

Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Παραγωγής και Υπηρεσιών»

«Αυτοματισμός

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
Επιβλέπων: Δρ. Χρήστος Δρόσος

“ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ
ΟΧΗΜΑΤΑ LEGO MINDSTORMS”

“ LINE FOLLOWING ALGORITHMS FOR LEGO MINDSTORMS AUTONOMOUS VEHICLES”

ΜΙΧΑΗΛ-ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΠ. ΘΕΡΙΑΝΟΣ

2017

“ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ LEGO MINDSTORMS”

“ LINE FOLLOWING ALGORITHMS FOR LEGO MINDSTORMS AUTONOMOUS VEHICLES”

ΜΙΧΑΗΛ – ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΠ. ΘΕΡΙΑΝΟΣ

**“ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ
ΟΧΗΜΑΤΑ LEGO MINDSTORMS”**

“ LINE FOLLOWING ALGORITHMS FOR LEGO MINDSTORMS AUTONOMOUS VEHICLES”

2017

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μιχαήλ-Νικόλαος Θεριανός του Σπυρίδωνος, με αριθμό μητρώου 47, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο: "Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών", του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

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

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

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει 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 Δ.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Δ.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Επίσης δηλώνω υπεύθυνα ότι έχω παρακολουθήσει το σεμινάριο συγγραφής και εκπόνησης πτυχιακής εργασίας που διοργανώνεται από το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. κατά το Εαρινό Εξάμηνο του Ακαδημαϊκού Έτους 2017

Ο Δηλών

Μιχαήλ-Νικόλαος Θεριανός

Ημερομηνία

16^η Οκτωβρίου 2017

**Στη Μαίρη και
στο Χριστόφορο**

- **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρήστο Δρόσο, επιβλέποντα της εργασίας μου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε, για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής, μου, Διατριβής, σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας και τον Κώστα Ντόντο για την βοήθεια "εκ των έσω" και τις εμπειριστατωμένες παρατηρήσεις του.

Ακόμη ευχαριστώ τον φίλο, συμμαθητή και εξαίρετο καθηγητή πληροφορικής Δρ. Δημήτρη Θεοτόκη για την βοήθειά που προέκυψε μετά από συζήτηση σχετικά με την σύλληψη, σχεδίαση και πειραματική εφαρμογή (Experimental implementation) της διπλωματικής μου.

Θα ευχαριστήσω, ακόμη την υπηρεσία μου, το Ιόνιο Πανεπιστήμιο, που, μέσω των θεσμικών οργάνων στα οποία απευθύνθηκα, περιβλήθηκα από αποδοχή, εμπιστοσύνη και κατανόηση στο δύσκολο έργο που είχα αναλάβει.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά, για την υποστήριξη και την υπομονή τους, την σύζυγό μου Μαίρη και τον γιό μου Χριστόφορο, που χωρίς αυτούς δεν θα ολοκλήρωνα τόσο γρήγορα και με ευχαρίστηση την εργασία μου.

- **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρήστο Δρόσο, επιβλέποντα της εργασίας μου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε, για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής, μου, Διατριβής, σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας και τον Κώστα Ντόντο για την βοήθεια "εκ των έσω" και τις εμπειριστατωμένες παρατηρήσεις του.

Ακόμη ευχαριστώ τον φίλο, συμμαθητή και εξαίρετο καθηγητή πληροφορικής Δρ. Δημήτρη Θεοτόκη για την βοήθειά που προέκυψε μετά από συζήτηση σχετικά με την σύλληψη, σχεδίαση και πειραματική εφαρμογή (Experimental implementation) της διπλωματικής μου.

Θα ευχαριστήσω, ακόμη την υπηρεσία μου, το Ιόνιο Πανεπιστήμιο, που, μέσω των θεσμικών οργάνων στα οποία απευθύνθηκα, περιβλήθηκα από αποδοχή, εμπιστοσύνη και κατανόηση στο δύσκολο έργο που είχα αναλάβει.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά, για την υποστήριξη και την υπομονή τους, την σύζυγό μου Μαίρη και τον γιό μου Χριστόφορο, που χωρίς αυτούς δεν θα ολοκλήωνα τόσο γρήγορα και με ευχαρίστηση την εργασία μου.

Περιεχόμενα	
	Σελ.
Κατάλογος Εικόνων	5
Κεφάλαιο 1-	
1.1 Ρομποτική	6
1.1.1 Ορισμοί	6
1.1.2 Κατηγοριοποίηση	6
1.1.3 Είδη Ρομπότ	8
1.1.4 Ταξινόμηση των ρομπότ	11
1.1.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα χρήσης των ρομπότ	12
1.2 Ιστορική Αναδρομή	12
1.3 Εκπαιδευτική Ρομποτική	17
1.3.1 Επιστήμη, Τεχνολογία, Μηχανική και Μαθηματικά (STEM)	18
1.3.2 Εκπαιδευτική Ρομποτική με LEGO Mindstorms	21
Κεφάλαιο 2	
2.1 Αυτόνομα οχήματα	24
2.2 Αναγνώριση γραμμής	25
2.2.1 Εισαγωγή	25
2.2.2 Ρυθμός δειγματοληψίας	26
2.2.3 Ποιότητα και τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα φωτός	27
2.2.4. Βασικές Αρχές Ακολουθήσης Γραμμής	30
2.3 Συμπεράσματα	36
Κεφάλαιο 3	
3.1 Αλγόριθμοί ακολουθήσης γραμμής	38
3.1.1 Αλγόριθμος δύο καταστάσεων	38
3.1.2 Αλγόριθμος αναλογικού ελεγκτή (P-Controller)	40
3.1.3 Αλγόριθμος ελεγκτή PI (PI-Controller)	43
3.1.4 Αλγόριθμος PID	44
3.1.5 Το "P" στο "PID": Το ποσοστό είναι το κλειδί	47
3.1.6 Από το P σε πραγματικά επίπεδα ισχύος κινητήρα	52
3.1.7 Ψευδοκώδικας για έναν ελεγκτή P	53
3.1.8 P Controller (συνοπτικά)	56
3.1.9 Προσθήκη του "I" στον ελεγκτή: Ο ελεγκτής PI	57
3.1.10 Το ολοκλήρωμα: η μνήμη που χρειάζεται ένας ελεγκτής	59
3.1.11 Ψευδοκώδικας για τον ελεγκτή PI	60
3.1.12 Προσθήκη "D" στον ελεγκτή: Ο πλήρης ελεγκτής PID	61
3.1.13 Ψευδοκώδικας για τον ελεγκτή PID	63
3.2 Υλοποίηση	69
3.2.1 Υπολογισμός παραγώγου ολοκληρώματος	70
3.2.2 Υπολογισμός διορθωτικών κινήσεων	71
3.2.3 Ο ελεγκτής PID ως σύνολο των παραπάνω	72
3.3 Συμπεράσματα	73
Κεφάλαιο 4	
4.1 Ασύγχρονοι Κινητήρες-Ρυθμιζόμενοι μη ρυθμιζόμενοι	75
4.2 Μεγάλες κατηγορίες	75
4.3 Κατασκευαστικά	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Συμπεράσματα	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	86
Παράρτημα 1: (PAPER)	87
Παράρτημα 2: (PROPOSAL)	97

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: LegoMindstorms Αυτόνομο Όχημα	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 2: Αυτόνομο όχημα ακολούθησης γραμμής	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 3: Αιθητήρας φωτός-χρώματος Lego	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 4: Αυτόνομο Όχημα Ακολούθησης Γραμμής με έναν αισθητήρα φωτός Error! Bookmark not defined.	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 5: Αισθητήρας φωτός σε κατάσταση μέτρησης αντανάκλασης φωτός Error! Bookmark not defined.	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 6: Κίνηση σχήματος με ταλάντωση	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 7: Ακολούθηση καμπύλης	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 8: Τεθλασμένη	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 9: Διασταυρώσεις	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 10: Αλγόριθμος ελεγκτή δύο καταστάσεων	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 11: Αναλογικός Ελεγκτής	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 12: Ακολουθητής Γραμμής	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 13: Κλίμακα τιμών αισθητήρα για μαύρο-άσπρο	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 14: Βελτιωμένη κλίμακα τιμών για μαύρο-άσπρο	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 15: Γραφική αναπαράσταση της κανονικοποίησης	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 16 Βαθμονόμηση και υπολογισμός σφάλματος	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 17Υπολογισμός παραγώγου-ολοκληρώματος	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 18 Υπολογισμός διορθωτικών ελιγμών	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 19: Το σύνολο της υλοποίησης του PID	Error! Bookmark not defined.

Κεφάλαιο 1

1.1 Ρομποτική

1.1.1 Ορισμοί

Η Ρομποτική είναι ο κλάδος της επιστήμης που μελετά τις μηχανές που μπορούν στην εκτέλεση μιας εργασίας, η οποία συνδυάζει τη φυσική δραστηριότητα με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο. Τα ρομπότ είναι μηχανές, η χρήση των οποίων αποσκοπεί στην αντικατάσταση του ανθρώπου στην εκτέλεση συγκεκριμένου έργου. Η αντικατάσταση αυτή αφορά τόσο στο φυσικό επίπεδο του έργου όσο και στο επίπεδο λήψης απόφασης.

Ο όρος ρομποτική χρησιμοποιήθηκε από τον Asimov ως το σύμβολο της επιστήμης που είναι αφιερωμένη στη μελέτη των ρομπότ και διέπονται από τους παρακάτω τρεις βασικούς νόμους:

- 1. Ένα ρομπότ δεν μπορεί να τραυματίσει ή μέσω της αδράνειάς του να βλάψει ένα ανθρώπινο πλάσμα.**
- 2. Ένα ρομπότ πρέπει να υπακούει στις εντολές που δίνονται από τους ανθρώπους, εκτός και αν αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.**
- 3. Ένα ρομπότ πρέπει να προστατεύει την ίδια του την ύπαρξη, εκτός και αν αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον πρώτο ή τον δεύτερο νόμο.**

Τι είναι, όμως, το ρομπότ;

Σύμφωνα με τον ορισμό του Ινστιτούτου Ρομπότ των ΗΠΑ (Robot Institute of America), "ρομπότ είναι μια επαναπρογραμματιζόμενη πολυλειτουργική χειριστική διάταξη, σχεδιασμένη για τη μετακίνηση υλικών, εξαρτημάτων, εργαλείων και εξειδικευμένων διατάξεων, μέσω μεταβλητών, προγραμματισμένων κινήσεων με σκοπό την επιτέλεση ποικιλίας εργασιών." Ένα ρομπότ συγκροτείται από δύο συστήματα, το μηχανικό-μηχανολογικό (στο οποίο περιλαμβάνεται το σύστημα κίνησης και το οποίο ενσωματώνει τη δυνατότητα του ρομπότ για εκτέλεση έργου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μηχανισμούς που επιτρέπουν στο ρομπότ να κινείται όπως αρθρώσεις, συστήματα μετάδοσης κίνησης, επενεργητές-κινητήρες, οδηγούς κλπ..) και το ηλεκτρονικό (στο οποίο υπάγεται και η επαναπρογραμματιζόμενη μνήμη του).

1.1.2 Κατηγοριοποίηση

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια διάκρισης και αντίστοιχες κατηγοριοποιήσεις των ρομπότ. Μία από αυτές είναι η διάκρισή τους σε τρεις, επί του παρόντος, "γενιές".

- Στην πρώτη γενιά κατατάσσονται ρομπότ με περιορισμένη ευελιξία, που διευθύνονται από τον άνθρωπο, όπως, για παράδειγμα, οι απλοί "χειριστές", σχετικά απλά εργαλεία που επιτρέπουν, για παράδειγμα, τη μετακίνηση επικίνδυνων αντικειμένων (π.χ. ραδιενεργών υλικών).

- Στη δεύτερη γενιά κατατάσσονται τα ρομπότ που είναι εφοδιασμένα με σταθερό πρόγραμμα δράσης και ρομπότ που λαμβάνουν εντολές από κάποιο σύστημα αριθμητικού ελέγχου.
- Στην τρίτη γενιά κατατάσσονται ρομπότ που είναι εφοδιασμένα:
 1. Με αισθητήριες "πληροφορίες" από το περιβάλλον,
 2. Με διάταξη επεξεργασίας των πληροφοριών και
 3. Με κινητήριο σύστημα εκτέλεσης εργασιών.

Επειδή δεν υπάρχει διαχωρισμός, μέσω κάποιου κανόνα, ανάμεσα σε ρομπότ και μηχάνημα, κατά γενική ομολογία ένα ρομπότ μπορεί να κάνει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω :

- να κινείται,
- να χειρίζεται ένα μηχανικό άκρο (βραχίονα),
- να αισθάνεται και να αντιδρά στο περιβάλλον και
- να μιμείται κάποια νοημοσύνη, ανθρώπινη ή κάποιου ζώου.

Υπάρχει σύγκρουση στον αν μπορεί να αποδοθεί σε μηχανήματα που λειτουργούν με τηλεχειρισμό, η αν είναι αποκλειστικά με μηχανές που διαθέτουν την δίκη τους νοημοσύνη και είναι αυτοδιατηρούμενα, ο όρος Ρομπότ.

Σε πάρα πολλούς παραγωγικούς τομείς και κυρίως στη βιομηχανία (βιομηχανική ρομποτική), στην ιατρική, την αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική κ.ά, γίνεται ευρύτατη χρήση ρομπότ, γεγονός που προώθησε την περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας των ρομπότ, ιδιαίτερα στην Ιαπωνία και τις ΗΠΑ. Οι κυριότερες εφαρμογές των βιομηχανικών ρομπότ, μέχρι σήμερα, ήταν οι εφαρμογές σε εργασίες πρεσαρίσματος, οι συναρμολογήσεις, οι ηλεκτροσυγκολλήσεις, οι βαφές με ψεκασμό και η επεξεργασία επιφανειών σε τροφοδοτήσεις εργαλειομηχανών, σε μορφοποιήσεις πλαστικών σε μήτρες κ.ά.

Περίπου από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η χρήση των ρομπότ γενικεύτηκε στο πλαίσιο της ανάπτυξης των Ολοκληρωμένων Συστημάτων Παραγωγής (Computer-Integrated Manufacturing), που ήταν αυτοματοποιημένα και ευέλικτα εργοστάσια, στα οποία οι εργαλειομηχανές μπορούν να επαναπρογραμματίζονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, για την παραγωγή νέων ή διαφοροποιημένων προϊόντων. Πρωτοποριακά εργοστάσια, ως προς την ευρύτατη χρήση ρομπότ, θεωρούνται το εργοστάσιο της IBM στο Lexington, το εργοστάσιο της General Motors στο Hamtramck, το BuickCity στο Flint του Michigan, κ.ά. Εκτός, όμως, από τη χρήση στη βιομηχανία ευρύτατη χρήση ρομπότ γίνεται και σε μη μεταποιητικές εφαρμογές, όπως, για παράδειγμα, σε ιατρικές εφαρμογές, στην εξόρυξη πετρελαίου, σε πυρηνικούς σταθμούς, σε υποθαλάσσιες έρευνες, κ.α. Τα (μη επανδρωμένα) δηλαδή τα αυτοματοποιημένα διαστημόπλοια με την ευρεία έννοια μπορούν να θεωρηθούν Ρομπότ επίσης, που χρησιμοποιούνται για διαστημικές έρευνες, καθώς και ειδικές κατασκευές όπως, για παράδειγμα, η καθοδηγούμενη με ασύρματο από τη Γη σοβιετική σεληνάκατος Lunokhod-1.

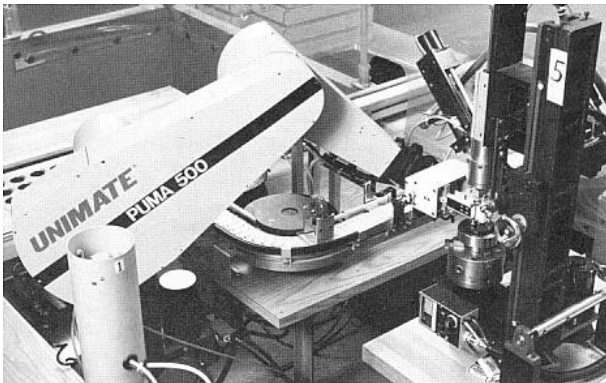
1.2 Είδη Ρομπότ

Η επιστήμη, κατά την πολυετή εξέλιξη της, στον τομέα της ρομποτικής δημιούργησε διάφορα είδη ρομποτικών μηχανισμών, οι οποίοι ενώ διαφέρουν σημαντικά στη μορφή, αποτελούνται όμως από αντίστοιχα επιμέρους υποσυστήματα, δηλαδή το μηχανολογικό υποσύστημα, το υποσύστημα αίσθησης και το σύστημα ελέγχου.

Ένα σημαντικό πεδίο δράσης της επιστήμης της Ρομποτικής, τα τελευταία χρόνια, έχει επικεντρωθεί στον τομέα της ανάπτυξης και εξέλιξης των αυτόνομων οχημάτων επίγειων, πλωτών, εναέριων, υποβρύχιων και διαστημικών. Στη σημερινή εποχή οι απαιτήσεις που υπάρχουν για να εξευρεθεί τρόπος υποβοήθησης ή και αντικατάστασης της συμμετοχής των ανθρώπων σε επικίνδυνες ή κουραστικές και βαρέως τύπου εφαρμογές, έχει οδηγήσει στην εξέλιξη αυτόνομων ή μη οχημάτων ικανών να εκτελούν δύσκολες αποστολές και να συμμετέχουν σε ποικιλία εργασιών.

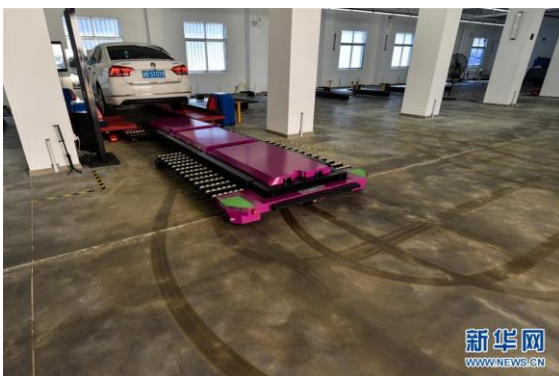
Τα πιο γνωστά είδη ρομπότ είναι τα παρακάτω:

- Ρομπότ Σταθερής Βάσης



Βιομηχανικός Ρομποτικός Βραχίονας

- Κινούμενα Ρομπότ



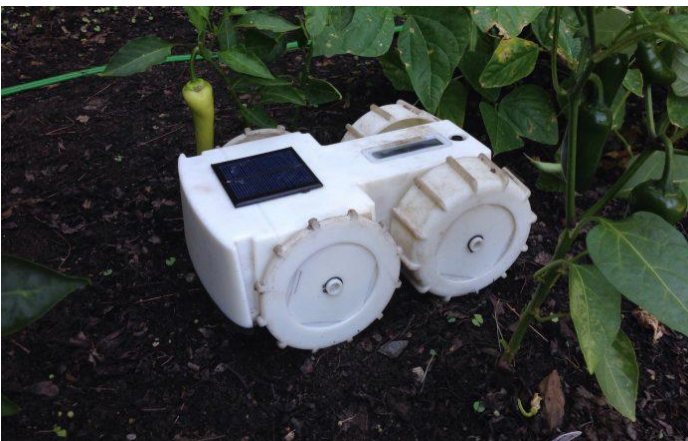
AGV σε Βιομηχανικό Περιβάλλον

- Βαδίζοντα Ρομπότ



Ο Dante II του Εργαστηρίου JPL της NAS

- Αυτόνομα Έντροχα Ρομπότ



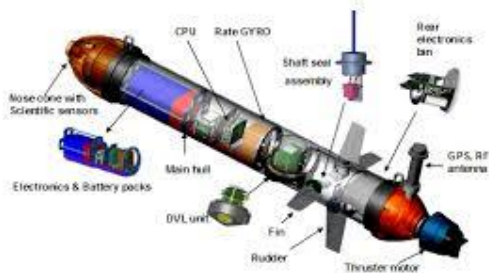
Αυτόνομο Έντροχο Ρομπότ

• ROVs: τα ROVs (Remotely Operated Vehicles) ανήκουν στην κατηγορία των μη επανδρωμένων υποβρύχιων ρομπότ.



ROV

- AUVs: τα AUVs (Autonomous Underwater Vehicles), αντίθετα με τα ROVs, είναι πλήρως αυτόνομα και κατά συνέπεια δεν έχουν την ανάγκη καλωδίου.



- Εναέρια ρομπότ



Ρομποτικό Ελικόπτερο του USC



UAV εναέριο ρομπότ

Τα ρομπότ χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές στη βιομηχανία και ονομάζονται βιομηχανικά ρομπότ και τα προτιμούν γιατί είναι πιο οικονομικά στις εργασίες, έχουν αρκετές δυνατότητες (επαναχρησιμοποίηση, αξιοπιστία, επαναλαμβανόμενες εργασίες κτ) και χρειάζονται μόνο επίβλεψη.

Τα συναντάμε σε εφαρμογές όπως η συναρμολόγηση και η συσκευασία προϊόντων, οι κολλήσεις, διάφορες κατεργασίες υλικών (λείανση, κοπή κλπ), η φόρτωση και εκφόρτωση μηχανημάτων, η βαφή και η παλλετοποίηση. Ακόμη χρησιμοποιούνται στην ιατρική (επεμβάσεις, φροντίδα ασθενών όπως

προσθετικά μέλη και ρομποτικά αμαξίδια, αποκαταστάσεις ασθενών με κινητικά προβλήματα δηλαδή κινούν τα προβληματικά άκρα και ελέγχουν την πορεία της αποκατάστασης), τα αυτοκινούμενα ρομπότ χρησιμοποιούνται για την εξερεύνηση αγνώστου εδάφους (συνήθως χρησιμοποιούνται σε διαστημικές αποστολές και, φυσικά, με ηλιακή ενέργεια), υποβρύχια, σαν μηχανικά χέρια, στη γεωργία, στην κτηνοτροφία, στην οικοδομή και γενικά στον κατασκευαστικό κλάδο και, φυσικά, ιπτάμενα, πολύποδα και ανθρωποειδή-ανδροειδή.

Είναι ιδανικά και ικανά σχεδόν για κάθε βρώμικη, ανθυγιεινή, κουραστική και επικίνδυνη εργασία, που είναι καλό να αποφεύγει ο άνθρωπος.

Έχουν, ακόμη, κατασκευαστεί οικιακά ρομπότ (σε πειραματική και όχι εμπορική βάση) τα οποία καθαρίζουν το σπίτι, σερβίρουν ποτά ή "παίζουν" με τα παιδιά. Η τεχνητή νοημοσύνη, για τα ανωτέρω παραδείγματα-αναφορές, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια έρευνας της επιστήμης της πληροφορικής και αφορά την κατασκευή συστημάτων αυτοματισμού που να είναι εφοδιασμένα με ικανότητα μάθησης και κατανόησης της φυσικής γλώσσας, αξιολόγησης στοιχείων, λήψης αποφάσεων κ.ά.

Ταξινόμηση των ρομπότ

I. Επίπεδα αυτονομίας:

- **Απευθείας έλεγχος:** ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο και χρησιμοποιείται για ρομπότ που τηλεκατευθύνονται,.
- **Υποβοηθούμενη λειτουργία:** ο χρήστης επιλέγει μεσαίου και υψηλού επιπέδου εφαρμογές-στόχους, τους οποίους το ρομπότ πρέπει να ολοκληρώσει.
- **Αυτόνομο ρομπότ:** δεν χρειάζεται την επέμβαση του ανθρώπου για αρκετό καιρό. Για την υλοποίησή του δεν είναι απαραίτητες περίπλοκες εργασίες, όπως τα ρομπότ σε γραμμές παραγωγής τα οποία είναι αυτόνομα αλλά έχουν μια πολύ συγκεκριμένη λειτουργία.

II. Τρόπος χειρισμού:

- **ΜεΤηλεκατεύθυνση.** Κάθε κίνηση ελέγχεται από τον άνθρωπο. Οποιαδήποτε αλλαγή, της μηχανής, καθορίζεται πλήρως από τον χειριστή.
- **Με επίβλεψη.** Μόνο γενικές κινήσεις και αλλαγές στη θέση, ελέγχει ο άνθρωπος. Η μηχανή επιλέγει τις κινήσεις των ενεργοποιητών της.
- **Αυτονομία σε επίπεδο στόχων.** Το ρομπότ προσπαθεί να πετύχει τους στόχους που καθορίζει ο χειριστής.
- **Πλήρης αυτονομία.** Χωρίς καμία παρέμβαση από ανθρώπινο χέρι, η μηχανή επιλέγει και πετυχαίνει τους στόχους της.

Η κατασκευή ρομπότ τα οποία πέρα από τις βασικές αισθήσεις, όπως η αφή και η όραση, θα είναι εφοδιασμένα με αντιληπτικές ικανότητες (για παράδειγμα, αντίληψη σχημάτων, μορφών, εικόνων κ.λπ.), σε σχετικές έρευνες στον τομέα της ρομποτικής αφορούν την ικανότητα διεξαγωγής λογικών συνειρμών και εξαγωγής συμπερασμάτων, καθώς και την δυνατότητα να ανακατανεμηθούν τα δεδομένα για τη χρήση για την οποία ζητούνται και με ικανότητα αυτοδιόρθωσης. Σε χώρους που είναι δύσκολα προσπελάσιμοι για τον άνθρωπο, η ανάπτυξη της προηγμένης τεχνολογίας των ρομπότ αναμένεται να βοηθήσει σημαντικά στην επίλυση προβλημάτων και στην ολοκλήρωση εργασιών αλλά οι φόβοι που εκφράζονται για τη δυσκολία ελέγχου –από τον άνθρωπο- των συστημάτων

αυτών, αφού θα είναι εφοδιασμένα με ικανότητα ανάπτυξης σχετικής αυτονομίας κατά τη λειτουργία τους, αφήνει κάποια ερωτηματικά.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα χρήσης των ρομπότ

I. Πλεονεκτήματα

- Ακρίβεια
- Επαναληψιμότητα
- Η απόδοση των ρομπότ είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των επαναλήψεων εκτέλεσης μιας εργασίας
- Μείωση κόστους
- Αύξηση της παραγωγικότητας
- Απαλλαγή ανθρώπου από επικίνδυνες και ανθυγιεινές εργασίες

II. Μειονεκτήματα

- Σε εργασίες που απαιτούν νοημοσύνη
- Σε εργασίες που εκτελούνται σε αβέβαιο περιβάλλον
- Μείωση θέσεων εργασίας σε ανιδείκνυτο και χαμηλά ειδικευόμενο προσωπικό που δεν αντισταθμίζεται από την δημιουργία νέων θέσεων

1.3 Ιστορική Αναδρομή

Ξεκινώντας να μιλάμε για "Ρομποτική" πρέπει να ανατρέξουμε στη μυθολογία, προκειμένου να αναφέρουμε τον μυθικό φύλακα της [Κρήτης](#), που ονομαζόταν "Τάλως" και ήταν ένας ανθρωπόμορφος γίγαντας με χάλκινο σώμα. Υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές σχετικά με την προέλευσή του, από τις οποίες η πιο γνωστή, από τον [Απολλόδωρο](#), λέει πως τον κατασκεύασε ο θεός [Ήφαιστος](#) και τον χάρισε στο βασιλιά [Μίνωα](#) για να φυλάει την Κρήτη. Οι περισσότερες πηγές αναφέρουν ότι ήταν άγρυπνος φύλακας της Κρήτης που γύριζε τις ακτές του νησιού τρεις φορές τη μέρα και κρατούσε σε απόσταση τα άγνωστα πλοία που πλησίαζαν την Κρήτη πετώντας τους τεράστιες πέτρες. Αν οι άγνωστοι είχαν ήδη αποβιβαστεί, τους έκαιγε με την ανάσα του ή πυράκτωνε το [χάλκινο](#) σώμα του σε κάποια φωτιά, τους αγκάλιαζε σφιχτά πάνω του κι έτσι τους έκαιγε. Το τέλος του Τάλω ήρθε όταν συναντήθηκε με τους [Αργοναύτες](#) που γύριζαν από την [Κολχίδα](#). Όταν θέλησαν να προσεγγίσουν, οι Αργοναύτες, στο νησί αντιμετώπισαν τον γίγαντα ο οποίος τους κρατούσε σε απόσταση. Τότε η [Μήδεια](#), που ταξίδευε μαζί τους, μάγεψε με τα λόγια της τον Τάλω, υποσχόμενη του αθανασία, κι έτσι μπόρεσε ο [Ιάσωνας](#) να του αφαιρέσει το καρφί στη φτέρνα του που έκλεινε τη μια και μοναδική [φλέβα](#) που διέτρεχε όλο το κορμί του και περιείχε [υχώρ](#), θανατώνοντάς τον.



Δίδραχμο της Φαιστού, 280 π.Χ. Ο φτερωτός Τάλως σπλισμένος με πέτρα.

Η κατασκευή του **πρώτου** ρομπότ αποδίδεται στον μαθηματικό **Αρχύτα τον Ταραντίνο (428-347 π.Χ.)**, ο οποίος λέγεται πως κατασκεύασε μια ιπτάμενη μηχανή, την “περιστερά” ή “πετομηχανή”, η οποία κινούνταν με ατμό και μπορούσε να διανύσει μέχρι και 200 μέτρα απόσταση.

Ο **Leonardo DaVinci** σχεδιάζει και πιθανόν κατασκευάζει (το **1495**) το παλαιότερο σχέδιο ανθρωποειδούς ρομπότ το οποίο σώζεται μέχρι σήμερα. Ουσιαστικά είναι μια μηχανική κατασκευή που μοιάζει με στρατιώτη που φοράει πανοπλία. Ο μηχανισμός που υπάρχει στο εσωτερικό του, του επιτρέπει να κινεί τα χέρια και το κεφάλι του και να ανασηκώνεται, όπως ακριβώς θα γινόταν εάν βρισκόταν ένας άνθρωπος μέσα στην πανοπλία.

Το **1738** ο **Jacques de Vaucanson** κατασκευάζει έναν μηχανισμό (ρομπότ) που μπορεί να παίξει δώδεκα τραγούδια με φλάουτο Αργότερα βελτιώνει την αρχική κατασκευή του φτιάχνοντας ένα ρομπότ που μπορεί να παίξει, εκτός από φλάουτο και τύμπανο. Η “πάπια”, όμως, ήταν η πιο διάσημη κατασκευή του. Στην ουσία ήταν μια ρομποτική πάπια που είχε τη δυνατότητα να κινείται, να κουνάει τα φτερά της και να τρώει σπόρους. Η πάπια ήταν αποτέλεσμα δοκιμών στα πλαίσια της μελέτης του “κινούμενη ανατομία”, την μοντελοποίηση δηλαδή της ανατομίας, ανθρώπων και ζώων, με χρήση μηχανισμών..

Το **1898** ο **Nikola Tesla** κατασκευάζει και επιδεικνύει το πρώτο τηλεχειριζόμενο πλοίο.

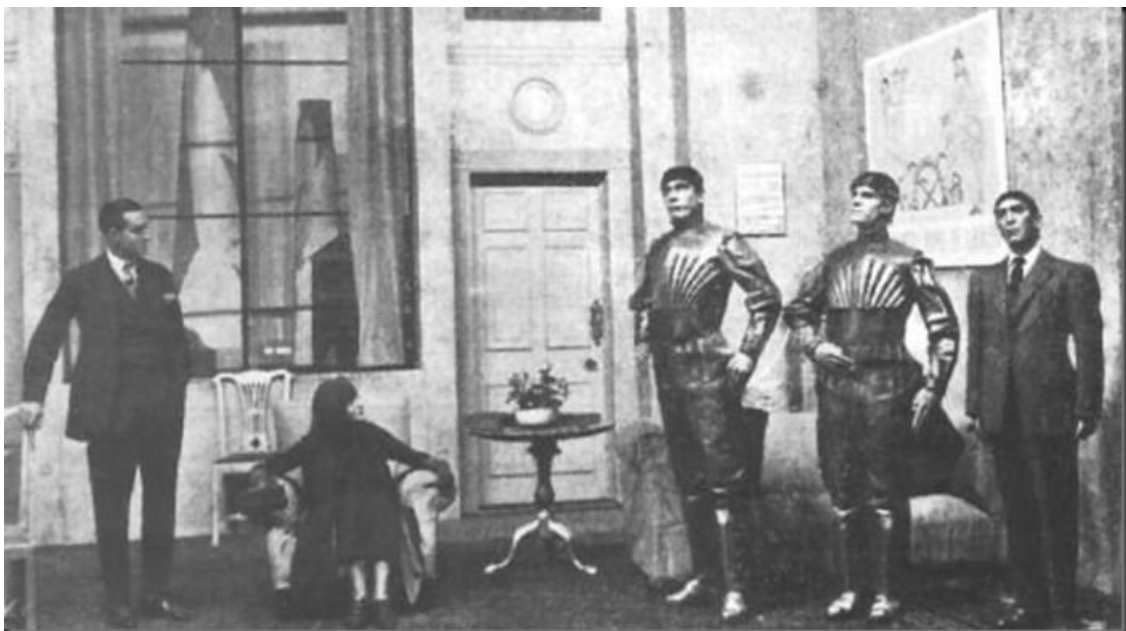
Το **1936** ο **Alan Turing**, με τις μηχανές Turing στην ουσία εισάγει την έννοια των μηχανών υπολογισμού. Αργότερα σε μία δημοσίευσή του με τίτλο: “Υπολογιστικές Μηχανές και Νοημοσύνη” (Computing Machinery and Intelligence), θα προτείνει ένα πείραμα (Turingtest) που θα καθορίζει τα πρότυπα που θα “πιστοποιούν” το πότε μια μηχανή μπορεί να καλείται νοήμων. Το **1948** κατασκευάζεται στο **πανεπιστήμιο του Bristol** το πρώτο αυτόνομο ρομπότ με το όνομα “Elsie”, το οποίο κινούνταν βάση ερεθισμάτων που λάμβανε από αισθητήρες φωτός.

Ο όρος “**ρομπότ**” πρωτοεμφανίστηκε σε ένα θεατρικό έργο, επιστημονικής φαντασίας, του Τσέχου συγγραφέα Κάρελ Τσάπεκ το 1921. Ποια ήταν όμως η προέλευση της λέξης που αντικατέστησε όρους όπως “αυτόματο” ή “ανδροειδής”; Ο Τσάπεκ εμπνεύστηκε από την τσέχικη λέξη «robota» που σημαίνει καταναγκαστική εργασία και τους «robotnik», τους σκλάβους δηλαδή που εργαζόνταν καταναγκαστικά στα χωράφια των αφεντικών τους. Μπορεί η επινόηση της νέας λέξης να χρεώνεται στον Κάρελ Τσάπεκ, ωστόσο νέος όρος ήταν ιδέα του αδερφού του συγγραφέα, Τζόσεφ

Τσάπεκ. Τα δύο αδέρφια από μικροί μεγάλωσαν μαζί και συνεργάστηκαν σε όλη τους την ζωή. Ο Κάρελ ήθελε να ονομάσει τα ρομπότ "Labori", αλλά άκουσε τελικά την συμβουλή του Τζόσεφ. Στη συνέχεια, με επιστολή του στο Αγγλικό Λεξικό της Οξφόρδης ξεκαθάρισε ότι ο νέος όρος δεν ήταν ιδέα του ίδιου, αλλά του αδερφού του....



Η παραγωγική διαδικασία αυτοματοποιείται, στις βιομηχανίες μαζικής παραγωγής και αντικαθιστά τους ανθρώπους έχοντας τοποθετήσει στην θέση τους εξειδικευμένες μηχανές που εκτελούν μια προκαθορισμένη σειρά κατεργασιών στα προϊόντα που παράγονται. Στόχος της αυτοματοποίησης, είναι η αυξημένη παραγωγικότητα, η βελτιωμένη ποιότητα, η αύξηση του κέρδους των επιχειρήσεων αλλά και ο έλεγχος των μέσων παραγωγής.



Θεατρικό έργο R.U.R/ Rossum's Universal Robots (Παγκόσμια Ρομπότ του Ρόσσουμ)
νεαρού επιστήμονα Ρόσσουμ.

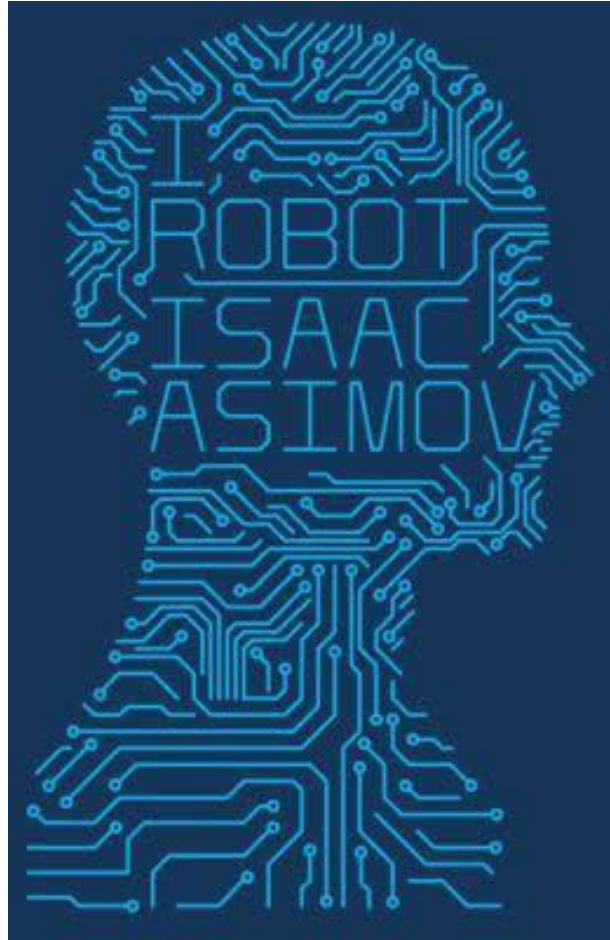
Η εφεύρεση του

Στην συνέχεια έχουμε να δούμε τα βιβλία του Ρώσου συγγραφέα Ισαάκ Ασίμοφ τη δεκαετία του 1940 (Το 1964, ο φημισμένος συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας, Ισαάκ Ασίμοφ, προσπάθησε να μαντέψει το πώς θα έχει επηρεάσει η τεχνολογία τη ζωή το 2014). Ο Isaac Asimov συνέλαβε το robot ως ένα «αυτόματο» με εμφάνιση ανθρώπου, αλλά απαλλαγμένο από συναισθήματα, δηλαδή η συμπεριφορά του υπαγορευόταν από ένα «ποζιτρονικό μυαλό» προγραμματισμένο από τον άνθρωπο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες αρχές ηθικής συμπεριφοράς.



Χρησιμοποιώντας το χάρισμά του να οραματίζεται την τεχνολογία, ο Ασίμοφ, αποδεικνύεται ιδιαίτερα ακριβής στις προβλέψεις του, έπειτα από 50 χρόνια...) και τα έργα επιστημονικής φαντασίας, όπως "Ο πόλεμος των άστρων", τα οποία έχουν επηρεάσει τους περισσότερους στον τρόπο με τον οποίο φαντάζονται τα ρομπότ.

Από τα βιβλία του Isaac Asimov έως τα κινηματογραφικά έργα, τα ρομπότ παρουσιάζονται σαν ανθρωποειδή τα οποία μπορούν να περπατούν, να μιλούν, να βλέπουν, να ακούνε και, σε μερικές περιπτώσεις, να είναι προικισμένα με αισθήματα.



Με τον τίτλο Εγώ, το ρομπότ κυκλοφόρησε το 1950 μία συλλογή εννέα διηγημάτων του Ισαάκ Ασίμοφ. Τα διηγήματα πρωτοπαρουσιάστηκαν σε αμερικάνικα περιοδικά στην περίοδο μεταξύ 1940 και 1950.

Το πρώτο βιομηχανικό (ψηφιακό και προγραμματιζόμενο) ρομπότ (ρομποτικός βραχίονας) κατασκευάζεται, από τον **George Devol** και τίθεται σε λειτουργία το 1961, του δίνεται το όνομα: "Unimate", που είχε σκοπό να φέρνει σε πέρας επικίνδυνες, δύσκολες ή επαναλαμβανόμενες και ανιαρές εργασίες και ειδικότερα η εργασία του ήταν να σηκώνει καυτά κομμάτια σιδηρού και να τα στοιβάζει..



1961, the Unimate was the very first industrial robot.

Στο **Ινστιτούτο Έρευνας του πανεπιστημίου του Stanford (1966)**, κατασκευάζεται το πρώτο κινούμενο ρομπότ με δυνατότητες Τεχνητής Νοημοσύνης "που ονομάστηκε "Shakey", το οποίο μπορούσε να εκτελέσει εργασίες όπως τον οπτικό εντοπισμό ενός αντικείμενου, την μετάβαση προς το, ανωτέρω, αντικείμενο και την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο, όπως για παράδειγμα να το αγγίξει ή να το σπρώξει. Στο βιβλίο του **Seymour Papert (1980)**, με τίτλο "Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas", προτείνεται, για πρώτη φορά, η χρήση εκπαιδευτικών ρομπότ και εισάγεται η έννοια της εκμάθησης μέσα από την κατασκευή και το πείραμα. Η συνεργασία της **LEGO με το MIT (1986)** αποφέρει την κυκλοφορία του πρώτου εκπαιδευτικού προϊόντος που βασίζεται σε Lego, το **LEGOtCLogo**. Προγραμματιζόταν σε Logo και είχε ευρεία χρήση στην εκπαιδευτική διαδικασία και ειδικότερα στην διδασκαλία εννοιών της επιστήμης των υπολογιστών.

Σύμφωνα με έναν ευρέως αποδεκτό ορισμό, από το 1980, ένα βιομηχανικό ρομπότ είναι μια επαναπρογραμματιζόμενη μηχανή σχεδιασμένη να μετακινεί αντικείμενα, εργαλεία ή διατάξεις μέσω μιας ποικιλίας προγραμματιζόμενων κινήσεων, για την εκτέλεση εργασιών. Ο, ανωτέρω, ορισμός στην ουσία περιγράφει με σαφήνεια την σημερινή χρήση των ρομπότ στη βιομηχανία και αποτελεί έναν αναπτυσσόμενο τομέα εφαρμογής της ρομποτικής τεχνολογίας και των προϊόντων της. Τυπικές εφαρμογές τους στη βιομηχανία περιλαμβάνουν τη φόρτωση - εκφόρτωση προϊόντων τη βαφή την κοπή κ.τ.λ.

1.3 Εκπαιδευτική Ρομποτική

1.3.1 Επιστήμη, Τεχνολογία, Μηχανική και Μαθηματικά (STEM)

Ανατρέχοντας στην "Βικιπαίδεια" και αναζητώντας τον όρο "Επιστήμη, Τεχνολογία, Μηχανική και Μαθηματικά" μας εμφανίζει το παρακάτω σημείωμα, το οποίο παραθέτω αυτολεξεί:

"Επιστήμη, Τεχνολογία, Μηχανική και Μαθηματικά (αγγλικά: Science, Technology, Engineering and Mathematics με ακρωνύμιο, και παλιότερα SMET) είναι ένα εκπαιδευτικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Το ακρωνύμιο αναφέρεται στους ακαδημαϊκούς κλάδους της επιστήμης, της τεχνολογίας, της μηχανικής και των μαθηματικών. Ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως όταν αναφερόμαστε στην πολιτική της εκπαίδευσης και στα προγράμματα σπουδών στα σχολεία για τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογικής ανάπτυξης. Έχει επίδραση στην ανάπτυξη του εργατικού δυναμικού, στα θέματα εθνικής ασφάλειας και της μεταναστευτικής πολιτική."

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα: "<http://stem.edu.gr>",

"Το **"STEM"** είναι μια προσέγγιση στην Εκπαίδευση που σχεδιάζεται ώστε στη διδασκαλία των Μαθηματικών και των Φυσικών Επιστημών, που είναι ζωτικής σημασίας για μια βασική κατανόηση του σύμπαντος, να εισαχθούν οι Τεχνολογίες και η Επιστήμη των Μηχανικών, που αποτελούν για τον άνθρωπο τα μέσα αλληλεπίδρασης με το σύμπαν. Είναι ένας νέος "μετά – επιστημονικός κλάδος"!"

και, η "Βικιπαίδεια", συνεχίζει:

"Το αρκτικόλεξο προέκυψε αμέσως μετά από μια συνάντηση, σχετικά με την επιστήμη της εκπαίδευσης που πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών των ΗΠΑ υπό την προεδρία της τότε NSF διευθυντριας Rita Colwell. Ένας διευθυντής από το γραφείο Επιστημών Ανάπτυξης Εργατικού Δυναμικού για Εκπαιδευτικούς και Επιστήμονες, ο Δρ Peter Faletra, πρότεινε

την αλλαγή από το παλαιότερο SMET ακρωνύμιο σε STEM. Η Δρ. Colwell, εκφράζοντας κάποια αντιπάθεια για το παλαιότερο ακρωνύμιο, απάντησε θετικά προτείνοντας στο Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών των ΗΠΑ να αποδεκτεί την αλλαγή. Ένα από τα πρώτα έργα του Εθνικού Ιδρύματος Επιστημών των ΗΠΑ που χρησιμοποίησε το αρκτικόλεξο ήταν το STEMTEC (Science, Technology, Engineering and Math Teacher Education Collaborative) στο Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης Άμχερστ, το οποίο χρηματοδοτήθηκε το 1997.”



Το Πανεπιστήμιο της Columbia προσπαθούσε να δώσει λύση σε ένα βασικό ερώτημα σχετικά με την πορεία και τις επιδόσεις των μαθητών, το οποίο σε συντομία ήταν το παρακάτω:

“Υπάρχει τρόπος ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε τη μάθηση να αποκτήσει τέτοιο νόημα για τους μαθητές που να τους κάνει να παραμένουν στο σχολείο, να επιτυγχάνουν υψηλές επιδόσεις, και να αποφοιτούν με επιτυχία από το λύκειο προς την τριτοβάθμια εκπαίδευση ή προς μια δουλειά της επιλογής τους;”

Στην προσπάθειά τους να απαντήσουν σκέφθηκαν πως η απάντηση που δίνουν είναι ... “απλή”:

Οι μαθητές θα πρέπει να εκπαιδευτούν για να μπορέσουν να αντιληφθούν πως από την ποιότητα του πλανήτη εξαρτάται και η δική τους ευημερία και η εκπαίδευσή τους θα πρέπει να περιλαμβάνει θέματα όπως: την προστασία και την πρόσβαση σε πηγές νερού, την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, τη διατήρηση της εναπομένουσας βιοποικιλότητας κλπ, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζουν τέτοια θέματα-προκλήσεις τα οποία όμως έχουν περιβαλλοντικές, κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές επιδράσεις. Ένα έθνος με βαθιές γνώσεις όχι μόνο διαβάζει αλλά υπολογίζει, εξετάζει και καινοτομεί.

Το STEM προέκυψε από την ανάγκη εφαρμογής του λεγόμενου «υπολογιστικού τρόπου σκέψης» - computational thinking- όπου οι εκπαιδευόμενοι πρέπει να επιλύσουν προβλήματα που θα συνδυάζουν γνώσεις από τις παραπάνω, αναφερόμενες, γνωστικές περιοχές.

Το **STEM**, με την ενθάρρυνση των παιδιών ώστε να απαντούν σε ερωτήματα και να συμμετέχουν ενεργά σε, μέσω του παιχνιδιού, δραστηριότητες με θέματα την επιστήμη, τα μαθηματικά, τη μηχανική και την τεχνολογία, παρέχει ευκαιρίες για την ανάπτυξη των δεξιοτήτων τους. Η αλλαγή του ενδιαφέροντος και της ενεργής συμμετοχής που εμφανίζουν τα παιδιά σχετικά με τα επιστημονικά πεδία του **STEM**, είναι πραγματικά εντυπωσιακή. Εφαρμόζοντας το **STEM** μέσω projects, οι εκπαιδευόμενοι μαθαίνουν μέσω μίας σύνθετης και πολυεπίπεδης διαδικασίας, στην

οποία εμπλέκονται όλες οι προϋπάρχουσες έννοιες για τη μάθηση αλλά και οι υποκειμενικές εμπειρίες τους, κατά τη διαδικασία της επίλυσης αυθεντικών προβλημάτων και, με αυτόν τον τρόπο, αποκτούν δεξιότητες που είναι σχετικές με την παγκοσμιοποίηση στην εκπαίδευση, καθώς εστιάζει στην κριτική σκέψη, στην εργασία σε ομάδα και, ακόμη, έχει αναφερθεί ότι μειώνει το χάσμα γνώσεων ανάμεσα σε εκπαιδευόμενους από διαφορετικά κράτη.

Οι χώρες της Ευρώπης που θέλουν να αναπτύξουν τη βιομηχανία τους προσπαθούν να εντάξουν το **STEM** στην εκπαίδευση (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και στα παιδαγωγικά της τριτοβάθμιας). Έτσι (από το 2009) έχει αρχίσει μια προσπάθεια το Ευρωπαϊκό Σχολικό Δίκτυο, με έδρα τις Βρυξέλλες, για να μπορέσουν κάποια σχολεία να αναπτύξουν πιλοτικά νέες δραστηριότητες μάθησης και τεχνολογίες στην τάξη, διερευνώντας τη χρήση νέων παιδαγωγικών εργαλείων για τη διδασκαλία **STEM**.

Η κοινωνική δικαιοσύνη στην εκπαίδευση σαν βασικές συνιστώσες έχει την παροχή ίσων ευκαιριών «παιδείας» σε όλα τα παιδιά, ανεξαρτήτως οικονομικού, κοινωνικού, πολιτιστικού και μορφωτικού επιπέδου-υπόβαθρου, από το οποίο προέρχονται και επιπλέον την ανάπτυξη μοντέλων εκπαίδευσης που θα περιλαμβάνουν γνώσεις και καινοτόμες δεξιότητες σχετικές με την αγορά εργασίας.

Με το **STEM** κυρίαρχο ρόλο στο αναλυτικό πρόγραμμα θα διαδραματίζει η επίλυση προβλήματος, η ανακαλυπτική-διερευνητική μάθηση, ενώ θα απαιτείται η δημιουργική εμπλοκή των εκπαιδευόμενων στην ανακάλυψη της λύσης, δηλαδή γίνεται προσπάθεια να μετασχηματισθεί η διδασκαλία από το επίπεδο της παραδοσιακής δασκαλοκεντρικής που ισχύει μέχρι σήμερα.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες στον τομέα της εκπαιδευτικής καινοτομίας είναι πρωτοπόρες. Ο Λευκός Οίκος, την ιστοσελίδα του, κοινοποιεί επιστολή στην οποία ο πρώην Πρόεδρος Barack Obama επισημαίνει ότι απαιτείται να εκπαιδευτεί πλήθος καθηγητών ειδικευμένων στο **STEM** :

«One of the things that I've been focused on, as President, is how we create an all-hands-on-deck approach to science, technology, engineering, and math... We need to make this a priority to train an army of new teachers in these subject areas, and to make sure that all of us as a country are lifting up these subjects for the respect that they deserve».

President Barack Obama

Τρίτη ετήσια έκθεση επιστημών Λευκού Οίκου, Απρίλιος 2013.

Με ένα παράδειγμα θα μπορούσαμε να δούμε πώς μπορεί να διδαχθεί μια ενότητα με μεθοδολογία **STEM**;

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να διδάξουμε ένα οποιοδήποτε θέμα. Πως όμως θα το διδάσκαμε στο εργαστήριο; Με απλή επίδειξη του αντικειμένου και αρκετή θεωρία περί της δομής και της λειτουργίας του.

Με μεθοδολογία **STEM**, αν προσεγγίσουμε την ίδια διδασκαλία, θα πρέπει να υπάρξει διεπιστημονική προσέγγιση του θέματος με Φυσική, Χημεία, Πληροφορική, Μηχανολογία και

Μαθηματικά. Όταν εξέρχεται η μία επιστήμη από το μάθημα θα πρέπει να εισέρχεται η άλλη. Η συνεργασία της διεπιστημονικότητας για την επίλυση του προβλήματος αναδεικνύει την μέθοδο διδασκαλίας καινοτόμο και πρωτοποριακή. Αυτή είναι η μεθοδολογία S.T.E.M. στην εκπαιδευτική διαδικασία.

- Με το ελεύθερο λογισμικό αναπτύσσουμε πολύ εύκολα ένα μοντέλο προσομοίωσης, με το οποίο ο μαθητής θα μπορεί, εύκολα, να υπολογίσει στον υπολογιστή. Έτσι κάνουμε χρήση της Τεχνολογίας από το ακρωνύμιο S.T.E.M.
- Έχουμε προετοιμάσει πείραμα με επίλυση προβλήματος που θα το εκτελέσουν οι μαθητές. Θα βιντεοσκοπήσουν με το κινητό τους τα αποτελέσματα και στη συνέχεια με το ελεύθερο λογισμικό θα υπολογίσουν από το video τα ζητούμενα. Εδώ έχει γίνει χρήση της συνιστωσών Μηχανικής-Μηχανολογίας
- Σε φύλο εργασίας δίνουμε δεδομένη φωτογραφία σε μεγέθυνση επιφάνειας και ο μαθητής υπολογίζει με χαρτί και με μολύβι τα απαιτούμενα. Έχουμε κάνει χρήση των Μαθηματικών τύπων και υπολογισμών.
- Αναφορικά με τις επιστήμες Χημείας και Φυσικής είναι πολύ εύκολο να εμπλέξουμε το μαθητή με χημικές αντιδράσεις, θερμοκρασίες κ.λπ..

Η συνεργασία, μεταξύ των μαθητών και του εκπαιδευτικού, στο πείραμα και στις υπόλοιπες δραστηριότητες αυξάνουν την κομβική δεξιότητα της συλλογικής εργασίας και της επικοινωνίας.

Όπως παρατηρούμε με χρήση και των τεσσάρων γραμμάτων του ακρωνυμίου S.T.E.M. έχουμε καταφέρει να προσεγγίσουμε το συγκεκριμένο μάθημα διεπιστημονικά. Σε αντίθετη περίπτωση, στη συνήθη δασκαλοκεντρική μέθοδο διδασκαλίας, θα αρκούμασταν σε μια επίδειξη του προβλήματος και ενός μοντέλου και θα παραδίδαμε και λίγη θεωρία.

1.3.2 Εκπαιδευτική Ρομποτική με LEGO Mindstorms

Η γνωστή εταιρεία "[LEGO EDUCATION](#)", τα τελευταία τριάντα χρόνια, σε συνεργασία με τα καλύτερα πανεπιστήμια του κόσμου έχει αναπτύξει την πιο δημοφιλή εκπαιδευτική πλατφόρμα, γνωστή σε όλους ως "[LEGO Mindstorms EV3](#)".

Μετά την εμφάνιση, σε παγκόσμιο επίπεδο ([1989](#)), αυτού του εκπαιδευτικού πακέτου ουσιαστικά άνοιξε ο δρόμος για την εισαγωγή της εκπαιδευτικής ρομποτικής στην εκπαίδευση.

Η εκπαιδευτική ρομποτική, με θεμελιωτή της τον [Seymour Papert \(MIT\)](#), συνδυάζει τη μάθηση με το παιχνίδι και έτσι μετατρέπει την εκπαίδευση σε μία διασκεδαστική δραστηριότητα. Είναι γεγονός πως η μάθηση επιτυγχάνεται ευκολότερα, ταχύτερα και ουσιαστικότερα όταν συνδυάζεται με το παιχνίδι. Οι μαθητές μαθαίνουν να εργάζονται σε ομάδα (teamwork), να επιλύουν προβλήματα (problemsolving) και να υλοποιούν projects.

Η πλατφόρμα εκπαιδευτικής ρομποτικής **LEGO Mindstorms EV3** αποτελεί μία ολοκληρωμένη λύση εκπαίδευσης STEM (**S**cience **T**echnology **E**ngineering **M**athematics) βασισμένη στην τεχνολογία ρομποτικής και οι μαθητές που συμμετέχουν στο πρόγραμμα εκπαίδευσης με **LEGO Mindstorms** αποκτούν την ικανότητα να:

- περιγράφουν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ρομπότ (Τεχνολογία).
- περιγράφουν και να εξηγούν την λειτουργία απλών δομικών στοιχείων όπως είναι τα γρανάζια, οι άξονες, οι συνδετήρες κλπ (Τεχνολογία).
- σχεδιάζουν και να κατασκευάζουν μια μηχανή χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα υλικά (ρόδες, άξονες, κινητήρες) (Τεχνολογία).
- χρησιμοποιούν κατάλληλο λογισμικό και προγραμματιστικές δομές για να κινήσουν και να ελέγξουν την κατασκευή τους με κινητήρες και αισθητήρες (χρήση εικονοεντολών, εντολών ελέγχου, επανάληψης) (Πληροφορική).
- υπολογίζουν φυσικές ποσότητες που επιδρούν στη σχεδίαση και τη λειτουργία της κατασκευής τους, όπως η απόσταση, η γωνία βολής, το μήκος του άξονα (Φυσική).
- συνδυάζουν γνώσεις φυσικής, μαθηματικών και πληροφορικής για την δημιουργία συναρπαστικών project.
- αξιοποιούν τεχνικές επίλυσης προβλήματος.
- διατυπώνουν υποθέσεις και να ελέγχουν την ορθότητά τους.
- διατυπώνουν και να αξιολογούν επιχειρήματα που στηρίζονται στα δεδομένα που έχουν συλλέξει.
- αυτοοργανώνονται και να ελέγχουν την πορεία της εργασίας τους.
- γνωρίζουν και να αξιολογούν τη προσφορά της επιστήμης και της τεχνολογίας στην ευημερία του σύγχρονου ανθρώπου.
- να εργάζονται σε ομάδες, να υλοποιούν projects, να εναλλάσσουν ρόλους.



- **Multi-bot:** Πρόκειται για ένα ρομπότ με αρκετά αρθρωτά εξαρτήματα που μπορούν να εναλλάσσονται σε διάφορους συνδυασμούς.



- **VanGogh:** Η εργασία αυτού του ρομπότ (VanGogh) είναι να χρωματίζει τους στύλους στο τραπέζι με τους αντίστοιχους σε χρώμα κοίλους κύβους.



- **Roboarm:** Πρόκειται για έναν εξελιγμένο ρομποτικό βραχίονα ο οποίος έχει τρεις κινητήρες και αυτό που κάνει είναι να μπορεί να πιάσει και να ανυψώσει αντικείμενα με τις δαγκάνες του.



- **Tribot:** Από τους τρεις τροχούς που διαθέτει, προκύπτει η ονομασία του. Είναι αρκετά ευέλικτο και εκμεταλλεύεται όλους τους αισθητήρες για να κάνει την προγραμματισμένη εργασία του.



- **Spike:** Έχει δύο χέρια σαν τανάλιες και "κινείται" σε έξι πόδια. Με τους αισθητήρες ήχου και υπερήχων, που διαθέτει, μπορεί να ακούσει και να δει αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2.

2.1 Αυτόνομα οχήματα

Τα αυτόνομα οχήματα χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες, ασφαλής ανατίναξη εκρηκτικών μηχανισμών ή για κουραστικές-ανιαρές εργασίες όπως ο αυτόνομος καθαρισμός επιφανειών, η μεταφορά και τοποθέτηση αντικειμένων προς φύλαξη σε αποθήκες. (Εικόνα 1)



Εικόνα 1: LegoMindstorms Αυτόνομο Όχημα

Τα οχήματα αυτού του τύπου αντλούν πληροφορίες οι οποίες προέρχονται από το περιβάλλον τους για να επιτελέσουν τρεις διακριτές λειτουργίες τα αποτελέσματα των οποίων συμβάλουν στο να επιτελέσει το αυτόνομο όχημα το έργο του αποτελεσματικά μέσα στα χωρο-χρονικά πλαίσια που του έχουν τεθεί.

Οι λειτουργίες αυτές αφορούν στην :

1. **Οδομετρία:** Η συλλογή δεδομένων από αισθητήρες κίνησης με σκοπό την εκτίμηση της μεταβολής της θέσης ενός αυτόνομου οχήματος μέσα στον χρόνο. Τα δεδομένα αυτά όταν χρησιμοποιηθούν αυτόνομα **δεν** εξασφαλίζουν απόλυτη ακρίβεια διότι είναι απόλυτα εξαρτημένα από τα μηχανικά στοιχεία του κινητήρα κίνησης. Έτσι στη περίπτωση που ένα όχημα χρησιμοποιεί δύο κινητήρες για την κίνηση του τότε υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο τα δεδομένα από τον έναν κινητήρα να διαφέρουν από τα δεδομένα του άλλου κινητήρα και η διαφορά αυτή, δ , να οφείλεται αποκλειστικά σε κατασκευαστικούς παράγοντες.
2. **Στην αντίληψη του περιβάλλοντα χώρου:** Η αντίληψη του χώρου στα αυτόνομα οχήματα προέρχεται από τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες του αυτόνομου οχήματος και αφορούν στην αναγνώριση εμποδίων αλλά και σημείων αναφοράς. Τα σημεία αναφοράς είναι σημεία στη διαδρομή ενός αυτόνομου οχήματος όπου το όχημα θα πρέπει να πάρει μία απόφαση, ή θα πρέπει να επαλήθευση τη θέση του ή θα πρέπει να περιμένει για δεδομένα (π.χ. την άφιξη ενός αντικειμένου το οποίο πρέπει να μεταφέρει). Λόγω της χρήσης αισθητήρων, η ποιότητα και η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται και εδώ όπως και στην οδομετρία από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, το είδος ή είδη αισθητήρων που χρησιμοποιούνται αλλά και από χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου όπως η απορροφητικότητα των υλικών στη περίπτωση χρήσης αισθητήρων υπερήχων, ο βαθμός ανάκλασης, κυρίως δέσμης φωτός, ενός υλικού στην περίπτωση χρήσης αισθητήρα φωτός, κ.α.
3. **Την συνδυασμένη υπολογιστική επεξεργασία** των δύο παραπάνω κάτω από κάποιο αλγοριθμικό πλαίσιο για τον υπολογισμό της τρέχουσας θέσης, την αναγνώριση τυχών εμποδίων, τον προσδιορισμό των ενεργειών για την μετακίνηση στην επόμενη θέση, την λήψη διορθωτικών ενεργειών. Δεδομένης της εγγενούς πολυπλοκότητας της, αυτή η φάση κίνησης ενός αυτόνομου οχήματος αποτελεί ίσως την πλέον σημαντική όπου οι το υπολογιστικό πλαίσιο θα πρέπει να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο ελαχιστοποιώντας το σφάλμα που προκύπτει από την οδομετρία και την αντίληψη του περιβάλλοντα χώρου.

2.2 Αναγνώριση γραμμής

2.2.1 Εισαγωγή

Στις περισσότερες των περιπτώσεων ένα αυτόνομο όχημα το οποίο πραγματοποιεί εργασίες ρουτίνας (επαναλαμβανόμενες εργασίες σε ένα συγκεκριμένο χωρο-χρονικό πλαίσιο π.χ. τοποθέτηση βιβλίων σε ράφια, διαχείριση αποθήκης υλικών) απαιτείται να ακολουθήσει έγχρωμες γραμμές οι οποίες ορίζουν διαφορετικές πορείες μέσα στο χώρο ανάλογο με την εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί.

Κατά την διαδικασία ακολούθησης γραμμής ένα αυτόνομο όχημα φέρει τουλάχιστον έναν αισθητήρα φωτός με το οποίο ακολουθεί μία γραμμή κάποιου συγκεκριμένου χρώματος (βλέπε Εικόνα 2)



Εικόνα 2: Αυτόνομο όχημα ακολούθησης γραμμής

Η ακολούθηση γραμμής ενώ αρχικά μπορεί να μοιάζει με τετριμμένη διαδικασία στη πράξη επηρεάζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες όπως:

1. Το ρυθμό δειγματοληψίας του αισθητήρα φωτός
2. Την ποιότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα φωτός
3. Την επιθυμητή ταχύτητα κίνησης του αυτόνομου οχήματος
4. Την χρωματική ποιότητα της γραμμής
5. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η γραμμή
6. Το υλικό πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένη η γραμμή
7. Το σχήμα και πάχος της γραμμής (ευθεία, τεθλασμένη, καμπύλη, οξείες γωνίες, αμβλείες γωνίες, διασταυρώσεις με γραμμές ιδίου ή διαφορετικού χρώματος)
8. Τη θέση του αισθητήρα ως προς την γραμμή (αριστερά, πάνω ή δεξιά)

2.2.2 Ρυθμός δειγματοληψίας

Ως ρυθμός δειγματοληψίας ορίζεται το πλήθος των τιμών τις οποίες έχει τη **δυνατότητα** να λάβει (μετρήσει) ο αισθητήρας φωτός σε ένα δευτερόλεπτο. Με άλλα λόγια κατά την διάρκεια ενός δευτερολέπτου κίνησης πάνω σε μια γραμμή πόσες φορές έχει ο αισθητήρας τη δυνατότητα να «πάρει» μέτρηση. Το μέγεθος αυτό είναι εξαρτημένο από τον κατασκευαστή του αισθητήρα, οπότε υφίσταται φυσικός περιορισμός. Συγκεκριμένα για το αισθητήρα φωτός-χρώματος της Lego (Εικόνα 3) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής ο κατασκευαστής δίνει ως ρυθμό δειγματοληψίας 1KHz. Πρέπει να επισημανθεί στο σημείο αυτό, ότι σε ταχεία κίνηση (ισχύς κινητήρων > 60% της ολικής αποδιδόμενης ισχύος των κινητήρων) ο ρυθμός αυτός παράγει τέτοιο πλήθος δειγμάτων που είναι αδύνατη η επεξεργασία τους από τον υπολογιστή του αυτόνομου οχήματος (LegoMindstormsEV3 –ARM9 μικροεπεξεργαστής με λειτουργικό σύστημα Linux) . απαιτώντας έτσι την απόρριψη δειγμάτων με προγραμματιστικό τρόπο (χρονοκαθυστέρηση).



Εικόνα 3: Αιθητήρας φωτός-χρώματος Lego

2.2.3 Ποιότητα και τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα φωτός

Από το πειραματισμό στα πλαίσια της εργασίας αυτής προέκυψαν τα ακόλουθα σημαντικά στοιχεία:

α. Διαφορετικοί αισθητήρες δίνουν διαφορετικές τιμές για την ίδια γραμμή στο ίδιο σημείο.

β. Η απόσταση αισθητήρα-γραμμής για την σωστή μέτρηση διαφέρει από αισθητήρα σε αισθητήρα και κυμαίνεται από 0,5 εκ. έως 1.3 εκ.

γ. Οι κραδασμοί κατά την κίνηση επηρεάζουν σημαντικά τον αισθητήρα φωτός. Αυτό συνεπάγεται ότι ο αισθητήρας δεν μπορεί να βρίσκεται, ως προέκταση, πολύ μπροστά ή πολύ πίσω από το αυτόνομο όχημα γεγονός που στερεί την έγκαιρη προειδοποίηση κατά την κίνηση του οχήματος. Η όποια ενέργεια πρέπει να πραγματοποιηθεί γίνεται με την λήψη του δεδομένου – δεδομένου ότι ο αισθητήρας βρίσκεται πολύ κοντά στο όχημα- που την απαιτεί χωρίς να υπάρχει χρονικό διάστημα που να επιτρέπει τυχόν διορθωτικές αποφάσεις από την πλευρά του λογισμικού ακολούθησης γραμμής.

Επιθυμητή ταχύτητα κίνησης του αυτόνομου οχήματος

Η ταχύτητα με την οποία πρέπει να κινείται το όχημα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ορθή κίνηση του κατά την ακολούθηση γραμμής. Με άλλα λόγια όσο αυξάνει η ταχύτητα τόσο μειώνεται η αξιοπιστία των πολλαπλών δειγμάτων που προσλαμβάνει ο αισθητήρας φωτός λόγω του ρυθμού δειγματοληψίας που αναφέραμε πιο πάνω. Αυτό επιτείνεται περαιτέρω λόγω των ταλαντώσεων που υφίσταται το αυτόνομο όχημα στην προσπάθειά του να ακολουθήσει πιστά την γραμμή. Συνεπώς, με δεδομένη μηδενική ή ελάχιστη ταλάντωση ένας αριθμός δειγμάτων δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη προκειμένου να αποφευχθούν άσκοπες διορθωτικές κινήσεις οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν στην αύξηση της ταλάντωσης του οχήματος και συνεπώς είτε στη μείωση της τελικής ταχύτητας είτε στην αναποτελεσματική ακολούθηση της γραμμής ή και στα δύο.

Χρωματική ποιότητα γραμμής

Η χρωματική ποιότητα της γραμμής που ακολουθεί ένα αυτόνομο όχημα είναι τεράστιας σημασίας για την ορθή ακολούθηση της. Είναι γνωστό ότι κάθε χρώμα σχηματίζεται ως ποσοστό των τριών βασικών χρωμάτων (κόκκινο-πράσινο-μπλέ) στη περίπτωση που γίνεται χρήση του προτύπου RGB ή τεσσάρων συνιστωσών (κυανό-ματζέντα-κίτρινο-μαύρο) στη περίπτωση που γίνεται χρήση του προτύπου CMYK. Κατά την εκτύπωση μία γραμμής ακόμη και μαύρου χρώματος συμμετέχουν όλα τα επιμέρους στοιχεία είτε του RGB είτε του CMYK. Ας υποθέσουμε ότι μία μαύρη γραμμή σχηματίζεται ως RGB(0,0,0), δηλαδή μαύρο, αλλά σε κάποιο σημείο η γραμμή έχει σχηματιστεί από RGB(0,0,15) το οποίο στο γυμνό μάτι είναι μαύρο, ο αισθητήρας φωτός σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο θα λάβει εσφαλμένη μέτρηση. Αποτέλεσμα αυτού είναι, ανάλογα με το ποσοστό του σφάλματος, να δοθούν διορθωτικές εντολές στο όχημα ενώ στην πράξη κάτι τέτοιο δεν έπρεπε να γίνει.

Υλικό κατασκευής γραμμής

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ακριβή ακολούθηση γραμμής είναι το υλικό από το οποίο έχει κατασκευαστεί η γραμμή. Διαφορετικές τιμές αποδίδονται αν το υλικό πάνω στο οποίο είναι τυπωμένη η γραμμή είναι χαρτί από αυτές που αποδίδονται αν είναι γυαλί ή πλαστικό κ.ο.κ. Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα που προκύπτει από το υλικό κατασκευής της γραμμής επιλύεται σχετικά εύκολα – σε αντίθεση με το πρόβλημα που περιγράφεται στην παραπάνω ενότητα – με τη σωστή βαθμονόμηση (καλιπράρισμα) του αισθητήρα αφού αφορά σε ολόκληρο το χώρο κίνησης του αυτόνομου οχήματος. Προβλήματα ανακύπτουν μόνο στις περιπτώσεις όπου λόγω εξωγενών συνθηκών το υλικό αυτό δεν είναι ομοιόμορφο στην ολότητα του χώρου.

Υλικό πάνω στο οποίο κινείται το αυτόνομο όχημα

Ανομοιογένεια στο υλικό πάνω στο οποίο κινείται το όχημα πέραν του ότι μπορεί να επηρεάσει τις τιμές του αισθητήρα φωτός, επηρεάζει την κίνηση του. Λιγότερη ή περισσότερη τριβή σ' έναν από τους δύο κινητήρες κίνησης μπορεί να στρεβλώσει την κίνηση του απαιτώντας διορθωτικές κινήσεις άλλες από αυτές που είναι εξαρτημένες από τις τιμές του αισθητήρα φωτός και την αλγοριθμική τους επεξεργασία. Στη διόρθωση σφαλμάτων που προκύπτουν σε τέτοιες περιπτώσεις συμβάλει σημαντικά η οδομετρία υπό προϋποθέσεις που θα μελετηθούν σε απόμενες ενότητες.

Σχήμα και πάχος Γραμμής

Το είδος της γραμμής επίσης παίζει σημαντικό ρόλο για την ομαλή κίνηση ενός αυτόνομου οχήματος το οποίο την ακολουθεί. Η πλέον εύκολη περίπτωση είναι αυτή της ευθείας γραμμής. Το είδος αυτό γραμμής είναι ιδανικό για την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων αφού με δεδομένη της σωστή βαθμονόμηση του αισθητήρα φωτός απαλείφονται τυχόν ταλαντώσεις ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλη ανοχή κατά την απόρριψη δειγμάτων από τον κύκλο της επεξεργασίας. Το ίδιο δεν συμβαίνει όμως για τις καμπύλες όπου αυξάνεται η ταλάντωση λόγω της αδυναμίας του οχήματος να στρίψει ομαλά εξαιτίας των δύο τροχών με αποτέλεσμα να ακολουθεί την καμπύλη κάνοντας ζικ-ζακ με πολύ μικρή περίοδο. Η μικρή περίοδος ταλάντωσης σε αυτή την περίπτωση είναι το ζητούμενο γιατί σε κάθε άλλη περίπτωση υπάρχει σοβαρός κίνδυνος υπέρβασης της ακολουθούμενης γραμμής και συνεπώς απώλεια προσανατολισμού. Οι γωνίες είτε οξείες είτε αμβλείες αποτελούν στοιχεία στην

πορεία ενός αυτόνομου οχήματος που χρειάζονται ειδικό χειρισμό. Η δυσκολία δεν έγκειται στον τρόπο με τον οποίο θα τις ακολουθήσει ένα αυτόνομο όχημα, αλλά στο πως θα τις ανιχνεύσει. Για τις οξείες γωνίες η τεχνική της επιτόπιας στροφής (spin-turn) με γωνία συγκεκριμένων μοιρών εξασφαλίζει ταχεία και ακριβή στρέψη. Όμως, απαιτεί ενδελεχή χαρτογράφηση της διαδρομής και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα υφιστάμενα δεδομένα οδομετρίας(π.χ. μετά από ω περιστροφές των τροχών στροφή αριστερά 33.5°). Σε αντίθεση οι αμβλείες γωνίας μπορούν αν αντιμετωπισθούν με έναν γενικευμένο αλγόριθμο ακολούθησης γραμμής στο οποίο όμως πέρα από τα δεδομένα του αισθητήρα φωτός απαιτούνται και δεδομένα οδομετρίας έτσι ώστε η στρέψη του οχήματος να γίνεται πάντοτε στο σημείο που πρέπει. Σε ότι αφορά τις τεθλασμένες γραμμές αλλά και τις διασταυρώσεις τα δεδομένα οδομετρίας παίζουν πρωταρχικό ρόλο.

Το πάχος της γραμμής επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή ακολούθηση της. Όσο πιο λεπτή είναι μία γραμμή τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να την υπερβεί ο αισθητήρας φωτός σε μία ενδεχόμενη ταλάντωση ή στροφή με αποτέλεσμα το όχημα να αποπροσανατολιστεί. Αν το πάχος της γραμμής είναι μεγάλο, τότε ο κίνδυνος που ελλοχεύει είναι το αυτόνομο όχημα, ειδικά στη περίπτωση που ο αισθητήρας φωτός είναι πάνω από τη γραμμή να εξαναγκαστεί σε ταλαντώσεις μεγάλης περιόδου με αποτέλεσμα την απώλεια ταχύτητας. Σε κάθε περίπτωση το πάχος της γραμμής είναι συνάρτηση του μεγέθους και του οπτικού πεδίου του αισθητήρα.

Θέση αισθητήρα φωτός

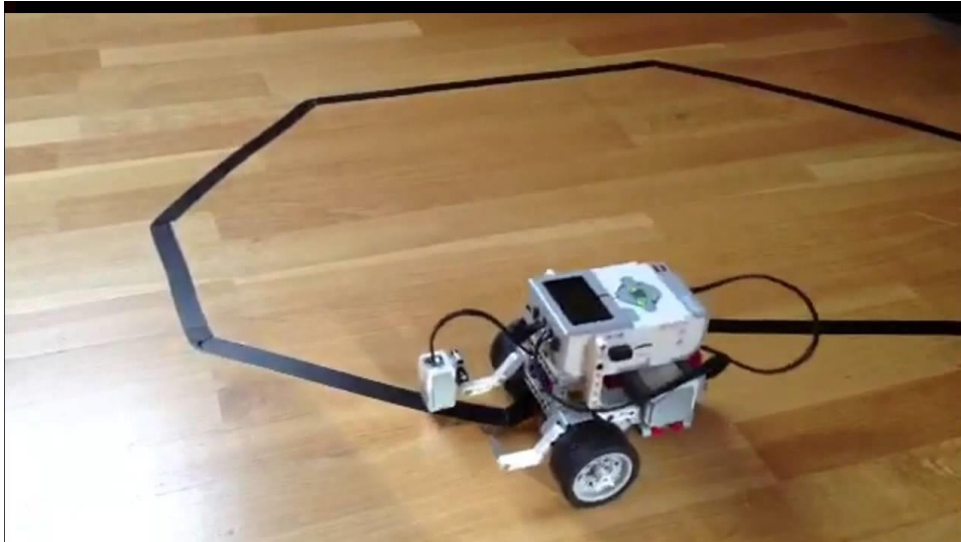
Η θέση του αισθητήρα φωτός αναφορικά με την γραμμή που ακολουθεί παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στην επιτυχή και ταχεία ακολούθηση γραμμής. Υπάρχουν δύο διακριτές περιπτώσεις τοποθέτησης του αισθητήρα φωτός αναφορικά με την γραμμή που θα ακολουθήσει. Στη πρώτη περίπτωση ο αισθητήρας τοποθετείται είτε δεξιά είτε αριστερά της γραμμής, ενώ στη δεύτερη τοποθετείται από πάνω από τη γραμμή. Η δεύτερη προσέγγιση έχει αποδειχθεί, όπως θα δούμε παρακάτω ότι δεν μπορεί να εξασφαλίσει υψηλές ταχύτητες κίνησης καθ' όλο το μήκος της διαδρομής διότι απαιτεί την επιβράδυνση πριν από σημεία αλλαγής κατεύθυνσης. Σε αντίθεση, η πρώτη περίπτωση δεν απαιτεί κάτι τέτοιο αλλά όπως έχουμε ήδη αναφέρει εξαρτάται από τα δεδομένα της οδομετρίας.

2.2.4. Βασικές Αρχές Ακολούθησης Γραμμής

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ένα αυτόνομο όχημα που φέρει μόνο έναν αισθητήρα φωτός μπορεί αν ακολουθήσει αρχικά μια ευθεία γραμμή, θέτοντας τις βασικές αρχές που διέπουν την διαδικασία με την οποία είναι εφικτή η ακολούθηση γραμμής. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τα προβλήματα που προκύπτουν στις καμπύλες, οξείες και αμβλείες γωνίες καθώς και τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται οι τεθλασμένες γραμμές

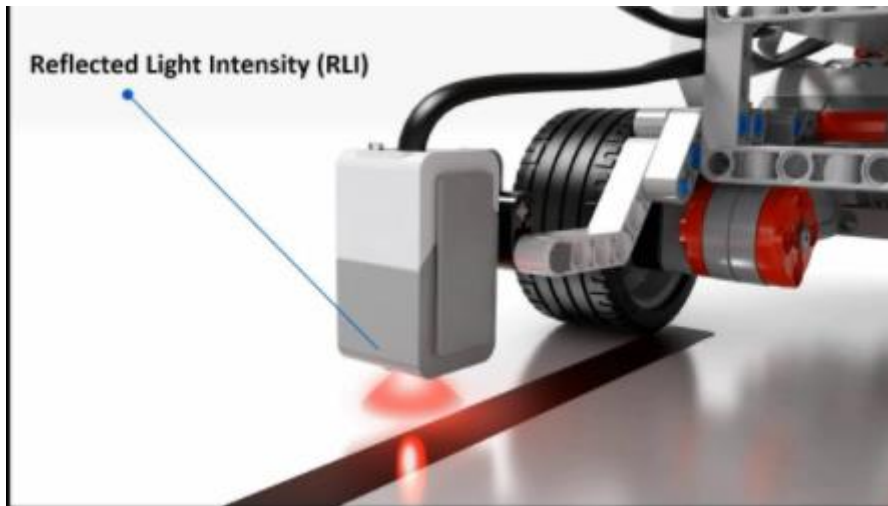
Ευθεία γραμμή

Υποθέτοντας ότι έχουμε ένα αυτόνομο όχημα με δύο κινητήρες κίνησης και έναν αισθητήρα φωτός, όπως το όχημα το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 4, και ότι ο αισθητήρας φωτός βρίσκεται στο εμπρός δεξιά μέρος του οχήματος, η διαδικασία με την οποία το όχημα μπορεί να ακολουθήσει ένα ευθύγραμμο τμήμα AB έχει ως ακολούθως:



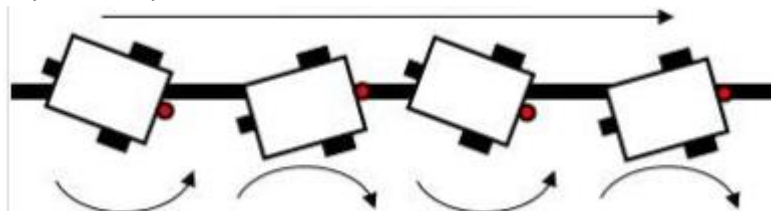
Εικόνα 4: Αυτόνομο Όχημα Ακολουθήσης Γραμμής με έναν αισθητήρα φωτός

- Αρχικά πρέπει να βαθμονομηθεί ο αισθητήρας. Η βαθμονόμηση αφορά στη μέτρηση του χρώματος της γραμμής και του χρώματος που βρίσκεται εκατέρωθεν της γραμμής. Ένας αισθητήρας φωτός, όπως αυτός που φέρουν τα αυτόνομα οχήματα της LEGO (EV3-Color-Sensor-45506) έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει χρώμα ή να μετρήσει την ένταση του ανακλώμενου φωτός (reflected light intensity). Όταν ένα όχημα ακολουθεί μία γραμμή, προκρίνεται η μέτρηση της έντασης του φωτός, διότι πέραν του ότι παρέχει πιο αξιόπιστη πληροφορία επιτρέπει τον ορισμό κατωφλίου (threshold) για το ποιο εύρος τιμών εμπίπτει στο προς αναγνώριση χρώμα και ποιο όχι. Παραδείγματος χάριν, για το μαύρο χρώμα σε μία κλίμακα τιμών από το 0 (απόλυτο μαύρο) έως το 100 (απόλυτο λευκό) το μαύρο χρώμα μπορεί να οριστεί από 0 έως 50. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο αισθητήρας, σε κατάσταση μέτρησης της έντασης ανακλώμενου φωτός, έχει ως εξής: Ο αισθητήρας διοχετεύει μία δέσμη ερυθρού φωτός στην προς ακολουθήση γραμμή και μετρά την ένταση του ανακλώμενου φωτός (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Αισθητήρας φωτός σε κατάσταση μέτρησης αντανάκλασης φωτός

- Αν το όχημα ακολουθεί πιστά την γραμμή, τότε η τιμή που λαμβάνει πρέπει να είναι 50. Η επιλογή της τιμής αυτής δεν είναι τυχαία. Δεδομένου ότι η τιμή 50 αντιστοιχεί στο γκριζο χρώμα στιδήποτε μικρότερου του 50 θεωρείται ότι ανήκει στο μαύρο χρώμα. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας του οχήματος βρίσκεται πάνω στην μαύρη γραμμή γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει μία στρέψη προς τα δεξιά. Αντίστοιχα, αν η ένταση του ανακλώμενου φωτός είναι μεγαλύτερη του 50 τότε ο αισθητήρας απομακρύνεται από την μαύρη γραμμή, δηλαδή το όχημα στρίβει προς τα αριστερά. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτούνται διορθωτικές κινήσεις έτσι ώστε η κηλίδα ερυθρού φωτός που εκπέμπει ο αισθητήρας να βρίσκεται **πάντα** κατά το ήμισυ πάνω στην μαύρη γραμμή και κατά το ήμισυ πάνω στην επιφάνεια που περιβάλλει την γραμμή. Προφανώς, οι τιμές που δίδονται παραπάνω βασίζονται στο ότι η γραμμή που πρέπει να ακολουθηθεί είναι μαύρη και η υπερβάλλουσα την γραμμή επιφάνεια λευκή. Διαφορετικά χρώματα απαιτούν νέα βαθμονόμηση και νέο ορισμό κατωφλιού.
- Είναι φανερό ότι όσο ή τιμή είναι 50 το αυτόνομο όχημα μπορεί να ακολουθεί τη γραμμή με μεγάλη ταχύτητα αφού δεν παρεκκλίνει της πορείας του. Επειδή όμως οι κινητήρες δεν είναι μεταξύ τους συγχρονισμένοι και εξαιτίας των κατασκευαστικών αποκλίσεων που εγγενώς υπάρχουν στα μηχανικά μέρη των κινητήρων υπάρχει πάντα απόκλιση στην κίνηση του οχήματος. Η απόκλιση αυτή οδηγεί στην ανάγκη να υπάρχουν διορθωτικές κινήσεις η οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε ταλάντωση του οχήματος με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του (Εικόνα 6).

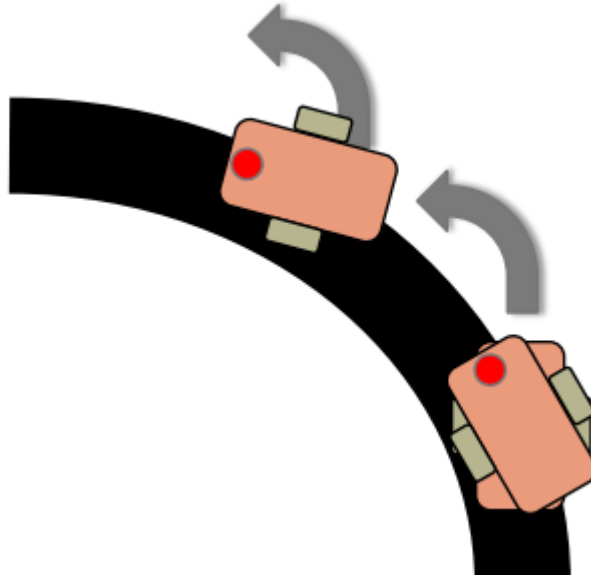


Εικόνα 6: Κίνηση οχήματος με ταλάντωση

Συνεπώς, για να εξασφαλισθεί η μέγιστη δυνατή ταχύτητα κατά την κίνηση απαιτείται η ελαχιστοποίηση ή καλύτερα η εκμηδένιση της ταλάντωσης.

Καμπύλες

Η ακολουθία μία καμπύλης από ένα αυτόνομο όχημα είναι μια πιο πολύπλοκη διαδικασία από αυτή που αφορά σ' ένα ευθύγραμμο τμήμα. Το όχημα δεδομένου ότι δεν έχει σύστημα διεύθυνσης δεν έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει ομαλά την καμπύλη όπως φαίνεται στη παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 7: Ακολουθία καμπύλης

Συνεπώς, κατά την κίνηση του τέμνει την γραμμή που ακολουθεί και εφαρμόζει διορθωτικές κινήσεις. Αυτό με τη σειρά του έχει επίπτωση στην ταχύτητα του οχήματος. Με άλλα λόγια η προσέγγιση μία καμπύλης με μεγάλη ταχύτητα απαιτεί μεγάλης κλίμακας διορθωτικές κινήσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της ταλάντωσης του οχήματος. Η μείωση της ταχύτητα εξασφαλίζει την ομαλή ακολουθία της γραμμής αλλά δεδομένου ότι τα ζητούμενο είναι η ταχεία κίνηση είναι μία λύση που δεν μπορεί να υιοθετηθεί. Πέραν τούτου, ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος το όχημα να εκτραπεί εντελώς της πορείας του αν το πλάτος της ταλάντωσης είναι τέτοιο ώστε ο αισθητήρας να βρεθεί εκτός της γραμμής από την αντίθετη πλευρά του (αριστερή). Είναι προφανές ότι η ταχεία κίνηση πάνω σε καμπύλη δεν μπορεί να εξασφαλισθεί μόνο από τα δεδομένα που προέρχονται από τον αισθητήρα φωτός αλλά απαιτούνται και δεδομένα οδομετρίας. Ο συνδυασμός των δύο μπορεί να εξασφαλίσει την ομαλότερη κίνηση αφού μέσω των δεδομένων οδομετρίας μπορούν να ελεγχθούν οι περιστροφές που πραγματοποιούν οι τροχοί και συνεπώς οι διορθωτικές κινήσεις να μην είναι εξαρτημένες μόνο από τις μετρήσεις της έντασης του ανακλώμενου φωτός.

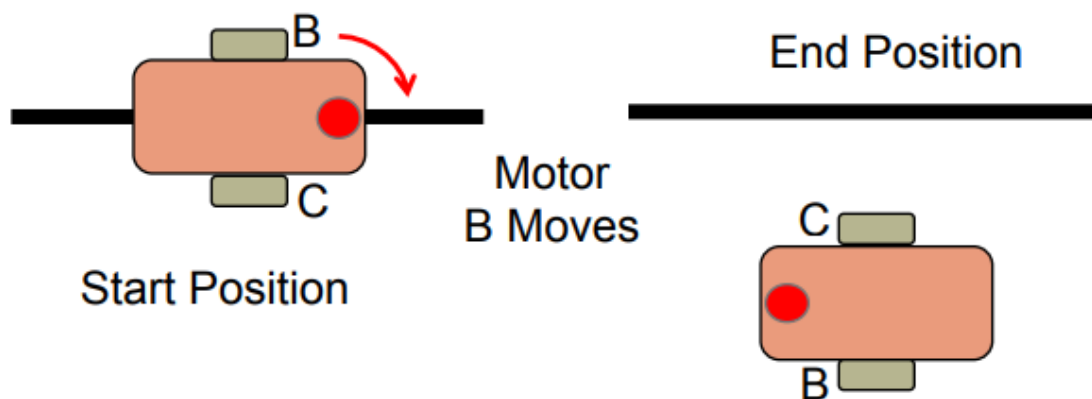
Γωνίες

Οι γωνίες αποτελούν ένα ιδιαίτερο στοιχείο όταν πρόκειται για αυτόνομα οχήματα χωρίς σύστημα διεύθυνσης. Η απότομη αλλαγή κατεύθυνσης είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί από τον αισθητήρα φωτός. Ενώ ο αισθητήρας «διαβάζει» τη μέση τιμή, π.χ. 50, ακολουθώντας την πορεία, απότομα «διαβάζει» αλλαγές περίπου 50 μονάδων:

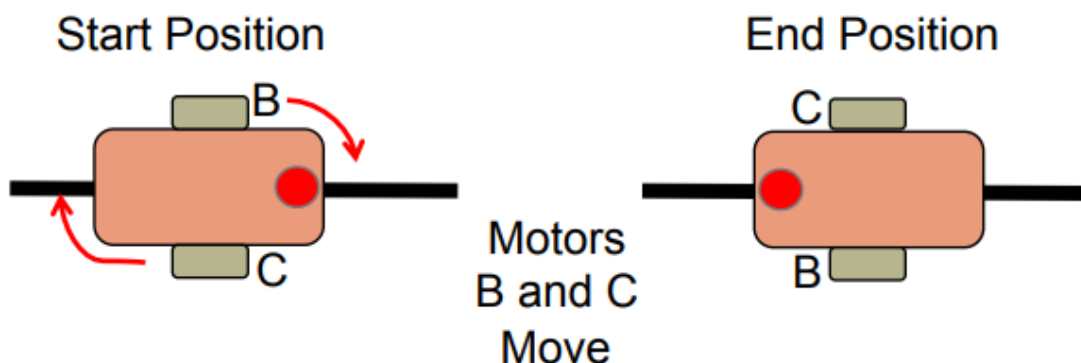
- Αν η γωνία έχει δεξιά κλίση και οι μοίρες είναι 1 έως 90 τότε ο αισθητήρας, σε κάποια στιγμή, θα ανιχνεύσει μία τιμή ίση του 0 οπότε θα εκτελεστούν διορθωτικές κινήσεις και θα

επανέλθει η ισορροπία στη τιμή 50 μετά από συνεχή στροφή προς τα δεξιά μέχρι που η τιμή που θα ανιχνευθεί θα είναι μεγαλύτερη του 50 και θα επανέλθει στη γραμμή σύμφωνα με όσα παραθέσαμε παραπάνω στην ενότητα που εξετάστηκαν οι ευθείες. Όμως για να αποφευχθεί ταλάντωση μεγάλου πλάτους η ταχύτητα δεν μπορεί να είναι υψηλή. Δεδομένα οδομετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του σημείου που σχηματίζεται η γωνία και η στροφή να πραγματοποιηθεί με επιτόπια στρέψη του οχήματος (αντίστροφη κίνηση των δύο κινητήρων, με αυτόν που είναι στη πλευρά της γωνίας να κινείται σε όπισθεν – spinturn) τόσες μοίρες όσες είναι η γωνία. Η επιλογή της επιτόπιας περιστροφής επιλέγεται για να εξασφαλισθεί η σωστή τοποθέτηση και προσανατολισμός του οχήματος μετά την εκτέλεση της στροφής όπως φαίνεται στο δεύτερο τμήμα του παρακάτω σχήματος (spinturn).

180 Degree Pivot Turn



180 Degree Spin Turn



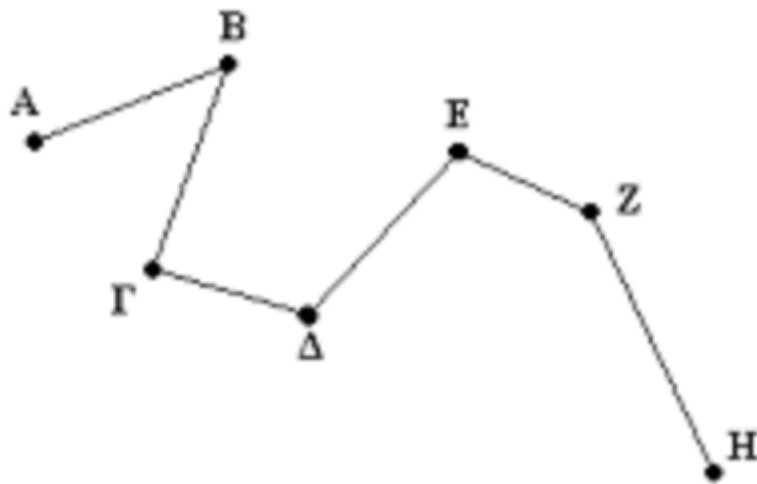
- Αν η γωνία έχει δεξιά κλίση και οι μοίρες είναι από 91 έως 170 τότε ο αισθητήρας σε κάποια στιγμή θα ανιχνεύσει μία τιμή, περίπου, ίση του 0 οπότε θα εκτελεστούν διορθωτικές

κινήσεις για να επανέλθει η ισορροπία στη τιμή 50 μετά από συνεχή στροφή προς τα δεξιά ομοίως με την παραπάνω περίπτωση.

- Αν η γωνία έχει αριστερή κλίση και οι μοίρες είναι 1 έως 170 τότε ο αισθητήρας σε κάποια στιγμή θα ανιχνεύσει μία τιμή σαφώς μεγαλύτερη του 50 οπότε θα εκτελεστούν διορθωτικές κινήσεις και θα επανέλθει η ισορροπία στη τιμή 50 μετά από συνεχή στροφή προς τα αριστερά εφόσον η ταχύτητα είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε να προλάβουν οι διορθωτικές κινήσεις να επαναφέρουν το όχημα στη γραμμή. Αν η ταχύτητα είναι μεγάλη τότε το όχημα θα κινηθεί προς τα αριστερά αλλά και προς τα εμπρός με αποτέλεσμα να χάσει τον προσανατολισμό του και να μην ακολουθήσει την πορεία του. Και εδώ, στοιχεία οδομετρίας σε συνδυασμό με την ανίχνευση τιμής πολύ μεγαλύτερης του πενήντα (> 50) έρχονται να δώσουν τη λύση. Μόλις το όχημα αντιληφθεί ότι δεν ακολουθεί την μαύρη γραμμή και έχει τιμή έντασης ανακλώμενου φωτός που πλησιάζει το λευκό τότε στρίβει με επιτόπια στροφή αριστερά τόσες μοίρες όσες είναι η γωνία.
- Αν πρόκειται για γωνία μεγαλύτερη των 170 μοιρών τότε απαιτείται αναστροφή του οχήματος οπότε μετά την ολοκλήρωση της ισχύουν τα όσα αναφέραμε για την ακολούθηση ευθύγραμμου τμήματος.

Τεθλασμένες γραμμές

Οι τεθλασμένες είναι πλήθος από ευθύγραμμα τμήματα ενωμένα μεταξύ τους σχηματίζοντας γωνίες όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνα 8. Κατά συνέπεια εμπίπτουν και αντιμετωπίζονται σύμφωνα με όλα τα παραπάνω κατά περίπτωση.

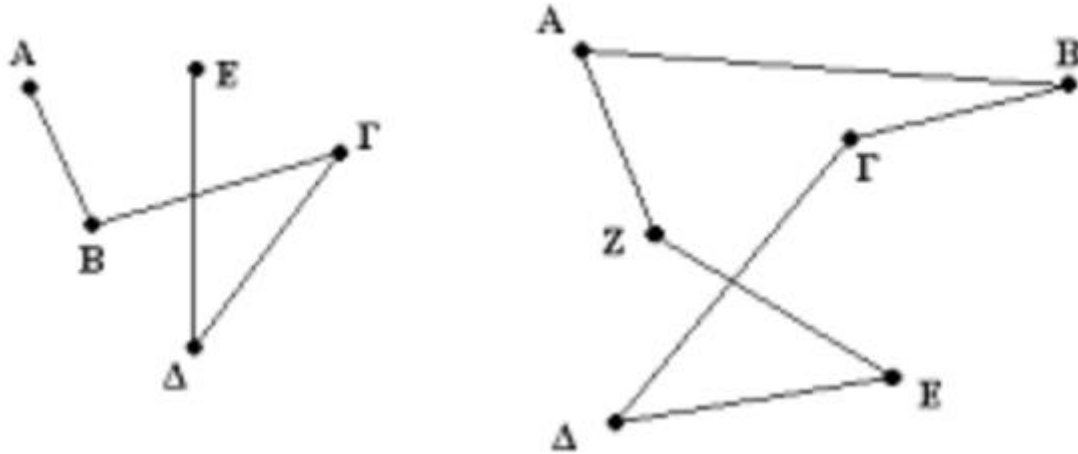


Εικόνα 8: Τεθλασμένη

Διασταυρώσεις.

Οι διασταυρώσεις (Εικόνα 9) αντιμετωπίζονται πάντα σε πρώτη φάση με δεδομένα οδομετρίας. Στη συνέχεια και ανάλογα με την ενέργεια που πρέπει να γίνει μπορεί η αντιμετώπιση τους να γίνει είτε

με δεδομένα του αισθητήρα φωτός, είτε με δεδομένα οδομετρίας ή με συνδυασμό των δύο, περιπτώσεις που εμπίπτουν στα όσα μέχρι έχουμε περιγράψει.



Εικόνα 9: Διασταυρώσεις

2.3 Συμπεράσματα

Η ακολούθηση γραμμής από ένα αυτόνομο όχημα φαντάζει μία απλή διαδικασία που όμως όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι αρκετά σύνθετη και χρίζει μελέτης. Ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα που ακολουθείται διαφορετικές ενέργειες πρέπει να εφαρμοστούν. Η μεγάλη πολυπλοκότητα έρχεται όταν η πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι συνδυασμός διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων. Ως βασική προσέγγιση επιλέγεται η ακολούθηση γραμμής με χρήση αισθητήρα φωτός που μετρά την ένταση του ανακλώμενου φωτός. Όμως από μόνη της αυτή η προσέγγιση δεν αρκεί. Σε πολλές περιπτώσεις, απότομες στροφές, τεθλασμένες, αποφυγή μεγάλου πλάτους ταλάντωσης, ακρίβεια στη κλίση του οχήματος καθώς και η ανάγκη διατήρησης υψηλής ταχύτητας απαιτούν την επικουρία των δεδομένων που προέρχονται από τον αισθητήρα από στοιχεία οδομετρίας για την ακριβή κίνηση και προσανατολισμό του οχήματος. Αυτά βέβαια είναι εφαρμόσιμα **μόνο** στις περιπτώσεις που η διαδρομή που θα ακολουθήσει το όχημα είναι γνωστή και ρητά ορισμένη. Ασαφείς ή τυχαίες διαδρομές δεν μπορούν να προσεγγιστούν μόνο από τα παραπάνω αλλά δεν αποτελούν αντικείμενο αυτής της μελέτης. Άλλωστε το «άγνωστο» δεν μπορεί να προσεγγισθεί ποτέ με υψηλές ταχύτητες. Συμπερασματικά λοιπόν οι προαναφερθείσες τεχνικές καλύπτουν απόλυτα το πλαίσιο μελέτης αυτής της εργασίας. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε αλγορίθμους για την εφαρμογή των παραπάνω με γνώμονα πάντα η πορεία του οχήματος να γίνεται με την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα. Κύριο μέλημα μας θα είναι ο εκμηδενισμός του πλάτους ταλάντωσης με τεχνικές που προέρχονται από το χώρο του αυτοματισμού με εφαρμογή στα δεδομένα του χώρου της κίνησης αυτόνομων οχημάτων.

Κεφάλαιο 3

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε αλγόριθμους ακολούθησης γραμμής οι οποίοι βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το αυτόνομο όχημα όπως τιμές έντασης ανακλώμενου φωτός, στοιχεία οδομετρίας κ.α. Η μελέτη των αλγορίθμων αυτών ξεκινάει με τους πλέον απλοϊκούς αλγόριθμους και καταλήγει σε αλγόριθμους που προέρχονται από τον χώρο του αυτοματισμού. Για κάθε αλγόριθμο που θα εξετάσουμε θα αναδειχθούν τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα τους καθώς και η καταλληλότητα του για να ακολουθήσει τα διάφορα σχήματα (ευθείες, καμπύλες, γωνίες, τεθλασμένες, διασταυρώσεις) που μπορεί να συναντήσει ένα αυτόνομο όχημα κατά την πορεία του.

3.1 Αλγόριθμοί ακολούθησης γραμμής

Με σκοπό την ύπαρξη ενός κοινού σημείου αναφοράς θεωρούμε ότι η επιφάνεια στην οποία κινείται το αυτόνομο όχημα είναι λευκή ενώ η γραμμή που σχηματίζει την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα είναι μαύρη. Επίσης θεωρούμε ότι ο αισθητήρας φωτός βρίσκεται λίγο μπροστά από τον δεξιό τροχό.

3.1.1. Αλγόριθμος δύο καταστάσεων ή αλγόριθμος ελεγκτή On/Off

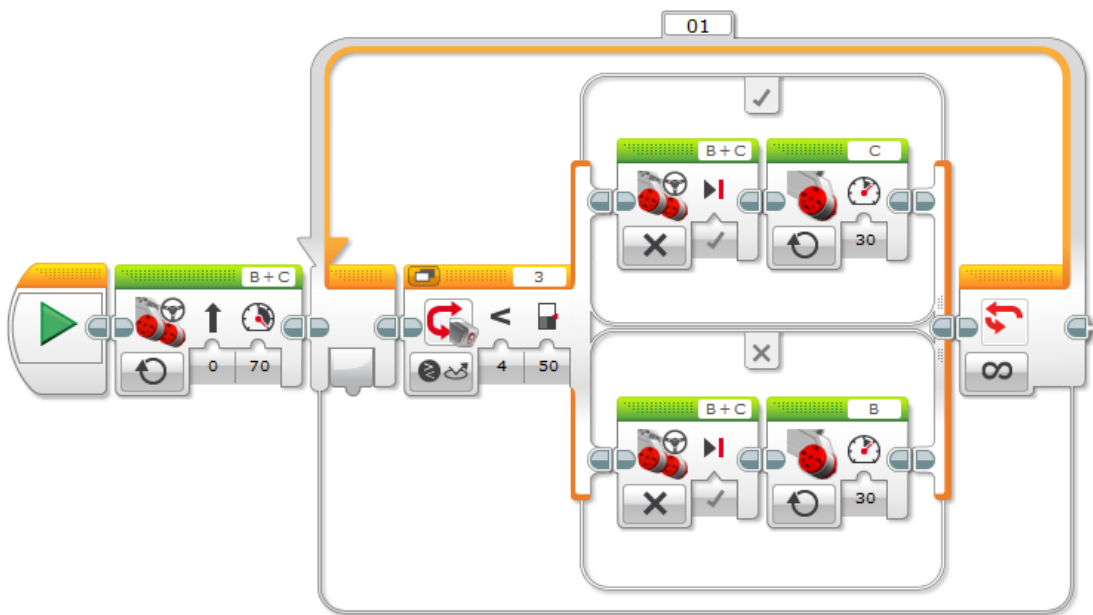
Ο αλγόριθμος δύο βημάτων ή «μπανγκ-μπανγκ» αλγόριθμος όπως πολλές φορές αποκαλείται βρίσκει τις ρίζες στα συστήματα ελέγχου δύο καταστάσεων. Η λογική που διέπει τον αλγόριθμο έχει ως ακολούθως:

- Η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός που λαμβάνεται από τον αισθητήρα φωτός ελέγχεται σε σχέση με την τιμή κατωφλιού.
 - Αν είναι μικρότερη τότε το όχημα έχει αρχίσει να εκτρέπεται της πορείας του προς τα αριστερά οπότε πρέπει να διορθωθεί η κίνηση του στρίβοντας προς τα δεξιά.
 - Αν είναι μεγαλύτερη τότε το όχημα έχει αρχίσει να εκτρέπεται της πορείας του προς τα δεξιά οπότε πρέπει να διορθωθεί η κίνηση του στρίβοντας προς τα αριστερά.
- - Αν είναι ίση, της τιμής κατωφλιού, τότε το όχημα συνεχίζει να κινείται σε ευθεία.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 10) απεικονίζεται σχηματικά ο παραπάνω αλγόριθμος.

Ο αισθητήρας φωτός είναι συνδεδεμένος στη θύρα 3 του ελεγκτή του οχήματος ενώ οι κινητήρες κίνησης είναι συνδεδεμένοι ο μεν δεξιός στη θύρα Β ο δε αριστερός στη θύρα C, παραδοχή που θα ακολουθήσουμε εφεξής.

Το όχημα από στάση ξεκινάει να κινείται με ισχύ στους κινητήρες κίνησης ίση με το 70% της ολικής ισχύος των κινητήρων. Μετά την εκκίνηση ο ελεγκτής εισέρχεται σ' έναν ατέρμονο βρόχο όπου σε σειρά εκτελούνται οι ακόλουθες ενέργειες: Η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός του αισθητήρα συγκρίνεται με το κατώφλι. Στη περίπτωση που η τιμή αυτή είναι μικρότερη του 50 τότε δίνεται εντολή να σταματήσει η κίνηση και στους δύο τροχούς και στη συνέχεια δίνεται εντολή εκκίνησης του μόνο στον κινητήρα C. Αν η τιμή είναι ίση η μεγαλύτερη του 50 τότε και πάλι δίνεται εντολή να σταματήσει η κίνηση και στους δύο κινητήρες και στη συνέχεια δίνεται εντολή εκκίνησης του μόνο στον κινητήρα Β. Κοιτάζοντας την εικόνα 1 παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά η ισχύς στους κινητήρες είναι ίση με το 70% της ολικής τους ισχύος, η ισχύς κατά την διεξαγωγή των διορθωτικών κινήσεων υποβιβάζεται στο 30% της ολικής ισχύος. Ο λόγος, της μείωσης αυτής, είναι ότι αν η ισχύς ήταν μεγαλύτερη τότε ο κίνδυνος της εκτροπής κατά την στρέψη είναι πολύ μεγάλος και θα έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια προσανατολισμού του οχήματος.



Εικόνα 10: Αλγόριθμος ελεγκτή δύο καταστάσεων

Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται ατέρμονα. Η κίνηση του οχήματος δεν είναι καθόλου ομαλή με τη χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Στη προσπάθεια να διατηρήσει την ευθεία πορεία του το όχημα συγκλίνει και αποκλίνει διαρκώς από το σημείο όπου η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός είναι ίση με 50, θυμίζοντας την κίνηση του ερπετού sidewinder. Η παλινδρόμηση αυτή δημιουργεί μία ταλάντωση στο πίσω μέρος του οχήματος που με τη σειρά της αποσταθεροποιεί την ομαλότητα της κίνησης με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας φαύλος κύκλος διορθωτικών κινήσεων που οδηγούν σε όλο και μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης. Για να μειωθεί το πλάτος ταλάντωσης, κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες είναι υποχρεωτική η μείωση της ταχύτητας δηλαδή το ποσοστό ισχύος που λειτουργούν οι κινητήρες. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται λειτουργικά στοιχεία του συγκεκριμένου αλγορίθμου που αφορούν στην κίνηση του οχήματος:

Μελέτη Περιπτώσεων	Αποτέλεσμα
Ταλάντωση	Μεγάλη κυρίως στο οπίσθιο τμήμα του οχήματος η οποία επηρεάζει εκτός από την ταχύτητα του οχήματος και την ομαλή κίνηση του
Ταχύτητα	Μικρή λόγω των συνεχών διορθωτικών κινήσεων και του σταματήματος-εκκίνησης των κινητήρων
Ευθεία κίνηση	Ο αλγόριθμος αυτός με μικρή ταχύτητα μπορεί να πετύχει μία ανώμαλη ευθεία κίνηση κατά την οποία το όχημα

	βρίσκεται σε μία διαρκή κίνηση με ελιγμούς (swervemotion- «ζικ-ζακ»)
Κίνηση σε καμπύλη	Δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με ισχύ > 12 %
Ορθή γωνία	Η στροφή σε ορθή γωνία δεν είναι εφικτή ανεξάρτητα από την ισχύ στους κινητήρες
Οξεία γωνία	Για γωνία λίγων μοιρών είναι εφικτή
Αμβλεία γωνία	Αδύνατη
Τεθλασμένη γραμμή	Ανάλογα με την κλίση των ευθυγράμμων τμημάτων (βλέπε τις δύο παραπάνω περιπτώσεις)
Διασταύρωση	Αδυναμία επιλογής

3.1.2. Αλγόριθμος αναλογικού ελεγκτή (P-Controller)

Στο χώρο του αυτοματισμού, ένας αναλογικός ελεγκτής, είναι ένα γραμμικό σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση όπου μία διόρθωση εφαρμόζεται στη μεταβλητή που ελέγχεται. Η διόρθωση αυτή είναι αναλογική προς της διαφορά του κατωφλιού και της πραγματικής τιμής που αποδίδεται από τον αισθητήρα φωτός. Αλγόριθμοι του τύπου αυτού είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις στις οποίες έχουμε ταχεία μεταβολή της τιμής που λαμβάνουμε από το εξωτερικό περιβάλλον η οποία και καθορίζει τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσει το όχημα.

Στον αλγόριθμο αναλογικού ελεγκτή η έξοδος του ελεγκτή είναι αναλογική προς το σφάλμα που προκύπτει από τη διαφορά του κατωφλιού και της μέτρησης. Η έξοδος του ελεγκτή με άλλα λόγια δεν είναι τίποτα άλλο από το γινόμενο του σφάλματος με το αναλογικό κέρδος.

Μέσα από έναν τυπικό φορμαλισμό:

$$P_{out} = K_p e(t) + p0$$

όπου:

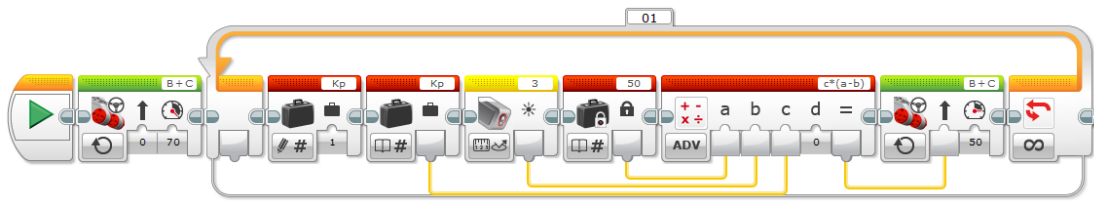
P_{out} : είναι η έξοδος του αναλογικού ελεγκτή

K_p : είναι το αναλογικό κέρδος

$e(t)$: είναι το στιγμιαίο σφάλμα που προκύπτει από τη διαφορά του κατωφλιού και της εκάστοτε στιγμιαίας μέτρησης

$p0$: είναι η έξοδος του ελεγκτή όταν το σφάλμα είναι 0

Ένα μειονέκτημα του αλγόριθμου αυτού είναι ότι δεν έχει τη δυνατότητα να απαλείψει το απομένον (υπολειπόμενο) σφάλμα της διαφοράς κατωφλιού και της λαμβανόμενης τιμής ούτε να έχει συσσωρευμένη γνώση του σφάλματος .



Εικόνα 11: Αναλογικός Ελεγκτής

Το όχημα από στάση ξεκινάει να κινείται με ισχύ στους κινητήρες κίνησης ίση με το 70% της ολικής ισχύος των κινητήρων. Μετά την εκκίνηση ο ελεγκτής εισέρχεται σ' έναν ατέρμονο βρόχο όπου σε σειρά εκτελούνται οι ακόλουθες ενέργειες: Ορίζεται αρχικά το αναλογικό κέρδος ίσο με 1. Γίνεται μέτρηση της έντασης του ανακλώμενου φωτός. Η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός του αισθητήρα αφαιρείται από το κατώφλι. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης πολλαπλασιάζεται με την τιμή του αναλογικού κέρδους. Το αποτέλεσμα που προκύπτει μπορεί να είναι α) ίσο με το μηδέν, β) μικρότερο του μηδενός και γ) μεγαλύτερο του μηδενός.

Στη πρώτη περίπτωση – αποτέλεσμα ίσο του μηδενός **δεν** απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες και το όχημα συνεχίζει να κινείται ακολουθώντας την ευθεία.

Όταν το αποτέλεσμα είναι αρνητικός αριθμός τότε το όχημα έχει αρχίσει να στρέφεται προς τα αριστερά της γραμμής ακολούθησης. Η τιμή δίνεται ως εντολή κίνησης στους κινητήρες με αποτέλεσμα ο κινητήρας C να λαμβάνει μεγαλύτερη ισχύ από τον κινητήρα B και έτσι το όχημα επανέρχεται στη σωστή θέση.

Όταν το αποτέλεσμα είναι θετικός αριθμός τότε το όχημα έχει αρχίσει να στρέφεται προς τα δεξιά της γραμμής ακολούθησης διαβάζοντας πλέον περισσότερο λευκό απ' ότι μαύρο. Η τιμή δίνεται ως εντολή κίνησης στους κινητήρες με αποτέλεσμα ο κινητήρας B να λαμβάνει μεγαλύτερη ισχύ από τον κινητήρα C και έτσι το όχημα επανέρχεται στη σωστή θέση.

Μέχρι στιγμής ο αλγόριθμος αυτός δεν διαφέρει κατά πολύ από τον αλγόριθμο που αναφέραμε στην ενότητα 3.1.1. Η μόνη διαφορά είναι ότι η διορθωτική εντολή κίνησης στους κινητήρες είναι το σφάλμα που έχει προκύψει μεταξύ του κατωφλιού και της ληφθείσας από τον αισθητήρα τιμής. Συνεπώς, και εδώ μπορούμε να έχουμε ταλάντωση και κίνηση με ελιγμούς. Για να μειώσουμε όμως το πλάτος της ταλάντωσης εκμηδενίζοντας έτσι την κίνηση με ελιγμούς μεταβάλλουμε την τιμή του αναλογικού κέρδους K_p . Μειώνοντας λοιπόν το K_p μειώνουμε την τιμή της διόρθωσης αναλογικά με την τιμή του K_p . Αντίθετα, αυξάνοντας την τιμή του K_p πετυχαίνουμε αναλογική αύξηση της τιμής της διόρθωσης. Έτσι μπορούμε να βρούμε κατάλληλες για το K_p τιμές όχι μόνο για ευθύγραμμα τμήματα αλλά και για καμπύλες και γωνίες. Βέβαια οι τιμές αυτές πρέπει να έχουν εδραιωθεί μετά από πειραματισμό διότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δεν παρέχει τη δυνατότητα για υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο.

Αν όμως η διαδρομή είναι ρητά ορισμένη εξ' αρχής και εφόσον υπάρχουν δεδομένα οδομετρίας η αλλαγή της τιμής - και όχι ο υπολογισμός της - σε πραγματικό χρόνο είναι εφικτή αφού σε

συγκεκριμένο σημείο στη διαδρομή μπορεί να πραγματοποιηθεί η αλλαγή αυτή. Ο προσδιορισμός του σημείου είναι προφανές ότι γίνεται μέσα από τα δεδομένα οδομετρίας.

Μελέτη Περιπτώσεων	Αποτέλεσμα
Ταλάντωση	Μπορεί να εκμηδενιστεί από την κατάλληλη τιμή του K_p
Ταχύτητα	Μεγάλη αφού α) έχει εκμηδενιστεί η ταλάντωση μέσω του K_p και β) ο χρόνος επαναφοράς του οχήματος στην επιθυμητή θέση ή χρόνος απόκρισης έχει μειωθεί σε σχέση με τον προηγούμενο αλγόριθμο.
Ευθεία κίνηση	Σε ευθεία κίνηση η ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα είναι μεγάλη αφού πλέον μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ισχύ $\leq 55\%$ της ολικής ισχύος των κινητήρων.
Κίνηση σε καμπύλη	Είναι εφικτή με το κατάλληλο K_p και ισχύ μεταξύ 40 και 45 % της ολικής ισχύος των κινητήρων.
Ορθή γωνία	Η στροφή σε ορθή γωνία δεν είναι εφικτή ανεξάρτητα από την ισχύ στους κινητήρες
Οξεία γωνία	Για γωνία λίγων μοιρών είναι εφικτή
Αμβλεία γωνία	Εφικτή με μεγάλη τιμή K_p σε συνδυασμό με δεδομένα οδομετρίας
Τεθλασμένη γραμμή	Όπως παραπάνω
Διασταύρωση	Αδυναμία επιλογής

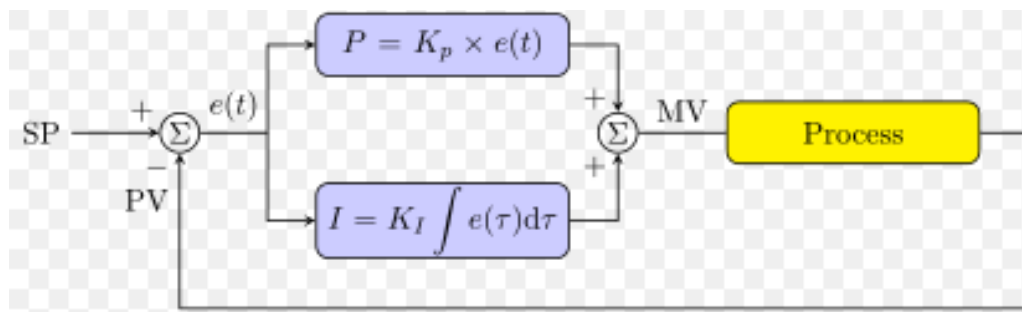
3.1.3 Αλγόριθμος ελεγκτή PI (PI-Controller)

Το σοβαρότερο ίσως μειονέκτημα του προηγούμενου αλγορίθμου, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, είναι ότι βασίζεται σε στιγμιαία δεδομένα και δεν έχει μνήμη των σφαλμάτων που έχει συναντήσει μέχρι την τρέχουσα χρονική στιγμή. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να διορθώσει ο αλγόριθμος ελεγκτή PI, ο οποίος αποκτά γνώση των προηγούμενων σφαλμάτων μέσα από την ολοκλήρωση τους στο χρόνο.

Η έξοδος του ελεγκτή δίνεται από το τύπο:

$$K_p \Delta + K_I \int \Delta dt$$

Όπου Δ είναι η διαφορά μεταξύ του κατωφλιού και της τιμής που προσλαμβάνεται από τον αισθητήρα. Το K_I είναι το κέρδος της ολοκλήρωσης. Ο αλγόριθμος αυτός ενώ έρχεται να συμπληρώσει τον προηγούμενο δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις όπου η μεταβολή της κατάστασης ή των πραγματικών δεδομένων (όχι του θορύβου) γίνονται με ταχύ ρυθμό, και για το λόγο αυτό δεν θα μελετηθεί σε βάθος. Επιπρόσθετα αποτελεί υποσύνολο του αλγορίθμου που ακολουθεί (PID). Ενδεικτικά παραθέτουμε το μπλόκ διάγραμμα του αλγορίθμου για πληρότητα μαζί με την υλοποίηση του.



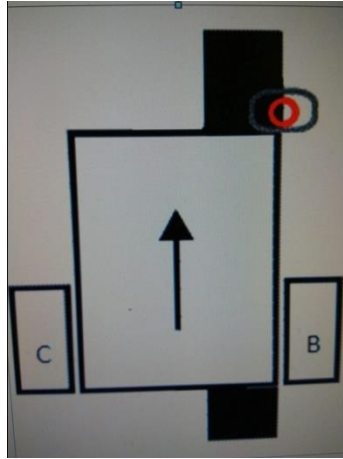
3.1.4 Αλγόριθμος PID

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τον πλέον αξιόπιστο αλγόριθμο ακολούθησης γραμμής που έχει τις ρίζες του στον αυτοματισμό και ειδικότερα στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου (Σ.Α.Ε.). Λόγω της πολυπλοκότητας που υπάρχει εγγενώς στο αλγόριθμο αυτό αρχικά θα εξετάσουμε το θεωρητικό του υπόβαθρο και στη συνέχεια θα παραθέσουμε την υλοποίηση του στα πλαίσια των πειραμάτων που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Η υλοποίηση όπως και στους προηγούμενους αλγορίθμους έχει γίνει για LegoMindstormsEV3 σε περιβάλλον LabView. Τέλος θα αξιολογήσουμε τον αλγόριθμο αυτό και τα αποτελέσματά του, αναφορικά με την ακολούθηση γραμμής αυτόνομα, αλλά και σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους που αναφέραμε στο κεφάλαιο αυτό.

Για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει καλύτερα τη δομή και λογική του αλγορίθμου αυτού θα θέσουμε ένα πραγματικό μεν αλλά απλοποιημένο παράδειγμα καθώς και τις σχετικές υποθέσεις – διαφοροποιημένες ελαφρώς από τις προηγούμενες ενότητες – με σκοπό να αναδείξουμε τα πλεονεκτήματά της προσέγγισης. Αν και ο αλγόριθμος που περιγράφουμε κάνει χρήση δεδομένων που προέρχονται από αισθητήρα φωτός θα μπορούσε να εφαρμοστεί ισοδύναμα, με τις κατάλληλες προγραμματιστικές τροποποιήσεις, και σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρα υπερήχων, γυροσκόπιο ή ακόμα και αισθητήρα υπέρυθρου φωτός.

Στο παρακάτω σχήμα (

Εικόνα 12) παρουσιάζεται ένα αυτόνομο όχημα με ένα αισθητήρα φωτός και δύο κινητήρες κίνησης τον Β, στη δεξιά πλευρά του οχήματος και τον C, στην αριστερή πλευρά του. Ο αισθητήρας φωτός βρίσκεται εμπρός και δεξιά του οχήματος και είναι τοποθετημένος με τρόπο τέτοιο ώστε η κηλίδα του φωτός που εκπέμπει να βρίσκεται κατά το ήμισυ στο μαύρο και κατά το ήμισυ στο λευκό χρώμα λαμβάνοντας έτσι μία τιμή στο εύρος 40-50 ανάλογα με την ποιότητα του υλικού που αντανακλά το φως.



Εικόνα 12: Ακολουθητής Γραμμής

Έτσι, ξεκινάμε με τη βασική διάταξη ενός ρομπότ που θα ήταν κατάλληλη για την ακολούθηση γραμμής. Στο σχήμα μας υπάρχει ένα απλοποιημένο σχέδιο κάτοψης του ρομπότ με όλες τις λεπτομέρειες που χρειαζόμαστε. Το αυτόνομο όχημα είναι ένα ρομπότ διαφορικής κατευθύνσεως με δύο μοτέρ, το καθένα συνδεδεμένο με έναν από τους τροχούς B και C. Το ρομπότ έχει έναν αισθητήρα φωτός τοποθετημένο στο μπροστινό μέρος που δείχνει προς τα κάτω, ώστε να μην βλέπει παρά την επιφάνεια κίνησης του. Ο κόκκινος κύκλος αντιπροσωπεύει την κηλίδα φωτός που εκπέμπει ο αισθητήρας και ανακλάται από τη επιφάνεια στην οποία το αυτόνομο όχημα κινείται. Με άλλα λόγια είναι η περιοχή που ο αισθητήρας φωτός μπορεί πραγματικά να «δει». Το υπόλοιπο ρομπότ είναι το μεγάλο ορθογώνιο με βέλος. Το βέλος απλά συμβολίζει την φορά κίνησης του αυτόνομου οχήματος.

Ο στόχος μας είναι να εξασφαλίσουμε ότι το αυτόνομο όχημα όχι μόνο θα ακολουθήσει την μαύρη γραμμή αλλά θα το κάνει αυτό χωρίς ταλάντωση και με υψηλή ταχύτητα. Μια κινητή συσκευή που μπορεί να ακολουθήσει μια γραμμή εμφανίζει όλα τα χαρακτηριστικά ενός πραγματικού αυτόνομου οχήματος. Χρησιμοποιεί αισθητήρα για να συλλέξει πληροφορίες σχετικά με τον κόσμο γύρω της και αλλάζει τη συμπεριφορά της ανάλογα με αυτές τις πληροφορίες.

Οι ακολουθητές γραμμών μπορούν να κατασκευαστούν με έναν ή περισσότερους αισθητήρες φωτός. Βέβαια όσο αυξάνει το πλήθος των αισθητήρων τόσο αυξάνει το κόστος της κατασκευής και η αλγοριθμική πολυπλοκότητα που απαιτείται για την αναγνώριση και ακολούθηση της γραμμής. Στον αντίποδα, βέβαια, όσο περισσότερους αισθητήρες φωτός διαθέτει το αυτόνομο όχημα, τόσο πιο αξιόπιστα μπορεί να ακολουθήσει μια γραμμή διότι η πληθώρα δεδομένων, που προέρχονται από τους αισθητήρες, εξασφαλίζει καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντα χώρου δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ταχείας κίνησης.

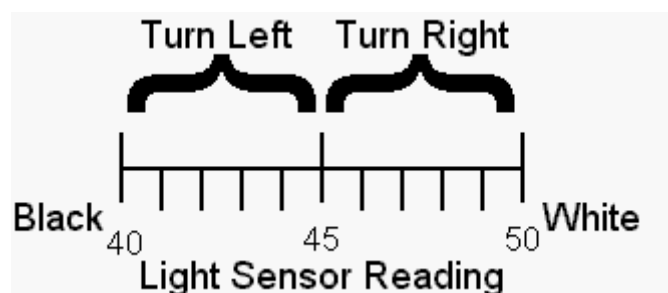
Εδώ θα περιοριστούμε σε έναν μόνο αισθητήρα φωτός Mindstorms. Ακόμη και με έναν μόνο αισθητήρα είναι δυνατή η κατασκευή ενός αυτόνομου οχήματος που μπορεί να παρακολουθεί τη γραμμή με ακρίβεια ακόμη και αν η γραμμή έχει καμπύλες, γωνίες και διασταυρώσεις μέσα σε αυτό.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ δεν ασχολούμαστε με το να ακολουθήσουμε τη μαύρη γραμμή *perse*. Αντ' αυτού, θα προσπαθήσουμε να ακολουθήσουμε την άκρη της γραμμής. Ο λόγος που επιλέγουμε να ακολουθήσουμε την άκρη της γραμμής οφείλεται στο ότι ακολουθώντας την ίδια την γραμμή (το μαύρο) τότε όταν το αυτόνομο όχημα εκτρέπεται της γραμμής και ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται το λευκό χρώμα δεν γνωρίζουμε σε ποια πλευρά της γραμμής είμαστε.

Με άλλα λόγια δεν έχει γνώση της πλευράς από την οποία έγινε η εκτροπή. Είμαστε αριστερά ή δεξιά της γραμμής; Αν ακολουθήσουμε την άκρη της γραμμής όμως, τότε μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για τον προσανατολισμό του οχήματος και συνεπώς για τη διεύθυνση της εκτροπής. Εάν ο αισθητήρας φωτός "βλέπει λευκό" χρώμα, τότε ξέρουμε ότι είναι δεξιά από την άκρη της γραμμής (και τη γραμμή). Αν "βλέπει μαύρο" χρώμα τότε ξέρουμε ότι είναι στα αριστερά της άκρης της γραμμής (και στη γραμμή). Αυτό ονομάζεται "ακολουθητής γραμμής

δεξιού χεριού" αφού ακολουθεί την δεξιά άκρη της γραμμής. Κατ' αντιστοιχία έχουμε και "ακολουθητές γραμμής αριστερού χεριού". Σε ορισμένες περιπτώσεις και για την διευκόλυνση της ομαλότητας της κίνησης ενός αυτόνομου οχήματος χρειάζεται να εναλλάσσουμε τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουμε τη γραμμή, πότε από τα δεξιά και πότε τα αριστερά.

Πρέπει επίσης να γνωρίζουμε ποιες τιμές επιστρέφει ο αισθητήρας φωτός όταν "βλέπει λευκό" και όταν "βλέπει μαύρο". Ένας τυπικός μη βαθμονομημένος αισθητήρας μπορεί να δώσει μια "λευκή" ανάγνωση 50 και μια "μαύρη" ανάγνωση 40 (μη βαθμονομημένη, σε κλίμακα 0 έως 100). Με γνώμονα αυτή την παραδοχή, μπορούμε να σχεδιάζουμε τις τιμές που λαμβάνονται από τον αισθητήρα σε μια απλή γραμμή αριθμών και έτσι να συμβολίζουμε το πώς μετατρέπουμε τις τιμές των αισθητήρων φωτός σε αλλαγές στη μετακίνηση του αυτόνομου οχήματος. Ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα παραθέτουμε τις τιμές έντασης του ανακλώμενου φωτός για το λευκό και το μαύρο χρώμα.



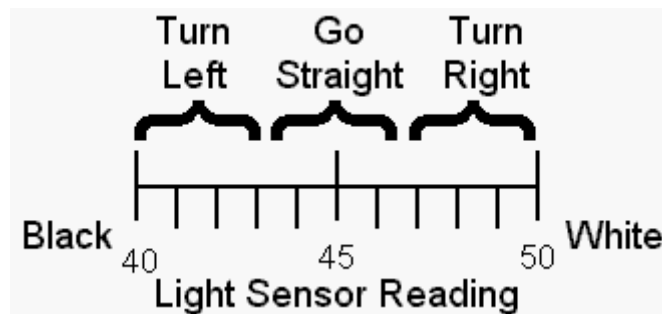
Εικόνα 13: Κλίμακα τιμών αισθητήρα για μαύρο-άσπρο

Χωρίζοντας την περιοχή σε δύο ίσα κομμάτια θεωρούμε ότι εάν το επίπεδο φωτισμού είναι μικρότερο από 45 το αυτόνομο όχημα έχει αρχίσει να εκτρέπεται προς τα αριστερά υπερβαίνοντας σταδιακά τη γραμμή οδηγό και συνεπώς είναι αναγκαία η διορθωτική κίνηση προς τα δεξιά. Αν είναι μεγαλύτερη από 45 τότε η εκτροπή έχει γίνει προς τα δεξιά και απαιτείται διορθωτική κίνηση προς τα αριστερά. Οι λεπτομέρειες των διορθωτικών κινήσεων, δηλαδή το πώς θα γίνουν οι στροφές δεν μας απασχολεί σε αυτή τη φάση αλλά επειδή οι διορθώσεις αυτές αφορούν ομαλές στροφές λίγων μοιρών είναι κατάλληλες για ακολούθηση ευθείας γραμμής.

Σε μια πορεία με πολλές καμπύλες ένα αυτόνομο όχημα, συνήθως, χρειάζεται να κάνει πιο απότομες στροφές. Για ήπιες στροφές είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν επίπεδα ισχύος έως και 70% στον γρήγορο τροχό και 50% στον αργό τροχό. Για πιο απότομες στροφές σε μια καμπύλη μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν ποσοστά ισχύος της τάξης του 45% της ολικής ισχύος για τον γρήγορο τροχό και την αδρανοποίηση ή το φρενάρισμα του αργού τροχού.

Αυτός ο τρόπος ακολούθησης γραμμής εξασφαλίζει την κίνηση πάνω σε ευθεία και μπορεί να αντιμετωπίσει ήπιες μεταβολές στην κλίση, προς τα δεξιά ή αριστερά, της διαδρομής αλλά δεν έχει

τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει απότομες καμπύλες από μόνος. Θα πρέπει το αυτόνομο όχημα να γνωρίζει πότε ακριβώς θα εκτελέσει μία απότομη στροφή. Η γνώση αυτή μπορεί μόνο να αποδοθεί σε προγραμματιστικό επίπεδο. Στην παραπάνω προσέγγιση το αυτόνομο όχημα δεν οδηγεί ποτέ ευθεία, ακόμα και αν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένο με την άκρη της γραμμής και η γραμμή είναι ευθεία. Αυτό δεν φαίνεται πολύ αποτελεσματικό. Αν λοιπόν αντί για δύο καταστάσεις (στροφή αριστερά – στροφή δεξιά) χωρίσουμε τους αριθμούς που αντιστοιχούν στις μετρήσεις του αισθητήρα σε τρεις καταστάσεις (στροφή αριστερά – ευθεία πορεία – στροφή δεξιά) τότε η αντιμετώπιση των ήπιων καμπυλών γίνεται εφικτή



Εικόνα 14: Βελτιωμένη κλίμακα τιμών για μαύρο-άσπρο

Έτσι τώρα αν η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός είναι μικρότερη του 43 θέλουμε το αυτόνομο όχημα να στρίψει αριστερά. Αν η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός είναι μεταξύ 44 και 47, θέλουμε να πάει ευθεία. Τέλος, αν η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός είναι μεγαλύτερη από 47, θέλουμε να στρίψουμε δεξιά.

Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλύτερα από την πρώτη. Τουλάχιστον τώρα το αυτόνομο όχημα κινείται απλά χωρίς να ταλαντώνει ιδιαίτερα. Όπως και με την πρώτη προσέγγιση, το είδος των στροφών που μπορεί να αντιμετωπίσει το αυτόνομο όχημα είναι συγκεκριμένο.

Είναι προφανές ότι αν η προσθήκη μία κατάστασης (πορεία εμπρός)βελτιώνει την συμπεριφορά του αυτόνομου οχήματος, ως προς την κίνηση του, τότε η προσθήκη παραπάνω καταστάσεων θα επιφέρει το ζητούμενο: ταχεία κίνηση σε οποιοδήποτε είδος γραμμής. Αυτή ακριβώς είναι η συμβολή ενός PID αλγόριθμου.

3.1.5 Το "P" στο "PID": Το ποσοστό είναι το κλειδί

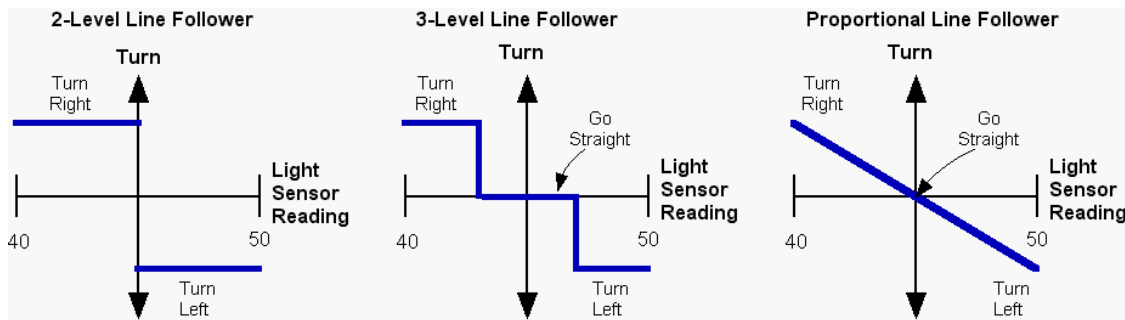
Τι θα συμβεί αν προσθέσουμε περισσότερα τμήματα στην γραμμή κλίμακας φωτός; Το πρώτο πράγμα που πρέπει να εξετάσουμε είναι αυτό που λέγεται "στροφή" με περισσότερες από τρεις διαφορετικές καταστάσεις εξ αιτίας των τιμών του ανακλώμενου φωτός;

- Στην πρώτη μας προσέγγιση το αυτόνομο όχημα μπορούσε να κάνει μόνο δύο πράγματα: να στρίψει αριστερά ή δεξιά. Οι στροφές ήταν πάντα ίδιες σε μοίρες και ακριβώς σε αντίθετες κατευθύνσεις.
- Στη δεύτερη προσέγγιση προσθέσαμε το "πορεία εμπρός" στις δύο στροφές.

Τώρα, εάν έχουμε περισσότερες από τρεις καταστάσεις, πέραν του αριστερά, ευθεία και δεξιά, μπορούμε να ορίσουμε ρητά τα εύρη που αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη στροφών (ανοιχτή στροφή, κλειστή στροφή, απότομη στροφή, αναστροφή)

Για να βοηθήσουμε στην κατανόηση του όρου "διαφορετικά είδη στροφών", θα κατασκευάσουμε εκ νέου την γραμμή των αριθμών (σχήματα Εικόνα 13, Εικόνα 14) και θα την μετατρέψουμε σε γράφημα.

Ο άξονας X (οριζόντιος άξονας) θα είναι οι τιμές της έντασης του ανακλώμενου φωτός ακριβώς όπως στις γραμμές των αριθμών. Ο άξονας Y (κάθετος άξονας) είναι ο άξονας που αναπαριστά την απαιτούμενη "στροφή".



Στα αριστερά του παραπάνω σχήματος είναι η αρχική μας ρύθμιση αυτή των δύο επιπέδων που εκφράζεται σε ένα γράφημα. Το αυτόνομο όχημα μπορεί να κάνει μόνο δύο πράγματα (που αναπαριστώνται από τις μπλε γραμμές), στρίβει δεξιά ή αριστερά και οι στροφές είναι πάντα οι ίδιες, εκτός από την κατεύθυνσή τους.

Στο κέντρο του παραπάνω σχήματος απεικονίζεται η συμπεριφορά που προκύπτει από έναν ακολουθητή γραμμής τριών επιπέδων. Το εύρος που προστέθηκε στο κέντρο είναι αυτό όπου το αυτόνομο όχημα κινείται σε ευθεία. Οι στροφές είναι οι ίδιες με τις προηγούμενες.

Στο δεξί μέρος του παραπάνω σχήματος παρουσιάζεται η συμπεριφορά που εμφανίζει ένας αναλογικός ακολουθητής γραμμής. Σε έναν αναλογικό ακολουθητή γραμμής η στροφή μεταβάλλεται ομαλά μεταξύ δύο ορίων. Εάν η τιμή της έντασης του φωτός που παρέχει ο αισθητήρας αναφέρει ότι είμαστε κοντά στη γραμμή τότε κάνουμε μια μικρή στροφή. Αν είμαστε μακριά από τη γραμμή τότε κάνουμε μια μεγάλη στροφή. Η έννοια του αναλογικού μεγέθους αποκτά πλέον μεγάλη σημασία για την κίνηση του αυτόνομου οχήματος. Αναλογική σημαίνει ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών. Για να το κάνουμε ακόμα πιο απλό, αναλογικό σημαίνει ότι ένα γράφημα των δυο μεταβλητών παράγει μια ευθεία γραμμή (όπως στο γράφημα στο δεξί άκρο του παραπάνω σχήματος).

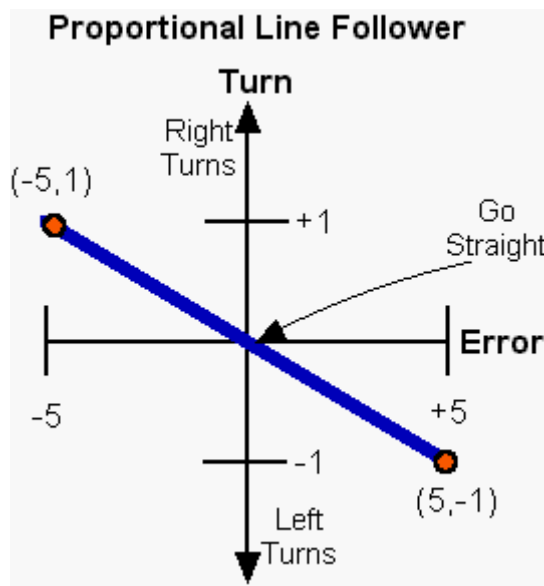
Με δεδομένο ότι η εξίσωση μιας ευθείας γραμμής είναι:

$$y = mx + b$$

Όπου y είναι η απόσταση προς τα πάνω (ή προς τα κάτω) στον άξονα Y, x η απόσταση στον άξονα X, m είναι η κλίση της γραμμής και b προσδιορίζει το σημείο στο οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα Y όταν το x είναι μηδέν. Η κλίση της γραμμής ορίζεται ως η μεταβολή στην τιμή y διαιρούμενη με την μεταβολή στην τιμή x χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε ζεύγος σημείων στη γραμμή.

Απλοποιώντας, θα μετατοπίσουμε το κέντρο της γραμμής που αναπαριστά την ένταση του ανακλώμενου φωτός (τον άξονα X) στο μηδέν. Αυτό είναι εύκολο να γίνει. Αν η τιμή 40 αντιστοιχεί

στο μαύρο και η τιμή 50 αντιστοιχεί στο λευκό τότε η τιμή 45 $((40 + 50) / 2)$ αντιστοιχεί στην ένταση του ανακλώμενου φωτός του πρέπει να διαβάζει ο αισθητήρας φωτός προκειμένου το όχημα να κινείται σε ευθεία. Ας ονομάσουμε αυτή την τιμή, το μέσο όρο μαύρου και λευκού **τιμή στόχο**. Όσο η διαφορά της εκάστοτε τιμής της έντασης του ανακλώμενου φωτός που προέρχεται από τον αισθητήρα και την τιμή στόχο είναι ίση με το μηδέν (0) το όχημα κινείται σε ευθεία γραμμή. Ονομάζουμε αυτή τη διαδικασία κανονικοποίηση της μέτρησης του αισθητήρα (light sensor value normalization). Ονομάζουμε το αποτέλεσμα της κανονικοποίησης **σφάλμα**. Όταν το σφάλμα είναι ίσο με το μηδέν έχουμε κίνηση πάνω στην ευθεία. Αν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο του μηδενός τότε έχουμε απόκλιση προς τα δεξιά ενώ όταν είναι αρνητικό έχουμε απόκλιση προς τα αριστερά. Η απόλυτη τιμή του σφάλματος μας δείχνει το μέγεθος της απόκλισης, δεδομένο που σε όλες τις προσεγγίσεις που έχουμε μέχρι τώρα εξετάσει δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί. Έτσι, εάν η τιμή της έντασης του ανακλώμενου του φωτός είναι 47, αφαιρούμε 45 και λάβουμε ένα σφάλμα ίσο με 2. Το σφάλμα μας λέει πόσο μακριά είναι η άκρη της γραμμής. Εάν ο αισθητήρας φωτός βρίσκεται ακριβώς στην άκρη της γραμμής, το σφάλμα είναι μηδενικό αφού η τιμή του φωτός είναι 45 και αφαιρούμε 45 από όλες τις αναγνώσεις μας. Αν ο αισθητήρας είναι εξ ολοκλήρου στο λευκό, το σφάλμα μας είναι +5. Μέσα στο μαύρο το σφάλμα είναι -5



Εικόνα 15: Γραφική αναπαράσταση της κανονικοποίησης

Στην παραπάνω γραφική παράσταση μετατοπίσαμε τον άξονα μετατρέποντάς τον σε κλίμακα σφάλματος. Δεδομένου ότι η γραμμή τώρα διασχίζει τον άξονα Y στο μηδέν σημαίνει ότι το b είναι μηδέν και η εξίσωση για τη γραμμή είναι λίγο πιο απλή:

$$y = mx$$

Κάνοντας αναφορά στο σύστημα αξόνων του παραπάνω σχήματος μπορούμε να εκφράσουμε την εξίσωση της ευθείας με όρους κίνησης του αυτόνομου οχήματος, δηλαδή:

$$\text{Turn} = m * \text{error}$$

όπου:

Turn: η διόρθωση που απαιτείται για την σύγκλιση του οχήματος στη γραμμή,

m: η κλίση της γραμμής και

error: το σφάλμα.

Δεν έχουμε καθορίσει ακόμα τη σημασιολογία του άξονα των στροφών, γι' αυτό τώρα θα πούμε ότι οι στροφές κυμαίνονται από το -1 (απότομη στροφή προς τα αριστερά) στο +1 (απότομη στροφή προς τα δεξιά) και η τιμή 0 αντιπροσωπεύει την ευθεία κίνηση προς τα εμπρός. Η κλίση της γραμμής στο παραπάνω γράφημα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα δύο σημεία που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα (οποιαδήποτε δύο σημεία στη γραμμή θα λειτουργήσουν). Άρα:

$$\text{κλίση} = m = (\text{μεταβολή του } y) / (\text{μεταβολή του } x) = (1 - (-1)) / (-5 - 5) = 2 / -10 = -0.2$$

για τα συγκεκριμένα δεδομένα που παρουσιάζονται στο σχήμα (Εικόνα 15)

Η κλίση είναι μια σταθερά αναλογικότητας και είναι ο παράγοντας που πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το **σφάλμα** (τιμή x) για να μετατραπεί σε τιμή στροφής **Turn** (y). Αυτό είναι ένα σημαντικό πράγμα που πρέπει να θυμόμαστε.

Η "κλίση" έχει αρκετά διαφορετικά ονόματα που όλα σημαίνουν το ίδιο πράγμα, τουλάχιστον σε αυτό το πλαίσιο. Στη βιβλιογραφία του PID, οι κλίσεις (σταθερές αναλογικότητας, m στην εξίσωση της γραμμής) ονομάζονται "K" (Το σύμβολο K προέρχεται από την λάθος γραφή της λέξης constant-σταθερά). Διάφορα Ks εμφανίζονται σε όλη τη βιβλιογραφία PID και είναι πολύ σημαντικά. Μπορούμε να φανταστούμε ένα συντελεστή K (ή m ή κλίση ή αναλογικότητα) ως ένα συντελεστή μετατροπής. Χρησιμοποιούμε το K για να μετατρέψουμε έναν αριθμό που σημαίνει ένα πράγμα (τιμές έντασης ανακλώμενου φωτός ή σφάλμα στην περίπτωση μας) σε κάτι άλλο όπως η στροφή. Αυτό είναι το μόνο που κάνει ένα K. Πολύ απλό και πολύ ισχυρό.

Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτά τα νέα ονόματα για τις μεταβλητές μας, η εξίσωση της γραμμής γίνεται:

$$\text{Turn} = K * (\text{error})$$

Με άλλα λόγια "παίρνουμε το λάθος και το πολλαπλασιάζουμε με την σταθερά αναλογικότητας K για να πάρουμε την απαιτούμενη στροφή. Η τιμή Turn είναι η έξοδος του ελεγκτή μας P και ονομάζεται "P term", αφού η παραπάνω εξίσωση αποδίδει τιμές ενός αναλογικού ελεγκτή

Παρατηρούμε ότι στο τελευταίο γράφημα (Εικόνα 15) η γραμμή δεν εκτείνεται εκτός του εύρους σφάλματος από -5 έως +5. Εκτός από την περιοχή από -5 έως +5 δεν μπορούμε να πούμε πόσο μακριά είναι ο αισθητήρας από τη γραμμή. Όλα τα "λευκά" εμφανίζονται ίδια αφού ο αισθητήρας δεν μπορεί να διαβάσει καθόλου μαύρο χρώμα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ορίσαμε αυτό το εύρος αυθαίρετα, το απαιτούμενο εύρος θα καθοριστεί από τη ρύθμιση του αισθητήρα φωτός μέσω της βαθμονόμησης του, τα χρώματα της πορείας που πρέπει να ακολουθηθεί (χρώμα γραμμής – χρώμα δαπέδου) κλπ. Όταν ο αισθητήρας φωτός απομακρυνθεί πολύ μακριά από την άκρη της γραμμής, αρχίζει να δίνει μια συνεχή ανάγνωση, δηλ. δεν είναι πλέον ανάλογη με το σφάλμα.

Μπορούμε μόνο να κρίνουμε πόσο μακριά είναι ο αισθητήρας από την άκρη της γραμμής όταν ο αισθητήρας είναι στην πραγματικότητα αρκετά κοντά της. Σε αυτή τη στενή περιοχή (σχετικά μικρή απόκλιση από την άκρη της γραμμής), η ένδειξη του αισθητήρα φωτός είναι ανάλογη προς την απόσταση. Επομένως, ο αισθητήρας μας έχει ένα περιορισμένο εύρος απόκλισης από την άκρη της γραμμής μέσα στο οποίο έχει τη δυνατότητα να παρέχει αναλογικές πληροφορίες.

Εκτός αυτού του εύρους, μας λείπει η σωστή κατεύθυνση αλλά το μέγεθος της απόκλισης είναι λάθος. Η ένδειξη του αισθητήρα φωτός ή ένδειξη **error**, είναι μικρότερη απ' ό,τι θα όφειλε να είναι και δεν παρέχει αρκετή πληροφορία για τη γωνία στρέψης που απαιτείται για τη διόρθωση τους σφάλματος

Στη σχετική με τους ελεγκτές PID βιβλιογραφία, η περιοχή στην οποία ο αισθητήρας δίνει μια αναλογική απόκριση ονομάζεται "αναλογικό εύρος". Το αναλογικό εύρος είναι μια άλλη πολύ σημαντική έννοια στο χώρο των ελεγκτών PID. Στον ακολουθητή γραμμής του παραδείγματος μας το αναλογικό εύρος για την ένταση των τιμών ανακλώμενου φωτός του αισθητήρα φωτός είναι 40 έως 50, ενώ για το σφάλμα είναι -5 έως +5. Οι κινητήρες μας έχουν επίσης αναλογικό εύρος, από -100 (πλήρη ισχύ προς τα πίσω) έως +100 (πλήρη ισχύ προς τα εμπρός). Τί, όμως, σημαίνει αναλογικό εύρος στην πράξη και συγκεκριμένα στην ακολουθήση γραμμής;

(1) Είναι θεμιτό το αναλογικό εύρος να είναι όσο το δυνατόν ευρύτερο. Η αναλογική περιοχή του αισθητήρα φωτός μας είναι πολύ μικρή, δηλαδή ο αισθητήρας πρέπει να είναι πολύ κοντά στην άκρη της γραμμής για να πάρει αναλογικές πληροφορίες. Το πόσο ακριβώς μεγάλο είναι το εύρος εξαρτάται κυρίως από την απόσταση του αισθητήρα από την επιφάνεια κίνησης. Αν ο αισθητήρας είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια, ας πούμε 0,16 εκ., τότε ο αισθητήρας βλέπει μία πολύ μικρή κυκλική περιοχή στην επιφάνεια κίνησης. Μία μικρή μετακίνηση του αισθητήρα φωτός προς τα πλάγια θα μεταβάλλει το σφάλμα από -5 σε +5, που είναι όλη η διαδρομή μέσα στην αναλογική περιοχή που ορίζεται το σφάλμα. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο αισθητήρας αποκτά "όραση σήραγγας" καθώς μπορεί να δει μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα της επιφάνειας κίνησης. Ο αισθητήρας πρέπει να είναι πολύ κοντά στην άκρη της γραμμής για να πάρει μια ανάγνωση που δεν είναι "λευκό" ή "μαύρο". Εάν το ύψος του αισθητήρα από την επιφάνεια κίνησης αυξηθεί τότε βλέπει μια μεγαλύτερη κυκλική περιοχή στην επιφάνεια κίνησης. Σε ύψος περίπου 1,27 εκ. ο αισθητήρας φωτός φαίνεται να κοιτάζει μια κυκλική επιφάνεια στο επίπεδο κίνησης του οχήματος περίπου ίση με 1,27εκ. Με την αύξηση του ύψους του αισθητήρα το αναλογικό εύρος είναι πολύ μεγαλύτερο, αφού ο αισθητήρας φωτός χρειάζεται μόνο να παραμείνει σε απόσταση +/- 1,27εκ. από την άκρη της γραμμής για να διατηρήσει μια αναλογική έξοδο. Δυστυχώς, υπάρχουν δύο μειονεκτήματα σε έναν αισθητήρα φωτός που έχει τοποθετηθεί σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια κίνησης.

Κατ' αρχάς, ένας αισθητήρας τοποθετημένος σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια κίνησης "βλέπει" και ανταποκρίνεται, στον φωτισμό του περιβάλλοντος. Ο φωτισμός του περιβάλλοντος χώρου επηρεάζει πολύ περισσότερο έναν αισθητήρα που έχει τοποθετηθεί σε μεγάλη απόσταση από την επιφάνεια κίνησης απ' ό,τι έναν αισθητήρα που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια κίνησης.

Επιπρόσθετα, ένα αισθητήρας που έχει τοποθετηθεί σε μεγάλη απόσταση από την επιφάνεια κίνησης, δεν ξεχωρίζει διακριτά τις τιμές μαύρου και λευκού με αποτέλεσμα να συγχέει τα δύο

χρώματα σε αντίθεση πάντα από έναν χαμηλά τοποθετημένο αισθητήρα. Σε μια αρκετά μεγάλη απόσταση μαύρο και άσπρο θα δώσει την ίδια τιμή.

(2) Εκτός του αναλογικού εύρους, ο ελεγκτής θα ανταποκριθεί διορθωτικά προς τη σωστή κατεύθυνση, αλλά αυτή η διόρθωση που θα έχει δεν θα είναι αρκετή. Η αναλογική ανταπόκριση του ελεγκτή περιορίζεται από το αναλογικό εύρος.

3.1.6 Από το P σε πραγματικά επίπεδα ισχύος κινητήρα

Τα ερωτήματα που πλέον δημιουργούνται είναι:

- Πώς μπορούμε να υλοποιήσουμε τις στροφές;
- Ποια θα είναι τα πραγματικά επίπεδα ισχύος κινητήρα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε;

Ένας τρόπος για να πραγματοποιηθούν οι στροφές είναι να οριστεί ένα αποδεκτό "επίπεδο επιθυμητής ισχύος", το οποίο και ονομάζουμε "Tr". Tr είναι το επίπεδο ισχύος και των δύο κινητήρων, όταν το αυτόνομο όχημα υποτίθεται ότι πηγαίνει ευθεία, πράγμα που κάνει όταν το σφάλμα είναι ίσο με 0. Όταν το σφάλμα δεν είναι μηδέν, χρησιμοποιούμε την εξίσωση $Turn = K * (\text{σφάλμα})$ για να υπολογίσουμε τον τρόπο αλλαγής των επιπέδων ισχύος για τους δύο κινητήρες. Ένας κινητήρας θα πάρει ένα επίπεδο ισχύος $Tr + Turn$, ο άλλος κινητήρας θα πάρει ένα επίπεδο ισχύος $Tr - Turn$. Σημειώστε ότι επειδή το σφάλμα μας είναι -5 έως +5 σημαίνει ότι η στροφή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική που αντιστοιχεί σε στροφές σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αποδεικνύεται ότι αυτό ακριβώς θέλουμε, αφού αυτόματα θα θέσει τον σωστό κινητήρα ως τον γρήγορο κινητήρα και τον άλλο ως τον αργό κινητήρα. Ένας κινητήρας (υποθέτουμε ότι είναι ο κινητήρας στα αριστερά του αυτόνομου οχήματος συνδεδεμένο στη θύρα C) θα πάρει πάντα την τιμή $Tr + Turn$ καθώς είναι το επίπεδο ισχύος του. Ο άλλος κινητήρας (δεξιά πλευρά του αυτόνομου οχήματος, θύρα B) θα πάρει πάντα $Tr - Turn$ όπως είναι το επίπεδο ισχύος του. Εάν το σφάλμα είναι θετικό, τότε το $Turn$ είναι θετικό και το $Tr + Turn$ είναι μεγαλύτερο από το Tr και ο αριστερός κινητήρας επιταχύνεται ενώ ο δεξιός κινητήρας επιβραδύνεται. Εάν το σφάλμα αλλάξει και υποχωρήσει αρνητικά (δηλαδή έχουμε περάσει πάνω από την άκρη της γραμμής και βλέπουμε μαύρο), τότε το $Tr + Turn$ είναι τώρα μικρότερο από το Tr και ο αριστερός κινητήρας επιβραδύνεται και ο δεξιός κινητήρας επιταχύνεται από το $Tr - Turn$ που δίνει τιμή μεγαλύτερη από την Tr .

3.1.7 Ψευδοκώδικας για έναν ελεγκτή P

Πρώτα πρέπει να μετρήσουμε τις τιμές που επιστρέφει ο αισθητήρας φωτός για το λευκό και το μαύρο. Από αυτούς τους δύο αριθμούς μπορούμε να υπολογίσουμε την μετατόπιση, δηλαδή, πόσο να αφαιρέσουμε από μια πρώτη τιμή φωτός για να την μετατρέψουμε σε μια τιμή σφάλματος. Η μετατόπιση είναι μόνο ο μέσος όρος των λευκών και μαύρων μετρήσεων. Για απλότητα θα υποθέσουμε ότι η μετατόπιση έχει ήδη μετρηθεί και αποθηκευτεί σε μια μεταβλητή που ονομάζεται offset.

Θα χρειαστεί επίσης μια θέση αποθήκευσης για τη σταθερή K, θα την ονομάσουμε Kp. Και, μια πρώτη εικασία για το ποιά θα πρέπει να είναι η τιμή του Kp. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να καθορίσουμε αυτή την πρώτη τιμή Kp. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία τυχαία τιμή και να την οριστικοποιήσουμε μέσω της διαδικασίας δοκιμής και λάθος (trialanderror). Εναλλακτικά μπορούμε να υπολογίσουμε μια τιμή με βάση τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και του αυτόνομου οχήματος. Θα κάνουμε το τελευταίο. Θα χρησιμοποιήσουμε Tr (ισχύ στόχου) 70, όταν το σφάλμα είναι μηδέν,

και οι δύο κινητήρες θα λειτουργούν σε επίπεδο ισχύος 70. Το σφάλμα κυμαίνεται από -5 έως +5. Θα υποθέσουμε ότι θέλουμε τη δύναμη να πάει από 70 σε 0 όταν το λάθος πηγαίνει από 0 έως -5. Αυτό σημαίνει ότι το K_p είναι:

$$K_p = (0 - 70) / (-5 - 0) = 14.$$

Θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή $K_p = 14$ για να μετατρέψουμε μια τιμή σφάλματος σε μια τιμή στροφής. Με λόγια η μετατροπή μας είναι "για κάθε αλλαγή μονάδας στο σφάλμα θα αυξήσουμε την ισχύ ενός κινητήρα κατά 14". Η ισχύς του άλλου κινητήρα μειώνεται κατά 14

Έτσι, στον ψευδοκώδικα

```
Kp = 10
Initializeourthreevariables
offset = 45
Tp = 50
Loop forever
    LightValue = read light sensor
    error = LightValue - offset
    Turn = Kp * error
    powerB = Tp + Turn
    powerC = Tp - Turn
end loop forever
```

Υπάρχουν δύο "ρυθμιζόμενες παράμετροι" και μία σταθερά σε αυτόν τον ελεγκτή P. Η σταθερά είναι η τιμή μετατόπισης (ο μέσος όρος των μετρήσεων αισθητήρα λευκού και μαύρου φωτός). Επίσης χρειάζεται μια τιμή για το μαύρο και μία τιμή για το άσπρο. Η διαφορά των δύο αυτών τιμών διαιρούμενη δια δύο μας δίνει τον μέσο όρο, τιμή που δίνουμε στο πρόγραμμα ελέγχου P στη μεταβλητή μετατόπισης.

Η τιμή K_p και η τιμή στόχου T_p είναι οι ρυθμιζόμενες παράμετροι. Μια σταθερή παράμετρος πρέπει να προσδιορίζεται από δοκιμή και σφάλμα. Το K_p ελέγχει πόσο γρήγορα ο ελεγκτής θα προσπαθήσει να επιστρέψει στην άκρη της γραμμής όταν έχει απομακρυνθεί από αυτή. Το T_p ελέγχει πόσο γρήγορα το αυτόνομο όχημα κινείται κατά μήκος της γραμμής.

Αν η γραμμή έχει καμπύλες, ιδιαίτερα αιχμηρές, θα υπάρχει μια μέγιστη τιμή T_p που θα λειτουργήσει. Αν το T_p είναι μεγαλύτερο από αυτό το μέγιστο δεν θα έχει σημασία ποια θα είναι η τιμή του K_p , το αυτόνομο όχημα θα χάσει τη γραμμή όταν συναντά μια καμπύλη επειδή κινείται πολύ γρήγορα. Αν το T_p είναι πραγματικά μικρό, τότε σχεδόν οποιαδήποτε τιμή K_p θα λειτουργήσει αφού το αυτόνομο όχημα θα κινείται πολύ αργά. Ο στόχος είναι το αυτόνομο όχημα να κινηθεί όσο πιο γρήγορα γίνεται, ενώ παράλληλα να είναι σε θέση να ακολουθήσει τη γραμμή ενδιαφέροντος.

Υπολογίσαμε μια αρχική τιμή για το K_p ίση με 14. Θα αρχικοποιήσουμε το T_p σε μία τιμή χαμηλότερη από ό, τι προτείνεται παραπάνω, το 45. Κάθε φορά που το όχημα χάνει την γραμμή πρέπει αυξάνεται το K_p . Αν η εκτροπή από τη γραμμή γίνεται επειδή το αυτόνομο όχημα ταλαντώνεται με μεγάλο πλάτος ταλάντωσης τότε πρέπει να μειωθεί το K_p . Εάν το αυτόνομο όχημα φαίνεται να ακολουθεί αρκετά καλά την γραμμή τότε μπορούμε να αυξήσουμε το T_p και να παρατηρήσουμε αν το αυτόνομο

όχημα θα συνεχίσει να κινείται ακολουθώντας τη γραμμή με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για κάθε νέο Tr θα χρειαστεί να καθοριστεί ένα νέο Kr, αν και το Kr συνήθως δεν θα έχει πολύ μεγάλες μεταβολές.

Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω, η διαδικασία ακολούθησης μιας ευθείας γραμμής είναι συνήθως αρκετά εύκολη. Η ακολούθηση, όμως, μίας γραμμής με ομαλές καμπύλες είναι λίγο πιο δύσκολη. Ακόμα πιο δύσκολη είναι η ακολούθηση μίας πορείας η οποία έχει απότομες καμπές. Όταν το αυτόνομο όχημα κινείται αρκετά αργά, τότε μπορεί να ακολουθήσει σχεδόν οποιαδήποτε γραμμή, ακόμη και με έναν πολύ βασικό ελεγκτή. Θέλουμε να ακολουθήσουμε καλά τη γραμμή, με ικανοποιητική ταχύτητα και την δυνατότητα να διαχειριζόμαστε ομαλές καμπές. Οι γραμμές με απότομες γωνίες συνήθως απαιτούν ή πιο εξειδικευμένους ακολουθητές γραμμής ή πολύ χαμηλές ταχύτητες κίνησης ή την χρήση δεδομένων οδομετρίας). Επιπρόσθετα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γραμμής που ορίζει την πορεία που πρέπει να ακολουθήσουμε (πάχος γραμμής, χρώμα γραμμής, κ.α.) να απαιτείται διαφορετική παραμετροποίηση του ελεγκτή. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση διαφορετικού, από κατασκευαστικής πλευράς, αυτόνομου οχήματος. Με άλλα λόγια, ένας ελεγκτής P (ή ένας ελεγκτής PID) παραμετροποιείται για ένα συγκεκριμένο είδος γραμμής και ένα συγκεκριμένο αυτόνομο όχημα και δεν θα λειτουργήσει αναγκαστικά καλά για άλλες γραμμές ή άλλα αυτόνομα. Ο αλγόριθμος και ο αντίστοιχος κώδικας θα λειτουργήσει για πολλά αυτόνομα οχήματα, αλλά οι παράμετροι, Kr, Tr και offset, πρέπει να ρυθμιστούν για κάθε αυτόνομο όχημα και κάθε εφαρμογή ξεχωριστά.

Κατά την παραμετροποίηση του ελεγκτή P η τιμή της Kr θα πρέπει να τεθεί μετά από πειραματισμό ξεκινώντας από μία κατά κάποιο τρόπο αυθαίρετη τιμή, π.χ. 1 και αυξάνοντας ή μειώνοντας την τιμή αυτή ανάλογο με την συμπεριφορά του αυτόνομου οχήματος κατά την κίνηση του πάνω στην πορεία. Το αναμενόμενο εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η Kr εξαρτάται από το τί ακριβώς κάνει ο ελεγκτής P. Πόσο μεγάλο είναι το εύρος τιμών εισόδου και πόσο μεγάλο είναι το εύρος των τιμών εξόδου; Για τον ελεγκτή P της γραμμής μας η περιοχή εισόδου είναι περίπου 5 μονάδες φωτός και η περιοχή εξόδου είναι 100 μονάδες ισχύος, επομένως φαίνεται πιθανό ότι το Kr θα βρίσκεται κοντά στα $100/5 = 20$. Σε ορισμένες περιπτώσεις το αναμενόμενο Kr δεν θα είναι τόσο μεγάλο. Τι συμβαίνει όμως όταν το αναμενόμενο Kr είναι ένα; Για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς και δεδομένου ότι η επεξεργασία ακεραίων αριθμών είναι πιο γρήγορη από ότι αυτή των δεκαδικών αριθμών στο EV3 θα ακολουθήσουμε μία πολιτική αναγωγής των τιμών όλων των παραμέτρων. Έτσι μία τιμή Κρίση με 1,3 θα την αναχθεί στο 130. Δηλαδή, κάθε δυνατή τιμή θα αυξηθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους, έτσι η τιμή 14 θα γίνει 1400 και η τιμή 140 θα γίνει 14000 αν μια τέτοια τιμή ήταν επιτρεπτή για το Kr

Όμως η αναγωγή αυτή θα οδηγήσει σε τιμές εκτός εύρους στην έξοδο του ελεγκτή. Με δεδομένο ότι οι κινητήρες του EV3 δέχονται τιμές στο εύρος -100 έως 100 με την τιμή 0 να συμβολίζει της ακινησία, πρέπει να ανάγουμε την έξοδο του ελεγκτή σε αυτό το εύρος τιμών. Η αναγωγή αυτή όμως είναι εύκολη αφού, μόλις υπολογίσουμε τον όρο P, θα διαιρέσουμε κατά 100 για να αφαιρέσουμε τον πολλαπλασιαστή μας.

Θυμηθείτε την εξίσωσή μας που ορίζει τον ελεγκτή P από νωρίτερα.

$$\text{Στροφή} = K_p * (\text{σφάλμα})$$

Θα πολλαπλασιάσουμε το K_p κατά 100, πράγμα που σημαίνει ότι η υπολογιζόμενη στροφή είναι 100 φορές μεγαλύτερη από ό, τι θα έπρεπε. Πριν χρησιμοποιήσουμε το $Turn$ πρέπει να το διαιρέσουμε με 100 για να το διορθώσουμε. Ο νέος και βελτιωμένος ψευδοκώδικας για έναν ελεγκτή P που χρησιμοποιείται για να ακολουθηθεί μία γραμμή είναι:

```
Kp = 1400  
offset = 45  
Tp = 70  
Loop forever  
    LightValue = read light sensor  
    error = LightValue – offset  
    Turn = Kp * error  
    Turn = Turn/100  
    powerB = Tp + Turn  
    powerC = Tp - Turn  
end loop forever
```

Σύμφωνα με τη λογική του παραπάνω αλγορίθμου, υπάρχουν δύο υπαρκτά προβλήματα. Τί θα συμβεί όταν στον κινητήρα σταλεί επίπεδο ισχύος μεγαλύτερο από 100 ή μικρότερο από -100; Αποδεικνύεται ότι ο κινητήρας αντιμετωπίζει ακριβώς τον αριθμό ως 100 ή -100. Αυτό είναι καλό για τη συμπεριφορά του κινητήρα και επομένως του οχήματος, αλλά όχι το καλύτερο πράγμα που θα συμβεί σε έναν ελεγκτή P (ή PID) όπου η έξοδος του είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από το προδιαγεγραμμένο εύρος τιμών του. Θα προτιμούσαμε πραγματικά ο ελεγκτής να μην προσπαθήσει ποτέ να ζητήσει από τους κινητήρες να κάνουν κάτι που δεν μπορούν, δεδομένου ότι η μέγιστη ισχύς στους κινητήρες Lego δεν ενδείκνυται για συνεχή χρήση, από την κατασκευάστρια εταιρεία. Εάν η ζητούμενη ισχύς δεν είναι πολύ πάνω από 100 (ή κάτω από -100), τότε πιθανόν οι κινητήρες να συμπεριφερθούν φυσιολογικά για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Εάν η ζητούμενη ισχύς είναι πολύ μεγαλύτερη από 100 (ή πολύ μικρότερη του -100), τότε συχνά σημαίνει ότι ο ελεγκτής είναι εκτός ελέγχου.

3.1.8 P Controller (συνοπτικά)

Χρησιμοποιήσαμε έναν αισθητήρα φωτός για να μετρήσουμε κάτι που προσπαθούμε να ελέγξουμε. Μετατρέψαμε τη μέτρηση σε σφάλμα. Για τον ακολουθητή γραμμών το κάναμε αυτό αφαιρώντας τον μέσο όρο των τιμών του μαύρου και του λευκού φωτός. Πολλαπλασιάζουμε το σφάλμα με παράγοντα κλιμάκωσης που ονομάζεται K_p . Το αποτέλεσμα είναι μια διόρθωση για το σύστημα. Στο παράδειγμά μας, η διόρθωση εφαρμόζεται ως αύξηση / μείωση της στάθμης ισχύος των κινητήρων. Ο συντελεστής κλιμάκωσης K_p προσδιορίζεται με τη χρήση μίας αυθαίρετης τιμής η οποία στη συνέχεια τροποποιείται μετά από δοκιμή και λάθος για να φέρει το αυτόνομο όχημα σε μία κατάσταση ισορροπίας μεταξύ ταχείας κίνησης και ταλάντωσης. Οι ελεγκτές P μπορούν να χειριστούν ένα εκπληκτικά ευρύ φάσμα προβλημάτων ελέγχου και όχι μόνο για την ακολούθηση γραμμής με ένα αυτόνομο όχημα Lego. Σε γενικές γραμμές, οι ελεγκτές P λειτουργούν πολύ καλά όταν πληρούνται οι, παρακάτω, προϋποθέσεις:

1. Ο αισθητήρας πρέπει να έχει ένα πλατύ δυναμικό εύρος (το οποίο δυστυχώς δεν ισχύει στη περίπτωση ακολούθησης γραμμής από το αυτόνομο όχημα μας).

2. Οι συσκευές που ελέγχονται (κινητήρες στην περίπτωση μας) θα πρέπει επίσης να έχουν ένα πλατύ δυναμικό εύρος, δηλαδή να έχουν ένα ευρύ φάσμα επιπέδων "ισχύος" με μεμονωμένα επίπεδα "ισχύος" που είναι κοντά μεταξύ τους (οι κινητήρες του EV3 είναι ικανοποιητικοί για την περίπτωση που εξετάζουμε).

3. Τόσο ο αισθητήρας όσο και το αντικείμενο που ελέγχεται πρέπει να ανταποκρίνονται γρήγορα. Το "γρήγορο" σε αυτή την περίπτωση είναι "πολύ πιο γρήγορα από οτιδήποτε άλλο συμβαίνει στο σύστημα". Συχνά, όταν ελέγχουμε τους κινητήρες, δεν είναι δυνατό να αποκτήσουμε "γρήγορη" ανταπόκριση, καθώς οι κινητήρες χρειάζονται χρόνο για να αντιδράσουν σε μια αλλαγή στην ισχύ (αδράνεια). Μπορεί να χρειαστούν μερικά δέκατα του δευτερολέπτου για τους κινητήρες Lego να αντιδράσουν σε μια αλλαγή στα επίπεδα ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι ενέργειες του αυτόνομου οχήματος παραμένουν πίσω από τις εντολές του ελεγκτή P. Αυτό καθιστά δύσκολο τον ακριβή έλεγχο με έναν ελεγκτή P.

3.1.9 Προσθήκη του "I" στον ελεγκτή: Ο ελεγκτής PI

Για να βελτιώσουμε την απόκριση του ελεγκτή μας P θα προσθέσουμε έναν νέο όρο στην εξίσωση. Ο όρος αυτός ονομάζεται ολοκλήρωμα, το "I" στο PID. Τα ολοκληρώματα είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των προηγμένων μαθηματικών, που έχει άμεση εφαρμογή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ), αφού μπορούν να τους προσδώσουν «μνήμη»

Το ολοκλήρωμα μπορεί να θεωρηθεί το τρέχον άθροισμα του σφάλματος. Έτσι λοιπόν, κάθε φορά που διαβάζουμε μία τιμή έντασης ανακλώμενου φωτός από τον αισθητήρα φωτός και υπολογίζουμε ένα σφάλμα, προσθέτουμε αυτό το σφάλμα σε μια μεταβλητή που θα την ονομάσουμε ολοκλήρωμα (integral).

$$\text{integral} = \text{integral} + \text{error}$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να φαίνεται λίγο περίεργη, και είναι. Δεν είναι γραμμένη ως μαθηματική δήλωση, είναι γραμμένη σε μια κοινή μορφή που χρησιμοποιείται στον προγραμματισμό για να προσθέσει μια σειρά αξιών. Μαθηματικά δεν έχει νόημα. Στη συνέχεια, ακριβώς όπως στη περίπτωση του όρου P, θα πολλαπλασιάσουμε το ολοκλήρωμα με μια σταθερά αναλογικότητας, δηλαδή μια άλλη K. Δεδομένου ότι αυτή η σταθερά αναλογικότητας αφορά το ολοκλήρωμα θα την ονομάσουμε K_i . Όπως ακριβώς και στη περίπτωση του αναλογικού όρου στον ελεγκτή, έτσι και εδώ πολλαπλασιάζουμε το ολοκλήρωμα με τη σταθερά (K_i) για να πάρουμε μια διόρθωση. Για τον ακολουθητή γραμμής που ελέγχει το αυτόνομο όχημα μας είναι μια προσθήκη στη μεταβλητή Turn.

$$\text{Turn} = K_p * (\text{error}) + K_i * (\text{integral})$$

Η παραπάνω απλουστευμένη εξίσωση είναι η βασική εξίσωση για έναν ελεγκτή PI. Η τιμή της μεταβλητής Turn είναι η διόρθωση που απαιτείται να γίνει στους κινητήρες.

Ο αναλογικός όρος είναι:

$$K_p * (\text{σφάλμα})$$

και ο όρος ολοκλήρωσης είναι

$K_i * (\text{integral})$.

Τί ακριβώς κάνει ο όρος ολοκλήρωσης στη περίπτωση μας;

Όταν το σφάλμα διατηρεί το ίδιο πρόσημο για αρκετούς βρόχους (επαναλήψεις), το ολοκλήρωμα αυξάνεται όλο και περισσότερο με άλλα λόγια η τιμή μεγαλώνει. Για παράδειγμα, αν ελέγξουμε τον αισθητήρα φωτός και υπολογίσουμε ότι το σφάλμα είναι 1, και λίγο αργότερα αν ελέγξουμε ξανά τον αισθητήρα και το σφάλμα θα είναι 2, τότε την επόμενη φορά που το σφάλμα είναι πάλι 2 το ολοκλήρωμα θα είναι $1 + 2 + 2 = 5$. Το ολοκλήρωμα είναι 5, αλλά το σφάλμα σε αυτό το συγκεκριμένο βήμα είναι μόνο το 2. Το ολοκλήρωμα μπορεί να είναι ένας πολύ βοηθητικός παράγοντας στη διόρθωση της πορείας του αυτόνομου οχήματος, αλλά συνήθως χρειάζεται λίγος χρόνος για την ολοκλήρωση του **integral** μέχρις που να αρχίσει να συμβάλλει. Μία άλλη διάσταση του όρου ολοκλήρωσης είναι ότι συμβάλλει στην απομάκρυνση μικρών σφαλμάτων. Εάν στον ανιχνευτή γραμμής μας ο αισθητήρας φωτός είναι πολύ κοντά στην άκρη της γραμμής, αλλά όχι ακριβώς πάνω της, τότε το σφάλμα θα είναι μικρό και θα χρειαστεί μόνο μια μικρή διόρθωση για να επανέλθει. Μπορούμε να διορθώσουμε αυτό το μικρό σφάλμα αλλάζοντας το K_r στον αναλογικό όρο, αλλά αυτό συχνά θα οδηγήσει ένα αυτόνομο όχημα σε ταλάντωση (ταλαντώνεται εμπρός και πίσω). Ο όρος ολοκλήρωσης είναι ιδανικός για τον καθορισμό μικρών σφαλμάτων. Δεδομένου ότι το ολοκλήρωμα προσθέτει τα σφάλματα, αρκετά, διαδοχικά, μικρά σφάλματα καθιστούν τελικά την τιμή του **integral** αρκετά μεγάλη και έτσι μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των διορθωτικών κινήσεων.

Ένας τρόπος να σκεφτούμε τον όρο ολοκλήρωσης είναι ότι είναι η "μνήμη" του ελεγκτή. Το ολοκλήρωμα είναι το σωρευτικό ιστορικό του σφάλματος και δίνει στον ελεγκτή μια μέθοδο για να διορθώνει σφάλματα που παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ένα θέμα που δεν έχουμε ακόμη εξετάσει είναι ο χρόνος. Όλα τα παραπάνω γίνονται μέσα στο χρόνο. Το ολοκλήρωμα συνεπώς δεν είναι τίποτα άλλο από το άθροισμα του σφάλματος * (Δt). Ο χρόνος Δ (dT) είναι η διαφορά του χρόνου μεταξύ της τελευταίας και της προηγούμενης, από αυτήν, μέτρησης της τιμής της έντασης του ανακλώμενου φωτός που λαμβάνουμε στον αισθητήρα.

$$\text{integral} = \text{integral} + \text{error} * (dT)$$

Επομένως κάθε φορά που προσθέτουμε στο **integral** η τιμή που πρέπει να προστεθεί είναι **error*(dT)**. Είναι αρκετά εύκολο για το αυτόνομο όχημα να μετρήσει το dT . Κάθε φορά που πραγματοποιούμε μία μέτρηση της έντασης του ανακλώμενου φωτός λαμβάνουμε παράλληλα και την τιμή ενός χρονομέτρου που έχει αρχικοποιηθεί κατά την εκκίνηση του οχήματος. Αν αφαιρέσουμε την χρονική τιμή που έγινε η τελευταία μέτρηση από την χρονική τιμή της τρέχουσας μέτρησης, έχουμε το χρόνο που έχει παρέλθει από την τελευταία ανάγνωση δηλαδή το dT . Δεδομένου ότι οι μετρήσεις ισαπέχουν χρονικά, η μια από την άλλη, κάθε φορά που τις προσθέτουμε στο ολοκλήρωμα έχουμε τον ίδιο όρο dT . Επομένως, μπορούμε να αφαιρέσουμε τον παράγοντα dT από το $\text{error} * (dT)$ και απλώς να αθροίσουμε το σφάλμα που προκύπτει από τα ζεύγη διαδοχικών μετρήσεων. Συνεπώς η εξίσωση μας γίνεται

$$\text{integral} = \text{integral} + \text{error}$$

Μόνο όταν θέλουμε να κάνουμε ένα άλλο είδος υπολογισμού με το integral τότε πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με dT. Μπορούμε να κάνουμε ακόμα περισσότερα για να αποκρύψουμε το χρονικό όριο. Ο όρος ολοκλήρωσης στην εξίσωση του ελεγκτή PI είναι $K_i * (\text{integral}) * dT$. Αλλά το K_i είναι μια παράμετρος που πρέπει να ρυθμίσουμε καλά (ακριβώς όπως το K_p), οπότε γιατί να μην αντικαταστήσουμε, το $K_i * dT$ μέρος του όρου, με ένα νέο K_i ; Το νέο K_i είναι διαφορετικό από το προηγούμενο, αλλά αφού δεν γνωρίζουμε κανένα από αυτά, δεν έχει σημασία ποιό χρησιμοποιούμε. Ανεξάρτητα από το τί το ονομάζουμε ή τί αντιπροσωπεύει, πρέπει να βρούμε τη σωστή του τιμή. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με πειραματισμό του τύπου δοκιμή και λάθος (trial and error). Έτσι έχουμε αφαιρέσει εντελώς το στοιχείο του χρόνου για τον όρο ολοκλήρωσης με τον περιορισμό ότι όλα τα βήματα, dTs, είναι ίδια (ή περίπου τα ίδια) πράγμα που μπορεί να ελεγχθεί προγραμματιστικά .

3.1.10 Το ολοκλήρωμα: η μνήμη που χρειάζεται ένας ελεγκτής

Μια τελευταία λεπτομέρεια που θα πρέπει να αναφερθεί για το ολοκλήρωμα είναι ότι το ολοκλήρωμα μπορεί να μετακινηθεί μόνο προς το μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, δεν συνεισφέρει κάτι στον ελεγκτή. Αυτό συμβαίνει όταν οι τιμές του σφάλματος που προστίθενται στο ολοκλήρωμα είναι αντίθετου προσήμου από αυτές που ήδη έχουμε αθροίσει. Για παράδειγμα, αν τα διαδοχικά σφάλματα που προκύπτουν στο βρόχο εκτέλεσης του αλγορίθμου 1,2,2,3,2,1 η τιμή του ολοκληρώματος είναι 11. Αφού το σφάλμα στη τελευταία μέτρηση είναι μόνο 1, τιμή που είναι πολύ μικρότερη από αυτή του ολοκληρώματος σε αυτό το σημείο. Ο μόνος τρόπος για το ολοκλήρωμα να κινηθεί προς το μηδέν είναι να πάρουμε μια σειρά από αρνητικά σφάλματα για να αντισταθμίσουμε την προηγούμενη σειρά θετικών σφαλμάτων για να "κατεβεί" το ολοκλήρωμα. Για παράδειγμα, εάν τα επόμενα λίγα λάθη είναι -2, -2, -3 τότε το ολοκλήρωμα θα πέσει από 11 σε 4 και θα χρειαζόταν ακόμα περισσότερα αρνητικά σφάλματα για να φτάσουμε στο μηδέν. Επιπλέον, το ολοκλήρωμα θέλει το ολικό σφάλμα να κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ θετικών και αρνητικών σφαλμάτων.

Αν συμβαίνει κάτι που θα αναγκάσει το αυτόνομο όχημα να εκτραπεί από την πορεία του προς τα αριστερά, δηλαδή αν πάψει να ακολουθεί την άκρη της γραμμής και βρεθεί στη περιοχή του μαύρου χρώματος, τότε η τιμή του όρου ολοκλήρωσης, **integral**, όχι μόνο θέλει να επιστρέψει στην άκρη της γραμμής αλλά θέλει επίσης να υπερβεί την δεξιά άκρη της κατά τόσο όσο ήταν η αρχική διαταραχή αριστερά.

Έτσι, το ολοκλήρωμα τείνει να "καταλήξει" αν υπάρχουν μεγάλα σφάλματα που παραμένουν για λίγο. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στους ελεγκτές που περιλαμβάνουν έναν όρο ολοκλήρωσης. Μερικές φορές αυτή η τάση του όρου ολοκλήρωσης, η αντίστροφη σε πλάτος υπέρβαση, δηλαδή να θέλει να υπερβεί την άκρη της γραμμής όταν προσπαθεί να διορθώσει το σφάλμα είναι ένα αρκετά μεγάλο πρόβλημα το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με προγραμματιστικό τρόπο. Όταν η «κατάληξη» της ολοκλήρωσης αρχίζει να αποτελεί πρόβλημα, τότε υπάρχουν δύο συνήθεις λύσεις:

(1) μηδενισμός του ολοκληρώματος, κάθε φορά που το σφάλμα είναι ίσο με μηδέν ή κάθε φορά που αλλάζει το πρόσημο του σφάλματος.

(2) "Υποβιβασμός" του ολοκληρώματος πολλαπλασιάζοντας το συσσωρευμένο ολοκλήρωμα με συντελεστή μικρότερο από την μονάδα κατά τον υπολογισμό της νέας τιμής του. Για παράδειγμα:

$$\text{integral} = (2/3) * \text{integral} + \text{error}$$

Σε κάθε επανάληψη του βρόχου μειώνεται η προηγούμενη ολοκληρωμένη τιμή κατά 1/3. Εάν σκεφτείτε τον όρο ολοκλήρωσης ως «μνήμη» των ελεγκτών, τότε αυτή η απόσβεση τους αναγκάζει να ξεχάσουν πράγματα που συνέβησαν πριν από «πολύ» καιρό.

3.1.11 Ψευδοκώδικας για τον ελεγκτή PI

Για να προσθέσουμε τον όρο ολοκλήρωσης στον ελεγκτή, πρέπει να προσθέσουμε μια νέα μεταβλητή για το K_i και μία για το ίδιο το ολοκλήρωμα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι πολλαπλασιάζουμε τα K_s που έχουμε με 100 για να εξασφαλίσουμε αριθμητική με ακέραιους αριθμούς που, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, είναι ταχύτερη από αυτή των δεκαδικών αριθμών στο EV3.

$K_p = 1000$

$K_i = 100$

offset = 45

$T_p = 50$

integral = 0

Loop forever

 LightValue = read light sensor

 error = LightValue - offset

integral = integral + error

 Turn = $K_p * \text{error} + K_i * \text{integral}$

 Turn = Turn/100

 powerA = $T_p + \text{Turn}$

 powerC = $T_p - \text{Turn}$

end loop forever

3.1.12 Προσθήκη "D" στον ελεγκτή: Ο πλήρης ελεγκτής PID, μια προσπάθεια για «πρόγνωση»!

Ο ελεγκτής μας τώρα περιέχει ένα αναλογικό (P) όρο που προσπαθεί να διορθώσει το τρέχον σφάλμα και έναν όρο ολοκλήρωσης (I) που προσπαθεί να διορθώσει παρελθόντα σφάλματα. Αυτό που πραγματικά θα θέλαμε είναι να μπορέσουμε να δούμε το «μέλλον». Με άλλα λόγια να ενσωματώσουμε στον ελεγκτή ένα τρόπο να κοιτάξει μπροστά στο χρόνο και να προσπαθήσει να προβλέψει το σφάλμα, που πρέπει να διορθώσει, όταν ακόμα αυτό δεν έχει συμβεί.

Η λύση, σ' αυτό το πρόβλημα, μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας ολοκληρωτικό λογισμό και ονομάζεται παράγωγος (**derivative**). Τώρα, υπάρχει το "D" στο PID. Όπως στο ολοκλήρωμα, έτσι και στην παράγωγο τα μαθηματικά είναι πολύπλοκα, αλλά, ευτυχώς για εμάς, αυτό που χρειαζόμαστε για το PID είναι αρκετά απλό.

Μπορούμε να εξετάσουμε το μέλλον υποθέτοντας ότι η επόμενη αλλαγή στο σφάλμα είναι η ίδια με την τελευταία αλλαγή, δηλαδή οι τιμές των δύο διαφορετικών σφαλμάτων ταυτίζονται. Αυτό σημαίνει ότι το επόμενο σφάλμα αναμένεται να είναι το τρέχον σφάλμα συν τη μεταβολή (Δ) του σφάλματος μεταξύ των δύο προηγούμενων δειγμάτων του αισθητήρα. Η αλλαγή στο σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων ονομάζεται παράγωγος. Η παράγωγος μπορεί να θεωρηθεί ίδια με την κλίση μιας γραμμής.

Αυτό μπορεί να ακούγεται λίγο περίπλοκο για τον υπολογισμό, αλλά στη πράξη δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα. Μια δειγματοληπτική σειρά δεδομένων θα βοηθήσει να δούμε πώς λειτουργεί.

Ας υποθέσουμε ότι το τρέχον σφάλμα είναι 2 και το σφάλμα πριν από αυτό ήταν 5. Ποιά θα είναι η τιμή του επόμενου σφάλματος;

Ποιά, επομένως, θα είναι η τιμή του νέου σφάλματος; Η αλλαγή στο σφάλμα είναι η παράγωγος που προκύπτει από την παρακάτω πράξη:

$$\text{(τρέχον σφάλμα)} - \text{(προηγούμενο σφάλμα)}$$

που για τους αριθμούς μας είναι $2 - 5 = -3$. Επομένως, η τρέχουσα τιμή που προσδιορίζει την παράγωγο (η επόμενη αλλαγή στο σφάλμα) είναι -3 .

Για να χρησιμοποιήσουμε την παράγωγο προκειμένου να προβλέψουμε το επόμενο σφάλμα που θα προκύψει, χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω πράξη :

$$\text{(επόμενο σφάλμα)} = \text{(τρέχον σφάλμα)} + \text{(τιμή τρέχουσας παραγώγου)}$$

που για τους αριθμούς μας είναι $2 + (-3) = -1$. Προβλέπουμε λοιπόν ότι το επόμενο σφάλμα θα είναι -1 .

Στην πραγματικότητα δεν μπορούμε να προβλέψουμε το επόμενο σφάλμα. Μπορούμε όμως, προσεγγιστικά, απλά να χρησιμοποιήσουμε την παράγωγο απευθείας στην εξίσωση του ελεγκτή.

Ο όρος D, όπως και ο όρος I, θα πρέπει στην πραγματικότητα να περιλαμβάνει ένα στοιχείο χρόνου, έτσι ο "επίσημος" όρος D γίνεται :

$$Kd(\text{derivative})/(dT)$$

Όπως και με τους αναλογικούς έτσι και στους ολοκληρωτικούς όρους, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με μια σταθερά. Δεδομένου ότι αυτή είναι η σταθερά που αφορά στη παράγωγο την ονομάζουμε Kd . Παρατηρούμε, επίσης, ότι για τον όρο που αφορά στην παράγωγο διαιρούμε με dT ενώ στον όρο ολοκλήρωσης πολλαπλασιάζουμε με dT . Το κλάσμα Kd / dT είναι μια σταθερά εάν dT είναι το ίδιο για κάθε επανάληψη του βρόχου. Έτσι μπορούμε να αντικαταστήσουμε το Kd / dT με ένα άλλο Kd . Δεδομένου ότι αυτό το K , όπως και τα προηγούμενα Ks , είναι άγνωστο και πρέπει να προσδιοριστεί με δοκιμή και σφάλμα, δεν έχει σημασία αν είναι Kd / dT ή απλά μια νέα τιμή για Kd .

Μπορούμε, τώρα, να γράψουμε την πλήρη εξίσωση για έναν ελεγκτή PID:

$$\text{Turn} = Kp * (\text{error}) + Ki * (\text{integral}) + Kd * (\text{derivative})$$

Είναι αρκετά προφανές ότι «η πρόβλεψη του μέλλοντος» θα ήταν ένα πρακτικό πράγμα που θα μπορούσε να γίνει αλλά πώς ακριβώς βοηθά και πόσο ακριβής είναι η πρόβλεψη;

Αν το τρέχον σφάλμα είναι χειρότερο από το προηγούμενο σφάλμα τότε ο όρος D προσπαθεί να διορθώσει το σφάλμα. Εάν το τρέχον σφάλμα είναι καλύτερο από το προηγούμενο σφάλμα τότε ο όρος D προσπαθεί να σταματήσει τον ελεγκτή από τη διόρθωση του σφάλματος. Η δεύτερη περίπτωση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Αν το σφάλμα πλησιάζει στο μηδέν τότε πλησιάζουμε στο σημείο όπου θέλουμε να σταματήσουμε τη διόρθωση. Δεδομένου ότι το σύστημα χρειάζεται λίγο χρόνο για

να ανταποκριθεί στις αλλαγές στην ισχύ των κινητήρων, θέλουμε να αρχίσουμε να μειώνουμε την ισχύ του κινητήρα πριν το σφάλμα φθάσει στο μηδέν, διαφορετικά θα υπερβούμε την άκρη της γραμμής. Παρουσιάζοντας το με αυτόν τον τρόπο φαίνεται ότι η εξίσωση για τον όρο D είναι πιο πολύπλοκη από ό, τι πραγματικά είναι, αλλά τα πράγματα δεν είναι έτσι. Για το μόνο πράγμα που πρέπει να ανησυχούμε είναι η αφαίρεση να γίνει με την σωστή σειρά. Η σωστή σειρά για αυτό το είδος αντικειμένου είναι "τρέχουσα" τιμή μείον "προηγούμενη" τιμή. Έτσι για να υπολογίσουμε την παράγωγο παίρνουμε το τρέχον σφάλμα και αφαιρούμε το προηγούμενο σφάλμα.

3.1.13 Ψευδοκώδικας για τον ελεγκτή PID

Για να προσθέσουμε την παράγωγο στον ελεγκτή, πρέπει να προσθέσουμε μια νέα μεταβλητή για το Kd και μια μεταβλητή που θα θυμάται το τελευταίο σφάλμα. Ας μην ξεχνάμε ότι πολλαπλασιάζουμε τα Ks με 100 για να εξασφαλίσουμε αριθμητική ακεραίων αριθμών.

```
Kp = 1000
Ki = 100
Kd = 10000
offset = 45
Tp = 50
integral = 0
lastError = 0
derivative = 0
Loop forever
    LightValue = read light sensor
    error = LightValue - offset
    integral = integral + error
    derivative = error - lastError
    Turn = Kp*error + Ki*integral + Kd*derivative
    Turn = Turn/100
    powerA = Tp + Turn
    powerC = Tp - Turn
    lastError = error
endloopforever
```

Τώρα έχουμε τον ψευδοκώδικα για τον πλήρη ελεγκτή PID για ένα αυτόνομο όχημα που κινείται ακολουθώντας μία γραμμή. Στη συνέχεια πρέπει να υλοποιήσουμε αυτό που είναι συχνά το δύσκολο κομμάτι, τον "παραμετροποίηση" του PID. Η παραμετροποίηση είναι η διαδικασία εύρεσης των καλύτερων, ή τουλάχιστον προσεγγιστικά καλύτερων, τιμών για τα Kp, Ki και Kd. Αποδεικνύεται ότι η μέτρηση μερικών παραμέτρων για το σύστημα μας, μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις "πολύ καλές" τιμές για Kp, Ki και Kd. Ανεξάρτητα από το ακριβές σύστημα που ελέγχεται οι εξισώσεις ρύθμισης σχεδόν πάντοτε λειτουργούν αρκετά καλά. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές για τον υπολογισμό των Ks, μία από τις οποίες ονομάζεται "μέθοδος Ziegler-Nichols", και την οποία θα χρησιμοποιήσουμε.

Για να παραμετροποιηθεί ο ελεγκτής PID, ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Ρυθμίζουμε τις τιμές K_i και K_d στο μηδέν, το οποίο απενεργοποιεί αυτούς τους όρους και κάνει τον ελεγκτή να λειτουργεί σαν απλός ελεγκτής P. Με άλλα λόγια ξεκινάμε με ένα απλό P εκλεκτή ο οποίος όμως έχει όλες τις λειτουργίες του PID ενσωματωμένες και προς το παρόν ανενεργές
2. Ορίζουμε τον όρο T_r να έχει μικρή τιμή. Για τους κινητήρες μας η τιμή 25 σε πρώτη φάση μπορεί να είναι μία καλή αφετηρία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέχρι να προσδιοριστούν οι τιμές για τα K_i και K_d δεν μπορούμε να αναπτύξουμε ταχύτητα διότι η κίνηση του αυτόνομου οχήματος μας θα αποκτήσει ταλάντωση.
3. Ορίζουμε τον όρο K_r σε μια "λογική" τιμή. Τι είναι όμως "λογικό" και πως θα το ορίσουμε;

A. Λαμβάνουμε μόνο τη μέγιστη τιμή που θέλουμε να στείλουμε στον έλεγχο ισχύος του κινητήρα (100) και διαιρούμε με τη μέγιστη τιμή του σφάλματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για τον ακολουθητή γραμμής που χρησιμοποιεί το αυτόνομο όχημα έχουμε υποθέσει ότι το μέγιστο λάθος είναι 5, οπότε η εικασία μας στο K_r είναι $100/5 = 20$. Όταν το σφάλμα είναι +5, η ισχύς του κινητήρα θα μεταβληθεί κατά 100 μονάδες. Όταν το σφάλμα είναι μηδενικό, η ισχύς του κινητήρα θα παραμείνει στο επίπεδο T_r .

B. Εναλλακτικά μπορούμε αυθαίρετα να δηλώσουμε ότι η τιμή του K_r είναι 1

Γ. Έχοντας κάνει την παραδοχή πως όλα τα K είναι βαθμονομημένα ως 100 φορές την πραγματική αξία τους, για να εξασφαλίσουμε αριθμητική ακεραιών, πρέπει να το λαμβάνουμε υπόψη μας συνέχεια. Η τιμή 1 εισάγεται ως 100, η τιμή 20 ως 2000, η τιμή 100 ως 10000.

4. Με δεδομένα τα παραπάνω κινούμε το αυτόνομο όχημα σε ευθεία κίνηση. Με δεδομένη τη συγκεκριμένη τιμή για την μεταβλητή K_r τρεις δυνατές περιπτώσεις υπάρχουν:

I. Το αυτόνομο όχημα **δεν** μπορεί να ακολουθήσει τη γραμμή και εκτρέπεται της πορείας. Σε αυτή την περίπτωση το βήμα 4 πρέπει να επαναληφθεί αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής K_r . Οι αυξήσεις αυτές πρέπει να γίνουν βαθμιδών με βήματα της τάξης του 0,1 αναγόμενα στην εκατοστιαία κλίμακα.

II. Το αυτόνομο όχημα ακολουθεί την γραμμή αλλά η κίνηση αυτή εμφανίζει ταλάντωση. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να μειωθεί η τιμή της μεταβλητής K_r . Συνεχίζουμε να αλλάζουμε την τιμή K_r μέχρι να βρούμε μία τιμή με την οποία να ακολουθεί πιστά τη γραμμή. Δεν υπάρχει όμως δυνατότητα να εξαλείψουμε πλήρως την ταλάντωση. Η κίνηση του αυτόνομου οχήματος θα είναι αξιοπρεπής αλλά όχι ταχεία λόγω της ταλάντωσης, πρόβλημα εγγενές στους ελεγκτές P. Θα ονομάσουμε αυτή την τιμή K_r : " K_c " ("κρίσιμο κέρδος του ελεγκτή" όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία του ελεγκτή PID)

III. Το αυτόνομο όχημα κινείται σε ευθεία χωρίς ταλάντωση. Η περίπτωση αυτή υφίσταται μόνο όταν η τιμή της μεταβλητής T_r είναι τόσο μικρή που δεν αναγκάζει το όχημα να ταλαντωθεί.

5. Χρησιμοποιώντας την τιμή της μεταβλητής K_c ως τιμή της μεταβλητής K_p , εκτελούμε νέο πείραμα κινώντας το αυτόνομο όχημα κατά μήκος της γραμμής και προσπαθούμε να προσδιορίσουμε πόσο γρήγορα ταλαντώνεται, με άλλα λόγια εκτιμούμε την περίοδο της ταλάντωσης. Η μέτρηση της περιόδου της ταλάντωσης να μην δεν μπορεί να είναι εντελώς ακριβής για ένα αυτόνομο όχημα EV3 αλλά μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη διαδικασία. Κάθε φορά που μεταβάλλεται το σφάλμα χρονομετρούμε μέχρι την επόμενη μεταβολή. Ο χρόνος αυτός είναι η μισή περίοδος. Για λόγους σχετικής ακρίβειας θεωρούμε ότι ο χρόνος μέχρι την επόμενη μεταβολή σφάλματος είναι ίδιος, οπότε διπλασιάζουμε τον πρώτο χρόνο μέτρησης. Έτσι εκτιμούμε την περίοδο της ταλάντωσης. Η περίοδος ταλάντωσης (P_c) είναι ο χρόνος που χρειάζεται το αυτόνομο όχημα να στρέφεται από τη μία πλευρά της γραμμής στην άλλη και στη συνέχεια πίσω στην πλευρά από την οποία ξεκίνησε. Για τα τυπικά αυτόνομα οχήματα Lego Mindstrors EV3 (όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων στα πλαίσια της εργασίας αυτής) η περίοδος είναι στην περιοχή από περίπου 0,5 δευτερόλεπτα έως δύο δευτερόλεπτα. Τα πειράματα αποδεικνύουν ότι ο μέσος όρος περιόδου ταλάντωσης είναι 1.4 sec. Ο μέσος όρος που αναγράφουμε ισχύει εφόσον η ισχύς των κινητήρων δεν ξεπερνά το 25% της ολικής ισχύος των.
6. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που πρέπει επίσης να γνωρίζουμε είναι σε πόσο απόλυτο χρόνο το αυτόνομο όχημα ολοκληρώνει ένα πλήρη βρόχο εκτέλεσης των εντολών του. Δεδομένου ότι το πλήθος των βημάτων του βρόχου ελέγχου είναι πεπερασμένο (όπως προκύπτει από τη θεωρία αλγορίθμων: ιδιότητα περατότητας (finiteness) αλγορίθμων - D. Harel, Algorithmics: The Spirit of Computing, Addison-Wesley, Reading, MA, (425 pp.) 1987;) μετράμε το συνολικό χρόνο εκτέλεσης του βρόχου κατά τη διάρκεια ακολουθίας της γραμμής από το αυτόνομο όχημα και διαιρούμε δια το πλήθος των επαναλήψεων του βρόχου. Ο χρόνος ανά βρόχο (dT) είναι ο μετρημένος χρόνος διαιρούμενος με τον αριθμό των βρόχων. Για έναν πλήρη ελεγκτή PID, εκτελούμενο σε Lego Mindstorms EV3 και υλοποιημένο με LabView (βλέπε υλοποίηση παρακάτω), το dT είναι στην περιοχή από 0,015 έως 0,020 δευτερόλεπτα ανά βρόχο. Η διακύμανση οφείλεται στις «διακοπές» (interrupts) που προέρχονται από τους αισθητήρες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων προέκυψε ότι αυτός ο χρόνος δεν ήταν επαρκής για τη σωστή αντίδραση του αυτόνομου οχήματος και αναγκαστήκαμε να ορίσουμε χρονοκαθυστέρηση στη εκτέλεση του βρόχου της τάξης του 0,003 sec.
7. Χρησιμοποιούμε τον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 1) για να υπολογίσουμε ένα σύνολο τιμών K_p , K_i και K_c . Εάν θέλουμε απλώς έναν ελεγκτή P τότε χρησιμοποιούμε τις τιμές στη πρώτη γραμμή του πίνακα που έχει επισημανθεί P για να υπολογιστεί το "σωστό" K_p . Τα K_i και K_d είναι και τα δύο μηδέν. Εάν θέλουμε έναν ελεγκτή PI, χρησιμοποιούμε τις τιμές στη δεύτερη γραμμή. Οι τιμές για τον πλήρη ελεγκτή PID εμφανίζονται στην τελευταία γραμμή.
8. Επειδή έχουμε υποθέσει ότι όλα τα K είναι καταχωρημένα ως 100 φορές (πάνω) από την πραγματική τους αξία, δεν χρειάζεται να το λάβουμε υπόψη σε αυτούς τους υπολογισμούς. Αυτός ο παράγοντας των 100 λαμβάνεται ήδη υπόψη στην τιμή $K_p = K_c$ που καθορίσαμε πιο πάνω.
9. Πειραματιζόμαστε με το αυτόνομο όχημα με τις παρακάτω τιμές (Πίνακας 1) και παρατηρούμε την συμπεριφορά του.
10. Μεταβάλλουμε τις τιμές K_p , K_i και K_d για να έχουμε την καλύτερη δυνατή απόδοση. Μπορούμε να ξεκινήσουμε με αρκετά μεγάλες μεταβολές, ας δεχθούμε αρχικά ότι

30% είναι αποδεκτό μέγεθος μεταβολής και στη συνέχεια μειώνουμε το ποσοστό αυτό για να αποκτήσουμε τη βέλτιστη (ή τουλάχιστον αποδεκτή) απόδοση. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι προσθετικές ή μειωτικές.

11. Μόλις έχουμε ένα καλό σύνολο τιμών για όλες της μεταβλητές K (K_p , K_i , K_d) προσπαθούμε να αυξήσουμε την τιμή T_p , η οποία ελέγχει την ταχύτητα του αυτόνομου οχήματος όταν αυτό κινείται σε ευθεία.
12. Κάθε φορά που μεταβάλουμε την τιμή της μεταβλητής T_p πρέπει να επαναλάβουμε της παραπάνω διαδικασία από το βήμα 3 για τη νέα τιμή T_p .
13. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα από το 3 μέχρι και το 12 μέχρι που η συμπεριφορά του οχήματος, στην επιθυμητή ταχύτητα, να γίνει αποδεκτή

Μέθοδος Ziegler-Nichols δίνοντας K' τιμές (οι βρόχοι θεωρούνται σταθεροί και ίσοι με dT)			
Τύπος Ελεγκτή	Kp	Ki	Kd
P	0.50Kc	0	0
PI	0.45Kc	$1.2K_p dT / P_c$	0
PD	0.80Kc	0	$K_p P_c / (8dT)$
PID	0.60Kc	$2K_p dT / P_c$	$K_p P_c / (8dT)$

Οι πρώτες τιμές για το Ki και για το Kd είναι μηδενικές ως υπενθύμιση ότι έχουν υπολογιστεί με δεδομένο ότι το dT είναι μία σταθερά και ότι το dT έχει ενσωματωθεί στις τιμές K.

Ακολουθούν οι τιμές που λάβαμε, κατόπιν μετρήσεων, για το αυτόνομο όχημα. Η τιμή του Kc ήταν 300 και όταν $K_p = K_c$ το αυτόνομο όχημα ταλαντώθηκε σε περίπου 0,8 δευτερόλεπτα ανά ταλάντωση, θέτοντας έτσι την τιμή της μεταβλητής Pc ίση με 0,8. Ο χρόνος βρόχου, dT, είναι 0,023 δευτερόλεπτα / βρόχο όπως προέκυψε από τα δεδομένα που συλλέξαμε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράψαμε στην παραπάνω περίπτωση 6.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα για έναν ελεγκτή PID,

$$K_p = (0.60) * (K_c) = (0.60) * (300) = 180$$

$$K_i = 2(K_p)(dT) / (P_c) = 2(180)(0.023) / (0.8) = 10.35 \text{ το οποίο στρογγυλοποιείται στο } 10$$

$$K_d = (K_p)(P_c) / ((8)(dT)) = (180)(0.8) / ((8)(0.023)) = 783 \text{ μετά από στρογγυλοποίηση}$$

Ύστερα από περεταίρω πειραματισμό καταλήξαμε ότι οι τιμές είναι $K_p = 220$, $K_i = 7$ και $K_d = 480$. Δεν πρέπει να μας διαφύγει ότι οι τιμές αυτές είναι αυξημένες λόγω ακεραιοποίησης (* 100). Συνεπώς οι τιμές των μεταβλητών K_p , K_i και K_d είναι στη πραγματικότητα 2,2 , 0,07 και 4,8.

Με δεδομένα τα παραπάνω ας εξετάσουμε τώρα πώς η μεταβολή των τιμών των K_p , K_i και K_d επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός αυτόνομου οχήματος. Η μέθοδος που παρουσιάσαμε παραπάνω είναι επαρκής για την παραμετροποίηση ενός ελεγκτή PID. Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τις μεταβολές κάθε μίας από τις παραμέτρους (K_p , K_i και K_d), του ελεγκτή PID, οι οποίες επηρεάζουν την συμπεριφορά του οχήματος κατά κάποιο τρόπο όταν η τιμή τους αυξάνεται.

Αποτέλεσμα αύξησης των παραμέτρων του ελεγκτή PID

Παράμετρος	Ταχύτητα διόρθωσης σφάλματος	Μέγεθος εκτροπής από τη γραμμή	Χρόνος επαναφοράς μετά από μεγάλο σφάλμα	Απομένον σφάλμα μετά από την αποκατάσταση της ισορροπίας
K_p	Μειώνεται	Αυξάνει	Μικρός	Μειώνεται
K_i	Μειώνεται	Αυξάνει	Αυξάνει	Εκμηδενίζεται
K_d	Απροσδιόριστο (πολύ μικρή αύξηση ή μείωση)	Μειώνεται	Μειώνεται	Καμία

Ταχύτητα διόρθωσης σφάλματος (Rise time): Είναι ο χρόνος (πόσο γρήγορα) αποκατάστασης ενός σφάλματος. Δηλαδή, πόσο χρόνο χρειάζεται το αυτόνομο όχημα για επανέλθει στη άκρη της γραμμής που ακολουθεί μετά την εκτροπή του από αυτή. Ο χρόνος διόρθωσης σφάλματος ή ταχύτητα διόρθωσης σφάλματος ελέγχεται από την τιμή της μεταβλητής K_p . Όσο αυξάνει η τιμή της μεταβλητής K_p τόσο πιο γρήγορα το αυτόνομο όχημα επανέρχεται και έτσι μειώνεται ο χρόνος επαναφοράς. Ο κίνδυνος που ελλοχεύει, βέβαια, είναι όταν η τιμή του K_p είναι πολύ μεγάλη. Τότε, το αυτόνομο όχημα κινδυνεύει να εκτραπεί από την αντίθετη πλευρά από αυτή που δημιούργησε το σφάλμα.

Μέγεθος εκτροπής από τη γραμμή (Overshooting): Είναι η απόσταση από την άκρη της γραμμής που εκτρέπεται ένα αυτόνομο όχημα κατά την προσπάθεια του να ανταποκριθεί σε κάποιο σφάλμα. Αν η απόσταση αυτή είναι πολύ μικρή τότε το αυτόνομο όχημα δεν ταλαντώνεται. Όσο αυξάνει η απόσταση αυτή τόσο αυξάνει το πλάτος της ταλάντωσης. Το μέγεθος της εκτροπής συνήθως ελέγχεται από την μεταβλητή K_d αλλά επηρεάζεται επίσης από τις τιμές των μεταβλητών K_i και K_p . Σε κάθε περίπτωση η διόρθωση μεγάλου μεγέθους εκτροπής γίνεται με τη μείωση της τιμής της μεταβλητής K_d .

Χρόνος επαναφοράς μετά από μεγάλο σφάλμα (Settling time): Είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα αυτόνομο όχημα για να επανέλθει μετά από μία μεγάλη μεταβολή (μεγάλο σφάλμα). Στην περίπτωση μας αυτό συμβαίνει όταν το αυτόνομο όχημα συναντήσει μία στροφή. Καθώς το αυτόνομο όχημα ανταποκρίνεται σε μία στροφή θα διορθώσει το σφάλμα και μετά θα εκτραπεί από τη γραμμή σε κάποιο βαθμό. Για να επανέλθει από την εκτροπή χρειάζεται και πάλι να διορθώσει το σφάλμα, αντίδραση ή οποία μπορεί να το οδηγήσει σε νέα εκτροπή από την αντίθετη όμως πλευρά της αρχικής. Αυτού του είδους διορθώσεις οδηγούν σε ταλάντωση γύρω από το σημείο ισορροπίας (άκρη της γραμμής). Ο χρόνος επαναφοράς αφορά στο χρόνο που χρειάζεται ώστε το πλάτος της ταλάντωσης να γίνει ίσο με μηδέν (σημείο ισορροπίας). Ο χρόνος επαναφοράς ελέγχεται από τις μεταβλητές K_i και K_d . Μεγάλη τιμή στο K_i αποδίδει μεγάλο χρόνο επαναφοράς. Μεγάλη τιμή στο K_d αποδίδει μικρότερους χρόνους επαναφοράς. Η αλήθεια είναι κάπου στη μέση: Απαιτείται ρύθμιση

και των δύο μεταβλητών έτσι ώστε να επιτευχθεί το ζητούμενο χωρίς να επηρεαστούν άλλα χαρακτηριστικά της κίνησης του αυτόνομου οχήματος (ταχύτητα, αύξηση του σφάλματος, κ.α.).

Απομένον σφάλμα μετά από την αποκατάσταση της ισορροπίας (error at equilibrium): Είναι το σφάλμα που έχει απομείνει όταν το όχημα έχει έλθει σε ισορροπία, δηλαδή ακολουθεί πιστά τη γραμμή, δεν ταλαντώνεται, κ.α.). Το υπολειπόμενο (residual) σφάλμα ελέγχεται με την αύξηση της τιμής του K_p , ενέργεια που όμως θα οδηγήσει όπως έχουμε αναφέρει σε ταλάντωση. Συνδυασμένη μεταβολή των τιμών των K_i και K_p εξασφαλίζει τη απαλοιφή του απομένοντος σφάλματος. Σε καμπές γενικότερα, όπου εμπλέκονται και στοιχεία οδομετρίας, υπάρχουν περιπτώσεις που ο προγραμματιστικός μηδενισμός του απομένοντος σφάλματος αποφέρει σημαντικά οφέλη και ίσως σε ιδανικές περιπτώσεις (σωστά ρυθμισμένες μεταβλητές του ελεγκτή PID) άριστα αποτελέσματα.

3.2 Υλοποίηση

Βαθμονόμηση τρέχουσας τιμής και υπολογισμός τρέχοντος σφάλματος.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 16) παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός τμήματος του ελεγκτή **PID**. Είναι το πρώτο τμήμα του βρόχου του ελεγκτή, που αφορά στη μέτρηση της τιμής της έντασης του ανακλώμενου φωτός, την βαθμονόμηση της στην κλίμακα 0-100 λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη (συμβολιζόμενη από την μεταβλητή Max) και ελάχιστη (συμβολιζόμενη από την μεταβλητή Min) τιμή που μπορεί να έχει η ένταση του ανακλώμενου φωτός, σε όλη τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το αυτόνομο όχημα. **Target** είναι η μεταβλητή που ορίζει την επιθυμητή ένταση ανακλώμενου φωτός έτσι ώστε ο αισθητήρας φωτός να βρίσκεται πάντα στη δεξιά πλευρά της γραμμής ακολούθησης μισός επάνω στο μαύρο και μισός επάνω στο άσπρο.

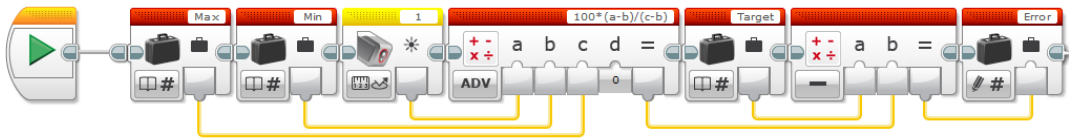
Error είναι η μεταβλητή που αναπαριστά το σφάλμα, δηλαδή πόσο απέχουμε από την επιθυμητή τιμή.

Η παράσταση:

$$100 * (a-b)/(c-b)$$

αναλαμβάνει τη βαθμονόμηση με το ακόλουθο σκεπτικό:

- **a** είναι η τρέχουσα τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός που προσλαμβάνεται από τον αισθητήρα
- **b** είναι η ελάχιστη τιμή έντασης ανακλώμενου φωτός που συναντήσαμε σε όλη τη διαδρομή που πρέπει να κινηθεί το αυτόνομο όχημα
- **c** είναι η μέγιστη τιμή έντασης ανακλώμενου φωτός που συναντήσαμε σε όλη τη διαδρομή που πρέπει να κινηθεί το αυτόνομο όχημα



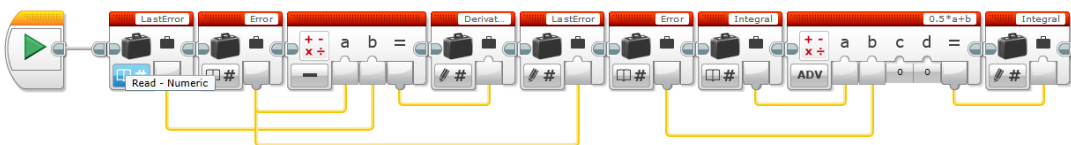
Εικόνα 16 Βαθμονόμηση και υπολογισμός σφάλματος

Με το παραπάνω τμήμα του προγράμματος πετυχαίνουμε να ορίσουμε εξ' αρχής το όριο (threshold) βάσει του οποίου πρέπει να ακολουθήσει το αυτόνομο όχημα την γραμμή που ορίζει την πορεία του στο χώρο. Η προσθήκη ενός ακόμα αισθητήρα φωτός στο αυτόνομο όχημα θα προσέδιδε τη δυνατότητα να υπολογίζουμε την τιμή της μεταβλητής Target δυναμικά κατά την διάρκεια της κίνησης του οχήματος δίνοντας μας την δυνατότητα ακόμη πιο αξιόπιστης ακολούθησης γραμμής.

3.2.1 Υπολογισμός παραγώγου ολοκληρώματος

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η παράγωγος είναι η διαφορά του τρέχοντος σφάλματος (Error), όπως αυτό υπολογίστηκε από το προηγούμενο τμήμα κώδικα, από το προηγούμενο σφάλμα (LastError). Η τιμή αποθηκεύεται στη μεταβλητή Derivative. Στη συνέχεια το τρέχον σφάλμα γίνεται το προηγούμενο σφάλμα και αποθηκεύεται στη μεταβλητή LastError και έτσι ο ελεγκτής αποκτά «μνήμη» της προηγούμενης κατάστασης. Το αθροιστικό σφάλμα είναι το integral το οποίο είναι η αθροιστική «μνήμη» του ελεγκτή. Σε κάθε επανάληψη του βρόχου υποβιβάζεται κατά το ήμισυ εξασφαλίζοντας έτσι μια πλέον ρεαλιστική εικόνα της πραγματικότητας και σε αυτό προστίθεται το τρέχον σφάλμα. Ο υποβιβασμός κατά το ήμισυ είναι αναγκαίος διότι το άθροισμα μεγαλώνει απότομα όταν έχουμε μεγάλο σφάλμα πιθανώς εξ' αιτίας θορύβου.

Μια τροποποίηση θα ήταν ο συντελεστής υποβάθμισης να υπολογίζεται δυναμικά ανάλογα με τις τιμές του σφάλματος απορρίπτοντας κάποιες τιμές που γνωρίζουμε ή υποθέτουμε ότι οφείλονται σε θόρυβο. Κάτι τέτοιο όμως για να λειτουργήσει στην πράξη απαιτεί την ύπαρξη ενός δεύτερου αισθητήρα ο οποίος «κοιτά» μπροστά και δεν συμμετέχει στο βασικό υπολογιστικό κορμό του ελεγκτή παρά μόνο για να δώσει «μελλοντική» πληροφορία – γνώση.



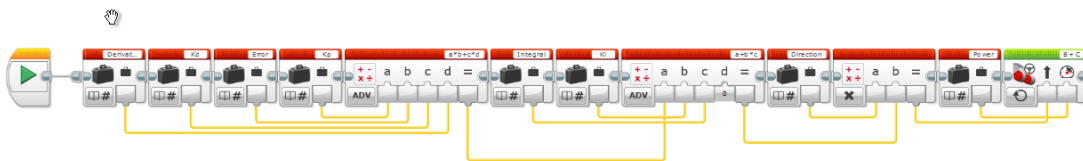
Εικόνα 17 Υπολογισμός παραγώγου-ολοκληρώματος

3.2.2 Υπολογισμός διορθωτικών κινήσεων

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των διορθωτικών κινήσεων βάσει των δεδομένων που έχουν ήδη συλλεγεί-υπολογιστεί. Στον παρακάτω κώδικα που αποτελεί το τελευταίο τμήμα του βρόχου του ελεγκτή γίνεται χρήση των τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή PID καθώς και των τιμών που υπολογίστηκαν στο παραπάνω τμήμα κώδικα και αφορούν στην παράγωγο και το ολοκλήρωμα. Ουσιαστικά αποτιμάται η παράσταση

$$K_p * \text{error} + K_d * \text{derivative} + K_i * \text{integral}$$

Ενδιαφέρον σε αυτό το σημείο έχει ο ρόλος της μεταβλητής **Direction**. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να λάβει δύο τιμές και συγκεκριμένα **-1** και **1**. Η τιμή της μεταβλητής καθορίζει από ποια πλευρά της γραμμής θα βρίσκεται ο αισθητήρας (δεξιά ή αριστερά). Η τιμή 1 δηλώνει ότι ο αισθητήρας είναι από δεξιά της γραμμής και αντίστοιχα. Η αλλαγή τιμής μπορεί να γίνει δυναμικά κατά την κίνηση του αυτόνομου οχήματος παρέχοντας τη δυνατότητα να ακολουθήσει καμπύλες είτε από την εσωτερική του πλευρά είτε από την εξωτερική του πλευρά ανάλογα με το είδος της γωνίας και την θέση της στη διαδρομή. Τέλος η επιθυμητή ισχύς μαζί με τη διόρθωση στη πορεία του οχήματος τροφοδοτούνται ως παράμετροι στην εντολή που ελέγχει τους κινητήρες. Με την προϋπόθεση της ύπαρξης ενός δεύτερου αισθητήρα τότε θα μπορούσαμε να έχουμε και μεταβλητή την ισχύ στους κινητήρες με δυναμικό τρόπο, προσεγγίζοντας τον τρόπο που κινούνται τα πραγματικά οχήματα. Με άλλα λόγια επιτάχυνση όπου το σφάλμα είναι μικρό επιβράδυνση όπου το σφάλμα ξεφεύγει του αποδεκτού εύρους τιμών.

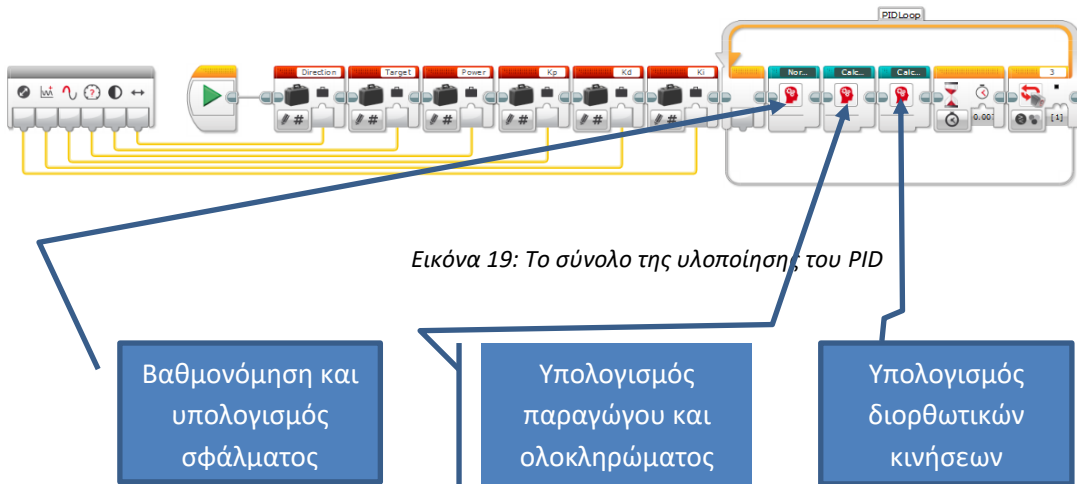


Εικόνα 18 Υπολογισμός διορθωτικών ελιγμών

3.2.3. Ο ελεγκτής PID ως σύνολο των παραπάνω

Το παρακάτω τμήμα κώδικα απεικονίζει την παραμετρική υλοποίηση του ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα τμήματα κώδικα. Ως παράμετροι πριν την εκκίνηση του βρόχου ελέγχου του ελεγκτή δίνονται:

- Το K_i
- Το K_d
- Το K_p
- Η επιθυμητή ταχύτητα
- Ο στόχος, δηλαδή η επιθυμητή τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός
- Η πλευρά από την οποία ο αισθητήρας διαβάζει την άκρη της μαύρης γραμμής.



Εικόνα 19: Το σύνολο της υλοποίησης του PID

Βαθμονόμηση και υπολογισμός σφάλματος

Υπολογισμός παραγώγου και ολοκληρώματος

Υπολογισμός διορθωτικών κινήσεων

Ας υποθέσουμε ότι η διαδρομή, που πρέπει να κινηθεί το αυτόνομο όχημα, είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την χρήση ενός συγκεκριμένου συνόλου παραμέτρων και γενικότερα τιμών για τον ελεγκτή. Διαφορετικά τμήματα της διαδρομής ανταποκρίνονται σε διαφορετική παραμετροποίηση του ελεγκτή. Η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να ικανοποιήσει και τέτοιου είδους διαδρομές. Η φιλοσοφία είναι απλή. Η παραμετροποίηση και ο βρόχος του ελεγκτή επαναλαμβάνονται στο συνολικό πρόγραμμα οδήγησης του αυτόνομου οχήματος τόσες φορές όσα είναι τα διακριτά τμήματα της διαδρομής, το κάθε τμήμα με τις δικές του μοναδικές τιμές παραμέτρων. Για να είναι κάτι τέτοιο εφικτό η εναλλαγή από τον ένα βρόχο του ελεγκτή στον επόμενο γίνεται αποκλειστικά με στοιχεία οδομετρίας (σε ποιο ακριβώς σημείο της διαδρομής θα γίνει η αλλαγή από τον ένα βρόχο στον άλλο). Με αυτή την τεχνική καταφέραμε το αυτόνομο όχημα να έχει τη δυνατότητα να στρίψει ορθή γωνία ελεγχόμενο αποκλειστικά από έναν ελεγκτή PID χωρίς να ταλαντώνει και με την ταχύτητα του στο 70% της συνολικής ισχύος των κινητήρων.

Στον παραπάνω κώδικα και δει στο τέλος του βρόχου του ελεγκτή PID υπάρχει προγραμματιστική χρονοκαθυστέρηση. Αυτό συμβαίνει για να εξαλειφθεί ο θόρυβος που δημιουργείται από τις υπερβολικά πολλές μετρήσεις που επιστρέφει ο αισθητήρας φωτός (1000/sec).

3.3 Συμπεράσματα

Ο έλεγχος της κίνησης ενός αυτόνομου οχήματος πάνω σε μία προδιαγεγραμμένη πορεία ενώ μπορεί να φαντάζει μία εύκολη αρχικά διαδικασία, η διαδικασία αυτή γίνεται πολύ δυσκολότερη όταν το αυτόνομο όχημα ελέγχεται από μόνο έναν αισθητήρα φωτός. Αναζητώντας ένα βέλτιστο τρόπο για να καθοδηγήσουμε το αυτόνομό μας όχημα πιστά και γρήγορα πάνω στην πορεία του και με δεδομένη την ύπαρξη μόνο ενός αισθητήρα, υλοποιήσαμε προγραμματιστικά ένα σύνολο ελεγκτών που βρίσκουν τις ρίζες τους στο χώρο των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου. Ξεκινώντας από τον ελεγκτή τύπου P, αναδείξαμε τα μειονεκτήματά του αναφορικά, όμως, με την ακολούθηση γραμμής. Δείξαμε πως ακόμα και

σε μικρά ποσοστά ισχύος κινητήρων ο αναλογικός ελεγκτής P δημιουργεί ταλάντωση μεγάλου πλάτους που μεγαλώνει (το πλάτος) όσο αυξάνει η ταχύτητα. Επίσης δείξαμε ότι ο ελεγκτής P δεν έχει καμία δυνατότητα να ακολουθήσει καμπύλες και γωνίες. Για το λόγο αυτό προχωρήσαμε και βάλουμε ένα είδος μνήμης στον ελεγκτή μας, υλοποιώντας έναν ολοκληρωτικό αναλογικό ελεγκτή (PI). Η μνήμη αποδείχθηκε ότι μας βοήθησε μέχρι κάποιο σημείο να ξεπεράσουμε τα προβλήματα ταλάντωσης αλλά δεν μας έδωσε ικανοποιητική λύση σε ότι αφορά στις γωνίες. Αυτό οφείλεται στο ότι *δεν έχουμε γνώση για το τί βρίσκεται μπροστά από τον αισθητήρα φωτός*. Μία λύση, σε αυτό το πρόβλημα, θα ήταν η προσθήκη ενός δευτέρου αισθητήρα, επιλογή που δεν υιοθετήσαμε, αφού στόχος μας, εξ' αρχής, (για λόγους οικονομίας) ήταν η χρήση ενός αισθητήρα. Με αφετηρία την παροχή δυνατότητας ακολούθησης γωνιών προχωρήσαμε στην υλοποίηση ενός ελεγκτή "με πρόβλεψη" PID. Η έννοια της παραγωγού, στον τύπο αυτού του ελεγκτή, μας έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε τί βρίσκεται μπροστά μας. Επιπλέον δείξαμε τον τρόπο παραμετροποίησης του ελεγκτή και τη σημασία που έχει η τιμή κάθε μίας από τις παραμέτρους του στη συμπεριφορά του αυτόνομου οχήματος.

Παραθέσαμε την υλοποίηση του αλγορίθμου με τρόπο τέτοιο ώστε να αναδειχθούν οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίσαμε την ταλάντωση, τις καμπύλες και τις γωνίες. Εφαρμόσαμε μία νέα τεχνική που αφορά στη δυναμική παραμετροποίηση του ελεγκτή με γνώμονα το ακόλουθο σκεπτικό:

Μία πορεία που πρέπει να ακολουθήσει ένα αυτόνομο όχημα μπορεί να χωρισθεί σε επιμέρους αυτόνομα τμήματα. Η πορεία σε κάθε τμήμα διέπεται από ένα σύνολο μοναδικών και ανεξάρτητων από άλλα τμήματα παραμέτρων, συνεπώς κάθε τμήμα μπορεί να έχει την υλοποίηση του γενικού ελεγκτή PID παραμετροποιημένη στις ιδιαιτερότητες του κάθε τμήματος. Συνεπικουρούμενο με στοιχεία οδομετρίας, το σκεπτικό αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουμε οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα (ευθείες, γωνίες, καμπύλες, τεθλασμένες και διασταυρώσεις). Έτσι, λοιπόν, πετύχαμε το ζητούμενο: Ένα αυτόνομο όχημα με έναν αισθητήρα φωτός να ακολουθεί μία πορεία με υψηλή ταχύτητα.

Κεφάλαιο 4.

Ασύγχρονοι Κινητήρες-Ρυθμιζόμενοι μη ρυθμιζόμενοι

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Ο ηλεκτρικός κινητήρας ή ηλεκτροκινητήρας, (motor, κοινώς *μοτέρ*), είναι διάταξη που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και τυγχάνει εξαιρετικής εκμετάλλευσης από τις βιομηχανίες

Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα είναι η δύναμη Laplace. Όταν ένας αγωγός από τον οποίο διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο ασκείται πάνω του δύναμη ίση με:

$$F = I * \lambda * B * \eta\mu\phi$$

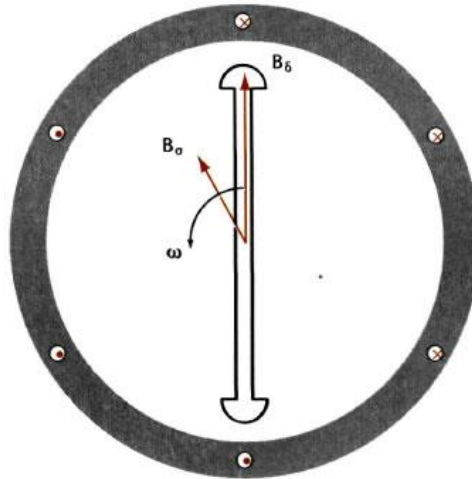
Όπου:

- I = Ένταση Ρεύματος
- λ = Μήκος Αγωγού
- B = Ένταση Μαγνητικού πεδίου
- ϕ = η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών (B)

Μεγάλες κατηγορίες

Ανάλογα με την κατασκευή και με τη λειτουργία τους οι κινητήρες Ε.Ρ. χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α) Τους σύγχρονους



Σύγχρονος κινητήρας με δύο πόλους.

Το, παραπάνω, σχήμα απεικονίζει ένα σύγχρονο κινητήρα δύο πόλων, όπου το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (B_s) παράγεται από το ρεύμα διέγερσης (I_s).

Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα ή γεννήτρια και ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης, στρέφεται πάντα με σταθερό αριθμό στροφών (σύγχρονο αριθμό στροφών που εξαρτώνται από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων των τυλιγμάτων και από τη συχνότητα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου).

Σε αντίθεση λοιπόν με τις ασύγχρονες μηχανές, στις σύγχρονες μηχανές η ολίσθηση του δρομέα είναι μηδενική.

Δηλαδή, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφονται με την ίδια ταχύτητα.

Το βασικό πλεονέκτημα της σύγχρονης γεννήτριας είναι η εύκολη ρύθμιση της ενεργού και της άεργης ισχύος.

β) Τους ασύγχρονους.



Οι ασύγχρονοι κινητήρες διακρίνονται:

1) Στους επαγωγικούς, που είναι οι:

- α)** δακτυλιοφόροι (μονοφασικοί ή πολυφασικοί) κινητήρες,
- β)** κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κινητήρες κλωβού (μονοφασικοί ή πολυφασικοί).

Οι μονοφασικοί κινητήρες διακρίνονται σε:

- α)** αντίστασης
- β)** βραχυκυκλωμένων σπειρών στο στάτη, και
- γ)** πυκνωτή (εκκίνησης - λειτουργίας).

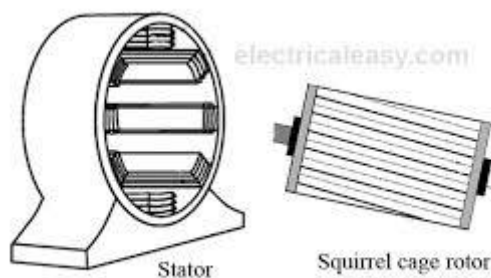
2) Στους κινητήρες με συλλέκτη, που είναι οι:

- α)** κινητήρες σειράς
- β)** κινητήρες “Γιουνιβέρσαλ” (Universal)
- γ)** κινητήρες αντίδρασης (ή απωστικοί κινητήρες).

Κατασκευαστικά

Οι ασύγχρονες μηχανές ονομάζονται επαγωγικές μηχανές.

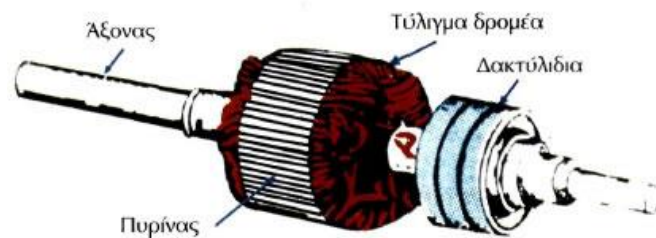
Η ασύγχρονη μηχανή αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος το στάτη και από ένα κινητό το δρομέα.



Τύλιγμα κλωβού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Ο στάτης φέρει στο εσωτερικό του μέρος αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό).

Το τύλιγμα αυτό παίρνει ρεύμα από το δίκτυο και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εξ' επαγωγής δημιουργεί ρεύματα στον δρομέα.



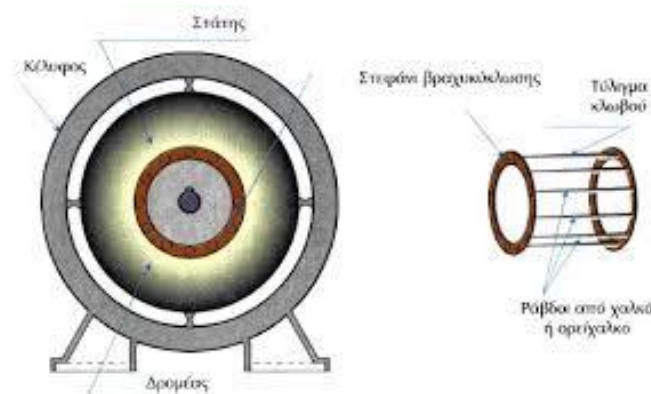
Δρομέας κινητήρα με δακτυλίδια.

Τα ρεύματα αυτά μαζί με το πεδίο που τα δημιούργησε προκαλούν δυνάμεις και κατά συνέπεια ηλεκτρομαγνητική ροπή, με την επίδραση της οποίας ο δρομέας περιστρέφεται.

Οι αυλακώσεις του στάτη μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα έχουν κατάλληλο σχήμα και αυτές που συναντάμε σήμερα είναι αυλακώσεις κατά το μισό ανοιχτές και στον δρομέα ανοιχτές κατά το μισό ή τελείως κλειστές.

Η καλύτερη περίπτωση είναι οι αυλακώσεις να είναι κλειστές αλλά αυτό συνεπάγεται δύσκολη τοποθέτηση των αγωγών μέσα σ' αυτές. Όσο μικραίνει το άνοιγμα μιας αυλακώσεως τόσο μικρότερη γίνεται η σκέδαση και τόσο μεγαλύτερη ασφάλεια έχουμε έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μηχανής τόσο πιο δύσκολα γίνονται τα πράγματα, γιατί μεγαλώνουν οι δυσκολίες στην τοποθέτηση των τυλιγμάτων και η μηχανή γίνεται αντιοικονομική. Στον στάτη όμως συναντάμε και ανοιχτές αυλακώσεις. Αυτό συμβαίνει για μηχανές υψηλής τάσης (π.χ 6 KV) όπου τα τυλίγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση, αυτά κατασκευάζονται εκτός της μηχανής και τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις.



Τύλιγμα κλωβού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες.

Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

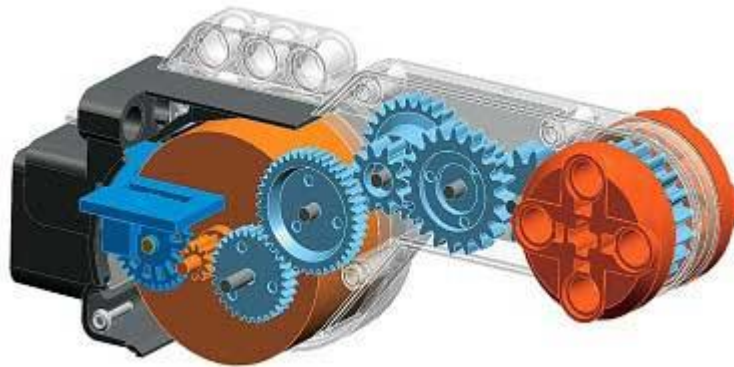
Από το τέλος του 18^{ου} αιώνα, υπήρχαν στο εμπόριο επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι.

Από τη δεκαετία του 1970, πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις, που, στην ποιότητα των υλικών, της μόνωσης των τυλιγμάτων και της κατασκευής οι οποίες επέτρεψαν τη σημαντική μείωση του όγκου και, φυσικά, του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων.



Η, παραπάνω, αναφορά στα είδη των κινητήρων έγινε για δύο λόγους:

1. Οι κινητήρες του Lego Mindstorms είναι ασύγχρονοι, με μηχανικά μέρη (η μετάδοση γίνεται από το μοτέρ προς τον τροχό με μία σειρά γραναζιών).



Επιπρόσθετα στη σύνηθη λειτουργία τους ρυθμίζονται σε ότι αφορά στο πλήθος των περιστροφών που έχουν εκτελέσει από έναν ελεγκτή PID ο οποίος ελέγχεται, με τη σειρά του, από το λειτουργικό σύστημα του Lego Mindstorms EV3. Αν λοιπόν υπάρχει απόκλιση μεταξύ των περιστροφών που έχουν εκτελέσει οι δύο κινητήρες ενός αυτόνομου οχήματος το λειτουργικό σύστημα του Lego Mindstorms EV3 αναλαμβάνει τη ρύθμισή τους (εξίσωση των περιστροφών μεταξύ των δύο κινητήρων). Η ενέργεια αυτή δυσχαιρένει κατά πολύ τη λειτουργία ενός ελεγκτή PID για την ακολούθηση γραμμής. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα επιλέξαμε τη λειτουργία των κινητήρων σε μη ρυθμιζόμενη, από το λειτουργικό σύστημα του Lego Mindstorms EV3, κατάσταση έτσι ώστε ο πλήρης έλεγχος των περιστροφών των κινητήρων να βρίσκεται στην ευθύνη του ελεγκτή PID που καθοδηγεί το αυτόνομο όχημα πάνω στη γραμμή. Η επιλογή αυτή μας έδωσε τη δυνατότητα της κίνησης με υψηλή ταχύτητα, σε συνάρτηση με όσα έχουν ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Μελετώντας και εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

Ιδιότητες που αναζητούμε από ένα ελεγκτή:

- Καλή επίδοση – κριτήρια απόδοσης βρόχου ανάδρασης.
- Ευρεία προσαρμοστικότητα – ρυθμιζόμενοι παράμετροι.
- Γρήγοροι υπολογισμοί – αποφυγή προβλημάτων αριθμητικής σύγκλισης.
- Μετάβαση από/σε χειροκίνητο έλεγχο –ομαλή.
- Επέκταση – εύκολη βελτίωση.

Η ακολούθηση γραμμής από ένα αυτόνομο όχημα ενώ φαντάζει μία απλή διαδικασία στην πραγματικότητα είναι αρκετά σύνθετη. Κάθε σχήμα ή κίνηση χρειάζεται διαφορετικές ενέργειες που πρέπει να εφαρμοστούν, οι οποίες δυσκολεύουν περισσότερο όταν η πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι συνδυασμός διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων. Επιλέχθηκε η ακολούθηση γραμμής με χρήση ενός αισθητήρα φωτός που μετρά την ένταση του ανακλώμενου φωτός αλλά δεν αρκεί σε όλες τις περιπτώσεις γι' αυτό κρίθηκε αναγκαία η επικουρία των δεδομένων από στοιχεία οδομετρίας (μόνο στις περιπτώσεις που η διαδρομή που θα ακολουθήσει το όχημα είναι γνωστή και ρητά ορισμένη) για την ακριβή κίνηση και προσανατολισμό του οχήματος. Μη εκ των προτέρων ορισμένες διαδρομές δεν εξετάζονται σε αυτό το πόνημα.

Οι ελεγκτές PID, παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι ελεγκτές στην βιομηχανία: Ελεγκτές Αναλογικοί – Ολοκληρωτικοί – Διαφορικοί (PID). Αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1930, έχοντας στην αρχή πνευματικό τρόπο λειτουργίας. Αργότερα (1950) άρχισαν τα πρώτα ηλεκτρονικά συστήματα. Αρχές δεκαετίας 1960 εμφανίστηκε ο έλεγχος με Η/Υ στην βιομηχανία χημικών διεργασιών. Από την δεκαετία του 1980 τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυριαρχούν στις εφαρμογές.

Θεωρείται ότι στην βιομηχανία χημικών διεργασιών οι ελεγκτές PID αποτελούν το 98% των περιπτώσεων [Astrom, Hagglund 1995]. Παρόλα αυτά, το 2000 αναφέρθηκε ότι το 80% των PID είναι

κακορυθμισμένοι, το 30% λειτουργούν σε manual mode και το 25% εξακολουθούν να έχουν τις αρχικές ρυθμίσεις

Ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός-παραγωγικός ελεγκτής (ελεγκτής PID) είναι ένας γενικός μηχανισμός με ανατροφοδότηση βρόχων ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως στα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Ένας ελεγκτής PID προσπαθεί να διορθώσει το λάθος μεταξύ μιας μετρημένης μεταβλητής-διαδικασίας (ProcessValue) και ενός επιθυμητού σημείου λειτουργίας (setpoint) με τον υπολογισμό και έπειτα την έξοδο μιας διορθωτικής δράσης που μπορεί να ρυθμίσει τη διαδικασία αναλόγως.

Ο υπολογισμός της εξόδου του ελεγκτή PID (αλγόριθμος) περιλαμβάνει τρεις ξεχωριστούς όρους, των οποίων η επιρροή στην απόκριση του συστήματος έχει ως εξής:

- Ο αναλογικός όρος P βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στην μεταβατική όσο και στην μόνιμη κατάσταση, αλλά αδυνατεί να εξαλείψει πλήρως το μόνιμο σφάλμα. Δεν μπορεί να αντεπεξέλθει ικανοποιητικά σε όλους τους τύπους των συστημάτων και των εξωτερικών διαταραχών, γι' αυτό (όπου απαιτείται) συνδυάζεται μαζί με άλλους όρους.
- Ο ολοκληρωτικός όρος I χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση, αφού για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα, η έξοδος του ελεγκτή, λόγω του ολοκληρώματος αυξάνεται με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος, αλλά αυτό γίνεται σε βάρος της ταχύτητας απόκρισης και της ευστάθειας του συστήματος.
- Ο διαφορικός όρος D αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτιώνει τη συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση, αλλά λόγω της επιβολής στην πράξη περιορισμού της εξόδου του ελεγκτή δεν χρησιμοποιείται ποτέ από μόνος του.

Το σταθμισμένο ποσό αυτών των τριών ενεργειών χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη διαδικασία μέσω ενός στοιχείου ελέγχου όπως η θέση μιας βαλβίδας ελέγχου ή η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενός στοιχείου θέρμανσης, κινητήρα κτλ.

Στη συνέχεια εξετάσαμε αλγόριθμους με γνώμονα την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα του οχήματος. Προσπαθήσαμε να εκμηδενίσουμε το πλάτος ταλάντωσης με τεχνικές που προέρχονται από το χώρο του αυτοματισμού (Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου) με εφαρμογή στα δεδομένα του χώρου της κίνησης αυτόνομων οχημάτων. Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε ο αλγόριθμος δύο βημάτων ή «μπανγκ-μπανγκ», που η λογική του είναι: "Η τιμή της έντασης του ανακλώμενου φωτός που λαμβάνεται από τον αισθητήρα φωτός ελέγχεται σε σχέση με την τιμή κατωφλιού". Η επόμενη περίπτωση που εξετάστηκε αφορά Αλγόριθμους αναλογικού ελεγκτή (P-Controller). Αλγόριθμοι του τύπου αυτού είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις στις οποίες έχουμε ταχεία μεταβολή της τιμής που λαμβάνουμε από το εξωτερικό περιβάλλον η οποία και καθορίζει τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσει το όχημα. Ένα μειονέκτημα του αλγόριθμου αυτού είναι ότι δεν έχει τη δυνατότητα να απαλείψει το απομένον (υπολειπόμενο) σφάλμα της διαφοράς κατωφλιού και της λαμβανόμενης τιμής ούτε να έχει συσσωρευμένη γνώση του σφάλματος με αποτέλεσμα να μην εκμηδενίζεται το πλάτος της ταλάντωσης. Η τρίτη περίπτωση έχει να κάνει με τον Αλγόριθμο ελεγκτή PI (PI-Controller), ο οποίος αποκτά γνώση των προηγούμενων σφαλμάτων μέσα από την ολοκλήρωση τους στο χρόνο, ο οποίος, όμως, αποτελεί υποσύνολο του αλγορίθμου που ακολουθεί (PID). Τελευταίος αλγόριθμος που εξετάστηκε είναι ο ελεγκτής PID (PID-Controller), που στην πραγματικότητα είναι μια κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μιας μεγάλης ποικιλίας μηχανημάτων, συμπεριλαμβανομένων οχημάτων, ρομπότ και ακόμη και πυραύλων. Η πλήρης

μαθηματική περιγραφή ενός ελεγκτή PID είναι αρκετά περίπλοκη, αλλά μια πολύ απλούστερη κατανόηση είναι πραγματικά ό, τι είναι απαραίτητο για την αποτελεσματική χρήση ενός PID.

Με τον " συντονισμό" των τριών σταθερών στον αλγόριθμο ελεγκτών PID, το PID μπορεί να παρέχει τη δράση ελέγχου που χρειάζεται για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της διαδικασίας. Η έξοδος του ελεγκτή μπορεί να περιγραφεί από τον τρόπο της απόκρισης του ελεγκτή σε ένα λάθος, ο βαθμός στον οποίο ο ελεγκτής κάνει υπερανύψωση από το setpoint και το βαθμό των ταλαντώσεων του συστήματος. Σημειώστε ότι η χρήση του αλγορίθμου PID για τον έλεγχο δεν εγγυάται τον βέλτιστο έλεγχο του συστήματος.

Μερικές εφαρμογές μπορούν να απαιτήσουν μόνο έναν ή δύο όρους για να παρέχουν τον κατάλληλο έλεγχο συστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό του κέρδους των ανεπιθύμητων όρων ελέγχου σε μηδέν. Ένας ελεγκτής PID θα λέγεται ελεγκτής p_i , pd , p ή i ανάλογα με την έλλειψη των αντίστοιχων όρων ελέγχου. Οι ελεγκτές p_i είναι ιδιαίτερα κοινοί, δεδομένου ότι η δράση του παραγωγικού όρου είναι πολύ ευαίσθητη στο θόρυβο μέτρησης.

Για να αντιμετωπίσουμε τα προβλήματα που υπάρχουν εγγενώς, μέσα σε έναν PID, προτείνουμε μία λύση η οποία χρησιμοποιεί μη ρυθμιζόμενους κινητήρες και αντιμετωπίζει την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει ένα αυτόνομο όχημα, σαν ανεξάρτητα τμήματα που ελέγχονται από τον ίδιο γενικό PID παραμετροποιημένο διαφορετικά κατά περίπτωση. Η τεχνική αυτή βασισμένη στη θεωρία υπολογισμού και συγκεκριμένα στην τεχνική του "διαίρει και βασίλευε", αποδείχθηκε ότι ήταν ικανή να "αναγκάσει" (επικουρούμενη από στοιχεία οδομετρίας) το αυτόνομο όχημα να πραγματοποιήσει στρέψεις ακόμη και 180° , διατηρώντας υψηλά ποσοστά ισχύος στους κινητήρες.

Οι αισθητήρες φωτός μπορούν, με ελάχιστες τροποποιήσεις στον κώδικα που έχουμε δώσει, να αντικατασταθούν από αισθητήρες υπερήχων ή υπερύθρων ή γυροσκόπιο ή πυξίδα.

Line Following Algorithms for Lego Mindstorms autonomous vehicles

MICHAEL – NICHOLAS SP. THERIANOS

Department of Automation Engineering

Piraeus University of Applied Sciences

P.Ralli & Thivon 250, Athens, 12244

GREECE

mit@ionio.gr

The post-graduate thesis outlined in this abstract is concerned with the study of basic Line Following algorithms for autonomous Lego Mindstorms vehicles. Initially a study of existing Line Following algorithms will take place in order to determine their field of application and at the same time outline their merits and disadvantages through case studies ((Garber 2013, Fargas 2015, Engin&Engin 2012). Next, these algorithms will be implemented and applied to an autonomous vehicle that uses a single light sensor for line following. The use of a single light sensor, although it imposes a number of constraints and difficulties related to accuracy, it reduces the cost of the autonomous vehicle while at the same time examines whether it is possible to implement fast and accurate line following robots that relay on a single light sensor. The aforementioned algorithms will be implemented using the LabView for Mindstorms integrated programming environment (IDE). The implemented algorithms will be tested using regulated and unregulated motors. Regulated motors are self-correcting motors where self-corrections are realized by an embedded in the motor PID controller which regulated the power delivered to the motors. Unregulated motors on the other hand allow the developer to fine control the motors' behavior according to real-time data obtained from them and thus provide the developer to surgically control the motion of the autonomous vehicle. Based on the results that will be obtained a comparison of the two approaches will take place. This thesis effectively is divided in two parts: The first one addresses the study of line following algorithms for single line sensor autonomous vehicles. The second one is concerned with experimentation, where the algorithms will be tested and the results obtained compared in order to determine the advantages and disadvantages related to them. These results will aid the engineer-developer to evaluate and access the obtained results when selecting a line following algorithm for a task in hand.

Key-Words: - Line following, line following algorithms, autonomous vehicles, tuning, oscillation, odometry

1 Introduction

Line following autonomous vehicles are used in various applications such as warehouse management, restaurant management, healthcare management systems, amongst others [1,2,3]. Line following, although at first seems a straight forward problem to solve, is a complex situation that encompasses a number of external factors that affect it. For instance, the surface on which the robot moves, the color of the line to be followed, the height of the light sensor from the surface that the robot moves etc., all play a significant role in achieving precise line following while maintaining acceptable rates of velocity. The velocity of an autonomous vehicle, hereafter AV, is a key aspect in AV management, since the time needed for a task to complete is proportional to the cost of the task. Thus, in the same time space, a fast moving AV completes more tasks than a slow moving one.

In this paper, we address the issue of maintaining high velocity for an AV that uses a single light sensor. The use of a single light sensor was based on an attempt to minimize the cost of the AV itself.

First, we provide a background on AVs and line following. The latter is based on the theory of automated control systems and in particular controllers. We then proceed, to examine in detail various different types of controllers presenting their benefits and drawbacks for the task in hand. Next, we provide enhancements on one particular controller, the PID controller, by introducing aspects of odometry in the controller's loop that ensure that velocity will not be sacrificed for precision. Finally, we compare our approach against a standard PID controller configuration in order to show our contribution to the field.

2 Background

AVs are mainly used in hazardous environments such as nuclear reactors, as well as for tedious and/or reparative tasks such as medicine delivery to patients, warehouse keeping or even floor cleaning. To do so they have to follow a pre-determined well-defined course. Furthermore, they have to interact with their environment, acquiring data that will be used in their navigation and movement process. In doing so, they engage in three discrete tasks the results of which are computationally combined so that the AV completes in a predetermined spatio-temporal framework its activity(ies).

2.1 Odometry

Odometry is the use of data from motion sensors to estimate or even calculate change in position over time[4]. Used on their own such data are not entirely reliable because they themselves rely on the interaction of the mechanical parts of the motors. However, when used in conjunction with other navigational data they can provide a means to enhance the precision of any corrective action

2.2 Perception of the surrounding space

AVs need to “know” the space in which they operate. Know refers to the process of acquiring environmental specific data of their surrounding space, evaluating them and using them in order to aid or enhance their navigational process. Such data include, but are not limited to, obstacle recognition, landmark recognition[5], arrival of an object to be stored in a warehouse.

2.3 Combined computational space

The term combined computational space refers to the algorithmic combination of data retrieved from odometry and the AV's surrounding space in order to establish a well formed virtual path on movement that matches the one that the AV has to follow in order to achieve its task in hand.

2.4 Line following

In most applications an AV has to follow a line from point A to point B and in between these points has to perform some tasks like placing books on shelves or administering medicine to patients. The space in which the AV has to move is very well defined in terms of colored lines that the AV has to follow (Figure 1). For instance, in a hospital ward the AV follows a line from the nurses' station or booth to a particular patient and issue a certain medicine. We are not concerned on how the medicine is issued but only how the AV is going to travel from the nurses' booth to the patient without spilling the medicine. Bear in mind that issuing medicines is a time constrained problem. In other words different medicines have to be issued to different patients in a ward in a given time.



Figure 1 Line following AV

Line following in general has to take into account a number of different contributing factors:

- The sampling frequency of the light sensor
- The light sensor's quality and technical specifications
- The AV's desired velocity
- The sensor's height in reference to the line to be followed
- The shape and width of the line that the Av has to follow
- The color and material of the line

- The color and material of the surface on which the AV navigates.

2.4.1 Sensor sampling frequency

In many cases the sampling frequency of a sensor is such that certain values have to be discarded in order to obtain a reliable representation of the AV's world. If too many values are used to determine the combined computational space, the need for corrective adjustments increases with little significance to the process as a whole due to the emerging oscillation related to consecutive adjustments. This in itself affects the operational velocity of the AV.

If an AV oscillates, the period of the oscillation hinders the AV's overall velocity. A large period implies significant decrease of the AV's velocity since the AV movement is a broken line (zigzag) rather than a straight line. The amount of sample to be discarded is closely related to the AV's velocity. The higher the larger the number of samples that have to be discarded.

2.4.2 Sensor's quality and technical specifications

Different light sensors produce different results for a particular line and point on it. This due to manufacturing issues. Manufacturing issues have to be taken into account during sensor calibration. Apart from manufacturing related issues sensor values may vary from sensor to sensor due to the height of the sensor from the line it follows. Experimentation has shown that a height between 0.5cm and 1.3cm, depending on the width of the line to be followed, produce reliable sample.

Another issue that is has to be taken under consideration is the vibration of the sensor due to the AV' movement and possible oscillation. If the sensor is extended far from the AV it is prone to vibration. Vibration will result in variable heights of the sensor during the AV's movement. This, in turn, will result in unreliable sensor reading. Consequently, the sensor has to be places as closely as possible to the AV and should be fastened to the AV as tightly as possible to eliminate any vibration. Shock absorbers are not to be considered as they do not work well given the weight of the sensor.

2.4.3 AV's desired velocity

The velocity that the AV has to move is fundamental to the precision of its movement. Firstly, as the velocity increases the sensor samples (given a fixed sampling rate) become less important. That is, not all sample are needed in producing the required adjustment in position, if one is needed.

The geometric nature of the path to be followed plays a very important role. A path that is made of short straights followed by sharp turns cannot be navigated solely by line following at high speeds. Do we reduce speed? The answer to this question is twofold. If speed is not of the essence then the answer is yes. However if speed is important then the answer is no and odometry data have to compensate for the inability to follow the path solely on light sensor readings. To sum it up, we need to follow a path at maximum velocity (whichever that is) without oscillation relying as much as possible on light sensor data and introducing odometry data whenever the need occurs i.e. sensor data in order to be reliable will result in velocity reduction.

2.4.4 Sensor height and position

Although, we mentioned that the light sensor has to be placed at a certain height form the line that forms the path to be followed we did not explain the reason as to why this is important.

Usually line following AV using light sensors operate the in reflected light intensity (RLI) mode. The concept behind RLI is that a light beam is emitted towards a surface and then the light returned due to reflection is measured. A bright

surface will reflect most of the emitted light, while a darker surface will absorb some of the emitted light, thus reflecting light at a lower intensity.

Apart from manufacturing issues, the sensor's height from the reflective surface is key to reliable measurements.

If the radius of the light spot emitted from the sensor is small, then although the intensity of the reflected light depicts precisely the color of the surface, the surface area in question is small and hence may be rendered "out of interest". On the other hand, if the radius is big then although a larger area is covered, the intensity of the reflected light is not as reliable because light is affected by its surrounding environment (ambient light).

Sensor height is not the only issue related to the physical position of the light sensor. The exact position of the sensor related to the AV is as well an important issue. The sensor has to be placed on either side of the AV so that the horizontal axis that runs through the center of the vehicle is parallel to the followed path. In order to ensure that this is the case the light sensor has to be placed in front of either wheel

2.4.5 Shape and width of the line forming the path

A thin line may cause more navigational problems than a thick one. The thinner the line the easier it is to overshoot it. By overshooting we refer to the condition that due to an acute adjustment the light sensor crossed and bypasses the line a circumstance in which the AV can no longer navigate. Thick path lines are best for line following as it becomes almost impossible to raise the aforementioned condition.

2.4.6. Path line and surrounding surface color.

The lighter the color of the path line the harder it becomes to follow it. One must ensure that the contrast between the path line's color and that of the surrounding surface is such that a clear distinction between the two is possible at all times irrespective of ambient light and shadows.

2.5 Lines followed by lines...

A path is a series of geometric shapes with a starting point and an ending point. Consequently a path is formed from straight lines, curves, turns, broken lines and intersections. Depending on its constituent parts a path requires different handling in order to achieve maximum reliability while maintaining high velocity levels. In this section we will examine each of a path's constituent parts in an attempt to show the issues associated with them.

2.5.1 Straight lines

Straight lines are the most straightforward geometric shapes for an AV to follow. Given that they are well formed, of an acceptable width, and of color that ensures a high contrast to the surrounding surface, straight line following is dependent on a good light sensor calibration and an accurate threshold estimation. A threshold in our case is the resulting reflected light intensity when the light sensor spot is half over the path line and half over the surrounding surface. As long as the light sensor spot abides to this condition the AV will move forward or backward without any deviation from the straight line. In order to follow a straight line fast one has to eliminate oscillation as oscillation results in overshooting as depicted in the following figure (**Error! Reference source not found.2**):

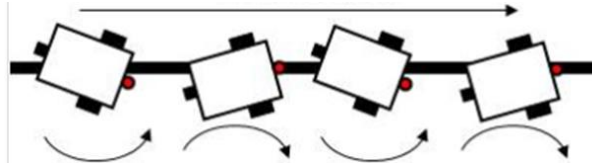


Figure 2 Oscillation during line following

2.5.2 Curves

Curves, as opposed to straight lines, are not so straightforward to follow. Since the AV tends to move on a straight line, a curve has to be tackled by consecutive adjustments in a manner that a curve is straightened. Oscillation to some extent will occur but should be kept to a minimal as far as its period is concerned. Figure 3 depicts the aforementioned issue

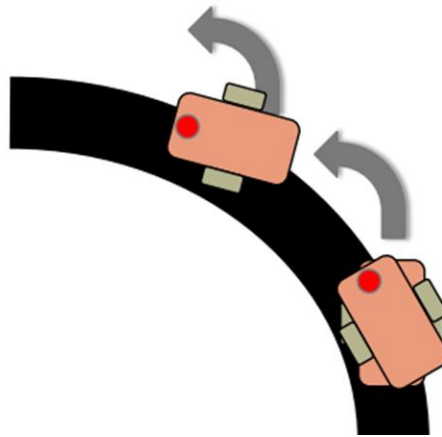


Figure 3 Curve related oscillation

Although smooth curves can be, to some degree, addressed as straight lines, sharp ones may need to be approached using a combination of light sensor data and odometry data.

2.5.3 Turns

Turns are perhaps the most difficult geometric shape an AV can encounter. Usually AV do not possess a steering system and as a result the only means for turning they possess is pivot and spin turns. These two types of turning differ significantly in their underlying concept. Pivot turns are achieved by stopping one motor and moving forward the other resulting in a shift in the AV's position. On the other hand, spin turns ensure no shift in the position of the AV. Spin turns are by far faster than pivot turns both in terms of velocity and resulting position. Figure 4 diagrammatically depicts the difference between the two types of turns.

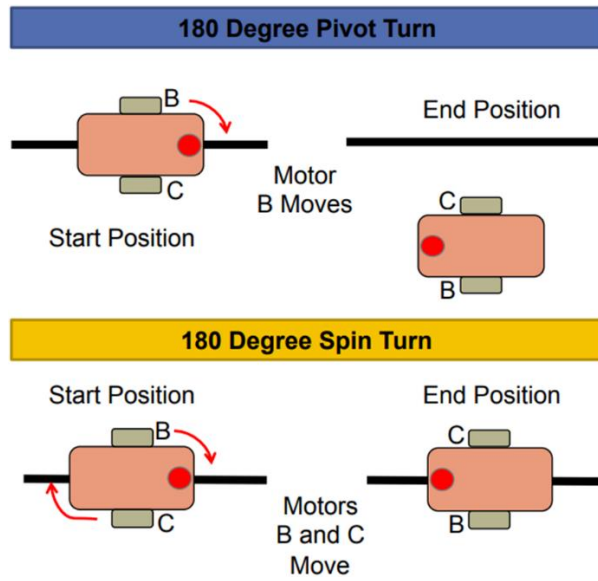


Figure 4 Pivot vs Spin turns

2.5.4 Broken lines

Broken lines can be viewed as consecutive straight lines joined in an angle. The angle itself can be wide, right or sharp. Be that as it may, broken lines are handled as straight lines and turns

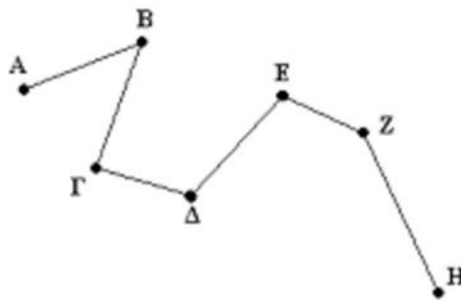


Figure 5 Broken line

2.5.4 Intersections

Intersections, due to their inherent geometric complexity, have to be handled using odometry data, since a line follower can detect them but cannot decide what to do with them unless specifically instructed. Specific instructions can only be given at specific points on the plane formed by the intersecting lines.

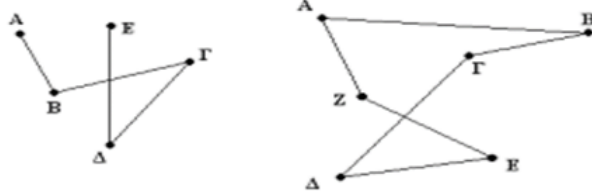


Figure 6 Intersections

3 Line following algorithms

As mentioned previously, in this work, we examine algorithms based on the theory of automated control systems, and in particular controllers. Such algorithms operate on data received from the controller's environment, such the intensity of reflected light, and corrective measures according to the values received in order to achieve the task in hand. The complexity of such algorithms depends entirely on what they control and how they do so.

3.1 On/Off Controller

On/Off controllers are the simplest kind of controllers as their operation is based on Boolean logic. If the value that controls the controller is above a threshold the controller is turned on otherwise it remains dormant.

In our case if the light sensor read black the AV is drifting, more and more, towards the black line, and must turn to the right – assuming a configuration where the light sensor is placed on the right hand side of the AV. If the light sensor reads white then the AV is moving far away from the black line in the opposite direction and thus has to turn to left. On.Off controllers are suitable for straight line following but the inherent mode of operation generated large period oscillation. Figure 7 the implementation of an On/Off controller using LabView.

The drawbacks associated with this approach are related to:

1. The large period of oscillation
2. The low velocity due to 1
3. The inability to handle curves, turns, broken lines and intersection
4. The zigzag movement of the AV

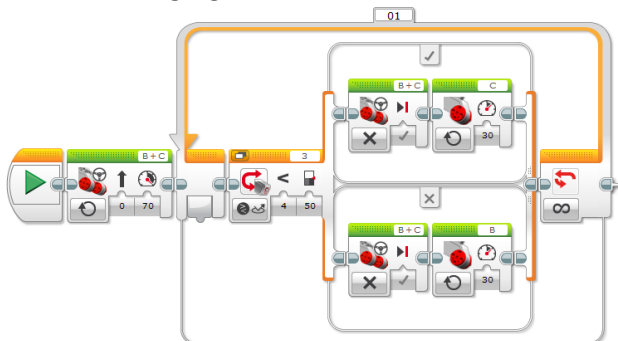


Figure 7 Implementation of an On/Off Controller

3.2 P-Controller

A P-controller or proportional controller is a linear control system with feedback where a correction is enforced on the control variable. This correction is proportional to the difference of the threshold and the value obtained from the light sensor. Such algorithms are best suited wherever the value we obtain (in our case the RLI value) changes rapidly over time. The controller's output is proportional to the error that occurs between the threshold and the measurement. In other words the controller's output is the product of the error times the proportional gain.

$$P_{out} = K_p e(t) + p_0$$

where:

P_{out} is the controller's output

K_p is the proportional gain

$e(t)$ is the error that occurs from the difference of the threshold minus the current measurement

p_0 is the controller's output when the error is 0

A serious drawback of this algorithm is its inability to eliminate the residual error.



Figure 8 Implementation of a P-Controller

Another issue associated with P-controllers is that they cannot possess knowledge of accumulated error. That in itself is considered as a limitation that hinders the ability of a p-controller to command a moving vehicle on a complex path. Error accumulation is significant because it incorporates all the errors that occurred during the AV's movement up to now. In as such, it can provide useful information regarding the AV's motion to this point and can be used to avoid extreme error variations in the future. Nevertheless a p-controller can:

1. Eliminate oscillation
2. Guarantee high velocity
3. Ensure straight line following at high speed
4. Reduced speed curve following

Thus it becomes obvious to the reader that it is a significant improvement to its On/Off counterpart. However it cannot achieve:

1. Right angle turning
2. Broken line following
3. Intersection handling

Due to these drawbacks we had to examine a variant of the P-controller, namely the PI controller

3.3 PI Controller

P-controllers rely on instantaneous data and possess no memory related to previous errors or previous error accumulation. The latter can be achieved through the use of a PI controller. Pi controllers use the notion of integration in order to obtain knowledge related to errors that occurred in the past. Time plays a significant role in this as shown by the following formula

$$K_p \Delta + K_I \int \Delta dt$$

Δ is the difference between the threshold and the sensor's value. K_I is the integration gain. Although this algorithm complements in this aspect the previous one it is not recommended for usage in situations where the situation or the real data change rapidly, and for this reason alone it will not be studied in depth. Furthermore, it can be considered as a subset of the PID algorithm presented in next section. However, for completion reasons alone, we provide the controller's block diagram

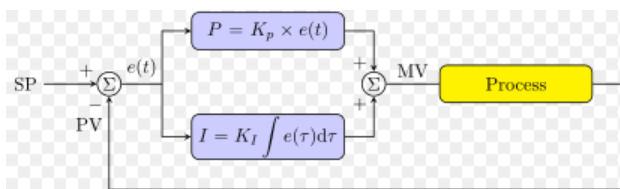


Figure 9 PI Controller

3.4 PID Controller

A PID algorithm could be considered as the flag ship of one variable feedback loop automated control systems controller. Not only it possesses memory but also it provides for "error look ahead". Since the main contribution of this work is based on enhancements on the PID controller, in this section we will discuss to some detail how a PID controller operates with respect to line following.

Consider the AV depicted in Figure 10. The red circle represents the light spot emitted by the light sensor. It is placed on ahead of the AV on its right hand side. Motors B and C are motion motors. As one can see the sensor's spot is half over the black line (line to be followed) and half over the line's surrounding space.

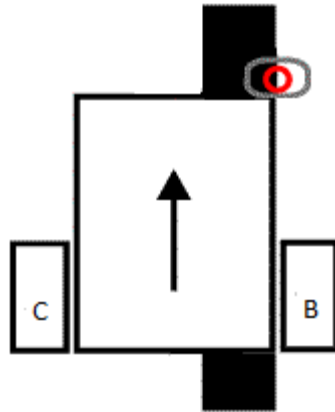


Figure 10 AV following a straight line

Assuming a threshold of 45 (RLI) when the sensor is as describe above we can safely assume that a left turn occurs when the value of RLI is less than 45 and a right turn occurs when the value of RLI is greter than 45 (see figure 11)

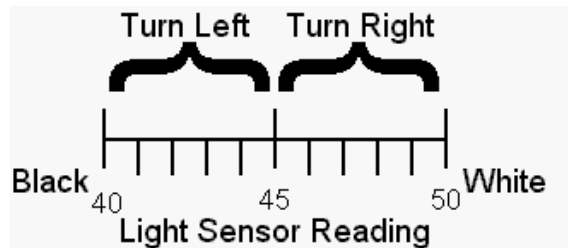


Figure 11 Sensor value interpretation

These assumptions will guarantee smoth line following of a straight line even when travelling at high speed. What happens when a turn is encountered. Smooth turn are handled in an acceptable manner. Sharp one they leave a lot to be desired. Let us now devide our range of values into three discreate areas. One for turning left, one for going straight and one for turning right as shown in figure 12

This approach is an improvement on the previous one. Adding a state (forward movement) betters the behaviour of the AV. Adding more states will fine grain the AV's movement altogether. Having said that the question that arises is how many such states are needed in order to achieve the smothest possible movement on a complex path.

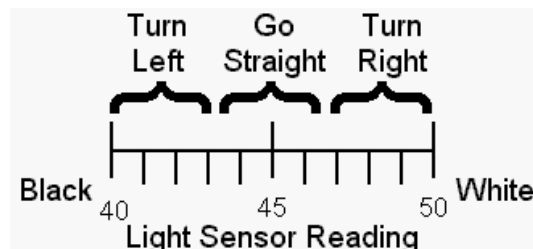
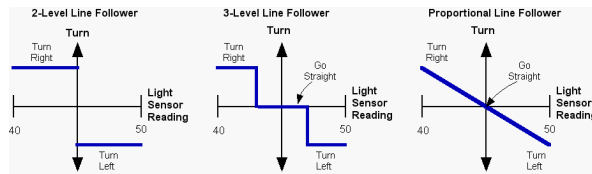


Figure 12 Accommodating for turns and straight line movement

The answer lies in error normalisation. We need to find the means to normalise the error instead of adding more and more states. Error normalisation is achieved via a P-Controller as we demonstrated above. Diagrammatically, this can be shown as follows:



So far what we have is nothing more than a P-Controller. Let us provide our controller with some memory. An integral is the accumulation of a value over time. Adding an integral part in the existing P-Controller we produce a controller, a PI controller, that possesses the knowledge of its previous behaviour. Thus calculating an adjustment in the AV's movement becomes

$$\text{Turn} = K_p * (\text{error}) + K_i * (\text{integral})$$

$K_p * (\text{error})$ is the P-Controller part

$K_i * (\text{integral})$ is the memory

The integral is defined by

$$\text{integral} = \text{integral} + \text{error}$$

K_i is the integral gain.

What remains now is to provide our controller with some kind of look ahead capability. We would like to be able to foresee what is next in terms of what will be the next error that we will encounter. Although it seems far fetched it is not as hard as it sounds. The addition of a derivative accommodates for this need. We can predict the future with respect to errors by assuming that the next change in error will be the same as the previous one. In other words the values of the previous error and that of the next error are the same. This implies that the next error will be the present error plus the change between the previous two readings of the light sensor. The change in error between two consecutive points or better instances is called derivative. The derivative can be considered as the slope of a line.

Hence, the value of the new error is as follows

$$\text{error} = (\text{error}) - (\text{last error})$$

where error is the threshold minus the sensor's reading.

As a result, turning adjustments for our AV are now calculated as follows:

$$\text{Turn} = K_p * (\text{error}) + K_i * (\text{integral}) + K_d * (\text{derivative})$$

Below we provide the implementation of a PID controller



Figure 13 Error calculation

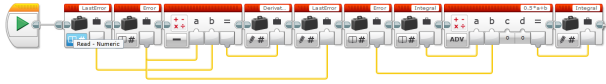


Figure 14 Integral and derivative calculation

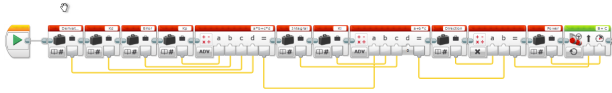


Figure 15 Steering calculation

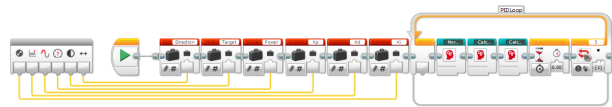


Figure 16 PID main loop

4 Contributions – Enhanced PID

Although a PID controller is suitable for most line following situations there are some cases where the error changes are such that the AV overshoots or takes considerable time to settle. To accommodate for these two issues we altered the PID's main loop by adding a parametric time delay. The delay time is calculated according to the value of the foreseeable error so that noise is taken out of the equation. A beneficial side effect of the time delay proved to be the rejection of light sensor values that would not contribute in significant course adjustment. On the contrary they would "confuse" the controller as it would be unable to process them effectively.

We then proceeded in providing the controller's main loop with data related to odometry. Odometry data can, under certain circumstances, be used to calculate the exact position of a moving object. Adding odometry data to a PID levitates the burden of having to understand an intersection. Once we know that the AV is on the intersection, we know it because we travelled so far (specific distance) we can take the necessary actions to follow the direction we have to. For instance if the medicine has to be delivered to patient X whose bed is on the left branch of the intersection we know that we have to turn left and then follow the line to the patient's bed.

From experimentation we concluded that enhancing a PID loop with time delay and odometry data not only made it operate properly on right angles and intersections, but also contributed in maintaining high speed while doing so. Overall we calculated a 20%-25% increase in the operational speed of our enhanced PID for a given path that incorporated straight lines, curves, acute as well as smooth angles and intersection.

5 Future Work

Fine tuning of our enhance PID is an area that requires further investigation. Although the **Ziegler-Nichols** tuning method still applies in our case it does not accommodate for odometry data. Adaptive tuning is also an area that can be researched. By adaptive tuning we refer to the process that the controller's tuning is incorporated into its main loop and depends on values within its own computational space. For instance, variable gains could be introduced that will be calculated according to the outcome of previous errors, derivatives and integrals. The area of research, in our belief, is open for further investigation and experimentation.

6 Conclusion

In this paper we address the issue of line following using a single light sensor autonomous vehicle. Key to our approach was to maintain the Av's velocity as high as possible. First, we addressed issues related to line following such as straight line, curve, turn, broken line following as well as intersection handling. We then proceeded by examining common practices to line following. In doing so we reviewed existing algorithms, all from the field of automated control systems, pinpointing their limitations with respect to the task in hand. On/Off controllers were proved inadequate in following a complex path as did P-controllers. PI and PD controllers resolved some of the issues that their simpler counterparts were unable to do so but were limited to straight lines and curves. The PID controller proved to be a significant improvement over the other alternatives, limited however by sharp turns and intersections. In order to resolve the inherent limitations of the PID controller, we presented an enhancement of the PID controller. This enhancement concerns two aspects of the controller. The first one has to do with the controller's main loop. By adding a time delay loop we ensured that a number of sensor readings were not taken in account in the computational space of the controller thus eliminating noise and redundant information. The second one, an innovation by itself, was the introduction of odometry data into the controller's loop hence creating a two variable PID controller. The innovation is that the controller's loop exhibits an "intelligence" related to when to use odometry data. When the absolute value of the error increases significantly odometry data are used to compensate. As a result we implemented a PID controller able to follow a complex path made of sharp curves, sharp turns and intersections.

7 Acknowledgements

I would like to take this opportunity to thank my supervisor for his assistance, his motivation and his encouragement in completing this work. Needless to say that I would like to extend my thanks and gratitude to my family for their support during this work.

References:

- [1] Deepak Punetha, Neeraj Kumar, Vartika Mehta, Development and Applications of Line Following Robot Based Health Care Management System, *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, Vol.2, No.8, 2013, pp. 2446-2450.
- [2] Harshit Kaur Chawla , Pallavi Rana , Priyasi, An RFID based warehouse robot, *International Journal of Technical Research and Applications*, Special Issue 39 (KCCEMSR), March 2016, pp. 91-93,
- [3] Pakdaman, M.; Sanaatiyan, M.M., Design and Implementation of Line Follower Robot, *Computer and Electrical Engineering*, 2009. *ICCEE '09*, Vol.2, No., pp.585-590, 2009.

- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Odometry>
- [5] Hatem Nasr and Bir Bhanu, Landmark recognition for autonomous mobile robots, Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation 1988, pp. 1218-1223
- [6] M. Zafri Baharuddin, Izham Z. Abidin, S. Sulaiman Kaja Mohideen, Yap Keem Siah, Jeffrey Tan Too Chuan, Analysis of Line Sensor Configuration for the Advanced Line Follower Robot, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.523.6444&rep=rep1&type=pdf>. 2005
- [7] Gregory Dudek and Michael Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2010.