



ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ
ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΘΕΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΥΤΗΣ

DPSD18054

Επιβλέπων καθηγητής: Μουλιανίτης Βασίλειος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη και την βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια και τον φίλο μου Νίκο Στραβοπόδη που μου γνώρισε τον κόσμο της ρομποτικής.

Χωρίς τη συμβολή τους αυτή η εργασία δεν θα είχε υπάρξει ποτέ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή, αφορά την σχεδίαση ενός ρομπότ που θα μπορεί να μεταφέρει ένα αντικείμενο σε κεκλιμένο επίπεδο χωρίς να ανατραπεί. Το ρομπότ θα διαθέτει μηχανισμό που μπορεί να μεταβάλει το κέντρο βάρους του και θα λειτουργεί με ένα σύστημα ελέγχου που παίρνει τα κατάλληλα δεδομένα από την κλίση του εδάφους και μετακινεί το κέντρο βάρους στη σωστή θέση ώστε το ρομπότ να έχει την καλύτερη δυνατή πέδηση στο έδαφος. Το σύστημα της ισορροπίας θα πρέπει να λειτουργεί τελείως αυτόματα, χωρίς κάποια χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων για τη φύση του εδάφους ή άλλων συνθηκών. Το ρομπότ θα διαθέτει πλατφόρμα επάνω στην οποία ένα φορτίο αδιευκρίνιστης μάζας και κέντρου βάρους θα είναι σταθερά τοποθετημένο. Το σύστημα ισορροπίας θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με διαφορετικό φορτίο κάθε φορά και όχι για ένα συγκεκριμένο φορτίο με πεπερασμένο κέντρο μάζας. Θεωρείται όμως ότι το φορτίο θα παραμένει σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας και δεν θα υπάρχει καμία μεταβολή της μάζας ή του κέντρου βάρους όσο το ρομπότ θα βρίσκεται εν κινήσει. Το ρομπότ μπορεί να στηρίζεται σε τέσσερις τροχούς, με τους οποίους μετακινείται στο έδαφος, οι οποίοι όμως δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένοι με το σύστημα ελέγχου της ισορροπίας. Η ιδέα είναι ότι ένας άνθρωπος ή ένα σύστημα θα μπορεί να δίνει εντολές στο ρομπότ όσον αφορά την κατεύθυνση της κίνησής του στο χώρο, αλλά παράλληλα, σε ότι έδαφος και αν βρεθεί κατά την διάρκεια της κίνησης, το ρομπότ θα διατηρήσει την ισορροπία του αυτόματα. Η κίνηση του ρομπότ στο χώρο με τη χρήση των τροχών, δεν μελετήθηκε εκτεταμένα κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς δεν ήταν το κύριο αντικείμενο μελέτης. Κύριο ζητούμενο της εργασίας είναι να σχεδιαστεί ο μηχανισμός και το σύστημα ελέγχου της ισορροπίας του σώματος, το οποίο θα λειτουργεί ανεξάρτητα από οποιαδήποτε άλλη πιθανή κίνηση.

Για την κατασκευή του ρομπότ θα χρησιμοποιηθούν φθηνά και απλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα από το λιανικό εμπόριο, διότι η εργασία δεν έχει στόχο να μελετήσει τη λειτουργία εξεζητημένων μηχανισμών, αλλά να κάνει μια έρευνα σε απλά συστήματα εισόδου – εξόδου και να παρέχει μια πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας. Η λειτουργία του συστήματος θα βασιστεί στην πλατφόρμα Arduino, καθώς είναι εύχρηστο και θεωρήθηκε ότι είναι κατάλληλο να εκτελέσει την ζητούμενη λειτουργία. Για την κατασκευή του ρομπότ θα γίνει χρήση 3D εκτυπωτή, καθώς είναι το φθηνότερο και καλύτερο μέσο κατασκευής στο οποίο υπάρχει εύκολη πρόσβαση καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης η 3D εκτύπωση παρέχει μεγάλη ελευθερία στο στάδιο της σχεδίασης, καθώς πολλαπλασιάζει τις δυνατότητες για περίπλοκα και πρωτότυπα σχέδια, χωρίς να βασίζεται σε μηχανισμούς ή φόρμες του εμπορίου.

SUMMARY

This thesis is about the development of a robot which will be able to transfer an object with undefined mass and center of gravity, in inclined ground, without causing the robot to overturn. Robot's mechanism will be able to move the total center of gravity of the system and will work using a control system that receives data about the angle of the ground, and then transform the center of gravity accordingly, in order to have the best possible holding on the ground. The system of balance will have to be completely autonomous, without any human input about the form of the ground or other ground conditions. The robot will have a platform on which the load will have been fixed before the startup. The system will have to be able to work with a different load in every use, without any standard mass or center of gravity. It is also considered that once the robot turns on, the load will remain the same, and won't be any changes at the mass or the center of gravity of the object. The robot can be supported by four wheels for its movement on the ground, but they will not necessarily be controlled by the automatic control system. The idea behind this, is that the robot will be moved on the ground by a human or a system, but either way the system of balance will work automatically. The movement on the ground by the use of wheels was not studied extensively, because it was not the main field of study. The wanted outcome of this thesis is the balance control system, which will work independently of any other movement system.

For the construction of the robot, the electronic systems will be simple and cheap components from the market, since the goal is not to study the function of any advanced electronic circuits, but to make a simple research on the input – output systems and provide a simple application of the control theory. The functionality of the system will be relied on the Arduino platform, since it's easy to use and was considered capable to perform the wanted operations. The construction of the hardware of the robot, will be done with the use of a 3D printer, since it's the simplest and cheapest means of construction that there is easy access to. Also 3D printing provides great liberties while designing, since it can create multiple complex and original forms to cover all the necessary needs, without relying exclusively on the market for products.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή και Έρευνα	6
1.1.	Εισαγωγή.....	6
1.2.	Δομή διπλωματικής	7
1.3.	Έρευνα	7
1.3.1.	Συστήματα αυτόματου ελέγχου	7
1.3.2.	Μηχανοτρονική	10
1.3.3.	PID ελεγκτής	12
1.4.	Τεχνολογική έρευνα.....	13
1.4.1.	Τεχνολογία MEMS (Micro Electromechanical Systems)	13
1.4.2.	Load Cells – Strain gauges.....	13
1.4.3.	Αισθητήρας αδράνειας	15
1.4.4.	Επιταχυνσιόμετρο	16
1.4.5.	Γυροσκόπιο.....	17
1.5.	Αντίστοιχα projects	20
1.5.1.	Ανάστροφο εκκρεμές	20
1.5.2.	Drones	21
1.5.3.	Άλλα συστήματα ισοροπίας	21
1.6.	Συμπεράσματα έρευνας	22
3.	Αναλυτική περιγραφή του προβλήματος.....	23
3.1.	Τι Σχεδιάζεται.....	23
3.2.	Θεωρητική περιγραφή του προβλήματος	23
3.3.	Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος	25
3.4.	Συμπεράσματα ανάλυσης του προβλήματος	28
4.	Εξέλιξη σχεδίασης	29
4.1.	Αρχικές ιδέες.....	29
4.1.1.	Μεταφερόμενη πλατφόρμα.....	29
4.1.2.	Περιστρεφόμενη πλατφόρμα.....	30
4.1.3.	Πλατφόρμα μετακινούμενη με υδραυλικά έμβολα.....	31
4.1.4.	Διαφορικό γρανάζι	32
4.2.	Τελική σύνθεση.....	33
4.3.	Συμπεράσματα κεφαλαίου	34
5.	Μαθηματική μοντελοποίηση	35
5.1.	Κινηματική Ανάλυση	35
5.1.1.	Σώμα Α.....	35
5.1.2.	Σώμα Β.....	36

5.1.3.	Σώμα Γ	38
5.2.	Δυναμική Ανάλυση	39
5.2.1.	Δυνάμεις βαρύτητας	39
5.2.2.	Δυνάμεις επαφής	39
5.2.3.	Σώμα Γ	41
5.2.4.	Σώμα Β.....	42
5.2.5.	Σώμα Α.....	44
5.3.	Σύστημα εξισώσεων.....	46
5.4.	Συμπεράσματα μαθηματικής μοντελοποίησης.....	46
6.	Σχεδίαση.....	47
6.1.	Σχεδίαση μεμονωμένων συστημάτων	47
6.1.1.	Γρανάζια	47
6.1.2.	Μηχανισμοί κύλισης.....	48
6.1.3.	Κορμοί πλατφορμών	49
6.1.4.	Σύστημα τροχών	51
6.2.	Assembly.....	53
6.3.	Συμπεράσματα Σχεδίασης	55
7.	Κατασκευή.....	56
7.1.	3D εκτύπωση	56
7.2.	Ηλεκτρονικά συστήματα.....	59
7.2.1.	Κίνηση πλατφορμών.....	59
7.2.2.	Κίνηση στο έδαφος.....	59
7.2.3.	Μέτρηση δυνάμεων	60
7.2.4.	Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας/γραμμικής επιτάχυνσης	60
7.2.5.	Μικροελεγκτής	60
7.2.6.	Καλωδίωση	60
7.3.	Πρώτο στάδιο πειραμάτων.....	61
7.4.	Συμπεράσματα από την κατασκευή	63
8.	Σύστημα ελέγχου και δεύτερο στάδιο πειραματισμού	64
8.1.	Ρ Έλεγχος.....	64
8.2.	Προτάσεις για το μέλλον	68
8.2.1.	Έλεγχος της βάσης στήριξης.....	68
8.2.2.	Έλεγχος με βάση τη μαθηματική μοντελοποίηση	69
8.3.	Συμπεράσματα πειραμάτων του συστήματος ελέγχου	70
9.	Συμπεράσματα	71
10.	Βιβλιογραφία	72

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΈΡΕΥΝΑ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σημερινή εποχή, τα αυτοματοποιημένα συστήματα συναντώνται σε κάθε πτυχή της καθημερινότητας. Από το θερμοστάτη και την πόρτα του σούπερ μάρκετ, μέχρι τη ρομποτική και τους δορυφόρους, υπάρχουν χιλιάδες λειτουργίες που επιτελούνται αυτοματοποιημένα, χωρίς την ενεργή συμμετοχή ανθρώπου. Τα σύγχρονα τεχνολογικά συστήματα έχουν γίνει πολύ περίπλοκα, με τόσες πολλές παραμέτρους, που θα ήταν αδύνατον για τον άνθρωπο να κάνει κάθε μια λειτουργία χειροκίνητα.

Ο πιλότος ενός αεροπλάνου για παράδειγμα, μπορεί να χρειαστεί να κατεβάσει το αεροπλάνο του σε χαμηλότερο ύψος. Για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα πρέπει να συντονιστούν όλα τα υποσυστήματα του αεροπλάνου: τα πτερύγια να πάρουν τη σωστή κλίση, οι κινητήρες να δώσουν τη σωστή ώθηση, το ραντάρ να επιβεβαιώσει ότι δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στην αναμενόμενη θέση και οι σηματοδότες των επιβατών να τους ενημερώσουν να βάλουν τις ζώνες τους. Αν έπρεπε η κάθε λειτουργία να γίνει σωστά και στο σωστό χρόνο χειροκίνητα από τον πιλότο, θα ήταν πολύ δύσκολο, χρονοβόρο, ακόμα και επικίνδυνο. Αντ' αυτού, ο πιλότος απλά κινεί το πεδάλιο όσο κρίνει ή θέλει και το σήμα αυτό μεταφράζεται αυτομάτως από τα συστήματα του αεροπλάνου σε όλες τις επιμέρους λειτουργίες που χρειάζονται. Με αυτόν τον τρόπο η πτήση γίνεται ευκολότερη, πιο σίγουρη και ασφαλή.

Παρόλο που ένας άνθρωπος έχει την εντύπωση του ελέγχου, στην πραγματικότητα υπάρχει ένα πλήθος λειτουργιών που γίνεται εν αγνοία του, για να εξυπηρετήσει τους επιθυμητούς στόχους. Όταν κάποιος χειρίζεται το τηλεκοντρόλ ή όταν αλλάζει θερμοκρασία στο κλιματιστικό, στην ουσία δηλώνει μια επιθυμία, την οποία το εκάστοτε σύστημα προσπαθεί να εκπληρώσει.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να σχεδιαστεί ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο σε μια απλή ανθρώπινη επιθυμία, να μπορεί να δώσει ένα θεωρητικά απλό αποτέλεσμα. Στην ενδιάμεση διαδρομή όμως, θα χρειαστεί να κινητοποιηθεί ένα περίπλοκο σύστημα, που θα διασφαλίσει, ότι αυτή η απλή εργασία θα εκτελεστεί σωστά.

1.2. ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Στη διπλωματική εργασία που ακολουθεί παρουσιάζονται σταδιακά τα βήματα για τη σχεδίαση και την κατασκευή αυτού του ρομπότ από την αρχή. Ξεκινώντας από τις θεωρητικές αρχές και καταλήγοντας στην πρακτική κατασκευή και τα πειράματα, η εργασία ακολουθεί τη λογική σειρά βημάτων που περιγράφουν τη διαδικασία της σχεδίασης και της κατασκευής. Να σημειωθεί ότι στην εργασία δεν παρουσιάζονται τα κεφάλαια με την σειρά που όντως έγιναν, καθώς πολλά διαφορετικά σημεία της εργασίας, μπορεί στην πραγματικότητα να εξελίχθηκαν παράλληλα ή με άλλη σειρά από αυτήν που παρουσιάζονται. Αντ' αυτού, η σειρά των κεφαλαίων γράφτηκε με βάση την ακολουθία των γνώσεων και των ιδεών που πρέπει να έχουν προηγηθεί σε κάθε ένα κεφάλαιο, για να παρουσιαστούν και να εξηγηθούν σωστά.

- Αρχικά παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα επάνω στη θεωρία και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της εργασίας.
- Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αρχικό στάδιο της σχεδίασης στο οποίο αναλύεται λεπτομερώς ο στόχος της εργασίας και μελετώνται ιδέες για την υλοποίησή του.
- Στο επόμενο βήμα γίνεται η λεπτομερής σχεδίαση του ρομπότ μαζί με το μαθηματικό του μοντέλο.
- Τέλος ακολουθούν τα κεφάλαια της κατασκευής του πρωτοτύπου και των πειραμάτων.

1.3. ΈΡΕΥΝΑ

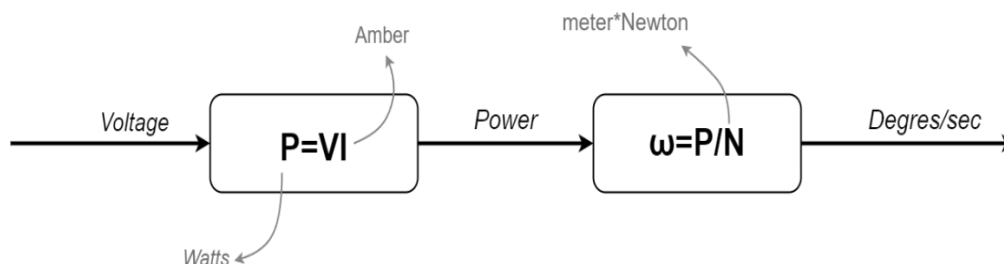
Προτού η εργασία προχωρήσει σε οποιαδήποτε μορφή σχεδιασμού, χρειάζεται να προηγηθεί μια εκτεταμένη έρευνα επάνω στο αντικείμενό της. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, μελετήθηκε η έννοια του αυτόματου ελέγχου (τι σημαίνει και πώς υλοποιείται), μελετήθηκε η τεχνολογία επάνω στην οποία το ρομπότ θα βασιστεί, καθώς και άλλα αντίστοιχα projects ή κατασκευές που παρείχαν χρήσιμες πληροφορίες για τη σχεδίαση του συστήματος.

1.3.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Με τον όρο σύστημα, θεωρούμε ένα τμήμα του περιβάλλοντος του οποίου τα μέλη αλληλοεπηρεάζονται. Σύστημα αυτόματου ελέγχου, είναι το σύστημα το οποίο έχει σαν στόχο να κατανοήσει το περιβάλλον του και να το επηρεάσει με ένα συγκεκριμένο τρόπο ώστε να αποδώσει ένα χρήσιμο αποτέλεσμα. Ένας διαφορετικός ορισμός δηλώνει ότι «σύστημα αυτόματου ελέγχου είναι ένα σύνολο διασυνδεδεμένων στοιχείων από το οποίο προκύπτει μια συγκεκριμένη διαμόρφωση (του συστήματος), που με τη σειρά της εξασφαλίζει την επιθυμητή απόκριση» [1].

Ένα τυπικό σύστημα ελέγχου έχει τουλάχιστον τρία στοιχεία, την είσοδο, τη διαδικασία και την έξοδο. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα διαβάσει μια χρήσιμη πληροφορία από το περιβάλλον, θα την επεξεργαστεί και θα δημιουργήσει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα που θα βγάλει ως έξοδο. Με αυτόν τον τρόπο επιτελείται μια ελεγχόμενη διαδικασία [1].

Τα πιο απλά συστήματα ελέγχου, ονομάζονται συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Τα συστήματα αυτά εκτελούν 'τυφλά' τη διαδικασία και δεν ασχολούνται καθόλου με το τι συμβαίνει μετά την έξοδο από το σύστημα [1] [2].



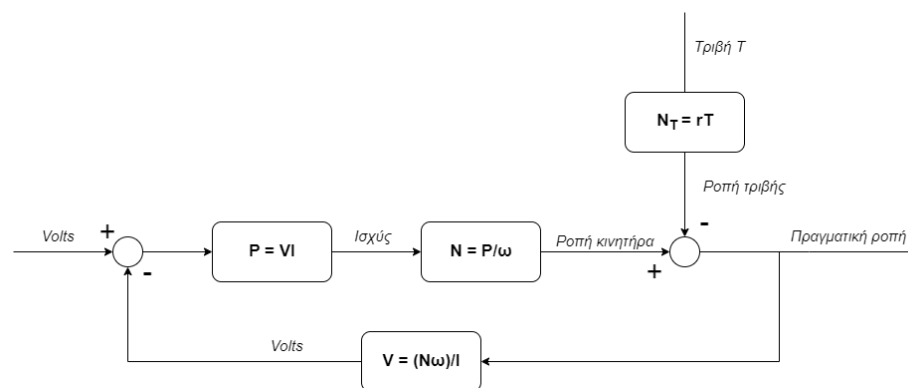
ΕΙΚΟΝΑ 1 :ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ ΓΙΑ DC ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της μορφής είναι ένας DC κινητήρας (Εικόνα 1). Ο κινητήρας δέχεται σαν είσοδο μια ηλεκτρική τάση, την οποία μετατρέπει σε κίνηση και εξάγει μια ταχύτητα. Όσο υψηλότερη είναι η τάση εισόδου, τόσο πιο υψηλή θα είναι η ταχύτητα εξόδου. Κατ' αυτόν τον τρόπο για να ελεγχθεί η ταχύτητα του κινητήρα (έξοδος), αρκεί απλά να ελεγχθεί η τάση του ρεύματος (είσοδος).

Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου βασίζονται καθαρά στη σχέση αίτιου αποτελέσματος [1] και συνήθως είναι απλά, αλλά εμφανίζουν προβλήματα όταν οι απαιτήσεις που έχουμε από το σύστημα αυξάνονται. Το σύστημα ανοιχτού βρόγχου δεν έχει επίγνωση της κατάστασης που βρίσκεται, επομένως δεν έχει τη δυνατότητα να διορθώσει τυχόν λάθη κατά τη διαδικασία. Στον πραγματικό κόσμο αστοχίες, αποκλίσεις ή λάθη είναι αναπόφευκτα σε οποιαδήποτε μορφή συστήματος.

Το παράδειγμα του κινητήρα που αναφέρθηκε πριν, μπορεί να εξελιχθεί αν στον κινητήρα προστεθεί μια ρόδα. Η ρόδα θα έχει βάρος, ροπή αδράνειας και μια τριβή με το έδαφος. Αυτοί οι παράγοντες αναπόφευκτα θα μειώσουν την ταχύτητα (έξοδος) του κινητήρα, παρόλο που η τάση του ρεύματος (είσοδος) παραμένει σταθερή. Σε αυτό το σημείο μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει μία θεωρητική και μια πραγματική ταχύτητα για τον κινητήρα. Η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και τη θεωρητική έξοδο ονομάζεται σφάλμα [1].

Για να αντιμετωπιστεί το σφάλμα των συστημάτων ελέγχου, δημιουργήθηκε ένα επιπλέον βήμα, η ανάδραση [1] [2]. Μετά το τέλος της διαδικασίας, η πραγματική έξοδος μετριέται και συγκρίνεται με την επιθυμητή έξοδο και το σήμα που παράγεται επιστρέφει στην εκκίνηση της διαδικασίας ώστε να συνυπολογιστεί με την είσοδο. Τα συστήματα αυτά, λέγονται συστήματα κλειστού βρόγχου και τείνουν να είναι πολύ πιο αξιόπιστα και σταθερά (Εικόνα 2).



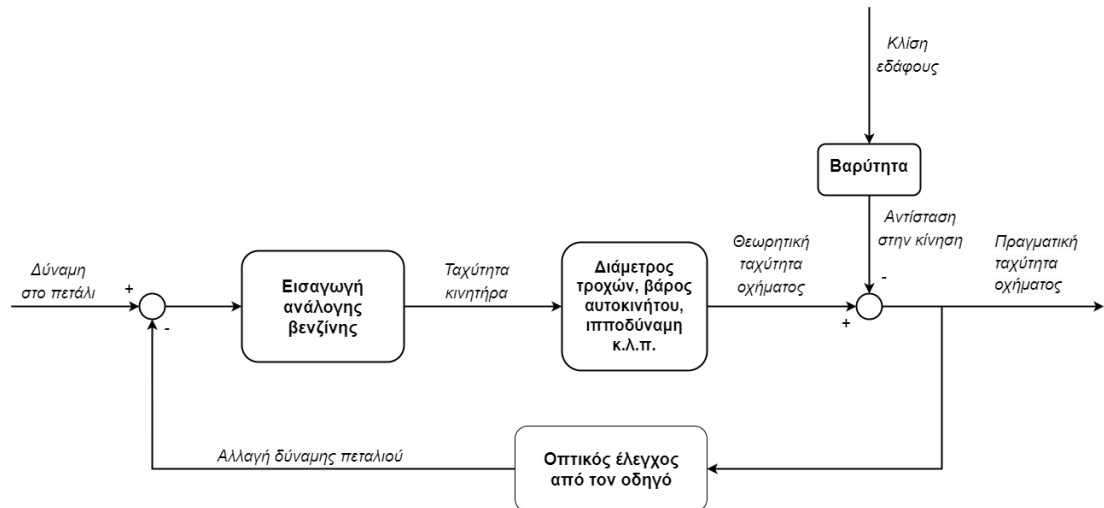
ΕΙΚΟΝΑ 2 : ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΑΝΑΔΡΑΣΗ ΓΙΑ DC ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΡΟΧΟ

Για να μελετηθεί ο βαθμός, που ένα σύστημα ελέγχου πετυχαίνει τον στόχο του, εισήχθη η έννοια της ευστάθειας. Σε καθαρά θεωρητικό επίπεδο, ευσταθές είναι ένα σύστημα που δίνει ένα φραγμένο αριθμό εξόδων για ένα φραγμένο αριθμό εισόδων. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η είσοδος να δίνει συγκεκριμένα αποτελέσματα, σε αντίθετη περίπτωση, δεν έχουμε ουσιαστικό έλεγχο και το σύστημα δεν έχει νόημα [3].

Το πρώτο σύστημα αυτόματου ελέγχου με ανάδραση που έχει καταγραφεί στην ιστορία, προέρχεται από την αρχαία Ελλάδα και είναι ένας μηχανισμός ρύθμισης της στάθμης υγρών τύπου φλοτέρ, περίπου το 300 π.Χ.. Αντίστοιχοι μηχανισμοί καταγράφονται και στα επόμενα χρόνια από ποικίλους εφευρέτες. Τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου εμφανίζονται στην Ευρώπη στον 16^ο - 17^ο αιώνα, με τον ελεγκτή θερμοκρασίας του Cornelis Drebbel (1572 - 1663) και το ρυθμιστή πίεσης για ατμολέβητες του Dennis Papin (1647-1712). Το 1769, ο James Watt εφευρίσκει τη διάταξη ελέγχου κινούμενης σφαίρας για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής μιας ατμομηχανής, το πρώτο σύστημα αυτόματου ελέγχου που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικό επίπεδο [1].

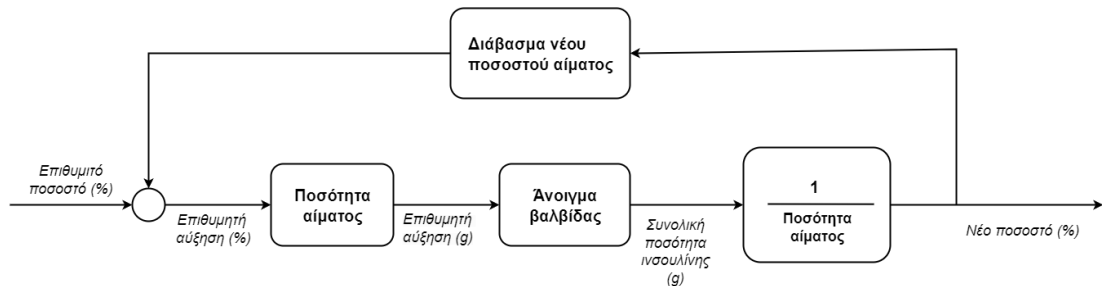
Με την εξέλιξη της μηχανολογίας κατά τη βιομηχανική επανάσταση, η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις των συστημάτων αυξήθηκαν, με αποτέλεσμα να υπάρξει η ανάγκη κατάρτισης μιας μαθηματικής θεωρίας επάνω στον αυτόματο έλεγχο. Τέτοιες θεωρίες θα διατύπωναν το 1868 ο J.C.Maxwell και ο I.A. Vyshnegradskii την ίδια περίοδο [1].

Με την είσοδο νέων τεχνολογιών στη βιομηχανική παραγωγή και την είσοδο στον 20^ο αιώνα, εμφανίζονται αντίστοιχα νέες απαιτήσεις. Το 1927 διατυπώνεται η ιδέα της ανάδρασης και το 1932 παρουσιάζεται η πρώτη μέθοδος ανάλυσης της ευστάθειας ενός συστήματος. Από το 1940 ξεκινούν να εμφανίζονται νέες θεωρίες, ώστε οι μελέτες της ευστάθειας ενός συστήματος από εμπειρικές (trial and error) να γίνουν υπολογίσιμες. Με την εκτόξευση των πρώτων δορυφόρων, τα μαθηματικά μοντέλα εξελίχθηκαν ώστε να εκτελούν υπολογισμούς βελτιστοποίησης και πολύ λεπτομερών ελέγχων [1]. Σήμερα τα συστήματα ελέγχου μπορούν να βρεθούν σε κάθε κλάδο της ζωής, με ευρεία χρήση στη ρομποτική, την αυτοκινητοβιομηχανία και τις υποδομές [2] [1]. Στην Εικόνα 3, φαίνονται δύο παραδείγματα συστημάτων ελέγχου με ανάδραση.



Επάνω: Σύστημα ελέγχου αυτοκινήτου με οδηγό

Κάτω: Σύστημα ελέγχου του ποσοστού ινσουλίνης στο αίμα



ΕΙΚΟΝΑ 3 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΟΔΗΓΟ (ΕΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΙΝΣΟΥΛΙΝΗΣ ΣΤΟ ΑΙΜΑ (ΚΑΤΩ)

1.3.2. ΜΗΧΑΝΟΤΡΟΝΙΚΗ

Μια συνεργασία επιστημών που πλέον συναντάται σε καθημερινή βάση, είναι η συνεργασία, Ηλεκτρολογίας – Προγραμματισμού – Μηχανολογίας. Στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, η κλασική θεωρία ελέγχου, συνδυάστηκε με τις καινούριες τεχνολογίες των υπολογιστών και της φυσικής και περίπλοκα ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα στη μηχανική και την παραγωγή [1]. Παράλληλα η παγκόσμια οικονομία πίεσε τις εταιρίες να παράγουν φθηνότερα και πιο αποδοτικά προϊόντα, με αποτέλεσμα να δοθεί έντονη έμφαση στη σχεδίαση και την παραγωγή [4]. Η μεγάλη αλληλεξάρτηση μεταξύ των τεχνολογιών, δημιούργησε την ανάγκη για μια νέα θεωρία επάνω στη σχεδίαση συστημάτων. Η νέα αυτή θεωρία απαιτεί μια μέθοδο ολοκληρωμένης σχεδίασης, που τα κομμάτια όλων των εμπλεκόμενων επιστημών δεν σχεδιάζονται ξεχωριστά, αλλά αντιμετωπίζονται σαν μια ενιαία επιστήμη. Τη δεκαετία του 1970, στην Ιαπωνία, ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν τον όρο Μηχανοτρονική για να περιγράψουν τη νέα σχεδιαστική μέθοδο. Σήμερα τα Μηχανοτρονικά συστήματα έχουν πρακτικά αντικαταστήσει την παραδοσιακή μηχανολογία. Σχεδόν όλες οι μηχανικές διεργασίες ελέγχονται ηλεκτρονικά, συνδυάζοντας αισθητήρες, μικροελεγκτές και λογισμικό [1].

Ένα ολοκληρωμένο μηχανοτρονικό σύστημα χρειάζεται γνώσεις από τις εξής επιστήμες:

- *Μαθηματικά:* Για την επίλυση των περίπλοκων συστημάτων ελέγχου, καθώς και της φυσικής μοντελοποίησης των προβλημάτων, χρειάζεται μια άρτια γνώση επάνω στις διαφορικές εξισώσεις, θεωρία πινάκων, συστήματα συντεταγμένων, μετασχηματισμό Laplace κ.α.
- *Μηχανική – Κινηματική – Φυσική:* Για να σχεδιαστεί ένα σύστημα, θα χρειαστεί να γίνει μια καλή μοντελοποίηση των μελών του στο χαρτί. Θα χρειαστεί να εφαρμοστούν οι νόμοι της κινηματικής της δυναμικής και της φυσικής¹.
- *Ηλεκτρικά κυκλώματα / Υπολογιστές:* Από την στιγμή που μια λειτουργία ελέγχεται με ηλεκτρονικά μέσα, χρειάζεται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για να επιτελέσει αυτή τη λειτουργία. Η γνώση κυκλωμάτων είναι απαραίτητη, αφού αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι των μηχανοτρονικών συστημάτων.
- *Λογισμικό:* Πλέον η ίδια η σχεδίαση ενός συστήματος, απαιτεί τη χρήση υπολογιστών. Στην κατασκευή ενός μηχανοτρονικού συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν λογισμικά σχεδίασης, μαθηματικών υπολογισμών, προγραμματισμού, προσομοίωσης, καθώς και πιο εκλεπτυσμένα λογισμικά για τον έλεγχο του συστήματος κατά την λειτουργία του.
- *Θεωρία συστημάτων ελέγχου:* Όπως είπαμε και στην αρχή του κεφαλαίου, η σχεδίαση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου χρειάζεται ώστε να οργανωθούν οι λειτουργίες του συστήματος. Η θεωρία αυτόματου ελέγχου κάνει πιο εύκολο να κατανοηθούν και να εκτελεστούν οι αλληλεπιδράσεις του σχεδιαζόμενου συστήματος.
- *Τεχνολογικές – Τεχνικές γνώσεις:* Ένα μηχανοτρονικό σύστημα μπορεί να έχει μια ποικιλία εξαρτημάτων, είτε ως αισθητήρες είτε ως ενεργοποιητές. Ένα σύγχρονο αυτοκίνητο για παράδειγμα μπορεί να περιέχει 30-60 μικροελεγκτές, περισσότερους από 100 ηλεκτρικούς κινητήρες και δεκάδες διαφορετικά είδη αισθητήρων [1]. Για να σχεδιάσουμε ένα μηχανοτρονικό σύστημα, χρειάζεται μια καλή γνώση της τεχνολογίας που είναι διαθέσιμη στο σχεδιαστικό κοινό, καθώς και καλή επαφή με τις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται χρόνο με τον χρόνο.

¹ Ανάλογα με το τί σχεδιάζουμε, μπορεί να χρησιμοποιήσουμε μια ποικιλία θεωρημάτων από επιστήμες όπως επιστήμη υλικών, χημεία, βιολογία, νανοτεχνολογία κ.λ.π.

1.3.3. PID ΕΛΕΓΚΤΗΣ

Όταν σχεδιάζονται περίπλοκα συστήματα, μπορεί η απλή μοντελοποίηση του συστήματος να είναι δύσκολη και χρονοβόρα και απαιτείται ένας απλός τρόπος να παράγει το σήμα εξόδου. Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους να σχεδιάζεται ένα σύστημα ελέγχου, είναι με την χρήση PID ελεγκτή. Ο ελεγκτής είναι στην ουσία ένας τελεστής που μετασχηματίζει το σήμα εισόδου, ώστε να σταθεροποιεί το σύστημα στις εισερχόμενες μεταβολές. Ο όρος PID, είναι τα αρχικά των όρων: Proportional (αναλογικός) – Integral (ολοκληρωτικός) – Derivative (διαφορικός), που δείχνει τα τρία είδη μετατροπών που μπορεί ο ελεγκτής να επιτελέσει. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτές οι λειτουργίες και τα οφέλη που προσδίδει η κάθε μια στο σύστημα.

Η πιο απλή μορφή ελέγχου είναι ο αναλογικός ή αλλιώς P έλεγχος. Στην ουσία πρόκειται για έναν απλό ενισχυτή σήματος. Ο ελεγκτής είναι ένα σταθερό κέρδος K_P , το οποίο πολλαπλασιάζει την τιμή του σφάλματος. Το σήμα εξόδου επομένως από τον ελεγκτή αλλάζει αναλογικά με την απόσταση που έχει το σύστημα από την επιθυμητή του κατάσταση. Η χρησιμότητα αυτού του ελεγκτή έγκειται στην απλότητά του. Αν είναι καλά σχεδιασμένος μπορεί να έχει σίγουρα ένα καλό αποτέλεσμα. Ενδέχεται όμως να προκαλέσει αρκετή ταλάντωση και να χρειάζεται πολύ χρόνο για να σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή τιμή.

Η εξίσωση που δίνει το σήμα εξόδου ενός συστήματος με ελεγκτή K_P και σφάλμα $e(t)$ είναι:

$$u_{(t)} = K_P \cdot e_{(t)}$$

Για να βελτιωθεί η απόκριση του συστήματος, μπορεί να προστεθεί στον ελεγκτή ένα επιπλέον κομμάτι, ο διαφορικός, ή αλλιώς D έλεγχος. Ο D ελεγκτής, τοποθετείται επιπρόσθετα στον P και λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής του ρυθμού μεταβολής του σήματος εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα εισόδου επηρεάζεται και από την απόσταση του συστήματος από την επιθυμητή του θέση, αλλά και από την ταχύτητα απόκρισης που έχει. Αυτή η προσθήκη βοηθάει το σύστημα να κάνει μια πιο ομαλή κίνηση και να σταθεροποιηθεί σε λιγότερο χρόνο από ότι θα έκανε με απλό αναλογικό έλεγχο.

Η εξίσωση απόκρισης του συστήματος σε αυτήν την περίπτωση θα είναι:

$$u_{(t)} = K_P \cdot e_{(t)} + K_D \cdot \frac{de_{(t)}}{dt}$$

Τρίτη δυνατή προσθήκη είναι ο ολοκληρωτικός έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός, όπως δηλώνει και το όνομα, ρυθμίζει το ολοκλήρωμα του σήματος εισόδου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το σύστημα λαμβάνει υπόψη τις προηγούμενες θέσεις του και προσπαθεί να προβλέψει τη μελλοντική του απόκριση. Ο έλεγχος αυτός δουλεύει πάλι παράλληλα με τον αναλογικό, για να του προσδώσει καλύτερη απόκριση στις μεταβολές. Να σημειωθεί ότι σε αυτό το σημείο η ύπαρξη ελεγκτών από μόνη της δε λύνει απαραίτητα το πρόβλημα. Αν οι ελεγκτές δεν είναι καλά ρυθμισμένοι, δηλαδή αν οι τιμές των παραγόντων K_P, K_I, K_D δεν είναι καλές, η απόκριση θα απέχει από την επιθυμητή. Το ποιες είναι οι κατάλληλες τιμές για τον κάθε παράγοντα, μπορούν

να προσεγγισθούν μαθηματικά, αλλά και να δοκιμαστούν και να βελτιωθούν πειραματικά.

Ένας ολοκληρωμένος έλεγχος, που περιέχει και τα τρία είδη ελεγκτών που προαναφέρθηκαν, μπορεί να δώσει την καλύτερη δυνατή απόκριση του συστήματος σε τυχόν μεταβολές. Το συνολικό σήμα εξόδου $u_{(t)}$ με την χρήση PID ελεγκτή θα είναι:

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_I \cdot \int_0^t e_{(t)} dt + K_D \cdot \frac{de_{(t)}}{dt}$$

1.4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Ο κόσμος της τεχνολογίας έχει προσφέρει πολύ μεγάλες δυνατότητες στην ρομποτική. Ο άνθρωπος πλέον έχει πρόσβαση σε εξελιγμένα και εύχρηστα συστήματα, γεγονός που αυξάνει κατά πολύ τις δυνατότητες για τη δημιουργία πρακτικών εφαρμογών, όπως στην παρούσα εργασία. Παρακάτω έγινε μια έρευνα επάνω στα συστήματα μέτρησης δυνάμεων και τα συστήματα μέτρησης κίνησης, που σχετίζονται άμεσα με τις ανάγκες της εργασίας.

1.4.1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MEMS (MICRO ELECTROMECHANICAL SYSTEMS)

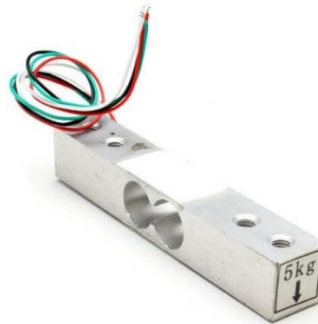
Πριν ξεκινήσει η ανάλυση συγκεκριμένων συστημάτων, χρειάζεται να γίνει μια αναφορά στην τεχνολογία των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων ((MEMS). Ο όρος MEMS πρωτοδιατυπώθηκε από τον καθηγητή R.Howe το 1989 [5]. Αυτό που ήθελε να περιγράψει, είναι ένα μηχανικό σύστημα, κατασκευασμένο σε μια μικροσκοπική κλίμακα, ώστε να μπορεί να συνδυαστεί ένα μηχανικό με ένα ηλεκτρονικό σύστημα σε μια κοινή κατασκευή από σιλικόνη [6]. Το προτέρημα τέτοιων συστημάτων είναι ότι μπορούν να εκδηλώσουν μηχανικές ιδιότητες, όπως ροπή, κίνηση και αδράνεια, ενώ παράλληλα είναι εγκατεστημένα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με όλες τις λειτουργίες του. Παράλληλα, λόγω του μικρού τους μεγέθους, μπορούν να εκδηλώσουν ιδιότητες που δεν θα ήταν δυνατές με μια μεγάλη κλασική κλίμακα. Τα συστήματα MEMS έχουν αποκτήσει πολλές λειτουργίες από την αρχή της χιλιετίας σε ποικίλους τομείς, από την αεροναυπηγική, μέχρι τη βιοτεχνολογία. [5] Το μεγάλο οικονομικό τους όφελος, έχει οδηγήσει στην ταχύτερη ανάπτυξή τους. Όσον αφορά τα γυροσκόπια για παράδειγμα, σήμερα τα γυροσκόπια MEMS δεν χρησιμοποιούνται για ακριβούς ερευνητικούς σκοπούς, καθώς τα κλασικά οπτικά γυροσκόπια θεωρούνται πιο αξιόπιστα. Πολλοί ερευνητές όμως, βασιζόμενοι στα άλματα που έχει κάνει η τεχνολογία MEMS μέχρι σήμερα, πιστεύουν ότι πολύ σύντομα αυτό θα αλλάξει [7].

1.4.2. LOAD CELLS – STRAIN GAUGES

Ένας πολύ απλός αλλά χρήσιμος αισθητήρας που χρησιμοποιείται στο project, είναι το *Strain gauge*. Ο αισθητήρας αυτός μετράει το μέγεθος της παραμόρφωσης που δέχεται, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να οδηγήσει σε μέτρηση δυνάμεων και ροπών που ασκούνται σε ένα σώμα. Ο αισθητήρας εφευρέθηκε το 1938 στην Καλιφόρνια από τον Edward E. Simons και βελτιώθηκε το 1958 στην Αγγλία από τον Peter Scot Jackson [8]. Το strain gauge αποτελείται από παράλληλες καλωδιώσεις, οι οποίες ανάλογα με την απόσταση που βρίσκονται η μία από την

άλλη, αυξομειώνουν την ηλεκτρική αντίσταση. Από τη φυσική είναι γνωστό ότι όλα τα σώματα σε στερεή μορφή είναι σε κάποιο βαθμό ευαίσθητα σε ελαστική παραμόρφωση. Προσκολλώντας τον αισθητήρα επάνω στην επιφάνεια ενός στερεού σώματος, μετριέται η παραμόρφωση του αντικειμένου και στη συνέχεια, αν είναι γνωστές οι μηχανικές ιδιότητες του στερεού, μπορεί να μετρηθεί η δύναμη που ασκείται. Με την χρήση strain gauge σε πολύ ευαίσθητες αποστάσεις, είναι δυνατόν να μετρηθούν πολύ μικρές παραμορφώσεις και στην συνέχεια οι δυνάμεις που τις δημιουργούν. Για να μπορούν να μετρηθούν παραμορφώσεις πολύ μικρών αποστάσεων, οι αισθητήρες λειτουργούν με ευαισθησία 2 mV. Είναι απαραίτητη επομένως μια ενίσχυση του σήματος για να μπορεί να διαβαστεί με ακρίβεια στην πορεία. [9]

Για να απλοποιηθεί η χρήση του *strain gauge*, οι αισθητήρες τοποθετούνται πλέον σε έτοιμα, συνήθως μεταλλικά σώματα, τα οποία μπορούν πιο εύκολα να τοποθετηθούν επάνω σε κατασκευές και έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες για να λαμβάνονται ακριβείς μετρήσεις. Το συνολικό σύστημα που προκύπτει ονομάζεται *load cell* και υπάρχει πλέον σε ποικίλες μορφές, ανάλογα με τις χρήσεις που προβλέπεται να έχει [9]. Μπορεί να είναι πολύ απλά και φθηνά εξαρτήματα για μέτρηση σε έναν άξονα (Εικόνα 4), ή και σε πιο εξελιγμένες κατασκευές για μέτρηση δυνάμεων σε πολλαπλούς άξονες για διάφορες λειτουργίες (Εικόνα 5).

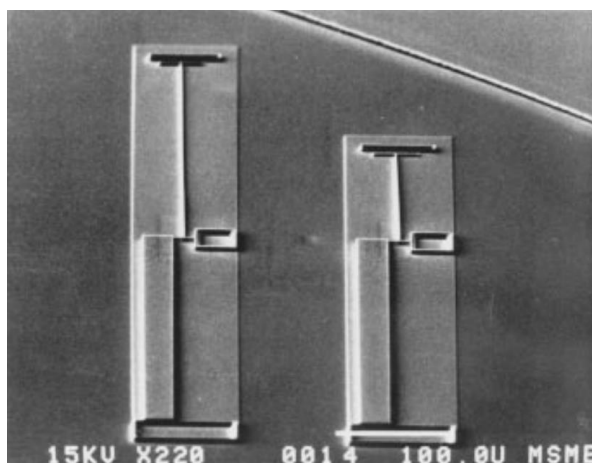


ΕΙΚΟΝΑ 4 : ΑΠΛΟ *LOAD CELL* ΕΝΟΣ ΑΞΟΝΑ (ΟΜΟΙΟ ΜΕ ΑΥΤΑ ΠΟΥ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ)



ΕΙΚΟΝΑ 5: *LOAD CELLS* ΠΟΛΛΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

Τώρα πια, τα *strain gauges* έχουν ενταχθεί και στην τεχνολογία *MEMS*, αποκτώντας νέες δυνατότητες για μετρήσεις με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την κλασική τεχνολογία [10] (Εικόνα 6).



ΕΙΚΟΝΑ 6 : ΜΙΚΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΑΠΟ MEMS LOAD CELL

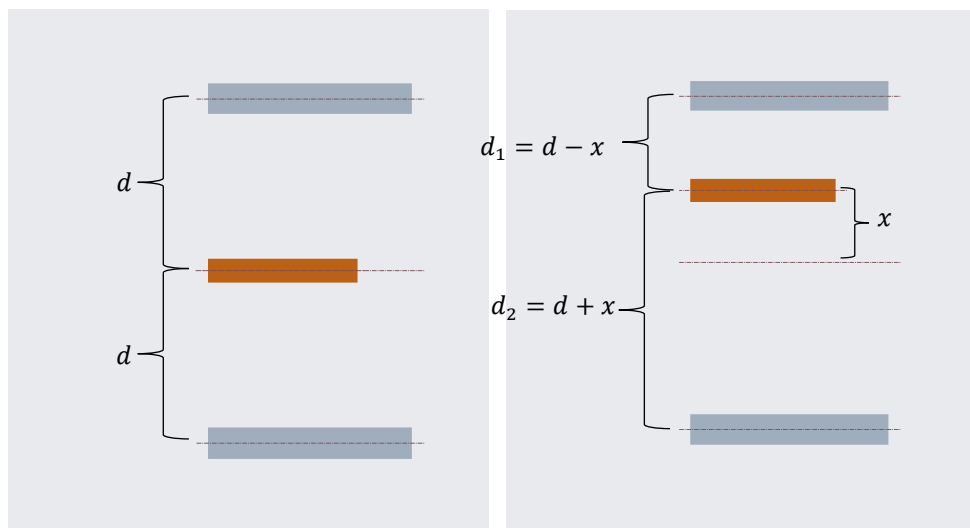
1.4.3. ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ

Ένα από τα πιο απλά και γνωστά συστήματα *MEMS*, είναι ο αισθητήρας αδράνειας. Έστω ότι υπάρχουν δύο πυκνωτές, με μια κοινή πλάκα ανάμεσά τους και η ενδιάμεση πλάκα μπορεί να μετατοπιστεί οριζόντια. Στην φυσική της θέση, η κεντρική πλάκα βρίσκεται στη μέση της απόστασης, δηλαδή οι δύο πυκνωτές έχουν την ίδια χωρητικότητα (Εικόνα 7).

Αν η κεντρική πλάκα μετατοπιστεί κατά x , τότε οι χωρητικότητες των πυκνωτών θα γίνουν:

$$C_1 = E \frac{A}{d+x} \quad \text{και} \quad C_2 = E \frac{A}{d-x}$$

Με βάση αυτή την αρχή επομένως, φαίνεται ότι διαβάζοντας τις τάσεις του ρεύματος στα άκρα των πυκνωτών, μπορεί να υπολογιστεί η μετατόπιση της κεντρικής πλάκας. Αν θεωρηθεί ότι η κεντρική πλάκα είναι προσκολλημένη σε ένα φορτίο γνωστής μάζας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι νόμοι της δυναμικής για να παρθούν δεδομένα για την κίνηση αυτού του φορτίου. Το σύστημα αυτό ονομάζεται μετρητής αδράνειας και χρησιμοποιείται και στο επιταχυνσιόμετρο και στο γυροσκόπιο, δυο πολύ διαδεδομένες μορφές αισθητήρα.



ΕΙΚΟΝΑ 7 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΠΥΚΝΩΤΗ

1.4.4. ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ

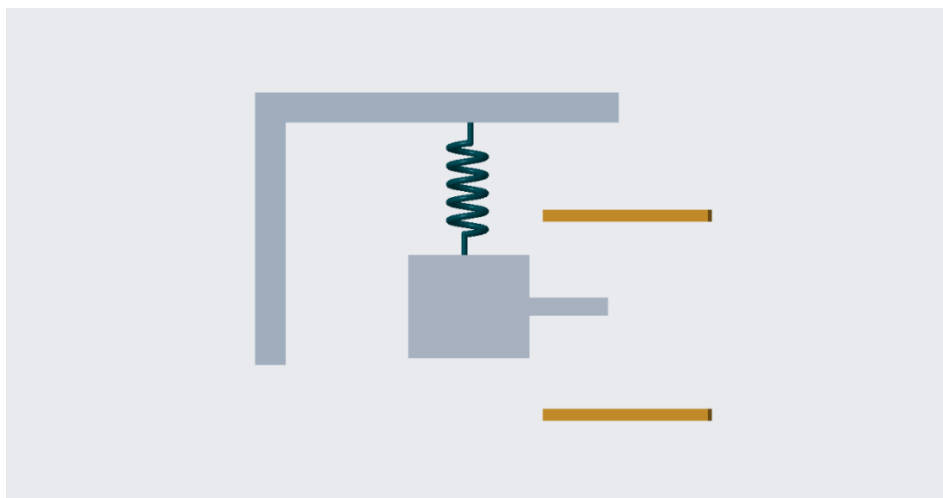
Ο πιο απλός τρόπος να μετρηθεί η επιτάχυνση ενός σώματος, ανέκαθεν ήταν να παρατηρηθεί η κίνηση του σώματος, όταν είναι προσκολλημένο σε ένα ελατήριο παράλληλο στην κατεύθυνση της κίνησης. Μετρώντας την μετατόπιση του ελατηρίου και συνδυάζοντας τον νόμο του Hook ($F = kx$, όπου k η σταθερά του ελατηρίου) με τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα ($F = ma$), υπολογίζεται η επιτάχυνση της μάζας [11]. Για να γίνει αυτό στην πράξη, έχουν περάσει ποικίλα σχέδια και τεχνολογίες, με διαφορές ως προς τη μέθοδο, τα υλικά, το μέγεθος και την κατασκευή. Το πρώτο επιταχυνσιόμετρο που κατασκευάστηκε και κυκλοφόρησε στο εμπόριο, σχεδιάστηκε το 1920 από τους McCollum και Peters και βρήκε πολύ γρήγορα εφαρμογή σε τομείς όπως οι ανελκυστήρες, τα δυναμόμετρα ή στην αεροναυπηγική. Η αρχική του επιτυχία, συνδέθηκε σύντομα με την ανακάλυψη του μετρητή τάσης, ανεξάρτητα από το MIT (1938) και το Caltech (1936). Η νέα αυτή τεχνολογία έδωσε στο επιταχυνσιόμετρο νέα ώθηση στην έρευνα και την εξέλιξη από πολλούς μεγάλους κατασκευαστές [12].

Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 εμφανίστηκαν τα πρώτα επιταχυνσιόμετρα που βασίζονταν στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Από την δεκαετία του 1950, αρκετές εταιρίες σε Αμερική και Ευρώπη ξεκίνησαν να δουλεύουν επάνω στις εξελίξεις αυτής της τεχνολογίας, μέχρι την ανακάλυψη των μικρό-μηχανικών κατασκευών. Το πρώτο μικρό-μηχανικό επιταχυνσιόμετρο κατασκευάστηκε το 1979 [11], αλλά μόνο στις αρχές του 1990 ξεκίνησαν τα καινούρια MEMS επιταχυνσιόμετρα να εμφανίζονται στην αγορά και είναι μέχρι σήμερα τα πιο διαδεδομένα [12].

Έστω ένα σώμα γνωστής μάζας, τοποθετημένο με ελατήριο και μειωτήρα στον άξονα x . Αν αυτό το σύστημα αποκτήσει επιτάχυνση, η δυναμική εξίσωση του συστήματος θα γίνει:

$$\begin{aligned}\Sigma \vec{F} &= m\vec{a} \\ -kx - c\dot{x} &= m\ddot{x}\end{aligned}$$

Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι μπορεί να εκφραστεί η επιτάχυνση ως προς την μετατόπιση x του ελατηρίου. Όταν ένας αισθητήρας αδράνειας μετρήσει αυτήν την μετατόπιση x , τότε αντίστοιχα υπολογίζεται η επιτάχυνση του αντικείμενου (Εικόνα 8).



ΕΙΚΟΝΑ 8 : ΑΝΑΜΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ

1.4.5. ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ

Παρατηρήσεις επάνω στην περιστροφική κίνηση είχαν γίνει από τα αρχαία χρόνια. Υπάρχουν αναφορές για τη μελέτη του φαινομένου της περιστροφής, τόσο από την αρχαία Ελλάδα όσο και από την Κίνα [13]. Η πρώτη φορά όμως που το φαινόμενο μελετήθηκε μαθηματικά, ήταν από τον Euler (1707 - 1783), ο οποίος έκανε εκτεταμένες μελέτες επάνω στη ροπή, τη γωνιακή ταχύτητα, τη ροπή αδράνειας και την περιστροφή στερεών σωμάτων [13]. Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα εμφανίζονται οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές για τα θεωρήματα της περιστροφικής κίνησης. Στο αγγλικό και το γαλλικό ναυτικό πειραματίζονται με μηχανισμούς που εκμεταλλεύονται την περιστροφική κίνηση για να μετρούν τη γωνιακή θέση των πλοίων [13] [14]. Λίγο αργότερα, το 1852, γίνεται η πρώτη εμφάνιση του κλασικού μηχανικού γυροσκοπίου από τον Lèon Foucault, που κάνει πειράματα επάνω στην περιστροφή της γης [7]. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το γυροσκόπιο τοποθετείται από το Γερμανικό ναυτικό, στις καινούριες τότε τορπίλες και αντικαθιστά την πυξίδα ως το κύριο όργανο καθοδήγησης των πλοίων [13] [14]. Την ίδια περίοδο (1913), ο George Marc Sagnac, ανακαλύπτει το ομώνυμο θεώρημα, το οποίο θα γινόταν αργότερα η αρχή λειτουργίας των οπτικών γυροσκοπίων [7]. Με την εξέλιξη των ηλεκτρικών συστημάτων, καθώς και με τις υψηλές απαιτήσεις από τις προόδους την αεροναυπηγικής, η χρήση του γυροσκοπίου ως αισθητήρας περιστροφής γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη. Στις δεκαετίες του 1960 – 1970 εμφανίζονται τα κύρια είδη οπτικών γυροσκοπίων, τα Ring laser gyroscopes (RLGs) και τα Interferometric Fiber Optic Gyroscopes (IFOGs). Στο τέλος της δεκαετίας του 1980 με την κατασκευή των πρώτων πρωτοτύπων των *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) [7], δημιουργείται μια νέα μορφή γυροσκοπίου που λειτουργεί με βάση την επιτάχυνση Coriolis του περιστρεφόμενου σώματος.

Όπως αναφέρθηκε, τα γυροσκόπια σήμερα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, τα *μηχανικά*, τα *οπτικά* και τα *MEMS*. Οι κατηγορίες χωρίζονται με βάση την αρχή λειτουργίας τους και η κάθε κατηγορία μπορεί να βρίσκει διαφορετικό πεδίο εφαρμογής ανάλογα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Οι τρεις αυτοί τύποι γυροσκοπίων εφαρμόζονται σε πληθώρα διαφορετικών μοντέλων από εταιρίες και ερευνητικούς φορείς σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα μηχανικά γυροσκόπια έχουν σε μεγάλο βαθμό εγκαταλειφθεί και πλέον έχουν πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα *οπτικά γυροσκόπια* κατά κανόνα έχουν καλύτερες επιδόσεις, αφού δίνουν πιο αξιόπιστες τιμές, αλλά είναι ακριβότερα και πιο δύσκολο να κατασκευαστούν. Γι' αυτόν τον λόγο δεν συναντώνται εύκολα στην καθημερινότητα. *Οπτικά γυροσκόπια* χρησιμοποιούνται πολύ στην αεροναυπηγική και σε άλλες μεγάλες κατασκευές που απαιτούν μέγιστη ακρίβεια [7]. Τα *μηχανο-ηλεκτρονικά (MEMS) γυροσκόπια* από την άλλη, έχουν πολύ πιο διαδεδομένη χρήση στη βιομηχανία και σε καθημερινές συσκευές. Δίνουν λιγότερο αξιόπιστες τιμές από τα οπτικά γυροσκόπια, αλλά είναι πολύ πιο οικονομικά και αρκετά αξιόπιστα αναλογικά με την αξία τους [14] [7].

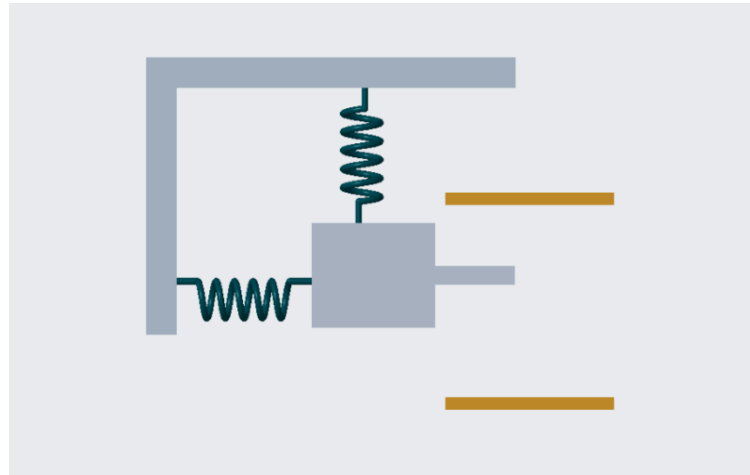
Τα γυροσκόπια *MEMS* (Εικόνα 10) βασίζονται στις αρχές της δυναμικής και της μεταφοράς ενέργειας. Όταν ένα σώμα κινείται με μια γραμμική ταχύτητα σε έναν άξονα και περιστρέφεται ως προς έναν άλλον, τότε το αρχικό σώμα αναπτύσσει επιτάχυνση Coriolis. Βάζοντας ένα σώμα σε ένα ελεγχόμενο σύστημα μετρούνται οι δυνάμεις του και η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται μέσω της επιτάχυνσης Coriolis.

Η λειτουργία των γυροσκοπίων MEMS βασίζεται στην επιτάχυνση Coriolis. Έστω ότι ένα σώμα είναι περιορισμένο με ελατήριο και μειωτήρα στους άξονες x και y . Ασκείται στο σώμα μια γνωστή δύναμη F_t στον άξονα y ώστε να αρχίσει να ταλαντώνεται και παράλληλα θεωρείται ότι το σύστημα περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω ως προς τον z (Εικόνα 9). Σε αυτήν την περίπτωση, η επιτάχυνση coriolis θα γίνει:

$$\vec{a}_c = 2\vec{V} \times \vec{\omega} = 2 \begin{bmatrix} 0 \\ V \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2V\omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

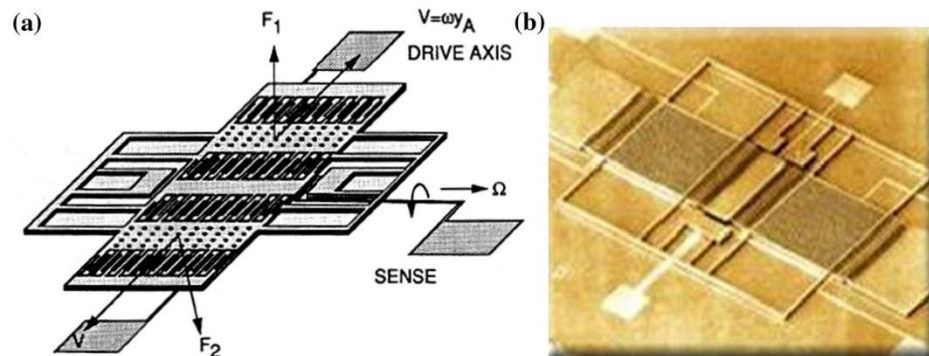
Κάνοντας μια μοντελοποίηση του συστήματος, η δυναμική εξίσωση του συστήματος θα γίνει:

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$$
$$\begin{bmatrix} -kx - c\dot{x} + 2m\dot{y}\omega \\ -ky - c\dot{y} + F_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ m\ddot{y} \\ 0 \end{bmatrix}$$



ΕΙΚΟΝΑ 9 : ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΓΥΡΩΣΚΟΠΙΟΥ

Σε αυτό το σημείο παρατηρείται ότι οι μοναδικοί άγνωστοι του συστήματος, είναι το ω και το x , εφόσον η ταχύτητα στον y προκαλείται ελεγχόμενα από τον χρήστη και η μάζα είναι γνωστή. Εάν μετρηθεί λοιπόν ο x με την χρήση ενός αισθητήρα αδράνειας που περιγράψαμε παραπάνω, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνιακή ταχύτητα ω στον άξονα z .



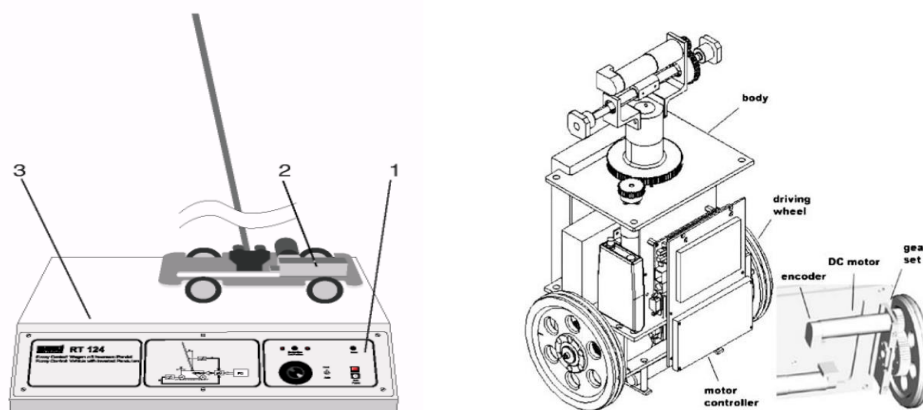
ΕΙΚΟΝΑ 10 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ MEMS ΓΥΡΩΣΚΟΠΙΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΜΙΚΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ MEMS ΓΥΡΩΣΚΟΠΙΟΥ

1.5. ANTIΣΤΟΙΧΑ PROJECTS

Ένα σημαντικό βήμα της έρευνας, είναι να μελετηθούν αντίστοιχα projects, με παρεμφερή σκοπό ή με αντίστοιχη λειτουργία. Ο σκοπός αυτής της μελέτης, είναι να διερευνηθούν οι τρόποι που αντιμετωπίστηκαν παρόμοια προβλήματα της ρομποτικής και του ελέγχου, να παρθούν ιδέες για το τι είναι δυνατό να δοκιμαστεί στην παρούσα εργασία, να αξιοποιηθεί η εμπειρία από άλλες εργασίες σχετικά με την πρακτικότητα διαφόρων πιθανών συστημάτων και να υπάρξει ένας προβληματισμός σχετικά με το τι καινούριο μπορεί να σχεδιαστεί. Παρακάτω παρατίθενται οι μεγάλες κατηγορίες των εργασιών που μελετήθηκαν, με τα χαρακτηριστικά, τους στόχους και τα συμπεράσματα που πρόσφεραν.

1.5.1. ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΕΚΚΡΕΜΕΣ

Το *ανάστροφο εκκρεμές* είναι ένας πολύ απλός μηχανισμός, με ένα βάρος τοποθετημένο στην κορυφή μιας δοκού που περιστρέφεται ελεύθερα (Εικόνα 11). Το σύστημα είναι από την φύση του ασταθές και λόγω της απλότητάς του, είναι ιδανικό για πειράματα επάνω στον αυτόματο έλεγχο [15]. Το *ανάστροφο εκκρεμές* μπορεί να έχει μια πολύ απλή μοντελοποίηση, με πολύ λίγες εισόδους και εξόδους [16] [17]. Ένα *ανάστροφο εκκρεμές* μπορεί να ελεγχθεί με πολλούς τρόπους π.χ. με ένα απλό σύστημα ανοιχτού βρόγχου, ένα πιο εξελιγμένο σύστημα που λαμβάνει περισσότερες παραμέτρους [16], ή ακόμα και με ασαφή λογική [15]. Τα συστήματα αυτά αποτελούν ένα εξαιρετικό παράδειγμα της χρήσης αυτόματου ελέγχου, έχουν παρόμοια σήματα εισόδου και εξόδου με αυτά που θα είναι αναγκαία στην παρούσα εργασία και ο τρόπος που αντιμετωπίζονται ως σύστημα αποτελεί χρήσιμη γνώση για τα επόμενα κεφάλαια.



ΕΙΚΟΝΑ 11: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΕΚΚΡΕΜΟΥΣ

1.5.2. DRONES

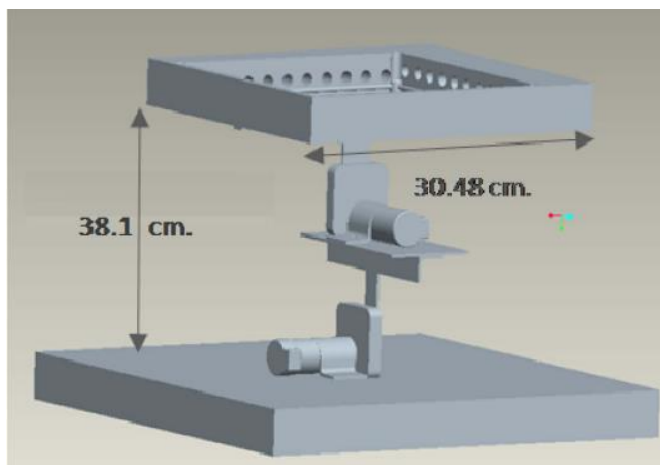
Ένα άλλο σύστημα που είναι πολύ διαδεδομένο τα τελευταία χρόνια και η λειτουργία του παρουσιάζει ενδιαφέρον, είναι το *drone* (UAV). Η βασική αρχιτεκτονική του *drone*, περιέχει τέσσερις ή περισσότερες κινητήρες με έλικες που σηκώνουν το βάρος της κατασκευής. Προκαλώντας μικρές διαφορές στη ροπή του κάθε κινητήρα, δημιουργείται επιτάχυνση που κινεί το drone στους τρεις άξονες [18]. Αυτή η φαινομενικά απλή αρχή λειτουργίας, στην πράξη κρύβει έναν πολύ πλούσιο χώρο για έρευνα. Στον χώρο που λειτουργεί το drone, υπάρχουν πολλές και μεγάλες αναταράξεις και μεγάλη αστάθεια. Γι' αυτό τα drones είναι μια άλλη πολύ καλή πλατφόρμα για πειραματισμό επάνω στα συστήματα ελέγχου με πολλές διαφορετικές μεθόδους [18]. Λόγω της εκτεταμένης επαγγελματικής χρήση των drones για ποικίλες δραστηριότητες (π.χ. επίβλεψη έργων, βιντεοσκόπηση, διασώσεις, αποστολή παραγγελιών [19], [20]), οι αλγόριθμοι για το έλεγχο τους έχουν εξελιχθεί ταχύτατα, αυξάνοντας την αξιοπιστία και τις επιδόσεις τους.

Ο τρόπος που αντιμετωπίζονται οι ποικίλες παρεμβολές που δέχονται από το περιβάλλον τους, καθώς και ο τρόπος που κινούνται σε ένα απόλυτα ασταθές περιβάλλον, είναι χρήσιμη γνώση για τις τυχόν δυσκολίες αυτής της διπλωματικής εργασίας. Για αυτό το λόγο η τεχνολογία των drones είναι ένα καλό πεδίο για έρευνα επάνω στον αυτόματο έλεγχο.

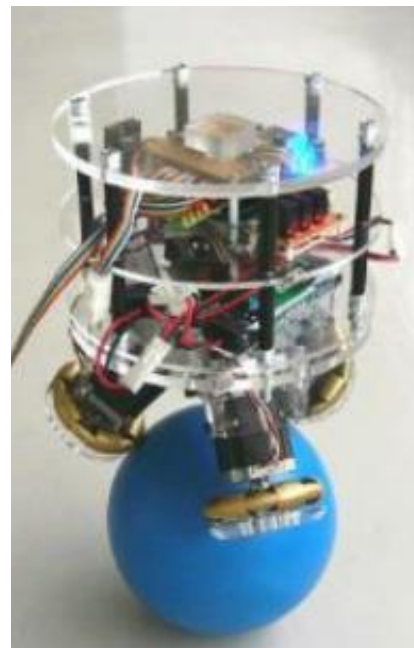
1.5.3. ΆΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Σε επόμενο στάδιο, μελετήθηκαν πιο εξελιγμένα σχέδια επάνω στην ισορροπία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είχαν τα συστήματα που ελέγχουν την ισορροπία σφαίρας. Αρκετά διαδεδομένα είναι τα ρομπότ ισορροπίας σφαίρας σε πλατφόρμα (Εικόνα 12) και τα ρομπότ που ισορροπούν επάνω σε μπάλα (Εικόνα 13). Εργασίες τέτοιου είδους είχαν πλούσιο περιεχόμενο σε συστήματα που ελέγχουν την αλληλεπίδραση διαφορετικών φυσικών σωμάτων (ρομπότ – σφαίρα) [21]. Όπως και το ανάστροφο εκκρεμές, έτσι και τα συστήματα αυτά είναι πάρα πολύ διαδεδομένα για μαθήματα και πειράματα σχετικά με συστήματα ελέγχου [22] [23] και υπάρχουν ποικίλες εργασίες με διαφορετικές ιδέες και λύσεις επάνω σε παραλλαγές του προβλήματος.

Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια της έρευνας, βοήθησαν στην κατανόηση του τρόπου που εξελίσσεται μια εργασία επάνω στον αυτόματο έλεγχο. Παρ' όλες τις διαφορές στους στόχους και τις τεχνολογίες που είχε η καθεμιά από τις παραπάνω εργασίες, όλες αποτέλεσαν καλά παραδείγματα του πως αντιμετωπίζεται ένα τεχνολογικό πρόβλημα. Η σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος, σε συνδυασμό με τις επιμέρους γνώσεις που η κάθε πηγή παρείχε, ήταν μεγάλη βοήθεια σε όλη την διάρκεια αυτής της διπλωματικής.



ΕΙΚΟΝΑ 12: ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΣΕ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ



ΕΙΚΟΝΑ 13: ΡΟΜΠΟΤ ΠΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΕΙ ΕΠΑΝΩ ΣΕ ΜΠΑΛΑ

1.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στη σημερινή εποχή ο καθένας μπορεί να έχει πρόσβαση σε πληθώρα τεχνολογιών. Όπως φάνηκε κατά την έρευνα, οτιδήποτε πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη εργασία έχει ξαναχρησιμοποιηθεί αμέτρητες φορές στο παρελθόν και υπάρχουν πολλές εργασίες που καταγράφουν τις εμπειρίες και τις καινοτομίες ερευνητών. Σκοπός αυτής της εργασίας δεν είναι να εφεύρει μια καινούρια τεχνολογία καθώς δεν υπάρχουν σε καμία περίπτωση οι κατάλληλες γνώσεις και κυκλοφορούν ήδη άπειρες εφευρέσεις στον κόσμο, διαδεδομένες και μη. Ο τομέας που μπορούν να υπάρξουν καινοτομίες, είναι, όχι στην εφεύρεση τεχνολογιών, αλλά στον τρόπο που χρησιμοποιούνται και συνδυάζονται ώστε να λύσουν καινούρια προβλήματα. Το δύσκολο κομμάτι της εργασίας, είναι η σωστή επιλογή των μεθόδων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, ώστε όχι απλά το ρομπότ να εκτελεί τις εντολές του, αλλά και να μην γίνονται σπατάλες ή κακή χρήση των μέσων που χρησιμοποιούνται. Η καλή έρευνα βοηθάει να φτιαχτεί ένα σύστημα αποδοτικό και ικανό σε συνάρτηση με το κόστος του, καθώς παρέχει όλες τις απαραίτητες γνώσεις και εμπειρίες από τον ακαδημαϊκό χώρο.

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1. ΤΙ ΣΧΕΔΙΑΖΕΤΑΙ

Σκοπός της εργασίας είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα για τη μεταφορά ενός φορτίου σε ανώμαλο έδαφος. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να δέχεται ένα φορτίο και να το μεταφέρει με ασφάλεια σε κεκλιμένο επίπεδο, που υπό φυσιολογικές συνθήκες θα ανατρεπόταν. Το φορτίο που θα κουβαλάει το σύστημα, δε θα είναι σε καμία περίπτωση προκαθορισμένο. Θα μπορεί να έχει οποιοδήποτε βάρος και διαστάσεις (εντός των ορίων αντοχής της κατασκευής προφανώς) και το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να ανταποκριθεί κατάλληλα σε κάθε περίπτωση.

Για τον καλύτερο περιορισμό του προβλήματος, θεωρείται ότι το φορτίο θα είναι σταθερά δεμένο επάνω στο ρομπότ και δεν θα κινδυνεύει να ανατραπεί επάνω στην πλατφόρμα. Η μόνη περίπτωση ανατροπής δηλαδή, είναι να ανατραπεί το ρομπότ και το φορτίο μαζί σαν ένα σώμα. Αυτός ο συμβιβασμός μας περιορίζει σημαντικά τις παραμέτρους του προβλήματος, αφού τώρα θα υπάρχουν λιγότερες συνθήκες που θα πρέπει να τηρούνται για να λειτουργήσει επιτυχώς το σύστημα. Επίσης θεωρείται ότι με αυτόν τον περιορισμό δίνονται περισσότερες δυνατότητες στο σύστημα να κινηθεί σε πιο ακραία όρια από ότι θα μπορούσε αλλιώς.

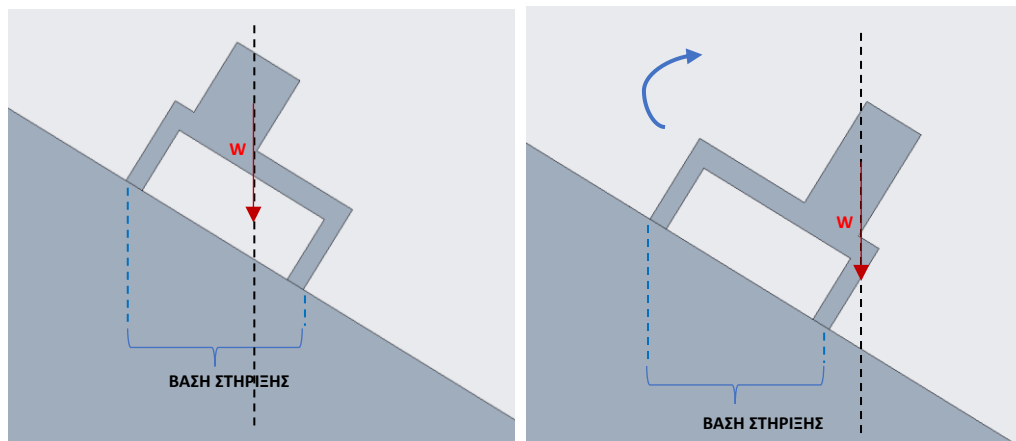
3.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της εργασίας είναι το ρομπότ να διατηρεί την ισορροπία του. Τι σημαίνει όμως αυτό για την εργασία; Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Νεύτωνα, ένα σώμα βρίσκεται σε ισορροπία όταν το άθροισμα των δυνάμεων που του ασκούνται είναι ίσο με 0. Σε αυτήν την περίπτωση, το σώμα θα διατηρήσει μια σταθερή ταχύτητα, μέχρι να του ασκηθεί κάποια άλλη δύναμη. Βλέπουμε όμως ότι αυτή η συνθήκη είναι αδύνατο να επιτευχθεί σε ένα τέτοιο σύστημα. Η κίνηση του ρομπότ δεν προβλέπεται ποτέ να είναι σταθερή, αλλά μπορεί να αλλάζει μέτρο και κατεύθυνση ανάλογα με τις εντολές του χειριστή ή τη μορφολογία του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις που θα ασκούνται στο σώμα θα αλλάζουν αντίστοιχα. Θα πρέπει λοιπόν να γίνει κατανοητό τι πραγματικά σημαίνει η έννοια «το ρομπότ διατηρεί την ισορροπία του».

Το ρομπότ θα στηρίζεται επάνω στις ρόδες του (που κατά πάσα πιθανότητα θα είναι τέσσερις). Δηλαδή η κατασκευή του προβλέπει τέσσερα σημεία επαφής για να λειτουργήσει το σύστημα σωστά. Οι δύο παράγοντες που καθορίζουν εάν το σώμα θα συνεχίσει να εφάπτεται στα σημεία επαφής, ή εάν θα περιστραφεί προς κάποια άλλη θέση, είναι το *κέντρο βάρους* και η *θέση στήριξης*.

Σε ένα σώμα με πεπερασμένη μάζα, το βάρος είναι μια δύναμη κατανεμημένη στον όγκο του αντικειμένου, ανάλογα με την κατανομή της μάζας. Κάθε σώμα όμως έχει ένα σημείο, στο οποίο αν ασκηθεί μια δύναμη $w=mg$, το αποτέλεσμα της δύναμης θα είναι ίδιο με το αποτέλεσμα του βάρους του. Αυτό το σημείο είναι το *κέντρο βάρους* του αντικειμένου. Έστω ένα σώμα με δύο πόδια που ακουμπάνε στο έδαφος. Η βαρύτητα ωθεί το σώμα να κινηθεί προς τα κάτω, αλλά εμποδίζεται από τα πόδια, στα οποία ασκείται μια δύναμη αντίδρασης από το έδαφος. Η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα πόδια είναι η *θέση στήριξης* του αντικειμένου.

Όσο το κέντρο βάρους βρίσκεται, στην οριζόντια διεύθυνση, μέσα στην *βάση στήριξης* και δεν ασκείται στο σώμα κάποια άλλη δύναμη, τότε το σώμα δεν θα περιστραφεί. Εάν το κέντρο βάρους είναι εκτός των ορίων της *βάσης στήριξης*, τότε το ένα πόδι θα σταματήσει να δέχεται δύναμη από το έδαφος και το σώμα θα αποκτήσει γωνιακή επιτάχυνση με κέντρο περιστροφής το άλλο σημείο επαφής (Εικόνα 14).



ΕΙΚΟΝΑ 14: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΣΩΜΑ ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΜΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (ΔΕΞΙΑ)

Πραγματικός σκοπός της εργασίας είναι το σύστημα να μπορεί να μετακινήσει το κέντρο βάρους του με τέτοιον τρόπο, ώστε να βρίσκεται πάντα εντός των ορίων της βάσης στήριξης, που καθορίζεται από τους τροχούς του συστήματος.

Το ρομπότ δεν θα είναι ένα συμπαγές αντικείμενο με ένα κέντρο βάρους, αλλά ένα σύνολο εξαρτημάτων με υπολογίσιμα βάρη, τα οποία αναπόφευκτα θα επηρεάσουν την τελική ισορροπία. Παράλληλα θα κάνει ένα συνδυασμό κινήσεων, που απαιτεί ακόμα πιο περίπλοκους υπολογισμούς, αφού προφανώς πρόκειται για δυναμικό και όχι για στατικό πρόβλημα. Για να κατασκευαστεί επομένως ένα μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος, θα χρειαστεί να μελετηθούν ξεχωριστά οι κινήσεις του κάθε εξαρτήματος και πώς αλληλοεπηρεάζονται τα εφαπτόμενα εξαρτήματα. Αυτό θα δημιουργήσει ένα περίπλοκο πρόβλημα για λύση, αλλά είναι χρήσιμο για την καλή κατανόηση του συστήματος και της προσδοκώμενης συμπεριφοράς του.

Στη συνέχεια, θα σχεδιαστεί σύστημα ελέγχου που θα εξασφαλίζει ότι όλες οι λειτουργίες θα γίνονται με την σωστή αλληλουχία και ότι όλα τα επιμέρους συστήματα θα αλληλοεπιδρούν σωστά μεταξύ τους. Το σύστημα ελέγχου δεν είναι απαραίτητο να λειτουργεί με βάση το μαθηματικό μοντέλο. Η χρήση του PID ελεγκτή είναι διαδεδομένη, ακριβώς επειδή βοηθάει να απλοποιηθούν περίπλοκα προβλήματα. Και πάλι όμως ένα μαθηματικό μοντέλο είναι χρήσιμο, διότι από την μία δίνει μια καλή εικόνα για την αντίδραση των σωμάτων που περιγράφονται, αλλά και μπορεί να βοηθήσει με άμεσο ή έμμεσο τρόπο κατά τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

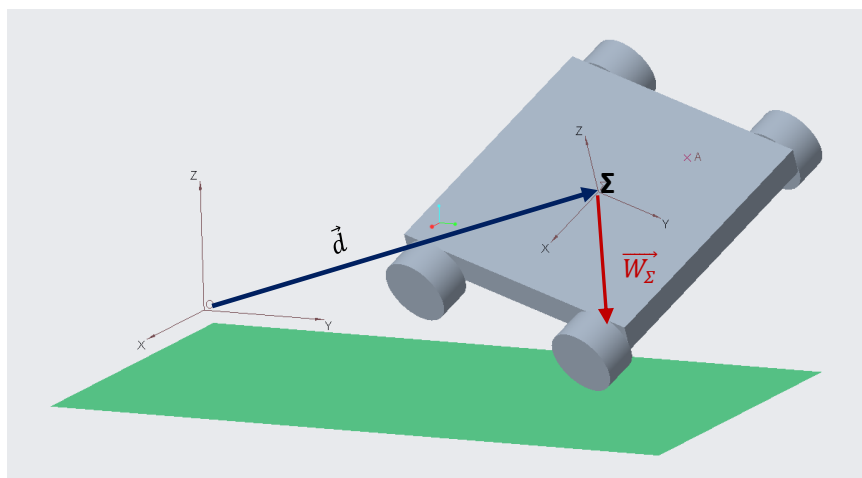
3.3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω ένα σταθερό σύστημα αξόνων O , που συμβολίζει την οριζόντια επιφάνεια της γης και ένα σώμα με τέσσερις τροχούς, με ένα σύστημα αξόνων Σ , που περιστρέφεται και μεταφέρεται ως προς το σύστημα αξόνων O (Εικόνα 15).

Το σώμα Σ έχει ένα βάρος μέτρου \vec{W}_Σ με κέντρο βάρους ένα τυχαίο σημείο A .

Το σώμα Σ θα έχει μια περιστροφή γωνίας $\vec{\theta}$, με γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση $\vec{\dot{\theta}}$ και $\vec{\ddot{\theta}}$ αντίστοιχα και μια μεταφορά \vec{d} , με ταχύτητα $\vec{\dot{d}}$ και επιτάχυνση $\vec{\ddot{d}}$.

Η περιστροφή από το σύστημα O στο σύστημα Σ και ανάποδα, θα γίνεται μέσω των αντίστροφων πινάκων ${}^O\Sigma R$ και ${}^\Sigma O R$ αντίστοιχα.

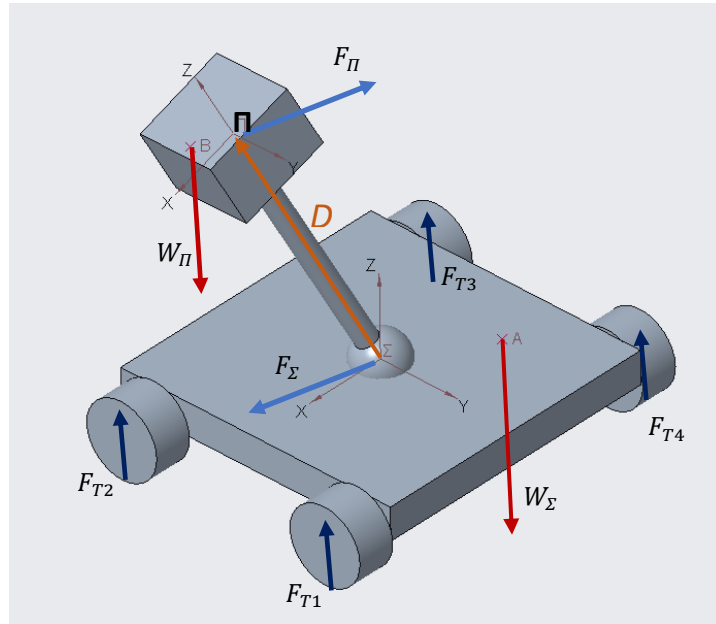


ΕΙΚΟΝΑ 15: ΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΠΕΡΙΣΤΡΑΜΜΕΝΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

Έστω ότι ένα άλλο σώμα με σύστημα αξόνων Π , με βάρος \vec{W}_Π και κέντρο βάρους ένα σημείο \vec{P} (Εικόνα 16).

Το σώμα Π θα βρίσκεται σε θέση $\vec{P} = \vec{d} + \vec{D}$ με ταχύτητα, $\vec{\dot{P}}$ και επιτάχυνση, $\vec{\ddot{P}}$ και περιστρεμμένο κατά $\vec{\gamma} = \vec{\theta} + \vec{\varphi}$, με γωνιακή ταχύτητα $\vec{\dot{\gamma}}$ και γωνιακή επιτάχυνση $\vec{\ddot{\gamma}}$.

Η περιστροφή από το πλαίσιο Σ στο πλαίσιο Π και αντίστροφα, θα γίνεται μέσω των αντίστροφων πινάκων ${}^\Sigma\Pi R$ και ${}^\Pi\Sigma R$ αντίστοιχα.



ΕΙΚΟΝΑ 16: ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΑΡΟΥΣ

Ο νόμος του Euler είναι στην ουσία η περιστροφική μορφή του 2^{ου} νόμου του Νεύτωνα και δίνεται από τον τύπο:

$$\Sigma M = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega$$

όπου ΣM είναι το άθροισμα των ροπών που ασκούνται στο σώμα, I είναι ο τανυστής αδράνειας.

Σώμα Π:

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m_{\Pi} \ddot{\vec{\Pi}} \\ \vec{W}_{\Pi} + \vec{F}_{\Pi} &= m_{\Pi} \ddot{\vec{\Pi}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M} &= I_{\Pi} \ddot{\vec{\gamma}} + \dot{\vec{\gamma}} \times I_{\Pi} \dot{\vec{\gamma}} \\ (\vec{\Pi} + \vec{A}) \times \vec{W}_{\Pi} + \vec{\Pi} \times \vec{F}_{\Pi} &= I_{\Pi} \ddot{\vec{\gamma}} + \dot{\vec{\gamma}} \times I_{\Pi} \dot{\vec{\gamma}} \end{aligned} \quad (2)$$

Ράβδος:

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m_p \ddot{\vec{P}} \\ \vec{W}_p + (-\vec{F}_{\Pi}) + \vec{F}_{\Sigma} &= m_p \ddot{\vec{P}} \xrightarrow{(1)} \\ \vec{W}_p + \vec{W}_{\Pi} - m_{\Pi} \ddot{\vec{\Pi}} + \vec{F}_{\Sigma} &= m_p \ddot{\vec{P}} \end{aligned} \quad (3)$$

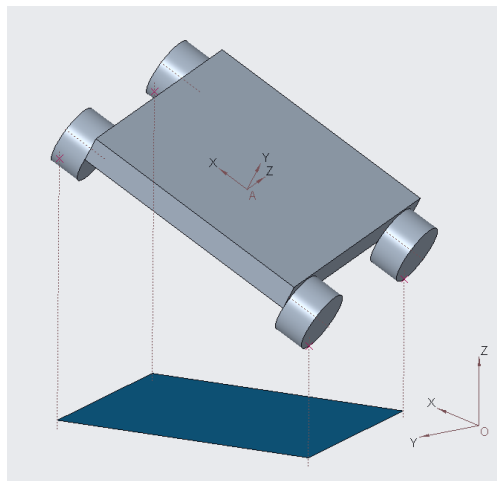
$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M} &= I_p \times \ddot{\omega} \\ \vec{P} \times \vec{W}_p + (\vec{\Pi}) \times (-\vec{F}_{\Pi}) + (\vec{d}) \times \vec{F}_{\Sigma} &= I_p \times \ddot{\omega} \xrightarrow{(2)} \\ \vec{P} \times \vec{W}_p + (\vec{\Pi} + \vec{A}) \times \vec{W}_{\Pi} - I_{\Pi} \times \ddot{\omega} + (\vec{d}) \times \vec{F}_{\Sigma} &= I_p \times \ddot{\omega} \end{aligned} \quad (4)$$

Σώμα Σ:

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m \ddot{d} \\ \vec{W}_{\Sigma} + (-\vec{F}_{\Sigma}) &= m \ddot{d} \xrightarrow{(3)} \\ \vec{W}_{\Sigma} + \vec{W}_p + \vec{W}_{\Pi} - m_{\Pi} \ddot{\Pi} - m_p \ddot{P} + \sum_{i=[0,3]} \vec{F}_T &= m \ddot{d} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M} &= I \times \ddot{\theta} \\ (\vec{d} + \vec{A}) \times \vec{W}_{\Sigma} + (\vec{d}) \times (-\vec{F}_{\Sigma}) &= I_{\Sigma} \times \ddot{\theta} \xrightarrow{(4)} \\ (\vec{d} + \vec{A}) \times \vec{W}_{\Sigma} + \vec{P} \times \vec{W}_p + (\vec{\Pi} + \vec{A}) \times \vec{W}_{\Pi} - I_{\Pi} \times \ddot{\omega} - I_p \times \ddot{\omega} + \sum_{i=[0,3]} (\vec{T}_i \times \vec{F}_{T_i}) &= I_{\Sigma} \times \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

\vec{F}_{T_i} είναι οι δυνάμεις που ασκεί το έδαφος στα σημεία επαφής και \vec{T}_i οι θέσεις των αντίστοιχων σημείων. Οι θέσεις \vec{T}_i , είναι και τα σημεία που θα καθορίσουν την βάση στήριξης του συστήματος (Εικόνα 17). Συγκεκριμένα τα σημεία αυτά θα έχουν τις συντεταγμένες τους, που θα κυμαίνονται σε κάποια όρια $[x_{min}, x_{max}]$ και $[y_{min}, y_{max}]$. Αυτά τα όρια είναι η βάση στήριξης.



ΕΙΚΟΝΑ 17: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΣΩΜΑ ΥΠΟ ΚΛΙΣΗ

Οι εξισώσεις (5) και (6), περιέχουν όλες τις μεταβλητές του συστήματος. Φαίνεται ότι το σύστημα εξισώσεων που δημιουργείται παραπάνω, έχει πολλούς αγνώστους, που θα μπορούν να είναι μεταβλητές εισόδου, εξόδου ή σταθερές. Η γωνία θ για παράδειγμα θα ήταν λογικό να είναι μια μεταβλητή εισόδου, ενώ η γωνία φ θα ήταν λογική μεταβλητή εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η θέση του βάρους του Π ανάλογα με

την κλίση που έχει αποκτήσει από το περιβάλλον, και να μεταβληθεί κατάλληλα ώστε να διατηρήσει της ιδανικές του συνθήκες.

Το Π συμβολίζει ένα συμπαγές σώμα διασυνδεδεμένο στο σύστημα, που η κίνησή του επηρεάζει τη συμπεριφορά του ρομπότ. Γνωρίζοντας την επίδραση της κίνησης του σώματος Π στο ρομπότ, ελέγχεται μέσω του σώματος Π η κίνηση του ρομπότ. Προφανώς και στο τελικό σχέδιο τα κομμάτια που βρίσκονται στο μηχανισμό και θα επηρεάζουν το σύστημα θα είναι περισσότερα και πιο περίπλοκα, αλλά θα αντιμετωπιστούν με ακριβώς τον ίδιο τρόπο.

3.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Από την αρχή της εργασίας ήταν γνωστό ότι σκοπός είναι να φτιαχτεί ένα ρομπότ που με κάποιον τρόπο θα μετακινεί το κέντρο βάρους του, αλλά όσο η ιδέα παρέμενε στην θεωρία, το τι πραγματικά πρέπει να σχεδιαστεί ήταν ασαφές. Η μετάφραση του προβλήματος από λόγια σε εξισώσεις, αφαιρεί κάθε θεωρητική ή ασαφή ιδέα που μπορεί να έχει κάποιος για το πρόβλημα. Παρόλο που μπορεί τα μαθηματικά που διατυπώνονται να μην έχουν απαραίτητα άμεση εφαρμογή στο τελικό αποτέλεσμα, η ύπαρξη και η σωστή κατανόησή τους έχει έμμεση επιρροή κατά την σχεδίαση. Ο σχεδιαστής μπορεί να αποκτήσει πολύ καλύτερη κατανόηση του τι εργασία ή κίνηση πρέπει να κάνει ο μηχανισμός που σχεδιάζει και μέσα από τα μαθηματικά να μελετήσει και να επιβεβαιώσει ή να διορθώσει τις ιδέες που μπορεί να δοκιμάσει.

4. ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

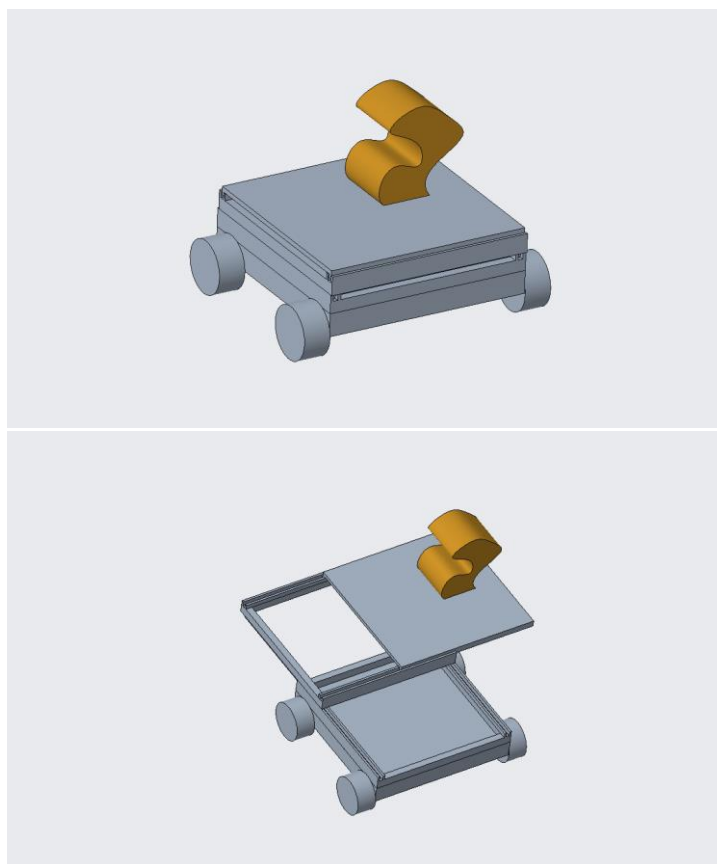
Η σχεδίαση του ρομπότ ξεκίνησε με την ιδέα ότι θα υπάρχουν δύο βασικά σώματα, το *κύριο σώμα* που θα είναι ο κορμός του ρομπότ και η *πλατφόρμα* που θα κουβαλάει το φορτίο. Το *κύριο σώμα* θα ακολουθεί την κλίση του εδάφους και η *πλατφόρμα* θα κινείται κατάλληλα ως προς το *κύριο σώμα*. Επάνω στη σχεδίαση του μηχανισμού που θα κάνει αυτήν την λειτουργία υπήρχαν αρκετές ιδέες, οι οποίες αξιολογήθηκαν ως προς τον βαθμό που επιτυγχάνουν να επιλύσουν το πρόβλημα. Οι κυριότερες από αυτές τις ιδέες παρατίθενται παρακάτω.

4.1. ΑΡΧΙΚΕΣ ΙΔΕΕΣ

4.1.1. ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

Η ιδέα αυτή περιλαμβάνει μια πλατφόρμα που θα κινείται με σύστημα τροχαλιών στον άξονα x και y, ώστε να μεταφέρει το κέντρο βάρους του φορτίου προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κατηφορική (Εικόνα 18). Με αυτόν τον τρόπο η ροπή που ασκείται από το βάρος είναι πάντα σε κατεύθυνση αντίθετη από την ροπή που χρειάζεται για να ανατραπεί το σύστημα. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του σώματος, το διάνυσμα \vec{D} και η γωνία $\vec{\varphi}$ όπως τα περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα είναι:

$$\vec{D} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ 0 \end{bmatrix} \text{ και } \vec{\varphi} = 0$$



ΕΙΚΟΝΑ 18 : ΙΔΕΑ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ (ΕΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΚΑΤΩ)

Προτερήματα

- Ρομπότ χαμηλού ύψους: Το συνολικό σώμα του ρομπότ μπορεί να είναι αρκετά χαμηλό, το οποίο επιδρά θετικά στη συνολική ισορροπία.

Ελαττώματα

- Χρειάζεται ρομπότ πολύ πλατύ αναλογικά με το μέγεθος του φορτίου που κουβαλάει. Για να υπάρχει περιθώριο το ρομπότ να μεταβάλει το κέντρο βάρους αρκετά, θα πρέπει να μετακινηθεί σε μεγάλη απόσταση σχετικά με τις διαστάσεις του, κάτι που απαιτεί ένα πλατύ και δυσκίνητο σύστημα.
- Αν το φορτίο είναι πολύ ψηλό, το κέντρο βάρους δεν θα αλλάζει σημαντικά.

4.1.2. ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

Πρόκειται για μια πλατφόρμα που περιστρέφεται γύρω από τους άξονες x και y (Εικόνα 19). Με την περιστροφή μετακινεί το κέντρο βάρους του φορτίου προς την κατάλληλη κατεύθυνση, ώστε η ροπή που ασκείται από το βάρος να επιδρά θετικά στην ισορροπία. Όσον αφορά την μοντελοποίηση του σώματος, το διάνυσμα \vec{D} και η γωνία $\vec{\varphi}$ θα είναι:

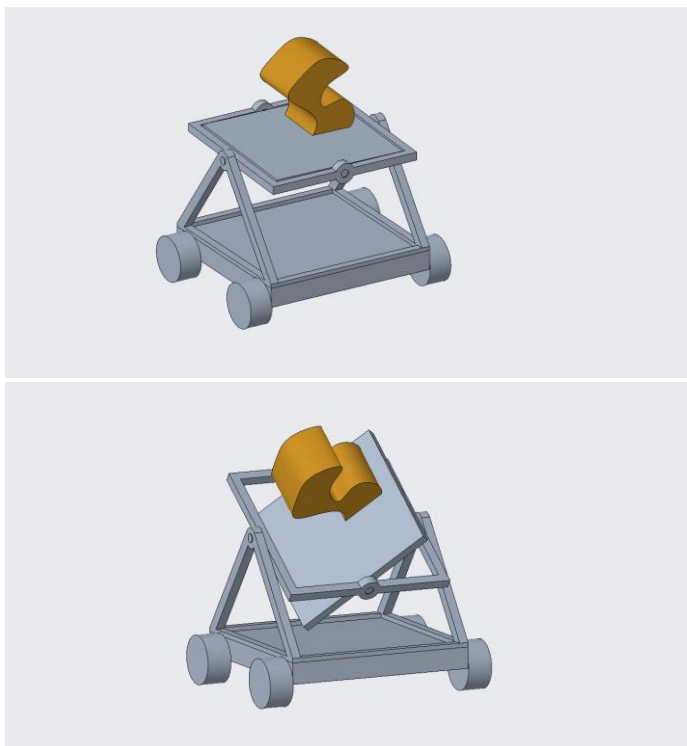
$$\vec{D} = 0 \text{ και } \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

Προτερήματα

- Επηρεάζει πιο δραστικά το κέντρο βάρους του φορτίου ώστε να φτάνει σε μεγαλύτερες κλίσεις. Σε αντίθεση με την μεταφερόμενη πλατφόρμα, η περιστρεφόμενη πλατφόρμα επιδρά στο κέντρο βάρους του ρομπότ το ίδιο, σε ότι ύψος και αν βρίσκεται το κέντρο βάρους του φορτίου.

Ελαττώματα

- Απαιτεί ένα μεγαλύτερο ύψος για το ρομπότ, που επιδρά αρνητικά στην μέγιστη κλίση ισορροπίας. Για να υπάρχει μια αρκετά πλατιά πλατφόρμα, ικανή να δεχτεί φορτία σε ποικίλες διαστάσεις, θα πρέπει να είναι τοποθετημένη σε ένα κατάλληλο ύψος, αλλιώς θα συγκρουόταν με το δάπεδο σε πολύ μικρές κλίσεις.
- Αν το κέντρο βάρους του φορτίου βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο της πλατφόρμας, οι ροπές που θα ασκούνται στους κινητήρες, κινδυνεύουν να είναι πολύ μεγάλες.



ΕΙΚΟΝΑ 19 : ΙΔΕΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ (ΕΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ (ΚΑΤΩ)

4.1.3. ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΜΕΤΑΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΑ

Η ιδέα αυτή χρησιμοποιεί μια σειρά από υδραυλικά έμβολα, τα οποία με την σωστή αλληλεξάρτηση θα μπορούν να δώσουν στην πλατφόρμα την επιθυμητή κλίση (Εικόνα 20). Η μαθηματική θεωρία πίσω από αυτήν την ιδέα είναι ότι τέσσερα σημεία ορίζουν ένα επίπεδο, επομένως ελέγχοντας το άκρο του κάθε εμβόλου, θα μπορούσε να πάρει η πλατφόρμα την επιθυμητή περιστροφή. Για την μοντελοποίηση του σώματος, το διάνυσμα \vec{D} και η γωνία $\vec{\varphi}$ θα είναι:

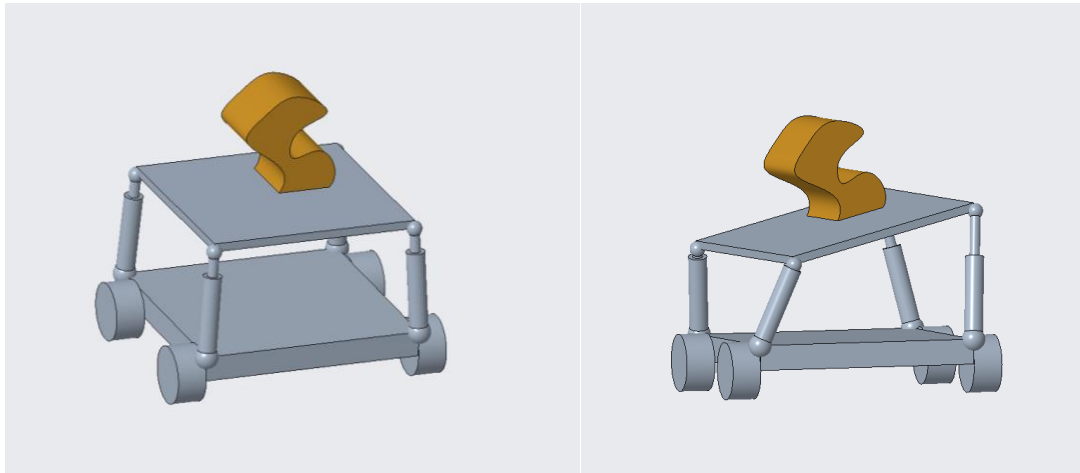
$$\vec{D} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \text{ και } \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

Προτερήματα

- Το υδραυλικό έμβολο είναι ικανό να ανυψώσει μεγάλα φορτία. Λόγω του ασυμπίεστου των υγρών, τα υδραυλικά έμβολα είναι ικανά να ασκήσουν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις. Έτσι το ρομπότ θα μπορεί να δεχτεί μεγάλα φορτία, ακόμα και αν είναι μικρού μεγέθους.

Ελαττώματα

- Όπως συμβαίνει και στην περιστρεφόμενη πλατφόρμα, τα έμβολα χρειάζεται να έχουν ένα μεγάλο ύψος, κάτι, που επιδρά αρνητικά στην ισορροπία.



ΕΙΚΟΝΑ 20 : ΙΔΕΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΑ ΣΕ ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ (ΔΕΞΙΑ)

4.1.4. ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΓΡΑΝΑΖΙ

Η τεχνολογία του διαφορικού γραναζιού χρησιμοποιείται στην τελευταία ιδέα ως ένας τρόπος που μπορεί να μας δώσει εύκολα και απλά μια επιθυμητή κλίση σε δύο άξονες. Μια πλατφόρμα θα μπορούσε να κινηθεί με αυτόν τον τρόπο, ώστε να περιστραφεί με ακρίβεια προς την επιθυμητή γωνία, για να στρέψει στην σωστή πλευρά το βάρος. Από εκεί και πέρα η ιδέα είναι ίδια με την περιστρεφόμενη πλατφόρμα, που περιστρέφεται ανάλογα με το δάπεδο. Όσον αφορά την μοντελοποίηση του σώματος, το διάνυσμα \vec{D} και η γωνία $\vec{\varphi}$ θα είναι:

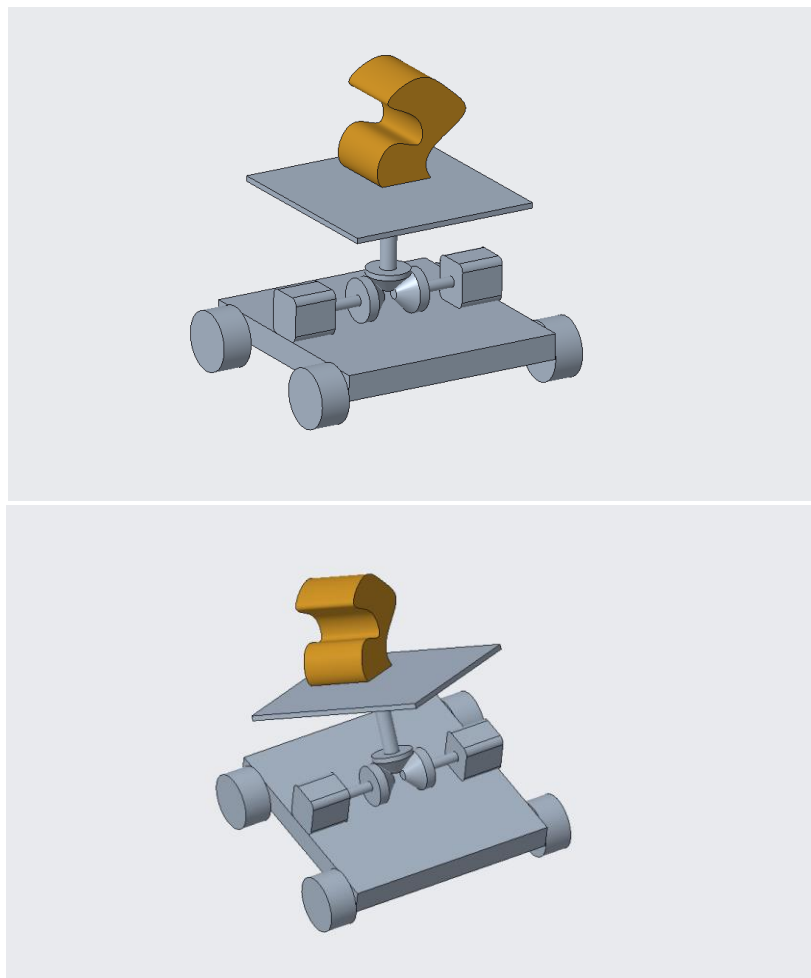
$$\vec{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \text{ και } \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ 0 \\ \varphi_z \end{bmatrix}$$

Προτερήματα

- Εύκολη και ακριβής ρύθμιση της κλίσης του φορτίου. Τα διαφορικά γρανάζια είναι ένας ακριβής μηχανισμός για ρύθμιση γωνιακής ταχύτητας σε δύο διαστάσεις, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό στην εργασία.

Ελαττώματα

- Αδυναμία να σηκώσει μεγάλα φορτία. Όλες οι ροπές του φορτίου θα συγκεντρώνονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο επάνω στα γρανάζια, κάτι που θα επιβαρύνει πολύ τους κινητήρες.



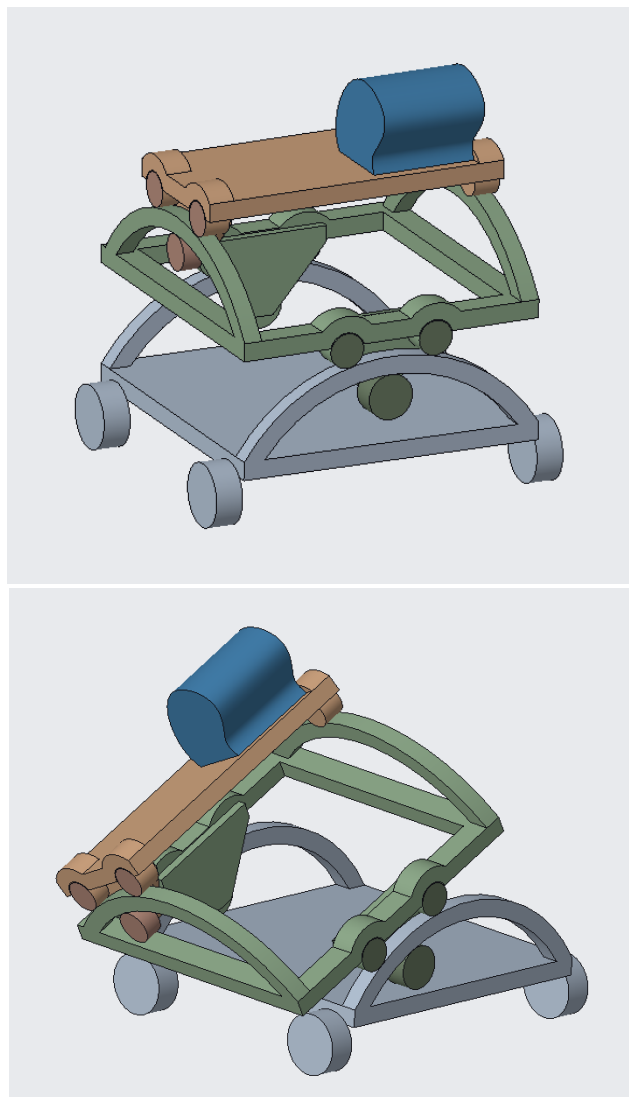
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΙΔΕΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΓΡΑΝΑΖΙ ΣΕ ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΚΑΤΩ)

4.2. ΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ

Η ιδέα που τελικά προέκυψε, είναι ένας συνδυασμός της πρώτης και της δεύτερης. Πρόκειται για ένα σύστημα με δυο ράγες επάνω στις οποίες κινείται η πλατφόρμα. Μία από τις δύο ράγες είναι εσωτερικό γρανάζι, επάνω στο οποίο περιστρέφεται ένα κανονικό μικρότερο γρανάζι (Εικόνα 22). Με αυτό το σύστημα ελέγχουμε τη θέση της πλατφόρμας επάνω στις ράγες. Το σύστημα αυτό επιλύει τα εξής προβλήματα:

Η πλατφόρμα περιστρέφεται και μεταφέρεται ταυτόχρονα, δημιουργώντας έτσι ένα βέλτιστο έλεγχο επάνω στο κέντρο βάρους του φορτίου, συνεπώς και ολόκληρου του ρομπότ. Με την μεταφορά του φορτίου κατά μήκος του τόξου, το κέντρο βάρους παραμένει σε μια περίπου κάθετη θέση στο οριζόντιο επίπεδο, επομένως απαλείφεται η αρνητική επιρροή που μπορεί να έχει το μεγάλο ύψος του ρομπότ από την κατασκευή του.

Μεγάλο ποσοστό του βάρους του φορτίου διοχετεύεται κάθετα στις ράγες, επομένως οι κινητήρες χρειάζονται μικρότερη ροπή για να μετακινήσουν την πλατφόρμα. Για να παραχθεί η ίδια κίνηση και στους δύο οριζόντιους άξονες, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί δύο φορές ο ίδιος μηχανισμός. Αποτυπώνοντας ολόκληρη την ιδέα, προκύπτει το παρακάτω κεντρικό σχέδιο:



ΕΙΚΟΝΑ 22 : ΤΕΛΙΚΗ ΙΔΕΑ ΣΕ ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΣΗ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΚΑΤΩ)

4.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Παρόλο που σε θεωρητικό επίπεδο ο στόχος της εργασίας είναι σχετικά απλός, όταν λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι περιορισμοί, είναι πιο δύσκολο να συνδυαστούν όλα τα πλεονεκτήματα και ελαττώματα σε ένα ιδανικό σχέδιο. Με την τελική ιδέα έγινε μια προσπάθεια να φτιαχτεί ένας μηχανισμός, που ανταποκρίνεται ακριβώς στις ανάγκες της εργασίας. Φυσικά δεν θα μπορεί κανένας να είναι σίγουρος για το επίπεδο επιτυχίας του σχεδίου, αν δεν κατασκευαστεί και δεν δοκιμαστεί πειραματικά. Ιδανικά θα έπρεπε όλες οι ιδέες που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο να κατασκευαστούν σε μια πολύ απλοϊκή μορφή, ώστε οι δυνατότητες και οι αδυναμίες της κάθε μιας να επιβεβαιωθούν πειραματικά. Δυστυχώς στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν υπήρχε η δυνατότητα για τόσο εκτεταμένες κατασκευές, επομένως χρειαζόταν πολύ προσοχή στους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη και τις λύσεις που επιλέγονται.

5. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Αφού οριστικοποιήθηκε η θεωρητική μορφή των μηχανισμών του συστήματος, επόμενο βήμα είναι να περιγραφεί ο μηχανισμός μαθηματικά. Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο προσομοιώνει την κατάσταση του συστήματος και αν γίνει σωστά, μπορεί να περιγράψει σε κάθε χρονική στιγμή την κατάσταση των εξαρτημάτων του ρομπότ, αλλά θα είναι πολύ περίπλοκο και δύσχρηστο, λόγω των πολλών συνδυαστικών κινήσεων που επιτελούνται. Για το λόγο αυτό το μαθηματικό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο βοηθητικά. Θα είναι χρήσιμο κατά την ρύθμιση των ελεγκτών και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Το μοντέλο θα προκύψει από τις κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις της φυσικής και χρειάζεται να εμπεριέχει όλες τις μεταβλητές τιμές του συστήματος, τόσο τις εισόδους, όσο και τις εξόδους.

5.1. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε πρώτο βήμα θα αναλυθούν οι κινήσεις κάθε σώματος στο ρομπότ. Σε κάθε κομμάτι του ρομπότ θα καταγραφούν οι μετακινήσεις και οι περιστροφές που κάνει, με τις αντίστοιχες ταχύτητες και επιταχύνσεις. Για τον καλύτερο υπολογισμό των κινήσεων, θα υπάρχει ένα σταθερό σύστημα αξόνων O , ως προς το οποίο θα μετρηθούν όλα τα διανύσματα που θα προκύψουν.

5.1.1. ΣΩΜΑ Α

Το σώμα A , με σύστημα αξόνων A με αρχή το κέντρο συμμετρίας του, αποτελεί τη σταθερή βάση του ρομπότ. Επάνω στο σώμα βρίσκονται οι τέσσερις ρόδες με τις οποίες μετακινείται στο έδαφος. Θεωρούμε ότι το σώμα θα βρεθεί σε ανώμαλο έδαφος, στο οποίο για να γίνεται σωστή πέδηση, πρέπει το σώμα A να περιστραφεί για να ακολουθήσει την κλίση του εδάφους (Εικόνα 23). Το πλαίσιο A περιστρέφεται λοιπόν ως προς το O κατά μια γωνία θ :

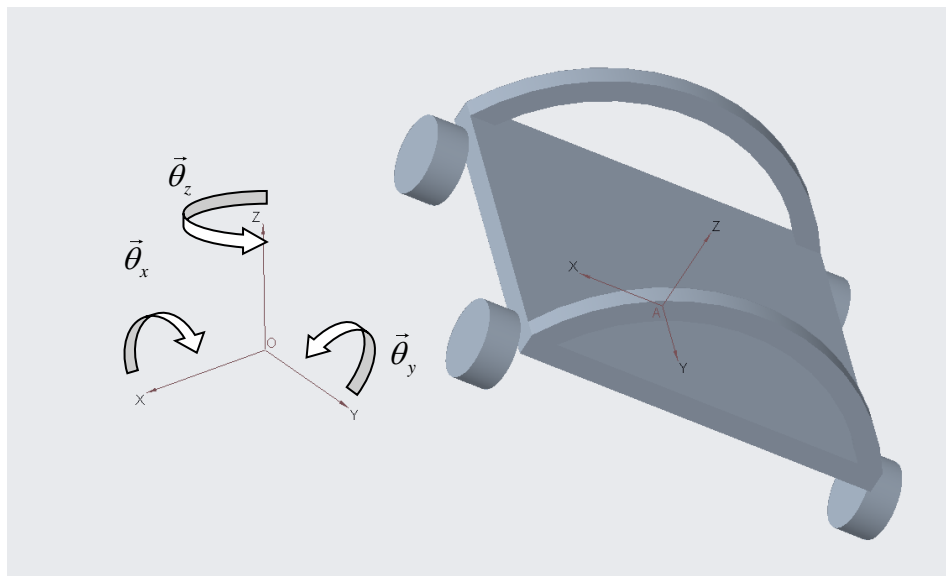
$${}^O\vec{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

με περιστροφική ταχύτητα:

$$\vec{\omega}_A = \vec{\theta} \quad (8)$$

Οι τέσσερις τροχοί, δίνουν μια αθροιστική ταχύτητα στο επίπεδο πέδησης:

$${}^A\vec{V}_A = \begin{bmatrix} {}^AV_{AX} \\ {}^AV_{AY} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$



ΕΙΚΟΝΑ 23 : ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ Α

5.1.2. ΣΩΜΑ Β

Στις ράγες του σώματος Α μετακινείται το σώμα Β. Λόγω της κατεύθυνσης του μηχανισμού κύλισης, περιστρέφεται ως προς το Α κατά γωνία $\vec{\varphi}_B$ (Εικόνα 24), όπου:

$${}^A\vec{\varphi}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Επομένως η συνολική περιστροφική κίνηση του σώματος Β θα είναι:

$$\vec{\omega}_B = \vec{\omega}_A + \vec{\varphi}_B \quad (11)$$

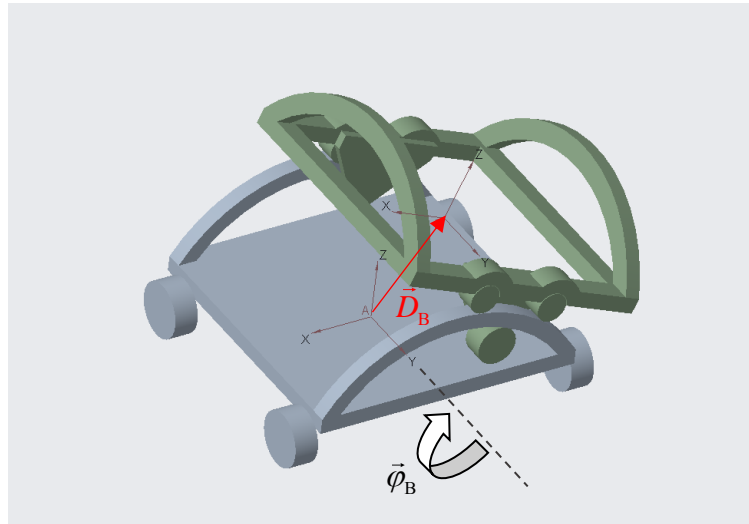
Παράλληλα το σώμα Β μεταφέρεται κατά μήκος των ραγών. Η μεταφορά του σώματος Β ως προς το σώμα Α, εκφράζεται με το διάνυσμα:

$${}^A\vec{D}_B = \begin{bmatrix} r \sin(\varphi_B) \\ 0 \\ r \cos(\varphi_B) - \Delta K_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

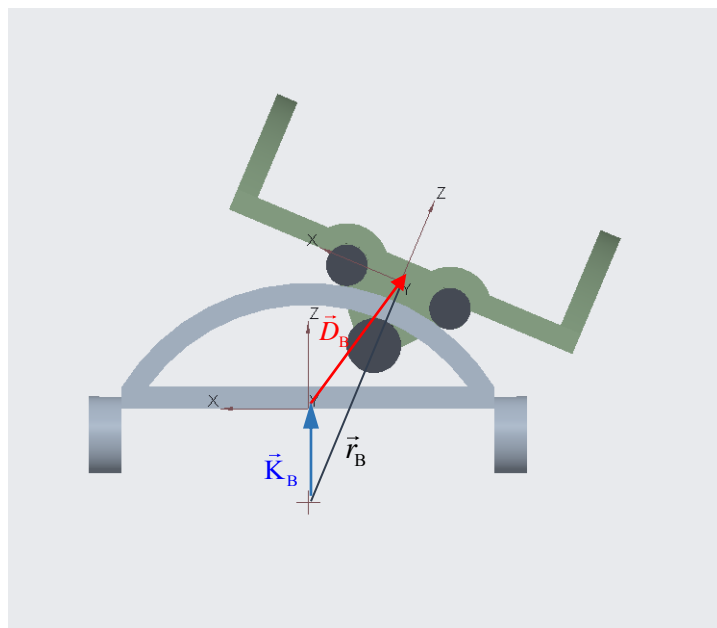
όπου ΔK_B είναι η διαφορά ύψους ανάμεσα στην αρχή των αξόνων Α και στο κέντρο του τόξου της ράγας (Εικόνα 25).

Η συνολική γραμμική ταχύτητα του σώματος Β επομένως, θα είναι:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{D}_B \quad (13)$$



ΕΙΚΟΝΑ 24 : ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Β ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ Α



ΕΙΚΟΝΑ 25 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Β ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ Α

5.1.3. ΣΩΜΑ Γ

Το σώμα Γ κινείται ως προς το Β, με τον ίδιο τρόπο που το Β κινείται ως προς το Α. Χρησιμοποιούν τον ίδιο μηχανισμό, με τη διαφορά ότι το σώμα Γ περιστρέφεται ως προς τον άξονα x (Εικόνα 26).

Συγκεκριμένα περιστρέφεται ως προς το σύστημα Β με γωνία $\vec{\varphi}_\Gamma$, όπου:

$${}^B\vec{\varphi}_\Gamma = \begin{bmatrix} \varphi_\Gamma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Επομένως η συνολική περιστροφική ταχύτητα του σώματος Γ θα είναι:

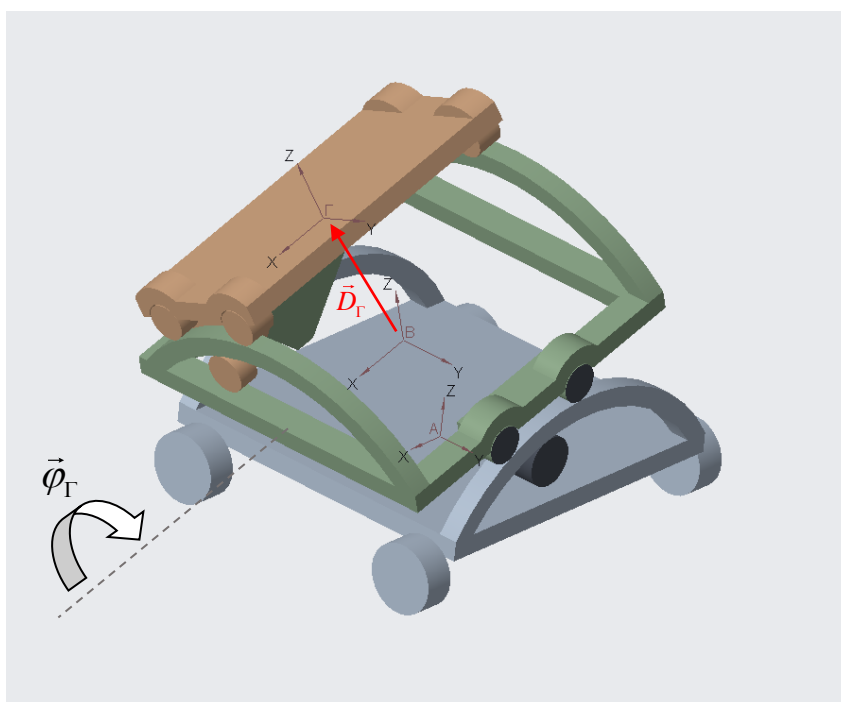
$$\vec{\omega}_\Gamma = \vec{\omega}_B + \vec{\varphi}_\Gamma \quad (15)$$

Παράλληλα το σώμα Γ μεταφέρεται κατά μήκος των ραγών (Εικόνα 27). Η μεταφορά του σώματος Γ ως προς το Β εκφράζεται με το διάνυσμα:

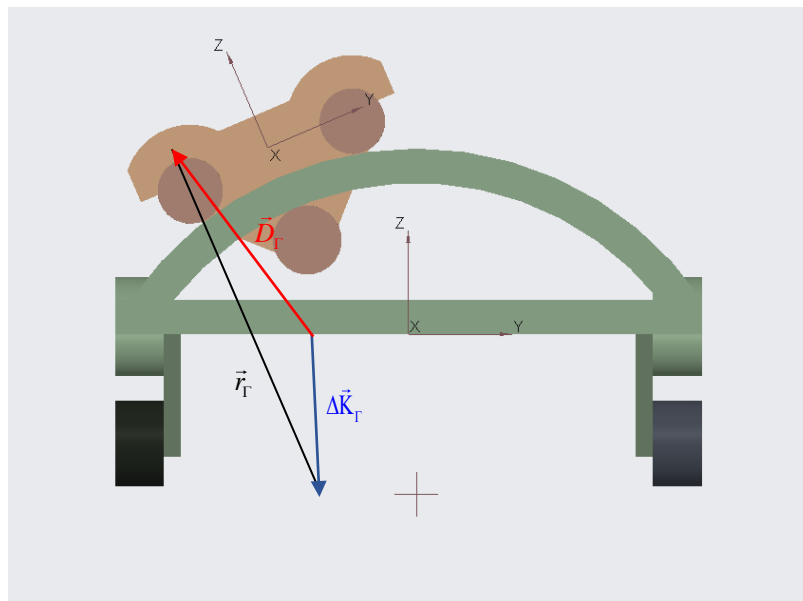
$${}^B\vec{D}_\Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ -r_\Gamma \sin(\varphi_\Gamma) \\ r_\Gamma \cos(\varphi_\Gamma) - \Delta K_\Gamma \end{bmatrix} \quad (16)$$

Επομένως η συνολική γραμμική ταχύτητα του σώματος Γ θα είναι:

$$\vec{V}_\Gamma = \vec{V}_B + \vec{D}_\Gamma = \vec{V}_A + \vec{D}_B + \vec{D}_\Gamma \quad (17)$$



ΕΙΚΟΝΑ 26 : ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Γ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ Β



ΕΙΚΟΝΑ 27 : ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Γ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΗΣ

5.2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αφού έχουμε καθορίσει τις ταχύτητες των σωμάτων, επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των δυνάμεων. Σε πρώτο βήμα θα αναλυθούν τα σύνολα των δυνάμεων που θα εμφανιστούν στο σύστημα και στη συνέχεια θα μελετηθεί η κάθε πλατφόρμα ξεχωριστά. Επειδή λόγω της βαρύτητας, το ένα κομμάτι θα τείνει να «κάθεται» επάνω στο άλλο, σκοπός είναι να περιγραφεί η δυναμική εξίσωση του σώματος Α, αφού είναι το σώμα το οποίο έχει επαφή με το έδαφος, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.3 *Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος*.

5.2.1. ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Σε κάθε στερεό σώμα ασκείται η δύναμη της βαρύτητας. Η δύναμη αυτή είναι πάντα κάθετη στο έδαφος, επομένως θα έχει την μορφή:

$${}^0\vec{W}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -W_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

Πρέπει να επισημανθεί, ότι η δύναμη έχει αυτήν τη μορφή στο πλαίσιο Ο. Όταν μελετάται ένα σώμα σε διαφορετικό σύστημα αξόνων, δεν πρέπει να παραλείπεται η μετατροπή ${}^i\vec{W}_i = {}^0R \times {}^0\vec{W}_i$.

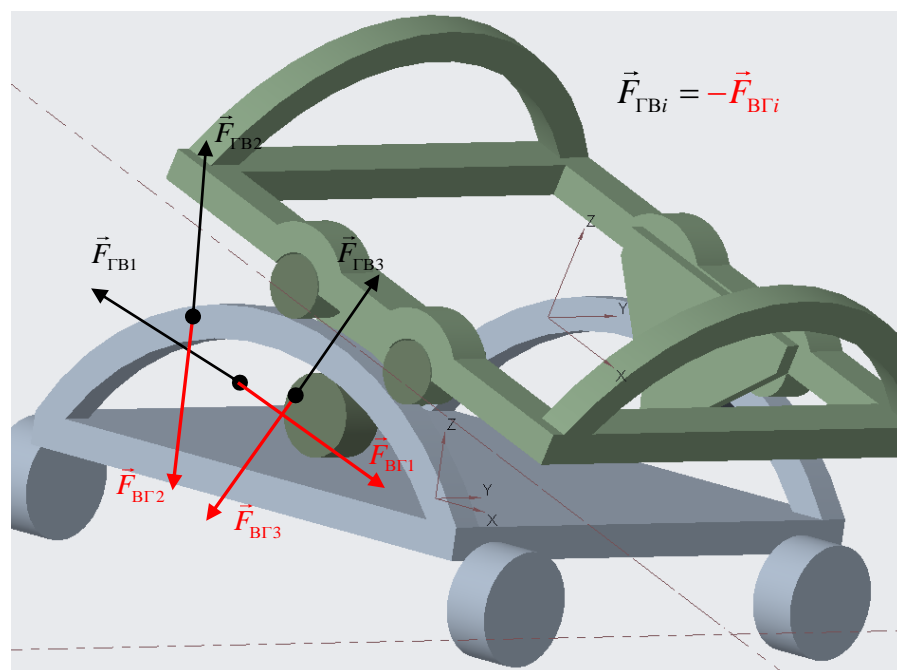
5.2.2. ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΑΦΗΣ

Τα τρία σώματα θα στηρίζονται το ένα επάνω στο άλλο, επομένως αναπόφευκτα, θα έχουν σημεία επαφής. Στα σημεία αυτά, το ένα σώμα θα ασκεί μια δύναμη στο άλλο (νόμος δράσης- αντίδρασης, Εικόνα 28). Στο σύστημα κύλισης της ράγας για παράδειγμα, τα σημεία επαφής θα είναι:

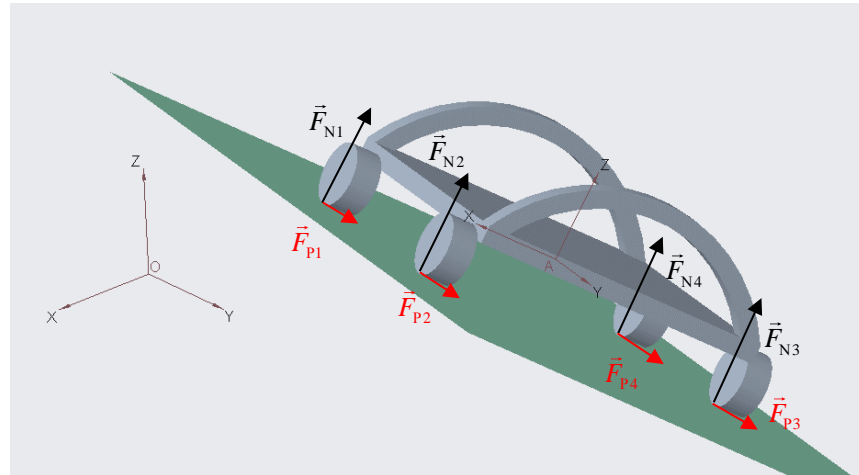
- Τα σημεία στα οποία οι τροχοί κύλισης εφάπτονται στη ράγα. Οι δυνάμεις αυτές θα έχουν κατεύθυνση προς το κέντρο του τόξου της ράγας.
- Το σημείο επαφής των γραναζιών. Η δύναμη σε αυτό το σημείο, απλουστευμένα θεωρείται κάθετη στην ακτίνα του τόξου.

Αυτές οι δυνάμεις συμβολίζονται \vec{F}_{nki} , όπου n το σώμα στο οποίο ασκείται η δύναμη και k το σώμα το οποίο ασκεί τη δύναμη. Όταν υπολογίζεται η ροπή αυτών των δυνάμεων, η απόστασή τους από το κέντρο περιστροφής θα συμβολίζεται d_{nki} .

Οι δυνάμεις \vec{F}_{nki} είναι πάρα πολλές και δύσκολες για να μετρηθούν με αισθητήρες και δεν υπάρχουν αρκετές εξισώσεις για να υπολογιστούν όλες. Επομένως μένουν δύο επιλογές. Η πρώτη επιλογή είναι να γίνουν κάποιες συμβάσεις για να απλοποιηθεί η εξίσωση (π.χ. οι δυνάμεις που ασκούνται στους τέσσερις τροχούς της ράγας να είναι ίσες με το ένα τέταρτο του βάρους). Αυτή η επιλογή μπορεί να μην ανταποκρίνεται ακριβώς στην πραγματικότητα, αλλά είναι εύκολος και γρήγορος τρόπος να αφαιρεθούν πολλοί περιττοί άγνωστοι. Η δεύτερη επιλογή είναι να βρεθεί ένας τρόπος να αντικατασταθούν οι άγνωστες δυνάμεις, μέσω της θεωρίας δράσης-αντίδρασης. Ο δεύτερος τρόπος είναι προτιμότερος, διότι δίνει την δυνατότητα να αποδειχθεί, ότι όσα σημεία επαφής και αν υπάρχουν μεταξύ των σωμάτων, εφόσον το ένα σώμα στηρίζεται αποκλειστικά επάνω στο άλλο, δεν επηρεάζεται το αποτέλεσμα. Αυτό εξυπηρετεί επειδή κατά τον σχεδιασμό, θα μπορούν να γίνουν διαφορετικά σχέδια, διορθώσεις ή προσθήκες, χωρίς να χρειάζεται να ξαναγίνει η μοντελοποίηση εξαρχής.



ΕΙΚΟΝΑ 28 : ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ



ΕΙΚΟΝΑ 29 : ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ιδιαίτερη περίπτωση δυνάμεων επαφής είναι οι δυνάμεις επαφής των τροχών στο έδαφος. Αυτές οι δυνάμεις είναι σημαντικό να επισημανθούν γιατί ο ρόλος τους είναι καθοριστικός για την επιτυχία της λειτουργίας του συστήματος (Εικόνα 29). Οι δυνάμεις αυτές συμβολίζονται ως \vec{F}_{Ti} , όπου i ο αριθμός του εκάστοτε τροχού. Οι δυνάμεις αυτές είναι κάθετες στο επίπεδο πέδησης, επομένως θα ισχύει:

$${}^A\vec{F}_{Ti} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{Ti} \end{bmatrix}$$

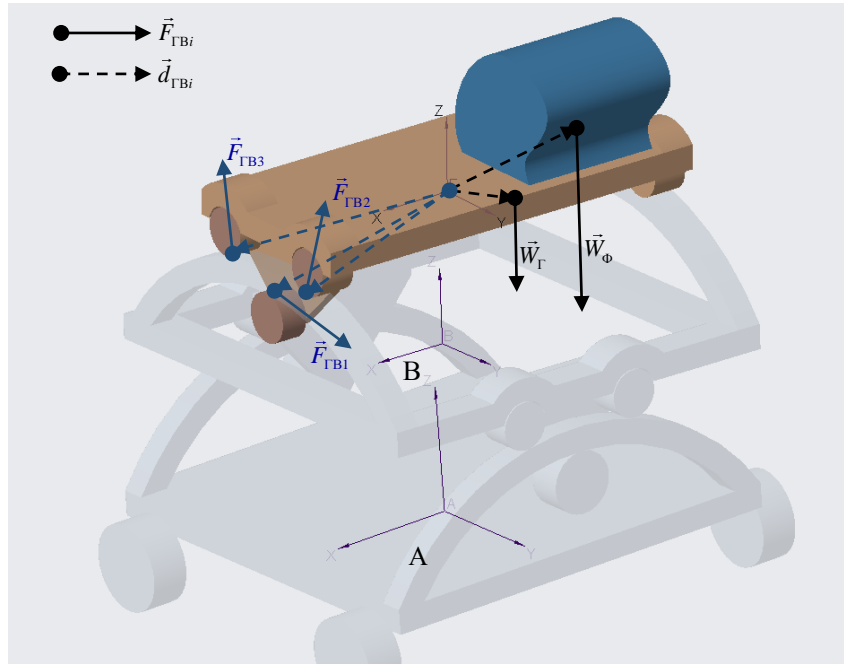
Η δεύτερη ειδική περίπτωση δυνάμεων, είναι οι δυνάμεις επαφής του σώματος με τον τροχό. Οι δυνάμεις αυτές συμβολίζονται ως \vec{F}_{Pi} , παράγονται από τη ροπή του κινητήρα και την πέδηση στο έδαφος και είναι στην ουσία η κινητήρια δύναμη του σώματος στο επίπεδο πέδησης (Εικόνα 29).

5.2.3. ΣΩΜΑ Γ

Αν και στο κεφάλαιο *Κινηματική Ανάλυση*, η μελέτη ξεκίνησε από το σώμα A (από κάτω προς τα επάνω), εδώ συμφέρει περισσότερο να μελετηθεί το σύστημα ανάποδα. Γι' αυτό πρώτο από όλα θα μελετηθεί το σώμα Γ. Το σώμα Γ θεωρείται ένα ενωμένο σώμα με το φορτίο. Θα ασκούνται επομένως δύο δυνάμεις βαρών σε δύο διαφορετικά σημεία. Επίσης θα του ασκούνται πολλές δυνάμεις στα σημεία επαφής με το σώμα B (Εικόνα 30).

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m\vec{V} \\ \Sigma \vec{F}_{\Gamma Bi} + \vec{W}_{\Gamma} + \vec{W}_{\Phi} &= m_{\Gamma}\vec{V}_{\Gamma} \end{aligned} \quad (18)$$

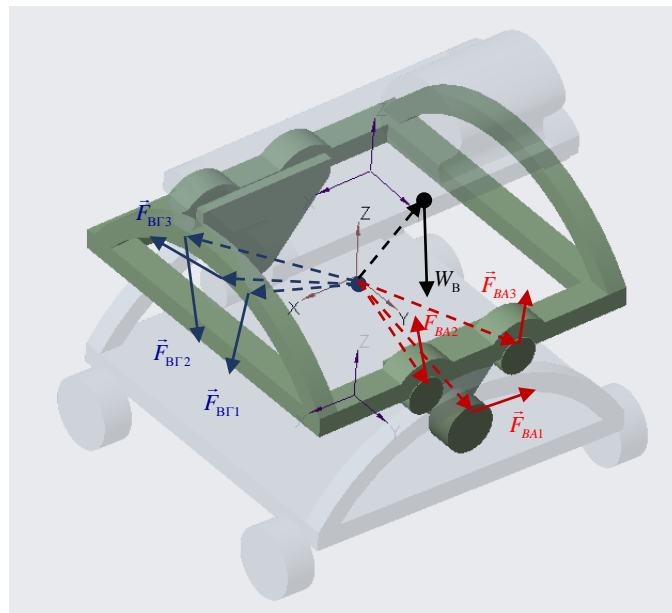
$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M} &= I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \\ \Sigma (\vec{d}_{\Gamma Bi} \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) + \vec{d}_{w\Gamma} \times \vec{W}_{\Gamma} + \vec{d}_{w\Phi} \times \vec{W}_{\Phi} &= I_{\Gamma}\dot{\omega}_{\Gamma} + \omega_{\Gamma} \times I\omega_{\Gamma} \end{aligned} \quad (19)$$



ΕΙΚΟΝΑ 30 : ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Α

5.2.4. ΣΩΜΑ Β

Το σώμα Β έχει το βάρος του και δέχεται τις αντιδράσεις των δυνάμεων επαφής με το σώμα Α, καθώς και τις αντίστοιχες δυνάμεις επαφής με το σώμα Γ (Εικόνα 31).



ΕΙΚΟΝΑ 31 : ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Β

$$\begin{aligned}
 \Sigma \vec{F} &= m \vec{V} \\
 \Sigma \vec{F}_{B\Gamma i} + \Sigma \vec{F}_{BAi} + \vec{W}_B &= m_B \vec{V}_B \xrightarrow{\text{(Δράση-Αντίδραση)}} \\
 \Sigma(-\vec{F}_{\Gamma Bi}) + \Sigma \vec{F}_{BAi} + \vec{W}_B &= m_B \vec{V}_B \\
 -\Sigma \vec{F}_{\Gamma Bi} + \Sigma \vec{F}_{BAi} + \vec{W}_B &= m_B \vec{V}_B \xrightarrow{(18)} \\
 W_\Gamma + \vec{W}_\Phi - m_\Gamma \vec{V}_\Gamma + \Sigma \vec{F}_{BAi} + \vec{W}_B &= m_B \vec{V}_B \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma \vec{M} &= I \vec{\omega} + \vec{\omega} \times I \vec{\omega} \\
 \Sigma(\vec{d}_{B\Gamma i} \times \vec{F}_{B\Gamma i}) + \Sigma(\vec{d}_{BAi} \times \vec{F}_{BAi}) + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B &= I_B \vec{\omega}_B + \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B \xrightarrow{\text{(Δράση-Αντίδραση)}} \\
 \Sigma(\vec{d}_{B\Gamma i} \times (-\vec{F}_{\Gamma Bi})) + \Sigma(\vec{d}_{BAi} \times \vec{F}_{BAi}) + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B &= I_B \vec{\omega}_B + \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B \\
 -\Sigma(\vec{d}_{B\Gamma i} \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) + \Sigma(\vec{d}_{BAi} \times \vec{F}_{BAi}) + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B &= I_B \vec{\omega}_B + \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B \quad (21)
 \end{aligned}$$

Είναι γνωστό ότι οι δυνάμεις $\vec{F}_{\Gamma Bi}$ και $\vec{F}_{B\Gamma i}$ είναι αντίθετες ($\vec{F}_{\Gamma Bi} = -\vec{F}_{B\Gamma i}$), επομένως στην εξίσωση (20), μπορεί να γίνει αντικατάσταση από την εξίσωση (18). Αυτό εξυπηρετεί, διότι με αυτήν τη λογική θα μπορούσαν μελλοντικά όλες οι μεταβλητές να συγκεντρώνονται στην εξίσωση του τελευταίου σώματος (σώμα Α). Παράλληλα οι άγνωστες δυνάμεις \vec{F}_{nki} , που είναι πολλές για να μετρηθούν ή να υπολογιστούν, μπορούν να απαλειφθούν.

Όταν εξετάζονται οι ροπές αυτών των δυνάμεων στην εξίσωση (21), προκύπτει το εξής πρόβλημα. Οι ροπές των δυνάμεων ασκούνται από διαφορετικές αποστάσεις ($\vec{d}_{\Gamma Bi} \neq \vec{d}_{B\Gamma i}$) και ισχύει ότι $\Sigma(\vec{d}_i \times \vec{F}_i) \neq \Sigma \vec{d}_i \times \Sigma \vec{F}_i$ επομένως δεν μπορεί να γίνει καμιά αντικατάσταση όπως έγινε στην (20) και οι άγνωστες δυνάμεις δεν απαλείφονται. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα θα έρθει με τον εξής τρόπο. Από την Εικόνα 32, φαίνεται ότι η απόσταση $\vec{d}_{B\Gamma i}$ είναι:

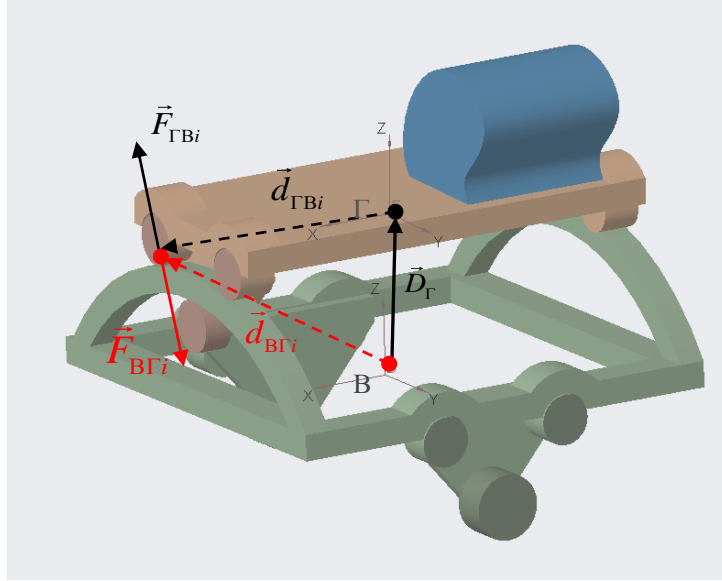
$$\vec{d}_{B\Gamma i} = \vec{d}_{\Gamma Bi} + \vec{D}_\Gamma \quad (22)$$

και ισχύει ότι για τυχαία διανύσματα τριών διαστάσεων:

$$(\vec{A}_1 + \vec{A}_2) \times \vec{B} = \vec{A}_1 \times \vec{B} + \vec{A}_2 \times \vec{B} \quad \text{και} \quad \vec{A} \times \vec{B}_1 + \vec{A} \times \vec{B}_2 = \vec{A} \times (\vec{B}_1 + \vec{B}_2)$$

Επομένως, με βάση την εξίσωση (22) οι ροπές $-\Sigma(\vec{d}_{B\Gamma i} \times \vec{F}_{\Gamma Bi})$ θα γίνουν:

$$\begin{aligned}
 &-\Sigma(\vec{d}_{B\Gamma i} \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) = \\
 &-\Sigma((\vec{d}_{\Gamma Bi} + \vec{D}_\Gamma) \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) = \\
 &-\Sigma(\vec{d}_{\Gamma Bi} \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) - \Sigma(\vec{D}_\Gamma \times \vec{F}_{\Gamma Bi}) = \\
 &-\underbrace{\Sigma(\vec{d}_{\Gamma Bi} \times \vec{F}_{\Gamma Bi})}_{\text{Αντικατάσταση από (19)}} - \underbrace{\vec{D}_\Gamma \times \Sigma \vec{F}_{\Gamma Bi}}_{\text{Αντικατάσταση από (18)}} = \\
 &-(I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma + \vec{\omega}_\Gamma \times I \vec{\omega}_\Gamma - \vec{d}_{W\Gamma} \times \vec{W}_\Gamma - \vec{d}_{W\Phi} \times \vec{W}_\Phi) - \vec{D}_\Gamma \times (m_\Gamma \vec{V}_\Gamma - W_\Gamma - \vec{W}_\Phi) = \\
 &-I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma - \vec{\omega}_\Gamma \times I \vec{\omega}_\Gamma + \vec{d}_{W\Gamma} \times \vec{W}_\Gamma + \vec{d}_{W\Phi} \times \vec{W}_\Phi - \vec{D}_\Gamma \times m_\Gamma \vec{V}_\Gamma + \vec{D}_\Gamma \times (W_\Gamma + \vec{W}_\Phi) \quad (23)
 \end{aligned}$$



ΕΙΚΟΝΑ 32 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Β

Αντικαθιστώντας την (23) στην (21), η εξίσωση του Euler για το σώμα Β θα γίνει:

$$-I_{\Gamma} \ddot{\omega}_{\Gamma} - \ddot{\omega}_{\Gamma} \times I \ddot{\omega}_{\Gamma} + \ddot{d}_{W\Gamma} \times \ddot{W}_{\Gamma} + \ddot{d}_{W\Phi} \times \ddot{W}_{\Phi} - \ddot{D}_{\Gamma} \times m_{\Gamma} \ddot{V}_{\Gamma} + \ddot{D}_{\Gamma} \times (\ddot{W}_{\Gamma} + \ddot{W}_{\Phi}) + \Sigma(\ddot{d}_{BAi} \times \ddot{F}_{Bi}) + \ddot{d}_{WB} \times \ddot{W}_B = I_B \ddot{\omega}_B + \ddot{\omega}_B \times I_B \ddot{\omega}_B \quad (24)$$

Κάνοντας μια πιο σωστή ομαδοποίηση η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

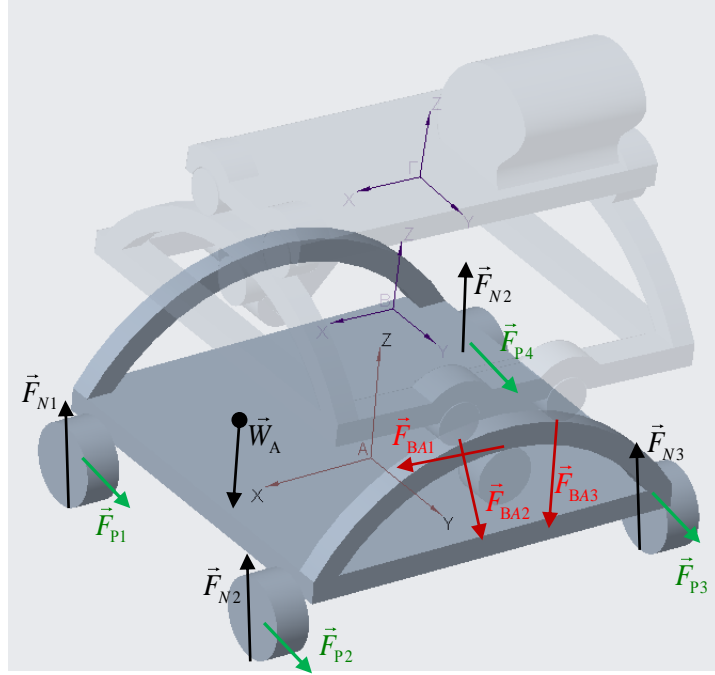
$$\ddot{d}_{W\Gamma} \times \ddot{W}_{\Gamma} + \ddot{d}_{W\Phi} \times \ddot{W}_{\Phi} + \ddot{d}_{WB} \times \ddot{W}_B + \ddot{D}_{\Gamma} \times (\ddot{W}_{\Gamma} + \ddot{W}_{\Phi}) + \Sigma(\ddot{d}_{BAi} \times \ddot{F}_{Bi}) = I_B \ddot{\omega}_B + \ddot{\omega}_B \times I_B \ddot{\omega}_B + I_{\Gamma} \ddot{\omega}_{\Gamma} + \ddot{\omega}_{\Gamma} \times I \ddot{\omega}_{\Gamma} + \ddot{D}_{\Gamma} \times m_{\Gamma} \ddot{V}_{\Gamma} \quad (25)$$

5.2.5. ΣΩΜΑ Α

Στις εξισώσεις του σώματος Α ακολουθείται για τις δυνάμεις F_{ABi} ακριβώς η ίδια μέθοδος που ακολουθήθηκε για τις δυνάμεις $F_{B\Gamma i}$ (Εικόνα 33).

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m \vec{V}_A \\ \Sigma(-\vec{F}_{Bi}) + \Sigma \vec{F}_{Ni} + \vec{W}_A &= m_A \vec{V}_A \xrightarrow{(20)} \\ \vec{W}_{\Gamma} + \vec{W}_{\Phi} + \vec{W}_B + \vec{W}_A + \Sigma \vec{F}_{Ni} &= m_A \vec{V}_A + m_B \vec{V}_B + m_{\Gamma} \vec{V}_{\Gamma} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M} &= I \ddot{\omega} \\ \Sigma(\ddot{d}_{ABi} \times \ddot{F}_{ABi}) + \Sigma(\ddot{d}_{ANi} \times \ddot{F}_{Ni}) + \ddot{d}_{WA} \times \vec{W}_A &= I_A \ddot{\omega}_A + \ddot{\omega}_A \times I_A \ddot{\omega}_A \\ \Sigma(\ddot{d}_{ABi} \times (-\ddot{F}_{BAi})) + \Sigma(\ddot{d}_{ANi} \times \ddot{F}_{Ni}) + \ddot{d}_{WA} \times \vec{W}_A &= I_A \ddot{\omega}_A + \ddot{\omega}_A \times I_A \ddot{\omega}_A \\ -\Sigma(\ddot{d}_{ABi} \times \ddot{F}_{BAi}) + \Sigma(\ddot{d}_{ANi} \times \ddot{F}_{Ni}) + \ddot{d}_{WA} \times \vec{W}_A &= I_A \ddot{\omega}_A + \ddot{\omega}_A \times I_A \ddot{\omega}_A \end{aligned} \quad (27)$$



ΕΙΚΟΝΑ 33 : ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Α

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 34 οι ροπές $-\Sigma(\vec{d}_{ABi} \times \vec{F}_{BAi})$ θα γίνουν:

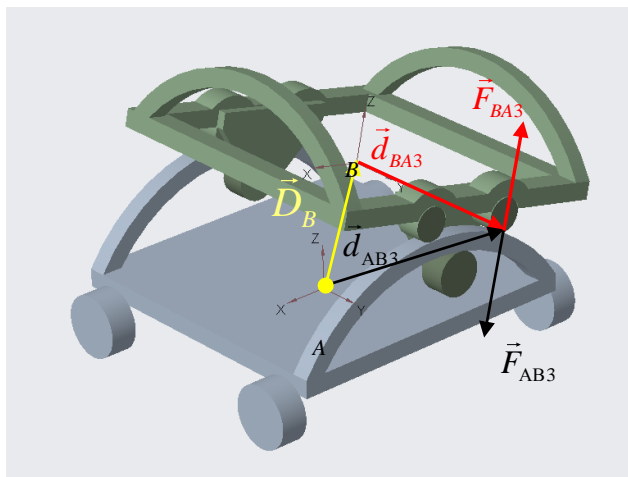
$$\begin{aligned}
 &-\Sigma(\vec{d}_{ABi} \times \vec{F}_{BAi}) = \\
 &-\Sigma((\vec{d}_{BAi} + \vec{D}_B) \times \vec{F}_{BAi}) = \\
 &-\Sigma(\vec{d}_{BAi} \times \vec{F}_{BAi}) - \Sigma(\vec{D}_B \times \vec{F}_{BAi}) = \\
 &\underbrace{-\Sigma(\vec{d}_{BAi} \times \vec{F}_{BAi})}_{\text{Αντικατάσταση από (25)}} - \underbrace{\vec{D}_B \times \Sigma \vec{F}_{BAi}}_{\text{Αντικατάσταση από (20)}} = \\
 &= \vec{d}_{W\Gamma} \times \vec{W}_\Gamma + \vec{d}_{W\Phi} \times \vec{W}_\Phi + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B + \vec{D}_\Gamma \times (\vec{W}_\Gamma + \vec{W}_\Phi) - I_B \vec{\omega}_B - \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B - I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma - \vec{\omega}_\Gamma \times I \vec{\omega}_\Gamma \\
 &-\vec{D}_\Gamma \times m_\Gamma \vec{V}_\Gamma - \vec{D}_B \times (m_B \vec{V}_B - \vec{W}_\Gamma - \vec{W}_\Phi - \vec{W}_B + m_\Gamma \vec{V}_\Gamma) \quad (28)
 \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας την (28) στην (27), η τελική εξίσωση περιστροφής του σώματος Α παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 &\vec{d}_{W\Gamma} \times \vec{W}_\Gamma + \vec{d}_{W\Phi} \times \vec{W}_\Phi + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B + \vec{D}_\Gamma \times (\vec{W}_\Gamma + \vec{W}_\Phi) - I_B \vec{\omega}_B - \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B - I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma - \vec{\omega}_\Gamma \times I \vec{\omega}_\Gamma \\
 &-\vec{D}_\Gamma \times m_\Gamma \vec{V}_\Gamma - \vec{D}_B \times (m_B \vec{V}_B - \vec{W}_\Gamma - \vec{W}_\Phi - \vec{W}_B + m_\Gamma \vec{V}_\Gamma) + \Sigma(\vec{d}_{ANi} \times \vec{F}_{Ni}) + \vec{d}_{WA} \times \vec{W}_A = I_A \vec{\omega}_A + \vec{\omega}_A \times I_A \vec{\omega}_A \quad (29)
 \end{aligned}$$

Με μια σωστή ομαδοποίηση:

$$\begin{aligned}
 &\vec{d}_{WA} \times \vec{W}_A + \vec{d}_{WB} \times \vec{W}_B + \vec{d}_{W\Gamma} \times \vec{W}_\Gamma + \vec{d}_{W\Phi} \times \vec{W}_\Phi + \vec{D}_\Gamma \times (\vec{W}_\Gamma + \vec{W}_\Phi) + \vec{D}_B \times (\vec{W}_\Gamma + \vec{W}_\Phi + \vec{W}_B) + \Sigma(\vec{d}_{ANi} \times \vec{F}_{Ni}) = \\
 &I_A \vec{\omega}_A + \vec{\omega}_A \times I_A \vec{\omega}_A + I_B \vec{\omega}_B + \vec{\omega}_B \times I_B \vec{\omega}_B + I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma + \vec{\omega}_\Gamma \times I_\Gamma \vec{\omega}_\Gamma + \vec{D}_B \times m_B \vec{V}_B + (\vec{D}_\Gamma + \vec{D}_B) \times m_\Gamma \vec{V}_\Gamma \quad (30)
 \end{aligned}$$



ΕΙΚΟΝΑ 34 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Α

5.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Οι εξισώσεις (26) και (30), περιέχουν τα χαρακτηριστικά όλων των σωμάτων του ρομπότ χωρίς αγνώστους. Πρόκειται για ένα χωρικό πρόβλημα, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει ένα σύστημα έξι εξισώσεων, μέσα στο οποίο περιέχονται όλες οι είσοδοι και οι έξοδοι του συστήματος. Θεωρητικά, λύνοντας το σύστημα ως προς τους αγνώστους που θα δίνονται σαν έξοδοι, μπορούν να βγουν εξισώσεις που θα δίνουν τα αποτελέσματα του συστήματος. Η επίλυση αυτή όμως δεν είναι τόσο απλή. Η μεθοδολογία που προηγήθηκε, οδήγησε σε ένα μη γραμμικό σύστημα, το οποίο δεν μπορεί να λυθεί με τις κλασικές μεθόδους. Για να λυθεί το μη γραμμικό σύστημα, πρέπει να γραμμικοποιείται τοπικά και να λύνεται ως γραμμικό. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να λύνεται ξεχωριστά για τις τιμές του σε κάθε σημείο του χρόνου και θα δίνει τοπικά αποτελέσματα. Ένα τέτοιο σύστημα θα είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στον έλεγχο του ρομπότ, μπορεί όμως με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB, να βοηθήσει κατά την σχεδίαση και τον πειραματισμό.

5.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η μαθηματική μοντελοποίηση των σωμάτων του ρομπότ, ήταν πιο δύσκολη διαδικασία από ότι υπολογιζόταν. Ενώ θεωρητικά οι αρχές της φυσικής είναι απλές, ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών και η αλληλεξάρτησή τους, δημιουργεί ένα μη γραμμικό σύστημα μεγάλης πολυπλοκότητας. Στο ξεκίνημα αυτού του κεφαλαίου, υπήρχε η αντίληψη ότι η λύση των εξισώσεων θα είχε εφαρμογή στον προγραμματισμό του συστήματος ελέγχου. Όταν όμως έγινε κατανοητό τι χρειάζεται ένα μη γραμμικό σύστημα για να λυθεί και να λειτουργήσει, το πλάνο της εργασίας αναθεωρήθηκε. Το μοντέλο παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για το πώς αλληλοεπηρεάζονται οι κινήσεις και οι δυνάμεις, αλλά αν η εργασία ξεκινούσε από την αρχή, θα αφιερωνόταν λιγότερος χρόνος στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, από ότι αφιερώθηκε τώρα. Σε μελλοντικές βελτιώσεις του ρομπότ, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλοι μικροελεγκτές, πιο ικανοί να επιτελούν μεγάλες λειτουργίες, ώστε να μπορεί το σύστημα να λειτουργήσει με ένα μοντέλο σαν αυτό που προβλεπόταν στην αρχή της εργασίας.

6. ΣΧΕΔΙΑΣΗ

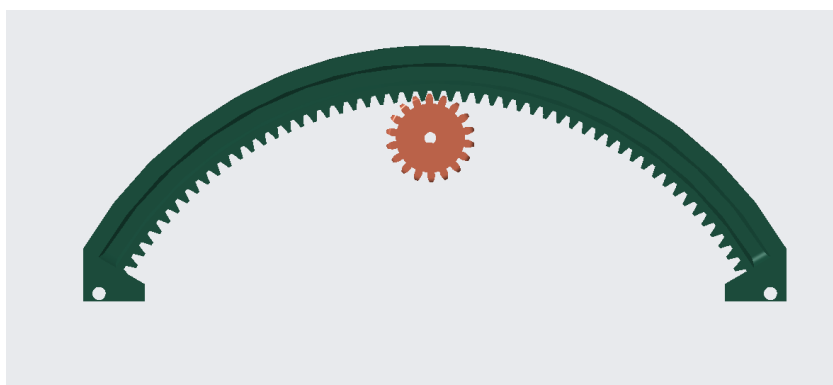
Έχοντας πλέον μια καθαρή εικόνα του προβλήματος, επόμενο βήμα είναι να γίνουν τα τελικά σχέδια. Το μαθηματικό μοντέλο μέχρι τώρα είναι απόλυτα μεταβλητό. Δεν έχει θεωρηθεί καμία διάσταση δεδομένη. Με βάση τις τεχνικές δυνατότητες και τα προσβάσιμα εργαλεία, αποφασίστηκε το Σώμα Α να είναι περίπου 300X300mm, το οποίο αναμενόταν να δώσει ένα ρομπότ περίπου 330X350X280mm. Οι ακριβείς διαστάσεις φυσικά θα προέκυπταν κατά την σχεδίαση.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Creo Parametric 5.0.0.

6.1. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

6.1.1. ΓΡΑΝΑΖΙΑ

Το πρώτο βήμα που έγινε κατά την σχεδίαση, ήταν να σχεδιαστούν οι δύο τύποι γραναζιών που θα χρησιμοποιηθούν. Το ένα γρανάζι είναι το μεγάλο εσωτερικό, που θα αποτελεί τη μία σταθερή ράγα επάνω στην οποία θα τσουλάει το σύστημα και το μικρό το οποίο θα ελέγχεται από τον κινητήρα και θα κινεί την πλατφόρμα. Σε πρώτη μορφή, τα γρανάζια σχεδιάστηκαν καθαρά παραμετρικά. Ο αριθμός δοντιών, η γωνία πίεσης και το module, ήταν μεταβλητές. Αλλάζοντάς τες αλλάζει και το σχέδιο αυτομάτως. Σχεδιάζοντας παραμετρικά τα γρανάζια, εξοικονομήθηκε πολύς χρόνος στα αρχικά στάδια της σχεδίασης, που δεν υπήρχαν συγκεκριμένες διαστάσεις, οπότε το μέγεθος των γραναζιών άλλαζε συχνά κατά τον ιδεασμό. Μετά από πειραματισμό, οι καλύτερες τιμές που επιλέχθηκαν ήταν module=2, γωνία πίεσης=20°, αριθμός δοντιών για το μικρό γρανάζι=18, αριθμός δοντιών για το μεγάλο γρανάζι=160. Στην συνέχεια έγιναν και στα δύο γρανάζια οι κατάλληλες τροποποιήσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 ώστε να βιδώνονται στο ολικό assembly .



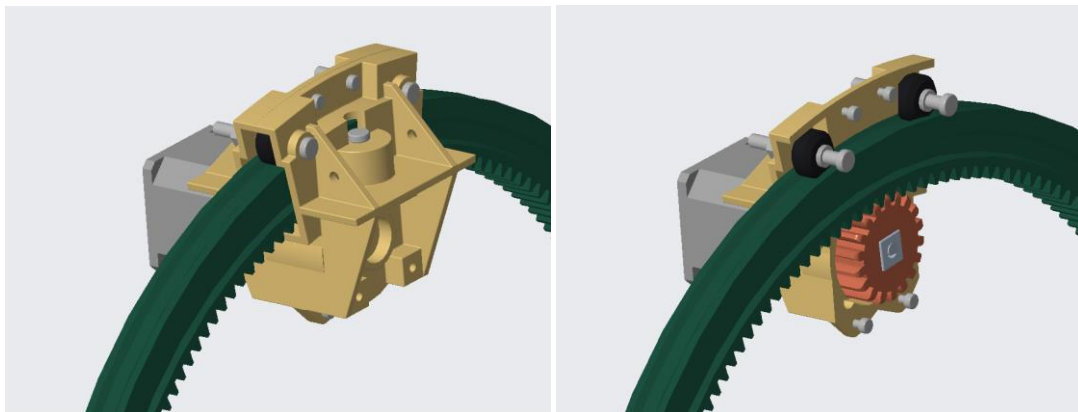
ΕΙΚΟΝΑ 35 : ΤΑ ΔΥΟ ΕΙΔΗ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το μεγάλο εσωτερικό γρανάζι κόπηκε στη μορφή τόξου, γωνίας 120°, έχει πάχος 25mm και πλάτος 16mm. Τα άκρα του είναι σχεδιασμένα να εφαρμόζουν στις προβλεπόμενες εσοχές των πλατφορμών και διαθέτουν όλες τις απαραίτητες οπές για τις βίδες κατά την συναρμολόγηση. Το γρανάζι των κινητήρων έχει διάμετρο 40mm και πάχος ίσο με το μεγάλο γρανάζι. Στα σχέδια δηλώθηκε παραμετρικά ότι τα δύο γρανάζια έχουν τα ίδια πάχη, ώστε να γίνουν πιο εύκολες οι αλλαγές.

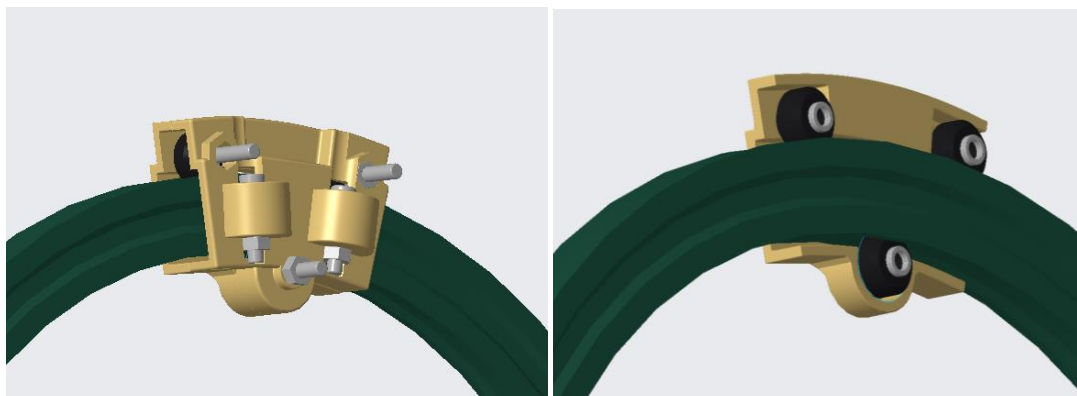
6.1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΥΛΙΣΗΣ

Για το ενδεχόμενο πιθανών αλλαγών και βελτιώσεων, αποφεύχθηκαν μεγάλα και περίπλοκα σχέδια. Στόχος ήταν να σχεδιαστούν μικροί και αυτόνομοι μηχανισμοί, που θα επιτελούν τη λειτουργία τους με εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο και είχαν την σημαντικότερη λειτουργία, είναι τα συστήματα κύλισης στις ράγες. Στην ουσία έπρεπε να σχεδιαστεί ένας μηχανισμός που κινείται επάνω στην ράγα σωστά, χωρίς να παρεκτρέπεται καθόλου και επάνω του θα βιδώνονται τα κύρια σώματα των πλατφορμών. Το σύστημα κύλισης πρέπει να περιέχει το μικρό γρανάζι και τις υπόλοιπες βοηθητικές ρόδες, κατάλληλα τοποθετημένες, ώστε να εφαρμόζουν σωστά επάνω στην ράγα.

Ανάλογα με το σημείο για το οποίο προορίζεται ένας τέτοιος μηχανισμός, μπορεί να περιέχει είτε το μικρό γρανάζι με τον κινητήρα (Εικόνα 36), είτε μόνο βοηθητικούς τροχούς για στήριξη (Εικόνα 37). Αντίστοιχα και η ράγα επάνω στην οποία ο μηχανισμός κινείται μπορεί να είναι γρανάζι ή όχι. Στην εξωτερική περίμετρο και στα πλάγια της ράγας σχεδιάζονται αυλακώσεις, εντός των οποίων θα κινούνται οι αντίστοιχες βοηθητικές ρόδες. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα κύλισης δεν θα μπορεί να παρεκτραπεί προς καμία κατεύθυνση.



ΕΙΚΟΝΑ 36 : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

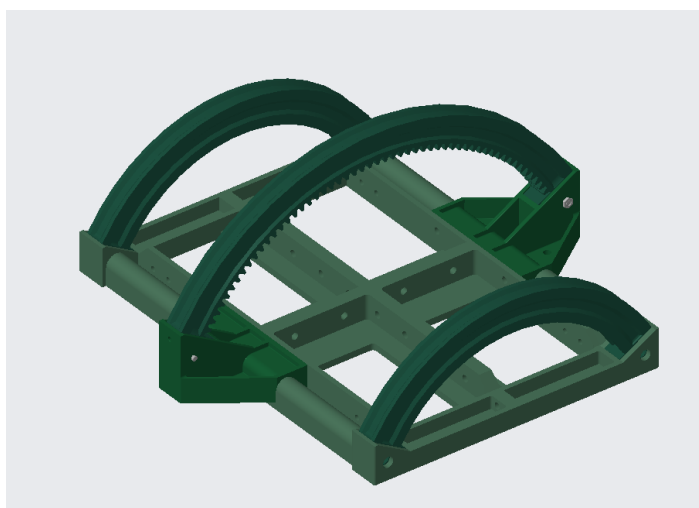


ΕΙΚΟΝΑ 37 : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

6.1.3. ΚΟΡΜΟΙ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ

Αφού ετοιμάστηκαν οι μηχανισμοί που θα εκτελούν την κίνηση, σειρά έχουν οι κύριες πλατφόρμες του συστήματος. Οι πλατφόρμες είναι τρεις, το κεντρικό σώμα, η πλατφόρμα κύλισης στον y και η πλατφόρμα κύλισης στον x (πλατφόρμες Α, Β και Γ αντίστοιχα όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5: *Μαθηματική μοντελοποίηση*).

Το κύριο σώμα (πλατφόρμα Α), αποτελεί τον κορμό του ρομπότ. Επάνω του θα βρίσκονται όλα τα ηλεκτρονικά, συγκεντρωμένα στους ελεύθερους χώρους. Στερεωμένα επάνω στο κύριο σώμα είναι επίσης τα συστήματα των τροχών (εξηγούνται παρακάτω). Το κύριο σώμα περιέχει τρεις ράγες, μία κεντρική με γρανάζι και δυο βοηθητικές (Εικόνα 38). Επάνω σε αυτές τις ράγες θα κινείται η πλατφόρμα κύλισης στον άξονα y . Οι βοηθητικές ράγες έχουν μικρότερο διάμετρο από το γρανάζι, είναι όμως ομόκεντρες. Αυτή η διάταξη μειώνει σημαντικά το ύψος της κατασκευής. Αν η κάθε πλατφόρμα ήταν τοποθετημένη καθαρά επάνω στην άλλη, τότε το ρομπότ θα ήταν αισθητά ψηλότερο με πολύ κενό χώρο. Τοποθετώντας την πλατφόρμα κύλισης στον y πιο χαμηλά από ότι είναι το γρανάζι, εξοικονομήθηκε ύψος και χώρος.

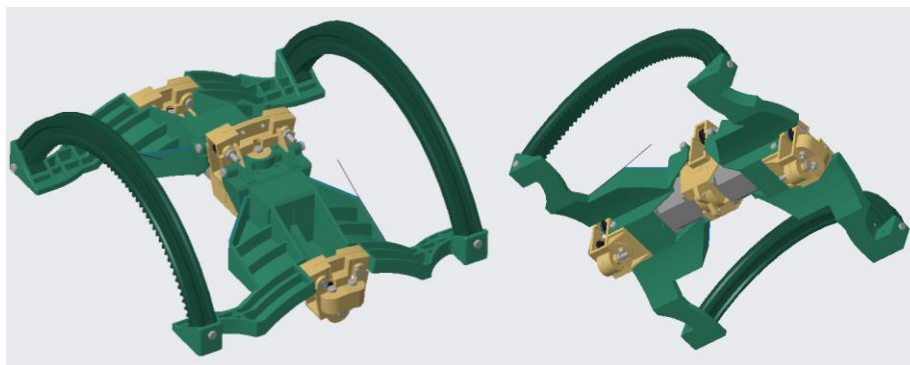


ΕΙΚΟΝΑ 38 : ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Α ΠΛΗΡΩΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗ

Η πλατφόρμα Α αποτελείται από τέσσερα είδη κομματιών. Ο κεντρικός σκελετός ιδανικά θα ήταν ένα ενιαίο κομμάτι, αλλά λόγω των διαθέσιμων τρόπων κατασκευής, κάτι τέτοιο ήταν αδύνατο. Στα πλάγια του κεντρικού σκελετού, τοποθετήθηκαν δύο επιπλέον μικρές βάσεις, που υποδέχονται το μεγάλο γρανάζι. Στο επόμενο βήμα προστίθενται οι δύο βοηθητικές ράγες, που έχουν μικρότερη ακτίνα και μεγαλύτερο πάχος με σκοπό να απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του βάρους του φορτίου.

Η πλατφόρμα κύλισης στον άξονα y (πλατφόρμα Β), είναι το κεντρικό κομμάτι του κορμού του ρομπότ (Εικόνα 39). Ήταν το πιο δύσκολο και περίπλοκο κομμάτι στη σχεδίαση, καθώς πρέπει να συνδυάζει πολλές λειτουργίες. Στηρίζει την κίνηση της ανώτερης πλατφόρμας ενώ παράλληλα κινείται και η ίδια. Πρέπει να έχει το σωστό ύψος ώστε να γίνεται καλή οικονομία χώρου και να είναι στα πλαίσια κάποιων διαστάσεων ώστε να μην παρεμποδίζει την κίνηση άλλων κινούμενων μελών. Παράλληλα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική για να μην υπάρχουν αστοχίες

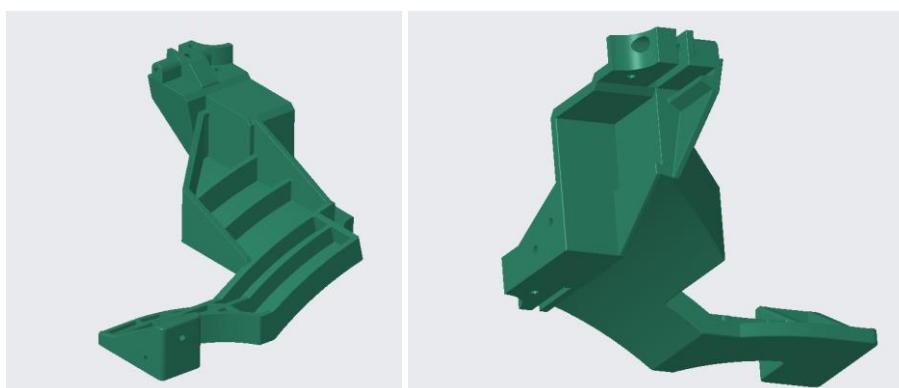
λόγω των μεγάλων ροπών που θα δεχθεί. Για την κύλιση της ανώτερης πλατφόρμας, υπάρχουν δύο ράγες ίσης διαμέτρου, η μία με γρανάζι και η άλλη απλή, τοποθετημένες στα πλάγια.



ΕΙΚΟΝΑ 39 : Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Β ΠΛΗΤΩΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗ, ΜΕ ΔΥΟ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Κεντρικό κομμάτι αυτής της πλατφόρμας είναι ο μηχανισμός κύλισης του γραναζιού που κινείται κατά μήκος του μεγάλου γραναζιού της πλατφόρμας Α. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός κύλισης έχει σχεδιαστεί με δύο κινητήρες που κινούν το ίδιο γρανάζι, λόγω του αυξημένου βάρους που θα κινεί.

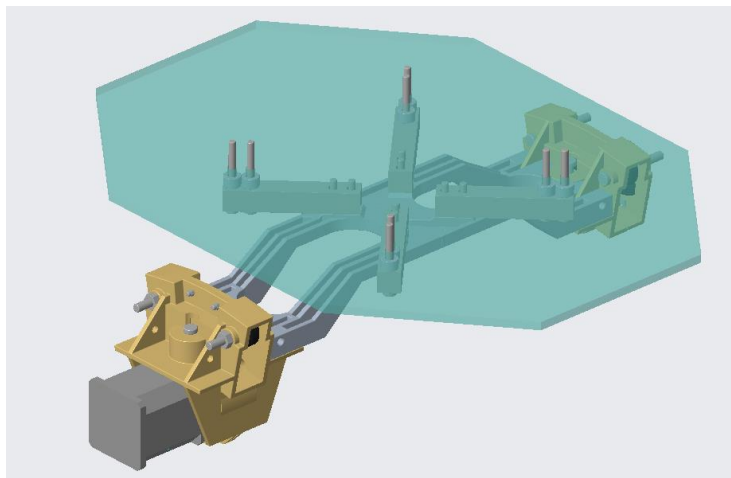
Επάνω στο μηχανισμό κύλισης, βιδώνονται τα τέσσερα κομμάτια του σκελετού της πλατφόρμας (Εικόνα 40). Ο σκελετός της πλατφόρμας πρέπει να ικανοποιεί πολλές απαιτήσεις. Πρώτον πρέπει να υποδέχεται το μεγάλο γρανάζι και την βοηθητική ράγα της άνωθεν του πλατφόρμας. Δεύτερον πρέπει να υποδέχεται τους μηχανισμούς κύλισης για τις βοηθητικές ράγες της πλατφόρμας Α. Τρίτον πρέπει να εκτελεί την κίνηση κατά μήκος της ράγας σε όλο της το εύρος χωρίς να συγκρούεται με άλλα αντικείμενα. Τέλος, πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό για να αποφευχθούν θραύσεις, επειδή το βάρος από την επάνω πλατφόρμα ασκείται σε μεγάλη απόσταση από τα σημεία στήριξης, επομένως προβλέπονται μεγάλες ροπές (Εικόνα 39).



ΕΙΚΟΝΑ 40 :ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Β ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ

Η πλατφόρμα κύλισης στον άξονα x (πλατφόρμα Γ) είναι το ανώτερο σώμα, επάνω στο οποίο στερεώνεται το φορτίο. Η πλατφόρμα αυτή περιέχει τους δύο μηχανισμούς κύλισης, ενωμένους με έναν κεντρικό σκελετό. Επάνω στον σκελετό, είναι τοποθετημένα τέσσερα load cells, σε περίπτωση που χρειαστεί να μετρηθεί το βάρος του φορτίου. Επάνω στα load cells, στερεώνεται η επιφάνεια τοποθέτησης

του φορτίου. Στα άκρα του σκελετού είναι τοποθετημένοι ο μηχανισμός κύλισης με κινητήρα και ο βοηθητικός (Εικόνα 41).

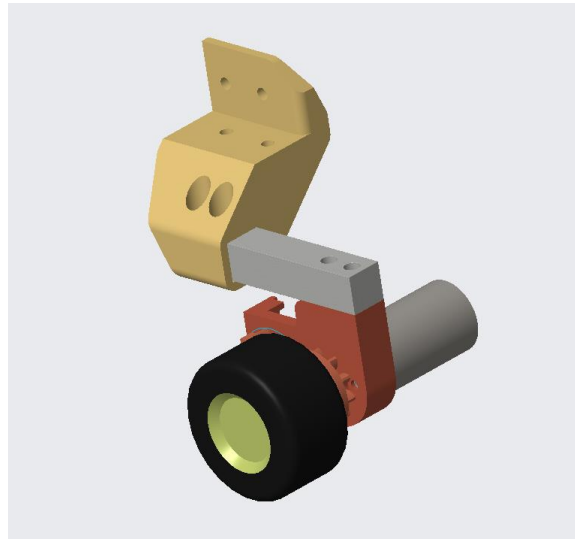


ΕΙΚΟΝΑ 41 :Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Γ ΠΛΗΡΩΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗ

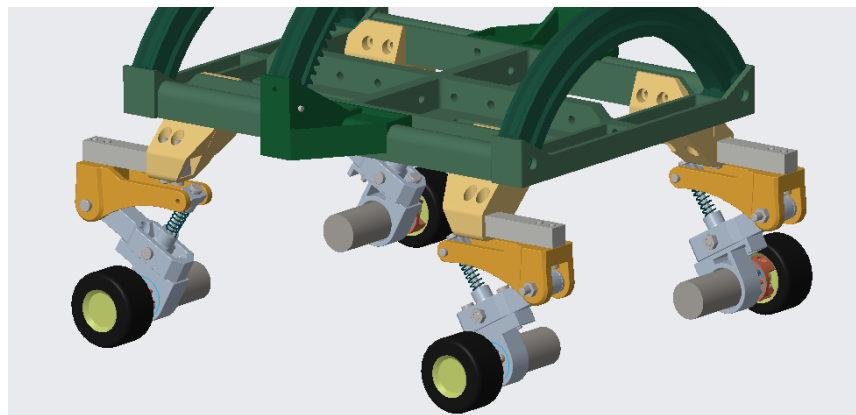
6.1.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΧΩΝ

Τέλος, το ρομπότ πρέπει να στηρίζεται επάνω σε τέσσερις τροχούς, ο καθένας με τον κινητήρα του. Η καλή πέδηση των τροχών στο έδαφος είναι καίριας σημασίας, αφού η δύναμη που ασκείται μεταξύ τροχού και εδάφους αποτελεί το κύριο σήμα ανάδρασης του συστήματος ελέγχου (εξηγείται περαιτέρω στο κεφάλαιο 8. *Σύστημα ελέγχου και δεύτερο στάδιο πειραματισμού*). Για το λόγο αυτό, ολόκληρο το σύστημα της κάθε ρόδας τοποθετήθηκε επάνω σε ένα *load cell*. Δεν έπρεπε το σύστημα του τροχού να έρχεται σε κανένα άλλο σημείο σε επαφή με το σώμα του ρομπότ, διότι τότε θα αλλοιώνονταν τα δεδομένα του *load cell*. Οι τροχοί είναι τύπου *mechanism wheels* και αγοράστηκαν έτοιμοι από το εμπόριο. Επειδή ο άξονας του DC κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν συμβατός με τις υποδοχές των τροχών, σχεδιάστηκε ένα ενδιάμεσο σύστημα που να τα συνδέει. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η βάση που θα συνδέει τον κινητήρα με τον τροχό και θα τα τοποθετεί επάνω στο *load cell* (Εικόνα 42).

Στις πρώτες δοκιμές του ρομπότ, φάνηκε ότι κάποιες αποκλίσεις στις διαστάσεις (ατέλειες των εκτυπώσεων, παραμορφώσεις κ.α.) έκαναν κάποιους τροχούς να μην πεδίζουν καλά στο έδαφος, γεγονός που δημιουργούσε πρόβλημα στις μετρήσεις των αισθητήρων. Για να διορθωθεί αυτό, σχεδιάστηκε ένα καινούριο σύστημα, με λειτουργία τύπου αμορτισέρ. Στην ουσία πρόκειται για ένα μηχανισμό που τοποθετείται ανάμεσα στη βάση του τροχού και το *load cell* (Εικόνα 43). Η χρήση ελατηρίου στη στήριξη, βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό τη στήριξη και οι μετρήσεις από όλα τα *load cells* ήταν πολύ πιο κοντά στις αναμενόμενες.



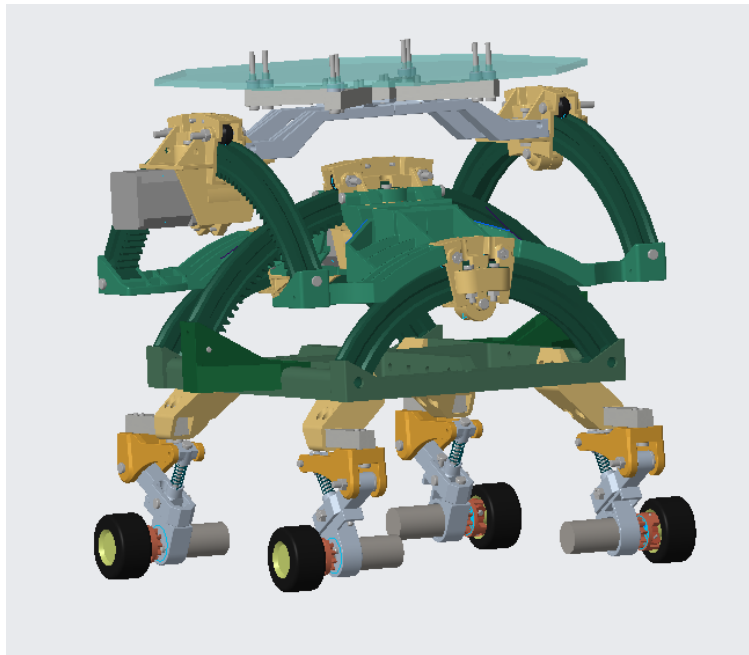
ΕΙΚΟΝΑ 42 :ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΧΟΥ – ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΕ LOAD CELL



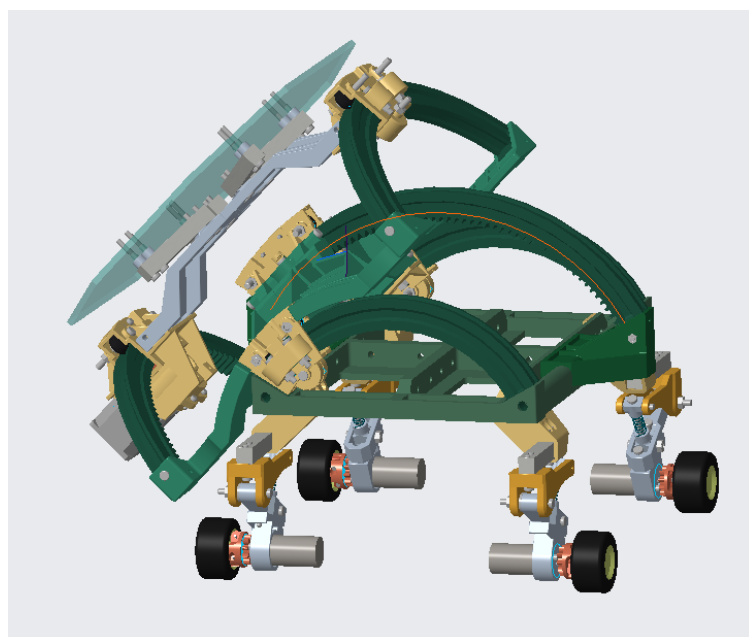
ΕΙΚΟΝΑ 43 :Η ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Α ΜΕ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ

6.2. ASSEMBLY

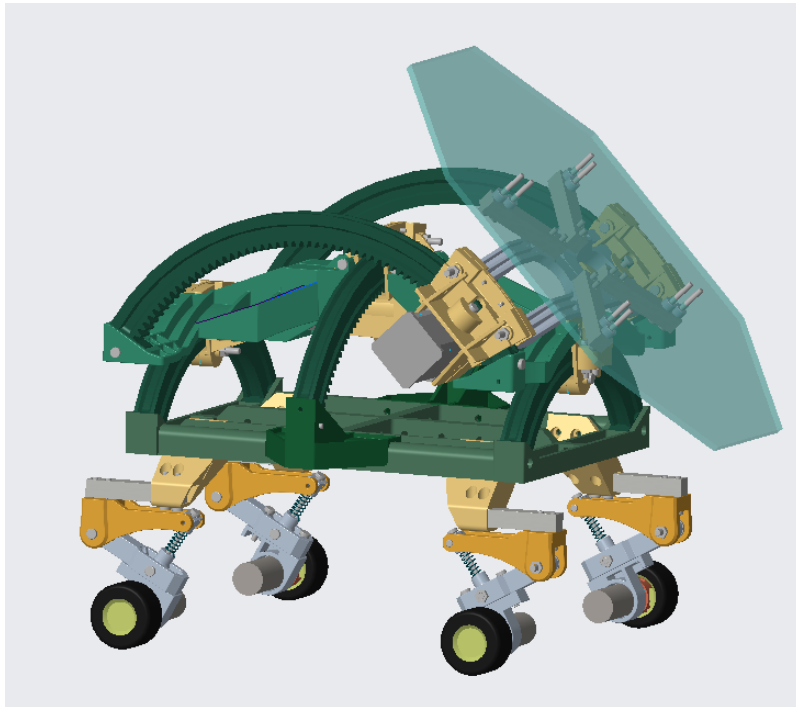
Ολοκληρώνοντας την κατασκευή, οι πλατφόρμες συνδέθηκαν ως κινούμενα μέρη με βάση το σύστημα των γραναζιών τους. Έτσι μετακινώντας τις πλατφόρμες, φαίνεται το εύρος κινήσεων που θα μπορεί το ρομπότ να εκτελεί όταν θα είναι πλήρως συναρμολογημένο. Στην Εικόνα 44 φαίνεται το ρομπότ στη φυσική του θέση. Στην Εικόνα 45 και στην Εικόνα 46, φαίνεται το ρομπότ με μετατοπισμένο το βάρος στον άξονα y και x αντίστοιχα. Στην Εικόνα 47 το σύστημα είναι μετατοπισμένο και στους δύο άξονες.



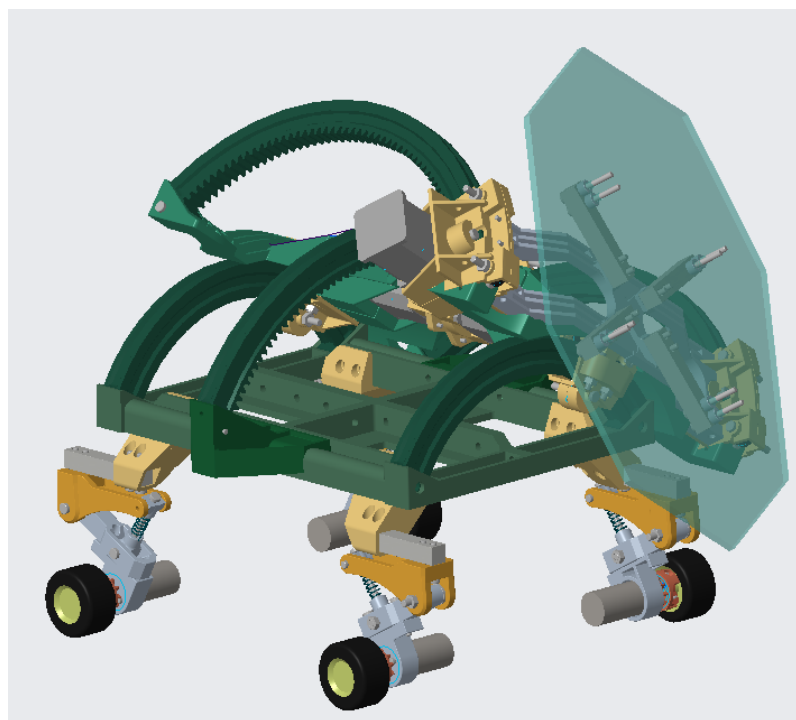
ΕΙΚΟΝΑ 44 :ΤΟ ΡΟΜΠΟΤ ΠΛΗΡΩΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΟ ΣΤΗΝ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΘΕΣΗ



ΕΙΚΟΝΑ 45 :ΤΟ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ y



ΕΙΚΟΝΑ 46 :ΤΟ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ



ΕΙΚΟΝΑ 47: ΤΟ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΔΥΟ ΑΞΟΝΕΣ

6.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

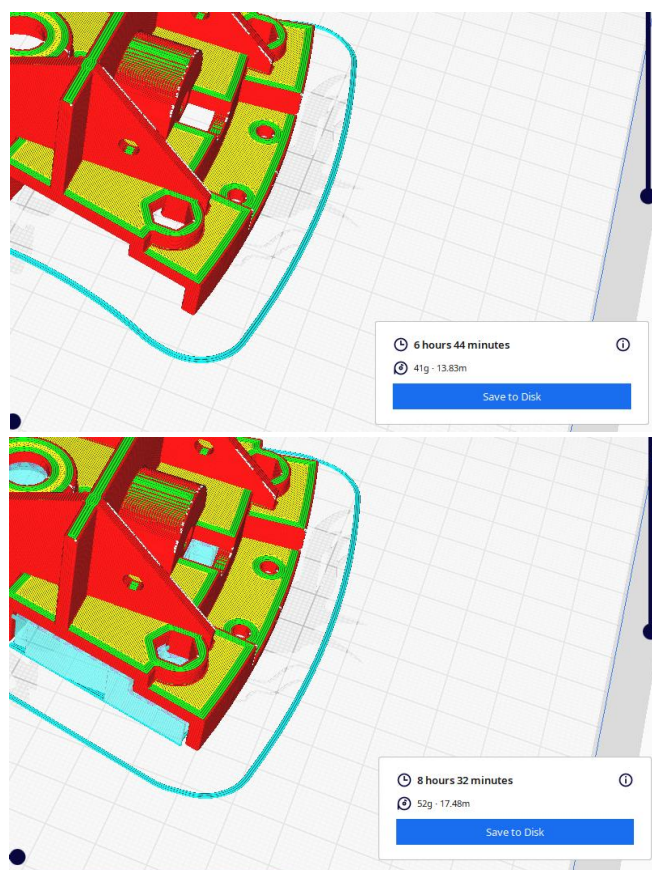
Η σχεδίαση του ρομπότ αναμενόταν να είναι δύσκολη, καθώς στο παρελθόν δεν είχε σχεδιαστεί ξανά τόσο περίπλοκος μηχανισμός. Η σχεδίαση όμως προχώρησε αρκετά βατά και δεν είχε ιδιαίτερα τεχνικά προβλήματα. Το αναπάντεχο πρόβλημα σε αυτό το κεφάλαιο ήταν οι πολλές αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν. Υπήρξαν πολλές περιπτώσεις που μικρές ατέλειες απαιτούσαν αλλαγές σε ένα εξάρτημα οι οποίες με την σειρά τους επηρέαζαν ολόκληρο το assembly. Συχνά ήταν τα μικρά λάθη, όπως π.χ. να παραλειφθούν οπές για βίδες ή να έχουν λάθος διάμετρο και άξονες να μην ευθυγραμμίζονται σωστά. Όλα τα προβλήματα τέτοιας φύσης διορθώθηκαν, χρειάστηκε όμως σημαντικά περισσότερος χρόνος από την αρχική πρόβλεψη. Αντιθέτως ένα στοιχείο που αποδείχθηκε πολύ χρήσιμο και εξοικονόμησε πολύ χρόνο, ήταν η παραμετρική σχεδίαση. Οι διαστάσεις τόσο μεταξύ των σωμάτων, όσο και ενός συγκεκριμένου σώματος, ήταν όσο γινόταν παραμετρικά συνδεδεμένες. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζοντας μια κεντρική διάσταση, αυτόματα άλλαζαν και όλες οι εξαρτημένες διαστάσεις, είτε στο ίδιο εξάρτημα είτε στο assembly. Σαν γενικό συμπέρασμα, η διαδικασία της σχεδίασης χρειάζεται προσοχή και αξίζει να αφιερωθεί αρκετός χρόνος, διότι ένα κακό ή βιαστικό σχέδιο, θα δημιουργήσει έντονα προβλήματα κατά την κατασκευή, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

7.1. 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ

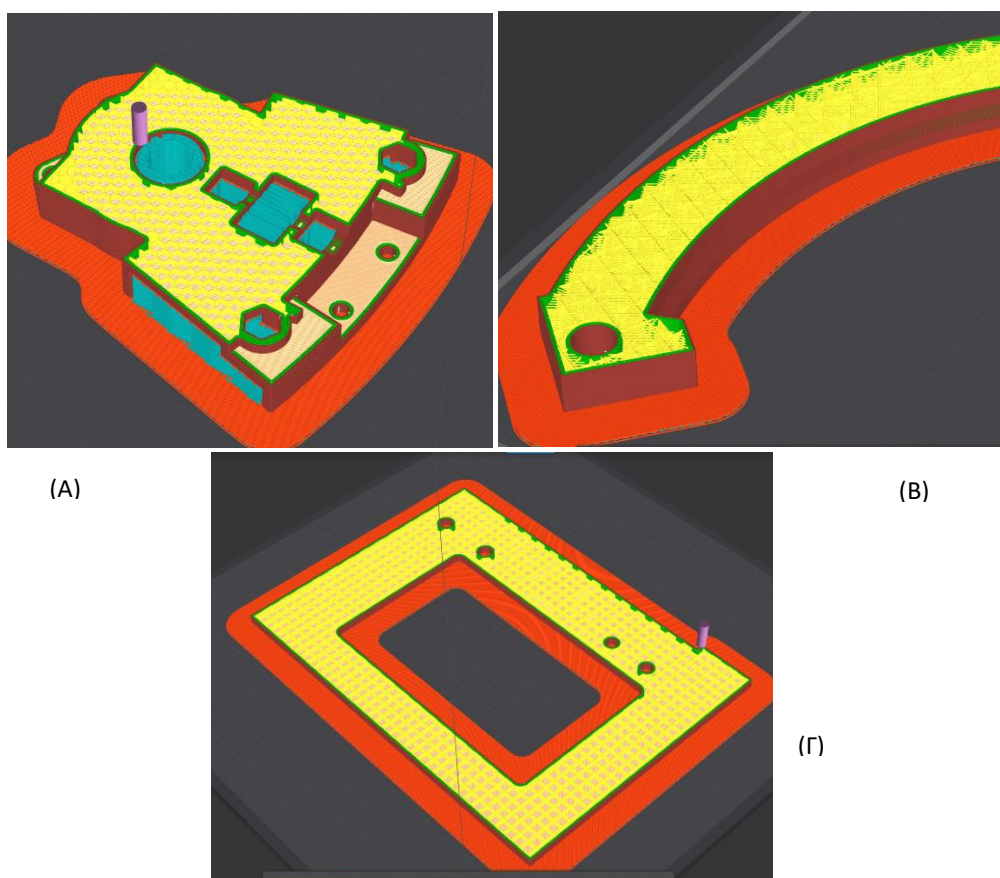
Μετά την ολοκλήρωση των σχεδίων, επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή του ρομπότ. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για την κατασκευή ήταν η 3D εκτύπωση, καθώς ήταν η πιο απλή και προσβάσιμη μέθοδος κατασκευής. Να σημειωθεί εδώ ότι η 3D εκτύπωση επιλέχθηκε από το ξεκίνημα της εργασίας και όχι στην διάρκεια. Αυτό παίζει ρόλο επειδή η προοπτική της εκτύπωσης επηρέασε τη σχεδίαση των εξαρτημάτων. Τα τοιχώματα για παράδειγμα, υπολογιζόταν από την αρχή ότι θα είναι από υλικό PLA, οπότε θα έπρεπε να είναι αρκετά πιο ενισχυμένα σε σχέση με το πώς θα ήταν αν ήταν κατασκευασμένα από άλλους τύπους πολυμερούς ή κάποιο μεταλλικό έλασμα.

Το μεγαλύτερο μέρος των εκτυπώσεων έγινε με εκτυπωτή Ender 3 Pro. Όλα τα εξαρτήματα εκτυπώθηκαν με πάχος επιπέδου 0.2mm σε ταχύτητες 30 – 50 mm/s. Όλα τα εξαρτήματα προς εκτύπωση είχαν από τη σχεδίαση μια επίπεδη επιφάνεια για να εκτυπωθούν σωστά, αλλά σε πολλές περιπτώσεις χρειάστηκαν επιπλέον ενισχύσεις, που αύξησαν κατά πολύ το χρόνο εκτύπωσης (Εικόνα 48). Για παράδειγμα, οι μηχανισμοί κύλισης χρειάζονταν υποστηρίγματα που αύξησαν τον χρόνο εκτύπωσης από περίπου έξι ώρες σε οκτώ. Η πιο χρονοβόρα εκτύπωση ήταν ο σκελετός της πλατφόρμας Β, που χρειάστηκε περίπου δεκαοκτώ ώρες εκτύπωσης.



ΕΙΚΟΝΑ 48 :ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΧΩΡΙΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΜΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ (ΚΑΤΩ)

Ανάλογα με τις φορτίσεις που θα δεχόταν το κάθε κομμάτι, προσαρμόστηκαν τα εσωτερικά μοτίβα και η πυκνότητα των εκτυπώσεων (Εικόνα 49). Τα μοτίβα που επιλέχθηκαν στις εκτυπώσεις είναι τρία: το τετράγωνο, το κυβικό και το εξάγωνο. Το τετράγωνο μοτίβο είναι το λιγότερο ανθεκτικό, αλλά εκτυπώνεται γρήγορα. Το εξάγωνο είναι το πιο ανθεκτικό και πιο χρονοβόρο. Το κυβικό έχει καλό χρόνο εκτύπωσης και καλή αντοχή σε φορτίσεις πολλών κατευθύνσεων. Η επιλογή του μοτίβου έγινε ανάλογα με τις προβλεπόμενες φορτίσεις που θα δεχόταν το εκάστοτε εξάρτημα. Το τετράγωνο μοτίβο ήταν προτιμότερο για μεγάλα και σταθερά εξαρτήματα όπως η πλατφόρμα Α. Το εξάγωνο μοτίβο ήταν κατάλληλο για εξαρτήματα που έπρεπε να έχουν καλή αντοχή αναλογικά με τον όγκο τους, όπως οι μηχανισμοί κύλισης. Τέλος το κυβικό μοτίβο κρίθηκε καταλληλότερο για εξαρτήματα μεγάλα και με περίπλοκες λειτουργίες όπως οι ράγες και η πλατφόρμα Β.



ΕΙΚΟΝΑ 49 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ: (Α) ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ ΜΟΤΙΒΟ ΜΕ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 13% -(Β) ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΡΑΓΑΣ ΜΕ ΚΥΒΙΚΟ ΜΟΤΙΒΟ ΜΕ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 20% - (Γ) ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ Α ΜΕ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΜΟΤΙΒΟ ΜΕ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 40%.

Το υλικό της εκτύπωσης ήταν το PLA. Το ιδανικότερο θα ήταν οι εκτυπώσεις να γίνουν με PETG ή ABS, καθώς θεωρούνται καλύτερα υλικά για μηχανικές κατασκευές, λόγω της ελαστικότητάς τους και της αντοχής τους σε κρούσεις. Δυστυχώς όμως ο εκτυπωτής που ήταν στην διάθεση της εργασίας δεν είχε δυνατότητες να εκτυπώνει υλικά τόσο μεγάλων θερμοκρασιών, επομένως οι εκτυπώσεις έγιναν με PLA και δόθηκε περισσότερη προσοχή κατά τη σχεδίαση, ώστε να ενισχυθούν τα κομμάτια που θα φορτίζονται περισσότερο. Εξάιρεση αποτέλεσαν τα μεγάλα γρανάζια και η μεγάλη υποστηρικτική ράγα, τα οποία έγιναν παραγγελία από κατάστημα και υπήρχε δυνατότητα να εκτυπωθούν και με διαφορετικά υλικά. Γι' αυτό τα τρία αυτά κομμάτια εκτυπώθηκαν με PETG.

Κατά τη διάρκεια των εκτυπώσεων, υπήρξε πληθώρα αναπάντεχων προβλημάτων. Πρώτον, λόγω του μεγάλου αριθμού των συνεχόμενων εκτυπώσεων, ο εκτυπωτής ξεκίνησε να εξωθεί λιγότερο υλικό από το προβλεπόμενο. Αυτό είχε συνέπειες στην ανθεκτικότητα των κομματιών, αφού έμεναν «κενά» στην κατασκευή (Εικόνα 50), ή σε άλλες περιπτώσεις οδήγησε σε απολύτως αποτυχημένη εκτύπωση (Εικόνα 51). Ένα άλλο συχνό πρόβλημα, στα αρχικά στάδια της εργασίας, αφορούσε τα κομμάτια που έπρεπε να συνδέονται και να εφαρμόζουν μεταξύ τους. Η εκτύπωση πάντα έχει μια μικρή απόκλιση στο πλάτος της, που μπορεί να κυμαίνεται από 0.2mm – 0.5mm. Αυτή η απόκλιση πρέπει να έχει ληφθεί υπόψιν κατά τη σχεδίαση του αντικειμένου. Δυστυχώς υπήρξαν εκτυπώσεις που τελικά απέτυχαν λόγω κακού υπολογισμού αυτής της απόκλισης. Τέλος, υπήρξαν ακόμα και περιπτώσεις όπου ένα κομμάτι εκτυπώθηκε κανονικά, αλλά τελικά δεν δούλεψε όπως προβλεπόταν από την θεωρία. Με βάση την εκτύπωση έγιναν βελτιώσεις και διορθώσεις στο σχέδιο και η εκτύπωση επαναλήφθηκε. Σχεδόν όλα τα κομμάτια του ρομπότ εκτυπώθηκαν πάνω από μία φορά, λόγω κάποιου από τα προαναφερθέντα προβλήματα, πράγμα που προκάλεσε μεγάλες καθυστερήσεις στην πρόοδο της εργασίας.



ΕΙΚΟΝΑ 50 :ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΚΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ.



ΕΙΚΟΝΑ 51: ΑΠΟΤΥΧΗΜΕΝΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΛΟΓΩ ΦΡΑΓΗΣ ΤΟΥ ΕΚΤΥΠΩΤΗ

Αφού ολοκληρώθηκαν οι εκτυπώσεις, τοποθετήθηκαν ένθετα σπειρώματα όπου χρειαζόταν, για να βιδωθούν τα κομμάτια μεταξύ τους και το σύστημα συναρμολογήθηκε. Οι βίδες που προτιμήθηκαν ήταν διαμέτρου 3mm και 4mm, αλλά κατ' εξαίρεση χρησιμοποιήθηκαν και 5mm. Σε αρκετές περιπτώσεις χρειάστηκε να μεγεθυνθούν ή να ανοίξουν καινούριες σπές με τρυπάνι, για να σταθεροποιηθούν τα κομμάτια καλύτερα.

Θεωρητικά ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να τυπωθεί το ρομπότ, είναι περίπου μια βδομάδα, αν θεωρηθεί ότι οι εκτυπώσεις διαρκούν όλη μέρα και γίνονται συνεχόμενα, χωρίς να υπάρξει καμιά αποτυχημένη προσπάθεια. Στην πράξη όμως, υπήρξαν πολλές απρόοπτες καθυστερήσεις, όπως αποτυχημένες εκτυπώσεις, επιδιορθώσεις του εκτυπωτή και επανασχεδιασμός εξαρτημάτων, αύξησαν κατά πολύ την διάρκεια. Επιπλέον δεν ήταν πάντα δυνατή η συνεχής αδιάλειπτη εκτύπωση. Ως αποτέλεσμα, η διάρκεια κατασκευής των τμημάτων του ρομπότ ξεπέρασε τον ένα μήνα. Τα δύο μεγάλα γρανάζια και η μεγάλη υποστηρικτική ράγα, έγιναν κατ' εξαίρεση παραγγελία από εξειδικευμένο κατάστημα, επειδή δεν χωράνε στην επιφάνεια του Ender 3 Pro και δεν θεωρήθηκε σωστό να σπάσουν σε μικρότερα κομμάτια.

Το κόστος των εκτυπώσεων κυμαίνεται περίπου στα 75-85€. Για την εκτύπωση της κατασκευής ξοδεύτηκαν περίπου 1.5kg υλικό, χωρίς να υπολογίζονται οι αποτυχημένες εκτυπώσεις. Συνολικά μαζί με τις αποτυχίες, ξοδεύτηκε 2.5-3kg υλικό, το οποίο σημαίνει υλικό αξίας 50-60€. Επιπροσθέτως, ξοδεύτηκαν άλλα 25€ στην παραγγελία των εξαρτημάτων που δεν μπορούσαν να εκτυπωθούν με άλλο τρόπο.

7.2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στους ελεύθερους χώρους της πλατφόρμας Α. Δεν τοποθετήθηκαν ηλεκτρονικά επάνω στις κινούμενες πλατφόρμες λόγω φόβου για πιθανές βλάβες και για να μην υπάρχουν πολλά ελεύθερα καλώδια γύρω από τα κινούμενα σημεία (Εικόνα 52). Εξαίρεση προφανώς αποτελούν οι κινητήρες και τα limit switches, που η δουλειά για την οποία χρειάζονται είναι σε συγκεκριμένες θέσεις. Για την καλωδίωση χρησιμοποιήθηκαν καλώδια 0.25mm για τα ψηφιακά σήματα και 0.5mm για την τροφοδοσία. Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια.

7.2.1. ΚΙΝΗΣΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ

Για την κίνηση των πλατφορμών στους άξονές τους, χρειάζονταν κινητήρες που να έχουν ροπή αρκετή να σηκώσουν το απαιτούμενο βάρος, αλλά να έχουν και μια ακρίβεια ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η θέση τους. Για τον λόγο αυτό η προτιμότερη επιλογή, ήταν να χρησιμοποιηθούν βηματικοί κινητήρες (steppers). Για τις ανάγκες και τις διαστάσεις της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τρεις κινητήρες τύπου NEMA 17. Ένας κινητήρας με βηματισμό 0.9° τοποθετήθηκε στην πλατφόρμα Γ (άξονας x) και δύο κινητήρες βηματισμού 1.8° τοποθετήθηκαν στην πλατφόρμα Β (άξονας y). Για τον έλεγχο των κινητήρων χρησιμοποιήθηκαν δύο οδηγοί TB6600. Το κόστος των κινητήρων στο εμπόριο είναι 12€-16€ ο καθένας και των οδηγών ~10€ ο καθένας.

7.2.2. ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Για την κίνηση στο έδαφος δεν χρειαζόταν να διαβάζεται γωνία περιστροφής, επομένως ένας απλός DC κινητήρας είναι αρκετός. Η ανάγκη που υπήρχε σε αυτό το στάδιο ήταν να έχουμε ταυτόχρονα μια μέτρια ταχύτητα περιστροφής, αλλά με μεγάλη ροπή ώστε να μπορεί να μετακινήσει όλο το βάρος του ρομπότ. Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι κινητήρες τάσης 12V ,

γωνιακής ταχύτητας 100rpm και στατικής ροπής 9 kg/cm. Για τον έλεγχο τους χρησιμοποιήθηκαν δύο οδηγοί L298N. Ο κάθε κινητήρας τέτοιου τύπου συνήθως κοστίζει 8€-15€. Οι συγκεκριμένοι που χρησιμοποιήθηκαν κόστιζαν 9,5€ και οι οδηγοί 4€ ο καθένας.

7.2.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Για τη μέτρηση των δυνάμεων που απαιτούνται κατά την ανάδραση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν απλά load cells μέγιστου βάρους 20kg. Για τη μέτρηση δεδομένων από τους αισθητήρες αυτούς χρησιμοποιήθηκαν πλακέτες HX711. Το κόστος των load cells είναι 5€ το καθένα και η πλακέτα 1,8€ η κάθε μια.

7.2.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ/ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

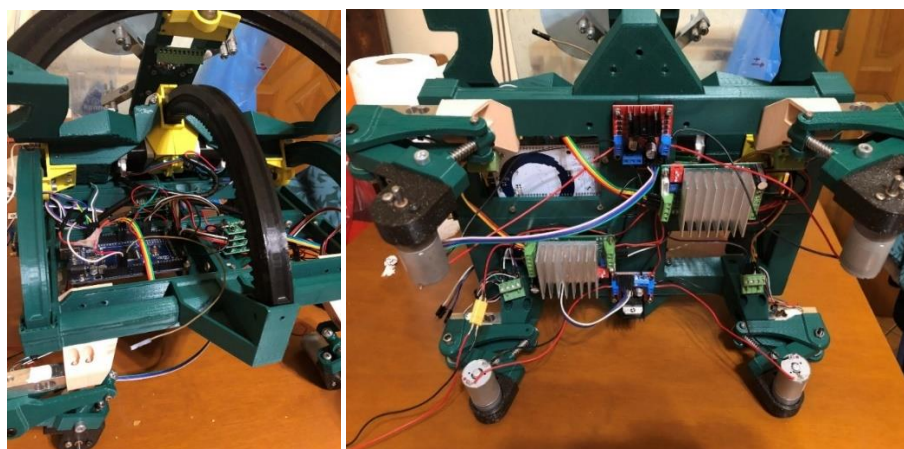
Για τη μέτρηση της περιστροφικής και γραμμικής κίνησης, χρησιμοποιήθηκε ένα γυροσκόπιο / επιταχυνσιόμετρο 6 βαθμών ελευθερίας, μοντέλο MPU6050, το οποίο κοστίζει 3,5€ - 4€.

7.2.5. ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ

Για την λειτουργία ολόκληρου του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ένα Arduino Mega 2560. Η πλατφόρμα του Arduino είναι αρκετά απλή στον προγραμματισμό και στη διεπαφή, αλλά για εξελιγμένα συστήματα έχει περιορισμένες δυνατότητες. Στη συγκεκριμένη εργασία, παρόλο που υπάρχουν πολλά συστήματα που δουλεύουν ταυτόχρονα, δεν γινόταν κάποιος υπολογισμός τόσο μεγάλος και δύσκολος, ώστε να χρειάζεται μια καλύτερη πλατφόρμα όπως το Raspberry Pi, που θα ήταν αρκετά πιο αξιόπιστο, αλλά θα ανέβαζε το κόστος. Ένα αυθεντικό Arduino mega στο εμπόριο κοστίζει ~50€.

7.2.6. ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ

Για να γίνει η συνδεσμολογία όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, χρησιμοποιήθηκαν είτε καλώδια πρωτοτυποποίησης, αρσενικά και θηλυκά, είτε καλώδια 0.5mm, κομμένα στο χέρι. Έγινε προσπάθεια τα καλώδια να μην ξεπερνάνε το απαραίτητο μήκος, ώστε να μην υπάρχει καμιά επιπλοκή στα κινούμενα μέρη του ρομπότ, αλλά και τα καλώδια μεταξύ τους να είναι οργανωμένα. Στα καλώδια που συνδέονταν με τις κινούμενες πλατφόρμες, χρησιμοποιήθηκε και σπείρωμα καλωδίων, για να αποφευχθούν επαφές με τα γρανάζια.



ΕΙΚΟΝΑ 52 :Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ Α

7.3. ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Μόλις το ρομπότ κατασκευάστηκε, έγιναν τα αρχικά πειράματα, για να διαπιστωθεί εάν οι λειτουργίες του ρομπότ γινόντουσαν σωστά όπως προβλεπόταν. Τα πειράματα αυτά δεν περιείχαν το σύστημα ελέγχου που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, αλλά γίνονταν με απλούς κώδικες για το κάθε εξάρτημα ξεχωριστά. Σκοπός ήταν όλα τα εξαρτήματα να λειτουργούν κανονικά, για να γίνουν ότι διορθώσεις χρειάζονταν στην κατασκευή πριν λειτουργήσει το σύστημα ελέγχου. Κατά τις δοκιμές αυτές, έγιναν διάφορες παρατηρήσεις αναπάντεχων προβλημάτων. Κάποια από αυτά ήταν εφικτό να διορθωθούν, όπως κακές συνδέσεις στα καλώδια, ελαφρά βιδωμένα εξαρτήματα ή μεγέθυνση σπών. Μια σημαντική παρατήρηση, ήταν ότι σε κάποιες περιπτώσεις δεν πατούσαν όλοι οι τροχοί στο έδαφος, με αποτέλεσμα τα load cells να μην παίρνουν σωστές τιμές. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, σχεδιάστηκαν οι βάσεις των τροχών με ανάρτηση, που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 6.1.4. Σύστημα τροχών.

Κατά τις αρχικές δοκιμές της κατασκευής, εντοπίστηκαν και προβλήματα που δυστυχώς δεν μπορούσαν να διορθωθούν άμεσα, λόγω μη διαθέσιμου χρόνου και πόρων. Παρόλα αυτά οι παρατηρήσεις καταγράφηκαν και προτείνονται κάποιες βελτιώσεις και διορθώσεις, σαν ιδέες για μελλοντικά σχέδια. Παρακάτω παρατίθενται αυτές οι προτεινόμενες αλλαγές, που θα υλοποιούνταν σε μια μελλοντική έκδοση του σχεδίου :

- Το σύστημα των τροχών με τις αναρτήσεις θα γινόταν πιο χαμηλό. Το ρομπότ είχε σχεδιαστεί ολόκληρο χωρίς το σύστημα των αναρτήσεων και το ύψος ήταν στο χαμηλότερο σημείο που δεν εμπόδιζε την κίνηση. Το χαμηλό ύψος των τροχών επηρέασε ακόμα και το σχέδιο της πλατφόρμας B, που σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μην χτυπάει με τους τροχούς σε ακραίες κλίσεις. Η ανάγκη να προστεθούν αναρτήσεις προέκυψε αργότερα, κατά τις πρώτες δοκιμές, όταν ολόκληρο το ρομπότ είχε κατασκευαστεί. Στα χρονικά πλαίσια αυτής της εργασίας, ήταν αδύνατον να γίνουν καινούρια σχέδια των πλατφορμών A και B και ειδικά καινούριες εκτυπώσεις. Επομένως, ο νέος μηχανισμός σχεδιάστηκε για να βιδωθεί επάνω στα παλιά κομμάτια της πλατφόρμας A. Αυτό αναπόφευκτα αύξησε το ύψος του ρομπότ πέραν του επιθυμητού. Εάν γίνονταν τα σχέδια από την αρχή, θα έπρεπε η πλατφόρμα A να σχεδιαστεί εξαρχής, με ότι αλλαγές αυτό συνεπάγεται και για το υπόλοιπο ρομπότ.
- Ένα ακόμα πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν ότι οι τροχοί με τους DC κινητήρες αποκτούσαν μια ανεπιθύμητη κλίση εσωτερικά. Σε μια μελλοντική διόρθωση, χρειάζεται μια πιο στιβαρή κατασκευή του συστήματος των τροχών για να αποφεύγονται ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και κάμψεις.
- Όταν σχεδιαζόταν το ρομπότ, δεν ήταν ακόμα σίγουρο ποια ακριβώς ηλεκτρονικά εξαρτήματα θα χρειαστούν. Συνεπώς η πλατφόρμα A σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει χώρους και βάσεις στήριξης στις οποίες να γίνουν χειροκίνητα μελλοντικές τρύπες και να τοποθετηθούν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα. Αυτό έγινε αναγκαστικά λόγω πίεσης χρόνου και οδήγησε σε μια περίπλοκη σύνδεση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και των καλωδίων. Σε περίπτωση που θα μπορούσαν τα σχέδια να γίνουν από την αρχή, θα σχεδιάζόντουσαν με ακρίβεια πιο σωστές και συγκεκριμένες θέσεις για την ακριβή εφαρμογή του κάθε εξαρτήματος, ώστε να είναι πιο εύκολη η πρόσβαση στα ηλεκτρονικά, να γίνει καλύτερη οικονομία χώρου και να κρατηθούν τα καλώδια οργανωμένα.

- Οι πλατφόρμες Β και Γ σχεδιάστηκαν για να εκτελούν τις απαραίτητες κινήσεις χωρίς να πιάνουν περιττό χώρο. Παρ' όλα αυτά παρατηρούνται αρκετοί κενοί χώροι ανάμεσα στα κομμάτια του ρομπότ. Σε περίπτωση που γινόντουσαν τα σχέδια από την αρχή, θα μπορούσε να μελετηθεί μια πιθανή σχεδίαση όπου ο κενός χώρος θα είναι ακόμα λιγότερος, με στόχο να μειωθεί περισσότερο το ύψος.
- Τα μικρά γρανάζια χρειάστηκε να κολληθούν στους κινητήρες για να μην χάνουν βήματα λόγω παραμορφώσεων. Μελλοντικά καλό θα ήταν τα γρανάζια να είναι μεταλλικά αντί για πλαστικά ώστε να αποφεύγονται μόνιμες συγκολλήσεις.
- Τελευταία παρατήρηση είναι ότι όταν οι steppers βρισκότουσαν σε ακραία σημεία δυσκολεύονταν να κινηθούν. Μελετώντας περαιτέρω, παρατηρήθηκε ότι σε κάποια σημεία σε συγκεκριμένες κλίσεις, τα v-wheels δεν είχαν καλή επαφή με τις ράγες. Στα σχέδια δεν φαίνεται σε κανένα σημείο τέτοια ατέλεια, επομένως η διαφορά αυτή στις διαστάσεις μάλλον οφείλεται σε ατέλειες της κατασκευής. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, σε μελλοντικά σχέδια θα γίνονταν δύο αλλαγές. Πρώτον, διορθώσεις στις αποστάσεις των v-wheels, ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι εφαρμόζουν σωστά σε κάθε σημείο των ραγών. Δεύτερον, οι μηχανισμοί κύλισης θα προσαρμόζονταν, ώστε να λειτουργούν με κινητήρα τύπου NEMA 23, που έχει ελαφρώς μεγαλύτερες διαστάσεις και βάρος, αλλά σημαντικά μεγαλύτερη ροπή, σε σχέση με τους κινητήρες τύπου NEMA 17 που χρησιμοποιούνται τώρα.

7.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Κατά την διάρκεια όλης της κατασκευής έγιναν πολλές παρατηρήσεις, από τις οποίες αποκτήθηκαν εμπειρίες σχετικά με το πώς κατασκευάζεται ένα περίπλοκο σύστημα μηχανισμών. Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου είναι ποικίλα και σχετίζονται τόσο με την σχεδίαση όσο και με την κατασκευή αυτή καθ' αυτή:

- Η 3D εκτύπωση δεν είναι ιδανική για όλα τα αντικείμενα. Κομμάτια όπως ο κορμός της πλατφόρμας A, ίσως είναι πιο κατάλληλα για κατασκευή με φρέζα. Από την άλλη, κομμάτια όπως οι μηχανισμοί κύλισης, θα ήταν πιο δύσκολο να κατασκευαστούν με κάποια μέθοδο αφαίρεσης υλικού, λόγω των πολλών διαφορετικών εσοχών τους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν υπήρχε άλλο διαθέσιμο μηχάνημα πέρα από τον 3D εκτυπωτή, οπότε ήταν δεδομένο ότι όλα τα κομμάτια θα κατασκευαστούν έτσι, αλλά ήταν χρήσιμη εμπειρία να δοκιμαστούν τα όρια της προσθετικής κατασκευής και να παρατηρηθεί σε ποια σημεία συμφέρει σαν μέθοδος και σε ποια όχι.
- Η 3D εκτύπωση χρειάζεται προσοχή στις ρυθμίσεις ανάλογα με το αντικείμενο που εκτυπώνεται. Ρυθμίσεις όπως η πυκνότητα, το μοτίβο του εσωτερικού χώρου ή το πάχος του τοιχώματος, μπορούν να αλλάξουν ριζικά το αντικείμενο και αν είναι επιλεγμένες σωστά, μπορούν να δώσουν καλό, γρήγορο και οικονομικό αποτέλεσμα.
- Χρειάζεται πάντα κατά την σχεδίαση να υπολογίζεται και η ελαστική παραμόρφωση που μπορεί να έχουν κάποια κομμάτια υπό φόρτιση. Ανάλογα με τη λειτουργία και τη δομή του εξαρτήματος, μια κάμψη ή μια στρέψη μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στη λειτουργία. Οι σωστές αποστάσεις ανάμεσα στα εξαρτήματα είναι σημαντικές.
- Το συνολικό κόστος που χρειάζεται για να κατασκευαστεί αυτό το ρομπότ από την αρχή, υπολογίζεται περίπου 260€ - 270€, με την προϋπόθεση ότι δεν θα υπάρχει σπατάλη υλικού κατά τις εκτυπώσεις, άρα θα αρκούν δύο κιλά υλικό και ότι όλα τα ηλεκτρονικά θα αγοραστούν από την αρχή. Στην συγκεκριμένη εργασία το κόστος των εκτυπώσεων ήταν περίπου το διπλάσιο, αφού με τους πειραματισμούς και τις κακές εκτυπώσεις χρησιμοποιήθηκε πολύ περισσότερο υλικό. Από την άλλη, πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα ήταν ήδη διαθέσιμα, επομένως εξοικονομήθηκαν αρκετά χρήματα. Υπολογίζεται ότι για την συγκεκριμένη εργασία ξοδεύτηκαν περίπου 210€.

Στην περίπτωση που κατασκευαστεί στο μέλλον μια νέα εκδοχή του ρομπότ, οι παραπάνω παρατηρήσεις θα είναι χρήσιμες, τόσο για τη σχεδίαση όσο και για την κατασκευή. Με βάση τις νέες εμπειρίες θα μπορούν οι μηχανισμοί του συστήματος να βελτιστοποιηθούν και η λειτουργία να γίνει πιο αξιόπιστη, καθώς και να μειωθούν κατά πολύ ο χρόνος και ο κόπος που θα χρειαστεί η κατασκευή.

8. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΥ

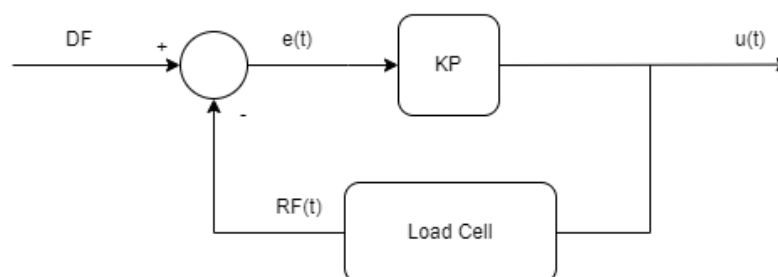
Τώρα που η σχεδίαση του ρομπότ έχει ολοκληρωθεί και υπάρχει ένα λειτουργικό πρωτότυπο, ήρθε η ώρα να φτιαχτεί και να δοκιμαστεί το σύστημα ελέγχου, που θα υπολογίζει και θα δίνει τις κατάλληλες εντολές στους κινητήρες. Για να παρθούν κατάλληλες τιμές στο σύστημα, θα πρέπει να ρυθμιστούν σωστά οι ελεγκτές.

Σε πρώτο στάδιο θα σχεδιαστεί ένα σύστημα ελέγχου με τα απολύτως απαραίτητα εξαρτήματα, θα γίνουν πειράματα που θα καταγραφούν σε διαγράμματα και θα γίνουν διορθώσεις ώστε να έχουμε ένα σύστημα με ικανοποιητική απόκριση. Σε δεύτερο στάδιο, θα αναλυθούν θεωρητικές ιδέες ελέγχου, που δεν εξετάστηκαν πειραματικά στη διάρκεια αυτής της εργασίας, αλλά είναι ιδέες για μελλοντικές βελτιώσεις του συστήματος.

8.1. Ρ ΕΛΕΓΧΟΣ

Στόχος του συστήματος είναι το ρομπότ να έχει την καλύτερη δυνατή πέδηση στο έδαφος. Αυτό συνεπάγεται οι τέσσερις τροχοί να πατάνε συνεχώς όλοι στο έδαφος και να μοιράζονται το βάρος με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Είναι προφανές λοιπόν ότι το κύριο σήμα ανάδρασης που χρειάζεται να παρέχεται, είναι οι τιμές των *load cells*. Στην επιθυμητή κατάσταση του συστήματος, όλα τα *load cells* διαβάζουν την ίδια δύναμη, η οποία θα πρέπει να είναι ίση με το ένα τέταρτο του συνολικού βάρους του ρομπότ με το φορτίο.

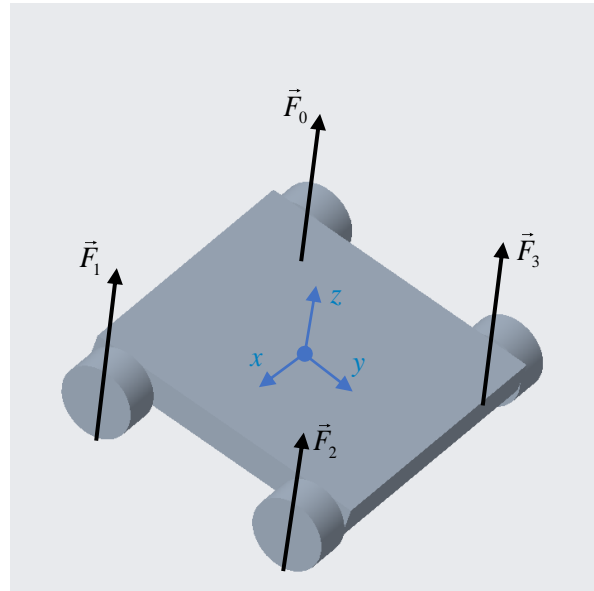
Όπως φαίνεται από τη σχεδίαση, μπορούμε να επηρεάσουμε το βάρος προς δύο κατευθύνσεις, τους άξονες x και y . Βλέπουμε ότι και στους δύο άξονες, οι δυνάμεις είναι χωρισμένες σε ζευγάρια: δύο δυνάμεις δημιουργούν θετική και δύο αρνητική ροπή (Εικόνα 54). Για την περιστροφή ως προς τον x άξονα, οι δυνάμεις που δημιουργούν θετική ροπή είναι οι δυνάμεις F_2 και F_3 και αρνητική οι F_0 και F_1 . Αντίστοιχα στον άξονα y , οι δυνάμεις που δημιουργούν θετική ροπή είναι οι δυνάμεις F_0 και F_3 και αρνητική οι F_1 και F_2 . Καταλαβαίνουμε ότι αν κινήσουμε την εκάστοτε πλατφόρμα κατά μήκος του άξονα x ή y , η δύναμη που ασκείται στο ένα ζευγάρι θα μειωθεί και θα αυξηθεί στο άλλο. Όταν το σύστημα φθάσει σε μια ακραία θέση όπου η δύναμη που ασκείται στο ένα ζευγάρι γίνει 0, σημαίνει ότι το ρομπότ αρχίζει να αποκολλάται από το έδαφος. Με βάση την παραπάνω ιδέα, σχεδιάστηκε ένα σύστημα P ελεγκτή με ανάδραση (Εικόνα 53).



ΕΙΚΟΝΑ 53 :ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ Ρ ΕΛΕΓΚΤΗ

Όπου:

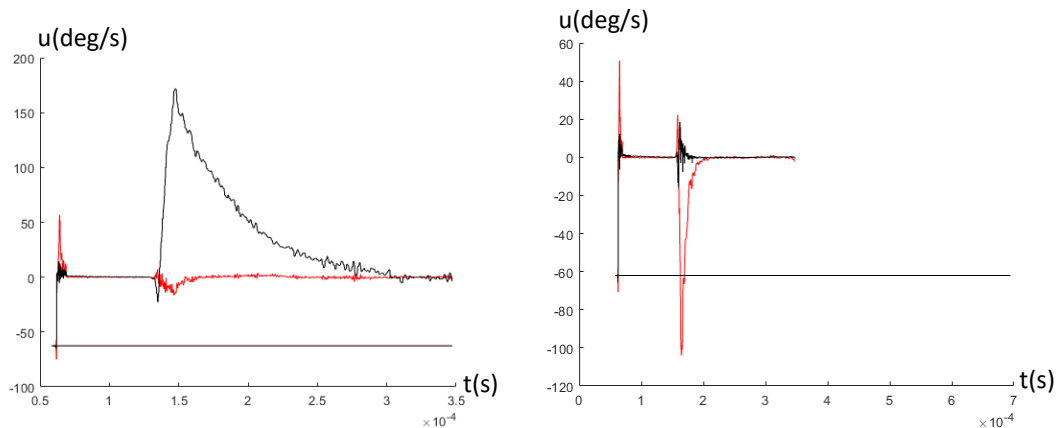
$$u_{(t)} = \begin{bmatrix} u_{x(t)} \\ u_{y(t)} \end{bmatrix}, DF = \begin{bmatrix} \Sigma F_{[0,3]} / 4 \\ \Sigma F_{[0,3]} / 4 \\ \Sigma F_{[0,3]} / 4 \\ \Sigma F_{[0,3]} / 4 \end{bmatrix}, RF = \begin{bmatrix} F_{[0]} \\ F_{[1]} \\ F_{[2]} \\ F_{[3]} \end{bmatrix}, KP = \begin{bmatrix} P & P & -P & -P \\ -P & P & P & -P \end{bmatrix}$$



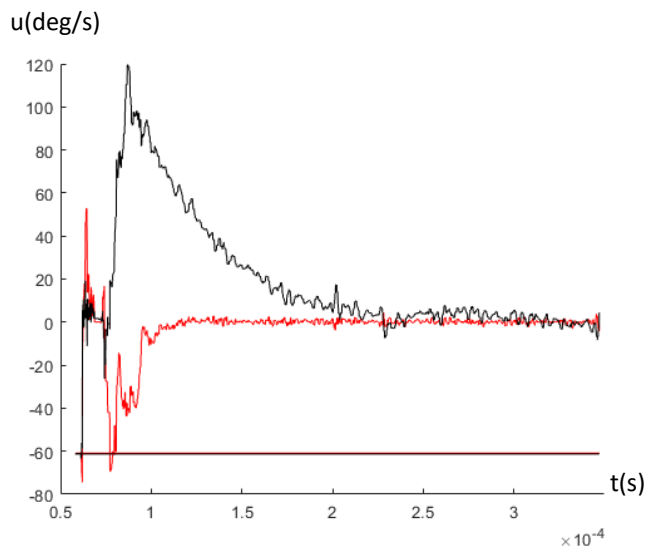
ΕΙΚΟΝΑ 54 : ΟΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ

Ο ελεγκτής KP είναι ένας πίνακας 2x4, διότι πρέπει να πολλαπλασιάζεται με ένα διάνυσμα τεσσάρων γραμμών (τέσσερις δυνάμεις) και να δίνει σαν αποτέλεσμα ένα διάνυσμα δύο γραμμών (δύο κινητήρες). Η τιμή P είναι ο τελεστής που θα τον προσεγγίσουμε στην συνέχεια. Τα πρόσημα μέσα στον πίνακα είναι έτσι τοποθετημένα ώστε να δημιουργούν τις διαφορές των ζευγών που προαναφέρθηκαν, με βάση τις οποίες γίνεται ο έλεγχος.

Οι πρώτες δοκιμές έγιναν με P=50, ώστε να φαίνονται καθαρά οι διαφορές των δυνάμεων στους δύο άξονες. Στα διαγράμματα φαίνονται με κόκκινο χρώμα η απόκριση $u_x(t)$ και με μαύρο χρώμα η απόκριση $u_y(t)$, στο διάγραμμα του χρόνου.

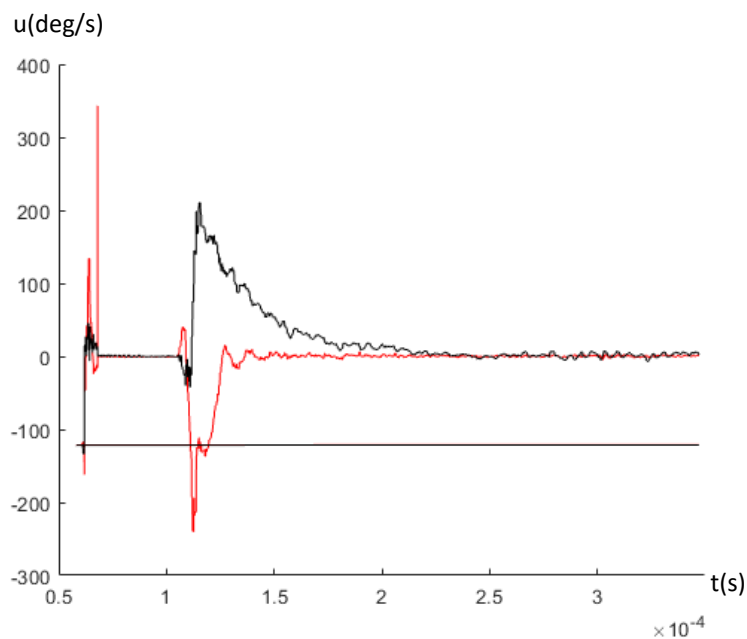


ΕΙΚΟΝΑ 55: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΞΟΝΑ ΣΕ ΓΩΝΙΑ ~30° ΤΗΝ ΚΑΘΕ ΦΟΡΑ



ΕΙΚΟΝΑ 56 : ΔΟΚΙΜΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΓΩΝΙΕΣ $\sim 30^\circ$ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΔΥΟ ΑΞΟΝΕΣ ΜΕ $P=50$

Τα πρώτα πειράματα έγιναν δίνοντας κλίση στο έδαφος μόνο προς τη μία κατεύθυνση κάθε φορά (Εικόνα 55). Παρατηρήθηκε ότι η πλατφόρμα Β (άξονας y) είχε πιο αργή απόκριση σε σχέση με την Γ (άξονας x). Μόλις δοκιμάστηκε να λειτουργήσουν και οι δύο άξονες μαζί, επιβεβαιώθηκε ότι η απόκριση στον άξονα x είναι πιο γρήγορη, αλλά δεχόταν μεγαλύτερες ταλαντώσεις. Η απόκριση στον άξονα y ήταν πολύ αργή για να ισορροπεί το σύστημα με ασφάλεια. Στο επόμενο πείραμα η τιμή του P έγινε $P=100$. Στο δεύτερο πείραμα (Εικόνα 57), η απόκριση στον άξονα y ήταν αρκετά καλύτερη και ο άξονας x ήταν και πάλι πιο γρήγορος, αλλά εξακολουθούσε να υπάρχει αρκετή ανεπιθύμητη ταλάντωση.



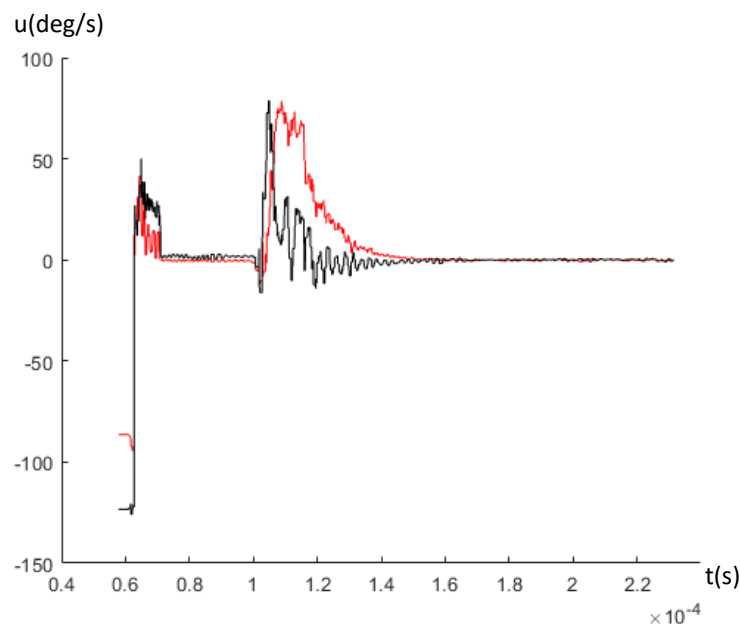
ΕΙΚΟΝΑ 57: ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ ΓΩΝΙΑ 40° ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΔΥΟ ΑΞΟΝΕΣ ΜΕ $P=100$

Ο λόγος που η απόκριση στον άξονα x έχει περισσότερη ταλάντωση, οφείλεται όχι σε θέμα προγραμματισμού, αλλά κατασκευής. Η πλατφόρμα κίνησης στον x είναι πιο ελαφριά, επομένως είναι ευκολότερο να αποκτήσει επιτάχυνση. Μια πιθανή λύση που δοκιμάστηκε ήταν να προστεθεί επιπλέον βάρος στην πλατφόρμα Γ. Επίσης, θεωρήθηκε σωστό να αλλάξουν οι τιμές του ελεγκτή, άρα οι άξονες x και y να έχουν άλλον τελεστή με αποτέλεσμα ο ελεγκτής να ρυθμιστεί καλύτερα. Ο νέος ελεγκτής, επομένως, είναι:

$$KP = \begin{bmatrix} P_x & P_x & -P_x & -P_x \\ -P_y & P_y & P_y & -P_y \end{bmatrix}$$

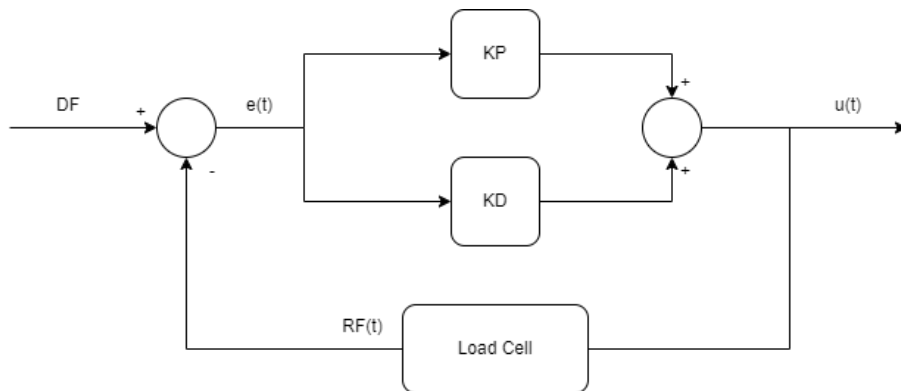
Μια άλλη πιθανή αιτία της ταλάντωσης που παρατηρήθηκε, ήταν ότι λόγω πιθανών παραμορφώσεων ή κακής επαφής, η πλατφόρμα Γ ήταν πολύ πιο επιρρεπής σε μικρές αποκλίσεις από την επιθυμητή τροχιά, που πολύ πιθανό να επηρεάζει τις τιμές της ανάδρασης. Δυστυχώς αυτό για να διορθωθεί θα χρειαζόταν επανασχεδιασμό και κατασκευή μερικών μεγάλων εξαρτημάτων, κάτι που δεν ήταν εφικτό.

Μετά τις αλλαγές πραγματοποιήθηκαν εκ νέου πειράματα με αρκετές διαφορετικές τιμές ελεγκτή. Τα καλύτερα αποτελέσματα φάνηκε να τα δίνουν οι τιμές $P_x=80$ - $P_y=120$, με τις αποκρίσεις που φαίνονται στην **Εικόνα 58**.

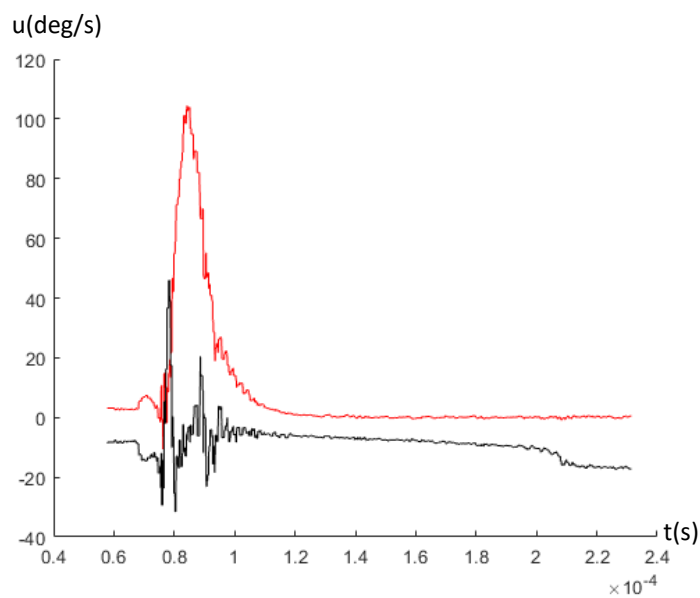


ΕΙΚΟΝΑ 58 : $P_x=80$, $P_y=120$

Παρόλες τις προσπάθειες κατά την ρύθμιση, οι ταλαντώσεις κατά την απόκριση συνεχίστηκαν, οπότε προστέθηκε και D ελεγκτής στο σύστημα. Το νέο διάγραμμα ελέγχου φαίνεται στην **Εικόνα 59**. Στα πειράματα που ακολούθησαν, οι καλύτερες αποκρίσεις που καταγράφηκαν ήταν για τις τιμές $P_x = 80$, $P_y=120$, $D_x = 20$, $D_y=15$ όπως φαίνεται στην **Εικόνα 60**. Ο KD ελεγκτής θα είναι και αυτός ένας πίνακας 2×4 όπως ακριβώς ο KP.



ΕΙΚΟΝΑ 59 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ PD ΕΛΕΓΚΤΗ



ΕΙΚΟΝΑ 60: PX = 80, PY=120, DX=20, DY=15

8.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

8.2.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Στο τωρινό σύστημα, ο έλεγχος γινόταν ως προς τις δυνάμεις που δεχόταν το ρομπότ από το έδαφος και η επιθυμητή κατάσταση ήταν να μοιράζεται ισότιμα το βάρος στους τροχούς. Παρόλο που αυτή η μέθοδος ήταν πολύ απλή και επιτυχημένη, θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα σύστημα μαθηματικά πιο εξελιγμένο. Σε αυτό το στάδιο, ο έλεγχος θα γίνεται με υπολογισμό της βάσης στήριξης στο έδαφος και επιθυμητή κατάσταση θα είναι το συνολικό κέντρο βάρους να βρίσκεται επάνω από το κέντρο της βάσης στήριξης. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να κάνει δύο μεγάλους υπολογισμούς, να υπολογίζει τις συνταγμένες των άκρων και του κέντρου της βάσης στήριξης και τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους. Οι δύο αυτοί υπολογισμοί με τη σειρά τους, χρειάζονται ένα σύνολο από καινούριες μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές είναι η κλίση του εδάφους ως προς το οριζόντιο επίπεδο και οι γωνίες περιστροφής των δύο κινητήρων.

Για να υπολογίσει το σύστημα την κλίση του εδάφους, χρειάζεται να προστεθεί ένα γυροσκόπιο. Το γυροσκόπιο δίνει τη γωνιακή ταχύτητα που αποκτά το σώμα του ρομπότ που πεδίζει στο έδαφος και με έναν απλό πολλαπλασιασμό της χρονικής διαφοράς, το σύστημα μπορεί να υπολογίσει την γωνία που έχει περιστραφεί.

Ο υπολογισμός της γωνίας περιστροφής των δύο κινητήρων είναι πιο εύκολος. Είναι γνωστή η γωνία του ενός βήματος του κάθε κινητήρα, επομένως σε κάθε βήμα, το σύστημα μαθηματικά προσθέτει ή αφαιρεί μια γωνία. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μια απλή αναλογία των δοντιών των γραναζιών, μετατρέπεται η γωνία του κινητήρα στην γωνία της πλατφόρμας, που είναι το ζητούμενο.

Επίσης το ρομπότ θα πρέπει να κάνει περισσότερους υπολογισμούς, για την μετατροπή των συντεταγμένων των απαραίτητων σημείων στον χώρο, σε σχέση με την κλίση του. Αντίστοιχα οι κινητήρες των γραναζιών θα επιλέγουν κατεύθυνση ανάλογα με την θέση που βρίσκεται το κέντρο βάρους. Στον υπολογισμό του κέντρου βάρους ξεκινάει ένα δύσκολο κεφάλαιο, καθώς οι γωνίες του ρομπότ και των κινητήρων μπλέκονται πολύ και δημιουργούν ένα μη γραμμικό σύστημα. Για να επιλυθεί αυτό θα χρειαστεί ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα, καθώς θα πρέπει να κάνει αρκετά περίπλοκες πράξεις.

8.2.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Μια άλλη ιδέα σχετικά με το σύστημα ελέγχου είναι να δουλεύει με βάση την μαθηματική μοντελοποίηση του κεφαλαίου 5. *Μαθηματική μοντελοποίηση*. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται στην ουσία ένα πολύ περίπλοκο σύστημα έξι εξισώσεων. Αν το σύστημα μπορεί να λυθεί, τότε θα μπορούσε να δίνει σαν αποτέλεσμα τις εξόδους του ελέγχου.

Οι έξι τιμές θα μπορούν να είναι οι επιταχύνσεις των έξι κινητήρων, τέσσερις των τροχών και οι δύο *steppers*. Οι τιμές που έχουν να κάνουν με αυτούς τους τέσσερις κινητήρες είναι οι μόνοι άγνωστοι που πρέπει να υπολογιστούν και όλες οι τιμές που θα χρειάζονται σαν είσοδο μπορούν να παρθούν από τα *load cells*, το γυροσκόπιο και το επιταχυνσιόμετρο. Όλες οι υπόλοιπες τιμές αυτών των τεράστιων εξισώσεων, είναι οι σταθερές τιμές του συστήματος, οι αποστάσεις, τα βάρη κ.λ.π. Θεωρητικά επομένως υπάρχει η δυνατότητα να λυθεί το σύστημα ως προς τις επιθυμητές τιμές και στην συνέχεια να περαστούν στο σύστημα οι εξισώσεις, ώστε να υπολογίσει κατευθείαν τις επιταχύνσεις των κινητήρων του.

Ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο στη μοντελοποίηση του συστήματος, αντί για έναν απλό PD ελεγκτή, περιέχει όλες τις φυσικές ιδιότητες των σωμάτων, την μάζα, την ροπή αδράνειας κ.λ.π. και δίνει τις ιδανικές τιμές του μοντέλου. Θεωρητικά πάντα, αυτό το μοντέλο θα δίνει αποτελέσματα, που σε άλλη περίπτωση θα απαιτούσαν έναν πολύ καλά ρυθμισμένο ελεγκτή. Από την άλλη πλευρά, ένα σύστημα τόσο μεγάλο θα χρειαζόταν πολύ υπολογιστική δύναμη για να τρέξει με τις επιθυμητές συχνότητες.

Από την άλλη, ένα τέτοιο σύστημα θα είναι πολύ πιο δύσκολο να σχεδιαστεί και να λειτουργήσει, δεν είναι βέβαιο αν θα δίνει όντως καλύτερα αποτελέσματα. Από τα πειράματα που έγιναν, φάνηκε ότι το απλό σύστημα με ελεγκτή, είναι αρκετά αξιόπιστο, επομένως δεν είναι σίγουρο αν ένα πιο περίπλοκο σύστημα είναι όντως αναγκαίο.

8.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Το σύστημα ελέγχου είναι το κομμάτι της εργασίας του οποίου ο στόχος άλλαξε ριζικά από το ξεκίνημα μέχρι το τέλος. Ξεκινώντας θεωρήθηκε ότι το ρομπότ θα πρέπει να κάνει περίπλοκους υπολογισμούς με βάση τις θεωρίες της φυσικής, για να υπολογίζει τις σωστές ταχύτητες που θα χρειαστεί να δίνει σαν εξόδους. Με την πρόοδο της έρευνας επάνω στον αυτόματο έλεγχο, κατανοήθηκε σωστά η θεωρία του PID ελεγκτή και πώς η σχέση εισόδου – ανάδρασης – εξόδου μπορεί να είναι πολύ απλούστερη. Αυτή η γνώση επιβεβαιώθηκε και πειραματικά, καθώς φάνηκε πόσο γρήγορα μπορεί ένας PD ελεγκτής να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί. Το γενικό συμπέρασμα που αντλήθηκε από τα πειράματα, είναι ότι ένας καλά σχεδιασμένος μηχανισμός, ελεγχόμενος από ένα σωστά ρυθμισμένο σύστημα ελέγχου, είναι καλύτερος από ένα περίπλοκο σύστημα με πολλούς δύσκολους υπολογισμούς, διότι ο απλός ελεγκτής μπορεί τόσο να σχεδιαστεί όσο και να διορθωθεί πολύ εύκολα και το αποτέλεσμα μπορεί να είναι πολύ ικανοποιητικό.



ΕΙΚΟΝΑ 61: ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΜΑΤΑ

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας, αντλήθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις μεθόδους και τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία καταγράφηκαν στο τέλος του κάθε κεφαλαίου.

Επίσης αντλήθηκαν και χρήσιμα συμπεράσματα για τον τρόπο οργάνωσης μιας μεγάλης εργασίας. Ο καλός προγραμματισμός των εργασιών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση ενός πολύπλοκου συστήματος. Οι εργασίες πρέπει να εξελίσσονται όσο πιο παράλληλα γίνεται, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες καθυστερήσεις, καθώς τα αναπάντεχα προβλήματα είναι πάντα πιθανά. Στην διάρκεια της εργασίας υπήρξαν καθυστερήσεις που θα είχαν αποφευχθεί με έναν καλύτερο καταμερισμό των εργασιών.

Παρόλες τις αναπάντεχες προκλήσεις, το αποτέλεσμα της εργασίας είναι ένα λειτουργικό ρομπότ που εκτελεί τον στόχο του σε καλό βαθμό. Τα πειράματα έδωσαν τις αναμενόμενες αποκρίσεις και η κατασκευή του ρομπότ λειτουργούσε όπως αναμενόταν. Ακόμα και όταν παρατηρήθηκαν ανεπιθύμητες παρεμβολές ή δυσλειτουργίες, αφορούσαν περισσότερο μικρές ατέλειες και σε καμιά περίπτωση δεν υπήρξε σοβαρό πρόβλημα στην λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Η ιδέα της πλατφόρμας που μεταφέρεται και περιστρέφεται μαζί (όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Εξέλιξη σχεδίασης) λειτούργησε όπως αναμενόταν, αποδεικνύοντας ότι στα αρχικά στάδια της εργασίας έγιναν σωστές επιλογές επάνω στην μορφή και την λειτουργία των μηχανισμών. Το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε (*Εικόνα 61*) δοκιμάστηκε με διάφορα φορτία σε διαφορετικές θέσεις επάνω στην πλατφόρμα και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων λειτούργησε σωστά, βρίσκοντας την ισορροπία του εύκολα και γρήγορα. Προφανώς και υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης σε περίπτωση που η ανάπτυξη του ρομπότ συνεχιστεί στο μέλλον. Διορθώσεις επάνω στα εξαρτήματα του μηχανισμού μπορούν να προσθέσουν περισσότερες δυνατότητες και αξιοπιστία, ενώ βελτιστοποιήσεις επάνω στον έλεγχο θα δώσουν γρηγορότερη απόκριση. Ακόμα και χωρίς αυτές τις βελτιώσεις όμως, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το ρομπότ εκπληρώνει πλήρως τον στόχο του. Το σύστημα ισορροπίας λειτουργεί επιτυχημένα πλήρως αυτόματα σε ότι κλίση και αν βρεθεί, ακριβώς όπως ήταν το ζητούμενο.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. C. Dorf και R. H. Bishop, «Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα συστήματα αυτόματου ελέγχου,» σε *Σύγχρονα συστήματα αυτόματου ελέγχου*, ΤΖΙΟΛΑ, 2009, pp. 15-56.
- [2] B. C. Κυο και F. Golnaraghi, «Κεφάλαιο1. Εισαγωγή,» σε *Συστήματα αυτόματου ελέγχου*, ΙΩΝ, 2003, pp. 1-21.
- [3] R. C. Dorf και R. H. Bishop, «Κεφάλαιο 6 Ευστάθεια γραμμικών συστημάτων ανάδρασης,» σε *Σύγχρονα συστήματα αυτόματου ελέγχου*, ΤΖΙΟΛΑ, 2009, pp. 478-542.
- [4] S. M. Qureshi, *Introduction to Mechatronics: A Graduate Engineering Course*, Risalpur.
- [5] M. Andrejasic, *MEMS ACCELEROMETERS*, MAREC: University of Ljubljana, 2008.
- [6] N. Dadafshar, *Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing and Applications*.
- [7] ,, A. C. L. V. M. D. C. C. E. C. Vittorio M. N. Passaro, «Gyroscope Technology and Applications: A Review,» *Sensors*, Bari, 2017.
- [8] P. K. Stein, «STRAIN GAGE HISTORY AND THE END OF THE,» *EXPERIMENTAL TECHNIQUES*, March / April 2001.
- [9] I. Muller, R. d. B. Machado, C. E. P. και V. Brusamarello, «Load Cells in Force Sensing,» *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, February 2010.
- [10] L. Lin, P. A. Pisano και R. T. Howe, «A Micro Strain Gauge with Mechanical Amplifier,» *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, τόμ. Vol. 6, αρ. NO. 4, pp. 313-321, December 1997.
- [11] L. L. Torben και P. R. Scheeper, *Historical Perspective of Accelerometer Technologies*, Naerum, Denmark.
- [12] P. L. Walter, *The history of the Accelerometer: 1920s-1996 - prologue and epilogue*, Ft.Worth, Texas: Texas Christianity University, 2006.
- [13] M. M. F. G. G. Bennett, «An historical review of the development of the,» *The Australian Surveyor*, pp. 244 - 252, Δεκέμβριος 1970.
- [14] A. E. M. M. R. B. S. I. M. L. W. M. AARON BURG, «MEMS GYROSCOPES AND THEIR APPLICATIONS,» Northwestern University, 2004.
- [15] G.-O. Tirian, O. Prosteian, F. Ioan και R. Cezara, «Inverted pendulum controlled through fuzzy logic,» σε *10th Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, Timosoara, Romania, 2015.

- [16] K. Pathak, F. Jaume και S. K. Agrawal, «Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, p. Vol 21, 3 June 2005.
- [17] Y. KIM, S. H. KIM και Y. K. KWAK, «Dynamic Analysis of a Nonholonomic,» *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, αρ. 44, pp. 25-46, 2006.
- [18] A. Zulu και S. John, «A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors,» *Open Journal Applied Sciences*, pp. 547-556, 15 Novembes 2014.
- [19] S. Hazim, S. Ahmad, A.-F. Ala, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah και M. Guizani, «Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A,» *IEEE Access*, pp. 48572 - 48634, 9 April 2019.
- [20] S. Bahareh, A. Alfonso, C. Jesus, C. Rita, O. Aníbal και P. Antonio, «Optimal Trajectory Planning for Autonomous Drone Cinematography,» σε *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Prague, Czech Republic, 2019.
- [21] Y. Zhou, J. Lin, S. Wang και C. Zhang, «Learning Ball-Balancing Robot through Deep Reinforcement Learning,» σε *2021 International Conference on Computer, Control and Robotics*, 2021.
- [22] A. Zeeshan, N. Nauman και M. J. Khan, «Design, Control and Implementation of a Ballon,» σε *9th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2012.
- [23] Z. Gao, S. Wijesinghe, T. Pathinathanpillai, E. Dyer και I. Singh, «Design and Implementation a Ball Balancing System for Control Theory Course,» *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC)*, τόμ. 17, αρ. 5, pp. 2363-2374, 2015.
- [24] C. F. L. B. .. Guo Zhanshe, «Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review,» Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.