



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη Αυτόνομου Ρομποτικού Οχήματος 4WS

Εκπόνηση:
Κούρος Γεώργιος

Επιβλέπων:
Πέτρου Λουκάς
Αναπ. Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Αύγουστος, 2016

Περίληψη

<summary>

Abstract

Development of an Autonomous 4WS Robotic Vehicle

Kouros Georgios

Electrical and Computer Engineering Department

Aristotle University of Thessaloniki, Greece

August, 2016

Ευχαριστίες

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|-----------|
| Ευχαριστίες | iv |
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Περιγραφή του Προβλήματος | 1 |
| 1.2 Συνεισφορά της Διπλωματικής | 1 |
| 1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής | 1 |
| 2 Ρομποτική Πλατφόρμα | 2 |
| 2.1 Ρομποτική Πλατφόρμα <i>Monstertruck</i> | 2 |
| 2.1.1 Τηλεκατευθυνόμενο Όχημα <i>GroundPounder</i> | 2 |
| 2.1.2 Σασί Ρομποτικής Πλατφόρμας | 3 |
| 2.1.3 Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός | 4 |
| 2.2 Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης | 16 |
| 2.2.1 Σύστημα Τετρακίνησης | 16 |
| 2.2.2 Σύστημα Τετραδιεύθυνσης | 18 |
| 2.3 Κινηματική Ανάλυση | 22 |
| 2.3.1 Κινηματικό Μοντέλο Ackermann | 22 |
| 2.3.2 Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης - 4WS | 25 |
| 2.3.3 Κινηματική Ανάλυση Οχήματος <i>Monstertruck</i> | 30 |
| 3 Αυτόνομη Πλοήγηση σε Άγνωστο Περιβάλλον | 31 |
| 3.1 Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτοφράφηση | 31 |
| 3.2 Κατασκευή Μονοπατιού | 31 |
| 3.3 Κινηματικά Εφικτή Παραμόρφωση Μονοπατιού για Αποφυγή Εμποδίων | 31 |
| 3.4 Διάσχιση Μονοπατιού | 31 |
| 4 Αρχιτεκτονική Συστήματος | 32 |
| 4.1 ROS | 32 |
| 4.2 Εργαλεία Προσομοίωσης | 32 |
| 4.2.1 STDR - 2D Προσομοίωση | 32 |
| 4.2.2 GAZEBO - 3D Προσομοίωση | 32 |
| 4.3 Αρχιτεκτονική Λογισμικού | 32 |
| 5 Πειράματα και Αποτελέσματα | 33 |
| 5.1 Κινηματικό | 33 |
| 5.2 SLAM | 33 |
| 5.3 Κατασκευή Μονοπατιού | 33 |
| 5.4 Κινηματικά Εφικτή Διαμόρφωση Μονοπατιού για Αποφυγή Εμποδίων | 33 |
| 5.5 Διάσχιση Μονοπατιού | 33 |
| 5.6 Αυτόνομη Εξερεύνηση Χώρου | 33 |
| 5.7 Αξιολόγηση Απόδοσης Υπολογιστή Odroid-XU4 | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία | 34 |
| 6.1 Συμπεράσματα | 34 |
| 6.2 Μελλοντική Εργασία | 34 |
| Α' Τίτλος Παραρτήματος | 35 |
| Βιβλιογραφία | 36 |

Λίστα Σχημάτων

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Το τηλεκατευθυνόμενο όχημα <i>GroundPounder</i> , της Redcat Racing. | 2 |
| 2.2 | Τα κουτιά του σασί. | 3 |
| 2.3 | 3D μοντέλο του συναρμολογημένου σασί της ρομποτικής πλατφόρμας <i>Monstertruck</i> . | 3 |
| 2.4 | Raspberry Pi 2 | 4 |
| 2.5 | Odroid-XU4 | 4 |
| 2.6 | Hokuyo URG-04LX. | 6 |
| 2.7 | Ο Σαρωτής Λέιζερ Hokuyo URG-04LX σε δράση. | 6 |
| 2.8 | Compass OS4000. | 6 |
| 2.9 | Logitech Portable Webcam C905. | 7 |
| 2.10 | Αισθητήρες θέσης και ταχύτητας κινητήρων. | 8 |
| 2.11 | Στάδια επεξεργασίας τάσης μπαταρίας για μέτρηση της σε ADC. | 9 |
| 2.12 | Ο κινητήρας Brushed 540 του τηλεκατευθυνόμενου όχηματος <i>GroundPounder</i> . | 9 |
| 2.13 | Ο ελεγκτής ESC B7003SR του τηλεκατευθυνόμενου όχηματος <i>GroundPounder</i> . | 9 |
| 2.14 | Ο κινητήρας maxon EC <TODO: τύπος και σωστή εικόνα>, της maxon motor. | 10 |
| 2.15 | Ο έξυπνος ελεγκτής κινητήρα, EPOS 24/1, της maxon motor [1]. | 10 |
| 2.16 | Καλωδίωση Κινητήρα, Ελεγκτή και Υπολογιστή [1]. | 10 |
| 2.17 | Μετατροπέας διεπαφής RS232 σε USB. | 10 |
| 2.18 | Σερβοκινητήρας Hitek HS-7954TH. | 11 |
| 2.19 | Pololu Micro Maestro 6-Channel USB Servo Controller | 11 |
| 2.20 | Σερβοκινητήρας στρέψης των τροχών. | 11 |
| 2.21 | Σερβοκινητήρας Dynamixel AX-12A, της Robotis. | 12 |
| 2.22 | Αντάπτορας USB2Dynamixel, της Robotis. | 12 |
| 2.23 | Διάταξη Pitch-Roll του σταθεροποιητή του σαρωτή λέιζερ. | 12 |
| 2.24 | TP-Link Wi-Fi USB Adapter N900 TL-WDN4200. | 13 |
| 2.25 | Διασύνδεση διεπαφών των επιμέρους υποσυστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας <i>Monstertruck</i> . | 14 |
| 2.26 | Μπαταρία Gens ace, LiPo, 22.2V, 4000mAh. | 14 |
| 2.27 | Επιμέρους τμήματα συστήματος τροφοδοσίας. | 15 |
| 2.28 | Σύστημα Τροφοδοσίας των επιμέρους υποσυστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας <i>Monstertruck</i> . | 15 |
| 2.29 | Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης (Drivetrain) της ρομποτικής πλατφόρμας <i>Monstertruck</i> . | 16 |
| 2.30 | Γρανάζια Πινιόν και Ωθησης. | 17 |
| 2.31 | Το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης (Transfer Case) του όχηματος <i>GroundPounder</i> . | 17 |
| 2.32 | Το διαφορικό (Differential) του όχηματος <i>GroundPounder</i> . | 18 |
| 2.33 | Λειτουργία ενδεικτικού μηχανισμού διαφορικού. | 18 |
| 2.34 | Μηχανισμός στρέψης, με άξονα έλξης (Drag Link Steering Mechanism). | 18 |
| 2.35 | Μετάδοση κίνησης από τον σερβοκινητήρα και το μπράτσο Pitman στον σύνδεσμο έλξης. | 19 |
| 2.36 | Τραπεζοειδής Μηχανισμός στρέψης των τροχών. | 20 |
| 2.37 | Κινηματικό Μοντέλο Ackermann. | 22 |
| 2.38 | Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου Ackermann. | 23 |
| 2.39 | Κινηματικό μοντέλο αρνητικής τετραδιεύθυνσης. | 26 |
| 2.40 | Κινηματικό μοντέλο θετικής τετραδιεύθυνσης. | 26 |

| | |
|---|----|
| 2.41 Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου αρνητικής τετραδιεύθυνσης. | 28 |
| 2.42 Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου θετικής τετραδιεύθυνσης. | 28 |

Λίστα Πινάκων

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Προδιαγραφές Raspberry Pi 2 και Odroid-XU4. | 4 |
| 2.2 | Προδιαγραφές Hokuyo URG-04LX | 6 |
| 2.3 | Προδιαγραφές Compass OS4000 | 6 |
| 2.4 | Προδιαγραφές σερβοκινητήρα Dynamixel AX-12A, της Robotis | 12 |
| 2.5 | Προδιαγραφές TP-Link Wi-Fi USB Adapter N900 TL-WDN4200. | 13 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

- 1.1 Περιγραφή του Προβλήματος
- 1.2 Συνεισφορά της Διπλωματικής
- 1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής

Κεφάλαιο 2

Ρομποτική Πλατφόρμα

2.1 Ρομποτική Πλατφόρμα *Monstertruck*

Η ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck* αποτελεί ένα ρομποτικό όχημα, η ανάπτυξη του οποίου, ξεκίνησε στα πλαίσια της ομάδας P.A.N.D.O.R.A. και ολοκληρώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Αναπτύχθηκε με σκοπό την χρήση σε εφαρμογές αυτόνομης λειτουργίας, για χαρτογράφηση και εξερεύνηση άγνωστων χώρων και αναζήτηση σημείων ενδιαφέροντος, αλλά και για πειραματισμό με εναλλακτικά μοντέλα κίνησης οχημάτων.

2.1.1 Τηλεκατευθυνόμενο Όχημα *GroundPounder*

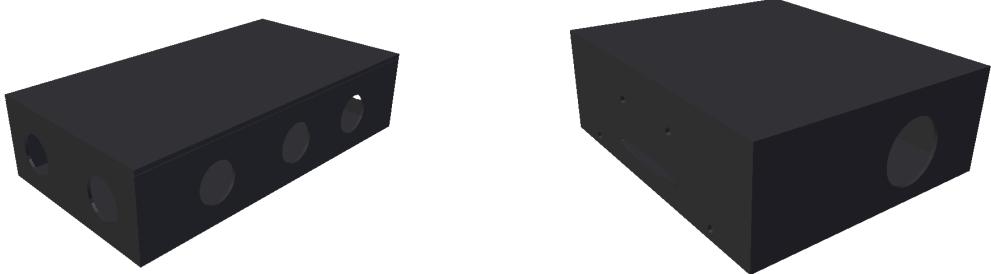
Για την κατασκευή της ρομποτικής πλατφόρμας, χρησιμοποιήθηκε, σαν βάση, το τηλεκατευθυνόμενο όχημα *GroundPounder* της *Redcat Racing*. Ανήκει στην κατηγορία φορτηγών οχημάτων *Monstertruck*, με κλίμακα 1:10 και περιλαμβάνει σκελετό από αλουμίνιο, όπως επίσης, και ρυθμιζόμενες αναρτήσεις. Επιπλέον, περιλαμβάνει σύστημα ανεξάρτητης στρέψης των μπροστινών και πίσω τροχών (*Tetrapodieύθυνση - 4-Wheel-Steering*), σε συνδυασμό με μετάδοση της κίνησης και στους τέσσερις τροχούς (*Tetrapakίνηση - 4-Wheel-Drive*), προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητες, συγκριτικά με τα συμβατικά αυτοκίνητα, που περιλαμβάνουν στρέψη, μόνο, των μπροστινών τροχών (*2-Wheel-Steering*) και κίνηση μόνο των μπροστινών (*Μπροστινοκίνηση - Front-Wheel-Drive*), ή μόνο των πίσω (*Πισωκίνηση - Rear-Wheel-Drive*).



Σχήμα 2.1: Το τηλεκατευθυνόμενο όχημα *GroundPounder*, της *Redcat Racing*.

2.1.2 Σασί Ρομποτικής Πλατφόρμας

Λόγω, της πληθώρας αισθητήρων, ηλεκτρονικών, καλωδιώσεων κλπ. και του περιορισμένου ελεύθερου χώρου πάνω στο όχημα, κρίθηκε σκόπιμο, αυτό, να επεκταθεί, με πρόσθετους χώρους. Για την λύση του προβλήματος, σχεδιάστηκαν, λοιπόν, και κατασκευάστηκαν, από μέλη της ομάδας P.A.N.D.O.R.A. 2014-15, δύο κουτιά, τα οποία προστέθηκαν επάνω στο υπάρχον όχημα, με σκοπό, να περιλάβουν τα επιμέρους εξαρτήματα του ρομπότ.

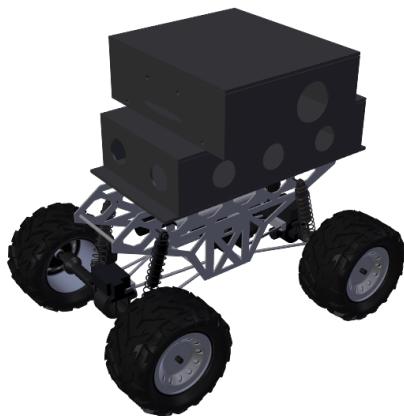


(α') Το *Kουτί Τροφοδοσίας* της ρομποτικής πλατφόρμας (β') Το *Kουτί Ηλεκτρονικών* της ρομποτικής πλατφόρμας

Σχήμα 2.2: Τα κουτιά του σασί.

Το *Kουτί Τροφοδοσίας*, του σασί της ρομποτικής πλατφόρμας, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2α', έχει διαστάσεις $310mm \times 170mm \times 74mm$, και περιλαμβάνει 10 τρύπες, διαμέτρου $35mm$, τοποθετημένες περιμετρικά, γύρω από το κουτί, για πέρασμα καλωδιώσεων.

Το *Kουτί Ηλεκτρονικών*, του σασί της ρομποτικής πλατφόρμας, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2β', έχει διαστάσεις $210mm \times 240mm \times 84mm$, με δύο τρύπες στα πλάγια του ρομπότ, για τοποθέτηση ανεμιστήρων ψύξης του υπολογιστή, όπως, επίσης και ένα σύνολο από τρύπες στην μπροστινή πλευρά του κουτιού για κεραίες ασύρματης επικοινωνίας WiFi και καλωδιώσεις.



Σχήμα 2.3: 3D μοντέλο του συναρμολογημένου σασί της ρομποτικής πλατφόρμας Monstertruck.

2.1.3 Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός

Υπολογιστής

Το πιο σημαντικό τμήμα μία ρομποτικής πλατφόρμας και ιδιαίτερα μίας αυτόνομης ρομποτικής πλατφόρμας αποτελεί ο εγκέφαλος του, δηλαδή, το υπολογιστικό του σύστημα, που του επιτρέπει να ελέγχει τα υποσυστήματα του και να εκτελεί διεργασίες και αλγορίθμους. Η επιλογή του υπολογιστικού συστήματος, που εν τέλει, εγκαταστάθηκε στην ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, βασίστηκε σε δύο κριτήρια. Πρώτο και βασικότερο κριτήριο επιλογής, αποτέλεσε η υπολογιστική ισχύς και κατά πόσο θα μπορούσε να εκτελεί τους απαιτούμενους αλγορίθμους ταυτόχρονα, αποδοτικά και χωρίς καθυστερήσεις. Το δεύτερο κριτήριο επιλογής, που λήφθηκε υπόψιν, ήταν, η κατανάλωση ισχύος, όσον αφορά τον χρόνο αυτονομίας.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, τα υπολογιστικά συστήματα που εξετάστηκαν είναι το *Raspberry Pi 2*, του *Raspberry Pi Foundation* και το *Odroid-XU4*, της *Hardkernel*. Και οι δύο υπολογιστές, αυτοί, αποτελούν πλήρεις υπολογιστές, με Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU), μνήμη RAM, κάρτα γραφικών κλπ., σε εξαιρετικά μικρό μέγεθος και χαμηλές κατανάλωση ισχύος.



Σχήμα 2.4: Raspberry Pi 2



Σχήμα 2.5: Odroid-XU4

Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές Raspberry Pi 2 και Odroid-XU4.

| Προδιαγραφές | Raspberry Pi 2 | Odroid-XU4 |
|--------------|---|---|
| CPU | Broadcom BCM2836 Arm7 Quad Core 900MHz Processor | Samsung Exynos5422 ARM® Cortex™-A15 Quad 2.0GHz/ Cortex™-A7 Quad 1.4GHz |
| GPU | Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor OpenGL ES 2.0 | Mali™-T628 MP6 OpenGL ES 3.0 / 2.0 / 1.1 and OpenCL 1.1 Full profile |
| RAM | 1GB LPDDR2 | 2GB LPDDR3 |
| USB 2.0 | 4 | 1 |
| USB 3.0 | - | 2 |
| Display | HDMI | HDMI |
| Sound | 4 pole Stereo output | HDMI Digital audio output |
| Storage | Micro SD | Micro SD ή eMMC 5.0 |
| Ethernet | 10/100 | 10/100/1000 |
| Wifi | USB IEEE 802.11b/g/n | USB IEEE 802.11b/g/n 1T1R WLAN |
| Περιφερειακά | 40-pin GPIO, UART, SPI, I2C | UART, 30-pin GPIO/IRQ/SPI/ADC 12-pin GPIO/I2S/I2C |
| Power | 5V, 2A | 5V, 4A |
| Dimensions | 85 × 56 × 17mm | 82 × 58 × 22mm |

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε στην ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, ο υπολογιστής *Raspberry Pi 2*, αλλά, μετά από πειράματα και δοκιμές, με τους απαιτούμενους αλγορίθμους, για την λειτουργία του οχήματος, ως αυτόνομο ρομποτικό πράκτορα, διαπιστώθηκε, ότι, ο υπολογιστής *Raspberry Pi 2*, είναι ανεπαρκής για την συγκεκριμένη εφαρμογή, για την οποία προορίζεται η ρομποτική πλατφόρμα. Σαν αποτέλεσμα, στην ρομποτική πλατφόρμα, τελικά χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστής *Odroid-XU4*, που μετά από αντίστοιχα πειράματα, η απόδοση του κρίθηκε πλήρως ικανοποιητική.

Αισθητήρες

Μία εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα, κάθε αυτόνομου ρομποτικού συστήματος, αποτελεί η αντίληψη του, όσον αφορά το περιβάλλον του. Συγκεκριμένα, η ρομποτική αντίληψη στηρίζεται σε ένα σύνολο αισθητήρων, που επιτρέπουν στο ρομποτικό σύστημα να λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον του, σε μορφή κατανοητή και να αξιοποιήσει, από αυτό.

Οι ρομποτικοί αισθητήρες, χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την πηγή της πληροφορίας, σε *ιδιοδεκτικούς (proprioceptive)* ή *εξωδεκτικούς (exteroceptive)* [3], εάν η πληροφορία προέρχεται από το ίδιο το ρομποτικό σύστημα, ή από το περιβάλλον του, αντίστοιχα. Παραδείγματα *ιδιοδεκτικών αισθητήρων*, αποτελούν, οι *αισθητήρες μέτρησης θέσης, ταχύτητας και ροπής* των κινητήρων, γυροσκόπια, *αισθητήρες μέτρησης της φόρτισης* των μπαταριών κα. Αντίστοιχα, *εξωδεκτικοί αισθητήρες*, θεωρούνται, οι *αισθητήρες επαφής (tactile sensors)*, οι *ηλεκτρονικές πυξίδες (compass, IMU)*, *αισθητήρες GPS*, οι *υπέρυθροι, υπερηχητικοί και λέιζερ αισθητήρες απόστασης (range sensors)*, όπως επίσης και οι κάμερες. Επίσης, χωρίζονται και με βάση την πηγή εκπομπής της πληροφορίας [3] σε *παθητικούς (passive)*, εάν μετρούν κάποια μορφή ενέργειας που προέρχεται από το περιβάλλον και σε *ενεργητικούς (active)*, εάν εκπέμπουν ενέργεια στο περιβάλλον και έπειτα, μετρούν την αντίδραση του περιβάλλοντος. Με βάση, τον συγκεκριμένο ορισμό, *αισθητήρες αφής, ηλεκτρονικές πυξίδες και κάμερες*, αποτελούν *παθητικούς αισθητήρες*, ενώ *κωδικοποιητές (encoders) κινητήρων, GPS, αισθητήρες απόστασης*, αποτελούν *ενεργητικούς αισθητήρες*.

Ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα, είναι προφανές, ότι απαιτεί αισθητήρες, από όλες τις παραπάνω κατηγορίες για να μπορεί να αντιληφθεί και να κινηθεί μέσα στο περιβάλλον του, αλλά και να αντιδράσει μ' αυτό. Ακολούθως, παρουσιάζεται το σύνολο των αισθητήρων, που περιλαμβάνει η ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*.

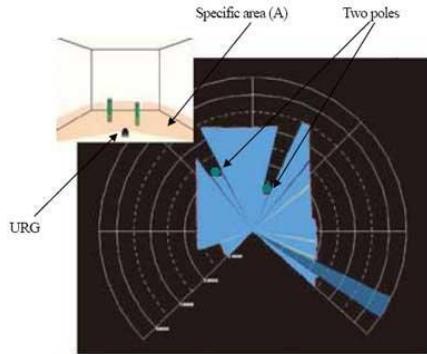
1. Οι πιο σημαντικοί αισθητήρες για ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα, είναι οι *αισθητήρες απόστασης (range sensors)*, οι οποίοι, του προσφέρουν πληροφορία, σχετικά με την απόσταση του οχήματος από εμπόδια, επιτρέποντας του, με αυτόν τον τρόπο, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, να χαρτογραφεί τον περιβάλλοντα χώρο του, να ξέρει, ανά πάσα στιγμή, τη θέση του και να πλοηγείται, αυτόνομα, μέσα σε αυτόν, αποφεύγοντας συγκρούσεις.

Αντίστοιχα, στην ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, για τους παραπάνω λόγους, εγκαταστάθηκε ένας *Σαρωτής Λέιζερ (Laser Scanner) Hokuyo URG-04LX*. Ο αισθητήρας αυτός περιλαμβάνει μία περιστρεφόμενη κεφαλή μέτρησης απόστασης, μέσω ανίχνευσης φωτός (*Light Detection and Ranging - LIDAR*), περιμετρικά του αισθητήρα, σε εύρος 240° και εμβέλεια $4m$.

2. Ένα, άλλο είδος αισθητήρων, ιδιαίτερα δημοφιλές και απαραίτητο στις περισσότερες ρομποτικές εφαρμογές, αποτελούν οι *αισθητήρες κατεύθυνσης (heading sensors)* [3]. Στην κατηγορία, αυτή, ανήκουν τα *γυροσκόπια (gyroscopes)*, τα *κλινόμετρα (inclinometers)* και οι *πυξίδες (compasses)*. Οι αισθητήρες, αυτοί, χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν ο *προσανατολισμός (orientation / yaw)* και η *κλίση (pitch, roll)* του ρομποτικού οχήματος, αλλά και σε συνδυασμό με μετρήσεις ταχύτητας για την εκτίμηση της θέσης του (*dead reckoning*).



Σχήμα 2.6: Hokuyo URG-04LX.



Σχήμα 2.7: Ο Σαρωτής Λέιζερ Hokuyo URG-04LX σε δράση.

Πίνακας 2.2: Προδιαγραφές Hokuyo URG-04LX

| Προδιαγραφές | Hokuyo URG-04LX |
|------------------|---|
| Τροφοδοσία | 5VDC, 500mA |
| Εμβέλεια | 60 - 4 095 mm |
| Περιοχή Μέτρησης | 240° |
| Ακρίβεια | 60 – 1000mm : ±10 1000 – 4095mm : 1% |
| Γωνιακή Ακρίβεια | 0.36°(360°/1024) |
| Διεπαφή | USB, RS232 |
| Διαστάσεις | 50 × 50 × 70mm |

Η ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck* χρησιμοποιεί την πυξίδα *Compass OS4000*, της *Ocean Server*. Ο αισθητήρας αυτός, συνδυάζει ένα μαγνητόμετρο (*magnetometer*), τριών αξόνων και ένα επιταχυνσιόμετρο (*accelerometer*), τριών αξόνων. Το μαγνητόμετρο χρησιμοποιεί το μαγνητικό πεδίο της γης, για να μετρήσει τον απόλυτο προσανατολισμό, ως προς τους τρεις άξονες x , y , z , ενώ το επιταχυνσιόμετρο, μετράει μεταβολές στην ταχύτητα, ως προς τους τρεις άξονες x , y , z .



Σχήμα 2.8: Compass OS4000.

| Προδιαγραφές | Compass OS4000 |
|---------------------|--------------------------|
| Τροφοδοσία | 3.3 – 5VDC, 30mA@3.3V |
| Σειριακή Διεπαφή | TTL 4800-115000 baud |
| Επικοινωνίας | 8 bit, 1 stop, no parity |
| Συχνότητα | 0.01 – 40Hz |
| Ακρίβεια Αξιμούθιου | < 0.5°, 0.1° resolution |
| Ακρίβεια Κλίσης | < 0.5°, 0.1° resolution |
| Διαστάσεις | 15 × 15mm |

Πίνακας 2.3: Προδιαγραφές Compass OS4000

Η πυξίδα *Compass OS4000*, για την ώρα, χρησιμεύει, μόνο, για την, εύρεση της κλίσης (pitch, roll) του ρομπότ, έτσι ώστε να σταθεροποιείται στο οριζόντιο επίπεδο ο σαρωτής λέιζερ, που αναφέρθηκε παραπάνω, μέσω ενός μηχανισμού σταθεροποιητή *pitch-roll*, που αποτελείται από δύο σερβοκινητήρες. Παρόλα αυτά, η πυξίδα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, κάλλιστα και για την εκτίμηση κατάστασης (θέση και προσανατολισμός) του οχήματος, για την επέκταση αλγορίθμων ακολούθησης μονοπατιού, με βάση την ομαλότητα του εδάφους, βάση της τρέχουσα κλίσης του

οχήματος, αλλά και σε ρουτίνες ασφαλείας, σε περίπτωση επικίνδυνων επιπέδων κλίσης του οχήματος, που μπορεί να προκαλέσουν ανατροπή.

3. Η όραση αποτελεί την πιο ισχυρή αίσθηση του ανθρώπου. Προσφέρει ένα τεράστιο όγκο πληροφορίας για το περιβάλλον και διευκολύνει την διάδραση του με αυτό. Στα ρομποτικά συστήματα, η αίσθηση της όρασης προσεγγίζεται με κάμερες, οι οποίες καταγράφουν την ίδια πληροφορία, σε μεγάλο βαθμό που συγκεντρώνει και το ανθρώπινο μάτι.

Στα ρομποτικά συστήματα, κάμερες, μπορεί να χρησιμοποιούνται για επίβλεψη και χειρισμό ρομποτικών συστημάτων, αλλά μεγαλύτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζει ο κλάδος της ρομποτικής όρασης, που ασχολείται με την δημιουργία αλγορίθμων, που εξάγουν πληροφορία, από τις εικόνες, που παράγει μία κάμερας. Για παράδειγμα, κάμερες και αλγόριθμοι ρομποτικής όρασης, χρησιμοποιούνται για αναγνώριση αντικειμένων, προσώπων και προτύπων, γενικότερα, αλλά, ακόμα και χαρτογράφηση περιβάλλοντος και εκτίμηση κατάστασης (*Visual SLAM*, *Monocular SLAM*) κα.

Στην ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, είναι εγκατεστημένη, μία απλή *web* κάμερα *Logitech Portable Webcam C905*, η οποία, χρησιμοποιήθηκε, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μονάχα για επίβλεψη κατά τον χειρισμό, ή την αυτόνομη λειτουργία της ρομποτικής πλατφόρμας. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την εκμετάλλευση της πληροφορίας από την κάμερα, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, η λειτουργικότητα της ρομποτικής πλατφόρμας, μπορεί να εξελιχθεί σημαντικά.

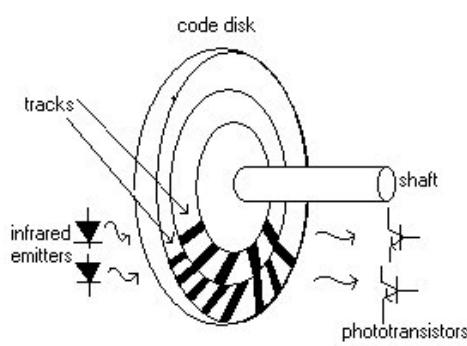
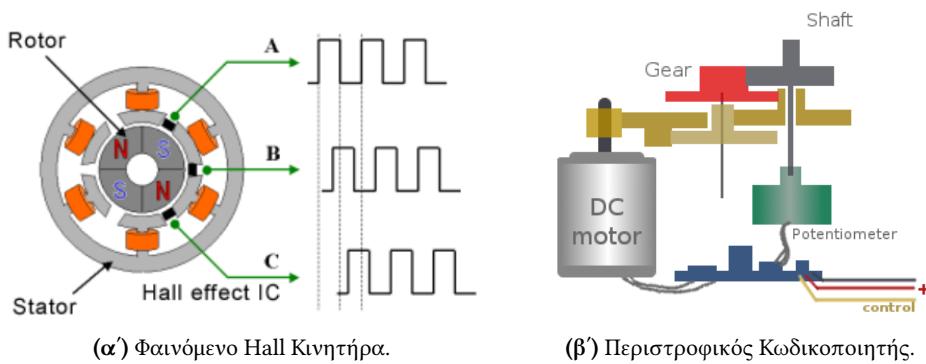


Σχήμα 2.9: Logitech Portable Webcam C905.

4. Σε ρομποτικά συστήματα, με κινούμενα μέρη, όπως είναι προφανές, χρησιμοποιούνται κινητήρες και σερβοκινητήρες. Για τον ακριβή έλεγχο και παρακολούθηση, αυτών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη αισθητήρων, που προσφέρουν πληροφορία, σχετικά με την θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση, φορτίο, ρεύμα, τροφοδοσία ή θερμοκρασία, κατά την λειτουργία τους. Στη ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, χρησιμοποιείται, ένας αισθητήρας *Hall*, για τον κινητήρα των τροχών και κωδικοποιητές (*encoders*), για τον κινητήρα και τους σερβοκινητήρες του οχήματος.

Ο αισθητήρας *Hall*, είναι ένας μετατροπέας, που μεταβάλλει την τάση εξόδου του, ως αντίδραση στις μεταβολές ενός μαγνητικού πεδίου. Στους κινητήρες χρησιμοποιείται ως μετρητής των στροφές ανά λεπτό. Είναι οικονομικός αισθητήρας, μπορεί να δουλέψει σε υψηλές συχνότητες και δεν επηρεάζεται από φαινόμενα θορύβου μηχανικών επαφών (*contact bounce*), αλλά, έχει μικρή ακρίβεια και είναι επιρρεπείς σε σημαντικές αποκλίσεις (*drift*).

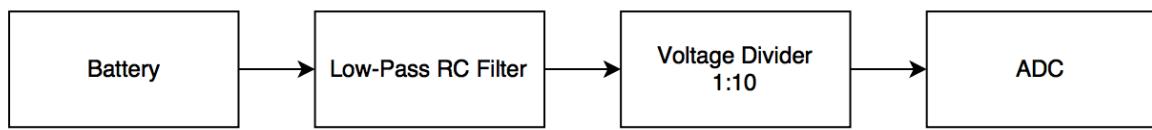
Οι κωδικοποιητές, είναι μία κατηγορία αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, για την μέτρηση της θέσης, σε απλές περιπτώσεις, ή ταχύτητας του άξονα ενός κινητήρα. Η μέτρηση αυτή χρησιμοποιείται από το κύκλωμα κλειστού βρόχου, ενός κινητήρα για έλεγχο θέσης ή ταχύτητας. Οι απλοί, συμβατικοί σερβοκινητήρες (*hobby servos*), του εμπορίου, χρησιμοποιούν περιστροφικούς κωδικοποιητές στην μορφή ποτενσιομέτρων (*rotary / shaft encoders*), που μεταβάλλουν την τάση εξόδου τους, ανάλογα με την θέση του άξονα του σερβοκινητήρα. Αντίθετα, οι βιομηχανικοί κινητήρες, συνήθως χρησιμοποιούν οπτικούς κωδικοποιητές (*optical encoders*), οι οποίοι, αποτελούνται από έναν δίσκο με διαφανείς και αδιαφανείς περιοχές και και ζεύγη φωτοεκπομπών και φωτοδεκτών, που διαβάζει τα μοτίβα του δίσκου και συμπεραίνει την θέση του άξονα του κινητήρα.



Σχήμα 2.10: Αισθητήρες θέσης και ταχύτητας κινητήρων.

5. Η ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, τροφοδοτείται, μέσω, επαναφορτιζόμενων μπαταριών Λιθίου - Πολυμερών (*LiPo*), που συνδυάζουν υψηλή χωρητικότητα, μικρό όγκο και βάρος, σε σύγκριση με άλλους τύπους μπαταριών. Ένα σημαντικό πρόβλημα των μπαταριών *LiPo*, είναι η ασφάλεια τους, καθώς σε περίπτωση υπερφόρτισης, αποφόρτισης, βραχυκυκλώματος, κρούσης ή διείσδυσης, μπορεί να προκληθεί καταστροφική ζημιά, όπως ρήξη συσκευασίας, διαρροή ηλεκτρολύτη και φωτιά. Επίσης, κακή χρήση της μπαταρίας, μέσω υπερφορτίσεων και αποφορτίσεων πέρα από τα επιτρεπτά επίπεδα, προκαλεί μείωση της χωρητικότητας και του χρόνου ζωής της μπαταρίας. Καθίσταται, επομένως, απαραίτητη, η χρήση ενός αισθητήρα, που θα μετρά τα επίπεδα τάσης της μπαταρίας και θα τα μεταδίδει στον κεντρικό υπολογιστή του ρομποτικού συστήματος, στον οποίο θα λειτουργεί μία διεργασία, που θα λαμβάνει την πληροφορία αυτή, θα την επεξεργάζεται κατάλληλα (πχ. φιλτράρισμα θορύβου) και θα εξάγει συμπεράσματα και θα ειδοποιεί τον επιβλέπον / χειριστή, σε περίπτωση που η μπαταρία χρειάζεται φόρτιση ή σε περίπτωση που παρεκκλίνει από τα επιτρεπτά όρια.

Για την μέτρηση της τάσης της μπαταρίας, απαιτείται ένας αισθητήρας που θα μετατρέπει την αναλογική τάση σε ψηφιακή πληροφορία. Τον σκοπό αυτό εξυπηρετούν οι *Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό (ADC)*, οι οποίοι μετατρέπουν μία αναλογική τάση σε έναν ψηφιακό αριθμό. Η διαδικασία της μετατροπής, περιλαμβάνει κβαντισμό και περιοδική δειγματοληψία, της τάσης εισόδου και σαν αποτέλεσμα εισάγει ένα μικρό σφάλμα μετατροπής, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση, δεν επηρεάζει, σημαντικά, την εφαρμογή. Οι αισθητήρες ADC, περιγράφονται, συνήθως, από μία μέγιστη τάση εισόδου (πχ. 5V). Επειδή, όμως στην ρομποτική πλατφόρμα χρησιμοποιούνται μπαταρίες LiPo, με ονομαστική τάση 22.2V (μέγιστη τάση 25.2V), απαιτείται μία κλιμακώση της τάσης εισόδου. Για τον λόγο αυτό, η τάση εισόδου του μετατροπέα ADC, κλιμακώνεται, μέσω ενός διαιρέτη τάσης, με σχέση 1:10, από 0-25.2V σε 0-2.52V. Επίσης, λόγω των μεγάλων διαταραχών, στην τάση της μπαταρίας, κατά την λειτουργία της ρομποτικής πλατφόρμας, χρησιμοποιήθηκε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RC.



Σχήμα 2.11: Στάδια επεξεργασίας τάσης μπαταρίας για μέτρηση της σε ADC.

Κινητήρας

Το τηλεκατευθυνόμενο όχημα GroundPounder, αρχικά, περιελάμβανε έναν *Brushed DC* ηλεκτρικό κινητήρα, με μέγιστη ταχύτητα, περίπου, 30 000 rpm, ο οποίος ελεγχόταν από έναν ελεγκτή ESC, με δυνατότητες ελέγχου ταχύτητας και φοράς. Παρόλα αυτά, λόγω της μικρής ακρίβειας, ελέγχου ταχύτητας και την απουσία κωδικοποιητή ή άλλων αισθητήρων για την παροχή μετρήσεων, σχετικά την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα, κάθε στιγμή, σε συνδυασμό, με τις υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας των ρομποτικών εφαρμογών, κρίθηκε σκόπιμο, το εν λόγω σύστημα κινητήρα και ελεγκτή, να αντικατασταθεί.



Σχήμα 2.12: Ο κινητήρας Brushed 540 του τηλεκατευθυνόμενου οχήματος GroundPounder.



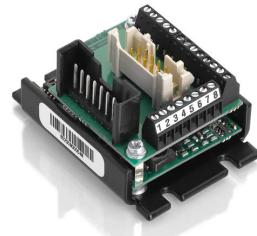
Σχήμα 2.13: Ο ελεγκτής ESC B7003SR του τηλεκατευθυνόμενου οχήματος GroundPounder.

Για την αντικατάσταση, λοιπόν του παραπάνω συστήματος κινητήρα και ελεγκτή, επιλέχθηκαν, από τον διαθέσιμο εξοπλισμό της ομάδας P.A.N.D.O.R.A, ένας κινητήρας, με αντίστοιχο ελεγκτή, της εταιρείας *maxon motor*. Ο κινητήρας <TODO: τύπος>, είναι ένας *Brushless EC* κινητήρας, με μέγιστη ταχύτητα 18000 rpm, με ψηφιακό κωδικοποιητή (*encoder*), για μέτρηση της θέσης του άξονα του κινητήρα, όπως επίσης και αισθητήρα *Hall* για μέτρηση των στροφών του κινητήρα, ανά λεπτό. Επίσης,

περιλαμβάνει κιβώτιο ταχυτήτων(gearbox), με σχέση 1:66. Αντίστοιχα, ως ελεγκτής, επιλέχθηκε ο EPOS 24/1, της maxon motor. Ο ελεγκτής αυτός, αποτελεί ένα μικρού μεγέθους, ψηφιακό, έξυπνο ελεγκτή, με δυνατότητες ελέγχου θέσης, ταχύτητας και ρεύματος.

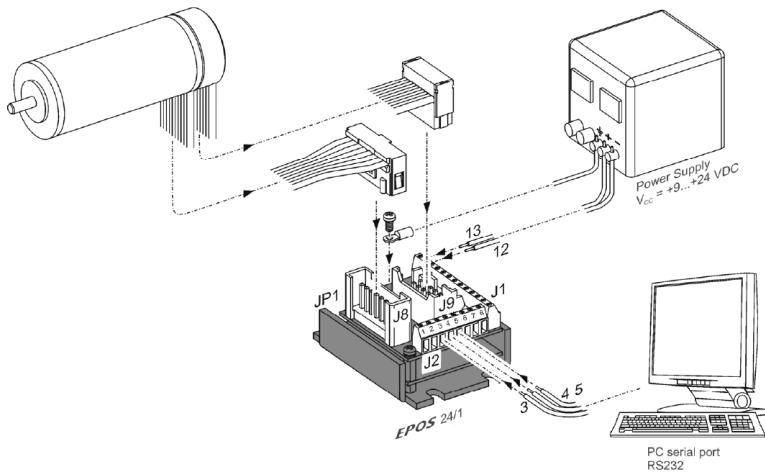


Σχήμα 2.14: Ο κινητήρας maxon EC <TODO: τύπος και σωστή εικόνα>, της maxon motor.



Σχήμα 2.15: Ο έξυπνος ελεγκτής κινητήρα, EPOS 24/1, της maxon motor [1].

Ο κινητήρας <TODO: τύπος>, συνδέεται με τον ελεγκτή EPOS 24/1, μέσω δύο καλωδίων, ένα για τον έλεγχο του κινητήρα και για λήψη μετρήσεων από τον αισθητήρα Hall και το άλλο, για λήψη μετρήσεων από τον ψηφιακό κωδικοποιητή. Ο ελεγκτής EPOS 24/1, επίσης, απαιτεί σύνδεση σε τροφοδοσία 9-24VDC, 1A, ενώ παρόλληλα, για επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή, χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας RS232, χωρίς χειραψία, μέσω της ελάχιστης συνδεσμολογίας RS232 (RX, TX, Ground).



Σχήμα 2.16: Καλωδίωση Κινητήρα, Ελεγκτή και Υπολογιστή [1].

Ο ελεγκτής EPOS 24/1, όπως προαναφέρθηκε, επιτρέπει την επικοινωνία με τον κεντρικό υπολογιστή της ρομποτικής πλατφόρμας, μέσω του πρωτοκόλλου διεπαφής RS232. Παρόλα αυτά, ο κεντρικός υπολογιστής, δεν διαθέτει διεπαφή RS232 και επομένως, απαιτείται, ένας ενδιάμεσος κόμβος, ο οποίος θα καθιστά δυνατή την επικοινωνία μεταξύ τους. Το ρόλο αυτό, στην προκειμένη περίπτωση, εξυπηρετεί ένα μετατροπέας διεπαφής RS232 σε USB (σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17: Μετατροπέας διεπαφής RS232 σε USB.

Σερβοκινητήρες

Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες, που επιτρέπουν ακριβή έλεγχο θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης. Οι συμβατικοί σερβοκινητήρες αποτελούνται από έναν DC κινητήρα, σε συνδυασμό με γρανάζια μετάδοσης, έναν αισθητήρα θέσης, συνήθως περιστροφικό κωδικοποιητή (*rotary encoder*) και ένα κύκλωμα ελέγχου. Οι απλοί, συμβατικοί σερβοκινητήρες ελέγχονται, μέσω σημάτων Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμού (PWM), αλλά υπάρχει, βέβαια και μία κατηγορία σερβοκινητήρων, οι λεγόμενοι *έξυπνοι σερβοκινητήρες* (*smart servo motors*), οι οποίοι έχουν ενσωματωμένο μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής, αυτός, προσφέρει, υψηλότερη ακρίβεια ελέγχου, ευρωστία στο θόρυβο και αμφίδρομη επικοινωνία, μέσω σειριακού πρωτοκόλλου, συνήθως TTL Full-Duplex ή Half-Duplex και RS485. Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα, των έξυπνων σερβοκινητήρων, έναντι των συμβατικών, είναι η παροχή πληροφορίας θέσης (position feedback), εξαιρετικής σημασίας για ρομποτικές εφαρμογές.

Στην ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck* χρησιμοποιούνται συνολικά τέσσερις σερβοκινητήρες, δύο από τους οποίους είναι συμβατικοί και οι άλλοι δύο, έξυπνοι.

Οι δύο συμβατικοί σερβοκινητήρες, χρησιμοποιούνται στο σύστημα τετραδιεύθυνσης της ρομποτικής πλατφόρμας, που θα αναλυθεί στην αντίστοιχη ενότητα. Είναι τύπου *Hitek HS-7954TH ??? <TODO>*, με ροπή $15kg/cm$ στα $6V$ και ανάλυση *<TODO : Resolution >*.

Ο έλεγχος των δύο σερβοκινητήρων πραγματοποιείται από έναν ελεγκτή *Micro Maestro 6 - Channel USB Servo Controller*, της *Pololu*. Ο ελεγκτής, αυτός, προσφέρει αποδοτικό έλεγχο σερβοκινητήρων, υψηλής ακρίβειας, με ενσωματωμένο έλεγχο ταχύτητας και επιτάχυνσης, έχει κανάλια ελέγχου και επικοινωνία, μέσω σειριακού πρωτοκόλλου *USB*.



Σχήμα 2.18: Σερβοκινητήρας Hitek HS-7954TH.



Σχήμα 2.19: Pololu Micro Maestro 6-Channel USB Servo Controller



Σχήμα 2.20: Σερβοκινητήρας στρέψης των τροχών.

Οι δύο έξυπνοι σερβοκινητήρες, χρησιμοποιούνται ως μηχανισμός σταθεροποίησης (*Pitch-Roll Stabilizer*) του *Σαρωτή Λέιζερ*, που αναφέρθηκε παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορία για την

κλίση του οχήματος, μέσω της πυξίδας *Compass OS4000*. Ο μηχανισμός αυτός είναι απαραίτητος για την αξιόπιστη χαρτογράφηση χώρου με ανώμαλο έδαφος.

Οι έξυπνοι σερβοκινητήρες του μηχανισμού σταθεροποίησης του Σαρωτή Λέιζερ, είναι τύπου *Dynamixel AX-12A*, της *Robotis*. Οι έξυπνοι σερβοκινητήρες *Dynamixel AX-12*, έχουν την δυνατότητα, να παίρνουν μετρήσεις, σχετικά με την ταχύτητα, θέση, θερμοκρασία, τάση και φορτίο και να αντιδρούν ανάλογα με την περίπτωση και να μεταδίδουν αυτήν την πληροφορία, στον υπολογιστή του ρομποτικού συστήματος.



Σχήμα 2.21: Σερβοκινητήρας Dynamixel AX-12A, της Robotis.

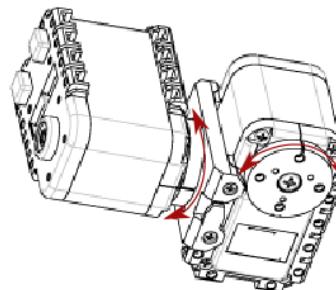
| Προδιαγραφές | Dynamixel AX-12A |
|------------------------------------|--|
| Τροφοδοσία | 9 – 12VDC, 900mA |
| Σειριακή Διεπαφή | 3-pin TTL Half-Duplex |
| Επικοινωνίας | 7343bps 1Mbps |
| Περιστροφή | 300°, ή συνεχής περιστροφή |
| Μέγιστη Ροπή | 15.3kg · cm |
| Μέγιστη Ταχύτητα (χωρίς φορτίο) | 59 RPM 0.169sec/60° |
| Feedback | Θέσης, Φορτίου, Θερμοκρασίας, Τάσης |
| Διαστάσεις | 32 × 50 × 40mm |

Πίνακας 2.4: Προδιαγραφές σερβοκινητήρα Dynamixel AX-12A, της Robotis

Η επικοινωνία, μεταξύ του υπολογιστή και των έξυπνων σερβοκινητήρων, επιτυγχάνεται μέσω του αντάπτορα *USB2Dynamixel*, ο οποίος επικοινωνεί με τον υπολογιστή, μέσω σειριακού πρωτοκόλλου *USB* και με τους έξυπνους σερβοκινητήρες, μέσω σειριακής επικοινωνίας *TTL*. Επίσης, οι δύο έξυπνοι σερβοκινητήρες, συνδέονται, μεταξύ τους, σειριακά, μέσω τοπολογίας *Daisy Chain*.



Σχήμα 2.22: Αντάπτορας USB2Dynamixel, της Robotis.



Σχήμα 2.23: Διάταξη Pitch-Roll του σταθεροποιητή του σαρωτή λέιζερ.

Ασύρματη Επικοινωνία

Η προετοιμασία και ο χειρισμός της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*, ή η επίβλεψη της, κατά την αυτόνομη λειτουργία, από τον χειριστή/επιβλέποντα, απαιτεί έναν πρόσθετο υπολογιστή, ο οποίος θα συνιστά τον σταθμό χειρισμού/επίβλεψης. Η επικοινωνία, μεταξύ των δύο υπολογιστικών συστημάτων, μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε ενσύρματα, μέσω μίας διασύνδεσης διεπαφής *Ethernet*,

είτε ασύρματα, μέσω ενός πομποδέκτη ασύρματης επικοινωνίας *Wi-Fi*, σε συνδυασμό με έναν δρομολογητή *Wi-Fi* (*Wi-Fi router*) που αποτελεί και την πιο πρακτική λύση, αν αναλογιστεί κανείς, ότι σε αντίθετη περίπτωση, ο χειριστής, θα πρέπει να κυνηγάει το ρομπότ από πίσω, με κίνδυνο, πρόκλησης ατυχήματος, πιθανή αποσύνδεση, αλλά και πιθανή παρεμβολή στις μετρήσεις των αισθητήρων.

Η παραπάνω αποίτηση, ικανοποιείται, μέσω ενός αντάπτορα *TP-Link WiFi N900 TL-WDN4200*, ο οποίος εικονίζεται στο σχήμα 2.24, μαζί με τις προδιαγραφές του.



Σχήμα 2.24: TP-Link Wi-Fi USB Adapter N900 TL-WDN4200.

| Προδιαγραφές | TP-Link Wi-Fi USB Adapter N900 TL-WDN4200 |
|--------------|---|
| Σύνδεση | USB 2.0 |
| Ταχύτητα | Dual Band $2 \times 450 Mbps$ |
| Πρότυπο | IEEE 802.11b/g/n |
| Συχνότητα | 2.4/5GHz |
| Ασφάλεια | WEP (64-128bit) |

Πίνακας 2.5: Προδιαγραφές TP-Link Wi-Fi USB Adapter N900 TL-WDN4200.

Διασύνδεση Υποσυστημάτων

Στις παραπάνω ενότητες, αναφέρθηκαν τα επιμέρους υποσυστήματα της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck* και έγινε φανερό, ότι δεν χρησιμοποιούνται οι ίδιες διεπαφές επικοινωνίας σε κάθε συσκευή, αλλά και ότι κάθε συσκευή, χρησιμοποιεί το δικό της πρωτόκολλο επικοινωνίας. Το μόνο κοινό όλων των υποσυστημάτων, είναι η διασύνδεση και η συγκέντρωση της πληροφορίας, στον κεντρικό κόμβο του συστήματος, τον υπολογιστή *Odroid-XU4*.

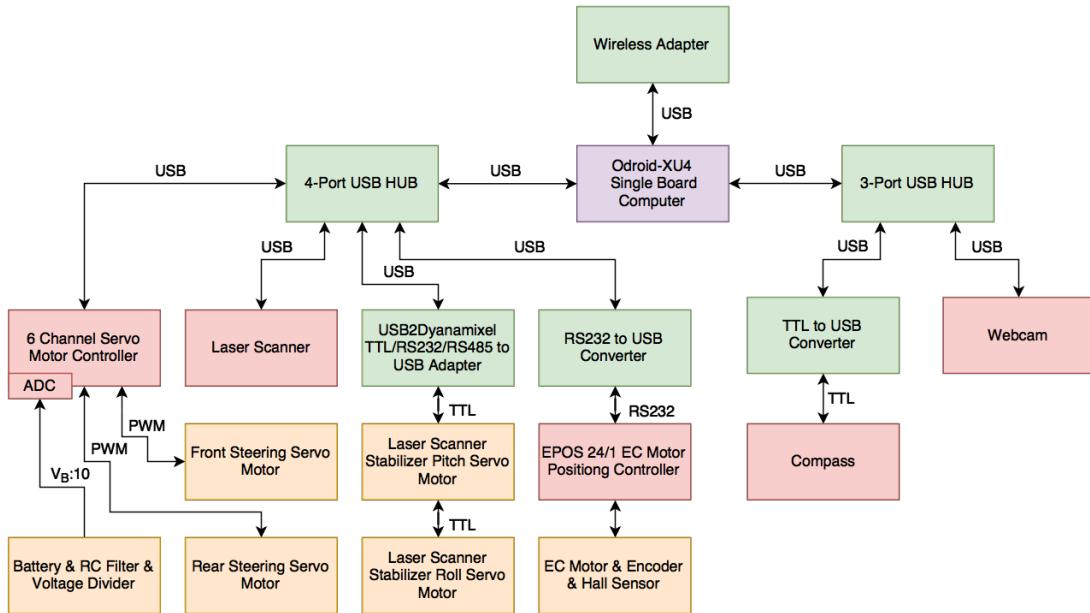
Ένα σημαντικό πρόβλημα, του υπολογιστή *Odroid-XU4*, αποτελεί ο ανεπαρκής, για την συγκεκριμένη εφαρμογή, αριθμός θυρών διεπαφής σειριακής επικοινωνίας USB. Επομένως, για την ταυτόχρονη λειτουργία, όλων των επιμέρους αισθητήρων και ελεγκτών του συστήματος, κρίθηκε απαραίτητη η επέκταση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*, με την προσθήκη δύο διακλαδωτών USB (*USB Hubs*).

<TODO: Add photos of USB hubs.>

Η διασύνδεση των διεπαφών, όλων των επιμέρους επιμέρους υποσυστημάτων, της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.25.

Σύστημα Τροφοδοσίας

Από την παρουσίαση των επιμέρους υποσυστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*, που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες παραγγάφους, προκύπτει, ότι, κάθε υποσύστημα - συσκευή, περιλαμβάνει διαφορετικές προδιαγραφές τροφοδοσίας. Επομένως, απαιτείται, ένα εκτενές και πλήρες σύστημα τροφοδοσίας, που να προσφέρει τις απαιτούμενες προδιαγραφές για κάθε υποσύστημα ξεχωριστά, για την ταυτόχρονη λειτουργία, όλων μαζί, αλλά και να επιτρέπει περιθώρια επέκτασης. Επίσης, θα πρέπει να περιλαμβάνει, επαρκής απομόνωση της τροφοδοσίας των ευαίσθητων ηλεκτρονικών υποσυστημάτων, από άλλα υποσυστήματα που εισάγουν θόρυβο στις γραμμές τροφοδοσίας, όπως οι κινητήρες και οι σερβοκινητήρες.



Σχήμα 2.25: Διασύνδεση διεπαφών των επιμέρους υποσυστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*.

Όπως, παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.28, ως πηγή τροφοδοσίας της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*, χρησιμοποιείται μία μπαταρία Λιθίου-Πολυμερών (σχήμα 2.26) με ονομαστική τάση 22.2V, μέγιστη τάση 25.2V (100% φόρτιση) και 3700/4000/5000mAh. Η τροφοδοσία που παρέχει η μπαταρία, τροφοδοτείται σε έναν διακλαδωτή (*Battery Distribution Board*), από τον οποίο τροφοδοτούνται ο ελεγκτής *EPOS 24/1* που τροφοδοτεί και τον κινητήρα του οχήματος, ο 12V DC-DC μετατροπέας και το τροφοδοτικό M4-ATX.



Σχήμα 2.26: Μπαταρία Gens ace, LiPo, 22.2V, 4000mAh.

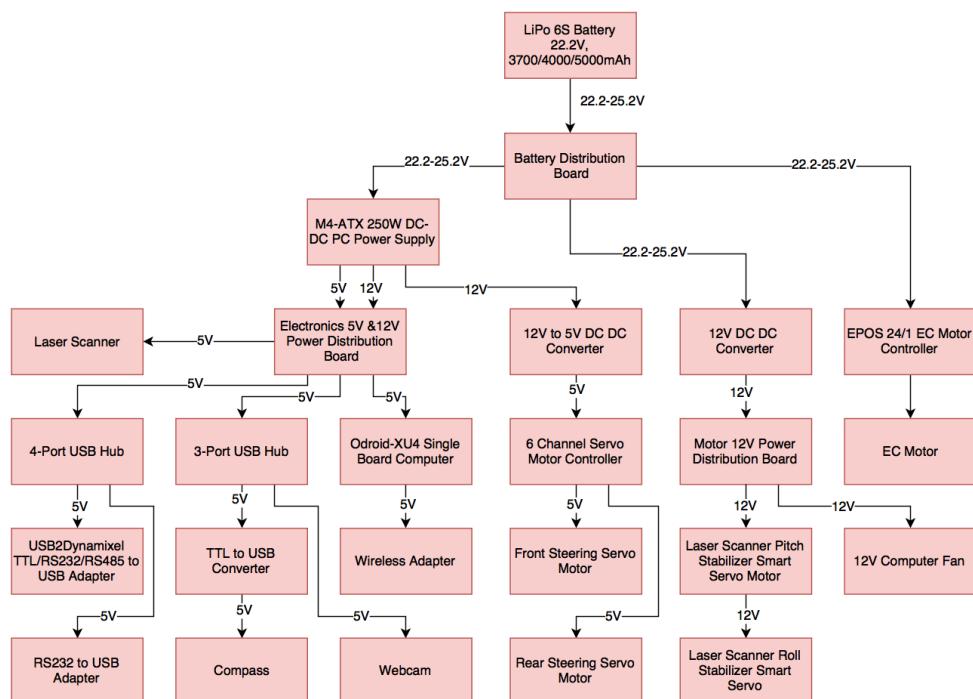
Ο 12V DC-DC μετατροπέας τροφοδοτεί με 12V, μέσω ενός διακλαδωτή (*Motor Distribution Board*) τους έξιπνους σερβοκινητήρες *Dynamixel*, του σταθεροποιητή *Pitch-Roll* του σαρωτή λέιζερ, όπως επίσης και έναν ανεμιστήρα, υπεύθυνο, για την ψύξη του υπολογιστή *Odroid-XU4*.

Το τροφοδοτικό M4-ATX, παράγει εξόδους τροφοδοσίας 5V και 12V και τροφοδοτεί την πλειονότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας. Αρχικά, τροφοδοτεί απευθείας έναν 5V DC-DC μετατροπέα, ο οποίος χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί τους σερβοκινητήρες του συστήματος στρέψης - τετραδιεύθυνσης της ρομποτικής πλατφόρμας, απομονώνοντας, ταυτόχρονα την τροφοδοσία των σερβοκινητήρων από την τροφοδοσία των υπόλοιπων ηλεκτρονικών υποσυστημάτων, που παρουσιάζουν ευαισθησία στον θόρυβο. Τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά υποσυστήματα της ρομποτικής πλατφόρμας, τροφοδοτούνται, από το τροφοδοτικό M4-ATX, μέσω ενός διακλαδωτή (*Electronics Distribution Board*), είτε άμεσα, όπως ο υπολογιστής *Odroid-XU4*, ο σαρωτής λέιζερ και οι διακλαδωτές USB (*USB Hubs*), είτε μέσω του υπολογιστή και των διακλαδωτών USB.



Σχήμα 2.27: Επιμέρους τμήματα συστήματος τροφοδοσίας.

<TODO: Insert distribution boards>



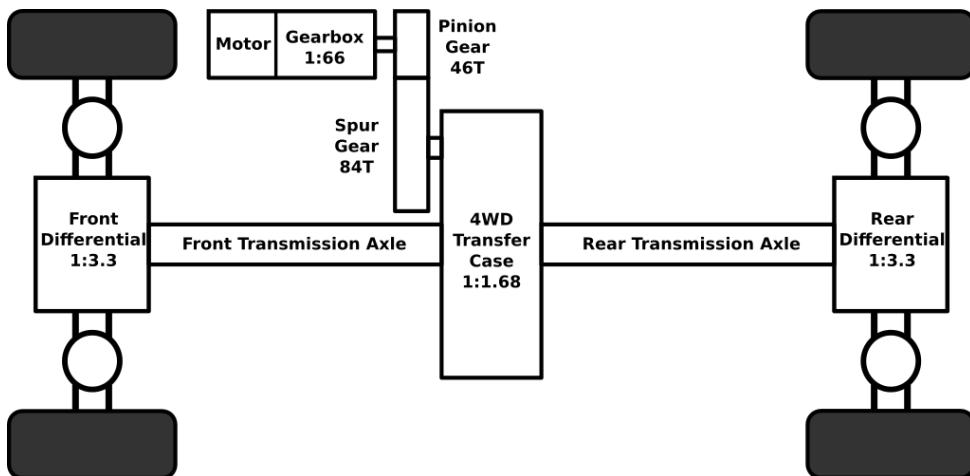
Σχήμα 2.28: Σύστημα Τροφοδοσίας των επιμέρους υποσυστημάτων της ρομποτικής πλατφόρμας Monstertruck.

2.2 Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης

Ένα αυτοκίνητο όχημα, για να κινηθεί, απαιτεί την ύπαρξη ενεργοποιητών(*actuators*), οι οποίοι μετατρέπουν την ενέργεια από μία πηγή τροφοδοσίας και ένα σήμα ελέγχου σε μηχανική κίνηση. Τον σκοπό αυτό, εξυπηρετούν οι κινητήρες και στην προκειμένη περίπτωση, για την επίτευξη της μηχανικής κίνησης του υλοποιημένου ρομποτικού οχήματος, χρησιμοποιούνται ένας κινητήρας, ο οποίος, μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, μεταδίδει την περιστροφική κίνηση του και στους τέσσερις τροχούς του οχήματος (*tetrakínηση*) και δύο σερβοκινητήρες, οι οποίοι στρίβουν και τους τέσσερις τροχούς, με ανεξάρτητη στρέψη των μπροστινών, από τους πίσω τροχούς (*tetradiεύθυνση*). Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάλυση των μηχανισμών *tetrakínησης* και *tetradiεύθυνσης* της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*.

2.2.1 Σύστημα Τετρακίνησης

Η μετάδοση της κίνησης, από τον μοναδικό κινητήρα του οχήματος, προς τους τέσσερις τροχούς, δηλαδή η τετρακίνηση επιτυγχάνεται, μέσω του συστήματος μετάδοσης κίνησης (*drivetrain*), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.29. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει, συνολικά τέσσερα στάδια μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης του κινητήρα, προς κάθε τροχό, όπου κάθε στάδιο εισάγει ένα λόγο μείωσης των στροφών, αλλά ταυτόχρονα, αντίστοιχο λόγο αύξησης της ροπής στρέψης.

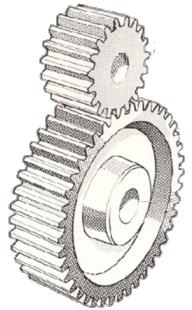


Σχήμα 2.29: Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης (Drivetrain) της ρομποτικής πλατφόρμας *Monstertruck*.

Το πρώτο στάδιο, αποτελεί το κιβώτιο ταχυτήτων - μειωτήρας (*gearbox*) του κινητήρα, το οποίο περιγράφεται από ένα λόγο μετάδοσης $1 : 66$. Ο λόγος, αυτός, μειώνει την μέγιστη περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα, από $18\,000\text{ rpm}$ σε $18\,000 : 66 = 272.72\text{ rpm}$.

Το δεύτερο στάδιο μετάδοσης, αποτελείται από δύο γρανάζια, το *Πινιόν* (*Pinion Gear*) και *Ωθησης* (*Spur Gear*). Το γρανάζι *Πινιόν*, μεταδίδει την κίνηση από τον κινητήρα στο γρανάζι *Ωθησης*, το οποίο, με τη σειρά του μεταδίδει την κίνηση στο επόμενο στάδιο μετάδοσης. Το γρανάζι *Πινιόν* περιλαμβάνει 46 οδοντώσεις, ενώ το γρανάζι *Ωθησης*, 84, έχοντας ως αποτέλεσμα ένα λόγο μετάδοσης $46 : 81 = 1 : 1.76$. Με την μείωση του δεύτερου σταδίου, η μέγιστη ταχύτητα μειώνεται στα $272.72 : 1.76 = 154.96\text{ rpm}$.

Το τρίτο στάδιο μετάδοσης και σημαντικότερο, για την επίτευξη *tetrakínησης*, περιλαμβάνει το κιβώτιο μετάδοσης (*Transfer Case*) του μπροστινού και του πίσω άξονα, που φαίνεται στο σχήμα 2.31. Το κιβώτιο μετάδοσης, περιλαμβάνει δύο γρανάζια, το γρανάζι μετάδοσης (*Transmission Gear*) και το



Σχήμα 2.30: Γρανάζια Πινιόν και Ωθησης.

διαφορικό γρανάζι (Differential Gear). Η περιστροφική κίνηση μεταδίδεται, από το γρανάζι Ωθησης, προς το γρανάζι μετάδοσης, μέσω ενός μηχανισμού σφιγκτήρα ολίσθησης (*slipper clutch*), που επιτρέπει την αποσύμπλεξη των γραναζιών, μέσω ολίσθησης, σε περίπτωση, υψηλής ροπής στους τροχούς, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά στα γρανάζια και στους άξονες μετάδοσης. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, το γρανάζι μετάδοσης, μεταδίδει την περιστροφική κίνηση προς το διαφορικό γρανάζι και έπειτα προς τους δύο άξονες μετάδοσης, με λόγο μετάδοσης $1 : 1.68$. Επομένως, έχουμε μία επιπλέον μείωση των στροφών, με αποτέλεσμα $154.96 : 1.68 = 92.24 \text{ rpm}$.



Σχήμα 2.31: Το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης (Transfer Case) του οχήματος GroundPounder.

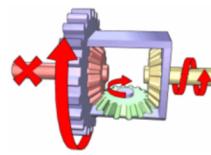
Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο μετάδοσης της κίνησης, αποτελείται από δύο διαφορικά (*differential*), ένα για τους μπροστινούς τροχούς και ένα για τους πίσω. Το διαφορικό είναι ένας μηχανισμός, ο οποίος μετατρέπει την κατεύθυνση κίνησης, από την ευθύγραμμη, του άξονα μετάδοσης, στην εγκάρσια, των ημιαξόνων κάθε τροχού. Παράλληλα, επιτρέπει σε δύο τροχούς, έναν αριστερό και ένα δεξιό, να κινούνται με διαφορετική περιστροφική ταχύτητα, ανάλογα με την πρόσφυση σε κάθε έναν, από αυτούς. Ο μηχανισμός, αυτός, είναι απαραίτητος, καθώς, όταν ένα όχημα προσπαθεί να στρίψει, ακολουθώντας μία καμπύλη, οι τροχοί που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά της καμπύλης, διοινόντων μεγαλύτερη απόσταση, από τους εσωτερικούς τροχούς και άρα θα πρέπει να κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τέλος, το κάθε διαφορικό εισάγει, ακόμη, έναν τελευταίο λόγο μείωσης των στροφών, της τάξης του $1 : 3.3$, οπότε η τελική μέγιστη ταχύτητα περιστροφής των τροχών προκύπτει $92.24 : 3.3 = 27.95 \text{ rpm}$.

Επομένως, η σχέση μετάδοσης της περιστροφικής ταχύτητας, από τον κινητήρα, στους τροχούς προκύπτει:

$$\omega_{wheel} = \omega_{motor} / (\lambda_{gearbox} \times \lambda_{spur_pinion} \times \lambda_{transfer_case} \times \lambda_{differential}) = \omega_{motor} / 644 \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.32: Το διαφορικό (Differential) του οχήματος GroundPounder.

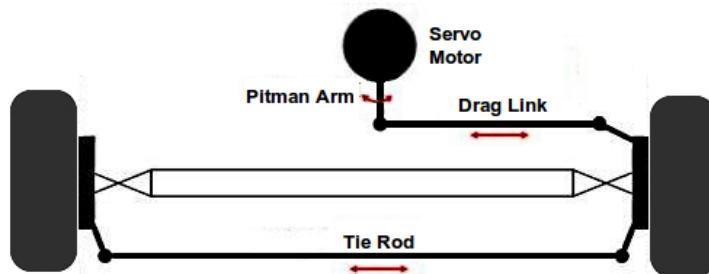


Σχήμα 2.33: Λειτουργία ενδεικτικού μηχανισμού διαφορικού.

2.2.2 Σύστημα Τετραδιεύθυνσης

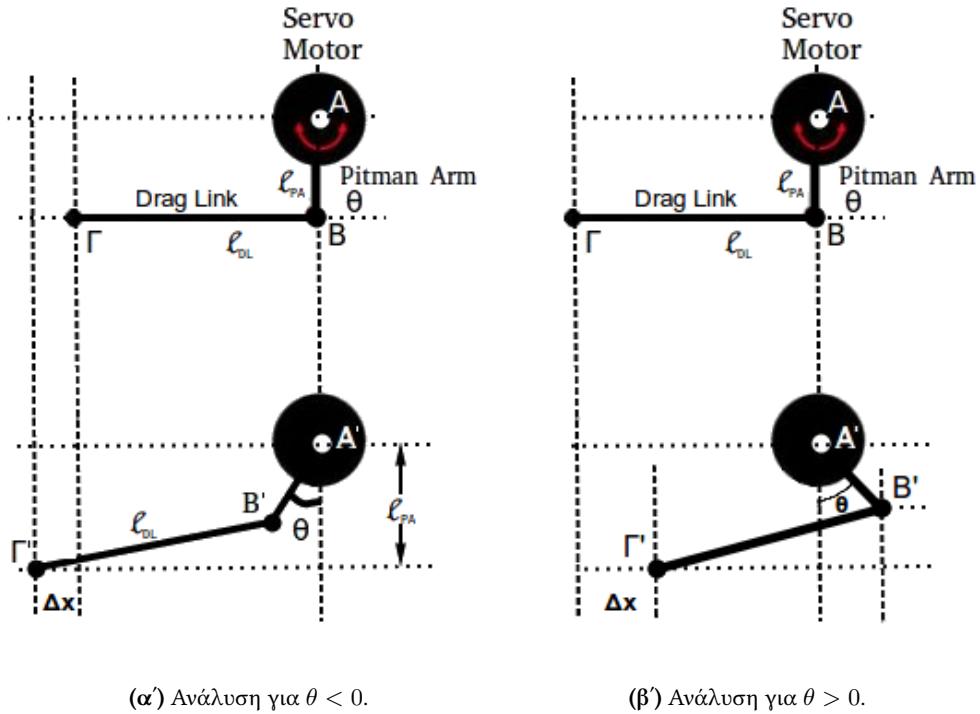
Η ρομποτική πλατφόρμα *Monstertruck*, περιλαμβάνει δύο σερβοκινητήρες, υπεύθυνους για την ανεξάρτητη στρέψη των μπροστινών και πίσω τροχών. Η ανεξάρτητη αυτή στρέψη, επιτρέπει στο όχημα να λειτουργεί με μπροστινή στρέψη (FWS), πίσω στρέψη (RWS), ή ταυτόχρονη στρέψη (τετραδιεύθυνση - 4WS) των τροχών. Στην ταυτόχρονη στρέψη, οι μπροστινοί τροχοί, μπορεί να στρίβουν, είτε, με την ίδια φορά (*Crab Steering*), είτε με αντίθετη (*Counter Steering*), από τους πίσω.

Εφόσον, υπάρχει ένας σερβοκινητήρας, για τους μπροστινούς τροχούς και ένας για τους πίσω, γεννάται το ερώτημα, πώς μεταδίδεται η στρέψη από έναν σερβοκινητήρα σε δύο τροχούς, έναν αριστερό και έναν δεξιό τροχό. Ο μηχανισμός, που λύνει το πρόβλημα, στην προκειμένη περίπτωση, ονομάζεται *Μηχανισμός Στρέψης*, μέσω *Συνδέσμου Έλξης* (*Drag Link Steering Mechanism*). Ο μηχανισμός στρέψης του οχήματος GroundPounder αποτελείται από έναν σερβοκινητήρα, ένα *μπράτσο Pitman* (*Pitman Arm*), έναν σύνδεσμο έλξης (*Drag Link*) και έναν σύνδεσμο ένωσης των τροχών (*Tie Rod*), όπως επίσης και τις αρθρώσεις στρέψης των τροχών (*Wheel Steering Knuckles*).



Σχήμα 2.34: Μηχανισμός στρέψης με άξονα έλξης (Drag Link Steering Mechanism).

Η περιστροφική κίνηση του σερβοκινητήρα, μεταδίδεται μέσω του *μπράτσου Pitman* και μετατρέπεται σε μεταφορική κίνηση του συνδέσμου έλξης, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε στρέψη της άρθρωσης του δεξιού τροχού. Η στρέψη, τώρα, της δεξιάς άρθρωσης, παρασύρει τον σύνδεσμο ένωσης των αρθρώσεων στρέψης των τροχών σε μεταφορική κίνηση, η οποία, έχει σαν αποτέλεσμα την στρέψη και του αριστερού τροχού. Ακολούθως, αναλύεται η λειτουργία του μηχανισμού στρέψης, σε δύο βήματα. Πρώτα υπολογίζεται η μετατόπιση Δx του συνδέσμου έλξης, συναρτήσει της γωνίας στρέψης θ του σερβοκινητήρα και έπειτα, συναρτήσει της γωνίας στρέψης δ της άρθρωσης τροχού, με την οποία, είναι συνδεδεμένος ο σύνδεσμος έλξης.



Σχήμα 2.35: Μετάδοση κίνησης από τον σερβοκινητήρα και το μπράτσο Pitman στον σύνδεσμο έλξης.

Λαμβάνοντας την παραδοχή, ότι η άκρη (σημείο Γ) του συνδέσμου έλξης, κινείται, μόνο οριζόντια και όχι κάθετα και με βάση το σχήμα 2.35 και απλή γεωμετρική ανάλυση, μπορεί να εξαχθεί η σχέση μεταξύ της γωνίας στρέψης θ του σερβοκινητήρα και της μετατόπισης Δx του συνδέσμου έλξης, ως:

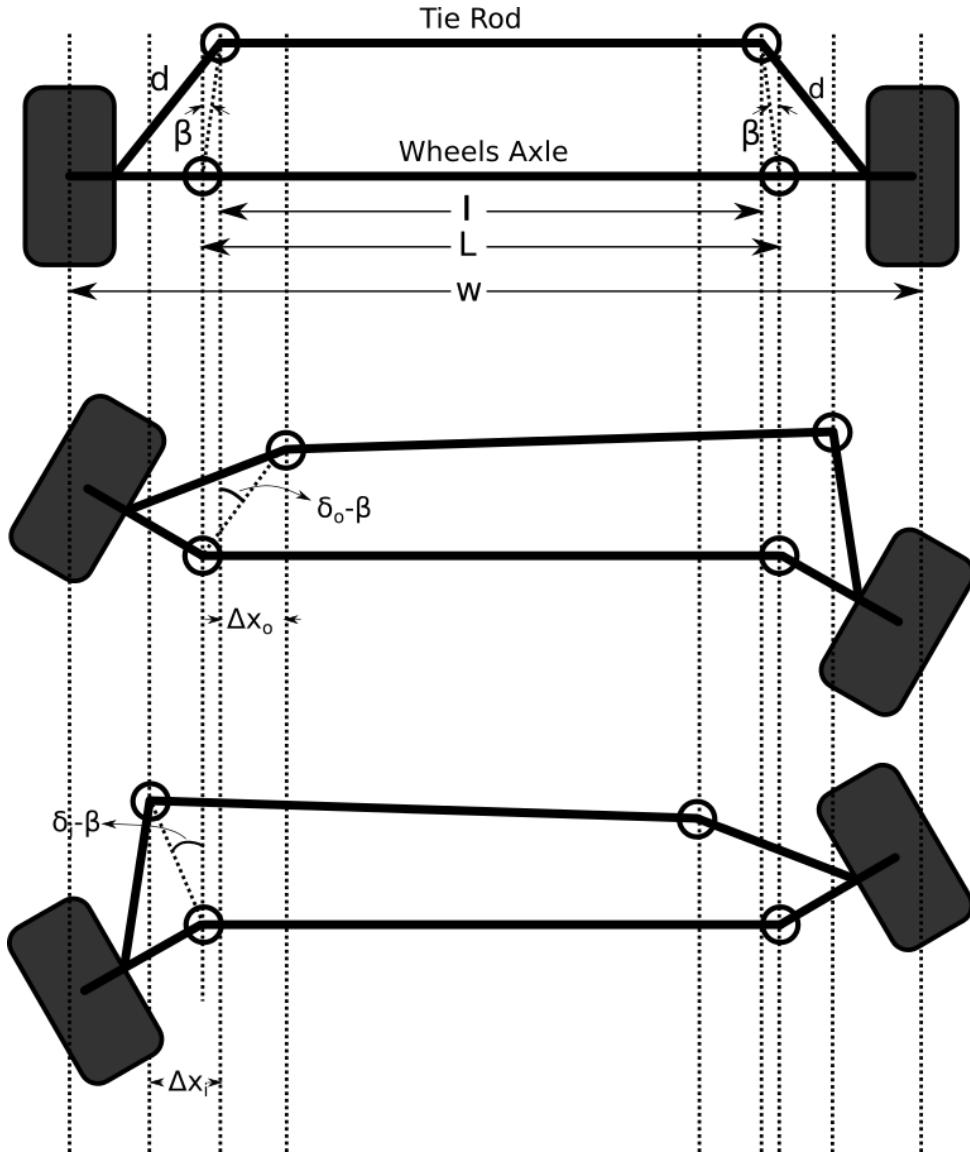
$$\Delta x = \begin{cases} \sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))^2} + l_{PA} \sin(|\theta|) - l_{DL}, & \theta < 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))^2} - l_{PA} \sin(|\theta|) - l_{DL}, & \theta > 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου l_{DL} είναι το μήκος του συνδέσμου έλξης και l_{PA} είναι το μήκος του μπράτσου *Pitman*.

Με βάση το σχήμα 2.36, μέσω γεωμετρικής ανάλυσης, προκύπτει ότι, η μετατόπιση του σύνδεσμου έλξης Δx , συναρτήσει της γωνίας στρέψης, του συνδεδεμένου τροχού, αριστερού, στην προκειμένη περίπτωση, για τις περιπτώσεις, ο τροχός να είναι στην εσωτερική ή στην εξωτερική πλευρά της στροφής, προκύπτει:

$$\Delta x_i = d \sin(\delta_i - \beta) + d \sin(\beta) \quad (2.3)$$

$$\Delta x_o = d \sin(\delta_o + \beta) - d \sin(\beta) \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.36: Τραπεζοειδής Μηχανισμός στρέψης των τροχών.

Εξισώνοντας, τώρα, τις σχέσεις (2.2), (2.3), (2.4), προκύπτει η σχέση μεταξύ της γωνίας στρέψης του σερβοκινητήρα και της γωνίας στρέψης του αριστερού τροχού, για τις περιπτώσεις που είναι εσωτερικά (δ_i) στην στροφή και εξωτερικά (δ_o):

$$\delta_i = \beta + \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))} + l_{PA} \sin |\theta| - l_{DL} - d \sin \beta}{d} \right) \quad (2.5)$$

$$\delta_o = -\beta + \sin^{-1} \left(\frac{-\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))} - l_{PA} \sin |\theta| - l_{DL} + d \sin \beta}{d} \right) \quad (2.6)$$

Ο υπολογισμός της γωνίας στρέψης, του απέναντι τροχού, δηλαδή, στην προκειμένη περίπτωση,

του δεξιού τροχού, προκύπτει από τις εξισώσεις τραπεζοειδούς μηχανισμού στρέψης τροχών [2], προσαρμοσμένες στην παρούσα τοπολογία:

$$\sin(\beta + \delta_o) + \sin(\beta - \delta_i) = \frac{L}{d} + \sqrt{\left(\frac{L}{d} - w \sin \beta\right)^2 - \left(\cos(\beta - \delta_i) - \cos(\beta + \delta_o)\right)^2} \quad (2.7)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή για την δ_i , στην εξίσωση (2.7) θα πρέπει να εφαρμοστεί, ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, για την εύρεση της δ_o και αντίστροφα.

Για την απλοποίηση της όλης διαδικασίας μετατροπής της γωνίας στρέψης του σερβοκινητήρα, σε γωνίες στρέψης των τροχών και αντίστροφα, χρησιμοποιήθηκαν πολυωνυμικές προσεγγίσεις των σχέσεων μεταξύ αυτών, λύνοντας, επαναληπτικά και για όλες τις δυνατές τιμές, τις εξισώσεις (2.5), (2.6), (2.7).

$$\begin{aligned} \delta_{LF} &= -0.0082 \cdot \theta_F^5 - 0.0162 \cdot \theta_F^4 - 0.00605 \cdot \theta_F^3 - 0.0192 \cdot \theta_F^2 + 0.6691 \cdot \theta_F \\ \delta_{LR} &= 0.0082 \cdot \theta_R^5 + 0.0162 \cdot \theta_R^4 + 0.00605 \cdot \theta_R^3 + 0.0192 \cdot \theta_R^2 - 0.6691 \cdot \theta_R \\ \delta_{RF} &= 0.0126 \cdot \delta_{LF}^5 - 0.0432 \cdot \delta_{LF}^4 + 0.0067 \cdot \delta_{LF}^3 - 0.0851 \cdot \delta_{LF}^2 + 0.9997 \cdot \delta_{LF} + 0.0035 \\ \delta_{RR} &= -0.0126 \cdot \delta_{LR}^5 + 0.0432 \cdot \delta_{LR}^4 - 0.0067 \cdot \delta_{LR}^3 + 0.0851 \cdot \delta_{LR}^2 - 0.9997 \cdot \delta_{LR} - 0.0035 \\ \theta_F &= 0.5334 \cdot \delta_{LF}^5 + 0.2997 \cdot \delta_{LF}^4 + 0.2857 \cdot \delta_{LF}^3 + 0.0556 \cdot \delta_{LF}^2 + 1.4951 \cdot \delta_{LF} \\ \theta_R &= -0.5334 \cdot \delta_{LR}^5 - 0.2997 \cdot \delta_{LR}^4 - 0.2857 \cdot \delta_{LR}^3 - 0.0556 \cdot \delta_{LR}^2 - 1.4951 \cdot \delta_{LR} \end{aligned} \quad (2.8)$$

όπου

θ_F : γωνία στρέψης του μπροστινού σερβοκινητήρα

θ_R : γωνία στρέψης του πίσω σερβοκινητήρα

δ_{LF} : γωνία στρέψης του μπροστινού αριστερού τροχού

δ_{RF} : γωνία στρέψης του μπροστινού δεξιού τροχού

δ_{LR} : γωνία στρέψης του πίσω αριστερού τροχού

δ_{RR} : γωνία στρέψης του πίσω δεξιού τροχού

2.3 Κινηματική Ανάλυση

Ένα σύγχρονο αυτοκίνητο όχημα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, για να κινηθεί, περιλαμβάνει έναν κινητήρα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την περιστροφική κίνηση των μπροστινών (μπροστινοκίνηση), πίσω (πισωκίνηση) ή όλων (τετρακίνηση) των τροχών. Επίσης, περιλαμβάνει ένα σύστημα στρέψης των τροχών, είτε μπροστινών (μπροστινοδιεύθυνση), είτε πισινών (πισωδιεύθυνση), είτε και των τεσσάρων (τετραδιεύθυνση), έτσι ώστε να μπορεί να κινείται σε καμπύλες τροχιές και όχι μόνο ευθύγραμμα.

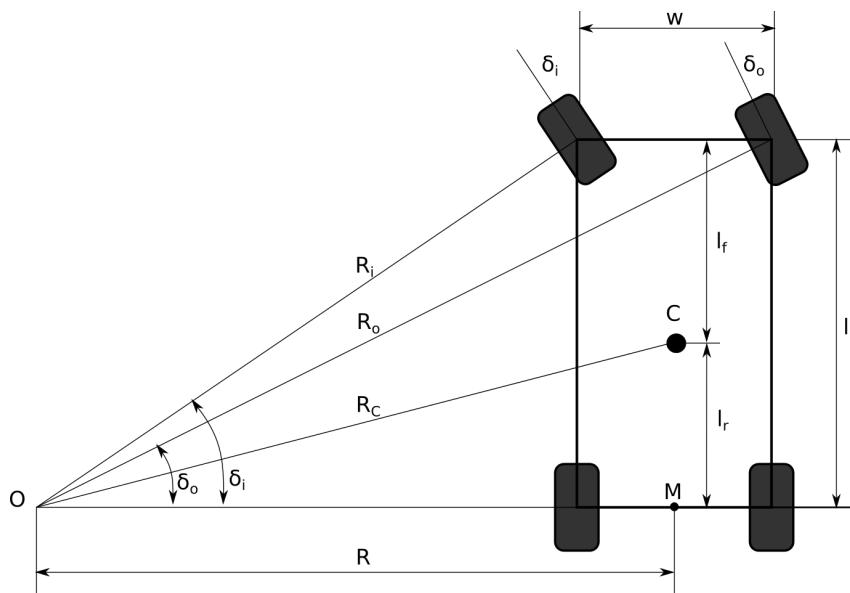
Η κινηματική ανάλυση του οχήματος, που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα, προσπαθεί να περιγράψει την επίδραση του ελέγχου κίνησης των τροχών του, στην κίνηση του οχήματος και στις μεταβολές της κατάστασης του. Η κατάσταση ενός άκαμπτου (rigid) ρομποτικού οχήματος, συνήθως περιγράφεται, από έξι μεταβλητές, τις καρτεσιανές συντεταγμένες του x , y , z και τις γωνίες Euler yaw, pitch, roll, ως προς ένα αυθαίρετο εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων. Στην προκειμένη περίπτωση, το πρόβλημα που εξετάζεται, περιορίζεται σε επίπεδο περιβάλλον και επομένως, ως κατάστασης του οχήματος, λαμβάνεται, η πόζα του, η οποία περιγράφεται από τις καρτεσιανές συνταγμένες του x , y στο επίπεδο και τον προσανατολισμό του θ , ως προς αυθαίρετο εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων.

$$s = [x \ y \ \theta]^T \quad (2.9)$$

TODO: Λίγα γενικά για κίνηση στο επίπεδο, ταχύτητες κλπ και τροχιά, ως σύνολο κυκλικών τροχιών

2.3.1 Κινηματικό Μοντέλο Ackermann

Τα συμβατικά αυτοκίνητα, που κυκλοφορούν στην αγορά, χρησιμοποιούν το λεγόμενο κινηματικό *Ackermann*. Το κινηματικό *Ackermann*, ορίζει μία συνθήκη, την λεγόμενη συνθήκη *Ackermann*, μεταξύ των τροχών στρέψης ενός αυτοκινήτου, που αν ικανοποιείται προβλέπει την κίνηση των τροχών, χωρίς ολίσθηση, σε χαμηλές ταχύτητες, όπου δεν λαμβάνονται υπόψιν δυναμικά φαινόμενα [2]. Η συνθήκη *Ackermann*, υποστηρίζει ότι για να κινείται ένα τετράτροχο όχημα χωρίς να ολισθαίνουν οι τροχοί του, θα πρέπει οι κάθετοι, στους τροχούς, άξονες να τέμνονται σε ένα κοινό σημείο, το οποίο ονομάζεται Στιγμιαίο Κέντρο Περιστροφής (Instantaneous Center of Rotation - ICR) και αποτελεί το κέντρο της στιγμιαίας κυκλικής τροχιάς που ακολουθεί το όχημα.



Σχήμα 2.37: Κινηματικό Μοντέλο Ackermann.

Λαμβάνοντας υπόψιν το σχήμα 2.37 προκύπτουν οι γωνίες στρέψης των τροχών ως

$$\tan(\delta_i) = \frac{l}{R - \frac{w}{2}} \quad \text{ή} \quad \cot(\delta_i) = \frac{R - \frac{w}{2}}{l} \quad (2.10)$$

$$\tan(\delta_o) = \frac{l}{R + \frac{w}{2}} \quad \text{ή} \quad \cot(\delta_o) = \frac{R + \frac{w}{2}}{l} \quad (2.11)$$

Αφαιρώντας τις εξισώσεις (2.10), (2.11), προκύπτει η συνθήκη Ackermann.

$$\cot \delta_i - \cot \delta_o = w/l \quad (2.12)$$

όπου

δ_i : γωνία στρέψης εσωτερικού (inner), ως προς την στροφή, τροχού.

δ_o : γωνία στρέψης εξωτερικού (outer), ως προς την στροφή, τροχού.

L : μεταξόνιο (wheelbase).

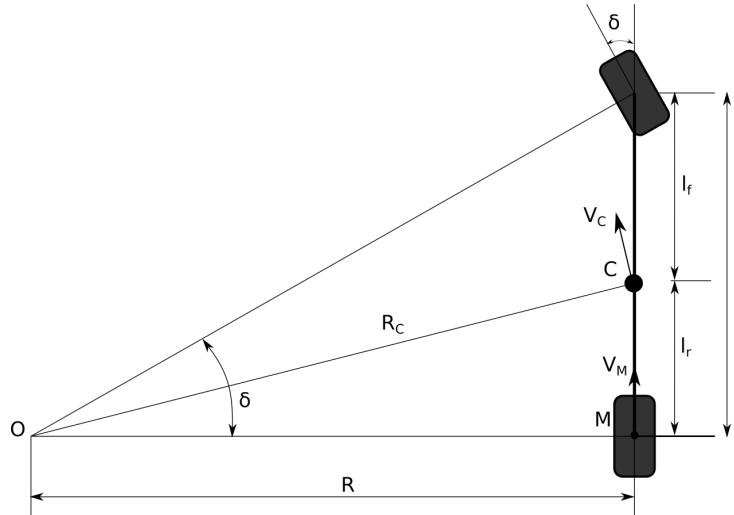
w : μετατρόχιο (track).

R : ακτίνα τροχιάς που εκτελεί το μεσαίο σημείο μεταξύ των πίσω τροχών.

Το όχημα, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.37, πραγματοποιεί μία κυκλική τροχιά γύρω από το Στιγματίο Κέντρο Περιστροφής Ο. Αν λάβοομε ως σημείο αναφοράς το κέντρο Μ του πίσω άξονα, τότε το όχημα εκτελεί μία κυκλική τροχιά, ακτίνας R , γύρω από το σημείο Ο. Η ακτίνα R , μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις εξισώσεις (2.10), (2.11), ως

$$R = l \frac{\cot \delta_i + \cot \delta_o}{2} = l \cot \delta = \frac{l}{\tan \delta} \quad (2.13)$$

όπου δ είναι ισοδύναμη γωνία στρέψης ποδηλάτου, με ίδιο μεταξόνιο και για ακτίνα τροχιάς R (σχήμα 2.38).



Σχήμα 2.38: Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου Ackermann.

Αντίστοιχα, ο υπολογισμός της ακτίνας R_c του κέντρου μάζας του οχήματος, με βάση το σχήμα 2.37, προκύπτει

$$R_c = \sqrt{R^2 + l_R^2} = \sqrt{R^2 + (l - l_F)^2} \quad (2.14)$$

όπου, l_R και l_F είναι η απόσταση του κέντρου μάζας του οχήματος από τον άξονα των μπροστινών και πίσω τροχών αντίστοιχα, όπου $l_R + l_F = l$.

Κατά την κίνηση σε κυκλική τροχιά, κάθε τροχός του οχήματος διαγράφει διαφορετική τροχιά από τους υπόλοιπους. Για παράδειγμα, στο σχήμα 2.37, για να καταστεί δυνατή η εκτέλεση της τροχιάς, γύρω από το Ο, χωρίς ολίσθηση, θα πρέπει οι τροχοί να κινούνται με διαφορετική γραμμική ταχύτητα, και άρα, καθένας, να περιστρέφονται με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα, ως προς την άξονα τους, ανάλογη της ακτίνας της τροχιάς που διαγράφει. Επίσης, οι τροχοί κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα $\dot{\theta}$, ως προς το Στιγμιαίο Κέντρο Περιστροφής Ο.

$$\dot{\theta}_{ir} = \dot{\theta}_{or} = \dot{\theta}_{if} = \dot{\theta}_{of} = \dot{\theta} \quad (2.15)$$

όπου

ir : εσωτερικός πισινός τροχός

or : εξωτερικός πισινός τροχός

if : εσωτερικός μπροστινός τροχός

of : εξωτερικός μπροστινός τροχός

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.15), την σχέση μεταξύ γωνιακής και γραμμικής ταχύτητας

$$v = \dot{\theta} \cdot R \quad (2.16)$$

η εξίσωση (2.15) μετασχηματίζεται στη μορφή

$$\frac{v_{ir}}{R_{ir}} = \frac{v_{or}}{R_{or}} = \frac{v_{if}}{R_{if}} = \frac{v_{of}}{R_{of}} = \dot{\theta} = \frac{v_c}{R_c} \quad (2.17)$$

Επομένως, με βάση τις δύο παραπάνω παρατηρήσεις, και την σχέση (2.17) μπορεί να υπολογιστεί η γραμμική ταχύτητα κάθε τροχού, ως

$$v_{if} = \dot{\theta} \cdot R_{if} = \dot{\theta} \cdot \sqrt{l^2 + (R - \frac{w}{2})^2} \quad (2.18)$$

$$v_{of} = \dot{\theta} \cdot R_{of} = \dot{\theta} \cdot \sqrt{l^2 + (R + \frac{w}{2})^2} \quad (2.19)$$

$$v_{ir} = \dot{\theta} \cdot R_{ir} = \dot{\theta} \cdot (R - \frac{w}{2}) \quad (2.20)$$

$$v_{or} = \dot{\theta} \cdot R_{or} = \dot{\theta} \cdot (R + \frac{w}{2}) \quad (2.21)$$

Χρησιμοποιώντας, τις εξισώσεις (2.20) - (2.19), όπως επίσης και την σχέση μεταξύ γραμμικής ταχύτητας v , περιστροφικής ταχύτητας ω

$$v = \omega \cdot r \quad (2.22)$$

όπου

r : το μήκος της ακτίνας των τροχών.

προκύπτουν οι περιστροφικές ταχύτητες των τροχών, ως

$$\omega_{ir} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot R_{ir} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot \left(R - \frac{w}{2} \right) \quad (2.23)$$

$$\omega_{or} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot R_{or} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot \left(R + \frac{w}{2} \right) \quad (2.24)$$

$$\omega_{if} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot R_{if} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot \sqrt{l^2 + \left(R - \frac{w}{2} \right)^2} \quad (2.25)$$

$$\omega_{of} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot R_{of} = \frac{\dot{\theta}}{r} \cdot \sqrt{l^2 + \left(R + \frac{w}{2} \right)^2} \quad (2.26)$$

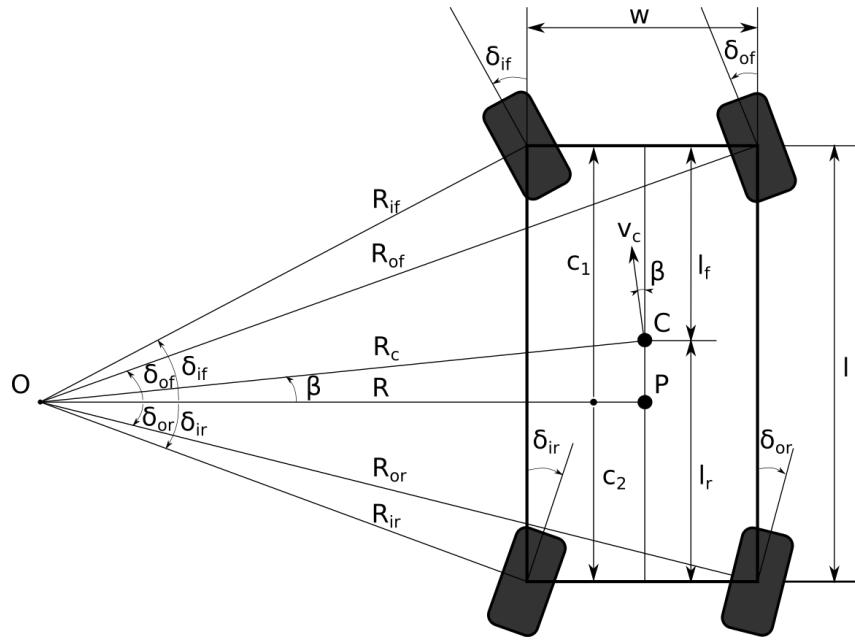
2.3.2 Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης - 4WS

Το κινηματικό μοντέλο τετραδιεύθυνσης αποτελεί επέκταση του κινηματικού μοντέλου *Ackermann*, χρησιμοποιώντας, ταυτόχρονη στρέψη των μπροστινών και πίσω τροχών του οχήματος. Προσφέρει, με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ευελιξία, μέσω μειωμένης ακτίνας τροχιάς, συγκριτικά με το απλό μοντέλο *Ackermann* ($R_{4WS,min} < R_{2WS,min}$), ενώ, ακόμα, παρέχει και δυνατότητα διαγώνιας κίνησης, μέσω παράλληλης στρέψη των τροχών (crab steering). Επίσης, στην ειδική περίπτωση, που κάθε τροχός, μπορεί να κινηθεί και να στραφεί ανεξάρτητα από τους άλλους, το όχημα μπορεί να πραγματοποιήσει επί τόπου στροφή (0-point-turn, $R_{4WS,min} = 0$).

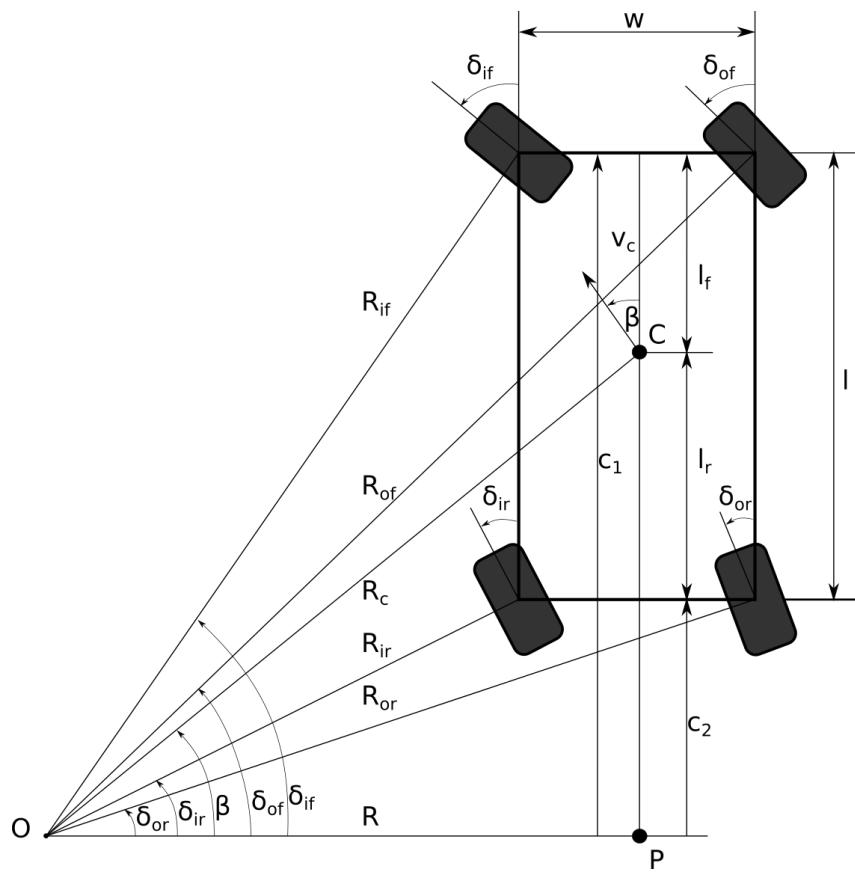
Στην παρούσα ενότητα, θα μας απασχολήσει η κινηματική ανάλυση του μοντέλου τετραδιεύθυνσης, για τις λειτουργίες, της αρνητικής στρέψης (counter/negative steering) και της θετικής στρέψης (same/positive/crab steering) των τροχών. Η αρνητική τετραδιεύθυνση, χρησιμοποιείται σε αυτοκίνητα, για χαμηλές ταχύτητες ($< 40 km/h$), με στόχο την αυξημένη ευελιξία, μέσω πραγματοποίησης πιο στενών ελιγμών. Αντίθετα, η θετική τετραδιεύθυνση, χρησιμοποιείται για, υψηλές ταχύτητες ($> 40 km/h$), για πιο ομαλή αλλαγή λωρίδων, μέσω πιο μικρών μεταβολών στην ακτίνα της τροχιάς που εκτελεί. Σε ρομποτικές εφαρμογές, όπως και η παρούσα, όπου οι ταχύτητες είναι πολύ μικρότερες, το μοντέλο θετικής στρέψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών, για την επέκταση του ρεπερτορίου των δυνατών κινήσεων, αλλά και για την ενίσχυση αλγορίθμων διάσχισης μονοπατιού, μέσω διόρθωσης απόκλισης, σε περιπτώσεις παρεκκλίνουσας συμπεριφοράς, λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως ολίσθηση, ή ατελειών του κινηματικού ή του δυναμικού μοντέλου του οχήματος. Επίσης, στην ειδική περίπτωση θετικής τετραδιεύθυνσης, όπου οι πίσω τροχοί στρέφονται με την ίδια γωνία και φορά με τους μπροστινούς, το όχημα κινείται πλαγίως, με μηδενική γωνιακή ταχύτητα και άρα μηδενική μεταβολή προσανατολισμού.

Η κινηματική ανάλυση του μοντέλου τετραδιεύθυνσης, ακολουθεί ίδια κατεύθυνση με την κινηματική ανάλυση του μοντέλου *Ackermann*, μέσω μία αντίστοιχης συνθήκης στρέψης των τροχών (steering condition) [2]. Η συνθήκη αυτή, την οποία θα καλούμε, συνθήκη τετραδιεύθυνσης, ορίζει την σχέση μεταξύ των γωνιών στρέψης και των τεσσάρων τροχών, έτσι ώστε, οι, κάθετοι στους τροχούς, άξονες να τέμνονται σε ένα κοινό σημείο (σχήματα 2.39, 2.40).

Η ανάλυση του κινηματικού μοντέλου τετραδιεύθυνσης και η εξαγωγή των εξισώσεων και σχέσεων, που ακολουθεί στην συνέχεια, χρησιμοποιεί την διάταξη αρνητικής τετραδιεύθυνσης, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.39, αλλά ισχύει, παράλληλα και για την διάταξη θετικής τετραδιεύθυνσης, γεγονός που μπορεί να αποδειχθεί με απλή γεωμετρική ανάλυση του σχήματος 2.40.



Σχήμα 2.39: Κινηματικό μοντέλο αρνητικής τετραδιεύθυνσης.



Σχήμα 2.40: Κινηματικό μοντέλο θετικής τετραδιεύθυνσης.

Μέσω γεωμετρικής ανάλυσης του σχήματος 2.39, βάση του ορισμού της συνθήκης τετραδιεύθυνσης, προκύπτουν οι γωνίες στρέψης των τροχών του οχήματος:

$$\tan \delta_{if} = \frac{c_1}{R - \frac{w}{2}} \quad (2.27)$$

$$\tan \delta_{of} = \frac{c_1}{R + \frac{w}{2}} \quad (2.28)$$

$$\tan \delta_{ir} = \frac{c_2}{R - \frac{w}{2}} \quad (2.29)$$

$$\tan \delta_{or} = \frac{c_2}{R + \frac{w}{2}} \quad (2.30)$$

Αντιστρέφοντας και αφαιρώντας τις σχέσεις (2.27), (2.28) και (2.29), (2.30)

$$\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if} = \frac{w}{c_1} \quad (2.31)$$

$$\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir} = \frac{w}{c_2} \quad (2.32)$$

και έπειτα προσθέτοντας τις προκύπτουσες εξισώσεις (2.31), (2.32), λαμβάνεται η μαθηματική εξίσωση της συνθήκης τετραδιεύθυνσης.

$$\frac{1}{\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if}} + \frac{1}{\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir}} = \frac{l}{w} \quad (2.33)$$

Η γωνία β πλευρικής ολίσθησης (sideslip angle) του κέντρου μάζας C του οχήματος, υπολογίζεται, εύκολα, από το ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου τετραδιεύθυνσης (σχήμα 2.41).

$$\tan \beta = \frac{l_r \cdot \tan \delta_f + l_f \cdot \tan \delta_r}{l} \quad (2.34)$$

όπου

δ_f : γωνία στρέψης μπροστινού τροχού ισοδύναμου μοντέλου ποδηλάτου τετραδιεύθυνσης

δ_r : γωνία στρέψης πίσω τροχού ισοδύναμου μοντέλου ποδηλάτου τετραδιεύθυνσης

Οι γωνίες στρέψης δ_f και δ_r , μπορούν να υπολογιστούν για ένα όχημα με τετραδιεύθυνση ως

$$\cot \delta_f = \frac{\cot \delta_{if} + \cot \delta_{of}}{2} = \frac{R}{c_1} \quad (2.35)$$

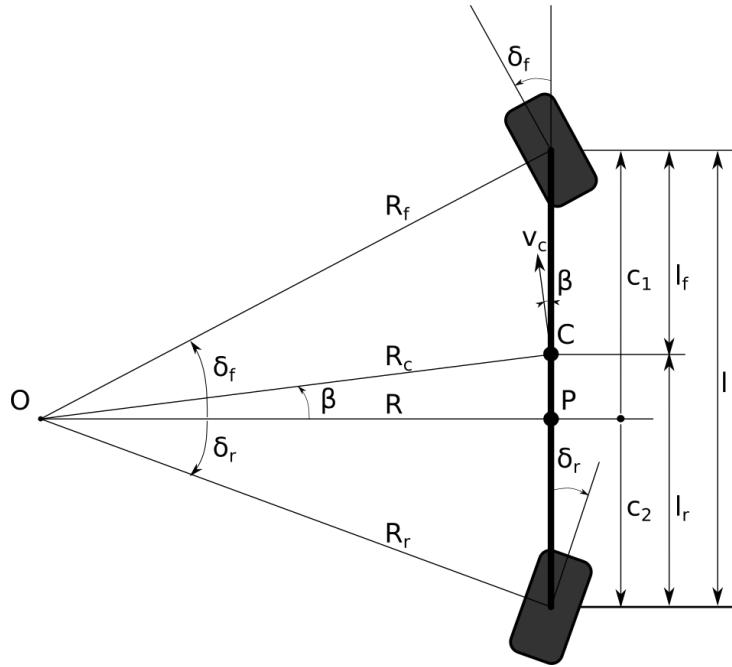
$$\cot \delta_r = \frac{\cot \delta_{ir} + \cot \delta_{or}}{2} = \frac{R}{c_2} \quad (2.36)$$

Αντιστρέφοντας και αφαιρώντας τις εξισώσεις (2.36), (2.35), υπολογίζεται η ακτίνα R της τροχιάς, του σημείου P

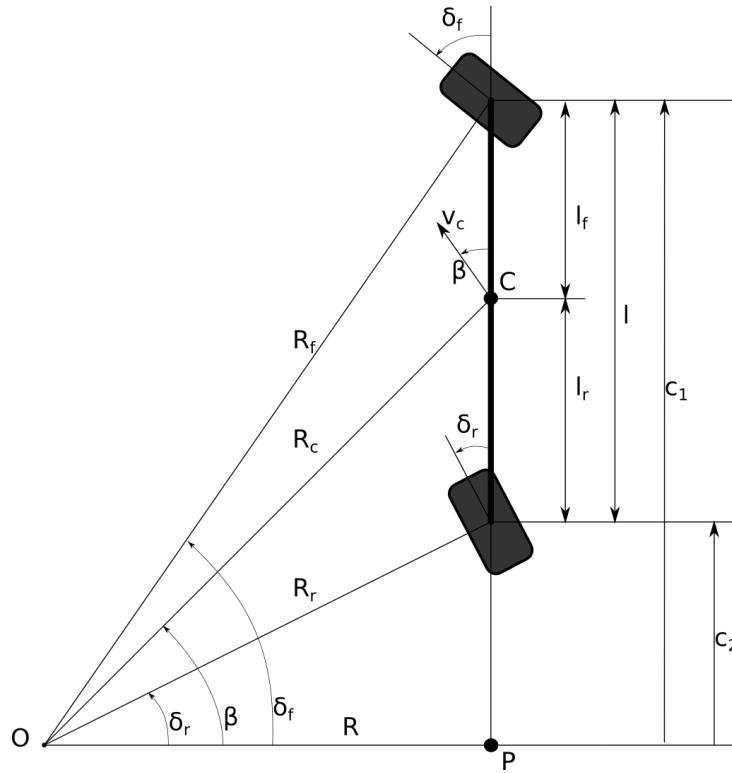
$$R = \frac{l}{\tan \delta_f - \tan \delta_r} \quad (2.37)$$

και έπειτα η ακτίνα R_c της τροχιάς του κέντρου μάζας C του οχήματος.

$$R_c = \frac{R}{\cos \beta} = \frac{l}{\cos \beta \cdot (\tan \delta_f - \tan \delta_r)} \quad (2.38)$$



Σχήμα 2.41: Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου αρνητικής τετραδιεύθυνσης.



Σχήμα 2.42: Ισοδύναμο μοντέλο ποδηλάτου θετικής τετραδιεύθυνσης.

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων θα χρησιμοποιηθούν, πάλι, οι εξισώσεις (2.15)-(2.17), εφόσον ισχύουν και στην προκειμένη περίπτωση, σε συνδυασμό με τις σχέσεις των ακτίνων τροχιάς κάθε τροχού, όπως προκύπτει από το σχήμα 2.39.

$$R_{if} = \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{if}} \quad (2.39)$$

$$R_{of} = \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{of}} \quad (2.40)$$

$$R_{ir} = \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{ir}} \quad (2.41)$$

$$R_{or} = \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{or}} \quad (2.42)$$

Επομένως, οι γραμμικές ταχύτητες των τροχών προκύπτουν, ως

$$v_{if} = \dot{\theta} \cdot R_{if} = \frac{v_c}{R_c} \cdot \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{if}} \quad (2.43)$$

$$v_{of} = \dot{\theta} \cdot R_{of} = \frac{v_c}{R_c} \cdot \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{of}} \quad (2.44)$$

$$v_{ir} = \dot{\theta} \cdot R_{ir} = \frac{v_c}{R_c} \cdot \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{ir}} \quad (2.45)$$

$$v_{or} = \dot{\theta} \cdot R_{or} = \frac{v_c}{R_c} \cdot \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{or}} \quad (2.46)$$

και αντίστοιχα οι περιστροφικές ταχύτητες των τροχών, ως

$$\omega_{if} = \frac{v_{if}}{r} = \frac{v_c}{r \cdot R_c} \cdot \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{if}} \quad (2.47)$$

$$\omega_{of} = \frac{v_{if}}{r} = \frac{v_c}{r \cdot R_c} \cdot \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{of}} \quad (2.48)$$

$$\omega_{ir} = \frac{v_{if}}{r} = \frac{v_c}{r \cdot R_c} \cdot \frac{R - \frac{w}{2}}{\cos \delta_{ir}} \quad (2.49)$$

$$\omega_{or} = \frac{v_{if}}{r} = \frac{v_c}{r \cdot R_c} \cdot \frac{R + \frac{w}{2}}{\cos \delta_{or}} \quad (2.50)$$

Με βάση την παραπάνω κινηματική ανάλυση, οι εξισώσεις των ταχυτήτων, του οχήματος, ως προς το κέντρο μάζας του C , μπορούν να υπολογιστούν, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις

$$\tan \beta = \frac{v_{c,y}}{v_{c,x}} \Leftrightarrow v_{c,y} = v_{c,x} \cdot \tan \beta \quad (2.51)$$

$$v_c^2 = v_{c,x}^2 + v_{c,y}^2 \Leftrightarrow v_c^2 = v_{c,x}^2 - v_{c,x}^2 \cdot \tan \beta^2 \quad (2.52)$$

$$v_c = \omega_c \cdot R_c \quad (2.53)$$

από τις οποίες, τελικά προκύπτουν οι εξισώσεις των ταχυτήτων του οχήματος:

$$v_{c,x} = \frac{v_c}{\sqrt{1 + \tan \beta^2}} \quad (2.54)$$

$$v_{c,y} = \frac{v_c \cdot \tan \beta}{\sqrt{1 + \tan \beta^2}} \quad (2.55)$$

$$\omega_c = \frac{v_c}{l} \cdot \cos \beta (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \quad (2.56)$$

2.3.3 Κινηματική Ανάλυση Οχήματος *Monstertruck*

Κεφάλαιο 3

Αυτόνομη Πλοήγηση σε Άγνωστο Περιβάλλον

- 3.1 Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτοφράφηση
- 3.2 Κατασκευή Μονοπατιού
- 3.3 Κινηματικά Εφικτή Παραμόρφωση Μονοπατιού για Αποφυγή Εμποδίων
- 3.4 Διάσχιση Μονοπατιού

Κεφάλαιο 4

Αρχιτεκτονική Συστήματος

4.1 ROS

4.2 Εργαλεία Προσομοίωσης

4.2.1 STDR - 2D Προσομοίωση

4.2.2 GAZEBO - 3D Προσομοίωση

4.3 Αρχιτεκτονική Λογισμικού

Κεφάλαιο 5

Πειράματα και Αποτελέσματα

- 5.1 Κινηματικό
- 5.2 SLAM
- 5.3 Κατασκευή Μονοπατιού
- 5.4 Κινηματικά Εφικτή Διαμόρφωση Μονοπατιού για Αποφυγή Εμποδίων
- 5.5 Διάσχιση Μονοπατιού
- 5.6 Αυτόνομη Εξερεύνηση Χώρου
- 5.7 Αξιολόγηση Απόδοσης Υπολογιστή Odroid-XU4

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

6.2 Μελλοντική Εργασία

Παράρτημα Α'

Τίτλος Παραρτήματος

Write your Appendix content here.

Βιβλιογραφία

- [1] *EPOS 24/1 Positioning Controller Documentation: Getting Started.* maxon motor. July 2007.
- [2] R. N. Jazar. “Vehicle Dynamics: Theory and Applications”. In: Springer Science and Business Media, LLC, 2009. Chap. 7: Steering Dynamics.
- [3] R. Siegwart and Illah R. Nourbakhsh. “Introduction to Autonomous Mobile Robots”. In: Cambridge MIT Press, 2004. Chap. 4.