

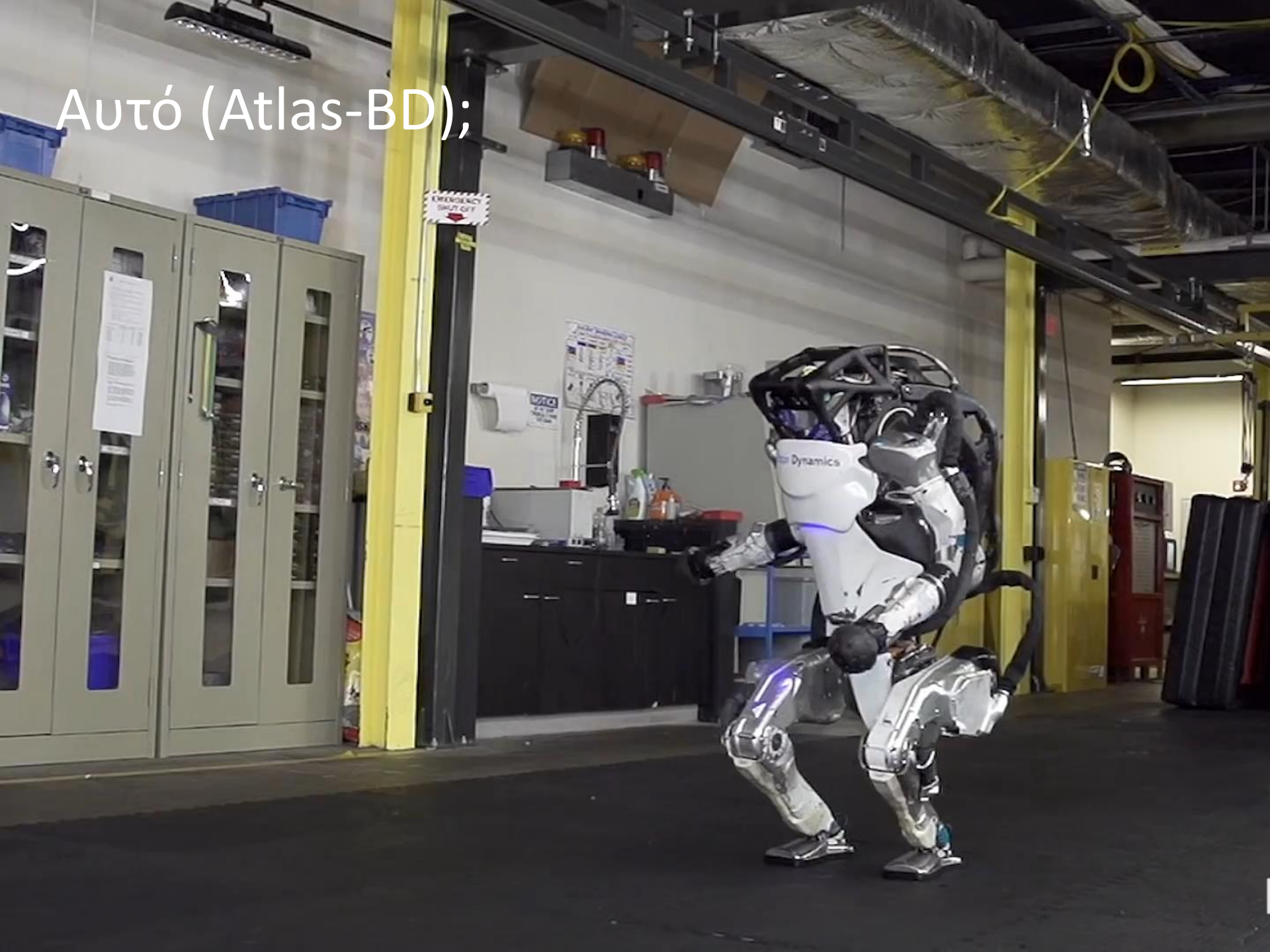
2.3.2007.6:
Μοντελοποίηση &
Αυτόματος Έλεγχος
Συστημάτων

Καθ. Ε. Παπαδόπουλος
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
ΕΜΠ

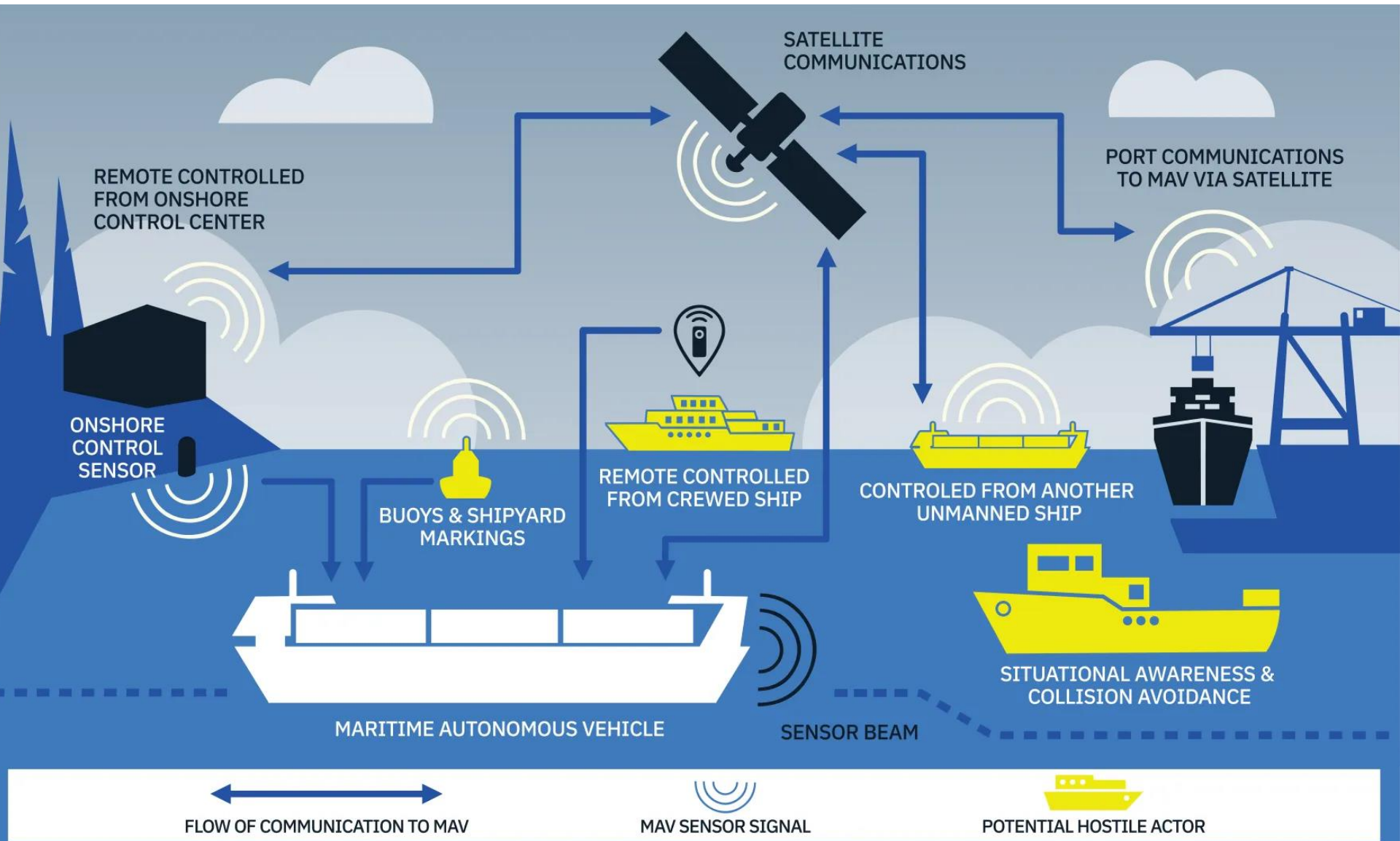
Πως θα ελέγχατε αυτό το σύστημα;



Αυτό (Atlas-BD);



Ἡ αὐτό (maritime autonomous systems);



Περιεχόμενα Μαθήματος

Εισαγωγή, μέθοδοι περιγραφής συστημάτων

Μαθηματικά μοντέλα φυσικών συστημάτων, Γραμμικοί Γράφοι

Δομικά διαγράμματα και απόκριση συστημάτων

Συναρτήσεις μεταφοράς, πόλοι & μηδενιστές

Ευστάθεια, ιδιότητες συστημάτων ελέγχου με ανάδραση

Ανάλυση μεταβατικής απόκρισης & σφάλματα

Μορφή και δράση βασικών νόμων ελέγχου

Απόκριση συχνότητας, αντιστάθμιση

Μέθοδοι σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου στο ΠΧ, ΠΣ

Τεχνολογία αυτομάτου ελέγχου & εφαρμογές.

Αναλυτικό Πρόγραμμα

# Μαθήματος	Περιεχόμενο
1-2	Εισαγωγή
3-5	Μοντελοποίηση
6-9	Απόκριση στο πεδίο του χρόνου
10-11	Νόμοι Ελέγχου & Ανάλυση
12-13	Σχεδιασμός νόμων ελέγχου στο ΠΧ
14-16	Απόκριση στο πεδίο της συχνότητας
17-18	Σχεδιασμός νόμων ελέγχου στο ΠΣ
6+1	Ασκήσεις

Αναμενόμενες Δεξιότητες

Περιγραφή *συμπεριφοράς* συστημάτων με γραμμικά μαθηματικά μοντέλα.

Ανάλυση *απόκρισης* συστημάτων με χρήση συναρτήσεων μεταφοράς, δομικών διαγραμμάτων, τόπου ριζών, και διαγραμμάτων Bode & Nyquist.

Ανάλυση & σχεδιασμός και βασικών κατευθυντών και αξιολόγηση της απόκρισης κλειστού βρόχου.

Επιλογή και εφαρμογή κατευθυντών/αντισταθμιστών στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

Βαθμολόγηση

▪ Τελική εξέταση	:	100%
▪ Ασκήσεις (προαιρ.)	:	θετικά
▪ Εργαστήριο (προαιρ.)	:	θετικά
		<hr/>
Σύνολο	:	100 + ? %

Βιβλιογραφία

Κύρια Βιβλία

- Ogata, K., *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*, 5η έκδ. (2009), Εκδ. Φούντα, 2013. (Εύδοξος : 12346979)
- Nise, Norman S., *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*, Εκδ. Φούντα, 2016. (Εύδοξος: 59380555)

Βοηθητικά Βιβλία

- Κρικέλη, Ν.Ι., *Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο*, Εκδ. Συμμετρία, 2002. (Εύδοξος: 45290)
- Dorf R.C., Bishop R.H., *Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*, Εκδ. Τζιόλα, 2003, (Εύδοξος: 9546)

Διδάσκων και Προσωπικό

Διδάσκων

Καθ. Ε. Παπαδόπουλος

- Διπλ. Μηχανολόγος
EMΠ, MS, PhD
Massachusetts Institute
of Technology (MIT)

Ασκήσεις

Μιχάλης Δροσάκης

- BSc Purdue University,
MPhil Leeds

Εργαστήριο

Δρ. Γιάννης Νταβλιάκος

- Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός ΑΠΘ,
Διδάκτωρ Μηχανικός
EMΠ

Δρ. Κωνσταντίνος Νάνος

- Διπλ. Χημικός
Μηχανικός EMΠ,
Διδάκτωρ Μηχανικός
EMΠ



Μοντελοποίηση & Αυτόματος Έλεγχος Συστημάτων:

Μάθημα 1: Εισαγωγή

Περιεχόμενα

Βασικές Έννοιες

Ιστορική αναδρομή

Παραδείγματα Συστημάτων Ελέγχου

Σχεδιασμός Συστημάτων Ελέγχου

Βασικές Έννοιες

Βασικές Έννοιες

- Σύστημα

- Συλλογή στοιχείων που περιλαμβάνονται σε πραγματικό ή ιδεατό σύνορο, με σκοπό την εκτέλεση κάποιας λειτουργίας.

- Περιβάλλον (συστήματος)

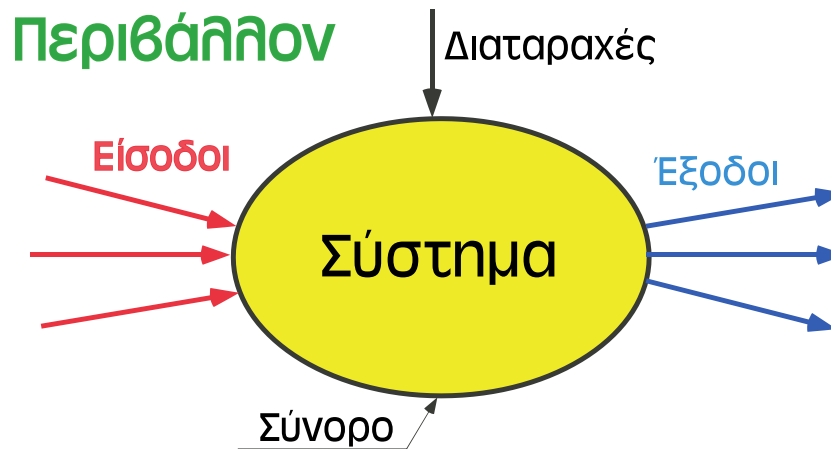
- Ότι δεν περιέχεται στο σύστημα.

- Δυναμικό Σύστημα

- Η συμπεριφορά του εξαρτάται από το χρόνο, διαθέτει «μνήμη».
- Περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις (ή εξισώσεις διαφορών).

Σύστημα

- Το σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του μέσω του συνόρου.
- Η συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται από **μεταβλητές**.
 1. Είσοδοι (ελέγχου)
 2. Έξοδοι
 3. Διαταραχές (μη ελεγχόμενες εισοδοι)



Σύστημα Ελέγχου

- ◆ **Ελεγχόμενο Σύστημα ή Εγκατάσταση (Plant) ή Διεργασία (Process)** είναι ένα σύστημα του οποίου επιθυμούμε να ορίσουμε την απόκριση.
- ◆ **Έλεγχος** είναι η διαδικασία κατά την οποία η Εγκατάσταση αναγκάζεται να λειτουργεί με κάποιο επιθυμητό τρόπο.
- ◆ **Σύστημα ελέγχου** είναι μία διασύνδεση στοιχείων τα οποία επιβάλλουν επιθυμητή απόκριση σε μία Εγκατάσταση.

Δομικό Διάγραμμα

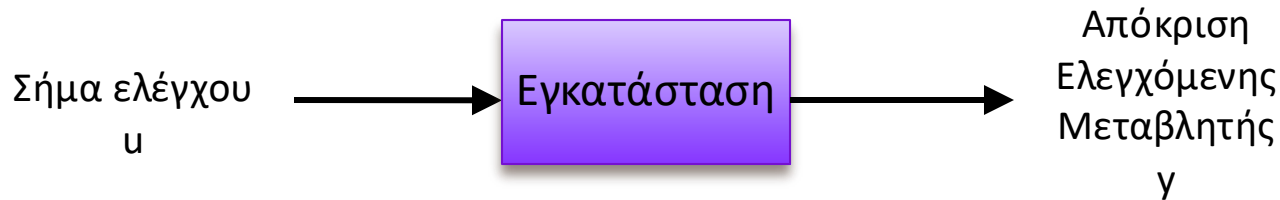
- ◆ Εγκαταστάσεις προς έλεγχο ή υποσυστήματα ελέγχου μπορούν να απεικονισθούν με ένα **δομικό διάγραμμα**.
- ◆ Η σχέση εισόδου-εξόδου αντιστοιχεί στο **αίτιο και αιτιατό** για την εγκατάσταση.



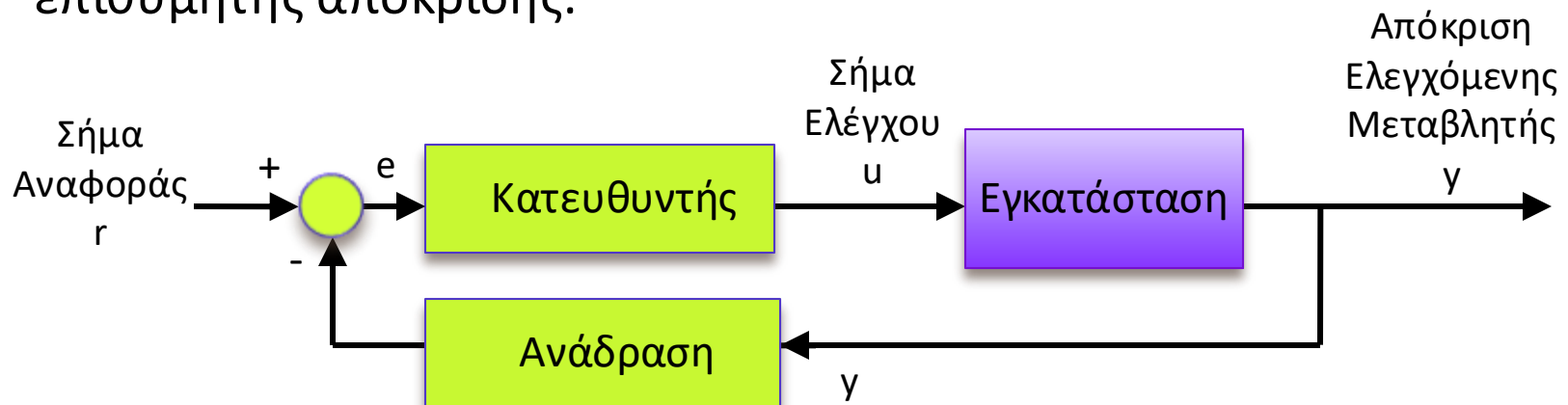
- ◆ Τα συστήματα ελέγχου ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:
 1. Συστήματα ελέγχου **ανοικτού** βρόχου
 2. Συστήματα ελέγχου **κλειστού** βρόχου

Ταξινόμηση Συστημάτων Ελέγχου

- ◆ Ένα σύστημα **ανοικτού βρόχου** ρυθμίζει την απόκριση μιας εγκατάστασης χωρίς τη χρήση της ανάδρασης (αισθητήρων).

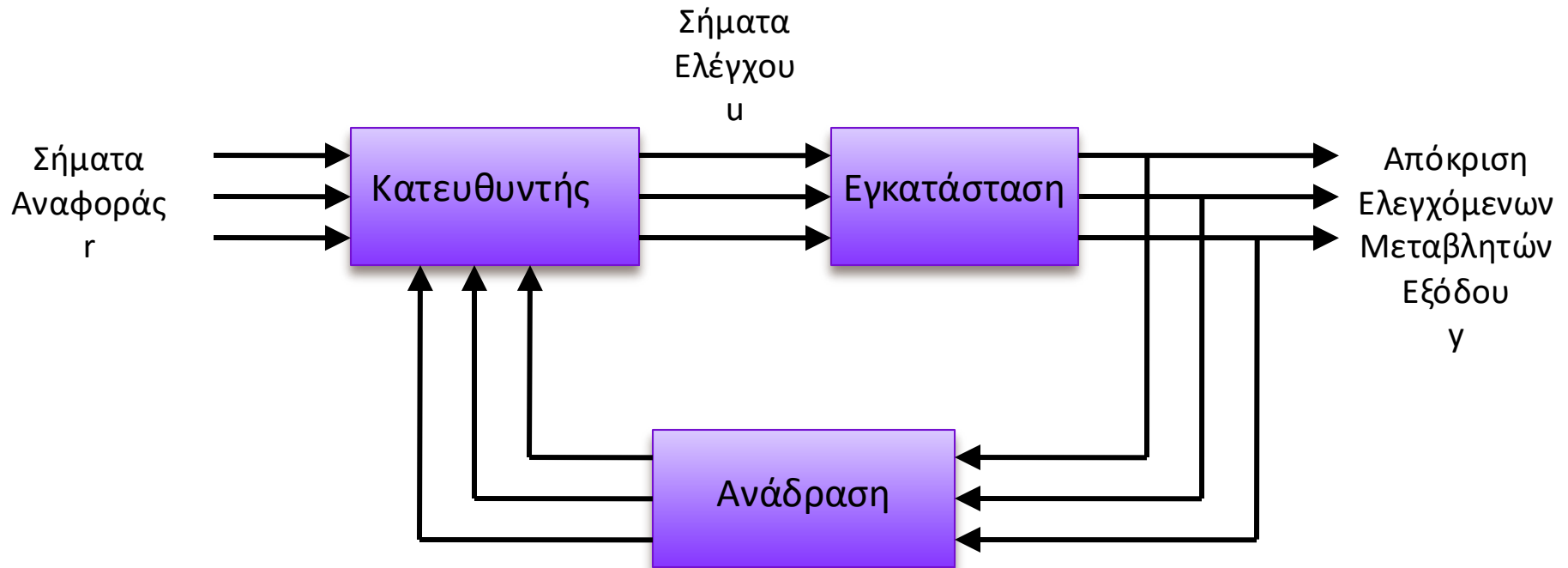


- ◆ Ένα σύστημα **κλειστού βρόχου** χρησιμοποιεί ανάδραση μεταβλητής και σύγκριση της με το σήμα αναφοράς, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης.



Σύστημα μιας εισόδου και μιας εξόδου (SISO)

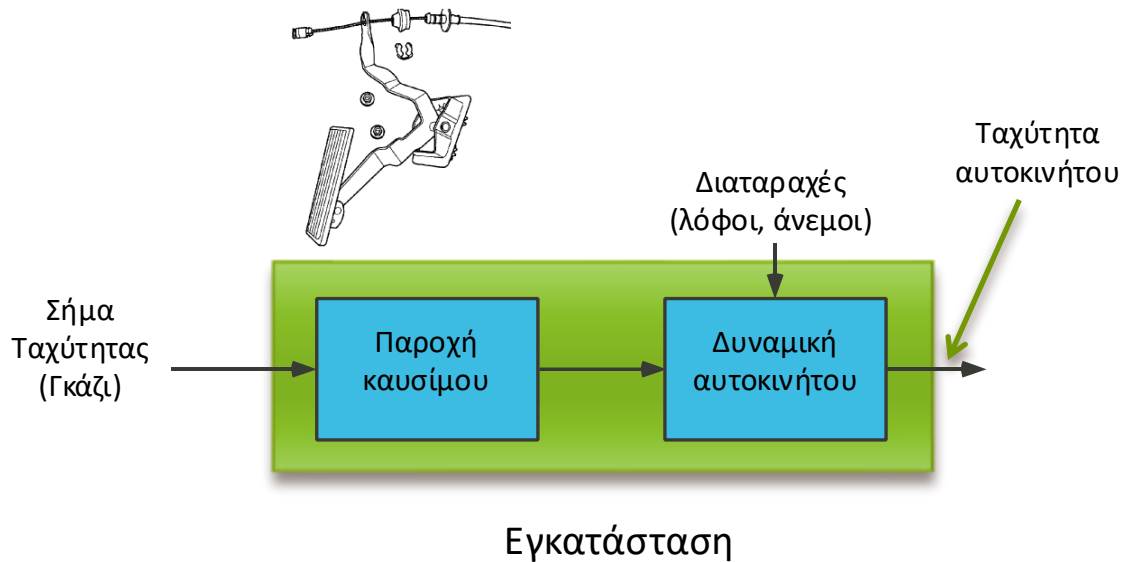
Ταξινόμηση Συστημάτων Ελέγχου



Σύστημα πολλών εισόδων και πολλών εξόδων (MIMO)

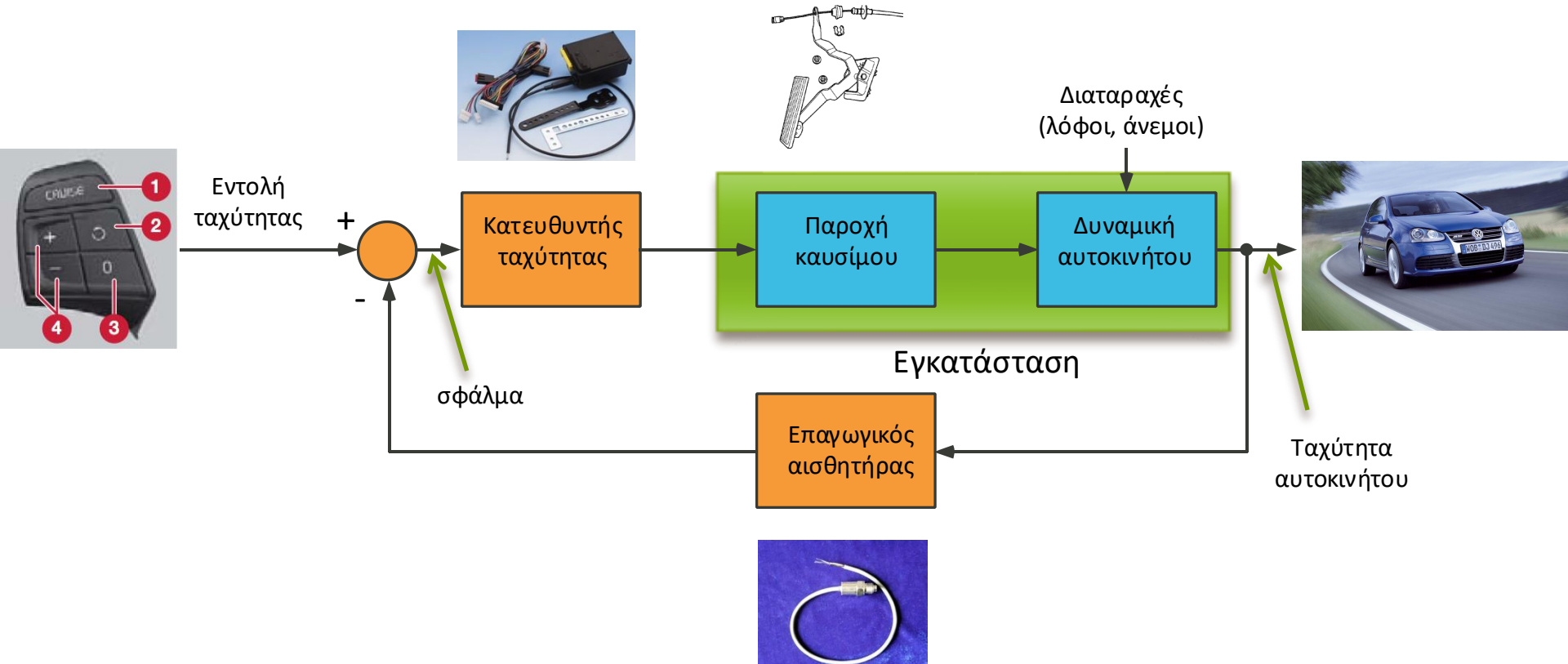
Σύστημα Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου

◆ Ρύθμιση ταχύτητας αυτοκινήτου



Σύστημα Ελέγχου Κλειστού Βρόχου

- ◆ Έλεγχος ταχύτητας αυτοκινήτου (cruise control)



Σύστημα Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου

◆ Ραδιοτηλεσκόπιο

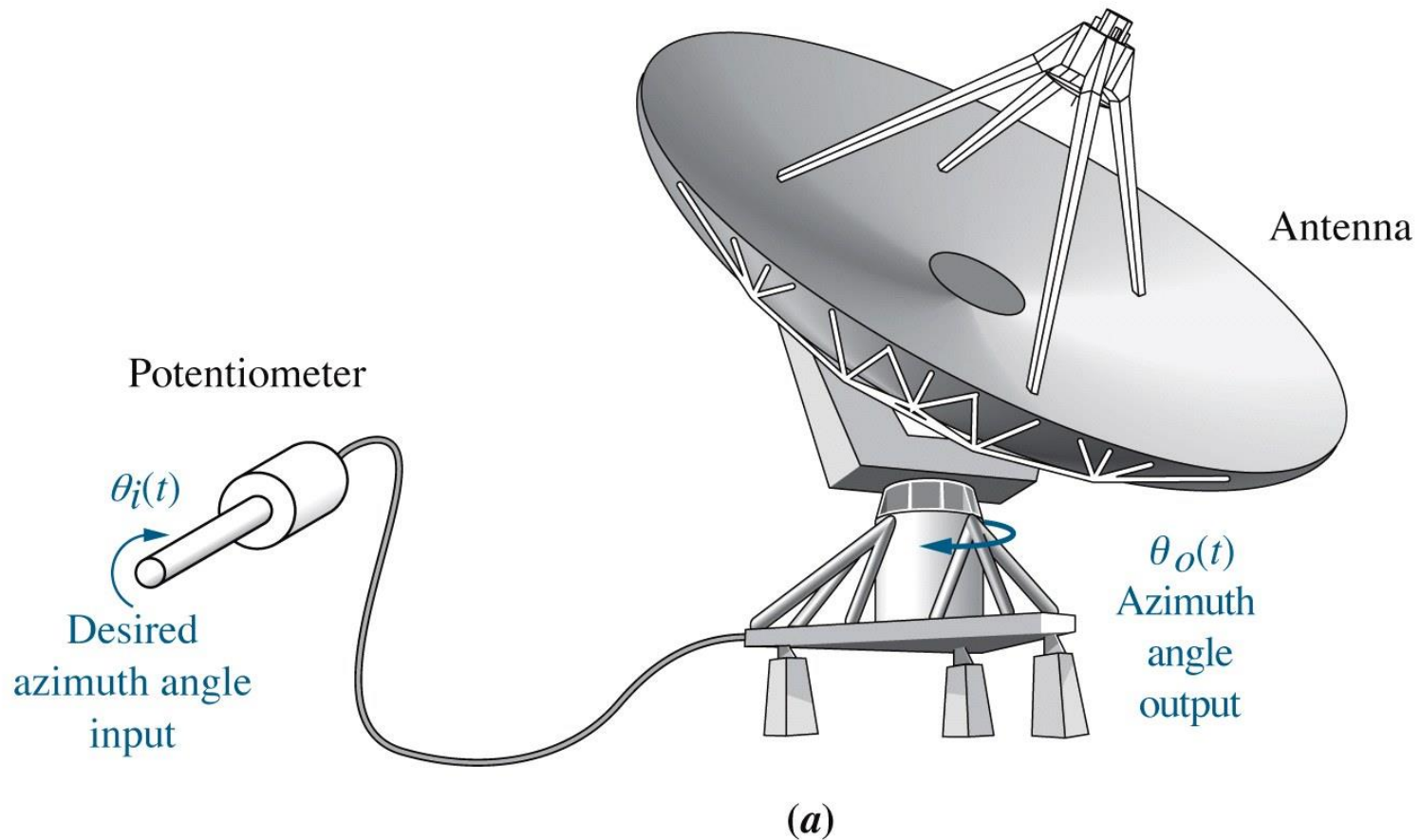


Figure 1.9a
© John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Σύστημα Ελέγχου Κλειστού Βρόχου

- ◆ Ραδιοτηλεσκόπιο με έλεγχο αζιμουθίου

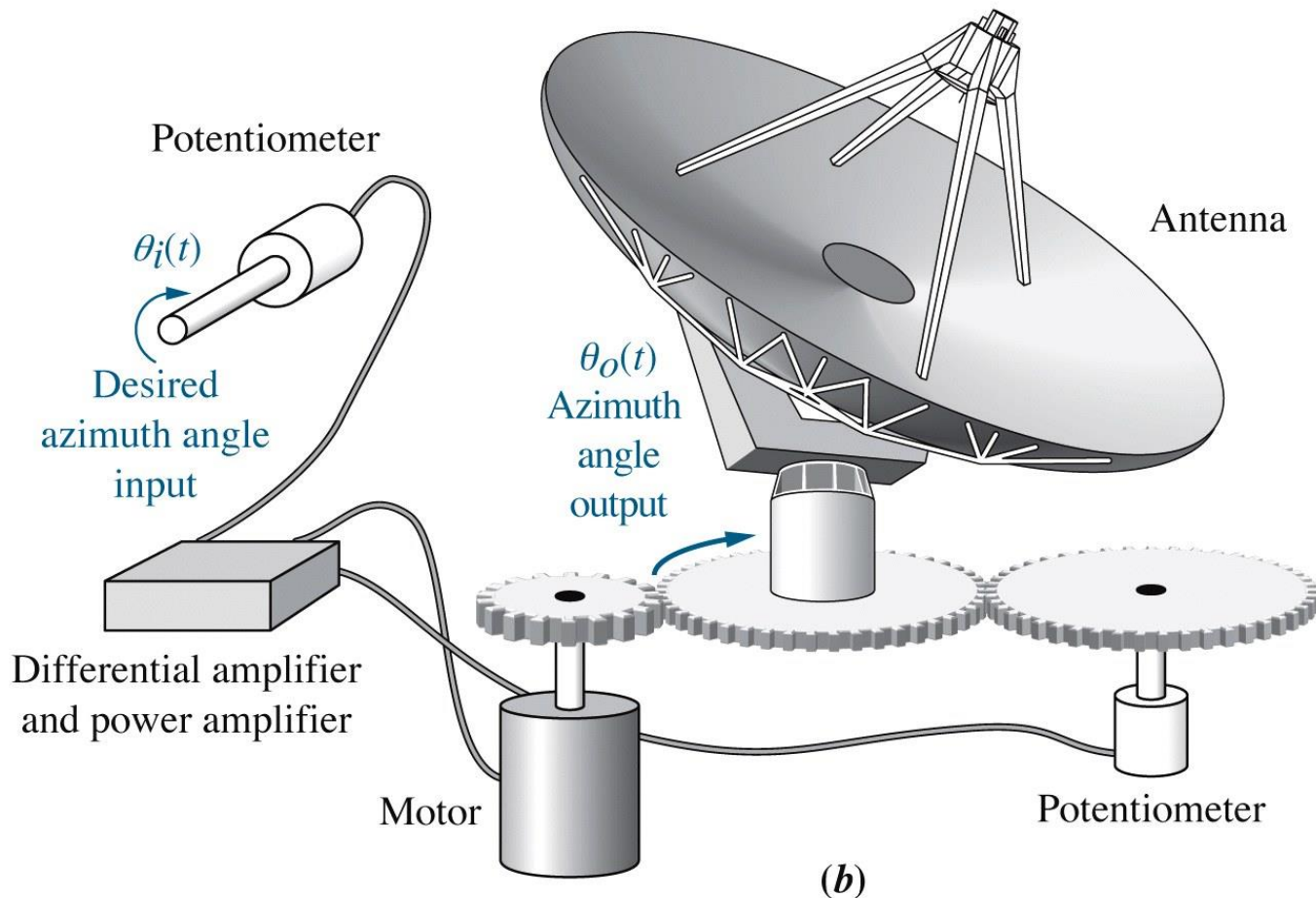


Figure 1.9b
© John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Χειροκίνητος & Αυτόματος Έλεγχος

- ◆ Ο έλεγχος ενός αεροπλάνου απαιτεί την ασφαλή πλοήγησή του έως τον προορισμό.
 - i. Εάν το αεροπλάνο το κυβερνά ο **πιλότος**, έχουμε **χειροκίνητο έλεγχο**.



- ii. Εάν το αεροπλάνο το κυβερνά ο **αυτόματος πιλότος**, τότε έχουμε σχεδιάσει και εγκαταστήσει ένα **σύστημα αυτομάτου ελέγχου**.



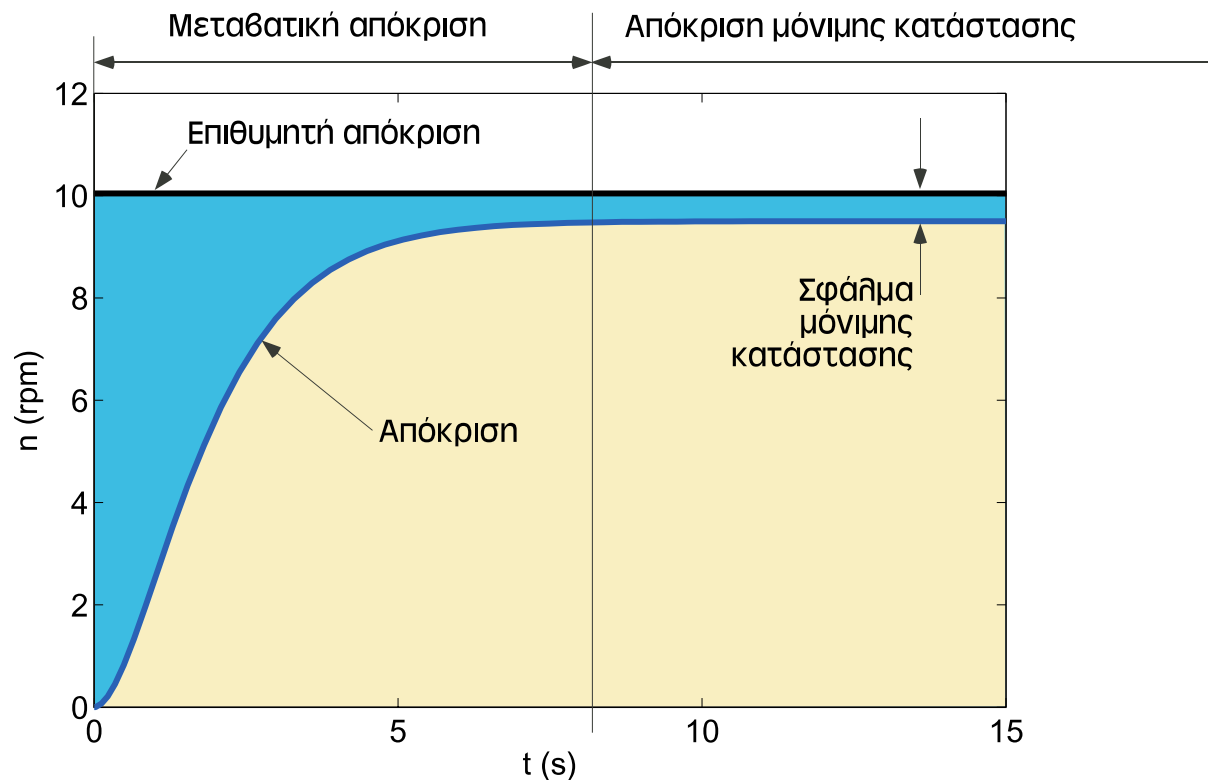
Navitron Autopilot Type NT921G

Autopilot in the movies - Airplane! (1980)



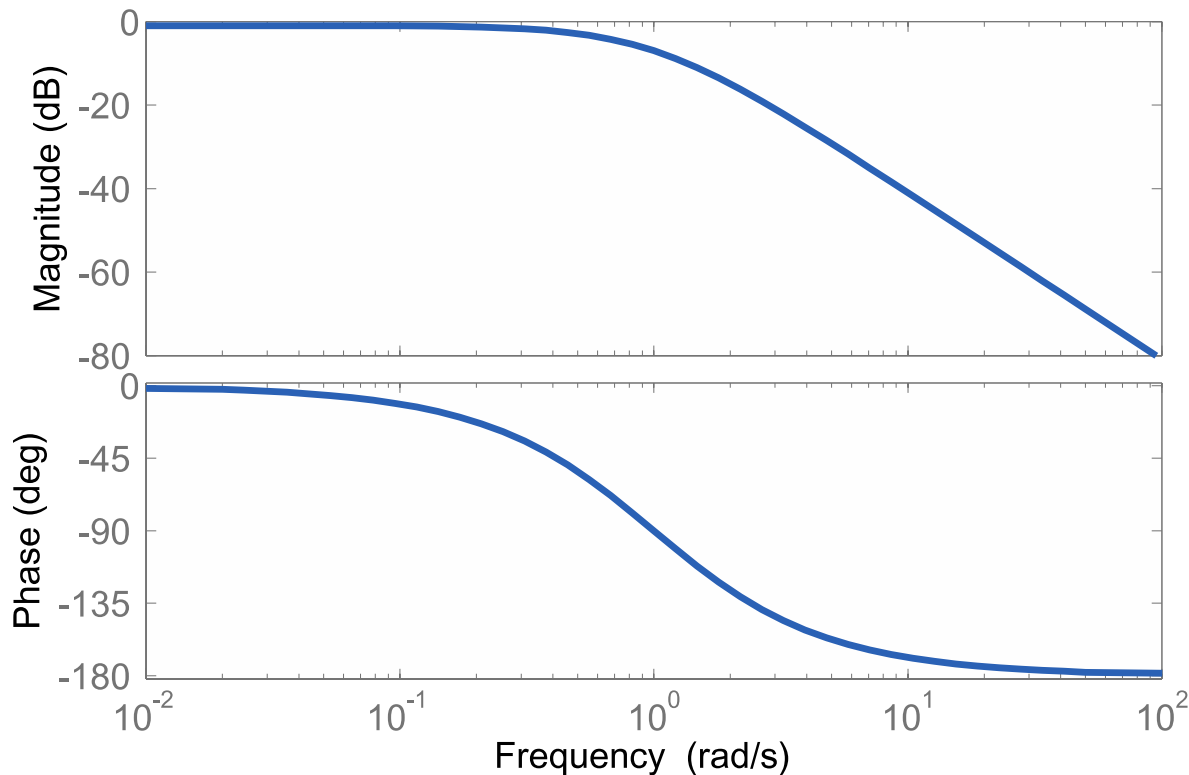
Χαρακτηριστικά Απόκρισης (Πεδίο Χρόνου)

- ◆ Μεταβατική απόκριση:
 - + Μεταβολή μεταβλητής από αρχική σε τελική κατάσταση (τιμή)
- ◆ Απόκριση μόνιμης κατάστασης:
 - + Προσέγγιση επιθυμητής κατάστασης



Χαρακτηριστικά Απόκρισης (Πεδίο Συχνότητας)

- ◆ Η μεταβατική απόκριση **δεν** μας ενδιαφέρει.
- ◆ Ενδιαφέρει η **απόκριση μόνιμης κατάστασης** του συστήματος ως **συνάρτηση της συχνότητας της εισόδου**.



Πλεονεκτήματα Συστημάτων Ελέγχου

1. Ενίσχυση ισχύος (κέρδος)
 - Περιστροφή ραδιοτηλεσκοπίου με περιστροφή ποτεντιομέτρου
2. Τηλεχειρισμός
 - Ρομποτικά συστήματα εξερεύνησης διαστήματος
3. Ρύθμιση της δυναμικής και της απόκρισης (απόδοση)
 - Ευστάθεια πειραματικού αεροσκάφους X-29 (ασταθές)
 - Γρήγορη κίνηση ρομπότ
4. Αντιστάθμιση διαταραχών
 - Έλεγχος ραδιοτηλεσκοπίου παρουσία δυνατών ανέμων
5. Μείωση ευαισθησίας σε αλλαγές παραμέτρων (ευρωστία)
 - Σταθερή απόκριση CNC ανεξάρτητα από τριβές, θερμοκρασία

Μειονεκτήματα Συστημάτων Ελέγχου

- ◆ Πιο ακριβά και πολύπλοκα
 - + Π.χ. αισθητήρες, επενεργητές, η/υ, κ.λπ.
- ◆ Αυξημένη πιθανότητα βλάβης
 - + Π.χ. Pitot σε A330 AF 447 (2009)



- ◆ Πιθανή απώλεια ευστάθειας ευσταθούς συστήματος
 - + Π.χ. μικροφωνισμός



Out of CONTROL

Why control systems go wrong and how to prevent failure

Όμως

Τα πλεονεκτήματα
υπερτερούν κατά πολύ
των μειονεκτημάτων!

Ιστορική Αναδρομή

Ιστορική Αναδρομή

Κτησίβιος (270 π.Χ.), Φίλων (250 π.Χ.)

- Σιφώνια για ρύθμιση ροής νερού, υδραυλικό ρολόι

Ήρων (10-85 μ.Χ.) Περί αυτοματοποιητικής

- Έλεγχος στάθμης με βαλβίδα, αυτόματες θύρες

Cornelis Drebbel (1572-1633)

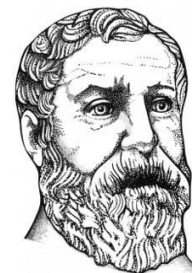
- Θερμοστάτης & έλεγχος θερμοκρασίας

James Watt (18th century)

- Ρυθμιστής στροφών μηχανών (flyball governor)

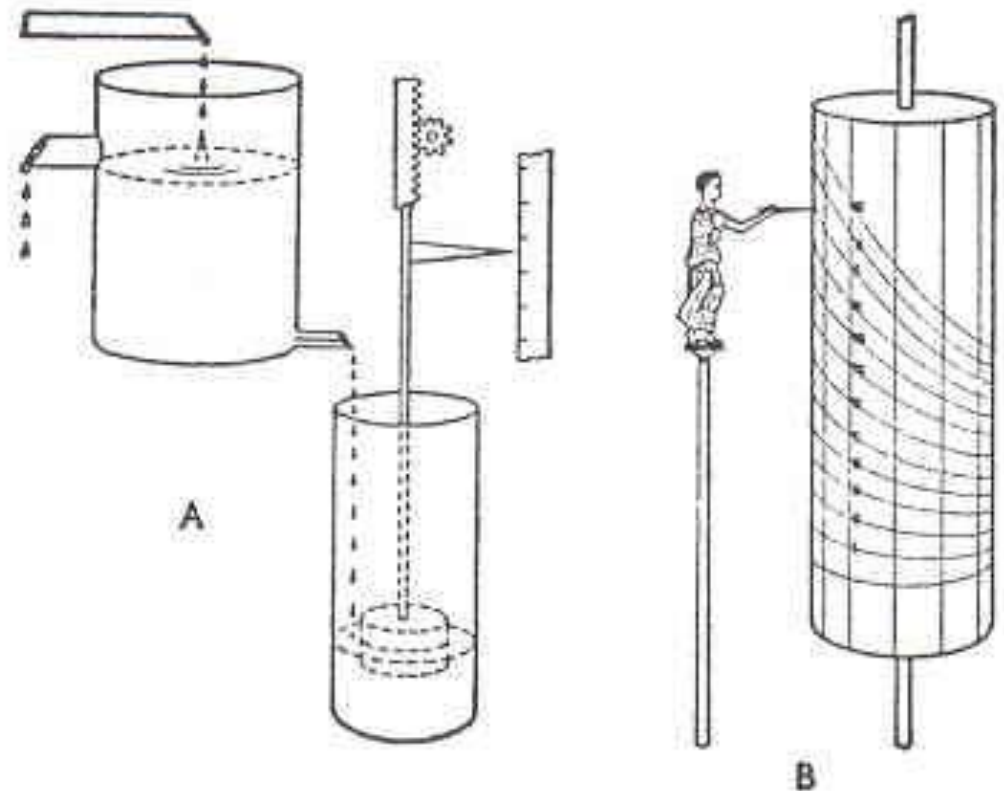
Τέλος 19^{ου} έως μέσα 20^{ου} αιώνα

- Σύγχρονη θεωρία ελέγχου



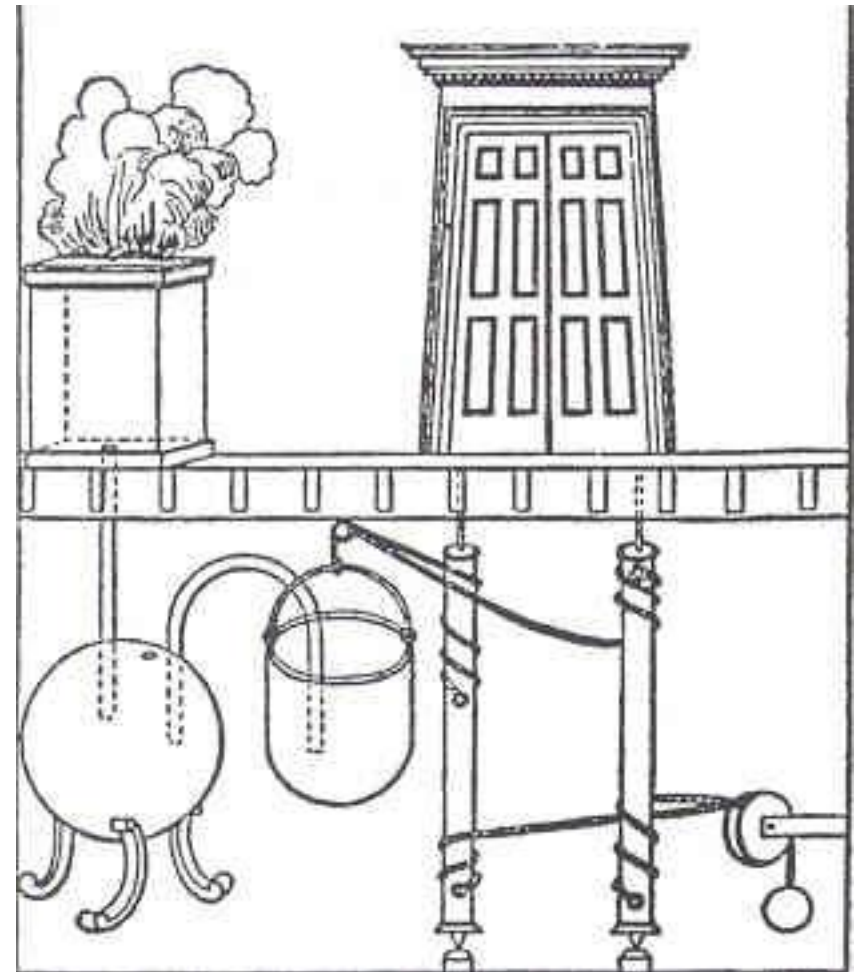
Υδραυλική Κλεψύδρα του Κτησίβιου

- Σταθερή στάθμη με σιφώνιο
- Διαφορετική διάρκεια ημέρας ανά εποχή
- Σύστημα κλειστού βρόχου

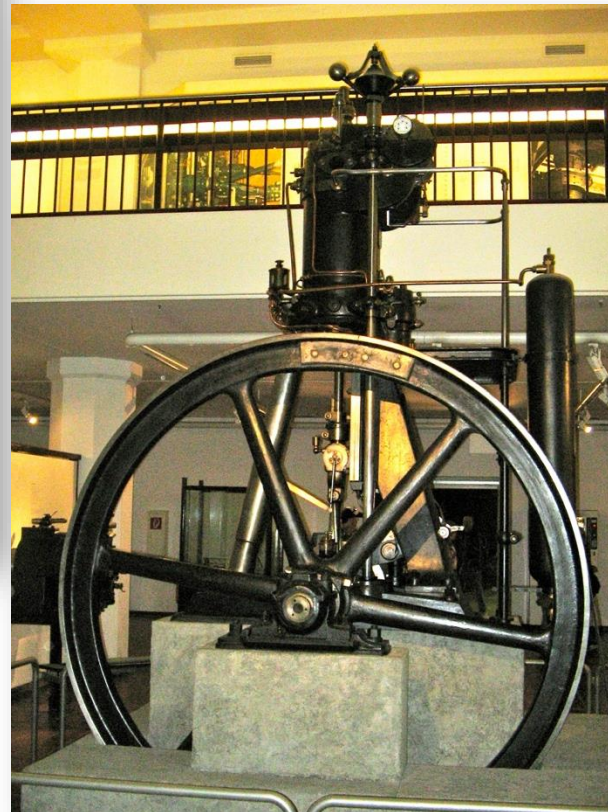
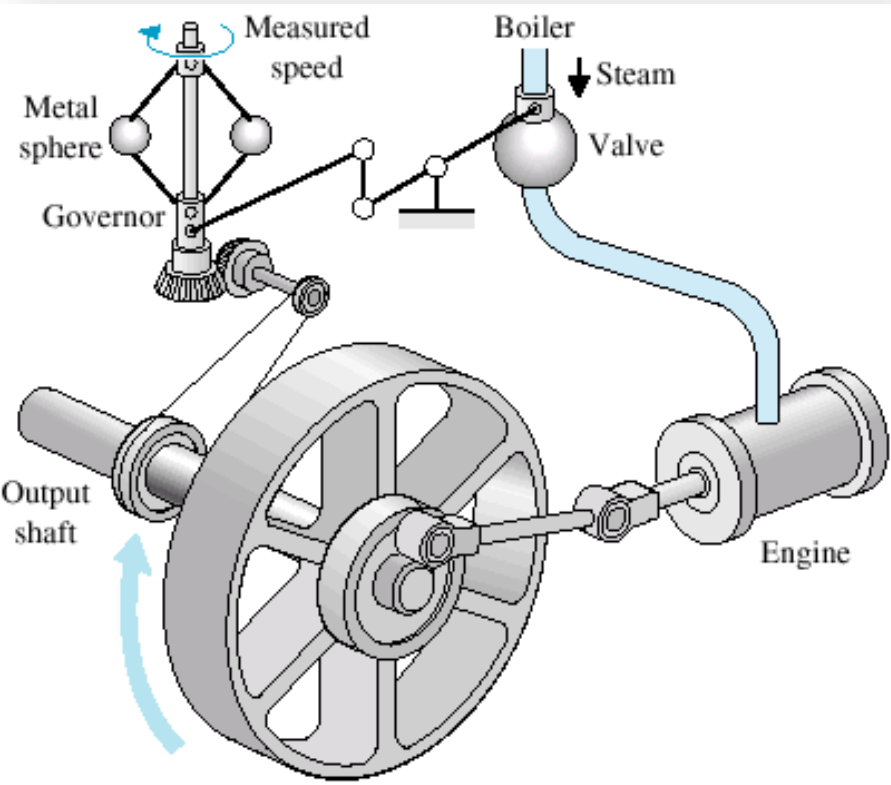


Αυτόματο Άνοιγμα Θυρών Ναού του Έρωνα

- ◆ Ο θερμός αέρας από το βωμό μεταφέρει νερό στον κινούμενο κάδο.
- ◆ Το αντίβαρο κλείνει τις θύρες όταν σβήσει η φωτιά.
- ◆ Σύστημα ανοικτού βρόχου



Ο Ρυθμιστής του Watt



Παραδείγματα

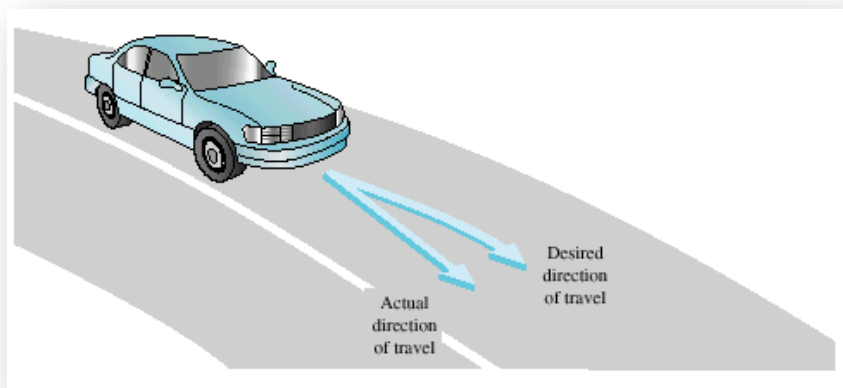
Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου

Πρέπει να ορίζονται

- ◆ Στόχος:
- ◆ Έξοδοι:
- ◆ Είσοδοι:
- ◆ Διαταραχές:

Μεταφορές

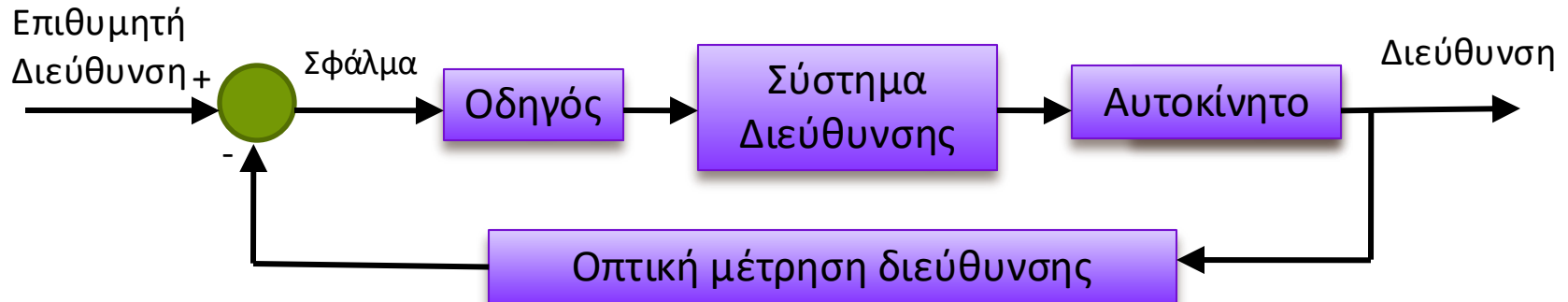
Αυτοκίνητο και Οδηγός



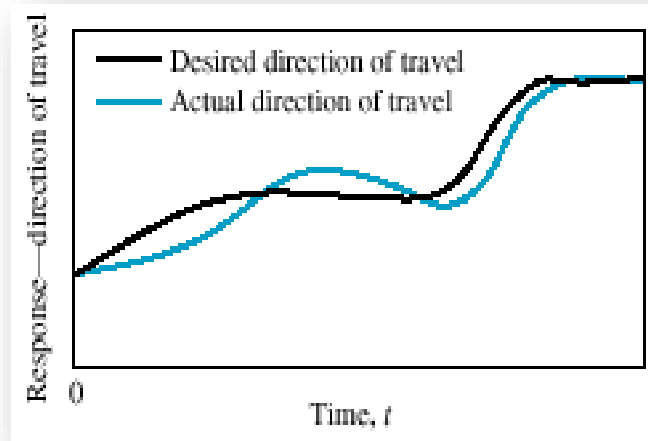
- ◆ Στόχος: Έλεγχος διεύθυνσης και ταχύτητας αυτοκινήτου
- ◆ Έξοδοι: Διεύθυνση και ταχύτητα αυτοκινήτου
- ◆ Είσοδοι: Γωνία τιμονιού και γκάζι/ φρένο
- ◆ Διαταραχές: Κλίση δρόμου, άνεμοι, βροχή, κ.λπ.

Μεταφορές

- ◆ Δομικό διάγραμμα:

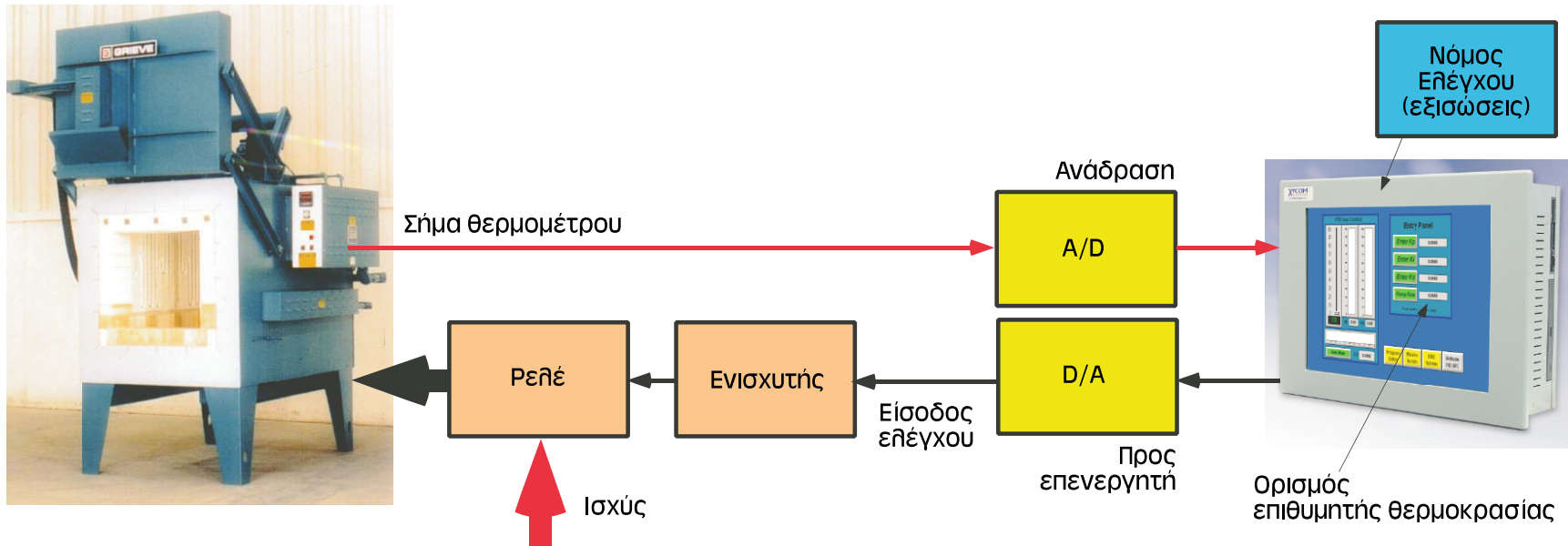


- ◆ Απόκριση:



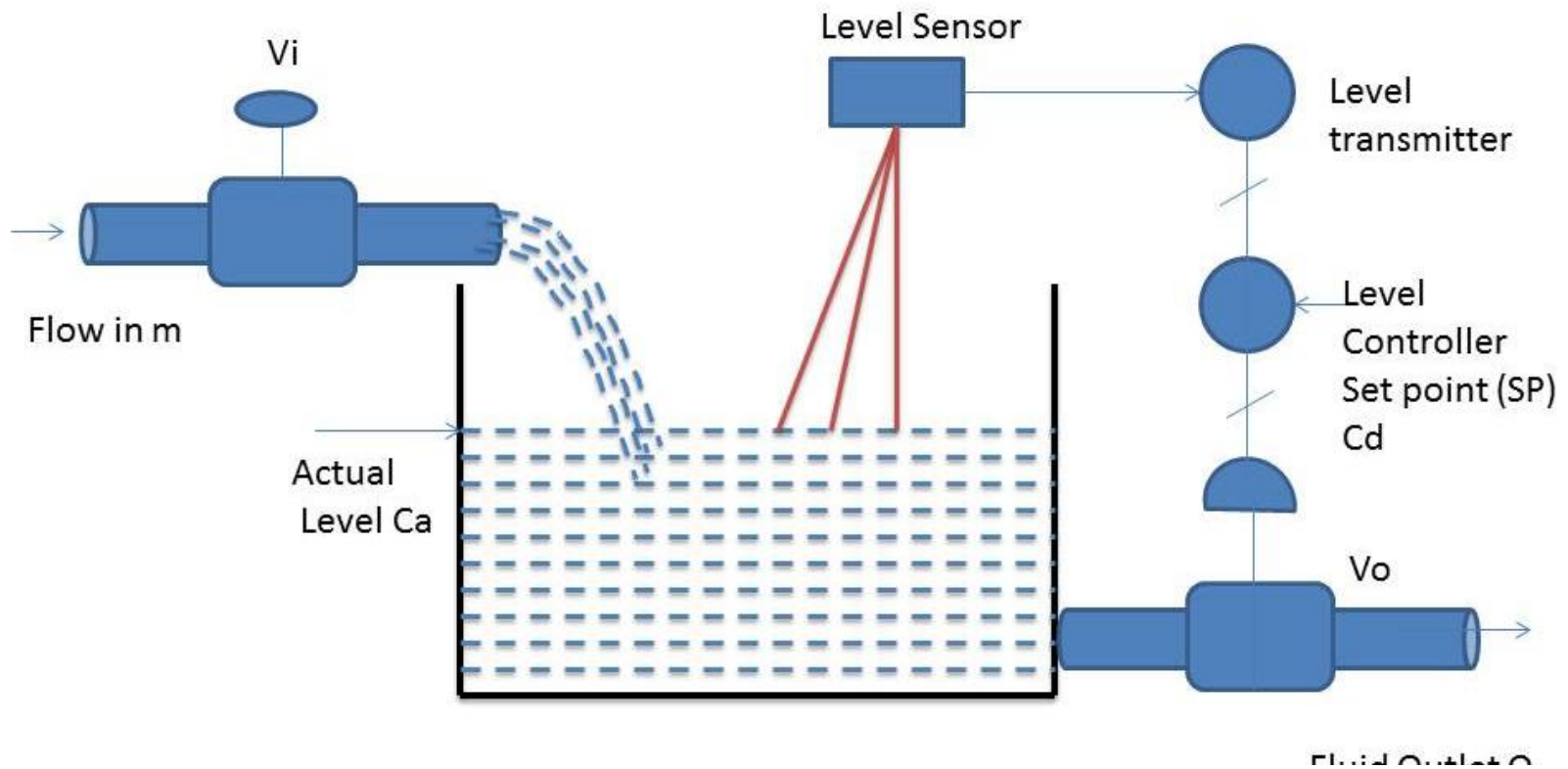
- ◆ Άλλα συστήματα: Ενεργητική ανάρτηση, φρένα ABS, κ.λπ.
- ◆ Ευρύτερα: Έλεγχος πυραύλων, αεροπλάνων, πλοίων, δορυφόρων.

Βιομηχανικές Εφαρμογές



- ◆ Στόχος: Σταθερή θερμοκρασία στο φούρνο
- ◆ Έξοδοι: Θερμοκρασία φούρνου
- ◆ Είσοδοι: Θερμότητα από ηλεκτρικό στοιχείο
- ◆ Διαταραχές: Μάζα στο φούρνο, θερμοκρασία περιβάλλοντος

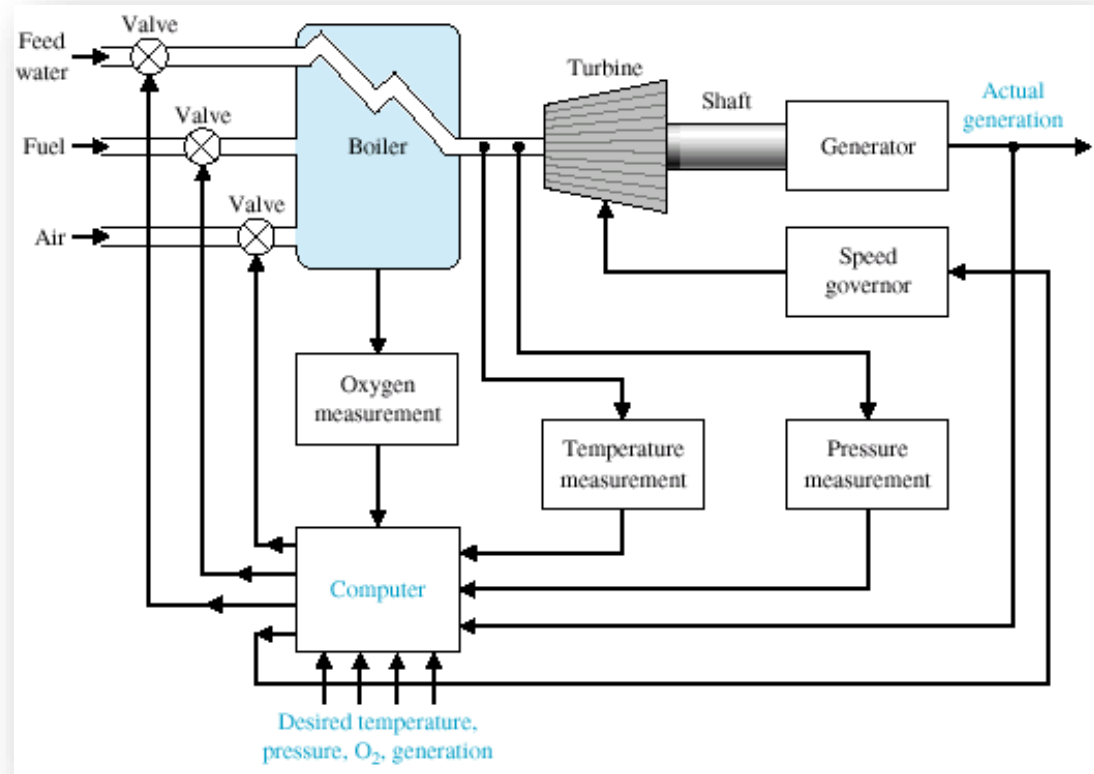
Χημική Βιομηχανία



- ◆ Έλεγχος στάθμης

Ενέργεια

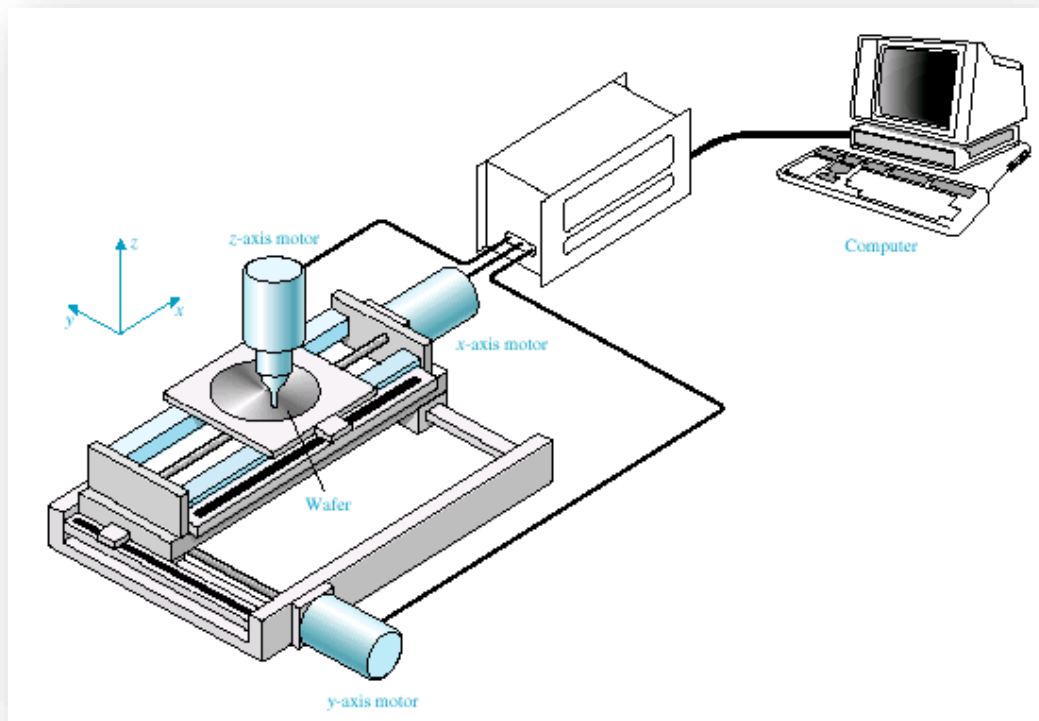
- Έλεγχος θερμικού εργοστασίου



- Έλεγχος ισχύος, τάσης, ροής, πίεσης, θερμοκρασίας, στροφών, τάσης...

Παραγωγή

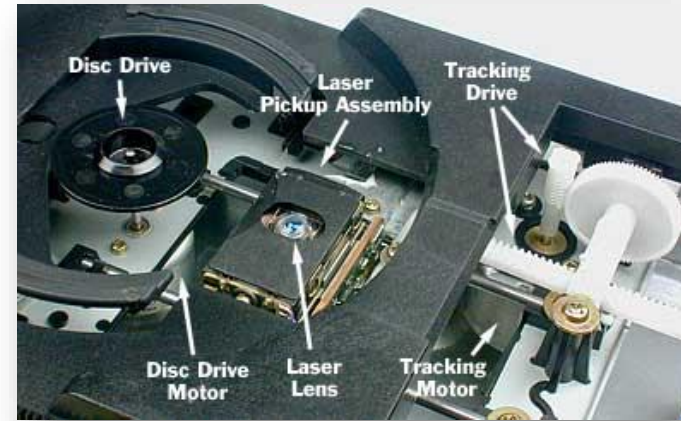
- ◆ Έλεγχος ποιότητας ημιαγωγών σε wafer με κάμερα με σερβομηχανισμό τριών αξόνων



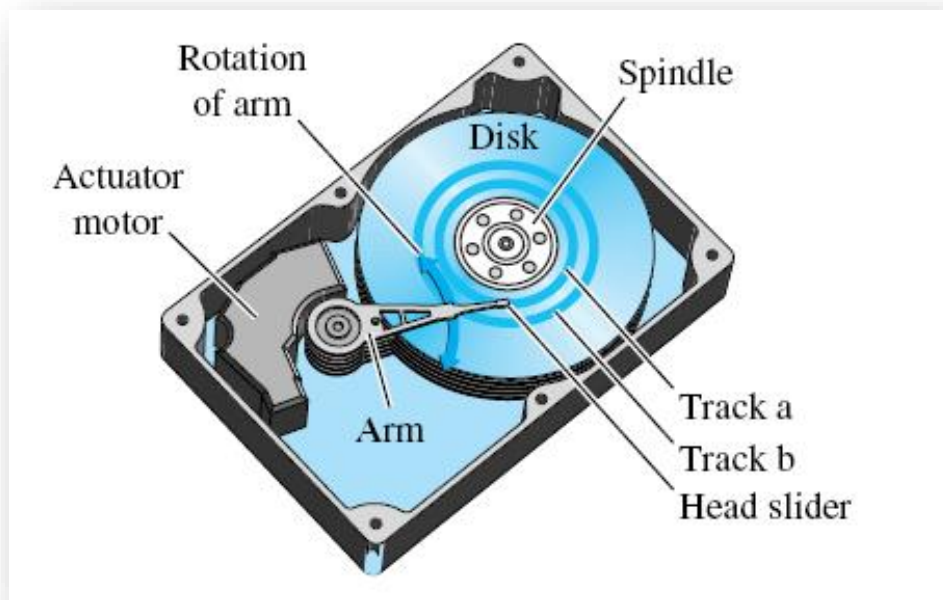
Καταναλωτικά Αγαθά

- Οδηγοί CD
 - Έλεγχος θέσης και προσανατολισμού του φακού του laser

- Σύστημα κλιματισμού
 - Χρησιμοποιεί θερμοστάτη για έλεγχο θερμοκρασίας
 - Υγρόμετρο για έλεγχο υγρασίας

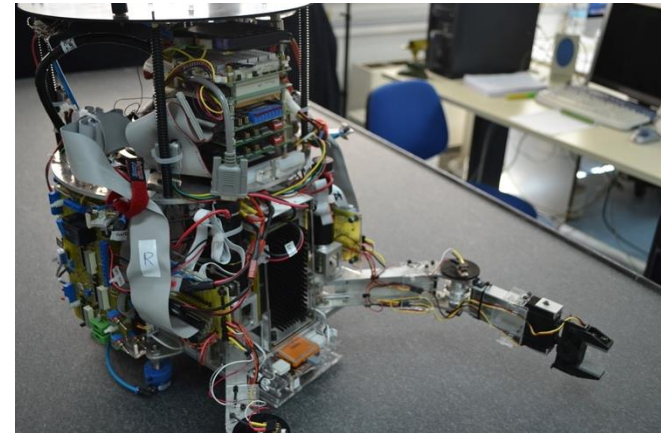


Μηχανοτρονικά Συστήματα

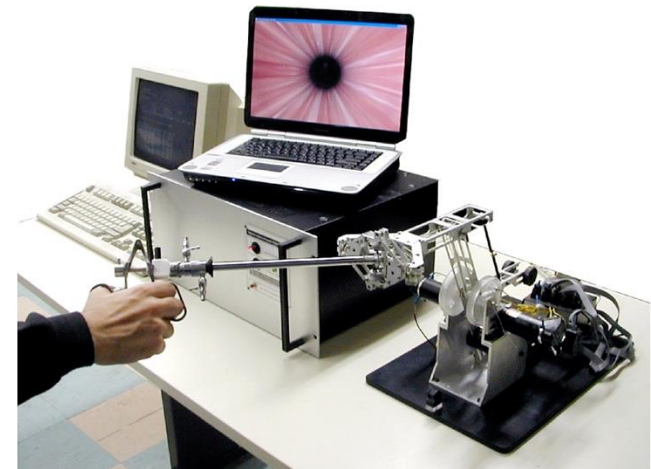
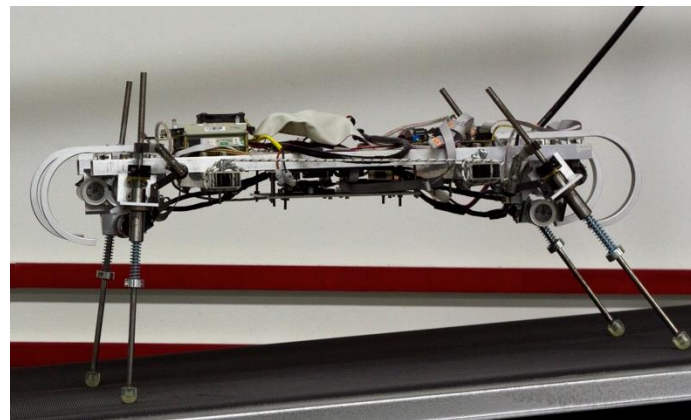


- ◆ Στόχος: Τοποθέτηση της κεφαλής για να διαβάσει πληροφορίες
- ◆ Έξοδοι: Θέση κεφαλής
- ◆ Είσοδοι: Ρεύμα στο πηνίο θέσης
- ◆ Διαταραχές: Θερμοκρασιακές διαστολές

Ρομποτική



Nao



Διάστημα

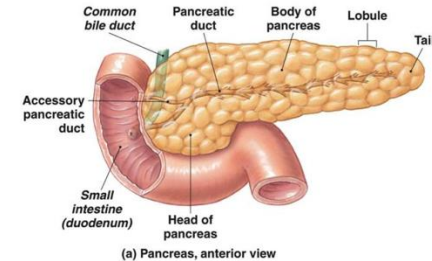
2001 Mars Odyssey (20 χρόνια γύρω από τον Άρη)



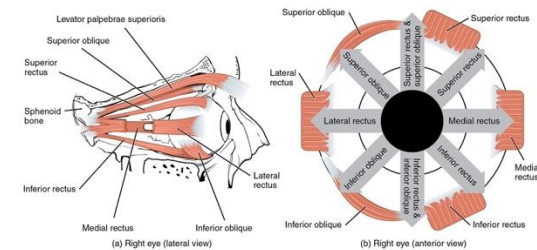
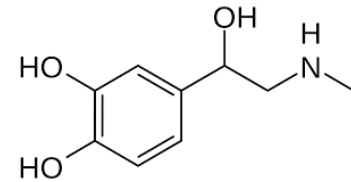
Ανθρώπινο/ Βιολογικό Σύστημα

- Πάγκρεας
 - ❖ Ρυθμίζει το επίπεδο γλυκόζης στο αίμα
- Επινεφρίνη (Αδρεναλίνη)
 - ❖ Αυτόματα αυξάνει τους παλμούς της καρδιάς και το οξυγόνο σε περίπτωση κινδύνου
- Οφθαλμός
 - ❖ Ακολουθεί κινούμενο αντικείμενο
- Χέρι+όραση
 - ❖ Σηκώνει αντικείμενο και το τοποθετεί στο επιθυμητό σημείο
- Θερμοκρασία
 - ❖ Ελέγχεται να είναι μεταξύ 36C και 37C

Pancreas

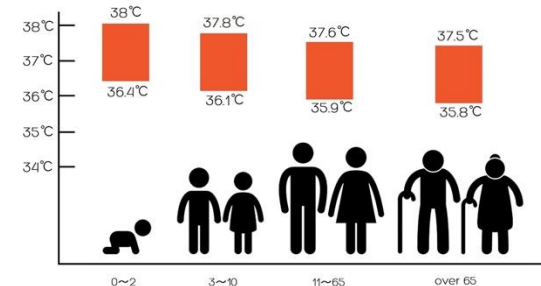


(a) Pancreas, anterior view

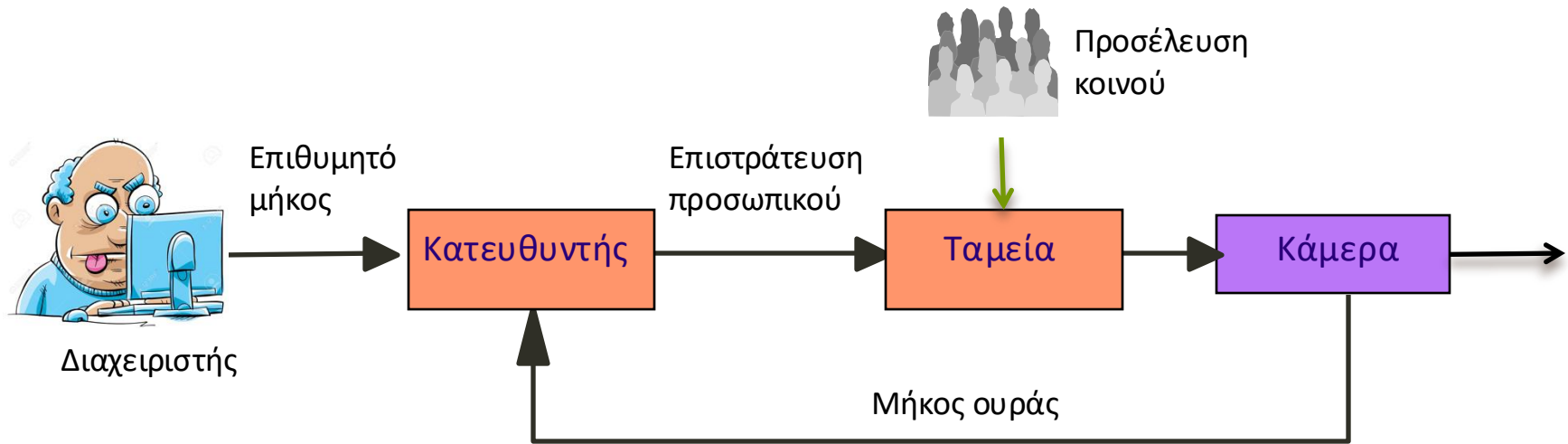


(a) Right eye (lateral view)

(b) Right eye (anterior view)



Έλεγχος Σειράς Αναμονής σε Ταμεία



- Στόχος: σταθερό μήκος ουράς ανεξάρτητα από την προσέλευση
- Έξοδοι: μήκος ουράς από κάμερα
- Είσοδοι: Αριθμός ενεργών ταμείων
- Διαταραχές: Διάρκεια κάθε εξυπηρέτησης, προσέλευση κοινού

Οικονομικό Σύστημα Ελέγχου

- Στόχος: Να βρεθεί η βέλτιστη οικονομική πολιτική για αύξηση βιοτικού επιπέδου χωρίς καταστροφή του περιβάλλοντος (Prof. Jey Forrester (MIT))

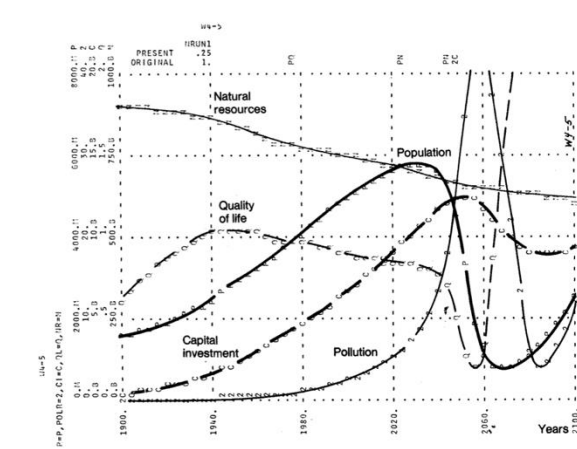
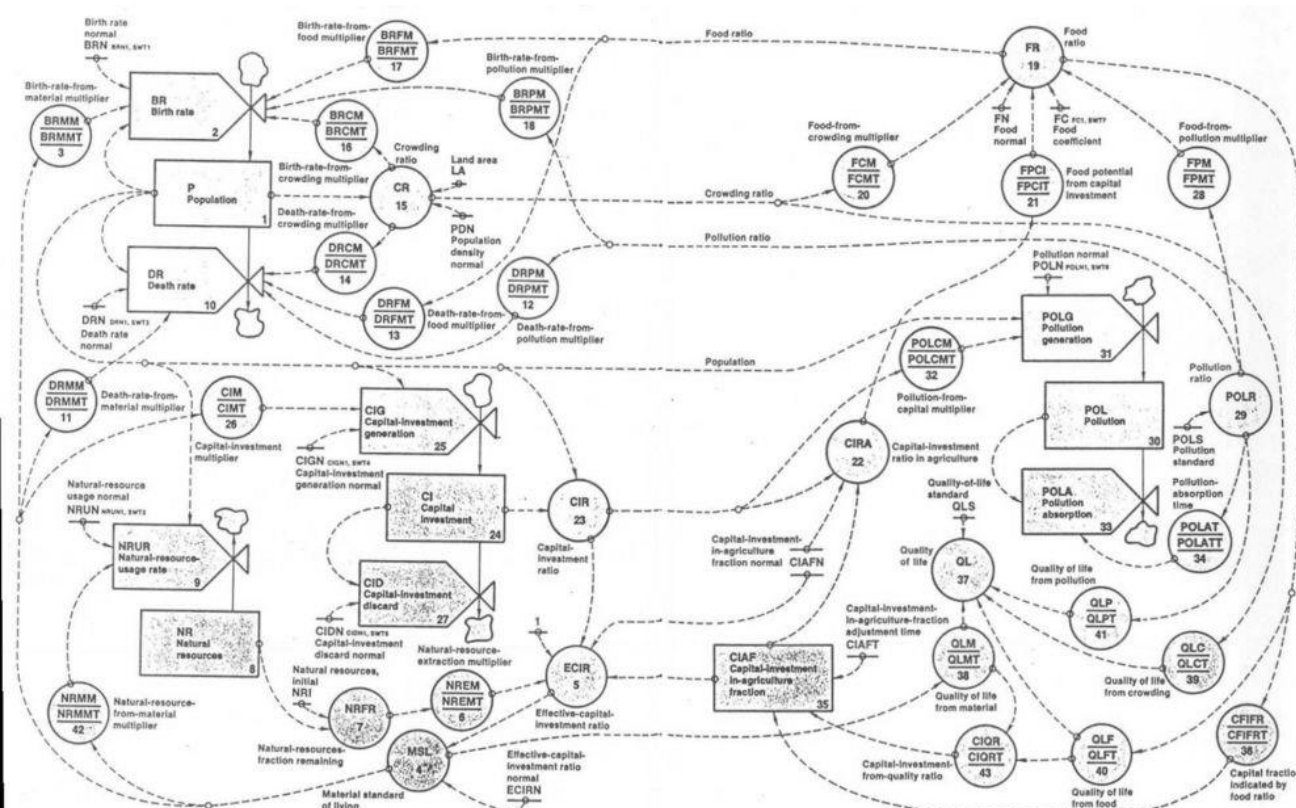
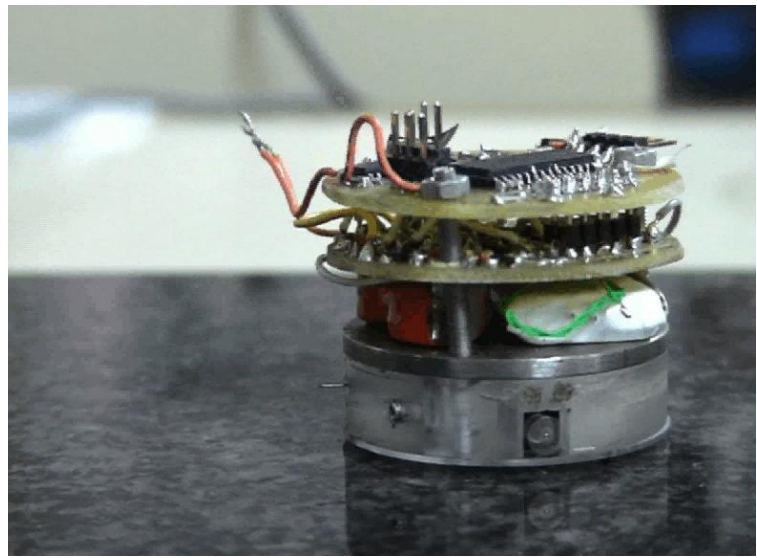
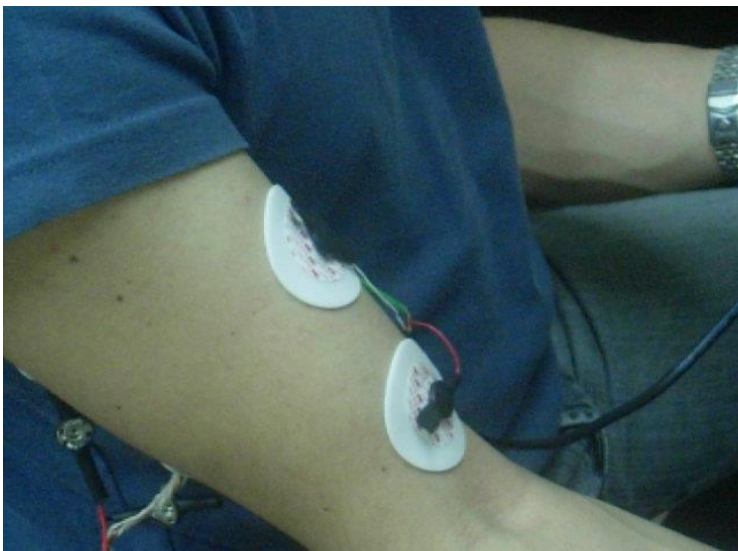
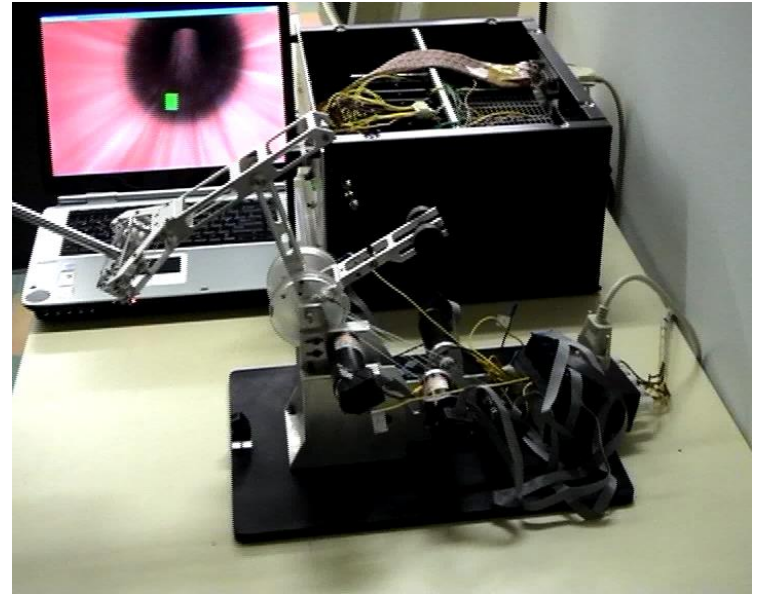
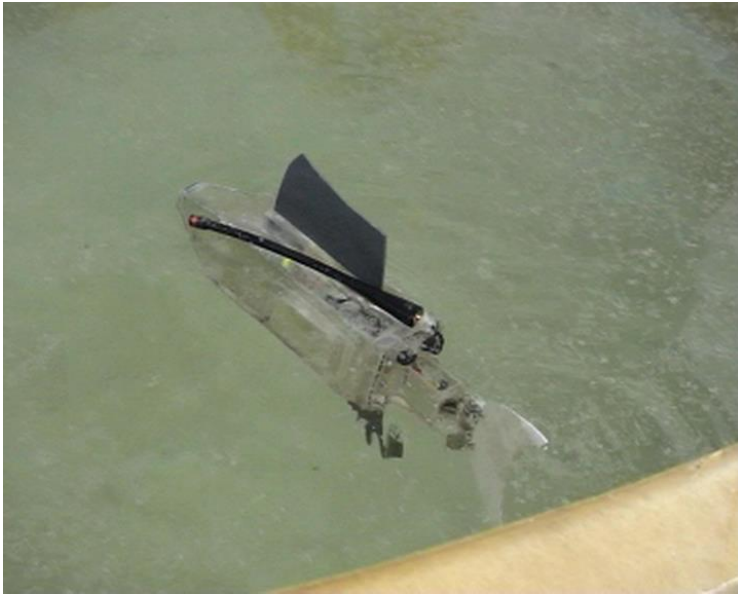
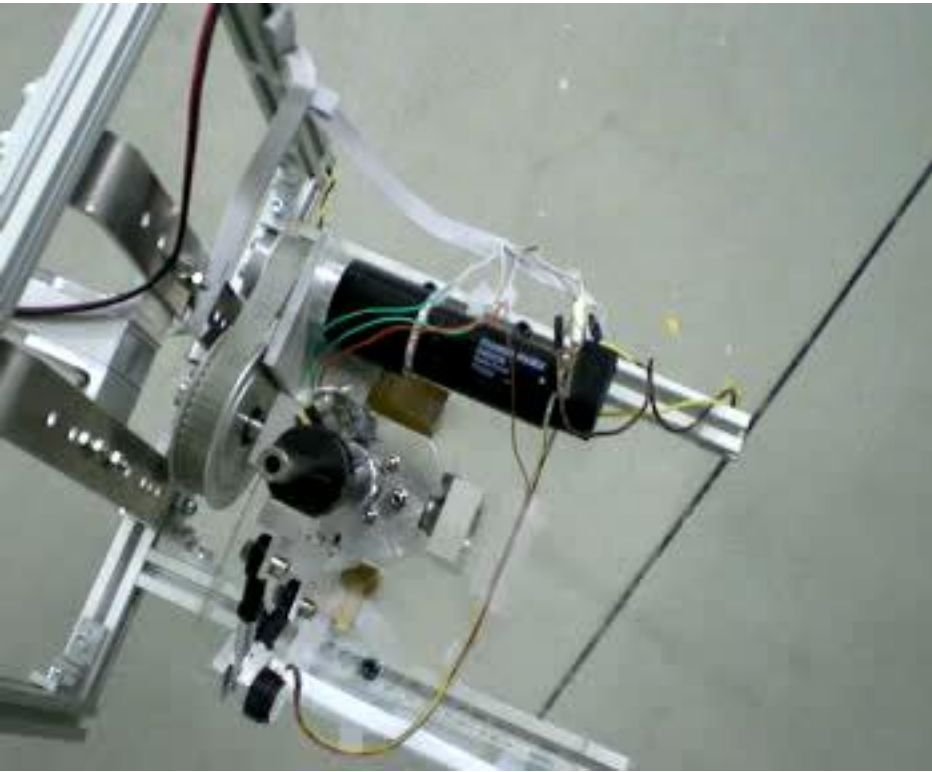


Fig. 3. A pollution crisis is precipitated by lower usage of natural resources. In 1970, natural resource usage is reduced 75 per cent by more effective technology without affecting material standard of living.

Παραδείγματα από το Εργαστήριο

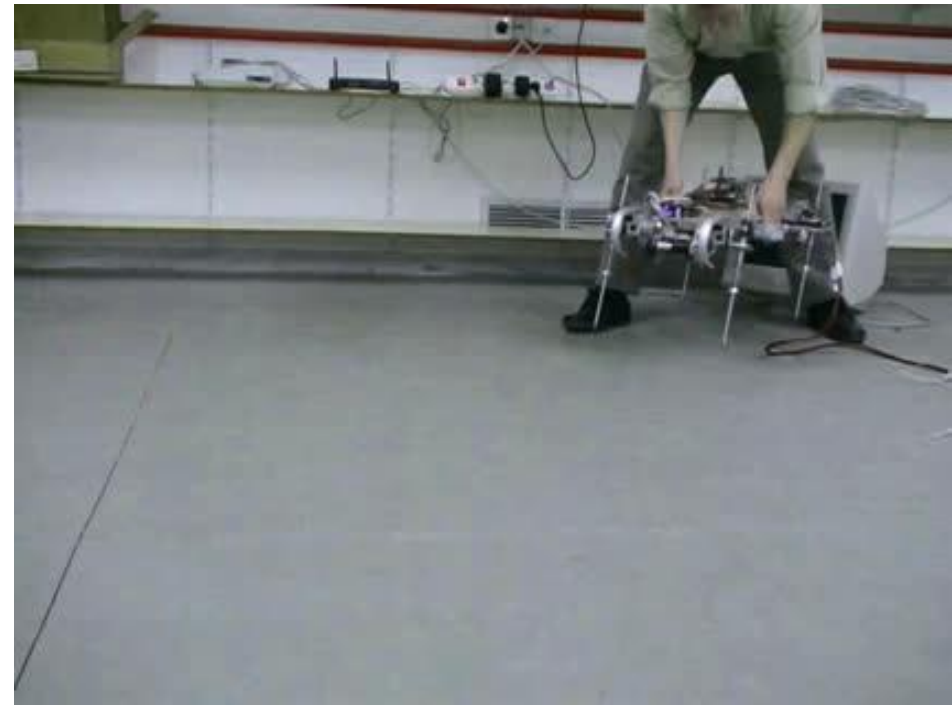


Παραδείγματα από το Εργαστήριο

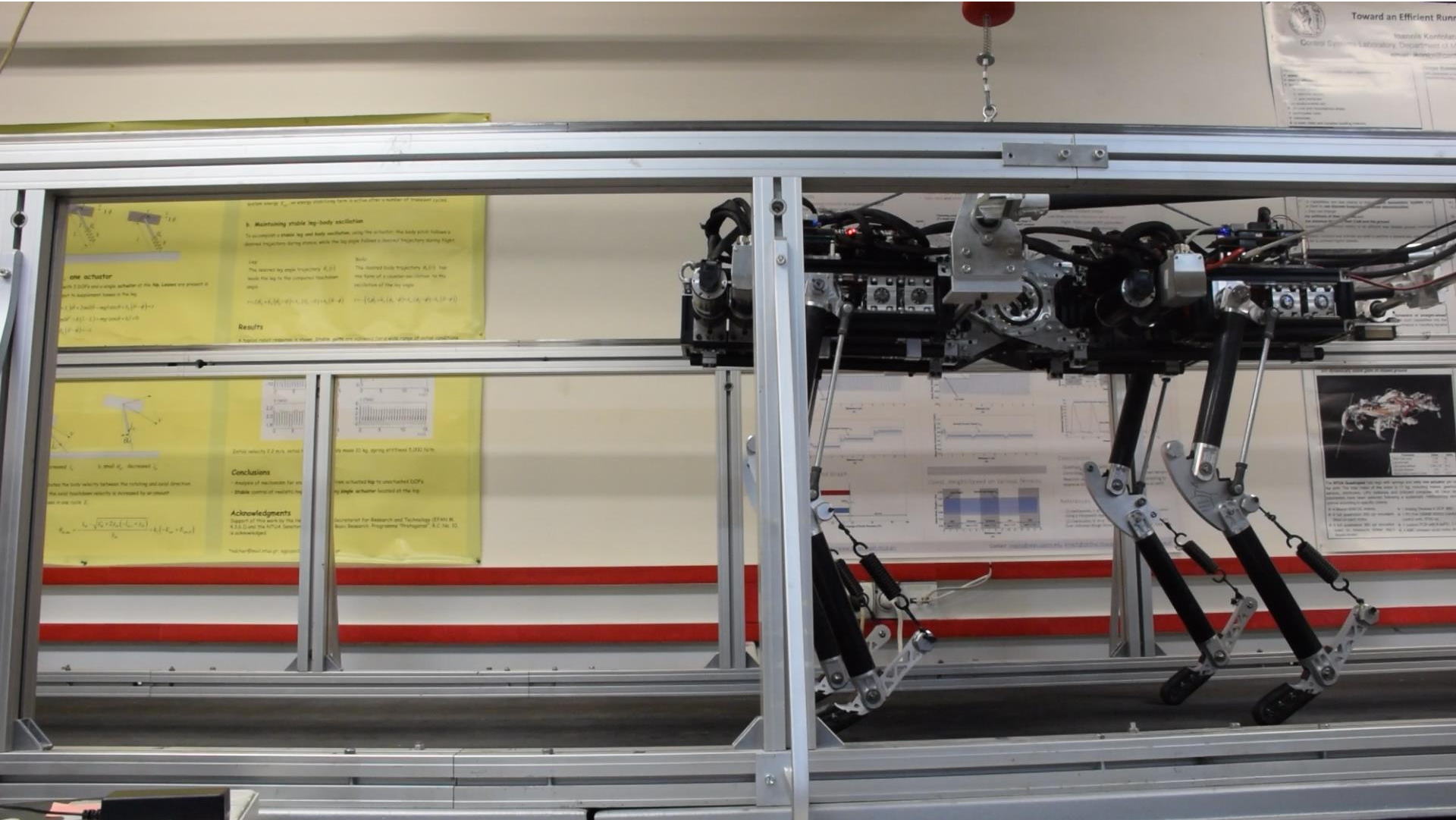


◆ Τετράποδο

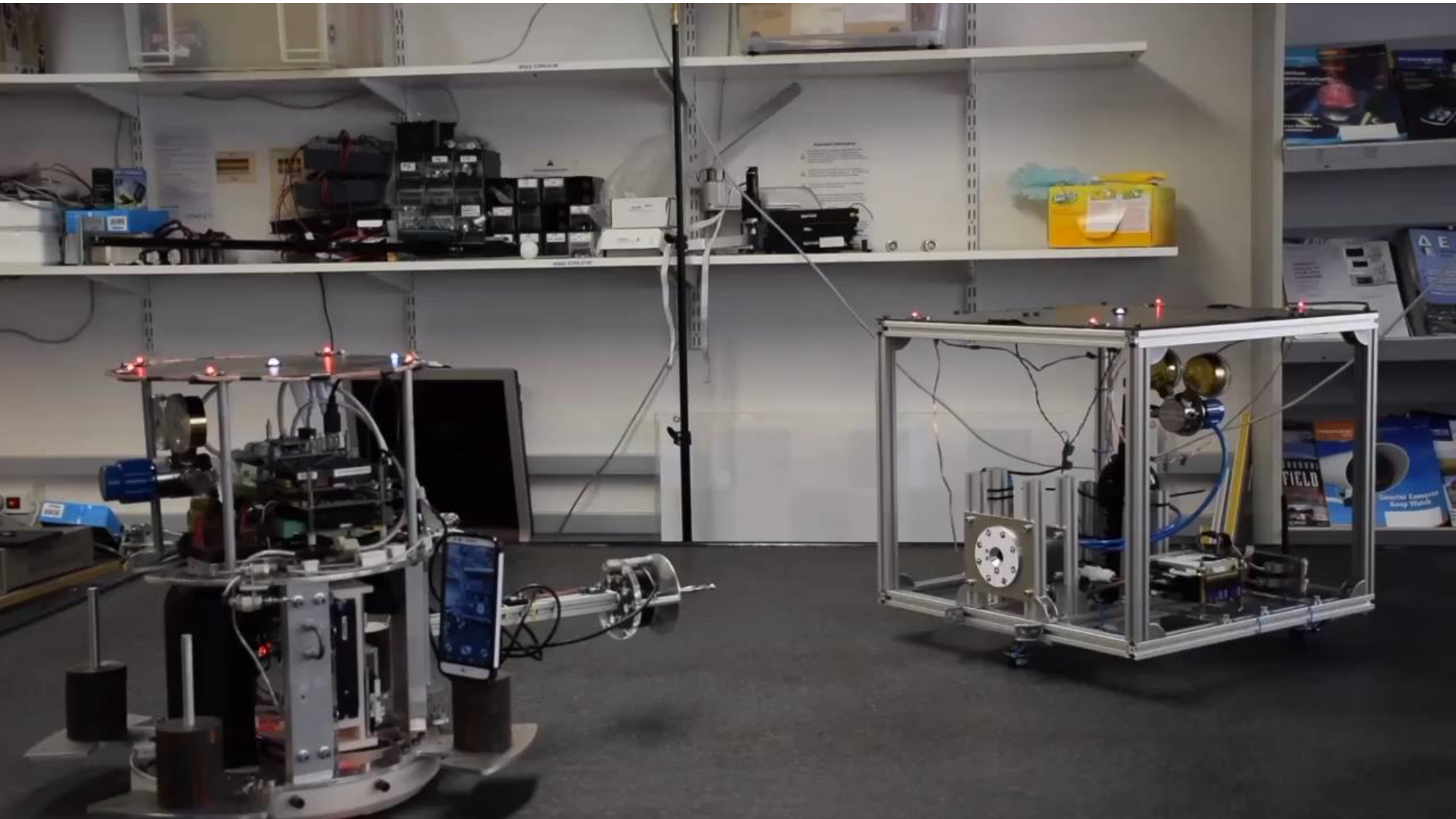
◆ Μονόποδο



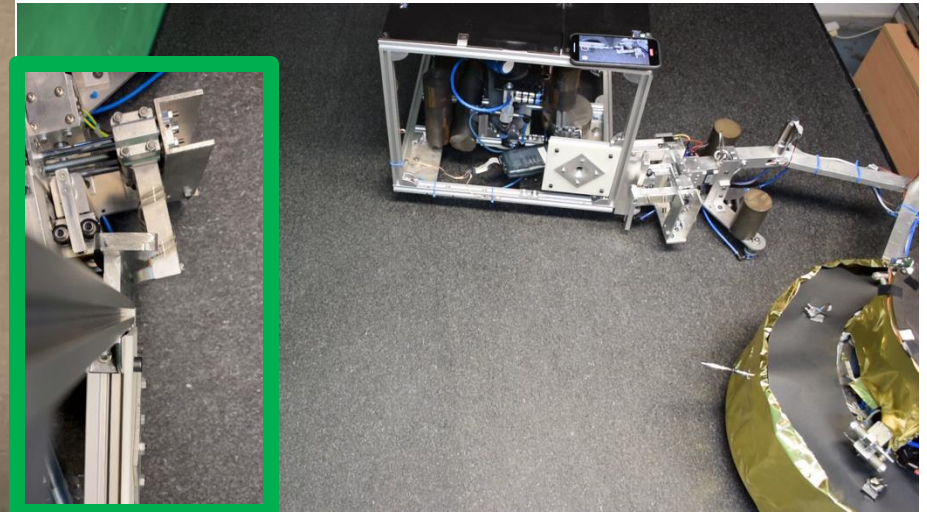
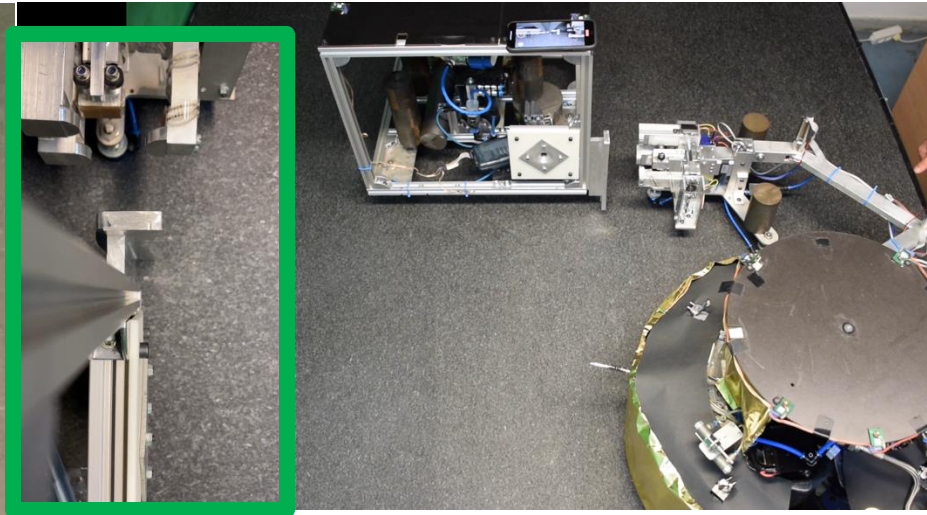
Laelaps



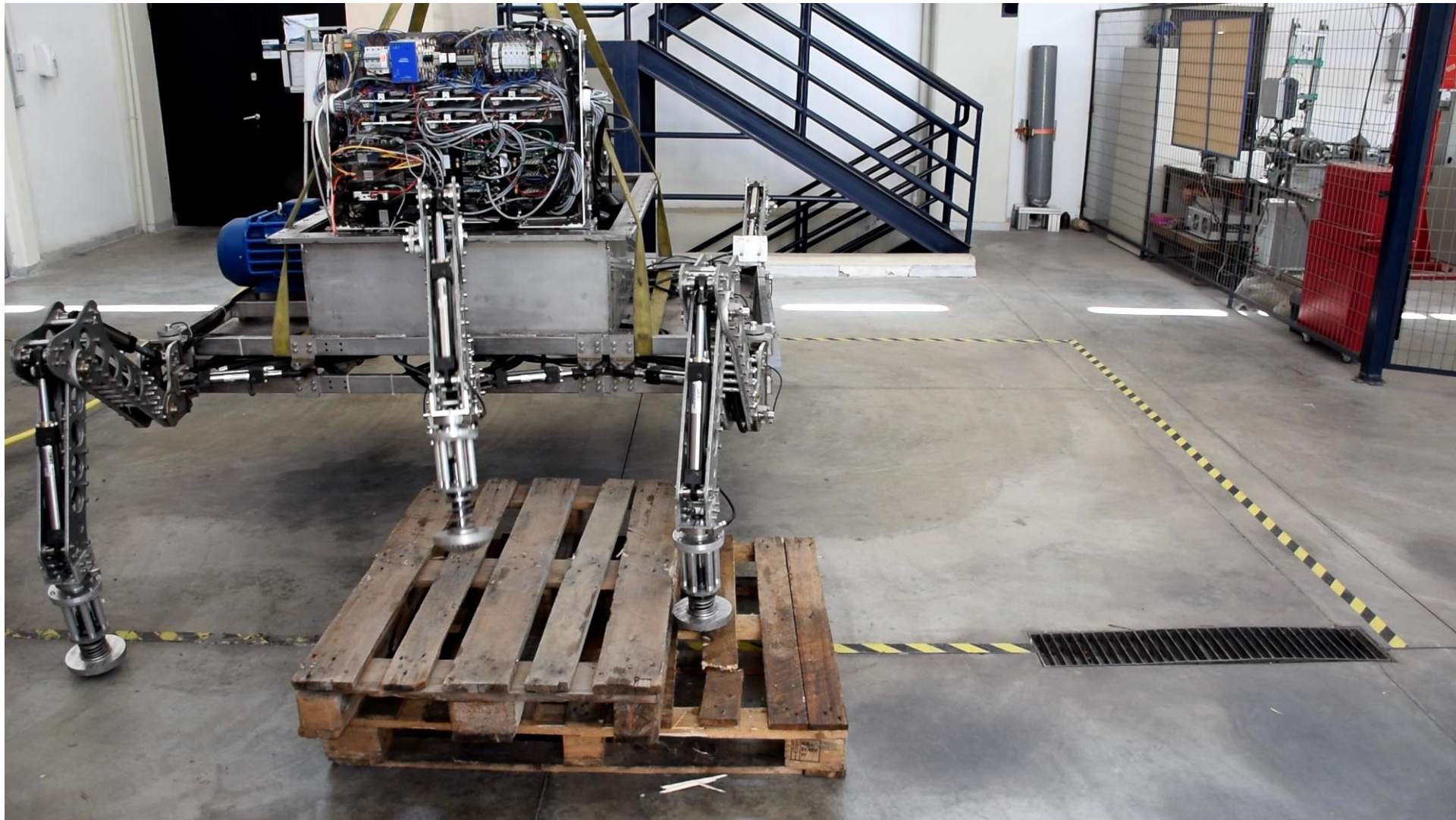
Ρομποτική αναπλήρωση καυσίμου σε τροχιά



Εξομοίωση σύλληψης στόχου στο διάστημα



Υποβρύχιο Εξάποδο Ρομπότ



Ο Αυτόματος Έλεγχος ως Επιστήμη

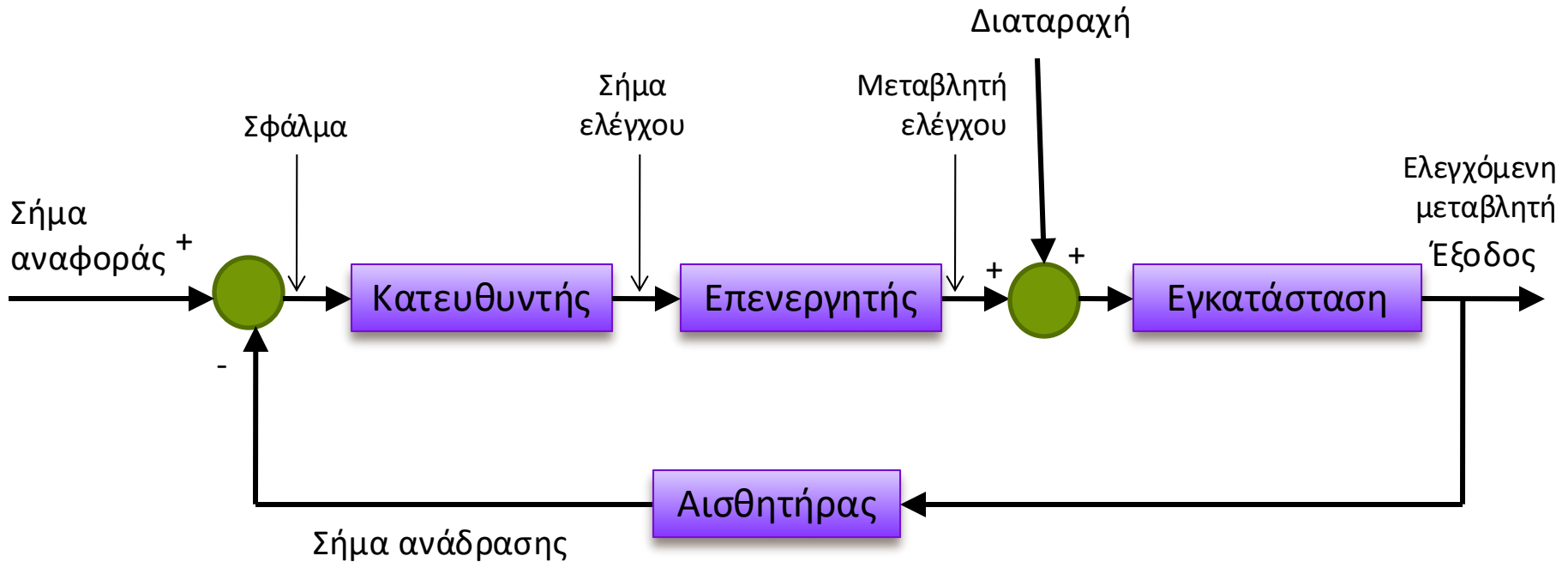
- ◆ Είναι γνωστικό αντικείμενο **κορμού** για Μηχανικούς
 - + Ο έλεγχος απαντάται σε μεγάλο αριθμό συστημάτων
- ◆ Είναι κυρίως **Συνθετική Επιστήμη**
 - + Σχεδιασμός κατευθυντή, όχι περιγραφή της φύσης!
- ◆ Είναι μία Επιστήμη με **Διεπιστημονική** εφαρμογή
 - + Με εφαρμογές ακόμα και στις κοινωνικές επιστήμες!

Σχεδιασμός Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου

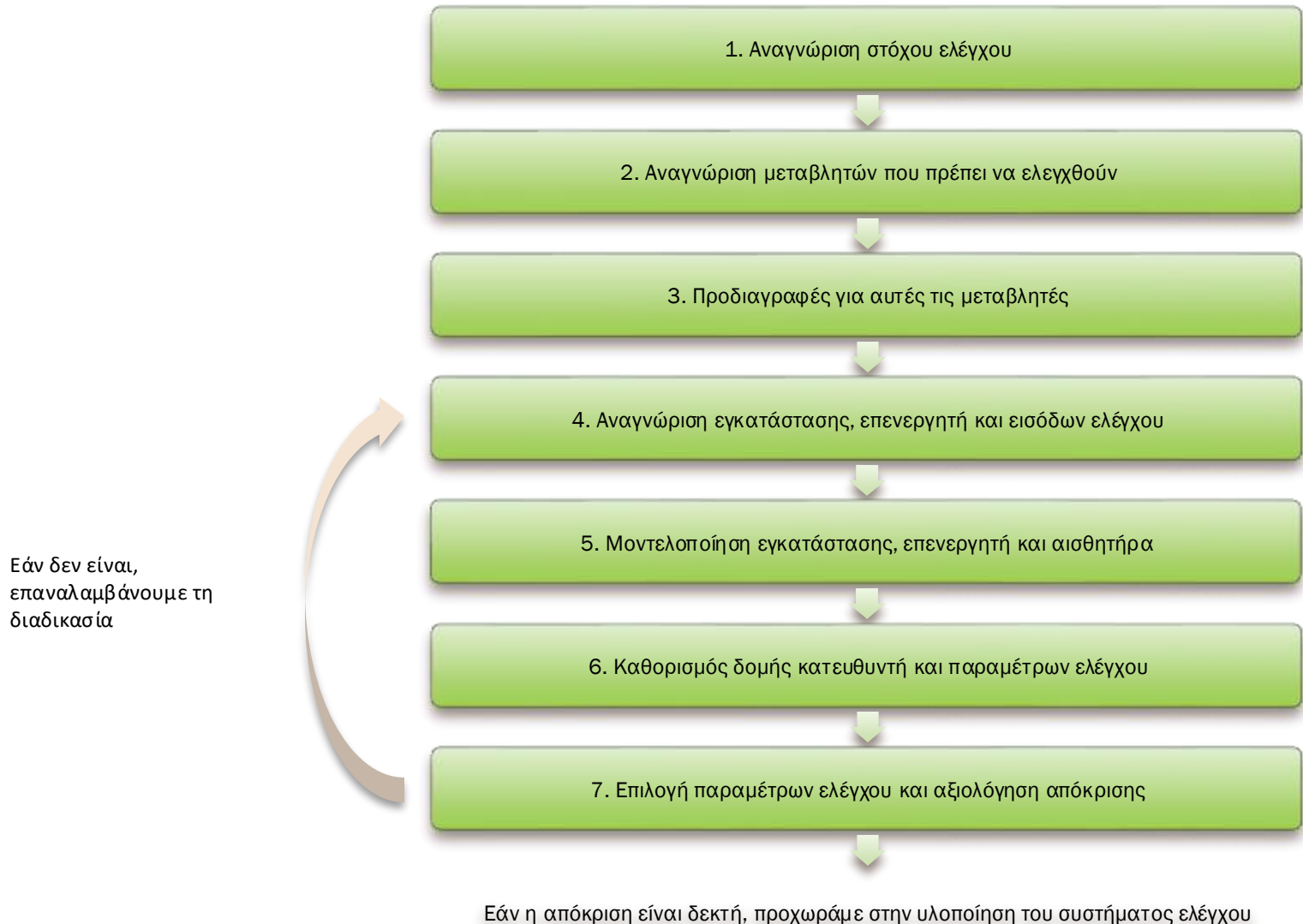
Βασικά Στοιχεία Συστήματος Ελέγχου

- ◆ Εγκατάσταση (Plant) ή Διεργασία ή Σύστημα
 - + Πρέπει να ελεγχθεί
- ◆ Αισθητήρες (Sensors)
 - + Παρέχουν μετρήσεις μεταβλητών εγκατάστασης
 - + Μπορούν να ενσωματωθούν στην εγκατάσταση (επόπτευση) ή στο σύστημα ελέγχου (ανάδραση).
- ◆ Επενεργητές (Actuators)
 - + Μετατρέπουν σήμα ελέγχου σε ισχύ ελέγχου
 - + Μπορούν να ενσωματωθούν στην εγκατάσταση.
- ◆ Κατευθυντής (Controller) ή Νόμος ελέγχου
- ◆ Σήμα αναφοράς (Reference input), ή εντολή, ή επιθυμητή απόκριση

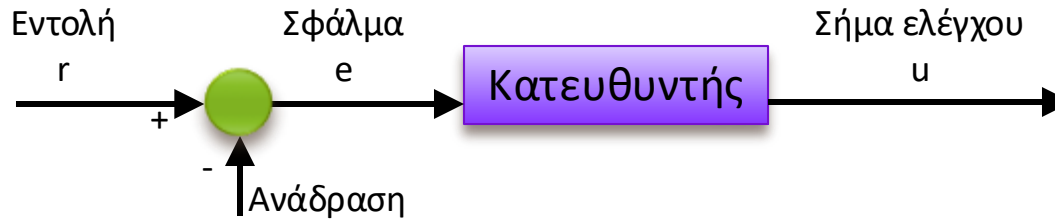
Τυπικό Σύστημα Ελέγχου



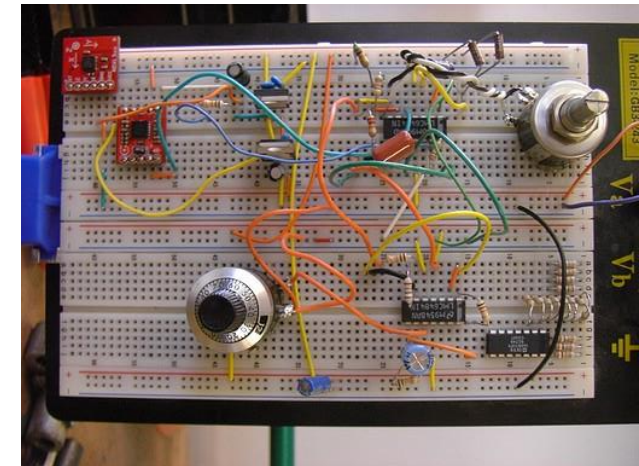
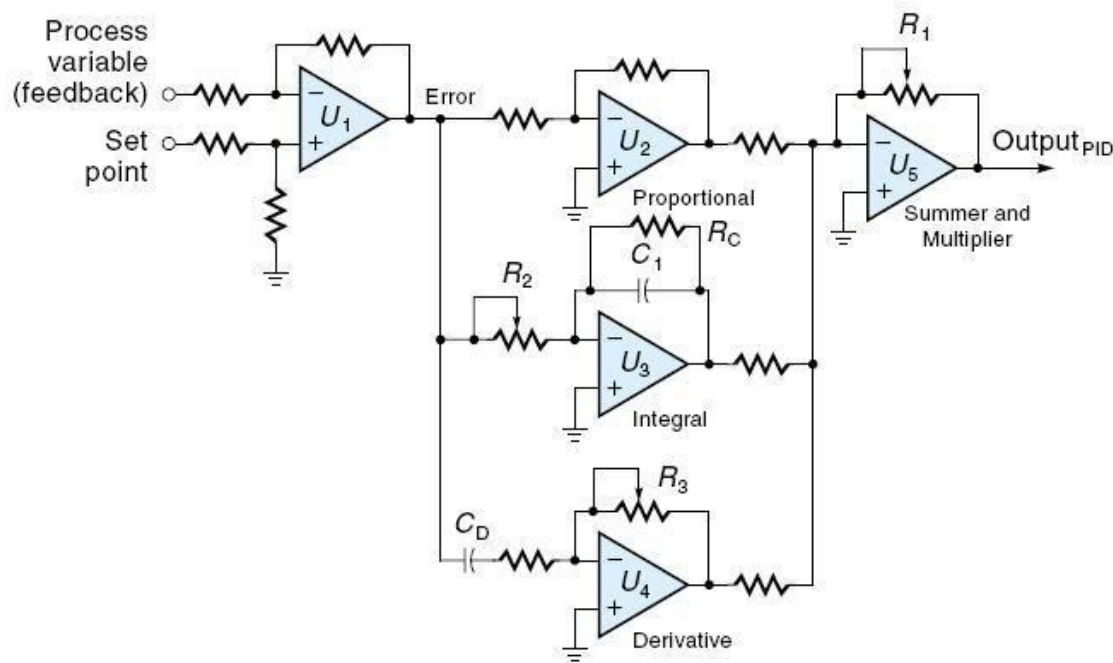
Σχεδιασμός Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου



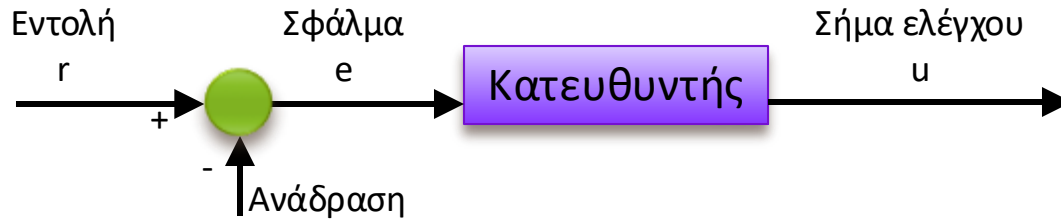
Υλοποίηση Κατευθυντή - Αναλογική



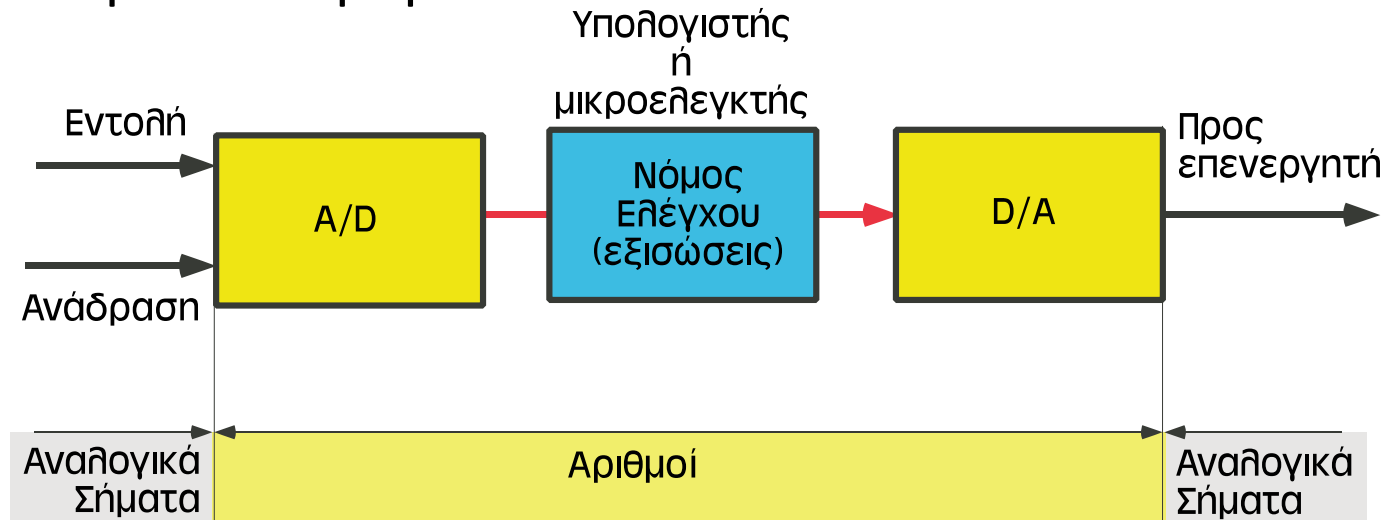
◆ Αναλογική υλοποίηση



Υλοποίηση Κατευθυντή - Ψηφιακή

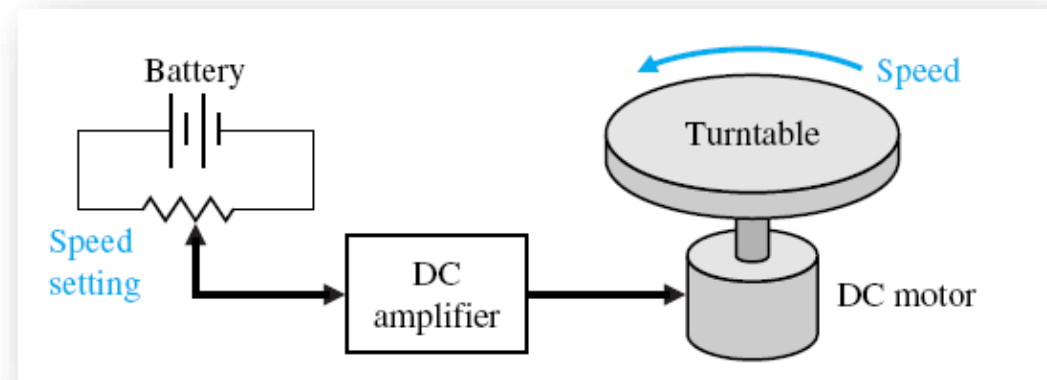


◆ Ψηφιακή υλοποίηση

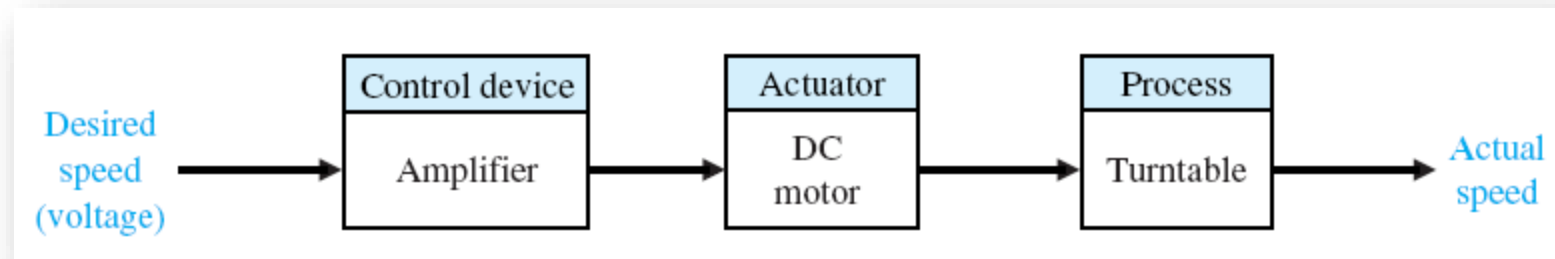


Π.χ. : Έλεγχος Γωνιακής Ταχύτητας-1

- ◆ Σύστημα: Οδηγός CD player, σκληρός δίσκος
- ◆ Στόχος Ελέγχου: Σταθερή γωνιακή ταχύτητα
- ◆ Προδιαγραφές: 7200 rpm
- ◆ Αναγνώριση εγκατάστασης, επενεργητής, ελεγχόμενη μεταβλητή ω

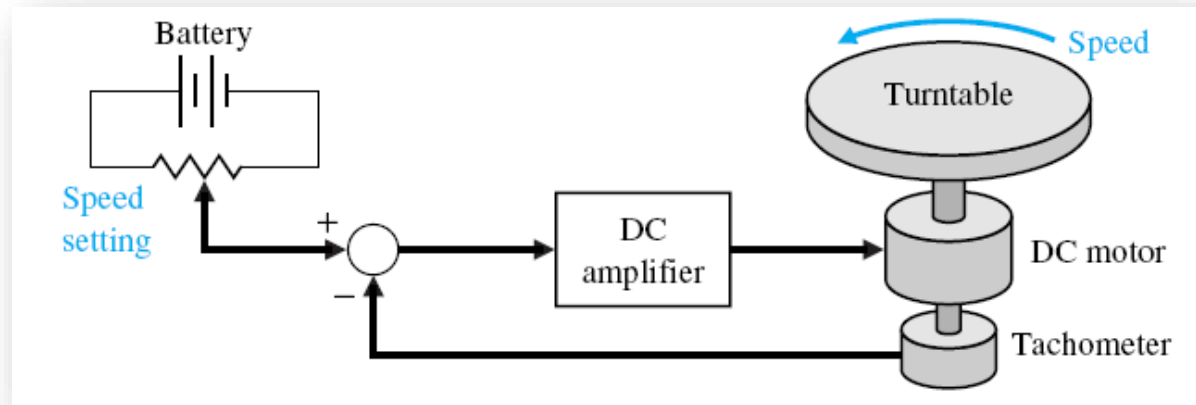


- ◆ Δομικό διάγραμμα, μοντελοποίηση:

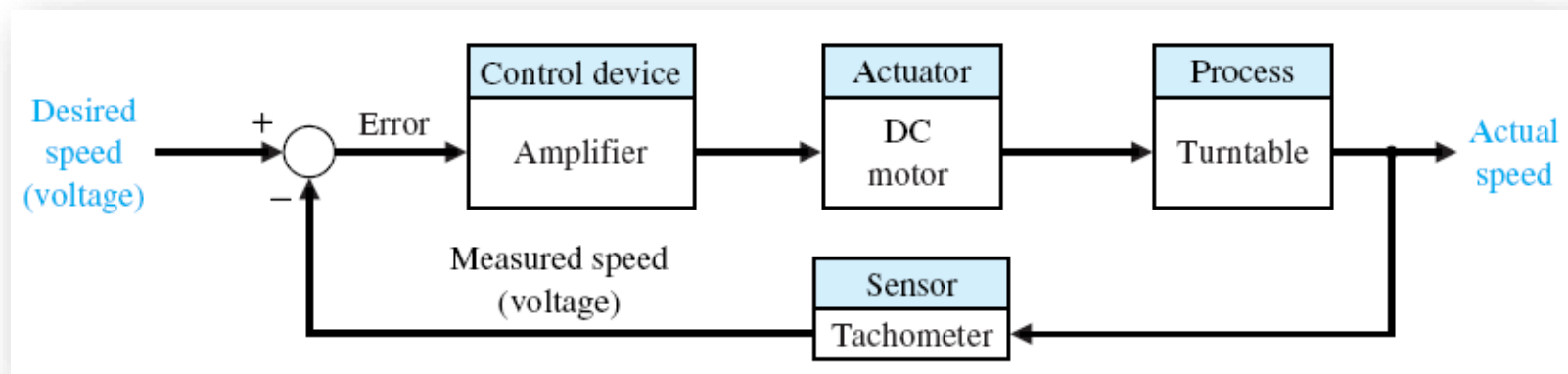


Έλεγχος Γωνιακής Ταχύτητας-2

- ◆ Σύστημα κλειστού βρόχου & κατευθυντής:

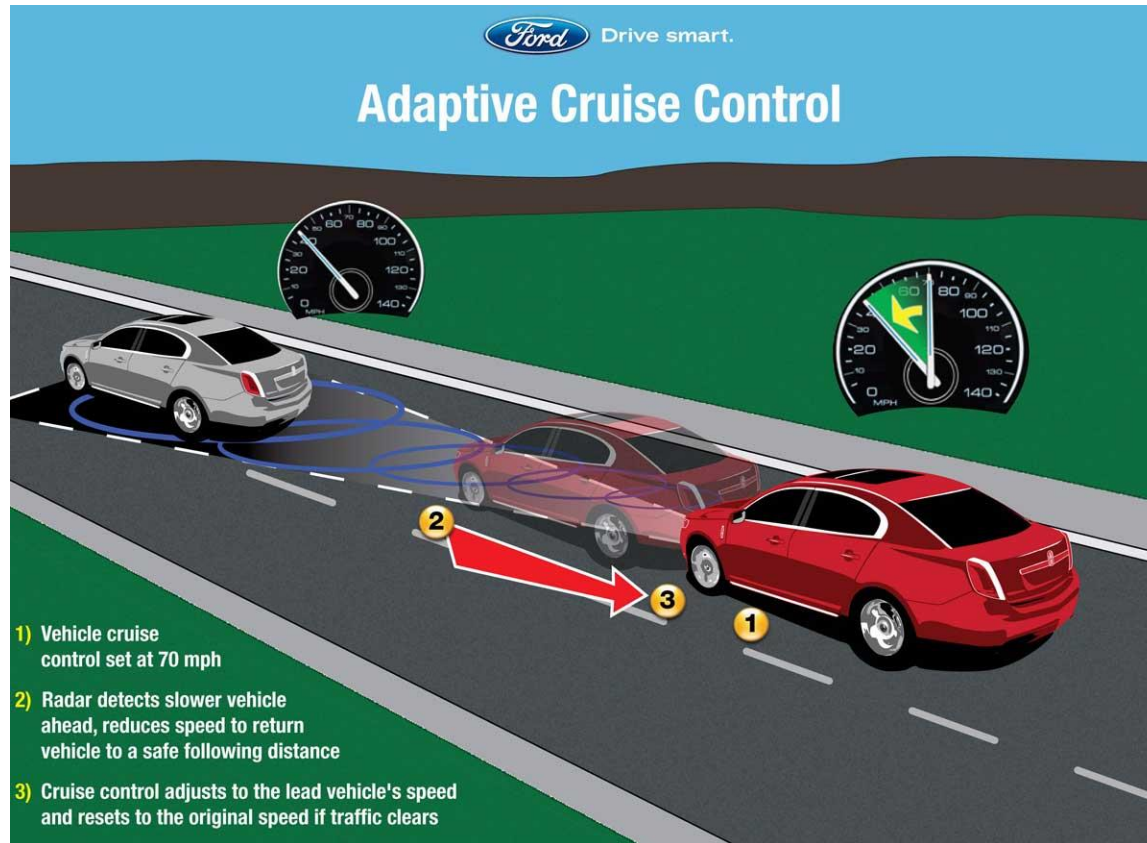


- ◆ Δομικό διάγραμμα κλειστού βρόχου:



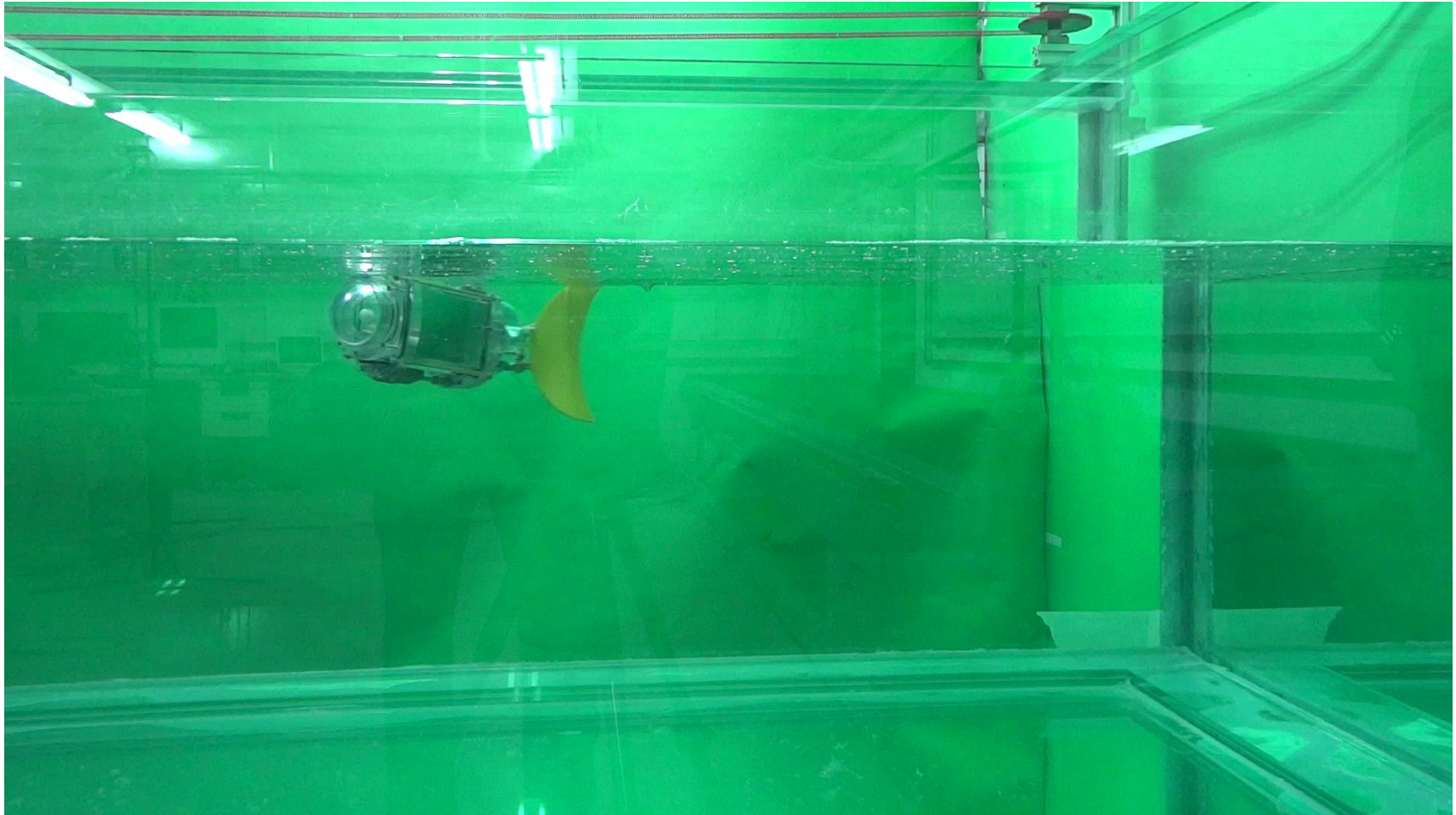
Προσαρμοστικός Έλεγχος Ταχύτητας

- ◆ Σχεδιάστε ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας για διατήρηση σταθερής απόστασης από προπορευόμενο όχημα.



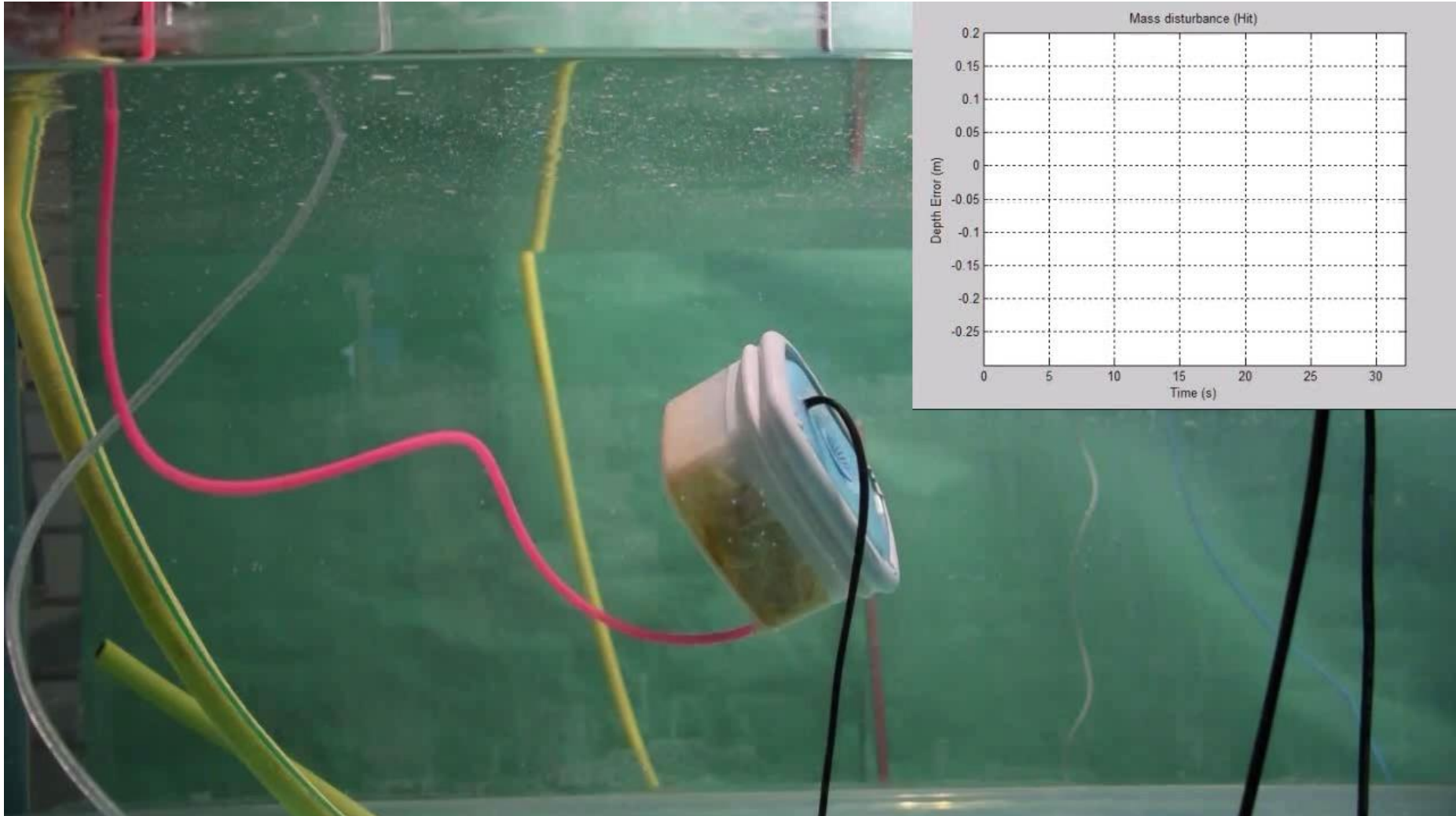
- ◆ Τι απαιτείται;

Έλεγχος Ρομποτικού Ψαριού

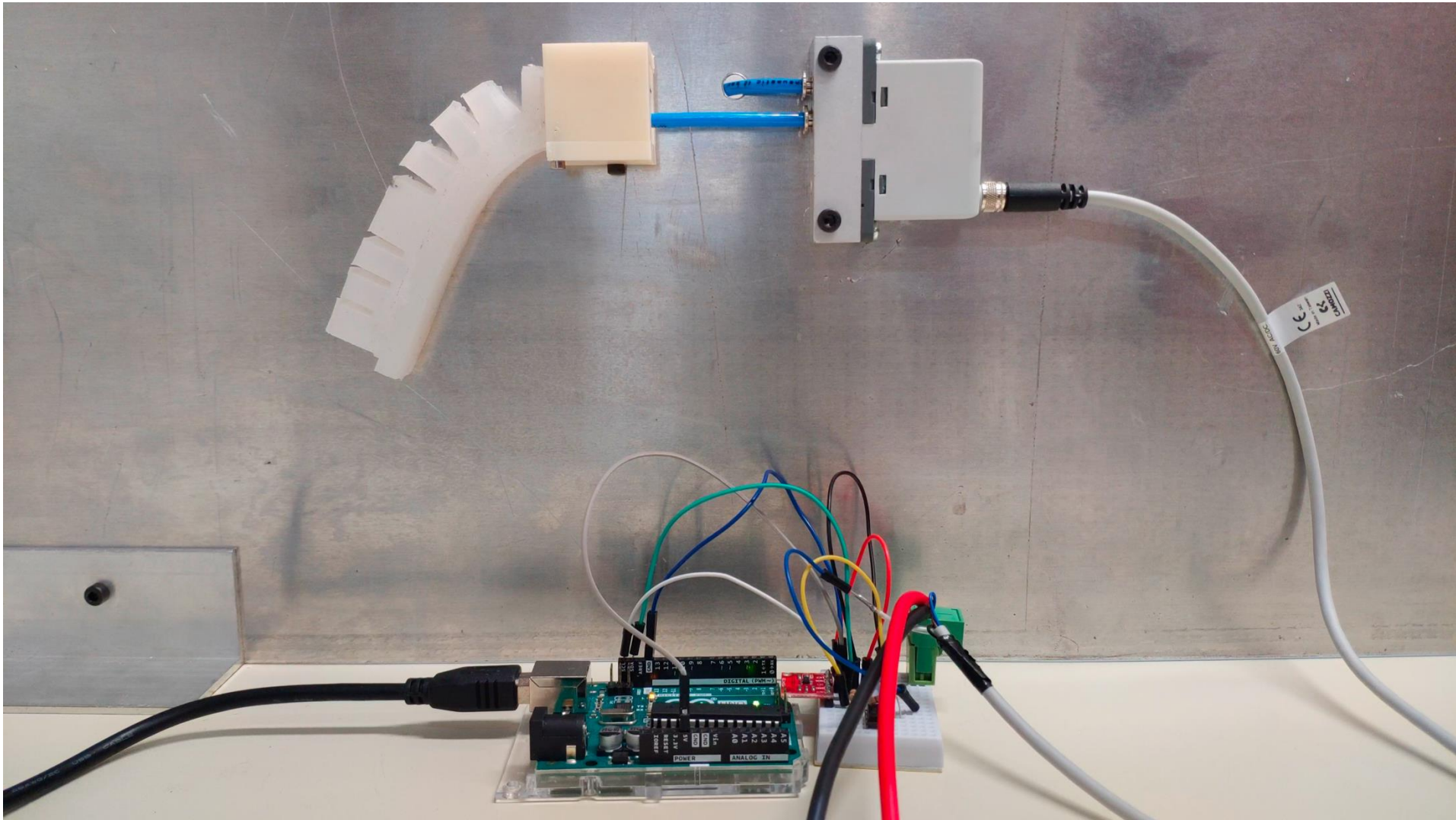


- ◆ Τι πρέπει να ελέγξουμε για να ακολουθεί επιθυμητή τροχιά;
- ◆ Τι πρέπει να ελέγξουμε ώστε να πάει σε κάποιο βάθος;

Έλεγχος Tyrrer (Απόρριψη Διαταραχής)



Έλεγχος δακτύλου αρπάγης για μανιτάρια



Ιστοσελίδες

- ◆ Ιστοσελίδες μαθήματος:

<http://nereus.mech.ntua.gr/courses/control/control.html>

<https://helios.ntua.gr>

- ◆ Ιστοσελίδες Εργαστηρίου:

Official site:

<http://csl-ep.mech.ntua.gr>

Youtube Channel:

<http://www.youtube.com/user/CSLabEP>

Facebook page:

<https://www.facebook.com/csIntua>

- ◆ Διάλειμμα 15'

