

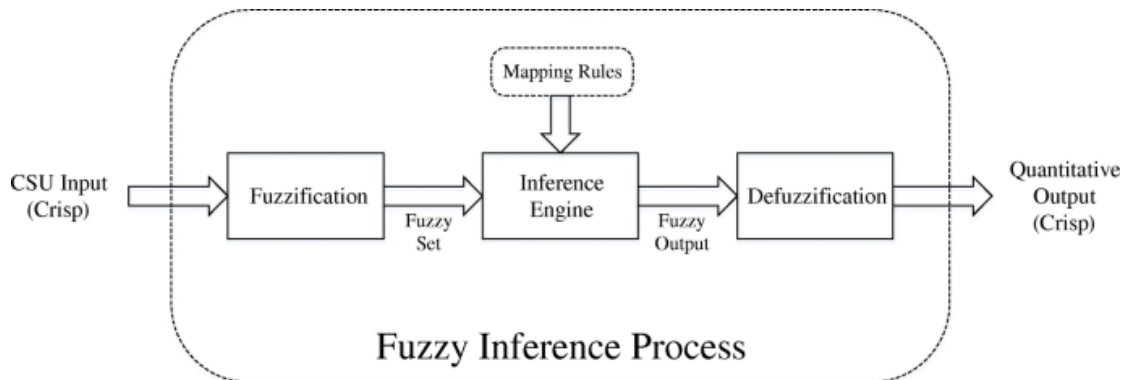


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Καλοκαίρι 2023

# Υπολογιστική Νοημοσύνη

Έλεγχος Γωνίας Προσανατολισμού  
ενός Δορυφόρου με Ασαφείς Ελεγκτές



ΤΖΟΥΒΑΡΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

AEM: 9659

Email: [tzouevan@ece.auth.gr](mailto:tzouevan@ece.auth.gr)

# Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	2
Α' Μέρος: Γραμμικός Ελεγκτής .....	2
1. Περιγραφή του προβλήματος .....	2
2. Σχεδίαση PI ελεγκτή .....	3
Β' Μέρος: Ασαφής Ελεγκτής (FLC) .....	6
1. Περιγραφή του προβλήματος .....	6
2. Κλιμακοποίηση σφάλματος και μεταβολής σφάλματος .....	8
3. Βάση κανόνων ασαφούς ελεγκτή .....	8
4. Σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή .....	9
5. Σενάριο 1 .....	11
6. Σενάριο 2 .....	19
Βιβλιογραφία .....	21

# Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος “υπολογιστική νοημοσύνη” και αποτελεί το 1<sup>ο</sup> μέρος του συνολικού project. Αφορά τον έλεγχο της γωνίας ενός συστήματος δορυφόρου, που έχει μοντελοποιηθεί με μία συνάρτηση μεταφοράς δύο πόλων. Στο 1<sup>ο</sup> μέρος της εργασίας, ο έλεγχος γίνεται με έναν PI (proportional integral) ελεγκτή με βάση την θεωρία του κλασσικού αυτόματου ελέγχου. Στο 2<sup>ο</sup> μέρος ο έλεγχος γίνεται με την χρήση ενός ασαφούς ελεγκτή ( Fuzzy Logic Controller –FLC), όπου και παρατηρείται η απόκριση του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις. Η ανάλυση και στα δύο μέρη γίνεται με χρήση του λογισμικού Matlab/Simulink.

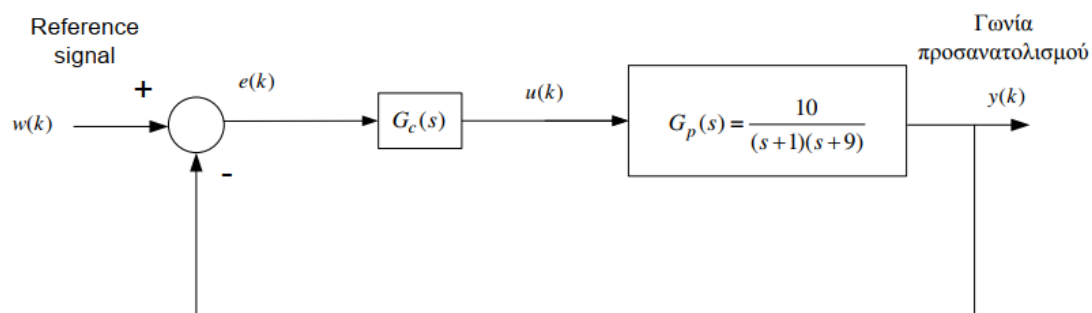
## Α' Μέρος: Γραμμικός Ελεγκτής

### 1. Περιγραφή του προβλήματος

Το σύστημα προς έλεγχο, είναι ένας δορυφόρος και σκοπός του ελεγκτή είναι να ελέγχει την γωνία του ώστε να την οδηγήσει στην επιθυμητή γωνία εισόδου. Ο δορυφόρος έχει μοντελοποιηθεί με την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς δύο πόλων.

$$G_p(s) = \frac{10}{(s+1)(s+9)} \quad (1)$$

Ο έλεγχος θα γίνει με έναν PI ελεγκτή που δέχεται ως είσοδο το σφάλμα μεταξύ της εισόδου αναφοράς και της πραγματικής τιμής της γωνίας εξόδου  $y(k)$ , που λαμβάνεται μέσω μοναδιαίας αρνητικής ανάδρασης. Το συνολικό block διάγραμμα του συστήματος απεικονίζεται στην εικόνα 1, όπου  $w(k)$  είναι η είσοδος αναφοράς στο σύστημα, ενώ το σήμα  $u(k)$ , αποτελεί τον νόμο ελέγχου (σήμα εξόδου του ελεγκτή).



Εικόνα 1: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος

## 2. Σχεδίαση PI ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή θα περιέχει έναν όρο κέρδους και έναν ολοκληρωτή, δηλαδή θα είναι της μορφής:

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s} \Rightarrow G_c(s) = \frac{k_p(s+c)}{s} \quad (2)$$

Σκοπός της σχεδίασης είναι να επιλεγθούν κατάλληλες τιμές για τα κέρδη του ελεγκτή, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές της εκφώνησης. Οι προδιαγραφές για την απόκριση του συστήματος, μετά την σχεδίαση του ελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

1. Υπερύψωση, για βηματική είσοδο, μικρότερη του 10%
2. Χρόνος ανόδου μικρότερος από 1.2sec.

Η τιμή του μηδενικού του ελεγκτή επιλέγεται ίση με -1, οπότε το c θα είναι ίσο με 1, ώστε να υπάρχει απαλοιφή του μηδενικού με έναν από τους πόλους του συστήματος.

Η τελική συνάρτηση μεταφοράς του ανοιχτού βρόχου ( $A(s)$ ) του συστήματος υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς του ευθύ βρόχου. Οπότε και προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$A(s) = G_c(s) * G_p(s) \Rightarrow A(s) = \frac{10k_p}{s(s+9)} \quad (3)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου προκύπτει από την συνάρτηση μεταφοράς του ανοιχτού βρόχου με μοναδιαία αρνητική ανάδραση. Οπότε θα ισούται με:

$$H(s) = \frac{A(s)}{1+A(s)} \quad (4)$$

Από την εξίσωση (4), εξάγεται το συμπέρασμα ότι το συνολικό σύστημα είναι 2<sup>ης</sup> τάξης της μορφής:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Στην εξίσωση (5), ο συντελεστής  $\zeta$  εκφράζει τον damping factor, ενώ η  $\omega_n$  είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος. Οι δύο αυτοί παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν σε ένα δευτεροβάθμιο σύστημα, στην ακραία περίπτωση των προδιαγραφών ως εξής:

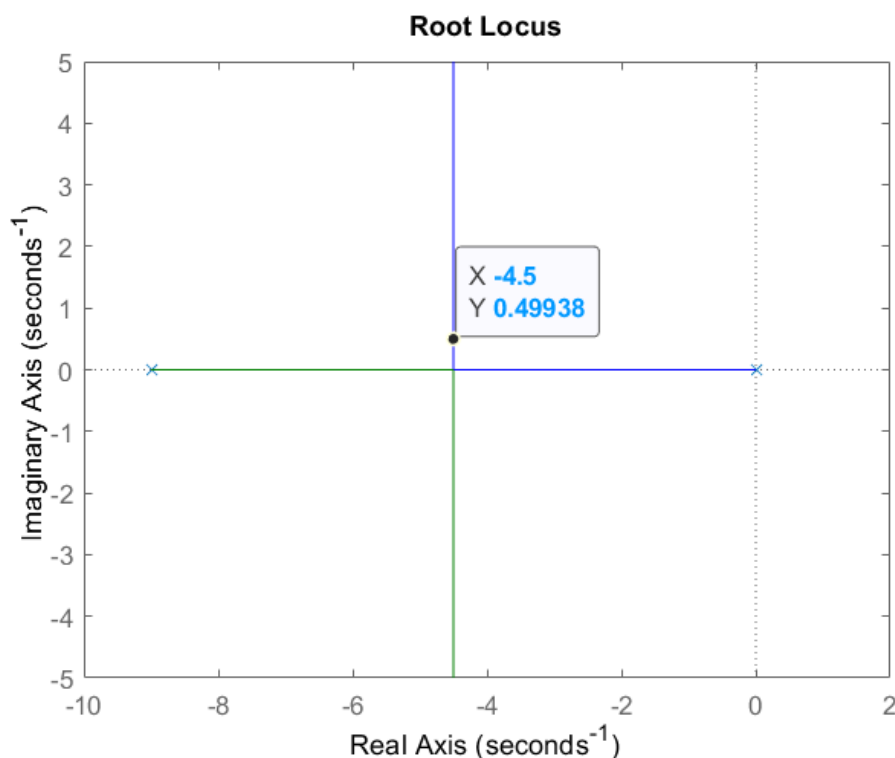
- Υπερύψωση:  $M_p = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow 0.1 = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \Rightarrow -\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}} = -2,5025 \Rightarrow \zeta^2 = 0,18916 \Rightarrow \zeta = 0,4349$
- Χρόνος ανόδου:  $t_r = \frac{\pi-\theta}{\omega_d} \Rightarrow t_r = \frac{\pi-\cos^{-1}\zeta}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \Rightarrow \omega_n = 1.87$

Με βάση τους παραπάνω συντελεστές, το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος κλειστού βρόχου, στην οριακή περίπτωση των προδιαγραφών, θα είναι:

$$s^2 + 1.6265s + 3.4969 = 0$$

Οπότε και οι πόλοι του συστήματος θα είναι οι: **p = -0.81325 +/- j1.6839**

Με βάση την σχέση (3) της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος ανοικτού βρόχου, σχεδιάζεται στο Matlab η γραφική παράσταση του γεωμετρικού τόπου των ριζών. Οπότε στην εικόνα 2, παρουσιάζεται η μεταβολή των πόλων του συστήματος κλειστού βρόχου, συναρτήσει της μεταβολής του κέρδους  $k_p$  (προσομοίωση στο livescript PI\_controller.mlx).



Εικόνα 2: Γεωμετρικός Τόπος των Ριζών

Με την αύξηση του  $k_p$  οι πόλοι του συστήματος γίνονται φανταστικοί και τείνουν ασυμπτωματικά στο άπειρο, με το φανταστικό μέρος να είναι ίσο με -4.5. Επιλέγεται το πραγματικό μέρος των πόλων να είναι  $\pm 0.5$ , ώστε να είναι μικρότερο του συστήματος οριακών προδιαγραφών. Για  $s = -0.5 \pm j4.5$  υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του  $k_p$  ως εξής:

$$|H(s)| = \frac{1}{k_p} \Rightarrow k_p = \frac{|s^2 + 1.6225s + 3.4969|}{3.4969} \Rightarrow k_p = 5.157$$

Οπότε με επιλογή του  $k_p = 5$ , προκύπτει η τελική συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου, και ελέγχεται η εκπλήρωση των προδιαγραφών με βάση το παρακάτω τμήμα κώδικα στο livescript:

Step response for the closed loop transfer function, after the calculation of the gain:

```
% Open loop transfer function for kp = 5
A_s = tf([50],[1 9 0]);

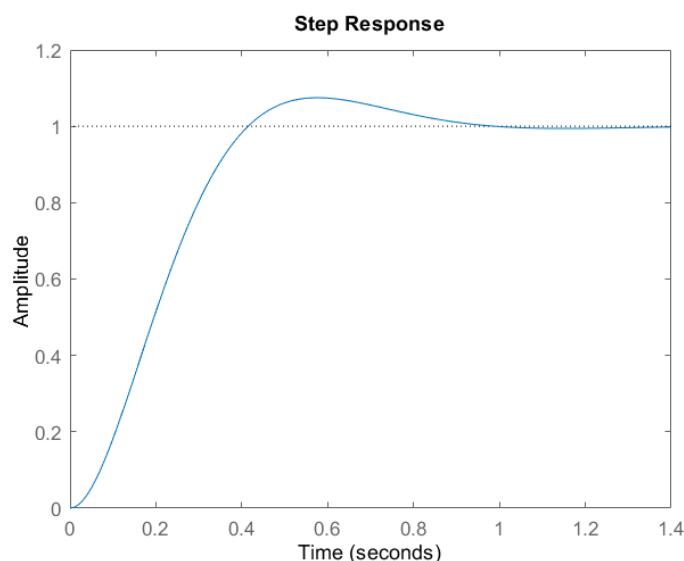
% Closed loop transfer function for kp = 5
H_s = feedback(A_s, 1, -1);

% Step response for the closed loop transfer function
figure;
step(H_s);

% Info about the step response
S = stepinfo(H_s);

% Print the results about rise time and overshoot
fprintf('STEP RESPONSE RESULTS');
fprintf('Rise time(sec): %f', S.RiseTime);
fprintf('Overshoot(%): %f', S.Overshoot);
```

Εικόνα 3: Livescript για τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος



Εικόνα 4: Βηματική απόκριση του συστήματος για  $k_p=5$

Με την βοήθεια του struct 'stepinfo', υπολογίζεται και τυπώνεται ο χρόνος ανόδου και η υπερύψωση του συστήματος, όπου και επιβεβαιώνεται ότι πληρούνται οι αρχικές προδιαγραφές.

#### STEP RESPONSE RESULTS

Rise time(sec): 0.275290

Overshoot(%): 7.486156

Εικόνα 5: Χρόνος ανόδου και υπερύψωση

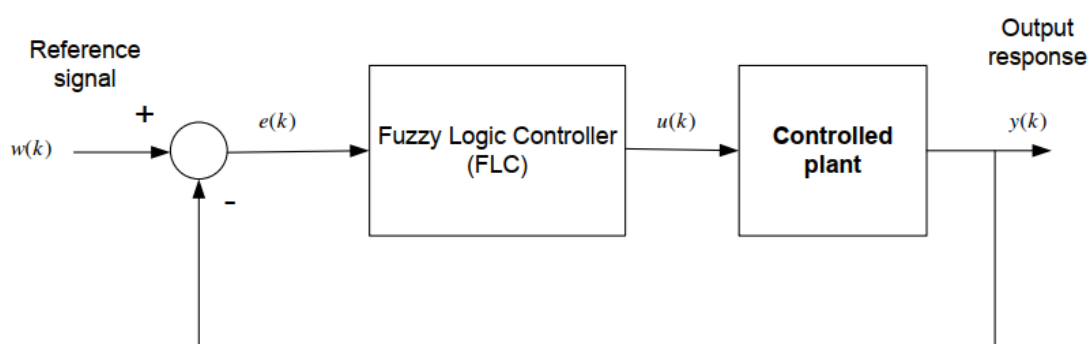
Εφόσον κατά την αρχική σχεδίαση επιλέχθηκε το μηδενικό στο -1, άρα και το κέρδος του ολοκληρωτή θα είναι ίσο με:

$$c = \frac{k_I}{k_P} \Rightarrow k_I = 5$$

## Β' Μέρος: Ασαφής Ελεγκτής (FLC)

### 1. Περιγραφή του προβλήματος

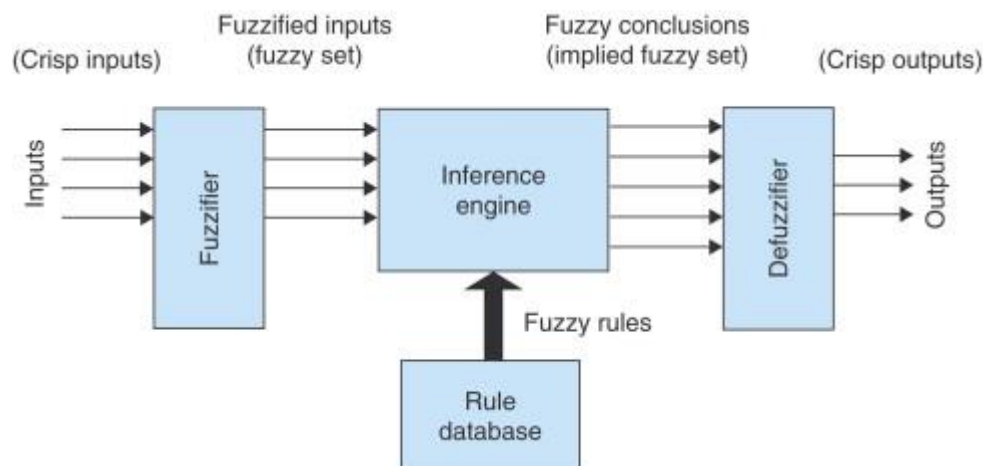
Σκοπός του 2<sup>ου</sup> μέρους είναι ο έλεγχος του ίδιου συστήματος (γωνία δορυφόρου), με την χρήση ασαφούς ελεγκτή PI, ώστε να μηδενίζεται και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης για την ταχύτητα. Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος με ασαφή ελεγκτή

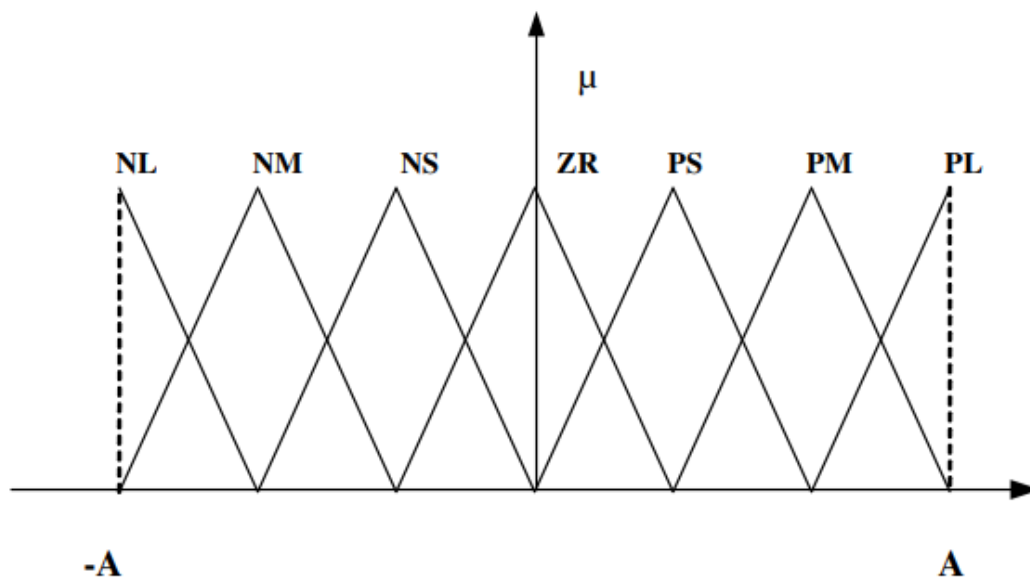
Ο fuzzy controller θα λαμβάνει σαν είσοδο το σφάλμα και την παράγωγο του σφάλματος, και μέσω **ασαφοποιητή singleton**, θα μετατρέπει τις crisp μεταβλητές σε fuzzy. Με βάση κανόνες θα εξάγει ένα άλλο σύνολο ασαφών μεταβλητών με την

χρήση **συνάρτησης συμπερασμού mamdani** όπου θα περνά από **από-ασαφοποιητή COA** (Center Of Area). Η δομή του ασαφούς ελεγκτή σε γενική μορφή παρουσιάζεται στην εικόνα 7.



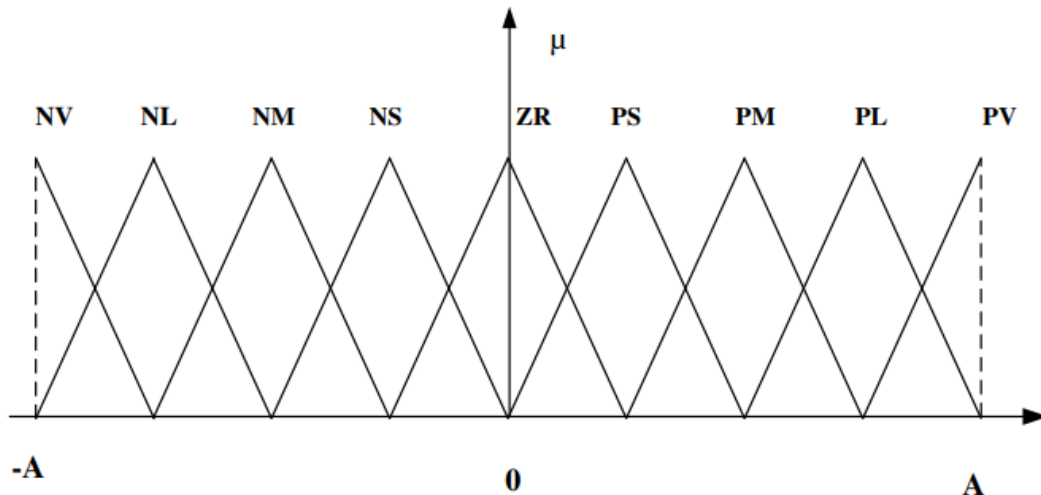
Εικόνα 7: Δομή ενός Fuzzy Logic Controller

Η λεκτική μεταβλητή του σφάλματος  $E$  και της μεταβολής του νόμου ελέγχου,  $\dot{U}$  μπορεί να πάρει επτά διαφορετικές τιμές, ενώ η λεκτική μεταβλητή της μεταβολής του σφάλματος,  $\dot{E}$  μπορεί να πάρει εννέα διαφορετικές τιμές. Τα ασαφή σύνολα έχουν τριγωνική μορφή ενώ υπάρχει και επικάλυψη μεταξύ των συνόλων όπως διακρίνεται στις εικόνες 8 και 9.



Εικόνα 8: Ασαφή Σύνολα των λεκτικών μεταβλητών  $E$  και  $\dot{U}$





Εικόνα 9: Ασαφή Σύνολα της λεκτικής μεταβλητής  $\dot{E}$ .

## 2. Κλιμακοποίηση σφάλματος και μεταβολής σφάλματος

Η γωνία του δορυφόρου (δηλαδή η αναφορά του συστήματος), κυμαίνεται από 0 έως 50 μοίρες, οπότε και το σφάλμα  $E$  κυμαίνεται στο διάστημα  $-50$  έως  $50$ . Για μεταβολή των μεγεθών στο διάστημα  $[-1,1]$ , ο συντελεστής κλιμακοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:

$$k_e = \frac{\widetilde{a}_e}{a_e} = \frac{1}{50}$$

Με βάση τα διαγράμματα των ασαφών συνόλων αλλά και του συντελεστή κλιμακοποίησης, προκύπτει ότι το εύρος κάθε συνόλου της λεκτικής μεταβλητής του σφάλματος είναι 33.33 μοίρες ή 0.6667 σε κλιμακοποιημένη μορφή, ενώ για την μεταβολή του σφάλματος, το εύρος του διαστήματος θα είναι 25 ή σε κανονικοποιημένη μορφή θα έχει εύρος 0.5.

## 3. Βάση κανόνων ασαφούς ελεγκτή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σφάλμα  $E$  μπορεί να λάβει επτά διαφορετικές λεκτικές τιμές, ενώ η μεταβολή του σφάλματος  $\dot{E}$ , μπορεί να λάβει εννέα διαφορετικές λεκτικές τιμές. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εισόδων στο σύστημα, οδηγεί στην δημιουργία μίας βάσης κανόνων  $63^{ωv}$  στοιχείων ( $7 \times 9$ ), οι οποίοι προκύπτουν με βάση τους μετα-κανόνες σωστής λειτουργίας του συστήματος κλειστού βρόχου. Με βάση αυτή την βάση θα υπολογίζεται η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή που θα οδηγείται στον από-ασαφοποιητή, ώστε έπειτα να επιδράσει στο περιβάλλον. Οι συνδυασμοί εισόδων και η αντίστοιχη τιμή εξόδου, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ε\ΔΕ	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
NL	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NM	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NS	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
ZR	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
PS	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PM	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PL	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL

#### 4. Σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή

Στο αρχείο 'fuzzy\_logic\_controller.m' δημιουργείται το μοντέλο του ασαφούς ελεγκτή, με την βοήθεια του fuzzy toolbox, που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στα μοντέλα του Simulink. Ο ασαφής ελεγκτής που δημιουργείται έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το συνδετικό AND υλοποιείται με τον τελεστή min
- Το συνδετικό ALSO υλοποιείται με τον τελεστή max
- Η συνάρτηση συμπερασμού υλοποιείται με τον κανόνα Mamdani (max-min)
- Ο από-ασαφοποιητής υλοποιείται με την τεχνική COA (Center Of Area)

Με βάση τα εξής χαρακτηριστικά, το νέο fis αντικείμενο δηλώνεται ως εξής (για χάρην ευκολίας παρουσιάζεται σε δύο γραμμές):

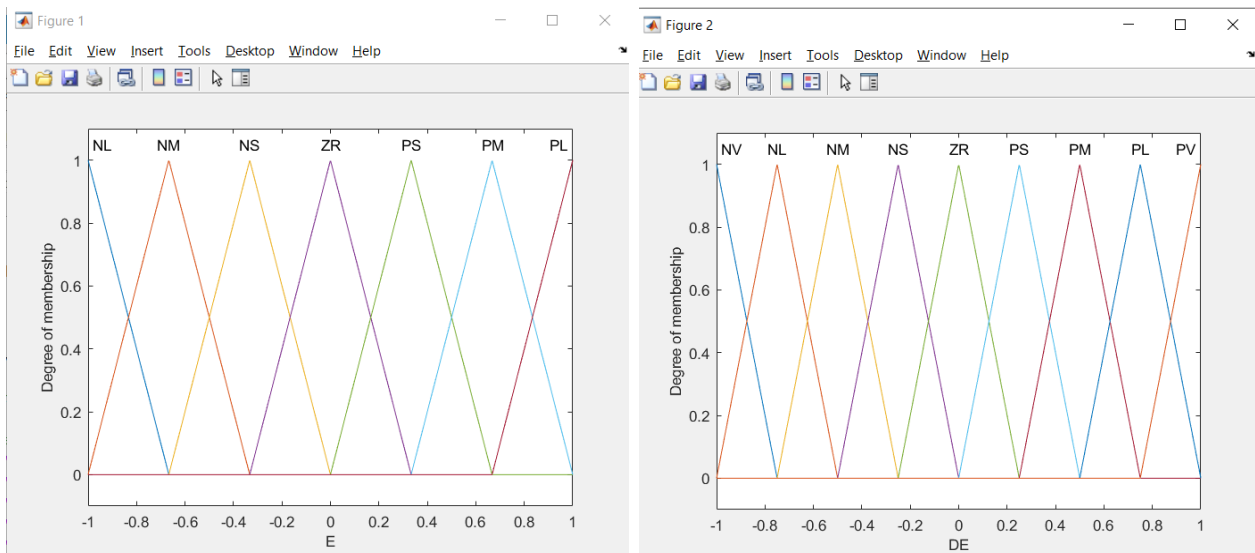
```

7 % Create the Fuzzy Inference System
8 % AND -> min
9 % ALSO (OR) -> max
10 % ImplicationMethod -> min, AggregationMethod -> max , Totally -> max-min method(mamdani method)
11 % Defuzzifier -> COA (Center Of Area)
12 fis = mamfis('Name', 'MyMamdaniFIS', 'AndMethod', 'min', 'OrMethod', 'max', 'ImplicationMethod', 'min',
13             'AggregationMethod', 'max', 'DefuzzificationMethod', 'centroid');
14

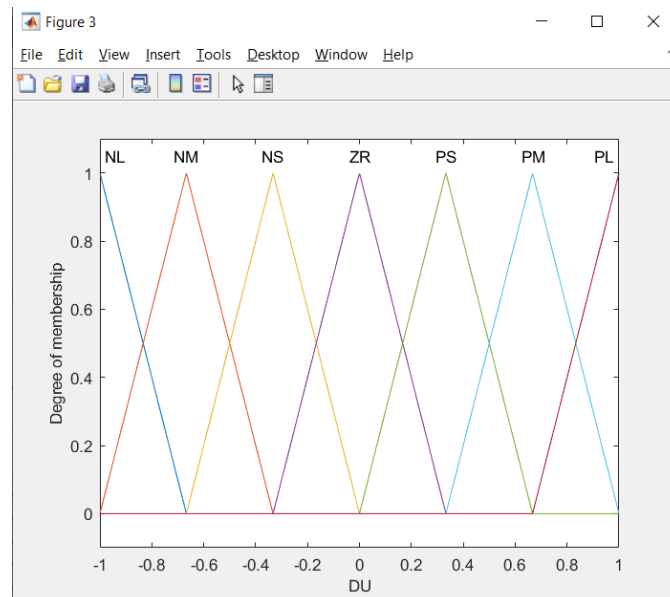
```

Εικόνα 10: Δήλωση ενός νέου fis αντικειμένου

Έπειτα δηλώνονται οι μεταβλητές εισόδου (σφάλμα  $E$  και παράγωγος σφάλματος  $\dot{E}$ ) καθώς και η μεταβλητή εξόδου (παράγωγος νόμου ελέγχου  $\dot{U}$ ). Για κάθε μεταβλητή ορίζονται όλες οι λεκτικές τιμές που μπορεί να πάρει, κανονικοποιημένες στο διάστημα  $[-1,1]$ . Επίσης δηλώνεται ότι η μορφή των ασαφών συνόλων θα είναι τριγωνική (trimf). Έτσι τα σύνολα των ασαφών μεταβλητών που προκύπτουν, παρουσιάζονται στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.



*Εικόνα 11: Ασαφή σύνολα μεταβητών εισόδου*



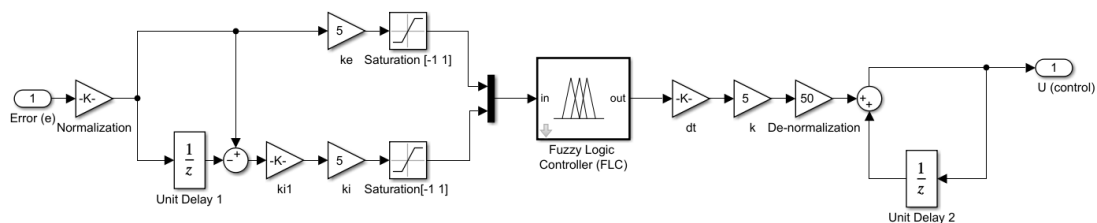
*Εικόνα 12: Ασαφή σύνολα μεταβλητής εξόδου*

Τέλος δηλώνεται η βάση των ασαφών κανόνων που παρουσιάστηκε στον πίνακα παραπάνω, και εισάγεται στο fis object. Το τελικό fis αντικείμενο εξάγεται σε ένα .fis αρχείο, για να χρησιμοποιηθεί στα μοντέλα Simulink.

## 5. Σενάριο 1

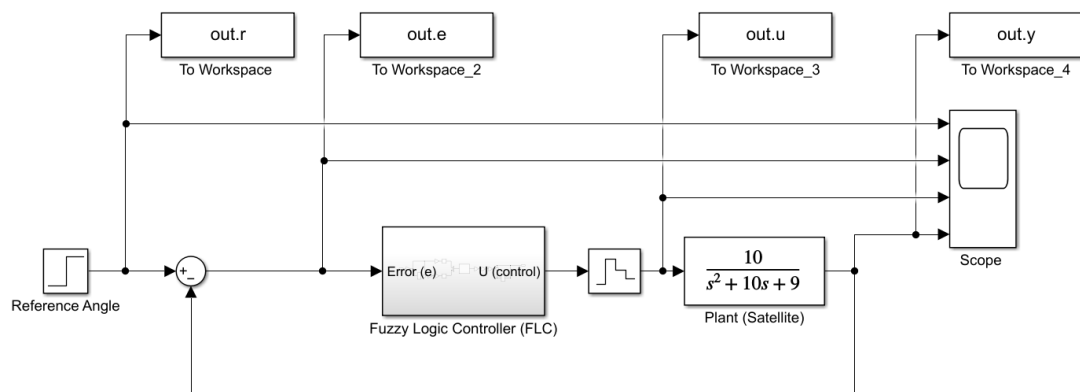
### A.

Το μοντέλο του ασαφούς ελεγκτή (fuzzy inference system), εισάγεται στο Simulink, σε έναν ασαφή PI ελεγκτή. Αρχικά το σφάλμα του συστήματος κανονικοποιείται στο διάστημα  $[-1 \ 1]$ . Από το σφάλμα δημιουργείται η διακριτή παράγωγος του σήματος (για διάστημα 0.01sec). Έπειτα τα δύο σήματα εισόδου πολλαπλασιάζονται με τα κέρδη  $k_e$  και  $k_i$ , και εισάγονται στο fuzzy system. Η έξοδος του ελεγκτή (παράγωγος του νόμου ελέγχου) πολλαπλασιάζεται με το κέρδος  $k_1$ , κανονικοποιείται σε τιμή  $[-50 \ 50]$ , και ολοκληρώνεται ώστε να προκύψει το τελικό σήμα  $u(k)$ .



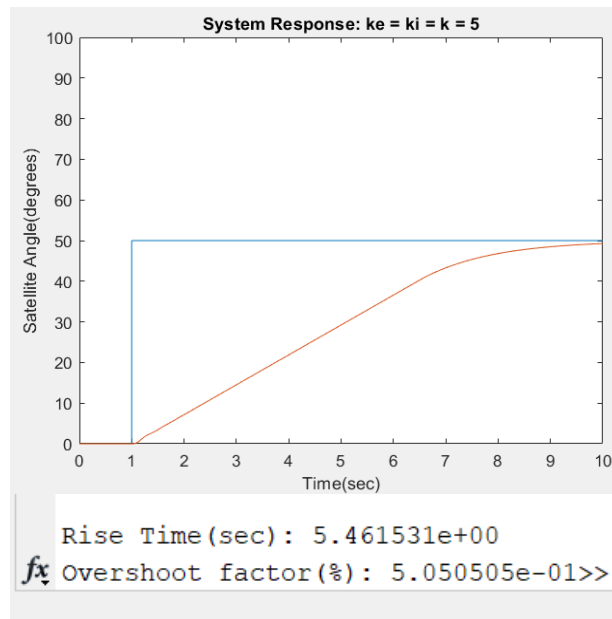
Εικόνα 13: PI ασαφής ελεγκτής

Ο PI fuzzy controller εισάγεται σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου για να ελέγξει το περιβάλλον, δηλαδή την γωνία του δορυφόρου.



Εικόνα 14: Σύστημα κλειστού βρόχου με ασαφή ελεγκτή

Με αρχική ρύθμιση των κερδών του PI ελεγκτή να είναι ίσα με 5, παρατηρείται μία πολύ αργή απόκριση του συστήματος, και σχεδόν καθόλου overshoot. Είναι λογικό τα κέρδη σε έναν κλασικό PI ελεγκτή και σε έναν fuzzy ελεγκτή να μην συμπίπτουν, γιατί ο κλασικός ελεγκτής βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, ενώ ο ασαφής ελεγκτής αποκλειστικά στην εμπειρία του σχεδιαστή. Οπότε και τα κέρδη απαιτούν ρύθμιση.

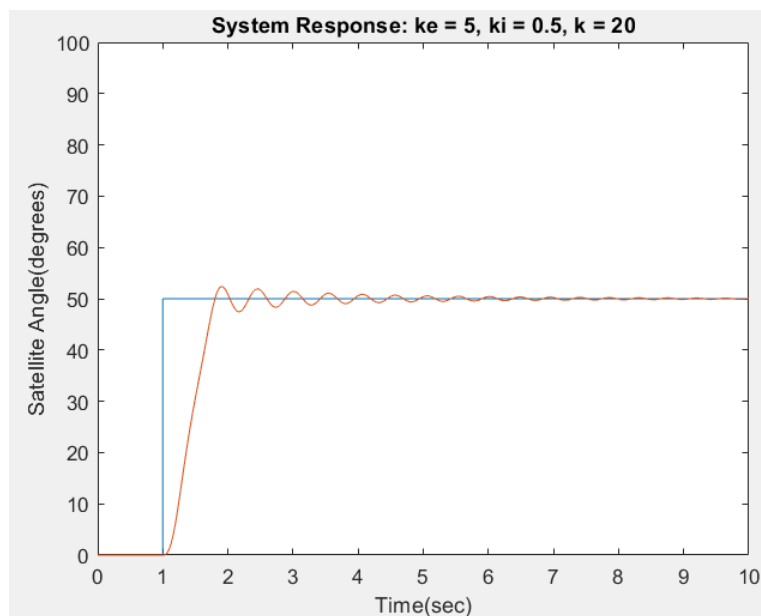


Εικόνα 15: Απόκριση του συστήματος με ίδια κέρδη με τον κλασικό PI ελεγκτή

Μετά από εφαρμογή της μεθόδου trial and error, προέκυψε ότι τα επιθυμητά κέρδη, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές (rise time < 0.6sec και overshoot < 7%), είναι τα ακόλουθα:

- $K_e = 5$
- $K_i = 0.5$  άρα και ο συντελεστής  $\alpha$  θα ισούται με:  $\alpha = 0.1$
- $K = 20$

Με βάση τα παραπάνω κέρδη στον ασαφή PI ελεγκτή, προκύπτει η ακόλουθη βηματική απόκριση του συστήματος:

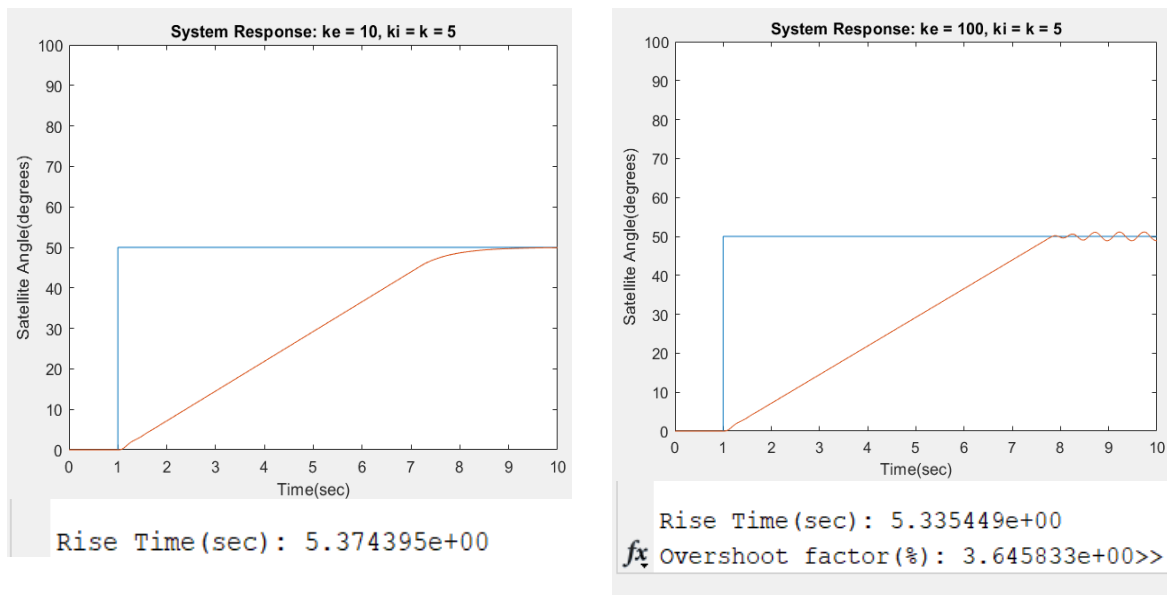


Εικόνα 16: Απόκριση συστήματος μετά το tuning

```
Rise Time(sec): 5.352073e-01  
fx Overshoot factor(%): 4.658077e+00>>
```

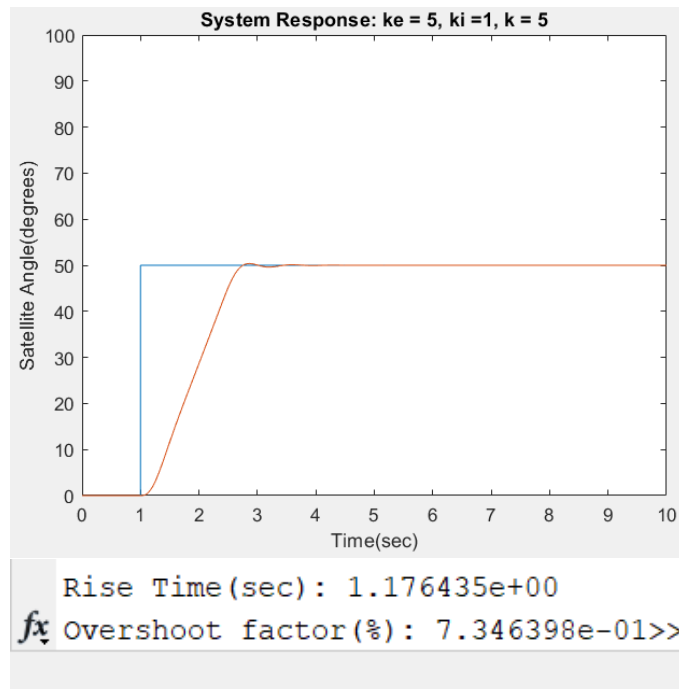
Εικόνα 17: Χαρακτηριστικά συστήματος ασαφούς ελεγκτή μετά το tuning

Η αύξηση του αναλογικού κέρδους του PI ελεγκτή ( $k_e$ ) οδηγεί σε μείωση του χρόνου ανόδου. Σε μεγάλες τιμές κέρδους όμως ξεκινούν οι ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή θέση, κάτι που δεν είναι επιτρεπτό σε τέτοιου είδους συστήματα.



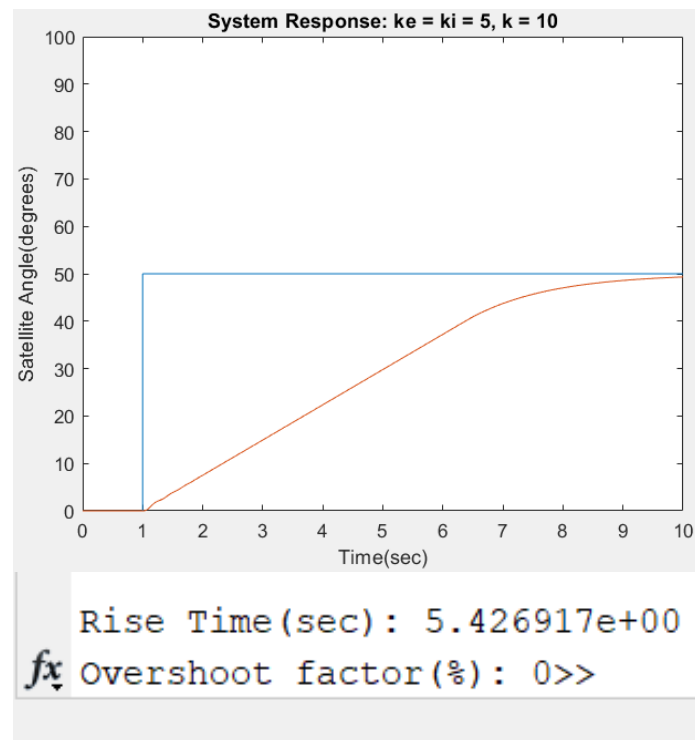
Εικόνα 18: Επίδραση του  $k_e$  στην βηματική απόκριση

Από την άλλη πλευρά, ο χρόνος ανόδου βελτιώνεται με μείωση του κέρδους του ολοκληρωτή. Όσο περισσότερο όμως βελτιώνεται η απόκριση, τόσο μεγαλύτερη υπερύψωση εμφανίζεται στην έξοδο. Οπότε προκύπτει ένας συμβιβασμός μεταξύ υπερύψωσης και χρόνου ανόδου σε σχέση με το μέρος του ολοκληρωτή. Οπότε για επίτευξη και των δύο προδιαγραφών η μείωση του  $k_i$  γίνεται μέχρι ένα σημείο και έπειτα ρυθμίζονται τα υπόλοιπα κέρδη (όπως και στην τελική ρύθμιση του ασαφούς ελεγκτή που έγινε προηγουμένως).



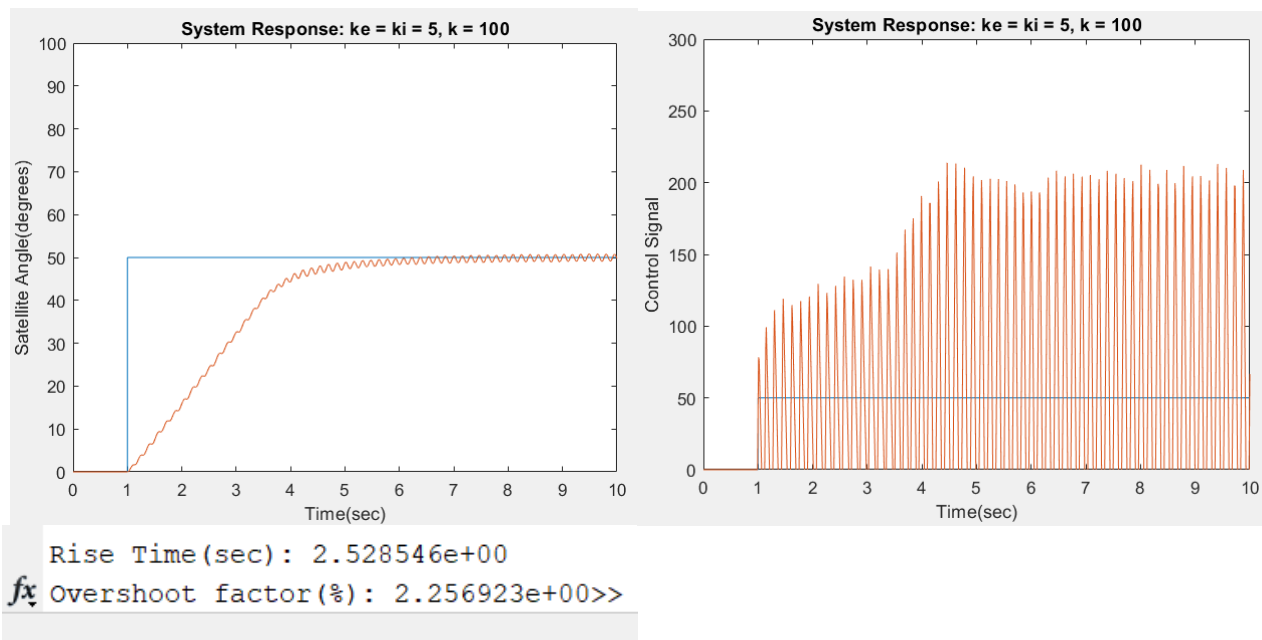
Εικόνα 19: Επίδραση του  $k_i$  στην βηματική απόκριση

Το κέρδος στην παράγωγο του σήματος ελέγχου,  $k$ , επηρεάζει την όπως και το κέρδος του αναλογικού μέρους, δηλαδή με αύξηση του βελτιώνεται ο χρόνος ανόδου.



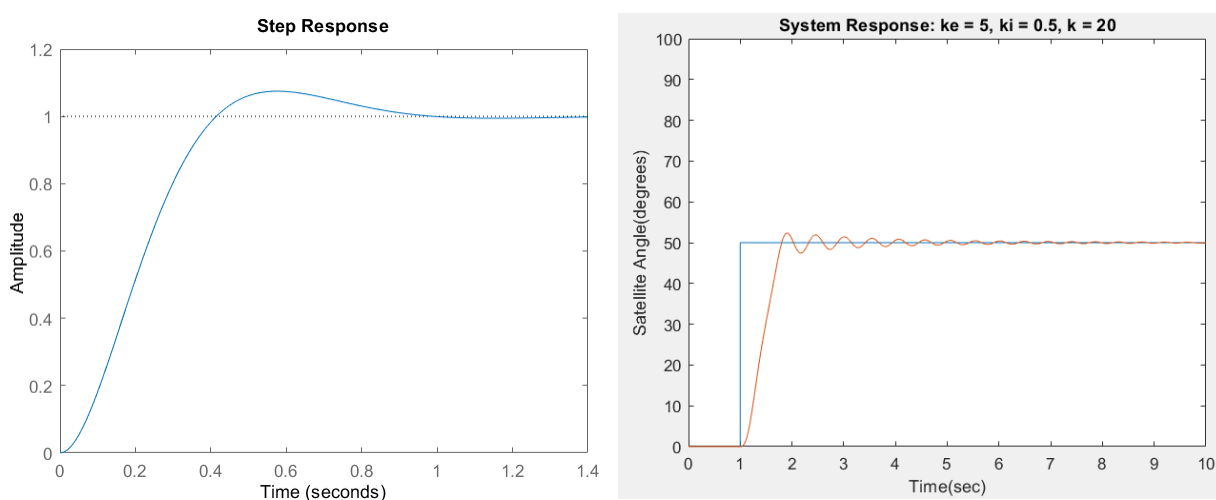
Εικόνα 20: Επίδραση του  $k$  στην βηματική απόκριση

Η αύξηση του κέρδους  $k$  σε αρκετά μεγάλες τιμές, σημαίνει ότι αυξάνεται το σήμα ελέγχου σε πολύ μεγάλες τιμές και παρατηρείται έντονη μεταβολή του σήματος ελέγχου που προκαλεί πολλές ταλαντώσεις στην έξοδο. Οπότε χρειάζεται προσοχή και σε αυτή την ρύθμιση.



Εικόνα 21: Απόκριση συστήματος και σήμα ελέγχου για μεγάλες τιμές του κέρδους  $k$

Στην σύγκριση των δύο ελεγκτών, παρατηρείται ότι ο ασαφής ελεγκτής προκαλεί μικρότερη υπερύψωση ακόμα και για παρόμοιο χρόνο αποκατάστασης, και λίγες περισσότερες ταλαντώσεις μικρού όμως μεγέθους. Για ίδιο βαθμό υπερύψωσης παρατηρείται καλύτερος χρόνος ανόδου με τον ασαφή ελεγκτή.



Εικόνα 22: Σύγκριση των δύο ελεγκτών

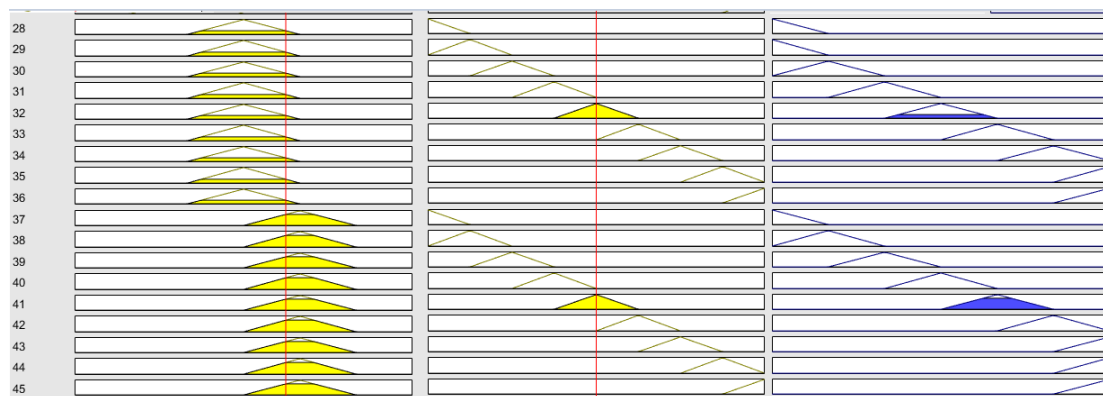


Γενικότερα, ένας ασαφής ελεγκτής που προκύπτει από ένα εμπειρικό μοντέλο μπορεί να παρουσιάσει καλύτερα αποτελέσματα, όταν δεν υπάρχει ακρίβεια στο μαθηματικό μοντέλο ώστε να προτιμηθεί ο κλασικός αυτόματος έλεγχος. Οπότε ανάλογα την περίπτωση, το διαθέσιμο μοντέλο και τα δεδομένα θα προτιμηθεί και ο αντίστοιχος τρόπος ελέγχου ενός συστήματος.

## B.

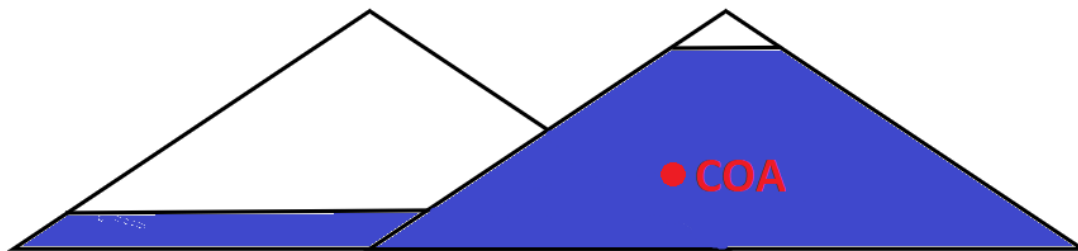
Ένα Positive Small (PS) error κινείται στο διάστημα 0 έως 33 μοίρες ή στο κανονικοποιημένο διάστημα [0 0.66]. Στα άκρα του διαστήματος όμως το σφάλμα τείνει είτε προς το μηδέν είτε προς το διάστημα Positive Medium. Στο διάστημα [0.166 0.5] το σφάλμα είναι κυρίως Positive Small. Οπότε επιλέγεται για μελέτη ένα σφάλμα στο 0.25 (ή 12.5 μοίρες γωνία δορυφόρου).

Η γραφική αναπαράσταση των διαστημάτων γίνεται με την βοήθεια της εντολής ruleview(fis) στο script του fis που είχε δημιουργηθεί. Στα διαγράμματα αριστερά ταυτόχρονα διεγείρονται οι κανόνες 28-45 όπου το σφάλμα είναι PS. Στις μεσαίες γραφικές παραστάσεις διεγείρονται ταυτόχρονα μόνο δύο κανόνες μεταξύ των 28-45 γιατί μόνο σε δύο περιπτώσεις το σφάλμα του DE είναι μηδέν. Έτσι σαν αποτέλεσμα του max-min κανόνα προκύπτουν δύο ασαφή διαστήματα από την βάση κανόνων. Το τελικό αποτέλεσμα θα ληφθεί μετά και τον ασαφοποιητή COA.



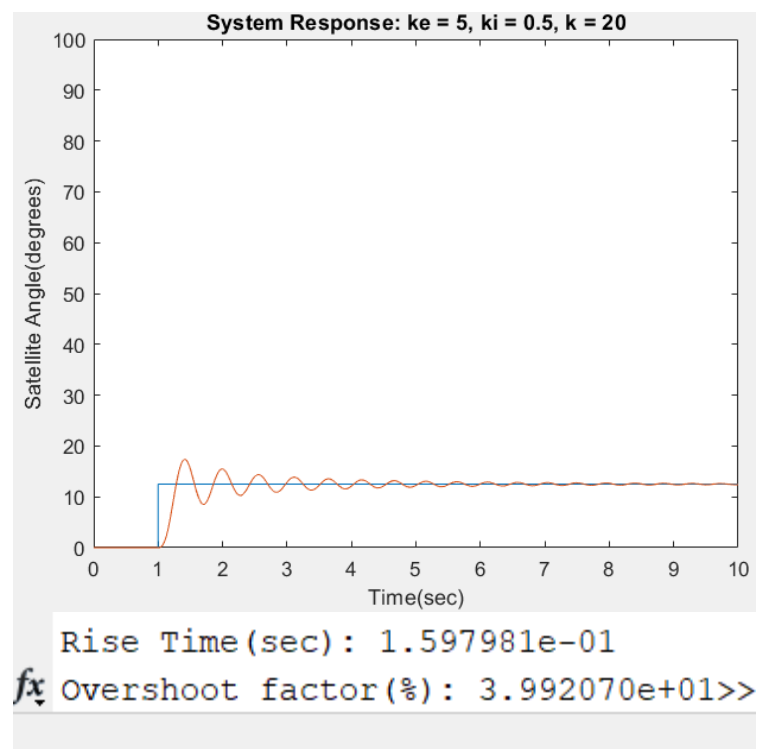
Εικόνα 23: Γραφικές Παραστάσεις των κανόνων που διεγείρονται για Positive Small Error

Ο από-ασαφοποιητής θα συνθέσει τα δύο αυτά σύνολα που είναι η έξοδος της βάσης κανόνων και θα υπολογίζει το κέντρο της συνολικής επιφάνειας που θα είναι και η τελική έξοδος του FIS. Η σύνθεση που γίνεται φαίνεται στην εικόνα 24.



Εικόνα 24: Σύνθεση απο-ασαφοποιητή και υπολογισμός του COA

Τέλος, εισάγοντας ως reference angle 12.5μοίρες στο μοντέλο που δημιουργήθηκε στο Simulink, θα μελετηθεί η βηματική απόκριση του συστήματος για μικρό αρχικό σφάλμα.

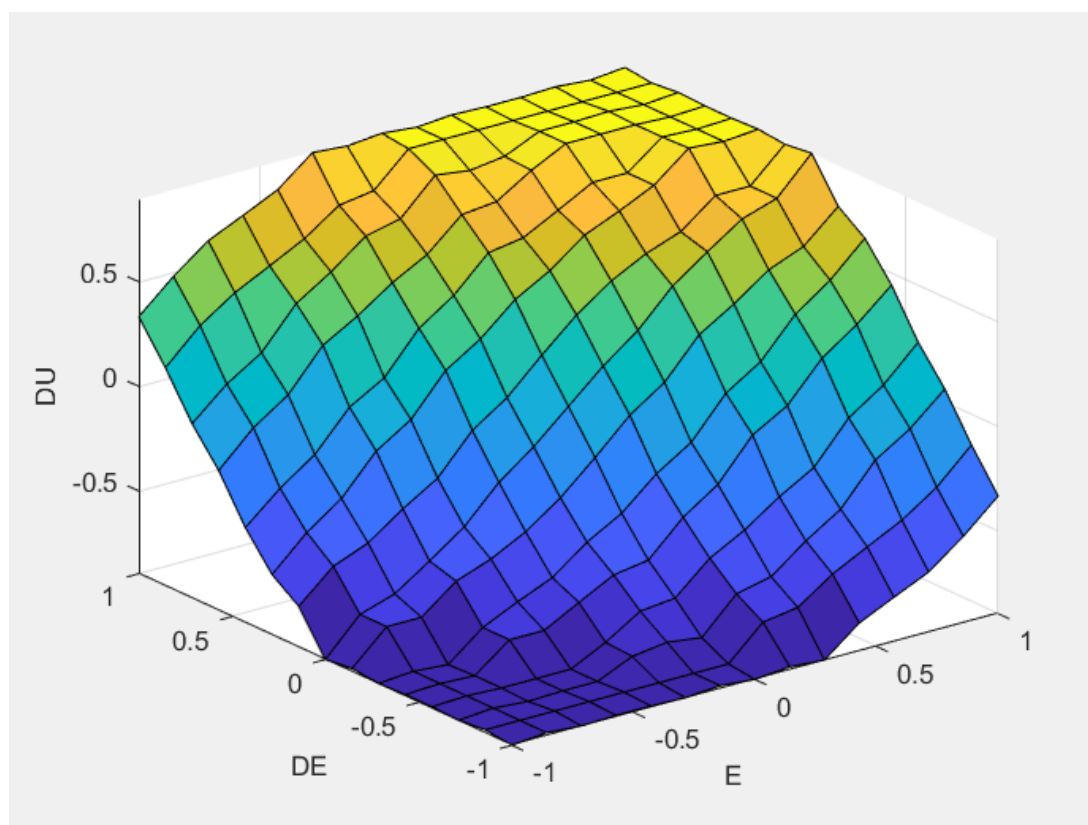


Εικόνα 25: Απόκριση συστήματος με μικρό σφάλμα

Παρατηρείται ότι το σύστημα αποκρίνεται αρκετά γρήγορα, όμως έχει αυξηθεί ποσοστιαία η υπερύψωση. Λόγω μικρής γωνίας, σε απόλυτη τιμή το overshoot είναι περίπου 4 μοίρες, δηλαδή όχι και τόσο μεγάλο. Σε περίπτωση που δεν είναι επιθυμητή η συμπεριφορά της υπερύψωσης, θα χρειαστεί να αυξηθεί το κέρδος  $k_i$  με το μειονέκτημα του πιο αργού χρόνου ανόδου.

### Γ.

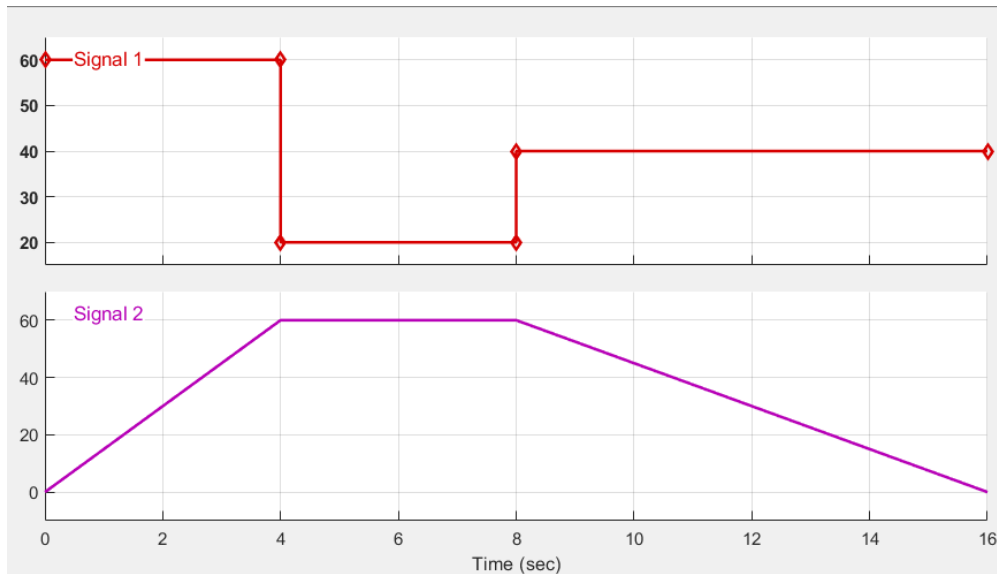
Με την χρήση της εντολής **gensurf(fis)** δημιουργείται η τρισδιάστατη απεικόνιση της εξόδου  $Du(k)$  συναρτήσει των εισόδων  $E(k)$  και  $DE(k)$ . Όταν το σφάλμα και η μεταβολή του σφάλματος είναι αρνητικές, τότε και η έξοδος θα είναι αρνητική για να διορθώσει το σφάλμα, ενώ αν αυξάνονται το σφάλμα και η μεταβολή του σφάλματος, έξοδος θα γίνει θετική για να επιδράσει και να το μειώσει. Αν το σφάλμα και η μεταβολή τείνουν στο μηδέν, τότε και έξοδος του ελεγκτή θα τείνει στο μηδέν μιας και το σύστημα έχει φτάσει στην επιθυμητή έξοδο στην μόνιμη κατάσταση.



Εικόνα 26: Επιφάνεια εξόδου του  $fis$  συναρτήσει των εισόδων

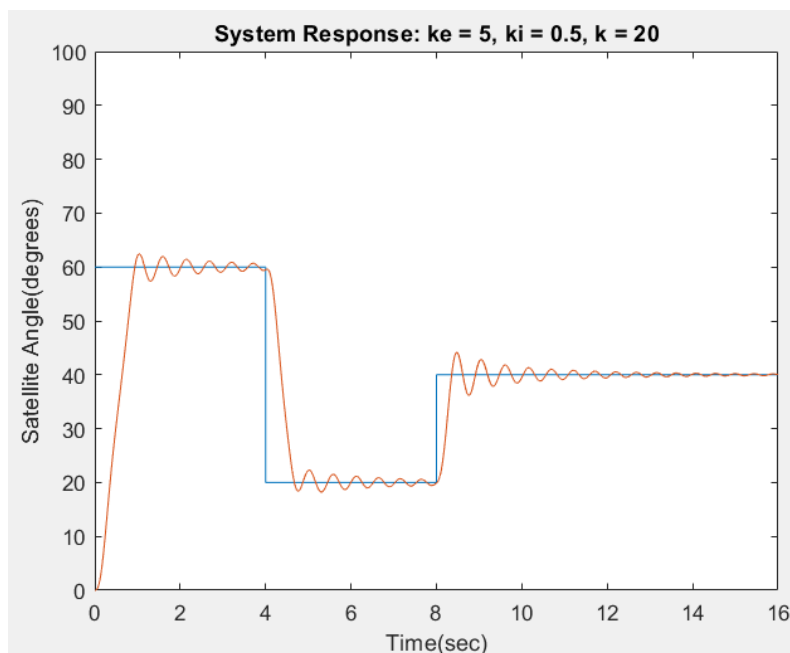
## 6. Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο μελετάται η απόκριση του συστήματος με τον ίδιο ασαφή ελεγκτή σε δύο προφίλ εισόδου. Τα δύο σήματα δημιουργούνται με την βοήθεια του signal block builder στο Simulink.



Εικόνα 27: Δημιουργία των δύο προφίλ εισόδων

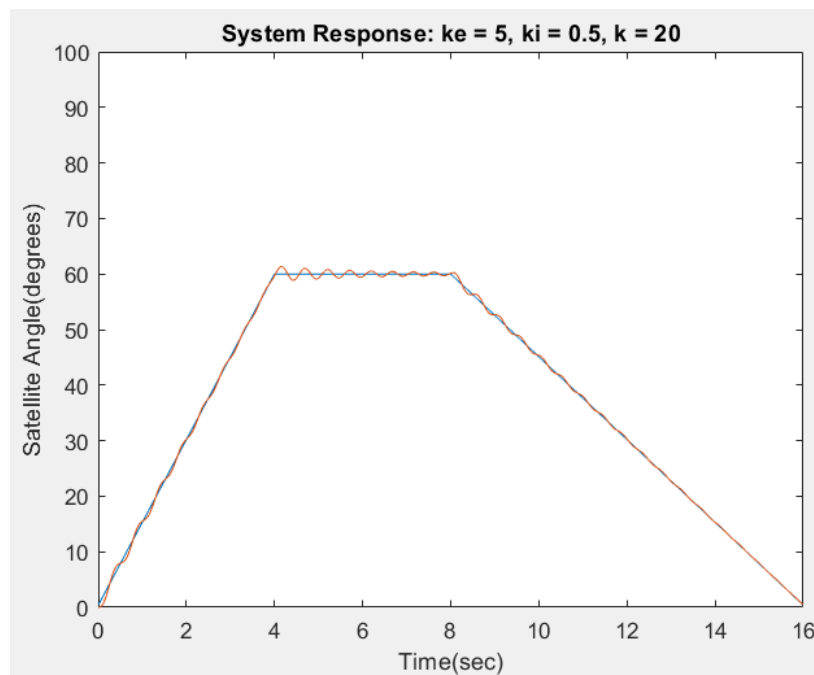
Στο πρώτο προφίλ εξετάζεται είσοδος με αλληπάλληλες κατακόρυφες αλλαγές στην γωνία (βηματικές αποκρίσεις).



Εικόνα 28: Απόκριση ελεγκτή στο 1ο προφίλ σήματος αναφοράς

Το σύστημα αποκρίνεται ικανοποιητικά και αρκετά γρήγορα σε κάθε μεταβολή της θέσης του, αλλά πριν φτάσει στην μόνιμη κατάσταση εμφανίζει ορισμένες ταλαντώσεις, χωρίς μεγάλη υπερύψωση. Αν είναι επιθυμητή η μείωση των ταλαντώσεων απαιτείται αύξηση του κέρδους του ολοκληρωτικού μέρους η οποία θα προκαλέσει αύξηση του χρόνου ανόδου.

Με το 2<sup>ο</sup> προφίλ αναφοράς εισόδου που περιλαμβάνει ράμπες, το σύστημα ακολουθεί την πορεία αναφοράς αρκετά ικανοποιητικά και πολύ καλύτερα σε σχέση με τις βηματικές αποκρίσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος ανόδου του ελεγκτή είναι μικρότερος σε σχέση με την κλίση της ράμπας.



Εικόνα 29: Απόκριση ελεγκτή στο 2ο προφίλ σήματος αναφοράς

## Βιβλιογραφία

- Υπολογιστική Νοημοσύνη, eLearning AUTH,  
<https://elearning.auth.gr/course/view.php?id=12762>
- Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Τόμος Α, Πετρίδης Βασίλειος
- Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, 13η Έκδοση, Dorf Richard C., Bishop Robert H.
- Fuzzy Logic Toolbox documentation , MATLAB,  
<https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>
- Fuzzy Logic, MATLAB Tech Talks, Brian Douglas,  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLn8PRpmsu08pSpYcLLkfXcYlcs5judkOd>