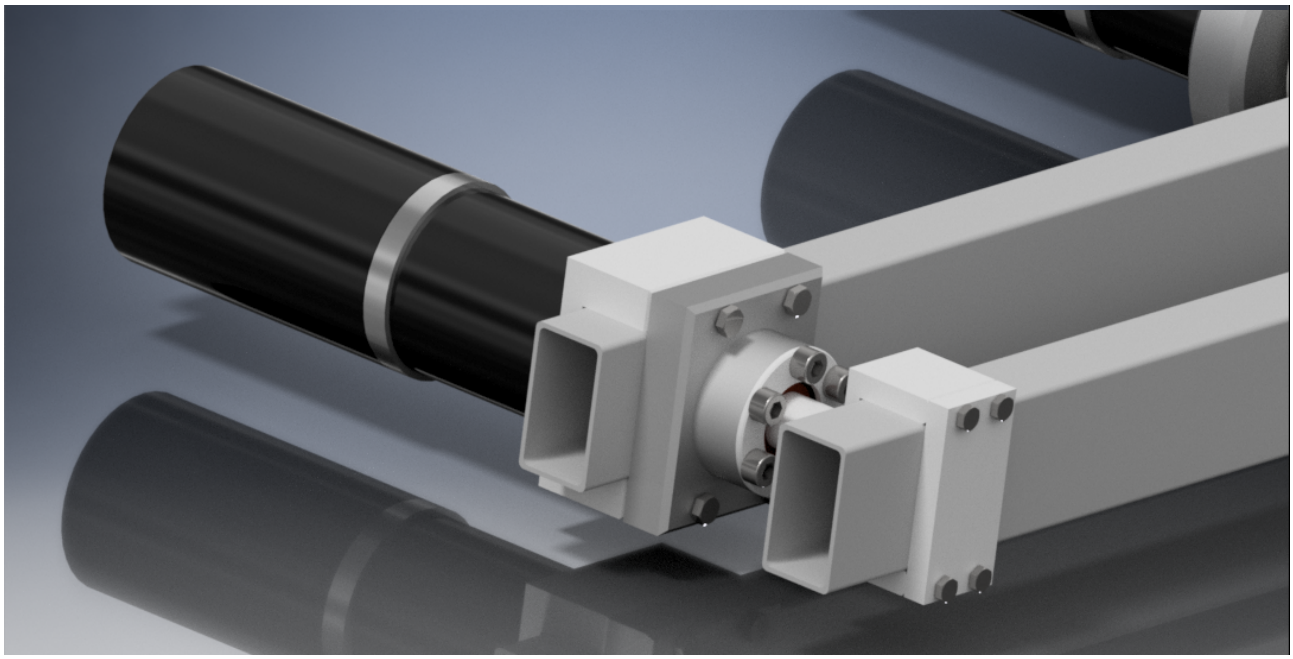
"Το φαινόμενο μέγεθος ενός αντικειμένου είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση του

από τον παρατηρητή."

Η ακριβής μαθηματική σχέση για τα παραπάνω αποδεικνύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο αυτής της εργασίας. Επιπλέον, το ρόλο της πρότερης εμπειρίας παίζει μία μέθοδος καταγραφής του μεγέθους του αντικειμένου σε συγκεκριμένη απόσταση.

Αυτός ο τρόπος εύρεσης ενός αντικειμένου στο χώρο έχει σημαντικά λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και κατά συνέπεια μικρότερο κόστος. Επιπλέον μπορεί να εφαρμοστεί εκ των υστέρων σε πολλά ήδη υπάρχοντα συστήματα. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή σε συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού όπου το περιβάλλον μπορεί να έχει *"ελεγχόμενη ασάφεια"*, να υπάρχουν δηλαδή κάποιες άγνωστες μεταβλητές του περιβάλλοντος ενώ τα υπόλοιπα είναι γνωστά και ελεγχόμενα. Τέτοια περιβάλλοντα μπορεί να είναι εργοστάσια που εφαρμόζουν τεχνικές *"Flexible Manufacturing Systems (FMS)"* ή απλώς σημεία της παραγωγής όπου υπάρχει ελλιπής αυτοματισμός, π.χ. Ένας ιμάντας μεταφοράς φέρνει μεταλλικά τεμάχια σε ένα χώρο χωρίς όμως αυτά να τοποθετούνται κάπου με ακρίβεια.

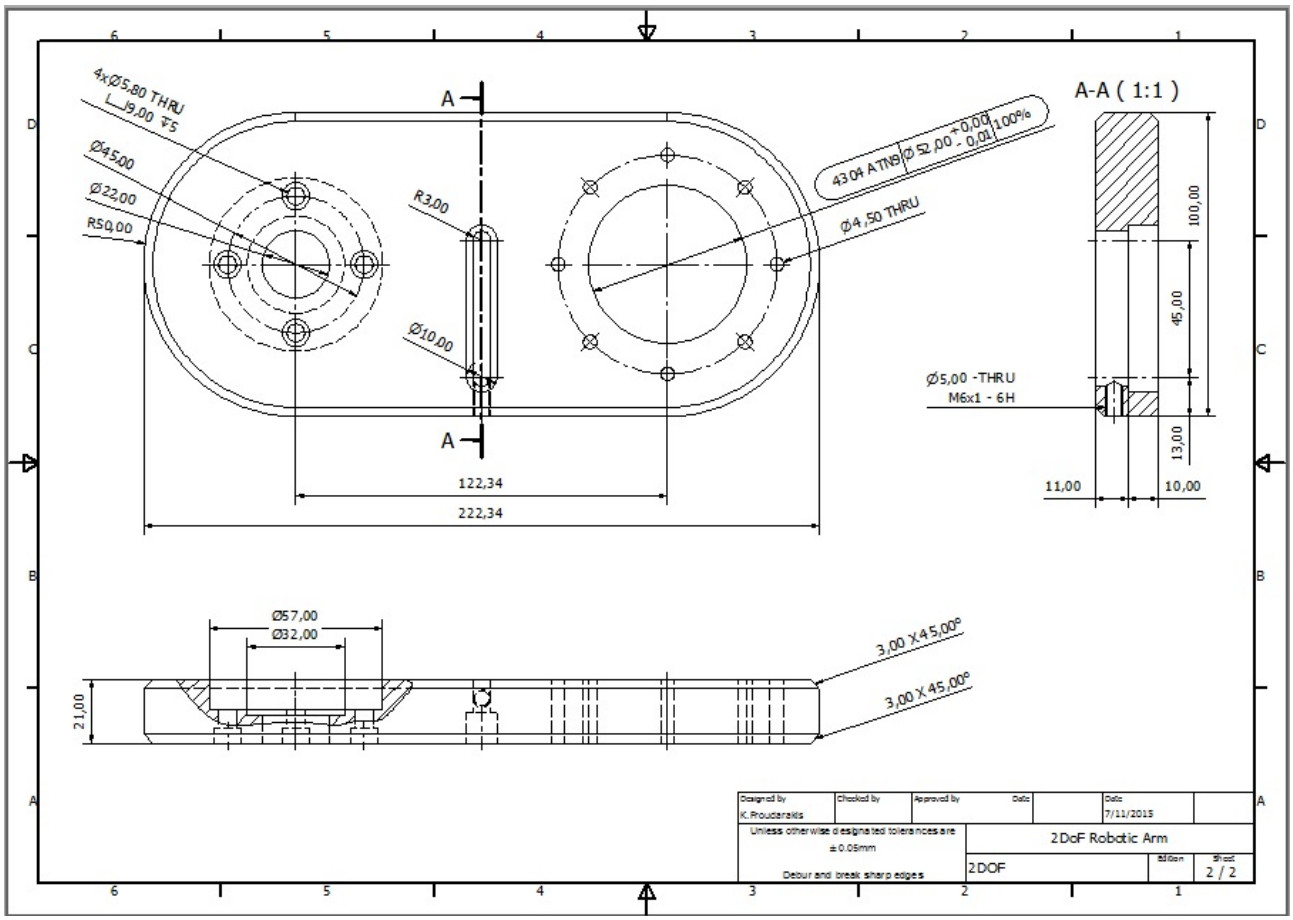
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται απεικονίσεις από την τελευταία έκδοση του σχεδίου του βραχίονα, που αντιμετωπίζει τα προβλήματα, κατασκευαστικά και λειτουργικά που παρουσίασαν οι δύο πρώτες εκδόσεις του.



Τα κύρια προβλήματα που λύνονται με αυτό το σχεδιασμό, είναι:

- Η όδευση της καλωδίωσης του 2^{ου} βαθμού μέσα από τον άξονα μετάδοσης της κίνησης του 1^{ου} βαθμού.
- Η στιβαρότητα του 2^{ου} βαθμού, στον οποίο έχει προστεθεί πλέον ρουλεμάν.
- Η ύπαρξη τροχαλίας εντατήρα για τον ιμάντα του 1^{ου} βαθμού.
- Και τέλος, η δυνατότητα προέντασης του ιμάντα μέσω ενός κοχλία που μετακινεί τον εντατήρα.

Το τελευταίο φαίνεται και στα μηχανολογικά σχέδια της βάσης του βραχίονα. Ο κοχλίας είναι αυτός που σημειώνεται ως *"M6x1 - 6H"*.



Να σημειωθεί επίσης, ότι οι δυσκολίες που αναφέρονται παραπάνω ήταν και ο λόγος που τελικά δεν έχει κατασκευαστεί ακόμα λειτουργικό πρωτότυπο του βραχίονα.

Παρ' όλα αυτά, το υποσύστημα Μηχανικής Όρασης του βραχίονα λειτουργεί ικανοποιητικά και μπορεί να προβλέψει, με τις ακρίβειες που αναφέρονται παραπάνω, την τροχιά της μπάλας όπως αποδείχθηκε πειραματικά.

Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή.

Η τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών έχει προχωρήσει με ταχύτατους ρυθμούς τις τελευταίες δεκαετίες. Τα πεδία έρευνας διευρύνθηκαν είτε μέσω της φυσικής περιέργειας των ερευνητών ή για να καλύψουν τις ανάγκες τις βιομηχανίας και της κοινωνίας με πιο αποτελεσματικούς ή και εντελώς νέους τρόπους.

Παράγραφος 2.1 : Μηχανική Όραση: Σύντομη Ιστορία και εφαρμογές

Με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύς και των δυνατοτήτων των υπολογιστών, ήρθε και η άνθηση της εφαρμοσμένης επιστήμης της Μηχανικής Όρασης. Για την ακρίβεια, παρ' όλο που υπήρχαν ερευνητικές προσπάθειες σε αυτό τον τομέα ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '50, η πραγματική αρχή αυτού που ονομάζουμε Μηχανική Όραση ήρθε τη δεκαετία του 1990 με την δημιουργία των πρώτων αξιόπιστων μοντέλων για την αναγνώριση σχημάτων σε μία ψηφιακή εικόνα.

Από τους βασικούς στόχους της μηχανικής όρασης είναι η αναδόμηση ενός χώρου μέσω εικόνων και η αναγνώριση συγκεκριμένων αντικειμένων μέσα σε αυτή. Τα παραπάνω μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες έρευνας:

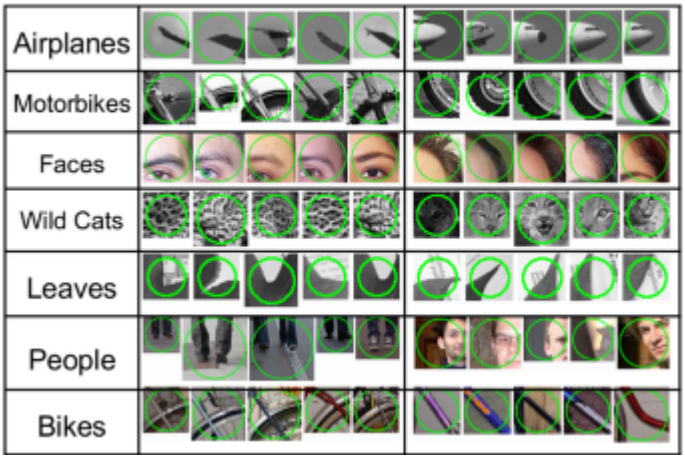
- Την αναγνώριση ενός αντικειμένου.
- Και τον υπολογισμό της απόστασης μέχρι ένα αντικείμενο.

Παράγραφος 2.2 : Αναφορά στην αναγνώριση αντικειμένων.

Η αρχή της λύσης του πρώτου προβλήματος, όπως προαναφέρθηκε, ήρθε τη δεκαετία του '90 με την ανάπτυξη των πρώτων αξιόπιστων αλγορίθμων αναγνώρισης αντικειμένων.

Τη μεγαλύτερη ώθηση σε αυτό τον τομέα την έδωσα η εξέλιξη του αλγορίθμου SIFT (Scale Invariable Feature Transformation) από τον David Lowe το 1999. Ο αλγόριθμος αυτός έδινε τη δυνατότητα για αξιόπιστη αναγνώριση σχημάτων, χωρίς να επηρεάζεται από την κλίμακα και τον προσανατολισμό ενός σχήματος μέσα στην εικόνα. Με τη δυνατότητα, να αναγνωρίζονται αξιόπιστα σχήματα μεταξύ δύο εικόνων, δόθηκε η δυνατότητα για την ανάπτυξη της Μηχανικής Μάθησης.

Η Μηχανική Μάθηση βασίζεται στη ανίχνευση ενός είδους αντικειμένου σε μία πληθώρα εικόνων και αναγνώριση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών αυτού του είδους. Στη συνέχεια, όταν αναγνωρίζονται αρκετά χαρακτηριστικά μίας κατηγορίας, ο αλγόριθμος καταλήγει ότι υπάρχει μέσα στην εικόνα αυτό το συγκεκριμένο είδος αντικειμένου στην εικόνα.



Στο παραπάνω βασίζονται οι αλγόριθμοι αναγνώρισης προσώπων και συρραφής εικόνων που είναι τόσο κοινοί στις σημερινές ψηφιακές φωτογραφικές κάμερες.

Παράγραφος 2.3 : Αναφορά στην στερεοσκοπία.

Για τη λύση του δεύτερου προβλήματος η επιστήμη μιμήθηκε τη φύση. Και συγκεκριμένα τον τρόπο διόφθαλμης όρασης των θηλαστικών. Πράγματι, ο τρόπος που τα θηλαστικά αντιλαμβάνονται το βάθος, και κατ' επέκταση και τη σχετική απόσταση, είναι συγκρίνοντας τις δύο εικόνες που λαμβάνουν από τους δύο ξεχωριστούς οφθαλμούς τους.

Οι οφθαλμοί των θηλαστικών είναι σε συμμετρικά σημεία της κεφαλής τους. Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τις διαφορετικές εικόνες και βασιζόμενος στην διαφορά της θέσης του κάθε αντικειμένου ή χαρακτηριστικού από τη μία εικόνα στην άλλη, αντιλαμβάνεται την απόσταση μεταξύ αυτού και των οφθαλμών του.

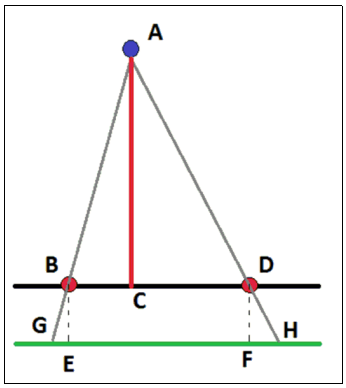
Για να έχει νόημα αυτή η πληροφορία, πρέπει να είναι γνωστή η απόσταση μεταξύ των οφθαλμών που έλαβαν τις εικόνες. Προφανώς στην περίπτωση του βιολογικού εγκεφάλου, αυτή η απόσταση έχει υπολογιστεί, είτε ως ένστικτο ή ως εμπειρία κατά την βρεφική και παιδική ηλικία του οργανισμού.

Στην περίπτωση της Μηχανικής Όρασης όμως, αυτή η απόσταση πρέπει να δοθεί ως παράμετρος έτσι ώστε να μπορεί ο αλγόριθμος να παράγει αποτελέσματα. Και σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμη η αναγνώριση χαρακτηριστικών και αντικειμένων με τη μέθοδο SIFT, καθώς για να έχουν νόημα τα αποτελέσματα πρέπει να αφορούν το ίδιο σημείο της εικόνας, το οποίο λόγω προοπτικής και απόστασης μπορεί να εμφανίζεται ελαφρώς παραμορφωμένο από τη μία εικόνα στην άλλη.

Οι παραπάνω διαδικασίες είναι αρκετά απαιτητικές υπολογιστικά. Αυτός είναι και ο λόγος που αυτές οι τεχνικές δεν αναπτύχθηκαν παρά μόνο στα τέλη της δεκαετίας του '90. Για να γίνει κατανοητό, όμως, το πόσο πραγματικά δύσκολη και απαιτητική διαδικασία είναι η όραση, να αναφερθεί ότι και στους βιολογικούς οργανισμούς απαιτεί μεγαλύτερο ποσοστό της εγκεφαλικής λειτουργίας από άλλες δραστηριότητες, συχνά άνω του 40%.

Ενδεικτικά να σημειωθεί, ότι ο τρόπος υπολογισμού βασίζεται στην ομοιότητα των τριγώνων για να υπολογισθεί η απόσταση μεταξύ του φακού της κάμερας και του αντικειμένου. Απαιτείται να είναι γνωστά η απόσταση μεταξύ των δύο καμερών και η

απόσταση μεταξύ του σημείου σύγκλισης της κάμερας και του επιπέδου προβολής, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



Εδώ τα σημεία B και D είναι τα κέντρα των οπών των καμερών, E και F είναι τα κέντρα των εικόνων που αποθηκεύονται και G και H είναι η απεικόνιση του σημείου A σε κάθε εικόνα. Ο τύπος ορίζει ότι η μετατόπιση της απεικόνισης $\boxed{d = GE + FH = \frac{k}{z}}$, όπου $k = BD \cdot BE$ και z η απόσταση του σημείου από το φακό της κάμερας *(AC)*. Το παραπάνω αποδεικνύεται στη βιβλιογραφία και η απόδειξη βασίζεται στην ομοιότητα των παρακάτω τριγώνων:

- ABC με BGE και
- ACD με DFH.

Παράγραφος 2.4 : Υπολογισμός της απόστασης με μία μόνο κάμερα.

Σε αυτή την εργασία θα γίνει μία προσπάθεια να υπολογιστεί η απόσταση μιμούμενοι και πάλι τη φύση. Αυτή τη φορά όμως, θα μιμηθεί ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζεται η φύση την περίπτωση καταστροφικής βλάβης στον ένα οφθαλμό.

Η παραπάνω κατάσταση αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μονόφθαλμη όραση. Υπάρχει πληθώρα συγγραμμάτων που αναφέρονται στις επιπτώσεις της απώλειας του ενός οφθαλμού και της προσαρμογής του ατόμου στην μονόφθαλμη όραση. Μάλιστα αξίζει να σημειωθεί, ότι αντίστοιχες μελέτες έχουν γίνει και σε ζώα, κυρίως θηλαστικά, τα οποία έχουν χάσει επίσης τον ένα οφθαλμό.

Το εντυπωσιακό σε αυτές τις μελέτες ήταν το χρονικό διάστημα της ανάρρωσης και της προσαρμογής στη νέα οφθαλμολογική κατάσταση. Στην πλειονότητα των ανθρώπων, ο χρόνος προσαρμογής δεν υπερέβαινε τον ένα χρόνο. Ενώ ιδιαίτερα χαμηλά ήταν και τα ποσοστά που ανέφεραν δυσκολίες στην κίνηση, την ισορροπία και την προσωπική ζωή. Επιπλέον, οι ηλικία των ασθενών δεν φάνηκε να επηρεάζει τα παραπάνω αποτελέσματα. Και μάλιστα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και σε θηλαστικά διαφορετικά των ανθρώπων.

Σε προηγούμενη παράγραφο όμως αναφέρθηκε ότι ο βιολογικός εγκέφαλος βασίζεται σε μία πολύ περίπλοκη λειτουργία και στη χρήση δύο οφθαλμών για την αντίληψη του βάθους. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα, πώς είναι δυνατόν κάποιος εάν δεν έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την απόσταση, να αυτοεξυπηρετηθεί. Πώς είναι δυνατόν να εκτελέσει απλές ενέργειες όπως, το να πιάσει ένα ποτήρι από το τραπέζι.

Στο παραπάνω ερώτημα η απάντηση είναι η απίστευτη δυνατότητα του βιολογικού εγκεφάλου να προσαρμόζεται και να μπορεί να επεξεργαστεί πληροφορίες με εντελώς διαφορετικό τρόπο από τον συνηθισμένο, εάν παραστεί η ανάγκη. Οι τρόποι λοιπόν που αντιμετωπίζεται το πρόβλημα είναι δύο:

- Με κινήσεις της κεφαλής για απόκτηση διαφορετικής οπτικής γωνίας, και
- με αναφορά σε πρότερες εμπειρίες.

Από τις δύο, η μεθοδολογία που θα εφαρμοσθεί σε αυτή την εργασία είναι η δεύτερη.

Ενδεικτικά όμως να αναφερθεί ότι στην πρώτη περίπτωση, ο εγκέφαλος εκτελεί ένα παρόμοιο υπολογισμό με βάσει δύο εικόνες από διαφορετικές όμως χρονικές στιγμές.

Επιπλέον, εδώ η απόσταση μεταξύ των οφθαλμών σε αυτές τις δύο εικόνες υπολογίζεται από τον εγκέφαλο λαμβάνοντας υπ' όψιν ολόκληρη τη στάση του σώματος.

Η δεύτερη περίπτωση βασίζεται στην πρότερη γνώση ενός αντικειμένου και υπολογίζει την απόσταση ως αυτό βάσει της προοπτικής. Ως γνωστόν, όσο μακρύτερα είναι ένα αντικείμενο από τον παρατηρητή, τόσο μικρότερο εμφανίζεται. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται πιο αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο και αποδεικνύονται και οι μαθηματικές σχέσεις που το διέπουν.

Αυτή είναι και η τεχνική που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόστασης του αντικειμένου από την κάμερα σε αυτή την εργασία. Μάλιστα, όπως και στην περίπτωση του βιολογικού εγκεφάλου, και εδώ πρέπει πρώτα να υπάρξει μία εμπειρία βάσει της οποίας θα εκτιμάται το μέγεθος και κατ' επέκταση και η απόσταση. Και αυτό γίνεται, με τη λήψη φωτογραφιών υπό συγκεκριμένες συνθήκες και τη χρήση των δεδομένων που προκύπτουν ως αναφορά για το σχετικό μέγεθος και κατά συνέπεια για την αλλαγή της απόστασης. Η ακριβής διαδικασία και ο τρόπος χρήσης των δεδομένων αναλύονται παρακάτω.



Κεφάλαιο 3: Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνων.

Είναι εντυπωσιακό ότι όλα τα χρώματα που αντιλαμβανόμαστε γύρω μας μπορούν να αναλυθούν σε τρία μόνο Βασικά Χρώματα. Όπως μαθαίνουμε στο σχολείο αυτά είναι το μπλε, το κίτρινο και το κόκκινο. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, βέβαια, αυτή η τριάδα δεν είναι μονοσήμαντη.

Το γεγονός όμως ότι όλα τα χρώματα που βλέπουμε μπορούν να αναλυθούν μόνο σε τρία διαφορετικά οφείλεται στο ότι το ανθρώπινο μάτι έχει μόνο τριών ειδών φωτοευαίσθητα κύτταρα που αναγνωρίζουν χρώμα.

Αυτά αντιδρούν σε ένα εύρος γύρω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και γενικά τα χρώματα που αναγνωρίζουν είναι το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. Η ποσοστιαία κατανομή αυτών των κυττάρων, κατά προσέγγιση, είναι:

- 30% Αυτά που αντιδρούν στο κόκκινο
- 59% αυτά που αντιδρούν στο πράσινο
- και 11% αυτά που αντιδρούν στο μπλε.

Αυτός είναι και ο λόγος που στην ψηφιακή αποθήκευση των φωτογραφιών, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά κανάλια τα οποία αποθηκεύουν την πληροφορία για τη φωτεινότητα αυτών των τριών χρωμάτων.

Από το παραπάνω προκύπτει ότι το χρώμα, στην ψηφιακή τεχνολογία, απεικονίζεται από ένα διάνυσμα με τρία στοιχεία. Και κατ' επέκταση μπορεί να ορισθεί ένας τρισδιάστατος χώρος, η κάθε διάσταση του οποίου αντιστοιχεί στη τιμή του κάθε στοιχείου του διανύσματος. Στην περίπτωση των ψηφιακών εικόνων μάλιστα, τα παραπάνω ορίζουν ένα πεπερασμένο θετικό γεωμετρικό σχήμα. Το είδος του σχήματος δε, εξαρτάται από το σύστημα απεικόνισης που χρησιμοποιείται. Γι αυτό υπάρχουν αναλυτικότερες πληροφορίες στις επόμενες παραγράφους.

Τα παραπάνω γίνονται κατανοητά εάν αναλογισθεί κανείς ότι στην περίπτωση των υπολογιστών η τιμή για μία μεταβλητή ξεκινάει από το 0 και καταλήγει σε μία δύναμη του δύο, ίση με τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιήθηκαν για να αποθηκεύσουν τη μεταβλητή αυτή.

Παρ' όλα αυτά, ο χώρος του Κόκκινου/Πράσινου/Μπλε δεν είναι ο μοναδικός χώρος που μπορεί να ορισθεί και να απεικονίζει το χρώμα. Αυτό προκύπτει και από το γεγονός του πεπερασμένου του κύβου που ορίζεται. Καθώς οποιεσδήποτε δύο κάθετες ακμές μπορούν να

είναι άξονες του κύβου αυτού και η περιεχόμενη ακμή μπορεί να δώσει την τρίτη διάσταση.

Παράγραφος 3.1 : Λήψη και αποθήκευση ψηφιακών εικόνων.

Όπως περιγράφεται και παραπάνω, η πληροφορία πρέπει να περιέχει την τιμή του κάθε ενός από τα τρία στοιχεία του διανύσματος του χρώματος. Η μόνη ουσιαστική διαφορά των ψηφιακών καμερών, είναι ο τρόπος που αποθηκεύουν το φως αφού αυτό έχει περάσει μέσα από όλο τον οπτικό μηχανισμό. Και αυτό διότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η πληροφορία αποθηκεύεται από ένα αισθητήρα ανά pixel.

Παρ' όλα αυτά, δεν είναι μονοσήμαντη η σχέση μεταξύ pixel και αισθητήρων. Και αυτό διότι πολλές φορές χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος ενώ διατηρείται η λειτουργικότητα.

Τέτοιες διατάξεις είναι τα φίλτρα τύπου Bayer καθώς και ειδικές διατάξεις των αισθητήρων όπως στον αισθητήρα Foveon X3. Για τη λήψη της φωτεινότητας του κάθε χρώματος ξεχωριστά δε, συνήθως χρησιμοποιούνται φίλτρα τα οποία είναι διαπερατά σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Αυτά τοποθετούνται πάνω από τον κάθε αισθητήρα και έτσι ο κάθε αισθητήρας λαμβάνει πληροφορία μόνο για τη φωτεινότητα του συγκεκριμένου χρώματος. Η ακρίβεια αυτού του τύπου των εικόνων εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο οδηγείται και φιλτράρεται το φως καθ' οδόν για τον κάθε αισθητήρα.

Παράγραφος 3.2 : Χώρος χρώματος RGB.

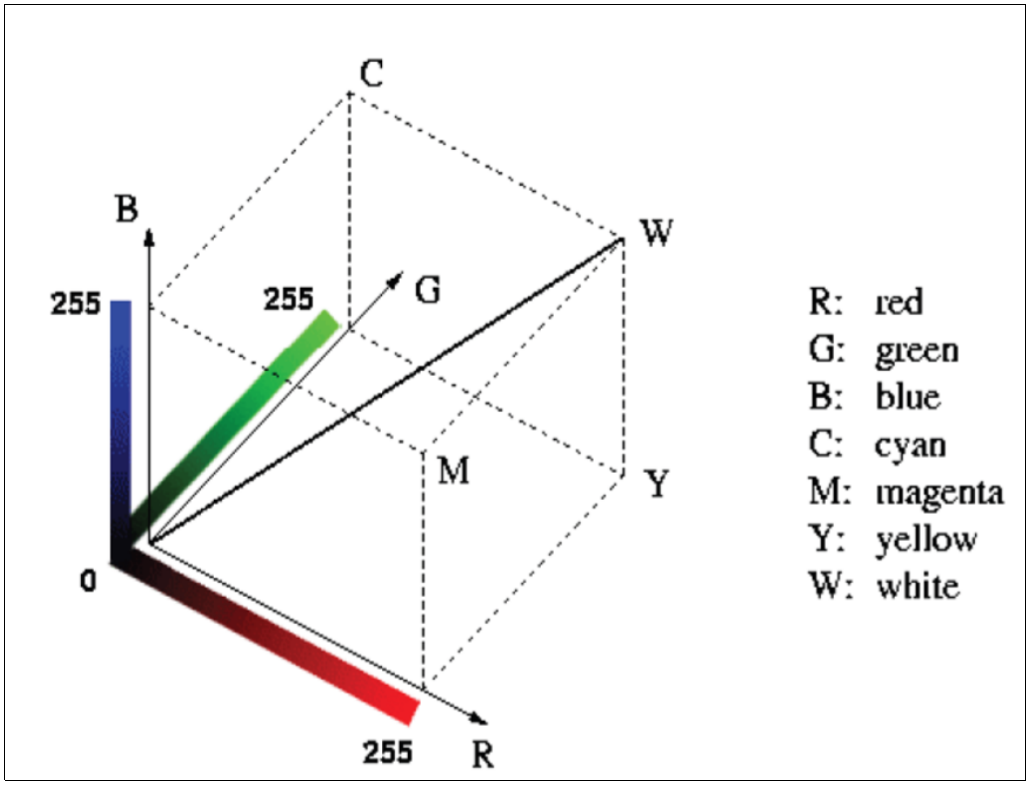
Αυτός ο χώρος απεικόνισης του χρώματος έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς είναι αυτός που χρησιμοποιείται στην προβολή εικόνων μέσα από τις οθόνες ψηφιακών συσκευών. Επιπλέον, είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης των εικόνων που λαμβάνονται από κάμερες, ακόμα και στη περίπτωση που η λήψη γίνεται με φίλτρα όπως π.χ. στη λήψη της εικόνας με χρήση φίλτρου τύπου Bayer.

Η προτίμηση στον ορισμό του χρώματος βάσει των τριών αυτών βασικών χρωμάτων οφείλεται στη ανατομία του ανθρώπινου οφθαλμού, καθώς αυτά είναι κατά βάση τα χρώματα που αντιλαμβάνονται τα φωτοευαίσθητα κύτταρα των ανθρώπων.

Κατά κύριο λόγο η προβολή γίνεται προβάλλοντας πολύ μικρές κουκκίδες από το κάθε χρώμα με την κατάλληλη φωτεινότητα. Από την απόσταση από την οποία ο άνθρωπος βλέπει την εικόνα, ο διαχωρισμός των χρωμάτων είναι αδύνατος και έτσι ο θεατής αντιλαμβάνεται το επιθυμητό χρώμα.

Στον κύβο που ορίζεται η κάθε κάθετη ακμή όμως του κύβου αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό χρώμα. Αυτό ξεκινάει από μαύρο χρώμα και καταλήγει σε ένα πολύ καθαρό και φωτεινό χρώμα. Και επάνω σε αυτή την αρχή μπορεί να γίνει και ορισμός διαφορετικών χρωματοχώρων, οι οποίοι στην ουσία απεικονίζουν το ίδιο ακριβώς χώρο μετά από κατάλληλο μετασχηματισμό του συστήματος αναφοράς.

Τα παραπάνω γίνονται εύκολα κατανοητά στην επόμενη εικόνα:



Από την παραπάνω εικόνα προκύπτει ότι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν βασικά χρώματα και αυτά που διδάσκονται στα παιδιά στο σχολείο, δηλαδή το μπλε το κόκκινο και το κίτρινο.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η τεχνική απεικόνισης χρώματος με το RGB και το RYB ανήκουν στις *Προσθετικές* τεχνικές. Δηλαδή, προσθέτοντας τα τρία χρώματα, αυξάνεται η φωτεινότητα, και προσθέτοντας και τα τρία χρώματα με τη μέγιστη φωτεινότητα το χρώμα που προκύπτει είναι το λευκό.

Ένα καλό παράδειγμα για τη σύνθεση μίας εικόνας στο σύστημα RGB είναι η παρακάτω εικόνα. Εδώ φαίνονται και οι τρεις εικόνες από τις οποίες αποτελείται η τελική εικόνα, μία για κάθε χρωματικό κανάλι.



Αυτή η φωτογραφία δεν είναι ψηφιακή. Τραβήχτηκε με φωτοχημικό φιλμ το 1911 από το Ρώσο φωτογράφο ***Sergei Mikhailovich Prokudin-Gorskii***. Εμπρός από το φακό τοποθετούνταν κάθε φορά τα κατάλληλα φίλτρα για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε και στο τέλος συντέθηκε το αποτέλεσμα των τριών φωτογραφιών. Παρ' όλο που δεν εξηγείται σε ποια από τις δεξιές φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκε ποιο φίλτρο, με βάση τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο ότι:

- Η πρώτη φωτογραφία απεικονίζει τις φωτεινότητες του μπλε χρώματος. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό συγκρίνοντας την γενική εικόνα και παρατηρώντας ότι στην περιοχή της μπλε φορεσιάς στην εικόνα απεικονίζεται ως άσπρο. Και καθώς εκεί περιμένουμε να υπάρχει αυξημένες τιμές φωτεινότητας του μπλε και χαμηλές στα άλλα δύο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυτή απεικονίζει το μπλε.
- Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στην ίδια περιοχή παρατηρείται ενδιάμεση φωτεινότητα στη δεύτερη φωτογραφία και πολύ χαμηλή στην τρίτη. Καθώς η φορεσιά είναι μεταξωτή, αντανακλά έντονα το φως και εμφανίζεται κυανή σε κάποιες περιοχές. Ανατρέχοντας στον κύβο του RGB όπως ορίστηκε παραπάνω, παρατηρούμε ότι το κυανό συντίθεται από το μπλε και το πράσινο με πάρα πολύ χαμηλές, σχεδόν μηδενικές, τιμές του κόκκινου. Με βάση και αυτό είναι προφανές ότι η δεύτερη εικόνα απεικονίζει τις φωτεινότητες του πράσινου και η τρίτη αυτές του κόκκινου.

Η παραπάνω φωτογραφία όμως είναι χρήσιμη για την επιβεβαίωση και κάποιων άλλων βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος RGB. Εν τάχει, παρατηρείται:

- Στις περιοχές του λευκού (π.χ. Τουρμπάνι) εμφανίζονται υψηλές τιμές και στα τρία χρώματα, απαραίτητο για τη σύνθεση του λευκού.
- Στις περιοχές του μαύρου (π.χ. Μπότες) εμφανίζονται χαμηλές τιμές και στα τρία χρώματα, επίσης απαραίτητο για την απεικόνιση του μαύρου.

- Στις περιοχές του γκρι, εμφανίζονται παραπλήσιες τιμές και στα τρία κανάλια. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαγώνιος που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο λευκό χρώμα απεικονίζει όλες τις διαβαθμίσεις του γκρι χρώματος.

Να σημειωθεί εδώ, ότι η τελευταία παρατήρηση είναι αυτή που συνδέει το χώρο του RGB με άλλους χώρους χρώματος, όπως αυτό του HSV. Μάλιστα, η προβαλλόμενη απόσταση πάνω σε αυτή την ευθεία δίνει απ' ευθείας μία εκ των τριών τιμών στην περίπτωση του HSV. Συγκεκριμένα αυτή της φωτεινότητας. Η παραπάνω έννοια αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Παράγραφος 3.3 : Χώρος Χρώματος HSV

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, για την απεικόνιση χρώματος σε ψηφιακά μέσα χρησιμοποιείτε κατά κύριο λόγω ο χώρος χρώματος RGB. Τα αποτελέσματα από αυτή την απεικόνιση είναι πάρα πολύ καλά και το χρώμα που αντιλαμβάνεται ο θεατής είναι πολύ κοντά στο πραγματικό. Παρ' όλα αυτά, αυτός ο τρόπος κωδικοποίησης της πληροφορίας του χρώματος δεν είναι καθόλου πρακτικός καθώς δεν υπάρχει απ' ευθείας αντιστοίχιση μεταξύ των τριών στοιχείων του διανύσματος RGB και του αντιλαμβανόμενου χρώματος.

Με την αρχή της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, ειδικά σε υπολογιστές, δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα σύστημα, στο οποίο το αντιλαμβανόμενο χρώμα να εκφράζεται με ένα μόνο από τα τρία στοιχεία του διανύσματος, για να διευκολύνεται ο χρήστης.

Ένα τέτοιο σύστημα είναι το σύστημα HSV. Το όνομα του προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων Hue, Saturation και Value. Η μεταβλητή που αναφέρεται παραπάνω είναι η Χροιά (Hue). Σε κάθε μία από τις διαθέσιμες τιμές αντιστοιχεί ένα διαφορετικό χρώμα, χωρίζοντας έτσι το ορατό φάσμα σε $X=2^{v}$ όπου ν= ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της πληροφορίας. Στην ουσία δηλαδή αυτό το σύστημα ακολουθεί μία λογική A2D (analogue to digital) μετατροπέα για την κωδικοποίηση του αντιλαμβανόμενου χρώματος μέσα στο ορατό φάσμα.

Το δεύτερο συνθετικό στοιχείο αυτό του χώρου είναι ο Κορεσμός (Saturation) του χρώματος. Αυτό εκφράζει το πόσο έντονο είναι το χρώμα. Ένα αχνό χρώμα λοιπόν θα είχε χαμηλότερη τιμή στον κορεσμό. Καλό παράδειγμα για αυτό είναι το κόκκινο και το ροζ χρώμα. Το ροζ έχει την ίδια τιμή στη χροιά αλλά χαμηλότερη τιμή ως προς τον κορεσμό του.

Το τρίτο συνθετικό αυτού του συστήματος είναι η Τιμή (Value). Στην ουσία εδώ εννοείται μία τιμή που απεικονίζει την ανακλαστικότητα του χρώματος. Το πόσο φως αντανακλά στο μήκος κύματος του συγκεκριμένου χρώματος. Να σημειωθεί επίσης ότι σε πολλά συστήματα επεξεργασίας εικόνων, αυτή η συνιστώσα ονομάζεται Φωτεινότητα (Brightness) και αντίστοιχα το σύστημα ονομάζεται HSB.

Και αυτό το σύστημα, όμως, έχει ένα μειονέκτημα ως προς τη ευκρίνεια της πληροφορίας που δίνει η τριάδα των αριθμών του στο χρήστη. Εδώ το πρόβλημα προκύπτει στην ουσία της πληροφορίας που δίνουν οι δύο τελευταίοι αριθμοί, αυτοί του κορεσμού και της τιμής. Στον μη εξοικειωμένο χρήστη αυτές οι δύο αξίες φαίνεται να αναφέρονται στο ίδιο πράγμα.

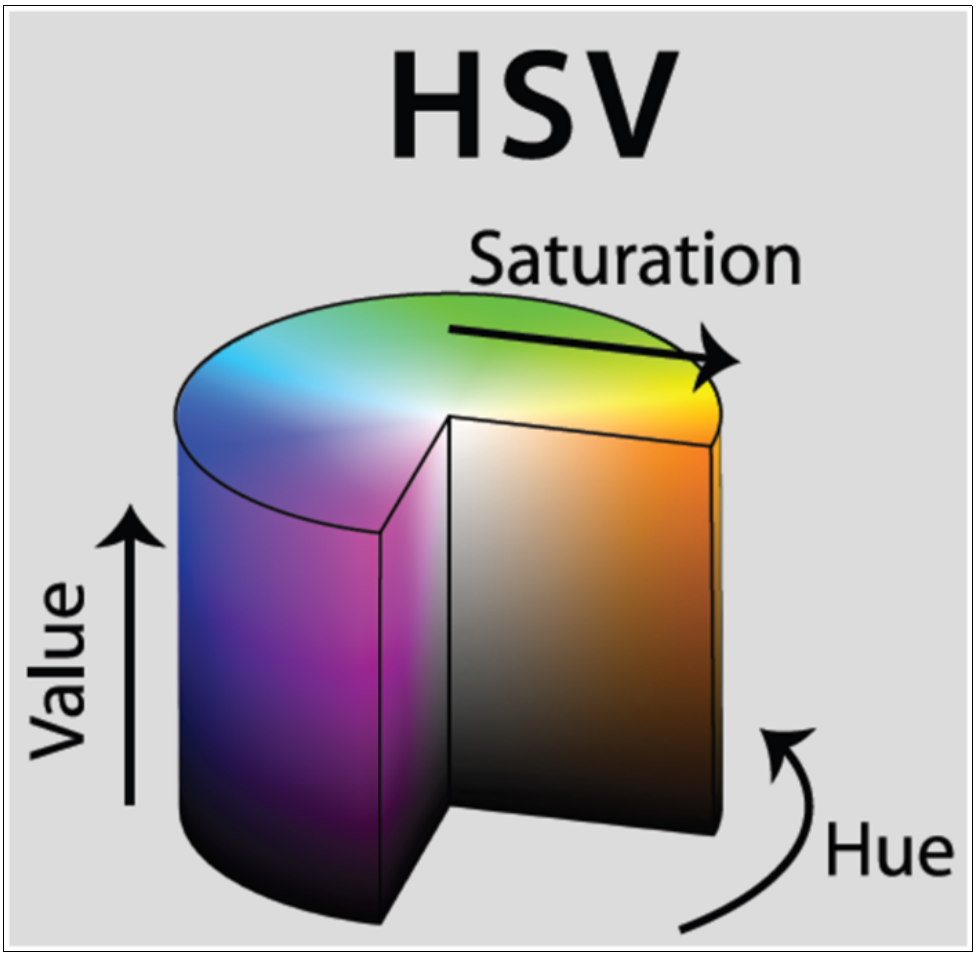
Παρ' όλα αυτά, η σημαντικότερη πληροφορία, αυτή του χρώματος, δίνεται ξεκάθαρα. Όσο για τα άλλα δύο στοιχεία, μπορεί να πει κανείς ότι ο κορεσμός αντιπροσωπεύει πόσο λευκό χρώμα έχει μέσα το χρώμα που αναλύεται, και η τιμή αντιπροσωπεύει το πόσο μακριά είναι από το μαύρο.

Επιπλέον, ο τρόπος ανάλυσης της πληροφορίας γίνεται λίγο πιο κατανοητός εάν σημειωθεί ότι το σύστημα HSV είναι μία απεικόνιση του καρτεσιανού κύβου του RGB σε συντεταγμένες

ενός κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων. Και σε αυτή την περίπτωση ο κύλινδρος έχει πεπερασμένο μέγεθος, για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω. Ο τρόπος ανάλυσης της πληροφορίας εδώ είναι ο εξής:

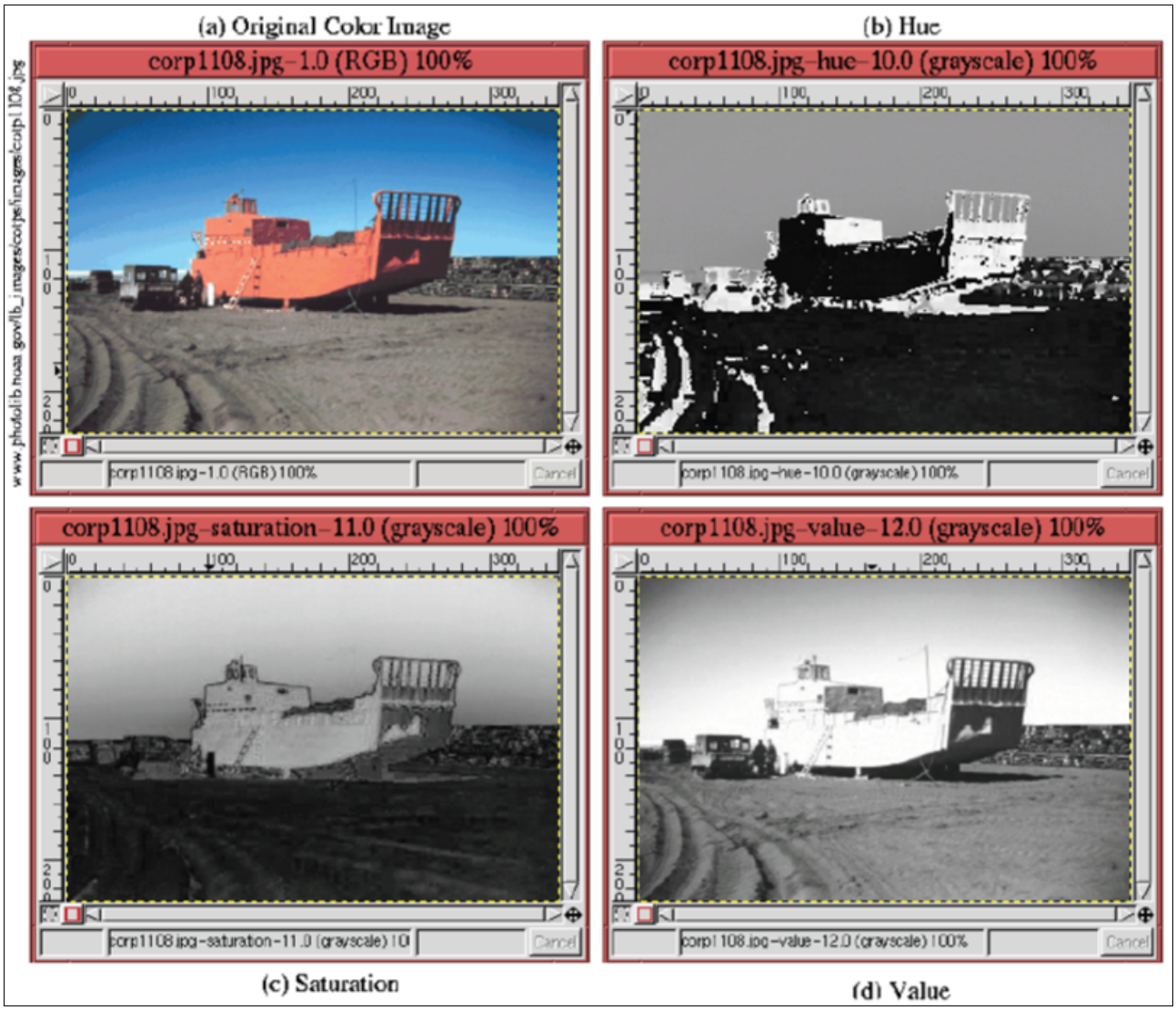
- Η Χροιά απεικονίζεται στη γωνία γύρω από τον άξονα περιστροφής.
- Ο Κορεσμός απεικονίζεται στην ακτίνα, δηλαδή την απόσταση από τον άξονα περιστροφής.
- Και η Τιμή (Φωτεινότητα) απεικονίζεται στο ύψος, την απόσταση δηλαδή από τη βάση του κυλίνδρου.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση αυτού του χώρου:



Προφανώς και εδώ οι τρεις τιμές ορίζουν ένα διάνυσμα, και τα διανύσματα των δύο χρωμάτων μπορούν να προστεθούν και να δώσουν το σωστό διάνυσμα του νέου χρώματος.

Και στην περίπτωση του συστήματος HSV μπορεί η κάθε εικόνα να αναλυθεί σε τρεις άλλες, με κάθε μία να ορίζεται ως μία εικόνα grayscale με την τιμή της φωτεινότητας να ορίζεται από την αριθμητική τιμή του κάθε στοιχείου του διανύσματος. Τα αποτελέσματα εδώ έχουν πολύ διαφορετική "ποιότητα" από την περίπτωση του RGB και έχει αξία να αναλυθούν περαιτέρω. Για το σκοπό αυτό παρακάτω δίνεται μία εικόνα σαν παράδειγμα καθώς και οι τρεις εικόνες στις οποίες αναλύεται.



Από την παραπάνω εικόνα γίνεται προφανές ότι οι επιμέρους εικόνες συμπεριφέρονται πολύ διαφορετικά απ' ότι στο RGB. Η βασικότερη ίσως διαφορά είναι ότι στο RGB διατηρούνταν η πληροφορία των ακμών της εικόνας και στις τρεις επιμέρους εικόνες. Σχολιάζοντας αυτές τις τρεις εικόνες αξίζει να σημειωθεί ότι:

Στην περίπτωση της Χροιάς η πληροφορία που αποθηκεύεται είναι πολύ λίγη. Καλό παράδειγμα γι αυτό είναι ο ουρανός σε αυτή τη φωτογραφία. Η τιμή του σχεδόν σε όλη την περιοχή του ουρανού είναι σταθερή. Αυτό ακολουθεί τον ορισμό της Χροιάς, καθώς ο ουρανός είναι κατά βάση μπλε. Οπότε και η τιμή της Χροιάς του είναι αυτή που αντιστοιχεί στο χρώμα μπλε.

Από την περιοχή του ουρανού επίσης φαίνεται πόσο σημαντική είναι η συνεισφορά των δύο άλλων τιμών στον καθορισμό του αντιλαμβανόμενου χρώματος.

Κάτι άλλο που γίνεται προφανές είναι ότι σε πολύ σκοτεινές και πολύ φωτεινές περιοχές της εικόνας είναι αρκετά δύσκολο να γίνει αντιληπτή η χροιά του χρώματος. Γενικά, το πρόβλημα προκύπτει στις περιοχές του χαμηλού κορεσμού. Εδώ επίσης είναι ποιο εύκολο να υπάρξει αλλοίωση της πληροφορίας κατά την αποθήκευση σε ψηφιακή μορφή. Ένα τέτοιο παράδειγμα στην παραπάνω εικόνα είναι το εμπρός και το κάτω μέρος του πλοίου, το οποίο ο παρατηρητής γνωρίζει ότι πρέπει να έχει χρώμα κόκκινο, όπως και το υπόλοιπο. Εδώ όμως φαίνεται ότι η τιμή που αποθηκεύεται δεν είναι ενιαία. Αυτό μπορεί να έχει προκύψει από μία

πληθώρα λόγων, ακόμα και από τον τρόπο λήψης της φωτογραφίας από τη φωτογραφική κάμερα.

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι υπάρχει αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια στην πληροφορία που δίνει η εικόνα βάσει του κορεσμού. Γενικά περιοχές που απεικονίζουν ένα συγκεκριμένο υλικό υπό ένα συγκεκριμένο φωτισμό, θα έχουν παραπλήσιες τιμές κορεσμού. Αυτό παρατηρείται και στις παραπάνω εικόνες. Ξανά, εδώ υπάρχουν διαφορές από αυτόν τον, πολύ γενικό, κανόνα οι οποίες μάλλον οφείλονται στον ίδιο λόγο που προκαλεί και τη μη αναμενόμενη συμπεριφορά των τιμών της Χροιάς.

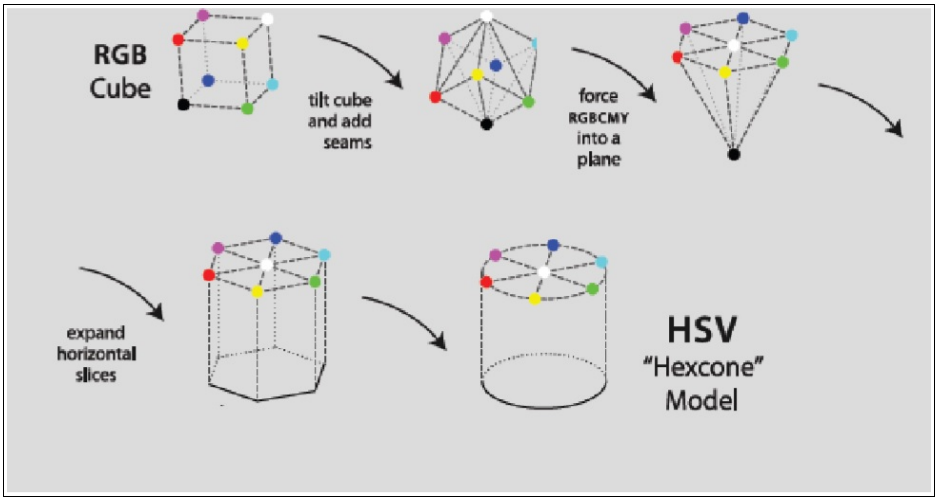
Και τέλος παρατηρείται ότι η εικόνα βάσει της Φωτεινότητας έχει εξαιρετική ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει διότι εδώ φαίνονται, στην ουσία, οι προβολές των διαφόρων σημείων του κυλινδρικού συστήματος HSV πάνω στον άξονα περιστροφής, ο οποίος όπως έχει ήδη αναφερθεί, απεικονίζει τις διαβαθμίσεις του γκρι. Η εικόνα της φωτεινότητας δηλαδή είναι η ασπρόμαυρη εκδοχή της εικόνας και εδώ διατηρείται τέλεια η πληροφορία των ακμών.

Παράγραφος 3.4 : Σχέση και αντιστοίχιση μεταξύ RGB και HSV.

Ο κυλινδρικός χώρος του HSV παρουσιάζει κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητες οι οποίες τον συνδέουν με τον κυβικό χώρο του RGB. Αυτές είναι οι εξής:

- Υπάρχει μία γραμμή, πάνω στον άξονα του κυλίνδρου, οι οποία απεικονίζει όλες τι διαβαθμίσεις του γκρι. Αντίστοιχη γραμμή υπάρχει και στο σύστημα RGB.
- Τα τρία βασικά χρώματα, Κόκκινο, Πράσινο και Μπλε είναι διατεταγμένα ανά 120° ή ανά το ένα τρίτο του διαθέσιμου εύρους τιμών.

Με βάση αυτές τις δύο ιδιότητες μπορούμε να αντιστοιχήσουμε τον κυλινδρικό χώρο του HSV στον κυβικό χώρο του RGB. Από αυτή την αντιστοίχηση δε, προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κυλινδρική επιφάνεια του σταθερού κορεσμού του HSV αντιστοιχεί σε ένα κώνο χρωμάτων στο RGB. Γενικά, κάθε μία τιμή του HSV αντιστοιχεί σε ένα γεωμετρικό τόπο στο RGB και αυτές οι σχέσεις αναλύονται παρακάτω:

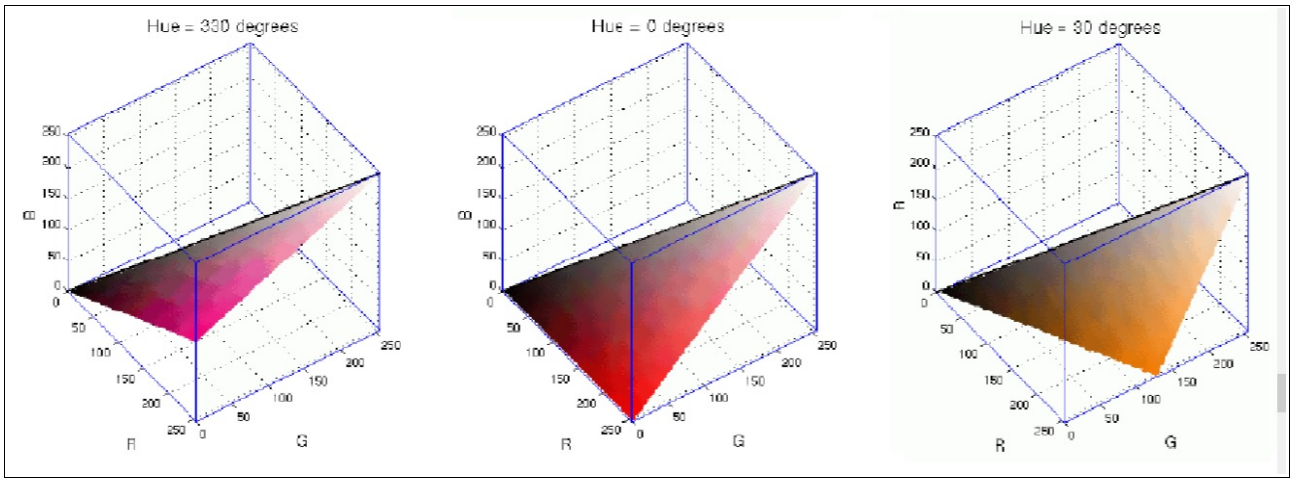


3.4.1 Αντιστοίχιση της Χροιάς (Hue).

Εάν θεωρήσουμε ένα κύλινδρο, μέσα στο κυβικό χώρο του RGB, με άξονα τη γραμμή των διαβαθμίσεων του γκρι προκύπτουν κάποιες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα, οι άξονες των βασικών χρωμάτων του RGB τέμνουν τον κύλινδρο αυτό ανά 120°, το οποίο συμφωνεί με την διάταξη των βασικών χρωμάτων στο HSV. Αυτό δεν είναι τυχαίο. Ο

κύλινδρος που ορίζεται με αυτό τον τρόπο είναι η απεικόνιση του HSV μέσα στο RGB. Μάλιστα, εάν αντιστοιχηθεί μαθηματικά κάθε σημείο του RGB στο HSV αυτό που προκύπτει είναι μία διπλή πυραμίδα κατά τη διαδρομή της γραμμής των διαβαθμίσεων του γκρι.

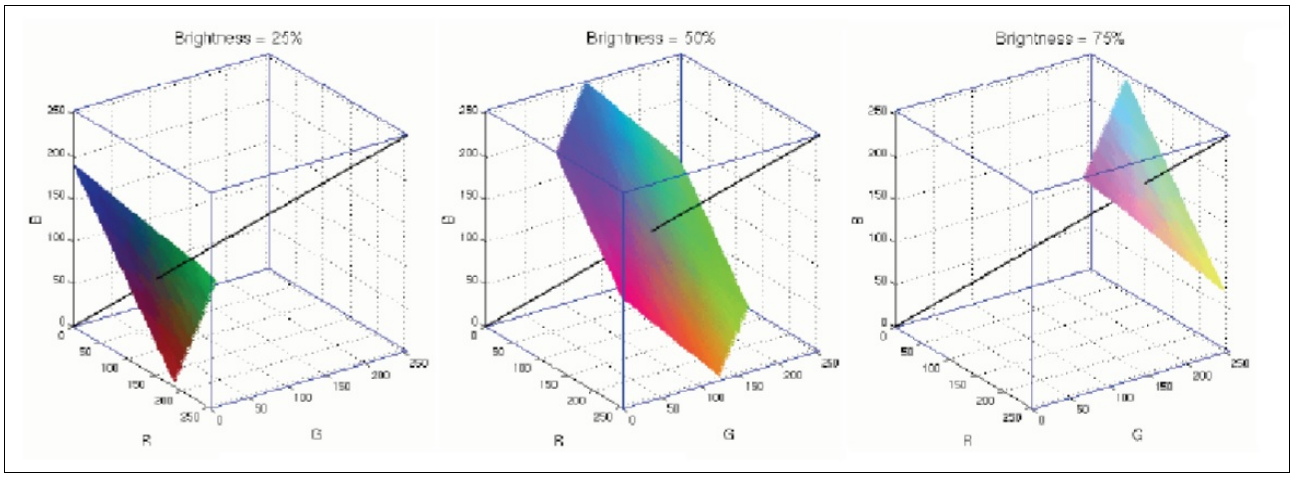
Και αφού η Χροιά είναι η γωνία στροφής γύρω από τη γραμμή των γκρι, η σταθερή Χροιά ορίζει ένα ημιεπίπεδο μέσα στο κύβο του RGB. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται μερικά παραδείγματα αυτής της απεικόνισης.



Εδώ να σημειωθεί και μία έλλειψη του HSV σε σχέση με το RGB. Βάσει του ορισμού του HSV, όλα τα σημεία επάνω στον άξονα των διαβαθμίσεων του γκρι, δηλαδή όλα όσα έχουν κορεσμό μηδέν, δεν έχουν χροιά. Πρακτικά, αυτό που συμβαίνει σε ένα υπολογιστικό σύστημα, όταν ο κορεσμός είναι 0 είναι ότι και στη χροιά δίνεται η τιμή 0, μόνο και μόνο επειδή πρέπει να υπάρχει μία τιμή στο πρώτο στοιχείο της τριάδας. Μαθηματικά όμως θα μπορούσε να υπάρχει εκεί μία οποιαδήποτε τιμή και να απεικονίζεται το ίδιο χρώμα. Άλλη ανωμαλία που παρουσιάζεται σε αυτή την περίπτωση είναι ότι ο γεωμετρικός τόπος του σταθερού κορεσμού, που μέχρι πρότινος είχε δύο διαστάσεις στο HSV, για κορεσμό μηδέν έχει μόνο μία. Να σημειωθεί επίσης ότι στο RGB δεν παρατηρείται τέτοιο πρόβλημα.

3.4.2 Αντιστοίχιση της Τιμής/Φωτεινότητας (Value/Brightness)

Η φωτεινότητα αναφέρεται στο πόσο φως αντανακλά το κάθε χρώμα. Εάν αντανακλά πολύ φως φαίνεται έντονο και καθαρό. Εάν αντανακλά λιγότερο τότε φαίνεται πιο μουντό και πιο κοντά στο μαύρο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τιμή της φωτεινότητας στο κυλινδρικό σύστημα HSV εκφράζεται από την κάθετη απόσταση του σημείου από τη βάση του κυλίνδρου. Άρα για σταθερή φωτεινότητα ορίζεται ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα των διαβαθμίσεων του γκρι. Και έτσι ακριβώς αντιστοιχείται και στο κυβικό RGB. Για σταθερή φωτεινότητα ορίζονται επίπεδα κάθετα στη γραμμή των διαβαθμίσεων του γκρι, που εδώ είναι και η διαγώνιος του κύβου. Παρακάτω δίνεται μία εικόνα στην οποία φαίνονται παραδείγματα γι αυτό.



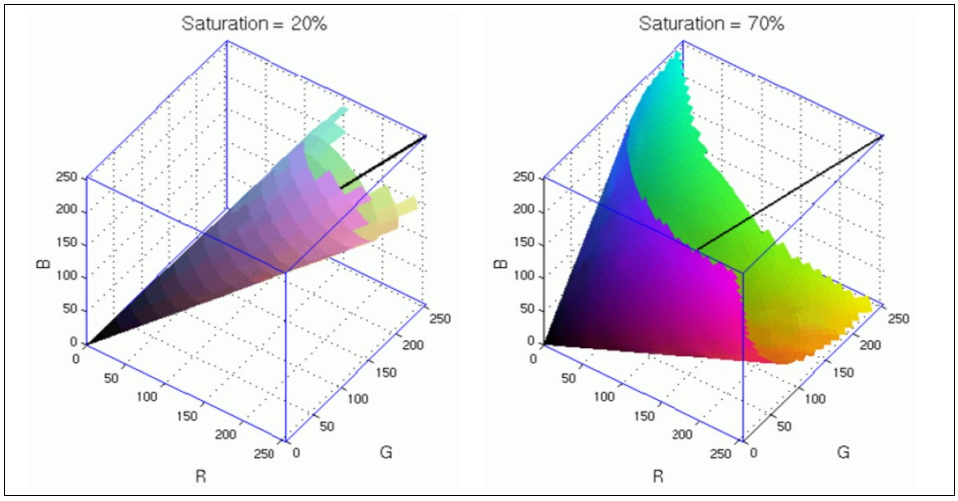
3.4.3 Αντιστοίχιση του Κορεσμού (Saturation).

Η αντιστοίχιση του κορεσμού παρουσιάζει μία αρκετά ενδιαφέρουσα ιδιαιτερότητα όταν αντιστοιχηθεί στο χώρο του RGB. Εδώ συμβαίνει αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω. Η κυλινδρική επιφάνεια που αντιπροσωπεύει μια σταθερή τιμή του κορεσμού, αντιστοιχείται σε ένα κώνο. Αυτή είναι ίσως και η δυσκολότερη περίπτωση να εξηγηθεί καθώς επηρεάζεται και από την τιμή της φωτεινότητας. Ίσως η καλύτερη περιγραφή είναι ότι:

- *Ο κορεσμός απεικονίζει την καθαρότητα του χρώματος για μία συγκεκριμένη φωτεινότητα.*

Έχει αναφερθεί ότι ο κορεσμός είναι η απόσταση του σημείου από τη γραμμή των διαβαθμίσεων του γκρι. Όταν όμως αντιστοιχηθεί το κυλινδρικό HSV στο κυβικό RGB η μέγιστη τιμή αυτής της απόστασης δεν είναι σταθερή. Και μάλιστα αλλάζει όσο αλλάζει και η φωτεινότητα. Αυτό έχει προκληθεί από την παραμόρφωση του σχήματος του χώρου του HSV και την αντίστοιχη παραμόρφωση του γεωμετρικού τόπου του σταθερού κορεσμού.

Από αυτό προκύπτει και ο ορισμός που αναφέρεται παραπάνω καθώς ισχύει ο ορισμός του κορεσμού ως ***ποσοστό της μέγιστης απόστασης από την γραμμή των διαβαθμίσεων του γκρι***. Και με βάση αυτό μπορεί να γίνει και πιο εύκολα αντιληπτό το πως προκύπτει το σχήμα του κώνου και πως αυτό αλλάζει καθώς μεταβάλλεται η τιμή του κορεσμού. Παρακάτω δίνεται μια εικόνα με απεικονίσεις σταθερών τιμών του κορεσμού ως παράδειγμα:

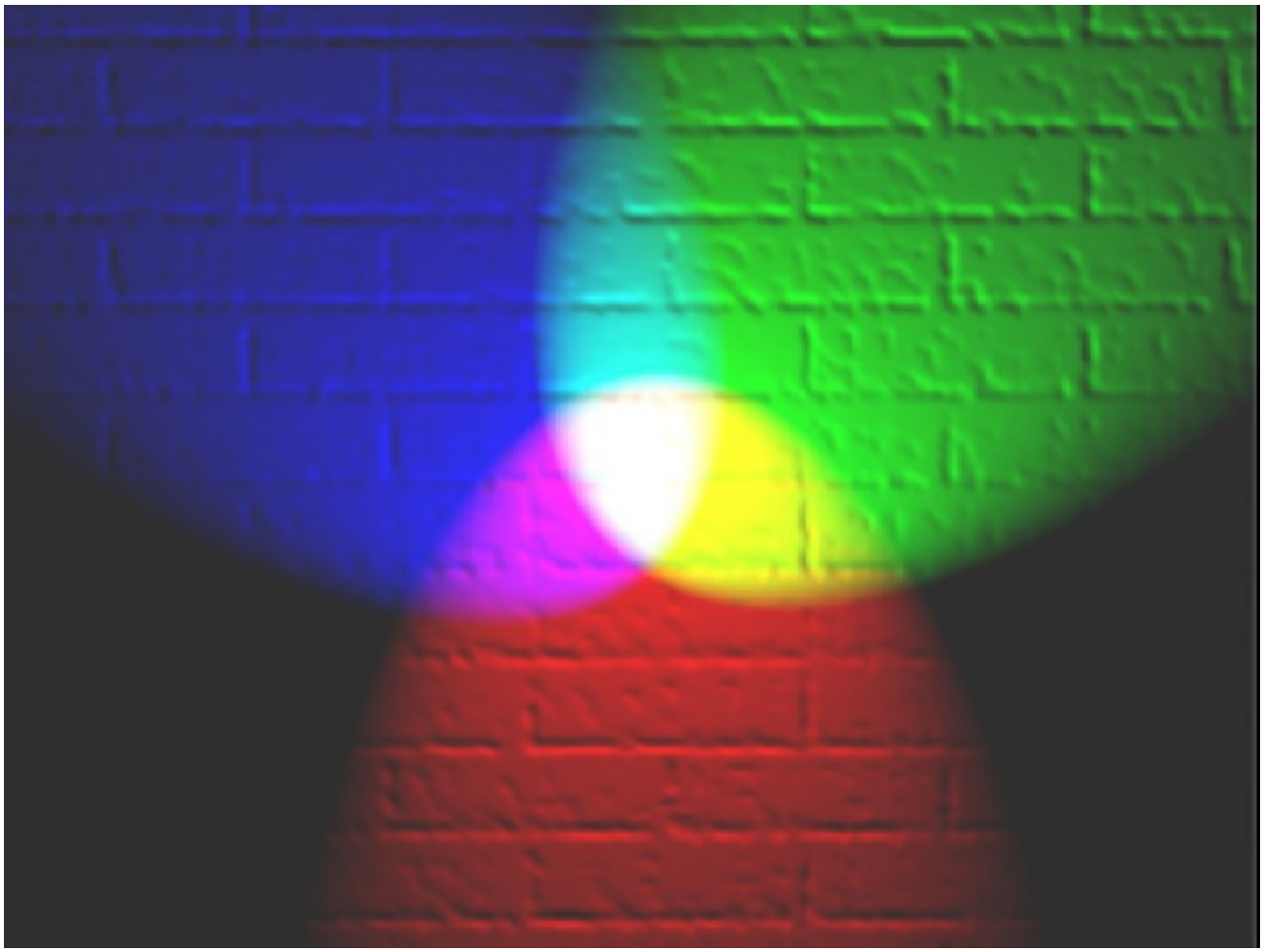


3.4.4 Παραδοχές που προκύπτουν.

Μια πρώτη ενδιαφέρουσα παραδοχή που προκύπτει είναι ότι από τα έξι σημεία του κύβου του RGB, το κυανό, το μωβ και το κίτρινο αντιπροσωπεύουν πιο φωτεινά χρώματα από το κόκκινο το πράσινο και το μπλε. Και αυτό διότι, από τα παραπάνω έχουμε ότι όσο αυξάνεται η φωτεινότητα μιλάμε για χρώματα που ανήκουν σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα των διαβαθμίσεων του γκρι σε σημείο μακρύτερα από την αρχή των αξόνων. Τα επίπεδα λοιπόν που βρίσκονται το κυανό, το μωβ και το κίτρινο είναι μακρύτερα από την αρχή των αξόνων από το επίπεδο που προβάλλονται τα κόκκινο, πράσινο και μπλε.

Επιπλέον φαίνεται ότι εάν προστεθούν δύο χρώματα των οποίων τα διανύσματα είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα των διαβαθμίσεων του γκρι, τότε το χρώμα που θα προκύψει είναι μία διαβάθμιση του γκρι φωτεινότερη και από τα δύο χρώματα. Παράδειγμα για το τελευταίο είναι ότι η πρόσθεση του κυανού και του κόκκινου δίνει το λευκό. Λογικό, καθώς το κυανό προκύπτει από την πρόσθεση του μπλε και του πράσινου. Άρα:

$$\textit{Κυανό} + \textit{Κόκκινο} = (\textit{Μπλε} + \textit{Πράσινο}) + \textit{Κόκκινο} = \textit{Λευκό}$$



Κεφάλαιο 4: Προοπτική

Στην περίπτωση των εικόνων, προοπτική ονομάζεται η απεικόνιση του βάθους ως σύγκλιση των διαφόρων μορφών σε ένα σημείο του ορίζοντα. Η χρήση της προοπτικής ξεκίνησε ήδη από την Αναγέννηση. Ήταν αποτέλεσμα των πειραματισμών Ιταλών καλλιτεχνών και αρχιτεκτόνων της εποχής.

Η απεικόνιση του βάθους ορίζει ότι τα αντικείμενα σε μία εικόνα τείνουν να συγκλίνουν σε ένα σημείο στον ορίζοντα. Μάλιστα οι γραμμές που είναι παράλληλες στον οριζόντιο άξονα της εικόνας φαίνεται να παραμένουν ανέπαφες, ενώ όσο πιο κάθετη είναι μία ακμή, και όσο πιο μακριά από αυτό το σημείο, τόσο περισσότερο φαίνεται να επηρεάζεται.

Παράγραφος 4.1 : Οφθαλμαπάτες λόγω προοπτικής.

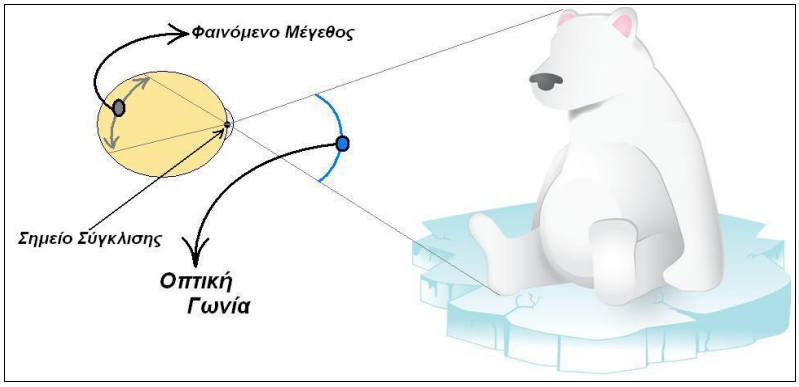
Ένα άλλο χαρακτηριστικό της προοπτικής είναι ότι όσο μακρύτερα είναι ένα αντικείμενο τόσο μικρότερο φαίνεται. Με αυτές τις δύο βασικές αρχές μπορεί να δημιουργηθεί η προοπτική σε μία οποιαδήποτε εικόνα. Αυτές οι παραπάνω ιδιότητες προκαλούν ιδιαίτερες οφθαλμαπάτες όταν συντελούν ορισμένοι παράγοντες. Μερικές τέτοιες εικόνες δίδονται παρακάτω, ώστε να γίνουν πλήρως κατανοητά όσα αναφέρονται παραπάνω.





Παράγραφος 4.2 : Φαινόμενο Μέγεθος, Οπτική γωνία και Σημείο Σύγκλισης.

Οι ακριβείς κανόνες της προοπτικής δεν απασχολούν αυτήν την εργασίας και για αυτό δεν θα εξεταστούν σε βάθος. Παρ' όλα αυτά η αλλαγή του μεγέθους βάση της απόστασης είναι πολύ σημαντική καθώς σε αυτή βασίζεται ο υπολογισμός της απόστασης από την κάμερα, και για την ακρίβεια, η απόσταση από το εστιακό σημείο της.



Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος ελέγχου της απόστασης είναι διότι το μέγεθος που φαίνεται να έχει ένα αντικείμενο είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης και η σχέση αυτή μπορεί να ορισθεί και να αποδειχθεί μαθηματικά.

Από την εικόνα γίνεται προφανές ότι το φαινόμενο μέγεθος εξαρτάται κυρίως από την οπτική γωνία, η οποία ορίζεται ως:

- *Η γωνία που σχηματίζουν οι διαδρομές του φωτός από τις δύο ακραίες γωνίες του αντικειμένου που παρατηρείται όταν τέμνονται στο σημείο σύγκλισης.*

Παράγραφος 4.3 : Μαθηματική σχέση Φαινόμενου Μεγέθους προς Απόστασης

Εάν ονομάσουμε:

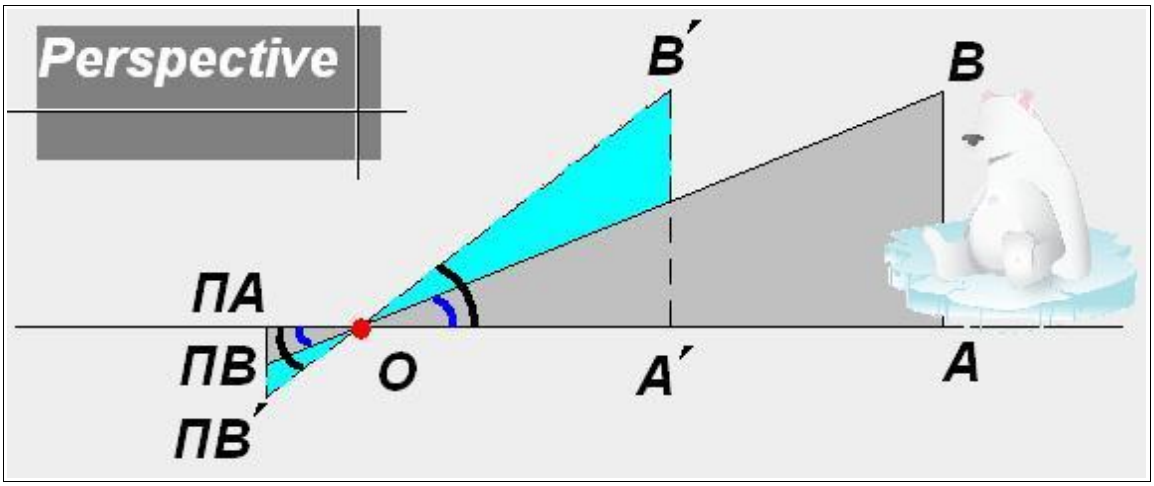
- ***h***: το Φαινόμενο Ύψος
- ***r***: το πραγματικό μέγεθος
- ***D***: η απόσταση από το σημείο σύγκλισης έως το αντικείμενο.
- ***ConvD***: η απόσταση από το σημείο σύγκλισης μέχρι το επίπεδο προβολής.

Τότε το η σχέση που δίνει το φαινόμενο ύψος είναι:

$$h = \frac{r}{D} \cdot ConvD \quad [1]$$

Για την απόδειξη του παραπάνω ας θεωρήσουμε το σχήμα:

1 [1] Perspective https://en.wikipedia.org/wiki/Perspective_(visual)



Στο παραπάνω σχήμα:

- ***ΒΑ***: Είναι το πραγματικό ύψος του αντικειμένου.
- ***ΟΑ***: Είναι η απόσταση από το σημείο σύγκλισης.
- ***ΟΠΑ***: Είναι η απόσταση του επιπέδου προβολής από το σημείο σύγκλισης.
- ***ΠΑΠΒ***: Φαινόμενο Ύψος.

Τα τονισμένα σημεία είναι αυτά που προκύπτουν μετά τη μετακίνηση του αντικειμένου στο δεύτερο σημείο. Να σημειωθεί ότι το επίπεδο προβολής παραμένει το ίδιο. Τότε ισχύει ότι:

$\frac{OA}{OA'}=\lambda$ (Σχέση 1) και

$AB=A'B'$ (Σχέση 2).

Φαίνεται επίσης ότι:

$A\hat{O}B$ *όμοιο με* $\Pi A\hat{O}\Pi B$

Η ομοιότητα ισχύει καθώς είναι ορθογώνια τρίγωνα με μία οξεία γωνία ίση όπως σημειώνεται στο σχήμα. Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και η ομοιότητα στα τρίγωνα που προκύπτουν μετά τη μετακίνηση του αντικειμένου. Άρα:

$\frac{BA}{\Pi B\Pi A}=\frac{OA}{O\Pi A}$ (Σχέση 3)

Για την περίπτωση που το αντικείμενο έχει μετακινηθεί ισχύει η ομοιότητα των τριγώνων με τα τονισμένα σημεία: $A'\hat{O}B'$ *όμοιο με* $\Pi A\hat{O}\Pi B'$. Άρα ισχύει ότι:

$\frac{B'A'}{\Pi B'\Pi A}=\frac{OA'}{O\Pi A}$ Αντικαθιστώντας από τη σχέση 1 προκύπτει ότι:

$\frac{B'A'}{\Pi B'\Pi A}=\frac{OA}{\lambda\cdot O\Pi A}$ (Σχέση 4) Λύνοντας τις σχέσεις 3 και 4 ως προς το φαινόμενο ύψος και διαιρώντας κατά μέλη προκύπτουν τα παρακάτω:

$\frac{\Pi B'\Pi A}{\Pi B\Pi A}=\frac{B'A'\frac{\lambda\cdot O\Pi A}{OA}}{BA\frac{O\Pi A}{OA}}$ Αντικαθιστώντας από τη σχέση 2 και απλοποιώντας προκύπτει ότι:

$$\boxed{\frac{ΠB'\,ΠA}{ΠBΠA}=\lambda}$$ (Σχέση Α)

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η αύξηση του φαινόμενου μεγέθους είναι ανάλογη με το λόγο της μείωσης της απόστασης από το σημείο σύγκλισης. Με απλά λόγια, όταν μειωθεί η απόσταση στο μισό, το φαινόμενο μέγεθος διπλασιάζεται κ.ο.κ.

Στη συνέχεια, λύνοντας τη σχέση 4 ως προς *ΠΒ'ΠΑ* και αντικαθιστώντας το λ από τη σχέση 1 έχουμε ότι:

$$ΠB'\,ΠA=BA\cdot\frac{OΠA}{OA}\cdot\frac{OA}{OA'} \quad => \quad \boxed{ΠB'\,ΠA=\frac{BA}{OA'}\cdot OΠA\,,\; OΠA=\sigma\tau\alpha\theta.}$$

Αυτή η σχέση, με την ονοματολογία που αναφέρεται στη αρχή γίνεται πράγματι:

$$\boxed{h=\frac{r}{D}\cdot ConvD}$$ (Σχέση Β)

Κεφάλαιο 5: Αναγνώριση και μέτρηση του αντικειμένου.

Από την πληθώρα των διαθέσιμων μεθόδων να αναγνωρισθεί ένα αντικείμενο πρέπει να επιλεγεί μία η οποία να ταιριάζει, όσο το δυνατό περισσότερο, στα παρακάτω:

- Στις συνθήκες των πειραμάτων.
- Στις δυνατότητες των υπολογιστών που θα χρησιμοποιηθούν.
- Να είναι ο κώδικας εύκολα προσαρμόσιμος αλλά και ανθεκτικός στις αλλαγές του περιβάλλοντος χώρου.

Να σημειωθεί εδώ ότι το αντικείμενο που πραγματεύεται αυτή η εργασία είναι ο υπολογισμός της απόσταση μέσω αλγορίθμων μηχανικής όρασης με μία μόνο κάμερα.

Αυτός είναι και ο λόγος που ο τρόπος που επιλέχθηκε για την αναγνώριση του αντικειμένου, είναι σχετικά απλός και εστιασμένος στα δεδομένα των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Με τις ίδιες αρχές έγινε και η επιλογή του σχήματος του αντικειμένου που θα αναγνωρισθεί. Τα παραπάνω εξηγούνται πιο αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Παράγραφος 5.1 : Επιλογή μεθόδου αναγνώρισης του αντικειμένου.

Από την αρχή, είχε αποφασισθεί ότι θα χρησιμοποιηθεί το πακέτο λογισμικού Matlab για τη συγγραφή του κώδικα και την εκτέλεση των υπολογισμών. Ο λόγος είναι οι πολύ μεγάλες δυνατότητες του συγκεκριμένου πακέτου στον τομέα της μηχανικής όρασης. Επιπλέον, παρέχει μεγάλη ευελιξία στην διεξαγωγή υπολογισμών σε πολλά διαφορετικά επιστημονικά πεδία μέσα στον ίδιο κώδικα με πολλή μεγαλύτερη ευκολία από άλλες γλώσσες προγραμματισμού.

Όσον αφορά τον ίδιο τον αλγόριθμο, έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα για την λήψη και επεξεργασία ενός μεγάλου πλήθους φωτογραφιών, για να υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα για την εκτέλεση των προβλέψεων που απαιτούνται. Άρα, ένας αλγόριθμος μεγάλης αξιοπιστίας και ακρίβειας, παρ' όλο που θα παρήγαγε δεδομένα με λιγότερο θόρυβο, θα χρειαζόταν περισσότερο χρόνο επεξεργασίας ανά εικόνα (frame) για να παράγει αυτά τα αποτελέσματα.

Σε αυτή την περίπτωση, θα απαιτούνταν και υψηλότερου επιπέδου εξοπλισμός. Δηλαδή θα απαιτούνταν υψηλών προδιαγραφών υπολογιστής για έχει τη δυνατότητα να εκτελεί τους υπολογισμούς στον απαιτούμενο χρόνο.

Όμως το βασικότερο πλεονέκτημα της χρήσης μίας μόνο κάμερας είναι το μικρότερο κόστος. Επιπλέον, υπάρχουν πάρα πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, που σήμερα εκτελούνται

μόνο με μία κάμερα, που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τις επιπλέον δυνατότητες του υπολογισμού του βάθους πέρα από την αναγνώριση ενός σχήματος.

Άρα έχει νόημα να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Το μειονέκτημα ενός τέτοιου αλγόριθμου είναι η σχετικά μεγαλύτερη ύπαρξη θορύβου αλλά αυτό αντισταθμίζεται από το σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων που λαμβάνονται και επεξεργάζονται κατά τη διάρκεια του χρόνου πτήσης.

Επιπλέον, μειώνεται και ο αρχικός χρόνος επεξεργασίας μέχρι το πρώτο αποτέλεσμα. Άρα μπορούν να δοθούν οι πρώτες εντολές στο βραχίονα πιο σύντομα, το οποίο είναι επίσης σημαντικό καθώς αυξάνει τις δυνατότητες αντίδρασης του βραχίονα ακόμα και με χαμηλότερων προδιαγραφών κινητήρες.

Οι μέθοδοι που μπορούσαν να εφαρμοστούν με τον εξοπλισμό που υπήρχε ήταν:

- Αναγνώριση σχήματος και κλίμακας με αλγόριθμο τύπου SIFT.
- Αναγνώριση χρώματος και εξαγωγή δυαδικής εικόνας (binary image).

Τα βασικά κριτήρια επιλογής ήταν η ακρίβεια της πληροφορίας και ο λόγος των δειγμάτων/sec.

5.1.1 Μέθοδος αναγνώρισης σχήματος

Στα αρχικά στάδια της εργασίας ελέγχθηκε ο πρώτος τρόπος. Και μάλιστα μία υποπερίπτωση αυτού, όπου ο αλγόριθμος έψαχνε απλώς για κύκλους. Δηλαδή έψαχνε μέσα στην εικόνα να αναγνωρίσει ένα σφαιρικό αντικείμενο, το οποίο στις δύο διαστάσεις, απεικονίζεται ως ένας κύκλος.

Τα παραπάνω γινόταν με τη χρήση της προϋπάρχουσας συνάρτησης *imfindcircle* του πακέτου Matlab. Αυτή η συνάρτηση απαιτεί ως είσοδο την εικόνα που θα αναλυθεί και το εύρος της ακτίνας των κύκλων που θα βρεθούν. Μία ελάχιστη και μέγιστη τιμή δηλαδή για την ακτίνα, και όσοι κύκλοι αναγνωρίζονταν με ακτίνα εκτός αυτού του εύρους δεν θα λαμβάνονταν υπ' όψιν στα αποτελέσματα της συνάρτησης.

Η παραπάνω μέθοδος απέδιδε αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια, αλλά είχε δύο πολύ σημαντικά μειονεκτήματα:

- Απαιτούσε μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της επεξεργασίας της κάθε εικόνας.
- Με το να μπορεί να αναγνωρίσει κύκλους συγκεκριμένων ακτίνων, μπορούσε κατ' επέκταση να αναγνωρίσει το αντικείμενο μέσα σε συγκεκριμένο εύρος αποστάσεων από το φακό της κάμερας.

Το δεύτερο γίνεται εύκολα αντιληπτό αν αναλογισθεί κανείς ότι για μεγάλες αποστάσεις το αντικείμενο είχε φαινόμενο μέγεθος στην εικόνα μερικά pixel ενώ κοντά στην κάμερα μπορούσε να καταλαμβάνει σχεδόν όλη την εικόνα.

Άρα επιλέγοντας ένα οποιοδήποτε πεπερασμένο εύρος γινόταν αδύνατη η αναγνώριση του αντικειμένου σε αντίστοιχες αποστάσεις οι οποίες μπορούσαν να υπολογιστούν με βάση τις σχέσεις που αποδείχθηκαν παραπάνω.

Υπήρχε η δυνατότητα ορισμού του εύρους από 0 έως Inf, στην ουσία δηλαδή αφαίρεσης του περιορισμού. Τότε όμως ο αλγόριθμος αργούσε ακόμα περισσότερο, δίνοντας μάλιστα τα ίδια αποτελέσματα με πριν. Άρα η αφαίρεση του περιορισμού δεν προκαλούσε αυξημένο θόρυβο στα αποτελέσματα αλλά προκαλούσε αύξηση του συνολικού χρόνου επεξεργασίας.

Ένας πιθανός λόγος γι αυτό είναι ότι η συνάρτηση *imfindcircle* βασίζεται στο μετασχηματισμό Hough. Άρα, μπορεί το τελικό αποτέλεσμα να ήταν το ίδιο, αλλά στην πορεία

να υπήρχαν περισσότερες λύσεις οι οποίες να διεκδικούσαν την "ψήφο" του αλγόριθμου και εκεί να οφειλόταν τελικά η μεγαλύτερη καθυστέρηση.

Για τους παραπάνω λόγους απορρίφθηκε αυτή η μέθοδος εύρεσης και μέτρησης του αντικειμένου στην εικόνα.

5.1.2 Μέθοδος αναγνώρισης χρώματος.

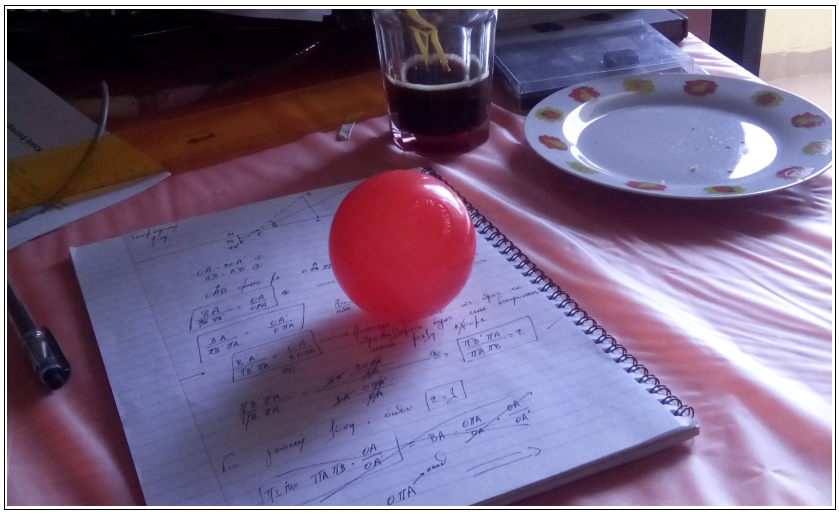
Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή της αναγνώρισης του χρώματος του αντικειμένου μέσα στην εικόνα. Για να λειτουργήσει αυτή η μέθοδος θα έπρεπε να το χρώμα να είναι αρκετά κορεσμένο, ώστε να ξεχωρίζει από το περιβάλλον. Επιπλέον θα έπρεπε να είναι ένα χρώμα που να μην υπάρχει στο χώρο των πειραμάτων και να μην υπάρχει και πιθανότητα να τοποθετηθεί κάτι μόνιμα σε αυτό το χώρο που να έχει το ίδιο χρώμα.

Να σημειωθεί εδώ ότι η εικόνα λαμβάνεται ως ένας τρισδιάστατος πίνακας του οποίου οι διαστάσεις είναι **Πλάτος Εικόνας x Ύψος Εικόνας x 3**. Οι δύο πρώτες τιμές αναφέρονται στον αριθμό pixel της κάθε διάστασης της εικόνας. Η τρίτη τιμή είναι πάντα 3. Υπάρχουν δηλαδή τρεις δισδιάστατοι πίνακες, ο καθένας εκ των οποίων περιέχει την πληροφορία για ένα εκ των τριών χρωματικών καναλιών που συνθέτουν την έγχρωμη εικόνα. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται παρακάτω, αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο τρόπος ανάλυσης της εικόνας εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις δυνατότητες της Matlab. Και αυτό διότι, αντίθετα με άλλες γλώσσες προγραμματισμού, στη Matlab γίνονται πολύ γρηγορότερα οι πράξεις πινάκων και καθυστερούν ιδιαίτερα όλοι οι βρόγχοι. Με αυτό τον τρόπο μπορούσε να γίνει ο διαχωρισμός του χρώματος πολύ γρηγορότερα αφού αφορούσε λογικές πράξεις πινάκων.

Τελικά επιλέχθηκε μία πλαστική κόκκινη μπάλα. Στις προσομοιώσεις πριν τα πραγματικά πειράματα, είχε σχεδιαστεί μία κόκκινη μπάλα, με χρώμα πλήρως κορεσμένο (255^R 0^G 0^B) , διαμέτρου 10cm.

5.1.3 Επιλογή σχήματος.

Να σημειωθεί εδώ ότι και το σφαιρικό σχήμα δεν επιλέχθηκε τυχαία. Και αυτό διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις δύο διαστάσεις η σφαίρα απεικονίζεται ως κύκλος. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο υπολογισμός της απόστασης γίνεται βάσει του φαινόμενου μεγέθους. Σε αυτό τον υπολογισμό ο κύκλος έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι το μέγεθος του μπορεί να περιγραφεί από μία μόνο διάσταση, αυτή της διαμέτρου.



Ο υπολογισμός μόνο της διαμέτρου, πέρα από το πλεονέκτημα της απλότητας και του μικρότερου χρόνου, έχει και ένα δεύτερο λιγότερο προφανές πλεονέκτημα. Αυτό προκύπτει

από το γεγονός ότι, όταν ένα αντικείμενο πετιέται και ακολουθεί μία τροχιά, είναι πρακτικά αδύνατο να μην περιστρέφεται κατά τη διάρκεια αυτής της πτήσης. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, ας θεωρήσουμε ένα σχήμα που δεν είναι σφαίρα. Έτσι, εάν θεωρήσουμε μία όψη του αντικειμένου ως την εμπρόσθια όψη και ανά 90^{o} ορίσουμε τις άλλες 5 που προκύπτουν, τότε θα υπήρχε τουλάχιστον μία όψη στην οποία θα υπήρχε ένας σχηματισμός ο οποίος θα απαιτούσε περισσότερες από μία διαστάσεις για να περιγραφεί πλήρως.

Από το παραπάνω προκύπτει ότι, πριν γίνει δυνατή η εκτίμηση των απαιτούμενων διαστάσεων θα πρέπει να υπολογισθεί η στάση του αντικειμένου στο χώρο. Είναι απαραίτητο, δηλαδή, να υπολογιστούν οι τρεις γωνίες περιστροφής γύρω από τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος που έχει ορισθεί.

Για την αποφυγή αυτής της πολυπλοκότητας στους υπολογισμούς επιλέχθηκε το σφαιρικό σχήμα, καθώς η σφαίρα απεικονίζεται στις δύο διαστάσεις ως ο ίδιος κύκλος, άσχετα από τη στάση της στο χώρο. Παρ' όλα αυτά, γίνεται παρακάτω αναφορά, επιγραμματικά, στην παραπάνω περίπτωση ως αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του σχήματος αυτού είναι ότι απλοποιεί πάρα πολύ και τους υπολογισμούς για την εύρεση της θέσης του αντικειμένου στην εικόνα. Προφανώς, ως θέση του αντικειμένου στην εικόνα επιλέγεται η θέση ενός χαρακτηριστικού σημείου του αντικειμένου έτσι ώστε να υπάρχει συνέχεια και συνοχή ανάμεσα στα δεδομένα από τις διάφορες εικόνες. Όπως και στην περίπτωση του μεγέθους, για την εύρεση της θέσης αυτού του σημείου θα έπρεπε πρώτα να υπολογιστεί η στάση του αντικειμένου. Στην περίπτωση του κύκλου όμως μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί η θέση του κέντρου του ως η τομή δύο οποιονδήποτε διαμέτρων. Μάλιστα με τον παραπάνω υπολογισμό, λαμβάνεται τελικά το κέντρο της σφαίρας αφού αυτό που απεικονίζεται στις δύο διαστάσεις είναι η τομή της σφαίρας με ένα επίπεδο το οποίο:

- Είναι κάθετο στην ευθεία από το σημείο σύγκλισης της κάμερας μέχρι τη σφαίρα.
- Πάνω του υπάρχει η μεγαλύτερη περίμετρος της σφαίρας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε αυτό το επίπεδο ανήκει και το κέντρο της σφαίρας. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό στις δυαδικές εικόνες όπου απεικονίζεται μόνο η σφαίρα.

Παράγραφος 5.2 : <u>Εύρεση του κόκκινου χρώματος στην εικόνα.</u>

Εφόσον επιλέχθηκε το κόκκινο χρώμα, και μάλιστα αρκετά κορεσμένο, αρκεί στην εικόνα να βρεθεί ένα κόκκινο με αντίστοιχο κορεσμό και φωτεινότητα. Για την ακρίβεια μάλιστα, αυτό που επιλέχθηκε να γίνει είναι να απορριφθούν από την εικόνα όλα τα pixel τα οποία δεν αφορούν ένα τέτοιο χρώμα. Επιπλέον, δεν διατηρήθηκε η πληροφορία του χρώματος, αλλά μόνο το εάν το κάθε pixel πληρεί τις προδιαγραφές ή όχι. Έτσι η εικόνα που προέκυψε ήταν δυαδικού τύπου ή όπως αναφέρεται στη Matlab λογικού τύπου.

5.2.1 Αρχική Προσπάθεια.

Στην αρχή των πειραματισμών με αυτή τη μέθοδο, μετατρεπόταν η εικόνα από το χώρο του RGB, στον οποίο είχε ληφθεί, σε εκείνο του HSV. Αυτό γινόταν με την προϋπάρχουσα συνάρτηση της Matlab *rgb2hsv*. Στη συνέχεια, λαμβανόταν μόνο ο πρώτος πίνακας που απεικόνιζε τη Χροιά. Στις τιμές αυτού του πίνακα γινόταν ένας λογικό έλεγχος για να απορριφθούν όλες οι τιμές χροιάς που δεν αφορούσαν το κόκκινο χρώμα. Σε περίπτωση που υπήρχαν και άλλα αντικείμενα κόκκινου χρώματος στην εικόνα, θα μπορούσε να γίνει έλεγχος και στο κανάλι του κορεσμού για να επιλεγεί το συγκεκριμένο χρώμα που αφορούσε το αντικείμενο.

Στη θεωρία, αυτός ο τρόπος θα έδινε εξαιρετικά αποτελέσματα αφού θα μπορούσε να γίνει επιλογή του αντικειμένου με μεγάλη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα που έδινε αυτή η μέθοδος ήταν ικανοποιητικά. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτούνταν ήταν μικρότερος από τη χρήση της συνάρτησης *imfindcircle*. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος που απαιτούνταν για την επεξεργασία του κάθε frame έφτανε σχεδόν τα 0.2sec, το οποίο άφηνε ένα περιθώριο για την ανάλυση το πολύ 5 frame/sec. Μάλιστα, δεδομένου ότι θα έπρεπε να γίνουν και επιπλέον υπολογισμοί βάσει της προοπτικής εξίσωσης καθώς και οι μετασχηματισμοί συστημάτων συντεταγμένων που αναφέρονται παρακάτω, καθίσταται σαφές ότι, ρεαλιστικά, δεν θα υπήρχε η δυνατότητα για επεξεργασία περισσοτέρων των 4 frame/sec.

Μετά από έρευνα στο forum της Mathworks, πλούσια πηγή πληροφοριών για τη λειτουργία της Matlab, φάνηκε ότι το καταλληλότερο σημείο βελτιστοποίησης ήταν η συνάρτηση *rgb2hsv.* Επιπλέον, έγινε έλεγχος με τη χρήση των *tic* και *toc,* και φάνηκε ότι πράγματι το κομμάτι του κώδικα που έπαιρνε τον μεγαλύτερο χρόνο ήταν αυτή η συνάρτηση.

5.2.2 Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε.

Αφού εντοπίστηκε το πρόβλημα, λήφθηκε η απόφαση, ο έλεγχος για το χρώμα να γίνει μέσα στο χώρο του RGB, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια χρόνου στην μετατροπή της εικόνας. Παρ' όλα αυτά είναι αρκετά δύσκολο να εκφραστεί μέσα στο RGB το χρώμα αφού αφορά τη σχέση και των τριών τιμών φωτεινοτήτων των καναλιών. Δηλαδή, τα pixel που απεικονίζουν ένα συγκεκριμένο χρώμα φαίνεται να έχουν μία συγκεκριμένη μαθηματική σχέση μεταξύ τους. Και πράγματι, η μαθηματική σχέση που διέπει αυτές τις τιμές είναι η συνάρτηση που μετασχηματίζει την τριάδα αριθμών του RGB στην αντίστοιχη του HSV, για συγκεκριμένη Χροιά.

Για την εύρεση, λοιπόν, pixel τα οποία απεικόνιζαν το χρώμα κόκκινο με τον κορεσμό και τη φωτεινότητα που έπρεπε χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Στη παραπάνω μεθοδολογία οι παράμετροι που δέχεται ο αλγόριθμος σαν ορίσματα είναι ο

λόγος που χρησιμοποιείται σαν όριο καθώς και μία τιμή φωτεινότητας. Παρατηρώντας αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο της αντιστοίχησης της Χροιάς από το HSV, γίνεται ξεκάθαρο ότι το κόκκινο χρώμα ορίζει ένα ημιεπίπεδο από τον άξονα των διαβαθμίσεων του γκρι το οποίο, προφανώς πρέπει να περιέχει και τον άξονα του κόκκινου.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το ημιεπίπεδο που περιγράφεται ορίζει μία γωνία 45^{o} τόσο με τον άξονα του πράσινου όσο και με τον άξονα του μπλε, στο RGB. Άρα, σε αυτή την περίπτωση, για να υπάρχει Χροιά 0^{o}, όπως αυτή ορίζεται στο HSV τότε πρέπει:

- Οι τιμές του πράσινου και του μπλε να είναι ίσες.
- Πρέπει η τιμή του κόκκινου να είναι μεγαλύτερη ή ίση με τις άλλες δύο.

Το δεύτερο γίνεται ευκολότερα αντιληπτό από την γραφική αναπαράσταση του ημιεπίπεδου του κόκκινου όπως αυτή δόθηκε παραπάνω, στην παράγραφο *3.4.1*. Επαναλαμβάνεται η γραφική αυτή αναπαράσταση, μόνο για το χρώμα κόκκινο αυτή τη φορά, ώστε να γίνουν πιο καλά κατανοητά τα όσα περιγράφονται παραπάνω:

Από την εικόνα είναι αντιληπτό το ότι οι τιμές του πράσινου και του μπλε πρέπει να είναι ίσες, εάν υποτεθεί η προβολή του ημιεπίπεδου στο BG. Αυτό μάλιστα είναι η ακμή που φαίνεται πάνω από τον άξονα του πράσινου.

Στην πράξη όμως ένας τόσο αυστηρός έλεγχος θα έδινε αποτελέσματα τα οποία δεν θα ανταποκρινόταν στη πραγματικότητα. Και αυτό διότι λόγω του φωτισμού αλλά και λόγω μικρών σφαλμάτων στη λήψη της εικόνας από την κάμερα, τα σημείο που ένας παρατηρητής θα αναγνώριζε εμφανώς ως κόκκινο δεν ακολουθούν τον κανόνα *μπλε=πράσινο*. Παρ' όλα αυτά όμως οι τιμές του μπλε και του πράσινου είναι σχετικά κοντά. Επιπλέον, στην περιοχή που απεικονίζεται το έντονο κόκκινο της μπάλας που επιλέχθηκε, η τιμή του κόκκινου είναι πολλαπλάσια των άλλων δύο.

Εν τέλει, η επιλογή των περιοχών του κόκκινου γίνεται από μία και μόνο γραμμή κώδικα στη Matlab. Αυτή δίνεται παρακάτω:

```
Result=(((R>Limit*G&R>Limit*B).*R)>BrightnessRange);
```

Όπου:

- *Result*: Είναι η δυαδική εικόνα που προκύπτει από τον έλεγχο
- *Limit*: Είναι η τιμή που χρησιμοποιείται σαν όριο για το Λόγο
- *BrightnessRange*: Είναι το όριο της φωτεινότητας
- *R,G,B*: Είναι οι δισδιάστατοι πίνακες που περιέχουν την πληροφορία του κάθε χρώματος με τιμές από 0 έως 255.

Η παραπάνω γραμμή κώδικα εκτελείται με τη σωστή σειρά όταν λόγω της κατανομής των παρενθέσεων.

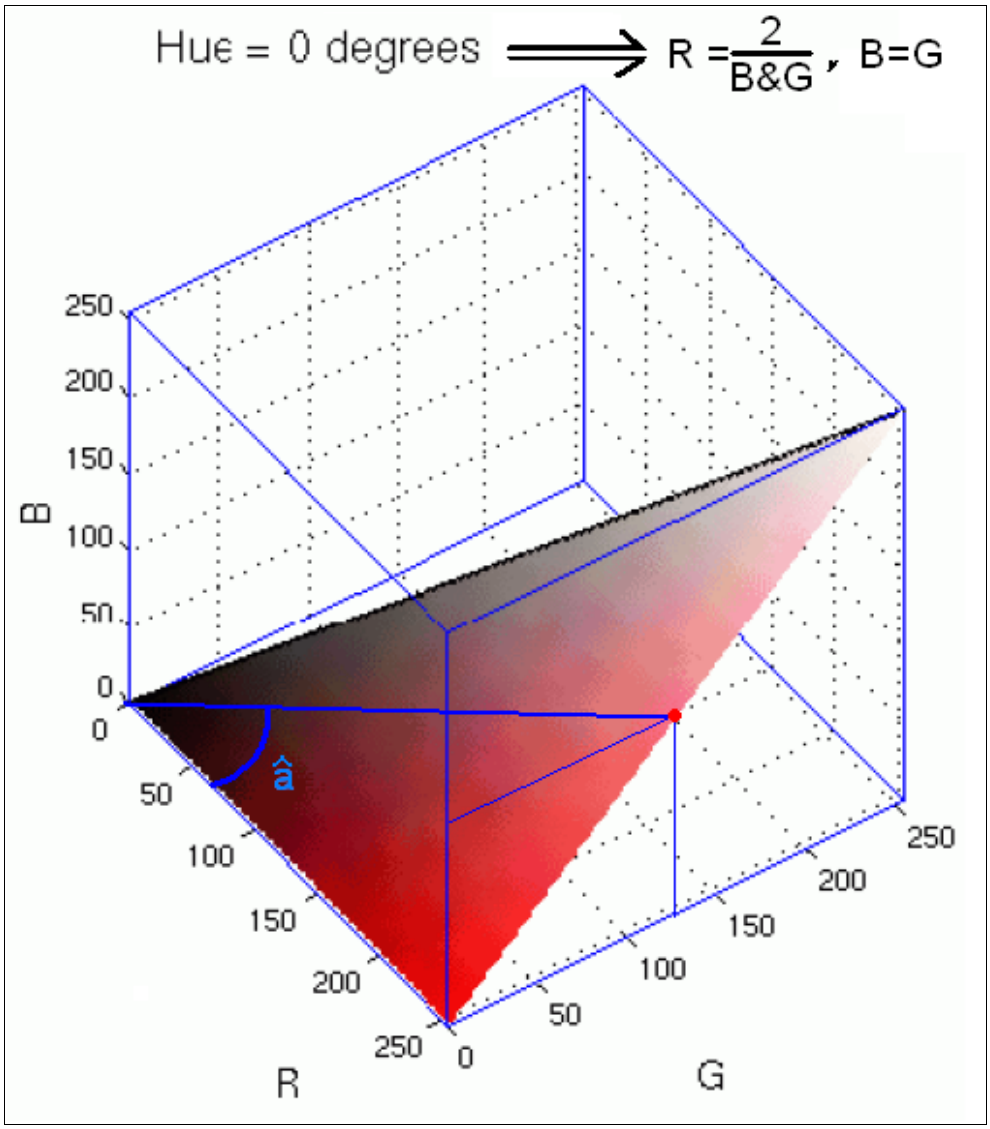
5.2.3 Λειτουργία του λόγου ως όριο.

Έτσι, επιλέχθηκε να αναζητούνται περιοχές που εμφανίζουν ένα λόγο τιμών μεταξύ του κόκκινου και του πράσινου και μεταξύ του κόκκινου και του μπλε και στη συνέχεια να γίνεται συναλήθευση. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού βέβαια απορρίπτει περιοχές, όχι μόνο διαφορετικής Χροιάς, αλλά και διαφορετικού κορεσμού και φωτεινότητας.

Σαν παράδειγμα ας αναφερθεί η περίπτωση όπου ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι *Limit=2*. Δηλαδή:

$$\left(R=\frac{2}{G}\right)\cup\left(R=\frac{2}{B}\right)$$.

Σε αυτή την περίπτωση ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που θα προέκυπτε είναι αυτός που διαγράφετε από το μπλε τρίγωνο στην επόμενη εικόνα:



$\lambda=2,$
$\hat{a}=35.26^{o}$

Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα αυτό που αναφέρεται παραπάνω, ότι ο έλεγχος με αυτό τον τρόπο δεν επηρεάζει μόνο τη Χροιά που επιλέγεται. Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα που παρατηρείται παραπάνω έχουν ήδη απορριφθεί τα περισσότερα σημεία με χαμηλό Κορεσμό.

Να σημειωθεί εδώ ότι δεν έχουν απορριφθεί τα σημεία με κορεσμό μικρότερο από το 50% όπως μπορεί να υποτεθεί αρχικά. Αντίθετα για κάθε τιμή Φωτεινότητας υπάρχει ένα όριο κορεσμού που θεωρείται ότι πληρεί τις προδιαγραφές. Αυτό προκύπτει και από τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο *3.4.3* που περιγράφει την αντιστοίχιση του Κορεσμού από το HSV στο RGB.

Παρ' όλα αυτά, από την απεικόνιση γίνεται ξεκάθαρο ότι έχουν επιλεγεί οι πιο "καθαρές" αποχρώσεις του κόκκινου. Επιπλέον, και αυτό είναι και το πιο σημαντικό, έχουν συμπεριληφθεί όλες οι αποχρώσεις που πρόκειται να έχει το αντικείμενο που έχει επιλεχθεί

στις εικόνες που θα ληφθούν. Μάλιστα στις περιοχές χαμηλότερης Φωτεινότητας, που μπορεί να υπάρξει λάθος στην αποθήκευση και του Κορεσμού, τα όρια επιλογής είναι ευρύτερα, και όσο αυξάνεται η Φωτεινότητα αυξάνεται και το επίπεδο Κορεσμού που "περνάει" από τον έλεγχου του αλγόριθμου.

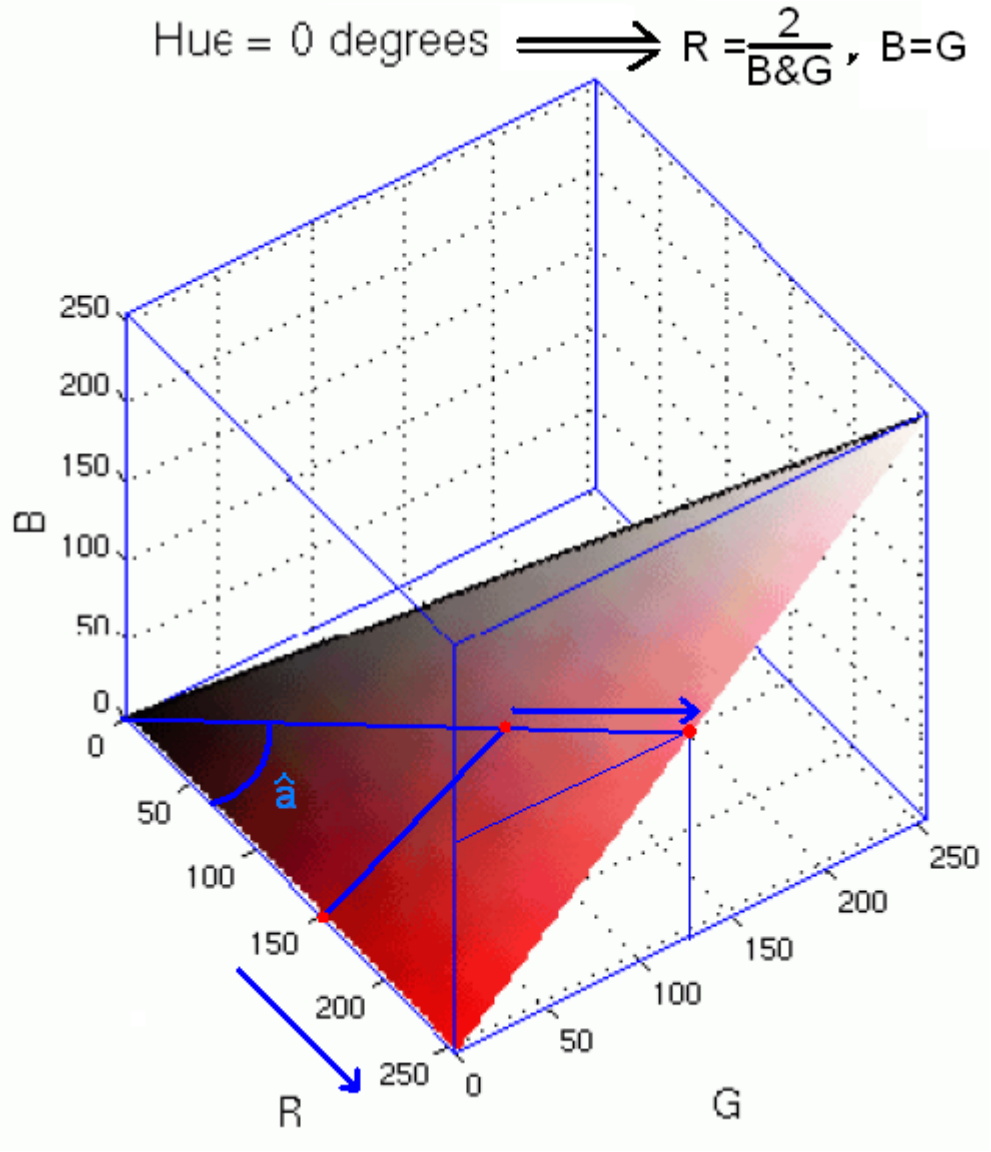
Αυτό εξασφαλίζει ότι σε κάθε περίπτωση θα υπάρχει μέσα στα αποτελέσματα του ελέγχου το σχήμα της μπάλας. Εξασφαλίζει επίσης, ότι αυτός ο αλγόριθμος ανίχνευσης είναι πάρα πολύ ανθεκτικός σε αλλαγές του φωτισμού ακόμα και κατά τη διάρκεια της πτήσης. Επιπλέον, με αυτό τον τρόπο λύνεται σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα που προκύπτει από το γεγονός ότι στην απεικόνιση της στην εικόνα, η μπάλα δεν πρόκειται να έχει το ίδιο χρώμα σε όλη της την επιφάνεια, λόγω διαφορετικής αντανάκλασης του φωτός σε κάθε σημείο της σφαιρικής επιφάνειας. Επιπλέον, ο αλγόριθμος είναι ανθεκτικός και στην ύπαρξη σκιάς στη μισή σφαίρα που προκαλεί η άλλη μισή λόγω της γωνίας του φωτισμού.

Το μειονέκτημα αυτού του είδους ελέγχου, είναι ότι είναι επιρρεπής σε παρουσία θορύβου σε περιοχές χαμηλού φωτισμού, καθώς εμφανίζονται φαινόμενα όπως αυτά που παρατηρήθηκαν στην εικόνα με το κόκκινο πλοίο στην παράγραφο *3.3*, όπου η τιμή της χροιάς και του κορεσμού αλλοιωνόταν στις περιοχές με έντονη σκιά.

5.2.4 Λειτουργία της Φωτεινότητας του Κόκκινου ως όριο

Αναφέρθηκε όμως παραπάνω ότι ο αλγόριθμος δέχεται σαν ορίσματα το λόγο που θα λειτουργήσει σαν όριο αλλά και μία τιμή φωτεινότητας του κόκκινου. Η επιλογή σημείων βάσει αυτής της τιμής γίνεται αφού έχει γίνει ο έλεγχος βάσει του λόγου του κόκκινου ως προς τα άλλα δύο χρώματα. Με αυτό τον τρόπο ο γεωμετρικός τόπος που ορίζεται τελικά είναι το τρίγωνο που ορίστηκε πριν με μία γραμμή να το τέμνει. Η γραμμή αυτή ξεκινάει κάθετα από τον άξονα του κόκκινου, από την τιμή που χρησιμοποιείται σαν όριο και καταλήγει στη διαγώνιο που ορίζει στα προηγούμενα βήματα ο λόγος.

Επιλέγεται δηλαδή το τμήμα του τριγώνου που απεικονίζει τις πιο φωτεινές και κορεσμένες αποχρώσεις του κόκκινου από αυτές που ήδη επιλέχθηκαν από τα προηγούμενα βήματα. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται γραφικά το αποτέλεσμα αυτού του τελευταίου ελέγχου.

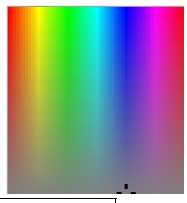


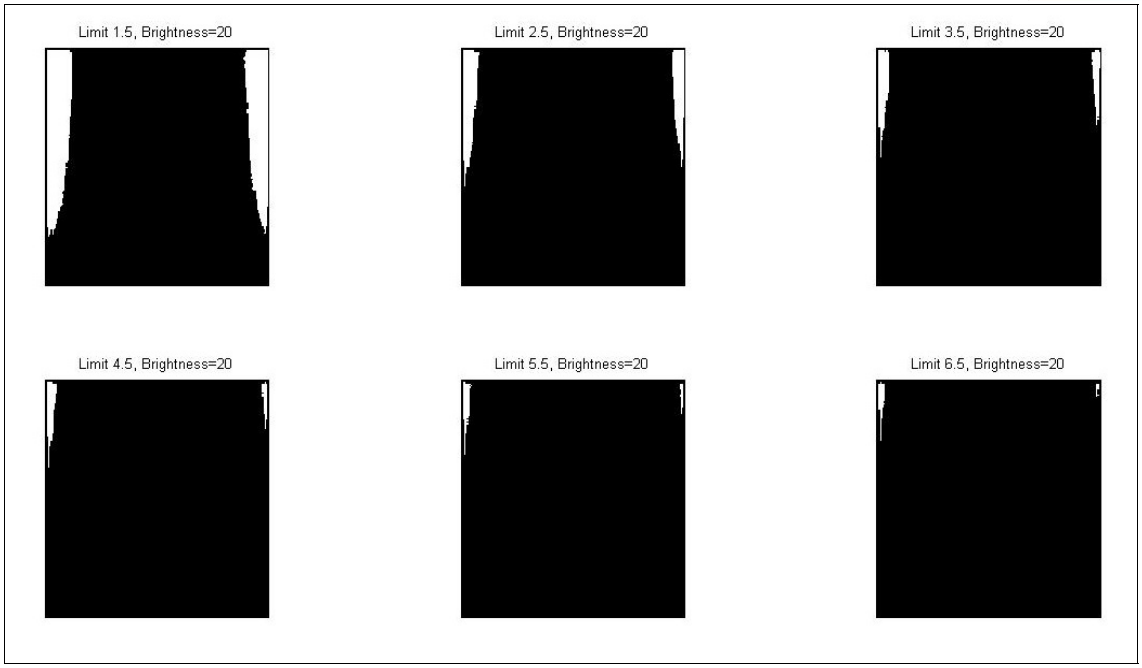
Brightness=150

Από την εικόνα είναι σαφές ότι ο γεωμετρικός τόπος όλων των ελέγχων που αναφέρονται παραπάνω είναι ένα τραπέζιο πάνω στο ημιεπίπεδο του κόκκινου, με σχήμα αντίστοιχο αυτού που απεικονίζεται παραπάνω. Αυτή η τιμή μπορεί να περιορίσει τον έλεγχο αρκετά και αντισταθμίζει ελαφρώς τα προβλήματα του θορύβου που προκύπτει στις πολύ σκοτεινές περιοχές, απορρίπτοντας τις εξ' αρχής. Αυτό βέβαια μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ελλιπής αναγνώρισης εάν το σχήμα που ψάχνει ο αλγόριθμος είναι, πράγματι, σε μία σκοτεινή περιοχή της εικόνας. Παρ' όλα αυτά, με ένα στοιχειώδη φωτισμό του περιβάλλοντος αυτό το πρόβλημα δεν υφίσταται.

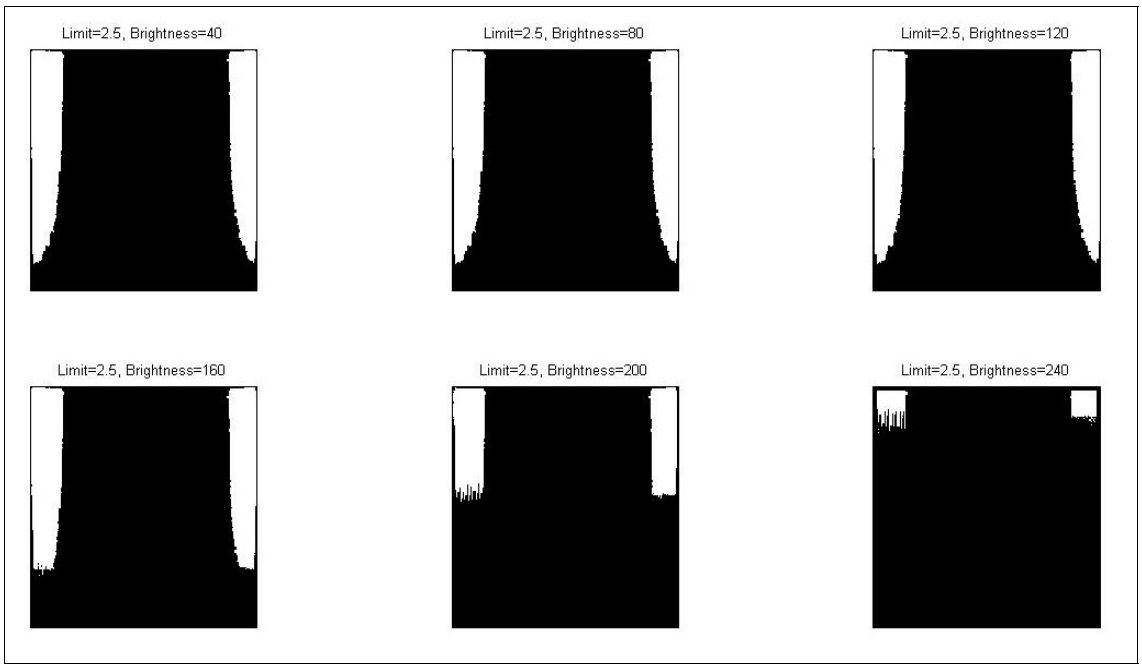
Παρακάτω δίνονται παραδείγματα ανίχνευσης του κόκκινου σε διάφορες φωτογραφίες. Αυτές είναι και οι φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για τα πρώτα πειράματα με τον αλγόριθμο ανίχνευσης του κόκκινου χρώματος.

Κατ' αρχήν δίνονται οι εικόνες που προκύπτουν εάν αναλυθεί ένα απλός χρωματικός χάρτης με τον αλγόριθμο που περιγράφεται παραπάνω. Στην πρώτη εικόνα μεταβάλλεται το όριο του λόγου και στη δεύτερη εικόνα μεταβάλλεται η φωτεινότητα. Θα γίνει έτσι ακόμα πιο κατανοητό το πως επηρεάζει η κάθε παράμετρος την ανίχνευση του κόκκινου.



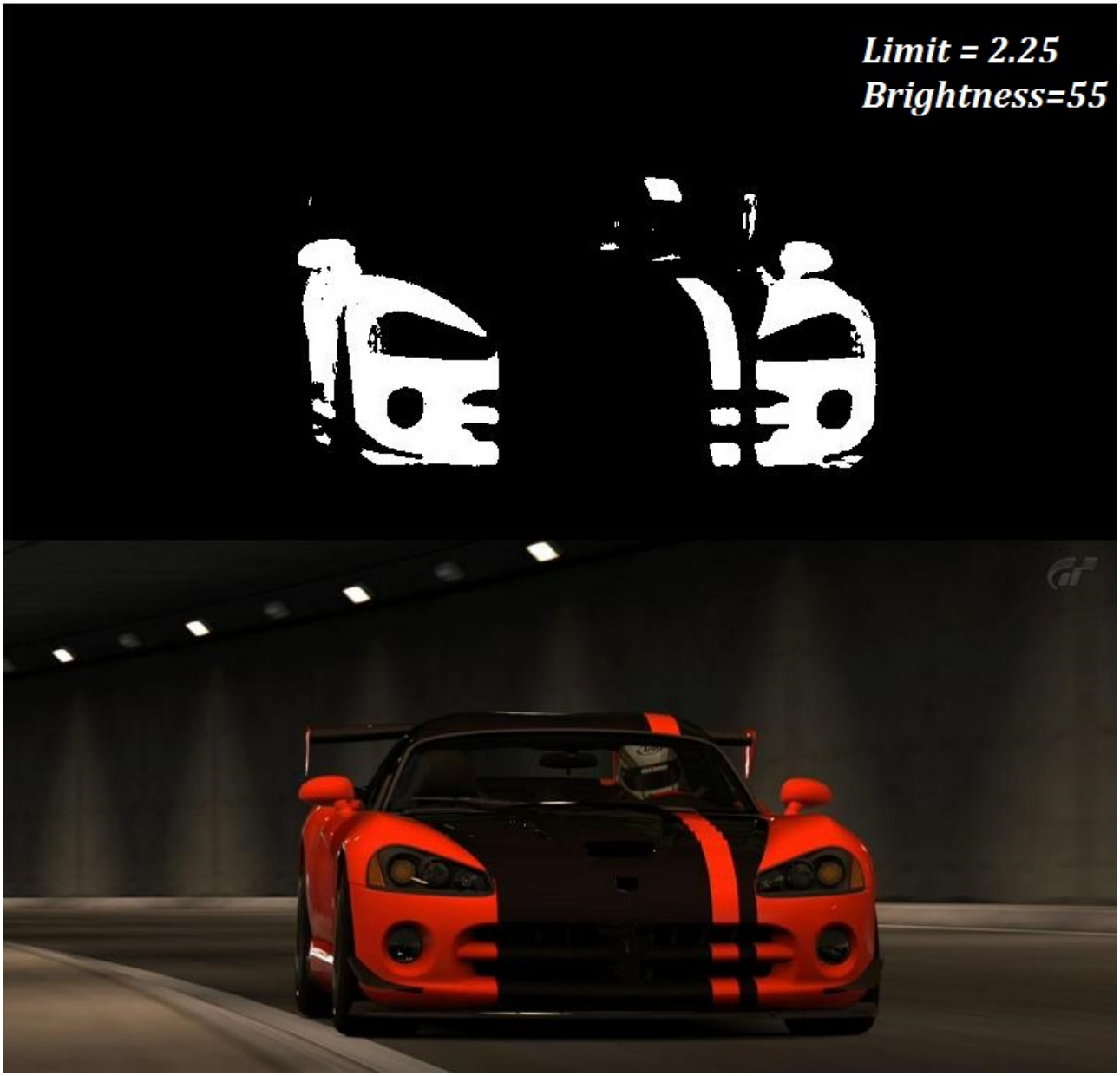


Εδώ ο λόγος ξεκινάει από την τιμή 1.5 και καταλήγει στην τιμή 6.5. Είναι ξεκάθαρο ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος, τόσο πιο περιορισμένη είναι η περιοχή που επιλέγεται. Επίσης φαίνεται ότι μειώνεται κατά κύριο λόγω το ύψος της. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, αυξάνοντας το λόγο επηρεάζεται και η Χροιά αλλά, κυρίως, ο Κορεσμός που επιλέγεται.



Σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται ότι η φωτεινότητα επηρεάζει μόνο το ύψος της περιοχής που αναγνωρίζεται, κάτι το οποίο είναι εντελώς αναμενόμενο. Επιπλέον, φαίνεται ότι μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα προϋποθέτουν και μεγάλες αλλαγές στο όριο της φωτεινότητας. Να σημειωθεί εδώ ότι εάν η εικόνα του χρωματικού χάρτη ήταν υψηλότερης ανάλυσης και χρωματικής ακρίβειας, το κάτω μέρος της επιλεγμένης περιοχής θα ήταν μία συνεχόμενη γραμμή και δε θα εμφάνιζε την οδοντωτή μορφή που εμφανίζει τώρα.

Η επόμενη εικόνα είναι παράδειγμα ανάλυσης εικόνας από γραφικά υπολογιστή:



Αυτή η εικόνα είχε αρχικά τραβηχτεί μέσα από ένα προσομοιωτή οδήγησης. Λόγω του ότι πρόκειται για γραφικά που παρείχθησαν από υπολογιστή, η Χροιά είναι πολύ ξεκάθαρα ορισμένη. Δηλαδή στις περιοχές του κόκκινου, ο λόγος της φωτεινότητας του κόκκινου και των φωτεινοτήτων των άλλων δυο χρωμάτων είναι πάνω από δύο.

Τα παραπάνω σημαίνουν ότι είναι πάρα πολύ εύκολο για τον κώδικα να παράξει αποτέλεσμα. Επίσης ο πολύ ξεκάθαρος διαχωρισμός του κόκκινου από τα άλλα χρώματα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί πολύ χαμηλό όριο φωτεινότητας. Και γι αυτό το λόγο

παρατηρείται ότι αναγνωρίζονται περιοχές όπου το χρώμα κόκκινο είναι σχετικά αλλοιωμένο, όπως η περιοχή κάτω από τα αεροδυναμικά βοηθήματα στον εμπρός προφυλακτήρα. Φαίνεται επίσης ότι έχει αναγνωρισθεί και το χρώμα κόκκινο που υπάρχει στο τιμόνι.

Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει και κάποιος θόρυβος στην εικόνα. Συγκεκριμένα έχουν αναγνωρισθεί περιοχές εσωτερικά του φανού όπου στην ουσία το χρώμα είναι ελαφρώς κίτρινο. Ο λόγος που δημιουργείται αυτός ο θόρυβος αναλύεται παρακάτω. Να σημειωθεί ότι υψηλότερος Λόγος θα θεράπευε το θόρυβο σε αυτή τη περίπτωση.

5.2.5 Μεθοδολογία επιλογής Λόγου και Φωτεινότητας για δεδομένο περιβάλλον.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι κάποιες αλλαγές στις παραμέτρους της ανίχνευσης του κόκκινου αλλάζουν ελαφρώς τα αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος. Γι αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν δύο πολύ απλοί κώδικες που εξετάζουν διάφορες τιμές για μία συγκεκριμένη φωτογραφία. Από την εκτύπωση των αποτελεσμάτων μπορεί ο χρήστης εύκολα να εξάγει συμπεράσματα ως προς το εύρος των τιμών που θα δώσουν τα καλύτερα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο περιβάλλον.

Να σημειωθεί εδώ ότι ακόμα και εάν η εύρεση του χρώματος γίνει μέσα σε βίντεο, αρκεί να εκτελεσθεί η παρακάτω διαδικασία σε ένα frame μόνο. Παρ' όλα αυτά, εάν ληφθεί **φωτογραφία** από τη κάμερα, ρυθμιστούν οι παράμετροι και μετά γίνει ανίχνευση στο βίντεο, υπάρχει σοβαρή πιθανότητα τα αποτελέσματα να μην είναι τα αναμενόμενα.

Η μεθοδολογία θα εξηγηθεί καλύτερα με ένα παράδειγμα. Και επειδή έχει γίνει ήδη ανάλυση μίας εικόνας που παράχθηκε εξ' ολοκλήρου από υπολογιστή, τώρα θα αναλυθεί μία εικόνα από πραγματική κάμερα. Να σημειωθεί ότι στην εικόνα αυτή ο χώρος είναι εσωτερικός αλλά με πολύ καλό φωτισμό και ο φωτογράφος είναι επαγγελματίας. Η φωτογραφία που θα αναλυθεί δίνεται παρακάτω:

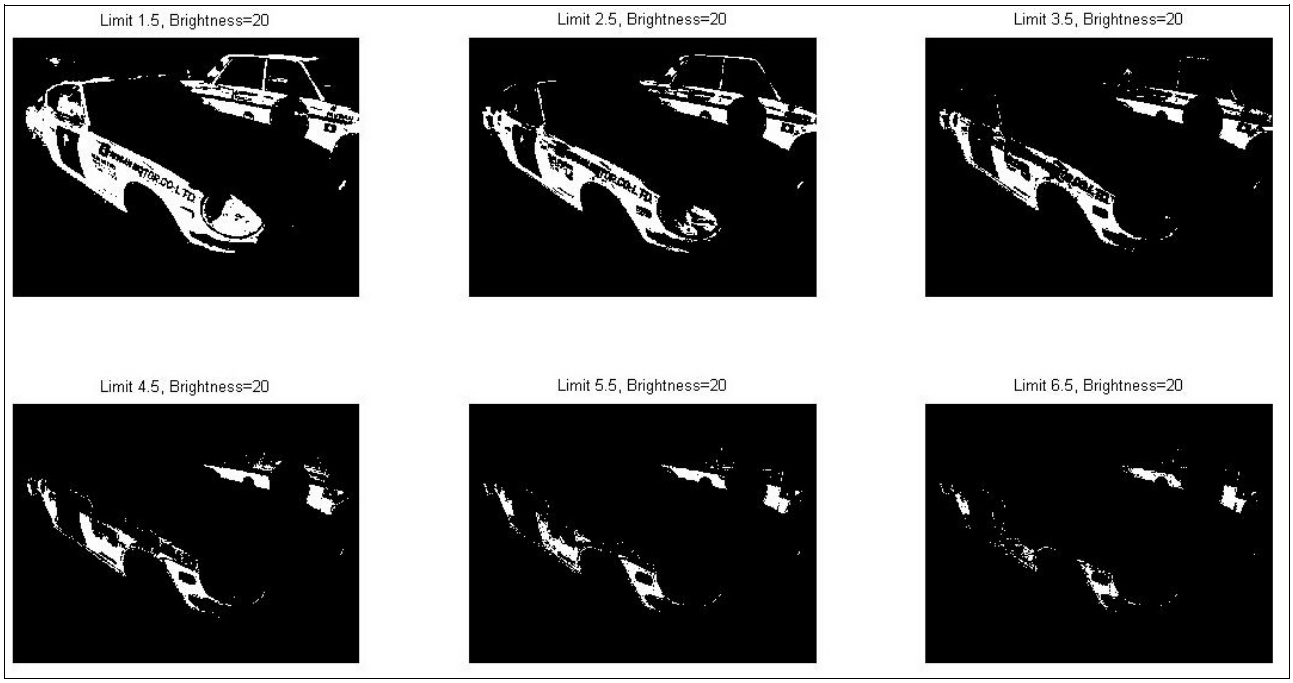


Το αυτοκίνητο της εικόνας είναι ένα Datsun 240Z Gr.2, του οποίου το πλήρωμα αποτελούσαν ο Rauno Aaltonen, γνωστός για τη νίκη του στο Rally Monte Carlo με το μινιμαλιστικό Mini Cooper, ο Jean Todt, νυν πρόεδρος της Διεθνής Ομοσπονδίας Αυτοκινήτου (F.I.A.) καθώς και ένας από τους Ιάπωνες οδηγούς αγώνων του εργοστασίου του οποίου το όνομα καταγράφεται στα Ιαπωνικά.

Πέρα από το ιστορικό ενδιαφέρον της φωτογραφίας, αποτελεί καλό παράδειγμα για τη λειτουργία του αλγόριθμου καθώς:

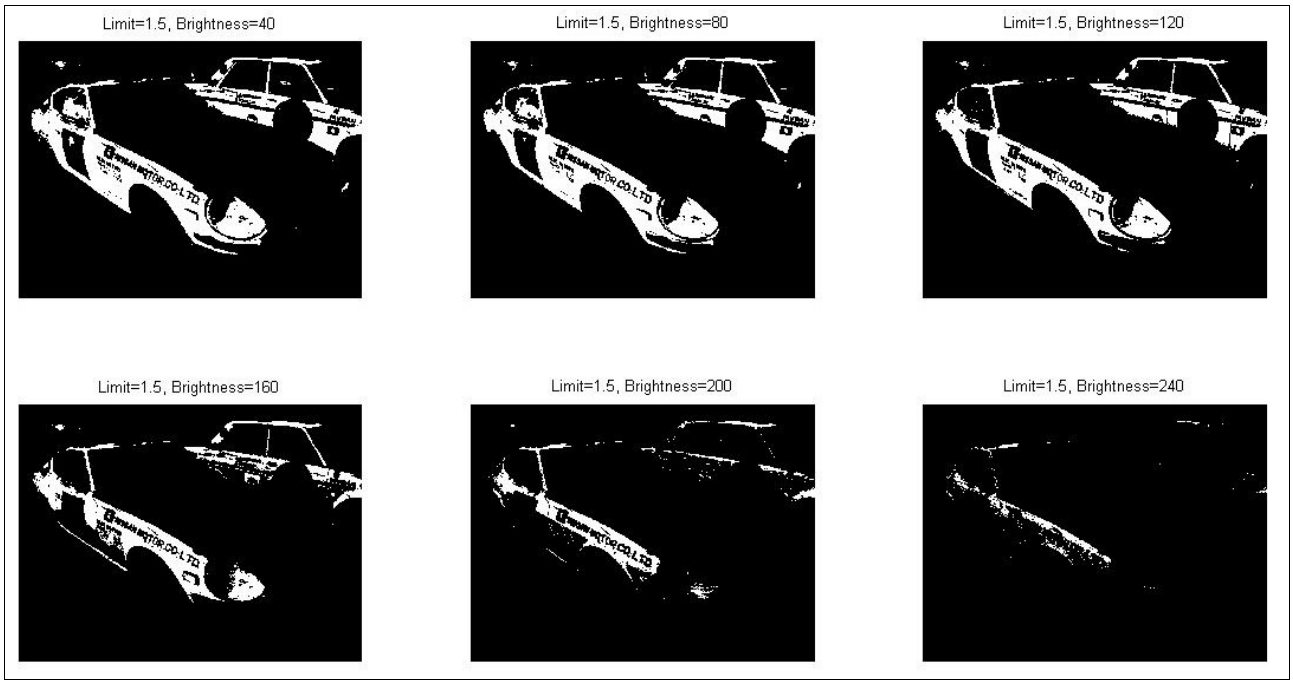
- Υπάρχει κόκκινο χρώμα κάτω από ανακλαστικές επιφάνειες
- Υπάρχουν διαφορετικές αποχρώσεις του κόκκινου η μία πάνω στην άλλη.
- Υπάρχουν περιοχές που αντανακλάται κόκκινο πάνω σε άλλα χρώματα και αλλοιώνει ελαφρώς τη Χροιά.
- Οι επιγραφές επάνω στα αυτοκίνητα θα δώσουν μία πάρα πολύ καλή εικόνα της ανίχνευσης από την ποιότητα των ακμών τους.

Οι δύο κώδικες που θα χρησιμοποιηθούν για την επιλογή των τιμών, απλώς εκτελούν επαναλαμβανόμενα την ανίχνευση του κόκκινου αυξάνοντας στη μία περίπτωση την τιμή του Λόγου και στην άλλη περίπτωση την τιμή της Φωτεινότητας. Κάθε κώδικας εκτελεί έξι επαναλήψεις και εκτυπώνει τα αποτελέσματα για οπτική σύγκριση. Πρώτα εκτελείται ο κώδικας του Λόγου:



Παρατηρείται ότι η καλύτερη ανίχνευση έχει γίνει μεταξύ των λόγων *λ=1.5* και *λ=2.5*. Από αυτή την τιμή και πάνω η ανίχνευση δεν περιλαμβάνει πολλές περιοχές του κόκκινου. Μάλιστα, αυτή του 1.5 είναι αυτή που έχει ανιχνεύσει πληρέστερα τις κόκκινες περιοχές αλλά περιλαμβάνει πολύ θόρυβο. Ένα τέτοιο σημείο θορύβου είναι η περιοχή του αριθμού όπου υπάρχει ένα μαύρο *"5"*. Εκεί αντανακλάται φως από ένα άλλο κόκκινο αυτοκίνητο αριστερά από το όριο της φωτογραφίας και προσδίδει μία ελαφριά κιτρινοκόκκινη Χροιά στην περιοχή. Στην εικόνα που ο λόγος ήταν *λ=2.5*, αυτό το συγκεκριμένο σημείο έχει λιγότερο θόρυβο αλλά υπάρχει προβληματική αναγνώριση του κόκκινου σε πολλές περιοχές τις εικόνας. Είναι ξεκάθαρο ότι από το *λ=2.5* έχουν ήδη αρχίσει να χάνονται περιοχές κόκκινου στην εικόνα. Άρα η βέλτιστη τιμή είναι πιο κοντά στο *λ=1.5*.

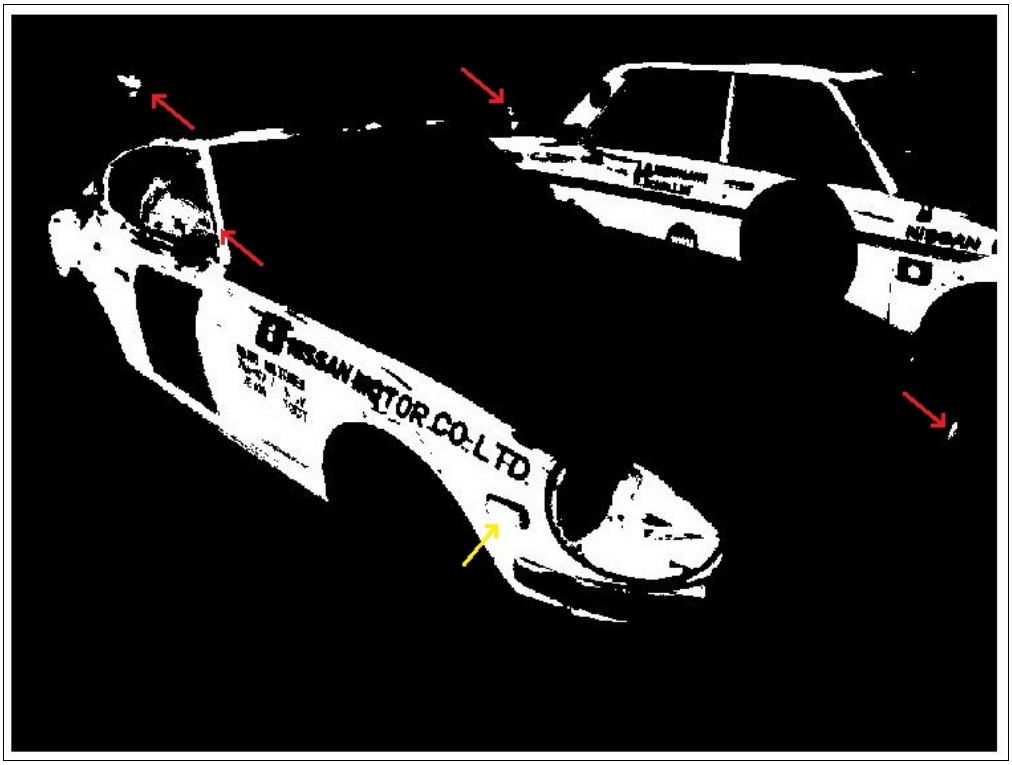
Στη συνέχεια εκτελείται ο κώδικας της φωτεινότητας:



Εδώ χρησιμοποιείται σχετικά χαμηλή τιμή του Λόγου ώστε είναι εμφανέστερη η επίδραση της Φωτεινότητας στη μείωση του θορύβου της φωτογραφίας. Εδώ φαίνεται ότι η φωτογραφία που είναι πιο κοντά στη σωστή ανίχνευση είναι αυτή της με *Brightness=80*. Όμως εκεί υπάρχει ακόμα ο θόρυβος που αναφέρεται και στις φωτογραφίες του κώδικα για το Λόγο. Άρα με δεδομένο ότι η καλύτερες ανιχνεύσεις έγιναν:

- Με Λόγο *1.5≤λ≤2.5,* με ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα στο 1.5,
- και με Φωτεινότητα *80≤Brightness≤120*, και ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα στο 80

γίνεται η επιλογή των τιμών *λ=1.6* και *Brightness=95*.



5.2.6 Ανάλυση της ανίχνευσης του αλγορίθμου.

Σχολιάζοντας την παραπάνω εικόνα αξίζει να αναφερθούν ότι σε κάποιες περιοχές υπάρχει ακόμα θόρυβος ενώ σε άλλες που φαίνεται να υπάρχει θόρυβος έχει γίνει πολύ σωστή αναγνώριση του κόκκινου χρώματος.

Αρχικά να αναφερθεί ότι το σημείο που δείχνει το κίτρινο βέλος σημειώνει περιοχή όπου έγινε εσφαλμένη αναγνώριση. Εκεί βρίσκεται το ανακλαστικό γυαλί του σηματοδότη, το οποίο λόγω εποχής ήταν μία απόχρωση του πορτοκαλί. Λόγω και της ανακλαστικότητας του, ο αλγόριθμος το αναγνώρισε σαν κόκκινο.

Παρ' όλα αυτά, η ποιότητα των ακμών που αναφέρθηκε παραπάνω είναι πάρα πολύ καλή. Το όνομα της εταιρείας είναι πολύ ξεκάθαρο και ακόμα και τα ονόματα του πληρώματος, ακριβώς πίσω από το θόλο του τροχού, μπορούν να αναγνωρισθούν. Στο δεύτερο αυτοκίνητο έχει γίνει πολύ καλή αναγνώριση γύρω από το σήμα της "SHELL", όπου μάλιστα υπάρχουν δύο αποχρώσεις του κόκκινου.

Το ενδιαφέρον είναι ότι όλα τα κόκκινα βέλη σημειώνουν σημεία όπου φαίνεται ότι υπάρχει θόρυβος, αλλά στην πραγματικότητα είναι έγκυρες αναγνωρίσεις. Το αριστερό βέλος σημειώνει ένα κόκκινο αυτοκίνητο στο βάθος το οποίο είναι εκτός εστίασης της κάμερας. Το δεξί βέλος στην πάνω πλευρά της εικόνας σημειώνει τα πίσω φώτα ενός άλλου αυτοκινήτου.

Η πιο σημαντική περιοχή αναγνώρισης όμως είναι στο παράθυρο του αυτοκινήτου. Εκεί εμφανίζεται στην πραγματικότητα το είδωλο ενός άλλου κόκκινου αυτοκινήτου, λόγω αντανάκλασης. Και ο αλγόριθμος το ανίχνευσε αυτό σωστά. Ένα σημείο που γενικά ήταν πολύ δύσκολο να γίνει σωστή ανίχνευση κόκκινου.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι ο κώδικας ανιχνεύει το κόκκινο σε μία εικόνα με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης φαίνεται ότι μπορεί να προσαρμοστεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες με μεγάλη ευκολία και ότι ανιχνεύει το κόκκινο ακόμα και σε περιοχές που έχει αλλοιωθεί.

Αξίζει όμως να αναλυθούν οι περιοχές όπου έχει γίνει λάθος αναγνώριση καθώς αυτές δείχνουν τα πραγματικά όρια του αλγόριθμου και αποκαλύπτουν και ως ένα βαθμό το τρόπο λειτουργίας του.

Παρατηρήθηκε ότι περιοχές που μπορεί να γίνουν λάθη και να παρουσιαστεί θόρυβος είναι αυτές που έχουν ελαφρώς κίτρινο χρώμα. Κλασσικό παράδειγμα του παραπάνω είναι οι σηματοδότες των αυτοκινήτων και γι αυτό επιλέχθηκαν και τα παραδείγματα που δόθηκαν. Γενικά τα σημεία που έχει γίνει λάθος ανίχνευση με αυτό τον τρόπο παρουσιάζουν Χροιά κοντά στο κόκκινο, αλλά διαφορετική από αυτό, υψηλό κορεσμό και χαμηλή φωτεινότητα.

Και στις δύο περιπτώσεις όπου έγινε λάθος, ένας ελαφρώς υψηλότερος Λόγος ως θα διόρθωνε το πρόβλημα. Θα προκαλούσε όμως ελλιπέστερη ανίχνευση σε άλλες περιοχές. Κατά περίπτωση μπορεί να γίνει επιλογή παραμέτρων που λειτουργούν με ικανοποιητικό τρόπο. Το πρόβλημα αυτό, όμως, προκαλείται από τον τρόπο που είναι δομημένος ο αλγόριθμος.

Στην πραγματικότητα δεν είναι μόνο οι περιοχές με ελαφρώς κίτρινο χρώμα που μπορεί να μπερδέψουν τον αλγόριθμο. Μπερδεύεται εξίσου και από αυτές που έχουν ελαφρώς μωβ χρώμα.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω στην παράγραφο *5.2.2.*, βρίσκονται πρώτα οι περιοχές όπου ισχύει $R > \lambda \cdot G$, στη συνέχεια $R > \lambda \cdot B$ και μετά επιλέγονται όλες οι περιοχές όπου ισχύουν οι δύο παραπάνω ανισότητες. Αυτή η μεθοδολογία δεν εξασφαλίζει ότι *G=B*, καθώς σε pixel όπου π.χ. ισχύει ότι $R = 1.73 \cdot G$ αλλά *B=0* καταλήγουν στην ανίχνευση. Αυτό σημαίνει ότι εδώ έχει αλλάξει η χροιά αφού όπως έχει αναφερθεί η Χροιά του κόκκινου ορίζει

ότι $R>(\lambda\cdot G=\lambda\cdot B)$, το οποίο στο παράδειγμα δεν ισχύει.

Παρ' όλα αυτά, αυτός ο τρόπος λειτουργίας κρίθηκε απαραίτητος αφού στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν ισχύει το *G=B* ενώ το χρώμα συνεχίζει να εμφανίζεται κόκκινο. Αφήνοντας το περιθώριο για τις περιπτώσεις όπου δεν ισχύει το *G=B*, αλλά διατηρώντας τον όρο ότι δεν θα ξεπερνάει ούτε το G ούτε το B ένα συγκεκριμένο ποσοστό του κόκκινου, εξασφαλίζεται ότι όλες οι κόκκινες περιοχές θα αναγνωρίζονται.

Μάλιστα σε περιπτώσεις όπου στο περιβάλλον δεν εμφανίζονται τα χρώματα που μπερδεύουν τον αλγόριθμο όπως αναφέρονται παραπάνω, δεν υπάρχει και λόγος για περαιτέρω ενέργειες. Ένας τρόπος για να παρακαμφθεί αυτό το πρόβλημα θα ήταν να υπάρχει και ένας κατώτατος Λόγος παράλληλα με τον ανώτατο ως όρια. Θα μπορούσε, έτσι, να γίνει πάρα πολύ συγκεκριμένη η επιλογή της Χροιάς και του Κορεσμού που επιλέγονται.

Αυτό δεν κρίθηκε απαραίτητο σε αυτή την περίπτωση, για τους παρακάτω λόγους:

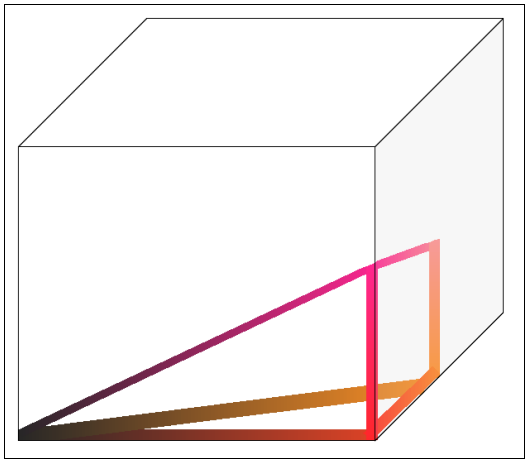
- Η μπάλα που επιλέχθηκε είναι από λεπτό πλαστικό και με έντονο φωτισμό παρουσιάζει χαρακτηριστικά διαφάνειας σε κάποια σημεία της επιφάνειας του.
- Θα προκαλούσε επιπλέον καθυστέρηση στο χρόνο που απαιτεί ένας κύκλος επεξεργασίας.
- Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ήταν ικανοποιητικά χωρίς να τεθούν επιπλέον όρια.

Τέλος, για λόγους πληρότητας, παρακάτω σημειώνονται οι ακραίες τιμές που χαρακτηρίζουν την πυραμίδα που αποτελεί το γεωμετρικό τόπο της ανίχνευσης που κάνει ο αλγόριθμος. Για σκοπούς καλύτερης απεικόνισης θα δοθούν τιμές για *λ=2.*

Παράμετροι	**Χρώμα**	**Δείγμα**
$0^R0^G0^B$	*Μαύρο*	
$255^R0^G0^B$	*Κόκκινο*	
$255^R127^G0^B$	*Πορτοκαλί*	
$255^R0^G127^B$	*Μωβ*	
$255^R127^G127^B$	*Ροζ*	

Να σημειωθεί ότι σε όλα τα χρώματα που αναφέρονται παραπάνω ο κορεσμός είναι 100%, πλην του μαύρου όπου εκεί εξ' ορισμού είναι 0%.

Στην ανίχνευση λοιπόν, στην περίπτωση όπου *λ=2* συμπεριλαμβάνονται όλα τα χρώματα που περικλείονται από το γεωμετρικό σχήμα που ορίζουν τα πέντε σημεία απεικονίζονται παραπάνω.



Παράγραφος 5.3 : Τεχνικές μείωσης του θορύβου στην ανίχνευση.

Αφού γίνει η ανίχνευση του κόκκινου στην εικόνα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιες τεχνικές μείωσης του θορύβου. Αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, μπορεί να εξάγονται αποτελέσματα που δίνουν ανίχνευση και καταλήγουν σε ικανοποιητικές εκτιμήσεις της τροχιάς του αντικειμένου στο χώρο.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η απαιτούμενη ακρίβεια είναι μεγαλύτερη ή το περιβάλλον προκαλεί προβλήματα αναγνώρισης λόγω της ύπαρξης χρωμάτων κοντά σε αυτό που αναζητείται.

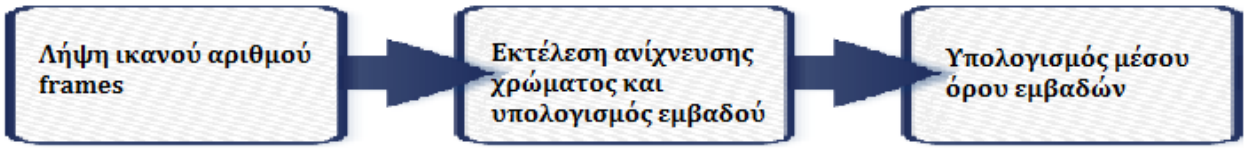
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν τελικά είναι τέσσερις:

- Μείωση του θορύβου αφαιρώντας το μέσο όρο αυτού.
- Κατωφλίωση στο εμβαδόν που μετριέται από την εικόνα.
- Αποθήκευση μόνο του μεγαλύτερου αντικειμένου ανά εικόνα.
- Και γέμισμα οπών στο εσωτερικό σχημάτων.

5.3.1 Μείωση του θορύβου αφαιρώντας το μέσο όρο αυτού.

Αυτή είναι ίσως και η απλούστερη μέθοδος αφαίρεσης θορύβου γενικά στην επεξεργασία σημάτων. Χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, από επεξεργασία ήχου μέχρι και επεξεργασία ηλεκτρικών σημάτων.

Εδώ η διαδικασία είναι σχετικά απλή, όπως περιγράφεται από το επόμενο διάγραμμα:



Να σημειωθεί εδώ, ότι η παραπάνω μέθοδος εκτελείται πριν από τις ρίψεις, με όσο το δυνατόν λιγότερα κινούμενα αντικείμενα στο οπτικό πεδίο της κάμερας και χωρίς το αντικείμενο που αναγνωρίζεται. Γι αυτό το λόγο έχει δημιουργηθεί ξεχωριστός κώδικας που εκτελεί τη λήψη των frames και τον υπολογισμό του μέσου όρου.

Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις όπου ο θόρυβος οφείλεται στο περιβάλλον στο οποίο γίνεται η μέτρηση.

Αφού υπολογιστεί αυτός ο μέσος όρος, αποθηκεύεται και στις πραγματικές ρίψεις αφαιρείται από το υπολογισμένο εμβαδόν του κάθε frame. Επιπλέον, πρέπει να έχει γίνει η διαδικασία επιλογής του Λόγου και της Φωτεινότητας και η ανίχνευση χρώματος να γίνεται με αυτές τις παραμέτρους.

Μάλιστα, επειδή σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί αυτός ο τρόπος μείωσης του θορύβου, υπάρχει πρόβλεψη στον κώδικα να μπορεί ο χρήστης να τον ενεργοποιήσει δίνοντας δύο επιπλέον ορίσματα όταν καλεί τον αλγόριθμο:

- *"Yes"*, για την ενεργοποίηση της μεθόδου.
- Την τιμή της μείωσης θορύβου , η οποία ενεργεί στον υπολογισμό του εμβαδόντος.

Η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου μείωσης του θορύβου αυξάνεται όταν συνδυάζεται με την αμέσως επόμενη μέθοδο της κατωφλίωσης του εμβαδόντος. Αυτή εξηγείται στην επόμενη παράγραφο.

Να σημειωθεί όμως ότι, αυτός ο τρόπος μείωσης του θορύβου παρουσιάζει ένα πρόβλημα όταν το αντικείμενο που ανιχνεύεται περάσει μπροστά από την περιοχή του θορύβου. Σε

αυτή την περίπτωση, η αιτία του θορύβου δεν είναι πλέον ορατή, συνεχίζει να υφίσταται όμως η μείωση του υπολογισμένου εμβαδού και το αποτέλεσμα είναι να υπολογίζεται μεγαλύτερη απόσταση του αντικειμένου από την πραγματική γι αυτά τα frames.

5.3.2 Κατωφλίωση στο εμβαδόν που μετριέται από την εικόνα.

Ένας δεύτερος τρόπος αφαίρεσης του θορύβου είναι η κατωφλίωση των εμβαδών που υπολογίζονται. Σε αυτή την περίπτωση, όταν το εμβαδόν είναι πάνω από μία τιμή που ορίζεται όταν καλείται ο αλγόριθμος, τότε η τιμή που αποθηκεύεται για το εμβαδόν είναι 0.

Αργότερα στον αλγόριθμο, όταν γίνεται η εκτίμηση της τροχιάς του αντικειμένου, βρίσκονται οι θέσεις των θετικών, μη μηδενικών στοιχείων των θέσεων X,Y,Z χώρο. Η εκτίμηση γίνεται μόνο βάσει των στοιχείων που είναι σε αυτές τις θέσεις.

Οι θέσεις των μηδενικών στοιχείων X,Y,Z είναι οι θέσεις όπου μηδενίστηκε το εμβαδόν. Αυτό λειτουργεί ως εξής:

$Για\ Area=0 \Rightarrow RedDots(Διάμετρος), RedDistance(Απόσταση)=0$, αφού αν $Area=0$ τερματίζεται ο βρόγχος και παραμένει η προεπιλεγμένη τιμή=0.

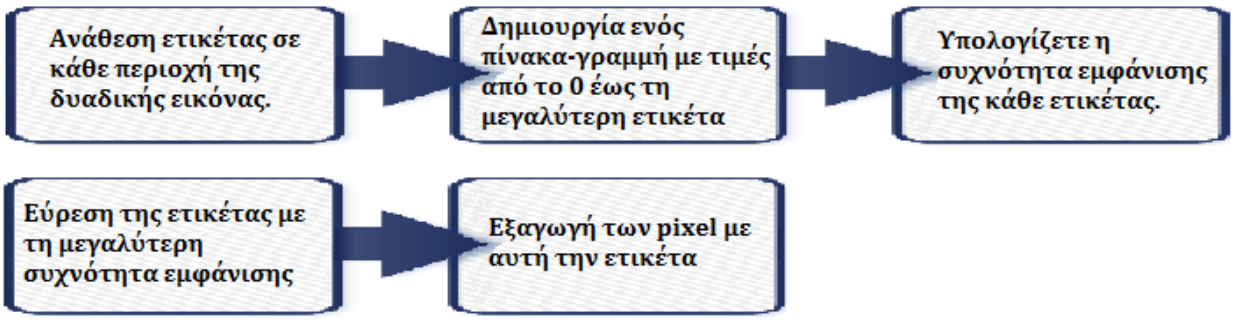
Εφόσον η απόσταση από το εστιακό σημείο είναι 0, και το εστιακό σημείο είναι στο σημείο XYZ (0,0,0) τότε οι συντεταγμένες που αποθηκεύονται είναι (0,0,0). Έτσι ο πίνακας των θέσεων που δημιουργείται είναι ένας πίνακας διαστάσεων $n\times 3$, στον οποίο πίνακα υπάρχουν κάποιες γραμμές με την τριάδα τιμών [0 0 0]. Έτσι είναι εύκολο, και εξαιρετικά αποδοτικό χρονικά, να αναγνωρισθούν αυτές οι γραμμές στον πίνακα και να αποθηκευτεί η διεύθυνση τους. Έτσι όταν δωθούν οι θέσεις στον αλγόριθμο που κάνει τον υπολογισμό της τροχιάς, μπορούν να δωθούν με τη μορφή ενός πίνακα στον οποίο έχουν αφαιρεθεί αυτές οι συγκεκριμένες γραμμές. Ο νέος πίνακας θα έχει διαστάσεις $(n-k)\times 3$, όπου:

$$k = ο\ αριθμός\ των\ frame\ στα\ οποία\ μηδενίστηκε\ το\ εμβαδόν.$$

5.3.3 Αποθήκευση μόνο του μεγαλύτερου αντικειμένου ανά εικόνα.

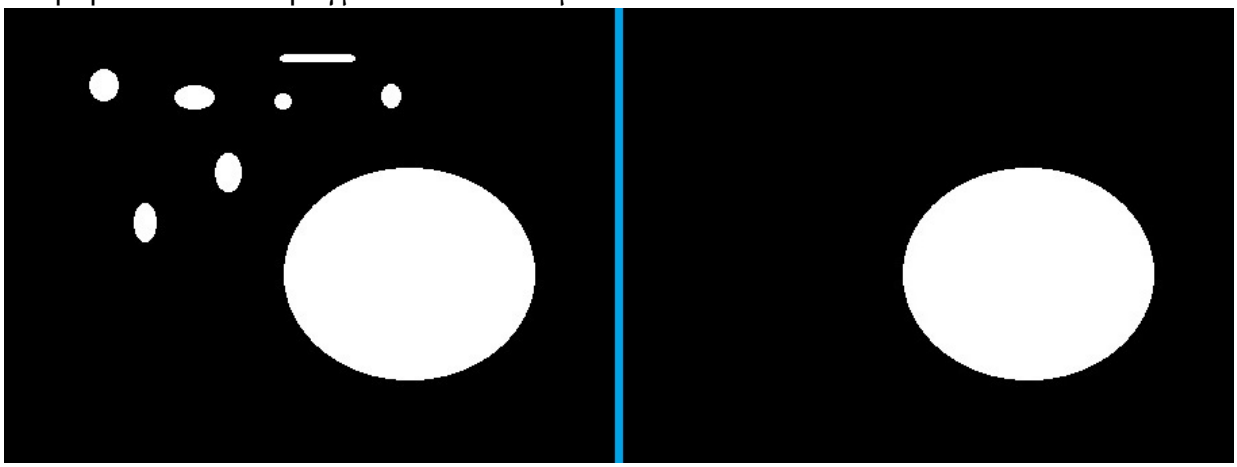
Αυτός ο τρίτος τρόπος μείωσης του θορύβου βασίζεται στην παραδοχή ότι, με σωστή ρύθμιση των παραμέτρων της ανίχνευσης, ο θόρυβος περιορίζεται σε μεμονωμένα pixel ή έστω μικρές συγκεντρώσεις pixel.

Σε αυτή την περίπτωση το συνεχές σώμα του αντικειμένου θα δημιουργεί μία πολύ μεγαλύτερη μεμονωμένη επιφάνεια από τις επιφάνειες των pixel του θορύβου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αποδοθεί το σχήμα που αναγνωρίζεται ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχει σημαντικός θόρυβος, αρκεί σαν θόρυβος να μην εμφανίζεται ένα μεγάλο αντικείμενο, ένα σταθερό περίγραμμα, κτλ. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:



Για να λειτουργήσει σωστά αυτός ο αλγόριθμος πρέπει το pixel στη θέση (1,1), δηλαδή το τέρμα επάνω αριστερά pixel της εικόνας, να είναι μηδέν. Δηλαδή να ανήκει στο φόντο της εικόνας. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα λειτουργίας του αλγόριθμου.

Το όνομα του αλγόριθμου αυτού είναι extract_largest_object2 και βρίσκεται μέσα στους βοηθητικούς κώδικες της εργασίας. Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου είναι ότι σε περιπτώσεις που υπάρχει πάρα πολύ θόρυβος, υπάρχει κίνδυνος να επιλεγεί μέρος του θορύβου αντί του πραγματικού αντικειμένου.



Επιπλέον, όταν το αντικείμενο φύγει πλέον από την εικόνα, επιλέγονται πάντα κομμάτια του θορύβου, όσο μικρά κι αν είναι αυτά. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος χωρίς προηγουμένως να έχει εκτελεστεί αυτή της κατωφλίωσης.

5.3.4 Γέμισμα οπών στο εσωτερικό σχημάτων.

Εδώ χρησιμοποιείται η προϋπάρχουσα συνάρτηση *imfill* της Matlab για να γεμίσει τις οπές που προκύπτουν στο εσωτερικό ενός σχήματος κατά την ανίχνευση.

Αυτό δεν είναι τόσο πολύ πρόβλημα θορύβου αλλά μάλλον ελλιπής ανίχνευσης. Παρ' όλα αυτά, βοηθάει στην επίλυση ενός πολύ κοινού προβλήματος της ανίχνευσης το οποίο είναι το εξής:

Όταν το αντικείμενο που αναγνωρίζεται έχει επιφάνειες πολύ έντονα ανακλαστικές υπάρχει περίπτωση οι λάμπες του φωτισμού να ανακλαστούν σε αυτές και να φωτίσουν απ' ευθείας την κάμερα. Σε αυτή την περίπτωση, εμφανίζεται ένα μέρος του αντικείμενο ως λευκό και προφανώς απορρίπτεται από τον αλγόριθμο. Στην δυαδική εικόνα αυτό απεικονίζεται ως ένα άσπρο σχήμα με μαύρες οπές.

Με τον τρόπο που υπολογίζεται η διάμετρος όμως, διαφορά στο φαινόμενο εμβαδόν από το πραγματικό μπορεί να προκαλέσει ανακρίβειες. Αυτές οι ανακρίβειες μπορούν να προληφθούν με τη χρήση αυτής της συνάρτησης. Υπάρχει όμως και κίνδυνος να αλλοίωσης αποτελεσμάτων. Γι αυτό συνιστάται η χρήση της μόνο στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Όταν το φαινόμενο της αντανάκλασης παρατηρείται σε όλα, ή τουλάχιστον τα περισσότερα, frames κατά τη ρίψη.
- Έχει χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση *imfill* κατά τον υπολογισμό της μεταβλητής *PixDist*, δηλαδή του φαινόμενου μεγέθους αναφοράς.

Σε άλλες περιπτώσεις θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της εκτός εάν ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει ότι θα έχει θετικά αποτελέσματα.

Επιπλέον, συνίσταται η χρήση της μόνο όταν είναι ενεργοποιημένες και οι μέθοδοι:

- Της κατωφλίωσης *(5.3.2)*
- Και της αποθήκευσης μόνο του μεγαλύτερου αντικειμένου ανά εικόνα *(5.3.3)*

Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να αυξηθεί σημαντικά ο θόρυβος.

Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός της θέσης στο χώρο και εκτίμηση της βαλλιστικής τροχιάς με μία μόνο κάμερα.

Σε αυτή την εργασία έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει τη θέση του αντικειμένου σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιώντας μία μόνο κάμερα.

Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε να είναι δυνατός ο υπολογισμός και της απόστασης του αντικειμένου από την κάμερα. Το πως επιτυγχάνεται αυτό μέχρι τώρα και πως θα επιτευχθεί αυτό σε αυτή την εργασία αναλύεται παρακάτω.

Παράγραφος 6.1 : Επιλογή της μεθόδου εκτίμησης της απόστασης

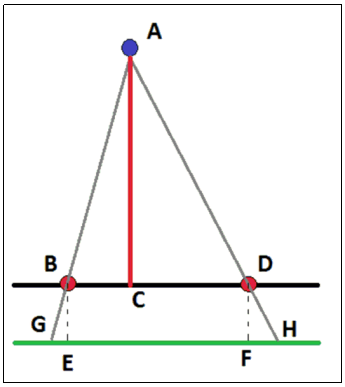
Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές περιπτώσεις όπου υπολογίζεται η απόσταση ενός αντικειμένου από την κάμερα χρησιμοποιώντας αλγορίθμους στερεοσκοπίας. Αυτός είναι και ο πλέον διαδεδομένος τρόπος αφού υπολογίζει την απόσταση με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η στερεοσκοπία βασίζεται στην ίδια αρχή στην οποία βασίζεται και ο βιολογικός εγκέφαλος, τόσο των ανθρώπων όσο και των υπόλοιπων ζώων. Δηλαδή στη διαφορά μεταξύ δύο εικόνων οι οποίες λήφθησαν από κάμερες με μία συγκεκριμένη και γνωστή απόσταση μεταξύ τους. Δύο εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί με αυτό τον τρόπο θα έχουν μια μικρή διαφορά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κάθε κάμερα κοιτάζει το αντικείμενο από ελαφρώς διαφορετική οπτική γωνία.

6.1.1 Στερεοσκοπία με δύο κάμερες

Στην περίπτωση του βιολογικού εγκεφάλου, αυτός μπορεί να εκτιμήσει την απόσταση του αντικειμένου από τα μάτια, και κατ' επέκταση και από το ίδιο το ζώο βασιζόμενο στην διαφορά των δύο εικόνων.





Μπορεί όμως να γίνει και κάτι αντίστοιχο με αλγορίθμους μηχανικής όρασης υπερθέτοντας τις δύο εικόνες και μετρώντας την απόσταση που φαίνεται να έχει μετατοπιστεί το κάθε αντικείμενο. Με γνωστή αυτή τη μετατόπιση και την απόσταση μεταξύ των δύο καμερών μπορεί να υπολογισθεί και η απόσταση του αντικειμένου από την ευθεία που διέρχεται από το εστιακό σημείο της κάθε κάμερας.

Ο τρόπος του υπολογισμού είναι αυτός που αναφέρεται στην παράγραφο *2.3.* Πλήρης απόδειξη δίνεται στο παράρτημα αυτής της εργασίας

6.1.2 Στερεοσκοπία με μία κινούμενη κάμερα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η στερεοσκοπία χρειάζεται δύο κάμερες. Αυτό όμως δεν είναι απαραίτητο. Υπάρχει μία άλλη μεθοδολογία η οποία βασίζεται στις εξισώσεις της στερεοσκοπίας. Σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνονται πολλαπλές εικόνες από την ίδια κάμερα αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων η κάμερα έχει μετακινηθεί κατά μία γνωστή απόσταση. Από αυτή τη μετακίνηση προκύπτει και η διαφορετική οπτική γωνία της κάθε εικόνας που κάνει δυνατή τη στερεοσκοπία.[2]

Αυτή η τελευταία μέθοδος οφείλει και αυτή την ύπαρξη της στο ζωικό βασίλειο. Είναι ένας από τους τρόπους που αντιλαμβάνονται την απόσταση άνθρωποι και ζώα με διόφθαλμη όραση, όταν χάσουν τον ένα οφθαλμό τους. Ακολουθεί ακριβώς την ίδια αρχή με τη στερεοσκοπία με δύο κάμερες, με τη διαφορά ότι εδώ οι δύο εικόνες δεν είναι σύγχρονες αλλά ετεροχρονισμένες.

Να σημειωθεί εδώ, ότι εξελίξεις αυτής της μεθόδου χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές σε υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα για τρισδιάστατη σάρωση αντικειμένων[3]. Εδώ χρησιμοποιούνται αλγόριθμου τύπου SIFT για την εύρεση των αντικειμένων στο χώρο, τον υπολογισμό της στάσης τους στο χώρο και την κλίμακα τους σε σχέση με την πρώτη φωτογραφία. Η τελικές διαστάσεις δίνονται αργότερα μέσα στο πρόγραμμα τελικής επεξεργασίας του τρισδιάστατου πλέγματος.

6.1.3 Μειονεκτήματα των δύο μεθόδων στερεοσκοπίας.

Και οι δύο μέθοδοι που αναλύθηκαν παραπάνω έχουν πολύ σοβαρά μειονεκτήματα όμως. Στην περίπτωση της στερεοσκοπίας με δύο κάμερες, υπάρχει το βασικό μειονέκτημα της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού καθώς πρέπει να υπάρχει υποστηρικτικός εξοπλισμός για

2 [2] 3D monocular robotic ball catching: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889013001176
3 [3] Autodesk 123D http://www.123dapp.com/

δύο κάμερες, και πρέπει να υπάρχει αρκετή υπολογιστική ισχύ για την επεξεργασία δύο εικόνων ανά frame. Άσχετα με την επιλογή της μεθόδου αναγνώρισης και μέτρησης του αντικειμένου.

Στην περίπτωση όμως κινούμενου αντικειμένου, προκύπτει και ένα δεύτερο μειονέκτημα. Το μειονέκτημα ότι οι κάμερες θεωρούνται συγχρονισμένες, και οι εικόνες θεωρούνται ότι λήφθηκαν την ίδια στιγμή. Στην πραγματικότητα αυτό είναι αδύνατο και είναι σίγουρο ότι θα υπάρχει μία μικρή χρονική διαφορά ανάμεσα στις εικόνες. Επιπλέον, αυτή η χρονική διαφορά είναι πάρα πολύ δύσκολο να υπολογισθεί, καθώς η σημασία της ακρίβειας σε αυτό τον υπολογισμό αυξάνει με την ταχύτητα του αντικειμένου που ανιχνεύεται..

Αυτή η χρονική διαφορά αλλοιώνει τη μέτρηση αφού η διαφορά στην θέση του αντικειμένου, σε κάθε εικόνα, δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ των καμερών, αλλά και από τη χρονική καθυστέρηση και την ταχύτητα του αντικειμένου. Όταν τα παραπάνω είναι γνωστά, τότε μπορεί να υπολογιστεί αυτή η διαφορά και να αντισταθμιστεί. Στην περίπτωση όμως αυτής της εργασίας, πρέπει το σύστημα να μπορεί να αντιδράσει σε οποιαδήποτε ρίψη γίνει μέσα στο οπτικό πεδίο της κάμερας του, άσχετα από την ταχύτητα του αντικειμένου.

Αντίστοιχο πρόβλημα παρουσιάζεται και με τη δεύτερη μέθοδο. Εδώ οι δύο εικόνες λαμβάνονται εξ' ορισμού σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Εδώ, βέβαια, η χρονική καθυστέρηση είναι γνωστή. Οπότε σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα του αντικειμένου είναι γνωστή μπορεί να γίνει υπολογισμός και αντιστάθμιση. Επιλύοντας μάλιστα τις εξισώσεις, παρατηρείται ότι η απόσταση υπολογίζεται ως συνάρτηση της ταχύτητας του αντικειμένου.

Παράγραφος 6.2 : Υπολογισμός του βάθους με μία μόνο κάμερα.

Αναφέρθηκε όμως ότι η μέθοδος της μίας κάμερας που κινείται είναι ένας από τους τρόπους που τα διοφθαλμικά ζώα αντιλαμβάνονται το βάθος, όταν χάνουν τη χρήση του ενός οφθαλμού. Ένας άλλος τρόπος, όμως, παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Ο Dr. Gunter von Noorden αναφέρει χαρακτηριστικά ότι:

- *"Η φύση των μη-στερεοσκοπικών στοιχείων (για το βάθος) είναι εμπειρική και έχει νόημα μόνο όταν μπορεί να συσχετιστεί με παλαιότερες εμπειρίες."*

Και η πλέον χρήσιμη εμπειρία σε αυτή την περίπτωση είναι η γνώση του μεγέθους του αντικειμένου. Ένας άνθρωπος που έχει χάσει το ένα μάτι, συνεχίζει να είναι ικανός να πιάσει το ποτήρι του από το τραπέζι και να πιει νερό. Για να πιάσει το ποτήρι του όμως πρέπει να τοποθετήσει το χέρι του στη σωστή θέση.

Αυτό καθίσταται δυνατό χάρη στην προοπτική και το βασικό φαινόμενο της προοπτικής που υπαγορεύει ότι όσο μακρύτερα είναι ένα αντικείμενο τόσο μικρότερο εμφανίζεται. Η απόδειξη αυτού έγινε στην παράγραφο *4.3*. Άρα ο άνθρωπος μπορεί να πιάσει το ποτήρι διότι γνωρίζει το μέγεθος του ποτηριού και συγκρίνοντας το με το μέγεθος που τώρα αντιλαμβάνεται κοιτάζοντας το, μπορεί να εκτιμήσει την απόσταση μέχρι αυτό[4].

Αυτή είναι και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία τελικά. Από όσα αναφέρθηκαν όμως, προκύπτει ότι πρέπει να γίνει μία μέτρηση με συγκεκριμένο τρόπο ώστε να γνωρίζει ο αλγόριθμος το μέγεθος που θα μπορεί να συγκρίνει κάθε φορά και να υπολογίζει την απόσταση. Άρα η πρώτη ενέργεια που πρέπει να γίνει είναι να αποτυπωθεί το μέγεθος που θα χρησιμεύει για τη σύγκριση και την εφαρμογή της προοπτικής εξίσωσης.

4 [4] Gunter von Noorden - Binocular Vision and Ocular Motility – Chapter 2 Binocular Vision and Space Perception, Paragraph - Monocular (Nonstereoscopic) Clues to Spatial Orientation

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, έγινε επιλογή του σφαιρικού σχήματος διότι διευκολύνει την διαδικασία υπολογισμού του μεγέθους αυτού. Και αυτό διότι σε όποια κατεύθυνση και να μετρηθεί η μέγιστη διάσταση του, η μέτρηση θα αντιστοιχεί στην διάμετρο. Αυτό απλοποιεί πάρα πολύ τη διαδικασία υπολογισμού του μεγέθους και επιπλέον κάνει τον αλγόριθμο πιο γρήγορο, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό αφού όσο περισσότερα δείγματα λαμβάνονται το δευτερόλεπτο, τόσο ακριβέστερη είναι και η εκτίμηση για το σημείο πρόσκρουσης στο οποίο πρέπει να μετακινηθεί ο βραχίονας.

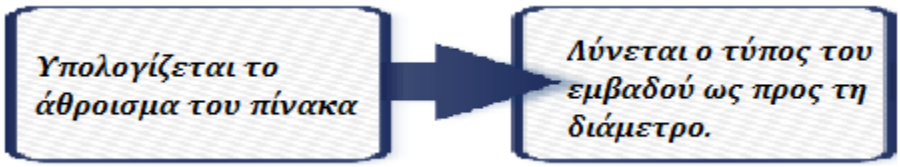
6.2.1 Αποθήκευση του μεγέθους αναφοράς και εύρεση της απόστασης.

Για την αποθήκευση του μεγέθους αναφοράς έχει επιλεχθεί να τοποθετείται το αντικείμενο σε απόσταση 1m από την κάμερα. Η ακρίβεια της μέτρησης εδώ είναι πάρα πολύ σημαντική, καθώς οποιοδήποτε σφάλμα μέτρησης εδώ θα μεταφερθεί σε όλο τον αλγόριθμο και τελικά και στην τελική πρόβλεψη. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η τοποθέτηση της κάμερας σε ένα τραπέζι, στερεωμένη στην άκρη του τραπεζιού. Στη συνέχεια με μία μετρητική ταινία υπολογίζεται απόσταση ενός μέτρου με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται. Η απόσταση θεωρητικά θα πρέπει να ξεκινάει από το σημείο εστίασης της κάμερα και όχι από την άκρη της συσκευής, οπότε αυτό προσεγγίζεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στη συνέχεια στο σημείο το οποίο απέχει ένα μέτρο από την κάμερα τοποθετείται μία ροδέλα, σχετικά μεγάλου πάχους, κατά προτίμηση πάνω από *2mm*. Ο εσωτερικός κύκλος θα βοηθήσει στον περιορισμό της σφαίρας στη απαιτούμενη θέση. Επιπλέον το μεταλλικό γκρι χρώμα της ροδέλας δεν ανιχνεύεται από τον αλγόριθμο και δεν προκαλεί ανακρίβεια στην αναγνώριση του αντικειμένου.

Αφού γίνει η τοποθέτηση, λαμβάνεται μία φωτογραφία και σε αυτή τη φωτογραφία εφαρμόζεται ο αλγόριθμος που αναφέρεται παραπάνω, στην παράγραφο *5.2.2*. Το αποτέλεσμα που θα δώσει είναι ένας πίνακας δυαδικού τύπου όπου κάθε στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα Pixel της εικόνας. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να έχουν την τιμή 1 ή 0. Έτσι διαχωρίζεται εάν το χρώμα στο Pixel που αντιστοιχεί το στοιχείο, ήταν μέσα στην χρωματική πυραμίδα που θεωρεί ο αλγόριθμος ικανοποιητική προσέγγιση στο κόκκινο χρώμα.

Στη συνέχεια εκτελείται ο ίδιος κώδικας που χρησιμοποιείται και κατά τις ρίψεις για τον υπολογισμό του μεγέθους. Εδώ εκτελούνται δύο πολύ απλά βήματα:



Στο πρώτο βήμα, καταμετρούνται τα pixel όπου έχει αναγνωρισθεί κόκκινο χρώμα καθώς τα στοιχεία που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα δεν προσφέρουν κάτι στο άθροισμα. Υπολογίζεται έτσι το εμβαδόν και αποθηκεύεται στη μεταβλητή *"Area"*. Να σημειωθεί εδώ ότι η μονάδα μέτρησης του εμβαδού εδώ είναι τα $pixel^2$.

Στη συνέχεια λύνεται ο τύπος του εμβαδού ως προς τη διάμετρο *"PixDist"* και υπολογίζεται η διάμετρος του αντικειμένου με βάση το εμβαδόν που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Αυτή είναι και η μεταβλητή στην οποία αποθηκεύεται η πληροφορία για το μέγεθος του αντικειμένου στην απόσταση αναφοράς. Εδώ η μονάδα μέτρησης στην οποία εκφράζεται η διάμετρος είναι τα pixel. Από τα παραπάνω έχει υπολογιστεί η διάμετρος που έχει η μπάλα στην εικόνα όταν έχει απόσταση από την κάμερα *1m*.

Ανατρέχοντας στη *Σχέση Β* από την παράγραφο *4.3*, γνωρίζουμε ότι το φαινόμενο μέγεθος

μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα από την απόσταση. Άρα υπολογίζοντας το λόγο του μεγέθους σε pixel σε κάθε εικόνα προς το μέγεθος *PixDist*, μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της απόστασης. Συγκεκριμένα, λύνοντας τη *Σχέση Β* ως προς *D* έχουμε:

$$\boxed{h=\frac{r}{D}\cdot ConvD} \Rightarrow \boxed{D=\frac{ConvD}{h}\cdot r}$$

Διαιρώντας κατά μέλη για κάθε εικόνα έχουμε ότι:

$$\boxed{\frac{D_2}{D_1}=\frac{\frac{ConvD}{h_2}\cdot r}{\frac{ConvD}{h_1}\cdot r}} \Rightarrow \text{Απλοποιώντας και αφού } D_1=1 \Rightarrow \boxed{D_2=\frac{h_1}{h_2}} \text{ (Σχέση Γ)}$$

Υπολογίζοντας τη *Σχέση Γ* για κάθε frame μπορεί με ακρίβεια να υπολογιστεί η απόσταση του αντικειμένου. Το D_2 είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου του αντικειμένου, όπως αναφέρεται στην παράγραφο *5.1.3,* και της κάμερας. Να σημειωθεί, ότι αυτή <u>δεν</u> εκφράζει την απόσταση των παράλληλων επιπέδων που βρίσκεται η μπάλα και η κάμερα. Τέλος, αποθηκεύεται στη μεταβλητή *"RedDistance".*

Να αναφερθεί επίσης, ότι στις δύο περιπτώσει υπολογισμού του εμβαδού και της διαμέτρου ο ορισμός της μονάδας μέτρησης είναι καταχρηστικός καθώς το pixel, ούτως ή άλλως εκφράζει ένα τετράγωνο. Παρ΄ όλα αυτά, έχει νόημα η χρήση που αναφέρεται παραπάνω αφού το μικρότερο αντικείμενο που μπορεί να απεικονιστεί είναι ένα pixel το οποίο σημαίνει, εκ παραδρομής, ότι εδώ το pixel παίζει και το ρόλο του γεωμετρικού σημείου. Έτσι, όταν αναφέρεται μήκος σε pixel, αναφέρεται στην ουσία το μήκος της μίας πλευράς του pixel. Αυτή η σύμβαση είναι πάρα πολύ σημαντική καθώς για την εύρεση των συντεταγμένων στο χώρο θα γίνει αναγωγή του ενός μέτρου σε pixel, βάσει της γνωστής διαμέτρου της μπάλας.

Επιπλέον οι πράξεις με τέτοιου είδους πίνακες, τύπου *logical* όπως ονομάζονται στη Matlab, μπορούν να εκτελεσθούν με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό βοηθάει τον αλγόριθμο να εκτελείται ακόμα πιο γρήγορα και είναι άλλο ένα πλεονέκτημα της απλής αναγνώρισης χρώματος υπέρ της μεθόδου SIFT, ο οποίος θα εκτελούνταν σε μία εικόνα έγχρωμη κατά RGB ή HSV. Άρα με την αποθήκευση των μεγεθών σε αριθμό pixel και την εκτέλεση όλων των πράξεων σε πίνακες τύπου *logical* επιταχύνεται η διαδικασία της επεξεργασίας και ανίχνευσης.

Παράγραφος 6.3 : <u>Ορισμός συστήματος συντεταγμένων και υπολογισμός της θέσης στο χώρο.</u>

Για τον υπολογισμό της θέσης του αντικειμένου στο χώρο δεν χρειάζεται επιπλέον πληροφορία πέρα από την εικόνα και την απόσταση του αντικειμένου από την κάμερα. Πριν από τον υπολογισμό της θέσης όμως πρέπει να ορισθεί το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο θα απεικονισθεί η θέση αυτή. Για την ακρίβεια μάλιστα πρέπει να ορισθούν <u>δύο</u> διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων για την κάμερα:

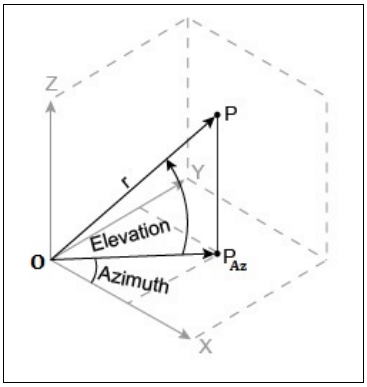
- Ένα σύστημα Σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο το εστιακό σημείο της κάμερας.
- Και ένα σύστημα Καρτεσιανών συντεταγμένων με κέντρο το εστιακό σημείο της κάμερας.

6.3.1 Ορισμός σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων και θέση του αντικειμένου.

Ο ορισμός ενός τρισδιάστατου σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων δίνει τη δυνατότητα

για την εύρεση της ευθείας που ορίζεται από το εστιακό σημείο της κάμερας και το κέντρο του αντικειμένου. Αυτή η ευθεία απαιτεί να ορισθούν μόνο οι δύο γωνίες του συστήματος:

- Το αζιμούθιο[5]
- και η ανύψωση.



Αναφορικά να σημειωθεί ότι εδώ θεωρείται μία κατεύθυνση προς την οποία και οι δύο γωνίες είναι μηδέν.

- Το αζιμούθιο (Azimuth) είναι η γωνία που ορίζει η ευθεία που ψάχνουμε με το διάνυσμα το επιπέδου της εικόνας της κάμερας, καθώς αυτή περιστρέφεται γύρω από τον κάθετο άξονα (Z) του επιπέδου προβολής της εικόνας.
- Η γωνία ανύψωσης (Elevation) προφανώς είναι η γωνία που σχηματίζεται καθώς η ευθεία περιστρέφεται γύρω από τον οριζόντιο (X) άξονα.

Με αυτές τις δύο γωνίες, όποια τιμή και να πάρει η απόσταση το τελικό σημείο θα βρίσκεται πάντα στην ίδια ευθεία. Μία γραφική απεικόνιση των παραπάνω δίνεται στην εικόνα. Η εικόνα αυτή είναι από το αρχείο βοήθειας της Matlab[6].

Ας θεωρήσουμε λοιπόν ένα σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων του οποίου:

- Η αρχή των αξόνων είναι στο εστιακό σημείο της κάμερας άρα και το κέντρο της εικόνας του κάθε frame.
- Τα σημεία χαρακτηρίζονται από δύο γωνίες (αζιμούθιο και ανύψωση) και την απόσταση από το εστιακό σημείο της κάμερας.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι εάν θεωρήσουμε ένα σημείο της εικόνας και τοποθετήσουμε εκεί το κέντρο του αντικειμένου, τότε εάν το αντικείμενο έχει, τυχαία, διαφορετικά φαινόμενα μεγέθη, οι θέσεις που προκύπτουν θα έχουν τις ίδιες γωνίες αζιμούθιου και ανύψωσης. Αυτό ισχύει διότι, όπως φαίνεται στην απόδειξη της παραγράφου *4.3*:

- *Το φαινόμενο μέγεθος εξαρτάται από την απόσταση του αντικειμένου από το εστιακό σημείο της κάμερας.*

Αντιπροσωπεύει, λοιπόν, το *"r"* του σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων.

Ίσως να θεωρήσει κανείς ότι στην παραπάνω περίπτωση, για να εμφανίζεται το αντικείμενο όλο και μικρότερο με σταθερό ρυθμό μεταβολής του φαινόμενου μεγέθους, θα πρέπει οι θέσεις του στο χώρο κάθε φορά να διαγράφουν μία ευθεία κάθετη ως προς το επίπεδο της εικόνας. Αυτό δεν ισχύει. Ένα καλό παράδειγμα για αυτό είναι το εξής:

Όταν κάποιος στέκεται στην άκρη του δρόμου και κοιτάζει σε μία κατεύθυνση παράλληλη με αυτή του δρόμου. Τότε, η άσπρη γραμμή στην άκρη του δρόμου θα φαίνεται να κινείται διαγώνια όσο πλησιάζει τον ορίζοντα. Είναι γνωστό όμως ότι η άσπρη γραμμή στην άκρη του δρόμου συνεχίζει ευθεία. Το παραπάνω οπτικό φαινόμενο οφείλεται στην προοπτική, όπως αυτό εξηγήθηκε στην παράγραφο *4.* Αντίθετα, βάσει και των κανόνων της προοπτικής, για να απεικονίζεται ένα αντικείμενο στο ίδιο σημείο της εικόνας ενώ αλλάζει το μέγεθος του, πρέπει να κινείται πάνω στην ευθεία που ορίζεται από το κέντρο του και το εστιακό σημείο της κάμερας. Από αυτό βέβαια προκύπτει ότι:

Για γωνία κώνου οπτικού πεδίου της κάμερας $\hat{a}$ *τότε πάντα,* $\boxed{180-\hat{a}/2 > Αζιμ. > \hat{a}/2}$

5 [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth
6 [6] Matlab – Product Help

Με βάση αυτό μπορεί να υπολογισθούν οι δύο γωνίες του σφαιρικού συστήματος χωρίς την απόσταση.

6.3.2 Το ωρολογιακό σύστημα του αζιμούθιου.

Για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών, εδώ θα χρησιμοποιηθεί το ωρολογιακό σύστημα αζιμούθιου[7]. Είναι το ίδιο που χρησιμοποιούν οι πιλότοι αεροσκαφών για να προσδιορίσουν τη διεύθυνση προς την οποία βρίσκεται ένα αντικείμενο σχετικά με το αεροσκάφος τους, και για την ακρίβεια σχετικά με το διάνυσμα της ταχύτητας του. Βέβαια η αναλυτική εξήγηση αυτού του συστήματος δεν είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Σε αυτό το σύστημα οι τιμές του αζιμούθιου, αντί να ξεκινάνε από τον άξονα του X του αντίστοιχου καρτεσιανού, ξεκινάνε από τον άξονα του Y. Οι πιλότοι χωρίζουν τον πλήρη κύκλο σε δώδεκα υποδιαιρέσεις, όπως το κυκλικό πρόσωπο ενός ρολογιού. Αντίστοιχα με το πρόσωπο το ρολογιού ορίζονται και οι κατευθύνσεις, από *"1 η ώρα"* έως *"12 η ώρα"*, με το τελευταίο να σημαίνει ακριβώς ευθεία, *"3 η ώρα"* να σημαίνει 90^{o} προς τα δεξιά κ.ο.κ. Το σύστημα αυτό, λοιπόν, έχει διακριτική ικανότητα 30^{o} και οι τιμές αυξάνονται κατά την δεξιόστροφη στροφή. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί η ίδια ωρολογιακή αρχή ορισμού του αζιμούθιου αλλά οι τιμές θα κυμαίνονται από *0* έως $2 \cdot pi$ και θα τηρείται ακρίβεια 15 δεκαδικών ψηφίων αφού η μεταβλητή αποθηκεύεται σε μορφή τύπου ***double***. Από αυτό προκύπτει ότι ο κανόνας που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο γίνεται, στην περίπτωση της ωρολογιακής γωνίας:

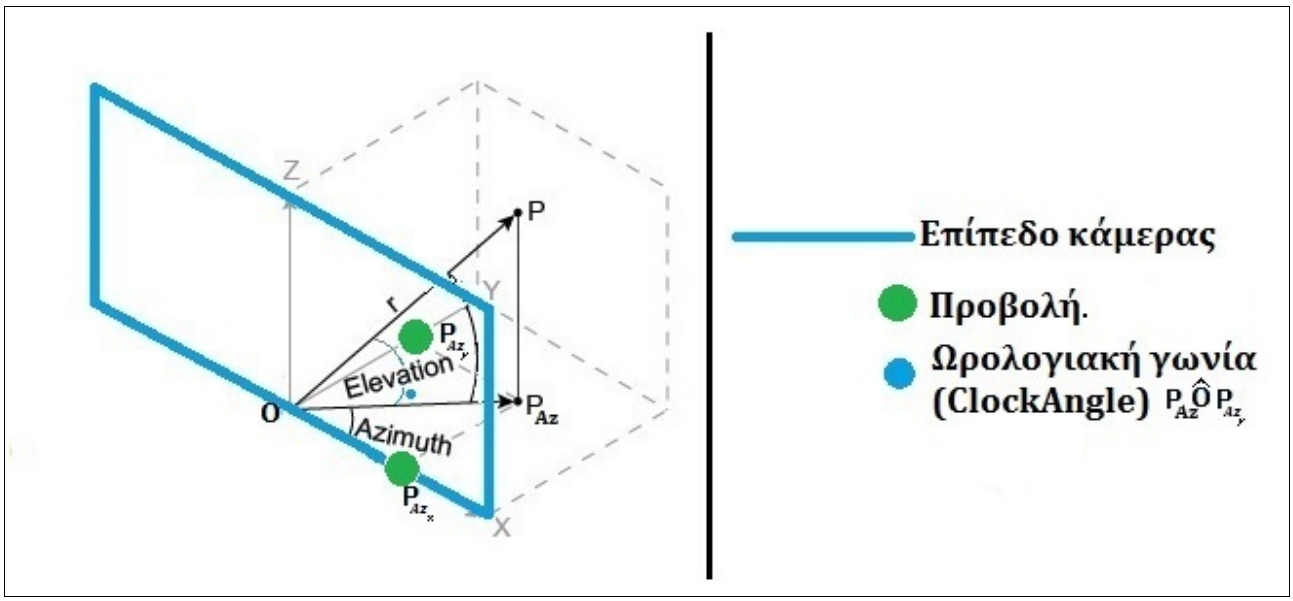
Για γωνία κώνου οπτικού πεδίου της κάμερας $\hat{a}$ *τότε πάντα,* $\boxed{-\hat{a}/2 < ClockAngle > \hat{a}/2}$

6.3.3 Η "υπόθεση του 1m".

Για να υπολογιστεί η ωρολογιακή γωνία γίνονται τα παρακάτω:

- Λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο το σημείο (P) που απεικονίζει το κέντρο του αντικειμένου, θεωρούμε ότι το σημείο αυτό βρίσκεται σε απόσταση τέτοια ώστε το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος OP_{Az_y} , όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα , να ισούται με ένα μέτρο (1m).
- Η ωρολογιακή γωνία υπολογίζεται ως: $\boxed{ClockAngle = \varepsilon\varphi^{-1}\left(\frac{P_{Az_x}}{\frac{PixDist}{0{,}068}}\right)}$ (Σχέση Δ). Εδώ το P_{Az_x} μετριέται σε pixel από το κέντρο της οθόνης προς τα δεξιά και η σχέση $PixDist/0{,}068$ μετατρέπει την απόσταση του ενός μέτρου *(1m)* σε pixel, κατά τα όσα αναφέρονται παραπάνω.

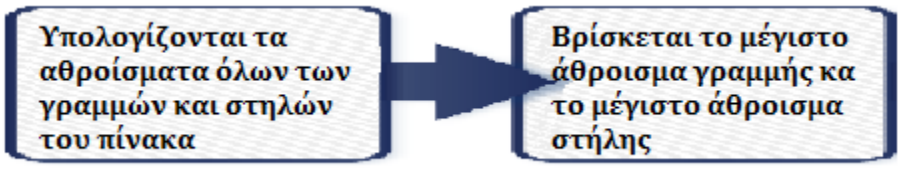
7 [7] Mariner, Liz (2007), Cleared for Takeoff: English for Pilots, Book 1, AE Link Publications, pp. 89–90, ISBN 978-0-9795068-0-2



- Στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία ανύψωση ως:

$$Elev=\frac{Zc}{OP_{Az}} \Rightarrow \boxed{Elev=\frac{Zc}{(\frac{PixDist}{0,068})\cdot\cos(ClockAngle)}}$$ (Σχέση Ε), όπου Zc τα pixel από το κέντρο της εικόνας καθ' ύψος.

Εδώ είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι για να υπολογίζονται οι αποστάσεις σε pixel από το κέντρο της εικόνας πρέπει να γίνουν τα εξής βήματα.



Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι:

- Η θέση του μέγιστου αθροίσματος γραμμής δίνει το Zc και
- Η θέση του μέγιστου αθροίσματος στήλης δίνει το Xc.

Η απλότητα αυτής της μεθόδου οφείλεται, επίσης, στην επιλογή του σφαιρικού σχήματος. Και αυτό γιατί εκείνο που υπολογίζεται με αυτή τη μέθοδο, και με ακρίβεια ανάλογη της ανάλυσης της εικόνας σε pixel, είναι η οριζόντια και η κάθετη διάμετρος του κύκλο στον οποίο απεικονίζεται η σφαίρα. Το σημείο όπου τέμνονται δύο διάμετροι είναι το κέντρο του κύκλου.

Με τον τρόπο όμως που απεικονίζει η Matlab μία εικόνα, η αρίθμηση των pixel ξεκινάει από την πάνω αριστερή γωνία. Τα pixel κατά πλάτος της εικόνας πράγματι αυξάνονται προς τα δεξιά αλλά τα pixel καθ' ύψος της εικόνας αυξάνονται προς τα κάτω. Άρα για να είναι μετράται η απόσταση από το κέντρο και να αυξάνονται οι τιμές με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί πρέπει να γίνουν οι παραπάνω μετατροπές:

- Xc=Xc-(Πλάτος_εικόνας/2)
- Zc=-Zc+(Ύψος_εικόνας/2)

Αυτές είναι και η εντολές που εκτελούνται μέσα στον αλγόριθμο, με κατάλληλη σύνταξη. Σε

περίπτωση που αλλάξει η ανάλυση της εικόνας που επεξεργάζεται πρέπει και αυτές οι τιμές να προσαρμοστούν αναλόγως.

6.3.4 Ορισμός και Αναγωγή στο καρτεσιανό σύστημα της κάμερας.

Με τις δύο παραπάνω γωνίες είναι γνωστή πλέον η ευθεία πάνω στην οποία βρίσκεται το κέντρο του αντικειμένου. Για να είναι όμως χρήσιμη η πληροφορία πρέπει να μετατραπεί στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων της κάμερας.

Αυτό ορίζεται όπως φαίνεται στην αμέσως προηγούμενη εικόνα με το *"O"* να βρίσκεται στο κέντρο της εικόνας. Αντίστοιχα τα θετικά του άξονα Z ξεκινάνε από το κέντρο της εικόνας και και αυξάνονται προς τα πάνω και, τέλος, τα θετικά του X ξεκινάνε από το κέντρο της εικόνας και αυξάνονται προς τα δεξιά της εικόνας.

Με δεδομένο αυτό το καρτεσιανό σύστημα, ισχύει ότι:

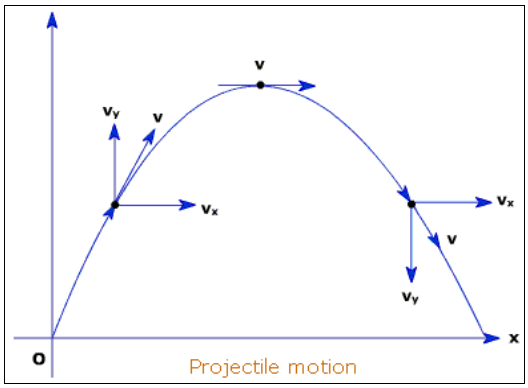
- $OP_{Az} = RedDistance \cdot \cos(Elev) = projdist$
- $X = projdist \cdot \sin(ClockAngle)$
- $Y = projdist \cdot \cos(ClockAngle)$
- $Z = RedDistance \cdot \sin(Elev)$

Τα X,Y και Z που υπολογίζονται παραπάνω είναι η θέση του αντικειμένου στο χώρο όπως υπολογίζονται με βάση την προοπτική. Η ακρίβεια αυτού του υπολογισμού ελέγχεται σε επόμενο κεφάλαιο όπου γίνεται η προσομοίωση της ρίψης στο λογισμικό V-REP.

Παράγραφος 6.4 : Υπολογισμός του σημείου πρόσκρουσης.

Παρ' όλο που ο υπολογισμός της θέσης στο χώρο με μία κάμερα παρουσιάζει μία ιδιαίτερη δυσκολία, το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι στην ουσία η εκτίμηση της βαλλιστικής τροχιάς που θα ακολουθήσει το αντικείμενο. Και μάλιστα αυτό πρέπει να γίνει σε ικανό χρόνο, ώστε να προλάβει ο βραχίονας να κινηθεί και να φέρει το άκρο του σε αυτή τη θέση.

Η πρόκληση εδώ είναι να γίνει αυτό με ακρίβεια αλλά και σε ικανοποιητικό χρόνο. Ο χρόνος αντίδρασης εξαρτάται βέβαια και από τους κινητήρες και τη στιβαρότητα της κατασκευής. Σε κάθε περίπτωση όμως έχει νόημα να βελτιστοποιηθεί αυτή η διαδικασία έτσι ώστε να έχει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικό περιβάλλον.



Έτσι για να γίνει η πρόβλεψη της τροχιάς που θα ακολουθήσει το αντικείμενο αναλύεται το διάνυσμα της κίνησης στους τρεις άξονες τους συστήματος συντεταγμένων κατά την *"Αρχή της Ανεξαρτησίας των Κινήσεων"* όπως προκύπτει από τη Νευτώνεια Φυσική.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για τυχαία στιγμή t, μπορούν να θεωρηθούν τρία διανύσματα της ταχύτητας. Και σύμφωνα με τους δύο πρώτους νόμους του Νεύτωνα, τα διανύσματα αυτά δεν αλλάζουν εάν δεν ασκηθεί δύναμη F επάνω στο σώμα. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα εδώ, είναι γνωστές. Κατά τον άξονα Z, όπως αυτός ορίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στο σώμα ασκείται η δύναμη της βαρύτητας και της αντίστασης του αέρα. Στους άλλους δύο άξονες ασκείται μόνο η δύναμη της αντίστασης του αέρα.

6.4.1 Υπολογισμός της αντίστασης του αέρα.

Παρακάτω υπολογίζεται η αντίσταση του αέρα για να αποδειχθεί ότι η επίδραση της στην τροχιά είναι αμελητέα. Αφού για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds αλλάζει η εξίσωση από την οποία δίνεται, αρχικά υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds από την εξίσωση:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu}$$ [8] Όπου:

- ***ρ***: η πυκνότητα του ρευστού
- ***v***: η σχετική ταχύτητα ρευστού αντικειμένου.
- ***l***: χαρακτηριστικός μέγεθος (εδώ η διάμετρος)
- ***μ***: Δυναμικό ιξώδες του αέρα.

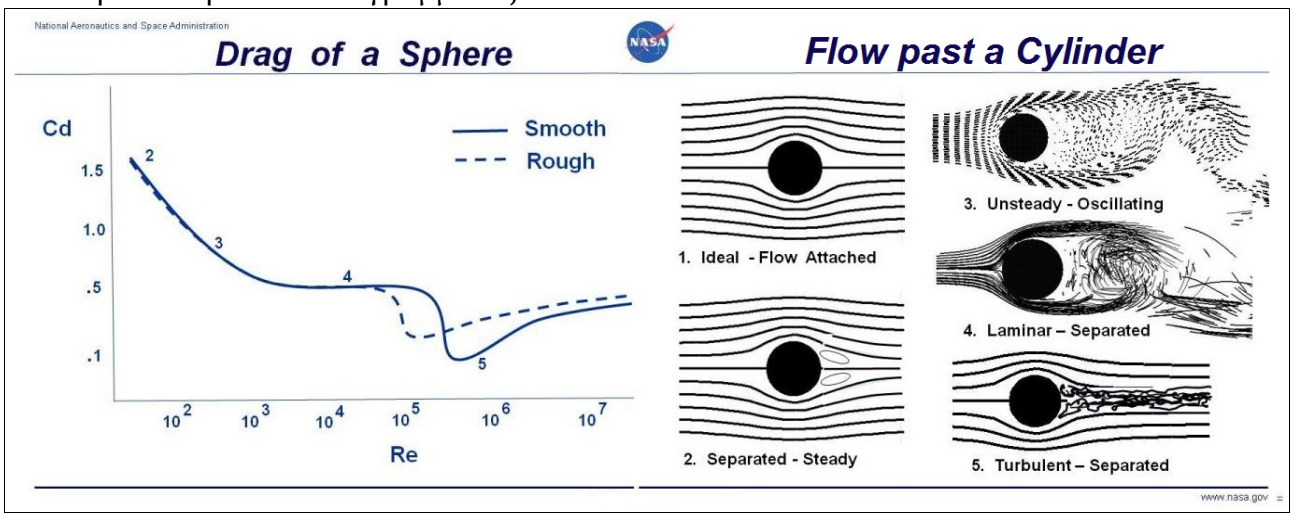
8 [8] Drag of a Sphere - NASA

Οι παραπάνω αριθμοί, για τον ατμοσφαιρικό αέρα, και θερμοκρασία ~30°C, στο *S.I.* γίνονται:

- $\rho = 1{,}225 \frac{kg}{m^3}$
- $v = 6 \frac{m}{sec}$
- $l = 0{,}068\, m$
- $\mu = 1846 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot sec}$

$$\boxed{Re = 27{,}07}$$

Βάση του παρακάτω διαγράμματος:



Γίνεται σαφές ότι ο αριθμός Reynolds που υπολογίζεται είναι ιδιαίτερα χαμηλός και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι $Cd_{sphere} = 1{,}5$. Άρα από τη εξίσωση της αντίστασης του αέρα, έχουμε:

$$F_{drag} = \frac{Cd \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2} \Rightarrow \boxed{F_{drag} = 0{,}120\, N}$$

Άρα όπως προκύπτει, για μία ταχύτητα της τάξης των *6m/sec*, η αεροδυναμική αντίσταση είναι περίπου το $^1/_6$ του Newton. Μία δύναμη πολύ μικρή καθώς, συγκριτικά, απαιτείται δύναμη περίπου 2*N* για να πιεστεί ο μηχανισμός που ανοίγει ένα στυλό.

Επιπλέον, να σημειωθεί ότι η δύναμη αυτή επηρεάζει, ως επί το πλείστον, την κίνηση στον άξονα των Y, όπως αυτός έχει οριστεί. Κι αυτό διότι, για να γίνει η ρίψη με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει μέσα στον κώνο που αποτελεί το οπτικό πεδίο της κάμερας, πρέπει η μπάλα να πεταχτεί με μικρή γωνία ανύψωσης, και άρα η συνιστώσα της ταχύτητας πάνω σε αυτόν τον άξονα θα είναι η μεγαλύτερη, και αρκετά κοντά στα *6m/sec* που υπολογίστηκαν.

Αντίστοιχα να αναφερθεί ότι η αεροδυναμική αντίσταση στους άλλους δύο άξονες είναι της τάξης του $10^{-3}\, N$, καθώς εκεί οι ταχύτητες είναι σημαντικά μικρότερες.

Επιπλέον με τα παραπάνω, να σημειωθεί ότι ο συνολικός χρόνος ρίψης κυμαίνεται από 1 ~ 2 sec. Αυτό σημαίνει ότι τυχόν ανακρίβειες στην εξίσωση της κίνησης που θα προβλεφθεί ανά άξονα, θα έχουν μικρότερη επίδραση στην πρόβλεψη της τελικής θέσης πρόσκρουσης της μπάλας πάνω στο επίπεδο του βραχίονα.

6.4.2 Πρόβλεψη της εξίσωσης της τροχιάς με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Για τους παραπάνω λόγους, η επίδραση της αεροδυναμικής αντίστασης δεν υπολογίζεται στην πρόβλεψη της τροχιάς του αντικειμένου. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι πλέον χρησιμοποιούνται οι τιμές των X,Y, και Z όπως αυτές έχουν αναχθεί στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και η μονάδα μέτρησης τους είναι πλέον τα μέτρα (m). Έτσι, οι κινήσεις που παρατηρούνται στον κάθε άξονα είναι οι παρακάτω:

- Άξονας X: Καμία δύναμη στο σώμα ⇒ ***Ευθύγραμμη Ομαλή Κίνηση.***
- Άξονας Y: Καμία δύναμη στο σώμα ⇒ ***Ευθύγραμμη Ομαλή Κίνηση.***
- Άξονας Z:δύναμη της Βαρύτητας στο σώμα ⇒ ***Ευθύγραμμη Ομαλά Επιταχυνόμενη.***

Αντίστοιχα, οι εξισώσεις της μετατόπισης στον κάθε άξονα θα είναι:

- $S_x = v_x \cdot t + S_0$
- $S_y = v_y \cdot t + S_0$
- $S_z = \frac{1}{2} a_z \cdot t^2 + v \cdot t + S_0$

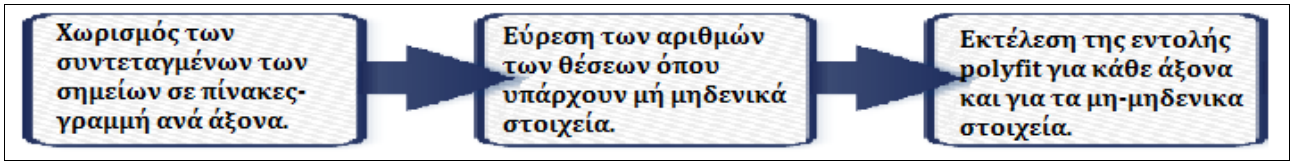
Άρα από το δείγμα των δεδομένων, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η εξίσωση της μετατόπισης σε κάθε άξονα. Οι τρεις αυτές εξισώσεις περιγράφουν τη βαλλιστική τροχιά που διαγράφει το αντικείμενο στο χώρο.

Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων όπως αυτή εφαρμόζεται από τη συνάρτηση *polyfit*. Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει σαν όρισμα:

- Τις τιμές της μεταβλητής και
- Τις τιμές των δεδομένων
- Και το βαθμό του πολυωνύμου του οποίου τους συντελεστές θα υπολογίσει ώστε να επιτύχει την καλύτερη παρεμβολή.

Εδώ γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να αποθηκεύεται και η τιμή του χρόνου (t) στον οποίο γίνεται η λήψη του κάθε frame και η αντιστοίχηση αυτών των τιμών με τις τριάδες X,Y,και Z.

Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:



Άρα για ένα συγκεκριμένο πλήθος δεδομένων, μπορεί να επιλεγεί ο βαθμός του πολυωνύμου της παρεμβολής και θα επιστραφούν οι συντελεστές του πολυωνύμου, στη μορφή ενός *πίνακα-γραμμή*, που θα το περιγράφουν. Γι αυτό θα επιλεγεί για την παρεμβολή του κάθε άξονα, ο παρακάτω βαθμός πολυωνύμου:

- Για τον ***Άξονα των X⇒ 1ου βαθμού***
- Για τον ***Άξονα των Y⇒ 1ου βαθμού***
- Για τον ***Άξονα των Z⇒ 2ου βαθμού***

Η σημασία της εκτέλεσης της παρεμβολής μόνο για μη μηδενικά στοιχεία συνδέεται με τις τεχνικές μείωσης του θορύβου, όπως αυτές αναφέρονται στην παράγραφο *5.3.* Συγκεκριμένα οι δύο πρώτοι μέθοδοι φροντίζουν στις εικόνες που υπάρχει μόνο θόρυβος να αναγράφεται η τιμή μηδέν ως εμβαδόν. Έτσι, στα frame όπου δεν υπάρχει η μπάλα μέσα, δεν γίνεται και

καταγραφή στα δεδομένα που εξάγονται για την πρόβλεψη. Τέτοια frame μπορεί να προκύψουν

- Στην αρχή της ρίψης, όπου ο άνθρωπος δεν έχει αφήσει ακόμα τη μπάλα και μπορεί να την καλύπτει με την παλάμη ή το χέρι του.
- Και στο τέλος της ρίψης όπου η μπάλα πλέον έχει βγει από το οπτικό πεδίο της κάμερας.

Επίσης να αναφερθεί ότι σαν *τιμές του X* στα ορίσματα της *polyfit* ορίζεται ο πίνακας του χρόνου, όπως αυτός μετριέται από τη Matlab. Δεν χρησιμοποιείται όμως όλος ο πίνακας. Από αυτόν χρησιμοποιούνται μόνο οι θέσεις με αριθμό ίδιο με αυτόν των θέσεων των μη-μηδενικών τιμών των X,Y,Z. Με τον τρόπο που εκτελείται ο αλγόριθμος, υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των τιμών του χρόνου και των υπολογισμένων θέσεων, με ακρίβεια 0,01*sec*.

Στις *τιμές του Y* της συνάρτησης *polyfit* δίνονται οι τιμές της υπολογισμένη θέσης στον κάθε άξονα. Σε συνδυασμό με τον βαθμού του πολυωνύμου, όπως έχει δοθεί παραπάνω, τα αποτελέσματα που αποδίδονται είναι η συνάρτηση της μετατόπισης ως προς το χρόνο σε κάθε άξονα.

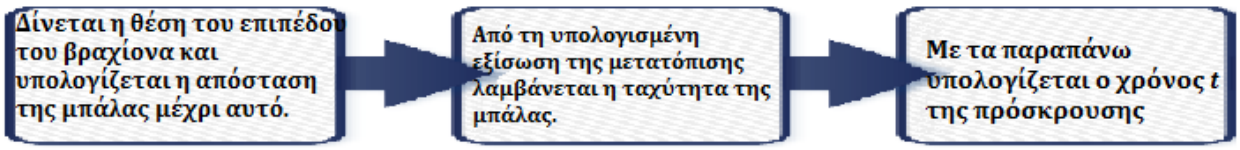
Άρα για μία οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί πλέον να υπολογιστεί η θέση του αντικειμένου σε κάθε άξονα.

6.4.3 Υπολογισμός του σημείου πρόσκρουσης.

Για να υπολογιστεί το σημείο πρόσκρουσης χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις που υπολογίστηκαν με τον τρόπο που αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο. Το μόνο που πρέπει να υπολογιστεί επιπλέον είναι ο χρόνος *t* στον οποίο θα φτάσει το αντικείμενο στο επίπεδο που κινείται ο βραχίονας ώστε να βρεθεί το σημείο πρόσκρουσης.

Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η συνάρτηση της μετατόπισης στον άξονα Y ως προς το χρόνο. Η συντεταγμένη του επιπέδου εργασίας του βραχίονα στον άξονα Y μπορεί να μετρηθεί. Και αφού το επίπεδο της εικόνας της κάμερας και το επίπεδο εργασίας του βραχίονα είναι παράλληλα, αυτή είναι και η μόνη συντεταγμένη που απαιτείται.

Για να υπολογιστεί ακολουθείται η διαδικασία που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Όπως φαίνεται και παραπάνω, από τη εξίσωση της μετατόπισης μπορεί να ληφθεί η ταχύτητα του αντικειμένου στον κάθε άξονα. Μάλιστα στους άξονες X και Y, όπου η κίνηση είναι *Ευθύγραμμη* Ομαλή, η στιγμιαία ταχύτητα είναι και η μέση ταχύτητα. Άρα:

Η ταχύτητα αντιστοιχεί στον πρώτο από τους δύο αριθμούς του πίνακα-γραμμή που αποδίδει η συνάρτηση polyfit.

Εφόσον λοιπόν η ταχύτητα είναι γνωστή μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που θα πάρει στο αντικείμενο να φτάσει από τη θέση που είναι τώρα μέχρι το επίπεδο εργασίας του βραχίονα ως $t_{2\text{imp}} = \frac{Dist_{wall}}{V_{ynow}}$. Στη συνέχεια ο χρόνος t_{imp} υπολογίζεται ως $t_{imp} = t_{now} + t_{2\text{imp}}$, όπου οι τιμές με το δείκτη *now* αντιστοιχούν στις τιμές του τελευταίου

frame, $t_{2\text{imp}}$ είναι ο χρόνος που απομένει μέχρι την πρόσκρουση και t_{imp} είναι ο χρόνος της πρόσκρουσης.

Ο λόγος που υπολογίζεται ο χρόνος που απομένει μέχρι την πρόσκρουση και στη συνέχεια προστίθεται στο χρόνο του τελευταίου frame είναι για μείωση του σφάλματος υπολογισμού. Και αυτό γιατί, για να υπολογιστεί ο χρόνος διαιρείται απόσταση δια ταχύτητα $(m/\frac{m}{sec}=sec)$. Με το να χρησιμοποιείται κάθε φορά η τελευταία μέτρηση βασίζεται ο υπολογισμός σε πιο αξιόπιστη εύρεση της θέσης του αντικειμένου στο χώρο, αφού το αντικείμενο είναι κοντύτερα στην κάμερα και εμφανίζεται πιο καθαρά στην εικόνα που λαμβάνεται. Επιπλέον, χρησιμοποιείται κάθε φορά η τελευταία εκτίμηση της ταχύτητας που είναι και ακριβέστερη.

Γνωρίζοντας πλέον το χρόνος της πρόσκρουσης μπορεί να τροφοδοτηθεί αυτή η τιμή στις εξισώσεις της μετατόπισης των αξόνων X και Z. Από κάθε μία θα δοθεί η αντίστοιχη συντεταγμένη του σημείου πρόσκρουσης στο χώρο. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, δεν υπάρχει λόγος υπολογισμού της τιμής για τον άξονα Y αφού αυτή είναι γνωστή και βάσει αυτής έγιναν οι υπολογισμοί. Άρα, εάν ονομάσουμε τους πίνακες-γραμμή με τους συντελεστές για τους άξονες X και Z ως Xv και Zv αντίστοιχα, το σημείο πρόσκρουσης στο χώρο δίνεται τελικά από τα παρακάτω:

- $\boxed{X_{imp}=X_v(1)\cdot t_{imp}+X_v(2)}$
- $\boxed{Y_{imp}=\sigma\tau\alpha\theta.}$, εδώ χρησιμοποιείται απλώς η μέτρηση από την κάμερα μέχρι το εμπρός μέρος του βραχίονα.
- $\boxed{Z_{imp}=\frac{1}{2}Z_v(1)\cdot t_{imp}^2+Z_v(2)\cdot t_{imp}+Z_v(3)}$

Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση της ρίψης στο λογισμικό V-REP.

Με όλη τη θεωρία δομημένη, πρέπει να γίνει έλεγχος των παραπάνω σε πειραματικό περιβάλλον. Η κατασκευή του πραγματικού βραχίονα όμως δεν προχώρησε με τον ίδιο ρυθμό που προχώρησε η ανάπτυξη της θεωρίας.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να γίνουν τα πρώτα πειράματα σε περιβάλλον προσομοίωσης. Αυτή η επιλογή έδινε και την επιπλέον δυνατότητα ότι μπορούσαν να λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο τιμές όπως η απόσταση της μπάλας από την κάμερα, η ταχύτητα της μπάλας στον κάθε άξονα, κ.α. Αυτά όλα χρησιμοποιήθηκαν για να βρεθούν και τυχόν σφάλματα στον κώδικα, αφού τις αντίστοιχες τιμές προσπαθούσε και ο κώδικας της μηχανικής όρασης να υπολογίσει.

Το λογισμικό V-REP υποστηρίζει τη σύνδεση με τη Matlab σαν remote API, οπότε μπορούσε να γίνεται η προσομοίωση των μοντέλων της φυσικής στο V-REP και η λήψη των δεδομένων, οι υπολογισμοί και η απόδοση των αποτελεσμάτων από τη Matlab.

Να σημειωθεί ότι θα μπορούσε όλη η προσομοίωση να γίνει μέσα στη Matlab. Αυτό όμως θα απαιτούσε ένα πολύπλοκο μοντέλο στο Simulink καθώς και ευρηματικό προγραμματισμό για να προσομοιωθεί η κάμερα και η λήψη εικόνων από αυτή[9]. Η χρήση του V-REP κάνει την προσομοίωση απείρως ευκολότερη και αποδοτικότερη όσον άφορα τη συγκέντρωση δεδομένων και τον πειραματισμό.

Παράγραφος 7.1 : Περίληψη των δυνατοτήτων του λογισμικού V-REP.

Το V-REP είναι ένα πολυεπίπεδο λογισμικό το οποίο συνδυάζει περίπλοκες μηχανές προσομοίωσης φυσικής με υποστήριξη για 7 γλώσσες προγραμματισμού, σύνδεση με εξωτερικούς ελεγκτές και με προγράμματα υπολογισμών όπως η Matlab και το Octave.

Μάλιστα η διαδικασία της προσομοίωσης είναι πλήρως ελέγξιμη και μπορεί να οποιαδήποτε παράμετρος να αλλαχθεί ανά πάσα στιγμή. Δίνεται λοιπόν η δυνατότητα να γίνει ένα μέρος της προσομοίωσης με ένα σετ παραμέτρων και στη συνέχεια αυτό να αλλάξει με ένα άλλο σετ παραμέτρων. Άρα παρέχεται η δυνατότητα κάθε μέρος της προσομοίωσης να εστιάζει σε διαφορετικές πτυχές αυτού που προσομοιώνεται επιτυγχάνοντας ακρίβεια με μειωμένο υπολογιστικό κόστος.

Επιπλέον, δίνεται στο χρήστη η επιλογή δημιουργίας πλαισίων διαλόγου εξ' αρχής. Αυτά μπορούν να είναι ενεργά συνέχεια ή μόνο κατά την προσομοίωση. Επιπλέον, κάθε επιλογή,

9 [9] Robsim Toolbox http://sites.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/wpage.php?wpage_id=71

τιμή ή χειριστήριο μέσα σε αυτά τα πλαίσια μπορεί να χειριστεί με τους παρακάτω τρόπους:

- Διαδραστικά από το χρήστη μέσω συσκευών διασύνδεσης χρήστη-μηχανής (πληκτρολόγιο, ποντίκι, κ.α.)
- Δυναμικά, μέσω προγράμματος ενσωματωμένου στην προσομοίωση ή σε ένα από τα αντικείμενα αυτής (π.χ. μοντέλο ενός αυτόνομου οχήματος).
- Δυναμικά, μέσω εξωτερικής σύνδεσης δεδομένων. Τέτοιες συνδέσεις μπορεί να είναι:
  - Ένας μικροελεγκτής.
  - Ο ελεγκτής ενός ρομπότ.
  - Ένα λογισμικό όπως η Matlab
  - Ένας server ο οποίος λαμβάνει δεδομένα από ένα οποιοδήποτε λογισμικό (π.χ. Πακέτο CAD), τα μετατρέπει κατάλληλα, τα αποστέλλει στο V-REP και το αντίθετο.
- Παθητικά ακολουθώντας μία μεταβλητή που υπολογίζεται από την προσομοίωση. Αυτό το τελευταίο δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας οργάνων εποπτείας μέσα στην προσομοίωση και βοηθάει στην οπτική αποτύπωση σε πραγματικό χρόνο της τηλεμετρίας που αποθηκεύεται ψηφιακά.

Τέλος, μπορεί να προσομοιωθεί μία πληθώρα αισθητήρων, όπως επαγωγικοί, υπέρυθροι, sonar, radar, γυροσκόπια κ.α.

Όλα αυτά κάνουν το V-REP εξαιρετικά ισχυρό στην δημιουργία προσομοιώσεων και στη διεξαγωγή πειραμάτων. Μπορεί ακόμα να παίξει και το ρόλο του ελεγκτή ενός πραγματικού συστήματος αφού διαθέτει εξαιρετικές δυνατότητες συνδέσεως με πραγματικά συστήματα και μικροελεγκτές.

Παρακάτω θα αναφερθούν περιληπτικά οι δυνατότητες του λογισμικού.

7.1.1 Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών μοντέλων.

Το V-REP υποστηρίζει την εκτέλεση προσομοιώσεων μέσω τριών μοντέλων φυσικής. Και τα τρία μπορούν να αποδώσουν τη νευτώνεια φυσική με εξαιρετική ακρίβεια. Συγκεκριμένα τα τρία μοντέλα Φυσικής είναι τα παρακάτω:

- Μοντέλο ***Bullet physics library*** [10]

Αυτό το μοντέλο είναι μία μηχανή φυσικής "*ανοιχτού κώδικα"* η οποία διαθέτει ανίχνευση σύγκρουσης σε τρεις διαστάσεις, δυναμική άκαμπτου σώματος και δυναμική εύκαμπτου σώματος. Η τελευταία δεν υποστηρίζεται ακόμα στο V-REP. Άλλες εφαρμογές αυτής της μηχανής είναι η δημιουργία ειδικών εφέ σε ταινίες και ως πυρήνας σε διάφορα ηλεκτρονικά παιχνίδια, όπως το *"Grad Theft Auto IV & V"*.

- Μοντέλο ***Open Source Dynamics (ODE)*** [11]

Αυτό το μοντέλο είναι μία μηχανή φυσικής *"ανοιχτού κώδικα"* η οποία έχει σαν βασικά στοιχεία, την τρισδιάστατη ανίχνευση της σύγκρουσης, τη δυναμική άκαμπτου σώματος την τριβή και τον υπολογισμό αρθρώσεων. Εκδόσεις αυτού του μοντέλο χρησιμοποιούνται και στο Simulink για την επίλυση του μοντέλου καθώς και σε πολλά παιχνίδια όπως το *"Call of*

10 [10] Bullet Physics http://www.bulletphysics.org/
11 [11] Open Source Dynamics http://www.ode.org/

Juarez" κ.α.

- Μοντέλο ***Vortex Dynamics***[12]

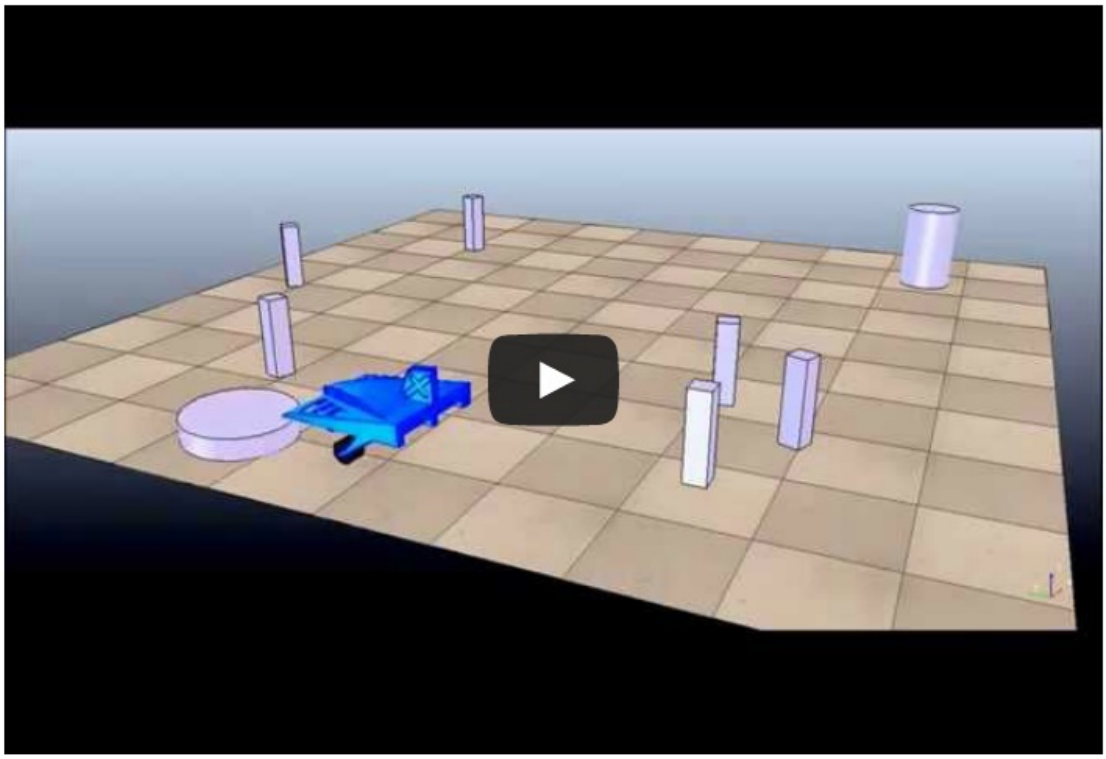
Μία μηχανή φυσικής η οποία διατίθεται εμπορικά. Παρέχει προσομοιώσεις φυσικής υψηλής πιστότητας και περιλαμβάνει πολλές επεξεργάσιμες παραμέτρους οι οποίες εκφράζονται με πραγματικές μονάδες. Η μηχανή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για προσομοιώσεις βιομηχανικών συστημάτων καθώς και στο πεδίο της έρευνας. Το plug in του V-REP για αυτή τη μηχανή είναι δοκιμαστικό και μπορεί να εκτελέσει προσομοιώσεις μόνο μέχρι 20 *sec*.

Με τα παραπάνω μπορούν να προσομοιωθούν οι αντιδράσεις αντικειμένων μεταξύ τους, με τρόπο που πλησιάζει πάρα πολύ τον πραγματικό. Κάνουν πράγματα δυνατά, όπως:

- Πτώση αντικειμένων.
- Διαχείριση αντικειμένων από μία αρπάγη λόγω μορφής ή τριβής.
- Τη μετακίνηση αντικειμένων από ένα ιμάντα μεταφοράς.
- Την ρεαλιστική κίνηση ενός οχήματος σε ανώμαλο έδαφος.

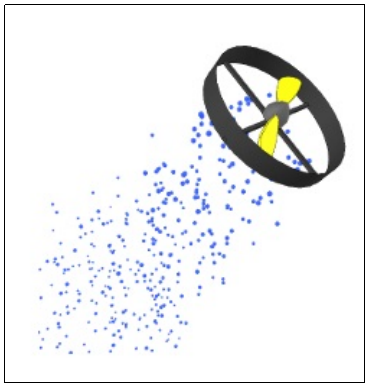
Επιπλέον το V-REP μπορεί να κάνει ταυτόχρονα και κινηματική και δυναμική προσομοίωση των αντικειμένων της κάθε σκηνής. Αυτό μειώνει το υπολογιστικό φόρτο και αποδίδει ακριβέστερα αποτελέσματα από μία καθαρά δυναμική προσομοίωση όπως κάνει το Matlab.

Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα για πλήρη κατανομή τόσο των δυναμικών όσο και των κινηματικών στοιχείων της προσομοίωσης για αξιόπιστη τηλεμετρία.[13]



12 [12] Vortex Dynamics http://www.cm-labs.com/
13 https://youtu.be/QYvxwLBb7n0

Μπορούν επίσης να προσομοιωθούν και δυναμικά σωματίδια, κάνοντας δυνατές προσομοιώσεις ρευστομηχανικής, προσομοιώσεις jet και προσομοιώσεις προπελών.



Οι παραπάνω δυνατότητες προσομοίωσης φυσικής είναι και οι πιο σημαντικές για την προσομοίωση ενός ρομποτικού συστήματος. Και αυτό γιατί επιτρέπουν στο προσομοιωμένο σύστημα να επιδράσει και να επηρεάσει το περιβάλλον του, αλλά και στο περιβάλλον να επηρεάσει το ρομποτικό σύστημα.Δυνατότητα υπολογισμού ευθύ και αντίστροφου κινηματικού μετασχηματισμού.

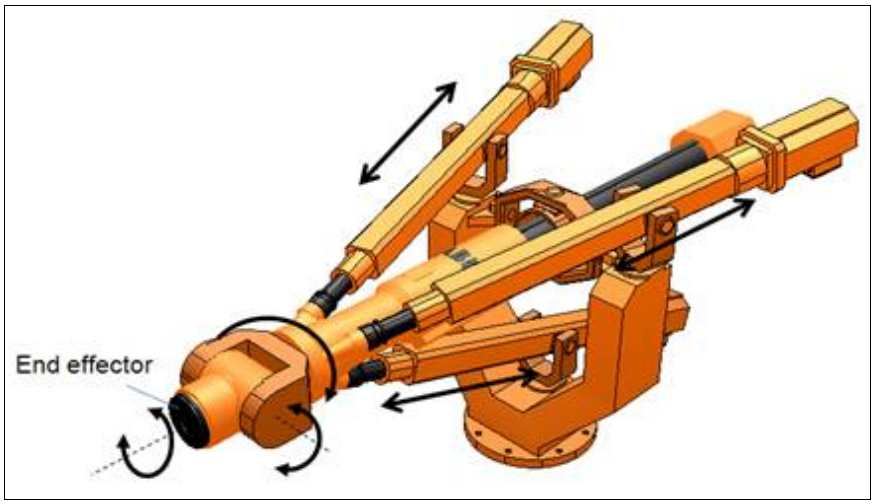
Η δυνατότητα αντίστροφου κινηματικού μετασχηματισμού του V-REP είναι αρκετά ισχυρή και ευέλικτη. Επιτρέπει στο χρήστη να χειρίζεται το σύστημα είτε σε λειτουργία αντίστροφου κινηματικού ή ευθύ κινηματικού.

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δώσει σε ένα ρομποτικό σύστημα μέσα στο V-REP μόνο την επιθυμητή τροχιά που πρέπει να ακολουθήσει ο βραχίονας. Από αυτό μπορεί το V-REP να υπολογίσει τις απαιτούμενες θέσεις των αρθρώσεων και να τις στείλει σαν εντολές στους κινητήρες. Αυτό, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα να συνδέεται με τον ελεγκτή ενός πραγματικού ρομπότ, αυξάνει κατακόρυφα τη χρηστικότητα ενός ρομποτικού συστήματος και καθιστά τον προγραμματισμό του ιδιαίτερα εύκολο. Βέβαια, πολλοί κατασκευαστές ρομποτικών συστημάτων έχουν την ίδια δυνατότητα ενσωματωμένη στον ελεγκτή του ρομπότ.

Η διαφορά εδώ είναι ότι, η παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει για ένα σύστημα που ο χρήστης έχει σχεδιάσει και κατασκευάσει μόνος του, με ένα πολύ βασικό μικροελεγκτή (π.χ. Arduino) σαν ελεγκτή του ρομπότ. Και μάλιστα στην προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιήσει και τα μοντέλα του CAD αυτούσια αν κριθεί απαραίτητο.

Αυτό είναι που πραγματικά αυξάνει της δυνατότητες πειραματισμού αλλά και αργότερα οδήγησης ενός πειραματικού ρομπότ.

Προφανώς βέβαια το ίδιο μπορεί να γίνει και για το ευθύ κινηματικό. Το οποίο γενικά θεωρείται και πιο εύκολο σαν πρόβλημα. Αυτό ισχύει στην πλειονότητα των περιπτώσεων αλλά πολλές φορές αποδεικνύεται το ίδιο μεγάλη πρόκληση με το αντίστροφο κινηματικό. Τέτοια παραδείγματα είναι γενικά οι κλειστές κινηματικές αλυσίδες όπως αυτή της επόμενης εικόνας:



7.1.2 Διαφορετικοί τρόποι προγραμματισμού στο V-REP.

Το V-REP βασικά δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να προγραμματίσει με διάφορους τρόπους και να ελέγξει την προσομοίωση. Αυτοί γενικά μπορούν να χωριστούν σε έξι βασικές κατηγορίες:

- ***Ενσωματωμένος κώδικας***: Σε αυτή την περίπτωση ο κώδικας γράφεται στη γλώσσα προγραμματισμού *"Lua"*. Αυτή μοιάζει με τη γλώσσα python και είναι σχετικά εύκολη στη μάθηση, σε σύγκριση με άλλες γλώσσες. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει είτε στη σκηνή και να επηρεάζει όλα τα αντικείμενα, είτε σε κάποιο αντικείμενο ή μοντέλο. Ή ακόμα και στα δύο. Στο δέντρο ιεραρχίας φαίνεται ποια αντικείμενα έχουν ενσωματωμένους κώδικες. Να σημειωθεί εδώ ότι ένας ενσωματωμένος κώδικας μπορεί να επηρεάσει μόνο το αντικείμενο στο οποίο έχει ενσωματωθεί και τα *"τέκνα"* αυτού του αντικειμένου. Γι αυτό, εάν πρέπει ένας κώδικας να επηρεάζει όλη την προσομοίωση, πρέπει να ενσωματωθεί στη σκηνή.
- ***Πρόσθετα κώδικες***: Αυτός ο τρόπος μοιάζει με τον τρόπο που λειτουργούν τα toolbox στη Matlab. Είναι δηλαδή ένα σύνολο συναρτήσεων, γραμμένων στη *lua* βέβαια, που μπορούν να εγκατασταθούν και να κληθούν σε πολλές διαφορετικές προσομοιώσεις.
- ***plugin***: Εδώ η λειτουργικότητα είναι αντίστοιχη με τα πρόσθετα, αλλά τα *plugins* έχουν ευρύτερο φάσμα εφαρμογών καθώς μπορεί να αποτελούν υποστήριξη για την επικοινωνία ενός πραγματικού ρομπότ με το V-REP.
- ***Εξωτερικό API***: Αυτός είναι βασικά ο τρόπος που επιλέχθηκε να εκτελεστεί η προσομοίωση σε αυτή την εργασία. Εδώ, όλοι ή ένα μέρος των υπολογισμών και του προγραμματισμού γίνεται εξωτερικά από το V-REP, σε ένα πρόγραμμα όπως η Matlab, σε γλώσσα C/C++ κ.α. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν περισσότερες από 100 συναρτήσεις επικοινωνίας μεταξύ V-REP και:
  - Matlab
  - Octave
  - C/C++
  - Java
  - Python
  - κ.α.
- ***Απ' ευθείας σύνδεση με το λειτουργικό σύστημα του ρομπότ (ROS)***: Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να δημιουργηθεί ένας κόμβος επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή του ρομπότ ή μίας εφαρμογής στον ελεγκτή και του V-REP.
- ***Ειδικός server για επικοινωνία με προγράμματα ή ελεγκτές***

Οι παραπάνω μέθοδοι καταγράφονται, μαζί με αρκετές χρήσιμες πληροφορίες στον παρακάτω πίνακα:

	Embedded script	Add-on	Plugin	Remote API client	ROS node	Custom client/server
Control entity is external (i.e. can be located on a robot, different machine, etc.)	No	No	No	Yes	Yes	Yes
Difficulty to implement	Easiest	Easiest	Relatively easy	Easy	Relatively difficult	Relatively difficult
Supported programming language	Lua	Lua	C/C++	C/C++, Python, Java, Matlab, Octave, Urbi	Any [1]	Any
Simulator functionality access (available API functions)	>280 functions, extendable	>270 functions, extendable	>400 functions	>100 functions, extendable	>100 services, >30 publisher types, >25 subscriber types, extendable	custom implementation (up to 300 func.)
The control entity can control the simulation and simulation objects (models, robots, etc.)	Yes	Yes, but not recommended	Yes	Yes	Yes	Yes
The control entity can start, stop, pause and step a simulation	Stop, pause	Start, stop, pause	Start, stop, pause, step	Start, stop, pause, step	Start, stop, pause, step	Start, stop, pause, step

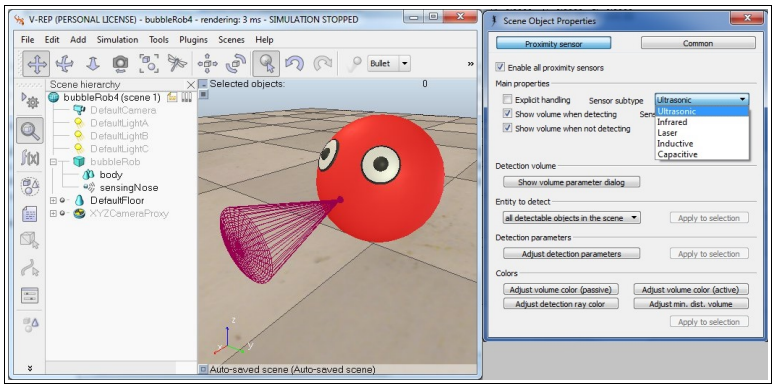
	Embedded script	Add-on	Plugin	Remote API client	ROS node	Custom client/server
The control entity can customize the simulator	No	Yes	Yes	No	No	No
Code execution speed	Relatively slow [2]	Relatively slow [2]	Fast	Depends on programming language	Depends on programming language	Depends on programming language
Communication lag	None	None	None	Yes, reduced [3]	Yes, reduced	Yes, can be reduced
Control entity is fully contained in a scene or model, and is highly portable	Yes	No	No	No	No	No
API mechanism	Regular API	Regular API	Regular API	Remote API	ROS	Custom communication + regular API
API can be extended	Yes, with custom Lua functions	Yes, with custom Lua functions	Yes, V-REP is open source	Yes, Remote API is open source	Yes, ROS plugin is open source	N/A
Control entity relies on	Nothing	Nothing	Nothing	Sockets + Remote API plugin	Sockets + ROS plugin + ROS framework	Custom communication + script/plugin
Synchronous operation [4]	Yes, inherent. No delays	Yes, inherent. No delays	Yes, inherent. No delays	Yes. Slower due to comm. Lag	Yes. Slower due to comm. Lag	Yes. Slower due to comm. Lag
Asynchronous operation [4]	Yes, via threaded scripts	No	No (threads available, but API access forbidden)	Yes, default operation mode	Yes, default operation mode	Yes

[1] Depends on what ROS currently supports
[2] The execution of API functions is however very fast
[3] Lag reduced via streaming and data partitioning modes
[4] *Synchronous* in the sense that each simulation pass runs synchronously with the control entity, i.e. simulation step by step

7.1.3 Δυνατότητα προσομοίωσης αισθητήρων.

Πέρα όμως από τα παραπάνω, η ποια σημαντική δυνατότητα του V-REP είναι η προσομοίωση αισθητήρων. Αρχικά στο χρήστη θα φανεί ότι υπάρχει πολύ μικρή δυνατότητα προσομοίωσης αισθητήρων. Και αυτό διότι υπάρχουν μόνο τρία είδη αισθητήρων που μπορούν να προστεθούν σε μία προσομοίωση:

- Αισθητήρας εγγύτητας
- Οπτικός αισθητήρας
- Και αισθητήρας δύναμης.

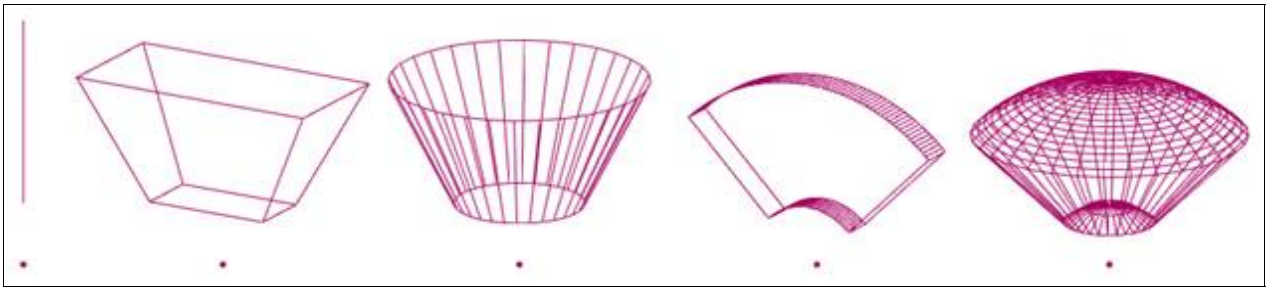


Παρ' όλα αυτά, οι δυνατότητες προσαρμογής των αισθητήρων εγγύτητας δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να τον κάνει να συμπεριφέρεται αντίστοιχα με τους περισσότερους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται.

Οι διαφορετικές μορφές που μπορεί να πάρει ο αισθητήρας είναι:

- Υπερήχων.
- Υπέρυθρων.
- Laser
- Επαγωγικός
- Χωρητικός.

Για κάθε ένα είδος αισθητήρα, τα υπόλοιπα αντικείμενα μπορούν να γίνουν ανιχνεύσιμα ή όχι από αυτή την τεχνολογία αισθητήρα. Με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα που θα δώσει αυτός ο αισθητήρας είναι πολύ κοντά στα πραγματικά. Επιπλέον, μπορεί ο χώρος ανίχνευσης του αισθητήρα να ρυθμιστεί έτσι ώστε να πλησιάζει το χώρο του πραγματικού. Τα σχήματα που μπορεί να πάρει είναι τα παρακάτω:



Να σημειωθεί εδώ ότι κάθε διάσταση του χώρου του αισθητήρα είναι προσαρμόσιμη (γωνία, νεκρή απόσταση, πλάτος, κλπ.).

Επιπλέον μπορεί να προσομοιωθεί και οπτικός αισθητήρας, όπως χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασίας. Εδώ μπορεί επίσης να ρυθμιστεί το σχήμα του χώρου καθώς και αν θα είναι προοπτικό το είδωλο που θα αντιλαμβάνεται ή όχι.

7.1.4 Ορισμός αρθρώσεων στο V-REP.

Μια άλλη πάρα πολύ σημαντική λειτουργία του V-REP είναι αυτή του ορισμού αρθρώσεων. Υπάρχουν τρία είδη αρθρώσεων:

- Περιστροφική

- Πρισματική
- Και Σφαιρική.

Με συνδυασμό των παραπάνω μπορούν να δημιουργηθούν ακόμα και οι πιο πολύπλοκοι μηχανισμοί. Επιπλέον κάθε άρθρωση μπορεί να είναι παθητική ή ενεργητική. Στην περίπτωση της ενεργητικής άρθρωσης, μπορεί να ελέγχεται η θέση ή η ταχύτητα. Όταν γίνεται έλεγχος θέσης δίνεται η δυνατότητα να ορισθεί και ένα ελεγκτής PID.

Σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει προσομοίωση ενός κινητήρα, καθώς και των διαφόρων ιδιοτήτων αδράνειας και μάζας ώστε να προβλέπεται σωστά η συμπεριφορά του κινητήρα στις διάφορες φορτίσεις.

Να σημειωθεί ότι ακόμα και οι παθητικές αρθρώσεις λαμβάνονται υπ' όψιν στις περιπτώσεις υπολογισμού του ευθέως ή αντίστροφου κινηματικού μετασχηματισμού.

Παράγραφος 7.2 : Δημιουργία μίας προσομοίωσης στο V-REP.

Για να δημιουργηθεί μία προσομοίωση στο V-REP πρέπει να ορισθούν όλα όσα χρειάζονται από αυτά που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Και το πιο σημαντικό, ίσως, είναι το μοντέλο του συστήματος που θα προσομοιωθεί. Στην ουσία, αυτό μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα και να εισηχθεί απ' ευθείας από το σύστημα CAD. Η εισαγωγή γίνεται ως πλέγμα τύπου .stl. Αυτό προσφέρει και τη μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανίχνευση συγκρούσεων, αλλά καταναλώνει πολύ υπολογιστική ισχύ και καθυστερεί την προσομοίωση. Για το λόγο αυτό, αυτό που γίνεται συνήθως είναι ότι, εισάγονται τα σχέδια ως .stl για οπτικοποιήση του μοντέλου αλλά ρυθμίζεται το V-REP έτσι ώστε να μην τους δίνει σημασία.

Το V-REP δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ορίζει εάν το κάθε σώμα θα αντιδράει με τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα οι δυνατότητες που δίνονται ορίζουν εάν σώμα θα είναι:

- Συγκρούσιμο.
- Ορατό.
- Ανιχνεύσιμο.
- Μετρήσιμο.

Με κατάλληλο συνδυασμό των παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί το απαιτούμενο αποτέλεσμα με τη λιγότερη δυνατή υπολογιστική ισχύ.

Επιπλέον στο V-REP υπάρχουν και επίπεδα ορατότητας. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν περίπου όπως και τα αντίστοιχα επίπεδα στο AutoCAD. Η διαφορά είναι ότι εδώ το κάθε αντικείμενο μπορεί να είναι ορατό σε περισσότερα από ένα επίπεδα. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν πολλές διαφορετικές απεικόνισης της προσομοίωσης και να εναλλάσσονται αυτές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Σαν καλή πρακτική, δημιουργείται μία απεικόνιση με όλα τα αντικείμενα που μπορούν να αλληλεπιδράσουν και μία με όλα τα αντικείμενα που έχουν καλλωπιστικό σκοπό.

Όλα τα παραπάνω ορίζονται μέσα στο δέντρο ιεραρχίας όπου τοποθετούνται πριν την προσομοίωση. Εκεί μπορούν να οριστούν και οι σχέσεις εξάρτησης (parent-child) μεταξύ των διαφόρων αντικειμένων. Αυτές είναι οι σχέσεις που ορίζουν την κινηματική του τελικού μοντέλου. Δεν είναι απαραίτητο όλα τα αντικείμενα στην προσομοίωση να ανήκουν στο ίδιο μοντέλο, είναι όμως απαραίτητο κάθε μοντέλο να έχει διαφορετική βάση.

Να σημειωθεί εδώ ότι ο ορισμός της σχέσης εξάρτησης σε μία άρθρωση είναι ιδιαίτερα σημαντικός και πρέπει να γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο. Και αυτό γιατί η σειρά αυτή επηρεάζει τη λειτουργία της άρθρωσης. Σαν παράδειγμα, για να ορισθεί ο κινητήρας ενός

τροχού για ένα όχημα, πρέπει:

- Να υπάρχει ήδη η βάση του οχήματος.
- Να εισαχθεί η άρθρωση στο κατάλληλο σημείο στο χώρο σε σχέση με τη βάση.
- Να εισαχθεί ο τροχός επίσης στο κατάλληλο σημείο.
- Να επιβεβαιωθεί ότι και τα δύο σώματα είναι αντιδράσιμα (respondable).
- Και τέλος να ορισθεί η βάση ως *"γονέας"* της άρθρωσης και η άρθρωση ως *"γονέας"* του τροχού.

Τα παραπάνω είναι η ραχοκοκαλιά του ορισμού της προσομοίωσης αφού η άρθρωση μένει ακίνητη ως προς τη βάση της και κινεί το *"τέκνο"* της. Να σημειωθεί εδώ ότι τα όποια φορτία μεταφέρονται μέσω της βάσης σε άλλες αρθρώσεις μέσω των σχέσεων εξάρτησης. Δηλαδή στην περίπτωση μίας ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας, θα υποστούν όλες οι αρθρώσεις το φορτίο της ανύψωσης ενός βάρους σχεδόν όπως αυτό θα κατανεμηθεί στο πραγματικό σύστημα. Οι όποιες ανακρίβειες προκύψουν οφείλονται στο γεγονός ότι θεωρείται πλήρως άκαμπτη η βάση της κάθε άρθρωσης, τουλάχιστον στα δύο πρώτα μοντέλα φυσικής που αναφέρονται παραπάνω στην παράγραφο *7.1.1*. Σε κάθε περίπτωση όμως οι ανακρίβειες αυτές θα είναι πολύ μικρές, και εφόσον οι κινητήρες έχουν μοντελοποιηθεί σωστά, μπορούν να εξαχθούν πολύ χρήσιμα αποτελέσματα από αυτού του είδους την προσομοίωση. Αφού ορισθούν όλα τα μοντέλα της προσομοίωσης και δημιουργηθεί και ο κώδικας, μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση.

Να σημειωθεί εδώ ότι υπάρχουν πέντε διαφορετικές επιλογές ακρίβειας για κάθε μηχανή φυσικής. Προφανώς, όσο αυξάνεται η ακρίβεια αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Επιπλέον το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι πλήρως ελέγξιμο.

Παράγραφος 7.3 : Σύνδεση με τη Matlab σαν εξωτερικό API.

Για τη σύνδεση του λογισμικού V-REP με τη Matlab, πρέπει να έχει δημιουργηθεί η σύνδεση μέσα στο V-REP. Αυτό γίνεται ως εξής:

- Με την καταχώριση των κατάλληλων στοιχείων μέσα στο αρχείο *"remoteApiConnections.txt"*. Η μορφή των καταχωρίσεων εξηγείται μέσα στο ίδιο αρχείο υπό μορφή σχολίων
- Με την αντιγραφή των κατάλληλων αρχείων σε μία διαδρομή δίσκου που να υπάρχει στο path της Matlab. Τα αρχεία αυτά είναι στη θέση *"/%installdir%/\V-REP_PRO_EDU\programming\remoteApiBindings\matlab\matlab"*.
- Μετά τα δύο πρώτα βήματα κάθε φορά που δίνεται σε ένα script της Matlab οι εντολές:

```
vrep=remApi('remoteApi'); % using the prototype file (remoteApiProto.m)
    clientID=vrep.simxStart('127.0.0.1',19999,true,true,5000,5);
```

Θα συνδέεται η Matlab ως εξωτερικό API στο V-REP.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο χρωματισμένος αριθμός αντιστοιχεί στον αριθμό που δίνεται στο server της σύνδεσης από το αρχείο *"remoteApiConnections.txt"*. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο αριθμοί θα πρέπει να συμφωνούν για να λειτουργήσει η σύνδεση. Επίσης καλό είναι να αποφεύγετε η χρήση του *19997* που χρησιμοποιείται στην αρχή, και να δίνεται μία

διαφορετική θέση για το server σύνδεσης.

Στη συνέχεια θα πρέπει να λαμβάνονται τα ονόματα των αντικειμένων μέσα στη προσομοίωση που θα ελέγχονται από τη Matlab ή θα στέλνουν στοιχεία στη Matlab. Αυτό γίνεται λαμβάνοντας το κατάλληλο *"handle"* με εντολές όπως η*"simxGetObjectHandle"* και άλλες. Το σύνολο των εντολών της Matlab ως remoteAPI αναφέρονται μέσα στο εγχειρίδιο του V-REP, το οποίο είναι διαθέσιμο και online χωρίς να είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα[14], στα θέματα, στην εξής διαδρομή:

Writing code in and around V-REP ⇒ V-REP API framework ⇒ Remote API ⇒
⇒ Remote API functions (Matlab)

Να σημειωθεί εδώ ότι, οι εντολές που αναφέρονται εκεί συντάσσονται μέσα στη Matlab σαν μέθοδος συναρτήσεων. Και άρα στην σύνταξη που αναφέρεται μέσα στο manual πρέπει να προστίθεται πάντα από μπροστά το *"vrep."* Στη συνέχεια μπορεί να γραφεί η εντολή όπως αναφέρεται στο manual. Π.χ.:

Η εντολή *"simxGetObjectHandle"* γράφεται ως *"vrep.simxGetObjectHandle"*.

Παράγραφος 7.4 : Ρίψη και αποτελέσματα.

Αφού ορίστηκε η σκηνή της προσομοίωσης με τον τρόπο που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους, έγινε εκκίνηση της μέσα από το Matlab. Για να υπάρχει επαναληψιμότητα δημιουργήθηκε ένα σχήμα, στο λογισμικό Creo Parametric 2.0, το οποίο έμοιαζε με μία χούφτα. Αυτό τοποθετήθηκε πάνω σε μία πρισματική άρθρωση πακτωμένη στο πάτωμα, με τον τρόπο που αναφέρεται στη παράγραφο *7.1.4*. Η γωνίες αυτής της άρθρωσης γύρω από του τρεις άξονες μπορούν να ρυθμιστούν μέσα από το μενού θέσης του αντικειμένου της άρθρωσης.

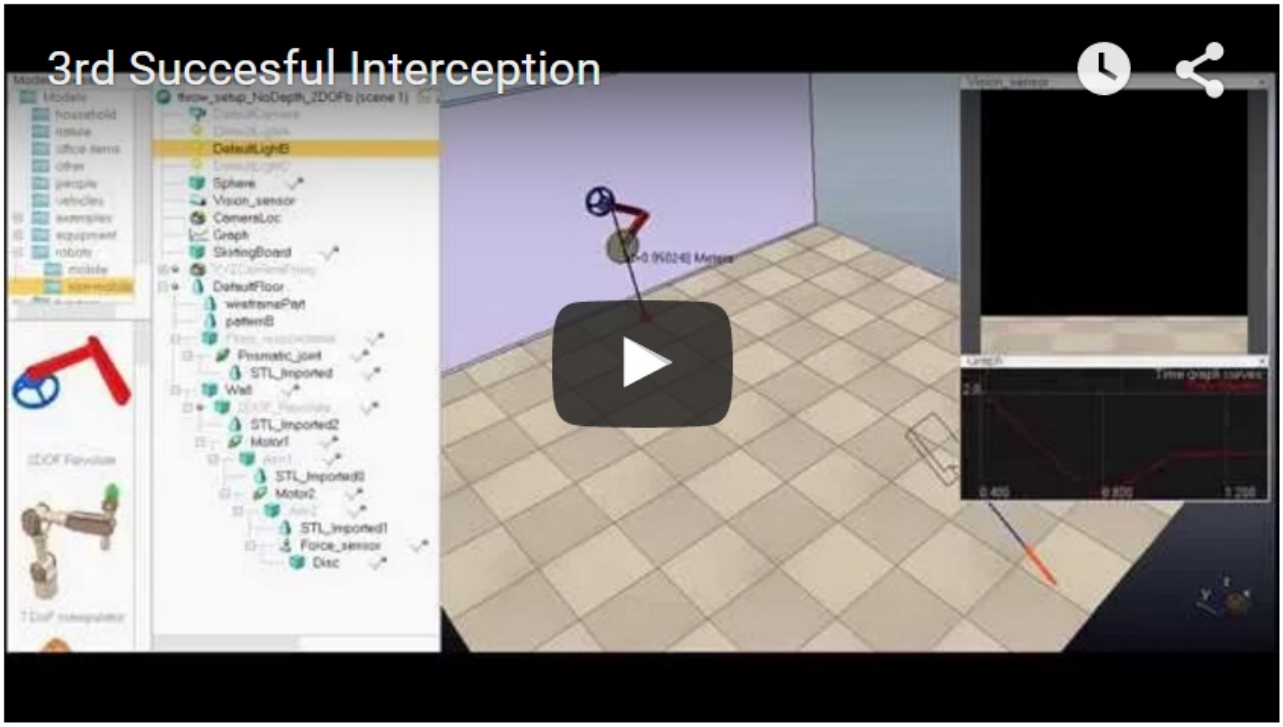
Η χούφτα σπρώχνει το αντικείμενο, το οποίο αναγκάζεται να ακολουθήσει μια βαλλιστική τροχιά. Για να μην μπερδεύεται ο αλγόριθμος από τα frame στα οποία η μπάλα είναι ακόμα μέσα στη χούφτα, σε αυτή δόθηκε διάφανο χρώμα. Έτσι, αντιδρούσε με το αντικείμενο σωστά αλλά η κάμερα δεν το καταγράφει. Με αυτό το τρόπο η μπάλα είναι ορατή στην κάμερα από το πρώτο frame.

Με την εκκίνηση της προσομοίωσης, η χούφτα υποχρεώνει τη μπάλα να μπει σε βαλλιστική τροχιά. Η Matlab τραβάει frames από την κάμερα και εφαρμόζει σε αυτά τον αλγόριθμο όπως αυτός έχει περιγραφεί παραπάνω. Ο αλγόριθμος προβλέπει τη θέση και στέλνει την εντολή στους κινητήρες.

Να σημειωθεί ότι εδώ γίνεται μία επιπλέον μετατροπή συστήματος συντεταγμένων έτσι ώστε η θέση στο χώρο που υπολογίζει ο αλγόριθμος της Matlab να συμφωνεί με αυτή που εξάγει σαν πληροφορία το V-REP. Ο σκοπός αυτής μετατροπής είναι να παρέχεται η δυνατότητα της απεικόνισης των δύο θέσεων στο ίδιο διάγραμμα για να εμφανίζεται καλύτερα η προσέγγιση του υπολογισμού στην σωστή θέση στο χώρο.

Παρακάτω δίνεται ένα στιγμιότυπο από τη ρίψη:

14 [13] V-REP manual http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/



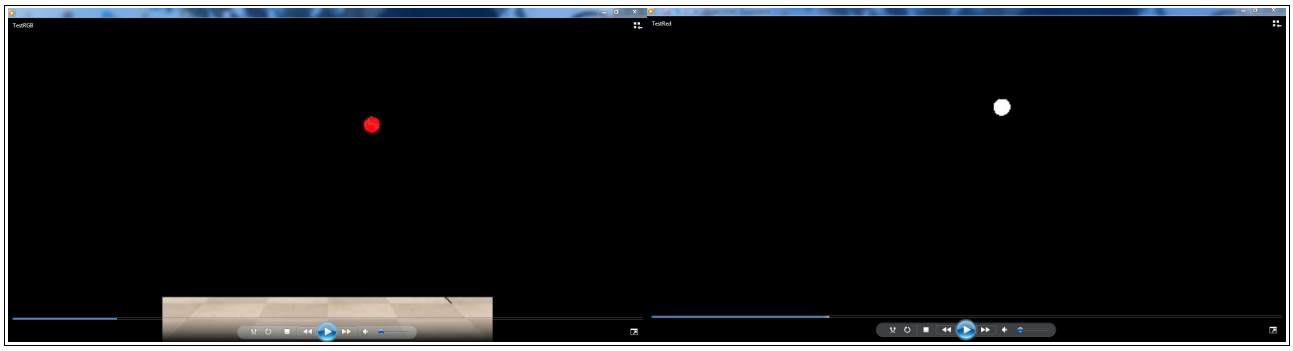
Εξάγεται επίσης και η απόσταση από την κάμερα μέχρι την μπάλα και συγκρίνεται σε κάθε frame με την υπολογισμένη. Δίνεται έτσι η δυνατότητα να εκτιμηθεί και η ακρίβεια του υπολογισμού αφού η απόσταση είναι η σημαντικότερη παράμετρος στην πρόβλεψη.

7.4.1 Γραφική αναπαράσταση απόστασης και θέσης στο χώρο.

Το βασικότερο στοιχείο των υπολογισμών ήταν η ακριβής ανίχνευση της μπάλας και η απομόνωση της σε μία δυαδική εικόνα.

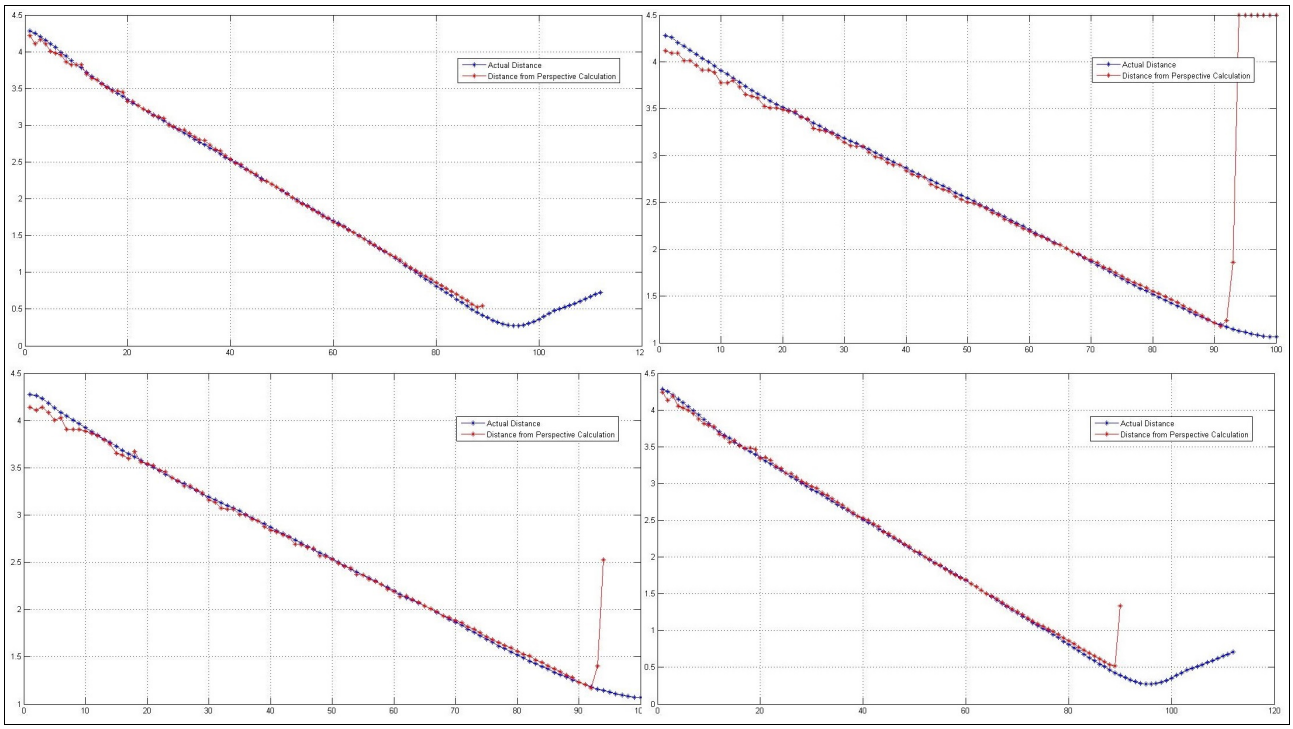
Εάν αυτό γινόταν με επιτυχία τότε όπως έχει αποδειχθεί από τις προηγούμενες παραγράφους, ο υπολογισμός της θέσης θα είχε πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα και σε σχετικά χαμηλές αναλύσεις.

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ανάλυση, για την κάμερα στο V-REP, 256x256 pixel. Ακόμα και σε αυτή την ανάλυση τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν ήταν εξαιρετικά κοντά στην πραγματικότητα. Αυτό φαίνεται και στην επόμενη εικόνα[15].



Λόγω της εξαιρετικής ευκρίνειας της ανίχνευσης του κόκκινου χρώματος, οι υπολογισμοί είχαν επίσης πάρα πολύ υψηλή ακρίβεια. Παρακάτω, δίνονται συγκριτικά διαγράμματα μέσα από τη Matlab με την απόσταση όπως αυτή μετριέται από το V-REP και με την απόσταση όπως υπολογίζεται από την εξίσωση της προοπτικής.

15 Βίντεο με τη λήψη κάμερας και ανίχνευση Matlab στο YouTube: https://youtu.be/1mF_OCqGCB8



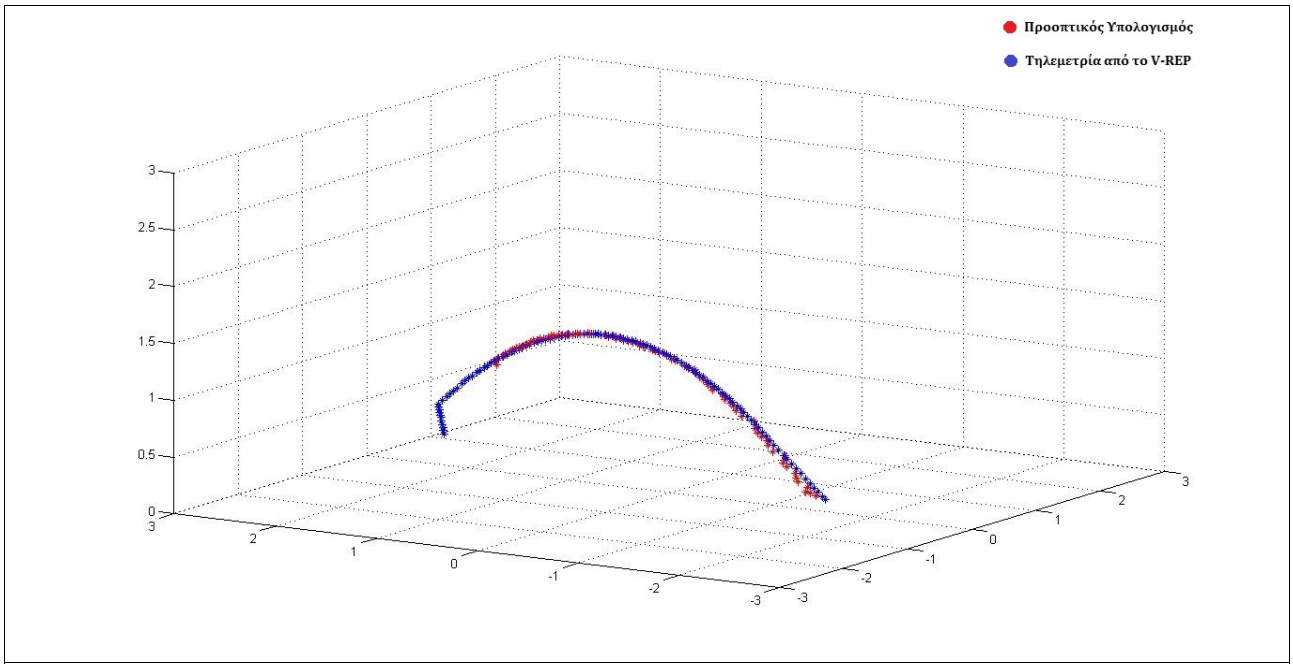
Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι η ανίχνευση του κόκκινου χρώματος ήταν αρκετά επιτυχημένη. Επίσης φαίνεται ότι η προσέγγιση για τον υπολογισμό της απόστασης ήταν εξαιρετικά επιτυχημένη και έδωσε πάρα πολύ καλά αποτελέσματα.

Αξίζει όμως να αφιερωθεί λίγος χρόνος για να σχολιαστούν τα διαγράμματα αυτά. Κατ' αρχήν φαίνεται ότι για τα πρώτα frame *(1^{ο} έως 5^{ο} frame)* υπάρχει σχετικά μεγάλη απόκλιση. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ μικρή η ανάλυση και σε αυτά τα frame το σχήμα της μπάλας είναι σχετικά τετραγωνισμένο, οπότε, ο υπολογισμός του εμβαδού δίνει μέτρια αποτελέσματα. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση βέβαια, το αποτέλεσμα είναι ήδη κοντά στο σωστό.

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι η απόσταση προσεγγίζει τη σωστή αλλά είναι συνέχεια είτε λίγο πάνω ή λίγο κάτω από αυτή. Και εδώ παίζει ρόλο η χαμηλή ανάλυση που έχει ορισθεί στον οπτικό αισθητήρα μέσα στο V-REP. Αυτές οι αποκλίσεις δηλαδή αφορούν την προσέγγιση του κύκλου από πολλά τετράγωνα. Και εδώ όμως η προσέγγιση είναι άκρως ικανοποιητική και μάλιστα καλύτερη ακόμα και από πριν.

Τέλος, παρατηρείται ότι στα τελευταία frame η απόσταση αυξάνεται πάρα πολύ γρήγορα και φεύγει πολύ μακριά από το σωστό. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτά τα frame η μπάλα έχει αρχίσει να φεύγει από το οπτικό πεδίο της κάμερας. Αυτό οφείλεται στο ότι για τα τελευταία τρία με τέσσερα frame δεν φαίνεται ολόκληρη η μπάλα στην εικόνα. Μάλιστα, σε κάθε frame που περνάει, φαίνεται όλο και μικρότερο μέρος της μπάλας στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Ο αλγόριθμος όμως αντιλαμβάνεται απλώς μικρότερο εμβαδόν της μπάλας και θεωρεί βάσει αυτού ότι η μπάλα απομακρύνεται. Αυτό απεικονίζεται και στο διάγραμμα. Να σημειωθεί ότι στο script που εκτύπωνε τα διαγράμματα στη Matlab έχει τεθεί όριο στα $4.5m$, που ήταν περίπου η απόσταση της μπάλας στην αρχή. Γι αυτό φαίνεται στο δεύτερο διάγραμμα και οι τιμές πάνε εκεί. Στην πραγματικότητα, οι τιμές σε αυτά τα frame ήταν *"άπειρο" (Inf)*.

Τα παραπάνω δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα και σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο για την εύρεση της θέσης προσεγγίζουν τη θέση του αντικειμένου στο χώρο με εξαιρετική ακρίβεια. Αυτό αποτυπώνεται και στην επόμενη εικόνα:



Εδώ φαίνεται επίσης ότι δεν υπάρχουν σημεία κοντά στην κάμερα καθώς εκεί παρατηρούνταν και τα προβλήματα στον υπολογισμό της απόστασης που αναφέρονται παραπάνω. Μάλιστα, να σημειωθεί ότι υπάρχουν σημεία υπολογισμένα στο χώρο αλλά επειδή η εκτύπωση εδώ γίνεται με περιορισμό στους άξονες του διαγράμματος αυτά δεν φαίνονται καθώς είναι πολύ μακριά και έξω από το χώρο που εκτυπώνεται.

7.4.2 Πρόβλεψη και περιορισμοί της πρόβλεψης στο V-REP.

Η υπολογισμός της θέσης με τόσο ικανοποιητική ακρίβεια βοηθάει εξαιρετικά στην πρόβλεψη της σωστής θέσης πρόσκρουσης στο επίπεδο του βραχίονα. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως είναι γνωστό, η μέθοδοι γραμμικής παρεμβολής αποτυγχάνουν όταν στο δείγμα υπάρχει πολύς θόρυβος. Σε αυτή την περίπτωση όμως που το πείραμα γινόταν σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον προσομοίωσης, ο θόρυβος ήταν πρακτικά ανύπαρκτος. Οπότε και η πρόβλεψη γινόταν επίσης με μεγάλη ακρίβεια.

Παρ' όλα αυτά όμως, παρουσιαζόταν κάποια προβλήματα στα σημεία της πρόβλεψης ειδικά στα πρώτα frame της ρίψης. Μετά από προσεκτική ανάλυση των δεδομένων φάνηκε ότι οι αρχικές ανακριβείς προβλέψεις οφειλόταν σε δύο βασικά προβλήματα:

- Στα πρώτα frame τα σημεία αλλάζουν θέση επάνω στο επίπεδο αρκετά, μερικές φορές αλλάζοντας ακόμα και τεταρτημόριο.
- Οι τιμές της πρόβλεψης φαίνεται να ξεκινάνε από τεράστιες τιμές στον άξονα των Z. Στη συνέχεια όσο μεγαλώνει το δείγμα, η τιμή του Z προσεγγίζει τη σωστή με πάρα πολύ γρήγορο ρυθμό.

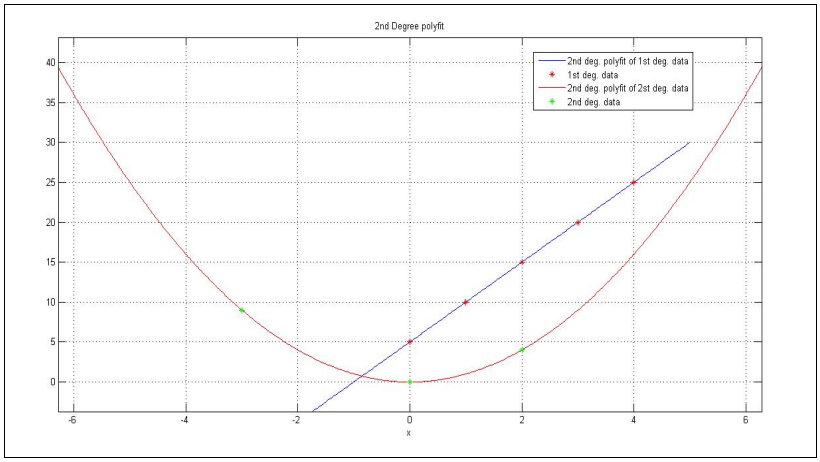
Το πρώτο οφείλεται σε ένα βασικό μειονέκτημα της γραμμικές παρεμβολής. Το ότι όταν παρεμβάλλονται γραμμικά δύο μόνο σημεία, τότε η λαμβάνεται η ευθεία που περνάει από αυτά τα δύο σημεία. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει τεράστια πιθανότητα τα πρώτα frame να δίνουν προβλέψεις με σημαντική απόκλιση.

Σε ένα μικρότερο βαθμό, το πρώτο πρόβλημα οφείλεται και στην απόκλιση στον υπολογισμό της απόστασης όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω. Εδώ η απόκλιση που προκαλείται είναι σχετικά μικρή και δεν αλλάζει τη σχετική θέση του σημείου πρόσκρουσης πάνω στο επίπεδο, μόνο την απόσταση από το κέντρο του βραχίονα.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει το δεύτερο πρόβλημα που εμφανίζεται.

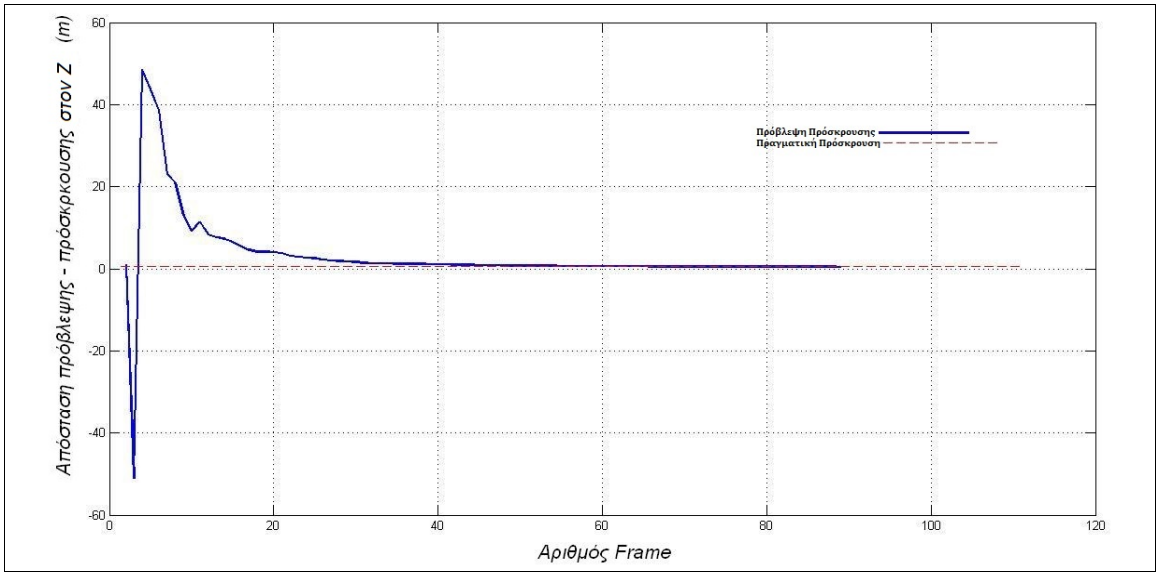
Μάλιστα εδώ η αιτία του προβλήματος δεν ήταν ξεκάθαρη μέχρι την εκτέλεση των πραγματικών πειραμάτων. Και αυτό διότι στις πραγματικές ρίψεις δεν φαινόταν να εμφανίζεται. Τελικά αποδείχθηκε ότι αυτή η συμπεριφορά στα προβλεπόμενα σημεία οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ρίψη που στη συνέχεια εξαναγκάζει τη μπάλα να ακολουθήσει τη βαλλιστική τροχιά.

Εδώ, η μπάλα σπρώχνεται από μία χούφτα την οποία κινεί μία πρισματική άρθρωση. Άρα για τα πρώτα 5 με 10 frame, γίνεται προσέγγιση δευτέρου βαθμού σε ένα σύνολο δεδομένων το οποίο όμως εκφράζουν μία ευθεία, αφού έτσι κινούνται οι πρισματικές αρθρώσεις. Για το λόγο αυτό η εξίσωση της μετατόπισης που υπολογίζεται δείχνει ένα σημείο πάρα πολύ ψηλότερα από το σωστό. Για του λόγου το αληθές παρακάτω φαίνονται δύο γραφικές παραστάσεις. Και στις δύο γίνεται προσέγγιση με εξίσωση δευτέρου βαθμού. Αλλά στη δεύτερη τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν μία ευθεία. Οι παραστάσεις που προκύπτουν δίνονται παρακάτω:



Από αυτό το παράδειγμα φαίνεται ότι όταν τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν μία ευθεία ή είναι κοντά σε αυτή, ακόμα και η προσέγγιση δεύτερου βαθμού δεν μπορεί να αποδώσει παραβολή καθώς τα δεδομένα δεν συμφωνούν με αυτό.

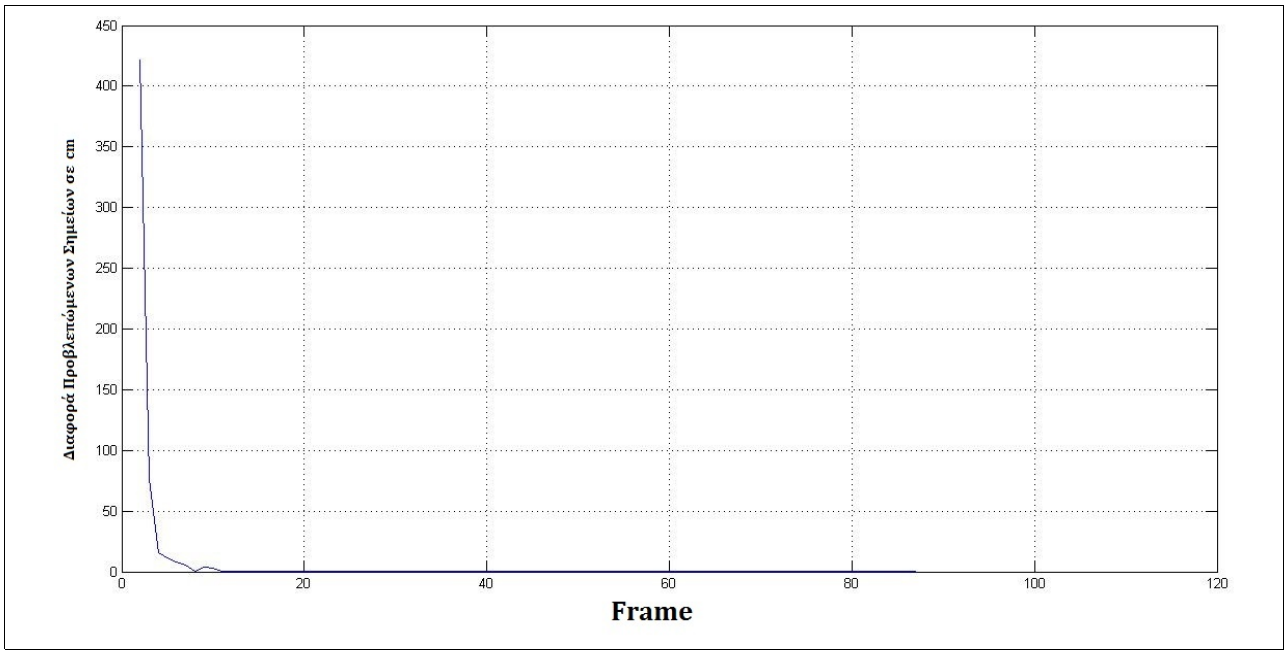
Επιπλέον στα δύο πρώτα σωστά αποθηκευμένα frame η *polyfit* δίνει ένα προειδοποιητικό μήνυμα ότι τα δεδομένα δεν επαρκούν για την εύρεση μοναδικής λύσης. Παρ' όλα αυτά δίνεται μία από τις πιθανές λύσεις ως απάντηση. Τα παραπάνω προκαλούν μία τεράστια διακύμανση στα δεδομένα της πρόβλεψης για τα πρώτα frame. Οι διακυμάνσεις αυτές καταγράφονται στα επόμενα διαγράμματα:



Στο παρακάτω διάγραμμα οι τιμές είναι σε μέτρα *(m)*. Ο σκοπός αυτού του διαγράμματος είναι να δείξει το μέγεθος του σφάλματος που προκύπτει. Φαίνεται ότι στα πρώτα frame που δεν επαρκούν τα δεδομένα για μοναδική λύση, έχει επιλεγεί η συμμετρική λύση της σωστής

από τις διαθέσιμες πιθανές. Μετά που τα δεδομένα επαρκούν για την εύρεση και των τριών συντελεστών, συμβαίνει αυτό που περιγράφεται παραπάνω. Δηλαδή υπολογίζεται μία τιμή, σημαντικά μεγαλύτερη από τη σωστή. Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα, η διαφορά μειώνεται ταχύτατα και στα 30 frame η προσέγγιση είναι ήδη ικανοποιητική. Μετά τα 60 frame η διαφορά μεταξύ της σωστής τιμής στο Z και της πρόβλεψης είναι μη παρατηρήσιμη σε αυτή την κλίμακα. Η γενικότερη μορφή του προβλήματος αποτυπώνεται στο επόμενο διάγραμμα όπου απεικονίζεται η διαφορά των σημείων της πρόβλεψης μεταξύ τους, καθώς αυτά δίνονται ανά κύκλο επεξεργασίας:

Εδώ φαίνεται ότι μετά τα 15 frame περίπου, ο ρυθμός μεταβολής των συντεταγμένων των σημείων μειώνεται πάρα πολύ και ταυτόχρονα σχεδόν σταθεροποιείται.



Κεφάλαιο 8: Σχεδιασμός και κατασκευή.

Η αρχική έκδοση του ρομποτικού βραχίονα έγινε στο εργαστήριο Ρομποτικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης με κριτήριο την απλότητα, ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος. Ο σχεδιασμός έγινε στο λογισμικό Creo Parametric 2.0. Το σχέδιο αυτό είχε κάποιες αδυναμίες και έγινε προσπάθεια διόρθωσης του.

Έτσι σχεδιάστηκε μία δεύτερη έκδοση αυτού και κατασκευάστηκαν μόνο τα εξαρτήματα τα οποία άλλαξαν από το πρώτο σχέδιο. Τα παραπάνω αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Παράγραφος 8.1 : Πρώτη έκδοση: Προτερήματα και αδυναμίες.

Η φιλοσοφία πίσω από το σχεδιασμό της πρώτης έκδοσης ήταν η απλότητα, η ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος.

Δημιουργήθηκε μία αλουμινένια βάση η οποία εφάρμοζε σε μία συγκολλητή ατσάλινη κατασκευή. Η ατσάλινη κατασκευή θα βιδωνόταν στον τοίχο έτσι ώστε ο βραχίονας να έχει το σωστό προσανατολισμό στο χώρο. Επάνω στη βάση τοποθετούνταν ο κινητήρας και επάνω σε αυτόν τοποθετούνταν ο βραχίονας του πρώτου βαθμού ελευθερίας.

Στο άκρο αυτού του βραχίονα τοποθετούνταν ο δεύτερος κινητήρας και στο άξονα αυτού ο δεύτερος βραχίονας. Έτσι ολοκληρωνόταν οι δύο βαθμοί ελευθερίας του βραχίονα.

Αυτό το σχέδιο είχε τα προτερήματα της εύκολης κατασκευής καθώς είχε σχήματα με κατάλληλη γεωμετρία αλλά απλό σχήμα. Επιπλέον, ήταν οικονομικό στην κατασκευή του καθώς τα μεγαλύτερα κομμάτια του ήταν φτιαγμένα από αλουμινένια προφίλ με κατάλληλα κοψίματα και οπές για κοχλίες.

Τέλος τα κόμπλερ για τη σύνδεση των αξόνων των κινητήρων με τους βραχίονες ήταν κατασκευασμένα από αλουμίνιο με αλουμινένιες σφήνες και παρ' όλα αυτά επέδειξαν εξαιρετική αντοχή και ακαμψία.

Υπήρχαν όμως και πολύ βασικά μειονεκτήματα. Κυριότερο αυτών ήταν το σχεδιαστικό λάθος της στήριξης ολόκληρου του δυναμικού μέρους του βραχίονα στο κινητήρα του πρώτου βαθμού, και κατ' επέκταση στο ρουλεμάν του άξονα του.

Αυτό δεν παρείχε την κατάλληλη ακαμψία και είχε ως αποτέλεσμα ο μηχανισμός να είναι αρκετά ασταθής. Σε βαθμό που κρίθηκε ότι η χρήση του θα κατέστρεφε τον κινητήρα του πρώτου βαθμού. Επιπλέον ένα πρόβλημα που προέκυψε αργότερα ήταν η επιλογή των

μεθόδων συναρμολόγησης και κοχλιοσύνδεσης. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την εξαιρετική δυσκολία στην αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση. Και αυτό είναι μειονέκτημα για ένα πειραματικό μοντέλο το οποίο χρειάζεται συνέχεια έλεγχο και προσαρμογή.

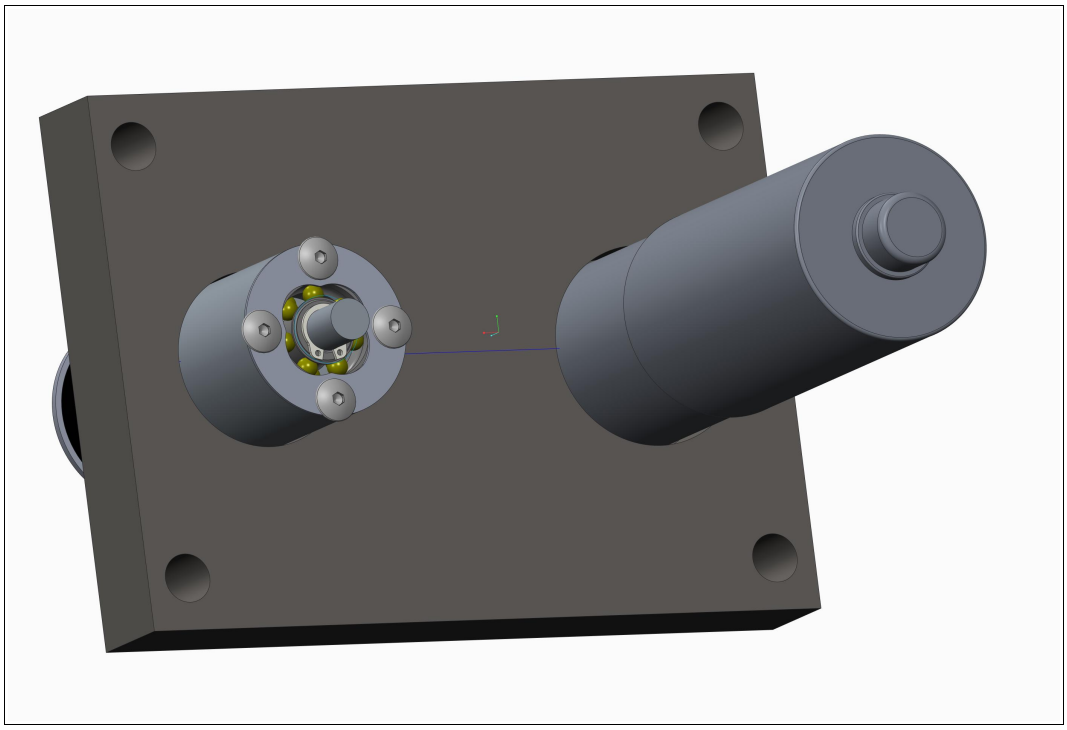
Στη δεύτερη έκδοση του σχεδίου έγινε μία προσπάθεια να διορθωθούν τα προβλήματα της πρώτης έκδοσης

Παράγραφος 8.2 : Δεύτερη έκδοση:Προτερήματα και αδυναμίες.

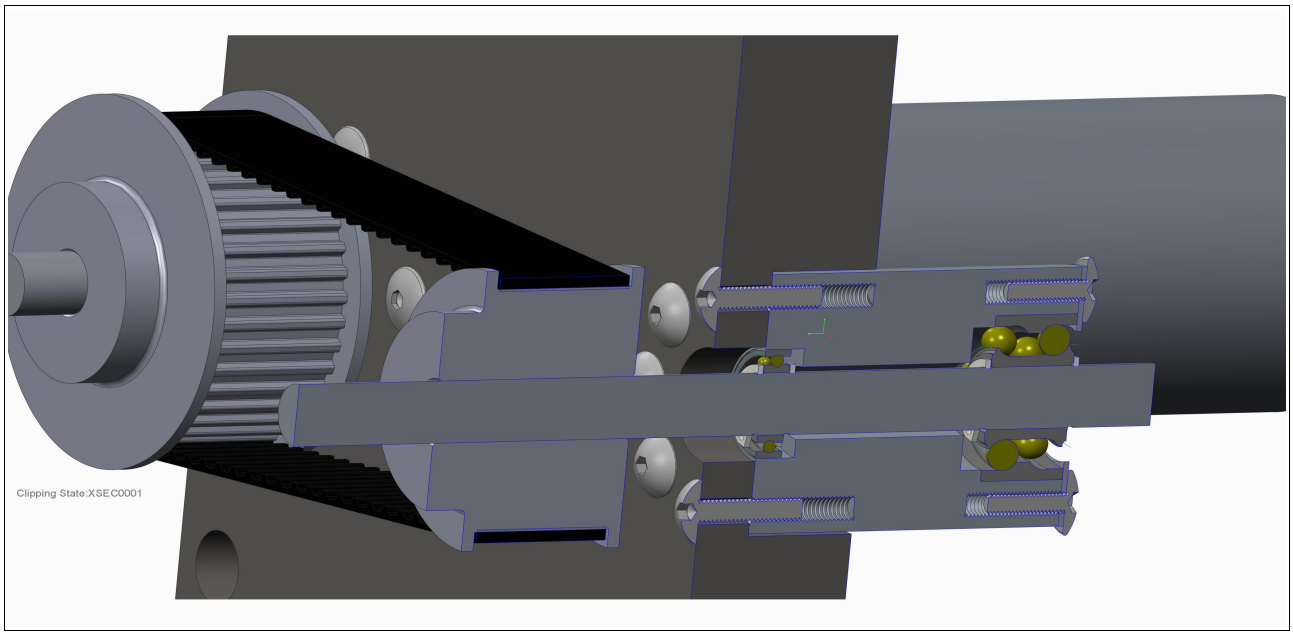
Στη δεύτερη έκδοση αποφασίστηκε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ακαμψίας του πρώτου βαθμού. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε νέα βάση και αποφασίστηκε να στηριχτεί ο πρώτος βραχίονας πάνω σε ένα άξονα που στηρίζεται σε δύο ρουλεμάν.

Ένα μονόσφαιρο βαθέως αύλακα και ένα δίσφαιρο το οποίο θα στηρίζει και τα όποια αξονικά φορτία προκληθούν από ανακρίβειες στην κατασκευή και από τα δυναμικά φορτία που θα προκύψουν από την κανονική λειτουργία. Τελικά τα ρουλεμάν που επιλέχθηκαν ήταν τύπου 61802[16] το μονόσφαιρο και τύπου 3202[17] το δίσφαιρο.

Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ξανά, στο ίδιο λογισμικό μία βάση, η οποία θα μπορούσε να στηρίξει τον κινητήρα ξεχωριστά από τον άξονα στον οποίο θα στηριζόταν ο βραχίονας. Επιπλέον επιλέχθηκε να γίνει η μετάδοση της κίνησης με τη χρήση οδοντωτού ιμάντα χρονισμού. Τα παρακάτω φαίνονται και στις εικόνες από το λογισμικό σχεδιασμού που δίνονται παρακάτω:



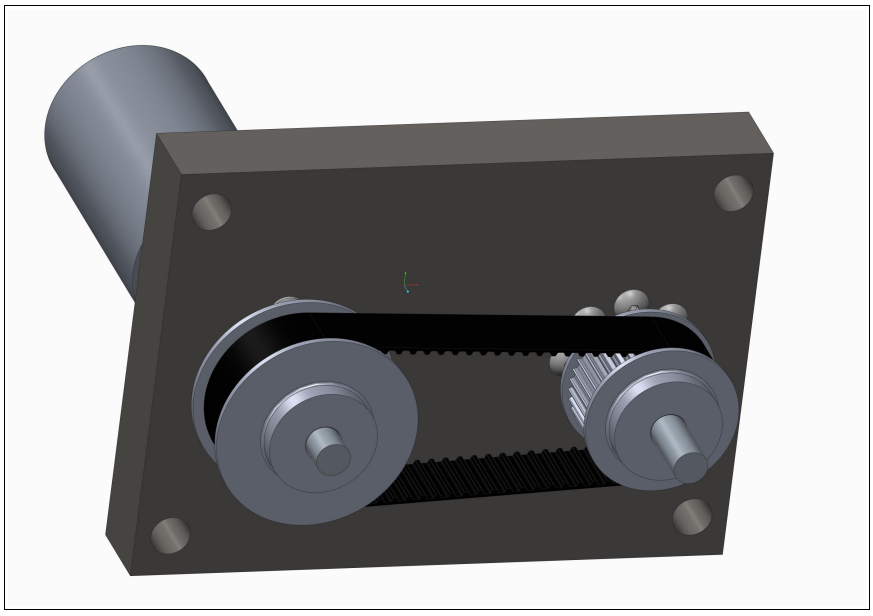
16 [14] SKF 61802
17 [15] SKF 3202

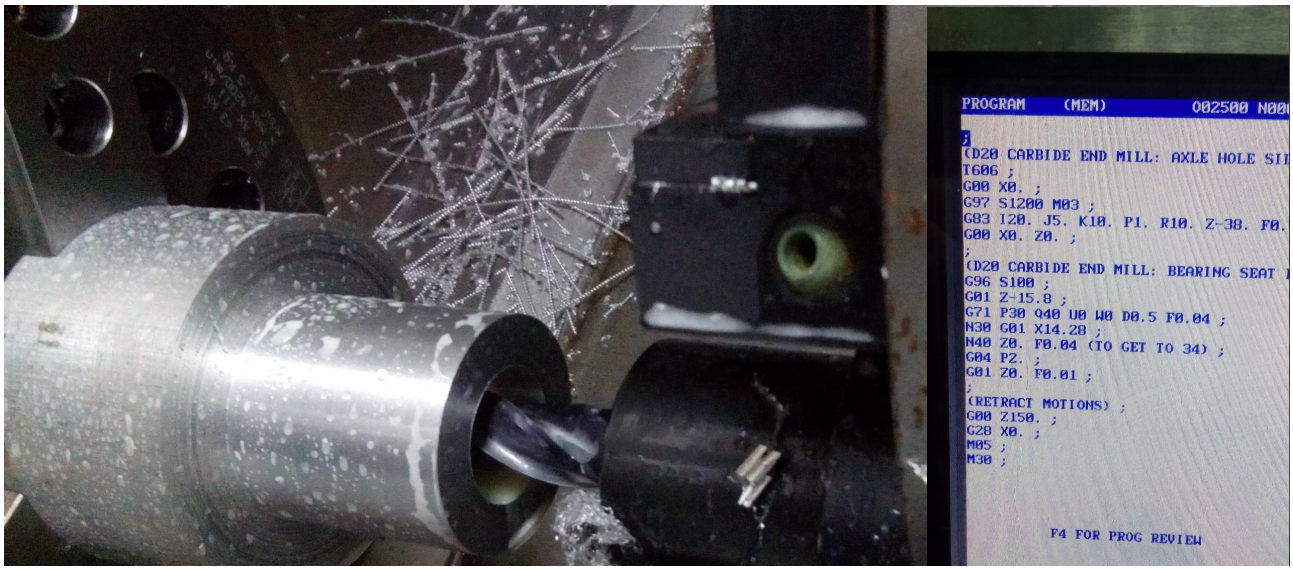


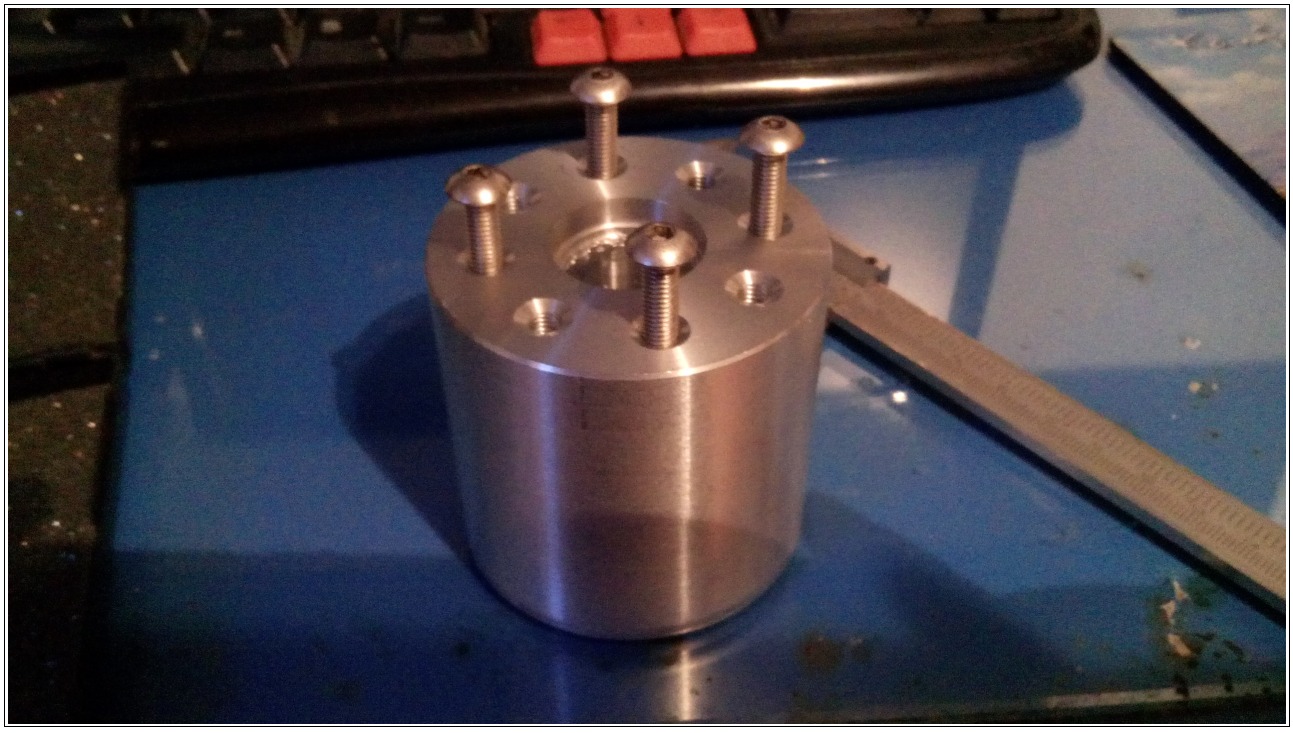
Η μελέτη για τον υπολογιζόμενο χρόνο ζωής των ρουλεμάν και για το απαιτούμενο μέγεθος ιμάντα δίνονται στο παράρτημα. Να σημειωθεί όμως ότι όλη η μετάδοση της κίνηση του πρώτου βαθμού είναι υπερδιαστασιολογημένη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής του ρουλεμάν τύπου 61802, για μη-καθαρές συνθήκες λειτουργίας, είναι της τάξης του $1 \cdot 10^9$ *περιστροφές* . Τέλος να σημειωθεί ότι αρχικά είχε υπολογισθεί άξονας $12mm$. Αυτός εμφανίζεται και στο σχέδιο. Τελικά χρησιμοποιήθηκε άξονας $15mm$ και τα σχέδια τροποποιήθηκαν κατάλληλα.

Η κατασκευή έγινε στα μηχανήματα CNC του εργαστηρίου ρομποτικής με κώδικα ο οποίος:

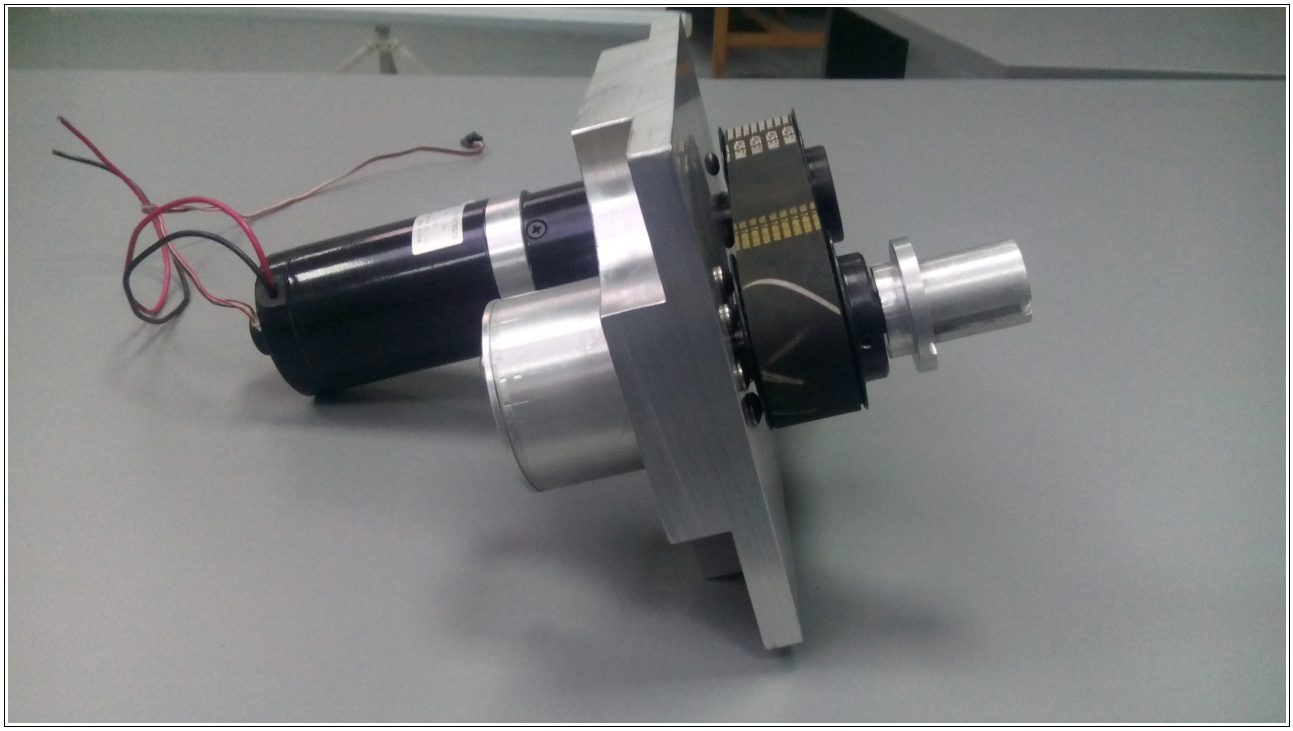
- Για τις δύο φρέζες *(Haas TM-1P, Haas VF2)* παράχθηκε από τον post-processor του λογισμικού CAM του Creo Parametric 2.0
- Για τον τόρνο *(Haas SL20-L)* γράφτηκε με τη χρήση του *Windows Notepad* και διορθώθηκαν όποια συντακτικά λάθη στον ελεγκτή της μηχανής, από τον συγγραφέα αυτής της εργασίας.
- Παρακάτω δίνονται εικόνες από την κατασκευή των εξαρτημάτων:

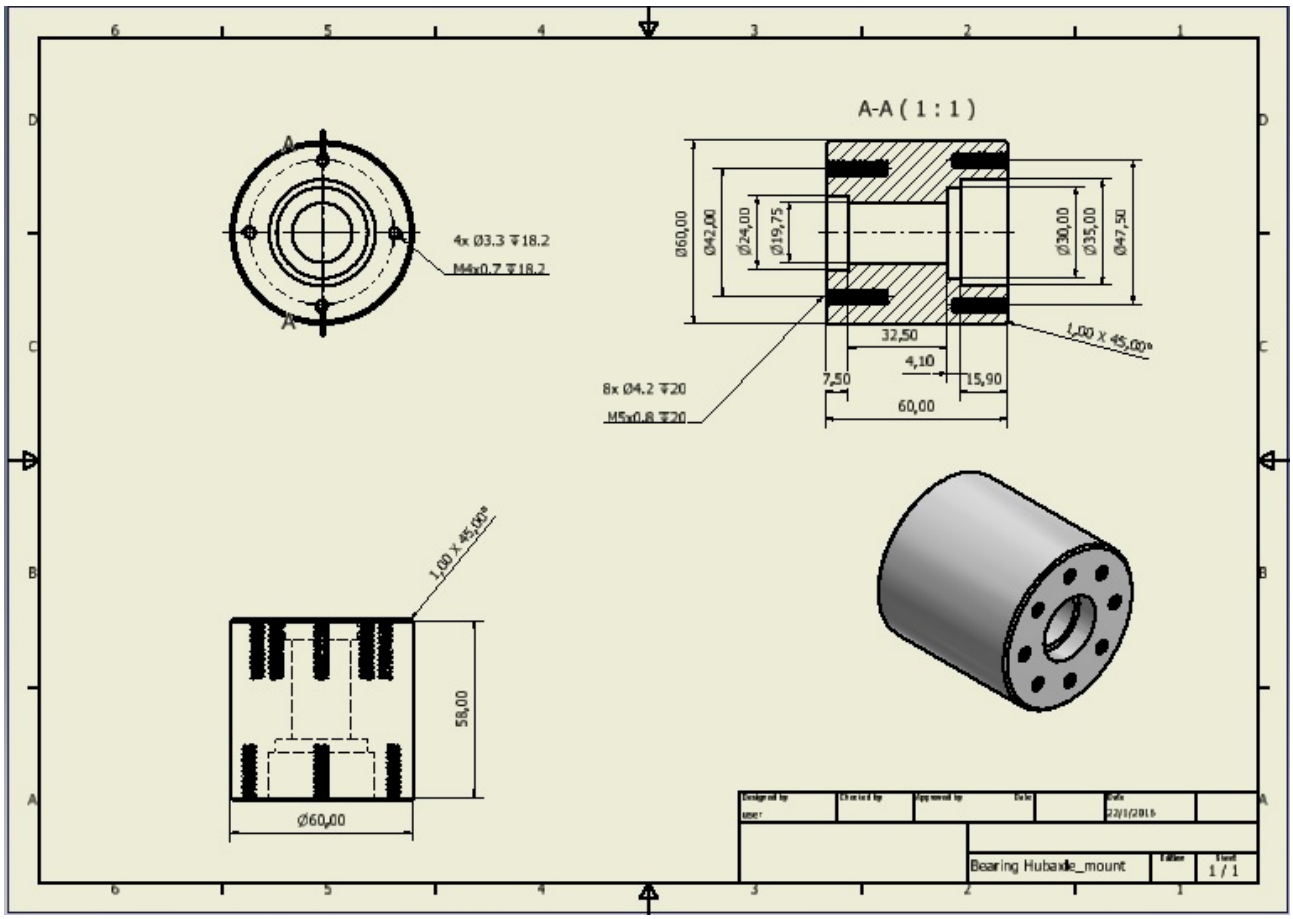



PROGRAM (MEM) 002500 N00
(D20 CARBIDE END MILL: AXLE HOLE SI
T606 ;
G00 X0. ;
G97 S1200 M03 ;
G83 I20. J5. K10. P1. R10. Z-38. F0.
G00 X0. Z0. ;
(D20 CARBIDE END MILL: BEARING SEAT
G96 S100 ;
G01 Z-15.8 ;
G71 P30 Q40 U0 W0 D0.5 F0.04 ;
N30 G01 X14.28 ;
N40 Z0. F0.04 (TO GET TO 34) ;
G04 P2. ;
G01 Z0. F0.01 ;
(RETRACT MOTIONS) ;
G00 Z150. ;
G28 X0. ;
M05 ;
M30 ;
F4 FOR PROG REVIEW



Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνεται η κατασκευή του αλουμινένιου εδράνου των ρουλεμάν. Δίνονται και φωτογραφίες από την ολοκληρωμένη βάση[18] με τον ιμάντα μετάδοσης.





18 Περισσότερες φωτογραφίες δίνονται στο συνοδευτικό δίσκο της εργασίας.

Τελικά, αποδείχθηκε ότι και αυτό το σχέδιο παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες στη συναρμολόγηση. Ειδικά στην τοποθέτηση της μικρής τροχαλίας η οποία δίνει κίνηση στον βραχίονα του πρώτου βαθμού ελευθερίας. Μάλιστα, υπήρχε ιδιαίτερη δυσκολία στην τάνυση του ιμάντα μετά την τοποθέτηση.

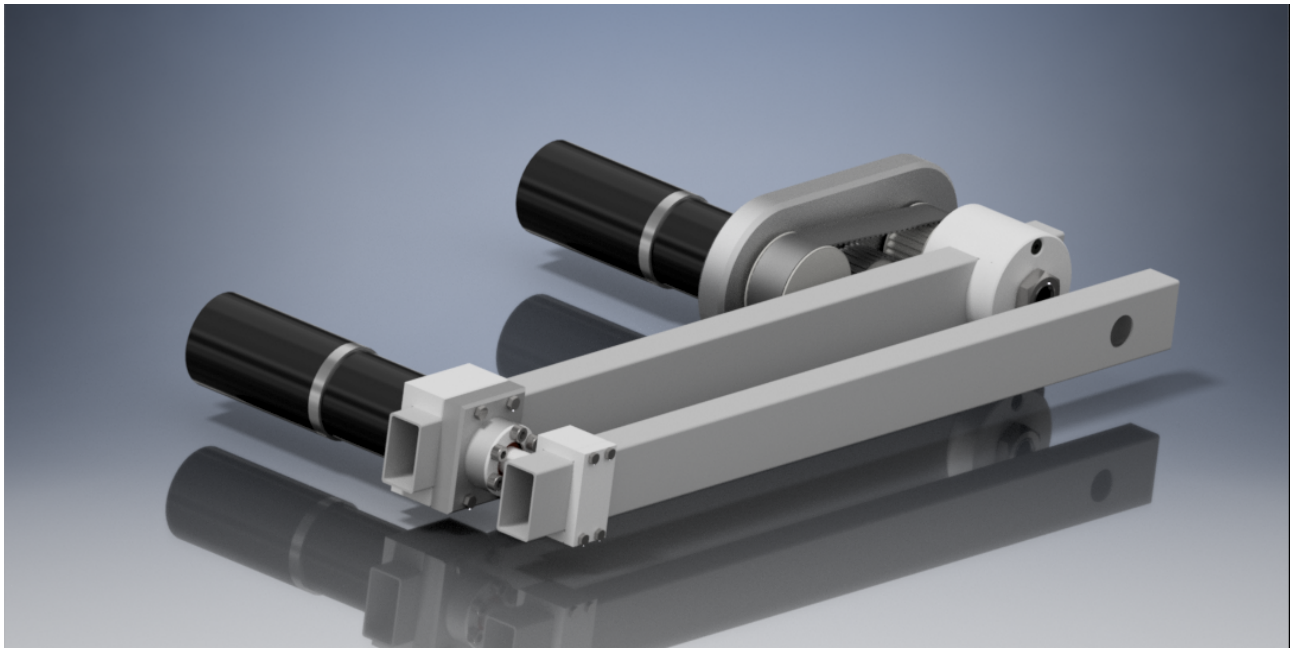
Επιπλέον, υπήρξε αστοχία του υλικού της σφήνας που μετέδιδε την κίνηση από την τροχαλία στον άξονα, πιθανώς επειδή το μέγεθος της σφήνας ήταν πολύ μικρό για την αποδιδόμενη ροπή του σερβοκινητήρα καθώς αυτός είχε πάρα πολύ μεγάλο λόγο μείωσης.

Τέλος, άκρως προβληματική ήταν η τοποθέτηση της καλωδίωσης του δεύτερου κινητήρα αφού αυτός ήταν τοποθετημένος στο άκρο του πρώτου βραχίονα. Το πρόβλημα που παρουσιαζόταν ήταν ότι σε πιθανή δυσλειτουργία του πρώτου κινητήρα, κατά την οποία γινόταν περιστροφή μεγαλύτερη των 360^{o}, η καλωδίωση θα τυλιγόταν γύρω από τον άξονα μετάδοσης και μπορούσε να προξενήσει πρόβλημα και στον ίδιο τον ελεγκτή. Μάλιστα αυτό το πρόβλημα εμφανίστηκε, ευτυχώς όχι με καταστροφικές συνέπειες.

Βέβαια παρά αυτά τα προβλήματα βελτιώθηκε σημαντικά η ακαμψία του βραχίονα αρκετά και η κίνηση γινόταν με αρκετή ακρίβεια μέχρι την καταστροφή της σφήνας της μικρής τροχαλίας.

Παράγραφος 8.3 : Τρίτη έκδοση: Προτερήματα και αδυναμίες

Στην τρίτη έκδοση έγινε μία προσπάθεια να επιλυθούν τα προβλήματα των δύο προηγούμενων εκδόσεων, κρατώντας όμως όλα τα προτερήματα. Επιπλέον, έγινε προσπάθεια να επιτευχθούν τα παραπάνω κρατώντας όσο το δυνατόν περισσότερα εξαρτήματα από της προηγούμενες εκδόσεις για μείωση του κόστους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην απλότητα της κατασκευής, τουλάχιστον όσο αυτό ήταν δυνατό. Δίνονται εικόνες του συναρμολογήματος, ενώ στο παράρτημα δίνονται εικόνες κάθε εξαρτήματος καθώς και τα μηχανολογικά του σχέδια.



Παράγραφος 8.4 : Ο ελεγκτής Roboteq SDC2130

Ο ελεγκτής Roboteq SDC2130[19] έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει εντολές από ασύρματο ή ενσύρματο χειριστήριο, Η/Υ και άλλες μεθόδους, σε σήματα υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος για την οδήγηση ενός ή δύο κινητήρων. Η κάρτα του ελεγκτή είναι περίπου 7x7cm σε μέγεθος.



Ο μικροελεγκτής που έχει ο SDC2130 είναι 32bit αρχιτεκτονικής και έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων υπολογισμών άσχετα από το είδος της λειτουργίας στην οποία έχει ρυθμιστεί. Προφανώς υπάρχουν και πολλαπλές θύρες εισόδου εξόδου οι οποίες μπορούν να επαναπρογραμματιστούν και να τους ανατεθεί νέα λειτουργία.

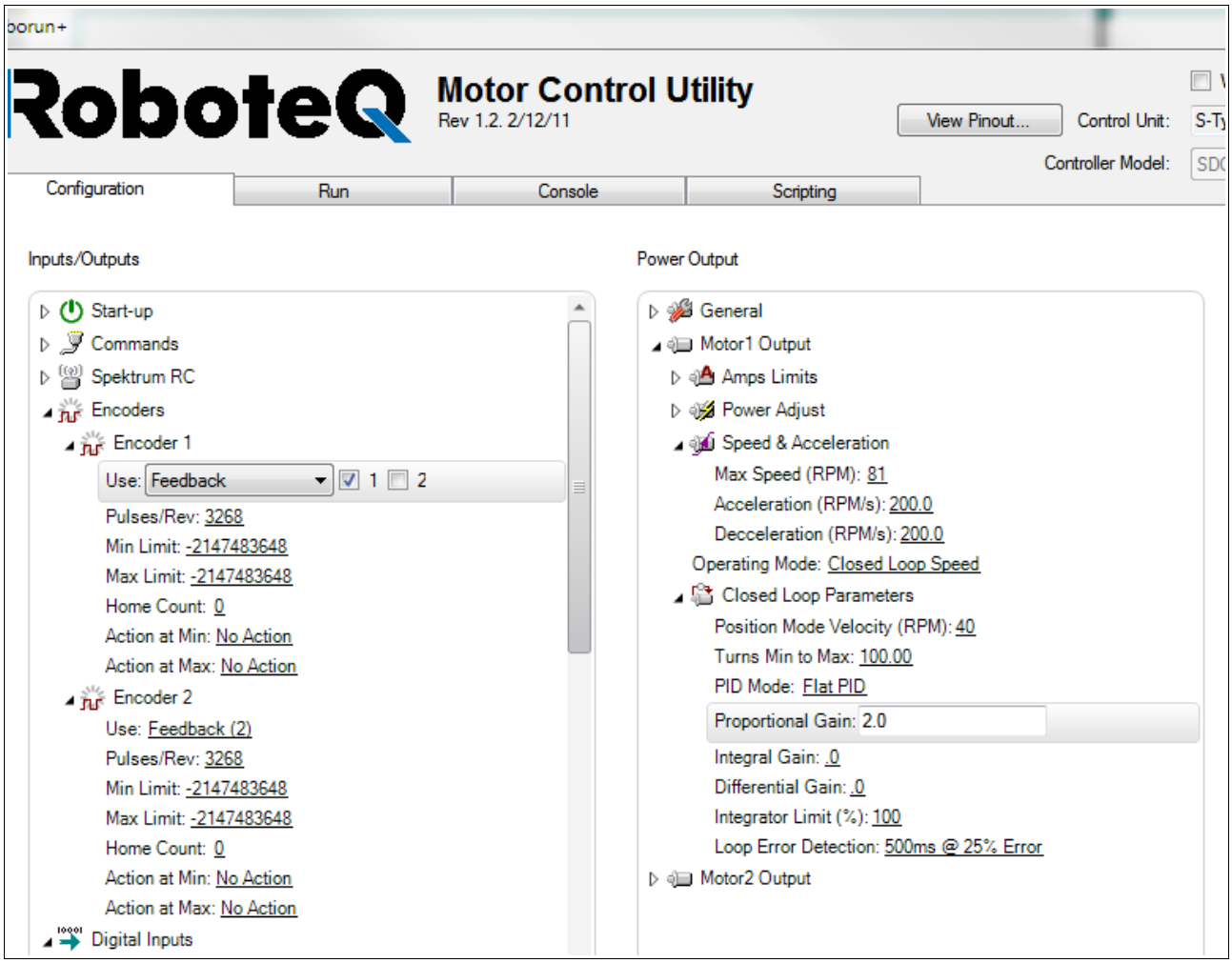
Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν εντολές στους δύο κινητήρες ταυτόχρονα το οποίο αυξάνει κατά πολύ τις δυνατότητες ελέγχου μίας ρομποτικής εφαρμογής. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση δημιουργίας ενός ρομποτικού οχήματος.

Επιπλέον, πέρα από τα στοιχεία ασφαλείας που έχει ενσωματωμένα, μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως η λειτουργία του γράφοντας κώδικα σε γλώσσα Basic.

Επιπλέον μέσα από το software το οποίο μπορεί να προγραμματιστεί, μπορούν να ορισθούν διάφορες παράμετροι οι οποίες ορίζουν τη λειτουργία του κινητήρα πλήρως. Τέτοιες είναι:

- Ορισμός διακριτικής ικανότητας του γωνιακού κωδικοποιητή.
- Ορισμός της μέγιστης ταχύτητας του κινητήρα.
- Ορισμός της μέγιστης επιτάχυνσης του κινητήρα.
- Ορισμός του τύπου του ελέγχου.
- κ.α.

19 Roboteq SDC2130 http://www.roboteq.com/index.php/roboteq-products-and-services/brushed-dc-motor-controllers/sdc2130-detail



Μέσα από τις παραπάνω επιλογές μπορούν να απλοποιηθούν πολύ περίπλοκες διαδικασίες όπως ο ορισμός του προφίλ της ταχύτητας των κινητήρων. Το πιο σημαντικό όμως είναι η δυνατότητα ορισμού ενός ελεγκτή PID μέσα από το interface του SDC2130.

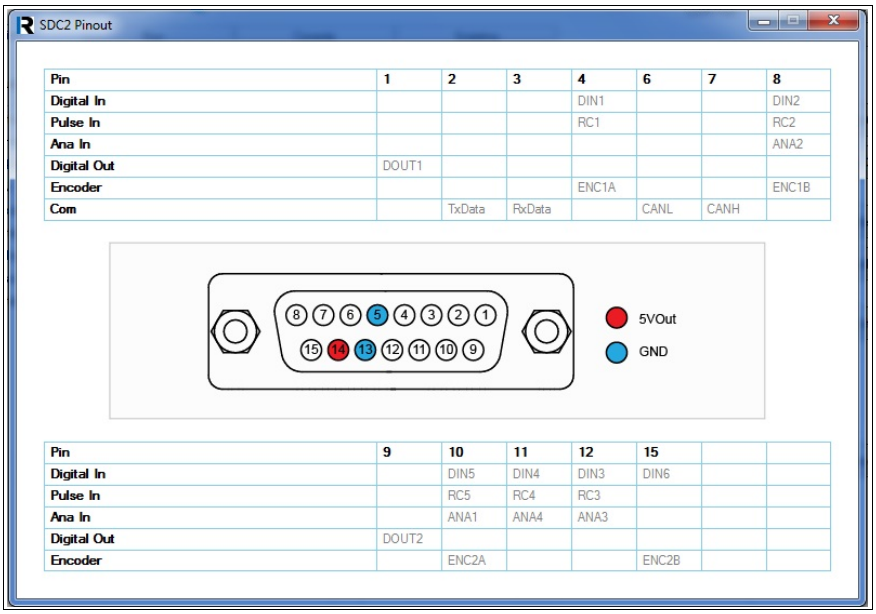
Τέλος, ο ελεγκτής έχει ενσωματωμένες ρουτίνες όπως, π.χ., η επιλογή της φοράς της κίνησης όταν δοθεί μια νέα εντολή, ανάλογα με την τρέχουσα θέση, κ.α.

Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής απλοποιεί κατά πολύ τη διαδικασία του ελέγχου ενός σερβοκινητήρα, ενώ μπορεί παράλληλα να συνδεθεί με κινητήρες οι οποίοι έχουν σχετικά υψηλές απαιτήσεις σε τάση και ρεύμα.

Όλα τα παραπάνω έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του ελεγκτή καθώς και στην ευκολία της εκμάθησης της χρήσης του.

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή έπρεπε να οδηγηθούν δύο σερβοκινητήρες, Για το λόγο αυτό έπρεπε να συνδεθεί ο κινητήρας αλλά και ο κωδικοποιητής κάθε συνόλου στον ελεγκτή. Η καλωδίωση των παραπάνω έπρεπε να επεκταθεί καθώς ο ελεγκτής, για λόγους ασφαλείας, έπρεπε να είναι τουλάχιστον έξω από το χώρο εργασίας του βραχίονα. Η επέκταση έγινε από τον υπογράφοντα καθώς και η σύνδεση των κωδικοποιητών σε d-sub connector των 15 pin.

Η σύνδεση έγινε σύμφωνα με το διάγραμμα σύνδεσης όπως αυτό δίνεται από το RoboRun, το πρόγραμμα που απεικονίζεται παραπάνω.

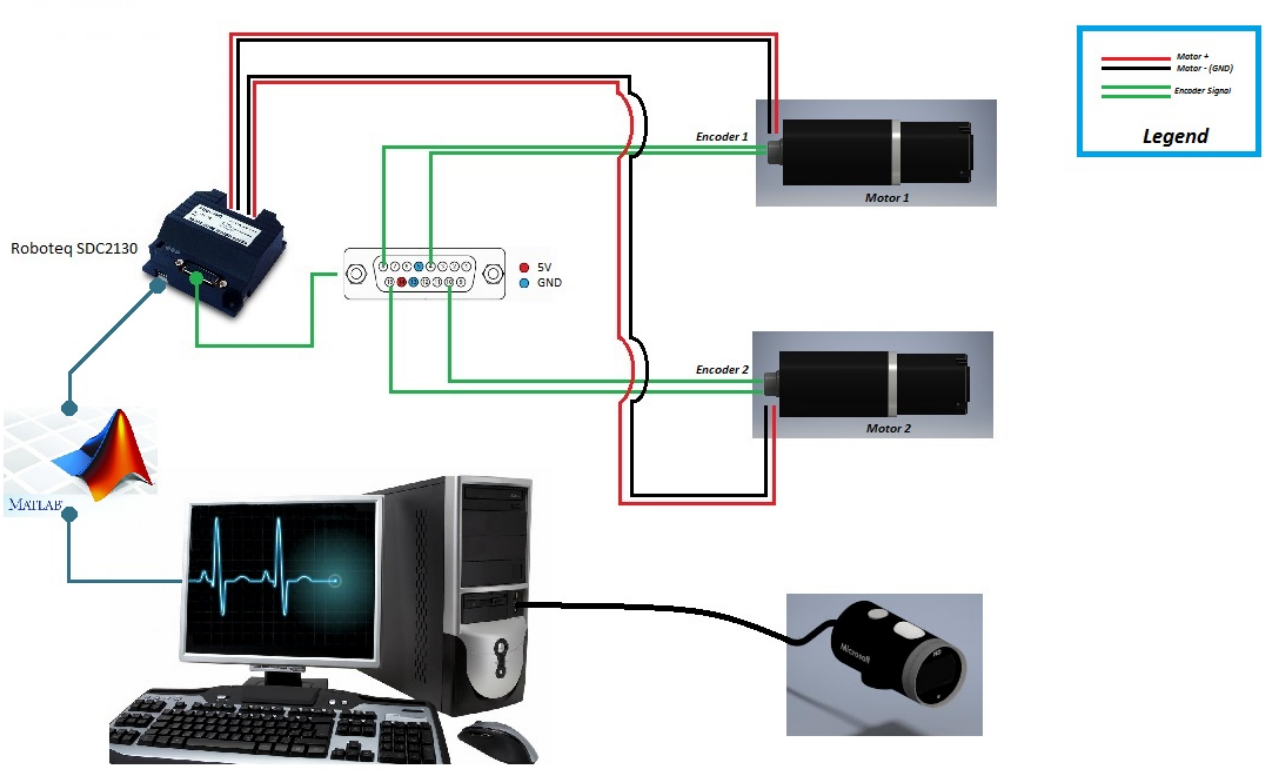


Pin	1	2	3	4	6	7	8
Digital In				DIN1			DIN2
Pulse In				RC1			RC2
Ana In							ANA2
Digital Out	DOUT1						
Encoder				ENC1A			ENC1B
Com		TxData	RxData		CANL	CANH	

Pin	9	10	11	12	15		
Digital In		DIN5	DIN4	DIN3	DIN6		
Pulse In		RC5	RC4	RC3			
Ana In		ANA1	ANA4	ANA3			
Digital Out	DOUT2						
Encoder		ENC2A			ENC2B		

Επιπλέον, για λόγους ευκολίας χειρισμού τοποθετήθηκε στη τροφοδοσία διακόπτης αλλά και ασφάλεια, όπως ορίζεται και από το εγχειρίδιο του ελεγκτή.

Στην παρούσα εφαρμογή δεν υπήρχε λόγος να γραφτεί κώδικας μέσα στον ελεγκτή, αφού όλοι οι υπολογισμοί θα γίνονταν στη Matlab και θα μεταφερόταν στον ελεγκτή μέσω σειριακής σύνδεσης από τη θύρα USB.



Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, η πληροφορία της εικόνας, μεταφερόταν από την κάμερα στον υπολογιστή, επεξεργαζόταν στη Matlab και αποστέλλονταν οι επιθυμητές θέσεις στον ελεγκτή σε πραγματικό χρόνο. Ο κλειστός βρόγχος για τον έλεγχο των κινητήρων εκτελούνταν μέσα στον ελεγκτή, όπου μπορούσε να επιλεχθεί το είδος του ελέγχου και τα κέρδη του κάθε σκέλους από το interface του ελεγκτή.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και αποτελέσματα από πειράματα.

Με την αρχή της εκτέλεσης πραγματικών πειραμάτων, έγινε αμέσως αντιληπτό ότι ο κώδικας της μηχανικής όρασης που είχε αναπτυχθεί στο V-REP, δεν ήταν αρκετός για την ανίχνευση της μπάλας στις ρίψεις των πραγματικών πειραμάτων.

Παρ' όλα αυτά φάνηκε αμέσως ότι η αρχή πάνω στην οποία βασίστηκε ο υπολογισμός της θέσης στο χώρο ήταν σωστή. Και ότι τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν οφείλονταν σε τρεις βασικούς παράγοντες:

- Προβλήματα στη μετατροπή των συστημάτων συντεταγμένων.
- Η σειρά των διαδικασιών ανίχνευσης του κόκκινου.
- Την ύπαρξη frame όπου η ανίχνευση έδινε αποτελέσματα μηδενικά ή πάρα πολύ κοντά στον θόρυβο.

Παράγραφος 9.1 : Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τα πειράματα με το πραγματικό σύστημα.

Από τα προβλήματα που αναφέρονται παραπάνω, αυτό που ήταν το ευκολότερο να ανιχνευθεί ήταν η λανθασμένη μετατροπή των συστημάτων συντεταγμένων. Παρ' όλα αυτά στα πραγματικά πειράματα ήταν εξαιρετικά δυσκολότερο να γίνει εντοπισμός και εκτίμηση του λάθους, αφού δεν υπήρχαν τα δεδομένα της τηλεμετρίας που υπήρχαν στην περίπτωση του V-REP. Άρα δεν μπορούσε να καταγραφεί η πορεία της απόκλισης των υπολογισμένων θέσεων από τις πραγματικές.

Επιπλέον, έπρεπε να γίνεται εκτίμηση της κλίσης της τροχιάς στο χώρο διαισθητικά. Δηλαδή κατά πόσο έμοιαζε με το πραγματικό. Κάποια εμφανή λάθη όπως, πρόσημα που δεν καταχωρήθηκαν στο κώδικα κτλ., ανακαλύφθηκαν αρκετά γρήγορα. Συνέχιζε όμως να παρατηρείται μία απόκλιση στις θέσεις στο χώρο η οποία προκαλούσε και εμφανώς λάθος προβλέψεις του σημείου πρόσκρουσης.

Η απόκλιση αυτή φαινόταν να γίνεται μεγαλύτερη εάν η μπάλα διέσχιζε το μέσο της εικόνας στα frame που τραβούσε η κάμερα κατά τη λήψη. Ενώ εάν αυτό δεν συνέβαινε, η απόκλιση στη θέση στο χώρο ήταν σχετικά μικρότερη, χωρίς όμως να βελτιώνεται η ακρίβεια της πρόβλεψης.

Τελικά, με προσεκτικό έλεγχο του κώδικα φάνηκε ότι αυτή η απόκλιση προκαλούνταν διότι ο υπολογισμός της θέσης στο χώρο θεωρούσε διαφορετική ανάλυση εικόνας από την πραγματική. Και καθώς, όπως εξηγείται στην παράγραφο *6.3.2*, πρέπει να μετρηθούν τα pixel της απόστασης από το κέντρο της εικόνας για να υπολογισθεί σωστά η θέση στο χώρο. Επίσης, λόγω του τρόπου που μετράει τα pixel μίας εικόνας η Matlab έπρεπε να γίνει μία κανονικοποίηση βάση της ανάλυσης της εικόνας για να εκφράζετε η θέση του κέντρου του αντικειμένου με τον τρόπο που έχει υποτεθεί ότι εκφράζετε στον αλγόριθμο.

Επειδή όμως θεωρήθηκε ότι η ανάλυση της εικόνας που λαμβάνεται από την κάμερα θα είναι γενικά σταθερή, η κανονικοποίηση αυτή υπάρχει μέσα στον κώδικα με συγκεκριμένους αριθμούς. Δεν οδηγείται δηλαδή από κάποια μεταβλητή η οποία να προσαρμόζεται όταν η ανάλυση αλλάξει.

Μετά την διόρθωση του προβλήματος, η υπολογισμένη τροχιά και η πραγματική, φαινόταν να συγκλίνουν. Επιπλέον, το σημείο πρόσκρουσης φαινόταν να συγκλίνει με την τροχιά όσο περνούσαν τα frame. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εδώ είναι μία ρίψη στην οποία η μπάλα χτύπησε στην βάση του βραχίονα και γύρισε πίσω. Εκεί ο αλγόριθμος αναγνώρισε μερικά κενά frame και μετά αναγνώρισε την επανεμφάνιση του αντικειμένου και αποτύπωσε την τροχιά του στο χώρο όπως ακριβώς έγινε κατά την επιστροφή.

Να σημειωθεί εδώ ότι υπάρχει η δυνατότητα με διάφορες συναρτήσεις της Matlab να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία της εξαγωγής της θέσης στην εικόνα με τον αναμενόμενο τρόπο. Τέτοιες συναρτήσεις είναι οι *size,* και πιθανών και άλλες. Αλλά επιλέχθηκε να μη γίνει αυτό καθώς η επιλεγμένη ανάλυση ήταν αρκετά υψηλή *(800x600)* και δεν φαινόταν να υπάρχει ανάγκη να αλλάζεται συχνά.

Το δεύτερο πρόβλημα που εμφανίστηκε ήταν η ύπαρξη θορύβου από την ανίχνευση του κόκκινου. Θεωρητικά, όπως ήταν δομημένη η συνάρτηση της ανίχνευσης του κόκκινου, θα έπρεπε να μπορεί να ρυθμιστεί να κάνει ακόμα πιο αυστηρή επιλογή, μειώνοντας έτσι το θόρυβο. Παρ' όλα αυτά, η αλλαγή των παραμέτρων δεν προκαλούσε τα αποτελέσματα που αναμενόταν. Η ανίχνευση ήταν ικανοποιητική, αλλά πάντα είχε πολύ θόρυβο. Προσεκτική ανάλυση του κώδικα έδειξε ότι μετά το πρώτο στάδιο του ελέγχου, η εικόνα γινόταν δυαδική. Αυτό σήμαινε ότι όταν αναζητούνταν τιμές τιμές μικρότερες από ένα αριθμό από 1 έως 256. Το πρόβλημα ήταν ότι ο δυαδικός πίνακας έχει τιμές 0 και 1. Άρα πρακτικά περνούσαν όλες οι τιμές που είχαν δοθεί από τον πρώτο έλεγχο.

Όταν ανιχνεύθηκε το πρόβλημα, με κατάλληλη αλλαγή των παρενθέσεων και των πράξεων, έγινε βέβαιο ότι όλα τα στάδια του αλγόριθμου λειτουργούσαν όπως έπρεπε. Να σημειωθεί εδώ ότι το πρόβλημα προέκυψε διότι το V-REP εξάγει τις εικόνες ως πίνακες τύπου *double* με δεκαδικές τιμές από 0 έως 1. Αυτή η λεπτομέρεια δεν ελέγχθηκε στον κώδικα για την πραγματική εικόνα και εκεί προέκυψε το πρόβλημα.

Το τελευταίο πρόβλημα μπορεί γενικά να περιγραφεί σαν ύπαρξη πολλών frame τα οποία προκαλούσαν απομάκρυνση της πρόβλεψης από το σωστό σημείο. Πιο συγκεκριμένα αυτό είχε δύο διαφορετικές αιτίες:

- Την ύπαρξη αρκετού θορύβου στις δυαδικές εικόνες.
- Την ύπαρξη μηδενικών frame ή frame με πολύ λίγα pixel με τιμή 1.

Ξεκινώντας από το δεύτερο να σημειωθεί ότι αντίστοιχο πρόβλημα παρατηρήθηκε και στην προσομοίωση στο V-REP, όπου εκεί υπολογιζόταν τεράστια τιμή απόστασης ή άπειρη απόσταση.

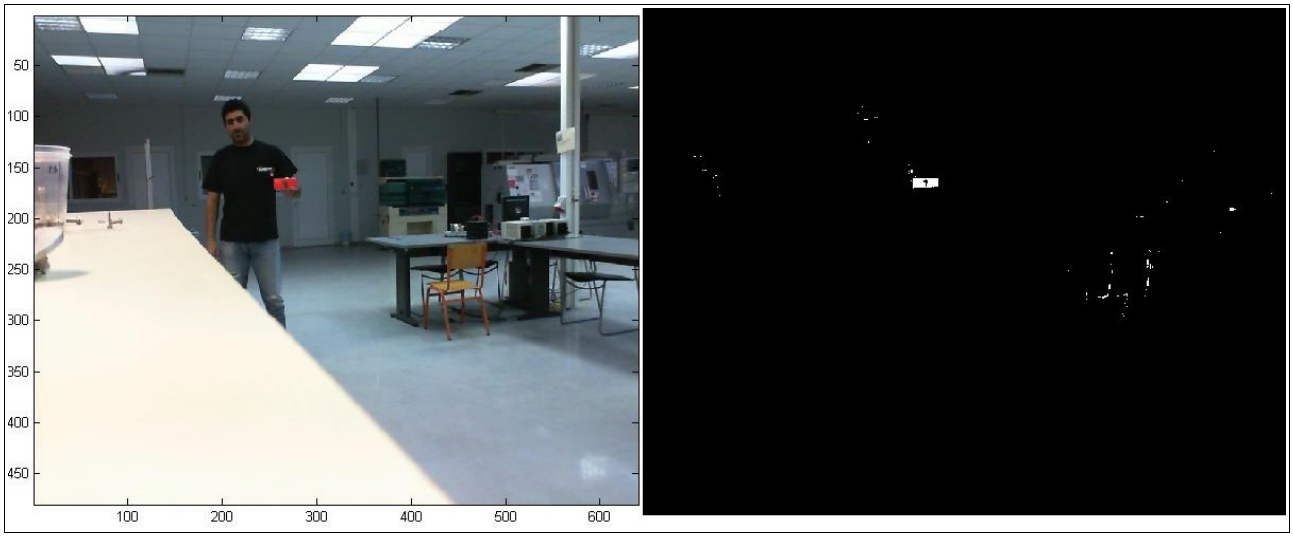
Αυτό λύθηκε κυρίως με την κατωφλίωση στο εμβαδόν που μετριέται στην εικόνα. Από τη στιγμή που τα frame που μπορούσαν, δυνητικά, να δώσουν τεράστιες αποστάσεις είχαν όλα

την ίδια τιμή=0, τότε μπορούσε ο αλγόριθμο να τα αναγνωρίζει αξιόπιστα και να τα απορρίπτει κατά την πρόβλεψη του σημείου πρόσκρουσης.

Ο θόρυβος όμως παρέμενε και αλλοίωνε το αποτέλεσμα για όλα τα frame. Να σημειωθεί εδώ ότι ο θόρυβος προερχόταν κυρίως από:

- Το χρώμα των τοίχων κοντά στην είσοδο.
- Και το χρώμα του τοίχου των γραφείων, όταν η πόρτα ήταν ανοιχτή.
- Το ρομπότ και το κάθισμα στο γραφείο απέναντι από την αίθουσα της τεχνολογίας ελέγχου

Κατ' αρχήν να αναλυθεί για ποιο λόγο προκαλούνταν ο θόρυβος σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση του ρομπότ και των καθισμάτων, εκεί το χρώμα ήταν κίτρινο ή ανοιχτό πορτοκαλί. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο *5.2.6*, μαζί με την ανίχνευση του κόκκινου γίνεται και ανίχνευση κάποιων άλλων Χροιών. Αυτό συμβαίνει διότι δεν γίνεται να ανιχνεύονται μόνο σημεία όπου ισχύει *G=B*, το οποίο είναι και ο σωστότερος ορισμός της κόκκινης Χροιάς. Και αυτό γιατί αντί για κλειστά σχήματα θα λαμβανόταν σαν ανίχνευση μερικά σημεία μέσα στο επιθυμητό σχήμα. Οι λόγοι γι αυτό έχουν αναλυθεί παραπάνω. Έτσι αυτά τα χρώματα προκαλούσαν κάποιο θόρυβο στην ανίχνευση.



Ο ίδιος θόρυβος θα μπορούσε να προκληθεί και από αποχρώσεις το μωβ αλλά δεν έτυχε να υπάρχουν τέτοια χρώματα στο χώρο των πειραμάτων. Σε προηγούμενες παραγράφους έχουν επίσης αναλυθεί και οι τρόποι αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων στην ανίχνευση.

Ο λόγος που οι τοίχοι προκαλούσαν θόρυβο όμως είναι διαφορετικός. Το χρώμα τους μπορεί να περιγραφεί σαν *"μπορντώ"*. Μία βαθιά, σκοτεινή απόχρωση του κόκκινου. Εδώ λοιπόν, ο εντοπισμός της χροιάς ήταν σωστός αλλά η φωτεινότητα δεν ήταν αυτή που έπρεπε για να αναγνωρισθούν σωστά ως μέρος της μπάλας τα συγκεκριμένα pixel. Εδώ, το πρόβλημα αντιμετωπιζόταν απλώς αυξάνοντας το όριο της Φωτεινότητας, με πολύ καλά αποτελέσματα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί μία λεπτομέρεια η οποία μπορεί να φανεί και στην αντίστοιχη εικόνα στην παράγραφο *5.2.4*. Τα αποτελέσματα από την αύξηση του ορίου της φωτεινότητας δεν "εξελίσσονται" αλλά εκθετικά. Φαίνεται δηλαδή ότι από μία τιμή και πάνω η αύξηση του ορίου κατά ίσα ποσά φέρει αυξανόμενα αποτελέσματα.

Αυτή η τελευταία λεπτομέρεια κάνει και αυτή τη ρύθμιση ελαφρώς ιδιαίτερη, καθώς από την τιμή 120 και μετά, φαίνεται ότι το όριο της φωτεινότητας αρχίζει να έχει σημαντική επιρροή στην τελική δυαδική εικόνα.

Παράγραφος 9.2 : Συμπεράσματα.

Αφού αντιμετωπίστηκαν τα προβλήματα που αναφέρονται παραπάνω, γίνανε κάποιες λήψεις αποτελεσμάτων με πολύ καλά και αναμενόμενα αποτελέσματα.

Φάνηκε δηλαδή η εκτύπωση των υπολογισμένων σημείων να είναι πολύ καλή. Φάνηκε επίσης και η μεταβολή του εμβαδού από το ένα frame στο άλλο να ακολουθεί την αναμενόμενη καμπύλη αφού, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, αυτή ήταν δευτέρου βαθμού καθώς αυξάνεται.

Αυτό ήταν και απολύτως λογικό αφού:

- Όπως έχει αποδειχθεί, η ταχύτητα στον Y είναι περίπου σταθερή.
- Η φαινόμενη διάμετρος αυξάνει με σταθερό ρυθμό, άρα βάσει μίας πρωτοβάθμιας εξίσωσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μορφή της εξίσωσης δευτέρου βαθμού είναι αναμενόμενη και μάλιστα δικαιώνει και την επιλογή της απόρριψης της αεροδυναμικής αντίστασης από τους υπολογισμούς.

Τέλος αποδεικνύεται ότι η χρήση της προοπτικής είναι έγκυρος τρόπος υπολογισμού της απόστασης με σημαντική ακρίβεια, άμεσα συγκρίσιμη με αυτή της στερεοσκοπίας. Μάλιστα, η ακρίβεια προκύπτει από τη επιτυχία της ανίχνευσης της γεωμετρικής ιδιότητας που χρησιμοποιείται για τον συγκριτικό υπολογισμό της απόστασης. Σε αυτή την περίπτωση γινόταν προσπάθεια να ανιχνευθεί το εμβαδόν ενός κύκλου. Θα μπορούσε όμως αντίστοιχα να υπολογιστεί μόνο το μήκος μία γνωστής ακμής. Μία βασική διαφορά εδώ είναι ότι δεν βοηθάει η ανίχνευση γεωμετρικών ιδιοτήτων που δεν αλλάζουν με την κλίμακα *(Scale Invariant Geometry)*, καθώς δεν θα μπορούσε να εκτελεστεί σύγκριση σε αυτή την περίπτωση. Παράδειγμα μίας τέτοιας γεωμετρίας είναι μία γωνία στο περίγραμμα ή στην επιφάνεια ενός αντικειμένου.

Κεφάλαιο 10: Πιθανές εφαρμογές της μεθόδου αναγνώρισης βάθους.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, αυτός ο τρόπος υπολογισμού του βάθους είναι πολύ λιγότερο απαιτητικός σε υπολογιστική ισχύ από τις μεθόδους που είναι σε χρήση σήμερα. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα όπου μπορεί να γίνει αναγνώριση χρώματος αξιόπιστα, φαίνεται ότι έχει και εξαιρετική ακρίβεια τόσο στη διεύθυνση όσο και στην απόσταση του αντικειμένου από την κάμερα.

Τα παραπάνω σημαίνουν ότι αυτή είναι μια εξαιρετική μέθοδος για χρήση σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον όπου μπορεί να ελεγχθεί το τι θα υπάρχει μέσα και το πώς θα το αντιλαμβάνεται η κάμερα. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον θα υπήρχε και η δυνατότητα χρήσης αντικειμένων μόνο γνωστού μεγέθους χωρίς να θυσιάζεται ευελιξία ή λειτουργικότητα.

Θα μπορούσε για παράδειγμα να καλύπτονται τα αντικείμενα με επίστρωση ή κάλυμμα (αυτοκόλλητο) το οποίο να αντανακλά σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος στο υπέρυθρο. Μάλιστα το υπέρυθρο είναι και η πιο λογική επιλογή αφού χρησιμοποιείται ήδη σε βιομηχανικές εφαρμογές για την αναγνώριση σχημάτων και χαρακτηριστικών.



Στις περισσότερες εφαρμογές, όπως και σε αυτή της εικόνας παραπάνω, ένας βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας βασίζεται στην καταμέτρηση κομματιών για να ολοκληρώσει την παλετοποίηση, ή για να αφαιρέσει ακατέργαστα κομμάτια από μία γνωστή παλέτα.

Σε αυτό το παράδειγμα μάλιστα, τα αντικείμενα έχουν όλα το ίδιο ύψος αφού είναι τοποθετημένα σε μία βάση, η οποία συχνά κοστίζει αρκετά να κατασκευαστεί αφού ελέγχεται η παραλληλότητα της και τηρούνται αυστηρές ανοχές.

Με τη χρήση αυτής της μεθόδου υπολογισμού του βάθος, μπορεί ο βραχίονας, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον υπολογιστική ισχύ, να εκτελεί τις παραπάνω εργασίες σε παλέτες οι οποίες δεν έχουν στοιβαχτεί σωστά ή είναι άγνωστες. Επιπλέον, θα μπορούσε να λειτουργήσει σε ένα χώρο πιο δυναμικό και πιο συχνά μεταβαλλόμενο αφού αυτό που πραγματικά πρέπει να είναι σταθερά γνωστό είναι το μέγεθος των αντικειμένων που θα χειρίζεται. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την ευελιξία μιας γραμμής παραγωγής και κατά συνέπεια και την παραγωγικότητα της.

Εκτός βιομηχανικού περιβάλλοντος, θα μπορούσε ένας τέτοιος αλγόριθμος να χρησιμοποιηθεί σε εμπορικά οχήματα για τον υπολογισμό της απόστασης από το προπορευόμενο όχημα. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια, το σχήμα του οχήματος δεν μπορεί να είναι γνωστό καθώς υπάρχει τεράστια ποικιλία. Μπορεί όμως να είναι γνωστό το μέγεθος της πινακίδας με τον αριθμό κυκλοφορίας.

Αυτό είναι γενικά σταθερό ανά χώρα και, ούτως ή άλλως, υπάρχουν λίγα διαφορετικά πρότυπα στις πινακίδες παγκοσμίως. Συνήθως μάλιστα έχουν και αντίστοιχους χρωματισμούς. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα radar μικρής εμβέλειας που χρησιμοποιούνται σήμερα. Μάλιστα θα είχε και μεγαλύτερη ακρίβεια στην παρακολούθηση της απόστασης από αυτά και θα μπορούσε να είναι ακριβέστερη η πρόβλεψη της επικείμενης σύγκρουση. Αυτό θα αύξανε και την οδική ασφάλεια.

Μία άλλη πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή θα μπορούσε να είναι διάφορα συστήματα ψυχαγωγίας ή και άθλησης. Μάλιστα η απλότητα αυτού του αλγόριθμου καθιστά δυνατό αυτή να είναι μία μόνο από τις λειτουργίες ενός ρομποτικού συστήματος. Η συνεχείς ρίψη μίας μπάλας μεταξύ δύο παικτών, είναι μία πολύ διαδεδομένη, γνωστή και παλιά μορφή ψυχαγωγίας. Θα μπορούσε λοιπόν, ένας τέτοιος αλγόριθμος να είναι ενσωματωμένος σε ένα ρομποτικό σύστημα με σκοπό την ψυχαγωγία και την άσκηση παιδιών στα πλαίσια του σχολείου.

Κεφάλαιο 11: Περιοχές περαιτέρω έρευνας.

Η βασικότερη περιοχή που αξίζει να συνεχιστεί η έρευνα επάνω σε αυτή την εργασία θα ήταν η εφαρμογή του αλγόριθμου σε μη σφαιρικά σχήματα. Η πρώτη λύση που έρχεται στο μυαλό είναι η αναγνώριση χαρακτηριστικών στις διάφορες πλευρές του αντικειμένου και η μέτρηση της μεταξύ τους απόστασης. Από τη θέση στην εικόνα και το μέγεθος των χαρακτηριστικών θα μπορούσε να υπολογισθεί και η στάση του αντικειμένου στο χώρο. Οι στροφές, δηλαδή, που έχει εκτελέσει γύρω από τους τρεις άξονες που περιγράφουν των τρισδιάστατο χώρο μέσα στον οποίο βρίσκεται.

Τα παραπάνω δίνουν τη δυνατότητα του υπολογισμού της απόστασης οποιουδήποτε γνωστού σχήματος από μία μόνο κάμερα. Και όπως αναφέρθηκε και της στάσης του στο χώρο. Εδώ μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος SIFT σε συνεργασία με αυτόν της εργασίας.

Μία άλλη πολύ σημαντική εξέλιξη αυτού του αλγόριθμου θα ήταν η ομαλή συγκράτηση αντικειμένων που είναι σε βαλλιστική τροχιά από ένα βραχίονα 6 βαθμών ελευθερίας. Και εδώ μπορούν να αναπαραχθούν συμπεριφορές που παρατηρούνται στο ζωικό βασίλειο αλλά και στους ανθρώπους.

Συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία γίνεται υπολογισμός της βαλλιστικής τροχιάς καθώς και του σημείου πρόσκρουσης σε ένα γνωστό επίπεδο. Υπολογίζεται επίσης και ο χρόνος πρόσκρουσης. Με αυτά τα δύο θα μπορούσε ένα βραχίονας να αναχαιτίζει το αντικείμενο, να το συγκρατεί *(αρπάγη, βεντούζα, μαγνήτης, κ.α.)* και στη συνέχεια να:

- Κινείται επάνω στην προβλεπόμενη τροχιά ξεκινώντας με ταχύτητα ίση με αυτή του αντικειμένου τη στιγμή της αναχαίτισης. Μπορεί να χρειαστεί να έχει ήδη ξεκινήσει να επιταχύνει ο βραχίονας επάνω στην υπολογισμένη τροχιά.
- Να επιβραδύνει ομαλά *(με σταθερή επιβράδυνση)* και με το διάνυσμα της ταχύτητας του και της επιβράδυνσης πάντα εφαπτόμενα στην βαλλιστική τροχιά που έχει υπολογιστεί.

Με αυτές τις δύο αρχές, θα μπορούσε ένας βραχίονας να αναχαιτίσει ένα αντικείμενο σε βαλλιστική τροχιά, να το συγκρατήσει και να το σταματήσει χωρίς να του προκαλέσει ζημιά, αφού η επιτάχυνση θα είναι επιλεγμένη κατάλληλα.

Το παραπάνω είναι περίπου αυτό που κάνει ένας άνθρωπος όταν πιάνει ένα βαρύ ή αιχμηρό/γωνιώδες αντικείμενο που του έχουν πετάξει, έτσι ώστε να μην τραυματίσει τα χέρια του.

Τέλος, με μικρές αλλαγές στον ήδη υπάρχοντα αλγόριθμο θα μπορούσαν να παρακολουθούνται πολλαπλά αντικείμενα, να υπολογίζεται ο χρόνος πρόσκρουσης του καθενός και να γίνεται αναχαίτιση όλων. Η σειρά, δε, της αναχαίτισης θα καθορίζεται από τους χρόνους πρόσκρουσης και την μέγιστη ταχύτητα μετατόπισης που μπορεί να πετύχει το άκρο του βραχίονα.

Κεφάλαιο 12: Παράρτημα.

Παράγραφος 12.1 : Αλγόριθμος Ελέγχου.

```
function [RedPosition, PredCoord, RedCentres, AllAreas,
Red]=ComputerVisionontheFly(VidWebCam,PixDist,Limit,BrightnessRange,Threshold,Fr
m,varargin)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Finding a red ball in the camera's field of view and calculating its
%position in the 3D Cartesian System of the camera as it is described in
%the comments of the code.
%
% It then predicts the coordinates of the landing
%point in a particular plane that is perpendicular to the camera's Y-axis.
%
% As an option a Noise Reduction value can be set in the Area calculations.
%To do that specify 2 extra input arguments:
%7th Input: 'Yes'. Input that to activate the Noise Reduction function
%8th Input: input the Noise Reduction value. Please use the provided
%function to calculate this value.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all

NRval=0;

% Turning Noise Reduction on or off and setting the NR value.
if nargin>6
    narginchk(8,Inf)
    if strcmp(varargin{1},'Yes')
        disp(['Specific Noise Reduction value set at ' num2str(varargin{2})]);
        NRval=varargin{2};
    else
        disp('Specific Noise Reduction value set at 0');
    end
end

% Preallocations for speed
CmdTime(Frm)=0;
Xc(Frm)=0;
Zc(Frm)=0;
AllAreas(Frm)=0;
RedPosition(1:3,Frm)=0;
PredCoord(1:3,Frm)=0;
Red{Frm}=zeros(800,600,3);
```

```
%Time for the human to setup and startup.
pause(5)
Go=imread('Go.jpg');
imshow(Go);
pause(.5)
tic

            for Count=1:Frm
    CmdTime(Count)=toc;

    %Finding the Ball.
    Image=peekdata(VidWebCam,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%     Red{Count}=FindRedAssociative(Image,Limit,BrightnessRange);%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Finds the color red in an RGB picture operating under the assumption that
% color is a 2D object in the 3D RGB space/cube.
%
% This approach is inspired by the representation of HSV-Hue in the
% RGB space/cube.

% tic;

R=double(Image(:,:,1));
G=double(Image(:,:,2));
B=double(Image(:,:,3));

Result=(((R>Limit*G&R>Limit*B).*R)>BrightnessRange);

%  RedTime=toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% "Fill Holes" Noise Reduction Method, use with caution as it can cause%
% unexpected results. Activate by switching the comment below%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%    Red{Count}=Result;
   Red{Count}=imfill(Result,'holes');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Extracting the single largset object from the picture%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%To activate un-comment the next line of code%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%    Red{Count}=extract_largest_object2(Red{Count});
    Area=sum(sum(Red{Count}))-NRval;

        if Area<=Threshold
            continue
        end

    RedDots=sqrt((Area*4)/pi);

    RedDistance=PixDist/RedDots;


    [~,Xc(Count)]=max(sum(Red{Count})); % Index of the max of the Sums of
columns, thus revealing the Y-coordinate of the centre.
    [~,Zc(Count)]=max(sum(Red{Count},2)); % Index of the max of the Sums of
rows, thus revealing the X-coordinate of the centre.

        Xc(Count)=Xc(Count)-300;
```

```
        Zc(Count)=-Zc(Count)+400;

    AllAreas(Count)=Area;

%%%%%%%%%%%%%% Camera 3D Cartesian System %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%A 3D Cartesian system is assumed for the camera with the Y-axis positive
%values starting from the centre of the screen and going out into the camera's
%field of view.
%
%The X-axis positive values start from the centre of the screen and continue to
%the right of the screen.
%
%Similarly the Z-axis starts at the centre of the screen and goes upward.

%Calculating the Azimuth and Elevation angles that define the direction on
%which the centre of the ball is located.

% PixDist*(1/.068) represents the value of 1m in pixels, since the ball
% diametre is 0.068m. In this case that number is being used as a unit of
% measurement (benchmark).
ClockAngle=atan2(Xc(Count),PixDist*(1/.068));

%The angle can be calculated as per the Clock angle system. Here instead of
%values of 1 ~ 12 we have values 0 ~ 2pi. 0 Meaning straight ahead or in the
%direction of the Y-axis of the cameras coordinate system. The above can be
%calculated from the pic data under the "1m assumption".

Elevation=atan2(Zc(Count),((PixDist*(1/.068))./cos(ClockAngle))); %With the
Clock Angle and the "1m assumption", the elevation can also be calculated.

% Using the calculated distance and the direction angles to determine the
% position of the ball in the 3D Cartesian coordinate system of the camera.

    projdist=RedDistance*cos(Elevation);

    RedPosition(1,Count)=projdist*sin(ClockAngle);

    RedPosition(2,Count)=projdist*cos(ClockAngle);

    RedPosition(3,Count)=RedDistance*sin(Elevation);

% Transforming the values to represent the calculated point in the
%Camera coordinates.

RedPosition(1,Count)=RedPosition(1,Count);

RedPosition(2,Count)=-(RedPosition(2,Count));

RedPosition(3,Count)=(RedPosition(3,Count));


%RealTimePredictPoint
% In order to calculate the function of the motion in each axis, first the
% components of the vector of velocity need to be calculated for each axis.

%RealTimeBallVelocity

% Analyzing the vector to its three components.
% and...
```

```
Xs=RedPosition(1,1:Count);
Ys=RedPosition(2,1:Count);
Zs=RedPosition(3,1:Count);


% Taking the zeros out of the interpolation code.
Index=find(RedPosition(1,1:Count)~=0);

% Applying the least squares method to find the function that describes
% the motion in each of the three axis.
Xv=polyfit(CmdTime(Index),Xs(Index),1);
Yv=polyfit(CmdTime(Index),Ys(Index),1);
Zv=polyfit(CmdTime(Index),Zs(Index),2);

% Next the position of the wall (impact plane) needs to be input as a
% coordinate in the Y-axis. From the calculations of velocity and distance
% the time to impact can be inferred. Feeding that time (t) back to the
% equation of motion will return the coordinates of the impact point in
% each axis.

WallPosition=0;

Run2Wall=WallPosition-RedPosition(2,Count);

TimeLeft=Run2Wall/Yv(1);

PredTime=CmdTime(end)+TimeLeft;

% Calculating the predicted coordinates.

PredCoord(1,Count)=Xv(1)*PredTime+Xv(2);
% PredCoord(2,Count)=WallPosition;
PredCoord(3,Count)=Zv(1)*PredTime^2+Zv(2)*PredTime+Zv(3);

            end

            RedCentres=[Xc;Zc];
    close all

    Done=imread('Done!.png');
    imshow(Done)
    pause(1.5)

    close all
end
```

Παράγραφος 12.2 : Αλγόριθμοι Μείωσης θορύβου στην ανίχνευση του κόκκινου.

Η κατωφλίωση του εμβαδού γίνεται μέσα στον κώδικα ελέγχου από τις εντολές:

```
AllAreas(Frm)=0; (Εκτελείται πριν από την εκκίνηση του βρόγχου ελέγχου)
.
.
.
Area=sum(sum(Red{Count}))-NRval;
```

```
        if Area<=Threshold
            continue
        end (Εάν η τιμή είναι μικρότερη από το κατώφλι, προχωράει στο επόμενο
κύκλο του βρόγχου χωρίς να αποθηκεύσει καμία τιμή)

Η αφαίρεση του θορύβου γίνεται επίσης στον παραπάνω κώδικα.
```

Η εξαγωγή του μεγαλύτερου αντικειμένου γίνεται από τον παρακάτω κώδικα:

```
function [Final, Sums_array]=extract_largest_object2(Image)
% tic;
A=bwlabel(Image);

BinNo=0:max(max(A));

[Sums_array, xout]=hist(A(:),BinNo);

% This is only correct with the assumption than the pixel in position
% (1,1) is part of the background.

Sums_array(1)=0;

[~,Pos]=max(Sums_array);

Final=A==xout(Pos);
% toc;
end
```

Παράγραφος 12.3 : Μελέτες αντοχής μέσω του συστήματος CAD για τον ιμάντα και τις συνδέσεις με σφήνα.

Μελέτη του ιμάντα:

Synchronous Belts Component Generator (Version: 2016 SP1 (Build 200210100, 210))
22/1/2016
⊞ Project Info
⊞ Summary

Title	2DoF Robotic Arm
Subject	
Author	K.Froudarakis
Manager	
Company	
Category	
Keywords	
Comments	A 2 Degree of Freedom robotic arm with an integrated Machine Vision subsystem. The system utilises one vision camera and is able to track and intercept an object on a ballistic trajectory.

⊞ Project

Part Number	2DOF

Stock Number	
Description	
Revision Number	
Project	
Designer	K.Froudarakis
Engineer	K.Froudarakis
Authority	
Cost Center	
Cost	0,00 €
Date Created	7/11/2015
Vendor	
Catalog web link	

⊞ Status

User Status	
Design Status	1
Last Saved By	
Checked by	
Engr Approved by	
Date Eng Approved	
Part Type name	Assembly
Mfg Approved by	
Date Mfg Approved	
Standard	
Manufacturer	
Standards Organization	

Belt Properties

Display name		Synchronous Belt
Size		25T5 x 455
Circular pitch	pb	5,000 mm
Number of teeth	z	91,000 ul
Pitch length	L	455,000 mm
Width	B	25,000 mm
Height	H	2,200 mm
Tooth width	S	2,650 mm
Tooth angle	β	20,00 deg
Tooth height	ht	1,200 mm
Root fillet radius	rr	0,400 mm
Tooth head fillet radius	ra	0,400 mm
Minimum pulley pitch diameter	Dmin	15,000 mm

Allowable maximum working tension	Ta	875,000 N
Maximum flex frequency	fmax	60,000 Hz
Maximum belt speed	vmax	80,000 mps
Specific mass	m	0,060 kg/m

⊞ Synchronous Pulley 1 Properties

Display name		Synchronous pulley
Size		26,5T5 x 40
Type of pulley		DriveR
Number of teeth	z	40,000 ul
Number of teeth in contact	zc	27,000 ul
Circular pitch	pb	5,000 mm
Pitch Diameter	Dp	63,662 mm
Outside pulley diameter	D0	62,662 mm
Pitch line offset	a	0,500 mm
Pulley width	bf	26,500 mm
Fillet radius of teeth height	rt	0,600 mm
Fillet radius of teeth root	rb	0,400 mm
Groove width	bw	1,800 mm
Tooth height	hg	1,250 mm
Groove angle	φ	25,00 deg
X coordinate	x	0,000 mm
Y coordinate	y	0,000 mm
Span length	Lf	26,968 mm
Power ratio	Px	1,000 ul
Power	P	0,126 kW
Torque	T	12,000 N m
Speed	n	100,000 rpm
Arc of contact	β	235,75 deg
Force on input	F1	452,396 N
Force on output	F2	75,405 N
Resultant axle load	Fr	498,740 N
Static tensioning force	Fv	466,551 N

⊞ Synchronous Pulley 2 Properties

Display name		Synchronous pulley
Size		26,5T5 x 32
Type of pulley		DriveN
Number of teeth	z	32,000 ul
Number of teeth in contact	zc	20,000 ul
Circular pitch	pb	5,000 mm

Pitch Diameter	Dp	50,930 mm
Outside pulley diameter	D0	49,930 mm
Pitch line offset	a	0,500 mm
Pulley width	bf	26,500 mm
Fillet radius of teeth height	rt	0,600 mm
Fillet radius of teeth root	rb	0,400 mm
Groove width	bw	1,800 mm
Tooth height	hg	1,250 mm
Groove angle	φ	25,00 deg
X coordinate	x	0,000 mm
Y coordinate	y	122,336 mm
Center distance	C	122,336 mm
Span length	Lf	122,170 mm
Power ratio	Px	1,000 ul
Power	P	0,122 kW
Torque	T	9,312 N m
Speed	n	125,000 rpm
Transmission ratio	i	0,800 ul
Arc of contact	β	218,50 deg
Force on input	F1	75,405 N
Force on output	F2	452,396 N
Resultant axle load	Fr	513,556 N
Static tensioning force	Fv	498,285 N

⊞ Flat Pulley 3 Properties

Display name		Flat Pulley1
Size		Custom
Type of pulley		Idler
Nominal diameter	D	48,000 mm
Pitch Diameter	Dp	49,000 mm
Pulley width	B	25,000 mm
X coordinate	x	12,608 mm
Y coordinate	y	61,168 mm
Center distance	C	62,454 mm
Span length	Lf	37,470 mm
Power ratio	Px	0,000 ul
Torque	T	0,000 N m
Speed	n	129,922 rpm
Transmission ratio	i	0,770 ul
Arc of contact	β	94,26 deg
Force on input	F1	452,396 N

Force on output	F2	452,396 N
Resultant axle load	Fr	663,111 N
Static tensioning force	Fv	386,819 N

Strength check

Power	P	0,126 kW
Torque	T	12,000 N m
Speed	n	100,000 rpm
Efficiency	η	0,970 ul
Service factor	cp	1,000 ul
Resultant service factor	cPR	2,321 ul
Belt Speed	v	0,333 mps
Effective pull	Fp	376,991 N
Centrifugal force	Fc	0,007 N
Belt installation tension	Ft	263,900 N
Maximum tension in belt span	Ftmax	452,396 N
Teeth in mesh factor	kz	1,000 ul
Tension factor	k1	1,200 ul

□ Summary of Messages

9:56:13 μμ Calculation: Calculation indicates design compliance!

Μελέτη της σφήνας του 1ου βαθμού:

Parallel Key Component Generator (Version: 2016 SP1 (Build 200210100, 210))
22/1/2016

□ Project Info
□ Summary

Title	2DoF Robotic Arm
Subject	
Author	K.Froudarakis
Manager	
Company	
Category	
Keywords	
Comments	A 2 Degree of Freedom robotic arm with an integrated Machine Vision subsystem. The system utilises one vision camera and is able to track and intercept an object on a ballistic trajectory.

□ Project

Part Number	2DOF
Stock Number	
Description	
Revision Number	
Project	
Designer	K.Froudarakis
Engineer	K.Froudarakis
Authority	
Cost Center	
Cost	0,00 €
Date Created	7/11/2015
Vendor	
Catalog web link	

□ Status

User Status	
Design Status	1
Last Saved By	
Checked by	
Engr Approved by	
Date Eng Approved	
Part Type name	Assembly
Mfg Approved by	
Date Mfg Approved	
Standard	
Manufacturer	
Standards Organization	

□ Guide

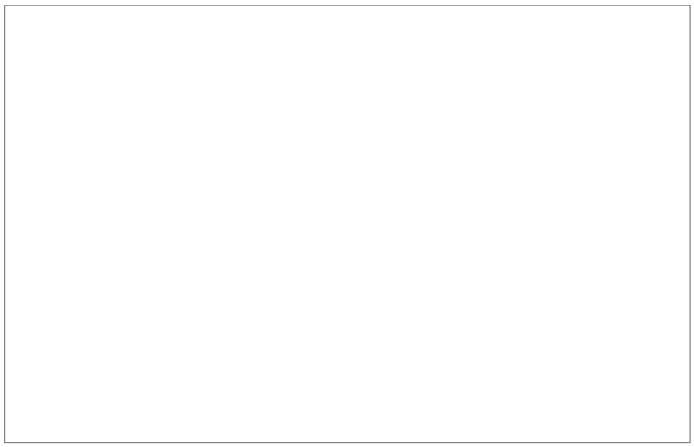
Method of Load Calculation - Power calculation for the specified torque and speed
Type of Strength Calculation - Strength check for the specified load, dimensions and joint properties

□ Loads

Power	P	0,126 kW
Speed	n	100,000 rpm
Torque	T	12,000 N m

□ Dimensions

Shaft Diameter	d	12,00000 mm
Hollow Shaft Inner Diameter	dh	0,000 mm



□ Key

Key Width	b	4,000 mm
Key Height	h	4,000 mm
Key Length	l	28,000 mm
Functional Length	lf	24,000 mm
Key Chamfer	s	0,400 mm
Key Radius	R	0,160 mm

□ Joint Properties

Number of Keys	N	1,000 ul
Application Factor	Ka	1,200 ul
Fatigue-Life Factor	Kf	1,800 ul
Wear-Life Factor	Kw	1,000 ul
Load Distribution Factor	Km	1,000 ul
Desired Safety	Sv	1,000 ul

□ Material

Key			Shaft			Hub		
Material	Carbon steel		Material	Carbon steel		Material	Structural steel	
Allowable Pressure	pA	130,000 MPa	Allowable Pressure	pA	130,000 MPa	Allowable Pressure	pA	90,000 MPa
			Allowable Stress in Shear	τA	200,000 MPa			

□ Results

Min. Functional Key Length	lmin	9,209 mm
Min. Shaft Diameter	dmin	5,884 mm
Strength Check		Positive

□ Key

Calculated Pressure	pc	36,547 MPa
Safety	S	3,557 ul

□ Shaft

Calculated Pressure	pc	36,547 MPa
Safety	S	3,557 ul

□ Hub

Calculated Pressure	pc	34,535 MPa
Safety	S	2,606 ul

□ Summary of Messages

10:03:28 μμ Calculation: Calculation indicates design compliance!

Μελέτη της σφήνας του 2ου βαθμού:

Parallel Key Component Generator (Version: 2016 SP1 (Build 200210100, 210))
22/1/2016

□ Project Info
□ Summary

Title	2DoF Robotic Arm
Subject	
Author	K.Froudarakis
Manager	
Company	
Category	
Keywords	
Comments	A 2 Degree of Freedom robotic arm with an integrated Machine Vision subsystem. The system utilises one vision camera and is able to track and intercept an object on a ballistic trajectory.

□ Project

Part Number	2DOF
Stock Number	
Description	
Revision Number	
Project	
Designer	K.Froudarakis
Engineer	K.Froudarakis
Authority	
Cost Center	
Cost	0,00 €
Date Created	7/11/2015
Vendor	
Catalog web link	

□ Status

User Status

Design Status	1
Last Saved By	
Checked by	
Engr Approved by	
Date Eng Approved	
Part Type name	Assembly
Mfg Approved by	
Date Mfg Approved	
Standard	
Manufacturer	
Standards Organization	

□ Guide

Method of Load Calculation - Speed calculation for the specified input power and torque
Type of Strength Calculation - Strength check for the specified load, dimensions and joint properties

□ Loads

Power	P	0,001 kW
Speed	n	3600,000 rpm
Torque	T	0,003 N m

□ Dimensions

Shaft Diameter	d	10,00000 mm
Hollow Shaft Inner Diameter	dh	0,000 mm



□ Key

Key Width	b	3,000 mm
Key Height	h	3,000 mm
Key Length	l	8,000 mm
Functional Length	lf	0,500 mm
Key Chamfer	s	0,400 mm
Key Radius	R	0,160 mm

□ Joint Properties

Number of Keys	N	2,000 ul
Application Factor	Ka	1,000 ul
Fatigue-Life Factor	Kf	1,000 ul
Wear-Life Factor	Kw	1,000 ul
Load Distribution Factor	Km	0,600 ul
Desired Safety	Sv	1,000 ul

□ Material

Shaft

Key

Material	User material		Material	User material		Hub	
Allowable Pressure	pA	246,000 MPa	Allowable Pressure	pA	246,000 MPa	Material	User material
			Allowable Stress in Shear	τA	344,000 MPa	Allowable Pressure	pA 246,000 MPa

□ Results

Min. Functional Key Length	lmin	0,002 mm
Min. Shaft Diameter	dmin	0,340 mm
Strength Check		Positive

□ Key

Calculated Pressure	pc	0,804 MPa
Safety	S	306,041 ul

□ Shaft

Calculated Pressure	pc	0,804 MPa
Safety	S	306,041 ul

□ Hub

Calculated Pressure	pc	0,804 MPa
Safety	S	306,041 ul

□ Summary of Messages

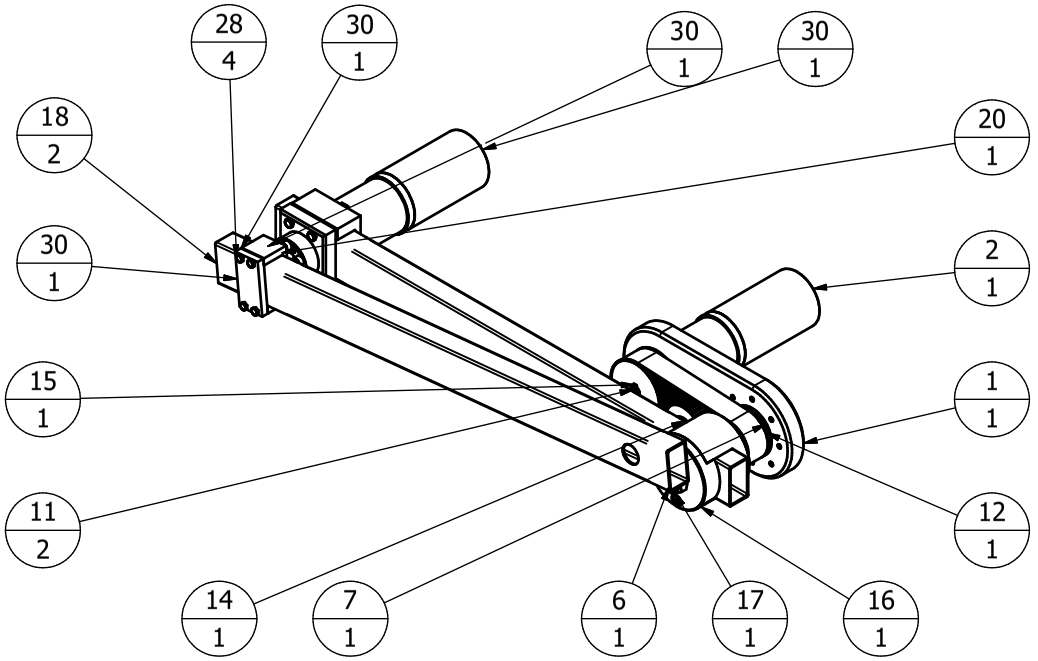
10:16:14 μμ Calculation: Calculation indicates design compliance!

Παράγραφος 12.4 : <u>Μηχανολογικά σχέδια της τελευταίας έκδοσης του βραχίονα.</u>

Ακολουθούν τα μηχανολογικά σχέδια της τελευταίας έκδοσης του βραχίονα.

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	TransmissionMount	
2	1	ElectroMotormotor	
3	1	TensionerMount	
4	1	ISO 7089 - 8 - 140 HV	Plain washers - Normal series - Product grade A
5	1	ISO 8675 - M8 x 1	Hexagon thin nuts (chamfered) with metric fine pitch thread
6	1	1stDegreeShaft	
7	1	4304 ATN9	Double row, design ATN9-Deep groove ball bearings
8	2	ISO 7089 - 4 - 140 HV	Plain washers - Normal series - Product grade A
9	2	ISO 4762 - M4 x 16	Hexagon Socket Head Cap Screw
10	4	ISO 4762 - M5 x 20	Hexagon Socket Head Cap Screw
11	2	Shaft	
12	1	Synchronous Belts Transmission	
13	1	Key Connection	
14	1	628	Explorer, Single row, open, with recessed outer ring-Deep groove ball bearings
15	1	DIN 6885 - A 4 x 4 x 28	Parallel Key
16	1	ArmHolderAssembly	

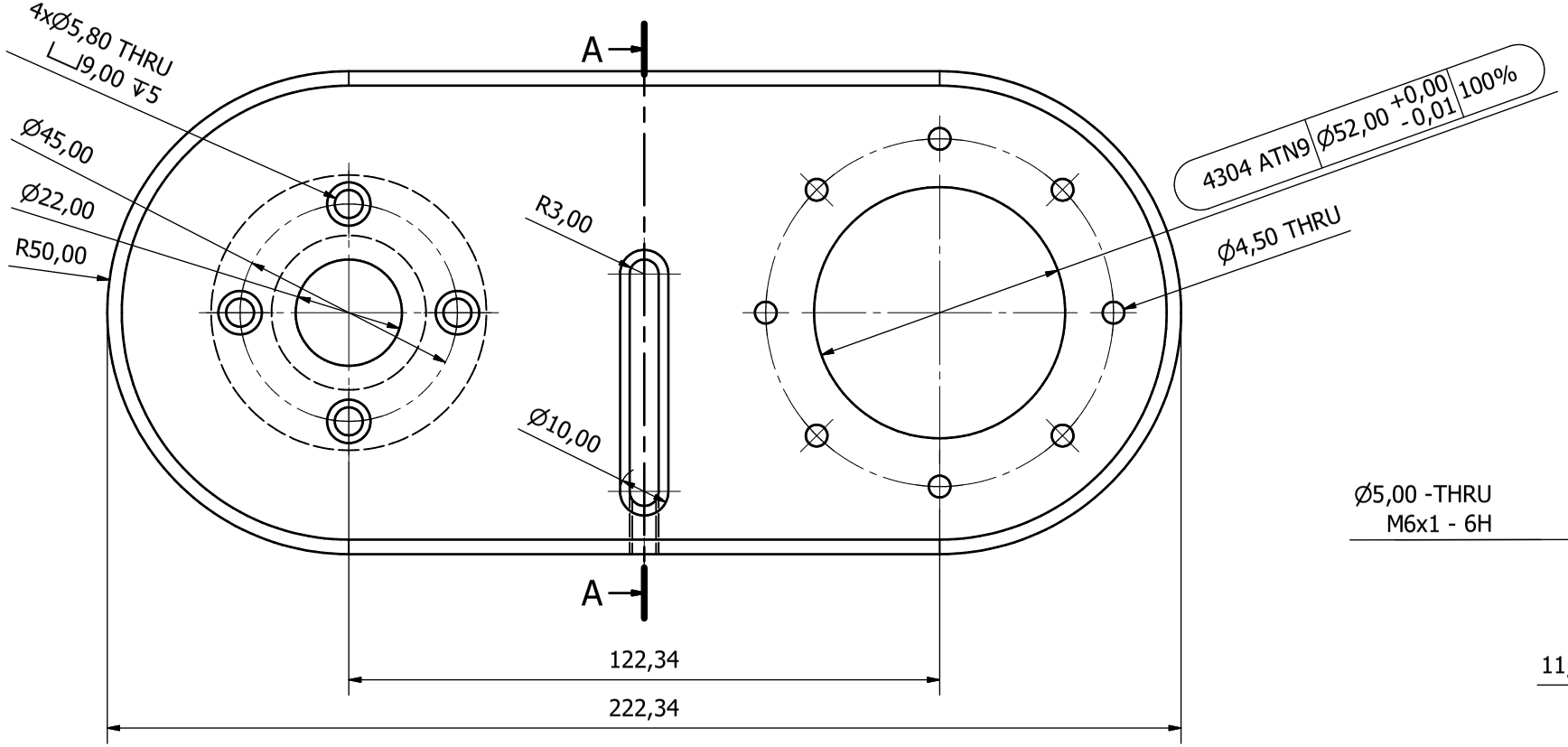
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
17	1	ISO 8675 - M20 x 1,5	Hexagon thin nuts (chamfered) with metric fine pitch thread
18	2	ArmProfile	
20	1	Double Row 4200 bearing	
24	2	DIN 6885 - A 3 x 3 x 8	Parallel Key
28	4	ISO 4014 - M4 x 25	Hexagon head bolt - product grades A and B
29	2	ISO 2491 - A 6 x 4 x 14	Thin parallel keys
30	1	2nd Degree of Freedom	

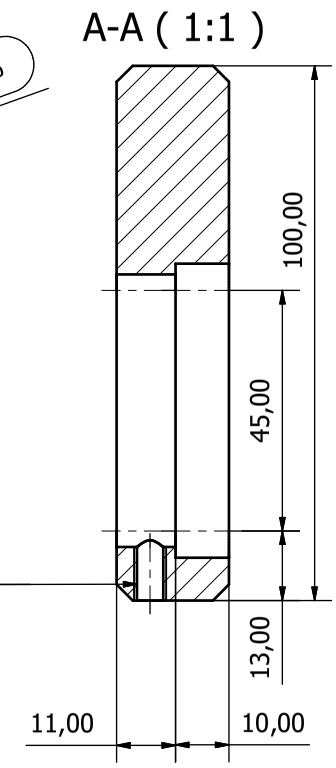


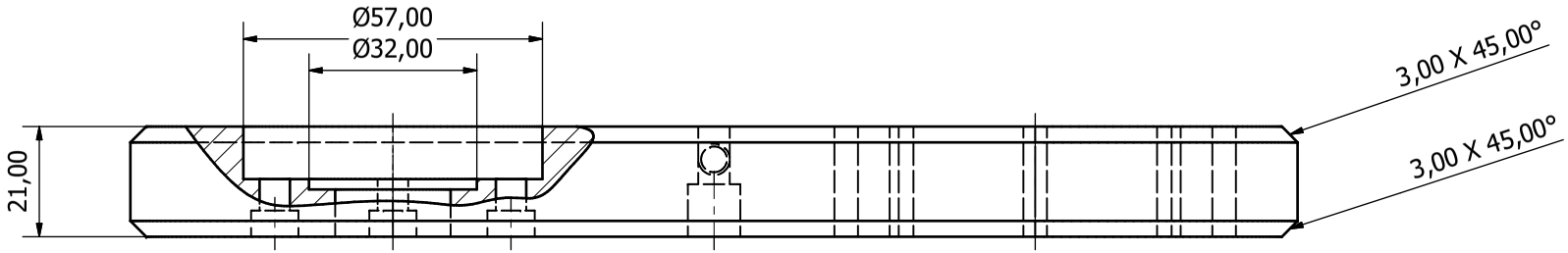
Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	
K.Froudarakis				7/11/2015	

2DoF Robotic Arm

	Edition	Sheet
2DOF		1 / 11

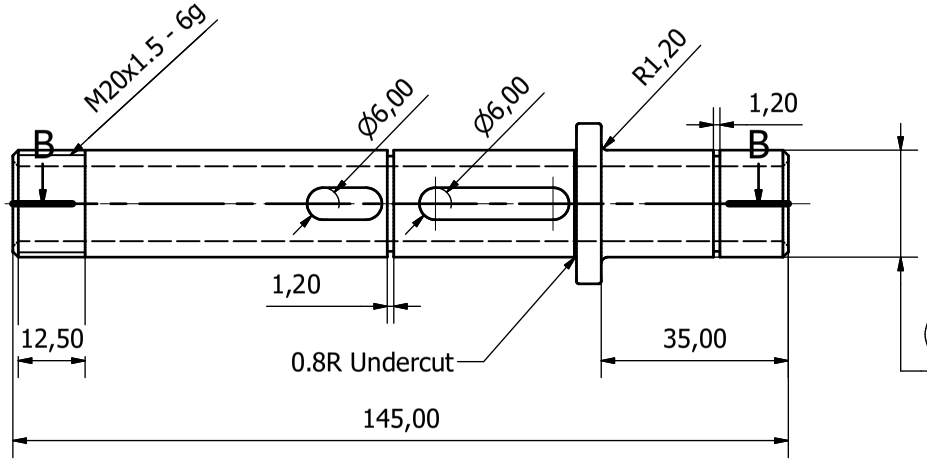


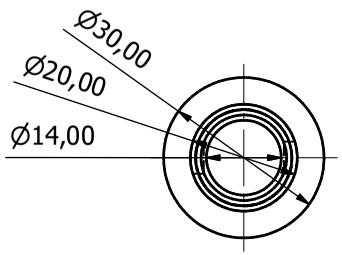




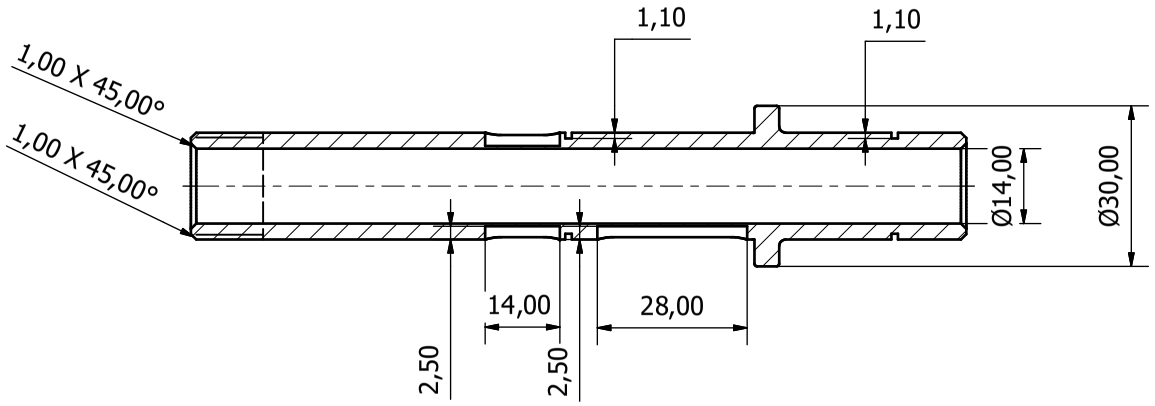
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges	2DoF Robotic Arm		
	2DOF	Edition	Sheet 2 / 11

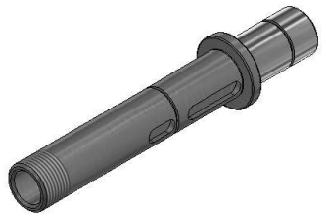




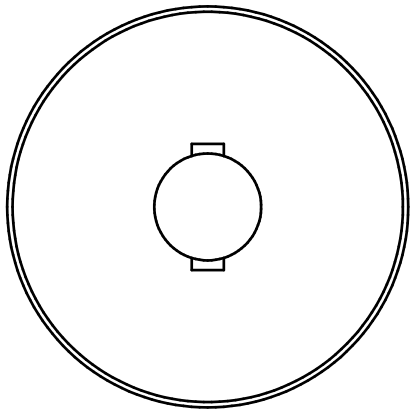
4304 ATN9	Ø20,00	+0,005 -0,000	100%

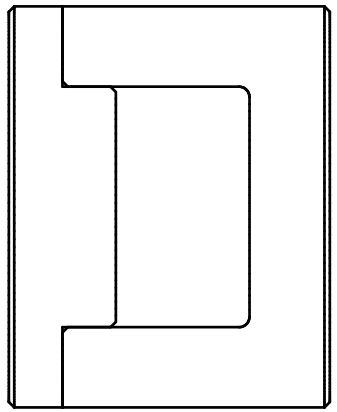


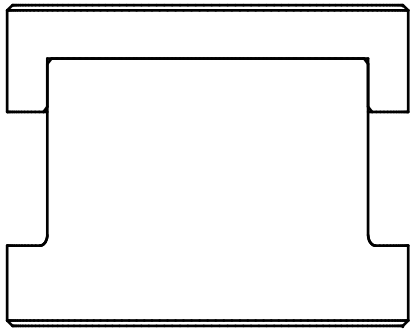
B-B (1 : 1)

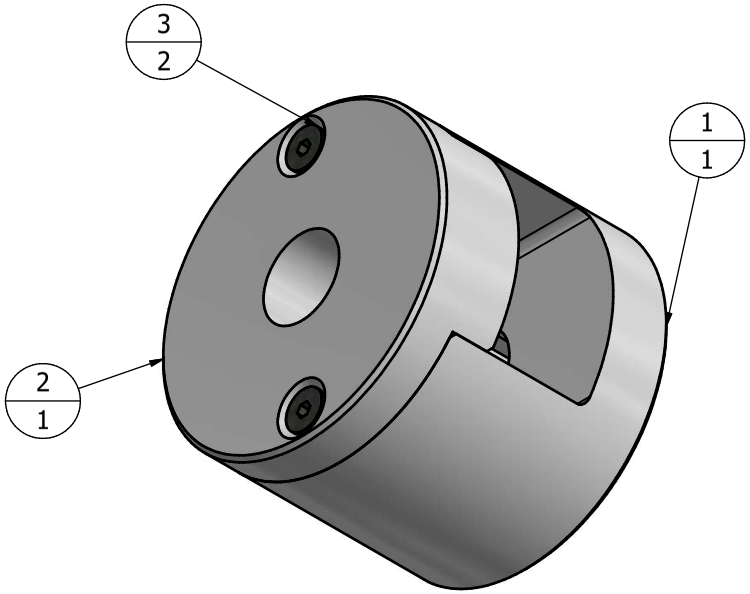


Designed by K.Froudarakis	Checked by	Approved by	Date		Date 7/11/2015	
Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges		2DoF Robotic Arm				
		2DOF		Edition	Sheet 3 / 11	







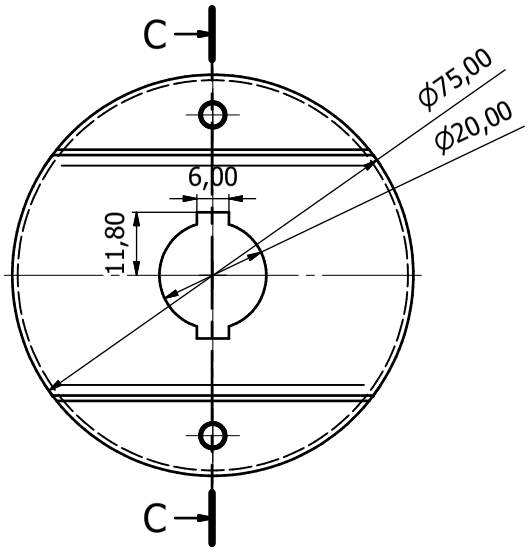


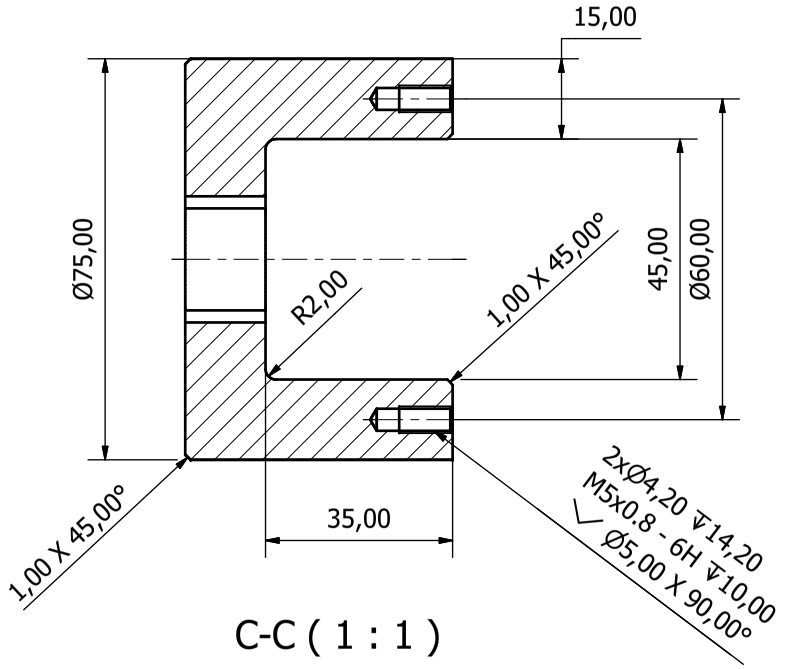
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Arm1Holder	
2	1	Arm1 Holder Cap	
3	2	ISO 10642 - M5 x 8	Hexagon Socket Countersunk Head Screw-1 - Product grade A

Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

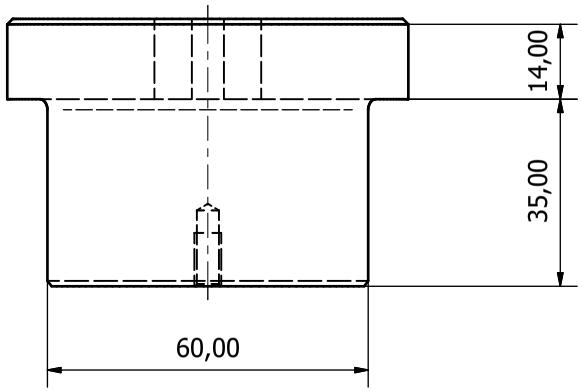
2DoF Robotic Arm

2DOF	Edition	Sheet 4 / 11

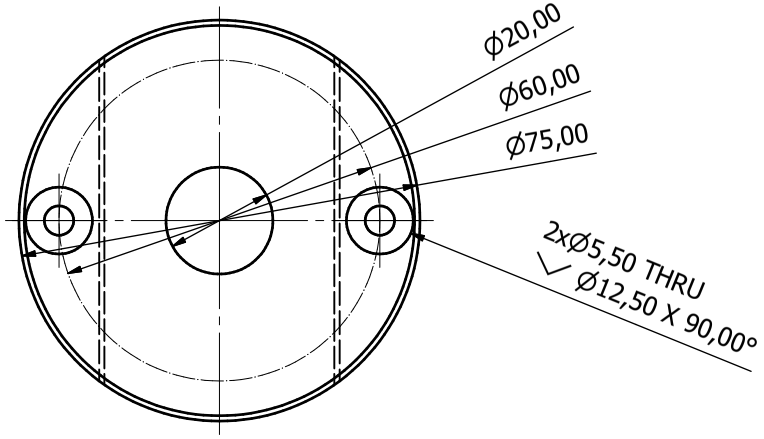


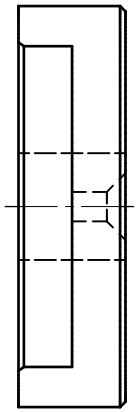


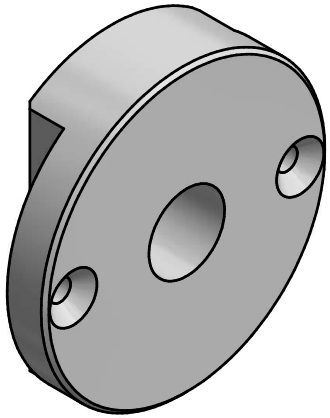
C-C (1 : 1)

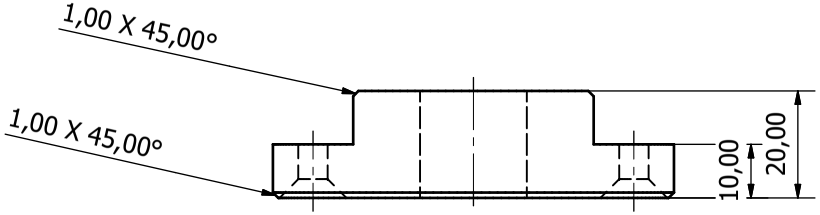


Designed by: K.Froudarakis	Checked by:	Approved by:	Date:	Date: 7/11/2015	
Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges	2DoF Robotic Arm				
	2DOF		Edition:	Sheet: 5 / 11	





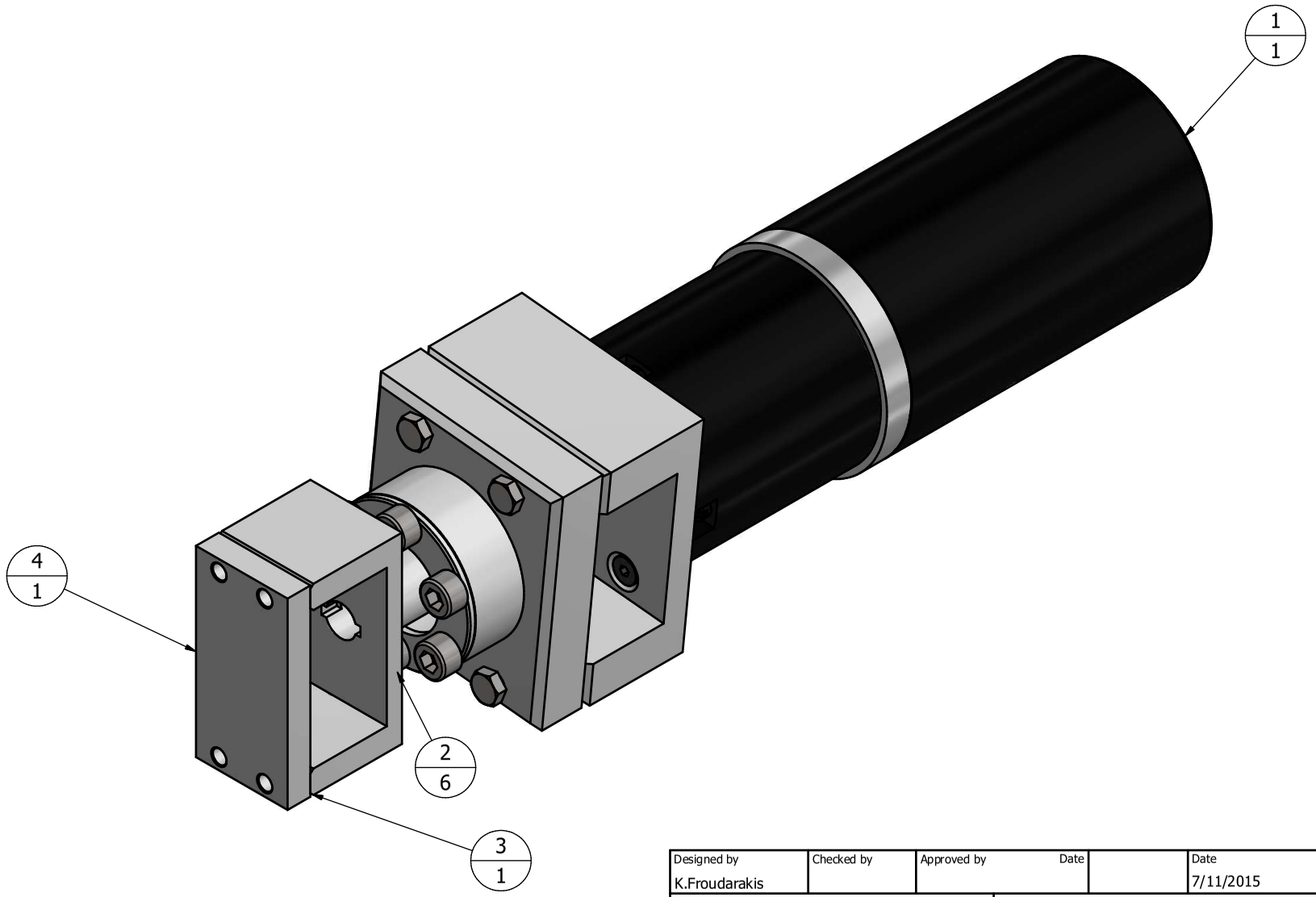




Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges	2DoF Robotic Arm		
	2DOF	Edition	Sheet 6 / 11

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Motor2Assembly	
2	6	ISO 4762 - M6 x 10	Hexagon Socket Head Cap Screw
3	1	2nd Arm Holder	
4	1	Arm2 Holder Cap	

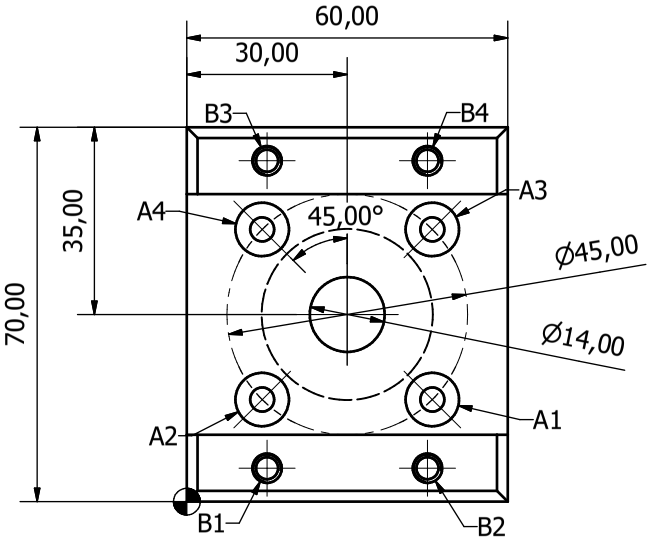


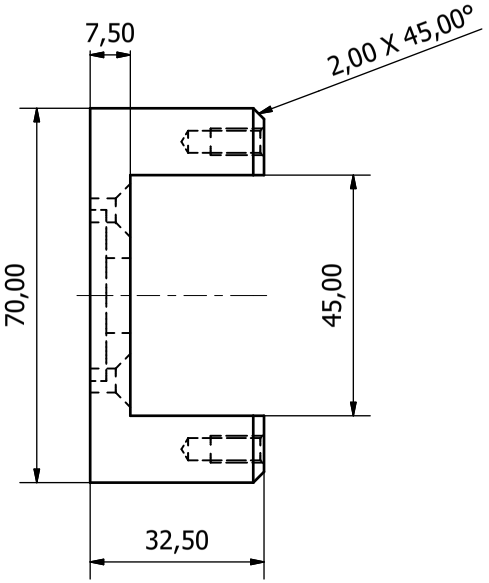
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

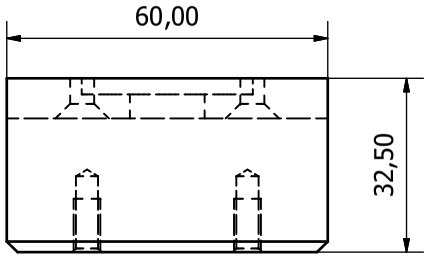
	2DoF Robotic Arm		
	2DOF	Edition	Sheet 7 / 11

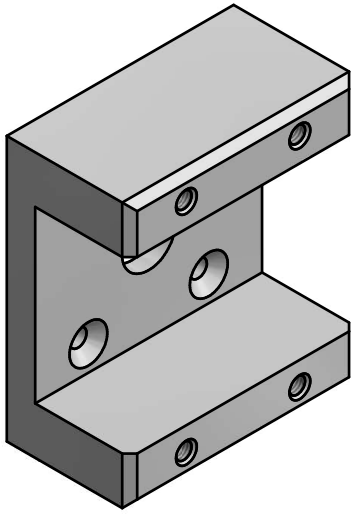
HOLE TABLE

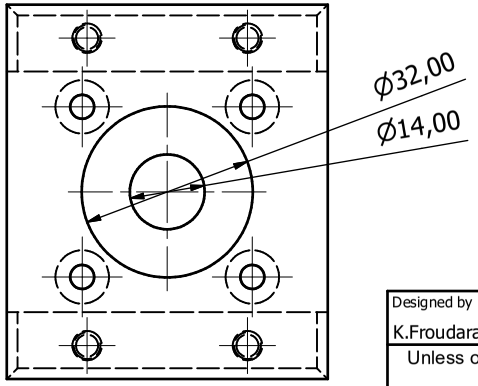
HOLE	XDIM	YDIM	DESCRIPTION	TAP DRILL DIAMETER
A2	14,09	19,09	Ø4,50 THRU ⌵ Ø10,00 X 90,00°	-
A1	45,91	19,09	Ø4,50 THRU ⌵ Ø10,00 X 90,00°	-
A4	14,09	50,91	Ø4,50 THRU ⌵ Ø10,00 X 90,00°	-
A3	45,91	50,91	Ø4,50 THRU ⌵ Ø10,00 X 90,00°	-
B1	15,00	6,25	M5x0.8 - 6H ⌵ Ø5,50 X 90,00°	4,20
B2	45,00	6,25	M5x0.8 - 6H ⌵ Ø5,50 X 90,00°	4,20
B3	15,00	63,75	M5x0.8 - 6H ⌵ Ø5,50 X 90,00°	4,20
B4	45,00	63,75	M5x0.8 - 6H ⌵ Ø5,50 X 90,00°	4,20











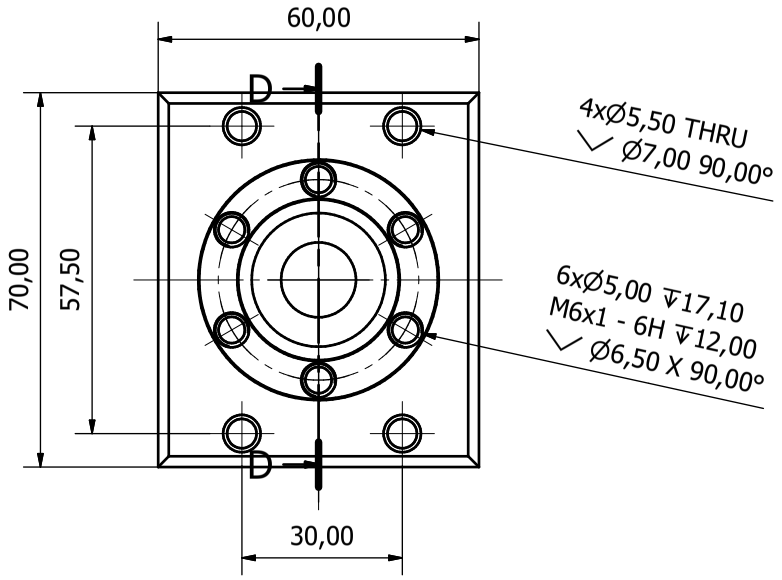
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

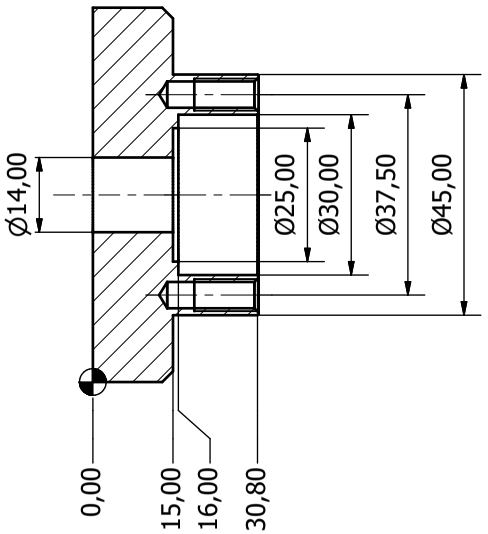
Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm

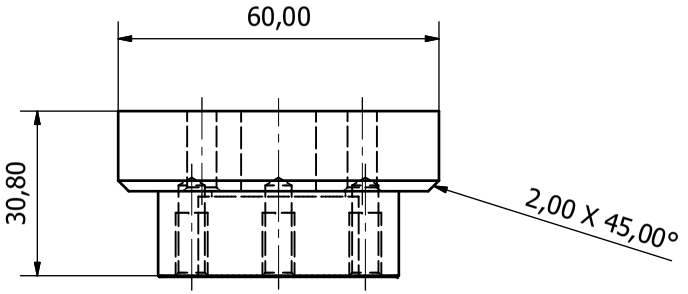
Debur and break sharp edges

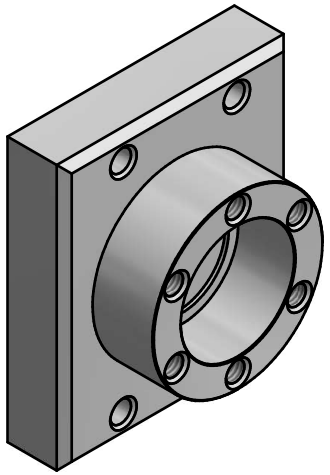
2DoF Robotic Arm

2DOF | Edition | Sheet 8 / 11

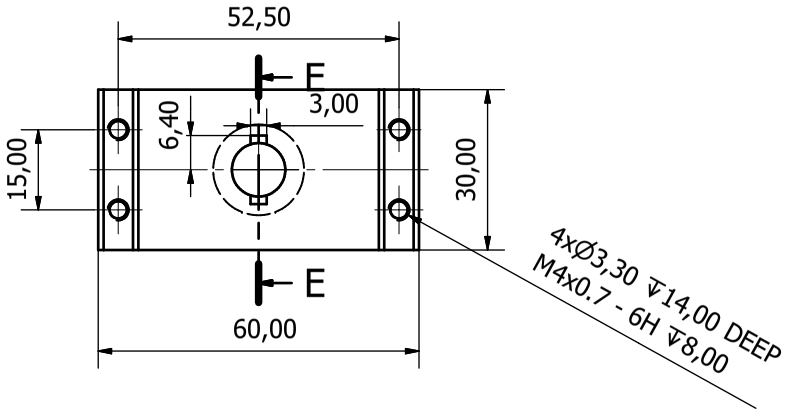


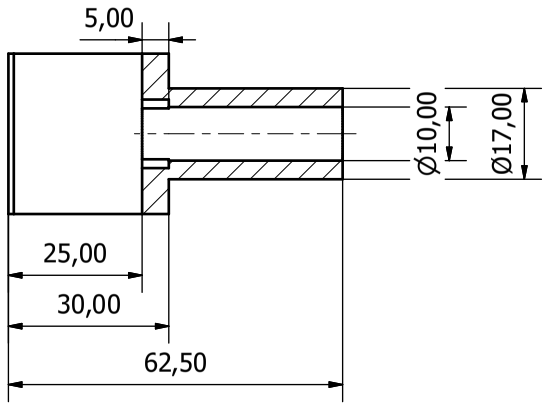




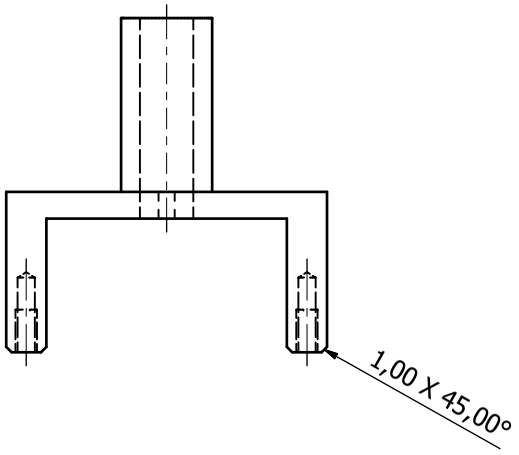


Designed by: K.Froudarakis	Checked by:	Approved by:	Date:	Date: 7/11/2015	
Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges	2DoF Robotic Arm				
	2DOF		Edition:	Sheet: 9 / 11	



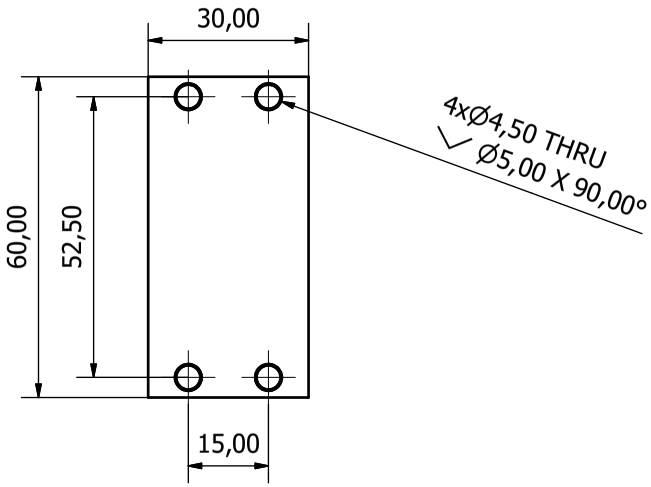


E-E (1 : 1)

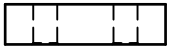


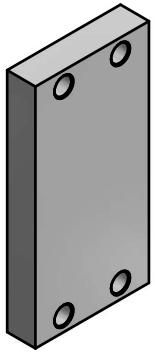
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

Unless otherwise designated tolerances are ± 0.05mm Debur and break sharp edges	2DoF Robotic Arm		
	2DOF	Edition	Sheet 10 / 11









Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
K.Froudarakis					7/11/2015	

	2DoF Robotic Arm		
	2DOF	Edition	Sheet 11 / 11

Βιβλιογραφία

(1) Perspective https://en.wikipedia.org/wiki/Perspective_(visual)

(2) 3D monocular robotic ball catching: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889013001176

(3) Autodesk 123D http://www.123dapp.com/

(4) Gunter von Noorden - Binocular Vision and Ocular Motility – Chapter 2 Binocular Vision and Space Perception, Paragraph - Monocular (Nonstereoscopic) Clues to Spatial Orientation

(5) https://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth

(6) Matlab – Product Help

(7) Mariner, Liz (2007), Cleared for Takeoff: English for Pilots, Book 1, AE Link Publications, pp. 89–90, ISBN 978-0-9795068-0-2

(8) Drag of a Sphere - NASA

(9) Robsim Toolbox http://sites.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/wpage.php?wpage_id=71 53

(10) Bullet Physics http://www.bulletphysics.org/

(11) Open Source Dynamics http://www.ode.org/

(12) Vortex Dynamics http://www.cm-labs.com/

(13) V-REP manual http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/

(14) SKF 61802

(15) SKF 3202

(16) Roboteq SDC2130 http://www.roboteq.com/index.php/roboteq-products-and-services/brushed-dc-motor-controllers/sdc2130-detail