



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Προηγμένες Τεχνολογίες Υπολογιστικών Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και Σχεδίαση Παραμετρικού Ελεγκτή για Έλεγχο μη Επανδρωμένου
Οχήματος**

**Ντελλής Σ. Αχιλλεύς
Α.Μ. 21021**

Εισηγητής: Δρ Βουτσινάς Στυλιανός

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και Σχεδίαση Παραμετρικού Ελεγκτή για Έλεγχο μη Επανδρωμένου Οχήματος

**Ντελλής Σ. Αχιλλεύς
Α.Μ. 21021**

Εισηγητής:

Δρ Βουτσινάς Στυλιανός

Εξεταστική Επιτροπή:

| Δρ. Βουτσινάς Στυλιανός | Δρ. Βογιατζής Ιωάννης | Δρ. Φατούρος Σταύρος |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | |

Ημερομηνία εξέτασης 20/02/2023

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος Ντελλής Αχιλλεύς του Σπυρίδων, με αριθμό μητρώου **21021** φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Προηγμένες Τεχνολογίες Υπολογιστικών Συστημάτων του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών



ΝΤΕΛΛΗΣ ΑΧΙΛΛΕΥΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου Δρ. Στέλιος Βουτσινάς, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με την σχεδίαση εύρωστων παραμετρικών ελεγκτών για τον έλεγχο ενός αυτόνομου οχήματος. Οι παραμετρικοί ελεγκτές σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι στατικοί και να εφαρμόζονται σε όλο το εύρος τιμών των αβέβαιων παραμέτρων του οχήματος. Οι παραμετρικοί ελεγκτές εφαρμόζονται για τον έλεγχο της πλάγιας κίνησης του οχήματος το οποίο εισέρχεται σε διάφορες κυρτώσεις του δρόμου. Σκοπός των ελεγκτών είναι να κρατάνε το όχημα στην μέση του οδοστρώματος μηδενίζοντας την απόσταση του οχήματος από μια σταθερή γραμμή κίνησης. Για τον σκοπό αυτό στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφοροι δυναμικοί και στατικοί ελεγκτές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνονται δύο στατικοί ελεγκτές, ένας εύρωστος ελεγκτής τριών όρων PID και ένας εύρωστος ελεγκτής ακολουθήσης αυθαίρετων σημάτων. Αρχικά παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο του οχήματος, στην συνέχεια σχεδιάζονται οι δύο ελεγκτές και κατόπιν εφαρμόζονται στο μοντέλο του οχήματος και τα αποτελέσματα αυτών δίνονται μέσω προσομοίωσης για διάφορες καμπυλότητες του οδοστρώματος.

ABSTRACT

The present thesis concerns with the design of robust parametrical controllers for the control of an autonomous vehicle. Parametrical controllers are designed to be static and applied over the range value of the uncertain parameters of vehicle. Parametrical are applied for the control line keeping of latera motion of vehicle which entering in curves of road. The objective of those controllers is to keep the vehicle in the center of a road and the distance of guideline tends in zero. For this purpose, many controllers, dynamics and statics have been suggested. In the present thesis are proposed two statics controllers, a robust PID controller for the vehicle lateral control and a robust controller for arbitrary reference command tracking. Initially, it is presented the mathematical model of vehicle and then controllers are designed and applied to the vehicle. Finally, simulation results are presented for various curved of the road.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Έλεγχος μη επανδρωμένων οχημάτων

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ελεγκτής, PID, Εύρωστος έλεγχος, Ελεγκτής αυθαίρετων
σημάτων, μη επανδρωμένα οχήματα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μοντέλο αυτοκινήτου..... | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σχεδίαση ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων..... | 20 |
| 3.1 Ελεγκτής ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων..... | 20 |
| 3.2 Υπολογισμός παραμέτρων ελεγκτή ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων | 24 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ελεγκτής Τριών όρων PID..... | 33 |
| 4.1 Εύρωστος Ελεγκτής τριών όρων (PID) | 33 |
| 4.2 Υπολογισμός παραμέτρων ελεγκτή PID | 36 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προσομοίωση Συστήματος Οχήματος Ανοιχτού Βρόχου και Κλειστού Βρόχου | 40 |
| 5.1 Προσομοίωση μοντέλου αυτοκινήτου ανοιχτού βρόχου | 40 |
| 5.2 Εφαρμογή του εύρωστου ελεγκτή τριών όρων στο μοντέλο του οχήματος..... | 43 |
| 5.3 Εφαρμογή του εύρωστου ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων | 46 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 49 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 51 |
| ΒΙΒΛΙΑ | 51 |
| ΕΡΓΑΣΙΕΣ | 51 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1: Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον πλευρικό έλεγχο | 17 |
| Σχήμα 2: Σύστημα κλειστού βρόχου ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων | 23 |
| Σχήμα 3:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΚΤΗ | 35 |
| Σχήμα 4:Είσοδος Συστήματος..... | 40 |
| Σχήμα 5: Σήμα αναφοράς | 40 |
| Σχήμα 6: Γωνία πλαγιολίσθησης | 41 |
| Σχήμα 7:Ρυθμός μεταβολής της γωνίας εκτροπής..... | 41 |
| Σχήμα 8: Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαπτόμενης γραμμής οδήγησης | 42 |
| Σχήμα 9: Πλευρική απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης..... | 42 |
| Σχήμα 10: Γωνία στροφής των εμπρός ελαστικών | 42 |
| Σχήμα 11: Εντολή Εισόδου Κλειστού Βρόχου..... | 43 |
| Σχήμα 12: Διαταραχές Κλειστού Βρόχου..... | 43 |
| Σχήμα 13: Γωνία Πλαγιολίσθησης | 44 |
| Σχήμα 14:Ρυθμός μεταβολής της γωνίας Εκτροπής..... | 44 |
| Σχήμα 15: : Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαπτόμενης γραμμής οδήγησης | 45 |
| Σχήμα 16: Πλευρική απόκλιση από την γραμμή οδήγησης | 45 |
| Σχήμα 17: Εντολή οδήγησης της εμπρόσθιας γωνιακής διεύθυνσης | 45 |
| Σχήμα 18: Σήμα αναφοράς Διαταραχών | 46 |
| Σχήμα 19: Γωνία πλαγιολίσθησης με ελεγκτή αυθαίρετου σήματος | 47 |
| Σχήμα 20: Μεταβολή της γωνίας εκτροπής με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων | 47 |
| Σχήμα 21:Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαπτόμενης γραμμής οδήγησης με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων..... | 47 |
| Σχήμα 22: Πλευρική απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων | 48 |
| Σχήμα 23:Γωνία στροφής των εμπρόσθιων ελαστικών με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων | 48 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Περιγραφή των μεταβλητών και παραμέτρων του συστήματος..... | 19 |
|--|----|

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

PID Proportional Integral Derivative

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνουν αναφορές, στα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας αυτής, στην εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων και τέλος στον έλεγχο των μη επανδρωμένων οχημάτων ως προς τη διατήρηση της λωρίδας οδήγησης κατά την πορεία του οχήματος.

1.1 Μη επανδρωμένα οχήματα παρόν και μέλλον

Η ιστορία των οχημάτων είναι μεγάλη καθώς τα πρώτα αυτοκίνητα εμφανίστηκαν περίπου στο τέλος του 1790 μ.Χ. Από τότε και μέχρι σήμερα έχουν γίνει μεγάλα άλματα στον τομέα της αυτοκίνησης. Τα τελευταία χρόνια η αυτοκινητοβιομηχανία έχει δείξει μεγάλο ενδιαφέρον στην ασφάλεια των οχημάτων και των οδηγών. Κάθε χρόνο εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν την ζωή τους από ατυχήματα, εκ των οποίων στο 94% ευθύνονται οι οδηγοί [B.59]. Για το λόγο αυτό προτάθηκε η ιδέα των αυτόνομων οχημάτων. Τα αυτόνομα οχήματα ήταν μια ουτοπία στο μυαλό του ανθρώπου πριν περίπου έναν αιώνα. Η πρώτη απόπειρα ενός μη επανδρωμένου οχήματος έγινε από τον Ισαάκ Νεύτωνα το 1680 μ. Χ., χωρίς όμως αυτό να καταφέρει να έχει μια πρακτική εφαρμογή. Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετά αυτόνομα οχήματα που μπορούν να οδηγηθούν χωρίς οδηγό. Με τον όρο μη επανδρωμένα οχήματα νοούνται τα οχήματα τα οποία μπορούν να εκτελέσουν όλες τις λειτουργίες από μόνα του, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση τιμονιού ή η ανθρώπινη παρέμβαση.

Ένα αυτόνομο όχημα απαιτεί πλήθος αισθητήρων για την συλλογή πληροφοριών από τον δρόμο καθώς και μια μονάδα επεξεργασίας η οποία θα κάνει την ανάλυση των σχετικών δεδομένων. Οι αισθητήρες που χρειάζονται είναι GPS, κάμερες, ραντάρ, Lidar κ.α [B.57]. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για να μπορούν να ανιχνεύουν και να αναγνωρίζουν τον περιβάλλοντα χώρο, να κρατάνε αποστάσεις από τα γειτονικά οχήματα και να κρατάνε μια σταθερή πορεία με βάση των γραμμών (λουρίδες) των αυτοκινητοδρόμων.

Τα μη επανδρωμένα οχήματα φέρνουν μια μεγάλη αλλαγή στις βιομηχανίες και στην οικονομία. Μελέτη που έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [B.58] το 2013 έδειξε ότι πάνω από 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν από τα αυτόματα οχήματα. Η εξοικονόμηση αυτή γίνεται από την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, την μείωση των ατυχημάτων κ. α.

Η στροφή στην αυτόνομη οδήγηση μπορεί να αποφέρει αρκετά μεγάλα οφέλη στους ανθρώπους. Μείωση της ιδιοκτησίας των αυτοκινήτων με ταυτόχρονη εξοικονόμηση θέσεων στάθμευσης, καθώς παράλληλα και τη δυνατότητα μετακίνησης ατόμων που δε δύναται να οδηγήσουν, όπως

ηλικιωμένοι, άτομα με αναπηρία και νέους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με πολλά μικρά αυτόνομα οχήματα τα οποία θα εκτελούν επαναλαμβανόμενες και συχνές διαδρομές [B.59], [B.69],[B.70].

Ένα ακόμη όφελος από την αυτόνομη οδήγηση θα είναι η μείωση του χρόνου οδήγησης των ανθρώπων. Με βάση έρευνας διεξάχθηκε στις ΗΠΑ ο μέσος άνθρωπος σπαταλάει περίπου 50,6 λεπτά την ημέρα για οδήγηση. Με τα αυτόνομα οχήματα ο άνθρωπος θα μπορεί να κοιμάται, να διαβάζει ή να μαθαίνουν μια νέα δεξιότητα, στο χρόνο αυτό [B.60][B.61].

Τέλος οι βιομηχανίες αυτοκινήτου θα δώσουν μεγαλύτερη έμφαση στο λογισμικό σχεδίασης του αυτόνομου οχήματος παρά στο υλικό. Έτσι ολοένα και περισσότερες εταιρίες τεχνολογίας θα μπαίνουν στην κατασκευή αυτόνομων οχημάτων (Microsoft, Apple, Google, Tesla κ.α).

1.2 Έλεγχος της διατήρησης της γραμμής οδήγησης στους αυτοκινητόδρομους

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια αναφορά στις διάφορες τεχνικές ελέγχου για τη διατήρηση της γραμμής οδήγησης ενός αυτόνομου οχήματος στους αυτοκινητόδρομους. Το πρόβλημα της διατήρησης της γραμμής είναι ένα πρόβλημα πλευρικού ελέγχου και έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές ελέγχου στη βιβλιογραφία.

Ο έλεγχος της γωνίας στροφής ο οποίος βασίζεται στην πλευρική κίνηση του οχήματος έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [B.64][B.65][B.66]. Ο έλεγχος της γωνίας στροφής παρέχει μεγαλύτερη στιβαρότητα στη σχεδίαση του ελεγκτή, διότι υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της μη γραμμικότητας του συστήματος οδήγησης του οχήματος και του βρόχου ελέγχου της γωνίας στροφής.

Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση του ελεγκτή διατήρησης της απόκλισης από τη γραμμή οδήγησης, η ροπή στήριξης του οχήματος, να αποτελεί είσοδο για το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιώντας ένα στατικό νόμο ανατροφοδότησης κατάστασης, με βάση τη θεωρία ελέγχου H_2 [B.67].

Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου του παραπάνω προβλήματος είναι η χρήση του εύρωστου ελεγκτή H_∞ [B.62]. Ο νόμος ελέγχου σχεδιάζεται και εφαρμόζεται στο μη γραμμικό σύστημα του οχήματος. Ένας άλλος νόμος ελέγχου που προτείνεται για τον έλεγχο είναι ο διπλός νόμος ανατροφοδότησης κατάστασης για το γραμμικό σύστημα του οχήματος [B.63].

Επίσης προτείνετε για τον έλεγχο των αυτόνομων οχημάτων ο έλεγχος του οχήματος με κάμερες και αναγνώρισης εικόνας [B.71]. Με το πέρασμα των χρόνων στον τομέα αυτό βοήθησε η τεχνική νοημοσύνη, η οποία πλέον χρησιμοποιείται στα αυτόνομα οχήματα για να βελτιστοποιήσει τους

αλγόριθμους αναγνώρισης εικόνας, του συστήματος ελέγχου, την ανάλυση των δεδομένων, την εκτίμηση της τιμής εξόδου κ.α. Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης είναι οι αλγόριθμοι νευρωνικών δικτύων, ασαφούς λογικής και οι γενετικοί αλγόριθμοι [B.72],[B.73].

Στην παρούσα εργασία προτείνονται δύο διαφορετικοί νόμοι ελέγχου για την απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης. Ένας εύρωστος ελεγκτής τριών όρων (PID) και ένας εύρωστος ελεγκτής αυθαίρετων συστημάτων. Η τροχιά της γραμμής οδήγησης μοντελοποιείται ως εξωτερική διαταραχή και ως είσοδο του συστήματος επιλέγεται η γωνία στροφής των εμπρόσθιων ελαστικών.

Στο κεφαλαίο δύο παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο του οχήματος. Το εν λόγω μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι το γραμμικό μοντέλο πλευρικής κίνησης του οχήματος. Οι παράμετροι c_f, c_r και u θεωρούνται αβέβαιες παράμετροι και παίρνουν τιμές μέσα σε ένα πεδίο. Η επίδραση του ελεγκτή ξεκινάει με την κίνηση του οχήματος ($u \neq 0$).

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αρχικά η θεωρία σχεδίασης του ελεγκτή εύρωστης ακολουθίας αυθαίρετων σημάτων και εν συνεχεία γίνεται η εφαρμογή του ελεγκτή στο μοντέλο του οχήματος και προσδιορίζονται οι παράμετροι του ελεγκτή.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αρχικά η θεωρία σχεδίασης του εύρωστου ελεγκτή τριών όρων PID και στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή του ελεγκτή στο μοντέλο του οχήματος και προσδιορίζονται οι παράμετροι του ελεγκτή.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται προσομοίωση του συστήματος ανοιχτού και κλειστού βρόχου και παρουσιάζονται τα διαγράμματα του διανύσματος κατάστασης του οχήματος, για το σύστημα ανοιχτού βρόχου και κλειστού βρόχου μετά από την εφαρμογή των δύο ελεγκτών. Η προσομοίωση του συστήματος ανοιχτού και κλειστού γίνεται για ελάχιστες, μεσαίες και μέγιστες τιμές των αβέβαιων παραμέτρων. Η προσομοίωση γίνεται στο λογισμικό πακέτο Mathematica.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και προτείνεται ένας από τους δύο ελεγκτές. Τέλος προτείνεται μια περαιτέρω μελέτη των αποτελεσμάτων της εργασίας και η προσομοίωση των ελεγκτών σε πραγματικό αυτόνομο όχημα.

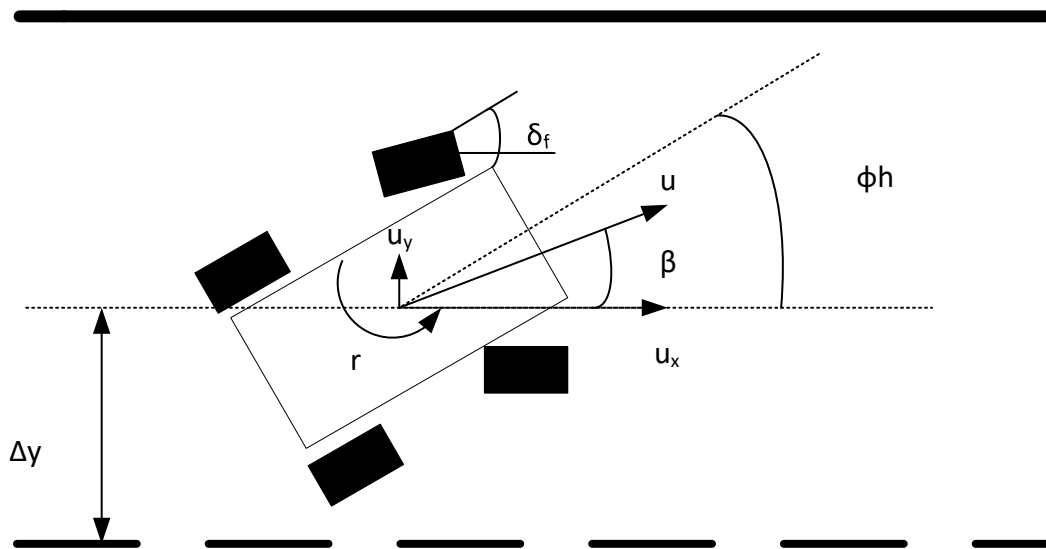
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μοντέλο αυτοκινήτου

Equation Chapter (Next) Section 2

Στον παρόν κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση του μοντέλου του μαθηματικού μοντέλου του οχήματος. Το μαθηματικό μοντέλο [A.12] είναι σημαντικό για την εύρεση των τιμών του παραμετρικού ελεγκτή που θα σχεδιασθή στα επόμενα κεφάλαια. Στην περίπτωση αυτή η γωνία στροφής των εμπρός ελαστικών (δ_f) είναι η έξοδος του ελεγκτή και η είσοδος του συστήματος, ενώ η απόκριση του συστήματος είναι μία αλλαγή στην πλευρική απόκλιση του συστήματος (Δ_y). Ένας από τους τρόπους μοντελοποίησης αυτών των δυναμικών είναι το μοντέλο “single-track” (μοντέλο δύο διευθύνσεων). Στην παρούσα εργασία αυτό το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των παραμέτρων των ελεγκτών ([B.1]-[B.3]).

Το μοντέλο αυτό είναι γραμμικοποιημένο γύρω από τα μη γραμμικά φαινόμενα του πραγματικού μοντέλου, όπως η πρόσφυση, η ολίσθηση του τροχού κ.α. ([B.3]). Η σχεδίαση των ελεγκτών θα γίνει με βάση αυτό το γραμμικό μοντέλο, με τη σημείωση ότι θα μπορούν να δρουν το ίδιο και στο μη γραμμικό μοντέλο, όπως επίσης και στο πραγματικό μοντέλο του οχήματος.

Το μοντέλο «single-track» αποτελείται από πέντε καταστάσεις, μία είσοδο (την γωνία στροφής δ_f) και μία έξοδο την πλευρική απόκλιση Δ_y (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον πλευρικό έλεγχο

Το μοντέλο μπορεί να γραφτεί με την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(q)x(t) + Bu_f(t) + D\rho_{ref}(t) \\ y(t) &= cx(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου: $x(t) = [\beta \ r \ \varphi_h \ \Delta y \ \delta_f]^T$, u_f είναι η εντολή οδήγησης της γωνίας στροφής των μπροστινών ελαστικών, $\rho_{ref} = 1/R_{ref}$ είναι η καμπυλότητα από τη γραμμή οδήγησης, β είναι η γωνία πλαγιολίσθησης του οχήματος, r η μεταβολή της γωνίας εκτροπής (yaw), φ_h η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κέντρου βάρους του οχήματος και της εφαπτόμενης με τη γραμμή οδήγησης, Δy η πλευρική απόκλιση και δ_f η γωνία στροφής των μπροστινών ελαστικών.

$$A(q) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ u & 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -u \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$C = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0) \quad (2.5)$$

όπου:

$$a_{11} = -\frac{c_f + c_r}{m * v} \quad (2.6)$$

$$a_{12} = -1 + \frac{c_r * l_r - c_f * l_f}{m * v^2}; \quad (2.7)$$

$$a_{21} = \frac{c_r * l_r - c_f * l_f}{J} \quad (2.8)$$

$$a_{22} = \frac{-(c_r * l_r^2 - c_f * l_f^2)}{J * v}; \quad (2.9)$$

$$b_{11} = \frac{c_f}{m * u} \quad (2.10)$$

$$b_{21} = \frac{c_f * l_f}{J} \quad (2.11)$$

Οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων (2.6)-(2.11) δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Περιγραφή των μεταβλητών και παραμέτρων του συστήματος

| Σύμβολο | Επεξήγηση | Τιμή |
|---------|---|--------------------------|
| m | Μάζα οχήματος | 1,5Kg |
| u | Ταχύτητα του οχήματος | 0,2 – 40 $\frac{m}{sec}$ |
| l | Το μήκος των τροχών | |
| l_f | Η απόσταση του κέντρου βάρους με τον εμπρόσθιο τροχό | 0,15m |
| l_r | Η απόσταση του κέντρου βάρους με τον οπίσθιο τροχό | 0,14m |
| c_f | Γωνιακή σκληρότητα (ακαμψία) των εμπρόσθιων ελαστικών | 0.25 – 1(N / rad) |
| c_r | Γωνιακή σκληρότητα (ακαμψία) των οπίσθιων ελαστικών | 500 – 1500(N / rad) |
| J | Η ροπή αδράνειας | 0,09Kg m^2 |

Οι παράμετροι u, c_f, c_r θεωρούνται αβέβαιες παράμετροι οι οποίες παίρνουν τιμές στο πεδίο των αβεβαιοτήτων \mathbb{Q} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σχεδίαση ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων

3.1 Ελεγκτής ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων

Equation Chapter (Next) Section 3

Έστω ένα σύστημα χρονικά αμετάβλητο και γραμμικό που περιγράφεται με το ακόλουθο μοντέλο [A.2],[B.16].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(q)x(t) + Bu(t) + Dw(t) \\ y(t) &= cx(t)\end{aligned}\quad (3.1)$$

και ένα σύστημα που παράγει αυθαίρετα φραγμένα σήματα με φραγμένες r παραγώγους

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) \quad (3.2)$$

$$y_r(t) = c_r x_r(t) \quad (3.3)$$

όπου $y_r(t) \in \mathbb{R}$, $x_r(t) \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ και $x_{r,0}$ αυθαίρετο διάνυσμα αρχικών συνθηκών και

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -d_r & -d_{r-1} & -d_{r-2} & \cdots & -d_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$c_r = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (3.5)$$

Επίσης ισχύει για το σύστημα (3.2)-(3.3)

$$y_r^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i y_r^{(r-i)}(t) = 0 \quad (3.6)$$

Το σύστημα των διαταραχών περιγράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$w^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i w^{(r-i)}(t) = 0 \quad (3.7)$$

Το σφάλμα ακολούθησης ορίζεται:

$$e(t) = y(t) - y_r(t) \quad (3.8)$$

Αν παραγωγίσουμε το σφάλμα r – φορές ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$e^{(r)}(t) = c(q)x^{(r)}(t) - y_r^{(r)}(t) = c(q)x^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i y_r^{(r-i)}(t) \quad (3.9)$$

η οποία μπορεί να γραφεί:

$$e^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i e^{(r-i)}(t) = c(q) \sum_{i=1}^r d_i x^{(r-i)}(t) \quad (3.10)$$

Στην συνέχεια δηλώνουμε τις ακόλουθες μεταβλητές:

$$\begin{aligned} z(t) &= x^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i x^{(r-i)}(t) \\ \tilde{u}(t) &= u^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i u^{(r-i)}(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

και προκύπτει το ακόλουθο επαυξημένο σύστημα:

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = \tilde{A}(q) \tilde{x}(t) + \tilde{b}(q) \tilde{u}(t) \quad (3.12)$$

όπου:

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} e(t) & e^{(1)}(t) & \dots & e^{(r-1)}(t) & z(t) \end{bmatrix}^T \quad (3.13)$$

$$\tilde{A}(q) = \begin{bmatrix} A_r & \tilde{c}(q) \\ 0_{n \times r} & A(q) \end{bmatrix}, \tilde{b}(q) = \begin{bmatrix} 0_{r \times 1} \\ b(q) \end{bmatrix}, \tilde{c}(q) = \begin{bmatrix} 0_{(r-1) \times n} \\ c(q) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Στο σύστημα (3.12) εφαρμόζεται ένας στατικός ελεγκτής ανατροφοδότησης κατάστασης της ακόλουθης μορφής:

$$\tilde{u}(t) = f \tilde{x}(t) = f_1 \tilde{e}(t) + f_2 z(t) \quad (3.15)$$

όπου: $\tilde{e}(t) = \begin{bmatrix} e(t) & e^{(1)}(t) & \dots & e^{(r-1)}(t) \end{bmatrix}^T$, $f_1 \in \mathbb{R}^{1 \times r}$ και $f_2 \in \mathbb{R}^{1 \times n}$

Ορισμός: το πρόβλημα της εύρωστης ασυμπτωτικής ακολούθησης εντολής είναι επιλύσιμο (δηλαδή η έξοδος του αβέβαιου συστήματος ακολουθεί το σήμα αναφοράς καθώς το σφάλμα τείνει στο μηδέν) αν υπάρχει στατικός ελεγκτής ανατροφοδότησης κατάστασης της μορφής $\tilde{u}(t) = f \tilde{x}(t)$, έτσι ώστε το χαρακτηριστικό πολυώνυμο (3.16) να είναι εύρωστα ευσταθές [B.55],[B.56].

$$\tilde{p}_{cl}(s, q, f) = \det[sI_{r+n} - \tilde{A}(q) - \tilde{b}(q)f] \quad (3.16)$$

Αν υπάρχει ελεγκτής της μορφής $\tilde{u}(t) = f \tilde{x}(t)$ που κάνει το επαυξημένο σύστημα εύρωστα ευσταθές τότε το σφάλμα $e(t)$ οδηγείται ασυμπτωτικά στο μηδέν καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο, με αυθαίρετες αρχικές συνθήκες ($\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0$).

Ο νόμος ελέγχου $\tilde{u}(t) = f \tilde{x}(t)$ μπορεί να εκφραστεί με όρους του αρχικού συστήματος ως εξής:

$$u^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i u^{(r-i)}(t) = \sum_{i=1}^r f_{1,i} e^{(i-1)}(t) + f_2 \left(x^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i x^{(r-i)}(t) \right) \quad (3.17)$$

όπου: $f_{1,i}$ ($i = 1, \dots, r$) είναι τα στοιχεία του f_1 . Με βάση τα παραπάνω οι παραπάνω εξισώσεις μπορεί να γραφούν στον χώρο κατάστασης ως εξής:

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + b_c e(t), \quad (3.18)$$

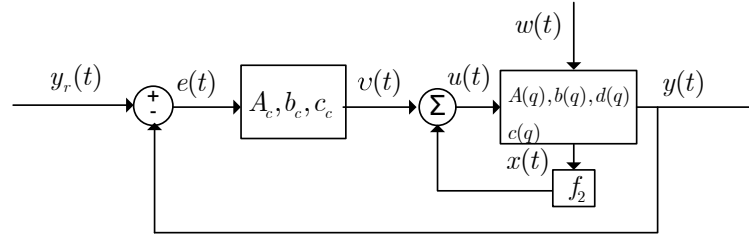
$$v(t) = c_c x_c(t) \quad (3.19)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} -d_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -d_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -d_r & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$b_c = \begin{bmatrix} f_{1,r} \\ f_{1,r-1} \\ \vdots \\ f_{1,1} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$c_c = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (3.22)$$

$$u(t) = v(t) + f_2 x(t) \quad (3.23)$$



Σχήμα 2: Σύστημα κλειστού βρόχου ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων

3.1.1 Συνθήκες επίλυσης

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου (3.16) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\tilde{\rho}_c(s, q, f) = \det[sI_r - A_r] \det[sI_n - A(q)] - f \operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q) \quad (3.24)$$

Ορίζετε ο ακόλουθος πίνακας:

$$\tilde{a}(q) = [1 \quad \tilde{a}_1(q) \quad \cdots \quad \tilde{a}_{r+n}(q)] \quad (3.25)$$

όπου: $\tilde{a}_i(q)$ ($i = 1, \dots, r+n$) είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου $\det[sI_r - A_r] \det[sI_n - A(q)]$

και ορίζεται επίσης ο παρακάτω πίνακας πολυωνύμων:

$$\tilde{P}(s, q) = \Omega(q) [s^{\mu(q)} \cdots s^0]^T = \operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q) \quad (3.26)$$

όπου: $\mu(q) \leq n+r$ είναι ο μέγιστος βαθμός του πολυωνυμικού πίνακα $\operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q)$

και όπου

$$\Omega(q) = [\omega_0(q) \cdots \omega_{\mu(q)}(q)] \quad (3.27)$$

$$\omega_i(q) = [\tilde{\omega}_{i,1}(q) \cdots \tilde{\omega}_{i,n+r}(q)]^T \quad (3.28)$$

Με βάση τις εξισώσεις (3.25) και (3.27) το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος κλειστού βρόχου μπορεί να γραφτεί:

$$\tilde{\rho}_c(s, q, f) = [s^{n+r} \quad \cdots \quad s^0] A^{**}(q) \begin{bmatrix} 1 \\ f^T \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

όπου: $A^{**}(q) = [\tilde{a} \quad -\Omega]$. Με βάση τα συμπεράσματα και τους ορισμούς των [B.54],[B.51] και [B.44] προκύπτει το ακόλουθο θεώρημα: Το πρόβλημα της ασυμπτωτικής ακολούθησης εντολής

ενός αβέβαιου συστήματος και για αυθαίρετα σήματα που παράγονται από ένα μοντέλο αναφοράς είναι επιλύσιμο αν ισχύουν τα ακόλουθα:

- i. Τα στοιχεία του $A^{**}(q)$ είναι συνεχείς συναρτήσεις του q για κάθε $q \in \mathbb{Q}$
- ii. Υπάρχουν $(n+r+1)$ -γραμμές του υποπίνακα $A^{**}(q)$ για τις οποίες ο πίνακας $A^*(q)$ είναι θετικά αντισυμμετρικός.
- iii. Τα πολυώνυμα $c_r \text{adj}[sI_r - A_r]x_{r,0}$ και $\det[sI_n - A(q)]$ δεν έχουν κοινές ρίζες.

Με βάση τα παραπάνω το σύστημα κλειστού βρόχου μπορεί να γραφεί στο χώρο κατάστασης:

$$\dot{x}(t) = [A(q) + b(q)f_2]x(t) + b(q)v(t) + d(q)w(t) \quad (3.30)$$

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + b_c e(t), \quad (3.31)$$

$$v(t) = c_c x_c(t), y(t) = c(q)x(t) \quad (3.32)$$

και στο πεδίο της συχνότητας:

$$y(s) = c(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)f_2 + b(q)c_c (sI_r - A_c)^{-1} b_c C \right]^{-1} b(q)c_c (sI_r - A_c)^{-1} b_c y_r(s) + c(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)f_2 + b(q)c_c (sI_r - A_c)^{-1} b_c C \right]^{-1} d(q)w(s) \quad (3.33)$$

3.2 Υπολογισμός παραμέτρων ελεγκτή ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων

Στην ενότητα αυτή θα σχεδιαστεί ένας εύρωστος ελεγκτής ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων για το μοντέλου του οχήματος και τον έλεγχο της απόστασης του οχήματος από τη γραμμή οδήγησης. Με βάση την εξίσωση (3.18) και για $r = 2$ το μοντέλο αναφοράς είναι το ακόλουθο:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r(t) &= A_r x_r(t) \\ y_r(t) &= c_r x_r(t) \\ x_{r,0} &= \begin{bmatrix} x_{r,01} \\ x_{r,02} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\text{όπου: } A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -d_2 & -d_1 \end{bmatrix} \text{ και } c_r = [1 \ 0].$$

Εφαρμόζοντας το μοντέλο αναφοράς στο σύστημα του αυτοκινήτου προκύπτει το ακόλουθο επαυξημένο σύστημα:

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = \tilde{A}(q) \tilde{x} + \tilde{b}(q) \tilde{u}(t) \quad (3.35)$$

όπου: $\tilde{x}(t) = [\varepsilon(t) \quad \varepsilon^{(1)}(t) \quad z(t)]^T$

$$\tilde{A}(q) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -d_2 & -d_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_{11} \\ 0 & 0 & a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

$$\tilde{b}(q) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

Στο επαυξημένο σύστημα εφαρμόζουμε στατικό νόμο ανατροφοδότησης της μορφής $\tilde{u} = f\tilde{x}$ με $f = (f_{11} \quad f_{12} \quad f_{21} \quad f_{22} \quad f_{23} \quad f_{24} \quad f_{25})$. Ο ελεγκτής μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το σήμα εισόδου του αρχικού συστήματος με βάση τα ακόλουθα:

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + b_c e(t), \quad v(t) = c_c x_c(t) \quad (3.38)$$

όπου:

$$A_c = \begin{bmatrix} -d_1 & 0 \\ -d_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_c = \begin{bmatrix} f_{1,2} \\ f_{1,1} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$c_c = [1 \quad 0]$$

$$u(t) = v(t) + f_2 x(t) \quad (3.40)$$

$$f_2 = [f_{21} \quad f_{22} \quad f_{23} \quad f_{24} \quad f_{25}] \quad (3.41)$$

Το επαυξημένο σύστημα κλειστού βρόχου έχει το ακόλουθο αβέβαιο χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{cl}(s, q, f) = \det[sI_{n+2} - \tilde{A}(q) - \tilde{b}(q)f] = & s^7 + \gamma_0(q, f)s^6 + \gamma_1(q, f)s^5 + \\ & + \gamma_2(q, f)s^4 + \gamma_3(q, f)s^3 + \gamma_4(q, f)s^2 + \gamma_5(q, f)s^1 + \gamma_6(q, f) \end{aligned} \quad (3.42)$$

όπου: q οι αβέβαιες παράμετροι και πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα u και η γωνιακή σκληρότητα των μπροστά και πίσω ελαστικών c_f και c_r

$$\gamma_0 = \frac{c_f(J - I_f^2 m) + c_r(J + I_r^2 m) + (d_1 - f_{25})Jmu}{Jmu} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 = & \frac{-2c_f^2 I_f^2 - c_f(c_r(I_f^2 - 2I_f I_r - I_r^2) + u(-d_1 J + f_{21} J + f_{25} J + d_1 I_f^2 m - f_{25} I_f^2 m + I_f mu + f_{22} I_f mu))}{Jmu^2} + \\ & + \frac{u((d_2 - d_1 f_{25})Jmu + c_r(d_1(J + I_r^2 m) - f_{25}(J + I_r^2 m) + I_r mu))}{Jmu^2} \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 = & \frac{1}{Jmu^2} (2c_f^2 (-d_1 + f_{21} + f_{25}) I_f^2 + u(-d_2 f_{25} Jmu + c_r(-d_1 f_{25} J - d_1 f_{25} I_r^2 m + d_2(J + I_r^2 m) + \\ & + d_1 I_r mu - f_{25} I_r mu)) - c_f(c_r(d_1(I_f^2 - 2I_f I_r - I_r^2) + f_{25}(-I_f^2 + 2I_f I_r + I_r^2) + (I_f + I_r)(f_{21} I_r + f_{22} u)) + \\ & + u(d_2(-J + I_f^2 m) + (f_{24} J - (f_{21} - f_{23} + f_{25}) I_f m)u + d_1(f_{21} J + f_{25}(J - I_f^2 m) + (1 + f_{22}) I_f mu))) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} \gamma_3 = & -\frac{1}{Jmu^2} (-2c_f^2 I_f^2 (-d_2 + d_1(f_{21} + f_{25}) + f_{24} u) + c_r u(d_1 f_{25} I_r mu + \\ & + d_2(f_{25}(J + I_r^2 m) - I_r mu)) + c_f(u((f_{12} J + d_1(f_{24} J - (f_{21} - f_{23} + f_{25}) I_f m))u + \\ & + d_2(f_{21} J + f_{25}(J - I_f^2 m) + (1 + f_{22}) I_f mu)) + c_r(d_2(I_f^2 - 2I_f I_r - I_r^2) + (I_f + I_r)(f_{23} + f_{24} I_r)u \\ & + d_1(f_{25}(-I_f^2 + 2I_f I_r + I_r^2) + (I_f + I_r)(f_{21} I_r + f_{22} u)))) \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \gamma_4 = & \frac{1}{Jmu^2} (-c_r d_2 f_{25} l_r mu^2 + 2c_f^2 l_f^2 (d_2 (f_{21} + f_{25}) + (f_{12} + d_1 f_{24}) u) + \\ & + c_f (- (f_{11} J + d_2 (f_{24} J - (f_{21} - f_{23} + f_{25}) l_f m)) u^2 + \\ & + c_r (- (l_f + l_r) u (f_{12} l_r + d_1 (f_{23} + f_{24} l_r) + f_{24} u) + \\ & + d_2 (f_{25} (l_f^2 - 2l_f l_r - l_r^2) - (l_f + l_r) (f_{21} l_r + f_{22} u)))))) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\gamma_5 = \frac{c_f (2c_f (f_{11} + d_2 f_{24}) l_f^2 - c_r (l_f + l_r) (f_{11} l_r + d_2 (f_{23} + f_{24} l_r) + (f_{12} + d_1 f_{24}) u))}{Jmu} \quad (3.48)$$

$$\gamma_6 = -\frac{c_f c_r (f_{11} + d_2 f_{24}) (l_f + l_r)}{Jm} \quad (3.49)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας $\tilde{a}(q)$ ως ακολούθως:

$$\tilde{a}(q) = (1 \quad \tilde{a}_1 \quad \tilde{a}_2 \quad \tilde{a}_3 \quad \tilde{a}_4 \quad \tilde{a}_5 \quad \tilde{a}_6 \quad \tilde{a}_7) \quad (3.50)$$

όπου:

$$\tilde{a}_5 = \tilde{a}_6 = \tilde{a}_7 = 0 \quad (3.51)$$

$$\tilde{a}_1 = \frac{c_f J + c_r J - c_f l_f^2 m + c_r l_r^2 m + d_1 J mu}{Jmu} \quad (3.52)$$

$$\tilde{a}_2 = \frac{-2c_f^2 l_f^2 + c_f (c_r (-l_f^2 + 2l_f l_r + l_r^2) - u (-d_1 J + d_1 l_f^2 m + l_f mu)) + u (d_2 J mu + c_r (d_1 J + d_1 l_r^2 m + l_r mu))}{Jmu^2} \quad (3.53)$$

$$\tilde{a}_3 = \frac{-2c_f^2 d_1 l_f^2 + c_r u (d_2 (J + l_r^2 m) + d_1 l_r mu) + c_f (c_r d_1 (-l_f^2 + 2l_f l_r + l_r^2) - u (-d_2 J + d_2 l_f^2 m + d_1 l_f mu))}{Jmu^2} \quad (3.54)$$

$$\tilde{a}_4 = \frac{d_2 (-2c_f^2 l_f^2 + c_r l_r mu^2 + c_f (c_r (-l_f^2 + 2l_f l_r + l_r^2) - l_f mu^2))}{Jmu^2} \quad (3.55)$$

και

$$[-\tilde{\Omega}(q)]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \tilde{\omega}_{33} & \tilde{\omega}_{34} & 0 & 0 & \tilde{\omega}_{37} \\ 0 & 0 & \tilde{\omega}_{43} & \tilde{\omega}_{44} & \tilde{\omega}_{45} & \tilde{\omega}_{46} & \tilde{\omega}_{47} \\ 0 & \tilde{\omega}_{52} & \tilde{\omega}_{53} & \tilde{\omega}_{54} & \tilde{\omega}_{55} & \tilde{\omega}_{56} & \tilde{\omega}_{57} \\ \tilde{\omega}_{61} & \tilde{\omega}_{62} & \tilde{\omega}_{63} & \tilde{\omega}_{64} & \tilde{\omega}_{65} & \tilde{\omega}_{66} & \tilde{\omega}_{67} \\ \tilde{\omega}_{71} & \tilde{\omega}_{72} & 0 & 0 & \tilde{\omega}_{75} & \tilde{\omega}_{76} & 0 \\ \tilde{\omega}_{81} & 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{\omega}_{86} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

όπου:

$$\tilde{\omega}_{61} = \tilde{\omega}_{52} = \tilde{\omega}_{46} = \frac{\tilde{\omega}_{33}}{u} = -\frac{c_f}{m} \quad (3.57)$$

$$\tilde{\omega}_{34} = \tilde{\omega}_{45} = -\frac{c_f l_f}{J} \quad (3.58)$$

$$\tilde{\omega}_{71} = \tilde{\omega}_{62} = -\frac{c_f (c_r l_r (l_f + l_r) - 2c_f l_f^2)}{Jmu} \quad (3.59)$$

$$\tilde{\omega}_{81} = \tilde{\omega}_{72} = \frac{d_2 \tilde{\omega}_{64}}{u} = \frac{d_2 \tilde{\omega}_{75}}{u} = d_2 \tilde{\omega}_{86} = -\frac{c_f c_r (l_f + l_r)}{Jm} \quad (3.60)$$

$$\tilde{\omega}_{43} = -\frac{c_f (-2c_f l_f^2 + c_r l_r (l_f + l_r) + u(d_1 J - l_f mu))}{Jmu^2} \quad (3.61)$$

$$\tilde{\omega}_{53} = -\frac{c_f (-2c_f d_1 l_f^2 + c_r d_1 l_r (l_f + l_r) + u(d_2 J - d_1 l_f mu))}{Jmu^2} \quad (3.62)$$

$$\tilde{\omega}_{63} = \frac{c_f d_2 (2c_f l_f^2 + mu^2 l_f - c_r l_r (l_f + l_r))}{Jmu^2} \quad (3.63)$$

$$\tilde{\omega}_{44} = \tilde{\omega}_{55} = -\frac{c_f (c_r (l_f + l_r) + d_1 l_f mu)}{Jmu} \quad (3.64)$$

$$\tilde{\omega}_{54} = \tilde{\omega}_{65} = \frac{c_f (c_r d_1 (l_f + l_r) + d_2 l_f mu)}{Jmu} \quad (3.65)$$

$$\tilde{\omega}_{56} = -\frac{c_f (-2c_f l_f^2 + c_r l_r (l_f + l_r) + d_1 Ju)}{Jmu} \quad (3.66)$$

$$\tilde{\omega}_{66} = -\frac{c_f(-2c_f d_1 l_f^2 + d_2 J u + c_r(l_f + l_r)(d_1 l_r + u))}{J m u} \quad (3.67)$$

$$\tilde{\omega}_{76} = -\frac{c_f(c_r(l_f + l_r)(d_2 l_r + d_1 u) - 2c_f d_2 l_f^2)}{J m u} \quad (3.68)$$

$$\tilde{\omega}_{37} = -\frac{-c_f m l_f^2 + c_f J + c_r J + c_r l_r^2 m + d_1 J m u}{J m u} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{47} = & -\frac{1}{J m u^2}(-2c_f^2 l_f^2 + c_f(c_r(-l_f^2 + 2l_r l_f + l_r^2) - u(d_1 m l_f^2 + m u l_f - d_1 J))) + \\ & + u(d_2 J m u + c_r(d_1 m l_r^2 + m u l_r + d_1 J)) \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{57} = & -\frac{1}{J m u^2}(-2c_f^2 d_1 l_f^2 + c_r u(d_2(m l_r^2 + J) + d_1 l_r m u) + \\ & + c_f(c_r d_1(-l_f^2 + 2l_r l_f + l_r^2) - u(d_2 m l_f^2 + d_1 m u l_f - d_2 J))) \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\tilde{\omega}_{67} = -\frac{d_2(-2c_f^2 l_f^2 + c_r l_r m u^2 + c_f(c_r(-l_f^2 + 2l_r l_f + l_r^2) - l_f m u^2))}{J m u^2} \quad (3.72)$$

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος μπορεί να γραφεί με βάση την εξίσωση (3.29) ως εξής:

$$\tilde{p}_d(s, q, f) = [s^7 \quad s^6 \quad s^5 \quad s^4 \quad s^3 \quad s^2 \quad s^1 \quad s^0] A^{**}(q) [1 \quad f_{11} \quad f_{12} \quad f_{21} \quad f_{22} \quad f_{23} \quad f_{24} \quad f_{25}]^T \quad (3.73)$$

όπου: $A^{**}(q) = [\tilde{a}^T \quad -\tilde{\Omega}^T]$, έστω ο ακόλουθος τετραγωνικός πίνακας με ορίζουσα διάφορη από το μηδέν:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.74)$$

Επιλέγουμε έναν υποπίνακα διαστάσεων 6×8 του πίνακα $A^{**}(q)T$ ο οποίος είναι ο ακόλουθος:

$$A^*(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{21} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \phi_{43} & \phi_{44} & 0 & 0 \\ \phi_{51} & \phi_{52} & \phi_{53} & \phi_{54} & \phi_{55} & 0 \\ 0 & \phi_{62} & \phi_{63} & \phi_{64} & \phi_{65} & \phi_{66} \\ 0 & 0 & 0 & \phi_{74} & \phi_{75} & \phi_{76} \\ 0 & 0 & 0 & \phi_{84} & 0 & \phi_{86} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

όπου:

$$\phi_{21} = \tilde{\alpha}_1, \phi_{31} = \tilde{\alpha}_2, \phi_{41} = \tilde{\alpha}_3, \phi_{51} = \tilde{\alpha}_4 \quad (3.76)$$

$$\phi_{66} = \phi_{55} = \phi_{44} = -\tilde{\omega}_{61} \quad (3.77)$$

$$\phi_{76} = \phi_{65} = -\tilde{\omega}_{71} \quad (3.78)$$

$$\phi_{86} = \phi_{75} = \phi_{84} d_2 = \phi_{64} \frac{d_2}{u} = -\tilde{\omega}_{81} \quad (3.79)$$

$$\phi_{32} = -\tilde{\omega}_{37}, \phi_{42} = -\tilde{\omega}_{47}, \phi_{52} = -\tilde{\omega}_{57}, \phi_{62} = -\tilde{\omega}_{67} \quad (3.80)$$

$$\phi_{33} = -\tilde{\omega}_{34}, \phi_{43} = -\tilde{\omega}_{44}, \phi_{53} = -\tilde{\omega}_{54}, \phi_{63} = -\tilde{\omega}_{64} \quad (3.81)$$

$$\phi_{54} = -\tilde{\omega}_{56}, \phi_{64} = -\tilde{\omega}_{66}, \phi_{74} = -\tilde{\omega}_{76} \quad (3.82)$$

Ο πίνακας $A^*(q)$ είναι θετικά αντισυμμετρικός και μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας πέντε θετικές επαυξήσεις (οι παράμετροι $\phi_{33}, \phi_{44}, \phi_{55}, \phi_{66}$ είναι θετικές σε όλο το πεδίων τιμών των αβέβαιων παραμέτρων) $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \Phi_4 \rightarrow \Phi_5 \rightarrow A^*(q)$

όπου:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \phi_{66} \\ \phi_{76} \\ \phi_{86} \end{bmatrix}, \Phi_2 = \begin{bmatrix} \phi_{55} & 0 \\ \phi_{65} & \phi_{66} \\ \phi_{75} & \phi_{76} \\ 0 & \phi_{86} \end{bmatrix}, \Phi_3 = \begin{bmatrix} \phi_{44} & 0 & 0 \\ \phi_{54} & \phi_{55} & 0 \\ \phi_{64} & \phi_{65} & \phi_{66} \\ \phi_{74} & \phi_{75} & \phi_{76} \\ \phi_{84} & 0 & \phi_{86} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$\Phi_4 = \begin{bmatrix} \phi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{43} & \phi_{44} & 0 & 0 \\ \phi_{53} & \phi_{54} & \phi_{55} & 0 \\ \phi_{63} & \phi_{64} & \phi_{65} & \phi_{66} \\ 0 & \phi_{74} & \phi_{75} & \phi_{76} \\ 0 & \phi_{84} & 0 & \phi_{86} \end{bmatrix}, \Phi_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{32} & \phi_{63} & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{42} & \phi_{43} & \phi_{44} & 0 & 0 \\ \phi_{52} & \phi_{53} & \phi_{54} & \phi_{55} & 0 \\ \phi_{62} & \phi_{63} & \phi_{64} & \phi_{65} & \phi_{66} \\ 0 & 0 & \phi_{74} & \phi_{75} & \phi_{76} \\ 0 & 0 & \phi_{84} & 0 & \phi_{86} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Το πολυώνυμο του πυρήνα $\bar{c}(q) = \Phi_1(q)$ είναι Hurwitz αμετάβλητος, καθώς το πολυώνυμο του πυρήνα έχει θετικές ρίζες. Παρακάτω παρατίθεται ο αλγόριθμος εύρεσης των τιμών του ελεγκτής χρησιμοποιώντας ως σήμα αναφοράς το σήμα $y_r(t) = 0.02 \sin[0.2t]$, $d_1 = 0, d_2 = 0.04$ και $x_{r,01} = 0, x_{r,02} = 0.004$

Βήμα 1^ο: Ο πυρήνας του πίνακα $A^*(q)$ είναι ο πίνακας Φ_1 . Κάνοντας 5 θετικές επαυξήσεις βρίσκουμε τον $A^*(q)$. Ορίζουμε $\tau_1 = 1$

Βήμα 2^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_1 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_2(q)[\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος. Το πολυώνυμο $[s^3 \ s^2 \ s \ 1]\Phi_2(q)[\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_1 > 0$. Επιλέγουμε $\varepsilon_1 = 1$

Βήμα 3^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_2 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_3(q)[\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_2 = [\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$). Το πολυώνυμο $[s^4 \ s^3 \ s^2 \ s \ 1]\Phi_3(q)[\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_2 > 0$. Επιλέγουμε $\varepsilon_2 = 2$

Βήμα 4^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_3 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_4(q)[\varepsilon_3 \quad \tau_3]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_3 = [\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$). Το πολυώνυμο $[s^5 \ s^4 \ s^3 \ s^2 \ s \ 1]\Phi_4(q)[\varepsilon_3 \quad \tau_3]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_3 \in (0, 0.03]$. Επιλέγουμε $\varepsilon_3 = 0.001$

Βήμα 5^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_4 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_5(q)[\varepsilon_4 \quad \tau_4]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_4 = [\varepsilon_3 \quad \tau_3]^T$). Το πολυώνυμο

$[s^6 \ s^5 \ s^4 \ s^3 \ s^2 \ s \ 1]\Phi_5(q)[\varepsilon_4 \ \tau_4]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_4 \in (0, 0.0001]$.

Επιλέγουμε $\varepsilon_5 = 0.000007$

Βήμα 6^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_5 > 0$ για την οποία ο πίνακας $A^*(q)[\varepsilon_5 \ \tau_5]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_5 = [\varepsilon_4 \ \tau_4]^T$). Το πολυώνυμο

$[s^7 \ s^6 \ s^5 \ s^4 \ s^3 \ s^2 \ s \ 1]A^*(q)[\varepsilon_5 \ \tau_5]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_5 \in (0, 0.0001]$.

Επιλέγουμε $\varepsilon_5 = 0.000007$

Βήμα 7^ο: Εύρεση του διανύσματος κέρδους \tilde{f} το οποίο ευσταθειοποιεί εύρωστα το πολυώνυμο $A^{**}(q)T - (A^{**}(q)\tilde{T}\tilde{f}^T)$. Με βάση τα παραπάνω το διάνυσμα κέρδους είναι:

$\tilde{T}\tilde{f}^T = (\varepsilon_5 \ -1 \ -\varepsilon_1 \ 0 \ -\varepsilon_3 \ 0 \ -\varepsilon_2 \ -\varepsilon_4)^T$ ή ισοδύναμα

$\tilde{T}\tilde{f}^T / \varepsilon_5 = \left(1 \ \frac{-1}{\varepsilon_5} \ \frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_5} \ 0 \ \frac{-\varepsilon_3}{\varepsilon_5} \ 0 \ \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_5} \ \frac{-\varepsilon_4}{\varepsilon_5} \right)^T$. Τελικά οι παράμετροι του ελεγκτή

είναι: $f_{11} = -\frac{1}{\varepsilon_5}, f_{12} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_5}, f_{21} = 0, f_{22} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_5}, f_{23} = 0, f_{24} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_5}$ και $f_{25} = -\frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_5}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ελεγκτής Τριών όρων PID

4.1 Εύρωστος Ελεγκτής τριών όρων (PID)

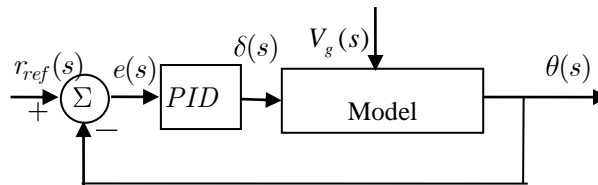
Equation Chapter (Next) Section 1Equation Chapter (Next) Section 4

Έστω ένα σύστημα χρονικά αμετάβλητο και γραμμικό αβέβαιο σύστημα που περιγράφεται με το ακόλουθο μοντέλο [A.2],[B.16],[B.20],[B.21].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(q)x(t) + B\delta(t) + Dw(t) \\ y(t) &= cx(t)\end{aligned}\quad (4.1)$$

Στο γραμμικό σύστημα εφαρμόζεται ελεγκτής τριών όρων της μορφής:

$$\delta(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \right) r_{ref}(s) \quad (4.2)$$



Το σύστημα κλειστού βρόχου μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned}y(s) &= C(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)CG_{pid}(s) \right]^{-1} b(q)G_{pid}(s)R_{ref}(s) + \\ &+ C(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)CG_{pid}(s) \right]^{-1} d(q)w(s)\end{aligned}\quad (4.3)$$

όπου: $G_{pid}(s) = \frac{s^2 K_D + sK_p + K_i}{s}$ η συνάρτηση μεταφορά του ελεγκτή στο πεδίο της συχνότητας.

Για να επιτευχθεί ασυμπτωματική ακολούθηση εντολής θα πρέπει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου (4.4) να μπορεί να γίνει ευσταθές με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή.

$$p_{cl}(s) = s \det(sI_n - A(q) - b(q)CG_{pid}(s)) = s^\mu + a_1(f)s^{\mu-1} + a_2(f)s^{\mu-2} + \dots + a_\mu(f)s^0 \quad (4.4)$$

όπου: $F = [f_1 \ f_2 \ f_3] = [K_p \ K_i \ K_D]$.

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο μπορεί να γραφτεί:

$$p_{cl}(s, f) = \begin{bmatrix} s^\mu & \dots & s^0 \end{bmatrix} W^{**} \begin{bmatrix} 1 \\ f^T \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$W^{**} = [\tilde{a}^T \quad \Omega] \quad (4.6)$$

$$\tilde{a} = [1 \quad a_1(0) \quad \dots \quad a_\mu(0)] \quad (4.7)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_1^1 & a_1^2 & a_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_\mu^1 & a_\mu^2 & a_\mu^3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

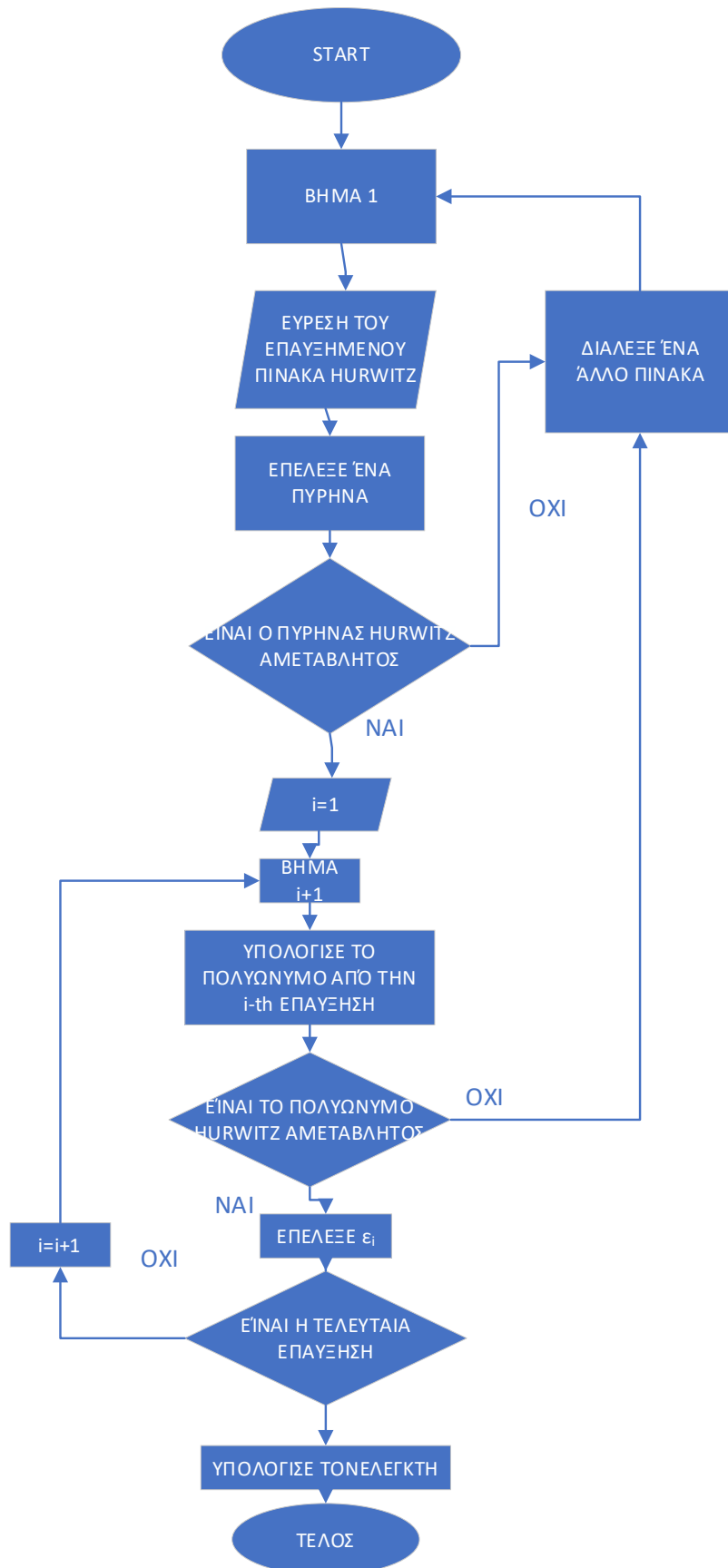
όπου: $\alpha_i^j = a_i(f) |_{f_k=1(j=k), f_k=0(\forall j \neq k)} - a_i(0) (\forall i=1, \dots, \mu, \forall j=1, 2, 3)$

4.1.1 Συνθήκες επίλυση

Έστω ένας πίνακας $W \in \mathbb{R}^{v \times \varphi}$ και ένας πίνακας $W^+ \in \mathbb{R}^{(v+1) \times (\varphi+1)}$. Ο πίνακας W^+ είναι άνω επαύξηση του πίνακα W αν ισχύει:

$$W = \begin{bmatrix} * & \dots & 0 \\ \vdots & & \\ * & & W \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Ο πίνακας W^+ αποτελεί μια θετική άνω επαύξηση του πίνακα W αν το στοιχείο (1,1) είναι θετικό για κάθε $q \in \mathbb{Q}$. Επίσης ο πίνακας $W \in \mathbb{R}^{v \times \varphi}$ είναι θετικά αντισυμμετρικός αν μπορεί να κατασκευάσει ένα ευσταθές πολυώνυμο από έναν θετικό πυρήνα \bar{c} με θετικές άνω επαυξήσεις. Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου μπορεί ευσταθειοποιηθεί αν υπάρχει ένας υποπίνακας του πίνακα W^{**} έστω W^* ο οποίος είναι θετικά αντισυμμετρικός. Η ευσταθειοποίηση του πολυωνύμου γίνεται με κατάλληλη επιλογή των βαθμών ελευθερίας του ελεγκτή τριών όρων. Αντί του πίνακα W^{**} μπορεί να υπάρξει ο πίνακας $W^* = W^*T$ όπου T ένας κατάλληλος αντιστρέψιμος πίνακας. Στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΚΤΗ

4.2 Υπολογισμός παραμέτρων ελεγκτή PID

Στο παρούσα ενότητα θα υπολογιστούν οι παράμετροι του εύρωστου ελεγκτή PID, εφαρμόζοντας την θεωρία της ενότητας 4.1 στο μοντέλο του οχήματος που περιγράφεται στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μοντέλο αυτοκινήτου. Εφαρμόζοντας τον νόμο ελέγχου της εξίσωσης (4.10) στο σύστημα του οχήματος της εξίσωσης (2.2) προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου της εξίσωσης

$$U_f(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \right) (r_{ref}(s) - Y(s)) \quad (4.10)$$

$$p_c(s, q) = s^6 + f_5(q)s^5 + f_4(q, K_d)s^4 + f_3(q, K_d, K_p)s^3 + f_2(q, K_i, K_p, K_d)s^2 + f_1(q, K_i, K_p)s^1 + f_0(q, K_i) \quad (4.11)$$

όπου: $U_f(s)$ και $Y(s)$ τα σχετικά σήματα εισόδου και εξόδου στο πεδίο της συχνότητας, ενώ το σήμα $r_{ref}(s)$ είναι μια εξωτερική εντολή (ή το σήμα αναφοράς) και όπου:

$$f_5(q) = \frac{c_f J + c_r J - c_f l_f^2 m + c_r l_r^2 m}{Jmu} \quad (4.12)$$

$$f_4(q, K_d) = \frac{c_f - 2c_f + c_r l_f^2 + 2c_r l_f l_r + c_r l_r^2 + c_f J K_d - c_f l_f m + c_r l_r m}{Jmu^2} u^2 \quad (4.13)$$

$$f_3(q, K_d, K_p) = \frac{c_f (-2c_f K_d l_f^2 + c_r K_d l_r (l_f + l_r) + J K_p u)}{Jmu} \quad (4.14)$$

$$f_2(q, K_i, K_p, K_d) = \frac{c_f - 2c_f K_p l_f^2 + J K_i u + c_r l_f + l_r K_p l_r + K_d u}{Jmu} \quad (4.15)$$

$$f_1(q, K_i, K_p) = \frac{c_f (-2c_f K_i l_f^2 + c_r (l_f + l_r) (K_i l_r + K_p u))}{Jmu} \quad (4.16)$$

$$f_0(q, K_i) = \frac{c_f c_r K_i (l_f + l_r)}{Jm} \quad (4.17)$$

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου μπορεί να γραφεί με την ακόλουθη μορφή:

$$p_c(s) = \begin{bmatrix} s^6 & s^5 & s^4 & s^3 & s^2 & s^1 & s^0 \end{bmatrix} W(q) \begin{bmatrix} 1 \\ K_p \\ K_i \\ K_d \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

όπου: $W(q) = [\tilde{a}(q) \quad \tilde{A}(q)]$, ($\tilde{A}(q) = \Omega$) και όπου $\tilde{a}(q) = [1 \quad a_{11} \quad a_{12} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$,

$$\tilde{A}(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{31} \\ A_{31} & 0 & A_{41} \\ A_{41} & A_{31} & A_{51} \\ A_{51} & A_{41} & 0 \\ 0 & A_{51} & 0 \end{bmatrix}$$

και

$$a_{11} = \frac{-c_f m l_f^2 + c_f J + c_r J + c_r l_r^2 m}{J m u} \quad (4.19)$$

$$a_{12} = \frac{-2c_f^2 l_f^2 + c_r l_r m u^2 + c_f c_r - l_f^2 + 2l_r l_f + l_r^2 - l_f m u^2}{J m u^2} \quad (4.20)$$

$$A_{31} = \frac{c_f}{m} \quad (4.21)$$

$$A_{41} = \frac{c_f (c_r l_r (l_f + l_r) - 2c_f l_f^2)}{J m u} \quad (4.22)$$

$$A_{51} = \frac{c_f c_r (l_f + l_r)}{J m} \quad (4.23)$$

έστω ο ακόλουθος τετραγωνικός πίνακας με ορίζουσα διάφορη από το μηδέν:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Επιλέγουμε έναν υποπίνακα διαστάσεων 7×4 του πίνακα $W(q)T$ ο οποίος είναι ο ακόλουθος:

$$W^*(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{21} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{31} & \omega_{54} & 0 & 0 \\ \omega_{41} & \omega_{41} & \omega_{54} & 0 \\ \omega_{51} & \omega_{51} & \omega_{41} & \omega_{54} \\ \omega_{61} & \omega_{61} & \omega_{61} & \omega_{61} \\ \omega_{71} & \omega_{71} & \omega_{71} & \omega_{71} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

όπου:

$$\omega_{21} = \frac{-c_f m l_f^2 + c_f J + c_r J + c_r l_r^2 m}{J m u}, \quad \omega_{41} = \frac{c_f (-2c_f l_f^2 + J u + c_r (l_f + l_r)(l_r + u))}{J m u}, \quad \omega_{54} = \frac{c_f}{m}$$

$$\omega_{31} = \frac{-2c_f^2 l_f^2 + c_r l_r m u^2 + c_f ((J - l_f m) u^2 + c_r (-l_f^2 + 2l_r l_f + l_r^2))}{J m u^2}, \quad \omega_{71} = \frac{c_f c_r (l_f + l_r)}{J m},$$

$$\omega_{61} = \frac{c_f (c_r (l_f + l_r)(l_r + u) - 2c_f l_f^2)}{J m u}, \quad \omega_{51} = \frac{c_f (-2c_f l_f^2 + J u + c_r (l_f + l_r)(l_r + u))}{J m u}.$$

Ο πίνακας $W^*(q)$ είναι θετικά αντισυμμετρικός και μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας τέσσερις θετικές επαυξησεις (οι παράμετροι ω_{54} είναι θετικές σε όλο το πεδίων τιμών των αβέβαιων παραμέτρων) $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow W^*(q)$

όπου:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \omega_{54} \\ \omega_{61} \\ \omega_{71} \end{bmatrix}, \quad \Phi_2 = \begin{bmatrix} \omega_{54} & 0 \\ \omega_{41} & \omega_{54} \\ \omega_{61} & \omega_{61} \\ \omega_{71} & \omega_{71} \end{bmatrix}, \quad \Phi_3 = \begin{bmatrix} \omega_{54} & 0 & 0 \\ \omega_{41} & \omega_{54} & 0 \\ \omega_{51} & \omega_{41} & \omega_{54} \\ \omega_{61} & \omega_{61} & \omega_{61} \\ \omega_{71} & \omega_{71} & \phi_{71} \end{bmatrix}$$

Με βάση τον αλγόριθμο του σχήματος 3 (Σχήμα 3) υπολογίζονται οι παράμετροι του PID ελεγκτή. Το πολυώνυμο του πυρήνα $\bar{c}(q) = \Phi_1(q)$ είναι Hurwitz αμετάβλητος, καθώς το πολυώνυμο του πυρήνα έχει θετικές ρίζες.

Βήμα 1^ο: Ο πυρήνας του πίνακα $W^*(q)$ είναι ο πίνακας Φ_1 . Κάνοντας 3 θετικές επαυξησεις βρίσκουμε τον $W^*(q)$. Ορίζουμε $\tau_1 = 1$

Βήμα 2^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_1 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_2(q)[\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος. Το πολυώνυμο $[s^3 \quad s^2 \quad s \quad 1]\Phi_2(q)[\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_1 > 0$. Επιλέγουμε $\varepsilon_1 = 51$

Βήμα 3^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_2 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_3(q)[\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_2 = [\varepsilon_1 \quad \tau_1]^T$). Το πολυώνυμο $[s^4 \quad s^3 \quad s^2 \quad s \quad 1]\Phi_3(q)[\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_2 > 0$. Επιλέγουμε $\varepsilon_2 = 40$

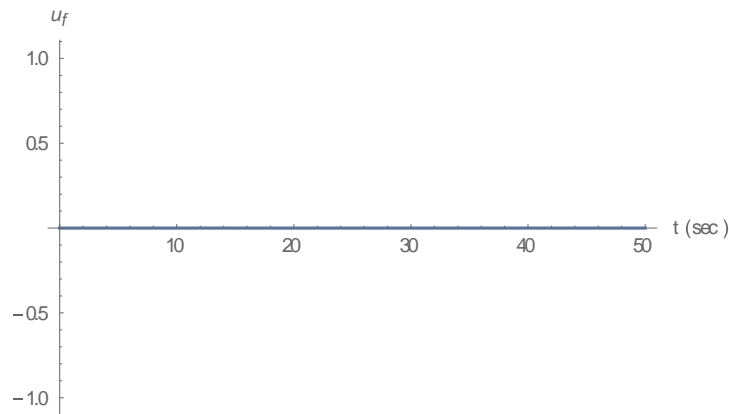
Βήμα 4^ο: Υπολογισμός της παραμέτρου $\varepsilon_3 > 0$ για την οποία ο πίνακας $\Phi_4(q)[\varepsilon_3 \quad \tau_3]^T$ είναι θετικά Hurwitz αμετάβλητος ($\tau_3 = [\varepsilon_2 \quad \tau_2]^T$). Το πολυώνυμο $[s^5 \quad s^4 \quad s^3 \quad s^2 \quad s \quad 1]W^*(q)[\varepsilon_3 \quad \tau_3]^T$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_3 \in (0, 0.00018]$. Επιλέγουμε $\varepsilon_3 = 0.0001$

Βήμα 5^ο: Υπολογισμός παραμέτρων εύρωστου ελεγκτή. Με βάση τα παραπάνω το διάνυσμα κέρδους είναι: $T[\varepsilon_3 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_1 \quad 1]^T = [\varepsilon_3 \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + 1 \quad \varepsilon_2 + \varepsilon_3]^T$ ή ισοδύναμα $T[\varepsilon_3 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_1 \quad 1]^T / \varepsilon_3 = \left[1 \quad \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \quad \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + 1}{\varepsilon_3} \quad \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \right]^T$. Τελικά οι παράμετροι του ελεγκτή είναι: $K_p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3}$, $K_i = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + 1}{\varepsilon_3}$ και $K_d = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3}$

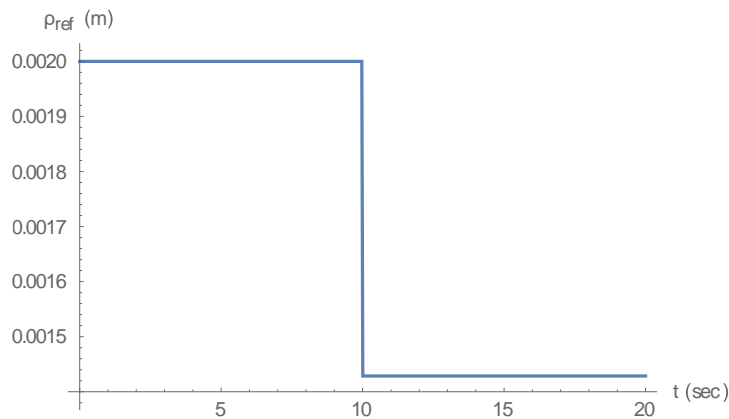
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προσομοίωση Συστήματος Οχήματος Ανοιχτού Βρόχου και Κλειστού Βρόχου

5.1 Προσομοίωση μοντέλου αυτοκινήτου ανοιχτού βρόχου

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει προσομοίωση του μοντέλου του οχήματος της ενότητας 2. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να επιτευχθεί η ακολούθηση εντολής από την έξοδο του συστήματος. Με βάση την ακολούθηση εντολής και την ταυτόχρονη απόρριψη των εξωτερικών διαταραχών οι είσοδοι του συστήματος ανοιχτού βρόχου θα είναι $u_f(t)=0$ (διατήρηση μηδενικής απόστασης από τη γραμμή οδήγησης) και το ρ_{ref} ένα σήμα που θα μας δείχνει την καμπυλότητα του οδοστρώματος. Στο σύστημα ανοιχτού βρόχου του οχήματος που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.1) εφαρμόζονται οι ακόλουθες είσοδοι:



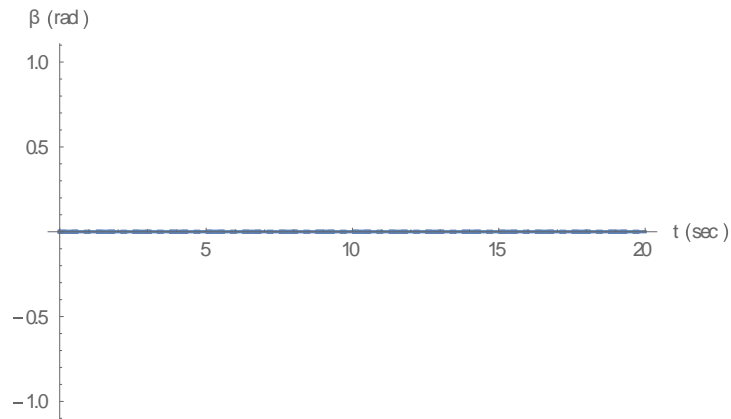
Σχήμα 4: Είσοδος Συστήματος



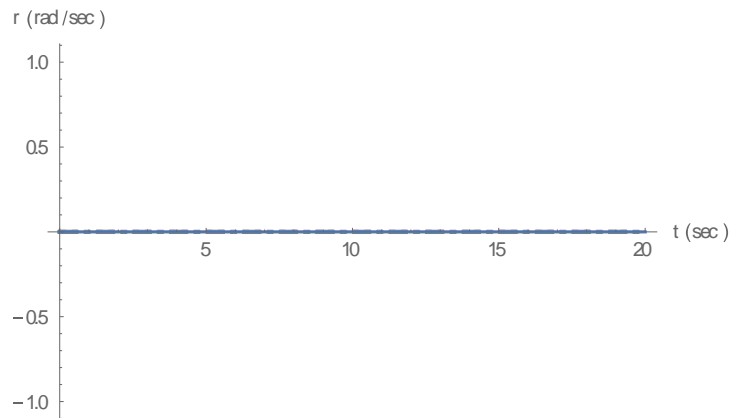
Σχήμα 5: Σήμα αναφοράς

Οι παραπάνω είσοδοι επιλέγονται με βάση την ακολούθηση εντολής από την έξοδο του οχήματος με την ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών. Επιλέγοντας $u_f(t)=0$ με την υπόθεση ότι η απόσταση του οχήματος από την γραμμή οδήγησης θα είναι μηδέν, δηλαδή το όχημα θα ακολουθεί την γραμμή οδήγησης. Επιλέγοντας ρ_{ref} όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 θεωρείτε ότι το

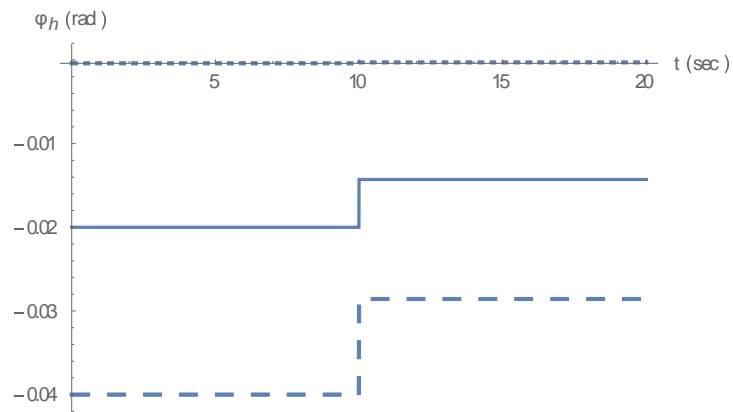
όχημα αρχικά μπαίνει σε μία στροφή με καμπυλότητα $\frac{1}{500}m$ για δέκα δευτερόλεπτα και στην συνέχεια βγαίνει από αυτή σε μία στροφή με καμπυλότητα $\frac{1}{700}m$. Με βάση τα παραπάνω οι έξοδοι του διανύσματος κατάστασης φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα. Στα διαγράμματα με τις κουκίδες απεικονίζετε το διάνυσμα κατάστασης για ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u=0.2, c_f=0.25$ και $c_r=500$), τα διαγράμματα με την ευθεία γραμμή απεικονίζουν το διάστημα κατάστασης για μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u=10, c_f=0.5$ και $c_r=1000$) και τα διαγράμματα με τις παύλες απεικονίζουν το διάνυσμα κατάστασης για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u=20, c_f=1$ και $c_r=1500$)



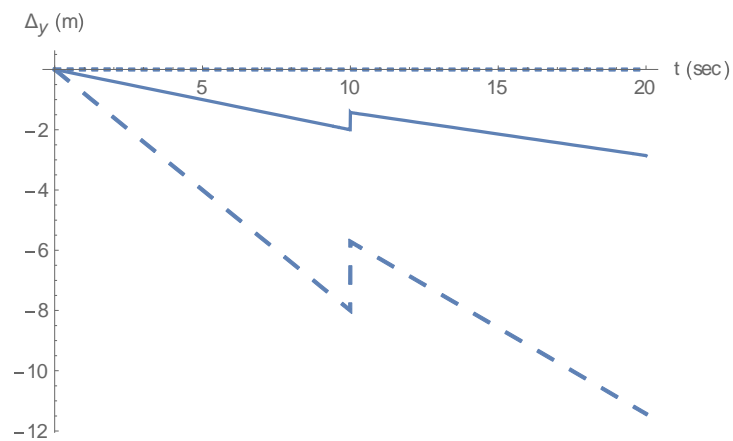
Σχήμα 6: Γωνία πλαγιολίσθησης



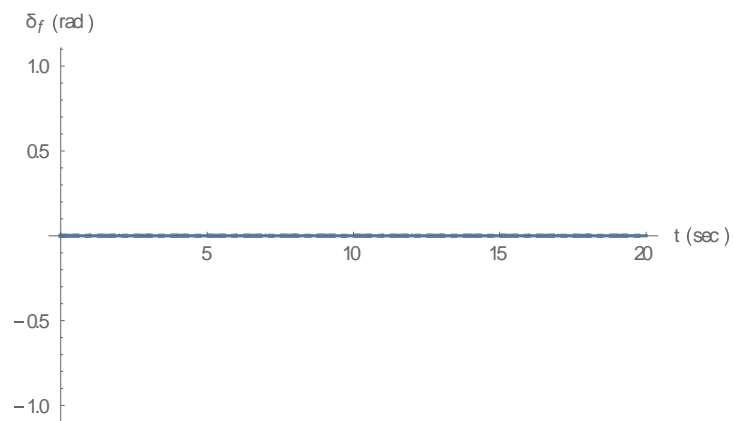
Σχήμα 7: Ρυθμός μεταβολής της γωνίας εκτροπής



Σχήμα 8: Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαπτόμενης γραμμής οδήγησης



Σχήμα 9: Πλευρική απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης



Σχήμα 10: Γωνία στροφής των εμπρός ελαστικών

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι το σύστημα ανοιχτού βρόχου είναι ασταθές οπότε για τον έλεγχο του οχήματος θα πρέπει να σχεδιαστούν ελεγκτές. Στις επόμενες ενότητες γίνεται εφαρμογή των ελεγκτών που υπολογίστηκαν στα κεφάλαια 3 και 4

5.2 Εφαρμογή του εύρωστου ελεγκτή τριών όρων στο μοντέλο του οχήματος

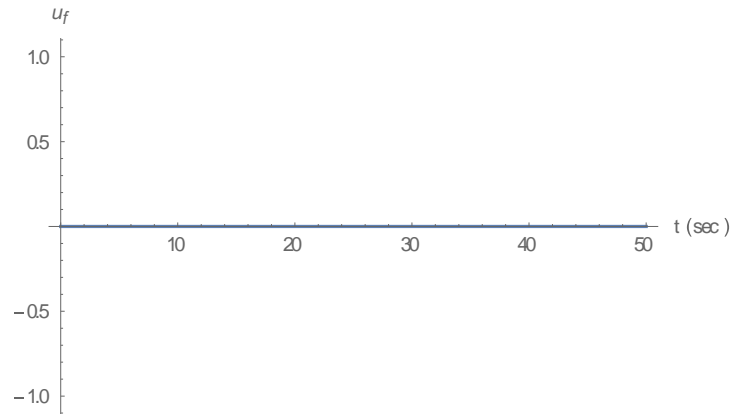
Εφαρμόζοντας τον νόμο ελέγχου της σχέσης (4.2) στο σύστημα του αυτοκινήτου (2.1) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$y(s) = C(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)CG_{pid}(s) \right]^{-1} b(q)G_{pid}(s)w(s) + C(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)CG_{pid}(s) \right]^{-1} d(q)R_{ref}(s) \quad (4.26)$$

Για την προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου χρησιμοποιούνται η τιμές του Πίνακα 1 και οι τιμές των αβεβαιοτήτων μεταβάλλονται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής και μιας μέγιστης

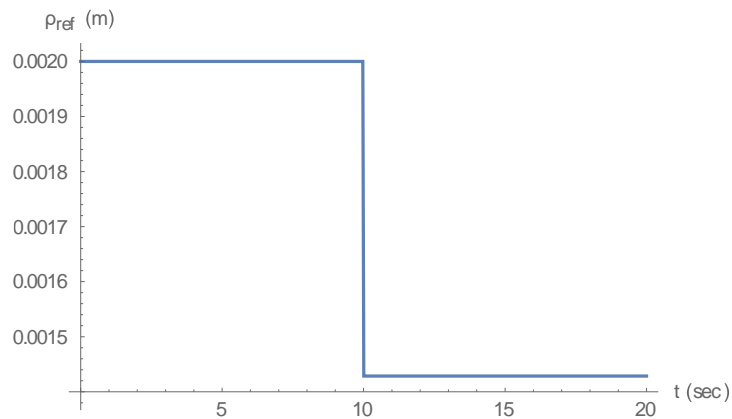
$u \in \left[0.2 \frac{m}{sec} \quad 20 \frac{m}{sec} \right]$, $c_f \in \left[0.25 \frac{N}{rad} \quad 1 \frac{N}{rad} \right]$ και $c_\rho \in \left[500 \frac{N}{rad} \quad 1500 \frac{N}{rad} \right]$. Στο σύστημα

κλειστού βρόχου η είσοδος του οχήματος διεγείρεται με ένα σήμα όπως το παρακάτω:



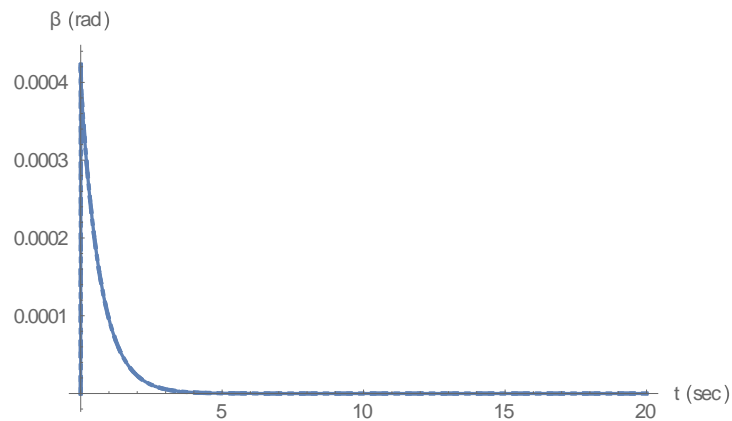
Σχήμα 11: Εντολή Εισόδου Κλειστού Βρόχου

Η είσοδος των διαταραχών του συστήματος διεγείρεται με το ακόλουθο σήμα:

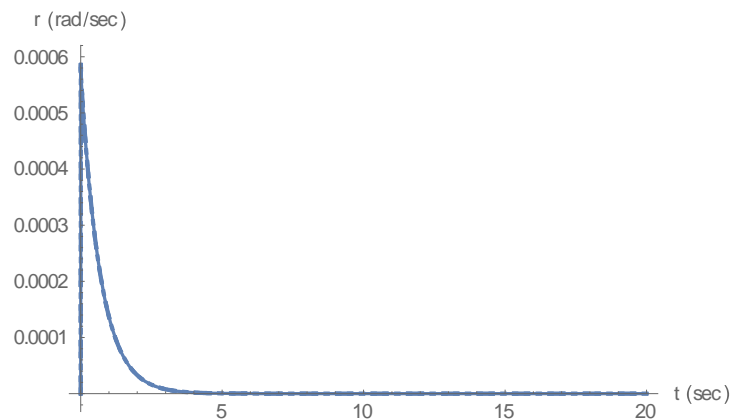


Σχήμα 12: Διαταραχές Κλειστού Βρόχου

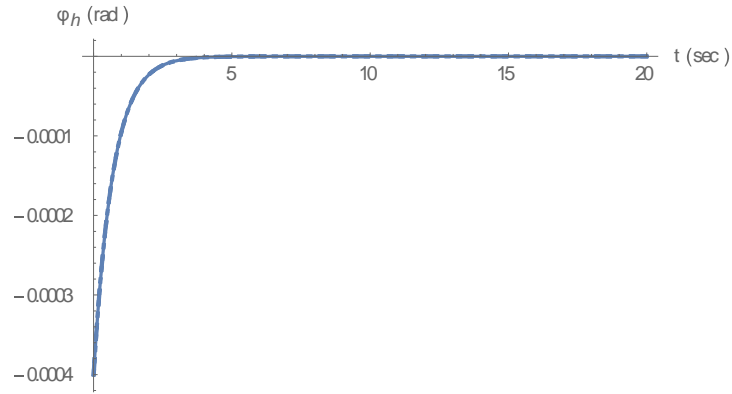
Επιλέγοντας ρ_{ref} όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 θεωρείτε ότι το όχημα αρχικά μπαίνει σε μία στροφή με καμπυλότητα $\frac{1}{500}m$ για δέκα δευτερόλεπτα και στην συνέχεια βγαίνει από αυτή σε μία στροφή με καμπυλότητα $\frac{1}{700}m$. Τα διαγράμματα που απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα με την ευθεία γραμμή απεικονίζουν το διάλυσμα κατάστασης κλειστού βρόχου του μοντέλου του οχήματος για ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 0.2, c_f = 0.25$ και $c_r = 500$) με κουκίδες, για μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 10, c_f = 0.5$ και $c_r = 1000$) με ευθείες γραμμές και τα διαγράμματα με τις παύλες απεικονίζουν το διάλυσμα κατάστασης για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 20, c_f = 1$ και $c_r = 1500$).



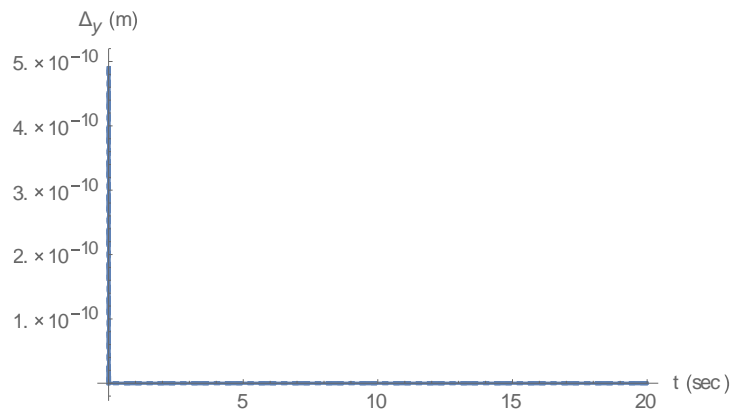
Σχήμα 13: Γωνία Πλαγιολίσθησης



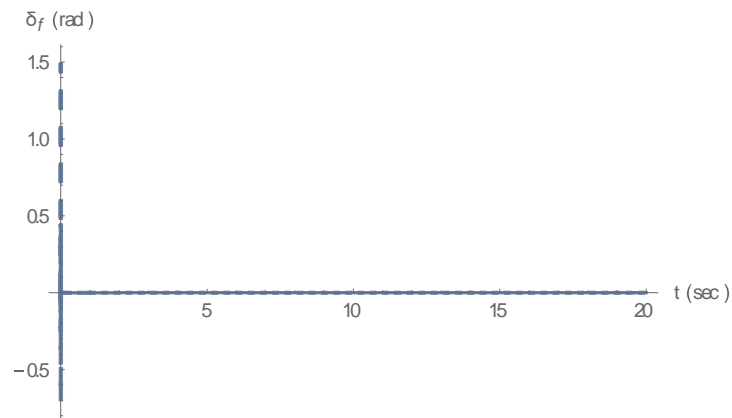
Σχήμα 14: Ρυθμός μεταβολής της γωνίας Εκτροπής



Σχήμα 15: Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαιπτόμενης γραμμής οδήγησης



Σχήμα 16: Πλευρική απόκλιση από την γραμμή οδήγησης



Σχήμα 17: Εντολή οδήγησης της εμπρόσθιας γωνιακής διεύθυνσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο σχεδιαστικός στόχος της ακολούθησης εντολής από την έξοδο του οχήματος για όλο το πεδίο τιμών των αβεβαιοτήτων έχει επιτευχθεί. Στο Σχήμα 16 παρατηρούμε ότι για όλες τις τιμές των αβεβαιοτήτων η απόκλιση από την γραμμή οδήγησης τείνει στο μηδέν, σχεδιαστικός στόχος, ανεξάρτητα από την καμπυλότητα του οδοστρώματος που εκφράζεται με το σήμα διαταραχών του συστήματος. Με άλλα λόγια έχουμε και ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών στο σύστημα του οχήματος. Επίσης βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της απόκλισης από την γραμμή οδήγησης είναι περίπου $5 \cdot 10^{-10} m$ για λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Επίσης παρατηρούμε ότι η εντολή οδήγησης των εμπρός ελαστικών δε ξεπερνάει

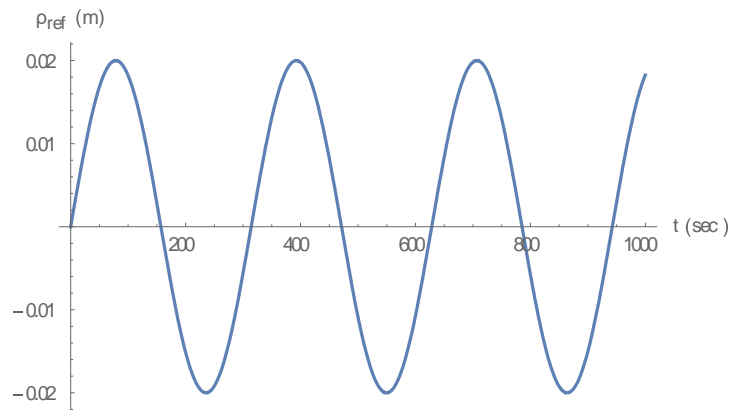
τα πραγματικά όρια, εκτός από τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων (Σχήμα 17). Με βάση τα παραπάνω θα πρέπει το όχημα να κινείται με ταχύτητες μικρότερες από $20 \frac{m}{sec}$. Σε αντίθετη περίπτωση κατά την εκκίνηση του ελεγκτή, οι μπροστινές ρόδες του οχήματος θα στρίψουν στα όρια για κάποια δέκατα του δευτερολέπτου.

5.3 Εφαρμογή του εύρωστου ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων

Εφαρμόζοντας τον νόμο ελέγχου της σχέσης (3.18) έως (3.23) στο σύστημα του αυτοκινήτου (2.1) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$y(s) = c(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)f_2 + b(q)c_c(sI_r - A_c)^{-1}b_c C \right]^{-1} b(q)c_c(sI_r - A_c)^{-1}b_c w(s) + c(q) \left[sI_n - A(q) - b(q)f_2 + b(q)c_c(sI_r - A_c)^{-1}b_c C \right]^{-1} d(q)y_r(s) \quad (4.27)$$

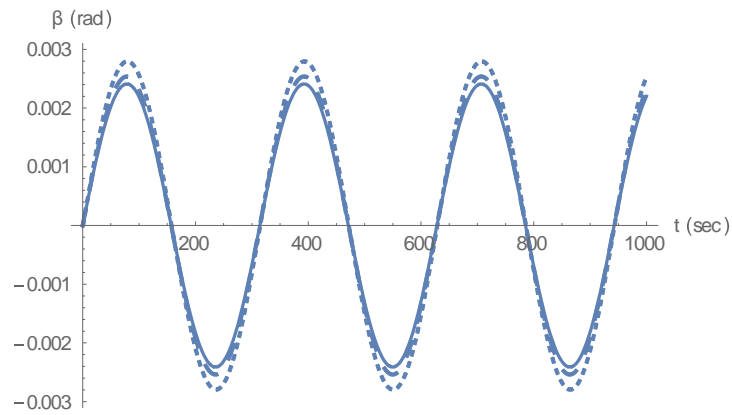
Για την προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου χρησιμοποιούνται η τιμές του Πίνακα 1 και οι τιμές των αβεβαιοτήτων μεταβάλλονται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής και μιας μέγιστης $u \in \left[0.2 \frac{m}{sec} \quad 20 \frac{m}{sec} \right]$, $c_f \in \left[0.25 \frac{N}{rad} \quad 1 \frac{N}{rad} \right]$ και $c_r \in \left[500 \frac{N}{rad} \quad 1500 \frac{N}{rad} \right]$. Στο σύστημα κλειστού βρόχου η είσοδος του οχήματος διεγείρεται με ένα σήμα όπως στο Σχήμα 11 και ένα σήμα αναφορά για τις διαταραχές της μορφής:



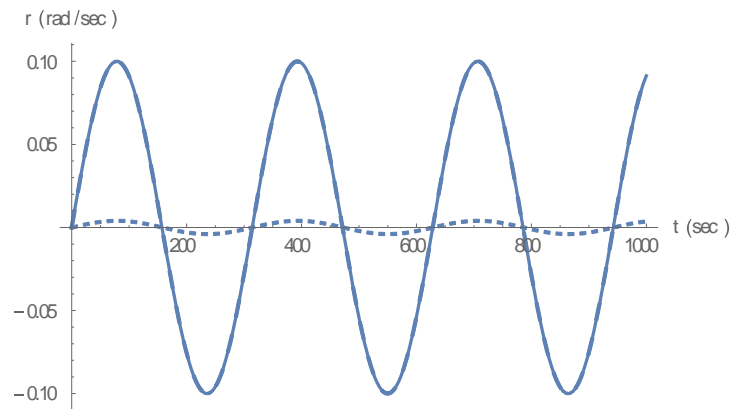
Σχήμα 18: Σήμα αναφοράς Διαταραχών

Τα διαγράμματα που απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα με την ευθεία γραμμή απεικονίζουν το διάνυσμα κατάσταση κλειστού βρόχου του μοντέλου του οχήματος για ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 0.2, c_f = 0.25$ και $c_r = 500$) με κουκίδες, για μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 10, c_f = 0.5$ και $c_r = 1000$) με ευθείες γραμμές και τα διαγράμματα με τις παύλες απεικονίζουν το διάνυσμα κατάσταση για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων ($u = 20, c_f = 1$ και $c_r = 1500$).

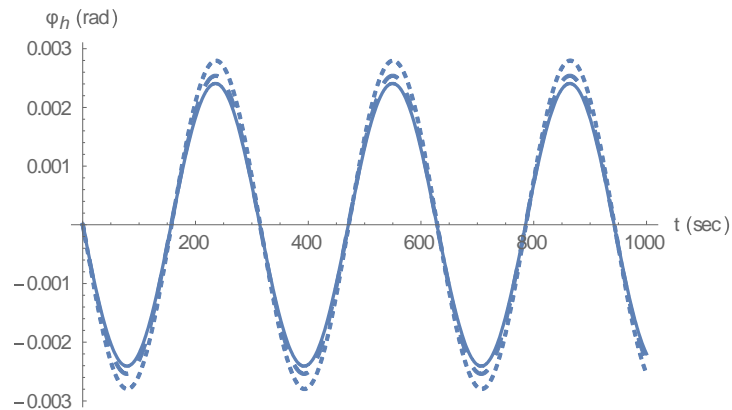
Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται η τροχιά του δρόμου και δείχνει ότι το όχημα μπαίνει σε συνεχόμενες στροφές. Στα σημεία που μηδενίζεται η καμπύλη είναι η αρχή και το τέλος της στροφής.



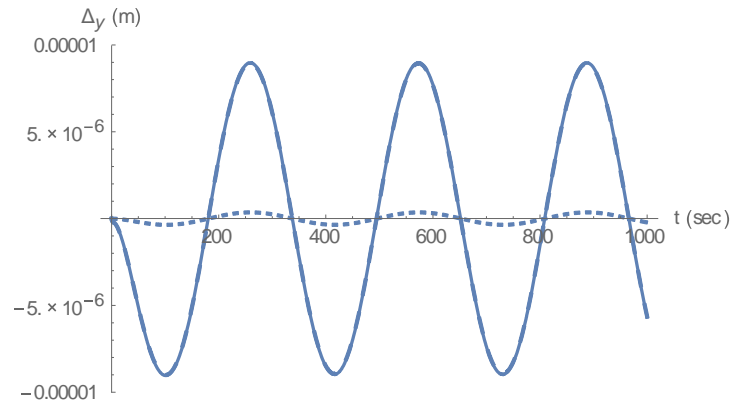
Σχήμα 19: Γωνία πλαγιολίσθησης με ελεγκτή αυθαίρετου σήματος



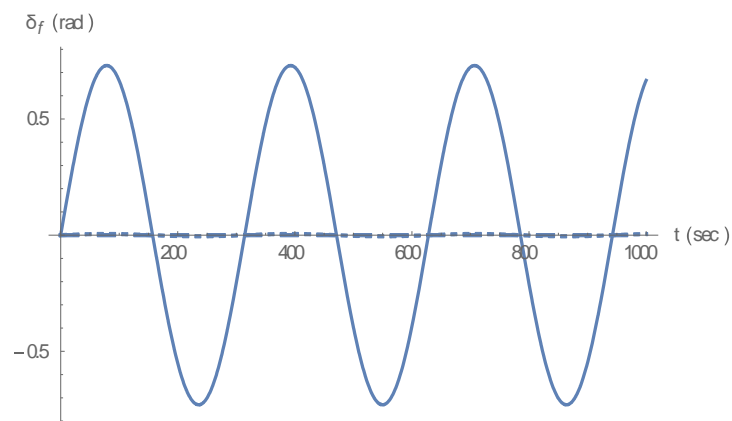
Σχήμα 20: Μεταβολή της γωνίας εκτροπής με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων



Σχήμα 21: Γωνία μεταξύ του κέντρου βάρους και της εφαπτόμενης γραμμής οδήγησης με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων



Σχήμα 22: Πλευρική απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων



Σχήμα 23: Γωνία στροφής των εμπρόσθιων ελαστικών με εφαρμογή του ελεγκτή αυθαίρετων σημάτων

Με βάση τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται ο σχεδιαστικός της ακολούθησης εντολής σε όλο το πεδίο τιμών των αβεβαιοτήτων με ταυτόχρονη αποκοπή των διαταραχών. Με βάση το Σχήμα 22 παρατηρούμε ότι η απόκλιση από την γραμμή οδήγησης του οχήματος τείνει στο μηδέν ανεξάρτητα από τις εναλλαγές στην καμπυλότητα του οδοστρώματος. Με μέγιστη απόκλιση στις υψηλές ταχύτητες οι οποία είναι μεταξύ $[-10^{-5} \text{ mm} \quad 10^{-5} \text{ mm}]$. Επίσης η εντολή οδήγησης του οχήματος παραμένει σε ανεκτές τιμές για όλο το πεδίο τιμών των αβεβαιοτήτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν τεχνικές ελέγχου για τον έλεγχο της απόκλισης ενός αυτοκινούμενου οχήματος, από τη λωρίδα οδήγησης. Για τον σκοπό αυτό η τροχιά του δρόμου μοντελοποιείται ως διαταραχή στο σύστημα. Η τροχιά του δρόμου περιγράφεται με ευθεία τμήματα και τμήματα με καμπύλες (στροφές). Η ακτίνα των τόξων είναι ρ_{ref} .

Αρχικά περιγράφεται το γραμμικό μοντέλο του οχήματος στο χώρο κατάστασης. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι εύρωστο, έχοντας τρεις αβέβαιες παραμέτρους, που είναι οι μεταβλητές c_f, c_r και u . Οι αβέβαιες παράμετροι παίρνουν τιμές σε ένα κλειστό πεδίο τιμών (βλέπε Πίνακας 1). Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση του συστήματος ανοιχτού βρόχου του οχήματος, για ελάχιστες, μεσαίες και μέγιστες τιμές των αβέβαιων παραμέτρων και διαπιστώνεται ότι το σύστημα ανοιχτού βρόχου είναι ασταθές. Επομένως παρουσιάζετε η σχεδιαστική ανάγκη για την ευσταθειοποίηση του συστήματος. Παράλληλα ορίζετε ένας ακόμη σχεδιαστικός στόχος, ο οποίος είναι της ακολούθησης εντολής, δηλαδή το όχημα θα πρέπει να κρατάει την απόκλιση από τη γραμμή οδήγηση σταθερή, με παράλληλη αποκοπή διαταραχών (τροχιά οδοστρώματος). Η ελεγκτές που σχεδιαστήκαν είναι ανεξάρτητοι των αβεβαιοτήτων και επιτυγχάνουν τον σχεδιαστικό στόχο σε όλο το πεδίο τιμών των αβέβαιων παραμέτρων.

Αρχικά σχεδιάστηκε ένας εύρωστος ελεγκτής τριών όρων. Ο ελεγκτής εφαρμόστηκε στο σύστημα ανοιχτού βρόχου και έγινε προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου, για ελάχιστες μέγιστες και μεσαίες τιμές των αβέβαιων παραμέτρων. Από την προσομοίωση παρατηρήθηκε ότι οι σχεδιαστικοί στόχοι, της ακολούθησης εντολής και της αποκοπής των διαταραχών επιτεύχθηκαν για όλο το πεδίο τιμών των αβέβαιων παραμέτρων (Σχήμα 13 έως Σχήμα 17). Η απόκλιση από την τροχιά του οδοστρώματος, όταν η είσοδο του συστήματος είναι μηδέν και οι διαταραχές του συστήματος είναι όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 12, είναι μηδέν (Σχήμα 16), πράγμα που σημαίνει ότι το όχημα διατηρεί μηδενική την απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης του οδοστρώματος ανεξάρτητα από την τροχιά του δρόμου. Επίσης παρατηρείται ότι η μέγιστη απόκλιση είναι $5 * 10^{-10} m$ για λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, πράγμα που σημαίνει ότι το όχημα δεν αποκλίνει από την πορεία του ανεξάρτητα από την τροχιά. Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί ότι η στροφή των ελαστικών παραμένει στα πραγματικά όρια, εκτός από τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων. Από την προσομοίωση που έγινε παρατηρήθηκε ότι η τιμή της γωνίας στροφής των ελαστικών ξεπερνάει τα επιτρεπτά πραγματικά όρια, όταν η ταχύτητα του οχήματος είναι στις μέγιστες τιμές (πραγματικά όρια περίπου 47° , όρια προσομοίωσης για μέγιστες τιμές περίπου 60°).

Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ένας εύρωστος ελεγκτής προσεγγιστικής ακολούθησης εντολής αυθαίρετων σημάτων. Ο ελεγκτής εφαρμόστηκε στο σύστημα ανοιχτού βρόχου και έγινε προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου, για ελάχιστες μέγιστες και μεσαίες τιμές των αβέβαιων παραμέτρων. Από την προσομοίωση παρατηρήθηκε ότι οι σχεδιαστικοί στόχοι, της ακολούθησης εντολής και της αποκοπής των διαταραχών επιτεύχθηκαν για όλο το πεδίο τιμών των αβέβαιων παραμέτρων (Σχήμα 19 έως Σχήμα 23). Η απόκλιση από την τροχιά του οδοστρώματος, όταν η είσοδο του συστήματος είναι μηδέν και οι διαταραχές του συστήματος είναι όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 18, είναι μηδέν (Σχήμα 22), πράγμα που σημαίνει ότι το όχημα διατηρεί μηδενική την απόκλιση από τη γραμμή οδήγησης του οδοστρώματος ανεξάρτητα από την τροχιά του δρόμου. Στην προσομοίωση αυτή η τροχιά του δρόμου είναι αλληπάλληλες στροφές. Επίσης παρατηρείται ότι η μέγιστη απόκλιση είναι $10^{-5} m$ για λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, πράγμα που σημαίνει ότι το όχημα δεν αποκλίνει από την πορεία του ανεξάρτητα από την τροχιά. Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί ότι η στροφή των ελαστικών παραμένει στα πραγματικά όρια, για όλες τις τιμές των αβέβαιων παραμέτρων. Από την προσομοίωση που έγινε παρατηρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της γωνίας στροφής των ελαστικών παρατηρείται στις υψηλές τιμές των αβέβαιων παραμέτρων και είναι $0,7 rad \approx 40^\circ$ που είναι μέσα στα ανεκτά πραγματικά όρια.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι και οι δύο νόμοι ελέγχου ανταποκρίνονται στις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Προτείνεται ο δεύτερος, διότι μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες (πραγματικό αυτόνομο όχημα), χωρίς να παρουσιάζονται τεχνικοί περιορισμοί (στροφή ελαστικών $< 45^\circ$), για όλες τις τιμές των αβεβαιοτήτων. Τέλος επέκταση των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορεί να υπάρξει με την εφαρμογή των νόμων ελέγχου σε πραγματικό όχημα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των θεωρητικών προσομοιώσεων με αυτών του πραγματικού μοντέλου. Επίσης θα μπορούσε να σχεδιαστεί και ένα φίλτρο για την ταυτόχρονη αποκοπή της γωνίας πλαγιολίσθησης του οχήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ

- [A.1] Μ. Γ. Σκαρπέτης , “Έλεγχος Γραμμικών Συστημάτων με Δομημένες Αβεβαιότητες” , Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1998.
- [A.2] Μ.Γ Σκαρπέτης, Φ.Ν. Κουμπουλής, «Αυτόματος έλεγχος υδραυλικών και πνευματικών συστημάτων», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Αθήνα 2016
- [A.3] Π.Ν Παρασκευόπουλος, “Εισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο ,Τόμος Α: θεωρία” , Αθήνα 2001.
- [A.4] Μ. G. Skarpetis, “Aircraft Flight Control via Decoupling Techniques “(Έλεγχος Πτήσης Αεροσκαφών με Τεχνικές Αποσύζευξης), Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Αθήνα 1991.
- [A.5] Φ. Ν. Κουμπουλής, Β. Γ. Μέρτζιος, “Εισαγωγή στη ρομποτική”, Αθήνα 2002
- [A.6] Φ. Ν. Κουμπουλής , “Βιομηχανικός Έλεγχος”, Αθήνα 1999
- [A.7] Φ. Ν. Κουμπουλής, Μ. Π. Τζαμτζή , “Διδακτικές Σημειώσεις στον Έλεγχο Και Προγραμματισμό Ρομπότ ”, Αθήνα 1999.
- [A.8] Ντελλής Αχιλλεύς, “Εύρωστος έλεγχος για αυτοκίνητα με τετραδιεύθυνση”, ΤΕΙ Χαλκίδας, Τμήμα Αυτοματισμού, 2005
- [A.9] Ντελλής Αχιλλεύς, “Αυτόματη ρύθμιση δικτύου ανοιχτών καναλιών με τεχνικές προσομοιωμένης απόπτησης”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Βόλος 2009
- [A.10] R.C Dorf R.H Bishop, “Σύγχρονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου”, Α έκδοση, Τζιόλα 2003
- [A.11] Ackermann, J, A. Barlett, D. Kaesbauer, W. Siemel and R. Steinhauser (1993). Robust Control (system with uncertain physical parameters), Springer, London.
- [A.12] Nikolai Schlegel, “Autonomous Vehicle Control using Image Processing” Master of Science In Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 1997

ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- [B.1] J. Guldner, V Utkin, J.Ackermann, A Sliding Mode Control Approach to Automatic Car Steering, Proceedings of the American Control Conference, P.1969-1973, Baltimore, MY, 1994
- [B.2] R.H. Byrne, C Abdallah, Robust Lateral Control of Highway Vehicles, Intelligent Vehicles Symposium Proceedings 1994, P.375-379, IEEE, Piscataway, NJ, 1994
- [B.3] Pushkin Kachroo, Nonlinear control strategies and vehicle traction control, UMI, Ann Arbor, MI, 1993
- [B.4] S. S. You, Y. –H. Chai, “Multi-Objective Control Synthesis: an application to 4WS passengers vehicles”, Mechatronics 9 (1999), pp. 363 – 390.
- [B.5] D.A. Schoenwald, (2000), "AUVs: In space, Air, Water, and on the Ground“, *IEEE Control System Magazine*, vol.20, no. 6, pp. 15-18.
- [B.6] J. Yuh and T. Ura, (1996), "Gust editors' Introduction, special issues on autonomous underwater robots“*Autonomous Robots*, pp. 75-77.
- [B.7] Ackermann, J., Siemel, W., and Steinhauser, R., (1993), "Robust automatic steering of a bus", *Proc. ECC'93 European Control Conference*, Groningen, The Netherlands, 3, pp.1534-1539.

- [B.8] Ackermann, J., and W. D. Arenberg, (1990), "Automatic track control of a city bus". *IFAC Theory Report on Benchmark Problems for Control System Design*,
- [B.9] Ackermann, J., and SieneI, W., (1993), "Robust yaw damping of cars with front and rear wheel steering," *IEEE Trans. on Control System Technology*, 1, pp.15-20.
- [B.10] Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling of a car steering dynamics with arbitrary mass distribution", In *Proc. Amer. Control Conf.*, Baltimore, pp. 1964-1968.
- [B.11] Ackermann, J., (1994), "Robust car steering by yaw rate control", In *Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, Honolulu, HI, Dec., pp. 2033-2034
- [B.12] Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling, ideal dynamics and yaw stabilization of 4WS cars", *Automatica*, 30, pp.1761-1768.
- [B.13] Furukawa, Y., N. Yuhara, S. ano, H. Takeda and Y. Hatsushita (1989), "A review of four-wheels steering studies from the view point of vehicle dynamics and control", *Vehicle System Dynamics*, 18, pp. 151-186.
- [B.14] McLean, J.R. and E.R. Hoffmann (1973), "The effects of restricted preview on driver steering control and performance", *Human Factors*, 15, 421-430.
- [B.15] Ono, E., K. Takanami, N. Iwama, Y. Hayashi, Y. Hirano, anf Y. Satoh, (1994), "Vehicle intergraded control for steering and traction systems by μ -synthesis", *Automatica.*, 30, pp.1639-1647.
- [B.16] Michael G. Skarpetis, Fotis N. Koumboulis, and Achilleas S. Ntellis, "Robust Arbitrary Reference Command Tracking with Application to Hydraulic Actuators", 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Rome Italy 2012.
- [B.17] Michael G. Skarpetis, Fotis N. Koumboulis, and Achilleas S. Ntellis, "Robust Position Tracking for a hydraulic Servo System", 22st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'14, 16-19 June, Palermo, Italy.
- [B.18] Michael G. Skarpetis, Fotis N. Koumboulis, and Achilleas S. Ntellis, "Robust Control of Pneumatic Clutch Actuators Using Simulated Annealing Techniques", 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'13, 25-28 June, Chania, Crete.
- [B.19] Michael G. Skarpetis, Fotis N. Koumboulis, and Achilleas S. Ntellis, "Robust Control Algorithms for a Hydraulic Actuator with Variable Displacement Vane Pump", 17th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2012), Krakow Poland
- [B.20] Michael G. Skarpetis, Fotis N. Koumboulis, and Achilleas S. Ntellis, "Longitudinal flight Multi Condition Control Using Robust PID Controllers", 16th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2011), Toulouse France
- [B.21] M.G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, «Robust Multi Condition Flight Controllers», 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED '08) June 25-27, Ajaccio-Corsica, France

- [B.22] M.G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, and A.S. Ntellis and T.E. Tsimos, «Robust Lane Keeping for a Tractor – Trailer», 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2007), Patras, Greece, September 25-28
- [B.23] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and Apostolis Sarris, «Robust Controller Design for Active Hydraulic Suspension», 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2007), Patras, Greece, September 25-28
- [B.24] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, «Robust Tracking for Time-Varying Uncertain Systems with Application to 4WS Vehicles», IEEE Industrial Electronics, IECON 2006- 32nd Annual Conference on Nov. 2006 Pages: 4689-4694
- [B.25] M. G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, A.S Ntellis, G. Chamilothis, «Robust Asymptotic Output Tracking for Four-Wheel-Steering Vehicles», 3rd IEEE International Conference on Mechatronics (ICM '06) July 3-5, 2006, Budapest, Hungary
- [B.26] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, “Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering, 14th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06), June 28-30, 2006, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [B.27] Vladimir Strejc, *State Space Theory of Discrete Linear Control*, John Wiley & Sons, New York, 1981
- [B.28] Pieter Eykhoff, *System Identification, Parameter and State Estimation*, John Wiley & Sons, London, 1974
- [B.29] J.V. Beck, K.J. Arnold, *Parameter Estimation in Engineering and Science*, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, New York, 1977
- [B.30] Ackermann, J, (1992), "Ein regelungsverfahren zur gierdämpfung von srab enfahrzeugen mit allradlenkung", „Deutsches Patentamt Munchen, Patentanmeldung P 4206654.9, Mar 1992.
- [B.31] Sanos, S., Y. Furakawa and S. Shiraishi (1986), "Four wheel steering system with rear wheel steer angle controlled as a function of steering wheel angle", *SAE Paper, 860625*
- [B.32] Bakker, E., H.B. Pacejka and L.Linder (1989), "A new tire model with an application in vehicle dynamics a studies", *SAE Paper, 890087*
- [B.33] Pacejka H.B. (1979), "Tire factors and vehicle handling", *Int. J. of Vehicle Design*, 1, pp.1-23.
- [B.34] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and N.S. Roussos, “Robust output command tracking for linear systems with non linear uncertain structure with application to flight control”, in Proc. 44th IEEE Conf. Decision Contr., and Europ. Contr. Conf. Seville, Spain 2005, pp. 7502-7507.
- [B.35] Naito, G., E. Yaguchi, T. Matuda, M. Asahi, T. Nakata and I. Inokuchi (1990), "New electronically controlled torque split 4WD system for improving cornering performance", *SAE Paper, 900056*.

- [B.36] Metz, D., and J. Maddock, (1986), "Optimal ride height and pitch control for championship race cars", *Automatica*, 22, pp. 509-520.
- [B.37] M.G. Skarpetis, "Robust Automatic Control of Vehicles", Pd thesis, IKY (Μεταδιδακτορική έρευνα στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών), 2000.
- [B.38] F. N. Koumboulis, M.G.Skarpetis, N.D. Kouvakas and N.S. Vlachos, "Noninteracting control for submarine straight horizontal course", *8th IEEE Mediterranean Conference on Control & Automation, ISIC-2000*, Patra Greece, 2000.
- [B.39] F. N. Koumboulis and M.G.Skarpetis, "Automatic steering control of unmanned vehicles, **System and Control: Theory and Applications**, *Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press*, pp. 180-182, 2000.
- [B.40] M.G.Skarpetis and F. N. Koumboulis, "Multi-Objective robust control for 4WS cars", **System and Control: Theory and Applications**, *Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press*, pp. 169-171, 2000.
- [B.41] F. N. Koumboulis, M. G. Skarpetis and N. D. Kouvakas, "An adaptive neural controller for 4Ws cars", IFDICON' 2001, European Workshop on Service and Humanoid Robots, Santorini, June 24-28, 2001.
- [B.42] F. N. Koumboulis, M. G. Skarpetis, N. D. Kouvakas and B. G. Mertzios, "Tracking control of an articulated vehicle using P-D feedback", Ktisivios, Santorini, Greece, June 28-30, 2001.
- [B.43] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust control of cars with front and rear wheel steering", *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*, vol. 149, pp. 394-404, 2002.
- [B.44] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust Triangular Decoupling with Application to 4WS Cars", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, pp. 344-352, 2000.
- [B.45] S. Bhattacharyya, A.C. del Nero Gomes and J.W.Houze, "The structure of robust disturbance rejection control", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 28, pp. 874-861, 1983.
- [B.46] G. Zames and J.G. Owen, "Duality Theory for MIMO robust disturbance rejection", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 38, pp. 743-752, 1993.
- [B.47] J.H.Su and I.K.Fong, "Robust stability analysis of linear continuous / discrete-time systems with output feedback controllers", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 38, pp. 1154-1158, 1993.
- [B.48] L.H. Keel, S.P.Bhattacharyya and J.W.Howze, Robust control with structured perturbations, *IEEE Trans. Automat. Control*, 339, (1988), pp. 68-78.
- [B.49] B.R. Barmish, and H.I. Kang, A survey of extreme points results for robustness of control systems, *Automatica*, 24, (1993), pp. 713-35.
- [B.50] Koumboulis, F.N., (1994), "Input output triangular decoupling and data sensitivity", *Automatica*, vol. 32, pp. 569-573, 1996.
- [B.51] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Input -Output decoupling for linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, vol. 333(B), pp. 593-624, 1996.
- [B.52] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Output feedback decoupling of linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, vol. 333(B), pp. 625-629, 1996.
- [B.53] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis "Robust Disturbance Rejection with Simultaneous Robust Input - Output Decoupling", *Automatica*, vol. 33, pp. 1415-1421, 1997.

- [B.54] Wei K and Barmish B.R., “Making a polynomial Hurwitz invariant by choice of feedback gain”, Int. J. Contr. Vol. 50, pp 1025-1038, 1989.
- [B.55] Chen, C. T., Linear System Theory and Design. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1984.
- [B.56] Goodwin, G. C., Graebe, S. F., Salgado M.E., Control System Design, Prentice Hall, 2001
- [B.57] Herrmann , A.H, Brenner , W.B & Stadler , R.S (2018). Autonomous Driving: How the Driverless Revolution Will Change the World . (1st ed.). England: Emerald Publishing Limited. Pg 95 to 96
- [B.58] Morgan Stanley Reserch, 2013: Autonomous Cars, Self-Driving the New Industry Paradigm
- [B.59] Χαράλαμπος Σουρής , Αθανάσιος Θεοφιλάτος , Γιώργος Γιαννής, “ Διερεύνηση Αποδοχής Αυτόνομων Οχημάτων από τους Έλληνες Οδηγούς ”, 8ο Διεθνές Συμπόσιο για τις μεταφορές στην Ελλάδα, Θεσσαλονίκη, 2017
- [B.60] Campbell, Mark, Magnus Egerstedt, Jonathan P. How, and Richard M. Murray. "Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 368, no. 1928 (2010): 4649-4672.
- [B.61] Aaafoundationorg. (2019). Aaafoundationorg. Retrieved 22 February, 2019, from https://aaafoundation.org/wpcontent/uploads/2018/02/18-0019_AAFTS-ADS-Research-Brief.pdf
- [B.62] S. Mammari “Two-Degree-of-Freedom H^∞ Optimization and Scheduling for Robust Vehicle Lateral Control” Vehicle System Dynamics, 34 (2000), pp. 401–422
- [B.63] Törő, O., Bécsi, T., Aradi, S. (2016) “Design of Lane Keeping Algorithm of Autonomous Vehicle”, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 44(1), pp. 60–68.
- [B.64] Netto, M., Chaib, S., Mammari, S.: ‘Lateral adaptive control for vehicle lane keeping’. American Control Conf., Boston, Massachusetts, USA, 2004, vol. 3, pp. 2693–2698
- [B.65] Peng, H.: ‘Evaluation of driver assistance systems: a human centered approach’. Proc. 6th Symp. Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan, 2002
- [B.66] Falcone, P., Ali, M., Sjöberg, J.: ‘Predictive threat assessment via reachability analysis and set invariance theory’, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 2011, 12, (4), pp. 1352–1361
- [B.67] Shimakage, M., Satoh, S., Uenuma, K., et al.: ‘Design of lane-keeping control with steering torque input’, JSAE Soc. Autom. Eng. Japan, 2002, 23, (3), pp. 317–323
- [B.68] Emma Allen, ‘Autonomous Vehicles – challenges and opportunities’
- [B.69] Morgan Stanley Reserch, 2013: Autonomous Cars, Self-Driving the New Industry Paradigm
- [B.70] <https://www.drive-now.com/gb/en/london>
- [B.71] M. Karthikeyan, S. Sathiamoorthy, and M. Vasudevan. “Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Based Obstacle Avoidance System for Autonomous Vehicle”, Springer Nature Switzerland AG 2020 J. S. Raj et al. (Eds.): ICIDCA 2019, LNDECT 46, pp. 118 126, 2020.
- [B.72] Chiou, J.S., Liu, M.T.: Using fuzzy logic controller and evolutionary genetic algorithm for automotive active suspension system. Int. J. Automot. Technol. 10(6), 703 (2009)

- [B.73] Termeh, S.V.R., Khosravi, K., Sartaj, M., Keesstra, S.D., Tsai, F.T.-C., Dijkma, R., Pham, B.: Optimization of an adaptive neuro-fuzzy inference system for groundwater potential mapping. *Hydrogeol. J.* 27, 2511–2534 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02017-9>