



**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**

**Π.Μ.Σ. “ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες**

**Αγιοπετρίτης Χριστόδουλος**

**Εισηγητής: Δρ Ιωάννης Έλληνας, Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΙΟΣ 2017**





Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες**

**Αγιοπετρίτης Χριστόδουλος**

**A.M. AIS0095**

**Εισηγητής:**

**Δρ Ιωάννης Έλληνας, Καθηγητής**

**Εξεταστική επιτροπή:**

**Ημερομηνία εξέτασης:**

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αγιοπετρίτης Χριστόδουλος, του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου ΑΙS0097, μεταπτυχιακός φοιτητής του μεταπτυχιακού «Εφαρμοσμένα Πληροφοριακά Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ Συστημάτων Τ.Ε. του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Διπλωματική Εργασία (Δ.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Δ.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερομένου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Δ.Ε. με άλλο θέμα και με διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Δ.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού εξαμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος εσωτερικού Κανονισμού.»

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από μεγάλη προσπάθεια, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό της κίνησης ενός ρομποτικού βραχίονα με Raspberry, Pi Camera και OpenCV.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Έλληνα και την οικογένειά μου που με στήριξαν στην προσπάθειά μου αυτή.



Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον έλεγχο ενός ρομποτικού βραχίονα πέντε βαθμών ελευθερίας, μέσω της κίνησης των δαχτύλων του χεριού μας τα οποία αναγνωρίζονται από την Pi Camera που είναι εγκατεστημένη στο Raspberry. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούμε το Raspberry Pi 3 model B το οποίο έχουμε συνδέσει την Pi Camera, σε συνδιασμό με δύο διάτρητες πλακέτες (breadboards). Στην μία έχει τοποθετηθεί το T-Cobbler έτσι ώστε να επεκτείνουμε το GPIO του Raspberry για ασφαλέστερη χρήση του και στην άλλη έχουν τοποθετηθεί τρία ολοκληρωμένα L293D κατάλληλα συνδεδεμένα έτσι ώστε να είναι δυνατή η κίνηση των κινητήρων του ρομποτικού βραχίονα. Στο Raspberry έχει γίνει εγκατάσταση του λειτουργικού Raspbian Jessie, της γλώσσας προγραμματισμού Python 3 καθώς και της βιβλιοθήκης OpenCV.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ : Εφαρμογή υλικού με Raspberry Pi, Ψηφιακή επεξεργασία Εικόνας, Προγραμματισμός

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Raspberry Pi, Python, OpenCV, Robotic arm, Pi Camera, OWI-535, L293D Chip, Raspbian

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the control of a robotic arm of five degrees of freedom through the movement of our fingertips, which are recognized by the Pi Camera, which is installed in Raspberry. To do this we use the Raspberry Pi 3 model B which we have connected to the Pi Camera in combination with two breadboards. In one, the T-Cobbler is placed so that we extend the Raspberry GPIO for safer use, and on the other we have three integrated L293D fittings connected so that the robotic arm engines can be moved. Raspberry has installed Raspbian Jessie, Python 3 programming language and OpenCV library.

SCIENTIFIC AREA: Raspberry Pi project, Digital image processing, Coding

KEY WORDS: Raspberry Pi, Python, OpenCV, Robotic arm, Pi Camera, OWI-535, L293D Chip, Raspbian

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	16
1.1 Ρομποτική	16
1.2 Ιστορική Αναδρομή	18
1.3 Τομείς Εφαρμογής	20
1.4 Χαρακτηριστικά των ρομπότ	21
1.5 Δομή των Ρομπότ	22
1.6 Τύποι ρομποτικών βραχιόνων και χώρος εργασίας	23
1.6.1 Ρομπότ καρτεσιανών συντεταγμένων	25
1.6.2 Ρομπότ κυλινδρικών συντεταγμένων	26
1.6.3 Ρομπότ σφαιρικών συντεταγμένων	26
1.6.4 Αρθρωτό ρομπότ	26
1.7 Αρθρώσεις (Joints)	27
1.7.1 Είδη αρθρώσεων	27
1.7.2 Αρθρώσεις σε ρομποτικούς βραχίονες	27
1.8 Βαθμοί ελευθερίας	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	30
2.1 Εισαγωγή στην κινηματική θεωρία	30
2.2 Ευθύ κινηματικό πρόβλημα	31
2.3 Αλγόριθμος Denavit-Hartenberg	32
2.4 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	41
3.1 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας	41
3.2 Ιστορική Αναδρομή	41
3.3 Στόχοι	42
3.4 Βιβλιοθήκη OpenCV	42
3.4.1 Τα πλεονεκτήματα της OpenCV	45
3.4.2 Εφαρμογές της OpenCV	45
3.4.3 Βασικές Δομές και Συναρτήσεις της OpenCV	46
3.5 Επεξεργασία με Γλώσσα Προγραμματισμού Python	47
3.6 Λειτουργικό Σύστημα	48
3.7 Στήσιμο Μηχανημάτων	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	52
4.1 Συστατικά Συστήματος	52
4.1.1 Raspberry Pi 3 Model B	52
4.1.2 Ρομποτικός βραχίονας OWI-535 Robotic Arm Edge	55

4.1.3	Raspberry Pi Camera Module V2 (8MP,1080p).....	56
4.1.4	Breadboard .....	57
4.1.5	Ολοκληρωμένα κυκλώματα L293D .....	59
4.1.6	Memory Card microSDHC 32GB Class 10 - SanDisk Ultra ....	61
4.1.7	T-Cobbler Plus - GPIO Breakout for Raspberry Pi 3.....	61
4.1.8	Official Raspberry Pi 3 Black Case .....	62
4.2	Δημιουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος για την οδήγηση των DC κινητήρων.....	62
4.3	Σύνδεση του Raspberry Pi 3 .....	65
4.4	Εγκατάσταση Λειτουργικού Noobs .....	68
4.5	Εγκατάσταση Raspberry Pi .....	71
4.6	Πρώτη εκκίνηση του Raspberry Pi .....	72
4.7	Εγκατάσταση OpenCV .....	74
4.8	Έλεγχος λειτουργίας του συστήματος – Συμπεράσματα .....	78
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α`</b> .....		80
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β`</b> .....		84

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Βιομηχανικός βραχίονας .....	16
Εικόνα 2 Ανθρωποειδές ρομπότ.....	17
Εικόνα 3 Ιστορική εξέλιξη ανθρωποειδών ρομπότ.....	19
Εικόνα 4 Τυπική μορφή βιομηχανικού ρομπότ (Cincinnati Milacron).....	21
Εικόνα 5 Οι τέσσερις βασικοί δομικοί τύποι βιομηχανικού ρομπότ.....	24
Εικόνα 6 Χώρος εργασίας του ρομπότ .....	25
Εικόνα 7 Συντεταγμένες σε γενικού τύπου βραχίονα.....	31
Εικόνα 8 Επίπεδο ρομπότ τριών βαθμών ελευθερίας .....	34
Εικόνα 9 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας.....	41
Εικόνα 10 Εφαρμογές OpenCV .....	43
Εικόνα 11 Αρχιτεκτονική OpenCV .....	44
Εικόνα 12 Βασικά συστατικά της OpenCV.....	45
Εικόνα 13 Raspberry Pi Software Configuration Tool.....	51
Εικόνα 14 Raspberry Pi 3 Model B.....	53
Εικόνα 15 Ρομποτικός βραχίονας OWI-535 Robotic Arm Edge.....	55
Εικόνα 16 Raspberry Pi Camera Module V2 .....	56
Εικόνα 17 breadboard .....	57
Εικόνα 18 ολοκληρωμένο κύκλωμα L293D .....	59
Εικόνα 19 H-Bridge.....	60
Εικόνα 20 Memory Card microSDHC 32GB Class 10 - SanDisk Ultra .....	61
Εικόνα 21 T-Cobbler Plus - GPIO.....	61
Εικόνα 22 Official Raspberry Pi 3 Black Case .....	62
Εικόνα 23 Συνδεσμολογία L293D .....	63
Εικόνα 24 Συνδεσμολογία L293D με «βοηθό» .....	64
Εικόνα 25 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης .....	64
Εικόνα 26 Σύνδεση Cobbler με κύκλωμα.....	65
Εικόνα 27 Σύνδεση Cobbler με κύκλωμα.....	66
Εικόνα 28 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του Raspberry με L293D .....	67
Εικόνα 29 Τελικό κύκλωμα .....	67
Εικόνα 30 Κατέβασμα SD Formatter .....	68
Εικόνα 31 Ρυθμίσεις SD Formatter.....	69
Εικόνα 32 Ολοκλήρωση SD Formatter .....	69
Εικόνα 33 Noobs Official Page .....	70
Εικόνα 34 Αντιγραφή αρχείων στην SD card .....	70
Εικόνα 35 Εξαγωγή SD card .....	70
Εικόνα 36 Είσοδος SD στο Raspberry Pi.....	71
Εικόνα 37 Θήκη Raspberry Pi.....	71
Εικόνα 38 Εκκίνηση Raspberry Pi .....	72
Εικόνα 39 Λειτουργικά Εγκατάσταση.....	73
Εικόνα 40 Εκκίνηση Εγκατάσταση.....	73
Εικόνα 41 Επιτυχής Εγκατάσταση .....	74
Εικόνα 42 Προσδιορισμός του χεριού από τον αλγόριθμο.....	77



## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Πίνακας Παραμέτρων Denavit-Hartenberg .....	34
Πίνακας 2 Καταστάσεις εισόδων πρώτου κινητήρα του L293D .....	60

## Ειδικό Λεξιλόγιο (Glossary) και Συντομογραφίες

Open source - Ανοικτός κώδικας

Scripting language - περιγραφική γλώσσα

Linux - λειτουργικό σύστημα το οποίο βασίζεται στο Unix

SD Formatter - λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για την εγγραφή και διαγραφή δεδομένων από κάρτες SD

OpenCV - βιβλιοθήκη για επεξεργασία εικόνας

SSH (secure shell) - Το SSH είναι ένα πρωτόκολλο που παρέχει ασφαλή απομακρυσμένη σύνδεση σε υπολογιστές πάνω από μη ασφαλές δίκτυο.

Breadboard – διάτρητη πλακέτα

Board - πλακέτα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Ρομποτική

Η Ρομποτική είναι εκείνος ο κλάδος της επιστήμης, που ασχολείται με τη σύλληψη, τη σχεδίαση, την κατασκευή, τη θεωρία και τις εφαρμογές των ρομπότ. Τα ρομπότ είναι μηχανές, που δεν έχουν τη μορφή ή τη συμπεριφορά του ανθρώπου, αλλά μπορούν να εκτελούν εργασίες, που κάνει ο άνθρωπος. Η χρήση τους, λοιπόν, έχει σκοπό την αντικατάσταση του ανθρώπου στην εκτέλεση εργασίας, η οποία αφορά τόσο στο φυσικό επίπεδο, όσο και στο επίπεδο λήψης απόφασης.

Η εξέλιξη των ρομπότ έχει περάσει από πολλά στάδια. Τα ρομπότ της πρώτης γενιάς δεν είχαν την ικανότητα υπολογισμού και αίσθησης, σε αντίθεση με τα ρομπότ της δεύτερης γενιάς, τα οποία διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και αισθητήρες ανατροφοδότησης. Τα ρομπότ της τρίτης γενιάς διαθέτουν νοημοσύνη με την έννοια ότι είναι ικανά να παίρνουν αποφάσεις κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας τους. Τις ικανότητες αυτές, τις αποκτούν μέσω τεχνικών της τεχνητής νοημοσύνης σε συνδυασμό με εξελιγμένες μορφές αισθητήρων αφής, δύναμης, απόστασης, όρασης, κ.ο.κ..



*Εικόνα 1 Βιομηχανικός βραχίονας*

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικό υπολογιστή σαν μια βασική συνιστώσα του ελέγχου τους. Σήμερα, οι υπολογιστές αποτελούν ένα βασικό μέρος του βιομηχανικού αυτοματισμού. Κατευθύνουν γραμμές παραγωγής και ελέγχουν συστήματα κατασκευής (λ.χ. εργαλειομηχανές, συγκολλητές, κοπτικές διατάξεις Laser κ.α.) Τα νέα ρομπότ εκτελούν ποικίλες εργασίες στα βιομηχανικά συστήματα και γενικά συμμετέχουν στον πλήρη αυτοματισμό των εργοστασίων.



*Εικόνα 2 Ανθρωποειδές ρομπότ*

Το κύριο πλεονέκτημα του ρομπότ είναι η ευελιξία του. Μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα προϊόντα στην ίδια γραμμή παραγωγής, όπως απαιτούν οι αλλαγές της αγοράς και να επαναπρογραμματιστεί έτσι, ώστε να είναι κατάλληλο για μικρές ή μεγάλες μεταβολές του παραγόμενου προϊόντος. Έτσι, προσφέρει στη βιομηχανία μαζικής παραγωγής έναν τρόπο να αντιμετωπίζει τις μεταβολές της απαιτούμενης ποσότητας ή του τύπου του προς παραγωγή προϊόντος.

Σύμφωνα με το Robot Institute της Αμερικής, ως ρομπότ μπορούμε να ορίσουμε έναν μηχανισμό σχεδιασμένο, ώστε μέσω προγραμματιζόμενων κινήσεων να μεταφέρει υλικά, τεμάχια, εργαλεία ή ειδικευμένες συσκευές με σκοπό την εκτέλεση ποικιλίας εργασιών. Ένας τέτοιος μηχανισμός περιλαμβάνει, συνήθως, τις ακόλουθες συνιστώσες: ένα μηχανολογικό υποσύστημα, ένα υποσύστημα αίσθησης και ένα σύστημα ελέγχου.

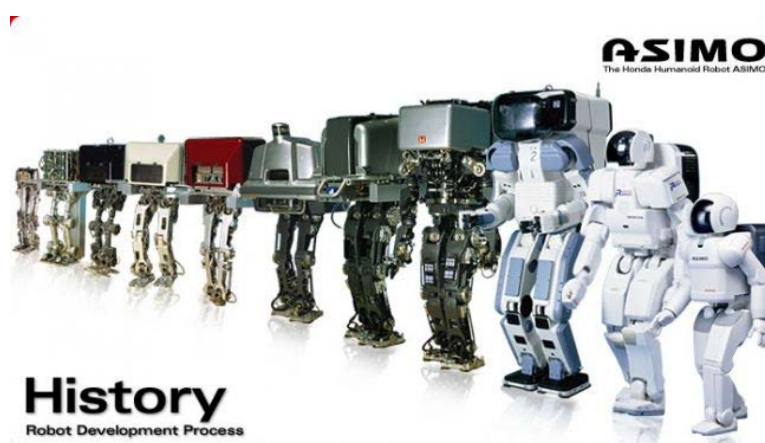
Το μηχανολογικό υποσύστημα επιτρέπει στο ρομπότ να εκτελεί την εργασία, που του έχει ανατεθεί. Αποτελείται από το υποσύστημα αίσθησης το οποίο βοηθάει το ρομπότ να συλλέγει πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τόσο το ίδιο, όσο και το περιβάλλον του. Εκτός των άλλων, δέχεται εξωτερικές εντολές, τις επεξεργάζεται, τις μεταφράζει σε ηλεκτρική ισχύ, που θα δοθεί στους κινητήρες του ρομπότ, καθώς, επίσης, παράγει σήματα εξόδου, που θα πληροφορούν για την κατάσταση του συστήματος. Στο υποσύστημα αίσθησης περιλαμβάνονται όργανα μέτρησης, αισθητήρες, ηλεκτρονικά στοιχεία, κ.λπ.. Επίσης συνήθως περιλαμβάνονται και μηχανισμοί, που επιτρέπουν στο ρομπότ να κινείται, όπως αρθρώσεις, σύστημα μετάδοσης κίνησης, επενεργητές – κινητήρες, οδηγούς, κ.λ.π..

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Τα βιομηχανικά ρομπότ αναπτύχθηκαν ταυτόχρονα με τον υπολογιστικό αριθμητικό έλεγχο (CNC). Βεβαίως, το πρώτο ρομπότ κατασκευάστηκε το 1961, αλλά τα ρομπότ άρχισαν να παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη βιομηχανική παραγωγή μόνον κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1970.

Η λέξη «ρομπότ» πρωτοεμφανίστηκε πριν από έναν αιώνα. Ο Τσέχος δραματογράφος Karel Capek, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το 1921 αυτόν τον όρο στο έργο του R.U.R. ( "Rossum's Universal Robots"). Αυτός ο όρος επινοήθηκε από την τσέχικη λέξη «robota», η οποία έχει τη σημασία της καταναγκαστικής εργασίας. Στο έργο του περιγράφεται η κατασκευή έξυπνων συσκευών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως υπηρέτες του ανθρώπινου δημιουργού τους.

Κατά τη δεκαετία του 1940, ο Ρώσος συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας, Isaac Asimov, περιέγραψε το ρομπότ ως μια μηχανή με εμφάνιση ανθρώπου απαλλαγμένο, όμως από συναισθήματα. Η συμπεριφορά του υπαγορευόταν από έναν εγκέφαλο προγραμματισμένο από ανθρώπους με ιδιαίτερο τρόπο, ώστε να ακολουθεί βασικές ηθικές αρχές. Για πρώτη φορά, επίσης, χρησιμοποιήθηκε από τον Asimov ο όρος «ρομποτική» για να περιγράψει τον τομέα της επιστήμης, που ασχολείται με τα ρομπότ.



*Εικόνα 3 Ιστορική εξέλιξη ανθρωποειδών ρομπότ*

Ο όρος βιομηχανικό ρομπότ (industrial robot) καθιερώθηκε το 1954 από τον G.C. Devol (ΗΠΑ). Ο Devol περιέγραψε πώς μπορεί να κατασκευαστεί ένα ελεγχόμενο μηχανικό χέρι, το οποίο μπορεί να εκτελεί διάφορες εργασίες στη βιομηχανία. Το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 1961 από την εταιρία Unimation. Έκτοτε, τέθηκαν σε λειτουργία χιλιάδες ρομπότ στην Αμερική, στην Ιαπωνία και στην Ευρώπη.

Η πρώτη γενιά των σύγχρονων ρομπότ απείχε κατά πολύ από τα ανθρωπόμορφα μηχανήματα, καθώς οι περισσότεροι κατασκευαστές δεν είχαν σκοπό να μιμηθούν το ανθρώπινο γένος. Το δημοφιλές ρομπότ Unimate της δεκαετίας του 1960 ήταν ικανό να κινήσει μονάχα το ένα του χέρι προς διάφορες κατευθύνσεις και να ανοιγοκλείνει την παλάμη του. Σήμερα, υπάρχουν πάνω από δύο εκατομμύρια ρομπότ Roomba, τα οποία

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

κινούνται και εκτελούν εργασίες, που άλλοτε εκτελούνταν από τους ανθρώπους, αλλά μοιάζουν περισσότερο με γρήγορες χελώνες παρά με υπηρέτες.

### 1.3 Τομείς Εφαρμογής

Τις τελευταίες δεκαετίες σημειώνεται μία ραγδαία ανάπτυξη των επιστημών και της τεχνολογίας. Στη διάρκεια του 20ου αιώνα εμφανίστηκε για πρώτη φορά η έννοια του ρομπότ και της ρομποτικής, του επιστημονικού πεδίου, που το ρομπότ αποτελείτο αντικείμενο μελέτης του. Η Ρομποτική βρήκε αρκετά πεδία εφαρμογής όπως στη βιομηχανία, στον στρατό και αλλού.

Γενικά, τα βιομηχανικά ρομπότ μπορούμε να πούμε ότι παρέχουν:

- Υποκατάστατο ανθρώπινου χεριού
- Ευελιξία
- Ευφυΐα και ειδικούς αισθητήρες
- Ταχύτητα και ακρίβεια
- Μεγαλύτερη δύναμη από τον άνθρωπο
- Γρήγορη ανάπτυξη – ολοκλήρωση
- Οικονομικές λύσεις για μικρή παραγωγή
- Σταθερή ποιότητα προϊόντος και παραγωγικότητα

Ακόμα αξίζει να αναφερθεί η εφαρμογή της ρομποτικής τεχνολογίας και στον τομέα της ιατρικής.

Η Ρομποτική Ιατρική (Medical Robotics) έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες κυρίως δεκαετίες και η έρευνα που γίνεται συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένα πεδία, από τα οποία τα πιο κύρια είναι τα ακόλουθα:

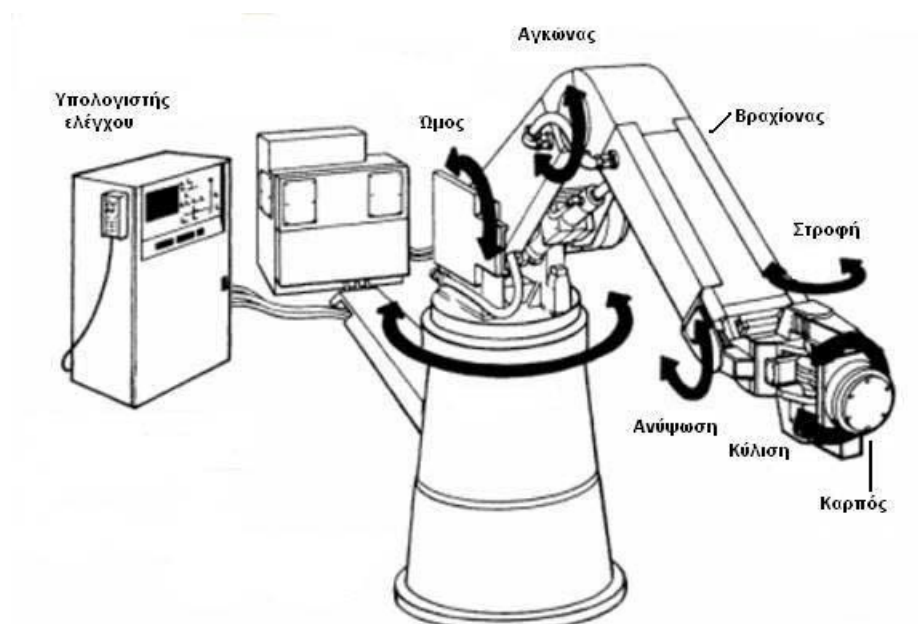
- Ρομποτική Χειρουργική (Robotic Surgery)
- Ρομποτική Αποκατάστασης (Rehabilitation Robotics)
- Προσομοιωτές Χειρουργικών Επεμβάσεων Εικονικής Πραγματικότητας με Οπτική Ανάδραση - Ανατροφοδότηση Δύναμης ή χωρίς (Training imulators with Haptic Display)

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

- Διαγνωστική Ρομποτική Τεχνολογία (Diagnostics Robotic Technology)
- Μικρορομποτική (Micro-Robotics)

#### 1.4 Χαρακτηριστικά των ρομπότ

Η τυπική μορφή ενός ρομπότ-βραχίονα φαίνεται στην εικόνα 4. Βασικά, ένα βιομηχανικό ρομπότ μιμείται το ανθρώπινο χέρι. Επειδή τα βιομηχανικά ρομπότ εκτελούν διάφορους χειρισμούς, ονομάζονται και μηχανικοί χειριστές ή απλώς χειριστές. Ένα ρομπότ έχει αρθρώσεις ανάλογες αυτών του ανθρώπινου χεριού.



Εικόνα 4 Τυπική μορφή βιομηχανικού ρομπότ (Cincinnati Milacron)

Ο υπολογιστής ενός σύγχρονου ρομπότ περιέχει ένα πρόγραμμα ελέγχου και ένα πρόγραμμα εργασίας. Το πρόγραμμα ελέγχου δίνεται από τον κατασκευαστή και ρυθμίζει την κίνηση κάθε μιας άρθρωσης του ρομπότ. Το πρόγραμμα εργασίας δίνεται από τον χρήστη και καθορίζει τις κινήσεις, που χρειάζονται για να εκτελεστεί κάθε φορά η επιθυμητή εργασία. Ένα πρόγραμμα εργασίας μπορεί να παραχθεί είτε περνώντας το ρομπότ από τις θέσεις που απαιτεί η συγκεκριμένη εργασία, είτε χρησιμοποιώντας



Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

κατάλληλες γλώσσες προγραμματισμού. Όταν χρησιμοποιείται μια γλώσσα προγραμματισμού, το ρομπότ περιέχει έναν κατάλληλο επεξεργαστή, που μεταφράζει το πρόγραμμα εργασίας και παρέχει τα δεδομένα, που χρειάζεται το πρόγραμμα ελέγχου για να καθοδηγήσει το ρομπότ στις επιθυμητές κινήσεις. Το πρόγραμμα ελέγχου χρησιμοποιεί το πρόγραμμα εργασίας σαν είσοδο και συνεπώς, για κάθε εργασία ο χρήστης πρέπει να γράψει ένα διαφορετικό πρόγραμμα εργασίας.

Τα πλεονεκτήματα των βιομηχανικών ρομπότ συνοψίζονται ως εξής:

- α) Ευελιξία
- β) Υψηλή παραγωγικότητα
- γ) Καλύτερη ποιότητα προϊόντος
- δ) Βελτιωμένη ποιότητα ζωής

### **1.5 Δομή των Ρομπότ**

Το βιομηχανικό ρομπότ είναι ένας προγραμματιζόμενος μηχανικός χειριστής, ικανός να κινείται προς διάφορες διευθύνσεις, εφοδιασμένος στο άκρο του με μια διάταξη εργασίας, που ονομάζεται τελικό σημείο δράσης (ή εργαλείο), και ικανός να εκτελεί διάφορες βιομηχανικές εργασίες, που συνήθως γίνονται από τον άνθρωπο.

Ένα σύγχρονο ρομπότ περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία βασικά δομικά μέρη:

- 1) τον χειριστή (βραχίονα, χέρι), που είναι το κινούμενο μηχανικό τμήμα,
- 2) τα στοιχεία δράσης (κινητήρες κ.λ.π.), που ενεργοποιούν τις αρθρώσεις του βραχίονα και
- 3) τον υπολογιστή, που αποθηκεύει και εκτελεί τα προγράμματα εργασίας και ελέγχει τις κινήσεις του ρομπότ.

Ο βραχίονας του ρομπότ περιέχει το κύριο σώμα και τον καρπό, που έχει στο τέλος του το εργαλείο (τελικό στοιχείο δράσης). Το εργαλείο μπορεί να

είναι μια κεφαλή συγκόλλησης, ένα πιστόλι χρωματίσματος, ένα μηχανικό εργαλείο ή μια αρπάγη, που ανοιγοκλείνει ανάλογα με την εφαρμογή, στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το ρομπότ. Επειδή όλα τα εργαλεία στερεώνονται στο τέλος των ρομπότ, λέγονται και "τελικά στοιχεία δράσης".

Το κύριο σώμα (δηλαδή ο κορμός) του ρομπότ αποτελείται από μια διαδοχή συνδέσμων ή μελών (links), που συνδέονται με αρθρώσεις (joints). Οι αρθρώσεις ελέγχουν τις κινήσεις των συνδέσμων. Η ομάδα των αρθρώσεων, που ελέγχει την κίνηση του εργαλείου, ονομάζεται "καρπός". Κάθε μια από τις αρθρώσεις του βραχίονα και του καρπού παρέχει έναν βαθμό ελευθερίας στην κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης. Έτσι, ένα ρομπότ με  $n$  βαθμούς ελευθερίας περιέχει  $n$  αρθρώσεις ή  $n$  άξονες κίνησης γενικά.

Η κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης ρυθμίζεται ελέγχοντας τη θέση και την ταχύτητα των αξόνων κίνησης του ρομπότ. Στη ρομποτική ένας άξονας κίνησης ισοδυναμεί με έναν βαθμό ελευθερίας, ως προς τον οποίο μπορεί να κινηθεί το ρομπότ. Για να μπορέσει ένα ρομπότ να φτάσει ένα αυθαίρετο σημείο (μέσα στο χώρο εργασίας του) με έναν επιθυμητό προσανατολισμό του εργαλείου, χρειάζεται να έχει έξι άξονες (βαθμούς ελευθερίας) κίνησης. Έστω και μόνο ένας διαφορετικός προσανατολισμός του εργαλείου μπορεί να αλλάξει εντελώς τη θέση του βραχίονα του ρομπότ.

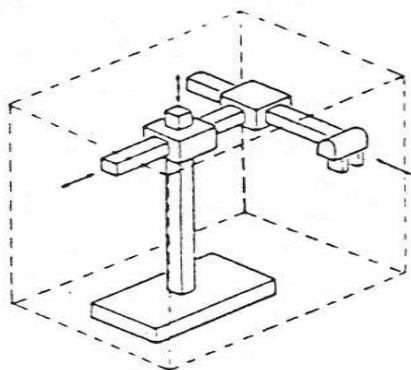
## **1.6 Τύποι ρομποτικών βραχιόνων και χώρος εργασίας**

Το μηχανικό τμήμα των ρομπότ αποτελείται από μια αλληλουχία μηχανικών συνδέσμων (links) και αρθρώσεων (joints) που ενώνουν τους συνδέσμους ανά δύο. Ένα τυπικό ρομπότ αποτελείται από το κυρίως τμήμα (δηλαδή τον βραχίονα) και από τον καρπό. Τόσο ο βραχίονας (arm) όσο και ο καρπός (wrist) έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας, ο καθένας. Υπάρχουν όμως ρομπότ στα οποία ο καρπός έχει λιγότερους βαθμούς ελευθερίας.

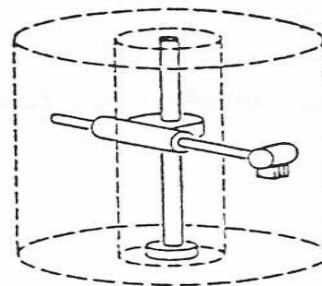
## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Τα ρομπότ ταξινομούνται ανάλογα με το σύστημα συντεταγμένων του βραχίονα ως εξής (εικόνα 5):

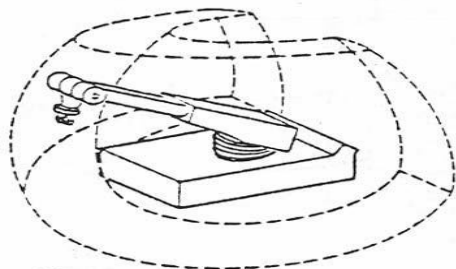
- **Καρτεσιανά:** Τρεις γραμμικοί άξονες
- **Κυλινδρικά:** Δυο γραμμικοί και ένας στροφικός άξονας
- **Σφαιρικά:** Ένας γραμμικός και δυο στροφικοί άξονες
- **Αρθρωτά:** Τρεις στροφικοί άξονες



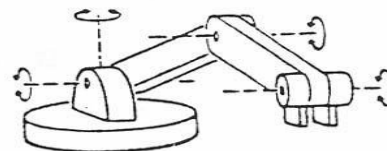
Καρτεσιανό ή  
X-Y-Z ρομπότ



Κυλινδρικό  
ρομπότ



Σφαιρικό ρομπότ

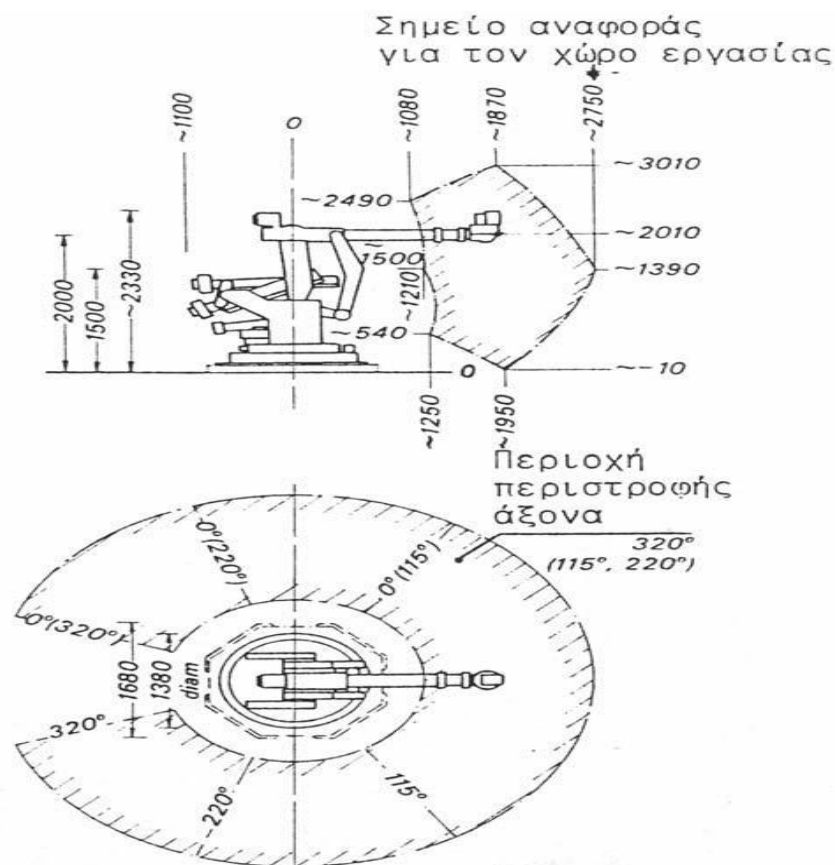


Αρθρωτό  
ρομπότ

Εικόνα 5 Οι τέσσερις βασικοί δομικοί τύποι βιομηχανικού ρομπότ

Οι γραμμικές αρθρώσεις μπορούν να είναι αρθρώσεις ολίσθησης (συμβολικά S: sliding), ή πρισματικές (συμβολικά P: prismatic). Μια, στροφική άρθρωση συμβολίζεται με R (revolute joint). Έτσι ο τύπος ενός ρομπότ με βάση τα συστήματα συντεταγμένων των αρθρώσεων του συμβολίζεται με την αλληλουχία των συμβόλων S, P και R αρχίζοντας από τη βάση και προχωρώντας προς τον καρπό. Ένα σφαιρικό ρομπότ μπορεί να είναι της μορφής RRP, ενώ ένα αρθρωτό ρομπότ συμβολίζεται με RRR.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός βιομηχανικού ρομπότ είναι το μέγεθος και το σχήμα του χώρου εργασίας του (work volume ή reach envelope). Πρέπει να σημειωθεί ότι με την προσθήκη του τελικού στοιχείου δράσης(εργαλείου) στον καρπό του ρομποτικού βραχίονα, ο χώρος εργασίας μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του εργαλείου.



Εικόνα 6 Χώρος εργασίας του ρομπότ

### 1.6.1 Ρομπότ καρτεσιανών συντεταγμένων

Το κυρίως σώμα ενός ρομπότ του τύπου αυτού αποτελείται από τρεις γραμμικούς άξονες όπως φαίνεται στο Εικόνα 5. Η δομή μπορεί να είναι όμοια με των εργαλειομηχανών (βάση, τραπέζι εργασίας, κ.ά.) αλλά τότε ο λόγος μεταξύ του χώρου εργασίας του ρομπότ και του χώρου που καταλαμβάνει είναι μικρότερος. Γενικά, τα χαρακτηριστικά (ηλεκτρονικό υλικό;hardware, πρόγραμμα έλεγχου κλπ) ενός καρτεσιανού ρομπότ είναι όμοια με εκείνα

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC).

### **1.6.2 Ρομπότ κυλινδρικών συντεταγμένων**

Το κυρίως σώμα ενός ρομπότ του τύπου αυτού αποτελείται από ένα οριζόντιο βραχίονα στερεωμένο σε μια κατακόρυφη κολώνα. Η κολώνα είναι με τη σειρά της στερεωμένη πάνω σε μια περιστρεφόμενη βάση (Εικόνα 5). Ο οριζόντιος βραχίονας κινείται προς τα εμπρός και προς τα πίσω κατά τη διεύθυνση του διαμήκου άξονα του και επίσης ανεβοκατεβαίνει στη κολώνα. Κολώνα και βραχίονας στέφονται σαν ένα σώμα πάνω στη βάση γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

### **1.6.3 Ρομπότ σφαιρικών συντεταγμένων**

Τα ρομπότ του τύπου αυτού αποτελούνται από μια στρεφόμενη βάση, ένα ανυψούμενο στέλεχος και ένα τηλεσκοπικό βραχίονα που κινείται προς τα μέσα και προς τα έξω όπως φαίνεται στο Εικόνα 5. Το μέγεθος της περιστροφής μετράται από ψηφιακούς κωδικοποιητές που είναι στερεωμένοι στους άξονες. Το βασικό μειονέκτημα των σφαιρικών ρομπότ είναι και πάλι η μικρή διακριτική ικανότητα θέσης των δυο στροφικών αξόνων που μεταβάλλεται με το μήκος του βραχίονα. Τα σφαιρικά ρομπότ, εκτός από το πλεονέκτημα της αυξημένης ταχύτητας κίνησης των στροφικών αξόνων, έχουν και το πλεονέκτημα της αυξημένης ευελιξίας σε σχέση τόσο με τα καρτεσιανά όσο και με τα κυλινδρικά ρομπότ.

### **1.6.4 Αρθρωτό ρομπότ**

Τα αρθρωτά ρομπότ αποτελούνται από τρία σταθερά μέλη (συνδέσμους) που ενώνονται με στροφικές αρθρώσεις και είναι τοποθετημένα πάνω σε μια στρεφόμενη βάση (εικόνα 5). Η κινηματική διάταξη μοιάζει με εκείνη του ανθρώπινου χεριού. Το εργαλείο (αρπάγη) είναι ανάλογο της παλάμης και προσαρμόζεται στον πήχυ (Forearm) μέσω του καρπού. Ο "αγκώνας" συνδέει τον πήχυ με τον άνω βραχίονα και ο "ώμος" συνδέει τον άνω βραχίονα με τη βάση. Πολλές φορές στην άρθρωση του ώμου διατίθεται και

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

μια περιστροφική κίνηση σε οριζόντιο επίπεδο.

## 1.7 Αρθρώσεις (Joints)

Στο χώρο των τριών διαστάσεων η σχετική κίνηση που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα συμπαγές σώμα, ως προς ένα άλλο που θεωρείται ακίνητο, χωρίζεται σε 6 βασικές επιμέρους κινήσεις, 3 μεταφορικές κινήσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του τρισσορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων και 3 περιστροφικές κινήσεις γύρω από αυτούς.

Άρθρωση (joint) ονομάζεται η κατάλληλα διαμορφωμένη διάταξη που συνδέει δύο σώματα μεταξύ τους, περιορίζοντας ένα ή, συχνότερα, περισσότερους από τους μεταξύ τους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή εμποδίζει την πραγματοποίηση μιας ή περισσότερων από τις παραπάνω 6 δυνατότητες κίνησης, μειώνοντας την ελευθερία κίνησης του ενός ως προς το άλλο σώμα.

### 1.7.1 Είδη αρθρώσεων

Οι ρομποτικοί βραχίονες χαρακτηρίζονται κυρίως από τον αριθμό και από τον τύπο των αρθρώσεων που έχουν. Τα είδη των αρθρώσεων διακρίνονται σε περιστροφικές αρθρώσεις (έναν βαθμό ελευθερίας), πρισματικές αρθρώσεις (έναν βαθμό ελευθερίας) και σφαιρικές αρθρώσεις (τρεις βαθμοί ελευθερίας) [βαθμός ελευθερίας = ανεξάρτητη κίνηση]. Έτσι για παράδειγμα ένας βραχίονας ο οποίος έχει δυο περιστροφικές, μια πρισματική και μια σφαιρική άρθρωση, χαρακτηρίζεται ως βραχίονας έξι βαθμών ελευθερίας.

### 1.7.2 Αρθρώσεις σε ρομποτικούς βραχίονες

Οι ρομποτικοί βραχίονες, αν και είναι μηχανισμοί με πολύ μεγάλη ευελιξία, στην πλειονότητα τους βασίζονται σε βραχίονες που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις **ενός βαθμού ελευθερίας**.

Έτσι οι ρομποτικοί βραχίονες, για να μπορέσουν να επιτύχουν την προσδοκούμενη ευελιξία, σχεδιάζονται με πολλές (συνήθως από τρεις μέχρι έξι) αρθρώσεις, κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να επιτρέπουν στους επενεργητές να κινούνται εύκολα. Οι αρθρώσεις αυτές είναι οι:

1. **Περιστροφική άρθρωση** (revolute joint), που επιτρέπει την ελεγχόμενη περιστροφή γύρω από τον άξονά της. Η περιστροφική άρθρωση κυρίως λόγω της μεγάλης ταχύτητάς της είναι η πιο κοινή άρθρωση σε ρομποτικούς βραχίονες.
2. **Γραμμικές αρθρώσεις** που χωρίζονται σε ολίσθησης (sliding) και πρισματικές (prismatic) και επιτρέπουν την ελεγχόμενη μετατόπιση προς μία κατεύθυνση. Οι αρθρώσεις αυτές χαρακτηρίζονται για την μεγάλη ακρίβειά τους, και χρησιμοποιούνται κυρίως σε διατάξεις συναρμολόγησης.

### 1.8 Βαθμοί ελευθερίας

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός ρομποτικού βραχίονα είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών θέσης. Ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι γνωστός και μονοσήμαντα ορισμένος για κάθε διάταξη, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της θέσης των τμημάτων που τη συνιστούν. Πρόκειται για μια γενική αρχή, που εφαρμόζεται σε όλους τους μηχανισμούς.

Κρίνεται σκόπιμο να επισημάνουμε τη διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στους βαθμούς κινητικότητας ενός βραχίονα και τους βαθμούς ελευθερίας που απαιτούνται για την εκτέλεση ενός έργου. Για έναν βραχίονα το πλήθος των βαθμών κινητικότητας είναι σταθερό και ίσο με το πλήθος των αρθρώσεων του. Από την άλλη πλευρά οι βαθμοί ελευθερίας είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το συγκεκριμένο έργο που καλείται να φέρει εις πέρας ο βραχίονα. Για την γενική περίπτωση που θέλουμε να τοποθετήσουμε και να προσανατολίσουμε ένα αντικείμενο στο χώρο απαιτούνται έξι βαθμοί ελευθερίας (τρεις για να τοποθετήσουμε ένα σημείο του αντικείμενου στο χώρο και τρεις για να προσανατολίσουμε το αντικείμενο ως προς ένα

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

σύστημα συντεταγμένων αναφοράς) είναι προφανές ότι ένας ρομποτικός βραχίονας με 6 βαθμούς κινητικότητας μπορεί να ανταπεξέλθει σ' αυτό το έργο, όπως επίσης και σε οποιοδήποτε άλλο έργο που απαιτεί μέχρι έξι βαθμούς ελευθερίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Εισαγωγή στην κινηματική θεωρία

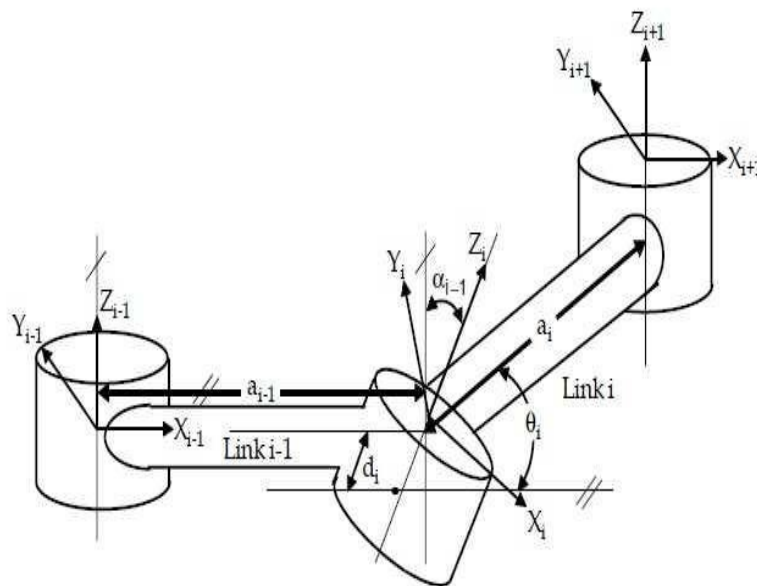
Κινηματική είναι η επιστήμη που μελετά την κίνηση χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις που την προκαλούν. Στην κινηματική ενδιαφερόμαστε για την θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και όλες τις παραγώγους των μεταβλητών που περιγράφουν τη θέση.

Η κινηματική ανάλυση ενός βραχίονα αφορά την επίλυση δύο προβλημάτων, του ευθέος και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος. Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα συνίσταται την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα ως προς την βάση του, όταν γνωρίζουμε την θέση κάθε άρθρωσης, ενώ το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση της θέσης της κάθε άρθρωσης, η οποία τοποθετεί το άκρο του βραχίονα σε μια συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό σε σχέση με την βάση του. Ο βαθμός δυσκολίας επίλυσης των προβλημάτων αυτών εξαρτάται από την γεωμετρία του βραχίονα.

Για την μετακίνηση του άκρου του βραχίονα από την παρούσα θέση του στην επιθυμητή είναι απαραίτητη η γνώση των γωνιών των αρθρώσεων που αντιστοιχούν στη επιθυμητή θέση. Οι γωνίες αυτές υπολογίζονται επιλύοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Η μετάβαση μεταξύ δύο διαδοχικών καταστάσεων του βραχίονα γίνεται μέσω ευθύγραμμης τροχιάς με παραβολική μείξη στο επίπεδο των αρθρώσεων ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η ομαλή κίνηση της κατασκευής όσο και η ταυτόχρονη έναρξη και λήξη της κίνησης όλων των κινητήρων.

## 2.2 Ευθύ κινηματικό πρόβλημα

Ένας βραχίονας αποτελείται από σειριακούς συνδέσμους οι οποίοι τοποθετούνται σε κάθε άρθρωση από τη βάση μέχρι το εργαλείο τελικής δράσης. Για να εφαρμοστεί το ευθύ κινηματικό σε ένα ρομπότ θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα κατάλληλο κινηματικό μοντέλο. Η μεθοδολογία Denavit - Hartenberg που χρησιμοποιεί τέσσερις παραμέτρους είναι η πιο κοινή μέθοδος για την περιγραφή του κινηματικού προβλήματος ενός ρομπότ. Ένα σύστημα συντεταγμένων επισυνάπτεται σε κάθε άρθρωση και καθορίζει τις DH παραμέτρους. Βάσει της μεθόδου αυτής επιλέγονται με συγκεκριμένο τρόπο τα συστήματα συντεταγμένων που είναι προσαρμοσμένα σε κάθε σύνδεσμο του ρομποτικού βραχίονα εκτελώντας τα βήματα του αλγορίθμου. Έτσι προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου εργαλείου ως προς το ακίνητο σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 7 Συντεταγμένες σε γενικού τύπου βραχίονα

### 2.3 Αλγόριθμος Denavit-Hartenberg

Ο αλγόριθμος των D-H, είναι μια διαδικασία σύμφωνα με την οποία τοποθετούνται ορθοκανονικά και δεξιόστροφα Συστήματα Συντεταγμένων στους συνδέσμους του βραχίονα. Η συστηματική αυτή μέθοδος μας βοηθάει στο να ορίσουμε την σχετική θέση και τον προσανατολισμό μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων.

Βασικό στοιχείο της μεθόδου αποτελεί ο σωστός ορισμός των πλαισίων κάθε άρθρωσης. Προκειμένου να γίνει αυτό, πρέπει να τηρηθούν οι παρακάτω τέσσερις κανόνες (Denavit – Hartenberg).

1. Επιλέγουμε τον άξονα  $Z_i$  κατά μήκος του άξονα της άρθρωσης  $i+1$
2. Τοποθετούμε το κέντρο  $O_i$ , στην τομή του άξονα  $Z_i$ , με την κοινή κάθετο των αξόνων  $Z_{i-1}$  και  $Z_i$ .
3. Επιλέγουμε τον άξονα  $x_0$  κατά μήκος της κοινής καθέτου των αξόνων  $Z_{i-1}$  και  $Z_i$  με τη φορά από την άρθρωση  $i$  στην άρθρωση  $i+1$ .
4. Επιλέγουμε τον άξονα  $y_i$ , ώστε να έχουμε δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων για το πλαίσιο  $i$

Έχοντας ορίσει τα πλαίσια αναφοράς κάθε άρθρωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα το μόνο που μας απομένει είναι να προσδιορίσουμε τις τέσσερις παραμέτρους της μεθόδου που είναι οι  $d_i, \theta_i, a_i, \alpha_i$ . Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται ως εξής.

- $a_i$  = η απόσταση μεταξύ των  $Z_i$  και  $Z_{i+1}$  μετρούμενη κατά μήκος του  $X_i$
- $\alpha_i$  = η γωνία μεταξύ των  $Z_i$  και  $Z_{i+1}$  μετρούμενη ως προς τον  $X_i$
- $d_i$  = η απόσταση μεταξύ των  $X_{i-1}$  και  $X_i$  μετρούμενη κατά μήκος του  $Z_i$
- $\theta_i$  = η γωνία μεταξύ των  $X_{i-1}$  και  $X_i$  μετρούμενη ως προς  $Z_i$

Εφόσον έχουμε ορίσει τα πλαίσια των αρθρώσεων και τις παραμέτρους της μεθόδου D-H, ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα, προκειμένου να

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

ορίσουμε τη θέση και τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς το πλαίσιο  $i-1$ .

*Βήμα 1: Περιστροφή του πλαισίου  $i-1$  γύρω από τον άξονα  $Z_{i+1}$  κατά γωνία  $\theta_i$*

*Βήμα 2: Μετατόπιση  $d_i$  του πλαισίου  $i-1$  κατά μήκος του άξονα  $Z_{i-1}$*

*Βήμα 3: Μετατόπιση  $a_i$  (μήκος της κοινής καθέτου) κατά τον άξονα  $X_0$*

*Βήμα 4: Περιστροφή γύρω από τον άξονα  $X_i$  κατά γωνία  $\alpha_i$*

Από το βήμα 1 και βήμα 2, παίρνουμε την μήτρα μετασχηματισμού

$$T_{\Sigma_i^{i-1}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ένω εφαρμόζοντας το βήμα 3 και βήμα 4 έχουμε την μήτρα μετασχηματισμού

$$T_i^{\Sigma_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Οπότε συνολικά η μήτρα μετασχηματισμού που μας δίνει τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό του πλαισίου  $i$  ως προς το πλαίσιο  $i-1$ , είναι η ακόλουθη:

$$T_i^{i-1} = T_{\Sigma_i^{i-1}} * T_i^{\Sigma_i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

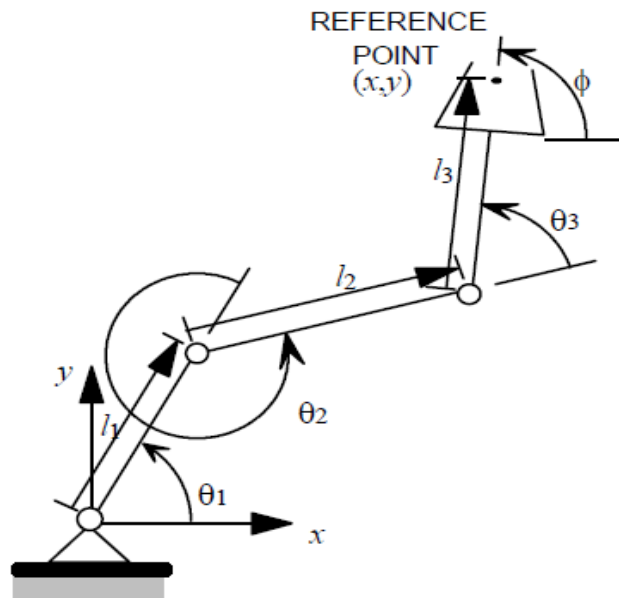
Στον παρακάτω πίνακα παραμέτρων κάθε σειρά περιέχει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την δημιουργία των ομογενών μετασχηματισμών μεταξύ των πλαισίων των γειτονικών συνδέσμων.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$L_1$	0	$\theta_2$
3	0	$L_2$	0	$\theta_3$

Πίνακας 1 Πίνακας Παραμέτρων Denavit-Hartenberg

## 2.4 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα αναφέρεται στον προσδιορισμό των μεταβλητών των αρθρώσεων του ρομπότ ενώ μας δίνεται η θέση και ο προσανατολισμός του εργαλείου της τελικής δράσης. Την επίλυση αυτού του προβλήματος αποτελεί η λύση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Για την αριθμητική επίλυση μη γραμμικών συστημάτων εξισώσεων υπάρχουν πολλές αριθμητικές μέθοδοι που συγκλίνουν προς την λύση.



Εικόνα 8 Επίπεδο ρομπότ τριών βαθμών ελευθερίας

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Πίνακες μετασχηματισμού των συνδέσμων:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Όπου  $c_i = \cos\theta_i$  και  $s_i = \sin\theta_i$

Από τους πίνακες μετασχηματισμού των συνδέσμων του επίπεδου βραχίονα και με τη χρήση τριγωνομετρικών ταυτοτήτων του αθροίσματος γωνιών βρίσκουμε τον  ${}^0T_3$

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Όπου  $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$  και  $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$

Ο  ${}^0T_3$  μας δίνει τη θέση και τον προσανατολισμό του τελευταίου πλαισίου του βραχίονα ως προς το ακίνητο σύστημα βάσης.

Δεδομένου ότι ο ρομποτικός βραχίονας είναι επίπεδος, μπορούμε να περιγράψουμε τα σημεία στόχευσης εύκολα, με τρεις αριθμούς  $x, y$  και  $\varphi$ . Η

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

γωνία  $\varphi$ , ορίζει τον προσανατολισμό στο επίπεδο (σε σχέση με τον θετικό ημιάξονα  $X$ ), του τρίτου μέλους .

Έτσι ο γενικός μετασχηματισμός έχει την περίπτωση αυτή την μορφή,

$${}^B_W T = \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 & X \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Όλα τα προσβάσιμα σημεία ανήκουν στον υποχώρο που δομείται με βάση τις εξισώσεις (3.5). Από την εξίσωση της (3.4) με την (3.5), καταλήγουμε σ' ένα σύστημα τεσσάρων μη γραμμικών εξισώσεων τις οποίες πρέπει να επιλύσουμε, για να υπολογίσουμε τις  $\theta_1, \theta_2$  και  $\theta_3$

$$c_\varphi = c_{123} \quad (3.6)$$

$$s_\varphi = s_{123} \quad (3.7)$$

$$x = l_1 c_1 + l_2 c_{12}, \quad (3.8)$$

$$y = l_1 s_1 + l_2 s_{12}, \quad (3.9)$$

Αθροίζοντας τα τετράγωνα των (3.8) και (3.9), καταλήγουμε στην σχέση

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2, \quad (3.10)$$

Για τα οποία χρησιμοποιήσαμε τους τύπους

$$c_{12} = c_1 c_2 - s_1 s_2, \quad (3.11)$$

$$s_{12} = c_1 s_2 + s_1 c_2. \quad (3.12)$$

Επιλύοντας τώρα ως προς  $c_2$ , έχουμε

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (3.13)$$

Για να υπάρχει λύση, πρέπει το δεξιό μέλος της ισότητας (3.13) να παίρνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα  $[-1, 1]$ . Ο αλγόριθμος επίλυσης, σ' αυτό το σημείο, διενεργεί τον παραπάνω έλεγχο και γνωμοδοτεί για την ύπαρξη ή όχι λύσης. Φυσιολογικά συμπεραίνουμε, ότι αν δεν ικανοποιείται η εν λόγω συνθήκη, ο στόχος βρίσκεται υπερβολικά μακριά και δεν είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από τον βραχίονα.

Υπο την προϋπόθεση ότι ο στόχος μας βρίσκεται εντός του χώρου εργασίας, μπορούμε να υπολογίσουμε το  $s_2$  από την παρακάτω γνωστή τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2} \quad (3.14)$$

Τελικά με την χρήση της συνάρτησης δύο ορισμάτων τόξου εφαπτομένης, υπολογίζουμε τη γωνία  $\theta_2$ .

$$\theta_2 = \mathbf{A \tan 2}(s_2, c_2) \quad (3.15)$$

Η επιλογή του πρόσημου της (3.14), έχει να κάνει με τη διεύθυνση του βραχίονα Έτσι, μπορούμε να επιλέξουμε λύση της μορφής "αγκώνας πάνω" ή "αγκώνας κάτω", κατά την προσέγγιση του βραχίονα στο επιθυμητό σημείο. Για τον υπολογισμό της  $\theta_2$ , χρησιμοποιούμε μία αναδρομική σχέση που συχνά χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους προβλήματα κινηματικής. Υπολογίζουμε και το ημίτονο και το συνημίτονο, για να εκχωρήσουμε ως



Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

ορίσματα στη συνάρτηση δύο ορισμάτων τόξου εφαπτομένης. Αυτή η τακτική μας εξασφαλίζει την εύρεση όλων των λύσεων. Ακόμα εξασφαλίζει την τοποθέτηση της γωνίας στο σωστό τεταρτημόριο.

Έχοντας ως δεδομένο την τιμή της  $\theta_2$ , μπορούμε να επιλύσουμε τις (3.10) και (3.11), και να υπολογίσουμε την  $\theta_1$ . Έτσι γράφουμε τις εξισώσεις αυτές στην ακόλουθη μορφή.

$$x = k_1 c_1 - k_2 s_1, \quad (3.16)$$

$$y = k_1 s_1 + k_2 c_1, \quad (3.17)$$

Όπου

$$k_1 = l_1 + l_2 c_2, \quad (3.18)$$

$$k_2 = l_2 s_2 \quad (3.19)$$

Για να λύσουμε μια τέτοια εξίσωση προβαίνουμε σε αλλαγή των μεταβλητών. Συγκεκριμένα μεταβάλουμε τον τρόπο αναπαράστασης των  $k_1$  και  $k_2$ .

Έστω ότι είναι:

$$r = + \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (3.20)$$

$$y = A \tan 2(k_2, k_1)$$

τότε,

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

$$k_1 = r \cos y, \quad (3.21)$$

$$k_2 = r \sin y,$$

Οι εξισώσεις (3.16) και (3.17) μπορούν τώρα να διατυπωθούν ως εξής:

$$\frac{x}{r} = \cos y \cos \theta_1 - \sin y \sin \theta_1, \quad (3.22)$$

$$\frac{y}{r} = \cos y \sin \theta_1 + \sin y \cos \theta_1 \quad (3.23)$$

Έτσι έχουμε,

$$\cos(y + \theta_1) = \frac{x}{r}, \quad (3.24)$$

$$\sin(y + \theta_1) = \frac{y}{r}, \quad (3.25)$$

Εφαρμόζοντας την συνάρτηση δύο ορισμάτων τόξου εφαπτομένης, καταλήγουμε στη σχέση :

$$y + \theta_1 = A \tan 2 \left( \frac{y}{r}, \frac{x}{r} \right) = A \tan 2(y, x), \quad (3.26)$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τη  $\theta_1$ , από την εξίσωση ,

$$\theta_1 = A \tan 2(x, y) - A \tan 2(k_2, k_1) \quad (3.27)$$

Χρειάζεται να σημειωθεί, ότι η επιλογή πρόσημου για τη  $\theta_2$  , επηρεάζει το πρόσημο της ποσότητας  $k_2$ , η οποία με την σειρά της επηρεάζει την τελική τιμή της  $\theta_1$  . Η αντικαταστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις (3.20) και (3.21) αποτελούν ουσιώδεις χαρακτηριστικό της μεθόδου που επιλέγουμε για τα

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

προβλήματα που συχνά διατυπώνονται στη μορφή που υποδεικνύεται από τις (3.10) και (3.11). Επισημαίνουμε επίσης ότι αν  $x=y=0$ , τότε η (3.27) είναι αόριστη, και η γωνία  $\theta_2$  μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή.

Τέλος, με χρήση των εξισώσεων (3.8) και (3.9), μπορούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα των τριών γωνιών ( $\theta_1+\theta_2+\theta_3$ ).

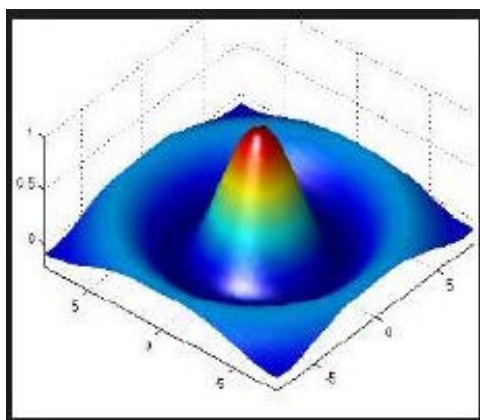
$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = A \tan 2(s_\varphi, c_\varphi) = \varphi \quad (3.28)$$

Από την σχέση (3.28), μπορούμε να υπολογίσουμε τη  $\theta_3$ , αφού ήδη γνωρίζουμε τις  $\theta_1$  και  $\theta_2$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας (Image Processing) είναι η χρήση αλγορίθμων για να παρουσιάσουν την επεξεργασία εικόνας σε ψηφιακές εικόνες. Ως υπό επίπεδο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία, επιτρέπει ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος αλγορίθμων να εφαρμοστούν σαν δεδομένα εισόδου και μπορεί να αποτρέψει προβλήματα όπως η συγκέντρωση θορύβου και διαστρέβλωση σημάτων κατά τη διάρκεια επεξεργασίας.



Εικόνα 9 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας

### 3.2 Ιστορική Αναδρομή

Πολλές από τις τεχνικές της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του '60 στο Jet Propulsion Laboratory, MIT, Bell Labs του Πανεπιστημίου του Maryland και σε μερικά ακόμα μέρη, με εφαρμογή στις δορυφορικές εικόνες, πρότυπα μετατροπής τηλεγραφικής φωτογραφίας, σε ιατρική απεικόνιση, στα τηλέφωνα με χρήση βίντεο, σε αναγνώριση χαρακτήρων και ενίσχυση φωτογραφιών. Αλλά και το κόστος της επεξεργασίας ήταν αρκετά υψηλό με τον εξοπλισμό των υπολογιστών εκείνης της εποχής.

Κατά τη δεκαετία του '70, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας πολλαπλασιάστηκε καθώς φθηνότεροι υπολογιστές και εξειδικευμένο hardware έγιναν διαθέσιμα. Οι εικόνες μπορούσαν πλέον να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, για κάποια συνηθισμένα προβλήματα όπως η μετατροπή τηλεοπτικών προτύπων. Δεδομένου ότι οι υπολογιστές γενικής χρήσης έγιναν γρηγορότεροι άρχισαν να αναλαμβάνουν

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

το ρόλο του υλικού σε όλες αλλά και στις περισσότερο εξειδικευμένες και εντατικά υπολογιστικές διαδικασίες.

Κατά την δεκαετία του 2000 με γρήγορους πλέον υπολογιστές και επεξεργαστές σημάτων διαθέσιμους, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας αναδείχθηκε στην πιο κοινή μορφή επεξεργασίας εικόνων και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη όχι μόνο επειδή είναι η πιο ευπροσάρμοστη μέθοδος αλλά επίσης και η πιο οικονομική.

### 3.3 Στόχοι

Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας επιτρέπει την χρήση πολλών περισσότερων σύνθετων αλγορίθμων για επεξεργασία εικόνας και ως εκ τούτου μπορεί να προσφέρει κα τα δύο, περιπλοκότερη απόδοση στους απλούς στόχους και την εφαρμογή μεθόδων οι οποίες θα ήταν αδύνατες με τα αναλογικά μέσα. Πιο συγκεκριμένα, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας είναι η μοναδική πρακτική τεχνολογία για:

- Ταξινόμηση
- Εξαγωγή χαρακτηριστικών
- Αναγνώριση σχεδίων
- Προβολή
- Ανάλυση σημάτων πολύ-κλίμακας

Μερικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας περιλαμβάνουν:

- Ανάλυση κύριων τμημάτων
- Ανάλυση ανεξάρτητων τμημάτων
- Χάρτες αυτό οργάνωσης
- Κρυμμένα μοντέλα Markov
- Νευρωνικά δίκτυα

### 3.4 Βιβλιοθήκη OpenCV

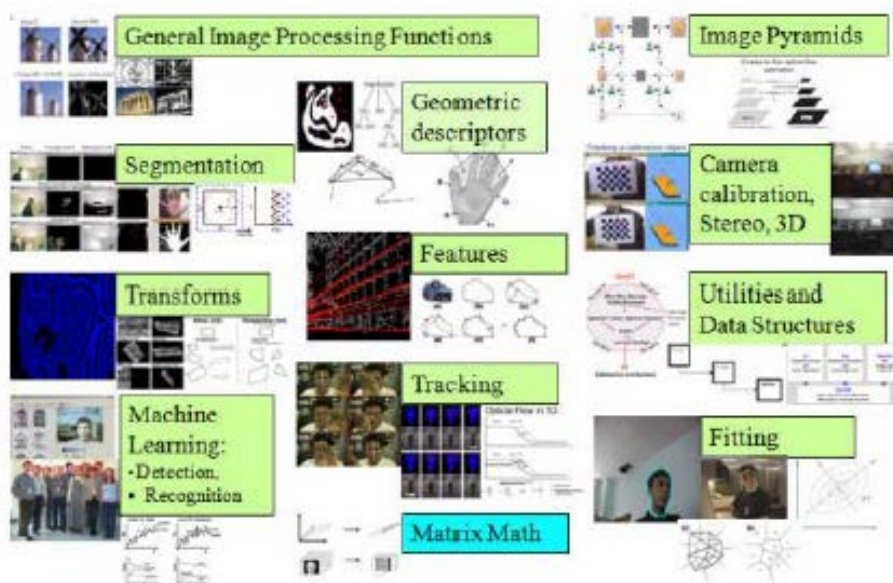
Η OpenCV είναι μία βιβλιοθήκη ελεύθερου λογισμικού η οποία αναπτύχθηκε από την Intel και αφορά στην επεξεργασία εικόνας. Η OpenCV παρέχει μία μεσαίου έως υψηλού επιπέδου διασύνδεση εφαρμογών με περίπου τριακόσιες συναρτήσεις γραμμένες σε C και μερικές κλάσεις C++. Η ανάπτυξη επικοινωνίας ανθρώπου με υπολογιστή, η ανίχνευση, απομόνωση και αναγνώριση αντικειμένων, η ανίχνευση και αναγνώριση προσώπων, η κατανόηση και παρακολούθηση κίνησης είναι μερικά από τα πεδία μηχανικής

όρασης που καλύπτει. Οι αλγόριθμοι της OpenCV είναι βελτιστοποιημένοι για επεξεργαστές αρχιτεκτονικής Intel Pentium (MMX, Pro, 3, 4). Τέλος, η δημιουργία της OpenCV αποσκοπεί και στην δημιουργία μιας κοινότητας ανοιχτού λογισμικού, σχετική με την μηχανική όραση, η οποία θα αναπτύσσει σύγχρονες μεθόδους επεξεργασίας εικόνας σε ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο τεχνολογικό περιβάλλον.

Η βιβλιοθήκη αυτή είναι ανοιχτού κώδικα και είναι ελεύθερη για εκπαιδευτική αλλά και για εμπορική χρήση. Είναι γραμμένη κυρίως στη γλώσσα προγραμματισμού C και χρησιμοποιείται στις κυριότερες πλατφόρμες όπως Windows, Linux, Mac, Android και άλλα. Η OpenCV έχει ενσωματωμένους αλγορίθμους επεξεργασίας εικόνας και τεχνητής όρασης.

Μερικές από τις εφαρμογές που καλύπτει η OpenCV είναι:

- Αναγνώρισης Προσώπου
- Αναγνώρισης Χειρονομιών
- Διεπαφής Χρήστη-Υπολογιστή
- Κινητά Ρομπότ
- Αναγνώρισης και Ταυτοποίησης αντικειμένων



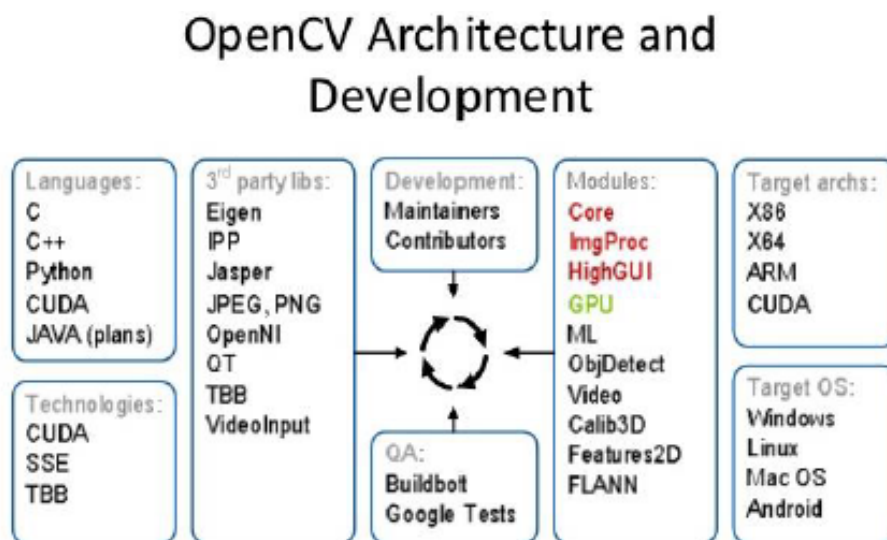
Εικόνα 10 Εφαρμογές OpenCV

Στην OpenCV κάθε εικόνα αναπαρίσταται με έναν πολυδιάστατο πίνακα. Ο τύπος αυτού του πολυδιάστατου πίνακα είναι τύπου Mat και μπορεί να περιέχει αρκετές διαστάσεις πινάκων, οι οποίοι συνήθως αντιπροσωπεύουν την απεικόνιση της εικόνας σε διάφορα χρώματα (rgb) και τιμή alpha για το μοντέλο rgba ενώ υπάρχουν και άλλα μοντέλα. Ο τύπος Mat παρέχει επίσης στον προγραμματιστή εύκολη πρόσβαση σε κάθε στοιχείο του πίνακα, με μεγάλη ταχύτητα. Η βιβλιοθήκη παρέχει μία πλειάδα από συναρτήσεις, οι οποίες καλύπτουν το ευρύ φάσμα της αναγνώρισης προτύπων και την

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

επεξεργασία εικόνας. Σε επόμενο κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικότερα κάποιες από τις συναρτήσεις που χρησιμοποιήσαμε.

Η αρχιτεκτονική του OpenCV παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 11 Αρχιτεκτονική OpenCV

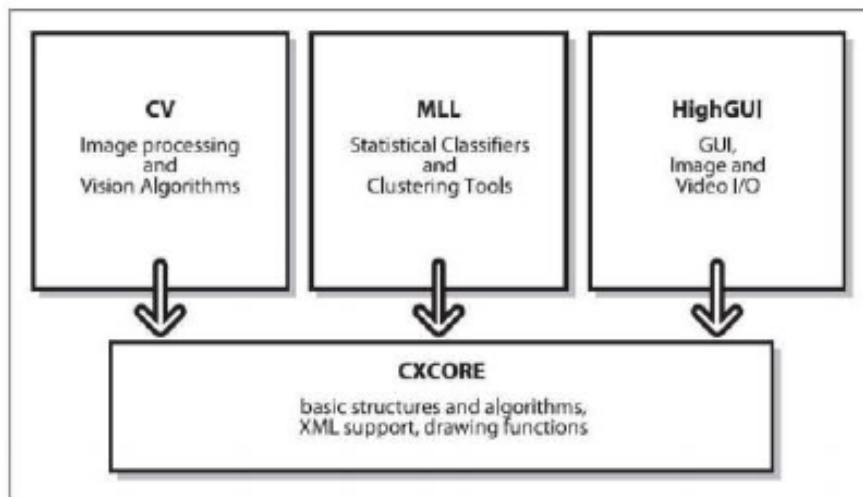
Η OpenCV περιέχει πάνω από 500 συναρτήσεις, κατάλληλες για πολλές διαφορετικές εφαρμογές στους τομείς της οπτικής επεξεργασίας, όπως για ιατρικές εφαρμογές που αφορούν εικόνα και βίντεο, κλειστό κύκλωμα παρακολούθησης, ασφάλεια, ρομποτική, ρύθμιση κάμερας, διεπαφή χρήστη και υπολογιστή. Επειδή υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ μηχανικής όρασης και μηχανικής εκμάθησης, η OpenCV περιέχει και μία βιβλιοθήκη μηχανικής εκμάθησης γενικού σκοπού (MLL – Machine Learning Library). Αυτή η ειδική βιβλιοθήκη εστιάζει στην αναγνώριση προτύπων με στατιστικές μεθόδους και στην ομαδοποίηση. Χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε πρόβλημα μηχανικής όρασης, λόγω της γενικής μορφής της.

Η OpenCV δομείται κυρίως από 5 συστατικά μέρη, 4 από τα οποία παρουσιάζονται στην (βλ. εικόνα παρακάτω). Το πρώτο στο σχήμα με την ονομασία CV, αναπαριστά τους βασικούς αλγορίθμους για επεξεργασία εικόνας, αλλά και τους υψηλού επιπέδου για τη μηχανική όραση. Το δεύτερο, ML, αναπαριστά τη βιβλιοθήκη μηχανικής μάθησης, που περιλαμβάνει εργαλεία για ομαδοποίηση και στατιστική ταξινόμηση. Το τρίτο, HighGUI, αναπαριστά τις ρουτίνες εισόδου-εξόδου, τις συναρτήσεις για την προβολή και την αποθήκευση των βίντεο και γενικά ότι έχει να κάνει με τη διεπαφή χρήστη-εφαρμογής.

Τέλος, το CxCore περιέχει τις βασικές δομές δεδομένων, όπως το IplImage, τη βασική δομή στην OpenCV που περιγράφει με κάθε λεπτομέρεια το κάθε καρέ προς επεξεργασία. Το τελευταίο δομικό μέρος της OpenCV είναι

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

το CnAuc, που περιέχει αλγορίθμους που δεν χρησιμοποιούνται πολύ, γιατί είναι σε πειραματικό στάδιο ή που έχουν απλά εγκαταλειφθεί.



Εικόνα 12 Βασικά συστατικά της OpenCV

### 3.4.1 Τα πλεονεκτήματα της OpenCV

Το βασικότερο πλεονέκτημα της OpenCV είναι η ταχύτητα. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που δημιουργήθηκε εξ αρχής, καθώς η Intel ήθελε να δείξει πόσο προχωρημένοι ήταν οι επεξεργαστές της, που μπορούσαν να επεξεργάζονται βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Το δεύτερο είναι ότι ενώ είναι ελεύθερο λογισμικό, υποστηρίζεται από εταιρίες όπως η Intel και η IBM, πανεπιστήμια όπως το Stanford, το MIT και πλήθος άλλων οργανισμών και εργαστηρίων που βοηθούν συνεχώς στην ανάπτυξή της.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτεί περίπλοκα μηχανήματα και εξοπλισμούς, αφού και η πιο απλή web camera, είναι αρκετή για είσοδο εικόνας και ο πιο απλός προσωπικός υπολογιστής, είναι ικανός για την επεξεργασία της.

### 3.4.2 Εφαρμογές της OpenCV

Οι επιστήμονες και οι ακαδημαϊκοί, που ασχολούνται με τη μηχανική όραση, γνωρίζουν πραγματικά τις δυνατότητές της και το ευρύ φάσμα στο οποίο χρησιμοποιείται. Οι περισσότεροι γνωρίζουν κάποια από τα πλεονεκτήματα της μηχανικής όρασης και λίγες εφαρμογές της. Οι πιο γνωστές εφαρμογές της είναι στα συστήματα παρακολούθησης, σε εικόνες και βίντεο στο διαδίκτυο. Η πραγματική δύναμή της φαίνεται σε περιοχές που δεν είναι ευρέως γνωστό ότι χρησιμοποιείται, όπως σε διεπαφές παιχνιδιών και σε άλλες εντυπωσιακές, όπως στους περισσότερους εναέριους χάρτες και χάρτες



δρόμων (όπως στο Google Street View), όπου χρησιμοποιούν κατά κόρον τεχνικές συγκόλλησης εικόνων, ευθυγράμμισης και διόρθωσης της εικόνας από παραμορφώσεις που εισάγει ο φακός.

Άλλες χρήσεις της είναι σε μη-επανδρωμένα οχήματα (γενικά στη ρομποτική) ή βιοϊατρικές αναλύσεις. Ένας σημαντικός κλάδος στον οποίο κερδίζει έδαφος, είναι η βιομηχανία. Σχεδόν όλα τα προϊόντα που παράγονται μαζικά, έχουν επιθεωρηθεί σε κάποιο στάδιο της παραγωγής από συστήματα μηχανικής όρασης. Από την πρώτη της έκδοσης, τον Ιανουάριο του 1999, η OpenCV έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, προϊόντα και ερευνητικές μελέτες.

Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν τον συγκερασμό εικόνων σε δορυφορικούς και διαδικτυακούς χάρτες, τη μείωση του θορύβου σε ιατρικές εικόνες, τα αυτόματα συστήματα ελέγχου και ασφαλείας, στρατιωτικές εφαρμογές και μη επανδρωμένα οχήματα (εναέρια, υποβρύχια, επίγεια). Έχει χρησιμοποιηθεί, ακόμα, σε αναγνώριση ήχου και μουσικής. Η OpenCV ήταν ένα βασικό συστατικό του συστήματος όρασης του ρομπότ από το πανεπιστήμιο Stanford, του “Stanley”, το οποίο κέρδισε τον DARPA Grand Challenge, αγώνα δρόμου ρομπότ στην έρημο.

### 3.4.3 Βασικές Δομές και Συναρτήσεις της OpenCV

Μερικές βασικές δομές και συναρτήσεις της OpenCV είναι τα παρακάτω:

- `IplImage`: Πίνακας στον οποίο αποθηκεύονται εικόνες. Μπορεί να έχει περισσότερα του ενός κανάλια η εικόνα.
- `CvSize`: Δομή για την αποθήκευση του μεγέθους των εικόνων.
- `CvScalar`: Δομή που έχει 4 μεταβλητές `double`, μια για κάθε κανάλι μιας εικόνας.
- `CvMat`: Πίνακας στον οποίο αποθηκεύονται στοιχεία με μία ενιαία γραμμική κώδικα.
- `Scalar`: Ο τύπος `Scalar` χρησιμοποιείται ευρέως στην OpenCV για να περάσει τιμές εικονοστοιχείων (`pixel`).
- Η συνάρτηση `cvCaptureFromCAM()` ενεργοποιεί τη κάμερα ως είσοδο ανάγνωσης εικόνων.
- Η συνάρτηση `cvSetCaptureProperty` ρυθμίζει την ανάλυση της κάμερας.
- Η συνάρτηση `cvQueryFrame` αποθηκεύει το καρτέ που δέχεται από τη κάμερα.
- Η συνάρτηση `cvReleaseCapture` ελευθερώνει τους πόρους της κάμερας.
- Η συνάρτηση `GaussianBlur` εφαρμόζει σε μία εικόνα το φίλτρο `Gaussian`.
- Η συνάρτηση `cvtColor` δέχεται ως είσοδο την αρχική εικόνα (`source image`) σε BGR και δίνει στην έξοδο την εικόνα (`destination image`) μετασχηματισμένη σε άλλο χρωματικό χώρο.

- Η συνάρτηση moments χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ροπών μέχρι τρίτης τάξης αντικειμένου. Μόλις κληθεί η συνάρτηση αυτή όλες οι ροπές αποθηκεύονται στο διάνυσμα m.

### 3.5 Επεξεργασία με Γλώσσα Προγραμματισμού Python

Επέλεξα σαν εργαλείο για την υλοποίηση της πτυχιακής μου να χρησιμοποιήσω αν και όχι ευρέως διαδεδομένη στην Ελλάδα (ας ελπίσουμε όχι για πολύ) την υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού Python. Η Python είναι μία αλληλεπιδραστική γλώσσα προγραμματισμού η οποία δημιουργήθηκε από τον Ολλανδό Guido van Rossum το 1990. Αρχικά ήταν scripting γλώσσα για το λειτουργικό σύστημα Amoeba και ικανή για κλήσεις συστήματος.

Η γλώσσα χρησιμοποιεί μεταγλωττιστή για την δημιουργία του εκτελέσιμου κώδικα και συσχετίζεται με τις γλώσσες προγραμματισμού Tcl, Perl, Scheme, Java Ruby. Η Python έχει αναπτυχθεί ως ανοιχτό λογιστικό (ανοιχτού κώδικα) και η διαχείρισή της γίνεται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό Python Software Foundation. Στο ερώτημα γιατί Python έχω να απαντήσω τα εξής:

- Μία από τις πιο ανεπτυγμένες εταιρίες υψηλής τεχνολογίας που πρωτοπορεί σε καινοτόμα προϊόντα σήμερα, η πασίγνωστη σε όλους μας Google χρησιμοποιεί την Python από την αρχή της ανάπτυξής της: “Python has been an important part of Google since the beginning, and remains so as the system grows and evolves” – Peter Norvig, Google.
- Είναι μία γλώσσα που λόγω της απλότητάς της και δυναμικότητας του scripting language ενθαρρύνεται για rapid development.
- Η σύνταξή της είναι τόσο απλή σαν ψευδοκώδικα, όταν ο κώδικας που βλέπουμε δείχνει λογικά σωστός, συνήθως το πρόγραμμα θα τρέχει σωστά.
- Προσφέρει μεγάλη υποστήριξη για ενοποίηση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού και εργαλεία.
- Διανέμεται με άδεια OSI-approved που σημαίνει ότι είναι μία γλώσσα 100% open source και οτιδήποτε δημιουργήσουμε με αυτήν μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε ελεύθερα χωρίς κανέναν περιορισμό, ακόμα και ως μία εμπορική εφαρμογή.
- Είναι 100% portable, ο ίδιος κώδικας τρέχει σε Windows, Linux, Mac κτλ. χωρίς μετατροπές.
- Μόλις πρόσφατα η Microsoft έκανε τα πρώτα βήματα για να την ενσωματώσει στην οικογένειά της. NET με την κωδική ονομασία IronPython.

### 3.6 Λειτουργικό Σύστημα

Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα λειτουργικά συστήματα για το Raspberry Pi όπως είναι το Arch Linux ARM, το Pidora (Fedora Remix), το Raspbmc και το Openelec, το Risc Os καθώς και το Raspbian που αποτελεί και την προτεινόμενη έκδοση για εφαρμογές γενικής χρήσης. Το Raspberry Pi 3 μπορεί να έχει και τα Windows 10 σαν λειτουργικό σύστημα.

Όλα τα παραπάνω είναι παραλλαγές των γνωστών λειτουργικών που τρέχουν και σε υπολογιστές που έχουν βελτιστοποιηθεί και προσαρμοστεί για τις ανάγκες του Raspberry Pi.



Το Pidora είναι μια διανομή Linux για το Raspberry Pi. Περιέχει τα πακέτα λογισμικού από το λειτουργικό Fedora (συγκεκριμένα, το Fedora ARM δευτεροβάθμιας έργου αρχιτεκτονικής) που έχουν μεταγλωττιστεί ειδικά για την αρχιτεκτονική ARMv6 που χρησιμοποιείται στο Raspberry Pi, πακέτα τα οποία έχουν γραφτεί ειδικά ή έχουν τροποποιηθεί για το Raspberry Pi, και το λογισμικό που παρέχεται από την Raspberry Pi Foundation για την πρόσβαση στη συσκευή.



Το Raspbmc είναι μια διανομή Linux βασισμένη στο Debian που φέρνει το XBMC στο Raspberry Pi. Το Raspberry Pi έχει αρκετή δύναμη για να χειριστεί την αναπαραγωγή πολυμέσων, καθιστώντας το ιδανικό συστατικό για την δημιουργία ενός HTPC (Home Theater PC), που μπορούσε να αποτελείται

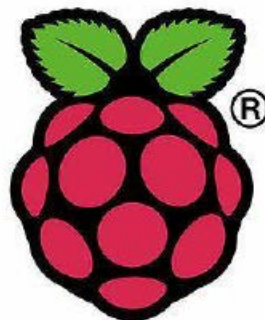
Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

από πολύ πιο δαπανηρές πλατφόρμες που θα παρήγαγαν το ίδιο αποτέλεσμα.



Το Raspbian είναι ένα ελεύθερο λειτουργικό σύστημα βασισμένο στο Debian και βελτιστοποιημένο για το υλικό του Raspberry Pi. Αποτελεί το ενδεδειγμένο λειτουργικό όταν το Raspberry Pi πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για γενική χρήση. Έχει περίπου 35.000 πακέτα προ-μεταγλωτισμένο λογισμικό σε κατανοητή μορφή για εύκολη εγκατάσταση.

**“NOOBS”**  
**New Out Of Box Software**



Η προτεινόμενη εγκατάσταση για αρχάριους από την Raspberry Pi Foundation είναι το Noobs γίνεται με απλή αντιγραφή στην κάρτα SD και περιέχει όλα τα παραπάνω λειτουργικά. Στο πρώτο άνοιγμα του Raspberry Pi αποφασίζει ο χρήστης ποιο από τα λειτουργικά θέλει να εγκαταστήσει και τα υπόλοιπα διαγράφονται αυτόματα από την κάρτα. (στο παράρτημα υπάρχει οδηγός εγκατάστασης).

### 3.7 Παραμετροποίηση Μηχανημάτων

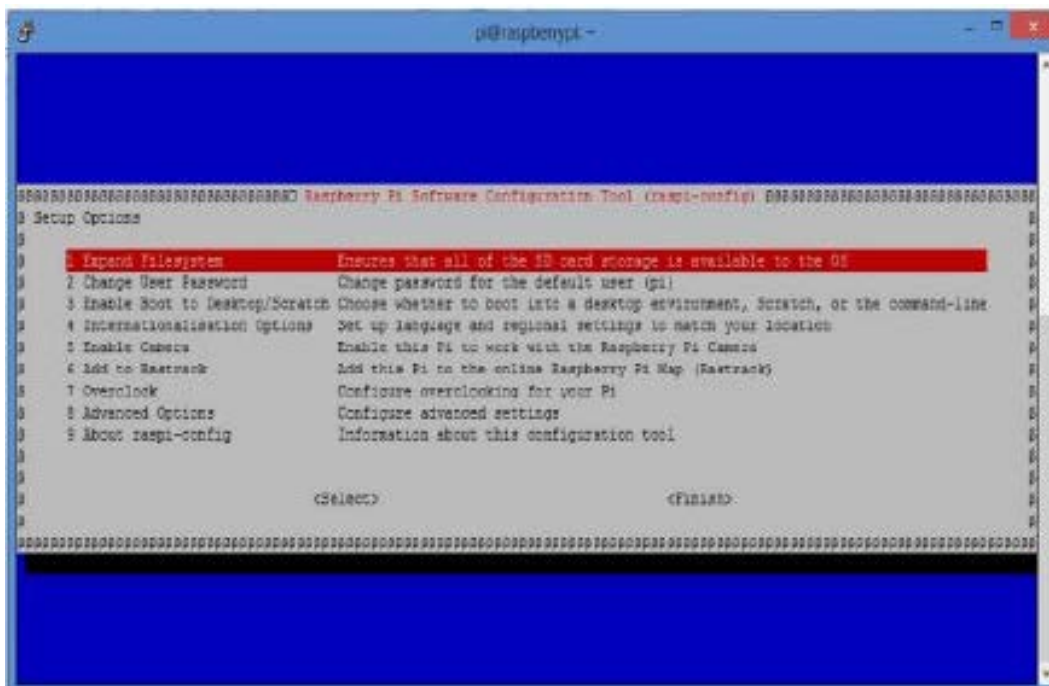
Το λειτουργικό που επιλέχθηκε είναι το Noobs καθώς είναι η προτεινόμενη εγκατάσταση για αρχάριους. Για να εγκαταστήσουμε το λειτουργικό Noobs στο Raspberry Pi θα πρέπει να ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα:

Βάζουμε την κάρτα σε έναν υπολογιστή που στην συγκεκριμένη περίπτωση τρέχει Windows 10 και με το SD Formatter κάνουμε format στην κάρτα έχοντας την επιλογή size adjustment στο ON έτσι να γίνει προσαρμογή στο μέγεθος της κάρτας. Έπειτα, με το Win32DiskImager αντιγράφουμε το αρχείο image στην κάρτα. Οι δύο παραπάνω διαδικασίες μπορούν να γίνουν και με άλλα αντίστοιχα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση καρτών SD.

Στη συνέχεια, βάζουμε την κάρτα SD στο Raspberry Pi και αφού το έχουμε συνδέσει στο τοπικό μας δίκτυο το ανάβουμε. Οι αρχικές ρυθμίσεις του Raspberry Pi είναι η απόκτηση IP να γίνεται μέσω dhcp client και η δυνατότητα σύνδεσης ssh να είναι ενεργοποιημένη. Έτσι, βρίσκουμε την IP διεύθυνση του Raspberry Pi, από τις συνδεδεμένες συσκευές στο Router, που από εδώ και στο εξής θα την αναφέρουμε ως IP address . Συνδεόμαστε στην πλακέτα απομακρυσμένα με ssh με ένα πρόγραμμα όπως το Putty. Αν όλα έχουν πάει καλά η σύνδεση είναι επιτυχής και εμφανίζεται στον υπολογιστή μας ένα παράθυρο με την λέξη "login as:". Το προκαθορισμένο username και password είναι pi και raspberry αντίστοιχα.

Η πρώτη ρύθμιση που θα πρέπει να κάνουμε στο Raspberry Pi είναι να επιτρέπεται η χρήση κάμερας (enable camera). Για να εισέλθουμε στις ρυθμίσεις του Raspberry Pi εκτελούμε την εντολή `sudo raspi-config` (Επισημαίνεται ότι για τον χρήστη pi δεν χρειάζεται κωδικός για να εκτελεστεί μία εντολή με sudo). Με την εκτέλεση αυτής της εντολής βλέπουμε τις παρακάτω επιλογές:

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραφίες



Εικόνα 13 Raspberry Pi Software Configuration Tool

Επιλέγουμε το 5 Enable Camera και πατάμε Enter. Μετά το τέλος της διαδικασίας αυτής μπορούμε να έχουμε τις λειτουργίες της κάμερας.

Στη συνέχεια εκτελούμε την εντολή `sudo apt-get update && sudo apt-get upgrade` (απαντάμε με YES στο ερώτημα αν θέλουμε να συνεχίσουμε) έτσι ώστε να γίνουν όλες οι τελευταίες αναβαθμίσεις που είναι διαθέσιμες για το Raspberry Pi καθώς επίσης και την εντολή `sudo apt-get clean` για να διαγραφούν τα προσωρινά αρχεία της εγκατάστασης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### 4.1 Συστατικά Συστήματος

Για την επίτευξη του στόχου μας επιλέξαμε να χρησιμοποιήσαμε χαμηλού κόστους υλικά τα οποία προμηθευτήκαμε από τοπικά καταστήματα. Αυτά είναι:

##### 4.1.1 Raspberry Pi 3 Model B

Το Raspberry Pi αποτελεί έναν υπολογιστή σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας. Αναπτύχθηκε από την Raspberry Pi Foundation και σκοπό είχε την προώθηση της διδασκαλίας της επιστήμης των υπολογιστών σε σχολεία. Είναι μια συσκευή η οποία παρουσιάζει πολλές δυνατότητες και είναι ικανή για λειτουργίες που συνήθως τις κάνει ένας προσωπικός υπολογιστής, όπως προβολή ταινιών, παιχνίδια, πλοήγηση στο διαδίκτυο κλπ.

Λόγω του μικρού μεγέθους και των υψηλών του δυνατοτήτων του χρησιμοποιείται σε πολλά προγράμματα (projects). Ο λόγος επιλογής αυτής της πλακέτας (board) ήταν ότι αποτελεί ένα σύγχρονο υπολογιστικό σύστημα με πολλές λειτουργικότητες και χαμηλό κόστος. Έχουν κυκλοφορήσει τρία μοντέλα, το raspberry pi 1, το raspberry pi 2 (Model B & Model B+) ενώ πρόσφατα κυκλοφόρησε και το raspberry pi 3 Model B.

Η διαφορά του μοντέλου raspberry pi 3 με το αρχικό raspberry pi 1 είναι ότι διαθέτει θύρα Ethernet, παραπάνω θύρες USB 2.0 και περισσότερη μνήμη Ram. Για την διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το Raspberry Pi 3.

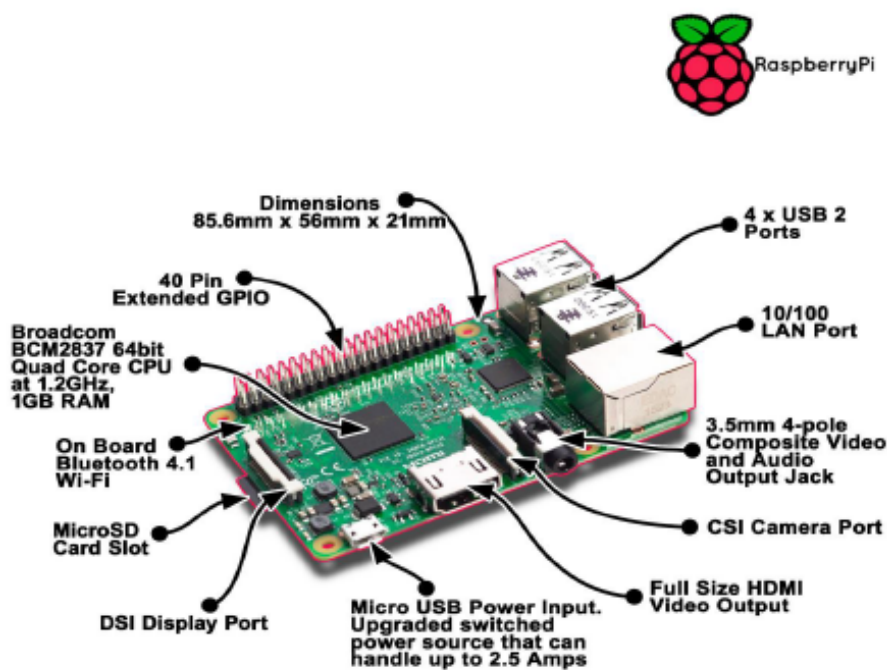
Το raspberry pi διαθέτει μία SD Card η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση αρχείων. Επίσης η SD Card είναι απαραίτητη στην boot διαδικασία καθώς όλα τα απαραίτητα αρχεία για την διαδικασία αυτή αποθηκεύονται σε ένα FAT32 partition της κάρτας.

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο Raspberry Pi, υπάρχει ένας Header ο οποίος διαθέτει 40 ακίδες. Πρόκειται για τον P1 Header. Συνολικά στη πλακέτα υπάρχουν ακόμη πέντε headers αλλά δεν είναι ενεργοποιημένοι.

Ο P1 header είναι γνωστός και ως expansion header gpio connector P1. Σε αυτό τον header πέραν από κάποιες ακίδες τροφοδοσίας 5V, 3.3V και GND, οι υπόλοιπες ακίδες έχουν κάποιες συγκεκριμένες λειτουργίες που επιτρέπουν την επικοινωνία και σύνδεση του raspberry pi με κάποιες άλλες

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

συσκευές. Η τροφοδοσία στο Raspberry Pi επιτυγχάνεται μέσω μιας micro usb θύρας που υπάρχει στη πλακέτα ή μέσω των 5V και GND ακίδων(pins).



Εικόνα 14 Raspberry Pi 3 Model B

Τα χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3 είναι τα εξής:

- 4 θύρες USB (μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποντίκι και πληκτρολόγιο)
- 1 θύρα ethernet (για σύνδεση στο τοπικό δίκτυο)
- 1 κάρτα SD (παίζει το ρόλο του αποθηκευτικού μέσου, όχι μόνο για τα αρχεία σας αλλά και για το λειτουργικό που θα τρέξει)
- 1 θύρα HDMI (για την σύνδεση με την οθόνη)
- 1 αναλογική έξοδος (για τα ηχεία)
- 1 rca video έξοδος (σε περίπτωση που δεν υπάρχει οθόνη με HDMI)
- 1 micro usb (για την τροφοδοσία)
- Ενσωματωμένο Wifi και Bluetooth

Θα αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3 και κάποιες διαφορές που υπάρχουν σε σχέση με πιο παλιά μοντέλα. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ότι έχει αλλάξει ο επεξεργαστής και είναι ο BCM2837 ο οποίος αποτελείται από τέσσερις πυρήνες και είναι στα 1,2GHz. Επιπλέον η



cache του επεξεργαστή αναβαθμίστηκε. Οπότε αυτόματα δίνει αρκετή δύναμη έτσι ώστε να βελτιωθούν λειτουργίες όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο και να υπάρχουν πολλές παράλληλες λειτουργίες (multithread) όπως για παράδειγμα σε άλλον επεξεργαστή να τρέχει το γραφικό περιβάλλον και σε άλλον η επεξεργασία των δεδομένων από την sd κάρτα. Επίσης μεγάλωσε η μνήμη RAM η οποία είναι πλέον 1GB. Σύμφωνα με τον Eben Upton η ταχύτητα έχει εξαπλασιαστεί.

Μια ακόμη σημαντική διαφορά είναι ότι η αρχιτεκτονική του νέου επεξεργαστή είναι ARMv8 η οποία επιτρέπει να δημιουργηθούν διανομές λειτουργικού συστήματος όπως ubuntu και όλα τα λειτουργικά που μπορεί να έχει ένας επεξεργαστής ARM. Επίσης αίσθηση έχει προκαλέσει ότι το Raspberry Pi 3 θα είναι συμβατό με τα Windows 10.

Όσον αφορά τη συμβατότητα, οι είσοδοι-έξοδοι γενικού σκοπού παραμένουν οι ίδιες. Επίσης έχει 4 USB οι οποίες όμως παρέχουν περισσότερο ρεύμα και είναι δυνατόν να συνδεθούν συσκευές που έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ρεύμα.

Ειδικά για το Raspberry Pi έχει φτιαχτεί και μία κάμερα, η Raspberry Pi Camera Module η οποία βοηθάει σημαντικά έτσι ώστε να τραβάμε φωτογραφίες ή βίντεο.

#### 4.1.2 Ρομποτικός βραχίονας OWI-535 Robotic Arm Edge

Έχει πέντε βαθμούς ελευθερίας, μία αρπάγη που ανοίγει και κλείνει, LED φωτισμό για την περιοχή εργασίας και ελέγχεται ενσύρματα με χειριστήριο. Η βάση του μπορεί να περιστραφεί μέχρι 2700 και να κάνει μέγιστη κίνηση 1800, ο «αγκώνας» του μπορεί να περιστραφεί μέχρι 3000 και ο «καρπός» μέχρι 1200. Επιπλέον διαθέτει ηχητική ειδοποίηση προστασίας και για τους πέντε DC κινητήρες που έχει, για την αποφυγή ζημιάς σε αυτούς κατά την διάρκεια του χειρισμού.



*Εικόνα 15 Ρομποτικός βραχίονας OWI-535 Robotic Arm Edge*

Χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα OWI-535:

Διαστάσεις: 29cm x 16cm x 38 cm (μήκος, πλάτος, ύψος)

Βάρος: 658g

Μέγιστο βάρος αντικειμένου μεταφοράς: 100g

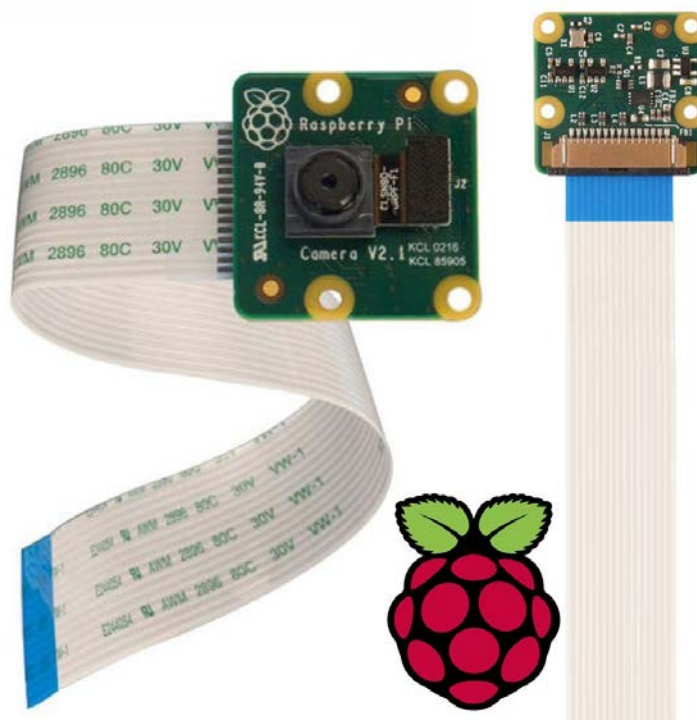
Μέγιστο μήκος έκτασης: 38cm

Μέγιστο ύψος έκτασης: 32cm

Μπαταρίες τροφοδοσίας: 4 μπαταρίες τύπου 'D'

#### 4.1.3 Raspberry Pi Camera Module V2 (8MP,1080p)

Η νέα κάμερα για το Raspberry Pi έχει υψηλότερη ανάλυση και καλύτερη ποιότητα από ό, τι το προηγούμενο μοντέλο. Το νέο Pi Camera Board V2 βασίζεται στον αισθητήρα εικόνας CMOS IMX219PQ της Sony.



Εικόνα 16 Raspberry Pi Camera Module V2

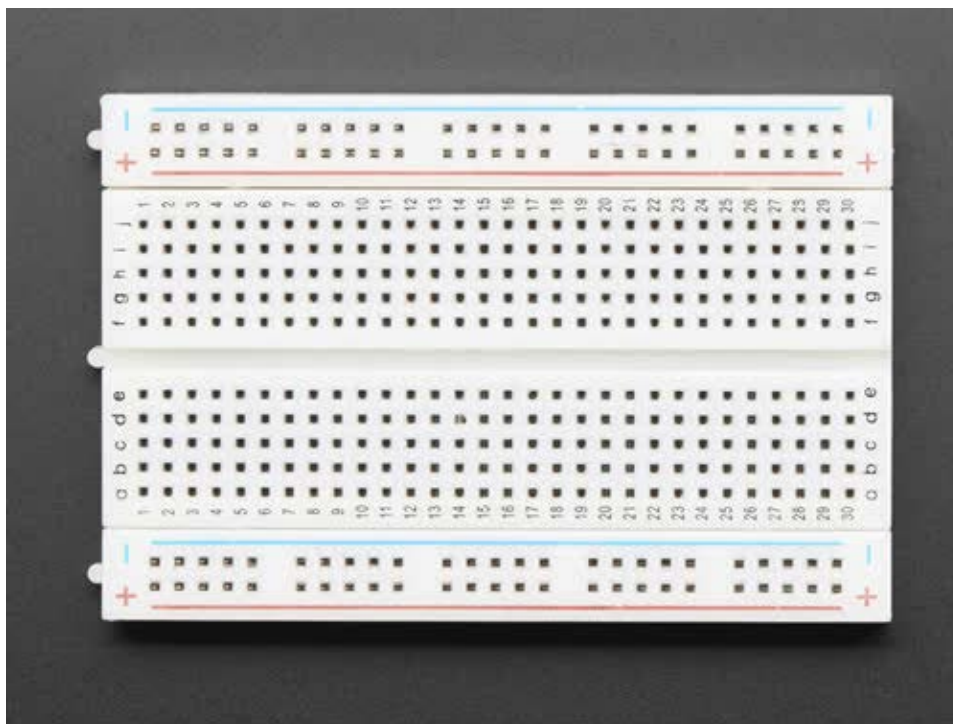
Η Raspberry Pi Camera είναι ένα πρόσθετο για το Raspberry Pi. Συνδέετε απευθείας στο Raspberry Pi σε μια από τις υποδοχές που βρίσκετε στο πάνω μέρος της πλακέτας. Η συγκεκριμένη κάμερα χρησιμοποιεί το ειδικό interface CSI που είναι σχεδιασμένο για διασυνδέσεις με κάμερες. Η πλακέτα έχει πολύ μικρές διαστάσεις (25mm x 20mm x 9mm) και το βάρος τις μόνο 3g, κάτι το οποίο δίνει την δυνατότητα σε εφαρμογές όπου το μέγεθος και το βάρος είναι σημαντικό.

Ο αισθητήρας έχει ανάλυση 8 megapixel και διαθέτει ενσωματωμένο fixed focus lens. Για φωτογραφίες η ανάλυση που υποστηρίζει είναι 3280 x 2464 και επίσης υποστηρίζει video με 1080p30 (Full HD), 720p60 και 640x480p60/90

#### 4.1.4 Breadboard

Το breadboard είναι μια μονάδα για την κατασκευή προσωρινών κυκλώματα (πρωτοτύπων) και δεν απαιτούν απολύτως καμία συγκόλληση.

Προτυποποίηση (prototyping) είναι η διαδικασία ελέγχου μιας ιδέας, με τη δημιουργία ενός προκαταρκτικού μοντέλου ενός κυκλώματος. Αυτή είναι μία από τις πιο κοινές χρήσεις για breadboards. Αν δεν είστε σίγουροι για το πώς ένα κύκλωμα θα αντιδράσει κάτω από ένα δεδομένο σύνολο παραμέτρων, είναι καλύτερο να δημιουργήσετε ένα πρωτότυπο και να το δοκιμάσετε.



Εικόνα 17 breadboard

Για τα αρχάριους με τα ηλεκτρονικά και τα κυκλώματα, τα breadboards είναι συχνά το καλύτερο μέρος για να ξεκινήσουν. Αυτή είναι η πραγματική ομορφιά των breadboards, ότι μπορούν να στεγάσουν τόσο το απλούστερο κύκλωμα, όσο και πολύ πολύπλοκα κυκλώματα. Αν το κύκλωμά σας ξεπερνά σε μέγεθος το τρέχον breadboard, μπορεί να επεκτείνετε το κύκλωμά σας συνδέοντας άλλα breadboard για να φιλοξενήσουν κυκλώματα όλων των μεγεθών και πολυπλοκότητας.

Μια άλλη κοινή χρήση των breadboard είναι να δοκιμάσουμε νέα εξαρτήματα, όπως ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs). Όταν προσπαθείτε να καταλάβετε πώς ένα εξάρτημα λειτουργεί και συνεχώς αλλάζετε την καλωδίωση, δεν θέλετε να κολλάτε τις συνδέσεις σας κάθε φορά.

Αξίζει να αναφερθεί, πως τα διάφορα σημεία επαφής που υπάρχουν σε ένα breadboard είναι οργανωμένα οριζόντια και κάθετα σε λωρίδες. Αυτές οι λωρίδες διακρίνονται είτε σε λωρίδες τροφοδοσίας, είτε σε λωρίδες

τερματισμού. Επίσης, κάθε breadboard διαθέτει τουλάχιστον μία ή περισσότερες λωρίδες τερματισμού καθώς και μία ή περισσότερες λωρίδες τροφοδοσίας.

Ο σκοπός των λωρίδων τερματισμού σε ένα breadboard είναι η σύνδεση των διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Τα σημεία επαφής σε μία λωρίδα τερματισμού είναι οργανωμένα και διατεταγμένα σε γραμμές και στήλες. Οι γραμμές σημαίνονται με αριθμούς και το πλήθος τους εξαρτάται από τις διαστάσεις του breadboard. Επίσης, οι στήλες σημαίνονται με τα γράμματα A-J του Αγγλικού αλφαβήτου και είναι πάντα 10 σε πλήθος.

Έτσι, κάθε σημείο επαφής χει απόλυτες και μοναδικές συντεταγμένες αναφοράς. Οι πέντε πρώτες στήλες A-E χωρίζονται από τις πέντε επόμενες στήλες F-J από μία φαρδιά εσοχή χωρίς σημεία επαφής, η οποία ονομάζεται κεντρική γραμμή. Η βασική ιδιότητα της λωρίδας τερματισμού είναι ότι για κάθε γραμμή της τα σημεία επαφής που βρίσκονται αριστερά ή δεξιά της κεντρικής γραμμής είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους. Έτσι, λόγου χάρη, αν ένας ακροδέκτης κάποιου εξαρτήματος συνδεθεί στο σημείο επαφής E4 της λωρίδας, τότε ουσιαστικά είναι συνδεδεμένος και με τα σημεία επαφής A4, B4, C4 και D4 αυτής.

Οι λωρίδες τροφοδοσίας αποτελούνται μόνο από δύο παράλληλες στήλες με σημεία επαφής. Η μια στήλη σημαίνεται συνήθως με κόκκινο χρώμα και το σύμβολο “+” ή το γράμμα “V”, ενώ η άλλη στήλη σημαίνεται με μαύρο ή μπλε χρώμα και το σύμβολο “-” ή το γράμμα “G”. Η βασική ιδιότητα αυτής της λωρίδας είναι ότι όλα τα σημεία επαφής καθεμιάς από τις δύο γραμμές της είναι βραχυκυκλωμένα. Ο ρόλος μιας λωρίδας τροφοδοσίας, λοιπόν, είναι να συνδεθεί σε αυτή μια τροφοδοσία και στη συνέχεια να τροφοδοτηθούν από αυτή τα διάφορα εξαρτήματα που είναι συνδεδεμένα στη λωρίδα τερματισμού.

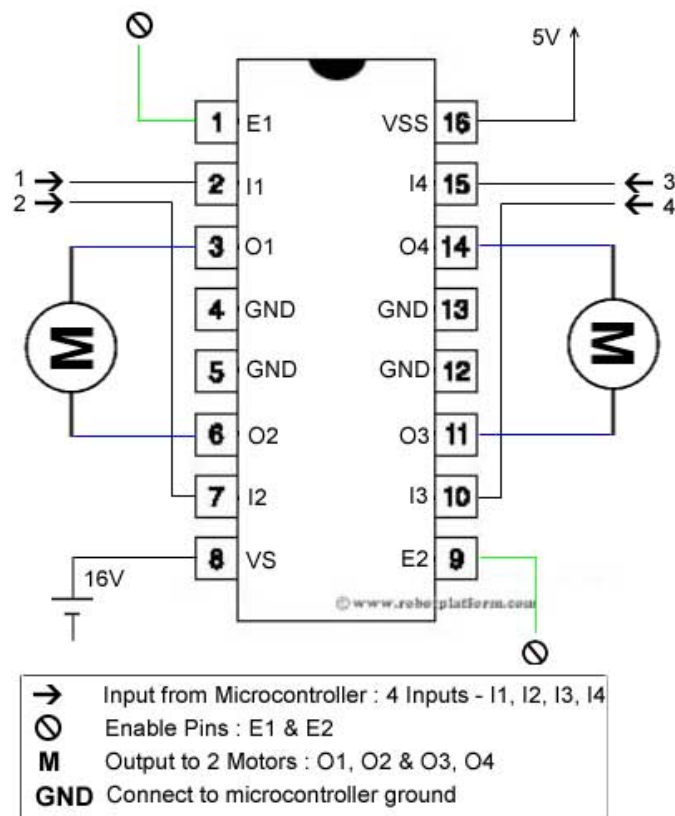
Στην εργασία μας το χρειαζόμαστε για να συνθέσουμε το ηλεκτρονικό κύκλωμα που ευθύνεται για την κίνηση των DC κινητήρων του ρομποτικού βραχίονα σε συνεργασία με τη πλακέτα του Raspberry Pi 3.

#### 4.1.5 Ολοκληρωμένα κυκλώματα L293D

Τα ολοκληρωμένο κύκλωμα L293D στην εργασία μας, είναι υπεύθυνο για την κίνηση των DC κινητήρων του ρομποτικού βραχίονα ανάλογα με τις τάσεις που του δίνει στις εισόδους του το Raspberry Pi 3. Χρειαζόμαστε τρία ολοκληρωμένα, διότι ο ρομποτικός βραχίονας έχει πέντε DC κινητήρες και κάθε ολοκληρωμένο μπορεί να κινήσει μέχρι δύο DC κινητήρες ταυτόχρονα.

Εδώ θα δούμε την λειτουργία του πιο αναλυτικά, καθώς αποτελεί κύριο συστατικό της εργασίας μας. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα L293D της Texas Instruments μπορεί να κινήσει κινητήρες διάφορων τύπων, στην εργασία μας θα το χρησιμοποιήσουμε όπως είπαμε για να κινήσουμε τους πέντε DC κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα.

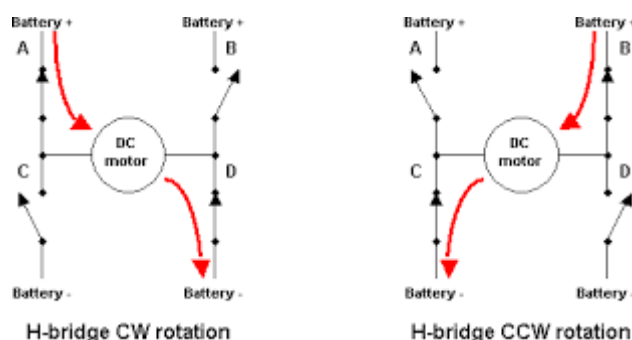
Το ολοκληρωμένο έχει 16 ακροδέκτες, τροφοδοτείται με τάση από τους ακροδέκτες 8 (Vs) και 16 (Vss). Η τάση Vs μπορεί να είναι από 4,5-36V που είναι ταυτόχρονα και η τάση τροφοδοσίας των κινητήρων, και η τάση Vss είναι 5V. Μπορεί να κινήσει μέχρι δύο κινητήρες ταυτόχρονα παρέχοντας μέγιστο ρεύμα 1.2 A ή 600 mA ανά κινητήρα.



Εικόνα 18 ολοκληρωμένο κύκλωμα L293D

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Παρατηρώντας το μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 18 βλέπουμε ότι υπάρχουν 2 "αυτόνομες" περιοχές, η μία είναι σχεδόν όλη η αριστερή πλευρά (1-8 pins) και η άλλη είναι σχεδόν όλη η δεξιά (9-15 pins). Παρατηρώντας καλύτερα βλέπουμε ότι ουσιαστικά καθένα από τα δύο αυτά τμήματα είναι το ανάποδο καθρέπτισμα της άλλης (εξαιρουμένων των pins 8 και 16 που αφορούν την τροφοδοσία), και λειτουργικά ότι ακριβώς κάνει το pin 1 κάνει και το pin 9, το ίδιο ισχύει για το pin 2 με το pin 10 κ.ο.κ. Κάθε πλευρά λοιπόν είναι υπεύθυνη για την κίνηση ενός DC κινητήρα και μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα από την άλλη. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να κινήσουμε 2 κινητήρες ή μόνο έναν, αν αυτό απαιτεί η εργασία μας. Επίσης το ολοκληρωμένο L293D διαθέτει ενσωματωμένες διόδους προστασίας.



Εικόνα 19 H-Bridge

Το ολοκληρωμένο L293D χαρακτηρίζεται και ως Γέφυρα-H (H-Bridge). Η Γέφυρα-H είναι τυπικά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που επιτρέπει την τάση να εφαρμοστεί σε ένα φορτίο και από τις δύο διευθύνσεις. Έτσι π.χ. ένας κινητήρας DC μπορεί να περιστραφεί δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα, εύκολα, αλλάζοντας τη διεύθυνση του ρεύματος, να αλλάζουμε τη φορά περιστροφής του DC κινητήρα που μας ενδιαφέρει.

Ας δούμε τώρα σύμφωνα με το σχήμα 16 πως μπορούμε να κινήσουμε έναν DC κινητήρα που συνδέουμε στην αριστερή πλευρά του ολοκληρωμένου L293D (στα pins 1-8), ανάλογα με τις τάσεις εισόδου που δίνουμε στους ακροδέκτες 1,2 και 7, όπου LOW = 0V και HIGH = 5V.

Pin 1	Pin 2	Pin 7	Function
High	Low	High	Turn clockwise
High	High	Low	Turn anti-clockwise
High	Low	Low	Stop
High	High	High	Stop
Low	Not applicable	Not applicable	Stop

Πίνακας 2 Καταστάσεις εισόδων πρώτου κινητήρα του L293D

#### 4.1.6 Memory Card microSDHC 32GB Class 10 - SanDisk Ultra



Εικόνα 20 Memory Card microSDHC 32GB Class 10 - SanDisk Ultra

Ιδανικό για smartphones και tablet που βασίζονται σε λειτουργικό Android. Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς 80MB / s. Class 10 για εγγραφή και αναπαραγωγή Full HD βίντεο. Αδιάβροχη, ανθεκτική στη θερμοκρασία, ανθεκτική στις κρούσεις, απόδειξη ακτινών X και απόδειξη μαγνητών. Η εφαρμογή Memory Zone σας επιτρέπει να διαχειρίζεστε αυτόματα το μέσο και τη μνήμη για κορυφαία απόδοση τηλεφώνου. Έρχεται με προσαρμογέα SD για χρήση σε κάμερες.

#### 4.1.7 T-Cobbler Plus - GPIO Breakout for Raspberry Pi 3



Εικόνα 21 T-Cobbler Plus - GPIO



Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Το T-Cobbler Plus είναι ένα πρόσθετο εξάρτημα στο πρωτότυπο Raspberry Pi 3 board από την Adafruit ειδικά σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να ξεσπάσει όλες τις νευρώσεις GPIO, I2C και SPI από την κεφαλίδα των 40 ακίδων σε ένα breadboard. Αυτό το σετ δίνει την δυνατότητα να γίνει προέκταση του GPIO του Raspberry για την ασφαλή σύνδεση του με άλλες συσκευές.

#### 4.1.8 Official Raspberry Pi 3 Black Case



*Εικόνα 22 Official Raspberry Pi 3 Black Case*

Ειδικά κατασκευασμένη και όμορφα σχεδιασμένη, αυτή η κομψή και απτική θήκη που έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει το Raspberry Pi 3. Τα πλαϊνά κομμάτια μπορούν να αφαιρεθούν ξεχωριστά για να επιτρέψουν την πρόσβαση στο GPIO και η κορυφή μπορεί επίσης να αφαιρεθεί για να επιτρέψει την προσθήκη HATs ή άλλης περιφέρειας GPIO. Υπάρχουν ακόμη και οδηγοί φώτων LED.

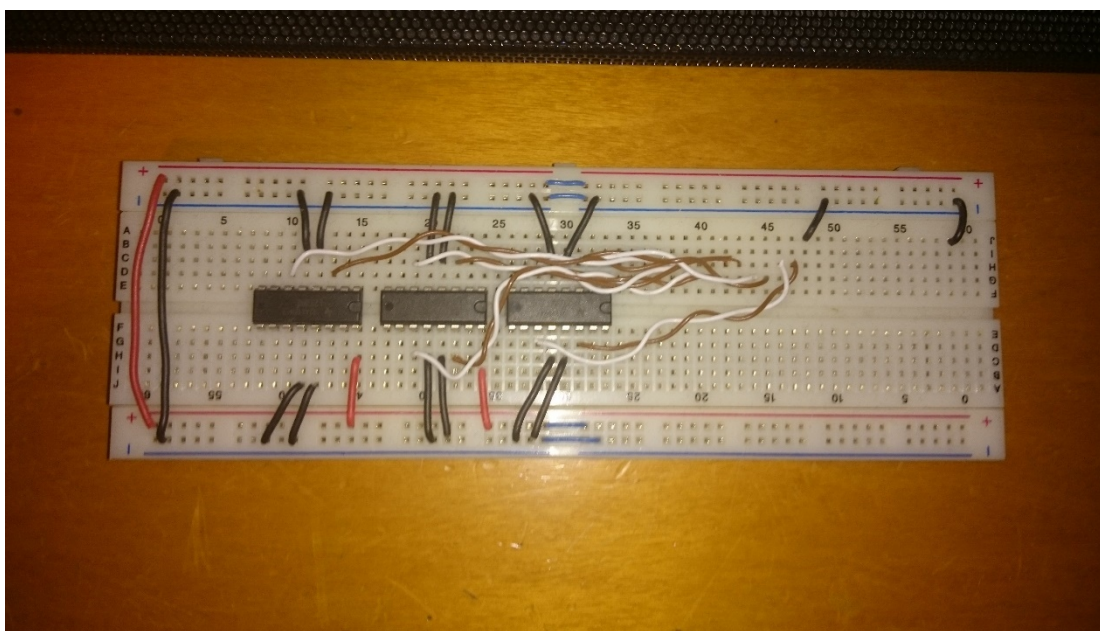
#### 4.2 Δημιουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος για την οδήγηση των DC κινητήρων

Το κύκλωμα οδήγησης των DC κινητήρων θα το δημιουργήσουμε πάνω στο breadboard χρησιμοποιώντας τα απαραίτητα για την δημιουργία του υλικά. Το ηλεκτρονικό αυτό κύκλωμα μας είναι απαραίτητο για να επιτύχουμε την οδήγηση των πέντε DC κινητήρων, από τους οποίους και αποτελείται, του ρομποτικού βραχίονα από το Raspberry Pi3. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

L293D είναι υπεύθυνο να λαμβάνει τις εντολές από το Raspberry Pi3 και να δίνει κίνηση στους κινητήρες DC. Το L293D μπορεί να κινήσει ταυτόχρονα μέχρι και δύο DC κινητήρες δίνοντας μέγιστο ρεύμα 600mA σε καθέναν από αυτούς. Ο ρομποτικός βραχίονας έχει πέντε DC κινητήρες και για αυτό θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα L293D.

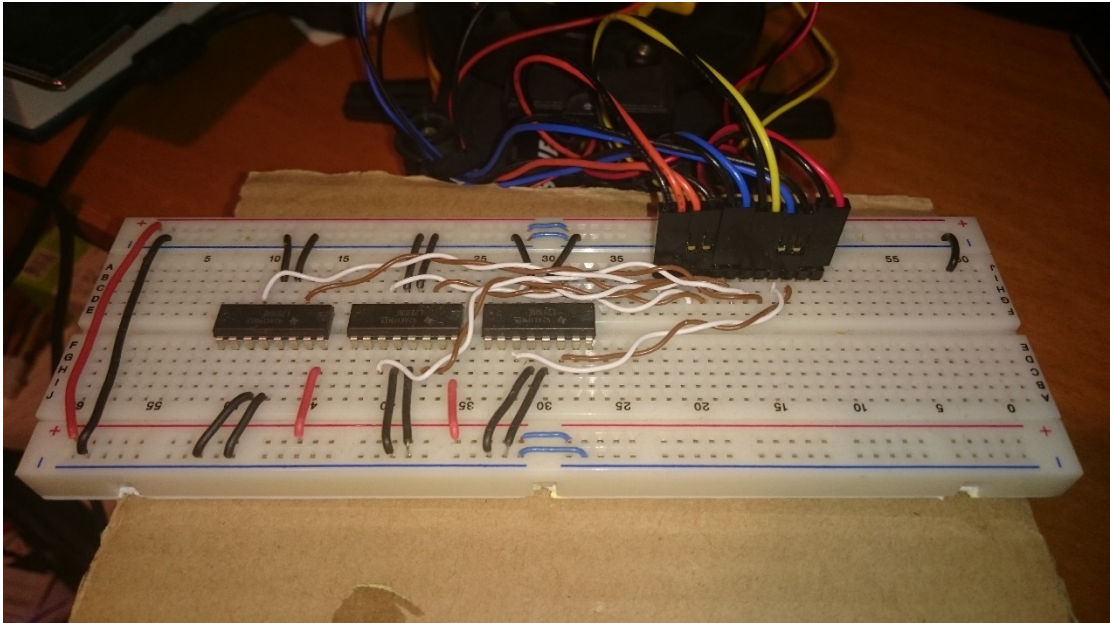
Αφού τοποθετήσουμε τα τρία ολοκληρωμένων L293D και κάνουμε τις απαραίτητες συνδέσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 20.



Εικόνα 23 Συνδεσμολογία L293D

Συνεχίζουμε βάζοντας τα κόκκινα καλώδια με τις τροφοδοσίες (+) και τα μαύρα καλώδια με τη γείωση (-) για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αλλά και συνολικότερα για όλο το κύκλωμα. Την τροφοδοσία θα την πάρουμε από τις τέσσερις μπαταρίες τύπου "AA" που είναι συνδεδεμένες εξωτερικά. Ο αρνητικός πόλος είναι η γείωση. Τα τρία ολοκληρωμένα κυκλώματα L293D πρέπει να μπουν όπως φαίνεται στην φωτογραφία ώστε οι ακροδέκτες της μίας πλευράς να μην βραχυκυκλώνουν με τους ακροδέκτες της άλλης. Το πρώτο από αριστερά ολοκληρωμένο κύκλωμα επειδή είναι και το πιο μακρινό επιλέγουμε να είναι αυτό από τα τρία που θα κινήσει έναν DC κινητήρα και όχι δύο, όπως τα άλλα και για αυτό, δεν δίνουμε τροφοδοσία στον ακροδέκτη 9 (Enable 2), αφήνοντας έτσι ανενεργό το τμήμα αυτό του ολοκληρωμένου. Συνδέουμε επίσης τον ακροδέκτη 8 (Vs) και των τριών ολοκληρωμένων, που ευθύνονται για την τάση τροφοδοσίας των DC κινητήρων στην θετική τροφοδοσία, η οποία είναι περίπου 5V (από τις τέσσερις μπαταρίες. Τα καφέ-άσπρα ζευγάρια καλωδίων συνδέουν τις εξόδους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με τους DC κινητήρες (δύο καλώδια για κάθε κινητήρα) και τα συγκεντρώνουμε δεξιότερα στο breadboard.

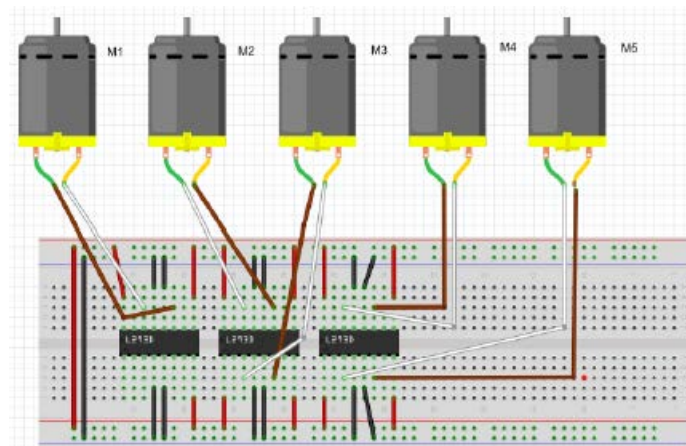
## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες



Εικόνα 24 Συνδεσμολογία L293D με «βοηθό»

Στην συνέχεια συνδέουμε στο υπάρχον κύκλωμα ένα βοηθό" 12 επαφών, που μας δίνει την δυνατότητα να συνδέσουμε πάνω του τα καλώδια από το ρομποτικό βραχίονα. Επάνω του, στις 10 πρώτες από αριστερά επαφές, έχουμε συνδέσει τους πέντε DC.

Παρακάτω στο σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης των τριών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων L293D με τους πέντε συνολικά DC κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα (Σχήμα 22) παρατηρούμε την σύνδεσή τους ευκρινέστερα.

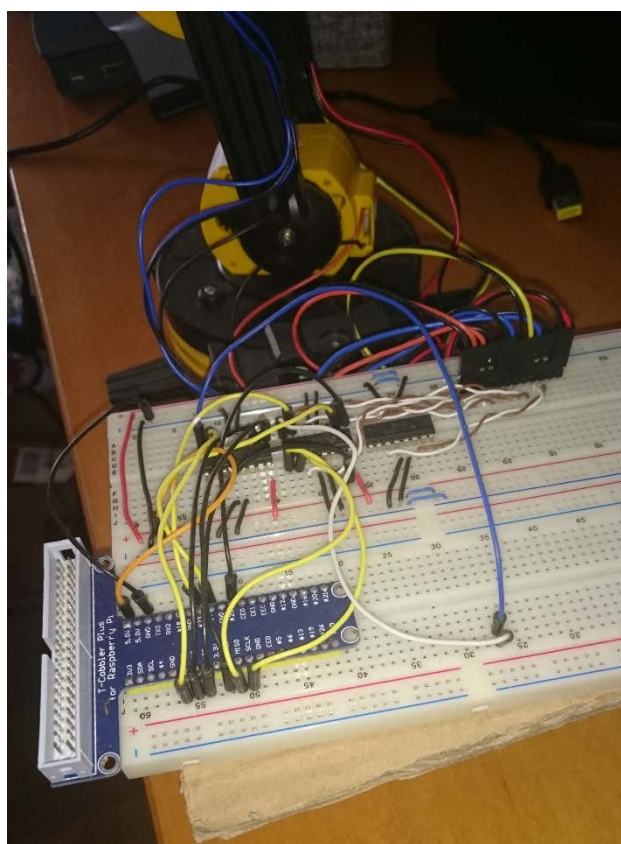


Εικόνα 25 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης

### 4.3 Σύνδεση του Raspberry Pi 3

Η σύνδεση του Raspberry Pi στο σύστημα προϋποθέτει να έχουμε φτιάξει ένα προσχέδιο υλοποίησης του προγράμματός μας για να κάνουμε ανάλογα τις διάφορες συνδέσεις που απαιτούνται στους ακροδέκτες του Raspberry Pi που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε.

Η σύνδεση δεν έγινε απευθείας πάνω στο GPIO του Raspberry Pi. Για μεγαλύτερη ασφάλεια χρησιμοποιήσαμε το T-Cobbler Plus – GPIO που μας δίνει την δυνατότητα να επεκτείνουμε το GPIO του Raspberry Pi στο breadboard μας. Έτσι μπορούμε καθαρότερα να κάνουμε τις συνδέσεις που απαιτούνται.



Εικόνα 26 Σύνδεση Cobbler με κύκλωμα

Για την κίνηση των τριών κινητήρων του βραχίονα χρησιμοποιούμε τα εξής pins του GPIO του Raspberry Pi 3:

- Για τον πρώτο κινητήρα (βάσης) χρησιμοποιούμε τα pin 11, pin 13, pin 15 όπου συνδέονται με τα δύο Input pins και το pin Enable αντίστοιχα.
- Για τον πρώτο κινητήρα (βάσης) χρησιμοποιούμε τα pin 16, pin 18, pin 22 όπου συνδέονται με τα δύο Input pins και το pin Enable αντίστοιχα.

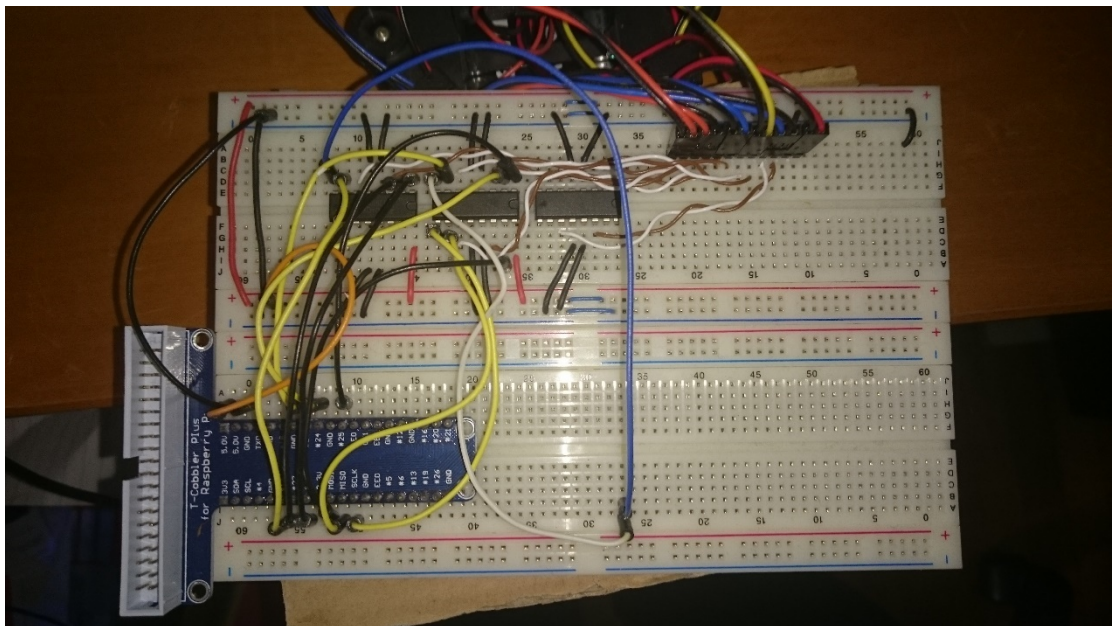
## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

- Για τον πρώτο κινητήρα (βάσης) χρησιμοποιούμε τα pin 19, pin 21, pin 23 όπου συνδέονται με τα δύο Input pins και το pin Enable αντίστοιχα.

Βάσει της λειτουργίας του ολοκληρωμένου κυκλώματος L293D, η κίνηση ενός DC κινητήρα εξαρτάται από τις τάσεις που εφαρμόζονται στους δύο ακροδέκτες εισόδου, σύμφωνα με το Σχήμα 16. Άρα τα καλώδια που φεύγουν από το Raspberry Pi 3 και πάνε στα ολοκληρωμένα L293D, είναι ουσιαστικά ζεύγη καλωδίων, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για την κίνηση ενός εκ των πέντε DC κινητήρων.

Με το πρόγραμμα του Raspberry Pi 3 που έχουμε γράψει και ανάλογα με τον αριθμό δακτύλων που ανιχνεύετε από την κάμερα, κάθε ζεύγος (άρα και κινητήρας) μπορεί να βρίσκεται σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις όταν το σύστημα είναι σε λειτουργία.

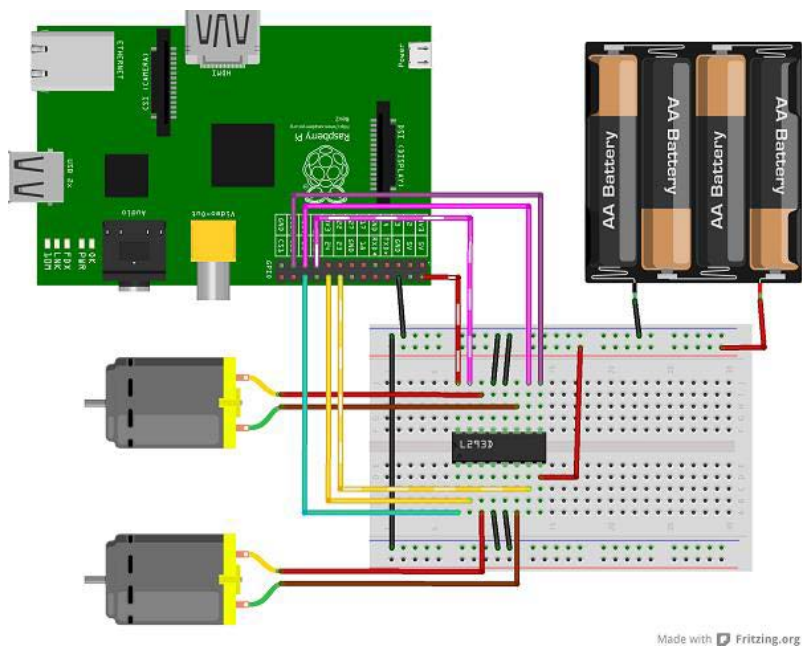
Αυτές διακρίνονται στην κατάσταση ακινησίας (η αντίστοιχη έξοδος του Raspberry Pi 3 στο pin Enable του L293D είναι LOW), στην κατάσταση κίνησης κατά τη φορά του ρολογιού (η μία έξοδος HIGH και η άλλη LOW και το Enable HIGH) και στην κατάσταση κίνησης αντίστροφης της φοράς του ρολογιού (η μία έξοδος LOW η άλλη HIGH και το Enable HIGH). Έτσι έχουμε πλήρη έλεγχο σε όλους τους DC κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 27 Σύνδεση Cobbler με κύκλωμα

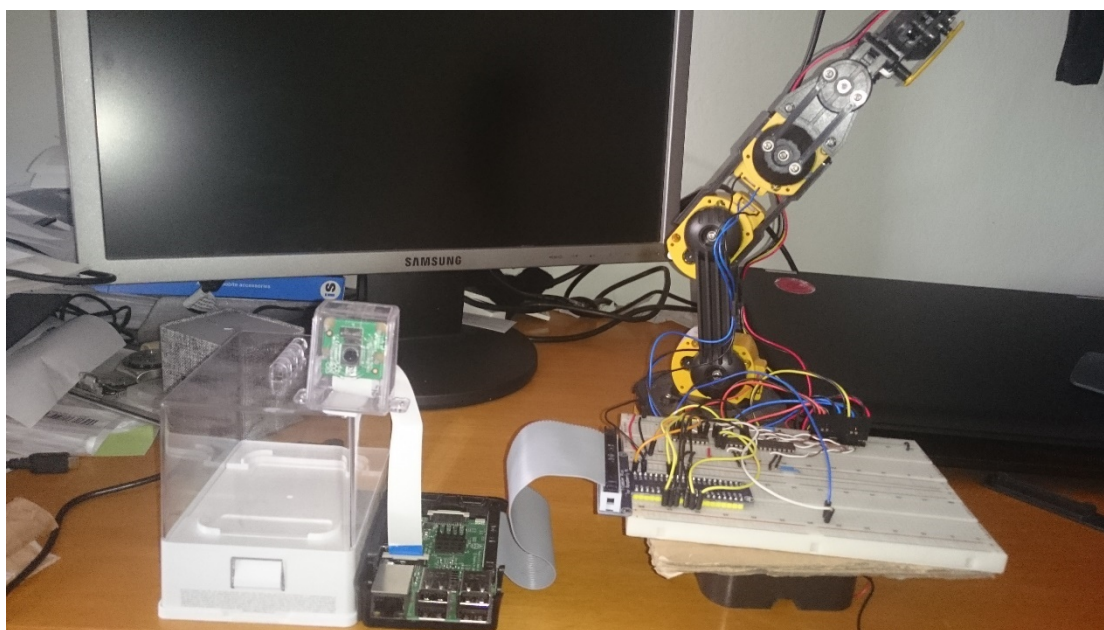
Εκτός από τις συνδέσεις για τους τρεις κινητήρες, παρατηρούμε ότι υπάρχει και ένα ακόμη καλώδιο, το τελευταίο στη σειρά, που συνδέει τη γείωση του Raspberry Pi 3 με τη γείωση του breadboard, δηλαδή έχουν κοινή γείωση. Αυτό είναι απαραίτητο για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες



Εικόνα 28 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του Raspberry με L293D

Αφού συνδυάσουμε όλα τα παραπάνω τότε έχουμε το τελικό μας κύκλωμα μαζί με το Raspberry όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 29 Τελικό κύκλωμα

#### 4.4 Εγκατάσταση Λειτουργικού Noobs

Η εγκατάσταση λειτουργικού στο Raspberry είναι πολύ απλή διαδικασία. Μεταφορτώνουμε τα αρχεία του Noobs από το διαδικτυακό τόπο <https://www.raspberrypi.org/downloads/noobs/>.

Το NOOBS, από τα αρχικά της φράσης New Out Of Box Software - "καινούριο software, του κουτιού", σε ελεύθερη μετάφραση - είναι ένα σύστημα που διευκολύνει σημαντικά την αρχική εγκατάσταση Raspberry Pi για τους αρχάριους. Το πρώτο που χρειάζεται είναι να κάνουμε είναι να συνδέσουμε την κάρτα Micro SD με τον ανάπτορα στον υπολογιστή μας, και να τη διαμορφώσουμε κατάλληλα. Το ίδιο το NOOBS συνιστά να χρησιμοποιήσουμε την επίσημη εφαρμογή για Format σε SD, την οποία θα βρούμε στη διεύθυνση:

[https://www.sdcard.org/downloads/formatter\\_4/eula\\_windows/](https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/eula_windows/)

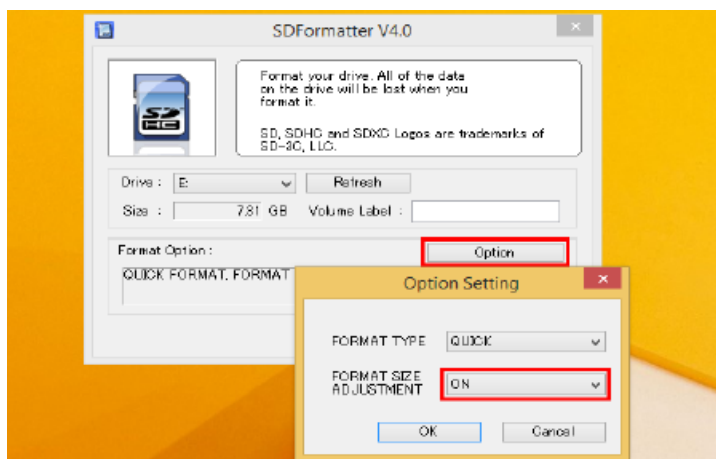


Εικόνα 30 Κατέβασμα SD Formatter

Κατεβάζουμε την εφαρμογή κάνοντας κλικ στο Accept στο κάτω μέρος της σελίδας. Αποσυμπιέζουμε το αρχείο .zip, το εγκαθιστούμε και τρέχουμε την εφαρμογή - η εγκατάσταση δεν έχει καμία δυσκολία - και επιλέγουμε το "Option", στο οποίο αλλάζουμε το Format Size Adjustment σε "ON".

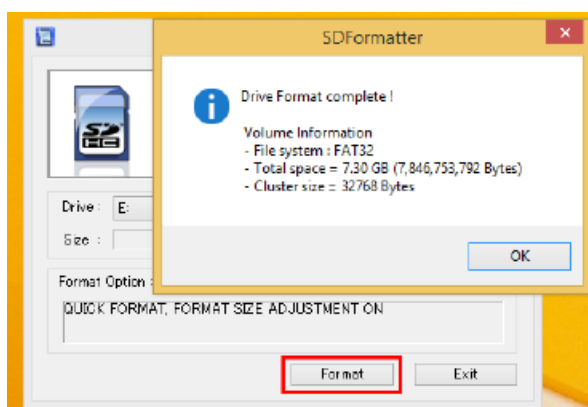
Παρακάτω βλέπουμε και τις εικόνες με τις ρυθμίσεις που αλλάζουμε στο SD Formatter.

## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραφίες



Εικόνα 31 Ρυθμίσεις SD Formatter

Κάνουμε κλικ στο Format, και σε λίγα δευτερόλεπτα έχει ολοκληρωθεί.

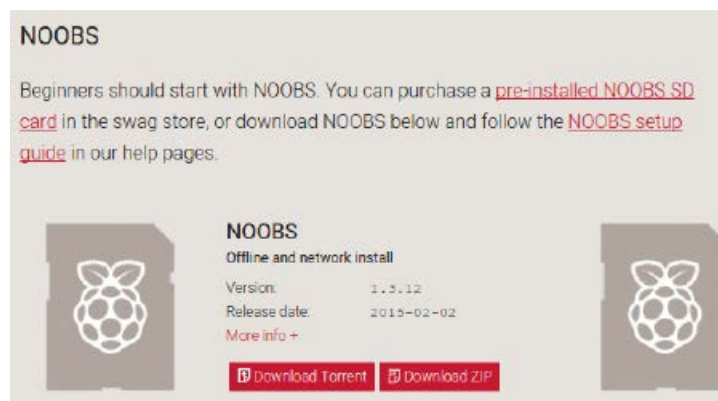


Εικόνα 32 Ολοκλήρωση SD Formatter

Με την κάρτα SD μας διαμορφωμένη, μπαίνουμε στη διεύθυνση <http://www.raspberrypi.org/downloads/> και κατεβάζουμε την τελευταία έκδοση του NOOBS, είτε σε .zip είτε μέσω Torrent. Έχει μέγεθος λίγο παραπάνω από 730MB. Γενικά το κατέβασμα με Torrent είναι σημαντικά πιο γρήγορο από το κατέβασμα μέσω της ιστοσελίδας.

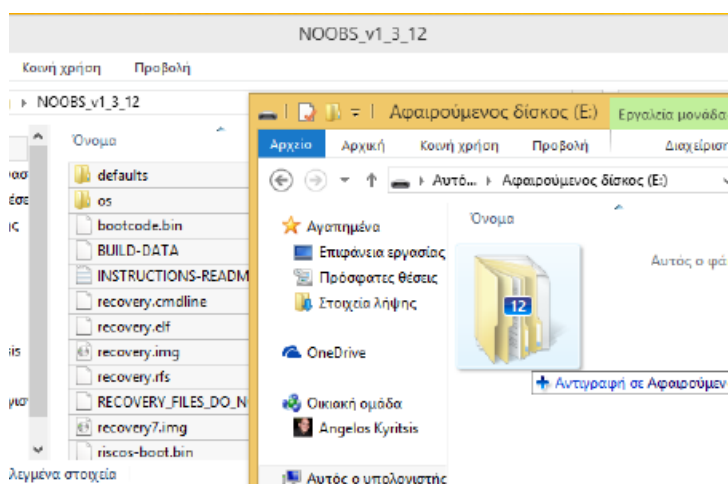


## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραφίες



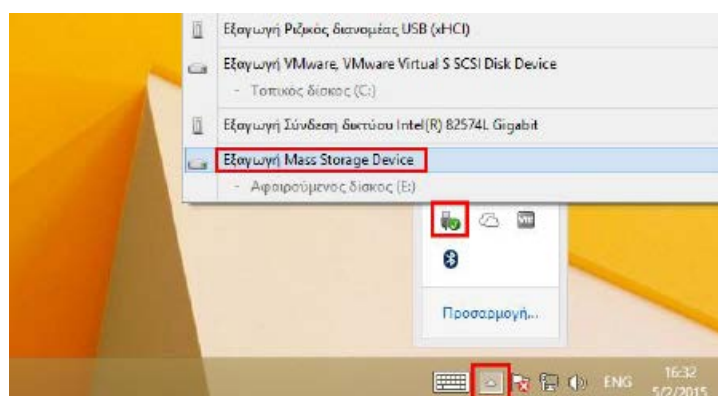
Εικόνα 33 Noobs Official Page

Αφού κατεβάσουμε το συμπιεσμένο φάκελο .zip, κάνουμε αποσυμπίεση σε όλα τα περιεχόμενά του. Ανοίγουμε το φάκελο στον οποίο έγιναν αποσυμπίεση, και τα αντιγράφουμε στην κάρτα SD, όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 34 Αντιγραφή αρχείων στην SD card

Αφού ολοκληρωθεί η αντιγραφή, κάνουμε εξαγωγή της κάρτας SD



Εικόνα 35 Εξαγωγή SD card

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

#### 4.5 Εγκατάσταση Raspberry Pi

Κρατάμε το Raspberry Pi και το γυρίζουμε ανάποδα για να τοποθετήσουμε την Micro SD. Υπάρχει ένας μόνο τρόπος για να μπει, και μπαίνοντας θα "κλειδώσει".



Εικόνα 36 Είσοδος SD στο Raspberry Pi

Για να αφαιρέσουμε την SD, την ξαναπατάμε προς τα μέσα, για να ξεκλειδώσει. Αν μαζί με το Raspberry Pi αγοράσαμε και θήκη, καλό είναι να το τοποθετήσουμε πριν βάλουμε την κάρτα, γιατί έστω και το λίγο που προεξέχει μπορεί να μας δυσκολέψει.



Εικόνα 37 Θήκη Raspberry Pi

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Στη συγκεκριμένη θήκη πρώτα χρειάστηκε να βάλουμε υπό γωνία το Raspberry Pi ώστε να μπει στις επάνω υποδοχές, και στη συνέχεια το κατεβάσαμε για να μπουν τα αντίστοιχα στελέχη στις κατάλληλες οπές. Με το Raspberry Pi στη θήκη του, βάζουμε την Micro SD από το σχετικό άνοιγμα.

Για τα άλλα καλώδια, το μόνο σημαντικό είναι να βάλουμε την τροφοδοσία τελευταία. Βλέπετε, το Raspberry Pi δεν έχει διακόπτη On/Off. Μόλις το βάλουμε στην πρίζα, θα ξεκινήσει κατευθείαν.

Αν έχουμε συνδέσει το Raspberry Pi στην τηλεόραση, επιλέγουμε σαν είσοδο το HDMI, και συνδέουμε το Raspberry Pi στην πρίζα.

#### 4.6 Πρώτη εκκίνηση του Raspberry Pi

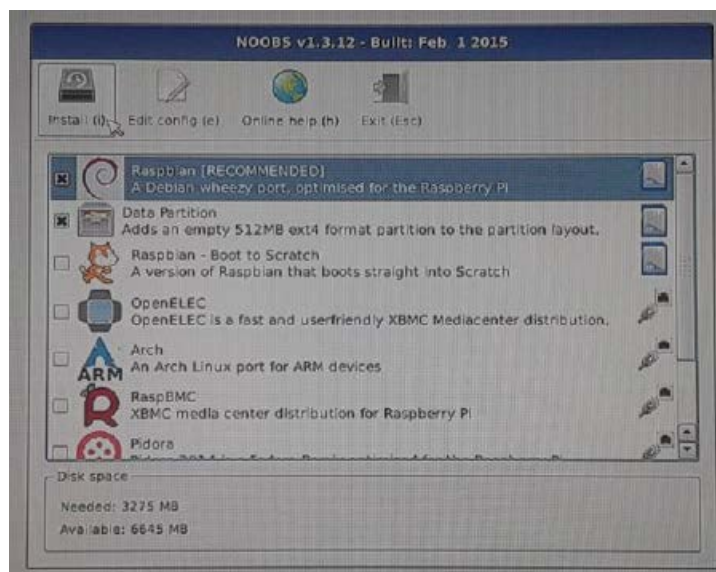
Ξεκινώντας, θα μας δείξει μια οθόνη με διάφορα χρώματα, γνωστή και σαν rainbow screen.



*Εικόνα 38 Εκκίνηση Raspberry Pi*

(Οι φωτογραφίες σε αυτό το σημείο δεν έχουν και την καλύτερη ποιότητα, καθώς φωτογράφιζα την οθόνη). Σύντομα θα φορτώσει το NOOBS, το οποίο θα μας εμφανίσει μια λίστα με τα λειτουργικά συστήματα.

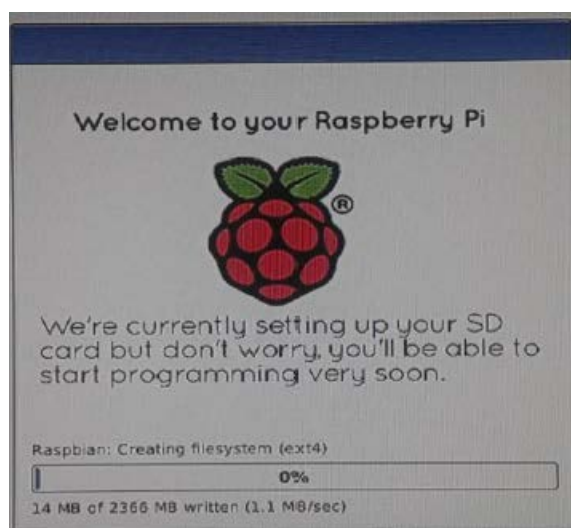
## Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες



Εικόνα 39 Λειτουργικά Εγκατάστασης

Στο παράδειγμα θα εγκαταστήσουμε το Raspbian, μια παραλλαγή του Debian για το Raspberry Pi, η οποία μπορεί να εγκατασταθεί και χωρίς σύνδεση στο Internet. Οι περισσότερες από τις υπόλοιπες επιλογές (OpenELEC, Arch, RaspBMC κλπ) χρειάζονται σύνδεση. Έχοντας τσεκάρει το Raspbian και κάνοντας κλικ στο Install, το σύστημα μας προειδοποιεί πως θα διαγραφεί όλο το περιεχόμενο της SD.

Επιλέγοντας "Yes", ξεκινάει η εγκατάσταση. Ανάλογα με την ταχύτητα της κάρτας SD που έχουμε βάλει, θα πάρει αρκετή ώρα. Η συγκεκριμένη SD, που ήταν Class 4, έγραφε με τον ρυθμό των 1,1MB ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 40 Εκκίνηση Εγκατάστασης

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Εφόσον όλα πάνε καλά, το σύστημα θα μας εμφανίσει το μήνυμα πως το λειτουργικό σύστημα (ή τα λειτουργικά συστήματα, αν επιλέξαμε πολλαπλά) εγκαταστάθηκαν επιτυχώς



Εικόνα 41 Επιτυχής Εγκατάσταση

Κάνοντας κλικ στο OK, το Raspberry Pi θα κάνει επανεκκίνηση.

#### 4.7 Εγκατάσταση OpenCV

Για την εγκατάσταση του πλαισίου εφαρμογής OpenCV είναι απαραίτητη η εκτέλεση των παρακάτω εντολών στο τερματικό(terminal) του raspberry pi.

```
$ sudo apt-get update  
$ sudo apt-get upgrade  
$ sudo rpi-update
```

Εγκατάσταση των εργαλείων προγραμματιστή

```
$ sudo apt-get install build-essential cmake pkg-config
```

Εγκατάσταση των απαραίτητων πακέτων εισόδου/εξόδου (image libraries).

```
$ sudo apt-get install libjpeg8-dev libtiff4-dev libjasper-dev libpng12-dev
```

Εγκατάσταση της βιβλιοθήκης GTK.

```
$ sudo apt-get install libgtk2.0-dev
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

Εγκατάσταση των απαραίτητων πακέτων εισόδου/εξόδου (video libraries).

```
$ sudo apt-get install libavcodec-dev libavformat-dev libswscale-dev libv4l-dev
```

Εγκατάσταση των απαραίτητων πακέτων οι οποίες είναι απαραίτητες για την βελτιστοποίηση της βιβλιοθήκης `opencv`.

```
$ sudo apt-get install libatlas-base-dev gfortran
```

Εγκατάσταση του `pip`.

```
$ wget https://bootstrap.pypa.io/get-pip.py
```

```
$ sudo python get-pip.py
```

Εγκατάσταση του εικονικού περιβάλλοντος `virtualenv` και `virtualenvwrapper` :

```
$ sudo pip install virtualenv virtualenvwrapper $ sudo rm -rf ~/.cache/pip  
$ source ~/.profile  
$ mkvirtualenv cv
```

Εγκατάσταση των εργαλείων προγραμματισμού της `python 2.7`.

```
$ sudo apt-get install python2.7-dev
```

Εγκατάσταση της βιβλιοθήκης `Numpy`. Το `opencv` χρησιμοποιεί πίνακες `numpy` για να την αναπαράσταση εικόνων.

```
$ pip install numpy
```

Μεταφόρτωση του κώδικα της βιβλιοθήκης του `opencv`, την μεταγλώττιση του και τη δημιουργία εκτελέσιμου.

```
$ wget -O opencv-2.4.10.zip  
http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-unix/2.4.10/opencv-2.4.10.zip/download
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

```
$ unzip opencv-2.4.10.zip
```

```
$ cd opencv-2.4.10
```

```
$ mkdir build
```

```
$ cd build
```

```
$ cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=RELEASE -D  
CMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local -D  
BUILD_NEW_PYTHON_SUPPORT=ON -D INSTALL_C_EXAMPLES=ON  
-D INSTALL_PYTHON_EXAMPLES=ON -D  
BUILD_EXAMPLES=ON ..
```

```
$ make
```

```
$ cd ~/.virtualenvs/cv/lib/python2.7/site-packages/
```

```
$ ln -s /usr/local/lib/python2.7/site-packages/cv2.so cv2.so
```

```
$ ln -s /usr/local/lib/python2.7/site-packages/cv.py cv.py
```

Έλεγχος ότι η βιβλιοθήκη opencv έχει εγκατασταθεί.

```
$ workon cv
```

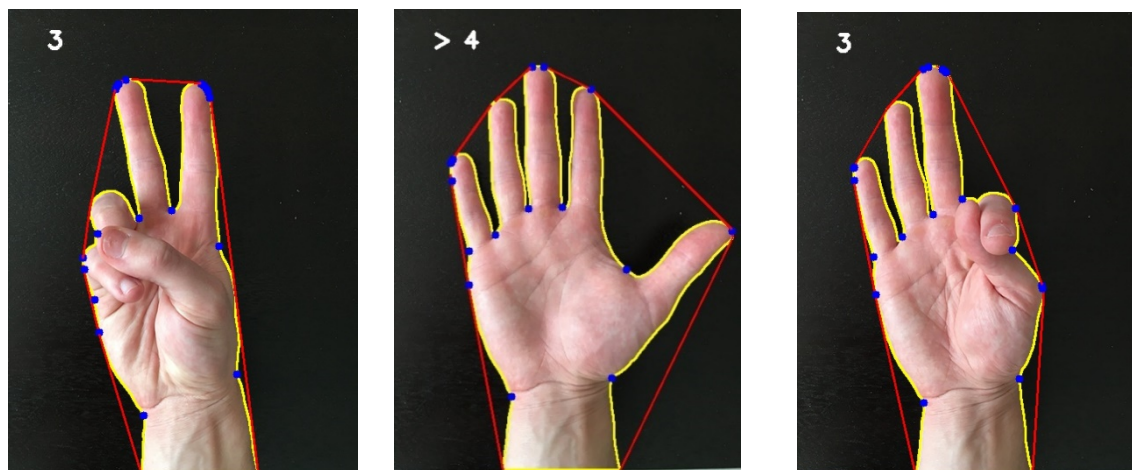
```
$ python
```

```
>>> import cv2
```

```
>>> cv2.__version__ '2.4.10'
```

#### 4.8 Αλγόριθμος ανίχνευσης δακτύλων

Ο αλγόριθμος για την ανίχνευση των δακτύλων προϋποθέτει την εγκατάσταση της βιβλιοθήκης OpenCV καθώς και των απαραίτητων εργαλείων της rython. Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε πως προσδιορίζει ο αλγόριθμος το χέρι μας.



Εικόνα 42 Προσδιορισμός του χεριού από τον αλγόριθμο

Για να επιτύχουμε την καλύτερη δυνατή αντίθεση που θα οδηγήσει με την σειρά της στην καλύτερη ανίχνευση θα πρέπει να υπάρχει αντίθεση με το φόντο. Α χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι τα εξής:

- Λαμβάνεται μια εικόνα.
- Το μέγεθός της περιορίζεται σε πλάτος 300 pixels.
- Μετατρέπεται από RGB σε HSV για καλύτερη επεξεργασία.
- Μετατρέπεται σε δυαδική (άσπρο-μαύρο).
- Απομακρύνεται ο θόρυβος με μορφολογικό τρόπο (erode-dilate).
- Θολώνουμε την εικόνα (blurring) για να υπάρχει ομοιόμορφη φωτεινότητα.
- Προσδιορίζεται αρχικά το μεγαλύτερο περίγραμμα (κίτρινη γραμμή).
- Προσδιορίζονται τα ακραία σημεία του περιγράμματος (convex hull) τα οποία ενώνονται με κόκκινη γραμμή και τα ελάχιστα σημεία (convexity defects).
- Με γεωμετρία υπολογίζεται η γωνία των ελάχιστων σημείων από τα δύο ακραία σημεία που τα περικλείουν.
- Εάν η γωνία είναι  $< 90$  μοίρες, σημαίνει ότι υπάρχουν δύο δάχτυλα όρθια και ο μετρητής αυξάνεται κατά 1.



#### 4.9 Έλεγχος λειτουργίας του συστήματος – Συμπεράσματα

Το τελικό αποτέλεσμα της εργασίας είναι άκρως ικανοποιητικό και κάλυψε απόλυτα τις αρχικές προσδοκίες και τους στόχους που είχαν τεθεί. Ο ρομποτικός βραχίονας παρότι είναι οικονομικός, είναι αρκετά ποιοτικός, λειτουργεί απροβλημάτιστα και με αρκετή ταχύτητα και ακρίβεια. Η εφαρμογή για την αναγνώριση των δακτύλων του χεριού είναι, γρήγορη, δεν παρουσιάζει κολλήματα κατά τη χρήση, δεν κρασάρει αλλά είναι πολύ ευαίσθητη και ανιχνεύει την παραμικρή αλλαγή με αποτέλεσμα να μην έχει μεγάλο ποσοστό ακρίβειας. Το Raspberry Pi δυστυχώς δεν έχει την δυνατότητα φορητότητας λόγω του ότι πρέπει να είναι μονίμως συνδεδεμένο με το ρεύμα με ένα μετασχηματιστή. Οι δυνατότητες που έχει όμως το κάνουν ασυναγώνιστο. Η ανταπόκριση στην αλλαγή των κινήσεων είναι εντυπωσιακά άμεση. Λόγω της ισχυρής επεξεργαστικής δύναμης και της μεγάλης μνήμης (RAM) έχουμε την δυνατότητα πολύωρης και σε υψηλή ανάλυση βίντεο χωρίς την παραμικρή διακοπή. Συνολικά ο χειρισμός του ρομποτικού βραχίονα με την κάμερα και το Raspberry είναι εύκολη, ευχάριστη και διασκεδαστική. Κατά την χρήση του χρειάζεται λίγη προσοχή μιας και όταν ανιχνεύσει κίνηση αρχίζει η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα, όμως είναι εύκολη και διασκεδαστική.

Δυσκολίες αντιμετωπίστηκαν πολλές κατά την υλοποίηση της εργασίας, και κατά τη διάρκεια της κατασκευής, και κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού, ξεπεράστηκαν όμως μετά από μεγάλη βοήθεια από τον επιβλέπον καθηγητή μου κ. Έλληνα, με πολύ αναζήτηση στο διαδίκτυο και χρόνο. Το σημείο που ήταν το δυσκολότερο, ήταν στον προγραμματισμό της εφαρμογής του Raspberry λόγω του ότι δεν είχα γνώση, ούτε για τις λειτουργίες του Raspberry αλλά ούτε και για την δημιουργία του προγράμματος μιας και δεν είχα ασχοληθεί στο παρελθόν με την γλώσσα προγραμματισμού Python.

Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση και τη συγγραφή ήταν πολύ μεγαλύτερος από αυτόν που αρχικά είχε υπολογιστεί, πράγμα που οφείλεται στην ποικιλία των υλικών και την διαφορετικότητα των σχετιζόμενων πεδίων καθώς και στην παντελή έλλειψη χρόνου λόγω των καθημερινών υποχρεώσεων. Παρ' όλα αυτά, ήταν μία πολύ ενδιαφέρουσα και δημιουργική εμπειρία. Προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης / τροποποίησης της παρούσας εργασίας θα ήταν να γίνουν νέες υλοποιήσεις, όπως να γίνεται ο έλεγχος της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα με άλλο τρόπο, είτε με την αναγνώριση των κινήσεων των δακτύλων να δινόταν η δυνατότητα κίνησης σε άλλη συσκευή, είτε τέλος αντί για ανίχνευση των δακτύλων του χεριού να γινόταν ανίχνευση προσώπου είτε χώρου.

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α`

Στο παράρτημα Α` παρατίθεται ο κώδικας του Raspberry για την ανίχνευση του αριθμού δαχτύλων και την εντολή κίνησης του βραχίονα .

```
# gesture recognition in real time
# use of TrafficHat

import math
import numpy as np
import time
import cv2
import RPi.GPIO as GPIO
from picamera.array import PiRGBArray
from picamera import PiCamera

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

Motor1A = 16
Motor1B = 18
Motor1E = 22

Motor2A = 19
Motor2B = 21
Motor2E = 23

Motor3A = 11
Motor3B = 13
Motor3E = 15

GPIO.setup(Motor1A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor1B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor1E,GPIO.OUT)

GPIO.setup(Motor2A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2E,GPIO.OUT)

GPIO.setup(Motor3A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3E,GPIO.OUT)

GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

cam=PiCamera()
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

```
cam.resolution=(640,480)
cam.framerate=32
rawCapture=PiRGBArray(cam,size=(640,480))

time.sleep(1)

while True:
    cam.capture(rawCapture, format="bgr", use_video_port=True)
    frame=rawCapture.array
    rawCapture.truncate(0)

    # get a ROI in the middle of the captured frame
    cv2.rectangle(frame,(470,390),(170,90),(0,255,0),0)
    # process ROI
    roi=frame[90:390,170:470]
    # convert frame to gray scale, blur it
    grey = cv2.cvtColor(roi, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    blurred = cv2.GaussianBlur(grey, (35, 35), 0)
    # threshold and perform erosion & dilation to remove noise
    thresh = cv2.threshold(blurred, 127, 255,
    cv2.THRESH_BINARY_INV)[1]
    thresh = cv2.erode(thresh, (9,9), iterations=1)
    thresh = cv2.dilate(thresh, (9,9), iterations=1)

    # get the largest contour
    cnts = cv2.findContours(thresh.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    # for opencv3
    cnts = cnts[1]
    cnt = max(cnts, key=cv2.contourArea)

    # draw outermost contour
    cv2.drawContours(roi, [cnt], -1, (0, 255, 255), 2)
    hull=cv2.convexHull(cnt, returnPoints=False)
    defects=cv2.convexityDefects(cnt,hull)
    counter=0
    for i in range(defects.shape[0]):
        s, e, f, d = defects[i, 0]
        start = tuple(cnt[s][0])
        end = tuple(cnt[e][0])
        far = tuple(cnt[f][0])
        a=math.sqrt((end[0]-start[0])**2+(end[1]-start[1])**2)
        b=math.sqrt((far[0]-start[0])**2+(far[1]-start[1])**2)
        c=math.sqrt((end[0]-far[0])**2+(end[1]-far[1])**2)
        angle=math.acos((b**2+c**2-a**2)/(2*b*c))*57
        if angle < 90:
            counter += 1
    # show the output image
    cv2.line(roi, start, end, [0,0,255], 2)
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

```
cv2.circle(roi, far, 5, [255, 0, 0], -1)

if counter < 2:
    cv2.putText(frame, "<2", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

elif counter == 2 :
    cv2.putText(frame, "=2", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor2A,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2B,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3A,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3B,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.HIGH)

elif counter == 4:
    cv2.putText(frame, "=4", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor2A,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor2B,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3A,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor3B,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.HIGH)

else:
    cv2.putText(frame," ", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1,
(255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

cv2.imshow("THRESHOLD", thresh)
cv2.imshow("FRAME", frame)

key=cv2.waitKey(1) & 0xFF
if key==ord("q"):
    break

GPIO.cleanup()
cv2.destroyAllWindows()
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β`

Στο παράρτημα Β` παρατίθεται ο κώδικας του Raspberry για την ανίχνευση του αριθμού δαχτύλων, έχοντας υπόψιν το χρώμα του δέρματος για μεγαλύτερη ακρίβεια, και την εντολή κίνησης του βραχίονα .

```
# gesture recognition in real time
# skin detection for the hand mask

import math
import numpy as np
import time
import cv2
import RPi.GPIO as GPIO
import imutils
from picamera.array import PiRGBArray
from picamera import PiCamera

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

Motor1A = 16
Motor1B = 18
Motor1E = 22

Motor2A = 19
Motor2B = 21
Motor2E = 23

Motor3A = 11
Motor3B = 13
Motor3E = 15

GPIO.setup(Motor1A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor1B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor1E,GPIO.OUT)

GPIO.setup(Motor2A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor2E,GPIO.OUT)

GPIO.setup(Motor3A,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3B,GPIO.OUT)
GPIO.setup(Motor3E,GPIO.OUT)

GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

cam=PiCamera()
```

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

```
cam.resolution=(640,480)
cam.framerate=32
rawCapture=PiRGBArray(cam,size=(640,480))

time.sleep(1)

lower=np.array([0, 48, 80], dtype="uint8")
upper=np.array([20, 255, 255], dtype="uint8")

while True:
    cam.capture(rawCapture, format="bgr", use_video_port=True)
    frame=rawCapture.array
    rawCapture.truncate(0)

    roi=imutils.resize(frame,width=300)
    # convert frame to HSV and get the binary mask
    hsv = cv2.cvtColor(roi, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    mask = cv2.inRange(hsv, lower, upper)
    # remove noise
    mask = cv2.erode(mask, (9,9), iterations=2)
    mask = cv2.dilate(mask, (9,9), iterations=2)
    # mask blurring
    mask = cv2.GaussianBlur(mask, (3, 3), 0)
    # show the skin in frame
    skin=cv2.bitwise_and(roi,roi,mask=mask)
    # get the largest contour
    cnts = cv2.findContours(mask.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    # for opencv3
    cnts = cnts[1]
    cnt = max(cnts, key=cv2.contourArea)

    # draw outermost contour
    cv2.drawContours(roi, [cnt], -1, (0, 255, 255), 2)
    hull=cv2.convexHull(cnt, returnPoints=False)
    defects=cv2.convexityDefects(cnt,hull)
    counter=0
    for i in range(defects.shape[0]):
        s, e, f, d = defects[i, 0]
        start = tuple(cnt[s][0])
        end = tuple(cnt[e][0])
        far = tuple(cnt[f][0])
        a=math.sqrt((end[0]-start[0])**2+(end[1]-start[1])**2)
        b=math.sqrt((far[0]-start[0])**2+(far[1]-start[1])**2)
        c=math.sqrt((end[0]-far[0])**2+(end[1]-far[1])**2)
        angle=math.acos((b**2+c**2-a**2)/(2*b*c))*57
        if angle < 90:
            counter += 1
    # show the output image
    cv2.line(roi, start, end, [0,0,255], 2)
```



Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες

```
cv2.circle(roi, far, 5, [255, 0, 0], -1)

if counter < 2:
    cv2.putText(frame, "<2", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

elif counter == 2 :
    cv2.putText(frame, "=2", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor2A,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2B,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3A,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3B,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.HIGH)

elif counter == 4:
    cv2.putText(frame, "=4", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
1, (255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor2A,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor2B,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3A,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor3B,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.HIGH)

else:
    cv2.putText(frame," ", (50,50), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1,
(255,255,255),3)
    GPIO.output(Motor3E,GPIO.LOW)
    GPIO.output(Motor2E,GPIO.LOW)

cv2.imshow("ROI & SKIN", np.hstack([roi,skin]))
cv2.imshow("FRAME", frame)

key=cv2.waitKey(1) & 0xFF
if key==ord("q"):
    break

GPIO.cleanup()
cv2.destroyAllWindows()
```

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Wikipedia – The Free Encyclopedia, <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CE%BF%CE%BC%CF%80%CF%8C%CF%84>

[2] Wikipedia – The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Robot#Robots\\_in\\_popular\\_culture](https://en.wikipedia.org/wiki/Robot#Robots_in_popular_culture)

[3] <https://www.python.org/>

[4] <https://www.raspberrypi.org/>

[5] <http://www.pyimagesearch.com>

- Αναφορά σε άρθρο

[6] SCOTT, P.B, The Robotics Revolution, Basil Blackwell, 1984.

- Βιβλία

[7] Ε.ΚΑΝΑΡΑΧΟΣ Ανδρέας-Καθηγητής Ε.Μ.Π, Μηχανισμοί και Ρομποτικά Συστήματα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1996

[8] JOHN GRAIN, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, Μηχανική και Αυτόματος έλεγχος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2008

[9] ΔΟΥΛΓΕΡΗ Ζωή, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, κινηματική δυναμική και έλεγχος αρθρωτών βραχιόνων, Εκδόσεις Κριτική, 2007

- Αναφορά σε άλλη εργασία (Διπλωματική - Πτυχιακή, Ερευνητική)

[10] [nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1650/1/Diplwmatiki\\_Ergasia.pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1650/1/Diplwmatiki_Ergasia.pdf)

[11] [www.intelligence.tuc.gr/lib/downloadfile.php?id=303](http://www.intelligence.tuc.gr/lib/downloadfile.php?id=303)

[12] «Κατασκευή και Πλοήγηση Ρομπότ Ακουστικών Μετρήσεων», Δημοσθένης Ρωσσίδης, Γεώργιος Καμπουράκης, Σεπτέμβριος 2012

Κίνηση ρομποτικού βραχίονα με χειραψίες