



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**<< ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ>>**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΠΕΝΤΑΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΛΥΜΠΕΡΗΣ-ΜΠΕΚΙΑΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, που δέχθηκε να αναλάβει την επίβλεψη της εργασίας μου και να με καθοδηγήσει να την υλοποιήσω.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στον Δρ. Γιώργο Ταϊρίδη, μεταδιδακτορικό ερευνητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης και υπότροφο του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), που με βοήθησε ανελλιπώς να λύνω όλα τα προβλήματα που συναντούσα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Σταυρακάκη, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και τυπικά επιβλέποντα μου, που με παρότρυνε να απευθυνθώ στον κ. Σταυρουλάκη για την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς ακόμα τον κ. Νικόλαο Λυμπέρη-Μπεκιάρη, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, που δέχτηκε να είναι στην επιτροπή.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου ήταν πάντα δίπλα μου και με βοηθούσαν στα καλά και τα άσχημα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για όλη την αγάπη και την στήριξη που μου έδωσαν για να βρίσκομαι σε αυτό το σημείο σήμερα. Αυτή η διπλωματική είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΡΟΜΠΟΤ	8
ΓΕΝΙΚΑ	8
ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	9
ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΡΟΜΠΟΤ	11
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΕΝΟΣ ΡΟΜΠΟΤ	12
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ	13
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ	13
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ 2 ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ (2DoF)	15
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ 2 ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ (2DoF)	16
ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ	23
ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ	24
ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
ΔΙΤΙΜΗ (ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΑ) ΛΟΓΙΚΗ	25
ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	25
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΙΤΙΜΗ ΚΑΙ ΑΣΑΦΗ ΛΟΓΙΚΗ	26
ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	28
ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΣΑΦΗΣ ΣΥΛΛΟΓΙΣΜΟΣ	28
ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	30
ΓΕΝΙΚΑ	30
ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	31
ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	32
ΕΙΔΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	34
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	35
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	37
ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ (ANFIS)	37
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	37
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ	38

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	40
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΡΑΧΙΟΝΑ	40
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΛΕΓΚΤΗ	44
ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	49
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	50
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	58

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1- Βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας (πηγή Turbosquid)	8
Εικόνα 2-Το ανθρωπόμορφο ρομπότ << Τάλως>> (πηγή Marathon Press)	9
Εικόνα 3-Unimate, το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ (πηγή Automate)	10
Εικόνα 4-Τα μέρη (links) και οι αρθρώσεις (joints) ενός ρομποτικού βραχίονα (πηγή ResearchGate)	14
Εικόνα 5-Κινηματική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF)	15
Εικόνα 6-Δυναμική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF) (πηγή Engineering Stack Exchange)	18
Εικόνα 7-Κοινό παράδειγμα δίτιμης-ασαφούς λογικής	27
Εικόνα 8-Τυπική δομή ασαφούς ελεγκτή (FIS)	29
Εικόνα 9-Βιολογικός νευρώνας (πηγή Wikipedia)	31
Εικόνα 10-Μοντέλο τεχνητού νευρώνα	33
Εικόνα 11-Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο τεσσάρων επιπέδων	34
Εικόνα 12-Είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων (αριστερά feed forward δίκτυο, δεξιά recurrent δίκτυο) (πηγή Μήτσιος, 2017)	35
Εικόνα 13-Οπισθοδιάδοση σφάλματος (Back Propagation)	36
Εικόνα 14-5αεπίπεδη αρχιτεκτονική προσαρμοστικού νευροασαφούς συστήματος ANFIS (πηγή ResearchGate)	38
Εικόνα 15-Πίνακας Αδράνειας $M(q)$ (Inertia)	41
Εικόνα 16-Πίνακας Κεντρομόλου $V(q, \dot{q})$ (Coriolis)	42
Εικόνα 17-Πίνακας βαρύτητας $G(q)$ (Gravity)	43
Εικόνα 18-Συνολικό σύστημα ανάδρασης	43
Εικόνα 19-Σύστημα ανάδρασης με τους ANFIS ελεγκτές	49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ευφυή μηχανικά συστήματα, τα οποία είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον μέσω κάποιου ενεργού μηχανισμού ελέγχου. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και η περίπτωση ενός ρομποτικού βραχίονα. Ωστόσο, λόγω ατελειών στο μηχανικό μοντέλο, αλλά και στα αισθητήρια όργανα, πάντα υπεισέρχεται στο σύστημα κάποιος βαθμός αβεβαιότητας. Ο κλασικός έλεγχος μπορεί να λειτουργήσει υπό συνθήκες αβεβαιότητας, αλλά με μειωμένη απόδοση.

Η σχεδίαση κανόνων ελέγχου μη γραμμικής ανάδρασης με χρήση κλασικών μεθόδων είναι δύσκολο εγχείρημα. Ως εκ τούτου προτείνεται η χρήση τεχνικών ευφυούς ελέγχου, ο οποίος βασίζεται σε νευροασαφή συστήματα.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η ανάπτυξη αξιόπιστου συστήματος νευροασαφούς ελέγχου σε περιβάλλον MATLAB(Simulink) και η σύνδεσή του με μηχανικό σύστημα ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας. Οι τεχνικές που θα αναπτυχθούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είναι κατάλληλες για επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων και μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος διαφορετικών εφαρμογών.

ABSTRACT

Intelligent mechanical systems, which are equipped with sensors and exciters made of piezoelectric materials, interact with the environment through an active control mechanism. One such example is the case of a robotic arm. However, due to imperfections in the mechanical model, but also in the sensory organs, a certain degree of uncertainty always enters the system. Classic control can operate under conditions of uncertainty, but with reduced efficiency.

Designing nonlinear feedback control rules using classical methods is a difficult task. It is therefore recommended to use intelligent control techniques, which are based on neurofuzzy systems.

The aim of this work is the development of a reliable neurofuzzy control system in MATLAB (Simulink) environment and its connection to a mechanical robotic arm system of 2 degrees of freedom. The techniques that will be developed in the context of this work are suitable for solving linear and non-linear systems and can be applied in a numeral of different applications.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ρομποτικοί βραχίονες, τα τελευταία χρονιά έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό το ανθρώπινο δυναμικό στις βιομηχανίες. Το γεγονός ότι οι ρομποτικοί βραχίονες δίνουν την δυνατότητα αυτοματοποίησης της εργασίας τους καθιστούν αναγκαίους σε κάθε βιομηχανική μονάδα. Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων καθιστά τα ρομπότ ιδανικά για οποιαδήποτε συνθέτη εφαρμογή που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια (πχ χειρουργική ιατρική, βιομηχανίες κλπ.).

Τα εμπορικά βιομηχανικά ρομπότ αποτελούνται από 2 βασικά μέρη, τον βραχίονα χειριστή και τον ελεγκτή. Η εύρεση επιθυμητής διαδρομής σε ένα απρόβλεπτο περιβάλλον για το βραχίονα είναι το ουσιαστικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε κατά τον έλεγχο του. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται εφαρμογή προσομοιώσεων με υβριδικό έλεγχο προσαρμοσμένο στην ικανότητα μάθησης και λογικής ενός νευρωνικού δικτύου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εφαρμογή Neuro-Fuzzy Control ή ANFIS για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα κάτω από απρόβλεπτες συνθήκες, όπως για παράδειγμα την εφαρμογή εξωτερικής ροπής στον βραχίονα. Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιώντας το εργαλείο της MATLAB, Simulink, μοντελοποιήσαμε το σύστημα ανάδρασης του ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF) σύμφωνα με το δυναμικό του μοντέλο και τις εξισώσεις Euler-Lagrange, με εισόδους εξωτερικές ροπές στις αρθρώσεις του βραχίονα και εξόδους την θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του άκρου του βραχίονα και στο σημείο σύνδεσης των 2 στελεχών.

Από την παραπάνω μοντελοποίηση εκλάβαμε βάσεις δεδομένων (datasets) τιμών εισόδου-εξόδου με σκοπό την υβριδική εκπαίδευση των ελεγκτών μας. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο ANFIS υλοποιήσαμε τους 2 ελεγκτές μας τους οποίους και προσθέσαμε στο αρχικό μας σύστημα για να παρατηρήσουμε αν υπήρξε βελτίωση στο πρόβλημα που είχαμε να αντιμετωπίσουμε.

ΡΟΜΠΟΤ



Εικόνα 1-Βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας (πηγή Turbosquid)

ΓΕΝΙΚΑ

Ρομποτική ορίζεται ως η επιστήμη που ασχολείται με τη σχεδίαση, την κατασκευή και τις εφαρμογές των ρομπότ. Ως ρομπότ μπορούμε να ορίσουμε έναν μηχανισμό σχεδιασμένο, ώστε μέσω προγραμματιζόμενων κινήσεων να μεταφέρει υλικά, τεμάχια, εργαλεία ή ειδικευμένες συσκευές με σκοπό την εκτέλεση ποικίλων εργασιών.

Για να φτάσουμε στην σημερινή μορφή των ρομπότ χρειάστηκε να περάσουν από πολλά στάδια. Τα πρώτα ρομπότ είναι αρκετά απλοϊκά ως προς την λειτουργία και δεν έχουν πολλές δυνατότες όπως την δυνατότητα υπολογισμού και αίσθησης. Τα ρομπότ δεύτερης γενιάς, διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και αισθητήρες ανατροφοδότησης. Τα τρίτης γενιάς ρομπότ είναι ικανά να παίρνουν αποφάσεις με την βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης ενώ παράλληλα εκτέλουν την εργασίας τους. Τις ικανότητες αυτές, τις αποκτούν με την χρήση προηγμένων αισθητήρων αφής, δύναμης, απόστασης, όρασης, κ.λπ..

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Από την αρχαιότητα υπάρχει στην σκέψη του ανθρώπου η ύπαρξη του ρομπότ. Στην ελληνική μυθολογία, ο θεός Ήφαιστος κατασκεύαζε ανθρωποειδή ρομπότ που τον υπηρετούσαν και είχαν την ικανότητα ομιλίας και κίνησης. Ίσως το γνωστότερο τέτοιο ρομπότ ήταν ο Τάλως, οποίος κατασκευάστηκε κατά παραγγελία του ετεροθαλή αδερφού του και βασιλιά των Μινωιτών, Μίνωα, και είχε σκοπό να προστατεύει το βασίλειο από πιθανούς εισβολείς.



Εικόνα 2- Το ανθρωπόμορφο ρομπότ << Τάλως>> (πηγή Marathon Press)

Η λέξη ρομπότ προέρχεται από την τσέχικη λέξη <<robota>> και αναφέρεται στην έννοια της καταναγκαστικής εργασίας. Δημιουργήθηκε από τον Τσέχο σκηνοθέτη Karel Capek το 1921 κατά την διάρκεια του έργου του R.U.R.

Η πρώτη αναφορά στην επιστήμη της ρομποτικής παρουσιάζεται από τον Ρώσο συγγραφέα, Isaac Asimov, ο οποίος αφού αρχικά όρισε σαν ρομπότ μια ανθρωπόμορφη μηχανή χωρίς συναισθήματα, έθεσε τους τρεις νόμους που χαρακτηρίζουν κάθε ρομπότ:

1. Ένα ρομπότ δεν μπορεί να βλάψει τον άνθρωπο με οποιοδήποτε τρόπο.
2. Ένα ρομπότ πρέπει να υπακούει στις εντολές του ανθρώπου, εκτός αν έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.
3. Ένα ρομπότ πρέπει να προστατεύεται, εκτός αν αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους 2 πρώτους νόμους.

Το 1954 περιγράφεται για πρώτη φορά ένα βιομηχανικό ρομπότ (Unimate) από τον μηχανικό George C. Devol. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1961 και είχε την μορφή ρομποτικού βραχίονα. Σκοπός την κατασκευής του ήταν να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εργασίες στην βιομηχανία. Χρειάστηκε να φτάσουμε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 για να αρχίσουν τα βιομηχανικά ρομπότ να έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην βιομηχανική παραγωγή.



Εικόνα 3- Unimate, το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ (πηγή Automate)

ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΡΟΜΠΟΤ

Όπως αναφέραμε, τα ρομπότ είναι μηχανές, που δεν έχουν τη μορφή ή τη συμπεριφορά του ανθρώπου, αλλά μπορούν να εκτελούν εργασίες, που κάνει ο άνθρωπος. Ένας τέτοιος μηχανισμός συνήθως αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

- **Το μηχανολογικό υποσύστημα**, το οποίο είναι υπεύθυνο για την κίνηση του ρομπότ (π.χ οι αρθρώσεις, οι οδηγοί, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, οι επενεργητές-κινητήρες, κ.λ.π.)
- **Το υποσύστημα αίσθησης**, το οποίο δέχεται εξωτερικές εντολές, τις επεξεργάζεται και τις τροφοδοτεί σε διάφορους υπομηχανισμούς του ρομπότ. Ακόμα, συλλέγει πληροφορίες για την κατάσταση, στην οποία βρίσκονται τόσο το ίδιο το ρομπότ, όσο και το περιβάλλον του. Στο υποσύστημα αίσθησης περιλαμβάνονται όργανα μέτρησης, αισθητήρες κ.λ.π.
- **Το υποσύστημα ελέγχου**, το οποίο συντονίζει ολόκληρο το σύστημα, οργανώνοντας την αίσθηση με τη δράση έτσι, ώστε το ρομπότ να λειτουργεί αποτελεσματικά και με τον επιθυμητό τρόπο. Για την σχεδίαση και την υλοποίηση του ελεγκτή απαιτείται ο συνδιασμός γνώσεων από πολλές γνωστικές περιοχές (αυτόματος έλεγχος, τεχνητή νοημοσύνη, επιστήμη υπολογιστών, κ.λ.π.)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΕΝΟΣ ΡΟΜΠΟΤ

Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας του ρομπότ (και ως αποτέλεσμα του ρομποτικού βραχίονα) είναι απαραίτητο να αναφέρουμε κάποιες βασικές παραμέτρους που το διέπουν.

- **Τις προδιαγραφές του:** Κάθε ρομπότ χαρακτηρίζεται από κάποιες ονομαστικές τιμές όπως, το μέγιστο βάρος εξυπηρέτησης, την ταχύτητα εκτέλεσης, την επιτάχυνση του κινητήρα, την ακρίβεια λειτουργίας καθώς και την περιοχή δράσης του.
- **Ο αριθμός των αξόνων με τους οποίους κινείται :** Ένα ρομπότ που κινείται με δύο άξονες μπορεί να επιτελέσει εργασίες πάνω σε ένα επίπεδο, ενώ κάποιο άλλο που κινείται σε τρεις άξονες μπορεί να επιτελέσει εργασίες στον τρισδιάστατο χώρο.
- **Οι βαθμοί ελευθερίας** Ο αριθμός των ελάχιστων ανεξάρτητων μεταβλητών που απαιτούνται για να καθορισθεί η θέση και ο προσανατολισμός του σώματος στο χώρο. Συνήθως ταυτίζονται με τον αριθμό των αρθρώσεων του ρομπότ.
- **Η κινηματική του :** Αυτή εξαρτάται από τους βραχίονες, τους συνδέσμους και γενικότερα όλα τα μέλη του ρομπότ και καθορίζει τις κινήσεις του, άρα και τη λειτουργία του.

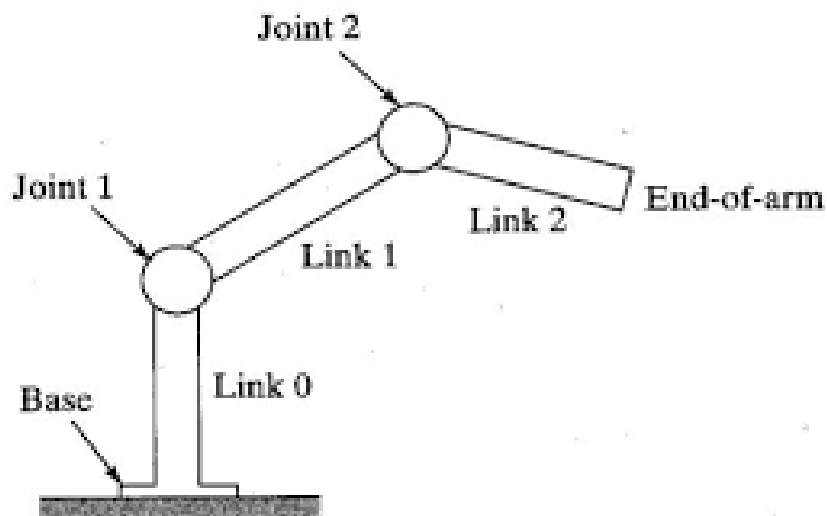
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ

Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικό υπολογιστή σαν μια βασική συνιστώσα του ελέγχου τους. Οι υπολογιστές, κατευθύνουν τις γραμμές παραγωγής και ελέγχουν τα συστήματα κατασκευής (π.χ. εργαλειομηχανές, συγκολλητές, κοπτικές διατάξεις Laser κ.α.). Ως αποτέλεσμα, η χρήση των σύγχρονων ρομπότ αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον πλήρη αυτοματισμό των εργοστασίων.

Ένα βιομηχανικό ρομπότ μιμείται το ανθρώπινο χέρι. Για αυτό το λόγο αναφερόμαστε σε αυτό και σαν ρομποτικό βραχίονα. Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται από διαδοχικούς συνδέσμους ή μέλη (links), που συνδέονται με αρθρώσεις (joints). Σαν αρθρώσεις μπορούμε να θεωρήσουμε μηχανισμούς οι οποίοι λειτουργούν ακριβώς όπως ο ώμος, ο αγκώνας ή καρπός σε ένα ανθρώπινο χέρι.

Κάθε μια από τις αρθρώσεις του βραχίονα παρέχει έναν βαθμό ελευθερίας στην κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης. Επομένως, για η βαθμούς ελευθερίας, έχουμε η αρθρώσεις ή οι άξονες κίνησης, ως προς τους οποίους μπορεί να κινηθεί ο βραχίονας. Οι άξονες κίνησης μπορεί να είναι άξονες στροφικής κίνησης (περιστροφικές αρθρώσεις), ή γραμμικής μεταφορικής κίνησης (πρισματικές αρθρώσεις). Στο άκρο του βραχίονα συναντούμε κάποιον ειδικό μηχανισμό (πχ. κεφαλή συγκόλλησης, πιστόλι βαφής κλπ.), που ονομάζεται τελικό στοιχείο δράσης (end effector), η κίνηση του οποίου ρυθμίζεται ελέγχοντας τη θέση και την ταχύτητα των αξόνων κίνησης του βραχίονα.

Για να κινηθεί και να «φτάσει» σε ένα αυθαίρετο σημείο στο χώρο το άκρο του ρομπότ, πρέπει ο βραχίονας να έχει 6 βαθμούς ελευθερίας (Degrees Of Freedom). Οι τρεις εξ αυτών προσδιορίζουν την θέση του και οι υπόλοιποι τρεις τον προσανατολισμό του.



Εικόνα 4- Τα μέρη (links) και οι αρθρώσεις (joints) ενός ρομποτικού βραχίονα (πηγή ResearchGate)

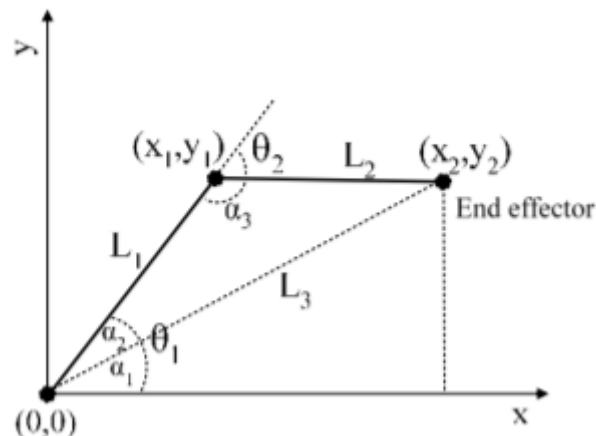
Η υπολογιστική μονάδα κάθε σύγχρονου ρομποτικού βραχίονα περιέχει ένα πρόγραμμα ελέγχου και ένα πρόγραμμα εργασίας. Το πρόγραμμα ελέγχου καθορίζει την κίνηση κάθε άρθρωσης σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που δίνει ο κατασκευαστής. Το πρόγραμμα εργασίας, είναι το πρόγραμμα, το οποίο δίνεται από τον χειριστή του βραχίονα, και είναι όλες οι απαραίτητες κινήσεις για την υλοποίηση της επιθυμητής εργασίας.

Ένα πρόγραμμα εργασίας μπορεί να δημιουργηθεί είτε περνώντας το ρομπότ από τις επιθυμητές θέσεις (training), είτε μέσω κάποιας γλώσσας προγραμματισμού.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μια γλώσσα προγραμματισμού, το ρομπότ χρειάζεται κατάλληλο επεξεργαστή, για την εύρυθμη παράλληλη λειτουργία των προγραμμάτων ελέγχου και εργασίας. Στην ουσία, μεταφράζει το πρόγραμμα εργασίας και παρέχει τα δεδομένα, που χρειάζεται το πρόγραμμα ελέγχου για να καθοδηγήσει το βραχίονα στις επιθυμητές κινήσεις.

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ 2 ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ (2DoF)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως μοντέλο προσομοίωσης θα χρησιμοποιήσουμε ένα ρομποτικό βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 5- Κινηματική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF)

Η κινηματική είναι ένας κλάδος της μηχανικής που περιγράφει την κίνηση αντικειμένων χωρίς αναφορά στις δυνάμεις που προκαλούν τη κίνηση. Κινηματική σε βιομηχανικό ρομπότ αφορά τη θέση και τον προσανατολισμό του τελικού σημείου του ρομπότ (end effector) σε σχέση με τη γωνία των μελών του ρομπότ. Υπάρχουν δύο κινηματικές αναλύσεις σχετικά με την κίνηση του ρομπότ, η ευθεία κινηματική και αντίστροφη κινηματική. Κατά την ευθεία κινηματική η υπολογίζουμε τη θέση και τον προσανατολισμό του end effector με βάση τη γωνία των αρθρώσεων.

$$\begin{aligned}x_1 &= L_1 \cos \theta_1 \\y_1 &= L_1 \sin \theta_1 \\x_2 &= x_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\y_2 &= y_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)\end{aligned}$$

Αντίστοιχα, στην αντίστροφη κινηματική υπολογίζουμε τη γωνία των μελών του βραχίονα για δεδομένη τελική θέση και του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα. Δεδομένου ότι στο χώρο εργασίας η ανθρώπινη αντίληψη αναπαριστάται συνήθως σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, η αντίστροφη κινητική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην πράξη. Ωστόσο, απαιτεί και περίπλοκη

μαθηματική ανάλυση, ειδικά σε ρομποτ με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας (DoF).

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{y_2}{x_2}$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_1L_3} \right)$$

$$\alpha_3 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_1L_2} \right)$$

$$\text{Για } L_3 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$$

$$\theta_1 = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\theta_2 = \alpha_3 - 180^\circ$$

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ 2 ΒΑΘΜΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ (2DoF)

Ρομποτική δυναμική θεωρούμε τη μελέτη και υλοποίηση του δυναμικού μοντέλου ενός ρομποτικού βραχίονα. Το δυναμικό μοντέλο αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν αναλυτικά τη σχέση ανάμεσα στις ροπές των κινητήρων που κινούν τις αρθρώσεις του βραχίονα και την κίνηση (θέση & προσανατολισμός), και την αλληλεπίδραση (δυνάμεις/ροπές) του μηχανισμού από το περιβάλλον.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι για να εξάγει κάποιος τις δυναμικές εξισώσεις ενός ρομποτικού βραχίονα. Στην μέθοδο Euler-Lagrange υπολογίζουμε την ολική κινητική και δυναμική ενέργεια του συστήματος με σκοπό να εξάγουμε την Lagrangian συνάρτησης L όλου του ρομπότ. Με αυτή την εξίσωση υπολογίζουμε τις ροπές κάθε άρθρωσης με βάση τις γωνιακές επιταχύνσεις. Η μέθοδος Newton-Euler στηρίζεται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για τον υπολογισμό των ροπών σύζευξης μεταξύ των συνδέσμων του ρομπότ. Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο Euler-Lagrange.

Η γενική μορφή της συνολικής ενέργειας ενός ρομποτικού βραχίονα n βαθμών ελευθερίας είναι:

$$E(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) + U(q)$$

όπου K είναι η συνολική κινητική ενέργεια,

U η συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος,

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων.

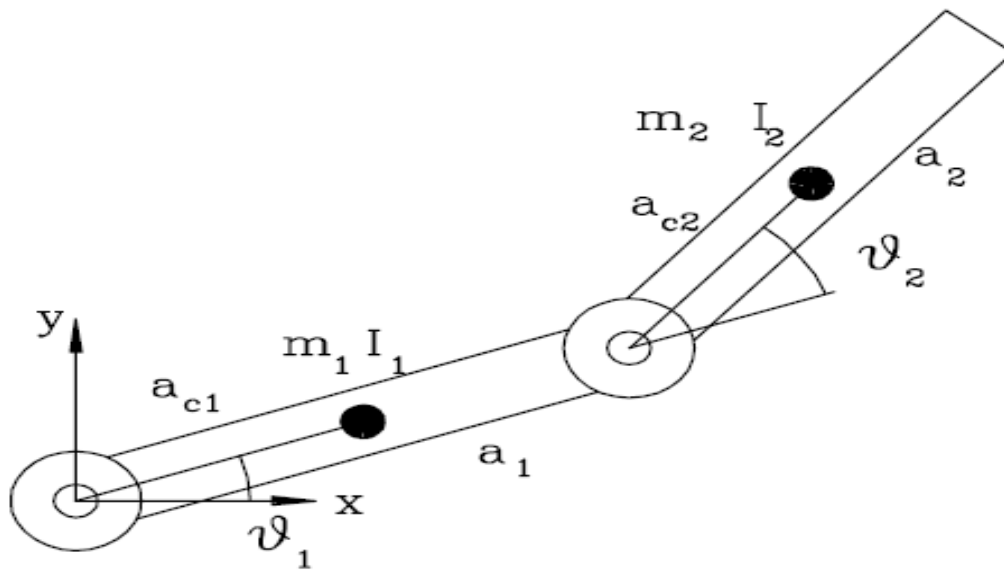
Η διαφορά μεταξύ της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του συστήματος ενός ρομποτικού βραχίονα ορίζεται ως Lagrangian συνάρτηση με τύπο:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος οφείλεται μόνο σε συντηρητικές δυνάμεις (π.χ. βαρύτητα), καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση Lagrange:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i \quad (1)$$

όπου $i=1,2,\dots,n$ είναι το πλήθος των αρθρώσεων του ρομπότ και τ_i οι εξωτερικές ροπές που εφαρμόζονται. Με βάση αυτή τη σχέση θα μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε το ρομποτικό βραχίονα δύο βαθμών ελευθερίας στο Simulink, αφού πρώτα την απλοποιήσουμε παρακάτω.



Εικόνα 6- Δυναμική ανάλυση ρομποτικού βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF) (πηγή Engineering Stack Exchange)

Αρχικά, έχοντας σκοπό να απλοποιήσουμε το σύστημα που παρουσιάζεται στην παραπάνω φωτογραφία θεωρούμε ότι το κέντρο μάζας κάθε βραχίονα βρίσκεται στο κέντρο του, καθώς και:

$$m_1 = 1_{kg}, \quad m_2 = 1_{kg}, \quad l_1 = 1_m, \quad l_2 = 1_m, \quad \theta_i = 0 \text{ και } g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Οι ροπές αδράνειας των δύο βραχιόνων ως προς τα κέντρα μάζας τους υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$I_{1cm} = \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \text{ και } I_{2cm} = \frac{1}{12} m_2 l_2^2$$

Η θέση του κάθε κέντρου μάζας στους άξονες x και y είναι:

$$\begin{aligned} X_{1cm} &= \frac{1}{2} l_1 \cos \theta_1 \\ y_{1cm} &= \frac{1}{2} l_1 \sin \theta_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_{2cm} &= l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) = \\
&= l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\
y_{2cm} &= l_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) = \\
&= l_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2
\end{aligned}$$

Η δυναμική ενέργεια είναι:

$$\begin{aligned}
P &= P_1 + P_2 = m_1 g y_{1cm} + m_2 g y_{2cm} = \\
&= m_1 g \frac{1}{2} l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g \frac{1}{2} l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)
\end{aligned}$$

Η συνολική κινητική ενέργεια είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του συστήματος λόγω περιστροφής και λόγω μεταφοράς :

$$K = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

Για τον πρώτο βραχίονα η παραπάνω σχέση αναπτύσσεται:

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{1}{2} m_1 [v_{xcm}^2 + v_{ycm}^2] + \frac{1}{24} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 = \\
&= \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{1}{4} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{1}{4} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_1 + \frac{1}{12} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \right) = \\
&= \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{1}{4} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \right) + \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{1}{12} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \right) = \\
&= \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2
\end{aligned}$$

Ενώ για τον δεύτερο βραχίονα θα έχουμε:

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 [v_{xcm}^2 + v_{ycm}^2] + \frac{1}{24} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

Όπου,

$$v_{xcm}^2 = \left[-l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right]^2$$

$$v_{ycm}^2 = \left[l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right]^2$$

Κάνοντας αντικατάσταση έχουμε:

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2$$

$$+ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

Επομένως η συνολική κινητική ενέργεια θα είναι:

$$K = K_1 + K_2 =$$

$$= \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

Απο την εξίσωση Lagrange θα έχουμε:

$$L = K - P =$$

$$= \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 - m_1 g \frac{1}{2} l_1 \sin \theta_1 - m_2 g l_1 \sin \theta_1 -$$

$$- m_2 g \frac{1}{2} l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)$$

Με βάση το (1) για τις γωνίες θ_1 και θ_2 θα έχουμε:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = \frac{1}{3}m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 +$$

$$+ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -\frac{1}{2}m_1 g l_1 \cos \theta_1 - m_2 g l_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2}m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2$$

$$- \frac{1}{2}m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \frac{1}{2}m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \frac{1}{2}m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 -$$

$$- \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \frac{1}{3}m_1 l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 +$$

$$+ \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_2 g l_1 +$$

$$+ \frac{1}{2}m_1 g l_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2}m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{2}m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 = \tau_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(-\frac{1}{3}m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{1}{3}m_2 l_2^2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \right) \ddot{\theta}_2 -$$

$$- m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_2 g l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2}m_1 g l_1 \cos \theta_1 -$$

$$- \frac{1}{2}m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{2}m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 = \tau_1 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} &= \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - \\
&\quad - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \\
&\quad + \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + \\
&\quad + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 = \\
&= \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - \\
&- \frac{1}{2} m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \\
\\
&\Rightarrow \left(\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \right) \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + \\
&\quad + \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{1}{2} m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = \tau_2 \quad (3)
\end{aligned}$$

Τελικά απο (2) και (3) καταλήγουμε στην σχέση που περιγράφει πλήρως το δυναμικό σύστημά μας έτσι ώστε να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε στο Simulink το βραχίονα.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$$

Όπου $M(q)$ είναι πίνακας αδράνειας (Inertia):

$$M(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \end{bmatrix},$$

$V(q, \dot{q})$ είναι κεντρομόλος πίνακας (Coriolis):

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \\ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix},$$

$G(q)$ είναι ο πίνακας βαρυτήτας (Gravity):

$$G(q) = \begin{bmatrix} m_2 g l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} m_1 g l_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2} m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ \frac{1}{2} m_2 g l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{1}{2} m_2 g l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

Και τ οι ροπές:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \text{ (Γιαννέλος, 2019)}$$

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Η ομαλή συνεργασία μεταξύ Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ στο χώρο εργασίας, αποτελεί μείζονος σημασίας για την από κοινού εκτέλεση βιομηχανικών καθηκόντων ή κατεργασιών, στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής. Ο στόχος αυτής της συνεργασίας είναι η βελτίωση της ποιότητας εργασίας και η αύξηση της παραγωγικότητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι σημαντικό να υπάρχει σωστός συνδιασμός της γνώσης και των δεξιοτήτων του εργαζόμενου-άνθρωπου, και της ακρίβειας, της υπολογιστικής δύναμης και της επαναληψιμότητας των ρομπότ.

Κατά το παρελθόν, η συνεργασία ανθρωπου-ρομποτ ήταν αρκετά διαχωρισμένη, καθώς υπήρχε η φυσική και χωρική απομόνωσή τους. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, καθώς και τις συνεχείς νέες ανάγκες και απαιτήσεις που υπάρχουν στα συστήματα παραγωγής, έγινε απαραίτητη η άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ άνθρωπου και ρομπότ. Αυτή η εξέλιξη, παρά την όποια αύξηση σε παραγωγικότητα, κέρδος και ευελιξία όπου επέφερε, αύξησε το πλήθος των ζητημάτων ασφαλείας σχετικά με την ομαλή και ασφαλή συνεργασία. Τα βασικότερα προβλήματα που

προκύπτουν έγκειται τόσο στην κίνηση στο χώρο του ρομποτικού βραχίονα, όσο και στην αντίληψη που έχει ο άνθρωπος για την κίνηση του βραχίονα.

Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων στην βιομηχανία, χρησιμοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί όπως αισθητήρες, κάμερες, panic buttons και συναγερμοί, έτσι ώστε είτε να επιβραδύνει η κίνηση του ρομποτ, είτε να σταματάει τελείως η κίνηση εως ότου είναι ασφαλής ο άνθρωπος.

Εκτός απο την ασφάλεια του ανθρώπου, σημαντικό ζήτημα αποτελεί ο έλεγχος για την σωστή λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα. Αυτή μπορεί να μεταβληθεί τόσο από λάθος οδηγία-πληροφορία του χειριστή-άνθρωπου όσο και απο κάποιο άλλο εξωτερικό παράγοντα στο περιβάλλον εργασίας(π.χ. άλλος ρομποτικός βραχίονας). Η ζημιά στην παραγωγή, απο ένα σφάλμα σαν και αυτο, μπορεί να τεράστια, και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί αρκετοί μεθόδοι έλεγχου, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος ανάδρασης.

Ο έλεγχος ανάδρασης είναι ένας μηχανισμός ελέγχου που αντλεί πληροφορίες από μετρήσεις αισθητήρων. Σε ένα σύστημα ελέγχου ανατροφοδότησης, η έξοδος είναι αυτή που μετριέται. Η θετική ανατροφοδότηση και η αρνητική ανάδραση είναι οι 2 κύριοι τρόποι ελέγχου ανάδρασης συστημάτων. Η θετική ανατροφοδότηση χρησιμοποιείται για την αύξηση της εισόδου, ενώ στην αρνητική ανάδραση, η ανατροφοδότηση χρησιμοποιείται για τη μείωση της εισόδου. Τα αρνητικά συστήματα είναι συνήθως σταθερά.

ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την θεωρία των συνόλων ήταν οι Cantor και Dedekind κατά το 1870. Παρόλα αυτά, έπρεπε να περάσει σχεδόν ένας αιώνας (1965), ώστε να θεμελιωθεί η θεωρία των ασαφών συνόλων από τον Lofti A. Zadeh. Με βάση την θεωρία αυτή, όλα τα αντικείμενα γύρω μας κατανέμονται σε ξεχωριστά και διακριτά σύνολα, με διαφορετικό βαθμό συμμετοχής το καθένα. Δεδομένου των αρκετά πρωτοποριακών ιδεών της θεωρίας του Zadeh, αρχικά αντιμετωπίστηκε με μεγάλη αμφισβήτηση. Οι υπολογιστές βασίζονταν σε δίτιμη λογική(ή Αρι-

στοτέλεια λογική) του 0 ή 1, κάτι το οποίο καθιστούσε αδύνατο την εφαρμογή της λογικής της θεωρίας των ασαφών συνόλων στους υπολογιστές. Το πρόβλημα λύθηκε με την δημιουργία της ασαφούς λογικής ώστε οι υπολογιστές να μπορούν να επεξεργάζονται γλωσσικές μεταβλητές. Ένας ελεγκτής ατμομηχανής, δημιουργίας του μηχανικού Ebrahim H. Mamdani, ήταν η πρώτη πρακτική εφαρμογή της ασαφούς λογικής.

ΔΙΤΙΜΗ (ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΑ) ΛΟΓΙΚΗ

Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ήταν αυτοί που θεμελίωσαν την κλασική, δίτιμη (Αριστοτέλεια) λογική, η οποία υπήρξε η βάση για την ανάπτυξη της σκέψης του δυτικού πολιτισμού. Στη δίτιμη λογική ένα γεγονός μπορεί να είναι αποκλειστικά μόνο αληθές ή ψευδές. Για την διευκόλυνσή μας, μπορούμε να θέσουμε την τιμή 0 για ένα ψευδές γεγονός και την τιμή 1 για ένα αληθές. Με μαθηματική απεικόνιση, η κλασική λογική για ένα δίτιμο σύνολο A , σε συνάρτηση με το σύνολο αναφοράς X έχει την μορφή της παρακάτω συνάρτησης:

$$I_A: X \rightarrow \{0, 1\}, \text{ με } I_A(x) = 1, \text{ αν } x \in A \text{ και } I_A(x) = 0, \text{ αν } x \notin A$$

Στον έλεγχο, η συγκεκριμένη λογική, μας απαντάει φαινομενικά με απόλυτη βεβαιότητα αν μια πρόταση είναι σωστή ή λάθος. Παρ' όλα αυτά, επειδή βασίζεται σε εμπειρικά πρότυπα και κανόνες, πολλές φορές και ανάλογα το γεγονός που ελέγχουμε, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι αναξιόπιστο ή ανακριβές.

ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ

Ως ασαφή λογική μπορούμε να θεωρήσουμε την προσπάθεια αναπαράστασης μιας κατάστασης που περιέχει αβεβαιότητα. Η αναπαράσταση αυτή βασίζεται σε κανόνες συμμετοχής των εμπλεκόμενων μεταβλητών οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με σκοπό το βέλτιστη επίλυση ενός ασαφούς προβλήματος. Στην ουσία, η ασαφής λογική αντανάκλα το τρόπο με τον οποίο σκέφτεται ο άνθρωπος, λεκτικοποιώντας μεταβλητές προσομοιώνοντας την ανθρώπινη λογική με σκοπό να παραχθούν ευφυή συστήματα.

Για παράδειγμα, έστω το ασαφές σύνολο “Όχημα”. Σε αυτό το σύνολο έχουμε αντικείμενα όπως: αυτοκίνητο, ποδήλατο, skateboard, πατίνι. Κάθε αντικείμενο μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 1, όπου 1 συμφωνεί απόλυτα με την έννοια του οχήματος και 0 καθόλου. Θεωρητικά, θα μπορούσαμε να δώσουμε τιμή 1 στο αυτοκίνητο ενώ στο skateboard μια τιμή κοντά στο 0, καθώς δεν αποτελεί την κλασική

περίπτωση οχήματος μεταφοράς, άλλα θα μπορούσε κάποιος να το χρησιμοποιήσει σαν όχημα. Η συνάρτηση συμμετοχής, αν αναπαραστήσουμε μαθηματικά το παραπάνω πρόβλημα θα είναι της μορφής:

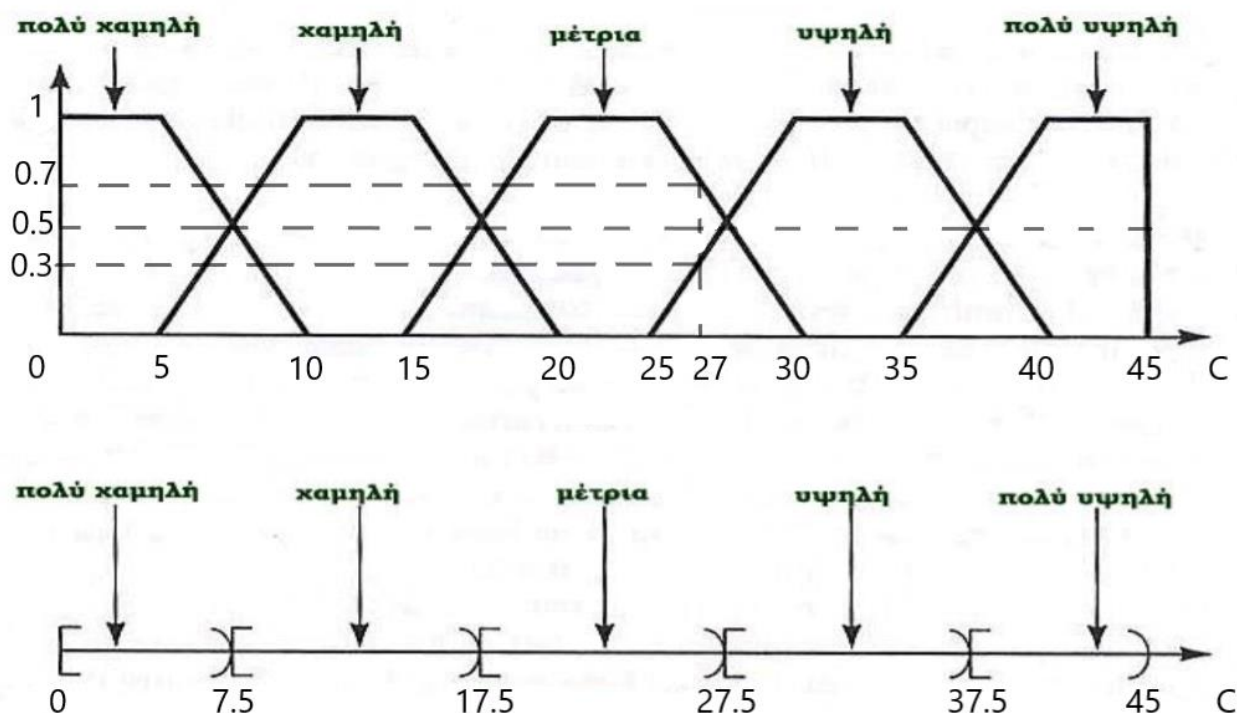
$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1], \text{ με } \mu_A(x) = \alpha, \alpha \in [0, 1]$$

Όπου A το ασαφές σύνολο “Όχημα”, $\mu_A(x)$ είναι ο βαθμός συμμετοχής του αντικείμενου x (αυτοκίνητο, ποδήλατο, κλπ.) στο A. Στην ουσία ο $\mu_A(x)$ μας δείχνει σε τι βαθμό συμμετέχει-ανήκει το ποδήλατο στο σύνολο “Όχημα”. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 1 και προκύπτουν από εκτιμήσεις και προσωπικά κριτήρια. Όταν $\mu_A(x)=1$ το αντικείμενο συμμετέχει πλήρως στο σύνολο A, όταν $\mu_A(x)=0$ το αντικείμενο δεν συμμετέχει καθόλου στο σύνολο A και όταν $0 < \mu_A(x) < 1$ τότε το αντικείμενο συμμετέχει-ανήκει στο σύνολο A μερικώς σε κάποιο βαθμό-ποσοστό.

Τα ασαφή σύνολα έχουν ως κύριο σκοπό την ορθότερη προσέγγιση μεγεθών τα οποία χαρακτηρίζονται από ασάφεια και απροσδιοριστία ώστε να έχουμε όσο το δυνατό καλύτερη λήψη αποφάσεων. (Κυριακάκης, 2020)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΙΤΙΜΗ ΚΑΙ ΑΣΑΦΗ ΛΟΓΙΚΗ

Για να γίνουν πλήρως κατανοητές οι έννοιες της δίτιμης και της ασαφούς λογικής θα σας παραθέσουμε το παρακάτω κοινό παράδειγμα. Έστω το γεγονός ‘Θερμοκρασία’ το οποίο χαρακτηρίζεται από τις λέξεις «πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια, υψηλή, πολύ υψηλή». Στο επόμενο γράφημα παραθέτουμε το γεγονός, με ασαφή και κλασική λογική αντίστοιχα.



Εικόνα 7- Κοινό παράδειγμα δίτιμης-ασαφούς λογικής

Βλέποντας το διάγραμμα με την κλασική δίτιμη λογική παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία 27 βαθμούς Κελσίου χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Αν όμως είχαμε ένα βαθμό υψηλότερη θερμοκρασία τότε αυτή θα χαρακτηριζόταν ως υψηλή, παρ' όλο που δεν θα είχε ουσιαστική διαφορά στην αίσθηση. Παρατηρούμε λοιπόν ότι δημιουργείται παρανόηση και ανακρίβεια, η οποία όμως λύνεται σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική. Στο διάγραμμα με την ασαφή λογική η θερμοκρασία 27 βαθμών Κελσίου είναι κατά 70% μέτρια και κατά 30% υψηλή.

Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι η ασαφή λογική καταφέρνει να περιγράψει σε μεγάλο βαθμό και πολύ πιο αποδοτικά την υποκειμενικότητα και την ασάφεια ενός γεγονότος σε σχέση με την κλασική δίτιμη λογική.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ο κλασικός γραμμικός έλεγχος έχει ως κύριο πλεονέκτημα το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει ισχυρά μαθηματικά μοντέλα για την υλοποίηση και την περιγραφή συστημάτων ελέγχου. Αντίθετα, η γραμμική ανατροφοδότηση που παρέχει στο σύστημα περιορίζει αρκετά τις δυνατότητες και τις ανάγκες που μπορεί να εξυπηρετήσει.

Ο μη γραμμικός έλεγχος (πχ. Ασαφής έλεγχος) είναι πιο ευέλικτος και με καλύτερη προσαρμοστικότητα στην επίλυση διαφορετικών αναγκών. Μπορεί να λειτουργεί με πολλούς στόχους και να είναι ανθεκτικός στις τροποποιήσεις των απαιτήσεων έχοντας τις ίδιες αρχικές ρυθμίσεις. Ως βασικότερο μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί η αδυναμία περιγραφής ενός τέτοιου ελεγκτή με την χρήση ενός μαθηματικού πλαισίου. (Βολογιαννίδης, 2009)

ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΣΑΦΗΣ ΣΥΛΛΟΓΙΣΜΟΣ

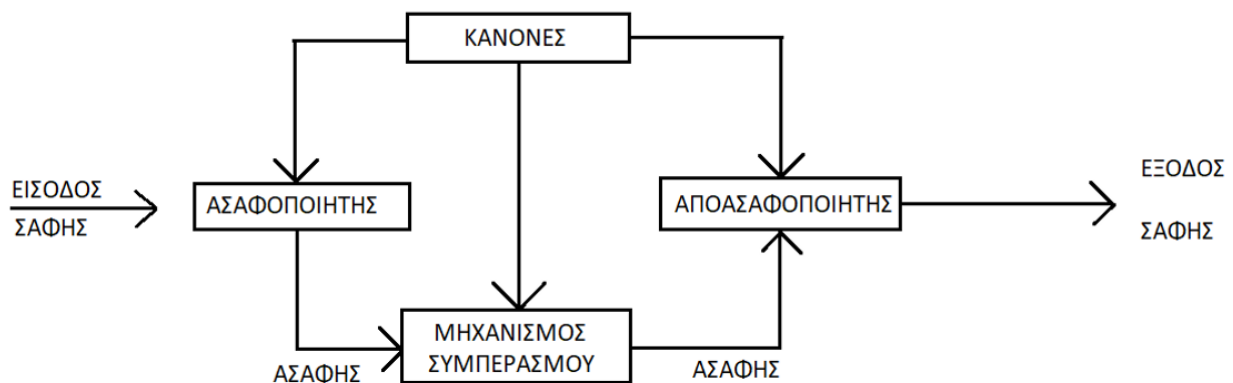
Ο ευφυής έλεγχος, συνδιάζοντας γνώσεις απο πολλούς επιστημονικού τομείς, έχει ως σκοπό να προσομοιώσει την ανθρώπινη σκέψη και γνώση για να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα κατα την παραγωγική διαδικασία σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές (πχ. γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου).

Κάθε επιτυχημένος ευφυής ελεγκτής πρέπει να χαρακτηρίζεται απο κάποιες βασικές αρχές. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να:

- Είναι ικανός να υλοποιεί και να εκτέλει πλήρη ασφάλεια τις απαιτήσεις του συστήματος.
- Μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα τις νέες εισόδους και συνθήκες χωρίς να χρειάζεται να δημιουργήσουμε καινούργιο ελεγκτή, ενώ παράλληλα λαμβάνει σωστές αποφάσεις.
- Μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές.

Στην ασαφή λογική, η δομή ενός ελεγκτή (Fuzzy Inference System, FIS) αποτελείται από:

- Βάση Γνώσης (κανόνες)
- Ασαφοποιητή
- Μηχανισμό Συμπερασμού
- Αποασαφοποιητή



Εικόνα 8- Τυπική δομή ασαφούς ελεγκτή (FIS)

Η βάση γνώσης είναι το σύνολο των ασαφών κανόνων και των συναρτήσεων συμμετοχής που χαρακτηρίζουν την διαδικασία. Βασίζονται στην εμπειρία και την γνώση του χειριστή, και χρησιμοποιούνται από το μηχανισμό συμπερασμού για την παραγωγή εξόδου του ελεγκτή.

Ο ασαφοποιητής μετατρέπει τις σαφείς, πραγματικές τιμές των μεταβλητών εισόδου του ασαφούς ελεγκτή σε ασαφή σύνολα. Επιτυγχάνεται με την δημιουργία συναρτήσεων συμμετοχής. Αυτή η διαδικασία (fuzzification) γίνεται για να μπορούν να είναι συμβατές οι είσοδοι με τους κανόνες.

Ο μηχανισμός συμπερασμού αποτελεί τον πυρήνα του ασαφούς ελεγκτή. Σε αυτό το στάδιο, ο μηχανισμός δέχεται ως είσοδο τα ασαφή σύνολα και τους κανόνες και παράγονται μέσω συνεπαγωγών τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων, δηλαδή οι εξόδοι του ελεγκτή σε ασαφή μορφή.

Το τελικό στάδιο του ελεγκτή, ο αποασαφοποιητής, μετατρέπει τις ασαφείς εξόδους του μηχανισμού συμπερασμού σε πραγματικούς αριθμούς ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιοποιήσιμα.

ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

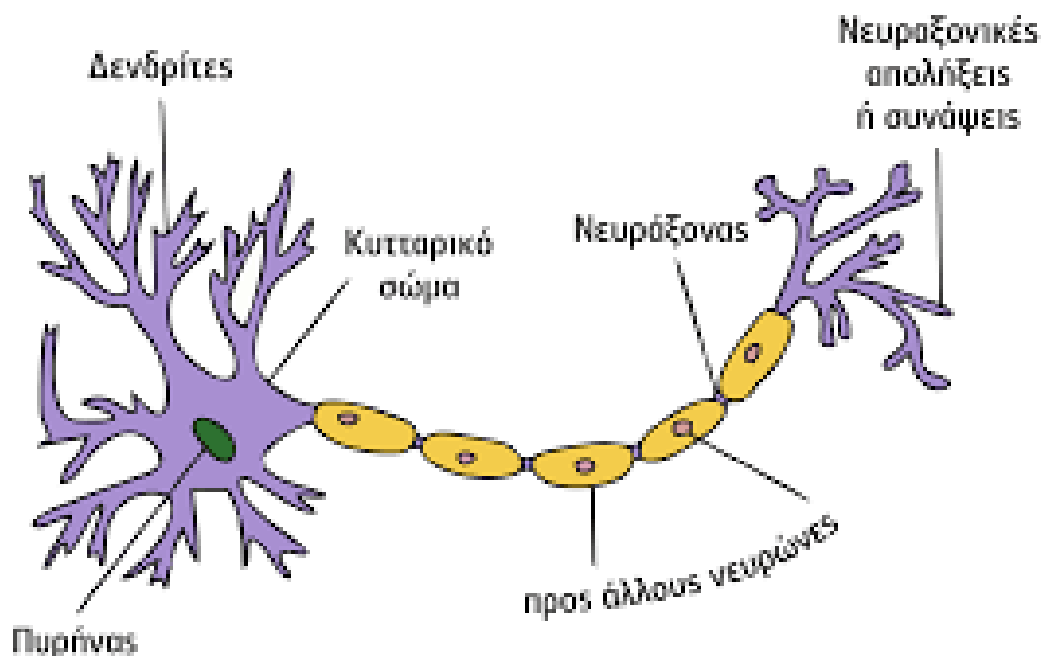
ΓΕΝΙΚΑ

Κατά την διάρκεια ερευνών για την Τεχνητή Νοημοσύνη, και ειδικότερα κατά την προσπάθεια μίμησης της ανοχής σε βλάβες στα χαμηλά επίπεδα του εγκεφάλου, αναπτύχθηκε ο όρος νευρωνικά δίκτυα. Έπειτα, μεταξύ 1960-1980 και στα πλαίσια των ίδιων ερευνών, δημιουργήθηκαν τα Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems). Βασίστηκαν σε ένα μοντέλο λογικής διεργασίας υψηλού επιπέδου, το οποίο δημιουργήθηκε από τον τρόπο με τον οποίο έχει δομηθεί η συλλογιστική διεργασία των ανθρώπων σχετικά με το χειρισμό των συμβόλων.

Ο κλάδος των νευρωνικών δικτύων (neural networks) παρόλο που είναι αρκετά νέος στις φυσικές επιστήμες, γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη σε διάφορα επιστημονικά πεδία όπως τα χρηματοοικονομικά, η ιατρική, η επιστήμη μηχανικού, η γεωλογία, η φυσική, η ρομποτική, η επεξεργασία σήματος κτλ. Στην ουσία, σε οποιοδήποτε ζήτημα πρόβλεψης, ελέγχου και ταξινόμησης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα νευρωνικά δίκτυα.

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι εφαρμόσιμα σχεδόν σε κάθε κατάσταση στην οποία ισχύει μια σχέση μεταξύ μεταβλητών πρόβλεψης (ανεξάρτητες, εισροές) και προβλεπόμενες μεταβλητές (εξαρτημένες, εκροές), ακόμα και όταν αυτή η σχέση είναι πολύ περίπλοκη. (Wikipedia)

Η βάση των νευρωνικών δικτύων είναι το ανθρώπινο νευρικό σύστημα. Το ανθρώπινο νευρικό σύστημα αποτελείται κατά προσέγγιση από 86.000.000.000 διασυνδεδεμένους νευρώνες. Ένας νευρώνας αποτελείται από ένα μηχανισμό εισόδου τους δενδρίτες, το κυτταρικό σώμα, το πυρήνα και έναν μηχανισμό εξόδου, τον νευροάξονα. Ο νευροάξονας, συνδέεται με τους δενδρίτες ενός άλλου νευρώνα μέσω νευροαξονικών απολήξεων ή αλλιώς συνάψεις. Ο σκοπός του κάθε νευρώνα είναι η μετάδοση ενός ηλεκτροχημικού σήματος στους γειτονικούς του νευρώνες. Όταν ένας νευροάξονας ενεργοποιηθεί, μεταδίδεται και το ηλεκτροχημικό σήμα κατά μήκος του άξονα. Η ενεργοποίηση του νευρώνα γίνεται μόνο όταν το συνολικό σήμα όπου έλαβαν οι δενδρίτες ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, το κατώφλι ενεργοποίησης (firing threshold).



Εικόνα 9- Βιολογικός νευρώνας (πηγή Wikipedia)

Η χρησιμότητα των βιολογικών νευρωνικών δικτύων είναι τόσο σπουδαία καθώς οποιαδήποτε διεργασία στην καθημερινή ζωή, περίπλοκη ή απλή, υλοποιείται χάρη στην ομαλή λειτουργία τους. Απο την αναγνώριση μιας εικόνας ή την αναγνώριση φωνής ως και πολύ πιο περίπλοκες διεργασίες. Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι υπήρξε το ερώτημα, για το κατα πόσο είναι δυνατό να προσομοιωθεί ένα βιολογικό νευρωνικό δίκτυο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το βασικό μειονέκτημα για την υλοποίηση αυτής της προσομοίωσης δεν είναι προφανώς ή μεγαλύτερη ταχύτητα υπολογισμών που έχει ο υπολογιστής σε σχέση με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, αλλά το γεγονός ότι έχουν πολύ διαφορετική δομή μεταξύ τους. Αυτή ή δυσκολία οδήγησε τους ερευνητές να προσπαθήσουν να δημιουργήσουν κάποια πρότυπα μοντέλα νευρωνικών δικτύων που θα έμοιαζαν στην δομή με τα βιολογικά και θα μπορούσαν από μόνα τους να υλοποιήσουν διάφορες διεργασίες.

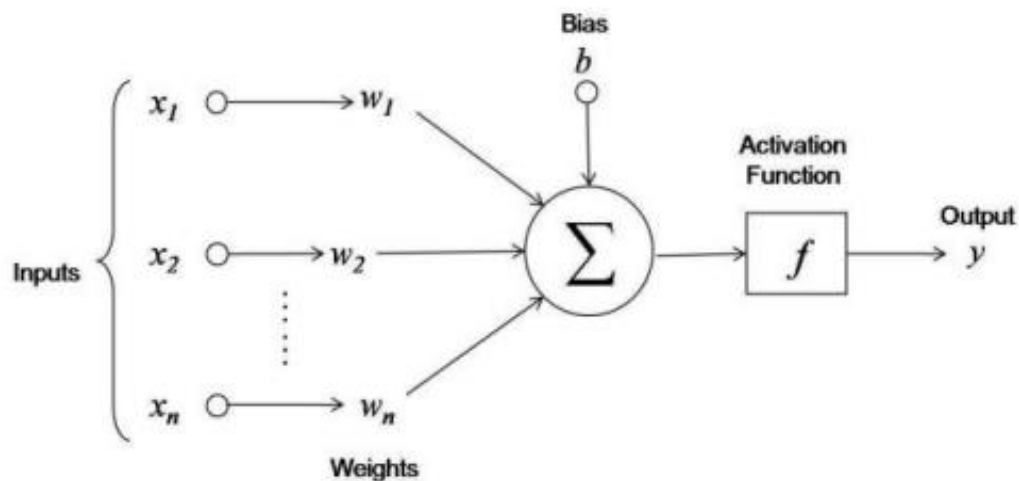
Αυτά τα δίκτυα ονομάστηκαν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks, ANN) και η βασική τους διαφορά από τα βιολογικά δίκτυα είναι ότι τα δίκτυα αυτά παίρνουν γνώσεις (εκπαιδεύονται) με την εξάσκηση και την εμπειρία, όπως ακριβώς και οι άνθρωποι, αλλά διαφέρουν στο ότι δεν ακολουθούν ορισμένους προκαθορισμένους κανόνες, που είναι χαρακτηριστικό των υπολογιστών.

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν δεί ραγδαία ανάπτυξη και πρόοδο. Η δυνατότητα που έχουν να μπορούν να επιτελούν από μόνα τους ορισμένες εργασίες, μετά από την κατάλληλη εκπαίδευση, οι οποίες μέχρι πρόσφατα γίνονταν αποκλειστικά από ανθρώπους, τα καθίστα ασυναγώνιστα και απόλυτα απαραίτητα για την ανάπτυξη ενός μεγάλου εύρους επιστημών.

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται δομικά από ένα σύνολο κόμβων, τους τεχνητούς νευρώνες. Κάθε νευρώνας δέχεται εισόδους και παράγει εξόδους. Οι εισοδοί και οι έξοδοι μπορούν να ληφθούν-αποσταλλούν είτε απο-προς άλλους νευρώνες είτε απο-προς το περιβάλλον.

Ένα υποτυπώδες μοντέλο του τεχνητού νευρώνα θα παρουσιάσουμε παρακάτω. Αποτελείται από συνολικά 5 δομικά στοιχεία, α) το σύνολο των εισόδων (inputs) x_i , β) το σύνολο των συναπτικών βαρών (weights) w_i , γ) την πόλωση (bias) u , δ) τη συνάρτηση ενεργοποίησης (Activation Function) f και ε) την έξοδο (output) του νευρώνα y



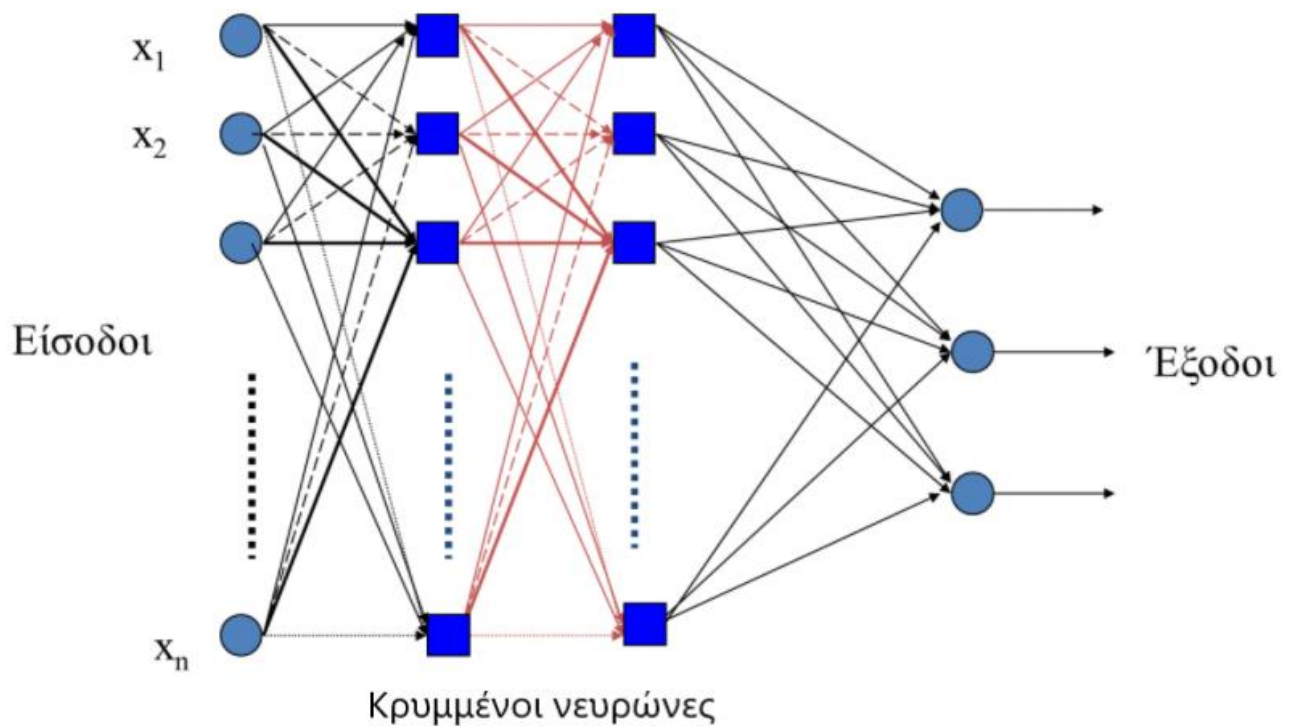
Εικόνα 10- Μοντέλο τεχνητού νευρώνα

Οι εισόδοι του νευρώνα x_i πολλαπλασιάζονται με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος w_i . Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα των παραπάνω πολλαπλασιασμών αθροίζονται μεταξύ τους και μαζί με μια επιπλέον σταθερή είσοδο το bias, η οποία εξασφαλίζει ότι ο νευρώνας θα είναι ενεργός ακόμα και αν έχουμε μηδενικές εισόδους. Το συνολικό άθροισμα εισάγεται στην συνάρτηση ενεργοποίησης η οποία έχει ως σκοπό να εισάγει την μη γραμμικότητα στην τελική έξοδο του νευρώνα.

Υπάρχουν 3 είδη τεχνητών νευρώνων στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Οι νευρώνες εισόδου, οι κρυμμένοι νευρώνες και οι νευρώνες εξόδου.

Η χρησιμότητα των νευρώνων εισόδου είναι να εισάγουν τα σήματα-εισόδους του δικτύου στο επόμενο στάδιο νευρώνων, τους κρυμμένους νευρώνες. Οι κρυμμένοι νευρώνες είναι στην ουσία οι νευρώνες που γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, και παράγουν τα αποτελέσματα-εξόδους του δικτύου. Οι νευρώνες εξόδου με την σειρά τους λαμβάνουν σαν είσοδο τις εξόδους από τους κρυμμένους νευρώνες και τις εξάγουν στο περιβάλλον.

Σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι σύνηθες να υπάρχουν πολλά επίπεδα από κρυμμένους νευρώνες, καθώς το πρόβλημα που προσπαθεί να επιλύσει μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από 3 ή 4 επίπεδα (δηλαδή με 1 ή 2 επίπεδα κρυμμένων νευρώνων), με κάθε επίπεδο να μπορεί να περιέχει ως και 1000 νευρώνες.



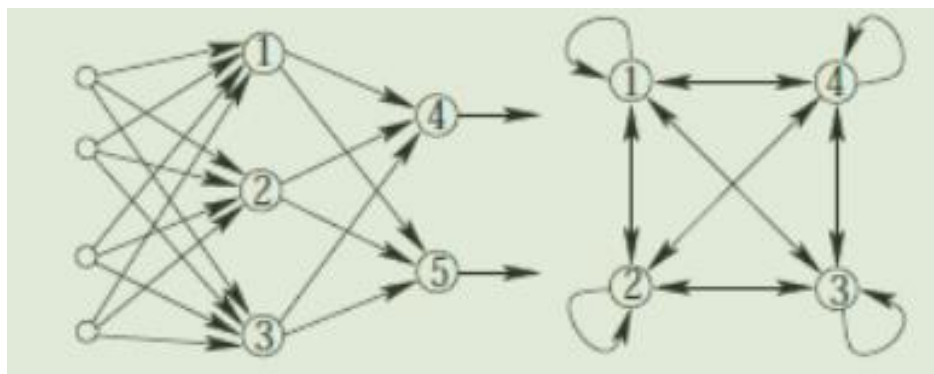
Εικόνα- 11 Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο τεσσάρων επιπέδων

ΕΙΔΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα είδη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων διαχωρίζονται από την αρχιτεκτονική δομή τους και πιο συγκεκριμένα από τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρουν τις πληροφορίες από έναν κόμβο σε άλλο. Τα βασικότερα είδη είναι τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης και τα αναδρομικά δίκτυα.

Τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feed forward) δεν έχουν ανατροφοδότηση της εξόδου ενός νευρώνα προς τους νευρώνες από τους οποίους επηρεάζεται άμεσα ή έμμεσα. Οι υπολογισμοί είναι όλοι στην ίδια κατεύθυνση, από την είσοδο προς την έξοδο, και δεν υπάρχει οποιαδήποτε σύνδεση νευρώνων του ίδιου επιπέδου μεταξύ τους. Το πιο γνωστό είδος feed forward δικτύου είναι το δίκτυο μονού ή πολλαπλών επιπέδων perceptron.

Αντίθετα, στα αναδρομικά δίκτυα (recurrent neural networks), οι νευρώνες μπορούν να ανατροφοδοτούν την έξοδο τους σε νευρώνες είτε του ίδιου είτε προηγούμενου επιπέδου. Κάποια γνωστά είδη αναδρομικών δικτύων είναι τα επαναλαμβανόμενα δίκτυα, τα δίκτυα Hopfield, τα δίκτυα Kohonen και τα δίκτυα ART.



Εικόνα 12- Είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων (αριστερα feed forward δικτυο, δεξια recurrent δικτυο) (πηγή Μήτσιος, 2017)

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για να είναι χρήσιμα στην υλοποίηση διάφορων διεργασιών θα πρέπει πρώτα να έχουν εκπαιδευτεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η εκπαίδευση καθορίζει το πως μεταβάλλονται τα βάρη των νευρώνων του δικτύου έτσι ώστε να μπορεί το νευρωνικό δίκτυο να επιτελεί την διαδικασία που επιθυμούμε. Η μεταβολή των βαρών γίνεται στις περισσότερες φορές με την χρήση κατάλληλων παραδειγμάτων. Ουσιαστικά δίνοντας στο δίκτυο τις επιθυμητές εισόδους-εξόδους, μεταβάλλεται η αρχιτεκτονική δομή του και οι τιμές των βαρών, με σκοπό όταν δοθεί κάποια είσοδος (πέρας της εκπαίδευσης) να μπορεί το δίκτυο να ανταποκριθεί και να δώσει την σωστή έξοδο.

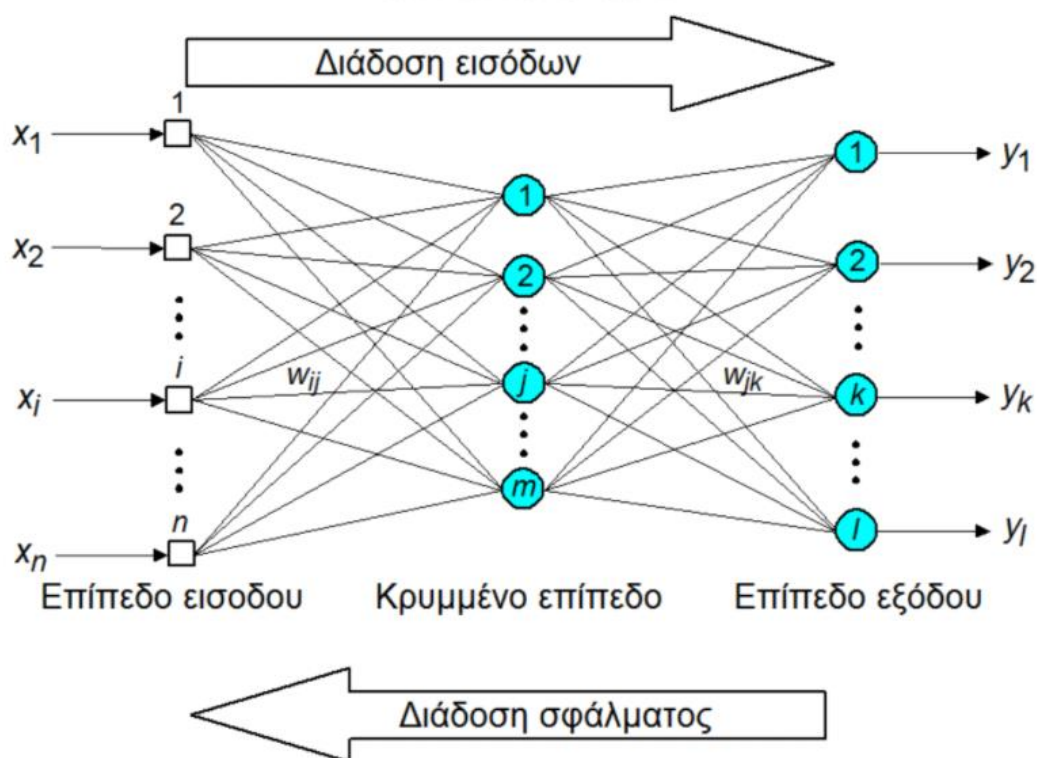
Όσο καλύτερα γίνεται η εκπαίδευση, τόσο επιτυγχάνεται η βέλτιστη εσωτερική δομή του δικτύου, κάτι που σημαίνει ότι το δίκτυο θα μπορεί να λύνει παρόμοια παραδείγματα-προβλήματα, χωρίς να χρειάζεται περισσότερη εκπαίδευση. Φυσικά η λογική δομή των παραδειγμάτων-προβλημάτων θα πρέπει να είναι παρόμοια με την δομή της εκπαίδευσης όπου έχουμε κάνει, καθώς διαφορετικά δεν θα εξάγει το δίκτυο τις επιθυμητές εξόδους.

Η διαδικασία της εκπαίδευσης δεν γίνεται απαραίτητα με τον ίδιο τρόπο κάθε φορά και διακρίνεται σε 2 μεθόδους, την μη επιβλεπόμενη και την επιβλεπόμενη μάθηση.

Στην μη επιβλεπόμενη μάθηση (Unsupervised Learning) το δίκτυο εκπαιδεύεται χωρίς κάποιον εξωτερικό «δάσκαλο» ή επιβλέποντα. Σε αυτή την διαδικασία, χρησιμοποιείται ένας εσωτερικός μηχανισμός ανάδρασης ο οποίος αναγνωρίζει από τα δεδομένα εισόδου κάποιες συλλογικές ιδιότητες ώστε να παράξει τις αντίστοιχες κατάλληλες εξόδους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της εκπαίδευσης είναι οι αλγόριθμοι Hebbian και Min-Max.

Στην επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised Learning) γίνεται ένα συνδιασμός του εξωτερικού «δασκάλου» και των δεδομένων εισόδων-εξόδων. Είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Για να μειώσει το σφάλμα που παρατηρεί ο επιβλέπων, μεταξύ της πραγματικής με την επιθυμητή έξοδο, πρέπει να αποφασίσει για το τι δεδομένα θα χρησιμοποιήσει στην εκπαίδευση, τότε θα θεωρείται ικανοποιητική η εκπαίδευση και τότε τερματίζεται. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους εκπαίδευσης με επίβλεψη, την μέθοδο οπισθοδιάδοσης σφάλματος.

Η οπισθοδιάδοση σφάλματος (Back Propagation) είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος λειτουργεί ως εξής. Αρχικά τα δεδομένα εισόδου διεγείρουν τους νευρώνες εισόδου και στην συνέχεια η ροή του σήματος, με τις ανάλογες τροποποιήσεις που υφίσταται, διαδίδεται από επίπεδο σε επίπεδο. Στο πέρας αυτής της διάδοσης παίρνουμε την πραγματική έξοδο του δικτύου. Ως αυτό το σημείο, τα βάρη των νευρώνων του δικτύου είναι σταθερά. Στη συνέχεια η πραγματική έξοδος αφαιρείται από την επιθυμητή και δημιουργείται ένα σήμα σφάλματος το οποίο ανατροφοδοτείται προς τα πίσω. Με αυτό το τρόπο τα συναπτικά βάρη των νευρώνων όλου του δικτύου αναπροσαρμόζονται έτσι ώστε συνολικό σφάλμα εξόδου να ελαχιστοποιηθεί.



Εικόνα 13- Οπισθοδιάδοση σφάλματος (Back Propagation)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, βασικότερα εκ των οποίων είναι η δυνατότητα αυτοεκπαίδευσης με την χρήση κατάλληλων μεθόδων, η επίλυση πολύπλοκων μη-γραμμικών προβλημάτων, καθώς και η δυνατότητα εκτέλεσης, ταυτόχρονα, πολλών διαφορετικών εργασιών. Καθ' όλη την λειτουργία των δικτύων, συναντάμε συχνά όμως και κάποια προβλήματα-μειονεκτήματα.

Τα δεδομένα που εισάγονται μετά την εκπαίδευση μπορεί να είναι ελλιπή, κάτι το οποίο μπορεί να κάνει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μη αποδοτικό, και να δώσει μια μη επιθυμητή λύση. Ακόμα, δεν υπάρχει καλή ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή δεν είναι εύκολο να τροποποιήσουμε το σύστημα καθώς έχει ήδη εκπαιδευτεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες και δεδομένα. Επίσης, πολλές φορές, ειδικά αν έχουμε μεγάλο όγκο δεδομένων, μπορεί να χρειαστεί αρκετό χρόνο και ισχύ για υπολογισμούς.

ΝΕΥΡΟΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ (ANFIS)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Στην προσπάθεια να εξαλειφθούν τα μειονεκτήματα των ασαφών συστημάτων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, προέκυψαν τα νευροασαφή συστήματα, τα οποία είναι στην ουσία ένας συνδιασμός των δυο παραπάνω εννοιών που αναπτύξαμε στην παρούσα διπλωματική. Για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήσαμε έναν τύπο ελέγχου αυτής της λογικής το σύστημα ANFIS.

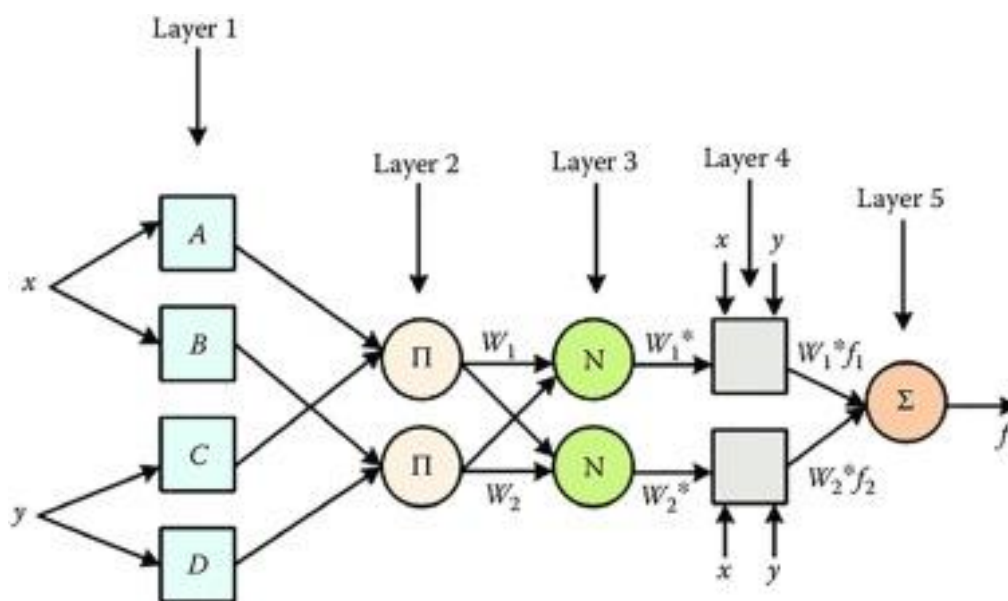
Το ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) ή προσαρμοστικό νευροασαφή σύστημα αποτελείται από ένα ασαφές σύστημα τύπου Takagi-Sugeno το οποίο έχει σχεδιαστεί σε αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου 5 επιπέδων, συνδυάζοντας εκ πρώτης την δυνατότητα που έχουν τα ασαφή συστήματα να χρησιμοποιούν και να αποθηκεύουν πληθώρα κανόνων και δεδομένων, και εν συνεχεία, την μέθοδο εκπαίδευσης (back propagation) των νευρωνικών δικτύων (Karnik et al., 1999)

Ουσιαστικά, το προσαρμοστικό νευροασαφές σύστημα, αναπαριστά τον τρόπο συμπεριφοράς του συστήματος έτσι ώστε να μπορεί να αποφασίζει κατάλληλα ανα περίπτωση, και όχι το σύστημα αυτο καθε αυτο. (Kaburlasos, 2006) Γίνεται δηλαδή μια προσπάθεια εντοπισμού των κατάλληλων συναρτήσεων συμμετοχής του FIS και στην συνέχεια, ασκούνται αλγόριθμοι εκπαίδευσης στην λογική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. (Carpenter & al., 1991)

Οι δυνατότητες που προσφέρουν τα νευροασαφή συστήματα ελέγχου είναι πραγματικά πάρα πολλές. Αρχικά, όπως είπαμε, συνδιάζουν τα πλεονεκτήματα των ασαφή συστημάτων ελέγχου και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, με τέτοιο τρόπο που μπορούν να προσεγγίζουν σύνθετα, μη-γραμμικά προβλήματα με πολύ μεγάλη ακρίβεια, χωρίς απαραίτητα μεγάλο dataset εισόδου και με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων σε σχέση με ένα απλό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. (Μάγκουρας, 2020)

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Παρακάτω, παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική δομή ενός ANFIS, ο οποίος είναι ισοδύναμος με ένα Takagi-Sugeno ασαφές σύστημα. Οι τετράγωνοι κόμβοι στο πρώτο και τέταρτο επίπεδο είναι προσαρμόσιμοι, δηλαδή η τιμή τους καθορίζεται από μια συνάρτηση κόμβου, ενώ οι κυκλικοί κόμβοι στα επίπεδα 2,3 και 5 είναι σταθεροί.



Εικόνα 14 - 5αεπίπεδη αρχιτεκτονική προσαρμοστικού νευροασαφούς συστήματος ANFIS (πηγή ResearchGate)

Στο πρώτο επίπεδο (layer 1), κάθε κόμβος i χαρακτηρίζεται από την συνάρτηση κόμβου $O_{i1}(x) = \mu A_i(x)$, όπου x είναι η είσοδος στο κάθε κόμβο i , A_i είναι η γλωσσική ετικέτα που σχετίζεται με τον κόμβο (A,B,C,D), μ είναι η συνάρτηση συμμετοχής για το A_i (πχ. Συνάρτηση καμπάνα, γκαουσιανή συνάρτηση κλπ.) και τέλος το O_{i1} το οποίο είναι ο βαθμός συμμετοχής της εισόδου x στην γλωσσική ετικέτα A_i .

Στο δεύτερο και τρίτο επίπεδο (layer 2,3) έχουμε σταθερούς κόμβους Π και Ν αντίστοιχα, όπου στο δεύτερο επίπεδο υπολογίζεται το γινόμενο όλων των εισερχόμενων σημάτων σε κάθε ένα κόμβο από το επίπεδο 1 και το αποτέλεσμα τους είναι ο βαθμός ενεργοποίησης του κανόνα, ενώ στο τρίτο επίπεδο υπολογίζεται ο λόγος του βαθμού ενεργοποίησης του κάθε κανόνα, ως προς το συνολικό άθροισμα των βαθμών ενεργοποίησης όλων των κανόνων.

$$(w_i^* = w_i / (w_1 + w_2)).$$

Τα αποτελέσματα αυτού του επιπέδου ονομάζονται και κανονικοποιημένοι βαθμοί ενεργοποίησης.

Στο τέταρτο επίπεδο, οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από την συνάρτηση κόμβου,

$$O_{4,i} = w_i^* * f_i = w_i^* * (p_i x + q_i y + r_i)$$

Με w_i^* το κανονικοποιημένος βαθμός ενεργοποίησης και οι παράμετροι p_i q_i r_i ονομάζονται επακόλουθοι παράμετροι.

Τέλος, το πέμπτο επίπεδο αποτελείται από ένα μόνο σταθερό κόμβο ο οποίος αθροίζει όλα τα εισερχόμενα σήματα από το τέταρτο επίπεδο και υπολογίζει την συνολική απόδοση.

$$f = O_{5,i} = \sum w_i^* * f_i$$

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

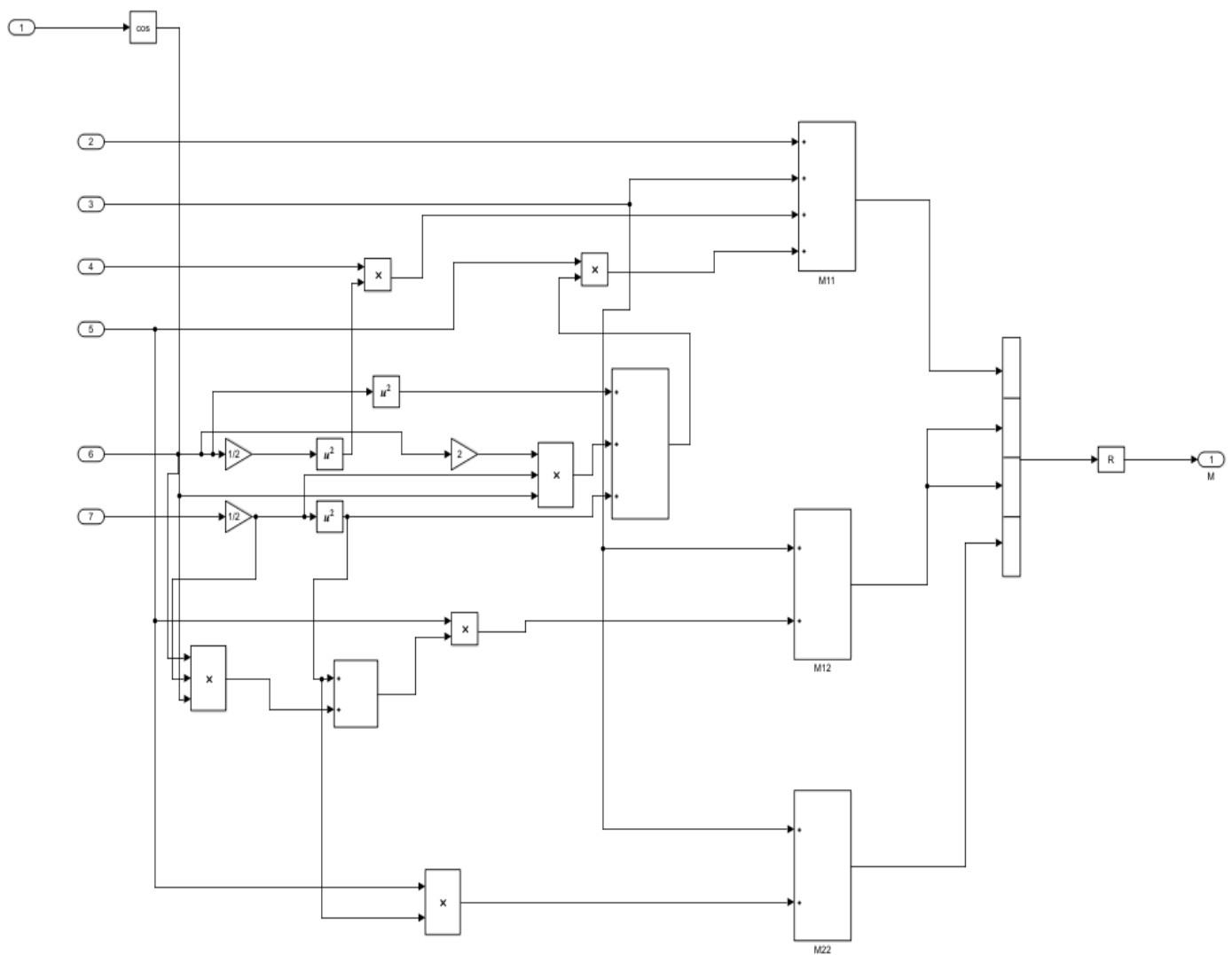
Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο σκοπός αυτή της διπλωματικής εργασίας είναι να μοντελοποιήσουμε έναν ρομποτικό βραχίονα 2 βαθμών ελευθερίας (2 DOF) και να εφαρμόσουμε ευφυή έλεγχο σε περίπτωση άσκησης εξωτερικής ροπής στον βραχίονα, έτσι ώστε να επαναφέρεται στην αρχική του θέση όσο τον δυνατόν πιο σύντομα και πιο ομαλά γίνεται.

Ρομποτικοί βραχίονες 2 βαθμών ελευθερίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας τοποθέτησης αγαθών ή προϊόντων σε μια βιομηχανία. Με αυτό το τρόπο, η διαδικασία τοποθέτησης γίνεται πιο ακριβής, οικονομικά αποδοτική και προβλέψιμη, ενώ παράλληλα αποτρέπεται ο κίνδυνος σωματικού τραυματισμού για τον ανθρώπινο παράγοντα.(intel)

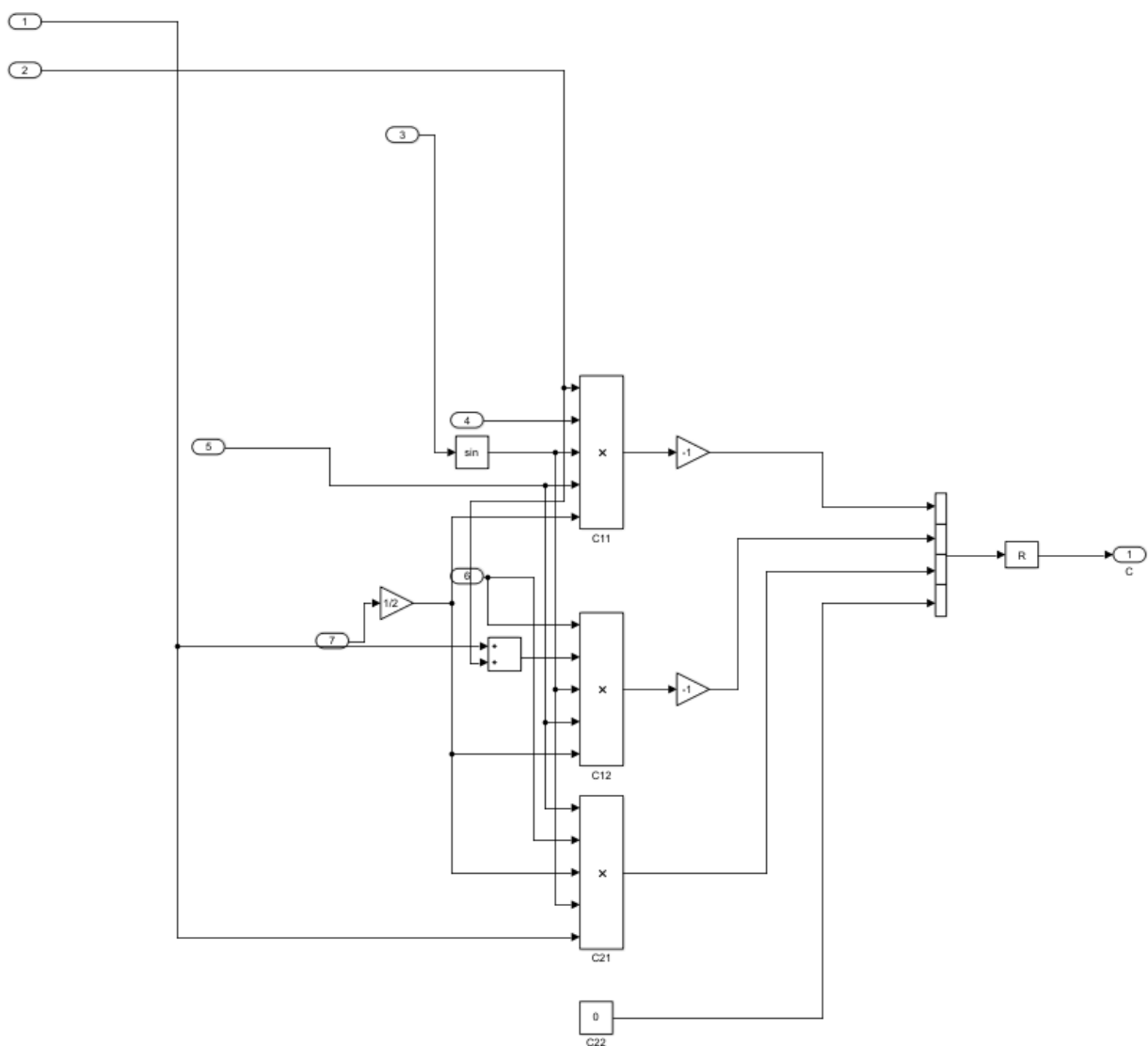
Παρακάτω θα παρουσιάσουμε το τρόπο που δουλέψαμε βήμα-βήμα.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

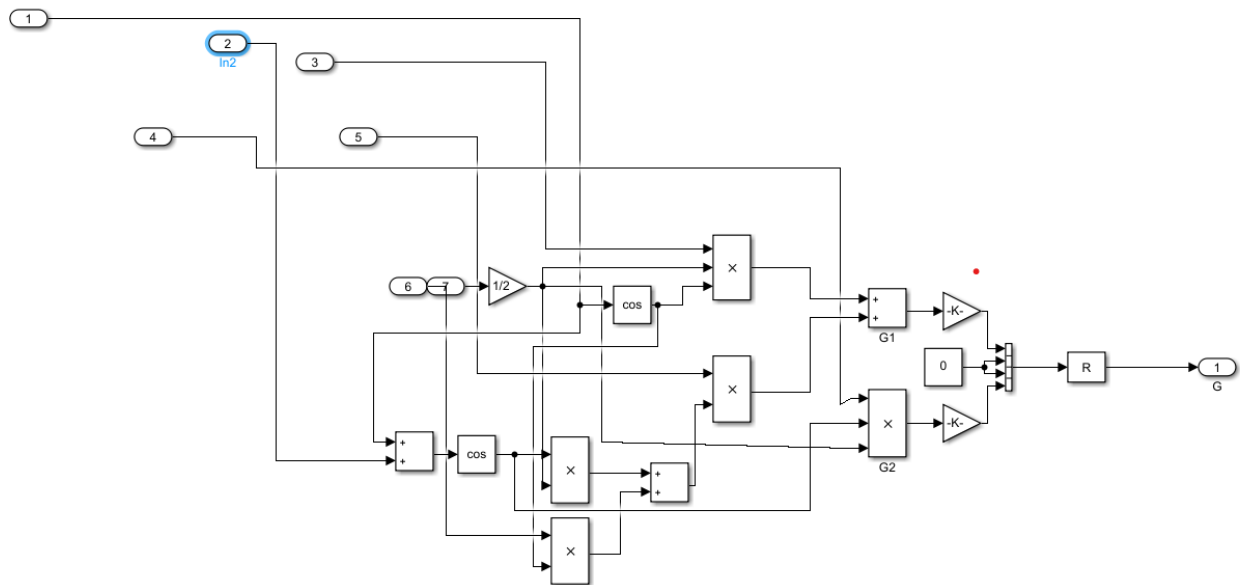
Αρχικά, κινηθήκαμε να μοντελοποιήσουμε το ρομποτικό βραχίονα μέσω του εργαλείου της Matlab, Simulink. Για την μοντελοποίηση αυτή ήταν απαραίτητη τόσο η κινηματική ανάλυση του βραχίονα, όσο και η δυναμική του, τις οποίες έχουμε αναπτύξει παραπάνω. Με βάση τις εξισώσεις Euler-Lagrange, δημιουργήσαμε υποσυστήματα για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης. Ενδεικτικά, παραθέτουμε παρακάτω τα υποσυστήματα των πινάκων αδράνειας $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ (Inertia), κεντρομόλου $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ (Coriolis), βαρύτητας $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ (Gravity), καθώς και το συνολικό σύστημα ανάλυσης.



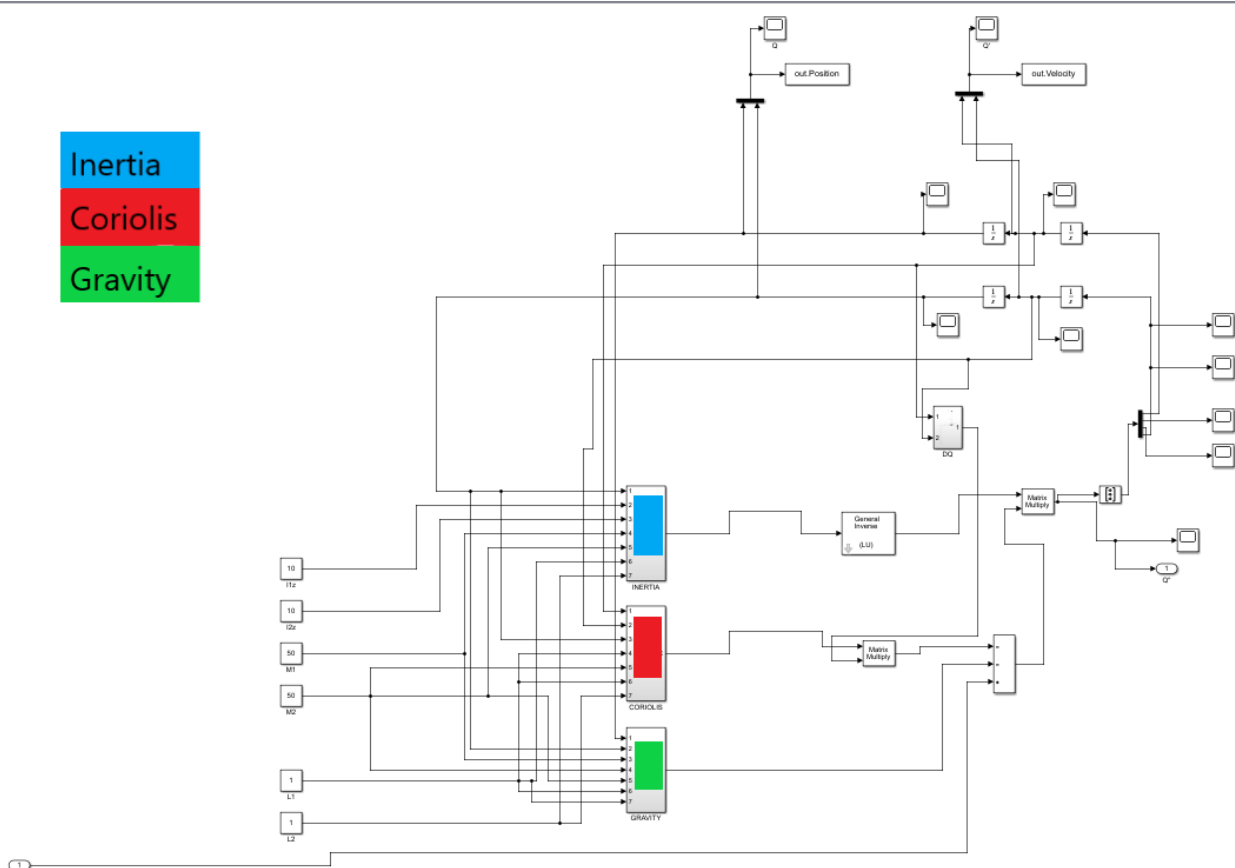
Εικόνα 15- Πίνακας Αδράνειας $M(q)$ (Inertia)



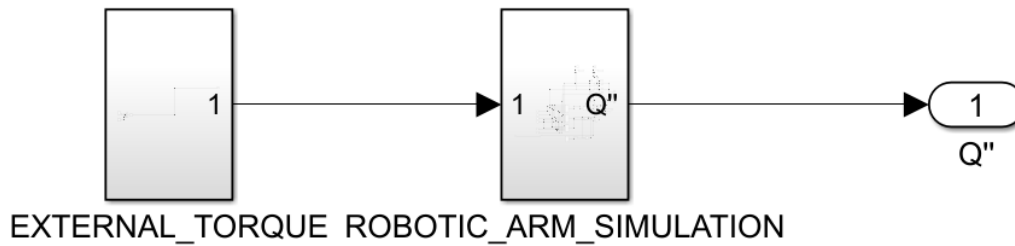
Εικόνα 16-Πίνακας Κεντρομόλου $V(q, \dot{q})$ (Coriolis)



Εικόνα 17-Πίνακας βαρύτητας $G(q)$ (Gravity)



Εικόνα 18- Συνολικό σύστημα ανάδρασης



Κατά την ενεργοποίηση της προσομοίωσης παρατηρήσαμε και μελετήσαμε την μεταβολή της θέσης του βραχίονα στις αρθρώσεις του και συγκεκριμένα την γωνία θ_i , την γωνιακή ταχύτητα ω_i , και την γωνιακή επιτάχυνση α_i . Στο επόμενο κεφάλαιο («ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ»), παραθέτουμε ενδελεχώς τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΛΕΓΚΤΗ

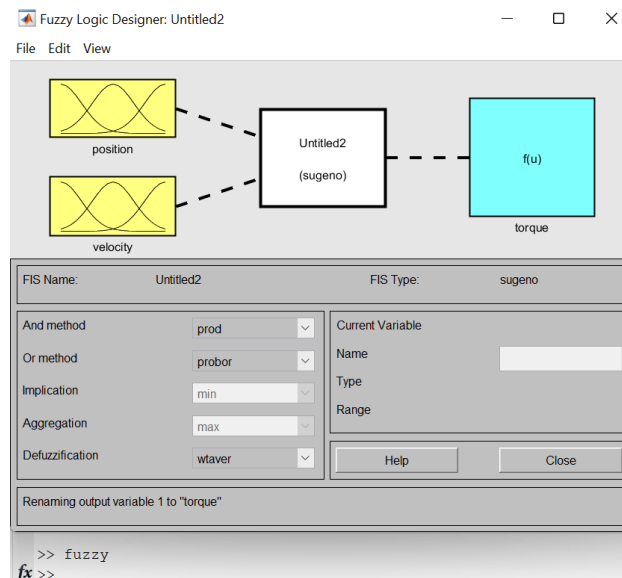
Στην συνέχεια, και αφού «τρέξαμε» την προσομοίωση του συστήματος, παρατηρήσαμε ότι ήταν απαραίτητο να δημιουργηθούν 2 ελεγκτές για τις 2 αρθρώσεις του βραχίονα με σκοπό την όσο το δυνατό ομαλή και σύντομη επαναφορά στην αρχική θέση του βραχίονα σε περίπτωση εξωτερικής ροπής στο σύστημα. Για αυτό το λόγο, δημιουργήσαμε μια βάση δεδομένων (data set) που αποτελείται από 2 εισόδους και μια έξοδο. Ως εισόδους πήραμε την γωνία και την γωνιακή ταχύτητα στην κάθε άρθρωση και ως έξοδο την εξωτερική ροπή που βάλαμε στο σύστημα για την προσομοίωση.

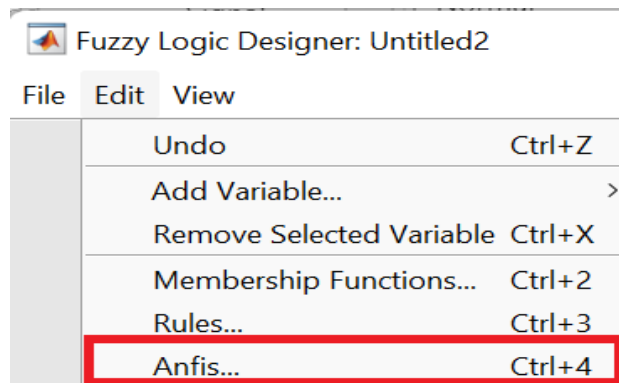
```

%CREATE DATASET
data3=[position(:,1) velocity(:,1) tau_due_to_env(:)];
data4=[position(:,2) velocity(:,2) tau_due_to_env(:)];
save 'data3.dat' data3 -ascii
save 'data4.dat' data4 -ascii
% data=cat(2,position,velocity,acceleration,tau_due_to_env);
% data1=[position(:,1) velocity(:,1) acceleration(:,1) tau_due_to_env(:)];
% data2=[position(:,2) velocity(:,2) acceleration(:,2) tau_due_to_env(:)];
% data3=[position(:,1) velocity(:,1) tau_due_to_env(1:5007)];
% data4=[position(:,2) velocity(:,2) tau_due_to_env(1:5007)];
% [pos,velo]=meshgrid(position(:,2),velocity(:,2));
% tau=meshgrid(tau_due_to_env(:));
% data5=[pos(:) velo(:) tau(:)];
% save 'data2.dat' data2 -ascii
% save 'data1.dat' data1 -ascii
% save 'data3.dat' data3 -ascii
% save 'data4.dat' data4 -ascii

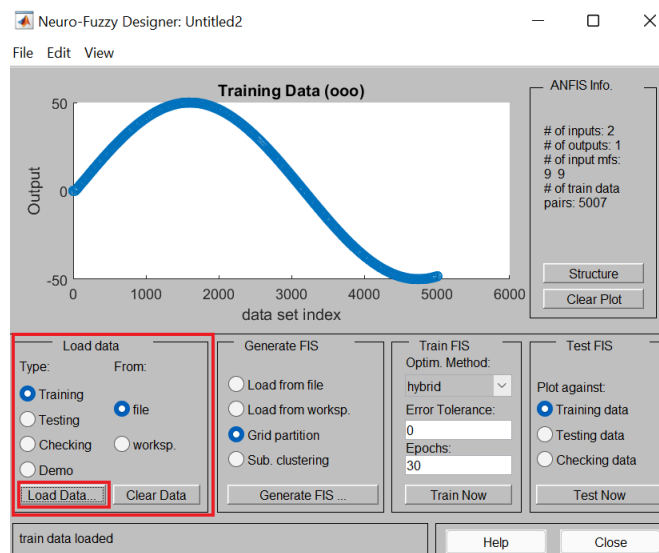
```

Μετά την αποθήκευση των δεδομένων σε αρχεία (.dat), ξεκινήσαμε να δημιουργήσουμε τους ελεγκτές μας. Αρχικά με την χρήση της εντολής **fuzzy** στην κονσόλα της Matlab, ανοίγουμε το γραφικό περιβάλλον GUI της ασαφούς εργαλειοθήκης της Matlab. Σε αυτό το περιβάλλον θα επιλέξουμε το είδος του ελεγκτή (Mamdani ή Sugeno). Στην περίπτωση μας, θα επιλέξουμε ελεγκτή Sugeno και αφού τον παραμετροποιήσουμε, ανοίγουμε το εργαλείο **Anfis** μέσω της επιλογής **Edit**.

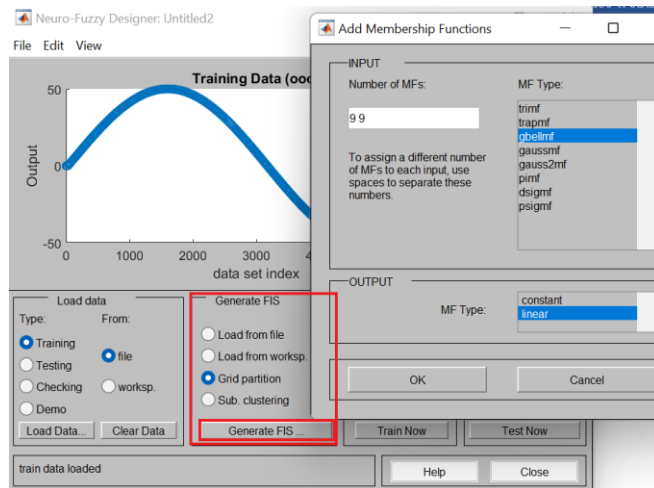




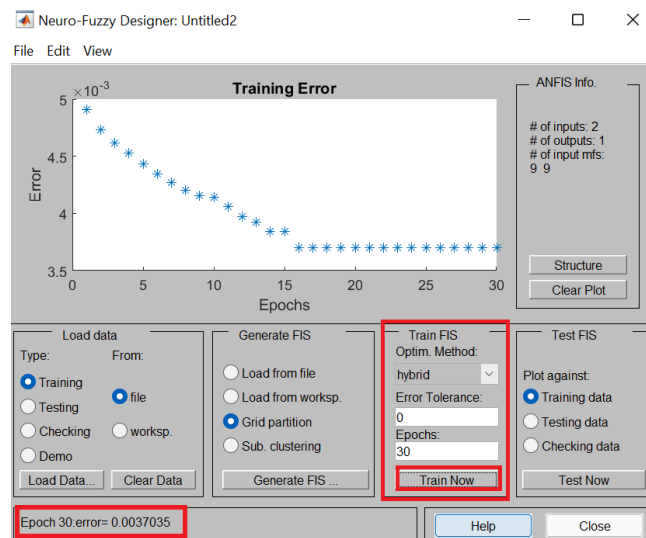
Στο επόμενο παράθυρο γίνεται όλη η υλοποίηση του ελεγκτή.



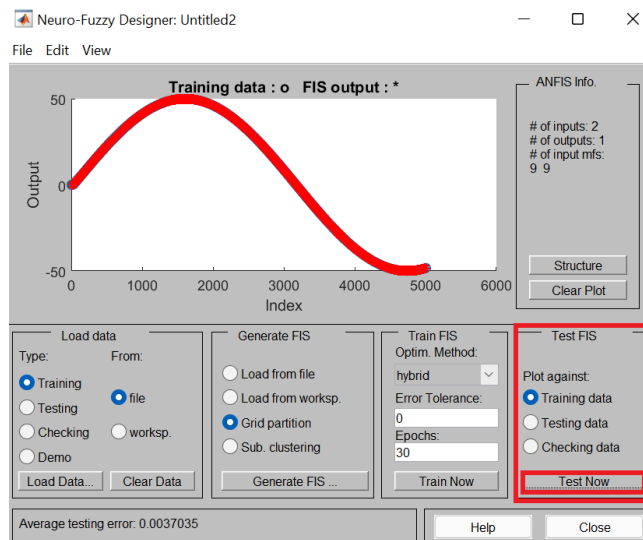
Αρχικά κάνουμε εισαγωγή του αρχείου data set για την πρώτη άρθρωση και επιλέγουμε τον τύπο των δεδομένων.



Στην συνέχεια δημιουργούμε το FIS μας. Μπορούμε να επιλέξουμε αν χρησιμοποιήσουμε κάποιον ήδη έτοιμο ελεγκτή που υπάρχει σε αρχείο ή στην επιφάνεια εργασίας μας στην Matlab, ή να δημιουργήσουμε έναν καινούργιο, είτε επιλέγοντας το τύπο και το πλήθος των συναρτήσεων συμμετοχής (grid partition) είτε κάνοντας υποκατηγοριοποίηση των εισόδων του ελεγκτή (sub-clustering)



Έπειτα εκπαιδεύουμε τον ελεγκτή μας θέτοντας των αριθμό των εποχών όπου θα γίνει η εκπαίδευση. Στο plot μας εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που αποκτά ο ελεγκτής μετά από κάθε εποχή εκπαίδευσης. Κάτω αριστερά αναφέρεται η τελική τιμή του σφάλματος.



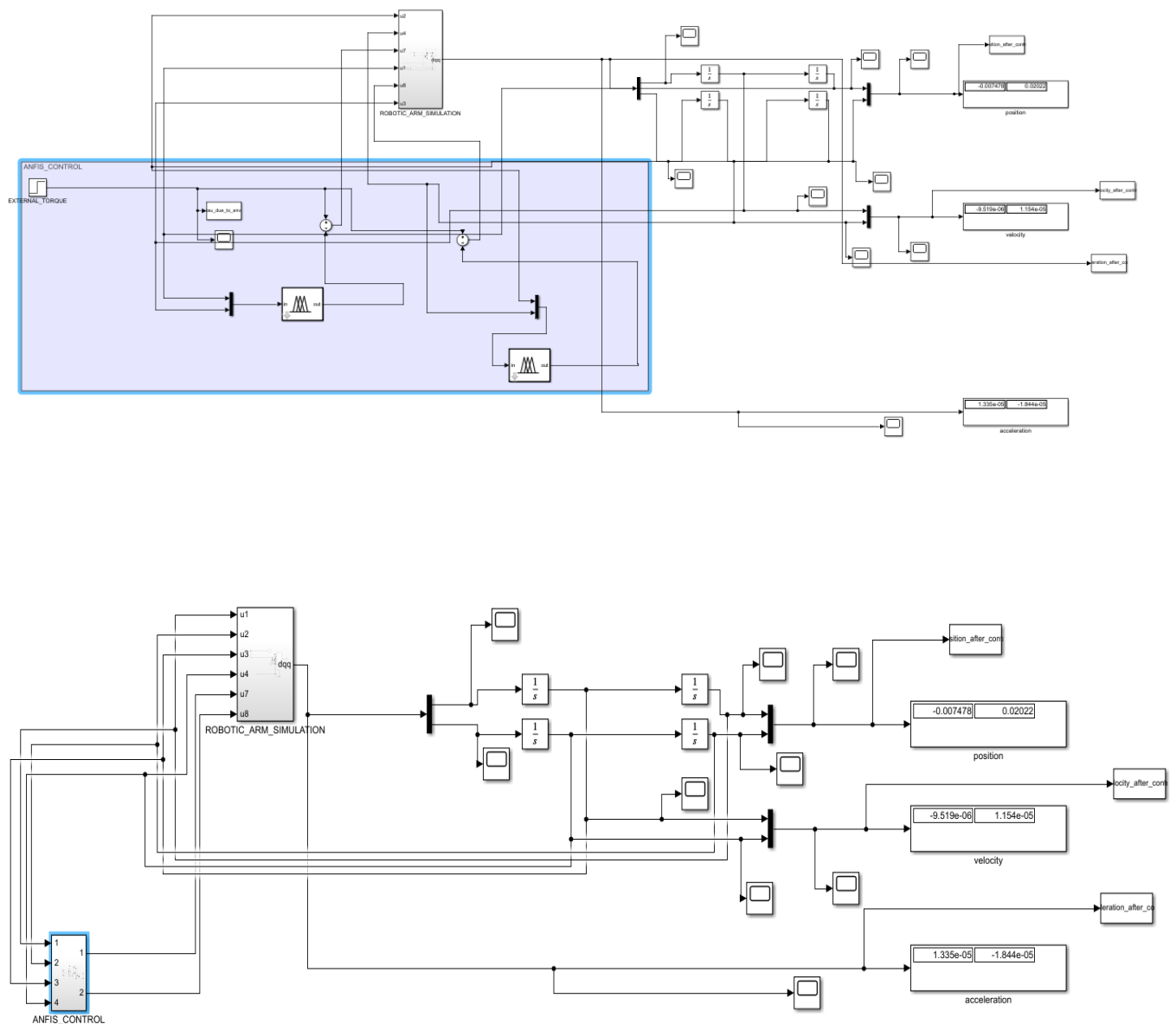
Τέλος μετα την εκπαίδευση, κάνουμε έλεγχο (testing) για να δούμε αν έχει βελτιστοποιηθεί ο ελεγκτής, κάνοντας από κοινού αναπαράσταση (plotting) την εξοδο που θα είχε ο ελεγκτής σε σχέση με την επιθυμητή εξόδο που θα θέλαμε να έχει ο ελεγκτής. Αν η κόκκινη γραμμή συμπίπτει με την αρχική μπλε γραμμή σε επιθυμητό βαθμό, τότε έχουμε τελειώσει με την υλοποίηση του ελεγκτή. Διαφορετικά, είτε ξανακάνουμε εκπαίδευση του ελεγκτή είτε δημιουργούμε άλλον ελεγκτή, αλλάζοντας τον αριθμό και τον τυπο των συναρτήσεων συμμετοχής.



Μετά την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας κάνουμε Export to file τον ελεγκτή μας και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για την άλλη άρθρωση του βραχίονα.

ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

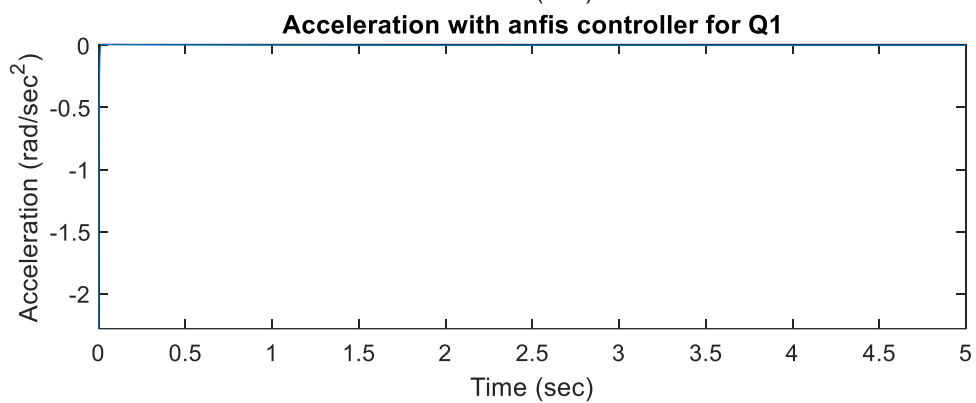
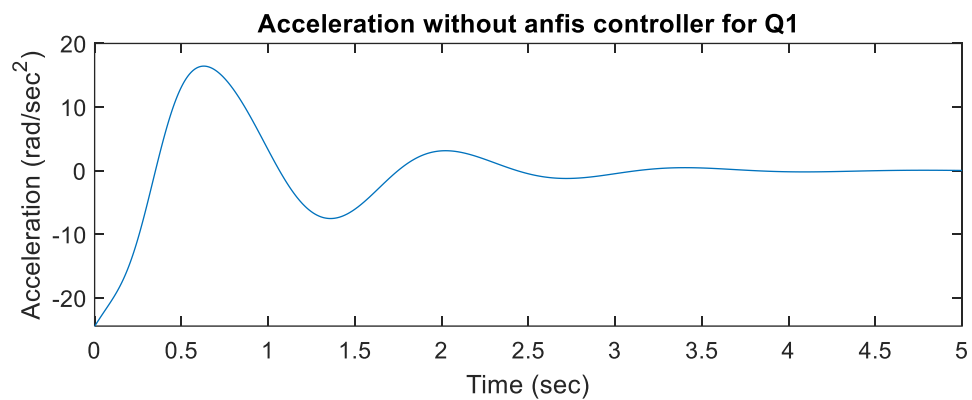
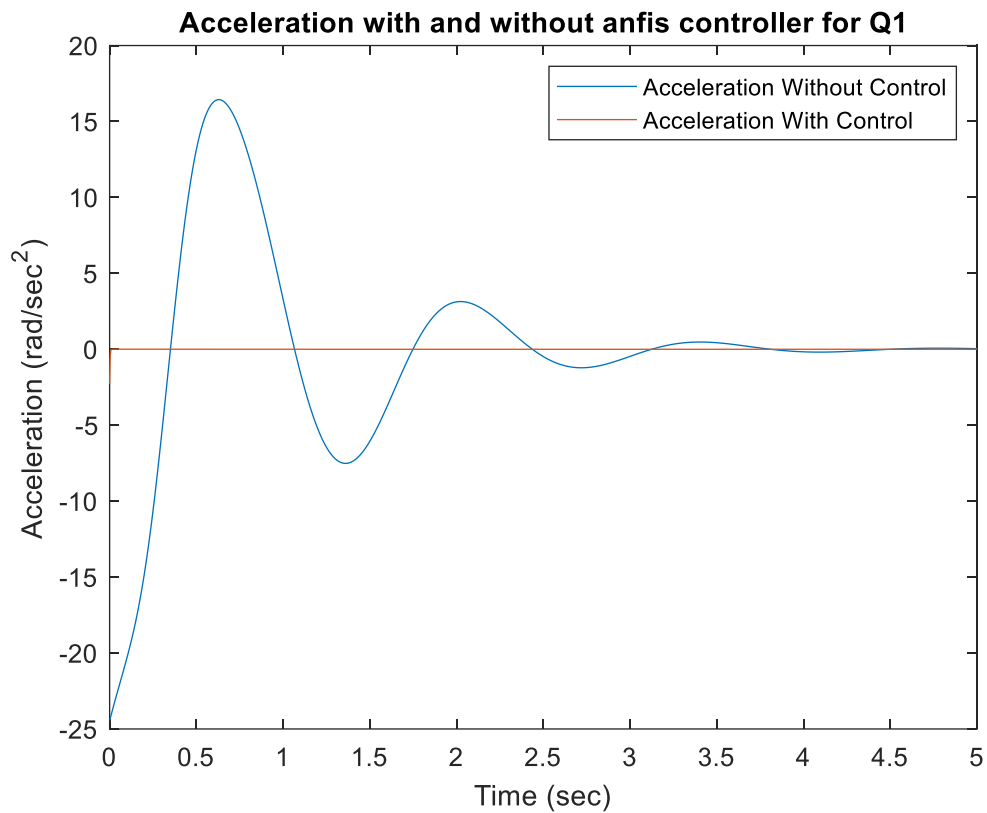
Στο τελικό στάδιο, εφαρμόσαμε τους 2 ελεγκτές μας στο αρχικό μας σύστημα, έτσι ώστε να δέχονται τις γωνίες και τις γωνιακές ταχύτητες κάθε στιγμή και να παράγουν αντίθετες ροπές οι οποίες θα επαναφέρουν τις αρθρώσεις στις αρχικές του θέσεις.

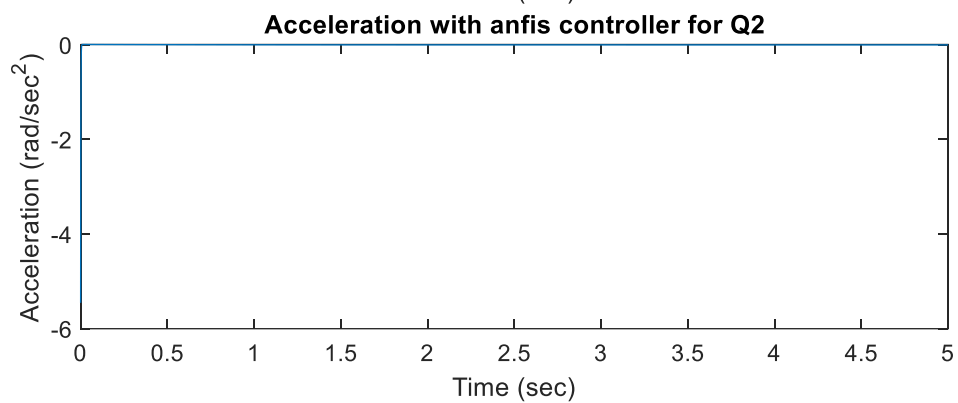
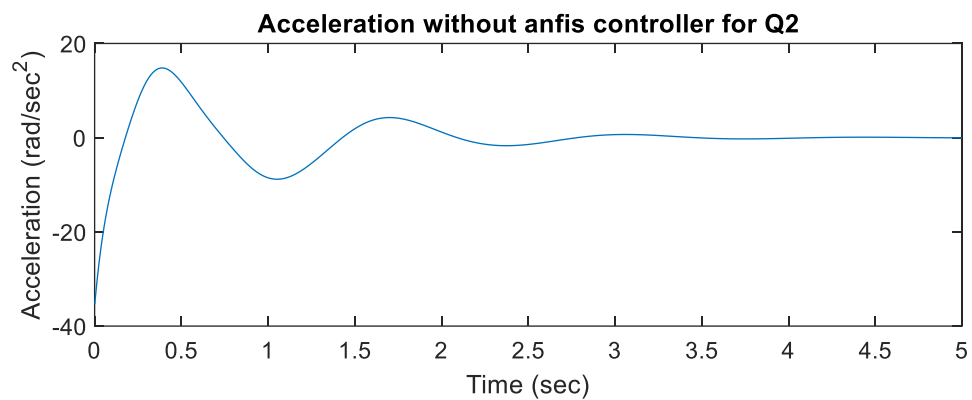
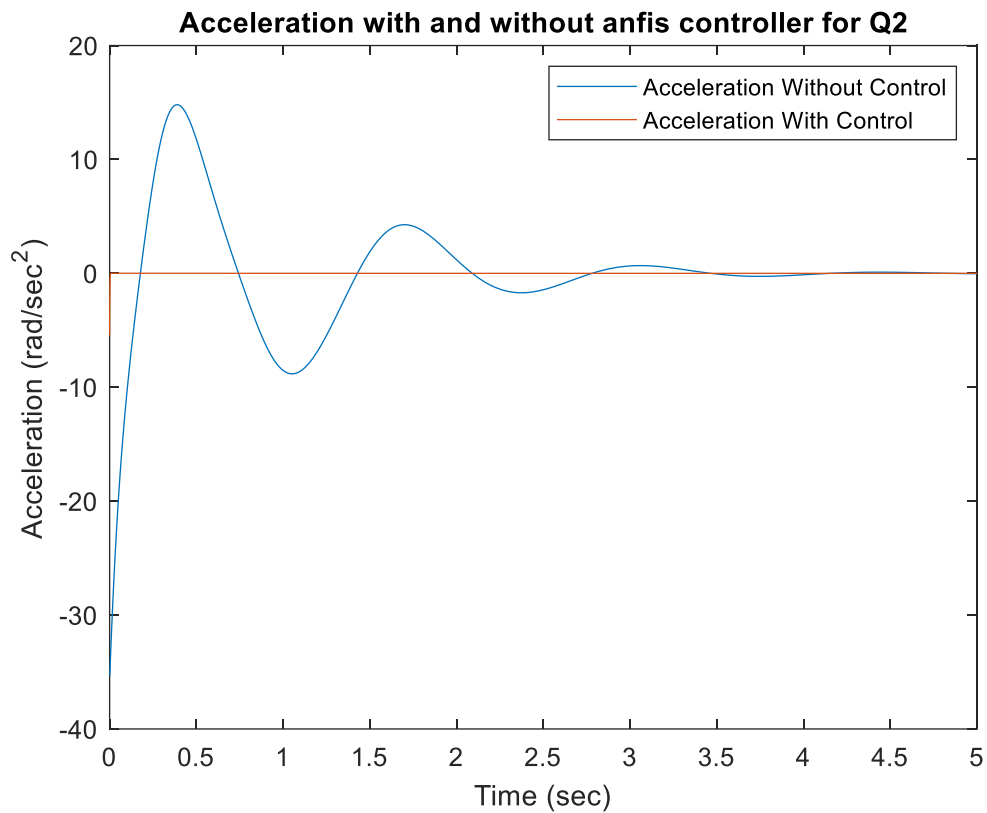


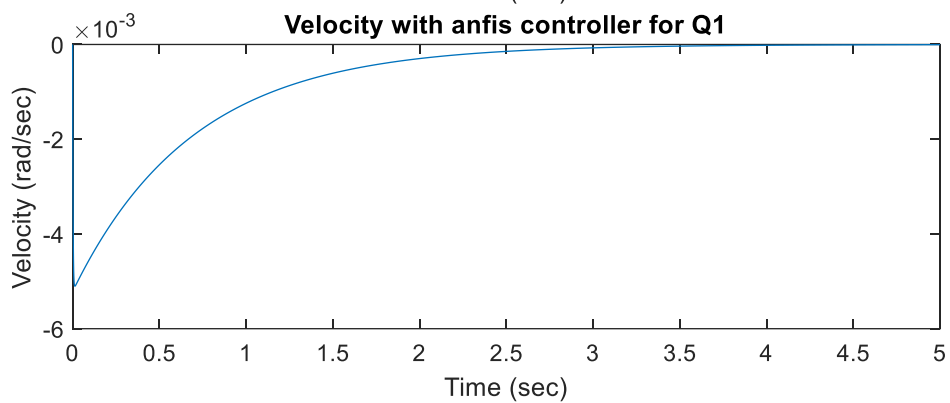
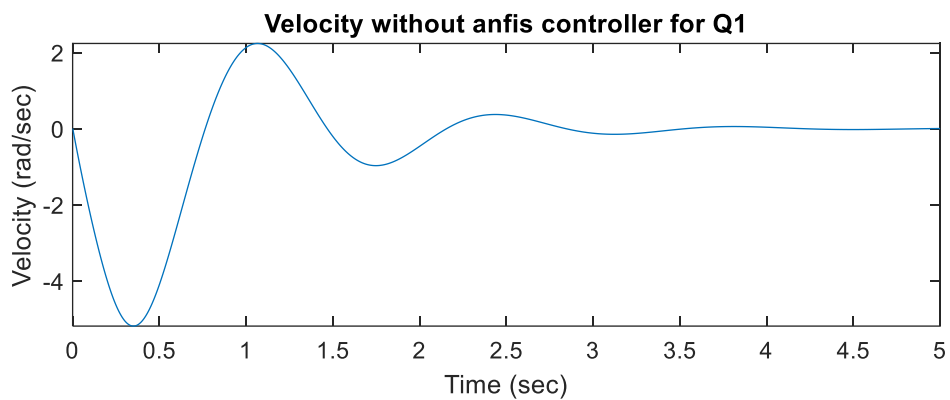
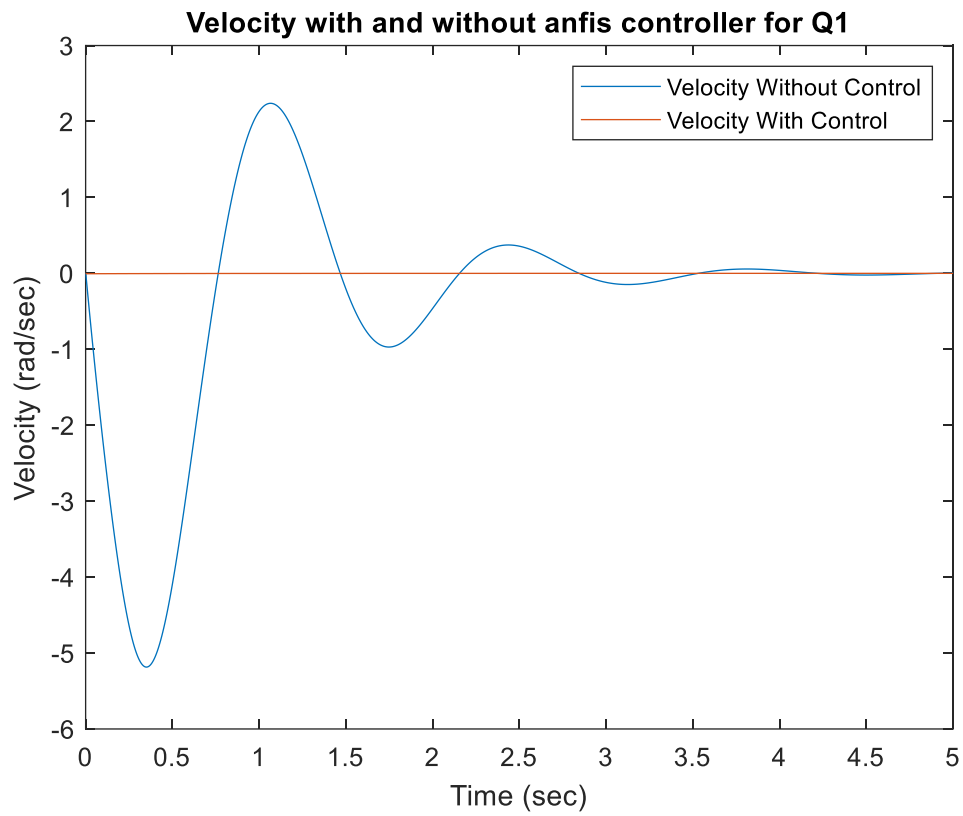
Εικόνα 19- Σύστημα ανάδρασης με τους ANFIS ελεγκτές

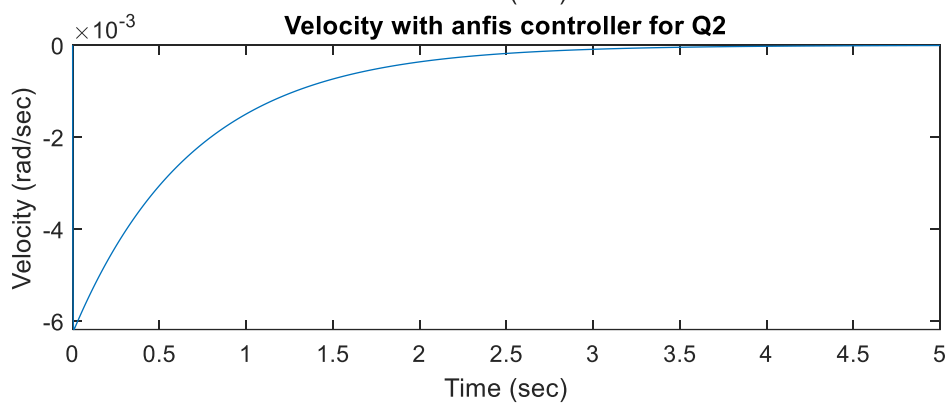
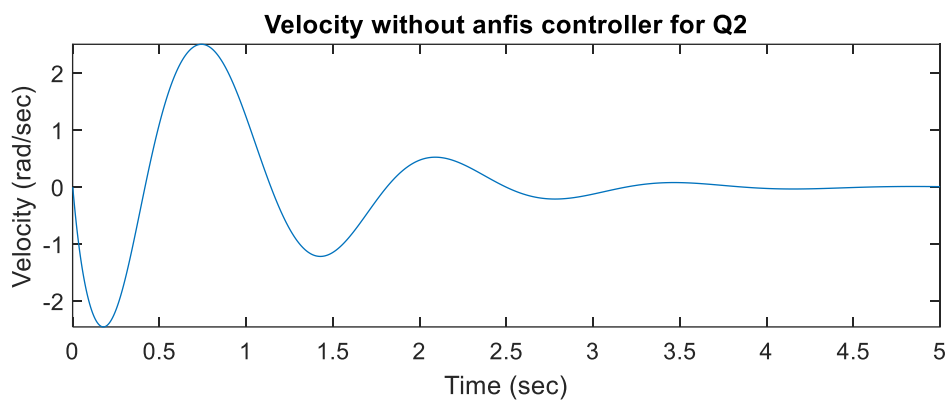
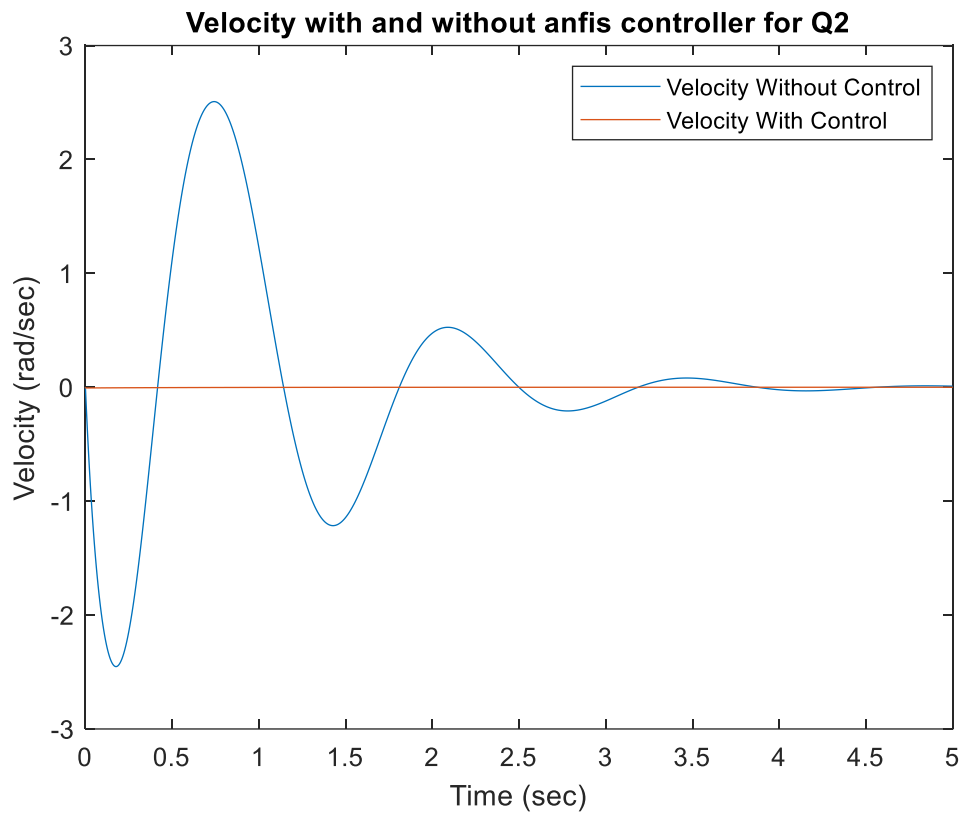
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

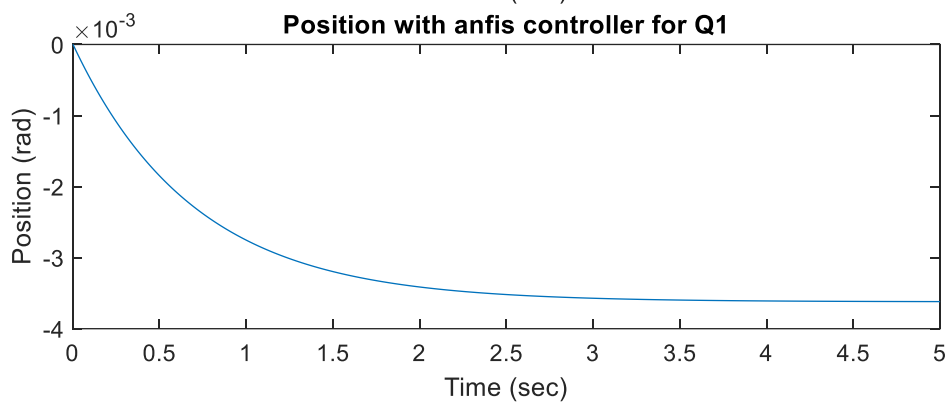
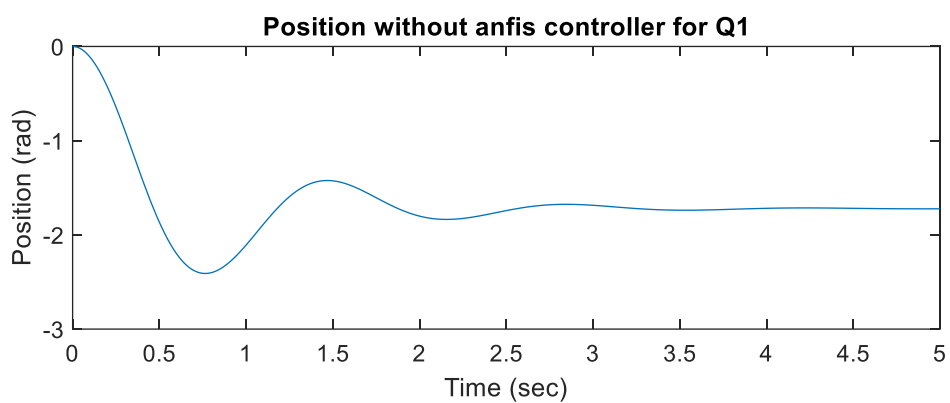
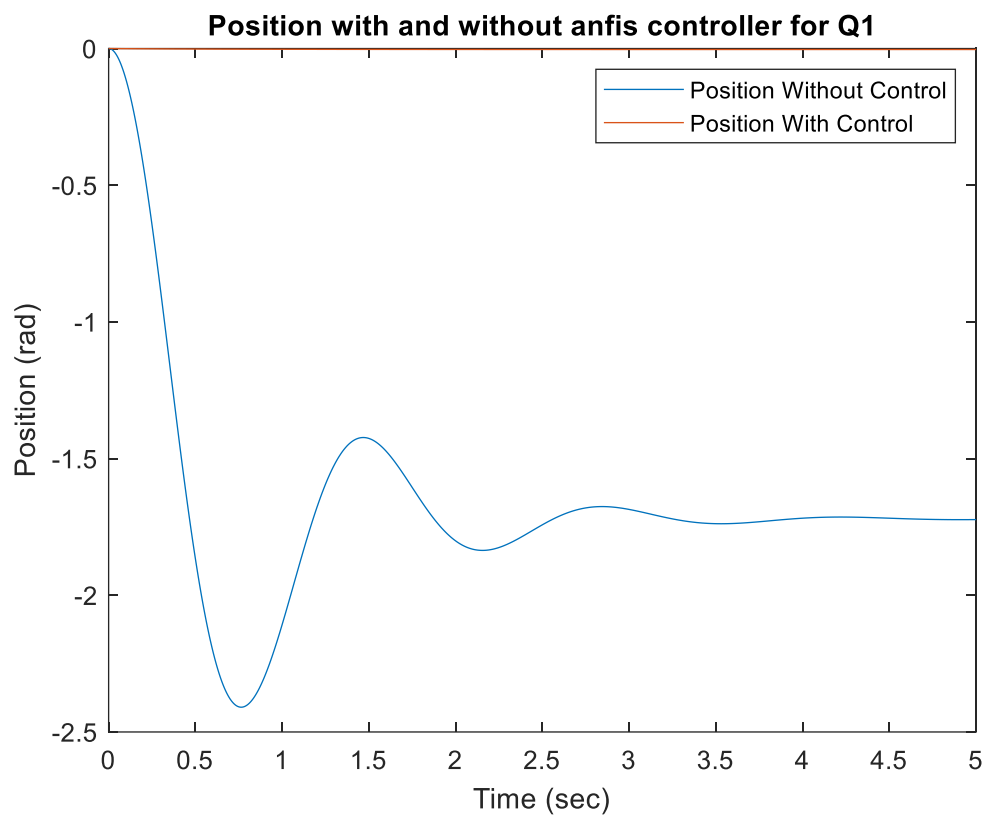
Οι μετρήσεις που πήραμε και τα διαγράμματα που θα παρουσιάσουμε αφορούν τις θέσεις, τις γωνιακές ταχύτητες και τις γωνιακές επιταχύνσεις των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα. Ο χρόνος προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι τα 5 second. Παρακάτω, εμφανίζουμε με 2 τρόπους την μελέτη της κίνησης του βραχίονα, για να είναι ξεκάθαρη η όλη προσομοίωση με, και χωρίς το νευροασαφή έλεγχο.

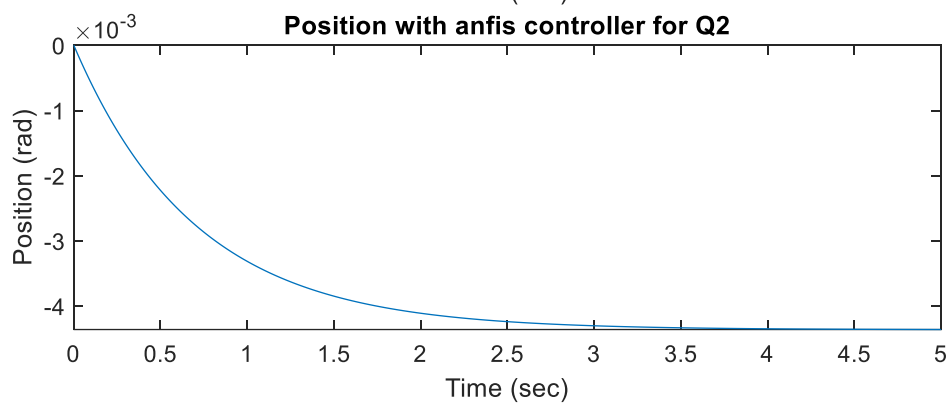
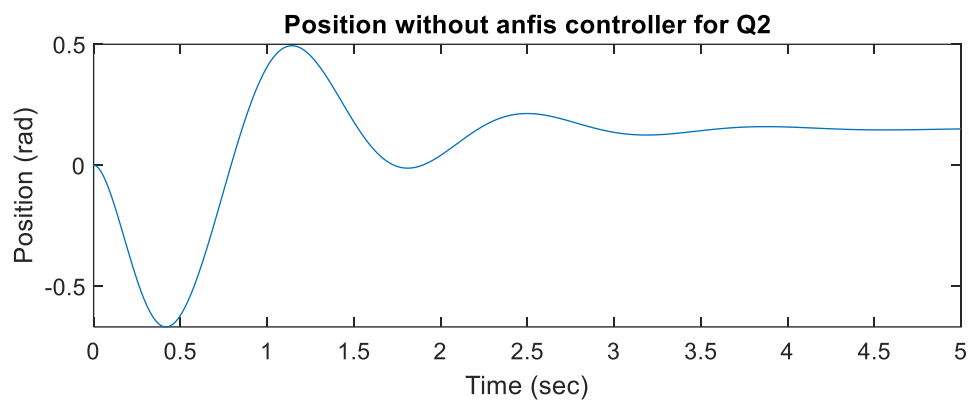
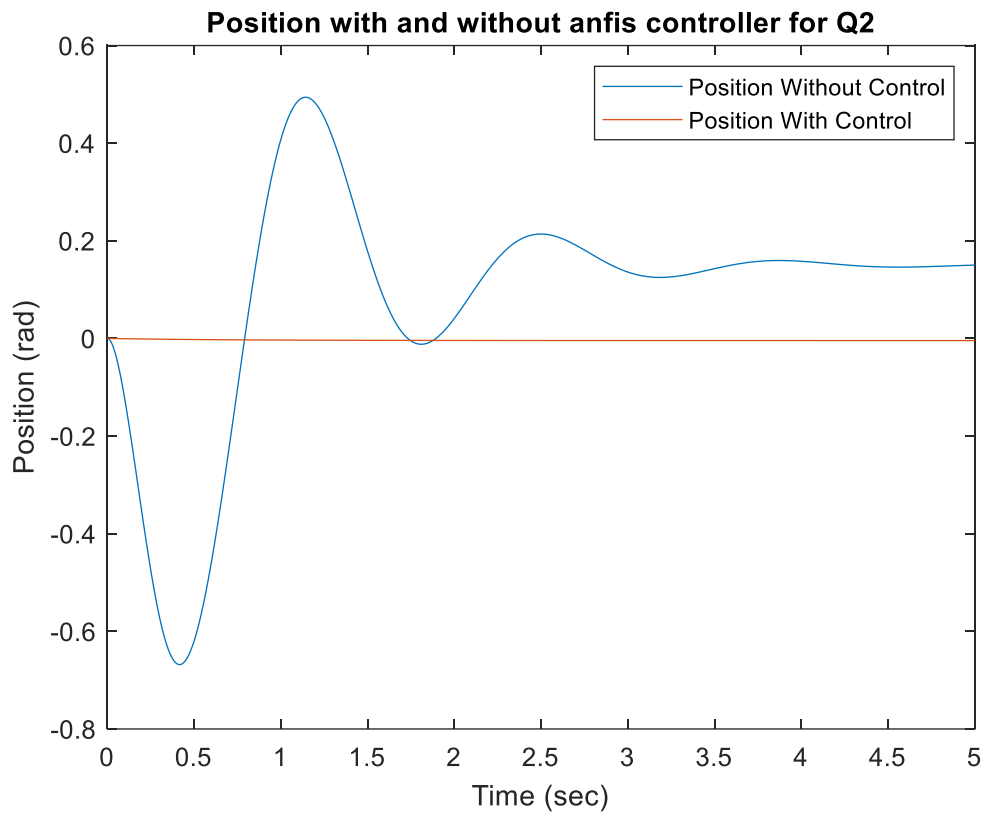












ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ

Αυτό που γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι ότι οι νευροασαφείς ελεγκτές καταφέρνουν πάρα πολύ αποτελεσματικά να ελέγξουν την συνολική κίνηση του βραχίονα. Παρατηρήσαμε ότι κατάφεραν σε πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα, από την εφαρμογή της εξωτερικής ροπής, να μηδενίσουν τις αρχικές επιταχύνσεις και ταχύτητες, σε σημείο που να δείχνει σχεδόν ακαριαία. Η θέση των αρθρώσεων βλέπουμε ότι δεν ταλαντώνει μετά τον έλεγχο και τήνει να σταθεροποιηθεί με πολύ μικρή απόκλιση από την αρχική, η οποία δικαιολογείται από την πιθανότητα σφάλματος που είχαν οι ελεγκτές κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης.

Η πραγματική απόκλιση που παρατηρήσαμε για την Q1 άρθρωση είναι της τάξεως των 0.003619 rad (ή 0.21 μοίρες) ενώ για την Q2 άρθρωση είναι 0.004359 rad(ή 0.25 μοίρες).

Σαν μελλοντική δουλειά θα μπορούσε να ασκηθεί νευροασαφής έλεγχος στην κίνηση ρομποτικού βραχίονα με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας ή να γίνει έλεγχος ανάδρασης για διαφορετικές γωνίες των αρθρώσεων του βραχίονα. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλου είδους ελεγκτές. (πχ P, PI, PID)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ταΐριδης, Γ. Κ., 2016. «Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση κατασκευών με ευφυή έλεγχο. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης». <http://purl.tuc.gr/dl/dias/2E583D03-56E0-4CF7-BBFC-A7C5A339AB68>

«Νευρωνικό Δίκτυο»

(https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B5%CF%85%CF%81%CF%89%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF)

«Industrial Robotic Arms: Changing How Work Gets Done.»

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/robotic-arm.html>)

Karnik, N.N., Mendel, J.M. and Liang, Q. (1999). Type-2 fuzzy logic systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 7(6), pp. 643-658.

Kaburlasos, V.G. (2006). Towards a Unified Modeling and Knowledge-Representation Based on Lattice Theory. Heidelberg, Germany: Springer.

Carpenter, G.A., Grossberg, S. and Rosen, D.B. (1991). Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System. Neural Networks, 4, pp. 759-771.

«Fir 05 dynamics 2-dof» <https://www.slideshare.net/nguyendattdh/fir-05-dynamics-2dof>

Θωμάς Κυριακάκης, "Προγραμματισμός νευροασαφών ελέγχων και η σύνδεσή τους σε ευφυή μηχανικά συστήματα", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2020

<http://purl.tuc.gr/dl/dias/C18B2F4B-D6E0-400C-9BE8-84A5FC9E8BAE>

Ιωάννης Μάγκουρας, "Εφαρμογές νευρο-ασαφών συστημάτων σε φυσικές καταστροφές", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2020.

<http://purl.tuc.gr/dl/dias/C24BD644-12BA-475F-ACE2-021C255935C6>

Ιωάννης Γιαννέλος, «Έλεγχος ανάδρασης εξόδου θέσης ρομποτικού βραχίονα με δύο αρθρώσεις», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2019

<http://hdl.handle.net/10889/13983>

Σταύρος Βολογιαννίδης, «Ευφυής Έλεγχος, θεωρία και Εφαρμογές.», ΤΕΙ ΣΕΡ-ΡΩΝ, 2009, <http://meleththrio.teicm.gr/xmlui/handle/123456789/42>

<https://www.turbosquid.com/ko/3d-models/3d-industrial-robot-arm-1198705>

<https://news.marathonpress.gr/talos-foniki-mhxanh-arxaion-ellhnon-mystikos-fylakas-krhths/>

<https://www.automate.org/a3-content/joseph-engelberger-unimate>

https://www.researchgate.net/figure/Joints-and-Links-of-Robot_fig4_301895257

<https://engineering.stackexchange.com/questions/24867/deriving-the-equations-of-motion-for-free-floating-spacecraft-with-a-single-link>

https://www.researchgate.net/figure/A-typical-ANFIS-model_fig3_333584194