



Autonomous Robotic Vehicles

Hellenic Mediterranean University

Lecture 2

Dr. Alina Eqtami

Lecture Goals - Στόχοι σημερινού μαθήματος!

Μετά το σημερινό μάθημα θα μπορείτε:

- Να περιγράφετε τι είναι locomotion και γιατί είναι σημαντικό στη ρομποτική.
- Να αναγνωρίζετε τους βασικούς τύπους: τροχοφόρα, ερπυστριοφόρα, περπατητά, ιπτάμενα, κολυμβητικά.
- Να συγκρίνετε τα trade-offs: ταχύτητα, σταθερότητα, κατανάλωση ενέργειας, πολυπλοκότητα.
- Να συζητάτε πραγματικά προβλήματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.

Ετυμολογία:

Απο το Λατινικό “loco” = “from a place” και “motion” = “movement”.

Κυριολεκτικά: μετακίνηση από ένα τόπο σε άλλον

Introduction to Locomotion

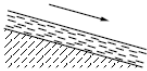
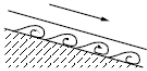
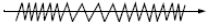
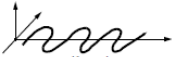
Locomotion είναι η ικανότητα ενός ρομπότ να μετακινείται από ένα σημείο σε άλλο.

Θεμελιώδες χαρακτηριστικό για αυτόνομα ρομπότ:

- Επηρεάζει την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον
- Καθορίζει αυτονομία και αποδοτικότητα
- Περιλαμβάνει (trade-offs) ανάμεσα στην ταχύτητα, τη σταθερότητα και την κατανάλωση ενέργειας.



Locomotion in Nature

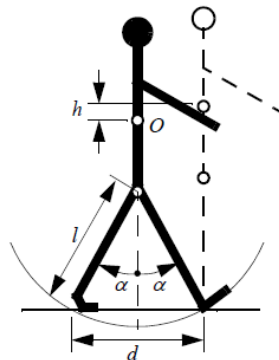
Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Periodic bouncing on a spring 
Walking 	Loss of kinetic energy	Rolling of a polygon 

Locomotion mechanisms used in biological systems.

*Image source: Autonomous Mobile Robots, our textbook.

Types of Robot Locomotion

- **Wheeled locomotion** – Ιδανικό για επίπεδες επιφάνειες, πιο αποδοτικό (σε επίπεδες επιφάνειες) και μοναδικό ως ανθρωπινή εφεύρεση!
- **Legged locomotion** – Κατάλληλο για ανώμαλο έδαφος, μιμείται ζώα
- **Tracked locomotion** – Σταθερότητα σε δύσκολο terrain
- **Flying locomotion** – UAVs/drones για εναέριες εργασίες
- **Swimming locomotion** – UUVs/ROVs για υδάτινο περιβάλλον



A biped walking system.

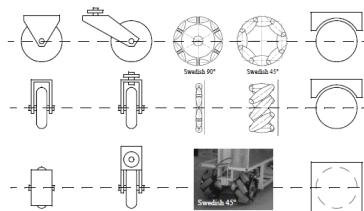
*Image source: Autonomous Mobile Robots.

Χαρακτηριστικά που καθορίζουν την επιλογή locomotion:

- Η **φυσική αλληλεπίδραση** μεταξύ του οχήματος και του περιβάλλοντός του, δηλαδή...
- Οι **δυνάμεις αλληλεπίδρασης**, καθώς και οι μηχανισμοί και ενεργοποιητές που τις παράγουν.
- Τα πιο σημαντικά ζητήματα στην κίνηση είναι:
 - **Σταθερότητα**: αριθμός σημείων επαφής, κέντρο βάρους, ισορροπία, κλίση εδάφους
 - **Χαρακτηριστικά επαφής**: σημείο ή επιφάνεια επαφής, τριβή
 - **Περιβάλλον**: δομή, μέσο (έδαφος, νερό, αέρας)

Different Wheels

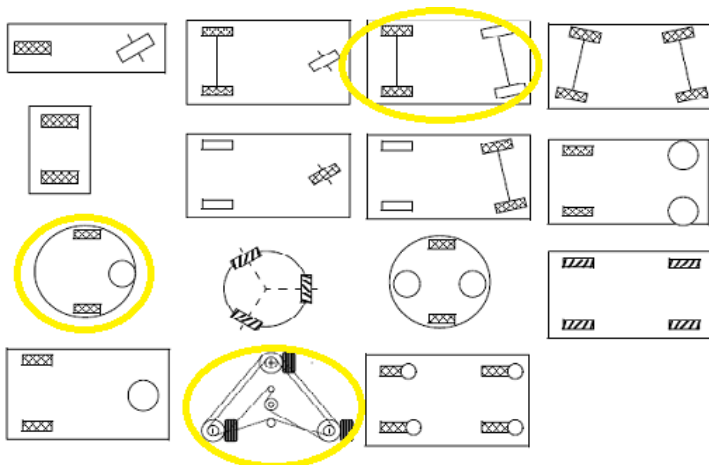
- **Fixed standard wheel** – 1 DOF (κύλιση)
- **Steerable standard wheel** – 2 DOF (κύλιση + κατεύθυνση)
- **Castor wheel** – 2 DOF (κύλιση + ελεύθερη περιστροφή)
- **Swedish/Omni wheel** – 2 DOF (κύλιση + παθητικοί κύλινδροι)
- **Ball or spherical wheel** – How many DOF? technically difficult realization



The 4 basic wheel types.

*Image source: Autonomous Mobile Robots.

Wheel Configurations for Rolling Vehicles



Wheel configurations.

*Image source: Autonomous Mobile Robots.

Stability in Wheeled Robots

Για να επιτευχθεί ευστάθεια, σε όχημα με 2 τροχούς:

- **Static stability:** πρέπει να έχει χαμηλό κέντρο μάζας (κάτω απο τον άξονα των τροχών), ευρεία βάση
- **Dynamic stability:** is like an inverted pendulum, utilizes gyroscope(s), i.e., ενεργό σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί γυροσκόπιο(α) και έχει καλό έλεγχο ταχύτητας των τροχών



Mobile Robot.

*Image source: Frontiers In Neurobotics.

Maneuverability = η ικανότητα ενός οχήματος/ρομπότ να εκτελεί ελιγμούς, δηλαδή να αλλάζει κατεύθυνση και θέση με ευκολία, μέσα σε περιορισμένο χώρο ή γύρω από εμπόδια.

- **Differential drive:** Υψηλή ευκινησία, στρίβει επιτόπου (pivot turn).
- **Omnidirectional wheels:** Πλήρης ελευθερία (μπρος-πίσω-πλάγια-διαγώνια). Ιδανικό για αποθήκες.
- **Ackermann steering:** Ρεαλιστικό για οχήματα δρόμου, αλλά απαιτεί μεγαλύτερη ακτίνα στροφής.

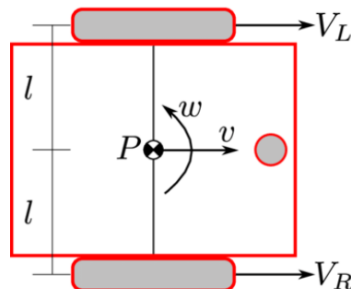
Ευστάθεια vs Ευκινησία: Συχνά αντικρουόμενα χαρακτηριστικά.

Controllability = η ικανότητα ενός ρομπότ/οχήματος να επιτυγχάνει μια επιθυμητή κατάσταση, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μέσα ελέγχου (τροχοί, ταχύτητες, γωνίες).

- Γενικά υπάρχει αντίστροφη σχέση με την ευκινησία (maneuverability).
 - Πολύ ευκίνητα συστήματα (π.χ. omni-wheels) → δύσκολος έλεγχος.
 - Λιγότερο ευκίνητα συστήματα (π.χ. Ackermann) → πιο σταθερός και ρεαλιστικός έλεγχος.
- Η ελέγξιμότητα εξαρτάται από τους μηχανικούς περιορισμούς (holonomic ή non-holonomic).
- Τα συμβατικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν Ackermann γεωμετρία, προσφέροντας καλή ελέγξιμότητα και σταθερότητα σε υψηλές ταχύτητες, αλλά περιορισμένη ευκινησία.

Διαφορικός μηχανισμός κίνησης:

- Two motorized wheels που κινούνται ανεξάρτητα.
- Ευέλικτο: μπορεί να στρίψει επιτόπου (pivot turn).
- Απλή κατασκευή, χαμηλό κόστος.
- Περιορισμένο σε υψηλές ταχύτητες ή σε ανώμαλο έδαφος.
- Δημοφιλές σε μικρά ρομπότ και εκπαιδευτικές πλατφόρμες (π.χ. TurtleBot, Lego Mindstorms).



Διαφορική οδήγηση: απλότητα και ευελιξία.

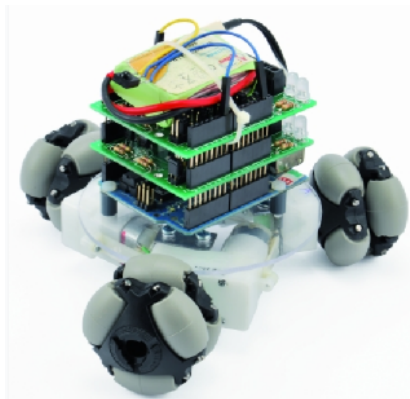
*Image source: ResearchGate.

Differential Drive vs Ackermann Steering

Differential Drive	Ackermann Steering
2 κινητήριοι τροχοί με ανεξάρτητα μοτέρ	4 τροχοί, μπροστινοί κατευθυνόμενοι, πίσω κινητήριοι
Δεν υπάρχει μηχανική σύνδεση (ο κάθε τροχός περιστρέφεται ανεξάρτητα)	Διαφορικό γρανάζι για συγχρονισμό τροχών του ίδιου άξονα
Υψηλή ευελιξία – στρίβει επιτόπου	Σταθερότητα και έλεγχος σε υψηλές ταχύτητες
Απλό, φθηνό, κατάλληλο για μικρά ρομπότ	Κατάλληλο για αυτοκίνητα και οχήματα δρόμου
Όχι ιδανικό για υψηλές ταχύτητες	Όχι ευέλικτο σε πολύ στενούς χώρους

Omnidirectional Wheels - Πανκαντευθυντικοί τροχοί

- Χρησιμοποιούν ειδικούς κυλίνδρους γύρω από την περίμετρο (Mecanum, omni, σφαιρικοί τροχοί).
- Επιτρέπουν πλήρη ολισθαίνουσα (holonomic) κίνηση σε όλες τις κατευθύνσεις.
- Ιδανικοί για περιορισμένους χώρους, π.χ. αποθήκες και εργοστάσια.
- Μειονεκτήματα: πολυπλοκότητα στον έλεγχο, μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος, μικρότερη πρόσφυση.



Omnidirectional Robot.

*Image source: OpenElectronics

Walking Wheels

- Συνδυάζουν την κύλιση με τη δυνατότητα «βηματισμού».
- Μπορούν να ξεπερνούν εμπόδια και ανώμαλο έδαφος καλύτερα από απλούς τροχούς, συγκεκριμένα έχουν εκπληκτική ικανότητα κίνησης σε εξαιρετικά ανώμαλα εδάφη, π.χ. για εξερεύνηση πλανητών
- Διατηρούν υψηλή αποδοτικότητα κύλισης σε ομαλές επιφάνειες
- Μειονεκτήματα: αυξημένη μηχανική πολυπλοκότητα και κόστος



Quadruped robot ANYmal on wheels.

*Image source: IEEESpectrum

Legged Locomotion

- Μεγάλη προσαρμοστικότητα σε ανώμαλο έδαφος.
- Απαιτεί πολλούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε πόδι
- Δύο βασικές κατηγορίες:
 - **Static walking** – σταθερότητα σε κάθε βήμα
 - **Dynamic walking** – εκμετάλλευση δυναμικών φαινομένων (π.χ. τρέξιμο, άλμα)
- Πιο κοντά στη βιολογική κίνηση ζώων και ανθρώπων.



Bipedal Robot, Agility Robotics.

*Image source: TheRobotReport

Legged Locomotion - Ευστάθεια και Αριθμός Ποδιών

- Όσο λιγότερα πόδια, τόσο πιο δύσκολη η ευστάθεια.
- Απαιτούνται τουλάχιστον 3 πόδια σε επαφή με το έδαφος για «στατική» ισορροπία.
- Δίποδα και τετράποδα χρειάζονται «δυναμική» ισορροπία.
- Έχουν δημιουργηθεί μηχανισμοί που κινούνται με ένα μόνο πόδι – η φύση δεν το έχει επιλέξει.

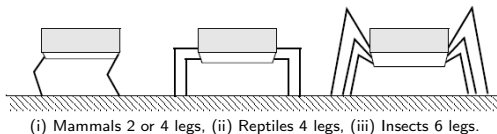


*Image source: Autonomous Mobile Robots, our textbook

Τι είναι τα **Gaits**:

Στη ρομποτική (όπως και στη βιολογία) το gait σημαίνει το μοτίβο / ρυθμός κίνησης των ποδιών ενός ρομπότ (ή ζώου) όταν περπατά, τρέχει ή κινείται. Είναι δηλαδή ο «συντονισμός» των ποδιών στο χρόνο και στον χώρο.

- **Walk** – πάντα ένα πόδι στο έδαφος (σταθερή κίνηση).
- **Trot** – διαγώνια ζεύγη ποδιών κινούνται μαζί.
- **Gallop** – υπάρχει φάση «πτήσης» χωρίς επαφή με το έδαφος.
- Στα πολύποδα (π.χ. εξάποδα) συχνά εφαρμόζεται το **tripod gait** — τρία πόδια πάντα σε επαφή για μέγιστη σταθερότητα.

Gaits - Δίποδα Ρομπότ

- Με δύο πόδια, μπορεί να βρεθεί κανείς στις παρακάτω καταστάσεις :

- 1) Και τα δύο πόδια κάτω
- 2) Δεξιό πόδι κάτω, αριστερό πάνω
- 3) Αριστερό πόδι κάτω, δεξιό πάνω
- 4) Και τα δύο πόδια πάνω



● Leg down
○ Leg up

- Βήμα θεωρείται η αλλαγή από μια κατάσταση σε μια άλλη και επιστροφή στην αρχική.
- Έτσι για τα δίποδα, έχουμε τις παρακάτω 6 διακριτές καταστάσεις :
- (Ισχύει γενικότερα : $N = (2k - 1)!$)

1 -> 2 -> 1 turning
on right leg

2 -> 3 -> 2 walking
running

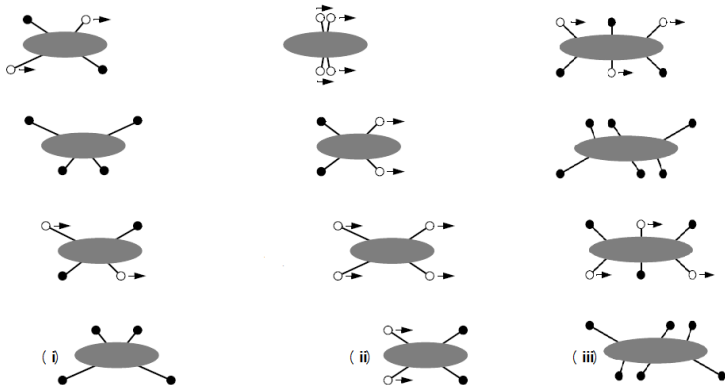
1 -> 3 -> 1 turning
on left leg

2 -> 4 -> 2 hopping
right leg

1 -> 4 -> 1 hopping
with two legs

3 -> 4 -> 3 hopping
left leg

Gaits - Τετράποδα & Εξάποδα Ρομπότ



Two gaits with four legs: (i) Left sequence depicts changeover walking (trot) and (ii) middle picture depicts bound (galloping).
Three gaits with six legs: (iii) Static walking with six legs.

*Image source: Autonomous Mobile Robots, our textbook

- **Multirotors (eg. drones)** – ευέλικτα, μπορούν να αιωρούνται, αλλά με περιορισμένη αυτονομία μπαταρίας
- **Fixed-wing** (π.χ. αεροπλάνο) – πολύ πιο αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις αλλά χρειάζονται χώρο για απογείωση/προσγείωση
- **VTOL (Vertical Take-Off and Landing)** – υβρίδια που συνδυάζουν πλεονεκτήματα και των δύο (ευελιξία + μεγάλη εμβέλεια)



Hybrid Propulsion Fixed-Wing VTOL Drone.

*Image source: Plymouth Rock Technologies Inc.

Flying Locomotion - Σύγκριση για Εφαρμογές Παράδοσης

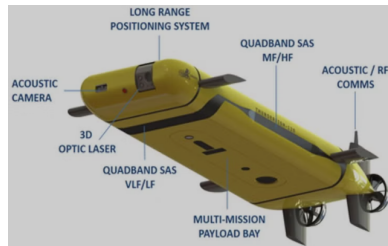
	Fixed-wing Drones	vs	VTOL Drones	vs	Multicopter Drones
					
 Structure	Fixed-wing design, requires runway for takeoff and landing.		Hybrid fixed-wing with vertical takeoff.		Multiple rotors, capable of vertical takeoff and agile movement.
 Performance	Great for long distances at high speeds but lacks vertical takeoff ability.		Efficient for medium to long distances, versatile in varied environments.		Suited for short distances, ideal for urban settings; limited range.
 Payload	Can carry light to medium loads, limiting delivery options.		Can handle larger loads, suitable for diverse delivery needs.		Best for small loads, struggles with heavy loads and long flight times.

The Ultimate Comparison: Fixed-Wing, Multicopters or VTOLs for Delivery Applications.

*Image source: RigiTech

Swimming Locomotion - Υποβρύχια Κίνηση

- **Propeller UUVs** — κίνηση με έλικες, παρόμοια με τα πλοία.
- **Biomimetic** — μιμούνται ζώα όπως ψάρια ή χελώνες, πιο αποδοτικά και πιο «φιλικά» στο περιβάλλον.
- **Challenges** — δυσκολίες επικοινωνίας (λόγω νερού), εντοπισμός θέσης, ενεργειακή αυτονομία.

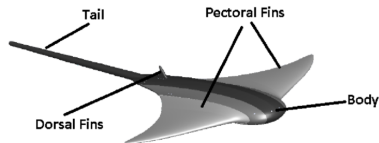


ThunderFish Autonomous Underwater Vehicle.

*Image source: Kraken Robotics

Bio-Inspired Swimming - Βιο-εμπνευσμένη Κίνηση

- Ρομπότ-τόνος, ρομπότ-χελώνα, ακόμα και ρομπότ-χέλι!
- Πλεονεκτήματα: **αποδοτικότητα**, **αθόρυβη κίνηση** (stealth), καλύτερη προσαρμογή σε περιβάλλοντα με θαλάσσια ζωή.
- Ιδανικά για αποστολές εξερεύνησης, παρακολούθησης και έρευνας.



Bio-inspired Underwater Vehicle with Flexible Propulsor.

*Image source: ResearchGate

Real-World Application: Warehousing

Αποθήκες:

- **Omni-wheels** για πλοήγηση σε στενούς διαδρόμους
- Αυτόματη μεταφορά και ταξινόμηση προϊόντων
- Θέματα **ασφάλειας** και συνεργασίας με ανθρώπινους εργαζόμενους



Omni Wheel Robot. "Tight Spaces? No Problem!"

*Image source: SEER Robotics

► Watch Example Video: Warehouse Robots

Real-World Application: Agriculture

Γεωργία:

- Χρήση tracks ή μεγάλων τροχών σε μαλακό έδαφος
- UAVs για αρακολούθηση καλλιεργειών
- Ρομπότ για συγκομιδή και ζιζανιοκτονία

► Watch Example Video: Agricultural Robots, aka Weeding Robot



Agriculture Robot: "BoniRob", Bosch GmbH.

*Image source: Wikipedia Commons

Real-World Application: Disaster Response

Αντιμετώπιση Καταστροφών:

- Ρομπότ με ερπύστριες ή πόδια για κίνηση σε ερείπια
- UAVs για επισκόπηση περιοχής και χαρτογράφηση
- Ανίχνευση και εντοπισμός θυμάτων

► Watch Example Video: Disaster Robotics



Rescue aka Life-Saving Robot.

*Image source: Baiji Robot

- **Υβριδικά ρομπότ** – συνδυασμός τρόπων κίνησης (π.χ. περπάτημα + πτήση).
- **Μαλακά και βιο-εμπνευσμένα ρομπότ** – ανθεκτικά, ασφαλή για συνεργασία με ανθρώπους, προσαρμόζονται στο περιβάλλον.
- **Ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες** – κρίσιμες για μακροχρόνιες αποστολές και βιώσιμη ανάπτυξη.
- **Νέες εφαρμογές** – έξυπνες πόλεις, υγεία, περιβάλλον, διάσωση.



Ρομπότ του μέλλοντος με πολλαπλές δυνατότητες..

*Image source: Futuristic Speaker

- **Τροχοί** – πιο αποδοτικοί ενεργειακά, κατάλληλοι για ομαλές επιφάνειες.
- **Πόδια** – ευέλικτα σε δύσκολα εδάφη, αλλά με υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα.
- **Πτήση και Κολύμβηση** – εξειδικευμένοι τρόποι κίνησης, ιδανικοί για συγκεκριμένες αποστολές.
- **Το πραγματικό περιβάλλον χρήσης καθορίζει τον σχεδιασμό.**

Η επιλογή τρόπου κίνησης δεν είναι θέμα «καλύτερου», αλλά «κατάλληλου» για το εκάστοτε πρόβλημα.

- Ποια μορφή κίνησης θα είναι πιο σημαντική στο μέλλον;
- Θα έπρεπε τα ρομπότ να μιμούνται τη φύση ή να ακολουθήσουν νέους δρόμους;