



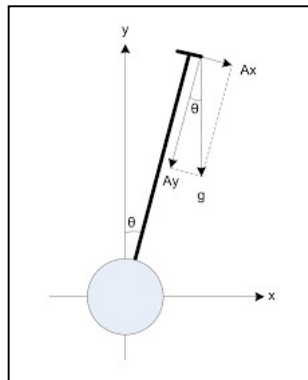
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

" ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ"



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ:

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΜΠΕΖΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ.ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2020

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΜΠΕΖΟΣ,

Του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου 36927 φοιτητής του Τμήματος **Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**, του **Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής** πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

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

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

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

Ο Δηλών

Ε.ΜΠΕΖΟΣ

Ημερομηνία

7/3/2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	5
1.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΕΚΚΡΕΜΕΣ	5
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	9
1.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ PID	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
2.1 ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ	13
2.2 ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ	17
2.3 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ.....	21
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	27
3.1 ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	27
3.2 ΦΙΛΤΡΟ KALMAN	28
3.3 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	35
4.1 DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	35
4.2 ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	40
4.3 ΠΛΑΙΣΙΟ	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	45
5.1 ΚΩΔΙΚΑΣ.....	45
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιαστεί η έρευνα πάνω στους τρόπους υλοποίησης ενός οχήματος το οποίο θα ισορροπεί σε δύο τροχούς. Έχοντας ως πυρήνα του οχήματος ένα μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό γυροσκοπίου και επιταχυνσιόμετρου, μπορούμε να έχουμε την ακριβή γωνία κλίσης του οχήματος. Με τη χρήση ενός ελεγκτή PID μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα κλειστό βρόγχο ελέγχου με ανάδραση, που δέχεται ως είσοδο την απόκλιση της τρέχουσας από την επιθυμητή γωνία κλίσης. Με αυτόν τον τρόπο και την χρησιμοποίηση κινητήρων, ως ελεγχόμενο σύστημα, μπορούμε να μηδενίσουμε αυτή την απόκλιση φέρνοντας το όχημα σε ισορροπία.

ABSTRACT

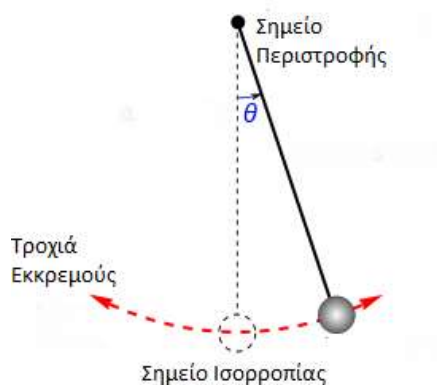
The purpose of this thesis is to present the research on how to implement a two wheel balancing robot. Having a microprocessor as the core of this autonomous vehicle and implementing a fusion of gyroscope and accelerometer, we can have the exact angle of inclination of the vehicle. Using a PID controller we can create a closed feedback loop controller that accepts as input the current deviation from the desired tilt angle. In that way, using motors as the controlled system, we can eliminate this deviation and keep the robot in balance.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΕΚΚΡΕΜΕΣ

Η κατασκευή του οχήματος βασίζεται σε ένα κλασικό πρόβλημα της θεωρίας ελέγχου, αυτό του ανάστροφου εκκρεμούς. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι ένα εκκρεμές το οποίο έχει το κέντρο μάζας του πάνω από το σημείο περιστροφής.

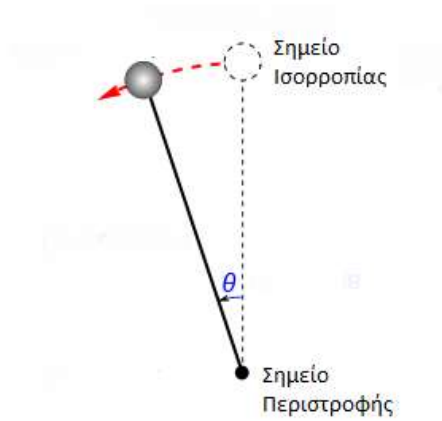
Σε ένα κανονικό εκκρεμές όπου το κέντρο της μάζας του κρέμεται ακριβώς κάτω από το σημείο περιστροφής, το εκκρεμές βρίσκεται σε σταθερό σημείο ισορροπίας. Καθώς οποιαδήποτε μετατόπιση του κέντρου μάζας του θα οδηγήσει σε μια φθίνουσα ταλάντωση, η οποία θα το επαναφέρει στο σημείο ισορροπίας.



Εικόνα 1: Κανονικό Εκκρεμές

Αντιθέτως το ανάστροφο εκκρεμές είναι ένα εγγενώς ασταθές σύστημα καθώς οποιαδήποτε μετακίνηση του κέντρου μάζας, το οποίο είναι πάνω από το σημείο περιστροφής, θα το επιταχύνει μακριά από το σημείο ισορροπίας με αποτέλεσμα να πέσει.

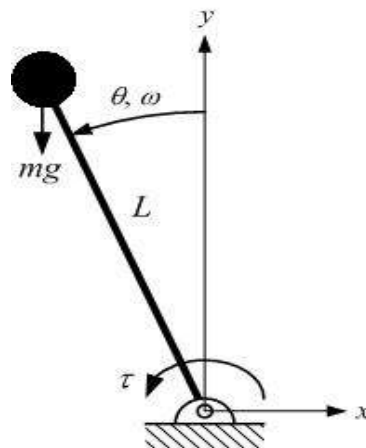
Για αυτόν το λόγο ένα ανάστροφο εκκρεμές πρέπει να ισορροπείται ενεργά ώστε να παραμένει όρθιο στο σημείο ισορροπίας. Ένας από τους τρόπους να επιτευχθεί αυτό είναι μέσω ενός συστήματος ελέγχου με ανάδραση, το οποίο παρακολουθώντας τη γωνία κλίσης του εκκρεμούς, θα μετακινεί το σημείο περιστροφής στο οριζόντιο επίπεδο ώστε να το ισορροπήσει.



Εικόνα 2: Ανάστροφο Εκκρεμές

Η μη γραμμική διαφορική εξίσωση που διέπει το εκκρεμές είναι η:

$$mL^2\ddot{\theta}(t) + mgL\sin\theta(t) = u(t)$$



Ας πάρουμε την κατάσταση όπου:

$$\theta(t) = \pi, \dot{\theta}(t) = 0$$

Έστω ότι διαταράσσεται το σύστημα του εκκρεμούς έτσι ώστε:

$$\theta(t) = \pi + \varphi(t) \quad \text{και} \quad \varphi(t) = \theta(t) - \pi$$

Με την γωνία να είναι μικρή ώστε να ισχύει:

$$\sin\theta(t) = \sin(\pi + \varphi(t)) = -\sin(\varphi(t)) = -\varphi(t) \quad \text{και} \quad \dot{\theta}(t) = \dot{\varphi}(t), \ddot{\theta}(t) = \ddot{\varphi}(t)$$

Συνεπώς η διαφορική εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$mL^2\ddot{\varphi}(t) - mgL\varphi(t) = u(t)$$

Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό Laplace:

$$L\{\varphi(t)\} = \Phi(s) \text{ και } L\{u(t)\} = U(s)$$

Έχουμε:

$$s^2\Phi(s) - s\varphi(0) - \dot{\varphi}(0) - \frac{g}{L}\Phi(s) = \frac{1}{mL^2}U(s)$$

Αν θεωρήσουμε ότι:

$$\frac{g}{L} = 1, mL^2 = 1, u(t) = 0, t \geq 0$$

$$\Phi(s) = \frac{s\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{s^2 - 1} = \frac{A}{s - 1} + \frac{B}{s + 1}$$

$$A = \frac{\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{2}, B = \frac{-\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{-2}$$

Άρα:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = L^{-1}\{\Phi(s)\} &= \frac{\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{2} \times L^{-1}\left\{\frac{1}{s - 1}\right\} + \frac{-\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{-2} \times L^{-1}\left\{\frac{1}{s + 1}\right\} \\ &= \frac{\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{2} e^t + \frac{-\varphi(0) + \dot{\varphi}(0)}{-2} e^{-t} \end{aligned}$$

Λόγω του όρου e^t όσο ο χρόνος t τείνει στο άπειρο, τότε $\varphi(t) \rightarrow \infty$

Συνεπώς χωρίς κάποια είσοδο $u(t)$ η κατάσταση ισορροπίας $\theta(t) = \pi, \dot{\theta}(t) = 0$ είναι ασταθής. Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα πρέπει να βρεθεί μια είσοδος $u(t)$ ώστε για κάποια μικρή διαταραχή να ισχύει ότι:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\varphi}(t) = 0$$

Ο πρώτος τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα είναι αυτός της εισόδου χωρίς ανάδραση. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθώς δεν είναι δυνατόν στην πράξη να γνωρίζουμε ακριβώς την αρχική κατάσταση του συστήματος, μια καθορισμένη από την αρχική κατάσταση είσοδος δεν θα μπορέσει να σταθεροποιήσει το σύστημα.

Ο δεύτερος τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αυτός της εισόδου με ανάδραση ανύσματος κατάστασης. Δηλαδή μέσω ενός αισθητηρίου να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε τα εξής:

α)Τη γωνία περιστροφής $\varphi(t)$ άξονα του εκκρεμούς σε σχέση με την κατακόρυφο

β)Τη γωνιακή ταχύτητα $\dot{\varphi}(t)$

Κατά συνέπεια μπορούμε να επιλέξουμε την είσοδο $u(t)$, δηλαδή την ροπή στρέψης του άξονα, ώστε να είναι ανάλογη της γωνίας περιστροφής και της γωνιακής ταχύτητας.

$$u(t) = -a\varphi(t) - b\dot{\varphi}(t)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την είσοδο στην διαφορική εξίσωση του εκκρεμούς έχουμε:

$$\ddot{\varphi}(t) + b\dot{\varphi}(t) + (a - 1)\varphi(t) = 0 \text{ και χαρακτηριστικό πολυώνυμο } s^2 + bs + (a - 1) = 0$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι η εξής:

$$\varphi(t) = c_1 e^{-t} + c_2 e^{-2t}$$

Όπου c_1, c_2 σταθερές οι οποίες προκύπτουν από την αρχική κατάσταση του συστήματος. Λόγω του όρου e^{-t} ισχύει ότι:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\varphi}(t) = 0$$

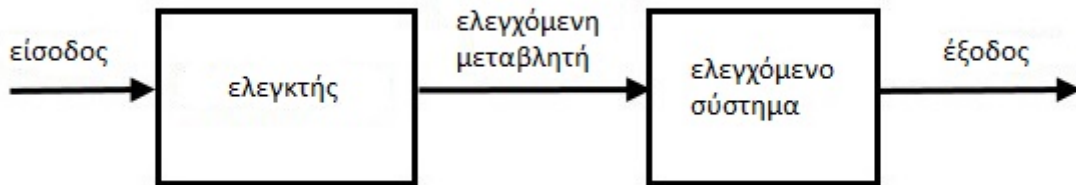
Με τα όρια της γωνίας και της γωνιακής ταχύτητας να ισούνται με μηδέν όταν ο χρόνος τείνει στο άπειρο, μπορούμε να πούμε ότι το κλειστό σύστημα είναι ασυμπτωτικά ευσταθές.

Συμπερασματικά γνωρίζοντας την γωνία και την γωνιακή ταχύτητα ανά πάσα στιγμή μπορούμε να δώσουμε στο σύστημα την κατάλληλη είσοδο $u(t)$ ώστε να επιτύχουμε μια κατάσταση ισορροπίας.

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Από την πρώτη στιγμή που ο άνθρωπος κατασκεύασε μηχανικά συστήματα προέκυψε και η ανάγκη του Ελέγχου. Η ανάγκη του δηλαδή να επηρεάσει ένα σύστημα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να έχει μια επιθυμητή συμπεριφορά.

Συνεπώς ως έλεγχος ενός συστήματος ορίζεται η διαδικασία ορισμού κατάλληλης εισόδου του συστήματος, ώστε η έξοδος του να ακολουθεί μια επιθυμητή συμπεριφορά. Την υλοποίηση της διαδικασίας ελέγχου αναλαμβάνει ο ελεγκτής, που μαζί με το ελεγχόμενο σύστημα αποτελούν ένα σύστημα ελέγχου.

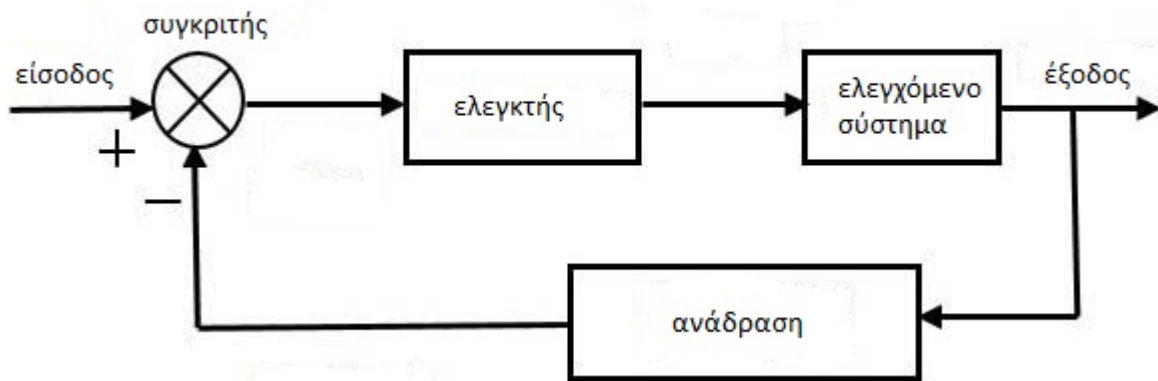


Εικόνα 3: Σύστημα Ελέγχου

Με βάση τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ελέγχου έχουμε και την βασική κατηγοριοποίηση τους, σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα ελέγχου.

Τα ανοιχτά συστήματα ελέγχου αποτελούνται μόνο από τον ελεγκτή και το ελεγχόμενο σύστημα. Έτσι η είσοδος του συστήματος είναι ανεξάρτητη από την έξοδό του, καθώς η ροή της πληροφορίας γίνεται προς μία μόνο κατεύθυνση. Από την στιγμή που το σύστημα δεν λαμβάνει υπ όψιν την έξοδο που προκύπτει από την είσοδο του, η διαδικασία ελέγχου έγκειται στην προσπάθεια του χειριστή να καθορίσει την ελεγχόμενη μεταβλητή μέσω του ελεγκτή ώστε να έχει την επιθυμητή έξοδο.

Τα κλειστά συστήματα ελέγχου ασκούν συνεχή δυναμικό έλεγχο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Υπάρχει συνεχής μέτρηση της τρέχουσας τιμής της εξόδου του συστήματος και σύγκρισή της με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς.



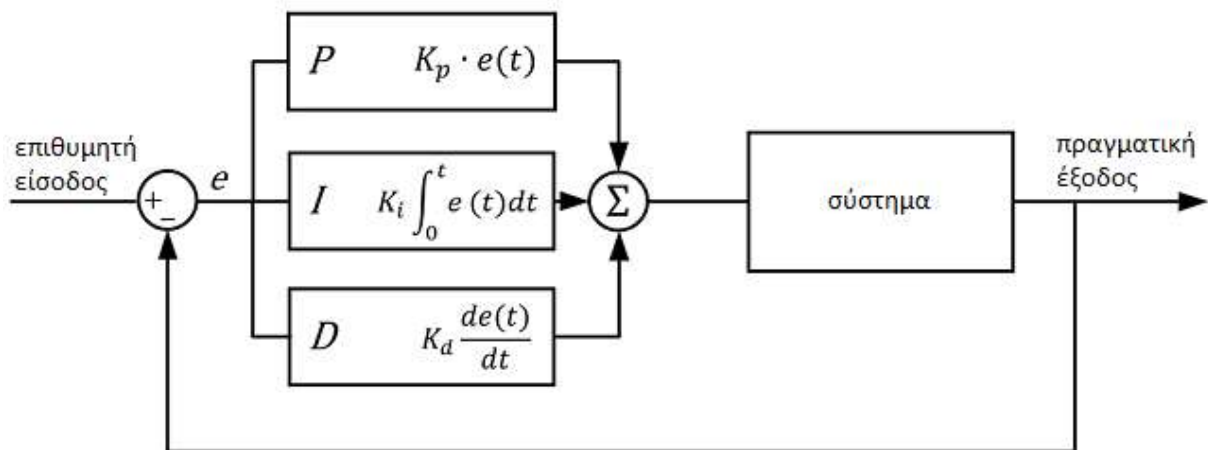
Εικόνα 4: Κλειστό σύστημα ελέγχου

Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται μια αντίστροφη ροή πληροφορίας από την έξοδο προς την είσοδο, δηλαδή από το αποτέλεσμα προς το αίτιο. Αυτό υλοποιείται με την προσθήκη σε ένα ανοιχτό σύστημα ελέγχου του κλάδου της ανάδρασης. Ο κλάδος της ανάδρασης αποτελείται από μια βαθμίδα μέτρησης της εξόδου και μια βαθμίδα σύγκρισής της με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης εισόδου-εξόδου ονομάζεται σφάλμα και αποτελεί το σήμα διέγερσης της βαθμίδας ελέγχου.

Συνεπώς σε ένα κλειστό σύστημα η διαδικασία ελέγχου είναι συνάρτηση όχι μόνο της εισόδου αλλά και της πραγματικής εξόδου του συστήματος. Θεωρώντας ότι η σύγκριση εισόδου-εξόδου είναι διαφορά, ονομάζουμε αυτά τα συστήματα κλειστά συστήματα ελέγχου με αρνητική ανάδραση.

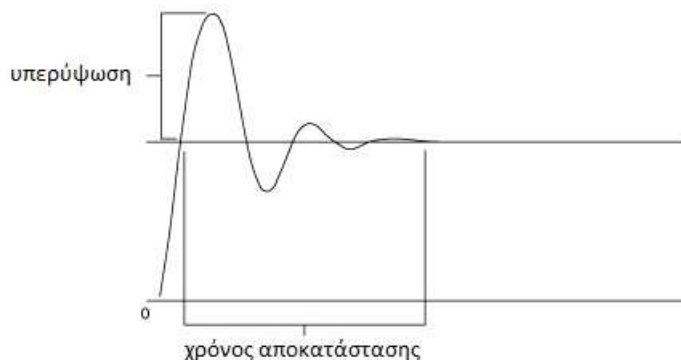
1.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ PID

Ο ελεγκτής PID είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ο οποίος χρησιμοποιεί τον κλάδο της ανάδρασης για να υπολογίσει το σφάλμα $e(t)$, ως την διαφορά ανάμεσα στην επιθυμητή είσοδο (SP) και την ελεγχόμενη έξοδο (PV), και να εφαρμόσει την ανάλογη διόρθωση επί του ελεγχόμενου συστήματος. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του ελεγκτή PID είναι η χρήση τριών όρων ελέγχου, του αναλογικού (P), του ολοκληρωτικού (I) και του παραγωγικού (D) με αποτέλεσμα τον ακριβή και βέλτιστο έλεγχο επί της διαδικασίας.



Εικόνα 5: Κλειστό σύστημα ελέγχου με PID

Ο όρος P είναι αναλογικός προς το τρέχον σφάλμα, που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα τόσο πιο «επιθετική» είναι θα είναι η διορθωτική ενέργεια του ελεγκτή. Η χρησιμοποίηση του όρου P έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση αλλά όχι εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος. Εάν εφαρμοσθεί μόνος του ο όρος P το σύστημα εμφανίζει το χαρακτηριστικό της υπέρβασης(overshoot).



Εικόνα 6: Υπερύψωση στην απόκριση του συστήματος

Ο όρος I έχει να κάνει με το προηγούμενο σφάλμα που ενσωματώνεται με την πάροδο του χρόνου. Για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα η έξοδος του ελεγκτή, λόγω του ολοκληρώματος, αυξάνεται με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος. Η χρησιμοποίηση του όρου I μειώνει την ταχύτητα απόκρισης και επηρεάζει την ευστάθεια του συστήματος(ταλαντώσεις).

Ο όρος D προσδιορίζει μια πιθανή μελλοντική τιμή σφάλματος με βάση τον τρέχοντα ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ευστάθειας(μείωση ταλαντώσεων) και την μείωση της υπερύψωσης.

Οι όροι K_p , K_i και K_d αποτελούν κατά σειρά το αναλογικό, το ολοκληρωτικό και το διαφορικό κέρδος. Χρόνος ανύψωσης είναι ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η απόκριση να ανέλθει από το 10% στο 90% της τελικής τιμής, ενώ χρόνος αποκατάστασης είναι ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η καμπύλη απόκρισης να φτάσει και να παραμείνει στο $\pm 2\%$ της τελικής τιμής. Υπερύψωση είναι η σχετική μέγιστη απόκλιση της εξόδου ως προς την τελική της τιμή και μόνιμο σφάλμα είναι η σταθερή απόκλιση της εξόδου του συστήματος από την είσοδο αναφοράς του.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε το αποτέλεσμα της αύξησης κάθε όρου ξεχωριστά.

Όροι	Χρόνος ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος αποκατάστασης	Μόνιμο σφάλμα	Ευστάθεια
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή μεταβολή	Μείωση	Επιδείνωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη	Επιδείνωση
K_d	Μικρή μεταβολή	Μείωση	Μείωση	Μικρή μεταβολή	Βελτίωση αν K_d μικρό

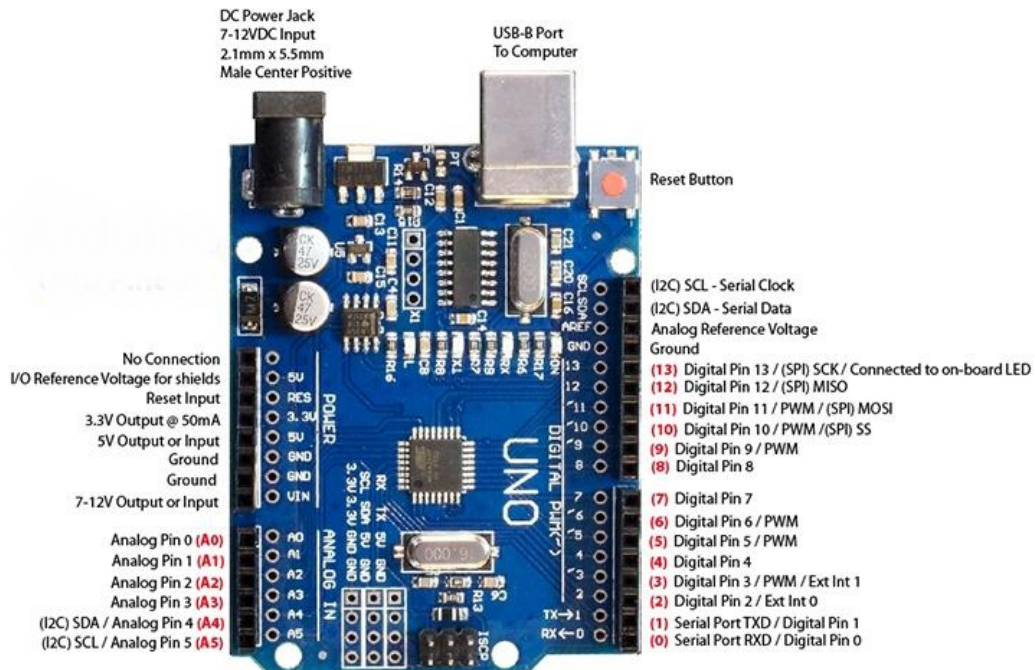
Ο παραπάνω πίνακας είναι ενδεικτικός καθώς στην πραγματικότητα οι όροι αλληλοεξαρτώνται και αλλαγές σε έναν από τους όρους επηρεάζουν και τη συμπεριφορά των υπολοίπων.

Η τελική μορφή του αλγορίθμου του PID είναι $u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

Για την υλοποίηση του προαναφερόμενου ελέγχου σε μια τέτοια εφαρμογή, θα χρειαστεί ένας μικροελεγκτής. Ο μικροελεγκτής θα δέχεται και θα διαχειρίζεται τα δεδομένα από τους αισθητήρες κατάλληλα, ώστε να ελέγξει τους κινητήρες σύμφωνα με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μια γλώσσας προγραμματισμού στην οποία θα γραφτεί το πρόγραμμα που θα υλοποιεί ο μικροελεγκτής.



Εικόνα 7: Arduino Uno

Μια επιλογή ενός τέτοιου μικροελεγκτή είναι ο Arduino Uno. Ο Arduino Uno είναι ένας μικροελεγκτής ανοιχτής αρχιτεκτονικής ο οποίος βασίζεται στον μικροεπεξεργαστή ATmega328P. Ο οποίος είναι επεξεργαστής 8-bit αρχιτεκτονικής RISC (Υπολογιστής

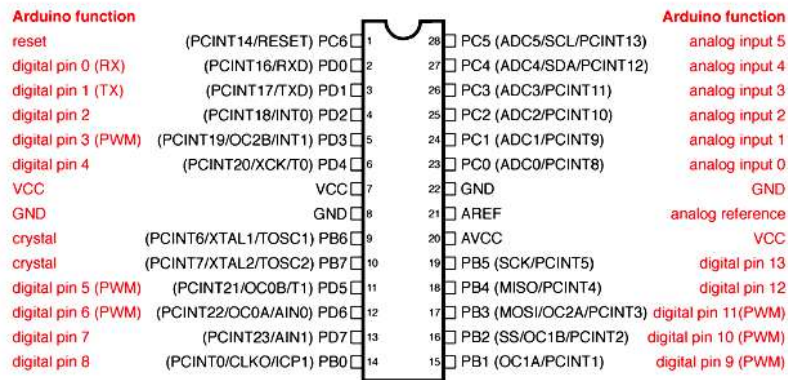
Περιορισμένου Συνόλου Εντολών) με 32KB μνήμη Flash και 1KB μνήμη EEPROM καθώς και με 23 γενικού σκοπού γραμμές εισόδων/εξόδων.

Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Εικόνα 8: Τεχνικά χαρακτηριστικά Arduino Uno

Ο Arduino Uno προσφέρει 6 αναλογικές εισόδους/εξόδους και 14 ψηφιακές, εκ των οποίων οι 6 προσφέρουν την δυνατότητα διαμόρφωσης πλάτους παλμού(PWM). Επίσης προσφέρει επικοινωνία με διάφορα περιφερειακά μέσω SPI(Serial Peripheral Interface) και TWI(Two-Wire Interface) μέσω του πρωτοκόλλου I^2C .

Για τον προγραμματισμό του μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι γλώσσες προγραμματισμού C και C++ καθώς και το πρόγραμμα Arduino IDE(Integrated Development Enviroment), το οποίο είναι λογισμικό βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού JAVA. Μέσω αυτού του λογισμικού μπορούμε να εγγράψουμε κώδικα και να προγραμματίσουμε τον μικροελεγκτή καθώς και να παρακολουθήσουμε την σειριακή επικοινωνία του, καθώς και να χρησιμοποιήσουμε διάφορα εργαλεία ρύθμισης της πλακέτας, διαχείρισης βιβλιοθηκών και αποθήκευσης διαφόρων αρχείων κώδικα.



Εικόνα 9: Αντιστοίχιση ακροδεκτών ATmega328P και Arduino Uno

Η σύνδεση του Arduino με τον υπολογιστή που θα εκτελεί το IDE γίνεται μέσω ενός καλωδίου USB.



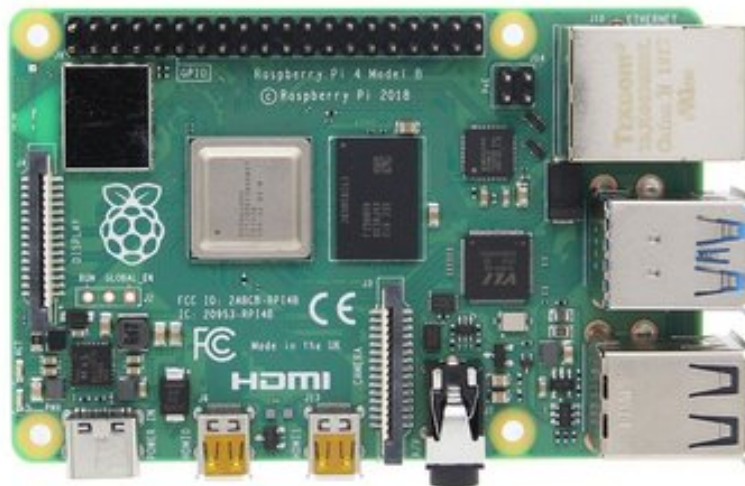
Εικόνα 10: Λογισμικό Arduino IDE

Ανοίγοντας το λογισμικό βλέπουμε το μέρος όπου γράφεται ο κώδικας σε ένα κενό sketch(αρχείο κώδικα), στο οποίο υπάρχουν μόνο δυο στοιχεία το void setup() και το void loop(). Στο χώρο κάτω από το void setup() γράφουμε το κομμάτι κώδικα που θέλουμε να τρέξει μόνο μια φορά κατά την εκκίνηση και συνήθως περιέχει διάφορες εντολές αρχικοποίησης και έναρξης επικοινωνίας με περιφερειακά. Στο χώρο κάτω από το void

loop() γράφουμε το κομμάτι κώδικα που θα είναι το κύριο μέρος του προγράμματός μας και θα εκτελείται συνεχώς από τον μικροελεγκτή.

Στη συνέχεια αφού έχουμε γράψει τον κώδικα που θέλουμε να δώσουμε στον Arduino επιλέγουμε το μοντέλο της πλακέτας που έχουμε, όπως και σε ποια θύρα την έχουμε συνδεδεμένη και μεταφορτώνουμε το πρόγραμμα.

Μια άλλη λύση υλοποίησης ελέγχου στην εφαρμογή που ερευνούμε είναι ο μικροϋπολογιστής Raspberry PI 4. Ο μικροϋπολογιστής είναι βασισμένος σε έναν τετραπύρηνο επεξεργαστή Cortex-A72(ARM v8) χρονισμένο στα 1.5GHz και διατίθεται με μνήμη από 1GB έως 4GB αναλόγως το μοντέλο.



Εικόνα 11: Raspberry PI 4

Επίσης προσφέρει σύνδεση μέσω WiFi, Ethernet καθώς και 4 θύρες USB. Έχει 40 θέσεις εισόδων/εξόδων γενικού σκοπού και 2 θύρες HDMI.

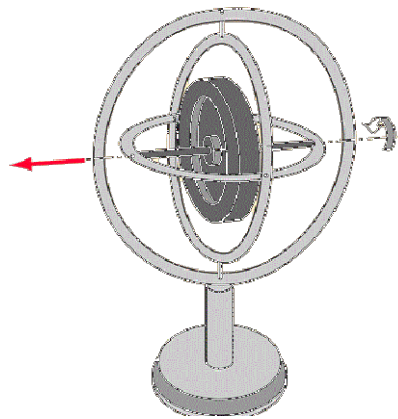
Μέσω της θέσης για κάρτα SD μπορούν να φορτωθούν στο Raspberry διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως το Raspbian που είναι βασισμένο στην αρχιτεκτονική Linux. Ενώ έχει τη

δυνατότητα να τρέχει παράλληλα πολλά προγράμματα, πράγμα που το καθιστά καλύτερο από τον Arduino σε πιο περίπλοκες εφαρμογές.

2.2 ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΟ

Ένας τρόπος να μετρήσουμε την κλίση ενός αντικείμενου σε σχέση με το επίπεδο είναι το γυροσκόπιο.

Το γυροσκόπιο εφευρέθηκε το 1852 από τον Ζαν Μπερνάρ Λεόν Φουκό και είναι μια συσκευή η οποία λόγω της αρχής διατήρησης της στροφορμής μπορεί να κρατήσει σταθερό τον προσανατολισμό της μέσω της περιστροφικής κίνησης των μερών της. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της στροφορμής ένα σώμα που περιστρέφεται αντιστέκεται στις δυνάμεις που προσπαθούν να αλλάξουν την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής του.



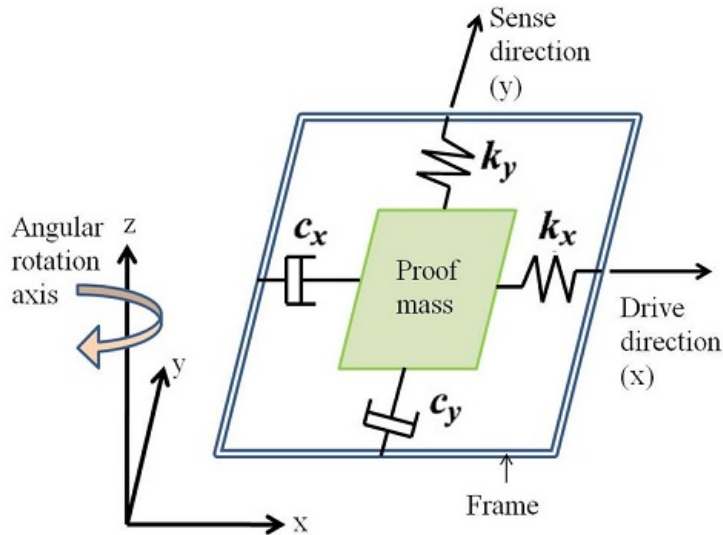
Εικόνα 12: Γυροσκόπιο

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα η διάταξη του γυροσκοπίου αποτελείται από μια στεφάνη η οποία μπορεί να κινηθεί ελεύθερα δεξιά-αριστερά, η οποία μέσα της φέρει άλλη μια στεφάνη η οποία μπορεί να κινηθεί ελεύθερα πάνω κάτω. Στο εσωτερικό αυτής της στεφάνης είναι στερεωμένος ο σφόνδυλος, μια σβούρα η οποία περιστρεφόμενη αντιστέκεται στην αλλαγή κατεύθυνσης του άξονα περιστροφής της.

Σύμφωνα με την αρχή της μετάπτωσης ένα γυροσκόπιο με ελευθερία κίνησης κινείται κάθετα ως προς τις εξωτερικές δυνάμεις που του ασκούνται.

Το γυροσκόπιο βρήκε διάφορους τομείς εφαρμογής όπως η γυροσκοπική πυξίδα, που σε αντίθεση με την μαγνητική πυξίδα, δεν χρήζει διορθώσεων καθώς η λειτουργία της δεν σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Καθώς και στα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης αεροπλάνων και πυραύλων για την διατήρηση η αλλαγή μια επιθυμητής πορείας.

Το κομμάτι που μας απασχολεί για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι τα μικροηλεκτρονικά γυροσκόπια (MEMS) τα οποία κάνουν χρήση του φαινομένου Coriolis το οποίο περιγράφει ότι αν σε ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται με ταχύτητα ω , μια μάζα m κινείται με ταχύτητα v και δέχεται δύναμη $F_c = -2m(\omega \times v)$

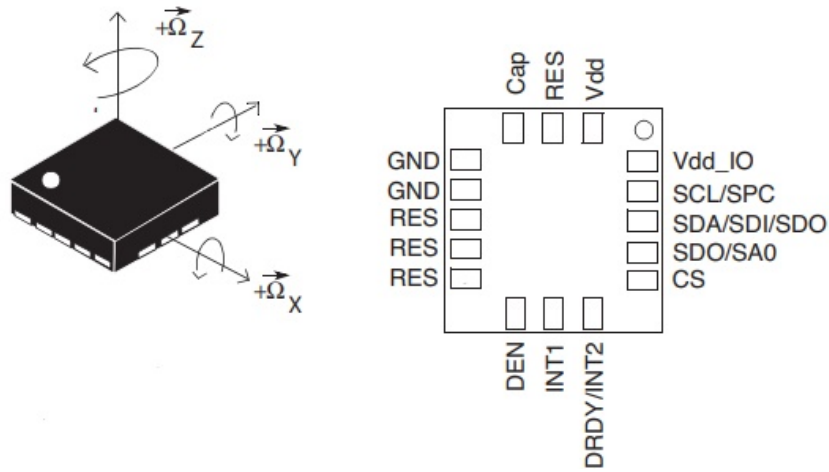


Εικόνα 13: Δονητικό γυροσκόπιο MEMS

Η πιο απλή εκδοχή ενός τέτοιου γυροσκοπίου αποτελείται από μια μάζα η οποία δονείται κατά μήκος ενός άξονα μετάδοσης κίνησης. Όταν το γυροσκόπιο περιστρέφεται δημιουργείται μια δευτερεύουσα δόνηση στον κάθετο άξονα λόγω της δύναμης Coriolis. Μετρώντας αυτή τη δόνηση, την οποία μετατρέπουμε σε ηλεκτρικά σήματα, μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνιακή ταχύτητα ω βάση της παραπάνω εξίσωσης. Γνωρίζοντας την γωνιακή ταχύτητα κάθε στιγμή, γνωρίζουμε και την κλίση του συστήματος.

Κάποια από τα προτερήματα αυτού του τύπου γυροσκοπίων είναι το μικρό μέγεθος και βάρος καθώς και το χαμηλό τους κόστος.

Ένα από αυτού του είδους γυροσκόπια είναι το L3GD20, ένα χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης γυροσκόπιο τριών αξόνων. Περιλαμβάνει το αισθητήριο και το ολοκληρωμένο κύκλωμα για στείλει μέσω SPI/TWI σε ένα μικροελεγκτή την τιμή της γωνιακής ταχύτητας.



Εικόνα 14: Άξονες μέτρησης και σχεδιάγραμμα ακροδεκτών του L3GD20

Επίσης παρέχει την δυνατότητα επιλογής της ευαισθησίας μέτρησης σε μια κλίμακα 250/500/2000dps(μοίρες ανά δευτερόλεπτο).

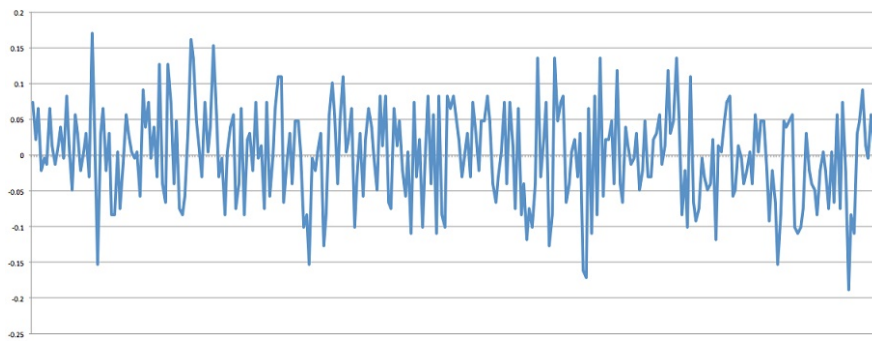
Για να μετρήσουμε την γωνία κλίσης με ένα τέτοιο γυροσκόπιο πρέπει να προσθέτουμε στην προηγούμενη μέτρηση της γωνίας την νέα της αλλαγή, πολλαπλασιάζοντας την γωνιακή ταχύτητα με τον χρόνο που πέρασε από την προηγούμενη μέτρηση.

$$\theta(t) = \theta(t - 1) + \omega * \Delta t$$

Τα γυροσκόπια όμως έχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως το συστηματικό σφάλμα και την ολίσθηση(bias drift). Το συστηματικό σφάλμα είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων της γωνιακής ταχύτητας που γυροσκόπιο στέλνει όταν είναι απολύτως ακίνητο. Ο τρόπος για να αποφύγουμε στις μετρήσεις μας τη συσσώρευση αυτού του λάθους είναι να το μετρήσουμε σε ακινησία για ένα ορισμένο χρόνο και έπειτα να το αφαιρούμε από κάθε μέτρησης της γωνιακή ταχύτητας.

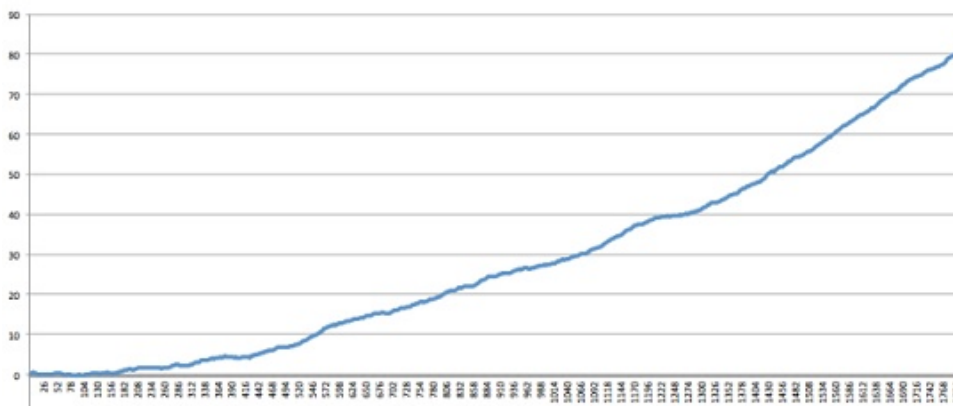
$$\theta(t) = \theta(t - 1) + (\omega - bias) * \Delta t$$

Αυτού του είδους τα γυροσκόπια παρουσιάζουν επίσης έναν υψηλής συχνότητας θόρυβο από μηχανικές και θερμικές αιτίες στο εσωτερικό του ολοκληρωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 15: Γράφημα μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας σε πλαίσιο 30 δευτερολέπτων

Παρότι η απόκλιση στις μετρήσεις της γωνιακής ταχύτητας λόγω του θορύβου μοιάζει να είναι αμελητέα, σε βάθος χρόνου το σφάλμα των μετρήσεων θα προστίθεται στην ήδη εσφαλμένη λόγω αυτού του φαινομένου μέτρηση της γωνίας κλίσης.



Εικόνα 16: Γράφημα της γωνίας κλίσης ενός απόλυτα ακίνητου γυροσκοπίου σε πλαίσιο 30 λεπτών

Με αποτέλεσμα την απόκλιση κατά 80 μοίρες στην μέτρηση της γωνίας κλίσης μετά από μετρήσεις 30 λεπτών.

Συμπερασματικά τα γυροσκόπια έχουν σχετικά μικρά σφάλματα σε μικρό χρόνο τα οποία όμως αθροιστικά σε βάθος χρόνου οδηγούν σε εσφαλμένη εκτίμηση της γωνίας κλίσης. Δεν υπάρχει κάποια λύση για να διορθωθεί αυτή η συμπεριφορά στην μέτρηση των γυροσκοπίων, η μόνη λύση για τον πιο αξιόπιστο υπολογισμό της γωνίας κλίσης είναι η συγχώνευση των μετρήσεων του γυροσκοπίου με αυτές ενός επιταχυνσιόμετρου.

2.3 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες που μετρούν την γραμμική επιτάχυνση ενός σώματος. Η μέτρηση της γραμμικής επιτάχυνσης μας επιτρέπει να γνωρίζουμε την ακριβή ταχύτητα του σώματος μέσω της ολοκλήρωσης.

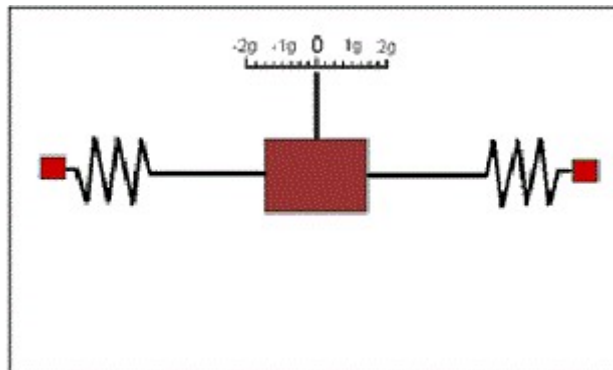
$$v = \int a dt$$

Καθώς και την ακριβή θέση του σώματος μέσω της διπλής ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης ή της ολοκλήρωσης της ταχύτητας του σώματος.

$$x = \int v dt$$

Επίσης τα επιταχυνσιόμετρα είναι ικανά να μετρήσουν και την επιτάχυνση της βαρύτητας που προκαλείται από το βαρυτικό πεδίο της Γής.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να είναι μηχανικά, όπου μια μάζα είναι συνδεδεμένη σε ελατήρια.

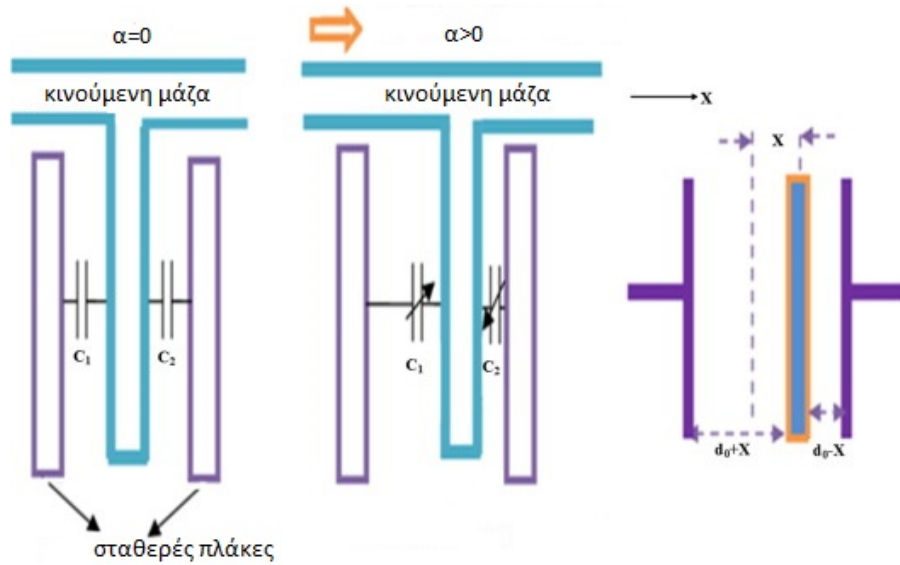


Εικόνα 17: Μηχανικό επιταχυνσιόμετρο

Η μετατόπιση της μάζας μετριέται με ένα αισθητήρα που δίνει σήμα ανάλογο της δύναμης F που ασκείται στην μάζα κατά τον οριζόντιο άξονα, έπειτα χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα $F = m * a$ για να υπολογιστεί η επιτάχυνση του σώματος.

Επίσης υπάρχουν τα στερεάς κατάστασης επιταχυνσιόμετρα τα οποία διαχωρίζονται σε αρκετές υποκατηγορίες, όπως επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, κραδασμών, πυριτίου και χαλαζία.

Τέλος υπάρχουν, όπως και στα γυροσκόπια, τα μικροηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα(MEMS) που μας ενδιαφέρουν για την έρευνα της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα μικροηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα κάνουν χρήση των ίδιων αρχών που ισχύουν και στα μηχανικά επιταχυνσιόμετρα για να μετρήσουν την γραμμική επιτάχυνση.

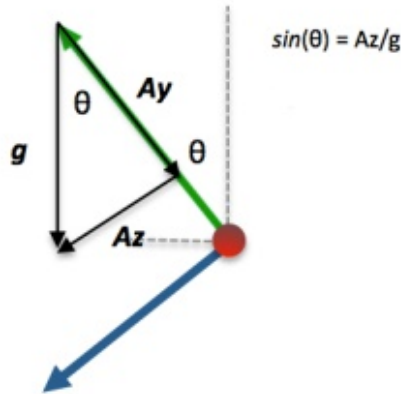


Εικόνα 18: Αρχή λειτουργίας χωρητικών επιταχυνσιόμετρων(MEMS)

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα όταν ασκείται μια δύναμη F στην κινούμενη μάζα που κινείται ελεύθερα μεταξύ δυο σταθερών πλακών, δημιουργώντας δύο πυκνωτές, τότε αλλάζει η χωρητικότητα των πυκνωτών. Αυτή την μεταβολή χρησιμοποιεί ο αισθητήρας μετατρέποντας την σε μια έξοδο τάσης ανάλογη της επιτάχυνσης που δέχεται το σώμα.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου επιταχυνσιόμετρων είναι το μικρό μέγεθος και βάρος, καθώς και η πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Το μειονέκτημα τους είναι ότι υστερούν σε ακρίβεια σε σχέση με τους κλασικούς τύπους επιταχυνσιόμετρων, με την απόδοσή τους όμως να βελτιώνεται συνεχώς.

Για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει σε αυτήν τη μελέτη θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το επιταχυνσιόμετρο για να μετρήσουμε τη γωνία κλίσης του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό χρειαζόμαστε ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων, δηλαδή έναν αισθητήρα που να μετράει την γραμμική επιτάχυνση σε τρεις διαφορετικούς άξονες x, y και z .



Εικόνα 19: Γωνία κλίσης θ ενός σώματος

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα το σώμα περιστρέφεται με άξονα περιστροφής τον άξονα x . Όταν το σώμα έχει γωνία κλίσης θ , η βαρύτητα ασκεί δύναμη στους άξονες y και z . Αφού κάνουμε την προβολή της δύναμης της βαρύτητας κατά μήκος των δυο αξόνων, μπορούμε να ορίσουμε την γραμμική επιτάχυνση στον άξονα z ως εξής:

$$\sin(\theta) = Az/g$$

Συνεπώς το ημίτονο της γωνίας κλίσης θ είναι ίσο με την γραμμική επιτάχυνση στον άξονα z δια την επιτάχυνση της βαρύτητας της Γής g .

Για γωνίες κλίσης μικρότερες των 30 μοιρών μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$\theta(t) = \sin(\theta(t))$$

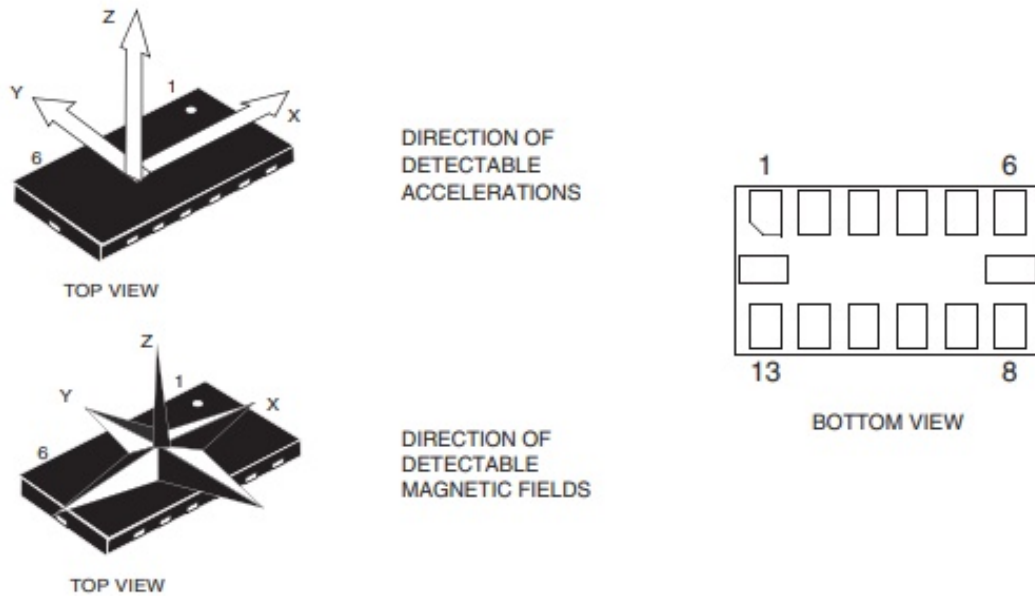
Με απόκλιση μικρότερη ή ίση με $\pm 1\%$

Και κατά συνέπεια:

$$\theta(t) = Az/g$$

Η μέτρηση της γωνίας κλίσης μέσω του επιταχυνσιόμετρου είναι στιγμιαία μέτρηση και δεν παραμένει σταθερή στο πέρασμα του χρόνου.

Ένα χωρητικό επιταχυνσιόμετρο είναι και το LSM303DLHC, το οποίο εκτός από επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων προσφέρει και μαγνητόμετρο.



Εικόνα 20: Άξονες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης, μαγνητικού πεδίου και σχεδιάγραμμα ακροδεκτών του LSM303DLHC

Επίσης μέσω του ολοκληρωμένου κυκλώματος παρέχει την δυνατότητα επικοινωνίας μέσω σειριακού διαύλου I^2C με τον μικροελεγκτή καθώς και ρύθμιση της ευαισθησίας μέτρησης σε κλίμακα 2/4/8/16g γραμμικής επιτάχυνσης.

Pin#	Name	Function
1	Vdd_IO	Power supply for I/O pins
2	SCL	Signal interface I^2C serial clock (SCL)
3	SDA	Signal interface I^2C serial data (SDA)
4	INT2	Inertial interrupt 2
5	INT1	Inertial interrupt 1
6	C1	Reserved capacitor connection (C1)
7	GND	0 V supply
8	Reserved	Leave unconnected
9	DRDY	Data ready
10	Reserved	Connect to GND
11	Reserved	Connect to GND
12	SETP	S/R capacitor connection (C2)
13	SETC	S/R capacitor connection (C2)
14	Vdd	Power supply

Εικόνα 21: Πίνακας επεξήγησης ακροδεκτών του LSM303DLHC.

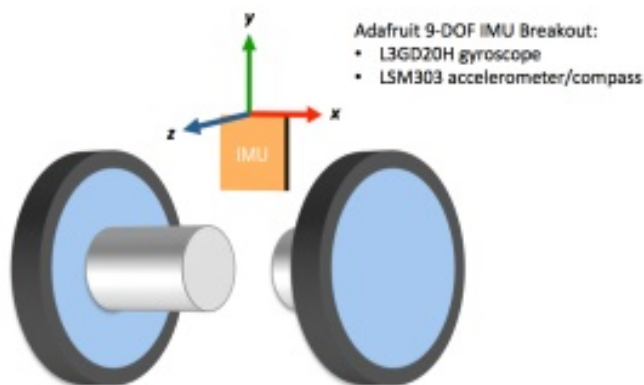
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Το σύστημα IMU(Inertial Measurement Unit) σε ελεύθερη μετάφραση σύστημα αδρανειακής εκτίμησης, είναι μια ηλεκτρονική πλακέτα η οποία χρησιμοποιεί γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα, για να μετατρέψει τα δεδομένα τους σε μια ακριβή θέση και προσανατολισμό στον τρισδιάστατο χώρο.

Η τεχνική αυτή ονομάζεται αδρανειακή πλοήγηση και χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την θέση και την κατεύθυνση ενός μη επανδρωμένου οχήματος(UAV) σε σχέση με την αρχική θέση, ταχύτητα και κατεύθυνση. Συνήθως αυτά τα συστήματα αποτελούνται από επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια τριών αξόνων τα οποία υπολογίζουν την ταχύτητα, την επιτάχυνση για κάθε πιθανό βαθμό ελευθερίας και κατά συνέπεια την θέση του οχήματος.

Η τομείς εφαρμογής της αδρανειακής πλοήγησης έχουν διευρυνθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της εμφάνισης των αισθητήρων MEMS που αναλύθηκαν παραπάνω, και επέτρεψαν την κατασκευή φθηνών και ελαφριών συστημάτων αδρανειακής πλοήγησης.

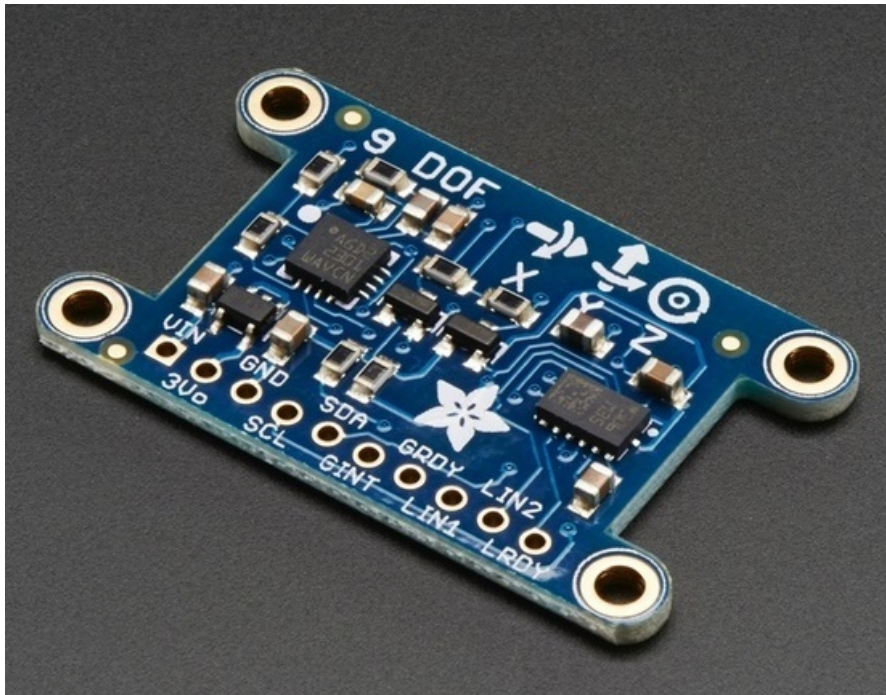
Ένα τέτοιο σύστημα αδρανειακής εκτίμησης είναι το 9-DOF Breakout της Adafruit, το οποίο συνδυάζει το γυροσκόπιο L3GD20H και το επιταχυνσιόμετρο LSM303DLHC που παρουσιάστηκαν εκτενώς στα προηγούμενα υποκεφάλαια.



Εικόνα 22: Σύστημα αδρανειακής εκτίμησης 9 βαθμών ελευθερίας και η τοποθέτηση του σε σχέση με τους άξονες των κινητήρων.

Ουσιαστικά συνδυάζουμε τους δύο αυτούς αισθητήρες σε μια ηλεκτρονική πλακέτα και κατά συνέπεια μειώνουμε τον χώρο που θα καταλαμβάνουν οι αισθητήρες καθώς και την ανάγκη για διαφορετικούς διαύλους επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή.

Επίσης μας δίνετε η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε βιβλιοθήκες εντολών της ίδιας της εταιρίας κατασκευής για τον έλεγχο του συστήματος μέτρησης, η να δημιουργήσουμε τις δικές μας βιβλιοθήκες εντολών για τον έλεγχο της.



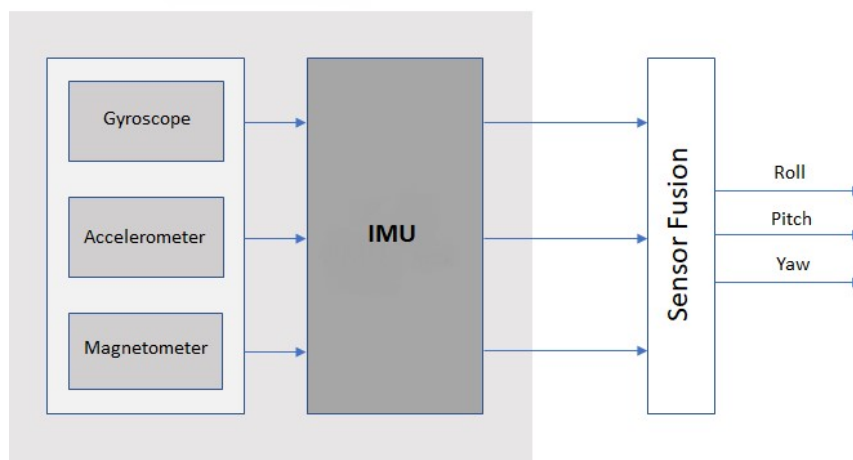
Εικόνα 23: Πλακέτα 9-DOF IMU της Adafruit.

Αυτού του είδους οι πλακέτες έχουν βοηθήσει στην ευκολία κατασκευής διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων και μη επανδρωμένων οχημάτων λόγω του χαμηλού κόστους, του μικρού χώρου που καταλαμβάνουν καθώς και του σχετικά εύκολου τρόπου να προγραμματιστούν και ελεγχθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

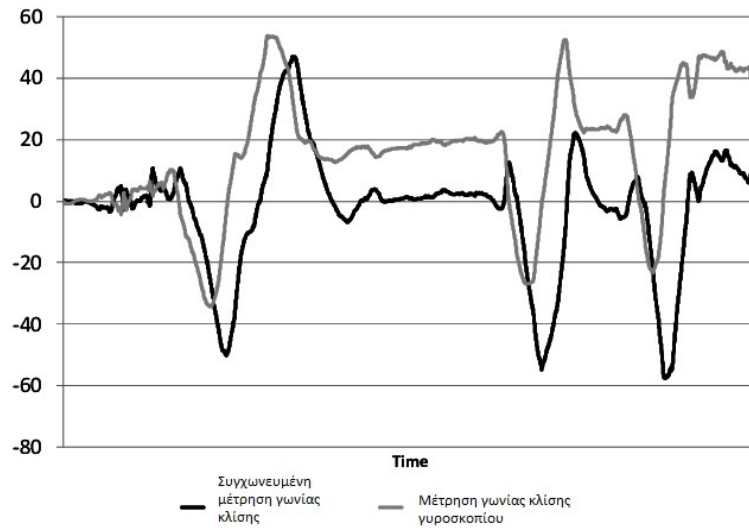
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το μεγαλύτερο πρόβλημα των γυροσκοπίων στην μέτρηση της γωνίας κλίσης είναι η ολίσθηση. Η ολίσθηση προκύπτει από την ενσωμάτωση στην εκτίμηση της γωνίας κλίσης νέων λανθασμένων μετρήσεων της γωνιακής ταχύτητας, αυτό μπορεί να συμβεί είτε λόγω θορύβου και αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αισθητήρα, είτε λόγω εξωτερικού θορύβου που επιδρά στο σύστημα.



Εικόνα 24: Διάγραμμα συγχώνευσης μετρήσεων των αισθητήρων

Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα των μετρήσεων του γυροσκοπίου θα πρέπει να συγκρίνουμε και να συγχωνεύσουμε τις μετρήσεις του με αυτές ενός επιταχυνσιόμετρου. Το επιταχυνσιόμετρο παρότι επηρεάζεται από εξωτερικούς θορύβους και δονήσεις, όπως αυτές που προκαλούν οι κινητήρες, μπορεί να μας δώσει μια αρκετά ακριβή στιγμιαία μέτρηση της γωνίας κλίσης.

Συνεπώς θέλουμε έναν τρόπο να συγκρίνουμε και να συνδυάσουμε αυτές τις διαφορετικές μετρήσεις του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου ώστε να χρησιμοποιήσουμε τα πλεονεκτήματα του καθενός στη μέτρηση και να φιλτράρουμε τα μειονεκτήματά τους.



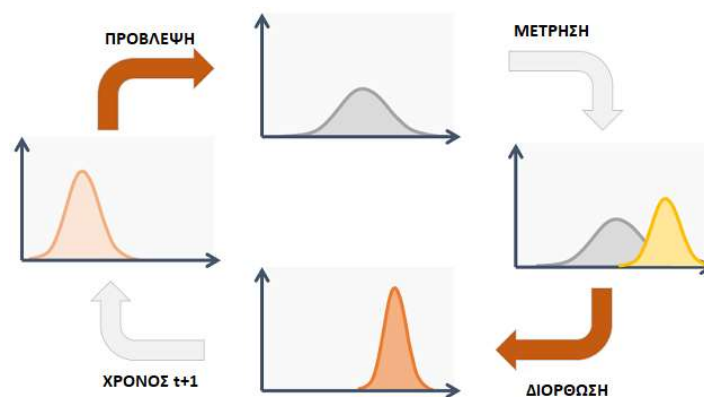
Εικόνα 25: Διαφορά μετρήσεων γωνίας κλίσης

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις για να κάνουμε αυτή τη συγχώνευση. Η πρώτη είναι το φίλτρο Kalman και η δεύτερη το συμπληρωματικό φίλτρο(Complementary Filter).

3.2 ΦΙΛΤΡΟ KALMAN

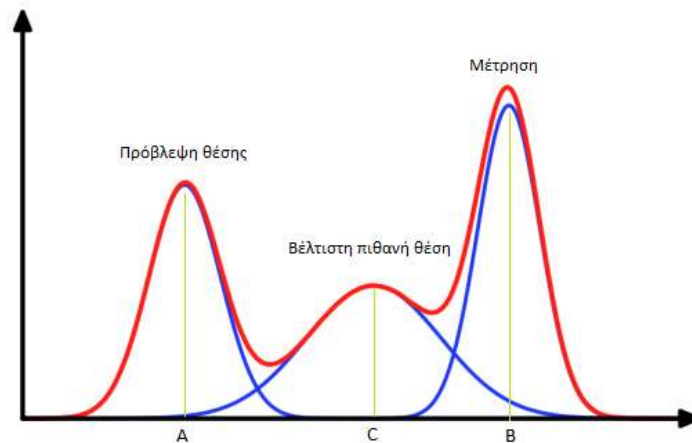
Το φίλτρο Kalman αναπτύχθηκε από τον Rudolf E. Kalman το 1960 ως ένας αλγόριθμος για να υπολογιστεί η κατάσταση ενός συστήματος, που λόγω της παρουσίας θορύβου, τα στοιχεία και οι μετρήσεις για την κατάσταση του μπορούν να θεωρηθούν αναξιόπιστα.

Η ανάπτυξη του φίλτρου Kalman είναι από τα πιο σημαντικά τεχνολογικά επιτεύγματα του προηγούμενου αιώνα καθώς μας έδωσε την ικανότητα να απαλλαγούμε σε ένα μεγάλο βαθμό από την αβεβαιότητα που προκαλεί ο θόρυβος σε όλων των ειδών τις μετρήσεις.



Εικόνα 26: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας του φίλτρου Kalman

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι και ο υπολογισμός της τροχιάς του διαστημικού σκάφους Apollo το οποίο χρησιμοποίησε το φίλτρο Kalman για την απαλλαγή από θορύβους και διαταραχές στην μέτρηση απόστασης και τροχιάς. Επίσης έχει βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως η εκτίμηση θέσης ενός αυτοκινήτου μέσω GPS, η εξομάλυνση μηνυμάτων ήχου ή εικόνας καθώς και σε οποιαδήποτε εφαρμογή απαιτεί υψηλή ακρίβεια δεδομένων.



Εικόνα 27: Γραφική παράσταση εκτίμησης θέσης αυτοκινήτου μέσω GPS με χρήση φίλτρου Kalman

Το φίλτρο Kalman λειτουργεί σε πρώτο στάδιο προβλέποντας τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών κατάστασης, υπολογίζοντας επίσης και την αβεβαιότητα τους. Όταν συμβαίνει η επόμενη μέτρηση τότε αυτές οι εκτιμήσεις αναπροσαρμόζονται δίνοντας βαρύτητα στις εκτιμήσεις με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Όλη η παραπάνω διαδικασία στηρίζεται στο ότι το σύστημα στο οποίο υλοποιείται είναι ένα γραμμικό δυναμικό σύστημα και ότι οι παράγοντες του σφάλματος ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Συνεπώς το φίλτρο Kalman δίνει λύση στο πρόβλημα της εκτίμησης της μεταβλητής κατάστασης x μιας διαδικασίας ελέγχου διακριτού χρόνου, η οποία συνήθως δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, και έχει χαρακτηριστική εξίσωση:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$

Η μεταβλητή x μπορεί να εκτιμηθεί όμως από μια συσκευή μέτρησης της οποίας η χαρακτηριστική εξίσωση είναι:

$$z_k = Hx_k + u_k$$

Όπου k τα διακριτά χρονικά σημεία, ενώ w_k και u_k είναι ο θόρυβος ο οποίος επιδρά στο σύστημα και ακολουθεί την κανονική κατανομή. Οι πίνακες συνδιακύμανσης των μεταβλητών του θορύβου w_k και u_k είναι οι Q και R αντίστοιχα.

$$Q = \text{cov}(w) \text{ και } R = \text{cov}(u)$$

Συνήθως ο πίνακας συνδιακύμανσης R μπορεί να εκτιμηθεί η και να υπολογιστεί βάση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση. Ενώ ο πίνακας Q μπορεί να εκτιμηθεί και ρυθμιστεί βάση δοκιμών.

Το πρώτο βήμα στην υλοποίηση του φίλτρου είναι η εκτίμηση και δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

Όπου το διάνυσμα στήλης \hat{x}_k^- είναι η a priori εκτίμηση της μεταβλητής x_k πριν την μέτρησή της, ενώ ο πίνακας P_k^- είναι η a priori εκτίμηση της διακύμανσης του σφάλματος.

$$P_k^- = \text{cov}(x_k - \hat{x}_k^-)$$

Επόμενο βήμα στην υλοποίηση είναι η διόρθωση και δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

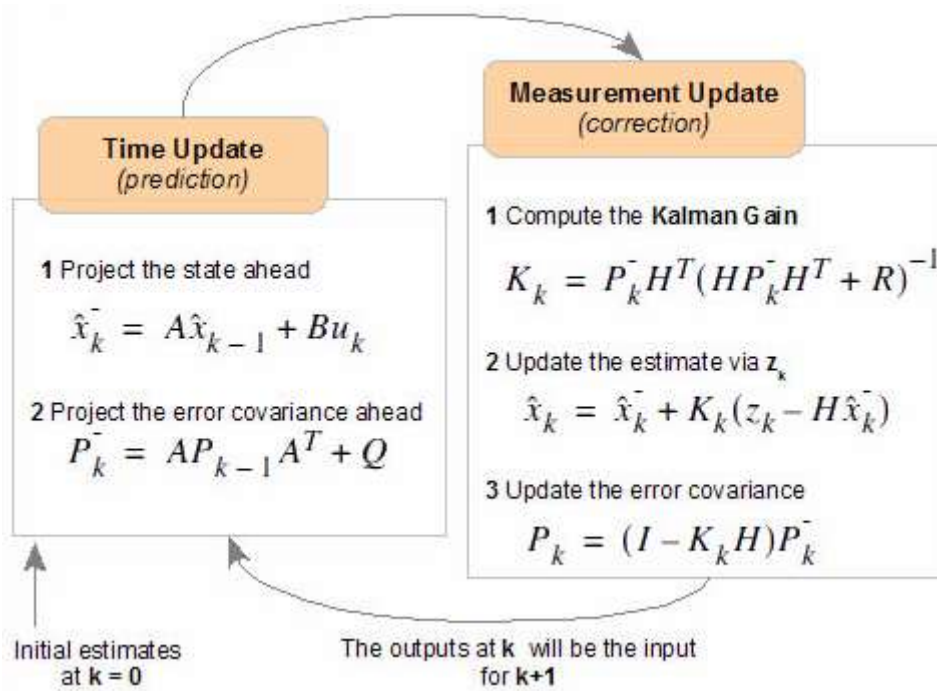
$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

Όπου K_k ο πίνακας του κέρδους Kalman που χρησιμοποιείται στην επόμενη εξίσωση για να υπολογίσει την μεταβλητή κατάστασης και P_k ο πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος την χρονική στιγμή k που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επόμενης συνδιακύμανσης σφάλματος.

Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το φίλτρο Kalman για να συνδυάσουμε αποτελεσματικά και χωρίς απόκλιση τις μετρήσεις του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου.



Εικόνα 28: Διάγραμμα λειτουργίας του φίλτρου Kalman

Η διαδικασία μέτρησης και συνδυασμού των μετρήσεων, με βάση το προηγούμενο παράδειγμα, δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\delta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -dt \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{k-1} \\ \dot{\theta}_{k-1} \\ \dot{\delta}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k-1}^{gyro} \\ \theta_{k-1}^{accel} \end{bmatrix} + w_{k-1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_k^{gyro} \\ \theta_k^{accel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\delta}_k \end{bmatrix} + u_k$$

Όπου θ_k η γωνιά κλίσης σε rad, $\dot{\theta}_k$ η γωνιακή ταχύτητα σε rad/s και $\dot{\delta}_k$ η προσαύξηση στο συστηματικό σφάλμα σε rad/s. Η σταθερά dt είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο μετρήσεις.

Οι μεταβλητές $\dot{\theta}_k^{gyro}$ και θ_k^{accel} αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου σε rad/s και rad αντίστοιχα.

Ο πίνακας συνδιακύμανσης Q μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά ενώ ο πίνακας R μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την διακύμανση στο σφάλμα μέτρησης του κάθε αισθητήρα που μπορούμε να βρούμε στο τεχνικό του φυλλάδιο.

Κατά συνέπεια οι εξισώσεις εκτίμησης του φίλτρου είναι οι εξής:

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\delta}_k^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -dt \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{k-1} \\ \hat{\theta}_{k-1} \\ \hat{\delta}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k-1}^{gyro} \\ \theta_{k-1}^{accel} \end{bmatrix}$$

$$P_k^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -dt \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_{k-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -dt & -1 & 1 \end{bmatrix} + Q$$

Και οι εξισώσεις μέτρησης ή διόρθωσης:

$$K_k = P_k^- \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} P_k^- \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + R \right)^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_k \\ \hat{\theta}_k \\ \hat{\delta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\delta}_k^- \end{bmatrix} + K_k \left(\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k-1}^{gyro} \\ \theta_{k-1}^{accel} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\delta}_k^- \end{bmatrix} \right)$$

$$P_k = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - K_k \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) P_k^-$$

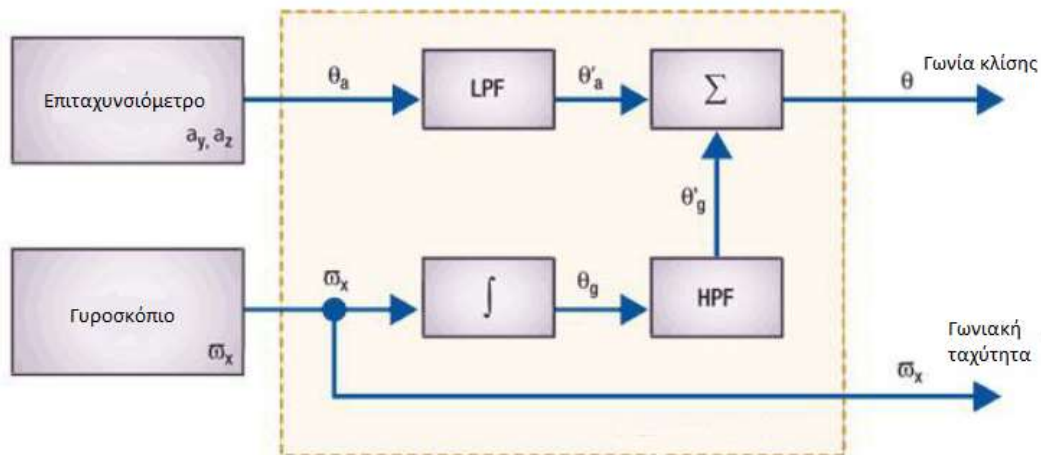
Καθώς και οι πίνακες συνδιακύμανσης σφάλματος:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.2dt \\ 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2dt \\ 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix}^T$$

$$R = \begin{bmatrix} var(\dot{\theta}^{gyro}) & 0 \\ 0 & var(\theta^{accel}) \end{bmatrix}$$

3.3 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ

Το συμπληρωματικό φίλτρο χρησιμοποιείται για να συνδυάσει τις μετρήσεις του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου, η εκτίμηση της γωνίας κλίσης δίνεται από την άθροιση των μετρήσεων των αισθητήρων. Η ολοκλήρωση της εξόδου του γυροσκοπίου περνάει από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο(low-pass) ενώ η έξοδος του επιταχυνσιόμετρου από ένα υψιπερατό φίλτρο(high-pass), έπειτα αθροίζονται και έτσι έχουμε την εκτίμηση της γωνίας κλίσης.



Εικόνα 29: Διάγραμμα λειτουργίας συμπληρωματικού φίλτρου

Συνεπώς η εξίσωση του υπολογισμού της γωνίας κλίσης είναι η εξής:

$$\theta = \theta_g + \theta'_a = \beta * \theta_g + \alpha * \theta_a \quad \text{όπου } \alpha = 1 - \beta$$

Αν θεωρήσουμε ότι η συχνότητα της δειγματοληψίας των αισθητήρων είναι 200Hz και κατά συνέπεια η περίοδος δειγματοληψίας είναι 0.02s, τότε η σταθερά χρόνου του συμπληρωματικού φίλτρου είναι:

Για $\beta=0.95$

$$\tau = \frac{\beta * \Delta t}{1 - \beta} = \frac{0.95 * 0.02}{1 - 0.95} = 0.38$$

Όταν η κίνηση είναι γρηγορότερη από την περίοδο των 0.38 δευτερολέπτων, τότε οι μετρήσεις του γυροσκοπίου αθροίζονται με μεγαλύτερη βαρύτητα και ο θόρυβος του

επιταχυνσιόμετρο φιλτράρεται. Όταν η κίνηση είναι πιο αργή από την περίοδο που αναφέραμε πιο πάνω, τότε η μέτρησης της κλίσης από το επιταχυνσιόμετρο αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα και η απόκλιση του γυροσκοπίου φιλτράρεται.

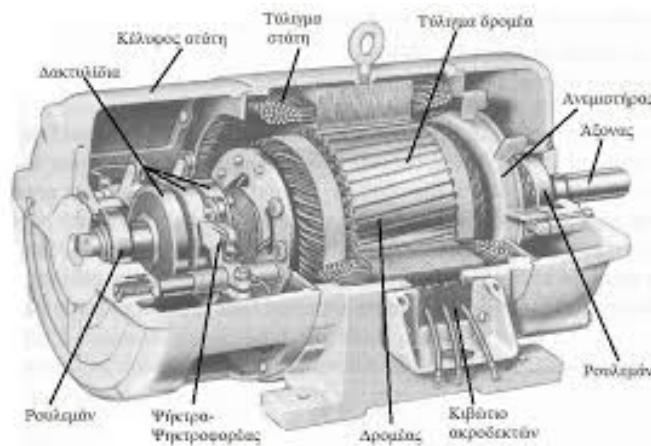
Το συμπληρωματικό φίλτρο συνήθως προτιμάται σε εφαρμογές με μικροελεγκτές λόγω της ευκολίας στην υλοποίηση και την εφαρμογή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Έχοντας χρησιμοποιήσει τους αισθητήρες για να μετρήσουμε τη γωνία κλίσης, το επόμενο βήμα είναι να δώσουμε την εντολή στο ελεγχόμενο σύστημα μέσω του PID για να προσπαθήσουμε να ισορροπήσουμε το όχημα. Το ελεγχόμενο σύστημα στην περίπτωση μας είναι οι κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν την οριζόντια κίνηση στο επίπεδο που θα επιτρέψει στο όχημα να έρθει σε ισορροπία.

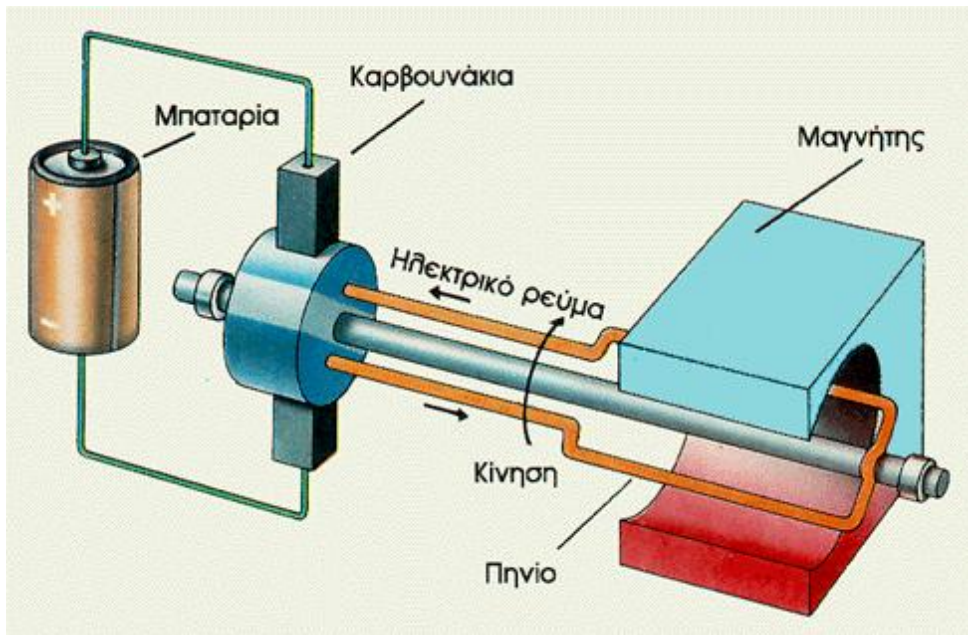
Μια πιθανή επιλογή κινητήρων είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος(DC). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από τον δρομέα, τον στάτη, τον οπλισμό και τον μεταγωγό.



Εικόνα 30: Μέρη κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος έχει μαγνήτες, είτε μόνιμους είτε ηλεκτρομαγνητικά τυλίγματα, που δημιουργούν μαγνητικό πεδίο. Όταν το ρεύμα διαρρέει τον οπλισμό, που είναι τοποθετημένος ανάμεσα στον βόρειο και νότιο πόλο του μαγνήτη, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον οπλισμό επιδρά με το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη και δημιουργεί ροπή στρέψης.

Συνήθως στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος οι μαγνήτες βρίσκονται τοποθετημένοι στον στάτη, ενώ το τύλιγμα ή οπλισμός είναι τοποθετημένο στον δρομέα και μέσω του μεταγωγού τροφοδοτείται ρεύμα στο κάθε πηνίο του οπλισμού. Ουσιαστικά ο μεταγωγός συνδέει τη σταθερή πηγή τάσης με τον περιστρεφόμενο οπλισμό μέσω ψηκτρών(καρβουνάκια).



Εικόνα 31: Αρχή λειτουργίας κινητήρα συνεχούς ρεύματος

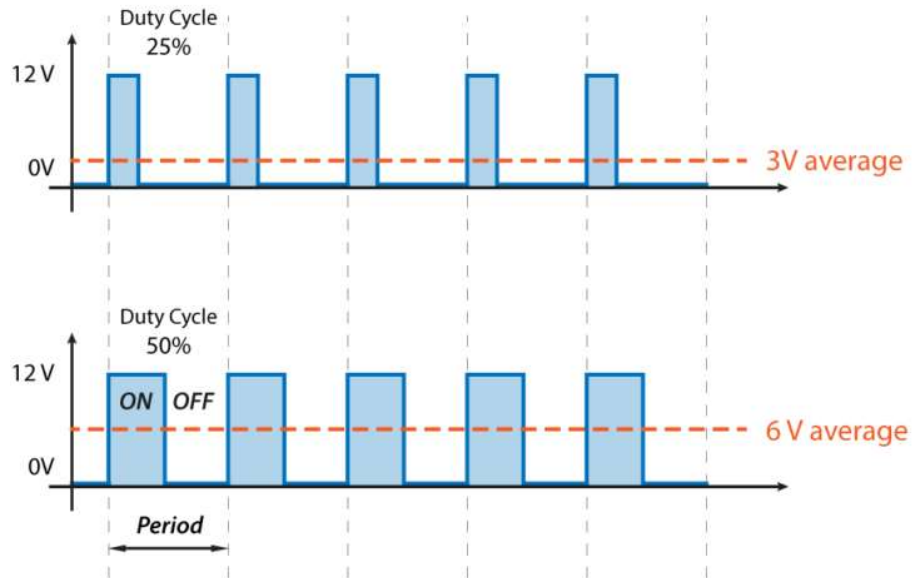
Η χρήση του μεταγωγού με τις ψήκτρες δημιουργεί μηχανικά προβλήματα όπως η τριβή των ψήκτρων, που μπορεί να επιφέρει απώλεια ισχύος καθώς και φθορά στις ίδιες τις ψήκτρες που χρειάζεται ανά διαστήματα να αντικαθίστανται με καινούργιες. Συνεπώς δημιουργούν πρόβλημα για εφαρμογές κλειστού τύπου όπου δεν είναι δυνατή η προσπέλαση των εσωτερικών μερών για να γίνουν οι αλλαγές στις ψήκτρες.

Αυτά τα ζητήματα οδήγησαν στην κατασκευή κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless), στους οποίους ο μόνιμος μαγνήτης βρίσκεται τοποθετημένος στον δρομέα και ο οπλισμός βρίσκεται τοποθετημένος στον στάτη. Τα τυλίγματα του οπλισμού δημιουργούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο καθώς διαρρέονται από ρεύμα ξεχωριστά το κάθε ένα και ο σταθερός μαγνήτης του δρομέα περιστρέφεται κινώντας το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι εύκολοι στην οδήγηση τους και στον έλεγχο της ταχύτητας τους καθώς ελέγχοντας την τάση εισόδου στον κινητήρα ελέγχουμε και την ταχύτητα του. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος να το κάνουμε αυτό είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM).

Αυτή η τεχνική μας επιτρέπει να καθορίσουμε την μέση τάση που θα τροφοδοτήσουμε στον κινητήρα εναλλάσσοντας πολύ γρήγορα την κατάσταση τροφοδοσίας από ON σε OFF.

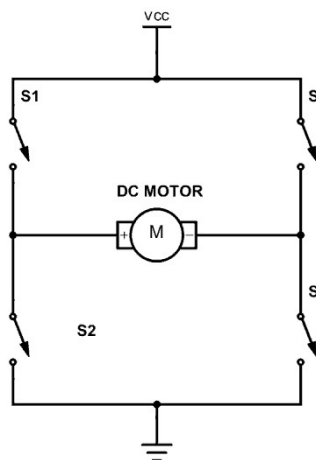
Η μέση τάση εξαρτάται από τον κύκλο λειτουργίας, ο οποίος είναι το ποσοστό του χρόνου που το σήμα της τροφοδοσίας του κινητήρα είναι σε υψηλή κατάσταση (ON) σε σχέση με τον συνολικό χρόνο.



Εικόνα 32: Διαμόρφωση πλάτους παλμού

Αυτό μπορεί πολύ απλά να γίνει με ένα τρανζίστορ MOSFET συνδεδεμένο σε έναν ακροδέκτη PWM στο Arduino. Ελέγχοντας τον παλμό στη βάση του μέσω της διαμόρφωσης παλμού ελέγχουμε και την ταχύτητα του κινητήρα που τροφοδοτείται μέσω του MOSFET.

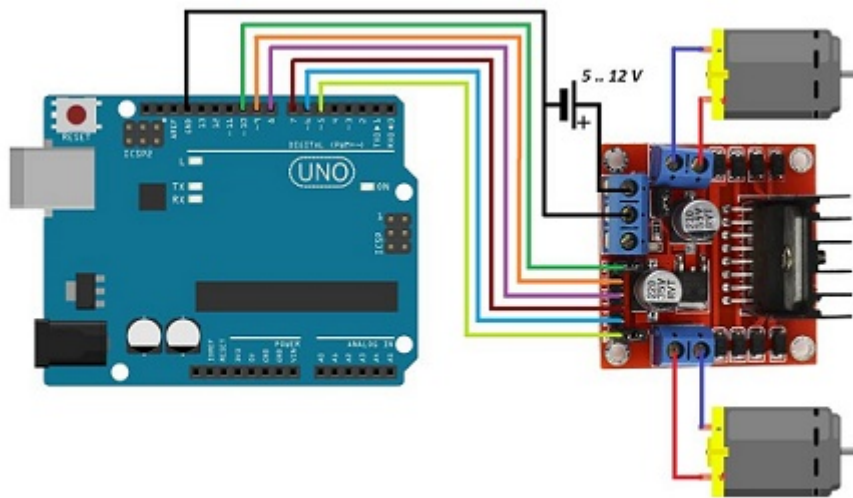
Πέρα από τον έλεγχο της ταχύτητας πρέπει να έχουμε και έλεγχο της φοράς περιστροφής του κινητήρα, αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής του ρεύματος στον κινητήρα.



Εικόνα 33: Διάταξη γέφυρας H

Ο πιο εύκολος τρόπος για να το επιτύχουμε αυτό είναι να χρησιμοποιήσουμε μια γέφυρα H, η οποία αποτελείται από 4 διακόπτες συνήθως τρανζίστορ και τον κινητήρα στη μέση αυτής της διάταξης. Ενεργοποιώντας τους διακόπτες κατά ζεύγη, ένα ζεύγος κάθε φορά S1,S4 και S2,S3 ελέγχουμε την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος μέσα στον κινητήρα και κατά συνέπεια τη φορά περιστροφής του.

Οι δύο αυτές υλοποιήσεις ελέγχου ταχύτητας και κατεύθυνσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται και σε πολλούς οδηγούς κινητήρων, ένας από αυτούς είναι και ο L298N.



Εικόνα 34: Σχεδιάγραμμα διασύνδεσης L298N με Arduino

Ο οδηγός αυτός απαρτίζεται από δυο γέφυρες H και επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο ταχύτητας και φοράς περιστροφής για δυο κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες θα πρέπει να έχουν τάση λειτουργίας 5-35V και μέγιστο ρεύμα 2A.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των κινητήρων γίνεται στους ακροδέκτες Enable A και Enable B της πλακέτας του οδηγού, όπου συνδέουμε μια έξοδο PWM του Arduino. Ενώ οι ακροδέκτες Input 1-4 χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της φοράς περιστροφής των κινητήρων, όταν στον ακροδέκτη 1 στείλουμε 5V(1) και στον ακροδέκτη 2 στείλουμε 0V(0) τότε ο κινητήρας θα κινηθεί με τη φορά του ρολογιού, εάν δώσουμε αντίθετα τις τάσεις στους ακροδέκτες θα κινηθεί αντίστροφα από την φορά του ρολογιού. Στην περίπτωση που και οι δυο ακροδέκτες έχουν την ίδια κατάσταση ο κινητήρας θα σταματήσει.

Ένα από τα προβλήματα που υπάρχουν με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σε εφαρμογές σαν αυτή που μελετούμε, είναι ότι δεν έχουμε έναν κλάδο ανάδρασης για την συμπεριφορά τους.

Λόγω μηχανικών και ηλεκτρικών διαφορών ανάμεσα σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος ακόμα και του ίδιου μοντέλου, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την συμπεριφορά τους. Δηλαδή μπορεί λόγω αυτών των διαφορών δυο ίδιοι κινητήρες με τάση τροφοδοσίας 10V, ο ένας να περιστρέφεται με 1000 στροφές και ο άλλος με 1002 με συνέπεια σε εφαρμογές όπως η εξισορρόπηση ενός ανάστροφου εκκρεμούς να έχουμε μεγάλο πρόβλημα ακρίβειας στον έλεγχο των κινητήρων.

Ένας τρόπος ελέγχου της συμπεριφοράς του κινητήρα και δημιουργίας ουσιαστικά ενός κλάδου ανάδρασης στον έλεγχο του κινητήρα είναι η προσθήκη κωδικοποιητή(encoder).



Εικόνα 35: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με κωδικοποιητή στο πίσω μέρος

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος με κωδικοποιητή μας επιτρέπει να ελέγξουμε την ταχύτητα του κινητήρα, την κατεύθυνση του και κατά συνέπεια την απόσταση που έχει καλύψει σε ένα συγκεκριμένο χρόνο. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε μεγαλύτερο έλεγχο στην λειτουργία του κινητήρα και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως αυτή που μελετούμε.

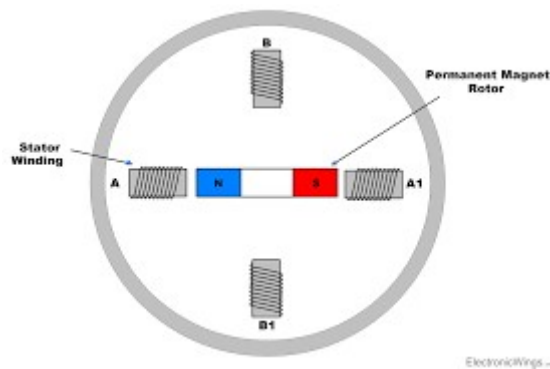
Τέλος πολύ σημαντικό κριτήριο στην επιλογή κινητήρα συνεχούς ρεύματος αλλά και γενικά διαφόρων ειδών κινητήρων είναι η ταχύτητά του, η οποία μετριέται σε περιστροφές ανά λεπτό(RPM) αλλά και η ροπή του.

4.2 ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι βηματικοί κινητήρες είναι στην ουσία κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες οι οποίοι περιστρέφονται με συγκεκριμένο βήμα. Αυτό μας επιτρέπει να τους περιστρέψουμε με ακρίβεια γνωρίζοντας πάντα την θέση τους, χωρίς να χρησιμοποιήσουμε ένα κλειστό σύστημα ελέγχου.

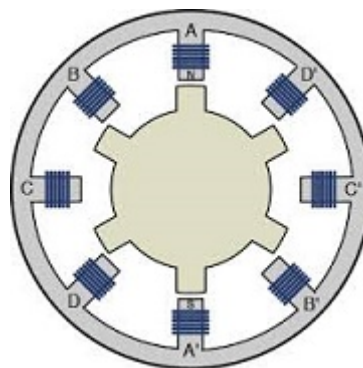
Οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση την κατασκευή τους και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη στον δρομέα όπου τα τυλίγματα στον στάτη δημιουργούν αντίθετη πολικότητα με αυτή του δρομέα αναγκάζοντας τον να περιστραφεί.



Εικόνα 36: Βηματικός κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη στον δρομέα

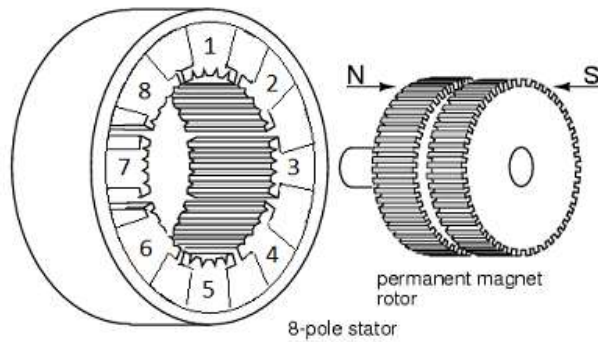
Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητή μαγνητικής αντίδρασης όπου ο δρομέας αποτελείται από μαλακό σίδηρο και έχει την γεωμετρία γραναζιού. Όταν ο σπλισμός του στάτη διαρρέεται από ρεύμα τότε τα δόντια του δρομέα έλκονται από τους μαγνητισμένους πόλους του στάτη.



Εικόνα 37: Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης

Η τρίτη κατηγορία βηματικών κινητήρων είναι οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες. Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες είναι μια σύνθεση των στοιχείων των δυο προηγούμενων κατηγοριών, όπου ο δρομέας είναι μόνιμος μαγνήτης με δόντια και ο στάτης είναι και αυτός οδοντωτός.

Επίσης ο δρομέας χωρίζεται σε δυο τμήματα τα οποία είναι οδοντωτά αλλά έχουν την αντίθετη πολικότητα.

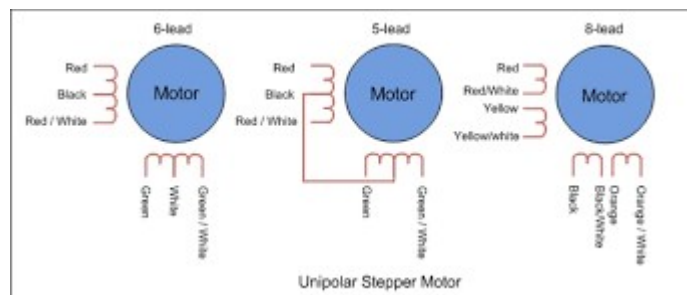


Εικόνα 38: Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Οι υβριδικοί κινητήρες παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση στην ακρίβεια του βήματος καθώς και στην ροπή και την ταχύτητα.

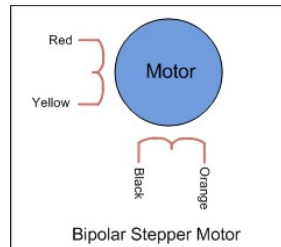
Επίσης οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες με βάση τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα τα τυλίγματα τους.

Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες έχουν δυο περιελίξεις ανά φάση, σε αυτή τη διάταξη ο μαγνητικός πόλος μπορεί να αντιστραφεί χωρίς την αλλαγή πολικότητας του ρεύματος



Εικόνα 39: Τύποι μονοπολικών βηματικών κινητήρων

Σε αντίθεση με τους μονοπολικούς βηματικούς κινητήρες, οι διπολικοί κινητήρες έχουν ένα τύλιγμα για κάθε φάση και κατά συνέπεια για να αντιστραφεί η πολικότητα ενός μαγνητικού πόλου θα πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα.

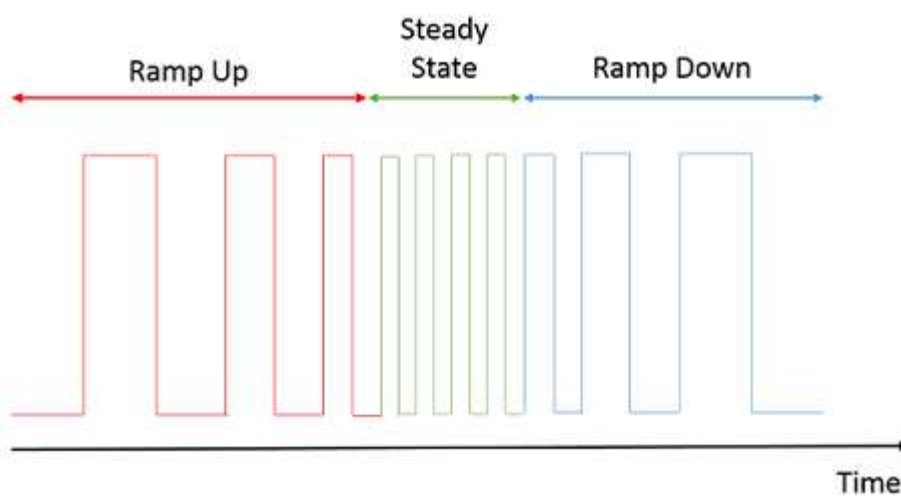


Εικόνα 40: Διπολικός βηματικός κινητήρας

Για αυτό τον λόγο συνηθίζεται η χρησιμοποίηση μια γέφυρας Η όπως είδαμε και παραπάνω για την αντιστροφή της πολικότητας του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα.

Ο λόγος που προτιμούνται οι βηματικοί κινητήρες από του απλούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η ακρίβεια, είναι ότι μπορούν να παρέχουν ακριβή έλεγχο θέσης και επαναληψιμότητα στην κίνηση τους. Επίσης έχουν άμεση απόκριση κατά την έναρξη της κίνησης καθώς και στην διακοπή ή αναστροφή της κίνησης.

Για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων χρησιμοποιείται συνήθως ένας οδηγός που παρέχει ένα παλμό για να ελέγξουμε τα βήματα του κινητήρα καθώς και ένα σήμα για να ελέγξουμε τη φορά περιστροφής του κινητήρα.



Εικόνα 41: Αλλαγή της συχνότητας του παλμού για να έχουμε επιτάχυνση,

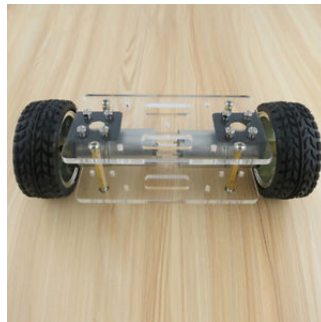
σταθερή ταχύτητα και επιβράδυνση

Η διαφορά σε σχέση με τον έλεγχο των απλών κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι ότι στην περίπτωση των βηματικών κινητήρων δεν αρκεί η διαμόρφωση πλάτους παλμού για να ελέγξουμε την ταχύτητα. Για να ελέγξουμε την ταχύτητα περιστροφής των βηματικών κινητήρων θα πρέπει να μπορούμε να ελέγξουμε την συχνότητα του παλμού που στέλνουμε, πράγμα που μπορούμε να επιτύχουμε χρησιμοποιώντας τους χρονιστές του Arduino.

4.3 ΠΛΑΙΣΙΟ

Το επόμενο βήμα στην μελέτη ενός ρομπότ με αυτόματη εξισορρόπηση είναι η επιλογή των στοιχείων που θα αποτελέσουν το πλαίσιο ή σασί του ρομπότ. Η γεωμετρία του πλαισίου παίζει σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια εξισορρόπησης, καθώς το βάρος και οι απόσταση από τον άξονα περιστροφής του κέντρου μάζας είναι μέρη της εξίσωσης.

Για την κατασκευή του πλαισίου συνήθως χρησιμοποιούνται ελαφρά υλικά όπως αλουμίνιο και πλεξιγκλάς, καθώς όσο μικρότερο το βάρος της κατασκευής τόσο χαμηλότερες είναι απαιτήσεις στην επιλογή του κινητήρα σε σχέση με την ροπή που μπορεί να παρέχει και κατά συνέπεια με το κόστος του.



Εικόνα 42: Πλαίσιο με χρησιμοποίηση πλεξιγκλάς και αποστατών

Με την ευρεία διάδοση της τρισδιάστατης εκτύπωσης κερδίζουν έδαφος οι κατασκευές πλαισίου με 3D εκτυπωτές. Τα αρκετά ανθεκτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση όπως το ABS μας δίνουν την δυνατότητα να σχεδιάσουμε και να εκτυπώσουμε το δικό μας πλαίσιο σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής μας.

Ένα μεγάλο προτέρημα αυτής της επιλογής είναι το χαμηλό κόστος υλοποίησης καθώς και η ελευθερία στον τρόπο κατασκευής και συναρμολόγησης.



Εικόνα 43: Εκτυπωμένο πλαίσιο σε 3D εκτυπωτή

Επίσης προσφέρει υψηλή εξατομίκευση καθώς δεν περιορίζει την κατασκευή σε ήδη υπάρχοντες τρόπους στήριξης και συναρμολόγησης των διαφόρων μερών του οχήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΚΩΔΙΚΑΣ

Πάνω στην μελέτη για τους τρόπους κατασκευής ενός ρομπότ με αυτόματη εξισορρόπηση έγιναν δοκιμές με ένα Arduino Uno σε συνδυασμό με ένα 9-DOF IMU, έναν οδηγό κινητήρων βασισμένο στο ολοκληρωμένο L298N και δυο απλούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Παρακάτω παρατίθενται τμήματα του κώδικα για την αρχικοποίηση των αισθητήρων, της επικοινωνίας, των μετρήσεων, την υλοποίηση του PID ελεγκτή καθώς και των έλεγχων των κινητήρων μέσω διαμόρφωσης πλάτους παλμού.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_L3GD20_U.h>

#include <Adafruit_LSM303_U.h>

#include <PID_v1.h>
```

Στο παραπάνω τμήμα κώδικα γίνεται η εισαγωγή των βιβλιοθηκών που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα. Πρόκειται για την βιβλιοθήκη επικοινωνίας των αισθητήρων με τον Arduino μέσω του πρωτοκόλλου I^2C , τις βιβλιοθήκες των αισθητήρων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και την μετατροπή τους σε πληροφορίες διαχειρίσιμες από το πρόγραμμα καθώς και την βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του ελεγκτή PID.

```
Adafruit_L3GD20_Unified gyro = Adafruit_L3GD20_Unified(20);

Adafruit_LSM303_Accel_Unified accel = Adafruit_LSM303_Accel_Unified(54321);

int a,i=0;

float gyro_x=0.0,accel_z=0.0,x_bias,z_bias,sumx=0.0,sumz=0.0;
```

```

float gyro_angle=0.0;

float theta=0.0;

float theta_deg=0.0;

float Real_Angle=0.0;

float accel_theta=0.0;

const int Dir1a = 2;

const int Dir1b = 4;

const int Enable1 = 3;

const int Dir2a = 7;

const int Dir2b = 8;

const int Enable2 = 5;

byte pwmValue1 = 0;

byte pwmValue2 = 0;

double Setpoint, Input, Output;

double Kp=0.9, Ki=0.5, Kd=0.6;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd,DIRECT);

```

Εδώ γίνεται η εισαγωγή διευθύνσεων στα αισθητήρια για την επικοινωνία τους με τον επεξεργαστή καθώς και η αρχικοποίηση όλων των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα. Επίσης ορίζονται οι συγκεκριμένοι ακροδέκτες του Arduino για τις ανάλογες λειτουργίες που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και οι όροι του ελεγκτή PID.

```

int STD_LOOP_TIME=10;

int lastLoopTime = STD_LOOP_TIME;

```

```
unsigned long loopStartTime = 0;
```

Αρχικοποίηση των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στην μέτρηση του χρόνου εκτέλεσης του κώδικα και κατά συνέπεια στον υπολογισμό του χρόνου ανάμεσα στις μετρήσεις που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της γωνίας κλίσης.

```
void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);

  pinMode(Dir1a, OUTPUT);
  pinMode(Dir1b, OUTPUT);
  pinMode(Enable1, OUTPUT);
  pinMode(Dir2a, OUTPUT);
  pinMode(Dir2b, OUTPUT);
  pinMode(Enable2, OUTPUT);

  gyroRange_t rng = GYRO_RANGE_2000DPS;

  gyro.begin(rng);
  accel.begin();

  Input = Real_Angle;

  Setpoint = 0;
```

```

myPID.SetMode(AUTOMATIC);

myPID.SetOutputLimits(-255, 255);

displaySensorDetails();

sensors_event_t event_g;

sensors_event_t event_a;

gyro.getEvent(&event_g);

accel.getEvent(&event_a);

for(i=1;i<=1000;i++)

{

    sumx=sumx+event_g.gyro.x;

    sumz=sumz+event_a.acceleration.z;

}

x_bias=sumx/1000.0f;

z_bias=sumz/1000.0f;

}

```

Το παραπάνω τμήμα κώδικα θα εκτελεστεί μόνο μια φορά κατά την εκκίνηση του Arduino. Περιέχει την αρχικοποίηση και έναρξη της σειριακής επικοινωνίας για λόγους αποσφαλμάτωσης, τον καθορισμό των ακροδεκτών που θα είναι υπεύθυνοι για των έλεγχο των κινητήρων και την ρύθμιση ακρίβειας των αισθητήρων.

Επίσης περιέχει τις εντολές έναρξης λειτουργίας των αισθητήρων, την έναρξη του ελεγκτή PID και καθορισμό των μεταβλητών του και του πλαισίου της εξόδου του.

Τέλος περιέχει μια επανάληψη η οποία θα λάβει 1000 μετρήσεις από τους δυο αισθητήρες όταν το ρομπότ βρίσκεται σε ηρεμία στη θέση ισορροπίας θα τις αθροίσει και θα πάρει τον μέσο όρο. Αυτός ο μέσος όρος θα αφαιρείται από τις μετρήσεις των αισθητηρίων σε κάθε επανάληψη για να προκύψουν οι πραγματικές τιμές μετρήσεων. Αυτή η τακτική ονομάζεται zeroing και χρησιμοποιείται για να γίνει η αρχικοποίηση των αισθητήρων και να αφαιρεθούν τυχαίες διακυμάνσεις των μετρήσεων σε κατάσταση ηρεμίας.

```
sensors_event_t event_g;
```

```
gyro.getEvent(&event_g);
```

```
sensors_event_t event_a;
```

```
accel.getEvent(&event_a);
```

Ανάκτηση των μετρήσεων από τους αισθητήρες.

```
gyro_x=(event_g.gyro.x-x_bias)/0.01745329252f;
```

```
gyro_angle=Real_Angle+(gyro_x*lastLoopTime/1000.0f);
```

Υπολογισμός της γωνίας κλίσης σε μοίρες μέσω της ολοκλήρωσης της γωνιακής ταχύτητα που μετράτε από το γυροσκόπιο με χρόνο που πέρασε από την προηγούμενη μέτρηση.

```
accel_z=event_a.acceleration.z-z_bias;
```

```
accel_theta=accel_z/9.80665f;
```

```
theta_deg=accel_theta/0.01745329252f;
```

Υπολογισμός της γωνίας κλίσης και μετατροπή της σε μοίρες με βάση τις μετρήσεις του επιταχυνσιόμετρου.

```
Real_Angle=(0.98f*gyro_angle)+(0.02f*theta);
```

Υλοποίηση του συμπληρωματικού φίλτρου για την συγχώνευση των μετρήσεων γυροσκοπίου και επιταχυνσιόμετρου.

```
Input =Real_Angle;
```

```
myPID.Compute();
```

Εισαγωγή της τελικής γωνίας κλίσης στον PID και έναρξη του υπολογισμού της εξόδου του.

```
if(Output<0)
```

```
{
```

```
    a=Output;
```

```
    digitalWrite(Dir1a, LOW);
```

```
    digitalWrite(Dir1b, HIGH);
```

```
    digitalWrite(Dir2a, HIGH);
```

```
    digitalWrite(Dir2b, LOW);
```

```
}
```

```
else if(Output>0)
```

```
{
```

```
    a=Output;
```

```
digitalWrite(Dir1a, HIGH);  
  
digitalWrite(Dir1b, LOW);  
  
digitalWrite(Dir2a, LOW);  
  
digitalWrite(Dir2b, HIGH);  
  
}  
  
analogWrite(Enable1,abs(a));  
  
analogWrite(Enable2,abs(a));
```

Αναλόγως την έξοδο του PID δίνουμε τις κατάλληλες εντολές στου κινητήρες, τον ανάλογο παλμό PWM καθώς και την φορά περιστροφής.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα πάνω στην υλοποίηση ενός ρομποτικού οχήματος με αυτόματη εξισορρόπηση έγινε με σκοπό την διερεύνηση του μαθηματικού μοντέλου του ανάστροφου εκκρεμούς και της θεωρίας ελέγχου που διέπει την εξισορρόπηση ενός εγγενώς ασταθούς συστήματος, καθώς και την ανάλυση όλων των βασικών ηλεκτρονικών και μηχανικών μερών ενός τέτοιου συστήματος.

Η ανάπτυξη και ευρεία διάδοση μικροελεγκτών όπως ο Arduino ή μικροϋπολογιστών όπως το Raspberry έχει επιτρέψει την ευκολότερη διασύνδεση αισθητηρίων και διαφόρων ηλεκτρομηχανικών μερών στην προσπάθεια κατασκευής αυτόνομων οχημάτων, με τη χρησιμοποίηση ευρέως διαδεδομένων γλωσσών προγραμματισμού όπως η C++ και η Python.

Παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας των αισθητήρων τύπου MEMS, οι οποίοι λόγω του μικρού μεγέθους και του τρόπου με τον οποίο κατασκευάζονται, αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για την υλοποίηση αυτόνομων οχημάτων. Παρατηρήθηκε ότι η αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής έχει επιτρέψει την κατασκευή ελαφρύτερων και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης αυτόνομων οχημάτων. Επίσης η ευρεία γκάμα τέτοιου τύπου αισθητηρίων έχει δώσει την δυνατότητα για υλοποίηση διαφόρων εφαρμογών που κινούνται σε μια ευρεία κλίμακα ακρίβειας αλλά και οικονομικού κόστους.

Έκτος από του αισθητήρες που παρουσιάστηκαν σε αυτή την μελέτη υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων αισθητήρων για την αύξηση των ικανοτήτων αλληλεπίδρασης

ενός αυτόνομου οχήματος με το περιβάλλον. Τέτοια παραδείγματα αλληλεπίδρασης είναι η αποφυγή εμποδίων, οι μετρήσεις περιβαλλοντικών παραγόντων καθώς και η ανάλυση εικόνων. Αυτές οι δυνατότητες μπορούν να δοθούν σε ένα αυτόνομο όχημα με την προσθήκη αισθητήρων υπερήχων, που βασίζονται στο φαινόμενο Doppler για την μέτρηση αποστάσεων καθώς και αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και διαφόρων αερίων. Συνεπώς η κατασκευή ενός τέτοιου οχήματος μπορεί να έχει διάφορες προεκτάσεις αναλόγως τις ιδιότητες που θέλουμε να προσδώσουμε στο όχημα.

Επίσης δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων μεθόδων για εξ αποστάσεως επικοινωνία με ένα αυτόνομο όχημα όπως η επικοινωνία μέσω WiFi, Bluetooth και RF με την χρησιμοποίηση πλακετών επέκτασης που συνεργάζονται με τους μικροελεγκτές. Αυτό επιτρέπει την απομακρυσμένη καθοδήγηση καθώς και την αποστολή δεδομένων εξ αποστάσεως.

Έγινε αναφορά πάνω σε διαφορετικές υλοποιήσεις φίλτρων συγχώνευσης των μετρήσεων από τους αισθητήρες, χρησιμοποιώντας πιο ακριβείς και πολύπλοκες μεθόδους όπως το φίλτρο Kalman αλλά και πιο εύκολες στην υλοποίηση μεθόδους όπως το συμπληρωματικό φίλτρο. Μέσα από αυτή την ανάλυση έγινε κατανοητή η ανάγκη για την απαλλαγή των μετρήσεων από τον θόρυβο αλλά και από τα μειονεκτήματα του κάθε αισθητηρίου.

Περαιτέρω διερευνήθηκαν οι τύποι κινητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια τέτοια εφαρμογή, που βασικός της σκοπός είναι η ακρίβεια και η ταχύτητα ανταπόκρισης στις εντολές κίνησης. Έγινε σαφές το πλεονέκτημα των βηματικών κινητήρων έναντι των απλών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, καθώς και της ακρίβειας στον έλεγχο που μας δίνει η χρησιμοποίηση κωδικοποιητών για την δημιουργία ενός κλειστού βρόγχου ελέγχου της κίνησης.

Τέλος παρουσιάστηκαν οι δυνατότητες οι οποίες προκύπτουν από την αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή μερών του πλαισίου του οχήματος. Η ελευθερία στον σχεδιασμό και εκτύπωση μερών προσφέρει υψηλή εξατομίκευση με βάση τις ανάγκες της κάθε υλοποίησης, καθώς και χαμηλό κόστος προτυποποίησης μιας τέτοιας εφαρμογής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ.Καλλιγερόπουλος, Σ.Βασιλειάδου ‘ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ Ι’ Σύγχρονη Εκδοτική, 2005
2. Δ.Καλλιγερόπουλος, Σ.Βασιλειάδου ‘ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΙ’ Σύγχρονη Εκδοτική, 2005
3. N.Wiener ‘ΚΥΒΕΡΝΗΤΙΚΗ’ Καστανιώτης, 1961
4. https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/EE107/7_%CE%95%CE%9B%CE%95%CE%93%CE%9A%CE%A4%CE%95%CE%A3%20PID.pdf προσπέλαση στις 7/3/2020
5. <https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/9700/3/Petropoulos%28ele%29.pdf> προσπέλαση στις 7/3/2020
6. https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10413/7/Nemertes_Abo%20Saleh-Papaeuthymiou%28ele%29.pdf προσπέλαση στις 7/3/2020
7. <https://opencourses.auth.gr/modules/document/file.php/OCRS431/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%AC%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%2016.%20%CE%91%CE%BD%CE%AC%CF%83%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%BF%20%CE%B5%CE%BA%CE%BA%CF%81%CE%B5%CE%BC%CE%AD%CF%82%20%28%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CE%B4%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%B7%20%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7%CF%82%29.pdf> προσπέλαση στις 7/3/2020
8. <http://www.kerrywong.com/2012/03/08/a-self-balancing-robot-i/> προσπέλαση στις 7/3/2020
9. <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM> προσπέλαση στις 7/3/2020

