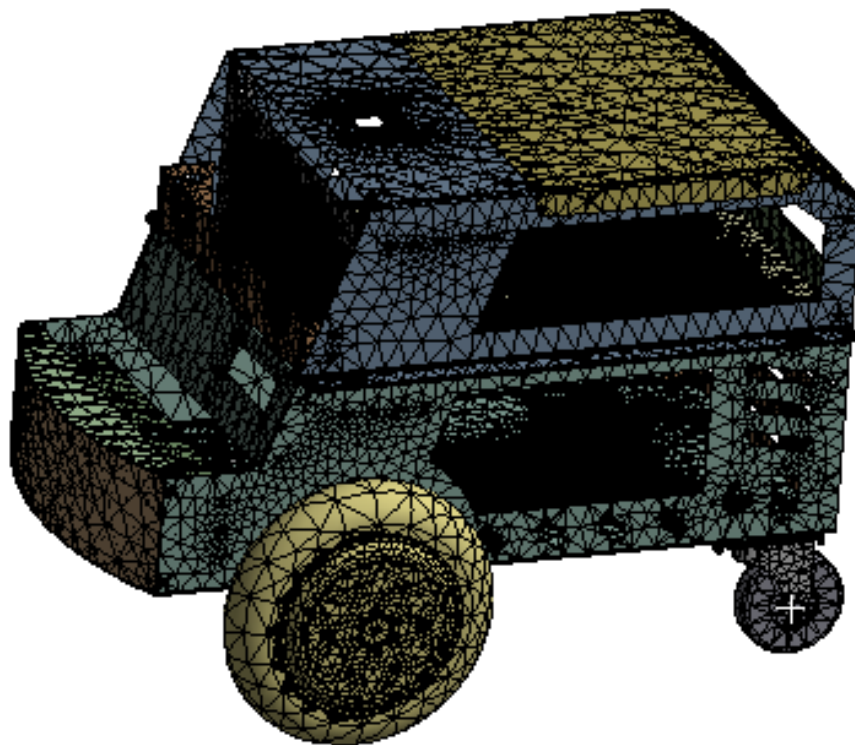


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μηχανολογικός σχεδιασμός και κατασκευή ρομποτικού οχήματος



Φοιτητής: Εβελζαμάν Ιωάννης (Α.Μ.9)

Επιβλέπων καθηγητής: Καλόμοιρος Ιωάννης

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε από τον

Ιωάννη Εβελζαμάν

την/4/2019

και εξετάστηκε από την εξής επιτροπή:

Ιωάννης Καλόμοιρος , Αναπλ. Καθηγητής

Σταύρος Βολογιαννίδης, Επίκ. Καθηγητής

Θεόδωρος Παχίδης, Αναπλ. Καθηγητής

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΦΟΙΤΗΤΗ:

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής, έχοντας επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από βιβλία, άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο επακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής:

Εβελζαμάν Ιωάννης

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και κατασκευή αυτόνομου ρομποτικού οχήματος διαφορετικής οδήγησης.

Αρχικά γίνεται παρουσίαση των τελευταίων εξελίξεων στο χώρο των αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων. Από τους πολλούς διαφορετικούς κατασκευαστικούς σχεδιασμούς που υπάρχουν, παρουσιάζονται τα αυτόνομα τροχήλατα ρομποτικά οχήματα εσωτερικού χώρου (autonomous indoor vehicles, AIV), με σκοπό να συλλέξουμε πληροφορίες για το σχεδιασμό τους και την εργασία που επιτελούν. Στην συνέχεια ορίσαμε τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το ρομποτικό όχημα που θα κατασκευάσουμε και με βάση τις οποίες αξιολογούμε τον σχεδιασμό μας καθώς αναπτύσσεται.

Ακολουθεί η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού οχήματος κατά την οποία περιγράφεται το ρομπότ διαφορετικής οδήγησης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Προσδιορίζεται ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, καταγράφονται οι κινηματικές εξισώσεις και επιλύονται τα κινηματικά προβλήματα(ευθύ – αντίστροφο).

Ο έλεγχος αντοχής του οχήματος πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου Ansys. Στο πρώτο μέρος υπολογίστηκε το βάρος της κατασκευής μας όταν χρησιμοποιούμε είτε α)ανοξείδωτο χάλυβα είτε β)αλουμίνιο. Στην συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη την προδιαγραφή για ικανότητα φόρτισης 50Kg ωφέλιμου φορτίου έγινε ο έλεγχος αντοχής του ρομπότ και για τα δύο υλικά με συγκριτικά αποτελέσματα των δύο υλικών.

Η σχεδίαση όλων των εξαρτημάτων έγινε με την βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου Solid Works και ακολούθησαν κατεργασίες κοπής laser και κάμψης για τα ελάσματα ανοξείδωτου χάλυβα. Η βάση του τροχού κατασκευάστηκε από αλουμίνιο σε ψηφιακό κέντρο κατεργασίας CNC και ακολούθησε η συναρμολόγηση του ρομποτικού οχήματος.

Συμπερασματικά φαίνεται ότι το ρομποτικό όχημα πληροί όλες τις προδιαγραφές που τέθηκαν αρχικά και ιδιαίτερα τη στιβαρότητα και το χαμηλό κόστος κατασκευής.

Abstract

Mechanical design and construction of a robot vehicles

The aim of this diploma thesis is the design and construction of an autonomous robotic differential drive vehicle.

Initially, the latest developments in the field of autonomous robotic vehicles are presented. Of the many different manufacturing designs that are available, ten autonomous indoor vehicles (AIV) are presented in order to collect information about their design and the work they perform. Then we set technical specifications that the robotic vehicle should satisfy. We evaluate our final design against these specifications.

Then, the kinetic analysis of the robotic vehicle with its geometrical characteristics is described. The number of degrees of freedom is determined, kinematic equations are recorded and kinematic problems (straight - reverse) are solved.

Vehicle endurance testing was carried out with the help of the Ansys package software. The first part calculated the weight of our construction when we use either (a) stainless steel or (b) aluminum. Subsequently, taking into account the specification for a load capacity of 50Kg of payload, the robot endurance test for both materials was compared.

All components were designed with the help of the SolidWorks design package, followed by laser and bending cuts for stainless steel plates. The wheel base was made of aluminum in a digital CNC machining center followed by the assembly of the robotic vehicle.

In conclusion, it appears that the robotic vehicle meets all the specifications originally laid out, and in particular the robustness and low manufacturing cost.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract.....	5
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος εικόνων.....	8
1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Παρουσίαση του προβλήματος	10
1.2 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας.....	11
2 Παρουσίαση της κατάστασης της τέχνης.....	12
2.1 Ρομπότ μεταφοράς προϊόντων.....	12
2.2 Ρομπότ υπηρεσιών	18
3 Μεθοδολογία σχεδιασμού ρομποτικού οχήματος.....	25
3.1 Ανάλυση φορτίων και επιλογή διαστάσεων	25
3.2 Επιλογή υλικών κατασκευής	26
3.3 Κατεργασία εξαρτημάτων του ρομπότ.....	26
4 Τεχνικές προδιαγραφές	29
4.1 Καταγραφή τεχνικών προδιαγραφών	29
4.2 Αναλυτική περιγραφή τεχνικών προδιαγραφών.....	29
4.2.1 Αυτόνομη πλοήγηση σε άγνωστο περιβάλλον	29
4.2.2 Καθοδήγηση με την βοήθεια διαφορικής οδήγησης.....	30
4.2.3 Διαστάσεις αμαξώματος.....	30
4.2.4 Παροχή ενέργειας από μπαταρία για 5 ώρες τουλάχιστον ..	30
4.2.5 Απλός σχεδιασμός	31
4.2.6 Ικανότητα μεταφοράς 50Kg	31
4.2.7 Επιλογή τυποποιημένων υλικών και εξαρτημάτων.....	31
4.2.8 Πρόβλεψη για δυνατότητα αναβάθμισης	32
5 Κινηματική ανάλυση του ρομπότ που σχεδιάστηκε	33
5.1 Όχημα διαφορικής οδήγησης.....	33
5.2 Γεωμετρικά δεδομένα	33
5.3 Κινηματικά μοντέλα και περιορισμοί.....	35
5.4 Εξισώσεις διαφορικής οδήγησης.....	36
5.5 Ευθύ κινηματικό μοντέλο	38
5.6 Αντίστροφο κινηματικό μοντέλο.....	42
5.7 Κινηματικοί περιορισμοί	44
5.8 Εφαρμογή στη γεωμετρία του ρομπότ που σχεδιάστηκε	45

6 Έλεγχος αντοχής του ρομποτικού οχήματος.....	47
6.1 Υπολογισμός μάζας	47
6.2 Προσδιορισμός τάσεων - παραμορφώσεων του ρομπότ	51
7 Μέθοδοι κατεργασίας και κατασκευή εξαρτημάτων του ρομπότ.....	57
7.1 Μέθοδοι κατεργασίας ανοξειδωτής λαμαρίνας.....	57
7.2 Κατεργασίες με παραμόρφωση.....	68
7.3 Προσομοίωση κατεργασίας βάσης κινητήριων τροχών	70
7.4 Κατεργασία βάσης συγκράτησης κινητήριων τροχών.....	72
8 Συναρμολόγηση του ρομπότ	74
9 Αποτελέσματα	77
10 Συμπεράσματα	83
11 Βιβλιογραφία	84
12 Παράρτημα 1.....	85
12.1 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά #TruLaser 3530	85
12.2 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά DECKEL-MAHO 600 C	87
13 Παράρτημα 2.....	88
13.1 Πρόγραμμα καθοδήγησης εργαλειομηχανής CNC (G Κώδικας) ...	88

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Ρομπότ AVGS	13
Εικόνα 2 Ρομπότ RB-2 BASE	14
Εικόνα 3 Ρομπότ RB-SHERPA	15
Εικόνα 4 Ρομπότ RB-1 BASE	16
Εικόνα 5 Ρομπότ Magni	17
Εικόνα 6 Ρομπότ SUMMIT-XL HL.....	20
Εικόνα 7 Ρομπότ SUMMIT-XL STEEL	21
Εικόνα 8 Ρομπότ Πωλητής.....	22
Εικόνα 9 Ρομπότ Σερβιτόρος	23
Εικόνα 10 Ρομπότ φύλακας	24
Εικόνα 11 Βασικές εξωτερικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος	34
Εικόνα 12 Τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν στο ρομποτικό όχημα	34
Εικόνα 13 Βαθμοί ελευθερίας ρομπότ	35
Εικόνα 14 Θέση ρομπότ στο αδρανειακό (I) και στο τοπικό (R) σύστημα αναφοράς	36
Εικόνα 15 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Οχήματος Διαφορικής Οδήγησης.....	38
Εικόνα 16 Θέση κινητήριων τροχών.....	44
Εικόνα 17 Σύγκριση μάζας σασί από Ανοξείδωτο - Αλουμίνιο	49
Εικόνα 18 Σύγκριση μάζας ρομποτικού οχήματος Ανοξείδωτο - Αλουμίνιο.....	50
Εικόνα 19 Γεωμετρία οχήματος και καθορισμός οριακών συνθηκών	53
Εικόνα 20 Αποτελέσματα τάσεων-παραμορφώσεων ανοξείδωτου χάλυβα	54
Εικόνα 21 Αποτελέσματα τάσεων-παραμορφώσεων από αλουμίνιο	55
Εικόνα 22 Κατεργασία κοπής με πλάσμα.....	59
Εικόνα 23 Κατεργασία κοπής με υδροκοπή	60
Εικόνα 24 Πλάτος αφαίρεσης υλικού (kerf) από διάφορες κατεργασίες κοπής	61
Εικόνα 25 Κατεργασία κοπής με Laser	62
Εικόνα 26 Τρισδιάστατη απεικόνιση του ρομπότ στο solid work	63
Εικόνα 27 Βάση ρόδας. SLDPRT και Βάση ρόδας.dxf	64
Εικόνα 28 Μετατροπή σχεδίου σε ανάπτυγμα.....	64
Εικόνα 29 Όπως φαίνεται το αρχείο με όνομα vasi.SLDPRT	65

Εικόνα 30 Το ανάπτυγμα του αρχείου με όνομα vasi.SLDPRT	65
Εικόνα 31 Μετατροπή του αρχείου vasi.SLDPRT σε vasi.dxf	66
Εικόνα 32 Τοποθέτηση όλων των .DXF αρχείων στην λαμαρίνα	67
Εικόνα 33 Μέθοδος κάμψης τεμαχίων σε μήτρα σχήματος V.....	69
Εικόνα 34 Κατεργασία εξαρτημάτων του δικού μας ρομπότ με κάμψη	69
Εικόνα 35 Μέθοδος κάμψης τεμαχίων μεταξύ κυλίνδρων	70
Εικόνα 36 Τμήμα προγράμματος καθοδήγησης εργαλειομηχανής CNC	71
Εικόνα 37 Βασικές ρυθμίσεις της εργαλειομηχανής CNC.....	72
Εικόνα 38 Εικόνες από την κατεργασία της βάσης στήριξης των τροχών	73
Εικόνα 39 Εικόνα από το τελικό αποτέλεσμα της βάσης στήριξης των τροχών	73
Εικόνα 40 Όλα τα εξαρτήματα πριν τη συναρμολόγηση του ρομπότ	74
Εικόνα 41 Συναρμολόγηση των τροχών με την βάση του ρομπότ	75
Εικόνα 42 Ενδιάμεσο στάδιο συναρμολόγησης του ρομπότ	75
Εικόνα 43 Το ρομπότ όπως φαίνεται συναρμολογημένο	76
Εικόνα 44 Εικόνα των κινητήριων τροχών από δύο όψεις	78
Εικόνα 45 Τροχός με φρένο τύπου (Castor wheel)	78
Εικόνα 46 Τελικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος	79
Εικόνα 47 Σύγκριση μαζών του ρομπότ από α)ανοξειδωτο χάλυβα β)αλουμίνιο	80

1 Εισαγωγή

Η ρομποτική είναι ένας κλάδος σχετικά νέος σε ηλικία που συγκεντρώνει πολλά διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Η κατασκευή ρομποτικών συστημάτων ανάγκασε τομείς όπως η μηχανολογία, ηλεκτρολογία, ηλεκτρονική και πληροφορική, να συνεργαστούν με στόχο την επίτευξη σύνθετων ρομποτικών κατασκευών. Με τον όρο ρομπότ στο μυαλό μας, αμέσως έρχεται η εικόνα ενός ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος μπορεί να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα, ακρίβεια και αδιάλειπτα, σε μία αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου. Μέχρι σήμερα ο βασικός τομέας χρήσης των ρομπότ ήταν η βιομηχανία, με εφαρμογή στην αυτοματοποίηση γραμμών παραγωγής, όπως συναρμολόγηση, συγκόλληση, κοπή, αλλά και σε μικρότερης κλίμακας επιχειρήσεις. Οι ανάγκες του ανθρώπου ώθησαν την έρευνα να δημιουργήσει νέα ρομπότ με απώτερο σκοπό την παροχή υπηρεσιών για την καλυτέρευση της ποιότητας ζωής και την μείωση των κινδύνων. Πλέον εκτός από την κατασκευή σταθερών ρομπότ, υπάρχει στροφή στην κατασκευή ημιαυτόνομων και αυτόνομων ρομπότ τα οποία έχουν φτάσει σε υψηλό επίπεδο και καλύπτουν ανάγκες: Μεταφοράς αντικειμένων, συντήρησης, καθαρισμού, ρομπότ υπηρέτες, ιπτάμενα ρομπότ (Drone). Με τον όρο αυτόνομο ρομπότ (Autonomous Mobile Robot ή AMR) εννοούμε μία ρομποτική διάταξη η οποία μπορεί να κινηθεί σε ένα γνωστό ή και σε άγνωστο μέρος χωρίς επίβλεψη εκπληρώνοντας τα καθήκοντα για τα οποία έχει κατασκευαστεί. Αντίθετα από ένα σταθερό ρομποτικό βραχίονα που είναι βιδωμένο σε μία σταθερή βάση με πολλούς περιορισμούς κινήσεων, ένα αυτόνομο ρομπότ είναι σε θέση να ταξιδέψει μέσα σε ένα εργοστάσιο παραγωγής, ή στο σπίτι μας, με ασφάλεια, ευελιξία, παίρνοντας μόνο του αποφάσεις. Ανάλογα με το περιβάλλον εργασίας βλέπουμε διάφορα είδη αυτόνομων ρομπότ. Αυτόνομα ανθρωποειδή ρομπότ (Humanoid Robots), αυτόνομα οχήματα εδάφους (Autonomous Ground Vehicles ή AGVs), αέρα (Autonomous Aerial Vehicles ή UAVs), όμοια με τα αυτοκίνητα (Car-like Robots).

1.1 Παρουσίαση του προβλήματος

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή αυτόνομου τροχήλατου ρομποτικού οχήματος. Πρόκειται για όχημα με τέσσερις τροχούς, δύο κινητήριους τύπου

brushless motor στην εμπρόσθια πλευρά του οχήματος και άλλους δύο τροχούς ελεύθερους με άρθρωση τύπου castor στο πίσω μέρος. Είναι όχημα εδάφους και η κίνηση του έχει τις ίδιες δυσκολίες, και περιορισμούς όπως ένα αυτοκίνητο στο δρόμο. Η κινηματική του ρομποτικού οχήματος βασίζεται στην διαφορική οδήγηση (Differential drive), με αποτέλεσμα να είναι ευέλικτο. Βέβαια η προδιαγραφή της αυτόνομης λειτουργίας αμέσως μας εμφανίζει το πρόβλημα της μετακίνησης του ρομπότ από την θέση στην οποία βρίσκεται σε μία νέα θέση. Για να πετύχει το στόχο του πρέπει να έχει γνώση της θέσης του κάθε στιγμή, και επιπλέον να μπορεί να κινείται σε γνωστό ή σε άγνωστο χώρο. Για να έχουμε λοιπόν αυτονομία κινήσεων πρέπει το ρομπότ να μπορεί να χαρτογραφεί τον άγνωστο χώρο που βρίσκεται, και να γνωρίζει την δική του θέση μέσα στο χάρτη που έχει δημιουργήσει.

1.2 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Η αρχική ιδέα είχε στόχο την υλοποίηση ενός ρομποτικού αυτόνομου τροχήλατου οχήματος κατασκευασμένο εξολοκλήρου από τα μέλη της ομάδας της διπλωματικής εργασίας. Γενικότερος στόχος ήταν το αποτέλεσμα της δουλειάς μας να πληροί κάποιες προδιαγραφές, ώστε το ρομποτικό όχημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση, αλλά και για ερευνητικούς σκοπούς. Εντοπίσαμε με την βοήθεια του διαδικτύου παρόμοιες ρομποτικές κατασκευές οι οποίες υπάρχουν σήμερα στον κόσμο και αφού πρώτα τις ταξινομήσαμε, τις εξετάσαμε επισημαίνοντας τα θετικά τους σημεία με στόχο να θέσουμε τις προδιαγραφές του ρομποτικού οχήματος που θα κατασκευάσουμε. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα ρομποτικά οχήματα ήταν κατασκευασμένα για την εργασία που είχαν από την αρχή μελετηθεί, με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός τους να μην αφήνει περιθώρια επέκτασης ή τροποποίησης για διαφορετική χρήση. Φιλτράροντας τα θετικά στοιχεία της έρευνας και προσπαθώντας για ένα καλαίσθητο, στιβαρό και χαμηλού κόστους αυτόνομο ρομποτικού οχήματος ξεκίνησε ο σχεδιασμός νέου.

2 Παρουσίαση της κατάστασης της τέχνης

Το κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζει μία ανασκόπηση της σύγχρονης τεχνολογίας αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων στην σημερινή εποχή και ειδικότερα εστιάζει σε αυτόνομα ρομποτικά οχήματα εσωτερικού χώρου (autonomous indoor vehicles, AIVs) με σκοπό να συλλέξουμε πληροφορίες για τις πιο σύνηθες εφαρμογές. Από τους πάρα πολλούς διαφορετικούς κατασκευαστικούς σχεδιασμούς που υπάρχουν επιλέγουμε να παρουσιάσουμε μόνο AIV τροχήλατα, καθώς κυριαρχούν σε πλήθος συγκριτικά με άλλους. Οι βασικές ερευνητικές περιοχές των τροχοφόρων AIV που εξετάζονται με λεπτομέρεια είναι οι ακόλουθες: 1) Σχεδιασμός και μοντελοποίηση 2) Έλεγχος κίνησης 3) Συλλογή δεδομένων, 4) Πλοήγηση. Το περιβάλλον εργασίας τους είναι οι κλειστοί εσωτερικοί χώροι, όπως το εργοστάσιο, η επιχείρηση, το σπίτι κλπ. Εκτελούν εργασίες όπως: Ξεναγού, μεταφέρουν υλικά, ανυψώνουν βάρη, και πολλές άλλες. Το δάπεδο του χώρου εργασίας των ρομποτικών οχημάτων εσωτερικού χώρου είναι συνήθως οριζόντιο και ομαλό. Λόγω της ποιότητας του δαπέδου χρησιμοποιούν μικρότερους τροχούς και δεν έχουν αναρτήσεις σε σχέση με αντίστοιχα οχήματα που κινούνται σε εξωτερικούς χώρους. Ένα όχημα εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη ανάγκη ακρίβειας στις κινήσεις του διότι κινείται σε στενό περιβάλλον εργασίας, συνήθως ανάμεσα σε ράφια, προϊόντα και ανθρώπους.

2.1 Ρομπότ μεταφοράς προϊόντων

Στο χώρο του εφοδιασμού και της μεταφοράς προϊόντων η εταιρεία Robotnik παρουσιάζει μία σειρά από αυτόνομα ρομποτικά οχήματα. Μερικά από αυτά είναι το AGVS, RB-2 BASE, RB-SHERPA, RB-1 BASE, για τα οποία ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή.

- Το AGVS (Automated Guided Vehicles) είναι ένα αυτόνομο κινητό ρομπότ που προορίζεται για τη μεταφορά προϊόντων από το σημείο παραγωγής στο σημείο παράδοσης. Είναι μηχανοκίνητο με δύο κινητήρες που ελέγχουν την κατεύθυνση του ρομπότ και την δύναμη έλξης του. Το ρομπότ διαθέτει πλαίσιο χαμηλού προφίλ, το οποίο το καθιστά κατάλληλο για κίνηση κάτω από κιβώτια προϊόντων. Το πλαίσιο, είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και χάλυβα, εμπεριέχει τις μπαταρίες, τους κινητήρες, τους μειωτήρες και όλα τα απαραίτητα μηχανικά μέρη

ώστε στο επάνω μέρος του ρομπότ να μπορεί να ανυψώνει και να κατεβάζει φορτίο μέχρι 500kg. Αυτό το κινητό ρομπότ έχει δύο αισθητήρες laser (πίσω και εμπρός) για την ανίχνευση αντικειμένων. Το ρομπότ είναι εφοδιασμένο με μηχανικό σύστημα πέδησης το οποίο ενεργεί σε περίπτωση απώλειας ισχύος ή βλάβης. Η απόσταση φρεναρίσματος υπολογίζεται ανάλογα με τις συνθήκες φορτίου, την ταχύτητα, την κλίση και την τριβή. Ο αισθητήρας λέιζερ ρυθμίζει την απόσταση φρεναρίσματος με το μέγιστο φορτίο και ταχύτητα. Η κινηματική διάταξη του ρομπότ το επιτρέπει να είναι ευέλικτο και να κινείται στην πορεία του με βέλτιστο τρόπο [1].

Προδιαγραφές του ρομπότ AVGS	
Διαστάσεις	1.750 x 652 x 345
Βάρος	250 Kg
Φορτίο μεταφοράς	500 Kg
Ταχύτητα	1,25 m/s
Αυτονομία	8h in normal operation
Έλεγχος κατεύθυνσης	Ackermann



Εικόνα 1 Ρομπότ AVGS

- Το RB-2 BASE είναι ένα αυτόνομο κινητό ρομπότ που προορίζεται για τη μεταφορά προϊόντων σε αποθήκες και χώρους εφοδιασμού. Η κατεύθυνση του

ελέγχεται από τους δύο κινητήριους τροχούς με διαφορική οδήγηση. Το ρομπότ διαθέτει πλαίσιο χαμηλού προφίλ, το οποίο το καθιστά κατάλληλο για κίνηση κάτω από κιβώτια προϊόντων. Μπορεί να ανυψώνει και να κατεβάζει φορτίο μέχρι 200kg. Ο έλεγχος της θέσης του στο χώρο επιτυγχάνεται με αναλογικούς μαγνητικούς αισθητήρες. Η απόσταση φρεναρίσματος υπολογίζεται ανάλογα με τις συνθήκες φορτίου, την ταχύτητα, την κλίση και την τριβή. Η κινηματική διάταξη του ρομπότ το επιτρέπει να είναι ευέλικτο και να κινείται στην πορεία του με βέλτιστο τρόπο [2].

Προδιαγραφές του ρομπότ RB-2 BASE	
Διαστάσεις	990 x 633 x 390
Βάρος	110 Kg
Φορτίο μεταφοράς	200 Kg
Ταχύτητα	1,7 m/s
Αυτονομία	10h in normal operation
Έλεγχος κατεύθυνσης	Differential drive



Εικόνα 2 Ρομπότ RB-2 BASE

- Το RB-SHERPA είναι ένα αυτόνομο κινητό ρομπότ για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους που προορίζεται για εργασίες γενικής χρήσης και

εφαρμογές εφοδιαστικής. Μπορεί να ακολουθήσει έναν άνθρωπο σε εξωτερικά και εσωτερικά περιβάλλοντα. Έχει αυτονομία 10ώρες και μπορεί να μεταφέρει φορτίο μέχρι 100kg [3].

Προδιαγραφές του ρομπότ RB-SHERPA	
Διαστάσεις	1142 x 1413 x 626
Βάρος	123 Kg
Φορτίο μεταφοράς	100 Kg
Ταχύτητα	3 m/s
Αυτονομία	10h in normal operation
Έλεγχος κατεύθυνσης	Single / Ackermann , Dual / Omni



Εικόνα 3 Ρομπότ RB-SHERPA

- Το RB-1 BASE είναι ένα αυτόνομο κινητό ρομπότ για εσωτερικούς χώρους που προορίζεται για επίβλεψη εργασιών, τη μεταφορά προϊόντων μικρού βάρους και στην έρευνα. Μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη βραχίονα. Το ρομποτικό

όχημα μπορεί να ενσωματώσει αισθητήρα λέιζερ και απόσταση λειτουργίας από 5 έως 60 μέτρα. Αισθητήρες RGBD (Asus Xtion, Kinect One κ.λπ.) μπορούν να τοποθετηθούν στην κορυφή της πλατφόρμας για την ανίχνευση εμποδίων. Εντοπίζει εμπόδια με δύο διαφορετικούς τρόπους, με τον αισθητήρα RGBD και τον αισθητήρα λέιζερ που χρησιμοποιείται για πλοήγηση και τοποθέτηση. Και στις δύο περιπτώσεις, το ρομπότ μπορεί είτε να σταματήσει είτε να βρει μια εναλλακτική διαδρομή και να φτάσει στο επόμενο σημείο. Η κατεύθυνση του ελέγχεται από τους δύο κινητήριους τροχούς με διαφορική οδήγηση. Μπορεί να ανυψώνει και να κατεβάζει φορτίο μέχρι 50kg [4].

Προδιαγραφές του ρομπότ RB-1 BASE	
Διαστάσεις	500 x 500 x 251
Βάρος	30 Kg
Φορτίο μεταφοράς	50 Kg
Ταχύτητα	1.5 m/s
Αυτονομία	10h in normal operation
Έλεγχος κατεύθυνσης	Differential drive



Εικόνα 4 Ρομπότ RB-1 BASE

- Το Magni είναι δημιούργημα της Ubiquity Robotics και έχει σχεδιαστεί να μεταφέρει αρκετά μεγάλα ωφέλιμα φορτία, για μεγάλες χρονικές περιόδους. Κατασκευάζεται σε τρία μοντέλα ανάλογα με το λογισμικό και τους αισθητήρες

που περιλαμβάνουν. Η πιο απλή έκδοση είναι το Magni bronze αλλά δεν περιλαμβάνει λογισμικό, κάμερα, πλοήγηση και αισθητήρες. Το επόμενο μοντέλο είναι το Magni silver το οποίο κοστίζει περίπου 1600 δολάρια και το πιο αναβαθμισμένο είναι το Magni gold. Πρόκειται για υβριδική πλατφόρμα ανάπτυξης στο ROS, υπάρχουν μαθήματα και βοήθεια στο διαδίκτυο για τον προγραμματισμό του Magni αλλά προαπαιτεί ο χρήστης να έχει καλές γνώσεις ρομποτικής και του ROS. Με λίγα λόγια δεν είναι κατασκευασμένο για αρχάριους χρήστες [5].



Εικόνα 5 Ρομπότ Magni

Προδιαγραφές του ρομπότ Magni

- Μέγιστο φορτίο: 100 kg
- Ισχύς κινητήρα: 2 x 200 W

- Μέγιστη ταχύτητα: 2 m / s
- Ισχύς: 7 A + 5 V και 7 A + 12 V DC
- Υπολογιστής: Quad-core ARM A9 - Raspberry Pi3
- Λογισμικό: Ubuntu 16.04, ROS Kinetic
- Κάμερα: Single upward facing
- Πλοήγηση: Ceiling fiducial based navigation
- Διάρκεια ζωής μπαταρίας: Με μπαταρίες 10Ah, 8 ώρες κανονικής λειτουργίας. Μπορούν να εγκατασταθούν έως και 32 Ah μπαταρίες μολύβδου, οι οποίες θα παρέχουν 24 ώρες κανονικής λειτουργίας
- 3D αισθητήρας (προαιρετικός εξοπλισμός): 2x time of flight cameras, 120 degree field of view.

Η ικανότητα του Magni να προγραμματίζεται με το ROS μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε τις ίδιες αυτόνομες δυνατότητες πλοήγησης που είναι διαθέσιμες σε οποιοδήποτε ρομπότ ROS. Έτσι μπορούμε να αναπτύξουμε τη δική μας αυτόνομη εφαρμογή εντοπισμού και πλοήγησης.

2.2 Ρομπότ υπηρεσιών

Τα ρομπότ υπηρεσιών βοηθούν τους ανθρώπους σε δύσκολες, επικίνδυνες και επαναλαμβανόμενες εργασίες. Τα περισσότερα ρομπότ υπηρεσίας είναι κινούμενα, ημιαυτόνομα ή πλήρως αυτόνομα. Υπάρχουν ρομπότ εξυπηρέτησης που προορίζονται να αλληλεπιδράσουν με ανθρώπους, τα οποίοι κατά κανόνα κινούνται σε χώρους λιανικής πώλησης, φιλοξενίας, υγειονομικής περίθαλψης και αποθήκες. Άλλα κινούνται σε εξωτερικό περιβάλλον με ανώμαλη επιφάνεια, όπως γεωργικές εφαρμογές, στο στρατό και το διάστημα. Στο χώρο των υπηρεσιών η εταιρεία Robotnik παρουσιάζει μία σειρά από αυτόνομα ρομποτικά οχήματα τα οποία επικοινωνούν με την ρομποτική πλατφόρμα ROS. Μερικά από αυτά είναι το SUMMIT-XL HL, SUMMIT-XL STEEL για τα οποία ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή.

- Το αυτοκινούμενο ρομποτικό όχημα SUMMIT-XL HL μπορεί να λειτουργήσει σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με την ίδια ευκολία. Για μεγαλύτερη ευελιξία όταν η χρήση είναι σε εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιεί mecanum τροχούς, ενώ σε εξωτερικούς χώρους μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν από

συμβατικούς τροχούς. Η οδομετρία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες των τροχών και ένα αισθητήρα γυροσκοπίου υψηλής ακρίβειας τοποθετημένο στο εσωτερικό του πλαισίου. Η ισχυρή μηχανική δομή επιτρέπει τη μεταφορά φορτίων μέχρι 65kg. Το ρομπότ διαθέτει 4 ηλεκτροκινητήρες υψηλής ισχύος. Κάθε τροχός ενσωματώνει έναν κινητήρα χωρίς ψήκτρες με κιβώτιο ταχυτήτων. Η βάση του ρομπότ μπορεί να πλοηγηθεί αυτόνομα ή από απόσταση μέσω μιας κάμερας που μεταδίδει βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Περιλαμβάνει έναν ανιχνευτή λέιζερ Hokuyo και αισθητήρα θέσης RTK-DGPS. Διαθέτει επίσης USB, RS232, RJ45, παροχή 5,12 VDC για να προσθέσουμε ότι άλλο στοιχείο θέλουμε. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές έρευνας και εκπαίδευσης, στην ασφάλεια, για απομακρυσμένη παρακολούθηση και σε επικίνδυνους χώρους [6].

Προδιαγραφές του ρομπότ SUMMIT-XL HL	
Διαστάσεις	722 x 613 x 416
Βάρος	65Kg
Φορτίο μεταφοράς	65 Kg
Ταχύτητα	3 m/s
Αυτονομία	10h continuous motion
Έλεγχος κατεύθυνσης	Omnidirectional , skid-steering



Εικόνα 6 Ρομπότ SUMMIT-XL HL

- Το SUMMIT-XL STEEL έχει στιβαρή σχεδίαση και μπορεί να μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο έως και 250kg. Είναι σχεδιασμένο να κινείται πανκατευθυντικά με τους τέσσερις κινητήρες μεγάλης ισχύος. Κάθε τροχός ενσωματώνει έναν κινητήρα χωρίς ψήκτρες με κιβώτιο ταχυτήτων και κωδικοποιητή. Η οδομετρία υπολογίζεται με τη χρήση αισθητήρα γυροσκοπίου υψηλής ακρίβειας τοποθετημένο στο εσωτερικό του πλαισίου και τον έλεγχο ταχύτητας του τροχού. Μπορεί να πλοηγηθεί αυτόνομα ή από απόσταση μέσω μιας κάμερας που μεταδίδει βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Μπορεί να δεχθεί διάφορους αισθητήρες ανάλογα με τις ανάγκες μας. Διαθέτει διαύλους επικοινωνίας USB, RS232, RJ45, παροχή 5,12 VDC για να προσθέσουμε ότι άλλο στοιχείο θέλουμε. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές έρευνας και εκπαίδευσης, στην ασφάλεια, για απομακρυσμένη παρακολούθηση και σε επικίνδυνους χώρους [7].

Προδιαγραφές του ρομπότ SUMMIT-XL STEEL	
Διαστάσεις	847 x 663 x 509
Βάρος	105Kg
Φορτίο μεταφοράς	250 Kg
Ταχύτητα	3 m/s
Αυτονομία	10h continuous motion
Έλεγχος κατεύθυνσης	Omnidirectional



Εικόνα 7 Ρομπότ SUMMIT-XL STEEL

- Η εταιρία Solteq δημιούργησε το Ρομπότ Πωλητή (Retail Robot) και φέρνει τη ρομποτική όραση και τη βαθιά εκμάθηση στο περιβάλλον του καταστήματος. Είναι κατασκευασμένο να βοηθά τις εταιρείες λιανικής να κάνουν τις καθημερινές τους παραγγελίες πιο αποτελεσματικές. Το Retail Robot είναι ικανό να ανιχνεύει και να καταμετρά προϊόντα στο χώρο ενός καταστήματος. Το Retail Robot κινείται αυτόνομα στους διαδρόμους ανάμεσα στα ράφια και στους ανθρώπους

σε ένα κατάστημα, και συγκεντρώνει δεδομένα. Σαρώνει τα προϊόντα και τις ετικέτες τιμών από τα ράφια και εξαγάγει χρήσιμες πληροφορίες. Αναγνωρίζει ράφια που δεν έχουν προϊόντα, ετικέτες ή είναι προβληματικές. Με όλα τα δεδομένα που συλλέγονται, οι πελάτες μπορούν να δημιουργήσουν έναν τρισδιάστατο χάρτη για κάθε κατάστημα με τις ακριβείς τοποθεσίες των προϊόντων. Συνδυάζει χαρακτηριστικά τόσο της ρομποτικής όσο και της τεχνητής νοημοσύνης. Διαθέτει πύργο δύο μέτρων, εξοπλισμένο με ισχυρές κάμερες RGB και Depth. Τροφοδοτούμε τις ροές των εικόνων από τις κάμερες στους αλγορίθμους και τα νευρωνικά δίκτυά μας για να συλλέξουμε τις απαιτούμενες πληροφορίες για την επιχείρηση. Το ρομπότ ελέγχει τον χώρο της αποθήκης και ανιχνεύει εάν τα ράφια είναι άδεια ή τα προϊόντα λείπουν [8].



Εικόνα 8 Ρομπότ Πωλητής

Μπορεί επίσης να εξαγάγει τις πληροφορίες τιμών και να ελέγξει αν είναι σωστά ενημερωμένες οι τιμές των προϊόντων από βάση δεδομένων. Ο υπολογιστής ελέγχου, μας δημιουργεί έναν χάρτη σημείων νέφους από το περιβάλλον και σε αυτό συνδέουμε τις εικόνες του καταστήματος από τις κάμερες του ρομπότ. Με αυτές τις πληροφορίες, μπορούμε να παράγουμε ένα 3D 360 ° περιβάλλον με τα εσωτερικά σημεία θέσης. Όλες οι καθημερινές λειτουργίες εκτελούνται από το

ρομπότ με την βοήθεια μονάδων GPU (graphics processing unit). Η κίνηση του ρομπότ είναι εντελώς αυτόνομη και είναι σε θέση να αποφύγει συγκρούσεις με οποιοδήποτε εμπόδιο και να επανατοποθετήσει την πορεία του στον χώρο όταν χρειάζεται.

- Το ρομπότ σερβιτόρος είναι δημιούργημα της PuduTech η οποία κατασκευάζει αυτόνομα ρομποτικά οχήματα και βοηθά επιχειρήσεις να εκσυγχρονιστούν και να αναδιαρθρώσουν τη ροή εργασίας τους. Το PuduBot είναι ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα κατασκευασμένο για τις ανάγκες χώρων εστίασης [9].



Εικόνα 9 Ρομπότ Σερβιτόρος

Ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων όπως LiDAR, οπτικούς και υπερύθρων, επιτρέπει στο ρομποτικό όχημα να αναγνωρίζει την θέση του και να κινείται στο εστιατόριο με ακρίβεια εκατοστού. Αυτό σημαίνει ότι το ρομπότ ξέρει πού βρίσκεται, πού κατευθύνεται και πώς να φτάσει στη θέση του στόχου. Η αποφυγή εμποδίων είναι γρήγορη και ασφαλής, οφείλεται στην ταχύτητα απόκρισης των αισθητήρων και τον ακριβή έλεγχο των κινητήριων τροχών. Ο χρόνος πέδησης είναι 0.5s αποτρέποντας τη σύγκρουση σε επείγουσες συνθήκες. Η ικανότητα σχεδιασμού διαδρομής διασφαλίζει ότι το PuduBot βρίσκει την συντομότερη διαδρομή για να φτάσει στο στόχο του. Η αρχική εγκατάσταση του σε μία

επιχείρηση θέλει περίπου δύο ώρες να δημιουργήσει χάρτες και να προετοιμασθεί για την πρώτη του παραγγελία. Τα πιάτα της παραγγελίας τοποθετούνται στο κεκλιμένο πλαίσιο με αποτέλεσμα η συνισταμένη του βάρους να περνά από το κέντρο βάρους του ρομπότ, και να μην υπάρχει κίνδυνος ανατροπής. Για κάλυψη μεγάλων επιχειρήσεων είναι δυνατή η συνεργασία μεταξύ πολλαπλών αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων.

- Το αυτόνομο ρομποτικό όχημα K3 εσωτερικών χώρων της εταιρίας knightscope είναι ένα ρομπότ φύλακας. Λειτουργεί από μόνο του 24 ώρες το εικοσιτετράωρο 7 ημέρες την εβδομάδα, συμπεριλαμβανομένης της αυτόνομης επαναφόρτισης χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση. Κατάλληλο για εσωτερικούς χώρους με δυνατότητες που επιτρέπουν τον διάλογο με τους ανθρώπους. Χρησιμοποιείται σε περιπολίες εμπορικών κέντρων, αποθήκες, νοσοκομεία, αεροδρόμια, καζίνο κλπ [10].



Εικόνα 10 Ρομπότ φύλακας

3 Μεθοδολογία σχεδιασμού ρομποτικού οχήματος

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των βημάτων υλοποίησης της μελέτης κατασκευής του ρομποτικού οχήματος, όπως και τα διάφορα λογισμικά προγράμματα που χρησιμοποιήσαμε κατά την πορεία του σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός μιας μηχανής είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί πολλές δεξιότητες. Ξεκινά με μία αόριστη περιγραφή του προβλήματος που πρέπει να λυθεί και ολοκληρώνετε με την κατασκευή μιας μηχανής. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας απαιτεί μια ακολουθία στην οποία εισάγονται και επαναλαμβάνονται ιδέες και λύσεις. Αρχικά επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στο γενικότερο σχεδιασμό της κατασκευής και στη συνέχεια στο μηχανολογικό σχεδιασμό. Στην σημερινή εποχή υπάρχουν πολλές πηγές βοήθειας και υποστήριξης του σχεδιαστή, συμπεριλαμβανομένων πολλών πηγών πληροφοριών και ενός πολύ μεγάλου αριθμού λογισμικών εργαλείων σχεδίασης. Στους μηχανικούς σχεδιασμού μαζί με την ικανότητα στον τομέα τους πρέπει να συνυπάρχει ένα ισχυρό αίσθημα ευθύνης και τεχνικής ηθικής (δεοντολογίας). Προβλήματα αβεβαιότητας εμφανίζονται σχεδόν πάντα και αντιμετωπίζονται συνήθως από τον σχεδιαστή ή την ομάδα σχεδίασης με βάση την ασφάλεια του προϊόντος ή με παράγοντα την αξιοπιστία ενός σχεδίου.

3.1 Ανάλυση φορτίων και επιλογή διαστάσεων

Ο πιο βασικός λόγος αστοχίας ενός μηχανολογικού στοιχείου είναι η περιορισμένη ικανότητα του υλικού να μεταφέρει τα φορτία. Για το λόγο αυτό πριν την επιλογή διαστάσεων των μερών των μηχανών πρέπει να γνωρίζουμε τα συνολικά φορτία κάθε μέλους με σκοπό να προσδιοριστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των μερών. Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε ένα εξάρτημα μηχανής ώστε να λειτουργεί με ασφάλεια, λαμβάνοντας υπόψη τα φορτία που παραλαμβάνει και τις μέγιστες παραμορφώσεις που μπορεί να εμφανίσει κατά την λειτουργία του. Η εφαρμογή όλων των παραπάνω αναλύσεων και ελέγχων έγινε με την βοήθεια υπολογιστή. Ο έλεγχος αντοχής του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος έγινε με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM) και τη χρήση λογισμικού πακέτου με την εμπορική ονομασία Ansys.

3.2 Επιλογή υλικών κατασκευής

Κάθε στάδιο του σχεδιασμού απαιτεί αποφάσεις σχετικά με την επιλογή υλικών από τα οποία πρόκειται να γίνει το προϊόν και τη διαδικασία για την κατασκευή του. Κανονικά το υλικό κατασκευής ενός στοιχείου υπαγορεύεται από το κατασκευαστικό σχέδιο. Μερικές φορές συμβαίνει το αντίθετο, προϊόντα που προϋπάρχουν να κατασκευάζονται από κάποιο νέο υλικό. Ο αριθμός των διαθέσιμων υλικών είναι κάτι μεταξύ 40.000 και 80.000. Και παρόλο που η τυποποίηση προσπαθεί να περιορίσει τον αριθμό τους, αυτός αυξάνει με την εμφάνιση νέων υλικών με νέες εκμεταλλεύσιμες ιδιότητες επεκτείνοντας περαιτέρω τις επιλογές. Πώς τελικά ο μηχανικός επιλέγει υλικό που ταιριάζει καλύτερα στο σκοπό του από αυτό το τεράστιο μενού, πρέπει να βασιστεί στην εμπειρία του; Η απάντηση στο ερώτημα δίδεται σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με το στάδιο που βρίσκεται ο σχεδιασμός. Στην αρχή ο σχεδιασμός είναι γενικός και οι επιλογές δεν είναι ξεκάθαρες, καθώς ο σχεδιασμός γίνεται περισσότερο συγκεντρωμένος και διαμορφώνεται, τα κριτήρια επιλογής εστιάζουν και η λίστα των υλικών που μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις μας στενεύουν. Στα τελικά στάδια του σχεδιασμού η λίστα με τα κατάλληλα υλικά περιορίζεται σε ελάχιστα, ίσως μόνο ένα. Η επιλογή του υλικού δεν μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από την επιλογή της διαδικασίας με την οποία το υλικό πρόκειται να διαμορφωθεί, να συνδεθεί και να αντιμετωπιστεί με άλλο τρόπο. Το κόστος εισέρχεται τόσο στην επιλογή του υλικού, αλλά και του τρόπου επεξεργασίας του υλικού. Τα προβλήματα σχεδιασμού υπάρχουν σχεδόν πάντα και δεν έχουν μια μοναδική ή «σωστή» λύση, αν και ορισμένες λύσεις είναι σαφώς καλύτερες από άλλες.

3.3 Κατεργασία εξαρτημάτων του ρομπότ

Στην σημερινή εποχή ο όρος κατεργασία σημαίνει την παραγωγή προϊόντων από πρώτες ύλες με τη χρήση διαφόρων διαδικασιών, με τη χρήση εργαλείων χειρός, μηχανημάτων ή ακόμη και υπολογιστών. Είναι επομένως μια μελέτη των απαιτούμενων διαδικασιών για την κατασκευή εξαρτημάτων και τη συναρμολόγησή τους σε μηχανές. Η διαδικασία εφαρμογής της κατεργασίας σε βιομηχανικές κατασκευές, δείχνει πώς μπορούν να επιλυθούν τα διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη διαφόρων μηχανών με τη μελέτη των φυσικών, χημικών και άλλων νόμων που διέπουν τη διαδικασία κατασκευής. Η μελέτη της κατεργασίας αποκαλύπτει εκείνες τις

παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν θετικά αυξάνοντας την παραγωγή και βελτιώνοντας την ακρίβειά. Ο προγραμματισμός της διαδικασίας αποτελείται από την επιλογή των μέσων παραγωγής (εργαλειομηχανές, εργαλεία κοπής, πρέσες, όργανα μέτρησης κλπ.). Επίσης ο προγραμματισμός της κατεργασίας περιλαμβάνει τα βήματα της ακολουθίας των κατεργασιών, τον προσδιορισμό των αλλαγών στη μορφή, τη διάσταση και την ολοκλήρωση της κατασκευής μαζί με τον προσδιορισμό των ενεργειών του χειριστή. Τέλος περιλαμβάνει και τον υπολογισμό του χρόνου κατεργασίας, καθώς και την απαιτούμενη ικανότητα του χειριστή. Επίσης, καθιερώνει μια βέλτιστη σειρά βημάτων κατασκευής για την ελαχιστοποίηση σπατάλης υλικών, που εξασφαλίζει ότι η εργασία θα πραγματοποιηθεί με το ελάχιστο κόστος και τη μέγιστη παραγωγικότητα. Οι βασικές έννοιες της διαδικασίας προγραμματισμού αφορούν γενικά μόνο τη μηχανική κατεργασία. Αν και αυτές οι έννοιες μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες διαδικασίες όπως χύτευση, σφυρηλάτηση κλπ. Η τεχνική της απλούστευσης και της τυποποίησης του προϊόντος είναι στενά αλληλένδετη, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα στην παραγωγή, καλύτερη ποιότητα και μειωμένο κόστος παραγωγής. Η απλούστευση είναι μια διαδικασία καθορισμού περιορισμένου αριθμού βαθμών, τύπων και μεγεθών συστατικών ή προϊόντων ή εξαρτημάτων προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερος ποιοτικός έλεγχος, ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, απλοποίηση της παραγωγής και συνεπώς μείωση του κόστους παραγωγής. Με την εξάλειψη των περιττών μεγεθών και σχεδίων, η απλοποίηση οδηγεί στην κατασκευή πανομοιότυπων εξαρτημάτων ή προϊόντων για εναλλαξιμότητα και σκοπούς συντήρησης της μηχανής. Η τυποποίηση είναι το σημαντικό βήμα προς την αύξηση της παραγωγής και την υψηλότερη οικονομία. Η τεχνική της τυποποίησης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδικασιών παραγωγής τον εντοπισμό του καλύτερου υλικού και όμοιων τεχνικών για την κατασκευή ενός προϊόντος. Ένα συγκεκριμένο προϊόν σε σχέση με την ποιότητά του, απαιτεί εξοπλισμό, μηχανήματα, εργασία, υλικά, διαδικασία παραγωγής και κόστος παραγωγής. Ένα αναγνωρισμένο πρότυπο προϊόν δεν πρέπει ποτέ να θεωρείται ως τελικό για πάντα, επειδή η βελτίωση είναι πάντοτε δυνατή. Πρέπει να ανταποκρίνεται στο αποτέλεσμα όλων των νέων ερευνών στις περιοχές παραγωγής, προκειμένου να συμβαδίζει με την αυξανόμενη παγκόσμια ανταγωνιστικότητα. Βελτιώσεις σε σχέση με τα υφιστάμενα πρότυπα από κάθε άποψη πρέπει πάντα να

είναι ευπρόσδεκτες. Για την κατασκευή του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος η κατεργασία όλων των ανοξειδωτων ελασμάτων πάχους 1.5mm έγινε με κατεργασία κοπής laser. Μόνο ένα εξάρτημα σχεδιάστηκε από αλουμίνιο και κατασκευάστηκε σε κέντρο κατεργασίας CNC με συμβατική μέθοδο. Η δημιουργία των σχεδίων και η προσομοίωση των κατεργασιών έγινε με τη βοήθεια λογισμικού πακέτου computer-aided design & computer-aided manufacturing. CAD/CAM με την εμπορική ονομασία SolidCam.

4 Τεχνικές προδιαγραφές

Σκοπός του κεφαλαίου που ακολουθεί είναι η καταγραφή των απαιτήσεων των τεχνικών προδιαγραφών που πρέπει να πληροί το ρομποτικό όχημα. Αρχικά καταγράφουμε σε μορφή λίστας τις προδιαγραφές και στην συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση της κάθε μίας ξεχωριστά.

4.1 Καταγραφή τεχνικών προδιαγραφών

Ένα προϊόν κατασκευάζεται για την εκτέλεση επιθυμητών λειτουργιών. Αυτό σημαίνει ότι κάθε προϊόν απαιτεί καθορισμένο μέγεθος, σχήμα, βάρος, όπως και άλλα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Οι τεχνικές προδιαγραφές καθορίζουν ένα σύνολο απαιτήσεων που ένα προϊόν ή μία κατασκευή πρέπει να πληρούν ή να υπερβαίνουν. Ξεκινάμε δημιουργώντας μια λίστα προδιαγραφών του αυτόνομου ρομποτικού οχήματος η οποία θα μας παράσχει μια λίστα κριτηρίων βάση των οποίων θα αξιολογούμε τον σχεδιασμό μας καθώς αναπτύσσεται.

- Αυτόνομη πλοήγηση σε άγνωστο περιβάλλον
- Καθοδήγηση με την βοήθεια διαφορικής οδήγησης
- Διαστάσεις αμαξώματος ΜxΠxΥ περίπου 500x350 x380
- Παροχή ενέργειας από μπαταρία για 5 ώρες τουλάχιστον
- Απλός σχεδιασμός
- Ικανότητα μεταφοράς 50Kg
- Επιλογή τυποποιημένων υλικών και εξαρτημάτων του εμπορίου
- Πρόβλεψη για δυνατότητα αναβάθμισης

4.2 Αναλυτική περιγραφή τεχνικών προδιαγραφών

4.2.1 Αυτόνομη πλοήγηση σε άγνωστο περιβάλλον

Αυτό σημαίνει ότι το ρομποτικό όχημα αναγνωρίζει τον γνωστό ή άγνωστο χώρο και την θέση που βρίσκεται το ίδιο. Μπορεί να πλοηγηθεί με ακρίβεια και ασφάλεια στο χώρο που βρίσκεται αποφεύγοντας εμπόδια και κινδύνους και να φτάσει στην θέση στόχο. Για να γίνουν όλα τα παραπάνω χρειάζεται υπολογιστικό σύστημα, αισθητήρες και

λογισμικό. Για τον χαμηλό έλεγχο των υποσυστημάτων χρησιμοποιήθηκε ο ελεγκτής Arduino, ενώ για τον υψηλό έλεγχο την δουλειά ανέλαβε ο εξαιρετικά μικρός σε μέγεθος υπολογιστής Raspberry Pi . Επίσης ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα απαιτεί πολλούς αισθητήρες ώστε να μπορεί να λαμβάνει πληροφορίες από τον εαυτό του, αλλά και το περιβάλλον του.

4.2.2 Καθοδήγηση με την βοήθεια διαφορικής οδήγησης

Ο τρόπος ελέγχου της κίνησης του ρομποτικού οχήματος πραγματοποιείται με διαφορική οδήγηση (differential drive). Όταν λέμε διαφορική οδήγηση αναφερόμαστε σε οχήματα που έχουν δύο τροχούς μη κατευθυντήριους, τα κέντρα των οποίων περνούν από τον ίδιο άξονα, και η περιστροφή του καθενός ελέγχεται από ανεξάρτητο κινητήρα. Η φορά περιστροφής, όπως και η ταχύτητα του κάθε τροχού είναι ανεξάρτητη. Τα περισσότερα εμπορικά ρομποτικά οχήματα για κλειστούς χώρους λειτουργούν με διαφορική οδήγηση λόγω της απλής κατασκευής, αλλά και λόγω της απλότητας στην κινηματική τους ανάλυση.

4.2.3 Διαστάσεις αμαξώματος

Σε αρχικό στάδιο της ιδέας το μέγεθος του ρομποτικού οχήματος που σκεφτήκαμε ότι θα κάλυπτε τις ανάγκες είναι περίπου: Μήκος=500mm, Πλάτος=350mm, Ύψος380mm. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι τεχνικές προδιαγραφές, το υλικό κατασκευής, οι διαστάσεις από τα διάφορα τυποποιημένα εξαρτήματα, η πρόβλεψη για μελλοντική επέκταση κλπ. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω δεδομένα έγινε μια πρώτη εκτίμηση των διαστάσεων του ρομποτικού οχήματος, που πλησίαζαν αρκετά στις τελικές του διαστάσεις. Οι κινητήριои τροχοί τύπου brushless motor στην εμπρόσθια πλευρά του οχήματος είναι τυποποιημένο προϊόν και το βρίσκουμε σε καθορισμένες διαστάσεις και ισχύ. Η τυποποιημένη διάσταση πιο κοντά στις δικές μας ανάγκες είναι 8" ίντσες, με 350W ο κάθε τροχός. Οπότε σε αναλογία διαστάσεων το ρομποτικό όχημα σε σχέση με τους τροχούς κατασκευάστηκε με τελικές διαστάσεις MxΠxΥ 500x400 x385mm.

4.2.4 Παροχή ενέργειας από μπαταρία για 5 ώρες τουλάχιστον

Η ενεργειακή αυτονομία του ρομποτικού οχήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις εργασίες που μπορεί να επιτελέσει. Εξαρτάται από

την χωρητικότητα των ηλεκτρικών συσσωρευτών και τις διάφορες καταναλώσεις του ρομπότ. Από τον σχεδιασμό της κατασκευής μπορούμε να προσέξουμε την επιλογή των κινητήρων, τις καταναλώσεις των αισθητήρων, του υπολογιστή, το βάρος της κατασκευής, τις τριβές, ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατό μικρότερες καταναλώσεις ενέργειας. Η τάση των ηλεκτρικών συσσωρευτών επιλέγεται συνήθως από την τάση του μεγαλύτερου καταναλωτή σε ισχύ σε όλο το κύκλωμα. Στο ρομποτικό όχημα οι μεγαλύτεροι καταναλωτές είναι οι οδηγοί των κινητήριων τροχών οι οποίοι δουλεύουν με τάση 36V και 350W ο κάθε ένας. Για την απαιτούμενη ενέργεια χρησιμοποιήσαμε 3 συσσωρευτές μολύβδου 12V 5AH σε σειρά.

4.2.5 Απλός σχεδιασμός

Αυξάνοντας το χρόνο σχεδιασμού πετυχαίνουμε αύξηση της αξιοπιστίας και μείωση του τελικού κόστους του προϊόντος. Απλός σχεδιασμός σημαίνει εξάλειψη πλεοναζόντων εξαρτημάτων, λιγότερες συνδέσεις, ταχύτερη, ευκολότερη κατασκευή, οικονομία πρώτων υλών. Με αυτή την έννοια ο απλός σχεδιασμός ακολουθεί τις ιδέες του βιώσιμου σχεδιασμού. Οι καταναλωτές προσελκύονται από απλά προϊόντα,

4.2.6 Ικανότητα μεταφοράς 50Kg

Ένα ρομποτικό όχημα αχθοφόρος για να μπορεί να ικανοποιεί ανάγκες στον πραγματικό κόσμο, πρέπει να μπορεί να μεταφέρει ένα ικανοποιητικό φορτίο. Το φορτίο μεταφοράς όπως και το ίδιο βάρος της κατασκευής παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του πάχους του υλικού κατασκευής, αλλά και του ίδιου του υλικού που θα επιλέξουμε. Αναλογικά με το μέγεθος και την χρήση του οχήματος επιλέχθηκε ωφέλιμο φορτίο μεταφοράς 50 Kg.

4.2.7 Επιλογή τυποποιημένων υλικών και εξαρτημάτων

Η τυποποίηση είναι παντού και κάνει τη ζωή μας πολύ ευκολότερη. Τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη που απολαμβάνουμε στην καθημερινή μας ζωή χάρη στην τυποποίηση προϊόντων τα παραβλέπουμε πολύ συχνά. Χάρη στους σχεδιαστές προϊόντων και τους μηχανικούς ο κόσμος μας γίνεται απλούστερος, ευκολότερος, αποδοτικότερος, φθηνότερος. Έτσι στον σχεδιασμό του ρομποτικού οχήματος χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένα εξαρτήματα, όπως βίδες, τροχοί, αισθητήρες, υπολογιστής κλπ. Σχεδιάζοντας προϊόντα με τυποποιημένα εξαρτήματα έχουμε τα παρακάτω οφέλη:

- Λιγότερο χρόνο σχεδίασης
- Εγγυημένη ποιότητα
- Απαιτείται λιγότερη προσπάθεια
- Καλύτερη τιμή

4.2.8 Πρόβλεψη για δυνατότητα αναβάθμισης

Συνήθως οι ρομποτικές συσκευές του εμπορίου εξυπηρετούν ένα μόνο σκοπό, αυτόν για τον οποίο έχουν κατασκευαστεί. Ο βασικότερος λόγος είναι το κόστος κατασκευής που αυξάνει όσο πιο σύνθετος είναι ο σχεδιασμός ενός προϊόντος. Αν λάβουμε υπόψη ότι η βασική εφαρμογή του ρομποτικού οχήματος που κατασκευάζουμε είναι η εκπαίδευση και η έρευνα, αμέσως δημιουργείται η ανάγκη πρόβλεψης για δυνατότητα αναβάθμισης στο ηλεκτρονικό κομμάτι, αλλά και στην κατασκευή αν το θελήσουμε. Ο σχεδιασμός του οχήματος έγινε λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση για μετέπειτα αναβάθμιση. Το σασί του ρομπότ κατασκευάστηκε από ανοξείδωτα ελάσματα που πολύ εύκολα μπορούν να συναρμολογηθούν ή να αποσυναρμολογηθούν, αλλάζοντας την χρήση και την μορφή του. Επίσης έχουν προβλεφτεί οπές σε πολλά σημεία της κατασκευής για τοποθέτηση και άλλων πλακετών, αισθητήρων, διακοπών, οθόνης υγρών κρυστάλλων, Laser Scanner κλπ.

5 Κινηματική ανάλυση του ρομπότ που σχεδιάστηκε

Στόχος του κεφαλαίου που ακολουθεί είναι η κατανόηση της κινηματικής συμπεριφοράς του ρομποτικού οχήματος, τόσο για την μηχανολογική σχεδίαση, όσο και για την δημιουργία λογισμικού ικανού να το κινεί αυτόνομα. Αρχικά γίνεται αναφορά στην διαφορική οδήγηση και στα γεωμετρικά δεδομένα που επηρεάζουν την κινηματική του ρομπότ. Ακολουθούν οι βαθμοί ελευθερίας του οχήματος και η επίλυση του ορθού και αντίστροφου κινηματικού προβλήματος.

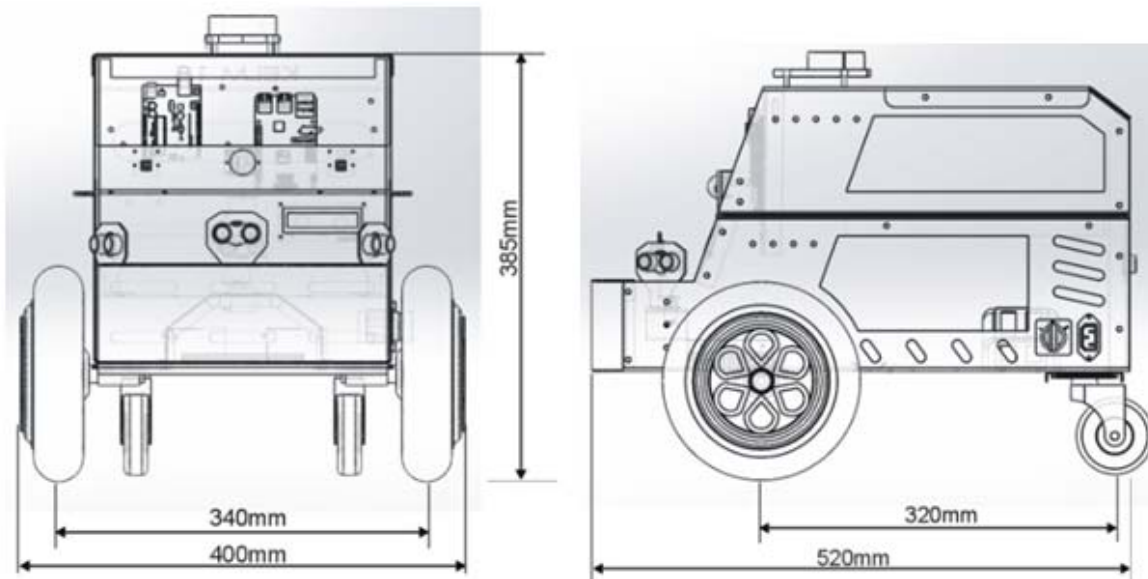
5.1 Όχημα διαφορικής οδήγησης

Σε ένα όχημα με διαφορική οδήγηση η κίνηση βασίζεται σε δύο χωριστά κινούμενους τροχούς μη κατευθυντήριους τοποθετημένους σε ένα άξονα. Μπορεί έτσι να αλλάξει την κατεύθυνσή του μεταβάλλοντας τον σχετικό ρυθμό περιστροφής των τροχών του και επομένως δεν απαιτεί πρόσθετη κίνηση διεύθυνσης. Αν και οι δύο τροχοί κινούνται στην ίδια κατεύθυνση και ταχύτητα, το ρομπότ θα κινείται σε ευθεία γραμμή. Εάν και οι δύο τροχοί περιστραφούν με την ίδια ταχύτητα σε αντίθετες κατευθύνσεις, το ρομπότ θα περιστραφεί γύρω από το κεντρικό σημείο του άξονα. Διαφορετικά, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και την κατεύθυνση της, το κέντρο περιστροφής μπορεί να πέσει οπουδήποτε στη γραμμή που ορίζεται από τα δύο σημεία επαφής των ελαστικών. Ενώ το ρομπότ ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή, το κέντρο περιστροφής είναι μια άπειρη απόσταση από το ρομπότ. Καθώς η κατεύθυνση του ρομπότ εξαρτάται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση περιστροφής των δύο κινητήριων τροχών, αυτές οι πληροφορίες πρέπει να ανιχνεύονται και να ελέγχονται με μεγάλη ακρίβεια. Τα τροχήλατα ρομπότ διαφορικής οδήγησης χρησιμοποιούνται εκτενώς στη ρομποτική, καθώς η κίνηση τους είναι εύκολη και μπορεί να ελεγχθεί καλά. Τα περισσότερα εμπορικά ρομπότ στην αγορά χρησιμοποιούν σήμερα διαφορικό σύστημα διεύθυνσης κυρίως για το χαμηλό κόστος και την απλότητα τους.

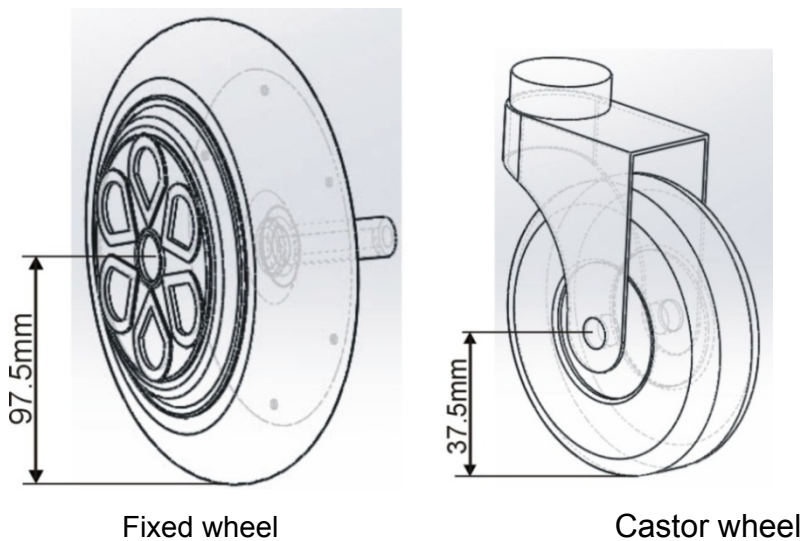
5.2 Γεωμετρικά δεδομένα

Πρόκειται για όχημα με τέσσερις τροχούς, δύο κινητήριους σταθερούς (Fixed wheel) στην μπροστινή πλευρά του οχήματος και άλλους δύο τροχούς ελεύθερους με άρθρωση

(Castor wheel) στο πίσω μέρος. Οι βασικές εξωτερικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος, αλλά και των τροχών φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν [11] [12]:



Εικόνα 11 Βασικές εξωτερικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος

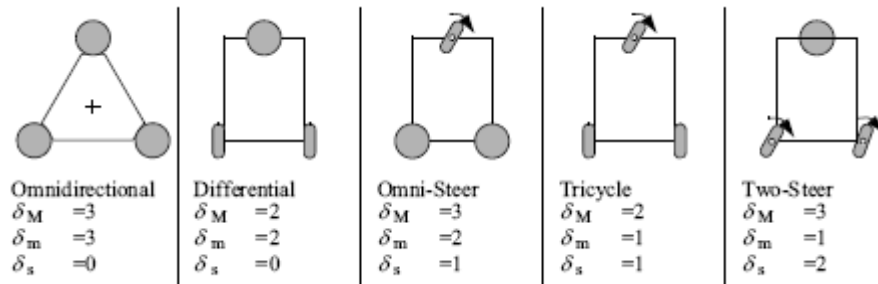


Εικόνα 12 Τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν στο ρομποτικό όχημα

5.3 Κινηματικά μοντέλα και περιορισμοί

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί για ρομπότ διαφορικής οδήγησης, αφού οι τροχοί δεν είναι κατευθυντήριοι η κατευθυντικότητα τους είναι $\delta_s = 0$, ενώ η κινητικότητα τους είναι $\delta_m = 2$. Η κίνησή τους γίνεται στην επιφάνεια που ορίζεται από τους άξονες x, y . Οι βαθμοί ελευθερίας δ_M των ρομπότ διαφορικής οδήγησης είναι [13]:

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s = 2 + 0 = 2 \quad (5.1)$$

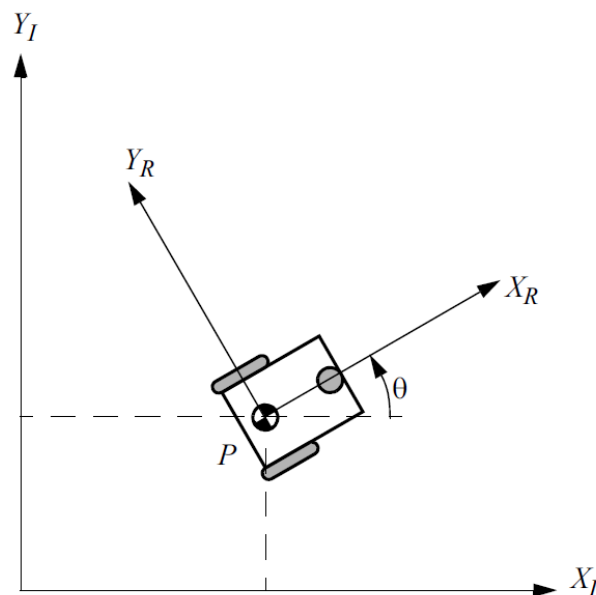


Εικόνα 13 Βαθμοί ελευθερίας ρομπότ

Να επισημάνουμε πως παρόλο που το όχημα διαφορικής οδήγησης κινείται στο επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες x, y , το διάνυσμα κίνησης του οχήματος δεν μπορεί να γίνει παράλληλο με τον άξονα που ορίζουν τα κέντρα των δύο τροχών.

5.4 Εξισώσεις διαφορικής οδήγησης

Στην παρούσα ανάλυση μοντελοποιούμε το ρομπότ ως άκαμπτο σώμα σε τροχούς, που λειτουργούν σε οριζόντιο επίπεδο. Η συνολική κινητικότητα του πλαισίου ρομπότ τοποθετείται στο επίπεδο με τρεις κινήσεις, δύο για την τοποθέτηση στο επίπεδο και μία για τον προσανατολισμό του ως προς τον κατακόρυφο άξονα, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο. Φυσικά, υπάρχουν πρόσθετοι βαθμοί ελευθερίας και ευελιξίας λόγω των αξόνων των τροχών και των αρθρώσεων των τροχών castor. Ωστόσο, ως σασί του ρομπότ αναφέρεται μόνο το άκαμπτο σώμα του ρομπότ, αγνοώντας τις εσωτερικές αρθρώσεις και τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας.



Εικόνα 14 Θέση ρομπότ στο αδρανειακό (I) και στο τοπικό (R) σύστημα αναφοράς

Για να καθορίσουμε τη θέση του ρομπότ στο επίπεδο, δημιουργούμε μια σχέση μεταξύ του γενικού πλαισίου αναφοράς (I) και του τοπικού πλαισίου αναφοράς (R) του ρομπότ. Οι άξονες X_I και Y_I ορίζουν μια αυθαίρετη αδρανειακή βάση στο επίπεδο σαν γενικό πλαίσιο αναφοράς ως προς κάποια θέση O : $\{X_I, Y_I\}$ [14].

Για να καθορισθεί η θέση του ρομπότ, επιλέγεται ένα σημείο P στο πλαίσιο του ρομπότ ως σημείο αναφοράς της θέσης του. Η βάση ορίζει δύο άξονες ως προς το P στο πλαίσιο του ρομπότ και είναι επομένως η τοπική αναφορά πλαισίου του ρομπότ. Η θέση του P στο γενικό πλαίσιο αναφοράς (I) καθορίζεται από τις συντεταγμένες x και y, καθώς και τη γωνιακή διαφορά μεταξύ του γενικού (I) και του τοπικού συστήματος αναφοράς, που συμβολίζεται ως θ .

Η θέση του ρομπότ ως διάνυσμα μπορεί να περιγραφεί με αυτά τα τρία στοιχεία:

$$\xi_R = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Για να περιγραφεί η κίνηση του ρομπότ, θα χρειαστεί να συσχετισθεί η κίνηση κατά μήκος των αξόνων του γενικού πλαισίου αναφοράς (I) με την κίνηση κατά μήκος των αξόνων του ρομπότ στο τοπικό πλαίσιο αναφοράς (R). Φυσικά, η συσχέτιση αυτή είναι συνάρτηση της τρέχουσας θέσης του ρομπότ και επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το ακόλουθο μητρώο περιστροφής:

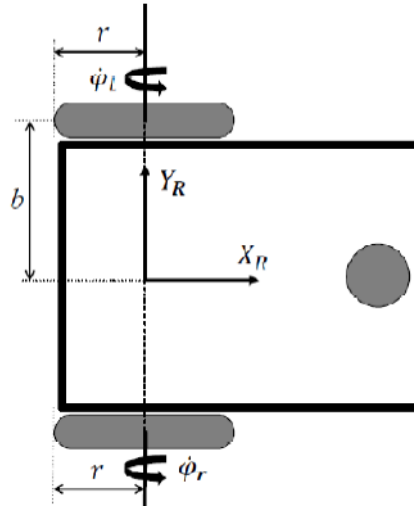
$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Αυτός ο πίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της κίνησης στο γενικό πλαίσιο αναφοράς $\{X_I, Y_I\}$ σε κίνηση στο τοπικό πλαίσιο αναφοράς $\{X_R, Y_R\}$. Αυτός ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της σχέσης $R(\theta)\dot{\xi}_I$, επειδή εξαρτάται από την τιμή του θ , όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta)\dot{\xi}_I \quad (5.4)$$

5.5 Ευθύ κινηματικό μοντέλο

Η εξίσωση (5.4) περιγράφει την κίνηση του ρομπότ, αφού δημιουργεί μια συνάρτηση που αποτελεί την ευθεία κινηματική του ρομπότ: Πώς κινείται το ρομπότ δεδομένης της γεωμετρίας και των ταχυτήτων των τροχών του;



Εικόνα 15 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Οχήματος Διαφορικής Οδήγησης

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται Όχημα Διαφορικής Οδήγησης, το οποίο έχει κινητήριους τροχούς με διάμετρο r . Λαμβάνοντας ένα σημείο P ως το μέσον μεταξύ των δύο κινητήριων τροχών, κάθε τροχός είναι σε απόσταση b από το κέντρο P . Δεδομένων των μεγεθών r , b και θ , καθώς και των ταχυτήτων περιστροφής κάθε τροχού, $\dot{\phi}_l$ και $\dot{\phi}_r$ για τον αριστερό (left) και τον δεξί (right) τροχό αντίστοιχα, προκύπτει ένα πρότυπο κινηματικό μοντέλο που προβλέπει τη συνολική ταχύτητα του ρομπότ στο γενικό σύστημα αναφοράς (I)[15]:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} = f(r, b, \theta, \dot{\phi}_l, \dot{\phi}_r) \quad (5.5)$$

Η συνολική ταχύτητα του ρομπότ στο γενικό σύστημα αναφοράς (I) συνδέεται με την ταχύτητα του ρομπότ στο τοπικό σύστημα αναφοράς (R) του ρομπότ με την σχέση:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_R \quad (5.6)$$

αντιστρέφοντας την σχέση (5.4) με $R(\theta)^{-1}$ να αποτελεί το αντίστροφο μητρώο στροφής του $R(\theta)$, δηλαδή:

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Στόχος είναι να υπολογιστεί αρχικά η κινηματική συνεισφορά του κάθε τροχού στο τοπικό σύστημα αναφοράς $\dot{\xi}_R$.

Θεωρείται το τοπικό σύστημα αναφοράς του ρομπότ προσανατολισμένο έτσι ώστε το ρομπότ να κινείται προς τα θετικά του άξονα $X (+X_R)$, όπως φαίνεται στην εικόνα 14.

Αρχικά εξετάζεται η συμβολή της ταχύτητας περιστροφής του κάθε τροχού στην ταχύτητα μεταφοράς του κεντρικού σημείου P κατά την κατεύθυνση $+X_R$. Η ταχύτητα μεταφοράς του αριστερού τροχού (l) κατά την κατεύθυνση $+X_R$ είναι:

$$\dot{x}_l = r\dot{\phi}_l \quad (5.8)$$

και η ταχύτητα μεταφοράς του δεξί τροχού (r) κατά την κατεύθυνση $+X_R$ είναι:

$$\dot{x}_r = r\dot{\phi}_r. \quad (5.9)$$

- Αν και οι δύο τροχοί περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα $\dot{\phi}_l = \dot{\phi}_r$, το σημείο P απλώς μεταφέρεται, χωρίς να περιστρέφεται. Η στιγμιαία ταχύτητα του σημείου P είναι ίση με την ταχύτητα του κάθε τροχού:

$$\dot{x} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_r)}{2} = r\dot{\phi}_r = \dot{x}_r \quad (5.10)$$

- Αν ο ένας τροχός περιστρέφεται, ενώ ο άλλος τροχός δεν συμμετέχει στην κίνηση και είναι ακίνητος, το σημείο P, αφού είναι στα μισά της απόστασης μεταξύ των δύο τροχών, θα κινείται στιγμιαία με τη μισή ταχύτητα:

$$\dot{x} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \quad (5.11)$$

- Όταν ένα διαφορικό ρομπότ στο οποίο κάθε τροχός περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις $\dot{\phi}_l = -\dot{\phi}_r$, έχει ως αποτέλεσμα ένα στάσιμο σημείο P, το οποίο όμως περιστρέφεται. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα του σημείου P είναι μηδενική $\dot{x} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} = r \frac{(\dot{\phi}_r + (-\dot{\phi}_r))}{2} = 0$

Η τιμή του \dot{y} είναι πάντα μηδενική αφού στα διαφορικά κινούμενα οχήματα δεν υπάρχει πλευρική κίνηση.

Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής του οχήματος $\dot{\theta}$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\dot{\theta} = r \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2b} \quad (5.12)$$

λόγω του ότι κάθε τροχός απέχει από το σημείο P απόσταση b.

Άρα συνολικά οι εξισώσεις έχουν ως εξής:

Γραμμική ταχύτητα στο σύστημα του ρομπότ: $\dot{x} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2}$

Εγκάρσια ταχύτητα ή ολίσθησης στο σύστημα του ρομπότ: $\dot{y} = 0$

Γωνιακή ταχύτητα στο σύστημα του ρομπότ: $\dot{\theta} = r \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2b}$

Έτσι, για το **ευθύ κινηματικό πρόβλημα** σε μητρική μορφή ισχύουν οι εξισώσεις κίνησης στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων (R):

$$\dot{\xi}_R = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

ή ισοδύναμα:

$$\dot{\xi}_R = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\dot{\phi}_r + \frac{r}{2}\dot{\phi}_l \\ 0 \\ \frac{r}{2b}\dot{\phi}_r + \frac{-r}{2b}\dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Σε μια γενική μητρική μορφή, η συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων $\dot{\xi}_R$ στο τοπικό σύστημα (R) και των γωνιακών ταχυτήτων $\dot{\phi}$, περιγράφεται από τη σχέση:

$$A\dot{\xi}_R = B\dot{\phi} \quad (5.15)$$

Συνεπώς για το ευθύ κινηματικό πρόβλημα ο υπολογισμός των ταχυτήτων $\dot{\xi}_R$ στο τοπικό σύστημα (R) προκύπτει από τη σχέση:

$$\begin{aligned} A^T A \dot{\xi}_R &= A^T B \dot{\phi} \Rightarrow \\ (A^T A)^{-1} A^T A \dot{\xi}_R &= (A^T A)^{-1} A^T B \dot{\phi} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\dot{\xi}_R = (A^T A)^{-1} A^T B \dot{\phi} \quad (5.16)$$

Για να υπολογιστούν οι ταχύτητες στο αδρανειακό σύστημα (I), πρέπει να πολλαπλασιαστεί το διάνυσμα ταχυτήτων $\dot{\xi}_R$ με τον αντίστροφο πίνακα στροφής $R(\theta)^{-1}$, εφαρμόζοντας την σχέση 5.6:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_I &= R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_R \Rightarrow \\ \dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} &= R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\dot{\phi}_r + \frac{r}{2}\dot{\phi}_l \\ 0 \\ \frac{r}{2b}\dot{\phi}_r + \frac{-r}{2b}\dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (5.17) \end{aligned}$$

Με γνωστές τις ταχύτητες στο αδρανειακό σύστημα (I), προκύπτει η θέση στο αδρανειακό σύστημα (I):

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ \theta_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Η τρέχουσα θέση x_n στον άξονα X_I , προκύπτει προσθέτοντας σε κάθε προηγούμενο x_{n-1} το νέο Δx , όπως προκύπτει από την ταχύτητα $\dot{x} = \Delta x / \Delta t$.

Δηλαδή:

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (5.19)$$

Το ίδιο ισχύει για το y και για το θ :

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y \quad (5.20)$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta \theta \quad (5.21)$$

5.6 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Για το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα, με γνωστές τις θέσεις του κινούμενου ρομπότ ανά πάσα στιγμή x_n, y_n, θ_n , ζητείται ο προσδιορισμός των γωνιακών ταχυτήτων $\dot{\phi}$ των δύο κινητήριων τροχών. Η συσχέτιση μεταξύ των γωνιακών ταχυτήτων $\dot{\phi}$ και των ταχυτήτων $\dot{\xi}_R$ στο τοπικό σύστημα (R), περιγράφεται από τη σχέση:

$$A \dot{\xi}_R = B \dot{\phi} \quad (5.22)$$

$$B^T A \dot{\xi}_R = B^T B \dot{\phi} \Rightarrow$$

$$(B^T B)^{-1} B^T A \dot{\xi}_R = (B^T B)^{-1} B^T B \dot{\phi} \Rightarrow$$

$$\dot{\phi} = (B^T B)^{-1} B^T A \dot{\xi}_R \quad (5.23)$$

Αντικαθιστώντας από τη σχέση (5.13), για το πρόβλημα που αναλύεται, προκύπτει η σχέση:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & 0 & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & 0 & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Άρα πρέπει να είναι γνωστές οι ταχύτητες $\dot{\xi}_R$ στο τοπικό σύστημα (R), που περιγράφονται από τη σχέση:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta) \dot{\xi}_I \quad (5.25)$$

Ως εκ τούτου, χρειάζεται να είναι γνωστές οι ταχύτητες στο αδρανειακό σύστημα (I), που περιγράφονται από τη σχέση:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x / \Delta t \\ \Delta y / \Delta t \\ \Delta \theta / \Delta t \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Συνεπώς πρέπει να είναι γνωστές οι θέσεις x_n, y_n, θ_n του κεντρικού σημείου P του κινούμενου ρομπότ, ως προς το αδρανειακό σύστημα (I), δηλαδή:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ \theta_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

οι οποίες όμως αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του αντιστρόφου προβλήματος.

5.7 Κινηματικοί περιορισμοί

Η γενική μορφή των εξισώσεων που περιγράφουν τους περιορισμούς της κινηματικής ενός κινούμενου ρομπότ είναι:

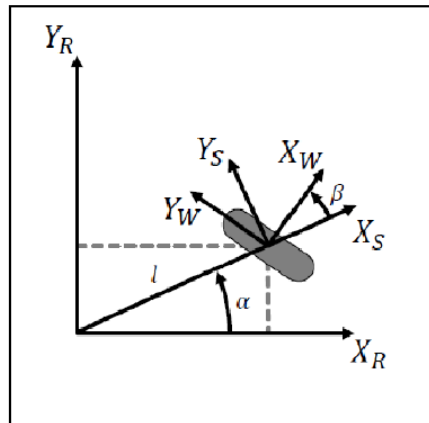
$$J_1(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I - \dot{\varphi}r = 0 \quad (5.28)$$

$$C_1(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (5.29)$$

Για την περίπτωση οχήματος που οι κινητήριοι τροχοί μπορούν να περιστρέφονται με γωνία τοποθέτησης β οι εξισώσεις αυτές παίρνουν τη μορφή[16]:

$$[-\sin \alpha + \beta \quad \cos \alpha + \beta \quad l \cos \beta]R(\theta)\dot{\xi}_I - \dot{\varphi}r = 0 \quad (5.30)$$

$$[\cos \alpha + \beta \quad \sin \alpha + \beta \quad l \sin \beta]R(\theta)\dot{\xi}_I = 0$$



Εικόνα 16 Θέση κινητήριων τροχών

Όταν το όχημα έχει σταθερούς τροχούς, μη κατευθυντικούς δηλαδή ισχύει $\beta=0$, αποτελεί δηλαδή όχημα διαφορικής οδήγησης, τότε οι παραπάνω εξισώσεις απλοποιούνται στη μορφή:

$$[-\sin \alpha \quad \cos \alpha \quad b]R(\theta)\dot{\xi}_I - \dot{\varphi}r = 0$$

$$[\cos \alpha \quad \sin \alpha \quad 0]R(\theta)\dot{\xi}_I = 0$$

5.8 Εφαρμογή στη γεωμετρία του ρομπότ που σχεδιάστηκε

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις στη γεωμετρία του ρομπότ που σχεδιάστηκε, για την οποία ισχύουν:

$r = 97.5 \text{ mm}$ (ακτίνα τροχού) και

$b = 170 \text{ mm}$ (ημι-απόσταση τροχών) ή $2b = 340 \text{ mm}$ (απόσταση τροχών)

προκύπτουν:

- οι ταχύτητες του ρομπότ στο τοπικό σύστημα (R) συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής των δύο τροχών:

$$\dot{\xi}_R = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{97.5}{2} & \frac{97.5}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{97.5}{340} & -\frac{97.5}{340} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

- οι ταχύτητες κίνησης του ρομπότ στο αδρανειακό σύστημα (I) συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής των δύο τροχών:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} &= R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\dot{\phi}_r + \frac{r}{2}\dot{\phi}_l \\ 0 \\ \frac{r}{2b}\dot{\phi}_r + \frac{-r}{2b}\dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\dot{\phi}_r + \frac{r}{2}\dot{\phi}_l \\ 0 \\ \frac{r}{2b}\dot{\phi}_r + \frac{-r}{2b}\dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{97.5}{2}\dot{\phi}_r + \frac{97.5}{2}\dot{\phi}_l \\ 0 \\ \frac{97.5}{340}\dot{\phi}_r + \frac{-97.5}{340}\dot{\phi}_l \end{bmatrix} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \left(\frac{97.5}{2} \dot{\phi}_r + \frac{97.5}{2} \dot{\phi}_l \right) \\ \sin(\theta) \left(\frac{97.5}{2} \dot{\phi}_r + \frac{97.5}{2} \dot{\phi}_l \right) \\ \frac{97.5}{340} \dot{\phi}_r + \frac{-97.5}{340} \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (5.32)$$











6 Έλεγχος αντοχής του ρομποτικού οχήματος







Στο κεφάλαιο που ακολουθεί υπολογίζεται η μάζα του ρομποτικού οχήματος εξετάζοντας δύο διαφορετικά υλικά κατασκευής α) ανοξείδωτος χάλυβας β) αλουμίνιο. Στην συνέχεια με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται έλεγχος αντοχής του ρομποτικού οχήματος σε φορτίο 50Kg για τα υλικά που προαναφέραμε και παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα.

6.1 Υπολογισμός μάζας

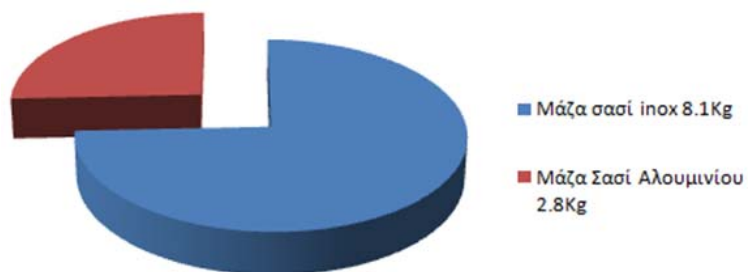
Το ίδιο βάρος όπως και το ωφέλιμο φορτίο που μεταφέρει ένα ρομποτικό όχημα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο αυτόνομης λειτουργίας, αλλά και την ευστάθεια του οχήματος. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού η επιλογή των τυποποιημένων εξαρτημάτων και των υλικών κατασκευής πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και τη μάζα τους.

Γνωρίζοντας όλα τα τυποποιημένα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε στο ρομποτικό όχημα, συντάσσουμε αναλυτικό πίνακα με την μάζα του κάθε εξαρτήματος. Το ίδιο κάνουμε και για τα εξαρτήματα που έχουμε σχεδιάσει εμείς σε ηλεκτρονική μορφή και δεν τα έχουμε μέχρι στιγμής κατασκευάσει. Σε νέο πίνακα γνωρίζοντας τον όγκο των εξαρτημάτων, και το ειδικό βάρος του ανοξείδωτου χάλυβα υπολογίζουμε την μάζα τους. Όλη η διαδικασία που προηγήθηκε με υλικό των ανοξείδωτο χάλυβα επαναλαμβάνεται και με υλικό το αλουμίνιο για να εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

Εξαρτήματα που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες του ρομπότ							
α/α	Εξάρτημα	Εικόνα εξαρτήματος	Όγκος/Τεμ. (cm ³)	Αριθμός τεμαχίων	Συνολικός όγκος τεμαχίων (cm ³)	Ανοξείδωτο με $\rho=8\text{gr/cm}^3$	Αλουμίνιο με 2.69gr/cm^3
1	kampili2		38.12	1	38.12	305.0	102.5
2	kapaki		113.39	1	113.39	907.1	305.0
3	Kapaki kampilis		12.95	1	12.95	103.6	34.8
4	Lama rodas megalis		32.33	1	32.33	258.6	87.0
5	Lama rodas mikri		34.76	1	34.76	278.1	93.5
6	plati		51.12	1	51.12	409.0	137.5
7	Plati 2os		29.64	1	29.64	237.1	79.7
8	plati R A		65.25	1	65.25	522.0	175.5
9	prosopsi		28.49	1	28.49	227.9	76.6
10	Raga Rele		4.58	1	4.58	36.6	12.3

11	vasi		510.51	1	510.51	4084.1	1373.3
12	vasi cameras		19.24	1	19.24	153.9	51.8
13	vasi sensor		18.7	1	18.7	149.6	50.3
14	Βάση πίσω ροδας2		5.86	4	23.44	187.5	63.1
15	Βάση ρόδας		4.96	4	19.84	158.7	53.4
16	omega Al		25.32	2	50.64		136.2
17	omega INOX		5.75	2	11.5	92.0	
	Σύνολο					8110.9	2832.6

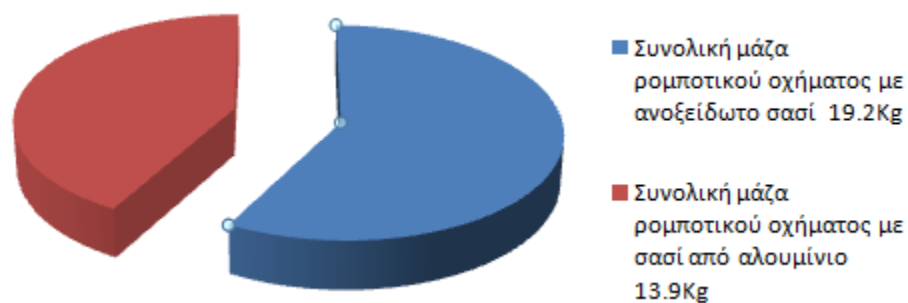
Από τον πίνακα που προηγήθηκε βλέπουμε ότι μόνο το σασί του ρομποτικού οχήματος από ανοξείδωτο χάλυβα έχει μάζα 8.1Kg, ενώ αν ήταν κατασκευασμένο από αλουμίνιο θα ήταν 2.8Kg, περίπου το 65% λιγότερο από μάζα που έχει ο ανοξείδωτος χάλυβας [17].



Εικόνα 17 Σύγκριση μάζας σασί από Ανοξείδωτο - Αλουμίνιο

Τυποποιημένα εξαρτήματα απαραίτητα για την υλοποίηση του ρομπότ					
α/α	Εξάρτημα	Εικόνα εξαρτήματος	Μάζα/Τεμ. (gr)	Αριθμός τεμαχίων	Συνολική μάζα (gr)
1	Μικρός τροχός		270	2	540.0
2	Μεγάλος τροχός		2500	2	5000.0
3	Μπαταρία		1800	3	5400.0
4	Βίδες inox		4	50	200.0
Σύνολο					11140.0

Η συνολική μάζα του ρομποτικού οχήματος με σασί από ανοξείδωτο χάλυβα έχει μάζα 19.2Kg, αν το σασί το κατασκευάσουμε από αλουμίνιο η συνολική μάζα του ρομποτικού οχήματος θα είναι 13.9Kg [18].



Εικόνα 18 Σύγκριση μάζας ρομποτικού οχήματος Ανοξείδωτο - Αλουμίνιο

6.2 Προσδιορισμός τάσεων - παραμορφώσεων του ρομπότ

Στόχος της ενότητας είναι να εξετάσουμε αν το ρομποτικό όχημα που έχουμε σχεδιάσει αντέχει συνολικά το ίδιο βάρος του και επιπλέον στατικό φορτίο 50Kg. Η επίλυση πραγματοποιείται αρχικά μόνο με το ίδιο βάρος του οχήματος και επαναυπολογίζουμε προσθέτοντας φορτίο 50Kg στη βάση του οχήματος. Επαναλαμβάνουμε το προηγούμενο βήμα με υλικό κατασκευής το αλουμίνιο, ώστε να παρουσιάσουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο υλικών με τα πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα τους. Ζητούμενα από την επίλυση των παραπάνω περιπτώσεων, είναι ο προσδιορισμός των μέγιστων τάσεων και παραμορφώσεων και η σύγκριση των δύο υλικών κατασκευής.

Η επίλυση έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM) και πιο συγκεκριμένα με το λογισμικό πακέτο Ansys14.

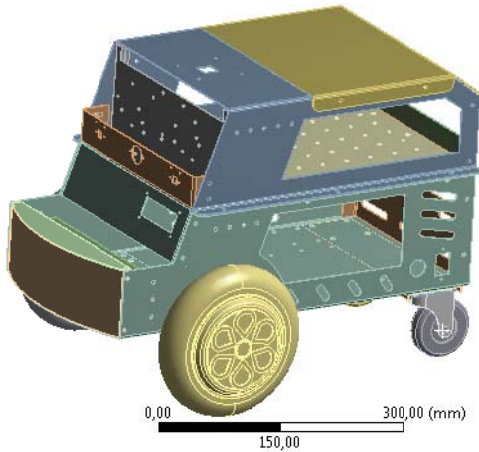
Σήμερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) θεωρείται ως μια από τις καθιερωμένες τεχνικές για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών σε διάφορους τομείς όπως: Μηχανολογία, πολιτικούς μηχανικούς, ιατρική κλπ. Είναι μέθοδος που χρησιμοποιείται σε διάφορα φυσικά προβλήματα και βασίζεται στην αριθμητική λύση ενός πολύπλοκου συστήματος διαφορικών εξισώσεων. Όταν έχουμε να επιλύσουμε ένα πρόβλημα όπου τα φορτία και η γεωμετρία της κατασκευής είναι απλή τότε μπορούμε να φτάσουμε στο αποτέλεσμα με την αναλυτική λύση των εξισώσεων. Η ανάγκη να λυθούν πιο πολύπλοκα προβλήματα ήταν ο λόγος που αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Τα προηγούμενα χρόνια ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθεί γιατί έχει πολύ μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Αυτή η αδυναμία ξεπεράστηκε με την μεγάλη ανάπτυξη των υπολογιστών. Για την επίλυση ενός προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα ακόλουθα βήματα.

- Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου CAD: Με οποιοδήποτε λογισμικό πακέτο τρισδιάστατης σχεδίασης όπως: Solidwork, ProE, Catia, κλπ. Δημιουργούμε την τρισδιάστατη γεωμετρία και την αποθηκεύουμε σε μορφή (IGES,STEP) που μπορεί να αναγνωριστεί από το λογισμικό πακέτο που θα χρησιμοποιήσουμε για την επίλυση του προβλήματος.
- Ορισμός ιδιοτήτων υλικού: Πρέπει να δηλώσουμε στο λογισμικό FEA το υλικό, ή κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αν μας ζητηθούν όπως το μέτρο

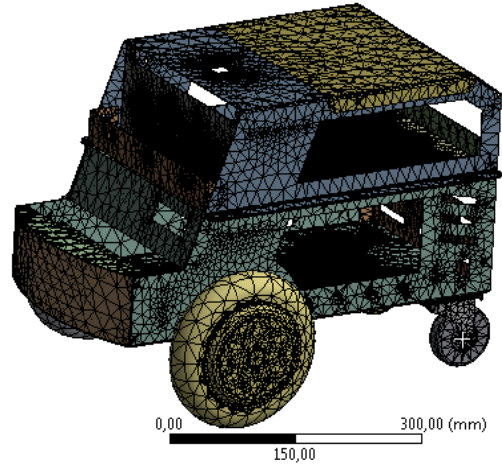
ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson κλπ. και όλες τις άλλες απαραίτητες ιδιότητες που απαιτούνται για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

- Πλέγμα (Meshing): Η δημιουργία πλέγματος είναι μια κρίσιμη λειτουργία στο FEA. Σε αυτή τη λειτουργία, η γεωμετρία CAD χωρίζεται σε πολλά μικρά κομμάτια. Τα μικρά κομμάτια ονομάζονται πλέγματα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και η διάρκεια της επίλυσης εξαρτώνται από τον αριθμό των στοιχείων και την γεωμετρία τους. Με την αύξηση του μεγέθους των στοιχείων, αυξάνεται η ταχύτητα επίλυσης, αλλά μειώνεται η ακρίβεια.
- Καθορισμός της οριακών συνθηκών (Defining Boundary Condition): Πρέπει να εισάγουμε στο πρόγραμμα τις θέσεις των στηρίξεων και των φορτίσεων του φορέα.
- Επίλυση (Solve): Σε αυτό το βήμα ξεκινά το λογισμικό FEA την επίλυση του προβλήματος για τις καθορισμένες ιδιότητες υλικού, τις οριακές συνθήκες και το μέγεθος των στοιχείων.
- Αποτελέσματα (Post Processing): Μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα της επίλυσης σε αυτό το βήμα, σε διάφορες μορφές: Έγχρωμα γραφήματα, αριθμητικές τιμές και κινούμενες εικόνες.

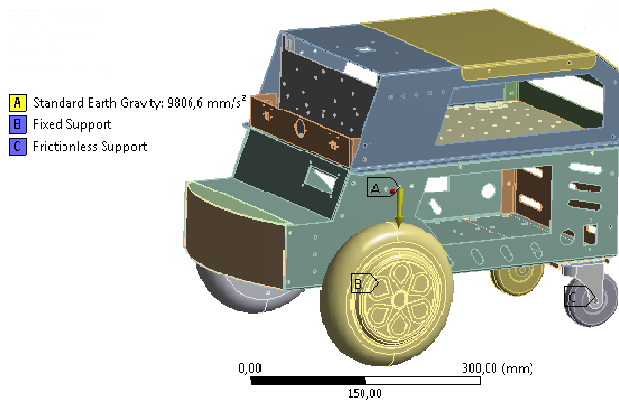
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η εισαγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας στο Ansys, η δημιουργία πλέγματος (Mesh), οι θέσεις στήριξης του οχήματος και η εφαρμογή των φορτίσεων. [19].



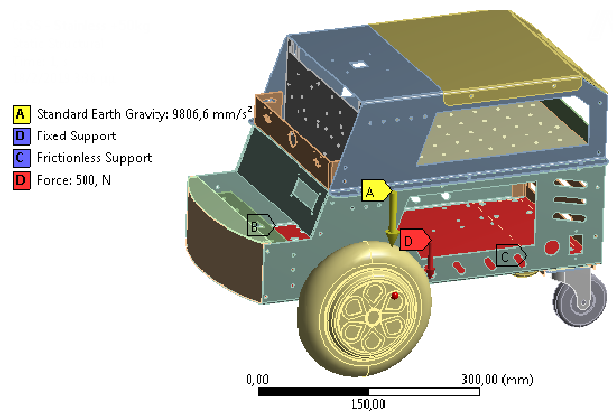
Γεωμετρία της κατασκευής



Πεπερασμένα στοιχεία



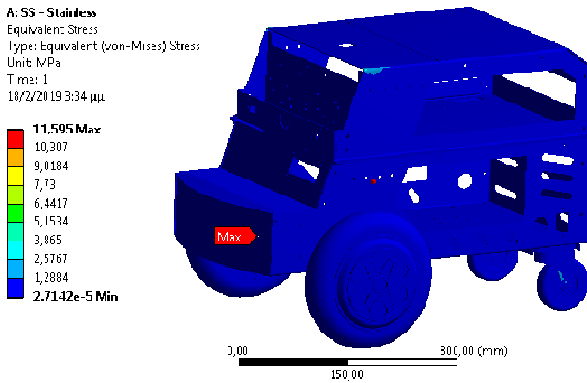
Στηρίξεις και ίδιο βάρος



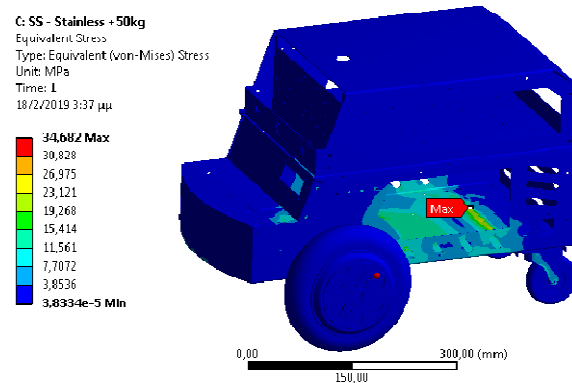
Στηρίξεις, ίδιο βάρος και 50Kg

Εικόνα 19 Γεωμετρία οχήματος και καθορισμός οριακών συνθηκών

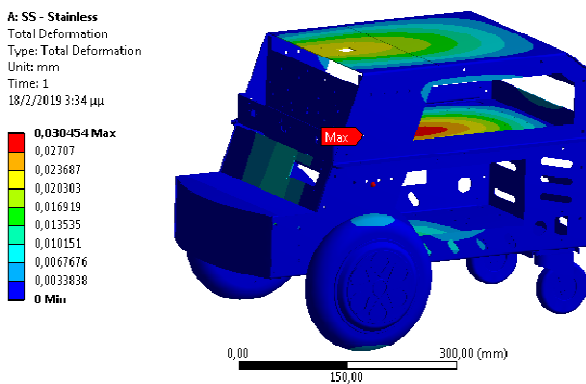
Ακολουθούν τα τελικά αποτελέσματα της επίλυσης για τον εντοπισμό της θέσης και του μέτρου των μέγιστων τάσεων-παραμορφώσεων του ρομποτικού οχήματος με υλικό κατασκευής τον ανοξείδωτο χάλυβα [20].



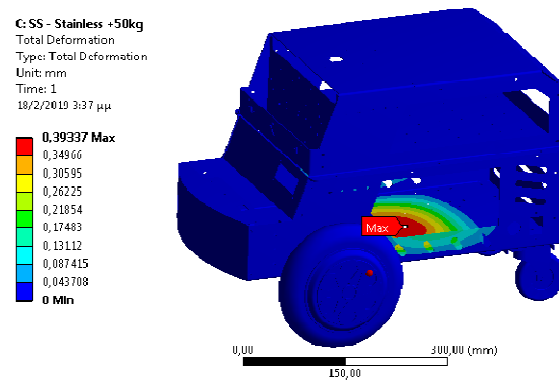
Ισοδύναμη τάση με ίδιο βάρος



Ισοδύναμη τάση με συνολικό βάρος



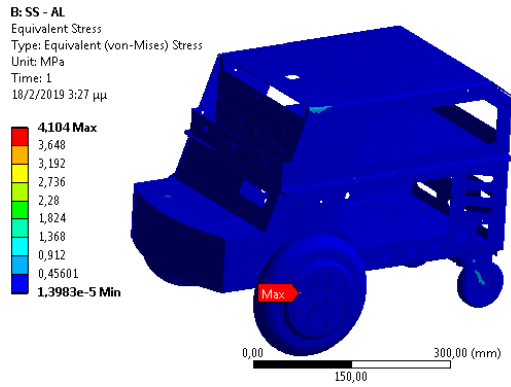
Παραμορφώσεις από το ίδιο βάρος



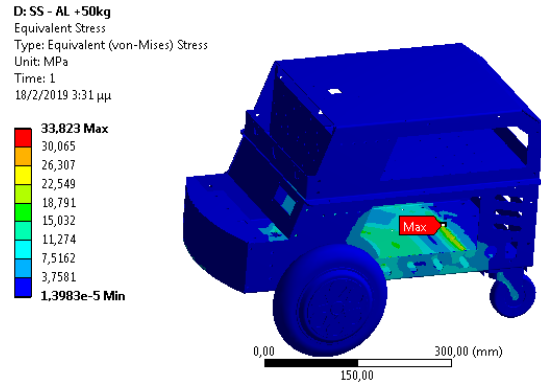
Παραμορφώσεις από το συνολικό φορτίο

Εικόνα 20 Αποτελέσματα τάσεων-παραμορφώσεων ανοξείδωτου χάλυβα

Ακολουθούν τελικά αποτελέσματα της επίλυσης για τον εντοπισμό της θέσης και του μέτρου των μέγιστων τάσεων-παραμορφώσεων του ρομποτικού οχήματος με υλικό κατασκευής το αλουμίνιο [21].

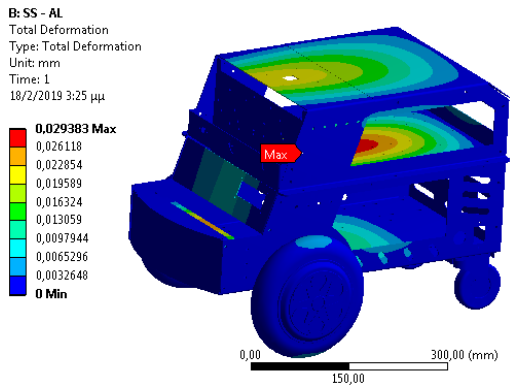


Ισοδύναμη τάση με ίδιο βάρος

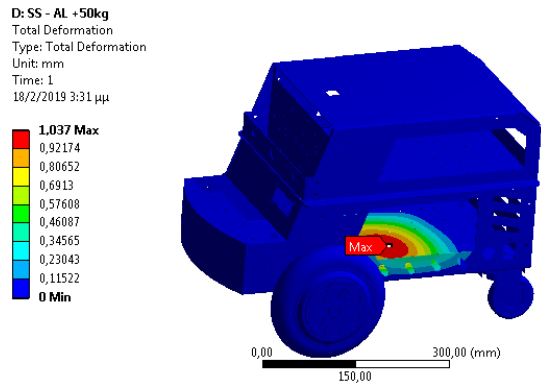


Ισοδύναμη τάση με συνολικό βάρος

Εικόνα 5.2.1



Παραμορφώσεις από το ίδιο βάρος



Παραμορφώσεις από το συνολικό φορτίο

Εικόνα 21 Αποτελέσματα τάσεων-παραμορφώσεων από αλουμίνιο

Ακολουθεί πίνακας με όλα τα παραπάνω αποτελέσματα συγκεντρωμένα .

	Ανοξείδωτος χάλυβας $\rho=8000\text{Kg/m}^3$ $E=193\text{GPa}$	Αλουμίνιο $\rho=2690\text{Kg/m}^3$ $E=68.3\text{GPa}$
Βάρος σασί	8.1Kg	2.8Kg
Τάσεις με το ίδιο βάρος	11.6	4.1
Τάσεις με το συνολικό βάρος	34.7	33.8
Παραμόρφωση από το ίδιο βάρος	0.03	0.03
Παραμόρφωση από το συνολικό βάρος	0.39	1.04

Είναι πολύ σημαντικό στο Ansys κατά την επίλυση του προβλήματος να αλλάζουμε μόνο το υλικό κατασκευής, κρατώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα ίδια ώστε τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε να είναι συγκρίσιμα.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι χρησιμοποιώντας υλικό κατασκευής των ανοξείδωτο χάλυβα ο συντελεστής ασφαλείας του ρομποτικού οχήματος είναι $\nu = \frac{\text{Μέγιστη τάση}}{\text{Τάση λειτουργίας}} = \frac{193\text{GPa}}{34.7\text{GPa}} = 5.5$ και η μέγιστη παραμόρφωση

0.39mm ενώ με υλικό κατασκευής το αλουμίνιο ο συντελεστής ασφαλείας

$\nu = \frac{\text{Μέγιστη τάση}}{\text{Τάση λειτουργίας}} = \frac{68.3\text{GPa}}{33.8\text{GPa}} = 2$ και μέγιστη παραμόρφωση 1.04mm.

7 Μέθοδοι κατεργασίας και κατασκευή εξαρτημάτων του ρομπότ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατεργασία κοπής λαμαρίνας αφού πρώτα γίνει περιγραφή των ακόλουθων μεθόδων κοπής: α) μέθοδος κοπής με πλάσμα β) μέθοδος κοπής με υδροκοπή γ) μέθοδος κοπής με Laser. Επίσης γίνεται περιγραφή της κατεργασίας παραμόρφωσης λαμαρινών με κάμψη (Bending). Ο σχεδιασμός της διαδικασίας παραγωγής της βάσης συγκράτησης των κινητήριων τροχών και η δημιουργία G κώδικα με την βοήθεια λογισμικού CAM (Computer Aided Manufacturing).

7.1 Μέθοδοι κατεργασίας ανοξείδωτης λαμαρίνας

Η παραγωγή των μη τυποποιημένων εξαρτημάτων του ρομποτικού οχήματος από εμάς, είναι ένα στάδιο της κατασκευής το οποίο μπορεί να πολλαπλασιάσει το κόστος κατασκευής όλου του έργου. Πρέπει λοιπόν να σχεδιάζουμε απλά και να λαμβάνουμε υπόψη το κόστος των υλικών, τα στάδια κατεργασίας που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση του κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά, αλλά και το χρόνο κατεργασίας στο κάθε στάδιο. Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν το αποτέλεσμα ήταν να δοθεί μία πρωτότυπη αλλά και καινοτόμα λύση. Όλο το σασί να κατασκευαστεί από το ίδιο υλικό, με το ίδιο πάχος και με τις ίδιες κατεργασίες. Το υλικό κατασκευής επιλέχθηκε να είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας σε μορφή λαμαρίνας 1.5mm για λόγους καλαισθησίας, μηχανικής αντοχής και αντιδιαβρωτικής προστασίας. Έγινε η σχεδίαση με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού σχεδίασης και ακολούθησε ο έλεγχος αντοχής της κατασκευής με το ίδιο βάρος και 50Kg πρόσθετο φορτίο. Κατά τον έλεγχο αντοχής βρέθηκε ότι το εξάρτημα omega_inox αντέχει αλλά ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ κοντά στην μονάδα.

Μία οικονομική λύση θα ήταν να κατασκευαστεί και δεύτερο εξάρτημα με λίγο μεγαλύτερες διαστάσεις τοποθετημένο πάνω από το πρώτο, ή ένα νέο εξάρτημα με μεγαλύτερο πάχος. Τελικά σχεδιάστηκε από την αρχή νέα βάση από αλουμίνιο, για μεγαλύτερη αντοχή η οποία κατασκευάστηκε με συμβατική κατεργασία σε κέντρο CNC.

Η κοπή φύλλων μετάλλου είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία σε πολλά τμήματα της βιομηχανίας. Η λαμαρίνα μπορεί να κοπεί και να λυγίσει σε μια ποικιλία από σχήματα που βρίσκουν πολυάριθμες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπως στέγες,

προσόψεις κτιρίων, φτερά αεροπλάνων και πολλά άλλα. Ακολουθεί περιγραφή με τρεις από τις πιο γνωστές μεθόδους κοπής λαμαρίνας που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να κατασκευάσουμε τα εξαρτήματα μας. Πρόκειται για την α) μέθοδο κοπής με πλάσμα β) μέθοδο κοπής με υδροκοπή γ) μέθοδο κοπής με Laser. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η κοπή Laser για λόγους ποιότητας επιφάνειας κοπής και κόστους. Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την τελική επιλογή της μεθόδου κοπής που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής: Υλικό που έχουμε να κατεργαστούμε, πάχος, κόστος κατεργασίας, ταχύτητα κοπής και ποιότητα τελικής επιφάνειας.

Μέθοδος κοπής με πλάσμα

Η κοπή με πλάσμα χρησιμοποιεί ένα εστιασμένο ρεύμα ιονισμένου αερίου (πλάσματος) για να κόψει το φύλλο μετάλλου. Το πλάσμα ρέει σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και υψηλή ταχύτητα και κατευθύνεται προς την θέση κοπής με ένα ακροφύσιο. Όταν το πλάσμα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του μετάλλου τήκεται και ταυτόχρονα απομακρύνεται από το σημείο της κοπής. Η ροή του πλάσματος σε σχέση με την απόσταση από το φύλλο λαμαρίνας ελέγχεται με ακρίβεια ώστε να πετυχαίνουμε όσο το δυνατό επιφάνεια με μικρότερη τραχύτητα. Η κοπή με πλάσμα εκτελείται με έναν πυρσό (τσιμπίδα) πλάσματος που μπορεί να συγκρατείται με το χέρι ή πιο συχνά να ελέγχεται από υπολογιστή. Οι ψηφιακά ελεγχόμενες από υπολογιστή μηχανές κοπής πλάσματος επιτρέπουν την κατασκευή πολύπλοκων και υψηλής ακριβείας τεμαχίων. Η κοπή πλάσματος μειονεκτεί στην ποιότητα της επιφάνειας κοπής η οποία έχει μεγάλη τραχύτητα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ωστόσο λόγω της δυνατότητας κοπής υλικών με μεγάλο πάχος σε συνδυασμό με το μικρό κόστος αγοράς της μηχανής η κοπή πλάσματος χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές [22].



Εικόνα 22 Κατεργασία κοπής με πλάσμα

Μέθοδος κοπής με Υδροκοπή (waterjet cutting)

Η κοπή με ψεκασμό νερού (waterjet cutting) αποτελεί μη-συμβατική διαδικασία κοπής υλικών. Σαν ιδέα είναι απλή αφού χρησιμοποιεί νερό για την κοπή, αλλά και σύνθετη διότι η πίεση του νερού φτάνει και σε μερικές περιπτώσεις τα 6000 bar. Την συναντάμε με δύο βασικές διαφορές α) Την (WJM) Water-Jet Machining κατά την οποία έχουμε νερό πολύ μεγάλης ταχύτητας και λεπτής δέσμης η οποία όταν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του υλικού που θέλουμε να κόψουμε την διαβρώνει. β) Την (AWJM) Abrasive Water-Jet Machining νερό υψηλής ταχύτητας το οποίο περιέχει λειαντικούς κόκκους οι οποίοι παρασύρονται από την δέσμη του νερού ,προσπίπτει στο κατεργαζόμενο κομμάτι και το διαβρώνει. Η μέθοδος με υδροκοπή προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως:

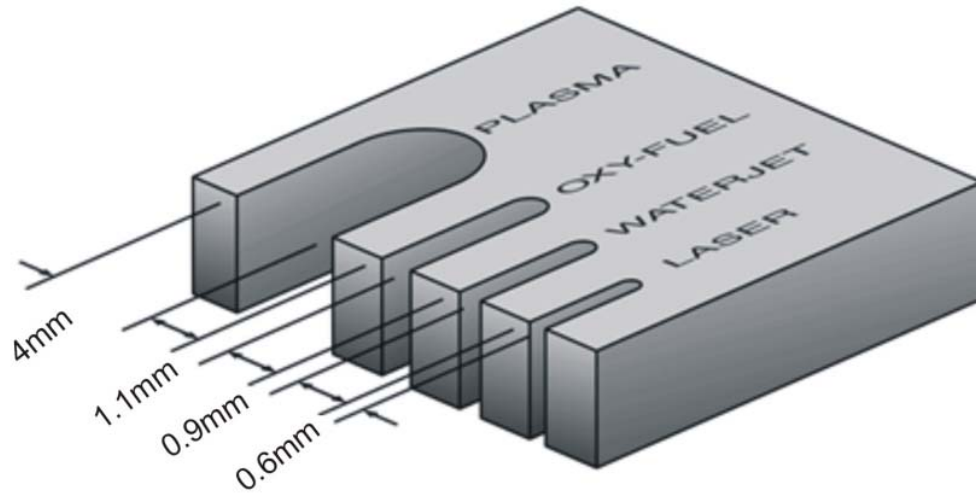
- Στην θέση επαφής της δέσμης νερού δεν αναπτύσσεται ζώνη θερμότητας και δεν προκαλείται σκλήρυνση ή αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Μπορούμε να κατεργαστούμε οποιοδήποτε υλικό.
- Το περιβάλλον εργασίας κατά την κοπή είναι καθαρό χωρίς καπνό, αναθυμιάσεις, σκόνες και αβλαβές για τον άνθρωπο [23].



Εικόνα 23 Κατεργασία κοπής με υδροκοπή

Μέθοδος κοπής με Laser

Η κοπή λέιζερ (Laser cutting) χρησιμοποιεί ένα υψηλής ισχύος λέιζερ για να κόψει το φύλλο μετάλλου. Μια σειρά καθρεφτών και φακών κατευθύνει και εστιάζει μια δέσμη φωτός υψηλής ενέργειας στην επιφάνεια του φύλλου μετάλλου που πρόκειται να κοπεί. Όταν η δέσμη χτυπά στην επιφάνεια, η ενέργεια της δέσμης λιώνει και εξατμίζει το μέταλλο. Το λιωμένο μέταλλο και ο ατμός απομακρύνεται από την περιοχή με φύσημα αδρανούς αερίου αφήνοντας την επιφάνεια κοπής με ένα υψηλής ποιότητας αποτέλεσμα. Η θέση της δέσμης λέιζερ σε σχέση με την λαμαρίνα ελέγχεται με ακρίβεια ώστε να επιτρέψει στο λέιζερ να ακολουθήσει την επιθυμητή διαδρομή κοπής. Η κοπή με λέιζερ μπορεί να γίνει σε φύλλα μετάλλων που είναι σιδηρούχα και μη σιδηρούχα. Υλικά με χαμηλή ανακλαστικότητα και αγωγιμότητα επιτρέπουν την ακτίνα λέιζερ να είναι πιο αποτελεσματική όπως ο απλός χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας το τιτάνιο είναι τα πιο κοινά. Η κοπή με λέιζερ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί πέρα από τις εφαρμογές σε μέταλλα και για την κοπή πλαστικών, κεραμικών, ξύλου κ.α. Σήμερα υπάρχουν στο εμπόριο σύνθετα CNC Laser cutting πολλών αξόνων με τα οποία μπορούμε να κατεργαστούμε διάφορα προφίλ (κυκλικά, γωνίες, τετράγωνα κλπ). Ανάλογα με το πάχος του υλικού, είναι δυνατά μικρά πλάτη τομής (kerf) της τάξης των 0,10mm [24].



Εικόνα 24 Πλάτος αφαίρεσης υλικού (kerf) από διάφορες κατεργασίες κοπής

Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας κοπής με laser [25]:

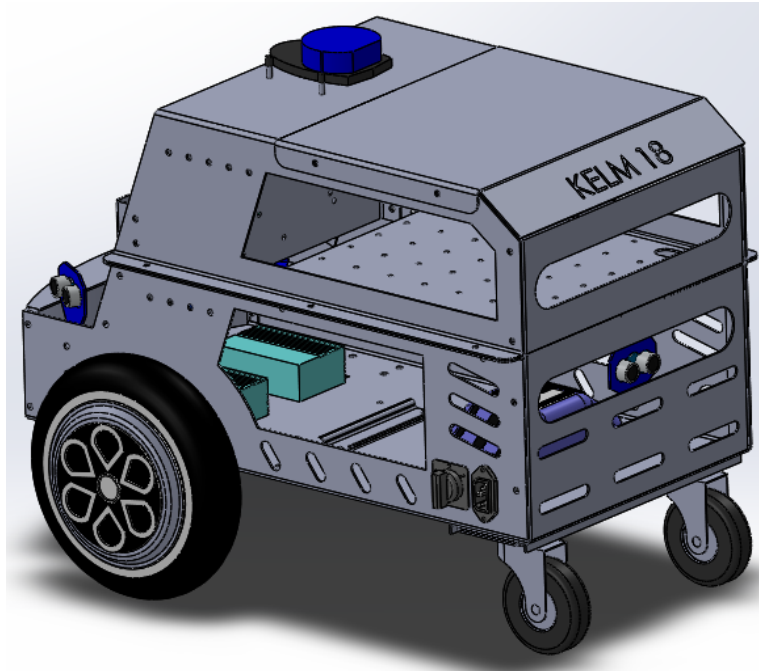
- Υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια επεξεργασίας
- Πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας κοπής
- Πολύ στενή δέσμη Laser με αποτέλεσμα μικρό πλάτος τομής (kerf)
- Πολύ μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.
- Κοπή περίπλοκων γεωμετριών
- Δυνατότητα κοπής και χάραξης
- Κατεργασία πολλών διαφορετικών υλικών
- Δεν ασκείται καμία δύναμη στο προς κατεργασία τεμάχιο
- Ο εύκολος και γρήγορος έλεγχος της ισχύος της δέσμης του λέιζερ.



Εικόνα 25 Κατεργασία κοπής με Laser

Κατεργασία κοπής λαμαρίνας με laser

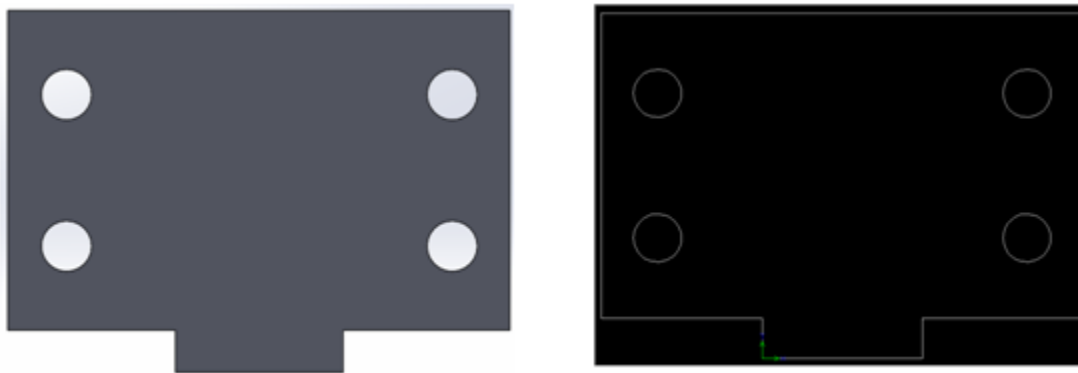
Βρισκόμαστε στο σημείο που έχουμε μελετήσει, υπολογίσει, σχεδιάσει και τέλος συναρμολογήσει με την βοήθεια υπολογιστή όλα τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το ρομποτικό όχημα. Έχουμε δηλαδή την τελική μορφή σε κατασκευαστικό σχέδιο, όλων των επιμέρους στοιχείων. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι πρέπει να έχουμε ελέγξει όλα τα σχέδια από λάθη σε διαστάσεις ή από παραλήψεις σε κατεργασίες οι οποίες δεν διορθώνονται μετά την κοπή. Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι σκληρό υλικό και αρκετά δύσκολο στην κατεργασία με εργαλεία χειρός. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι αν χρειαστεί να τρυπήσουμε σε κάποιο σημείο το έλασμα για να προσθέσουμε κάποιο νέο εξάρτημα θα είναι αρκετά δύσκολο και δεν θα έχει το φινίρισμα όπως η κοπή laser [26].



Εικόνα 26 Τρισδιάστατη απεικόνιση του ρομπότ στο solid work

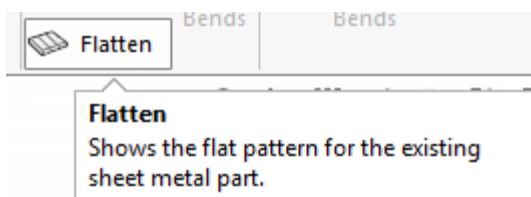
Για να κατεργαστούμε τα εξαρτήματα μας στο laser πρέπει να μετατρέψουμε τα σχεδιασμένα εξαρτήματα (Parts) σε αρχεία *.DXF Αν η κατασκευή μας αποτελείται από τεμάχια με διαφορετικά πάχη πρέπει να το προσέξουμε, έτσι ώστε κατά την παραγγελία τα εξαρτήματα να κοπούν με το κατάλληλο πάχος. Στον σχεδιασμό του ρομποτικού οχήματος χρησιμοποιήθηκε ένα πάχος λαμαρίνας και ένα υλικό κατασκευής. Συνήθως η αξία του φύλλου λαμαρίνας χρεώνεται ολόκληρη, ανεξάρτητα από την επιφάνεια που θα χρησιμοποιηθεί, επίσης η αλλαγή πάχους λαμαρίνας στο laser απαιτεί χρόνο από μέρος του χειριστή. Προσέχουμε να μην παραλείψουμε κάποιο σχέδιο και χρειαστεί στην συνέχεια να κατεργαστούμε μεμονωμένα εξαρτήματα.

Η μετατροπή των σχεδίων μας σε αρχεία *.DXF είναι κάτι απλό. Ανοίγουμε για παράδειγμα το αρχείο Βάση ρόδας.SLDPRT στο SolidWorks το οποίο είναι ένα εξάρτημα χωρίς κάποιο παραμορφωμένο άκρο και το αποθηκεύουμε σε μορφή *.DXF [27].

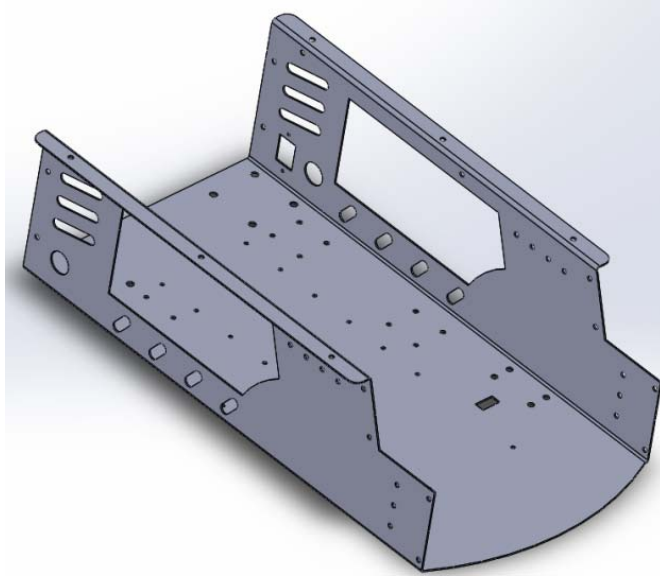


Εικόνα 27 Βάση ρόδας. SLDPRT και Βάση ρόδας.dxf

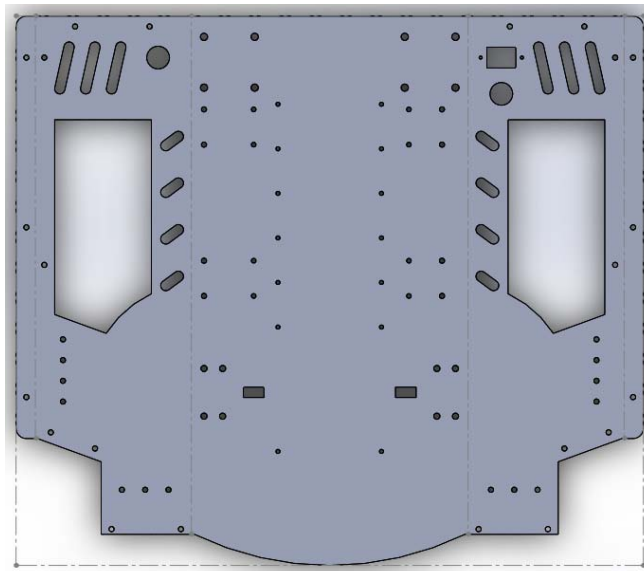
Σε περίπτωση που έχουμε κάποιο εξάρτημα στραντζαριστό πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε το ανάπτυγμα του ελάσματος και μετά να το μετατρέψουμε σε αρχείο .DXF. Για παράδειγμα ανοίγουμε το αρχείο vasi.SLDPRT όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, μετατρέπουμε το Part σε ανάπτυγμα (ξεδίπλωμα λαμαρίνας) πατώντας απλώς το εικονίδιο Flatten στο solidwork και στην συνέχεια το μετατρέπουμε σε αρχείο vasi.dxf [28] [29] [30] [31].



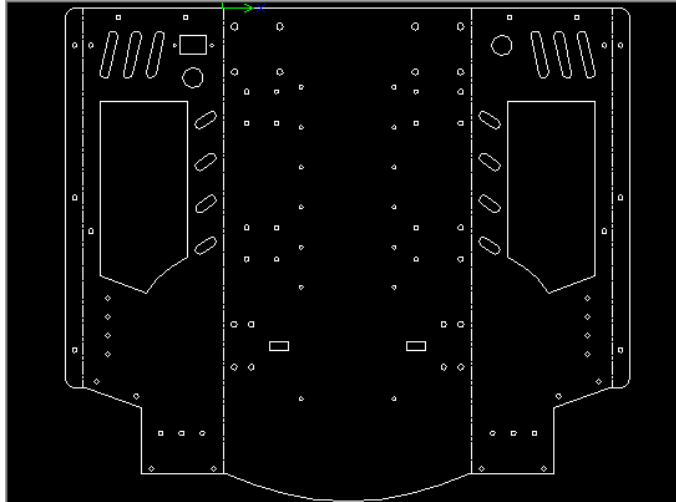
Εικόνα 28 Μετατροπή σχεδίου σε ανάπτυγμα



Εικόνα 29 Όπως φαίνεται το αρχείο με όνομα vasi.SLDPRT



Εικόνα 30 Το ανάπτυσμα του αρχείου με όνομα vasi.SLDPRT



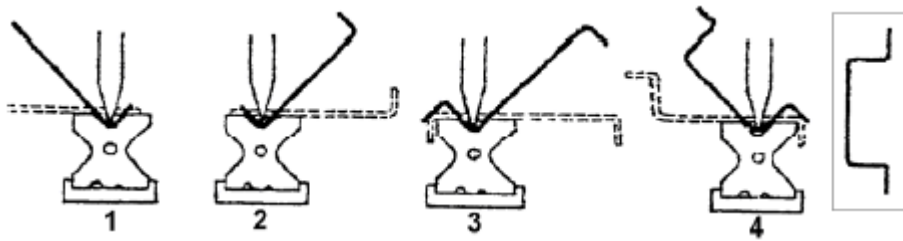
Εικόνα 31 Μετατροπή του αρχείου vasi.SLDPRT σε vasi.dxf

Με την ίδια διαδικασία όλα τα στοιχεία του ρομποτικού οχήματος τα μετατρέπουμε σε αρχεία .DXF και είναι έτοιμα για κοπή. Προσέχουμε αν κάποια αρχεία τα θέλουμε περισσότερες από μία φορές, όπως το Βάση ρόδας.dxf το οποίο μας χρειάζεται τέσσερις. Τέλος τοποθετούμε όλα τα αρχεία .DXF της κατασκευής μας σε ένα νέο αρχείο με το σωστό αριθμό αντιγράφων από τα εξαρτήματα που χρειαζόμαστε περισσότερες φορές. Η ενοποίηση όλων των αρχείων .DXF, καλό είναι να γίνεται σε συνεννόηση με τον χειριστή του Laser, ώστε να λάβουμε υπόψη μας τις διαστάσεις της λαμαρίνας που θα χρησιμοποιηθεί για την κοπή. Στην δική μας περίπτωση η διάσταση της λαμαρίνας είναι 1000mmX2000mm με πάχος 1.5mm. Άρα δημιουργούμε ένα αρχείο*.DXF στο οποίο έχουμε μεταφέρει τα σχέδια μας, μέσα στο χώρο των διαστάσεων της λαμαρίνας με απόσταση ασφαλείας μεταξύ των σχεδίων τα 2mm. Στην εικόνα που ακολουθεί με κόκκινο περίγραμμα είναι οι διαστάσεις της λαμαρίνας και με μαύρο χρώμα τα αναπτύγματα των τεμαχίων του ρομποτικού οχήματος [32].

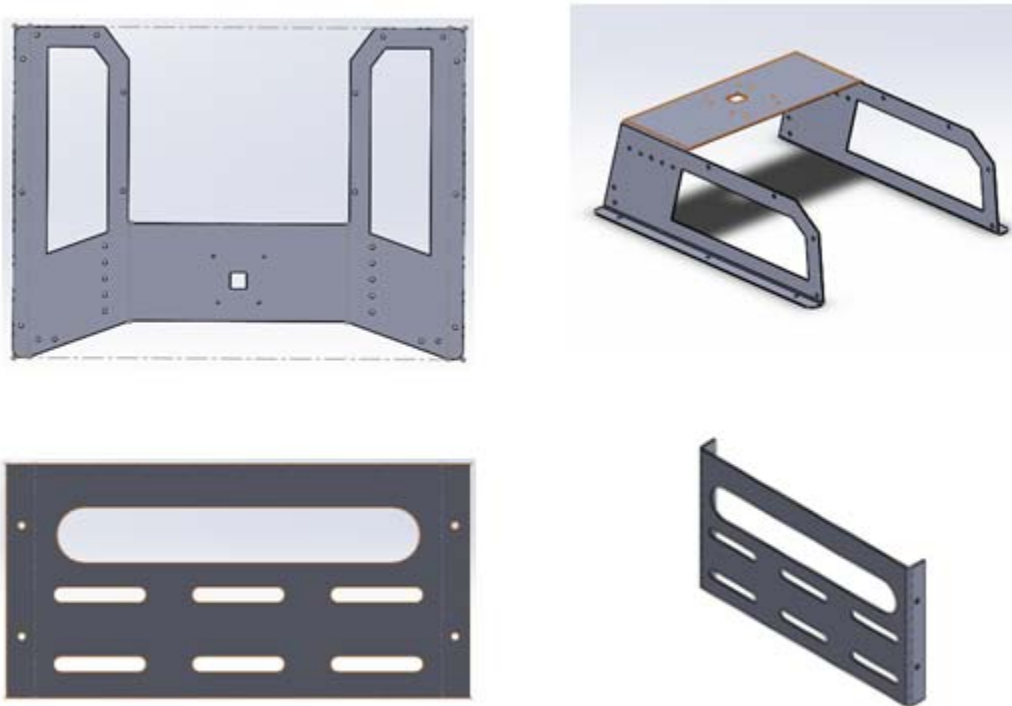
Τώρα μπορούμε να στείλουμε το αρχείο *.DXF στην εταιρεία και να μάθουμε τον απαιτούμενο χρόνο για την ολοκλήρωση της κατεργασίας, αλλά και το κόστος κατασκευής. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγγελίας μας συνήθως διαρκεί κάποιες μέρες. Το υλικό και το πάχος της λαμαρίνας που θέλουμε να κατεργαστούμε επηρεάζουν πολύ το χρόνο υλοποίησης της κατασκευής. Αν για παράδειγμα θέλαμε κάποια ειδική πυρίμαχη λαμαρίνα, θα θέλαμε αρκετό χρόνο για την αγορά και παραλαβή της. Επίσης πάχη ελασμάτων που δεν χρησιμοποιούνται συχνά πρέπει να γίνουν παραγγελία και το κόστος ανεβαίνει αντίστοιχα.

7.2 Κατεργασίες με παραμόρφωση

Η κάμψη (Bending) είναι μία μέθοδος κατεργασίας χωρίς αφαίρεση υλικού που χρησιμοποιείται ευρέως για τη διαμόρφωση φύλλων λαμαρίνας. Τις περισσότερες φορές δεν δημιουργεί καμία μεταβολή στο πάχος του κατεργαζόμενου ελάσματος. Αν χρησιμοποιείται μήτρα σχήματος V, τότε ονομάζετε κάμψη-V. Εκτός από τη δημιουργία μιας επιθυμητής μορφής, η κάμψη χρησιμοποιείται επίσης για να προσδίδει αντοχή, ακαμψία, αισθητική και εξάλειψη των αιχμηρών άκρων του ελάσματος. Η εργαλειομηχανή που κάμπτει ελάσματα ονομάζετε στράντζα και η εργασία στραντζάρισμα. Η αρχή λειτουργίας της εργαλειομηχανής είναι απλή και βασίζεται στην κάθοδο ενός υδραυλικού εμβόλου, που ελέγχεται από τον χειριστή ή από υπολογιστή. Ο έλεγχος από υπολογιστή δίνει την δυνατότητα να πετύχουμε οποιαδήποτε γωνία από 0 έως 180 μοίρες από διαφορετικό υλικό ή πάχος με υψηλή ακρίβεια. Στο εμπόριο υπάρχουν πλήρως αυτοματοποιημένα μοντέλα με όλες τις κινήσεις τους ελεγχόμενες από μονάδα CNC. Λόγω του ψηφιακού ελέγχου όπως και όλες οι ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές μας εξασφαλίζει επαναληψιμότητα της παραγωγής. Μπορούμε με κατάλληλο συνδυασμό και επανάληψη καμπτικών παραμορφώσεων στην λαμαρίνα να καταλήξουμε σε σύνθετες γεωμετρίες με μεγάλη βιομηχανική χρήση [33] [34] .



Εικόνα 33 Μέθοδος κάμψης τεμαχίων σε μήτρα σχήματος V



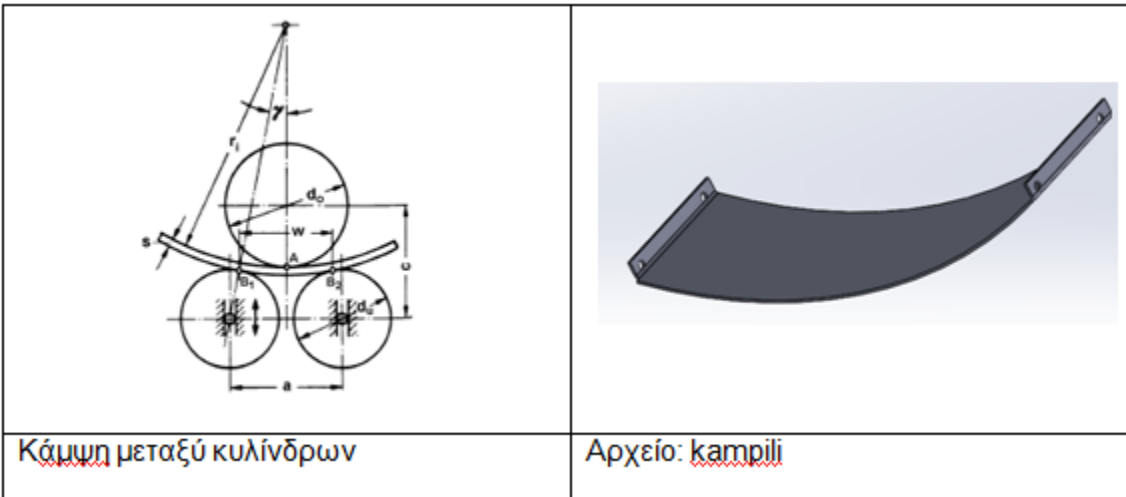
Ελάσματα πριν από την κάμψη

Τελικά εξαρτήματα μετά την κάμψη

Εικόνα 34 Κατεργασία εξαρτημάτων του δικού μας ρομπότ με κάμψη

Διαδικασία κάμψης τεμαχίων μεταξύ κυλίνδρων

Με την βοήθεια τριών κυλίνδρων οι οποίοι μπορούν να περιστρέφονται και να μετατίθενται μεταξύ τους, πετυχαίνουμε να αλλάξουμε την καμπυλότητα ελάσματος που βρίσκετε μεταξύ αυτών με κατάλληλους χειρισμούς [35].



Εικόνα 35 Μέθοδος κάμψης τεμαχίων μεταξύ κυλίνδρων

7.3 Προσομοίωση κατεργασίας βάσης κινητήριων τροχών

Η βάση συγκράτησης των δύο κινητήριων τροχών (omega) επανασχεδιάστηκε με σκοπό την καλύτερη σύσφιξη αλλά και την εξαναγκασμένη ευθυγράμμιση των αξόνων των τροχών στο σασί, όπως επίσης και την ομοαξονική τοποθέτηση των δύο αξόνων των κινητήριων τροχών. Η κατασκευή των δύο βάσεων έγινε από αλουμίνιο σε κέντρο κατεργασίας CNC του τμήματος μηχανολογίας ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας.

Με τον όρο CAD-CAM (Computer Aided Design)-(Computer Aided Manufacture) εννοούμε την συνεργασία ενός λογισμικού σχεδίασης με λογισμικό κατεργασιών.

Στόχος αυτής της συνεργασίας είναι:

- Η δημιουργία ψηφιακού σχεδίου του προϊόντος.
- Δημιουργία κώδικα για την καθοδήγηση εργαλειομηχανών
- Προσομοίωση κατεργασιών
- Έλεγχος και εντοπισμός προβλημάτων της κατεργασίας
- Διαχείριση παραγωγικής διαδικασίας
- Ψηφιακή καθοδήγηση εργαλειομηχανών

#Το λογισμικό CAD-CAM με το οποίο υλοποιήθηκε η εργασία είναι το solidworks για την σχεδίαση και το solidcam για τις κατεργασίες. Ανήκει στην κατηγορία των λογισμικών

παραμετρικής ψηφιακής σχεδίασης. Πρόκειται για λογισμικό στο οποίο έχουμε την δυνατότητα τροποποίησης ενός ολοκληρωμένου σχεδίου αλλάζοντας μία ή περισσότερες από τις διαστάσεις του. Σε πιο παλιά λογισμικά σχεδίασης δεν υπήρχε αυτή η δυνατότητα καθώς δεν διατηρούσαν ιστορικό εντολών και άρα δεν μπορούσαμε να μεταβούμε σε κάποιο προηγούμενο βήμα. Καλό είναι πριν ξεκινήσουμε το solidcam το αρχείο με το σχέδιο μας να το έχουμε τοποθετήσει σε ένα νέο φάκελο, γιατί το πρόγραμμα δημιουργεί πολλά βοηθητικά αρχεία και είναι δύσκολο να τα εντοπίσουμε και να μεταφέρουμε την δουλειά μας σε άλλο υπολογιστή. Ο στόχος της προσομοίωσης της κατεργασίας με την βοήθεια λογισμικού C.A.M είναι να εξάγουμε κατάλληλο πρόγραμμα (G κώδικα) για την καθοδήγηση της εργαλειομηχανής CNC με την οποία θα γίνει η κατεργασία του εξαρτήματος του ρομπότ. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης της κατεργασίας δύο προγράμματα καθοδήγησης, ένα για την κάθε πλευρά του εξαρτήματος που είναι να κατασκευάσουμε. Τμήματα των προγραμμάτων φαίνονται στην συνέχεια ενώ ολόκληρα βρίσκονται στο παράρτημα Β[36].

<pre> %PM N999999 (OMEGA.TAP) N1 G90 N2 G18 N3 G52 N4 (*WKZ 1 - DIA 40.0*) N5 T1 M6 (FACE MILL) N6 G14 N1=18 N2=26 (FM-facemill-T1) N7 M9 N8 (*WKZ 5 - DIA 6.0*) N9 T5 M6 (DRILL) N10 G14 N1=27 N2=37 (D-drill-T5) N11 M9 N12 (*WKZ 4 - DIA 10.0*) N13 T4 M6 (BALL NOSE MILL) N14 G14 N1=38 N2=52 (F-contour-T4) N15 G14 N1=70 N2=343 (3DR-target-T4) N16 M9 N17 G22 N=100 N18 (-----) N19 (FM-FACEMILL-T1 - FACE-MILLING) N20 (-----) N21 S1000 M3 N22 G0 X24 Y10 Z19 </pre>	<pre> %PM N999999 (OMEGA2.TAP) N1 G90 N2 G18 N3 G52 N4 (*WKZ 1 - DIA 40.0*) N5 T1 M6 (FACE MILL) N6 G14 N1=13 N2=21 (FM-facemill1-T1) N7 M9 N8 (*WKZ 14 - DIA 8.0*) N9 T14 M6 (END MILL) N10 G14 N1=22 N2=65 (P-contour2-T14) N11 M9 N12 G22 N=100 N13 (-----) N14 (FM-FACEMILL1-T1 - FACE-MILLING) N15 (-----) N16 S1000 M3 N17 G0 X24 Y10 Z19 N18 G0 Y2 N19 G1 Y0 F33 N20 X-84 F100 N21 G0 Y10 N22 (-----) </pre>
--	---

Εικόνα 36 Τμήμα προγράμματος καθοδήγησης εργαλειομηχανής CNC

#

7.4 Κατεργασία βάσης συγκράτησης κινητήριων τροχών

Για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε το εξάρτημα του ρομπότ στην εργαλειομηχανή C.N.C, αρχικά μεταφέρουμε τα προγράμματα καθοδήγησης (G κώδικας) στον υπολογιστή της εργαλειομηχανής και ελέγχουμε για τυχόν σφάλματα, μέσω της προσομοίωσης που παρέχει ο controller. Το επόμενο βήμα είναι να δηλώσουμε τα κοπτικά εργαλεία που είναι απαραίτητα για την κατεργασία του εξαρτήματος, με ίδια χαρακτηριστικά που είχαμε χρησιμοποιήσει κατά την προσομοίωση της κατεργασίας στο Solid CAM. Μετράμε τα κοπτικά με ειδικό όργανο και δηλώνουμε στον controller την εργαλειομηχανής τις γεωμετρικές παραμέτρους (μήκος L και ακτίνα R). Στην συνέχεια τοποθετούμε το υλικό που θα κατεργαστούμε (Stock) και προσέχουμε η κατεύθυνση τοποθέτησης να είναι όμοια με την τοποθέτηση του υλικού στην προσομοίωση. Τέλος πρέπει να μηδενίσουμε την εργαλειομηχανή με την βοήθεια ενός 3D μετρητικού ρολογιού, στους τρεις άξονες X,Y,Z, στο ίδιο μηδενικό σημείο που χρησιμοποιήσαμε στο CAM [37].



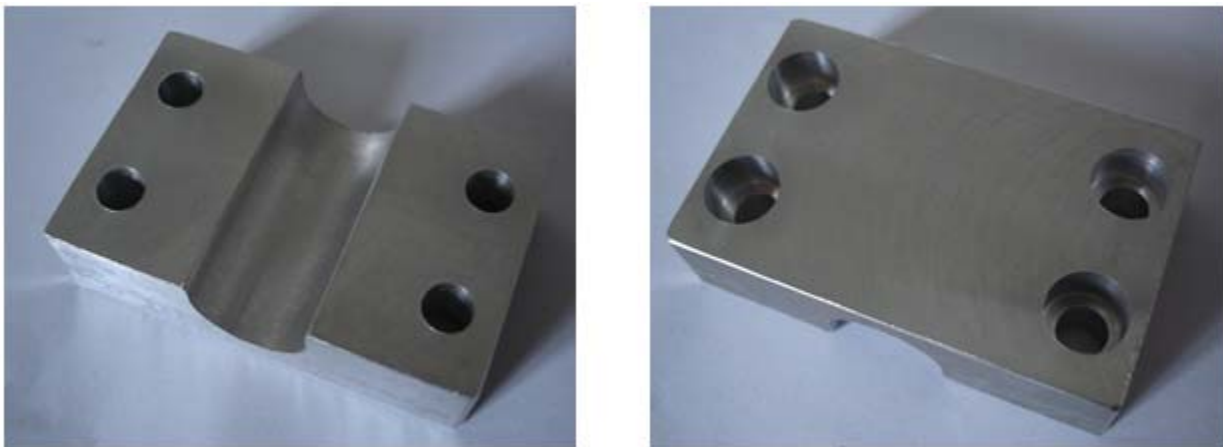
Εικόνα 37 Βασικές ρυθμίσεις της εργαλειομηχανής CNC

Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε την στιγμή της κατεργασίας και ολοκληρωμένη η πρώτη πλευρά[38].



Εικόνα 38 Εικόνες από την κατεργασία της βάσης στήριξης των τροχών

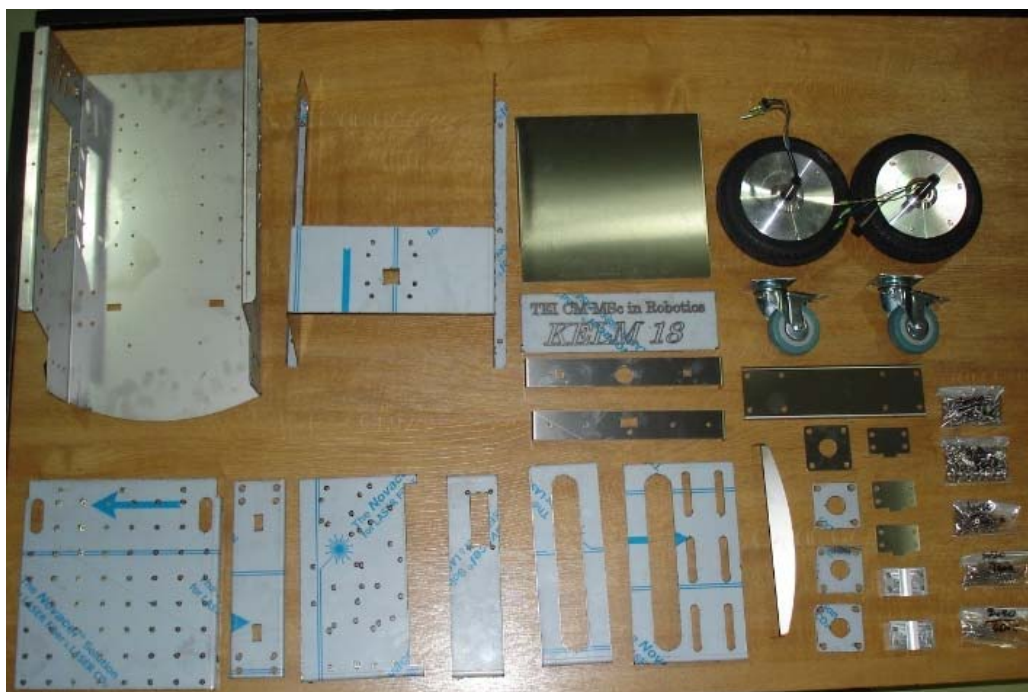
Μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας και με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα καθαρίζουμε το εξάρτημα από το υγρό κοπής και τα γρέζια. Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τη βάση στήριξης των κινητήριων τροχών από αλουμίνιο μόλις έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του [39].



Εικόνα 39 Εικόνα από το τελικό αποτέλεσμα της βάσης στήριξης των τροχών

8 Συναρμολόγηση του ρομπότ

Έχοντας ολοκληρώσει το στάδιο της κατασκευής των εξαρτημάτων του ρομποτικού οχήματος, συγκεντρώνουμε όλα τα υλικά και μπορούμε να αρχίσουμε την συναρμολόγηση. Οι ανοξείδωτες λαμαρίνες στη μία τους πλευρά προστατεύονται από αυτοκόλλητη μεμβράνη, η οποία αποκολλάται κατά την ώρα της συναρμολόγησης όταν δεν υπάρχει κίνδυνος να τις σημαδέψουμε ή να τις τραυματίσουμε. Η επιφάνεια κάτω από την προστατευτική μεμβράνη της ανοξείδωτης λαμαρίνας είναι λειασμένη από το εργοστάσιο και πρέπει να προσέξουμε από τον σχεδιασμό να συμπέσει με την ορατή πλευρά της κατασκευή μας. Στην φωτογραφία που ακολουθεί διακρίνονται οι κινητήριοι τροχοί με τα καλώδια τροφοδοσίας τους, οι μικροί τροχοί τύπου Castor και τα σακουλάκια με τους κοχλίες δεξιά της φωτογραφίας. Για την συναρμολόγηση των τροχών χρειάζονται οκτώ βίδες M6X20 τύπου allen, ενώ για όλα τα υπόλοιπα τεμάχια ανοξείδωτης λαμαρίνας θα χρειαστούμε βίδες M5X8 τύπου allen ανοξείδωτες [40].



Εικόνα 40 Όλα τα εξαρτήματα πριν τη συναρμολόγηση του ρομπότ

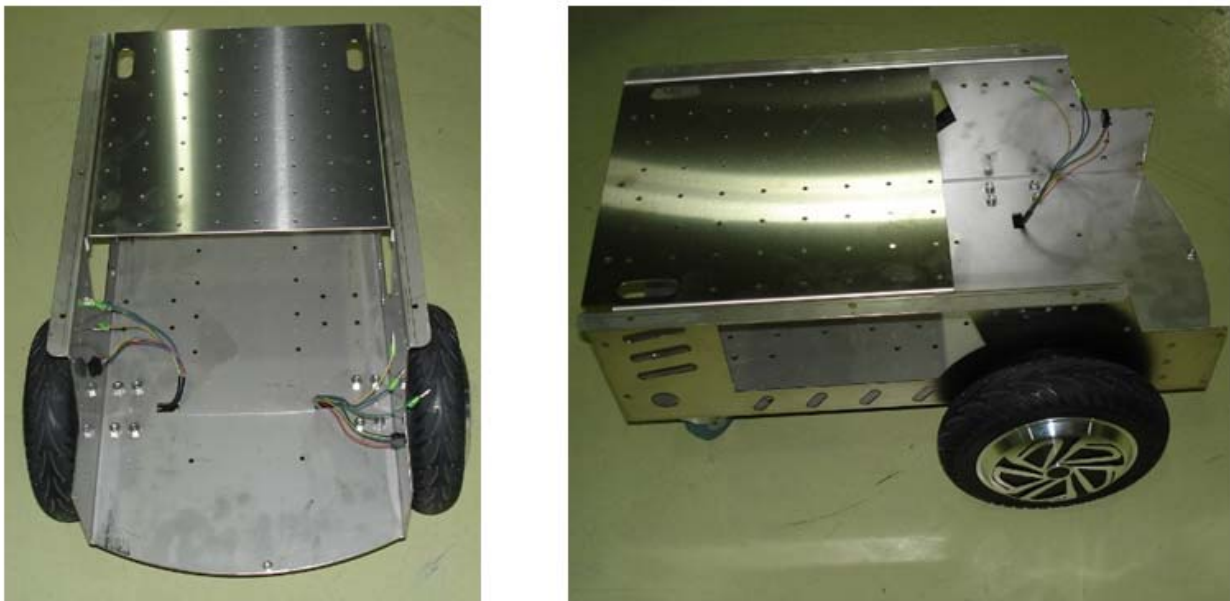
Η συναρμολόγηση ξεκίνησε από την βάση του ρομποτικού οχήματος τοποθετώντας τους τροχούς, τους αποστάτες των τροχών και τις βάσεις στήριξης, με την βοήθεια

τεσσάρων κοχλιών για κάθε τροχό. Στην εικόνα που ακολουθεί έχει ολοκληρωθεί η συναρμολόγηση της βάσης στην οποία διακρίνονται τα καλώδια τροφοδοσίας των κινητήριων τροχών [41].



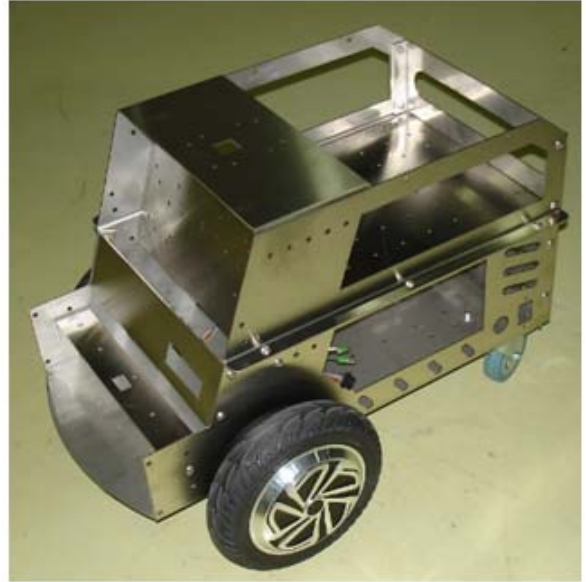
Εικόνα 41 Συναρμολόγηση των τροχών με την βάση του ρομπότ

Ακολουθεί η τοποθέτηση του δεύτερου επιπέδου και η στήριξη του με την βοήθεια κοχλιών στα πλευρικά τοιχώματα της βάσης του ρομπότ [42].



Εικόνα 42 Ενδιάμεσο στάδιο συναρμολόγησης του ρομπότ

Ακολουθούν οι εικόνες με το συναρμολογημένο ρομπωτικό όχημα [43].



Εικόνα 43 Το ρομπότ όπως φαίνεται συναρμολογημένο

9 Αποτελέσματα

- Ένα από τα πρώτα προβλήματα που τέθηκαν στον σχεδιασμό μελέτης του ρομποτικού οχήματος ήταν η επιλογή των τροχών. Έχοντας υπόψη τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών για διαφορική οδήγηση, αλλά και τις διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος έπρεπε να επιλέξουμε τροχούς. Η επιλογή της διαμέτρου των κινητήριων τροχών έγινε σε σχέση με το μέγεθος και τη χρήση του οχήματος. Επιθυμητή εξωτερική διάμετρος που δίνει ένα καλό αισθητικό και λειτουργικό αποτέλεσμα είναι περίπου $D=200\text{mm}$. Άλλα κριτήρια επιλογής είναι το φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο κάθε τροχός, το κόστος αγοράς και ο τρόπος μετάδοσης της ροπής από τον κινητήρα στο τροχό. Μία επιλογή θα ήταν ο τροχός να περιλαμβάνει μειωτήρα στροφών με γρανάζια, στην είσοδο του οποίου να υπάρχει κινητήρας συνεχούς τάσης. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι το μικρό βάρος και ο έλεγχος της περιστροφής με μεγάλη ακρίβεια. Αντίθετα το μειονέκτημα βρίσκεται στον υψηλό θόρυβο κατά την λειτουργία του και όταν διακόψουμε την τροφοδοσία οι τροχοί είναι ακινητοποιημένοι. Δεύτερη επιλογή είναι οι τροχοί που εμπεριέχουν ασύγχρονο κινητήρα BL motors. Τροφοδοτούνται από τριφασική πηγή εναλλασσόμενης τάσης, μεταβάλλοντας την συχνότητα αλλά και το πλάτος με την βοήθεια ενός ελεγκτή. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν έχουν μειωτήρα με γρανάζια που αυξάνουν τις τριβές και τον θόρυβο και όταν δεν τροφοδοτούνται ελευθερώνονται και μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα. Μειονέκτημα το μεγάλο βάρος και ο βηματικός έλεγχος της περιστροφής με την ακρίβεια θέσης να εξαρτάται από τον αριθμό πόλων του κινητήρα. Οι κινητήριοι τροχοί που τελικά επιλέχτηκαν είναι τύπου brushless motor με εξωτερική διάμετρο τροχού $D=195\text{mm}$ Μάζα= 2.5Kg /τροχό και μικρότερη ελεγχόμενη κίνηση ανά παλμό είναι: $L= 12^\circ$ [44].



Εικόνα 44 Εικόνα των κινητήριων τροχών από δύο όψεις

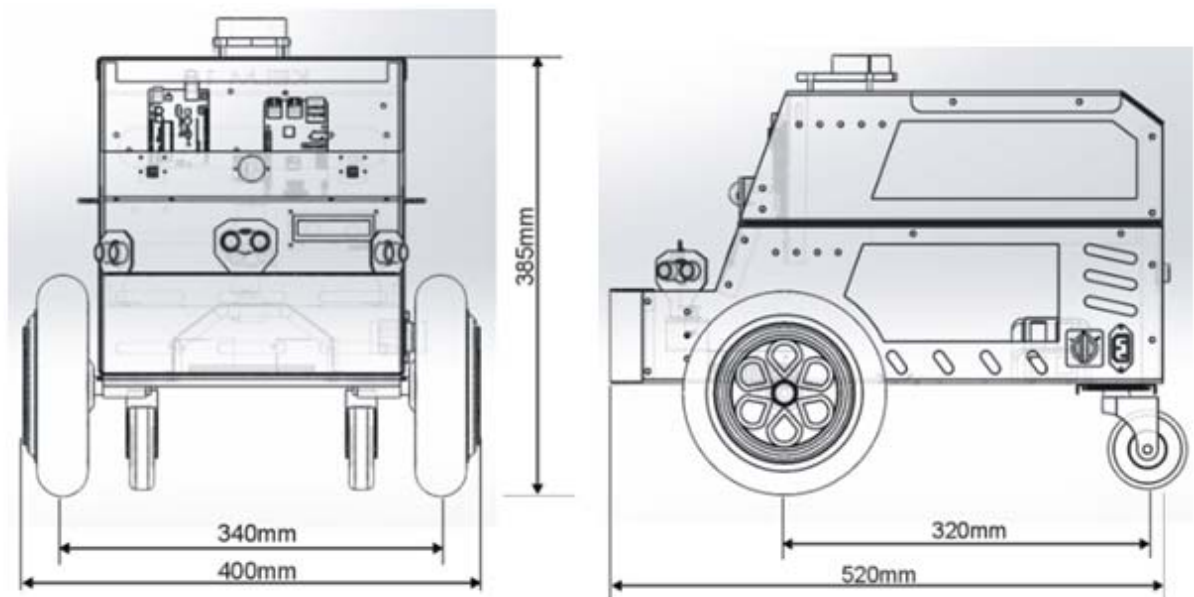
- Ο τροχός που επιλέχθηκε ως μη κινητήριος είναι τύπου Castor wheel και η επιλογή του έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το φορτίο μεταφοράς, το κόστος και να έχουν φρένο όταν δεν χρησιμοποιείται. Οι τροχοί που επιλέχθηκαν έχουν ικανότητα φόρτισης 50Kg με διάμετρο τροχού $D=75\text{mm}$ [45].



Εικόνα 45 Τροχός με φρένο τύπου (Castor wheel)

- Οι τελικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής είναι $M \times \Pi \times \Upsilon$ 520x400x385mm. Πρόκειται για όχημα με πολλούς ελεύθερους χώρους, ικανό να δεχθεί πολύ περισσότερους αισθητήρες, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, πλακέτες, μπαταρίες και ότι άλλο σκεφτούμε να το επεκτείνουμε. Στο κάτω επίπεδο είναι τοποθετημένες οι μπαταρίες και οι ελεγκτές των κινητήρων καταλαμβάνοντας σχετικά μικρή επιφάνεια του πρώτου επιπέδου.

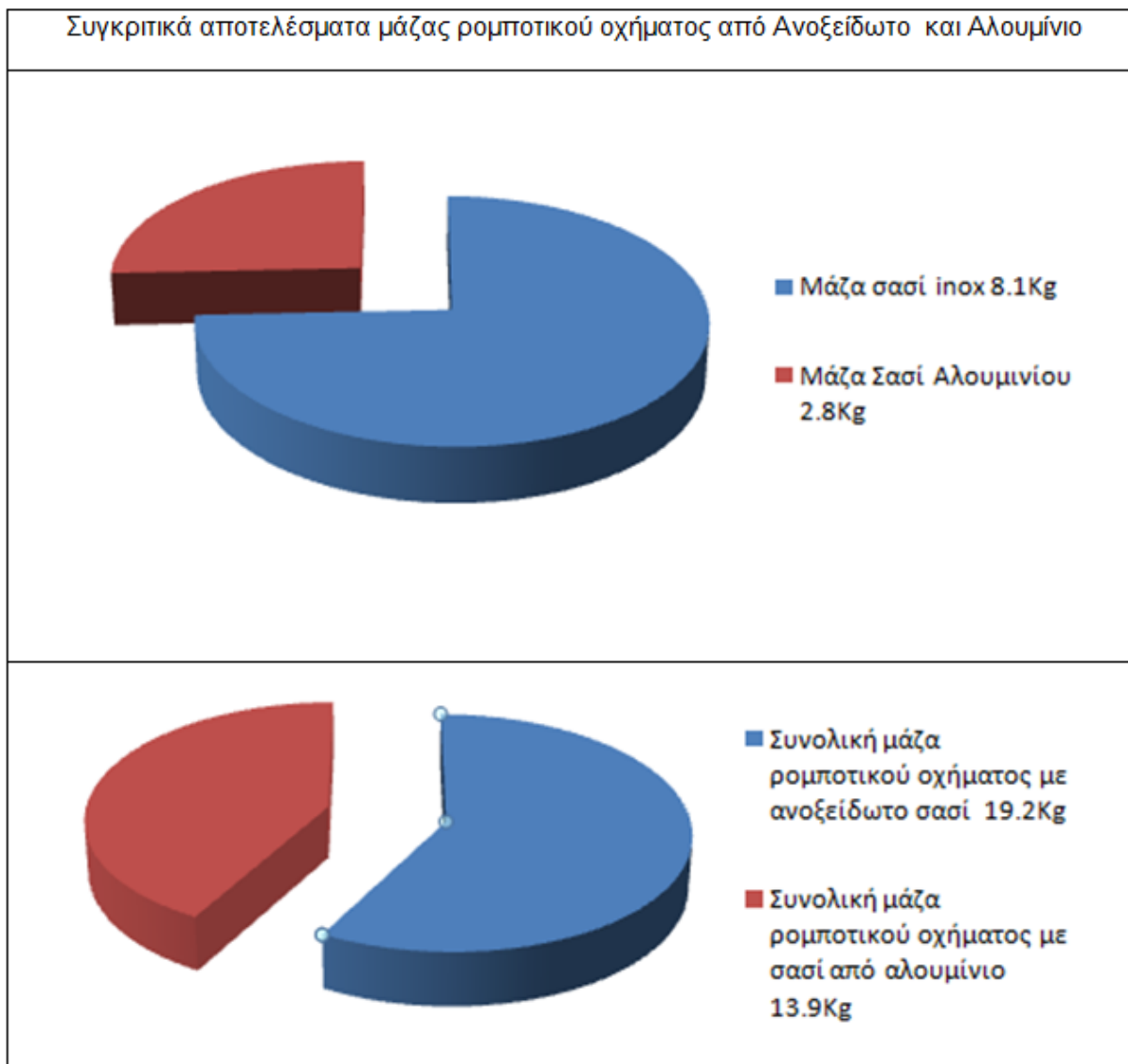
Η πλακέτα του arduino υπο και ο υπολογιστής Raspberry Pi είναι τοποθετημένες κάθετα στην πρόσοψη του οχήματος πίσω από τις κάμερες και των αισθητήρα κίνησης, ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση χωρίς την αποσυναρμολόγηση κάποιου εξαρτήματος. Το δεύτερο επίπεδο αρχικά δεν χρησιμοποιείται και είναι κενός και σκεπασμένος χώρος. Αν θέλουμε να μεταφέρουμε αντικείμενα μπορούμε να αφαιρέσουμε την οροφή για να έχουμε πρόσβαση, αλλιώς μπορούμε και αυτό το επίπεδο να το χρησιμοποιήσουμε για αναβάθμιση στα ηλεκτρονικά του οχήματος [46].



Εικόνα 46 Τελικές διαστάσεις του ρομποτικού οχήματος

- Το υλικό που επιλέγηκε για την κατασκευή του ρομποτικού οχήματος είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας. Παρόλο το υψηλό κόστος αγοράς, συχνά αποδεικνύεται η καλύτερη επιλογή σε βάθος χρόνου. Η ανθεκτικότητα του, η αντοχή στην διάβρωση και η ευκολία κατασκευής είναι κάποιες από τις ιδιότητες που το κάνουν μοναδικό. Επίσης η φωτεινή και εύκολα συντηρημένη επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα προσφέρει μια μοντέρνα και ελκυστική εμφάνιση. Στο στάδιο του σχεδιασμού εξετάστηκε και το αλουμίνιο ως υποψήφιο υλικό κατασκευής για το ρομποτικό όχημα. Ακολουθούν κάποια συγκριτικά αποτελέσματα για υλικό κατασκευής είτε α)ανοξείδωτο είτε β)αλουμίνιο [47].

Υπολογισμός μαζών ρομποτικού οχήματος		
	Ανοξείδωτο	Αλουμίνιο
Μάζα σασί ρομποτικού οχήματος	8.1Kg	2.8Kg
Συνολική μάζα ρομποτικού οχήματος	19.2Kg	13.9Kg



Εικόνα 47 Σύγκριση μαζών του ρομπότ από α)ανοξείδωτο χάλυβα β)αλουμίνιο

Συγκρίνοντας το σασί με υλικό κατασκευής το αλουμίνιο παρατηρούμε ότι η μάζα του είναι το 35% της μάζας από ανοξείδωτο. Ενώ σε ολόκληρο το ρομποτικό όχημα είναι στο 75% της μάζας σε σχέση με το ανοξείδωτο. Παρόλη την τόσο μεγάλη διαφορά στην συνολική μάζα του ρομποτικού οχήματος το υλικό που τελικά επιλέχτηκε είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, με βασικότερο λόγω αυτής της επιλογής τη μεγάλη μηχανική αντοχή. Αυτή του η ιδιότητα επιτρέπει την εξολοκλήρου κατασκευή του ρομποτικού οχήματος από ένα και μόνο πάχος λαμαρίνας. Αυτό σημαίνει λιγότερο χρόνο κατεργασίας των εξαρτημάτων του ρομποτικού οχήματος (κοπή και κάμψη ελασμάτων). Χωρίς σπατάλη υλικού αφού είναι μόνο ένα, απλή συναρμολόγηση εξαρτημάτων και χαμηλό τελικό κόστος.

- Αρχική απαίτηση των προδιαγραφών του ρομποτικού οχήματος είναι η ικανότητα μεταφοράς 50Kg χωρίς το ίδιο βάρος. Κριτήριο επιλογής των τυποποιημένων εξαρτημάτων είναι και τα φορτία που μπορούν να παραλάβουν και συνεπώς δεν χρειάζεται έλεγχος αντοχής. Αντίθετα τα στοιχεία που είναι μελετημένα και κατασκευασμένα από εμάς όπως το σασί πρέπει να τα εξετάσουμε αν καλύπτουν τις απαιτήσεις αντοχής σε φορτία. Ο έλεγχος αντοχής στο σασί του ρομποτικού οχήματος έγινε κατά τον σχεδιασμό με το λογισμικό πακέτο ansys και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

	Ανοξείδωτος χάλυβας $\rho=8000\text{Kg/m}^3$ $E=193\text{GPa}$	Αλουμίνιο $\rho=2690\text{Kg/m}^3$ $E=68.3\text{GPa}$
Βάρος σασί	8.1Kg	2.8Kg
Τάσεις με το ίδιο βάρος	11.6	4.1
Τάσεις με το συνολικό βάρος	34.7	33.8
Παραμόρφωση από το ίδιο βάρος	0.03	0.03
Παραμόρφωση από το συνολικό βάρος	0.39	1.04

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι χρησιμοποιώντας υλικό κατασκευής τον ανοξείδωτο χάλυβα ο συντελεστής ασφαλείας του ρομποτικού οχήματος είναι

$\nu = \frac{193GPa}{34.7GPa} = 5.5$ και η μέγιστη παραμόρφωση 0.39mm ενώ με υλικό κατασκευής το

αλουμίνιο ο συντελεστής ασφαλείας $\nu = \frac{68.3GPa}{33.8GPa} = 2$ και μέγιστη παραμόρφωση 1.04mm.

10 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός αυτόνομου τροχήλατου ρομποτικού οχήματος μεταφοράς αντικειμένων (ρομπότ αχθοφόρος), για χρήση στην εκπαίδευση και την έρευνα. Το αποτέλεσμα της κατασκευής υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις των προδιαγραφών που είχαμε θέσει στο πρώτο στάδιο του σχεδιασμού, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Για παράδειγμα το συνολικό κόστος για την κατασκευή του σασί του οχήματος, υλικά και δουλειά μαζί κόστισε 120€, ενώ ολόκληρο το ρομποτικό όχημα χωρίς τα ηλεκτρονικά δεν ξεπερνά τα 250€, την στιγμή που αντίστοιχα οχήματα στην αγορά ξεκινούν από πολύ υψηλότερο κόστος. Η συνολική αντοχή του οχήματος ξεπερνά κατά πολύ το όριο των 50Kg φορτίου μεταφοράς, μειώνοντας τον χρόνο αυτονομίας. Παρόλο που η αυτονομία του είναι μεγαλύτερη από τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών θα μπορούσε σε κάποιο μεταγενέστερο σχεδιασμό να γίνει κάποια μείωση της μάζας κάποιων στοιχείων. Για παράδειγμα οι 3 μπαταρίες μολύβδου 12V 5AH βάρους 5.4Kg να αντικατασταθούν από μία μπαταρία Li-Ion με αντίστοιχα χαρακτηριστικά και λιγότερο από 1Kg. Θα μπορούσε επίσης το σασί να είναι λιγότερο συμπαγές. Να δημιουργηθούν ανοίγματα όπου δεν χρειάζεται υλικό για μείωση του βάρους, καλύτερο αερισμό, ψύξη των εξαρτημάτων και ευκολότερη πρόσβαση.

11 Βιβλιογραφία

Βιβλία

- [1] Δουλγέρη Ζωή, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, κινηματική δυναμική και έλεγχος αρθρωτών βραχιόνων, Εκδόσεις Κριτική, 2007
- [2] Introduction to Autonomous Mobile Robots by Roland Siegwart
- [3] B. Siciliano et al., “Robotics: modelling, planning and control”, Springer, 2009
- [4] Δημαρόγκωνας Ανδρέας, Σχεδιασμός Μηχανών με την βοήθεια υπολογιστή
- [5] James G. Bralla, Design for manufacturing Strategies, Principles, and Techniques
- [6] Edward Shigley, Charles R. Mischke Mechanical engineering design Joseph
- [7] Jack T. Kimbrell Kinematics analysis and synthesis
- [8] George H. Martin Kinematics and dynamics of machines
- [9] Byoung K. Choi Surface modeling for CAD/CAM
- [10] Erdogan Madenci, Ibrahim Guven The finite element method and applications in engineering using ANSYS

Σύνδεσμοι

- <https://el.wikipedia.org>
- <https://www.robotnik.eu/mobile-robots/>
- <https://ubiquityrobotics.com/>
- <https://www.solteq.com/en/solutions/solteq-retail-robot>
- <http://pudutech.com/en/productintroduction.html>
- <https://www.knightscope.com/>
- <https://www.solidworks.com/>
- <https://www.ansys.com/>

12 Παράρτημα 1

Ακολουθούν τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των εργαλειομηχανών CNC α) TruLaser 3530 και β) Deckel -Maho 600 C που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εξαρτημάτων του ρομπότ

12.1 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά TruLaser 3530

Κέντρο κατεργασίας Laser Trumpf TruLaser 3530 με το οποίο έγιναν οι κοπές .



#Κέντρο κατεργασίας Laser Trumpf TruLaser 3530

#

#

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τύπος Μηχανής	TruLaser 3530
Κατασκευάστηκε	Trumpf
Μοντέλο	3530
Έτος κατασκευής	2008
CNC control	Siemens Sinumerik 840 D
Working area X x Y x Z [mm]	3000 x 1500 x 115
Laser type	CO2 TruFlow 3200 turbo
Ισχύς εξόδου [W]	110-3200
Μέγιστο βάρος κατεργασίας [kg]:	710

Μέγιστο πάχος (χάλυβα) [mm]	20
Μέγιστο πάχος (ανοξείδωτο) [mm]	12
Μέγιστο πάχος (αλουμίνιο) [mm]	8
Επιτάχυνση στον X άξονα	9m/sec
-XP + Y-axis	15 m / sec
-X-axis cut	4 m / sec
-Cut XP - and Y-axis	15 m / sec.
Installation area (L x W x H) [mm]	9300/4600/2000
Weight [kg]	12000

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του laser cutter διακρίνουμε ότι το μέγιστο πάχος κοπής ανοξείδωτου χάλυβα είναι 12mm, ενώ για αλουμίνιο δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε τα 8mm. Η ισχύς εξόδου ρυθμίζεται αυτόματα από 110-3200 Watt και μπορούμε να κόψουμε ή να χαράξουμε το υλικό που κατεργαζόμαστε. Επίσης ο έλεγχος της δέσμης Laser και ο έλεγχος των κινήσεων γίνετε από τον Controller Siemens Sinumerik 840 D.



Controller Sinumerik 840 D

#

#

12.2 Τεχνολογικά χαρακτηριστικά DECKEL-MAHO 600 C

- Μέγιστη διαδρομή στον άξονα X 600 mm
- Μέγιστη διαδρομή στον άξονα Y 450 mm
- Μέγιστη διαδρομή στον άξονα Z 450 mm
- Ισχύς κινητήρα ατράκτου (AC) 10 KW
- Πεδίο ταχυτήτων 20-6300 rpm
- Πεδίο ταχυτήτων προώσεων και στους τρεις άξονες 1-6000 mm/min
- Γρήγορη πρόωση για τοποθέτηση 6 m/min
- Υποδοχή εργαλείου κατά ISO 40
- Αυτόματη αλλαγή εργαλείου και στις δύο κατευθύνσεις 30 εργαλεία



Κέντρο κατεργασίας DECKEL-MAHO 600 C

13 Παράρτημα 2

13.1 Πρόγραμμα καθοδήγησης εργαλειομηχανής CNC (G Κώδικας)

Ακολουθούν τα δύο προγράμματα καθοδήγησης της εργαλειομηχανής DECKEL-MAHO 600 C με τα οποία πραγματοποιήθηκε η κατεργασία της άνω και κάτω πλευράς της βάσης στήριξης των κινητήριων τροχών

α) Πρόγραμμα καθοδήγησης άνω πλευράς

```
%PM
N999999 (OMEGA.TAP)
N1 G90
N2 G18
N3 G52
N4 (*WKZ 1 - DIA 40.0*)
N5 T1 M6 (FACE MILL)
N6 G14 N1=18 N2=26 (FM-facemill-T1)
N7 M9
N8 (*WKZ 5 - DIA 6.0*)
N9 T5 M6 (DRILL)
N10 G14 N1=27 N2=37 (D-drill-T5)
N11 M9
N12 (*WKZ 4 - DIA 10.0*)
N13 T4 M6 (BALL NOSE MILL)
N14 G14 N1=38 N2=52 (F-contour-T4)
N15 G14 N1=70 N2=343 (3DR-target-
T4)
N16 M9
N17 G22 N=100

N18 (-----)
N19 (FM-FACEMILL-T1 - FACE-
MILLING)
N20 (-----)
N21 S1000 M3
N22 G0 X24 Y10 Z19
N23 G0 Y2
N24 G1 Y0 F33
N25 X-84 F100
N26 G0 Y10

N27 (-----)
N28 (D-DRILL-T5 - DRILL)
N29 (-----)
N30 S1000 M3
N31 G0 X-7 Y10 Z10
N32 G81 Y2 Z-15 B8 F33
N33 G79 X-7 Y0 Z10
N34 G79 Z28
N35 G79 X-53
N36 G79 Z10
N37 G0 Y10

N38 (-----)
N39 (F-CONTOUR-T4 - PROFILE)
N40 (-----)
N41 S3000 M3
N42 G0 X-44.5 Y10 Z-5
N43 G0 Y2
N44 G1 Y-5 F33
N45 G14 N1=53 N2=69
N46 G1 Y-10 F33
N47 G14 N1=53 N2=69
N48 G1 Y-15 F33
N49 G14 N1=53 N2=69
N50 G1 Y-20 F33
N51 G14 N1=53 N2=69
N52 G0 Y10

N53 G1 X-1 Z-5 F200
N54 G2 X2.536 Z-3.536 R5
N55 G1 X3.536 Z-2.536
N56 G2 X5 Z1 R5
```


N57 G1 Z37	N102 Z19
N58 G2 X3.536 Z40.536 R5	N103 G0 Y10
N59 G1 X2.536 Z41.536	N104 G0 X-30.138
N60 G2 X-1 Z43 R5	N105 G0 Y2
N61 G1 X-59	N106 G1 Y-0.9 F33
N62 G2 X-62.536 Z41.536 R5	N107 Z33 F200
N63 G1 X-63.536 Z40.536	N108 X-29.862
N64 G2 X-65 Z37 R5	N109 Z5
N65 G1 Z1	N110 X-30.138
N66 G2 X-63.536 Z-2.536 R5	N111 Z19
N67 G1 X-62.536 Z-3.536	N112 X-35.138
N68 G2 X-59 Z-5 R5	N113 Z38
N69 G1 X-44.5	N114 X-24.862
N70 (-----)	N115 Z0
N71 (3DR-TARGET-T4 - 3-D MODEL)	N116 X-35.138
N72 (-----)	N117 Z19
N73 S3000 M3	N118 X-34.751
N74 G0 X-31.294 Y10 Z19	N119 Y-1.2 F33
N75 G0 Y2	N120 Z38 F200
N76 G1 Y-0.3 F33	N121 X-25.25
N77 Z33 F200	N122 Z0
N78 X-28.706	N123 X-34.751
N79 Z5	N124 Z19
N80 X-31.295	N125 X-34.429
N81 Z19	N126 Y-1.5 F33
N82 X-36.294	N127 Z38 F200
N83 Z38	N128 X-25.571
N84 X-23.706	N129 Z0
N85 Z0	N130 X-34.43
N86 X-36.295	N131 Z19
N87 Z19	N132 X-34.158
N88 G0 Y10	N133 Y-1.8 F33
N89 G0 X-30.625	N134 Z38 F200
N90 G0 Y2	N135 X-25.842
N91 G1 Y-0.6 F33	N136 Z0
N92 Z33 F200	N137 X-34.158
N93 X-29.375	N138 Z19
N94 Z5	N139 X-33.927
N95 X-30.625	N140 Y-2.1 F33
N96 Z19	N141 Z38 F200
N97 X-35.625	N142 X-26.073
N98 Z38	N143 Z0
N99 X-24.375	N144 X-33.927
N100 Z0	N145 Z19
N101 X-35.625	N146 X-33.729
	N147 Y-2.4 F33

N148	Z38 F200	N194	Z19
N149	X-26.271	N195	X-33.025
N150	Z0	N196	Y-4.5 F33
N151	X-33.729	N197	Z38 F200
N152	Z19	N198	X-26.975
N153	X-33.56	N199	Z0
N154	Y-2.7 F33	N200	X-33.025
N155	Z38 F200	N201	Z19
N156	X-26.44	N202	X-33.004
N157	Z0	N203	Y-4.8 F33
N158	X-33.561	N204	Z38 F200
N159	Z19	N205	X-26.996
N160	X-33.418	N206	Z0
N161	Y-3 F33	N207	X-33.004
N162	Z38 F200	N208	Z19
N163	X-26.583	N209	X-33
N164	Z0	N210	Y-5.1 F33
N165	X-33.418	N211	Z38 F200
N166	Z19	N212	X-27
N167	X-33.298	N213	Z0
N168	Y-3.3 F33	N214	X-33
N169	Z38 F200	N215	Z19
N170	X-26.702	N216	Y-5.4 F33
N171	Z0	N217	Z38 F200
N172	X-33.298	N218	X-27
N173	Z19	N219	Z0
N174	X-33.2	N220	X-33
N175	Y-3.6 F33	N221	Z19
N176	Z38 F200	N222	Y-5.7 F33
N177	X-26.8	N223	Z38 F200
N178	Z0	N224	X-27
N179	X-33.2	N225	Z0
N180	Z19	N226	X-33
N181	X-33.123	N227	Z19
N182	Y-3.9 F33	N228	Y-6 F33
N183	Z38 F200	N229	Z38 F200
N184	X-26.877	N230	X-27
N185	Z0	N231	Z0
N186	X-33.123	N232	X-33
N187	Z19	N233	Z19
N188	X-33.064	N234	Y-6.3 F33
N189	Y-4.2 F33	N235	Z38 F200
N190	Z38 F200	N236	X-27
N191	X-26.936	N237	Z0
N192	Z0	N238	X-33
N193	X-33.065	N239	Z19

N240	Y-6.6 F33	N286	Y-8.7 F33
N241	Z38 F200	N287	Z38 F200
N242	X-27	N288	X-27.173
N243	Z0	N289	Z0
N244	X-33	N290	X-32.827
N245	Z19	N291	Z19
N246	Y-6.9 F33	N292	X-32.747
N247	Z38 F200	N293	Y-9 F33
N248	X-27	N294	Z38 F200
N249	Z0	N295	X-27.253
N250	X-33	N296	Z0
N251	Z19	N297	X-32.747
N252	Y-7.2 F33	N298	Z19
N253	Z38 F200	N299	X-32.594
N254	X-27	N300	Y-9.3 F33
N255	Z0	N301	Z37.88 F200
N256	X-33	N302	X-32.593 Z38
N257	Z19	N303	X-27.406
N258	Y-7.5 F33	N304	Z0
N259	Z38 F200	N305	X-32.594
N260	X-27	N306	Z19
N261	Z0	N307	X-32.441
N262	X-33	N308	Y-9.6 F33
N263	Z19	N309	Z37.88 F200
N264	X-32.969	N310	X-32.44 Z38
N265	Y-7.8 F33	N311	X-27.559
N266	Z38 F200	N312	Z0
N267	X-27.031	N313	X-32.441
N268	Z0	N314	Z19
N269	X-32.97	N315	X-32.203
N270	Z19	N316	Y-9.9 F33
N271	X-32.922	N317	Z38 F200
N272	Y-8.1 F33	N318	X-27.797
N273	Z38 F200	N319	X-27.796 Z0
N274	X-27.078	N320	X-32.204
N275	Z0	N321	Z19
N276	X-32.922	N322	X-31.903
N277	Z19	N323	Y-10.2 F33
N278	X-32.874	N324	Z38 F200
N279	Y-8.4 F33	N325	X-28.097
N280	Z38 F200	N326	Z0
N281	X-27.126	N327	X-31.904
N282	Z0	N328	Z19
N283	X-32.874	N329	X-31.485
N284	Z19	N330	Y-10.5 F33
N285	X-32.827	N331	Z38 F200

N332 X-28.515
N333 Z0
N334 X-31.485
N335 Z19
N336 X-30.869
N337 Y-10.8 F33

N338 Z38 F200
N339 X-29.13
N340 Z0
N341 X-30.87
N342 X-30.869 Z19
N343 G0 Y10

β) Πρόγραμμα καθοδήγησης κάτω πλευράς

%PM
N999999 (OMEGA2.TAP)
N1 G90
N2 G18
N3 G52
N4 (*WKZ 1 - DIA 40.0*)
N5 T1 M6 (FACE MILL)
N6 G14 N1=13 N2=21 (FM-facemill1-T1)
N7 M9
N8 (*WKZ 14 - DIA 8.0*)
N9 T14 M6 (END MILL)
N10 G14 N1=22 N2=65 (P-contour2-T14)
N11 M9
N12 G22 N=100

N13 (-----)
N14 (FM-FACEMILL1-T1 - FACE-MILLING)
N15 (-----)
N16 S1000 M3
N17 G0 X24 Y10 Z19
N18 G0 Y2
N19 G1 Y0 F33
N20 X-84 F100
N21 G0 Y10

N22 (-----)
N23 (P-CONTOUR2-T14 - POCKET)
N24 (-----)
N25 S2000 M3
N26 G0 X-6.976 Y10 Z29
N27 G0 Y2
N28 G1 Y-4 F33
N29 G14 N1=66 N2=69

N30 G0 Y10
N31 G0 Z29
N32 G0 Y-2
N33 G1 Y-7 F33
N34 G14 N1=66 N2=69
N35 G0 Y10
N36 G0 X-52.976 Z29
N37 G0 Y2
N38 G1 Y-4 F33
N39 G14 N1=70 N2=73
N40 G0 Y10
N41 G0 Z29
N42 G0 Y-2
N43 G1 Y-7 F33
N44 G14 N1=70 N2=73
N45 G0 Y10
N46 G0 Z11
N47 G0 Y2
N48 G1 Y-4 F33
N49 G14 N1=74 N2=77
N50 G0 Y10
N51 G0 Z11
N52 G0 Y-2
N53 G1 Y-7 F33
N54 G14 N1=74 N2=77
N55 G0 Y10
N56 G0 X-6.976 Z11
N57 G0 Y2
N58 G1 Y-4 F33
N59 G14 N1=78 N2=81
N60 G0 Y10
N61 G0 Z11
N62 G0 Y-2
N63 G1 Y-7 F33
N64 G14 N1=78 N2=81
N65 G0 Y10

N66 G1 X-7.024 Z29 F100
N67 Z27
N68 X-6.976
N69 G3 Z27 X-6.976 I-7 K28

N70 G1 X-53.024 Z29 F100
N71 Z27
N72 X-52.976
N73 G3 Z27 X-52.976 I-53 K28

N74 G1 X-53.024 Z11 F100
N75 Z9
N76 X-52.976
N77 G3 Z9 X-52.976 I-53 K10

N78 G1 X-7.024 Z11 F100
N79 Z9
N80 X-6.976
N81 G3 Z9 X-6.976 I-7 K10