

Corso di Percezione Robotica (PRo)

Prof.ssa Cecilia Laschi

Fondamenti di Robotica Biomimetica



Barbara Mazzolai



Sommario

I Parte: INTRODUZIONE ALLA ROBOTICA
BIOMIMETICA

II Parte: NOMENCLATURA

III Parte: ROBOTICA vs BIOLOGIA

1° caso studio: robot bio-ispirati

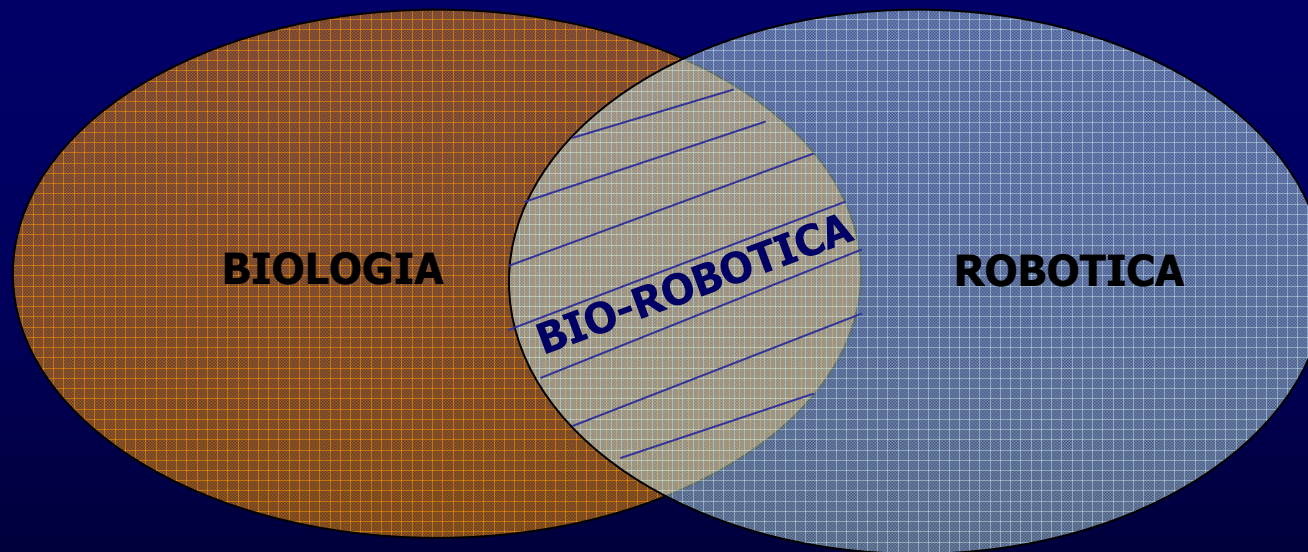
2° caso studio: algoritmo bio-ispirato

I PARTE

**INTRODUZIONE ALLA
ROBOTICA BIOMIMETICA**

Introduzione

Biorobotica può essere definita come
l'intersezione tra la biologia e la
robotica (Webb, B., 2001)



La scienza e tecnologia della progettazione e della realizzazione di sistemi robotici di ispirazione biologica

Robotica Bioispirata

- Esistono delle similitudini tra **robot** e **animali**, perché entrambi si muovono, mostrano sistemi comportamentali, hanno sensori e attuatori, richiedono un sistema di controllo che consenta loro di condurre task in un mondo dinamico e complesso;
- Robot bioispirati implementano soluzioni ispirate alla Natura, mostrando migliori prestazioni in termini di reattività, adattabilità, flessibilità, robustezza, stabilità;
- Robot bioispirati possono essere usati per validare modelli biologici e per condurre esperimenti difficili o impossibili da condurre su animali.

Obiettivi della Robotica Bioispirata

Analizzare e capire come funzionano i sistemi biologici e prendere **ispirazione** da questa conoscenza per progettare nuovi e migliori sistemi robotici

Obiettivi della Robotica Biomimetica

- Analizzare e studiare come funzionano i sistemi biologici e usare questi modelli per progettare nuovi e migliori sistemi robotici che **imitano** le funzionalità della loro controparte biologica
- Sviluppare piattaforme fisiche **equivalenti** ai sistemi biologici, al fine di testare sperimentalmente “modelli” di sistemi viventi e i loro principi funzionali

Epistemologia della Biorobotica

Proto-Cibernetica (J. Loeb 1905, 1912; H. S. Jennings 1906)

il 'meccanicismo' viene contrapposto al 'funzionalismo' e le macchine vengono utilizzate per lo studio degli organismi viventi (Cordeschi 1998).

I comportamenti complessi in realtà risultano dall'integrazione di comportamenti elementari, più semplici da osservare e che possono essere studiati implementandoli sulle macchine.

Cibernetica (Rosenblueth, Wiener, Bigelow 1943)

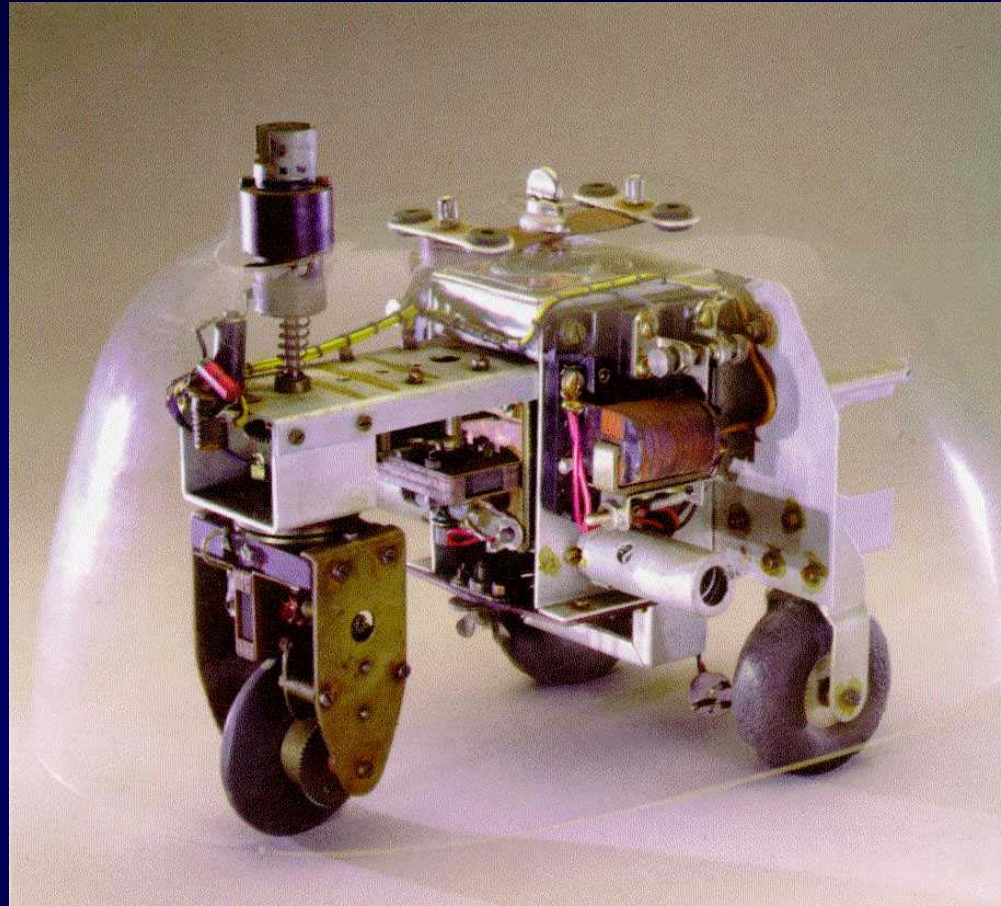


Le macchine divengono 'modelli materiali' da utilizzare per testare ipotesi scientifiche, ovvero producono scienza.

a) un modello materiale, quindi una macchina, permette di svolgere esperimenti in condizioni più favorevoli rispetto a quelli che si svolgerebbero con il sistema originario (biologico); b) il modello materiale permette di ottenere risultati che non potrebbero essere facilmente anticipati sulla base del solo modello formale; c) il modello materiale non è sempre 'biomimetico', dal momento che dovrebbe imitare la funzione o il comportamento naturale, e non necessariamente l'aspetto dell'organismo vivente di cui si studia il comportamento.

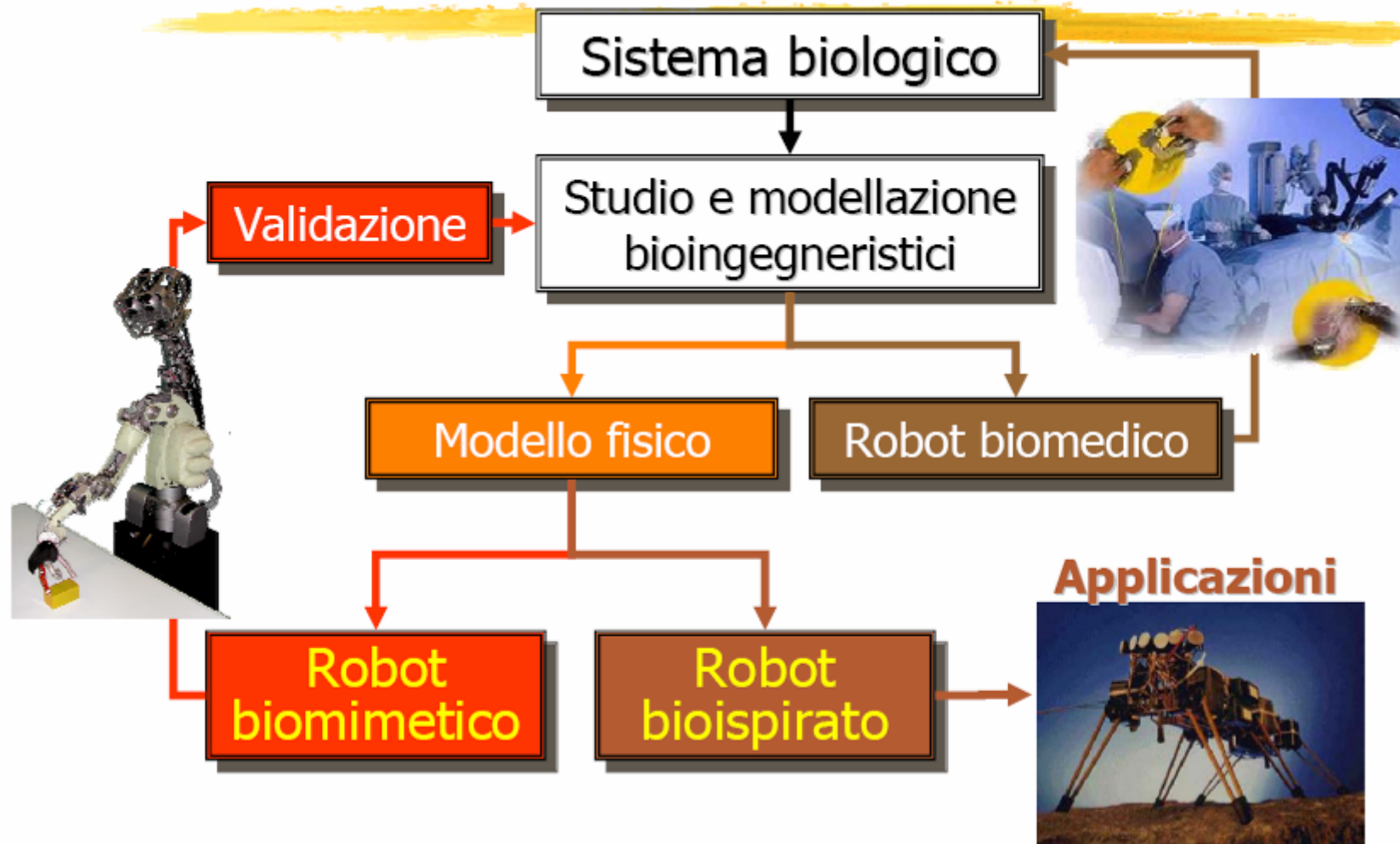
Roberto Cordeschi, *The Discovery of the Artificial: Behavior, Mind and Machines Before and Beyond Cybernetics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

Il "collo di bottiglia" tecnologico



Un esempio di robot cibernetico è la tartaruga di Grey Walter, 1950-1953, a cui alcuni autori imputano la nascita della Biorobotica contemporanea.

Robotica bio-ispirata



I robot e il modello biologico



Modelli biologici
per la
progettazione e
realizzazione di
robot bioispirati

Interfaccia tra
Biologia e
Robotica

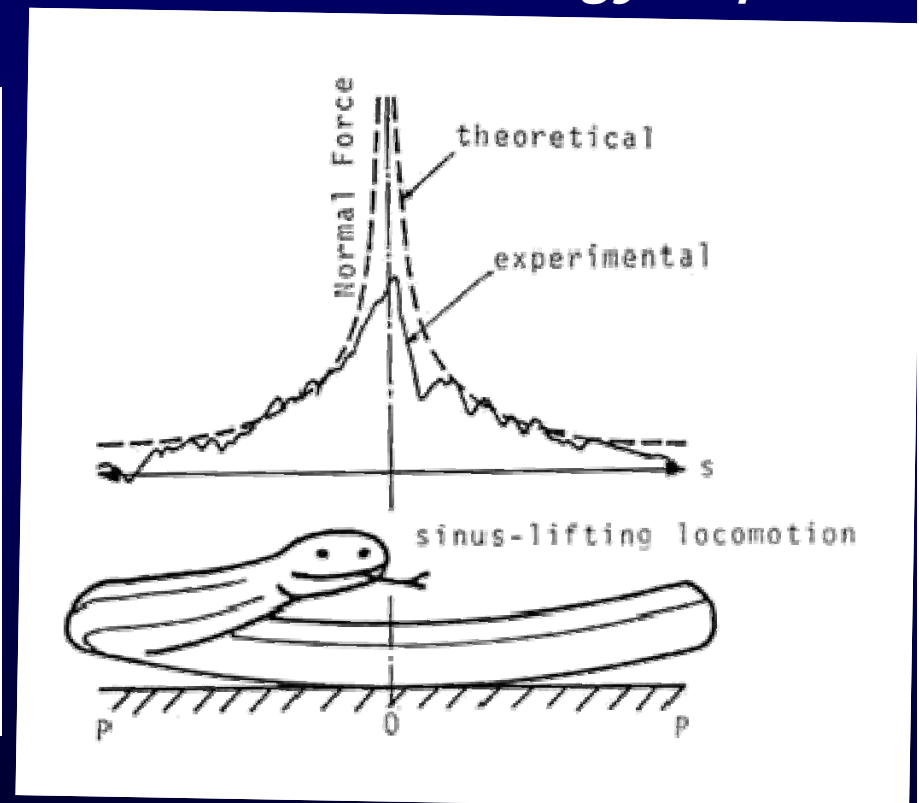
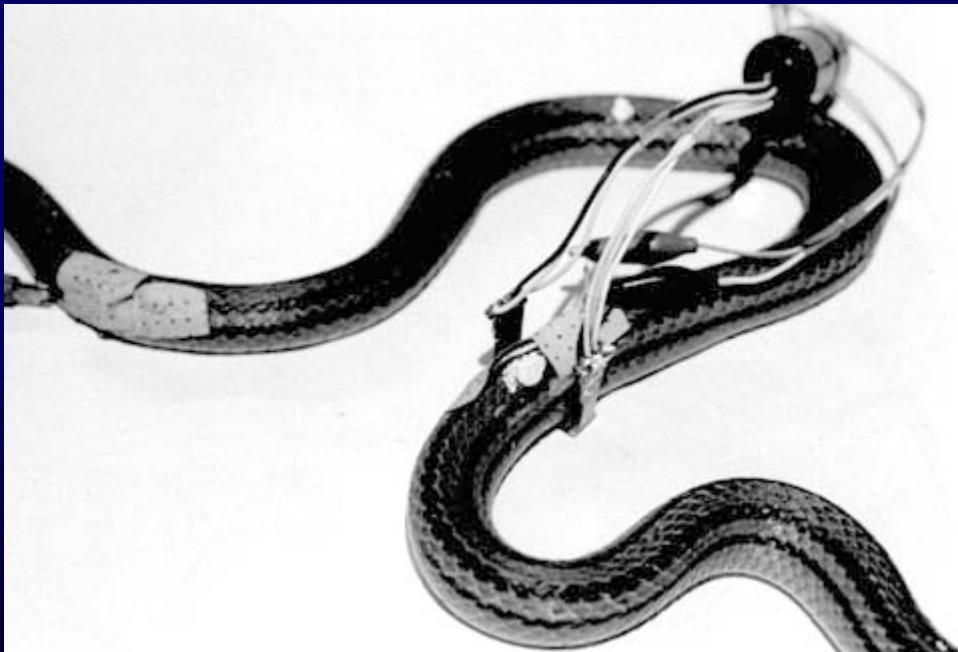
Robot come piattaforme fisiche
per validare modelli biologici e
spiegare il comportamento
dell'animale



Ricerche sui robot ispirati ai serpenti (TIT, Giappone)

"How is it that a snake can go forward without legs?
This question largely remained unanswered, and this required an
engineering analysis"

Shigeo Hirose, Tokyo Institute of Technology, Japan



Biomimetica

Tuttavia..

La selezione naturale non è Ingegneria



Conseguentemente, attingere idee dalla biologia può implicare vari livelli di ispirazione, dal copiare completamente l'apparenza e il funzionamento del sistema biologico in esame, ad una vaga ispirazione, in base a quanto il problema tecnologico si discosta dal modello biologico.

I più importanti risultati ingegneristici del 20° Secolo

1. Electrification
2. Automobile
3. Airplane
4. Water Supply and Distribution
5. Electronics
6. Radio and Television
7. Agricultural Mechanization
8. Computers
9. Telephone
10. Air Conditioning
and Refrigeration
11. Highways
12. Spacecraft
13. Internet
14. Imaging
15. Household Appliances
16. Health Technologies
17. Petroleum and
Petrochemical Technologies
18. Laser and Fiber Optics
19. Nuclear Technologies
20. High-performance Materials

Evoluzione vs Ingegneria

- Engineers often have final goals, whereas biological evolution does not.
- Organisms must do a multitude of tasks, whereas in engineering executing far fewer tasks will do.
- Trade-offs are the rule, severe constraints are pervasive and global optimality rare in biological systems.
- Biological evolution works more as a tinkerer than an engineer.
- Tinkerers never really know what they will produce and use everything at their disposal to make something workable.

Biological Inspiration

Biology



Passive, Dynamic,
Self-stabilization



RHex

UPenn, Boston Dynamics, Berkeley

Engineering



Electric Motor

**Use Principles and Analogies from
Biology when Advantageous. Integrate
with Best Human Engineering**

Cosa significa essere biologicamente ispirato?

Sono possibili molti **livelli di bioispirazione**, da una vaga somiglianza ad una stretta emulazione.

Nel caso della locomozione di robot ispirati ad insetti

- **Semplici esempi** di ispirazione biologica (ad es. osservare che gli animali usano le zampe anziché le ruote, o che l'uso di sei zampe nell'insetto fornisce maggiore stabilità);
- **Emulare**, in ogni dettaglio, una particolare specie di insetto;
- Studiare il numero e la configurazione dei **gradi di libertà della zampa** utilizzati dall'insetto per attraversare terreni accidentati e, sulla base degli effetti di torsione che questi gradi di libertà esercitano, selezionare la migliore geometria del robot;
- Esaminare in dettaglio i tipi di **informazioni sensoriali** che l'insetto usa per ben adattare i movimenti delle zampe;
- Cercare di emulare le differenti **strategie comportamentali** che l'insetto usa per attraversare terreni di varia natura;
- Cercare di basare la progettazione **dei controllori del cammino** per robot su zampe sui principi architettonici e funzionali dei circuiti nervosi implicati nel controllo del cammino dell'insetto.

Bioispirazione

Alcuni esempi di bioispirazione:

- Il Velcro è stato ideato nel 1941 da un ingegnere svizzero, George de Mestral, notando che gli uncini di una pianta (*Arctium lappa*) si attaccavano al pelo del suo cane.

• Un gruppo di ricerca (Bell Labs) ha scoperto che una spugna tropicale di Venere, costruisce strutture resistenti e estremamente fragili. Questa produzione di fili di fibre ottiche.

• "Adesivo modello Geco" è un sviluppo che si ispira alla capacità di arrampicarsi sui muri e camminare. L'adesivo sfrutta forze "van der Waals" intermolecolari – che il geco è in grado di sfruttare – presenti sui piedi.



) ha
o di
eriali
alla

io e
e di
ismo
attive
sete

Biomimetica

- DaimlerChrysler sta sviluppando un nuovo modello di veicolo a basso consumo energetico ispirato alla forma del corpo del pesce scatola, un pesce che si trova comunemente nei mari tropicali. La macchina bionica offrirà un 20% di consumo di carburante in meno e una riduzione superiore all'80% di emissione di NO₂.



Biomimetica

La Biomimetica è stata applicata ad un ampio numero di settori (cibernetica, intelligenza di sciame, neuroni artificiali, reti di neuroni artificiali, robotica, ecc.)

Generalmente sono tre le aree della biologia alle quali si ispirano le soluzioni tecnologiche:

- Replicare i metodi naturali di **fabbricazione di composti chimici** prodotti dalle piante e dagli animali
- Imitare i **meccanismi** presenti in Natura, come quelli del Velcro e "Adesivo modello Geco"
- Imitare i principi dei **comportamenti sociali** di organismi come le formiche, le api e i microorganismi.

II PARTE

NOMENCLATURA

Alcune definizioni

Nomenclatura

Tassonomia: un metodo sistematico di classificazione degli esseri viventi.

Classificazione: classificazione degli organismi in **taxa** (sing. taxon) basata sul grado di somiglianza correlata al grado evolutivo (filogenetica).

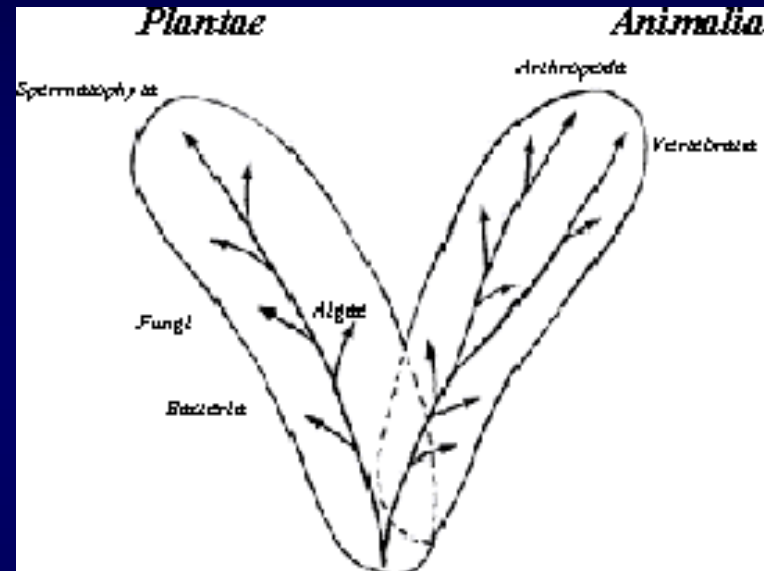
Sistematica: scienza interessata alla classificazione e allo studio degli esseri viventi in relazione ai legami naturali.

Cenni storici

La classificazione degli elementi di Aristotele



Aristotele
(384-324 a.C.)



Il **Regno Animalia** include organismi eterotrofi, dotati di movimento; il **Regno Plantae** include organismi autotrofi, sessili, in grado di fare fotosintesi.

La classificazione degli esseri viventi

Ernst Haeckel (1834-1919)

Classificazione in 3 regni: protista, plantae, animalia

Robert Whittaker (1969)

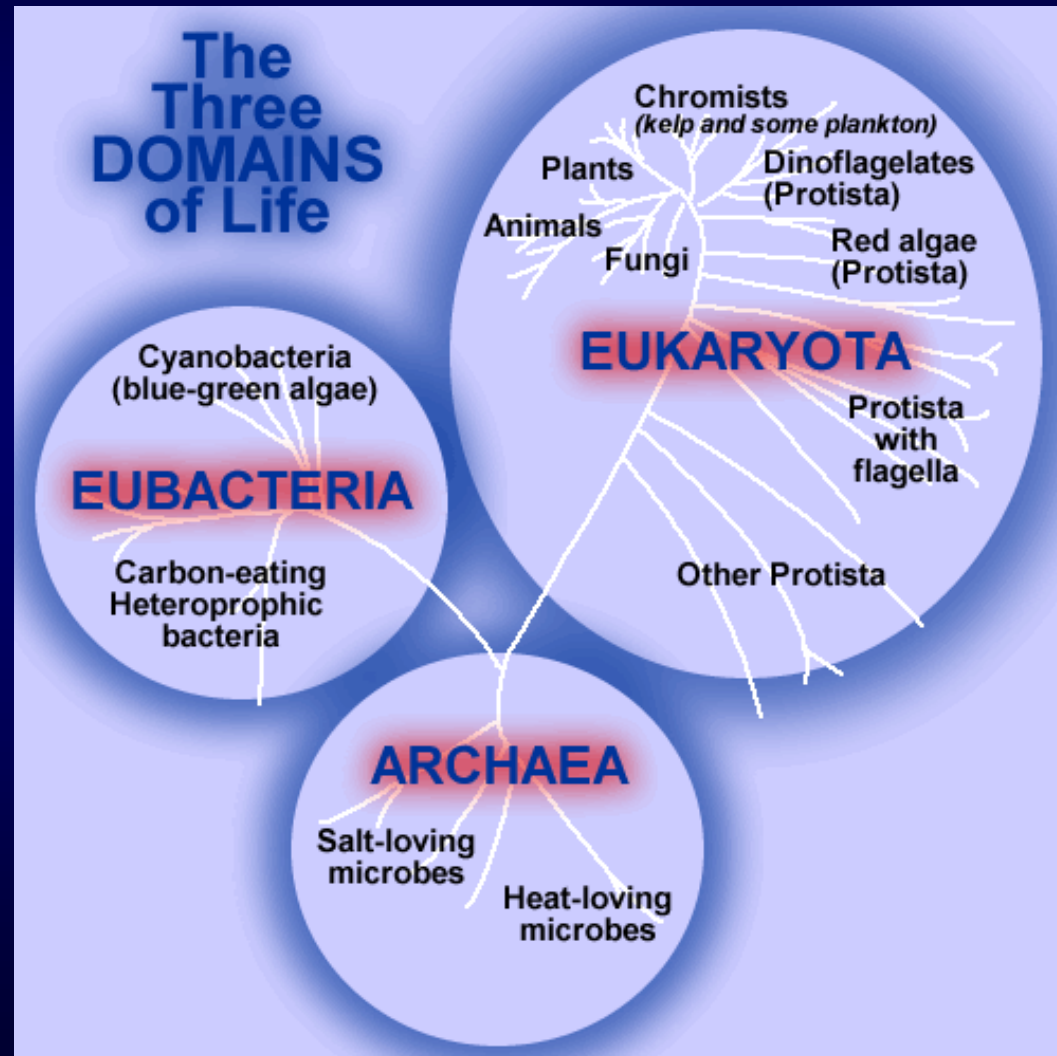
Classificazione in 5 regni:

KINGDOM	STRUCTURAL ORGANIZATION	METHOD OF NUTRITION	TYPES OF ORGANISMS	NAMED SPECIES	TOTAL SPECIES (estimate)
Monera	small, simple single prokaryotic cell (nucleus is not enclosed by a membrane); some form chains or mats	absorb food	bacteria, blue-green algae, and spirochetes	4,000	1,000,000
Protista	large, single eukaryotic cell (nucleus is enclosed by a membrane); some form chains or colonies	absorb, ingest, and/or photosynthesize food	protozoans and algae of various types	80,000	600,000
Fungi	multicellular filamentous form with specialized eukaryotic cells	absorb food	funguses, molds, mushrooms, yeasts, mildews, and smuts	72,000	1,500,000
Plantae	multicellular form with specialized eukaryotic cells; do not have their own means of locomotion	photosynthesize food	mosses, ferns, woody and non-woody flowering plants	270,000	320,000
Animalia	multicellular form with specialized eukaryotic cells; have their own means of locomotion	ingest food	sponges, worms, insects, fish, amphibians, reptiles, birds, and mammals	1,326,239	9,812,298

La classificazione degli esseri viventi

Recente classificazione

Tre domini: Archaea, Eubacteria, Eukaryota



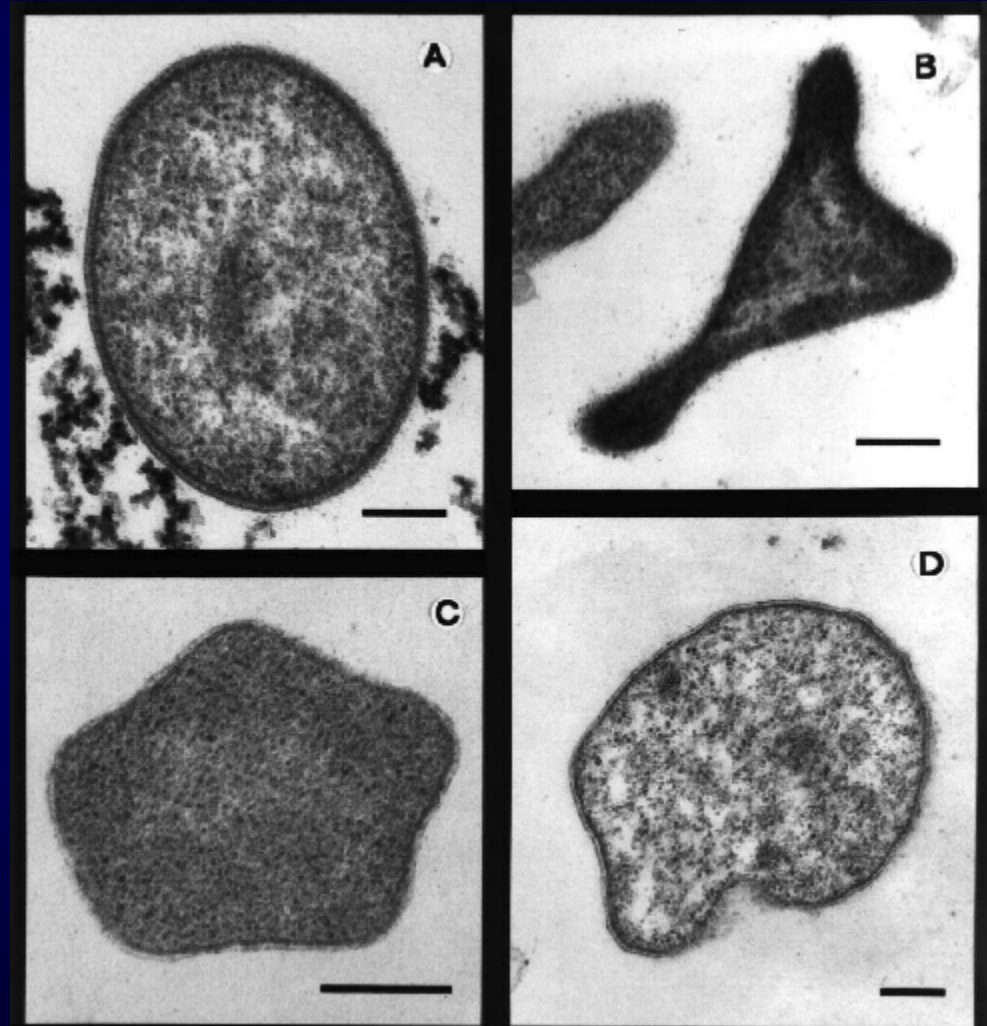
La classificazione degli esseri viventi

Archaea

Archaea sono microbi. Molti vivono in ambienti estremi. Questi sono chiamati **estremofili**. Altre specie non sono estremofile e vivono in ambienti con temperature e salinità ordinarie. Alcuni vivono nel nostro intestino. Originariamente Archaea venivano classificati come batteri, ma in realtà si tratta di esseri diversi e più semplici. Sono le forme di vita più antiche sulla Terra.

Archaea non richiedono luce del sole per fare la fotosintesi come le piante, né ossigeno. Archaea assorbono CO_2 , N_2 , o H_2S e rilasciano metano come gas di scarto.

Pianeti che hanno ambienti in cui gli archaea potrebbero sopravvivere sono Venere, l'ambiente presente su Marte in passato, Giove, Saturno, e la luna di Giove, Io.



La classificazione degli esseri viventi

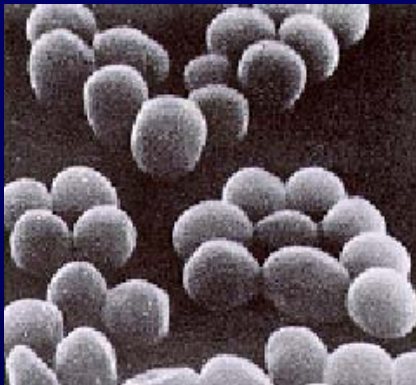
Eubacteria

Eubacteria sono cellule microscopiche procariotiche.

Cyanobacteria, chiamati anche alghe blu-verdi, sono Eubacteria che vivono sulla Terra da oltre 3 miliardi di anni.

Attraverso la fotosintesi, che produce ossigeno, miliardi di batteri sono stati e sono in grado di aggiungere ossigeno all'atmosfera della Terra.

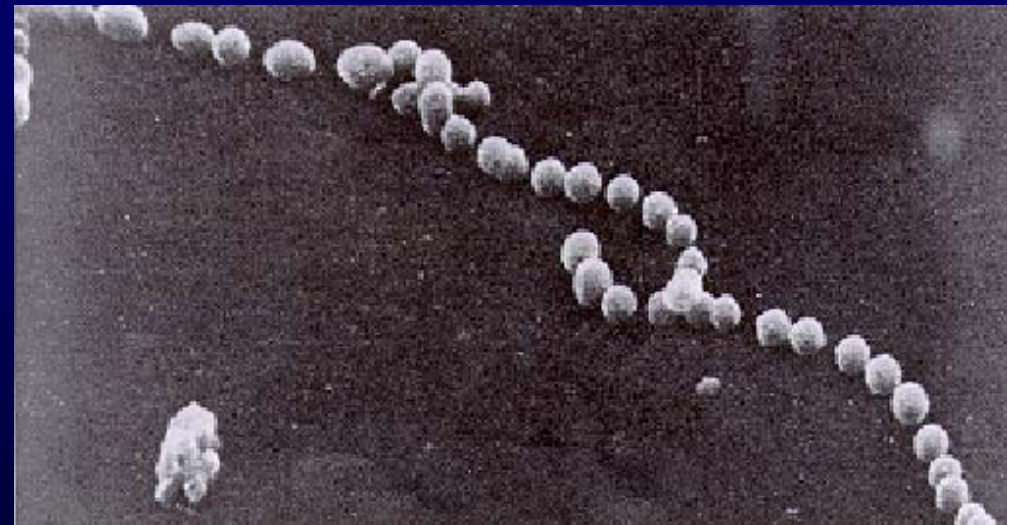
Alcuni Eubacteria possono causare problemi di salute nell'uomo, come infezioni al tratto respiratorio o inquinamento del cibo. Batteri come *E. coli* e *Salmonella* sono a volte presenti in carne poco cotta o uova.



Staphylococcus

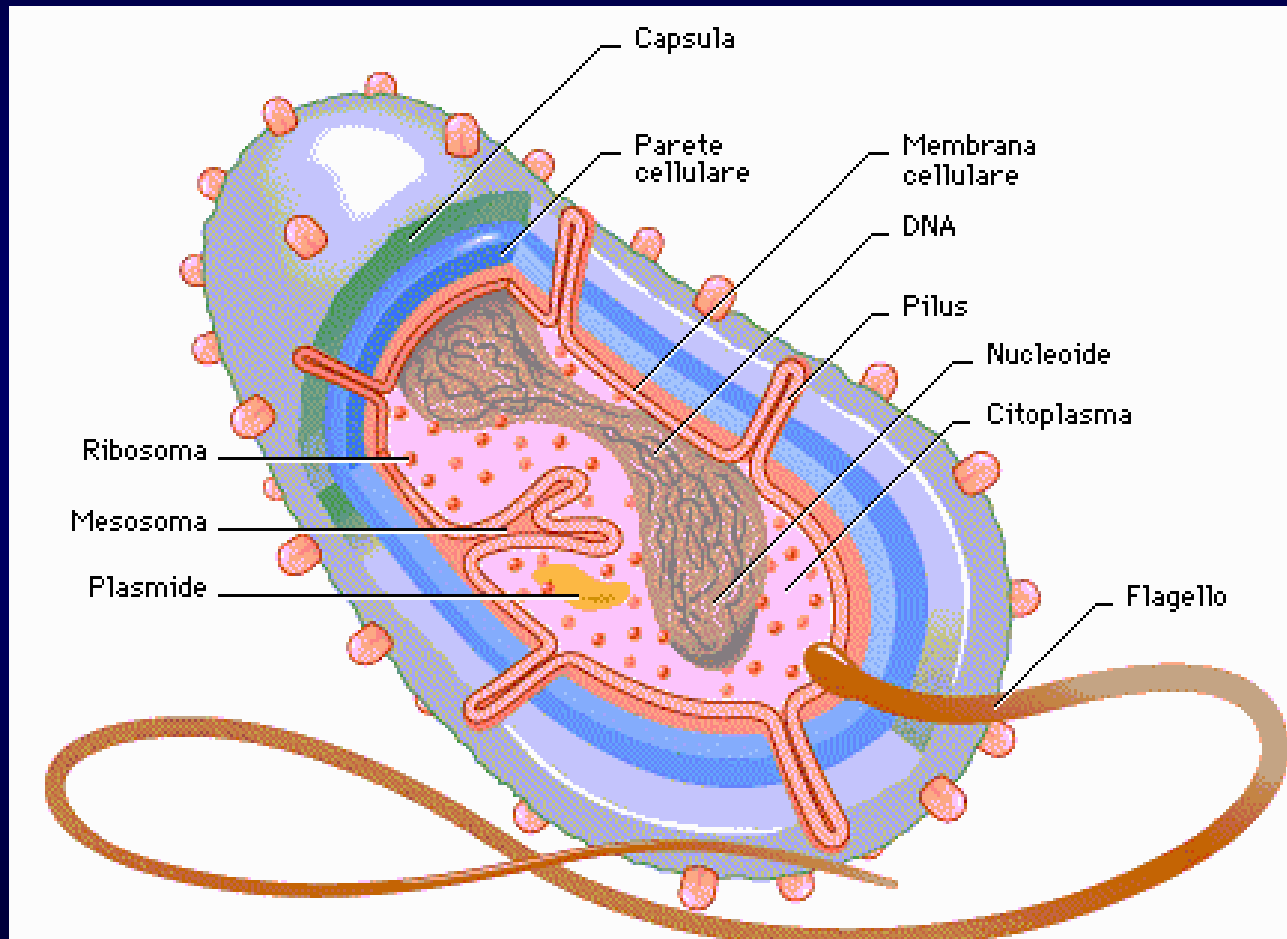


Escherichia coli



Streptococcus

Monera - Procariota



La classificazione degli esseri viventi

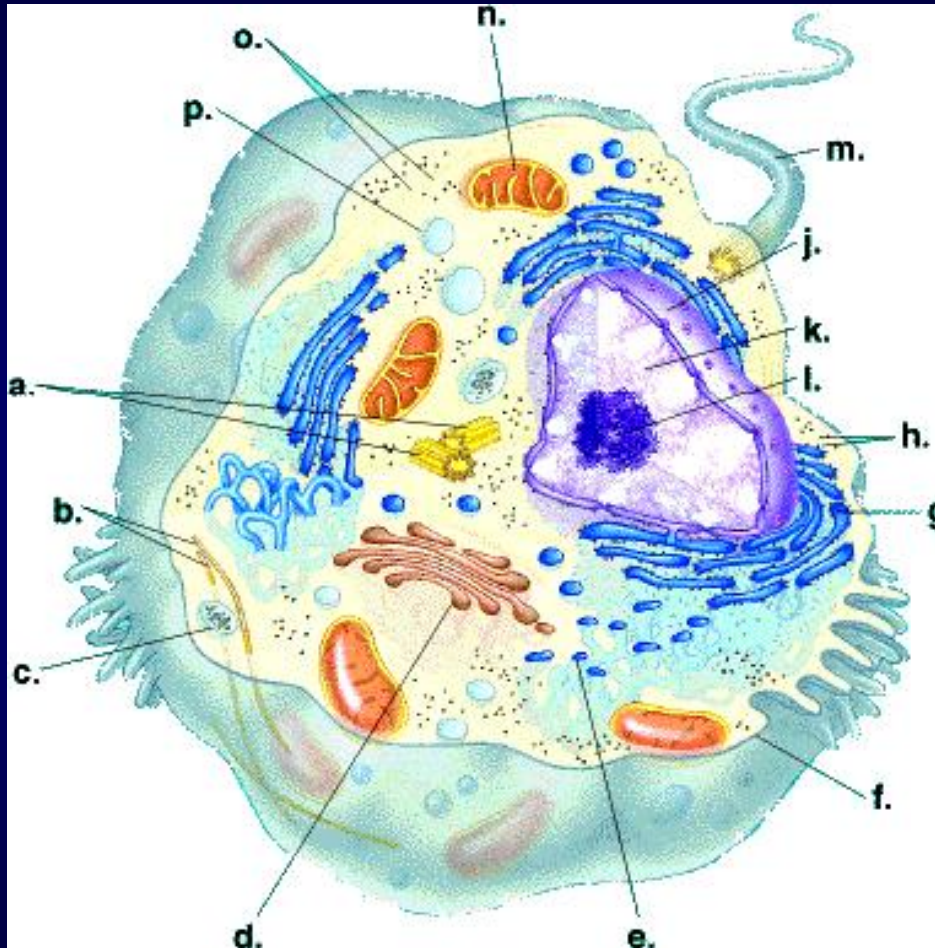
Eukaryota

Piante, animali, protisti e funghi appartengono tutti a questo dominio.

Tutti i membri del dominio Eukaryota hanno cellule eucariotiche. E' l'unico dominio che include cellule di questo tipo. Le cellule eucariotiche hanno una speciale parte che si chiama nucleo che contiene il materiale genetico all'interno dei cromosomi.



Cellula Eucariotica



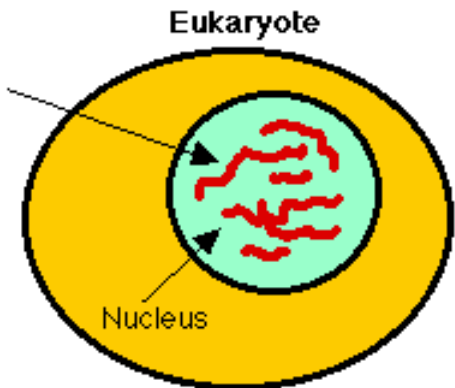
- a. Centrioles
- b. Intermediate filaments
- c. Lysosome
- d. Smooth endoplasmic reticulum
- e. Ribosomes
- f. Membrane cell
- g. Rough endoplasmic reticulum
- h. Golgi body
- i. Nucleolus
- j. Nuclear envelope
- k. Nucleus
- l. Flagellus
- m. Mitochondrion

- n. Cytosol
- o. Vacuole



DNA organized in a single chromosome.
No nucleus. No mitosis.

Dim. 0.2-10 μm



DNA organized in multiple chromosomes inside a nucleus.
Dim. 10-100 μm Mitotic division.

Differences between prokaryote and eukaryote

La classificazione degli esseri viventi

Plantae

Il Regno delle Piante contiene circa 300.000 diverse specie. Nel processo conosciuto come "fotosintesi", le piante usano l'energia solare per convertire acqua e anidride carbonica in zucchero e ossigeno. Poiché le piante sono in grado di produrre il cibo da sole, sono chiamate autotrofe e rappresentano il primo anello di molte catene alimentari.

Le prime piante comparvero sulla Terra circa 450 milioni di anni fa.

Da allora, le piante hanno colonizzato molti posti sulla Terra. Possono vivere in ambienti secchi o umidi, in posti caldi o freddi, ad altitudini basse o elevate. Gli uomini non possono vivere senza piante.



La classificazione degli esseri viventi

Animalia

Con oltre 2 milioni di specie, il Regno Animalia è il più ampio regno in termini di diversità di specie.

Oltre la metà delle specie animali appartengono al Phylum degli artropodi. Gli artropodi includono animali come i centopiedi, i granchi, gli insetti, i ragni, ecc.

Gli animali sono multicellulari (composti da molte cellule). In molti animali, queste cellule sono organizzate in tessuti, che formano organi e sistemi di organi. Tutti gli animali sono "eterotrofi", cioè ricavano il loro cibo ingerendo altri organismi, come piante, funghi, altri animali. Inoltre, tutti gli animali richiedono ossigeno per il loro metabolismo, e hanno la capacità di riprodursi sessualmente (sebbene alcuni siano in grado di riprodursi anche asessualmente). Durante il loro sviluppo dall'uovo fertilizzato all'adulto, tutti gli animali passano una serie di fasi embrionali come parti del loro ciclo di vita.

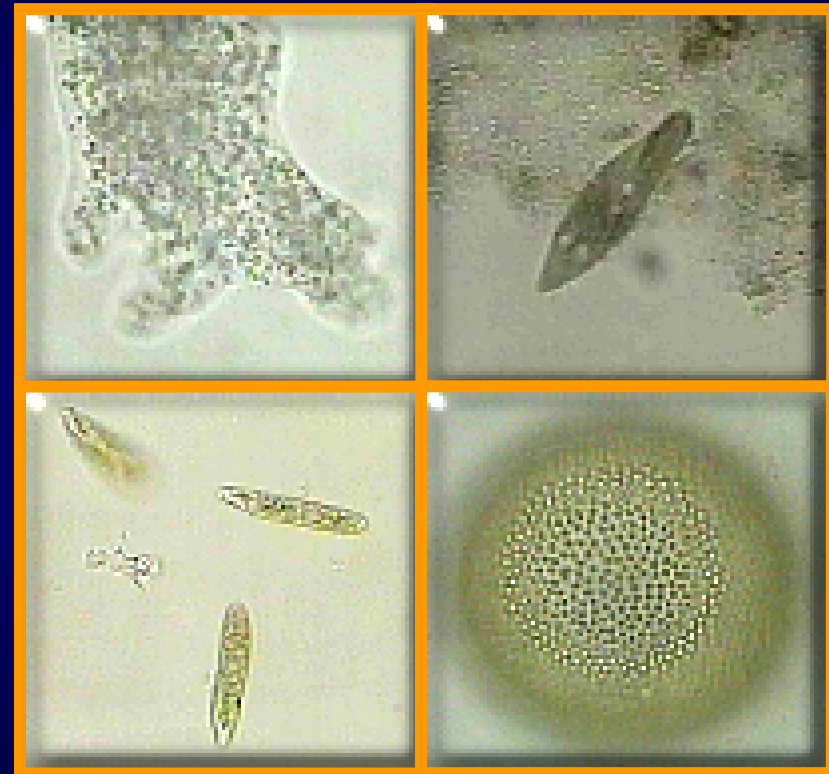


La classificazione degli esseri viventi

Protista

I membri del Regno Protista sono i più piccoli eucarioti. Alcuni membri del Regno sono unicellulari, altri sono coloniali, altri ancora multicellulari.

I protisti includono tutti quegli organismi che non sembrano appartenere a nessun altro Regno. Alcuni protisti sono in grado di fare fotosintesi come le piante, altri si muovono e si comportano come gli animali, ma i protisti non sono né l'uno né l'altro, e tanto meno sono funghi. I protisti sono raggruppati in tre categorie non ufficiali sulla base del tipo di nutrizione. Si parla infatti di Protisti come Protozoi, Piante o Funghi.



La classificazione degli esseri viventi

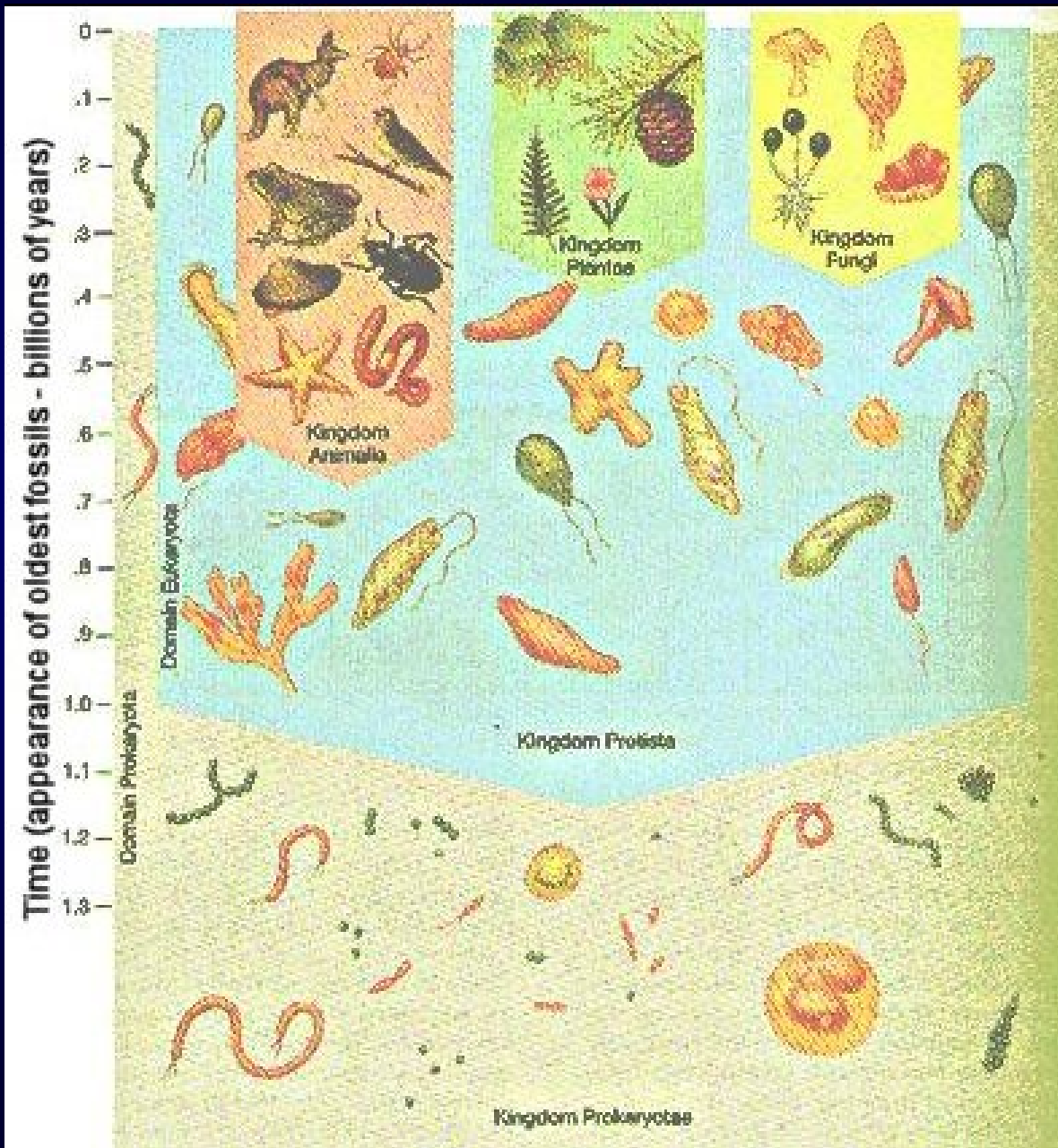
Funghi

Sebbene l'apparenza dei funghi possa ricordare quella delle piante, in realtà sono molto più simili agli animali. I funghi non sono capaci di fare la fotosintesi, così trovano il loro sostentamento da altre fonti. Molti funghi assorbono i nutrienti direttamente dal suolo. Molti altri si nutrono di organismi morti e in decomposizione e quindi hanno un importante ruolo nel riciclo dei nutrienti nei sistemi naturali. Altri ancora si nutrono di organismi viventi.

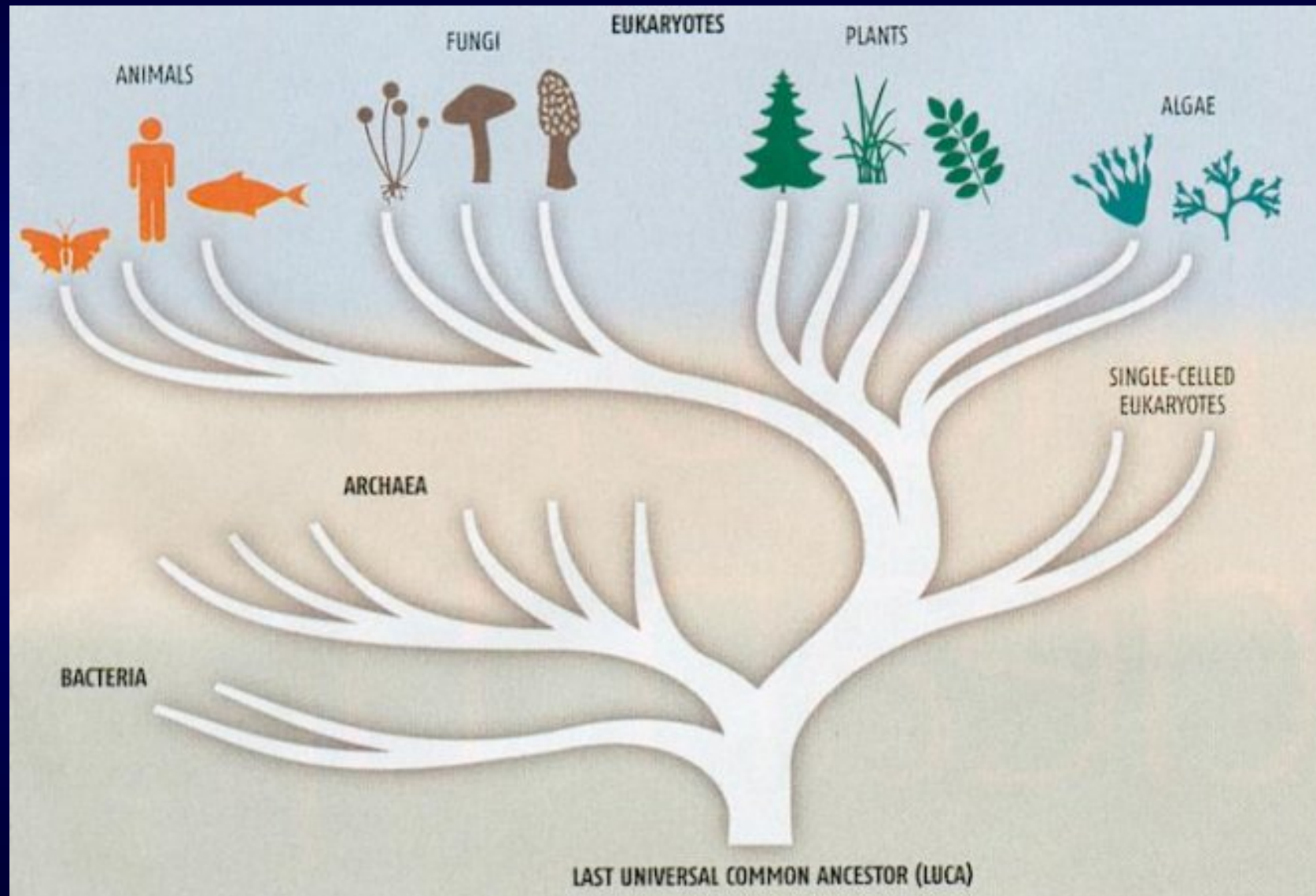
I funghi sono presenti in un'ampia varietà di forme e dimensioni, e hanno un grande valore economico. I lieviti sono importanti nei processi di lievitazione del pane e di fermentazione del vino e della birra. Molte medicine sono prodotte grazie all'aiuto di funghi, come, notoriamente, l'antibiotico Penicillina.



L'albero della Vita



L'albero della Vita



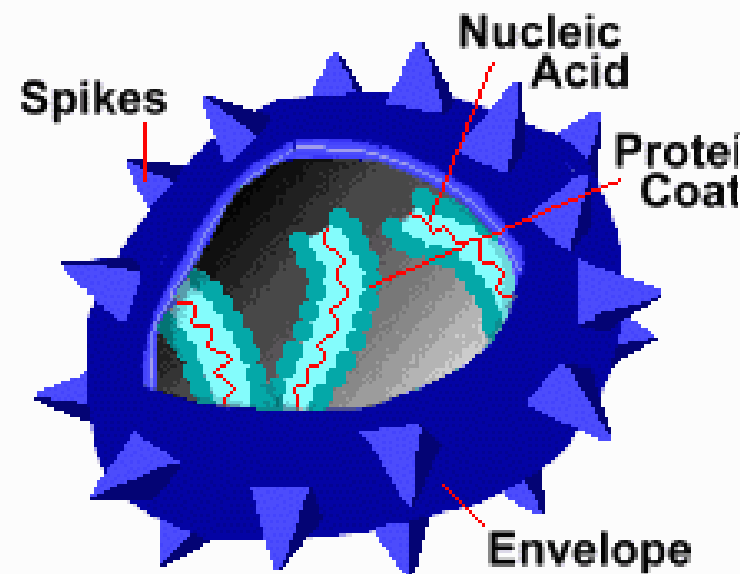
Virus

I virus sono esseri viventi?

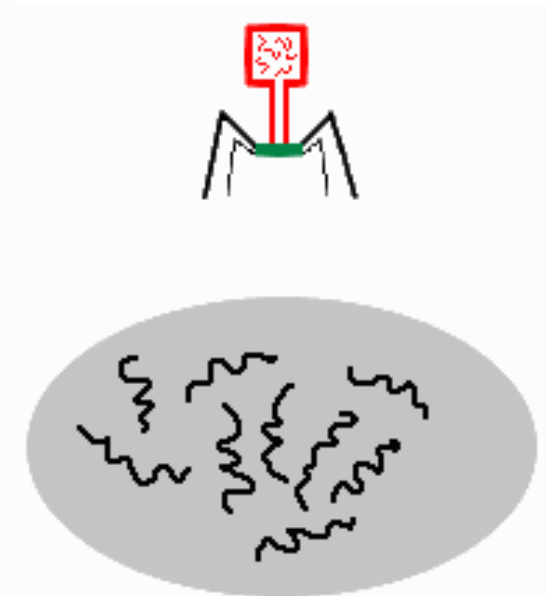
I virus sono parassiti e sono al limite tra la vita e la materia inerte. Hanno le stesse proteine e acidi nucleici che formano le cellule viventi, ma necessitano la presenza di queste cellule per replicarsi e diffondersi. I virus sono molto piccoli, con lunghezze nell'ordine dei nm. Tutti i virus sono fatti di materiale generico (DNA, o RNA), circondato da un rivestimento proteico.



Flu Virus



VIRUS



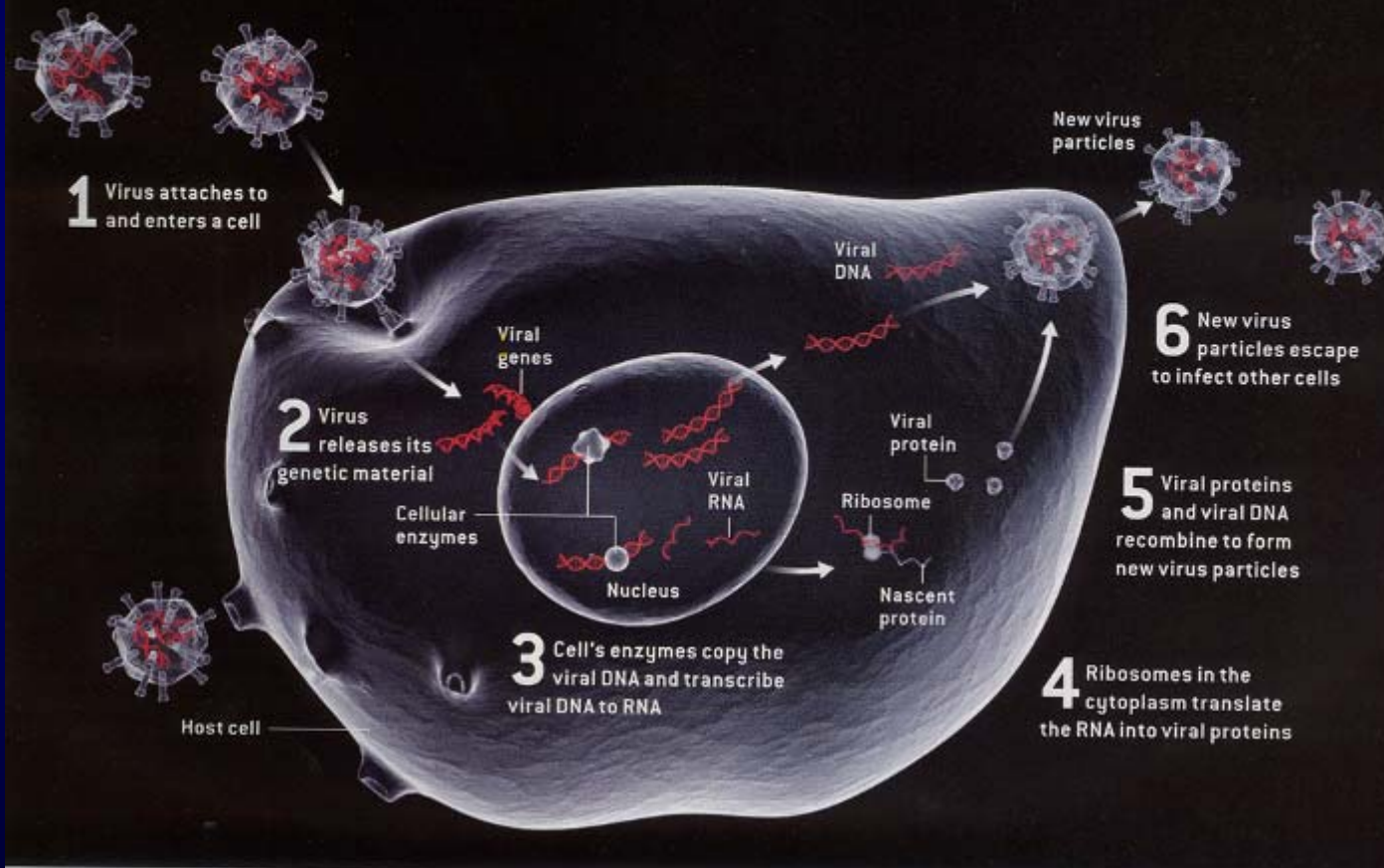
Bacteriophage

Virus

HOW A VIRUS REPLICATES

Whether or not viruses are technically "alive," they certainly exhibit a property of life—the ability to duplicate, albeit with the help of a host cell. This illustration shows one mode of viral reproduction, for a virus having double-stranded DNA

as its genetic material. The replication processes of phages (viruses that infect bacteria, which do not have nuclei), RNA viruses and retroviruses differ in some details but are variations on this theme.



La classificazione di Linneo



Carl von Linné (1707-1778)

Naturalista svedese (botanico)

Teoria creazionistica: il suo sistema di raggruppare e classificare gli organismi è tuttora valido (con molti cambiamenti).

Le specie esistono come entità metafisiche o "tipi" e gli individui sono copie del modello.

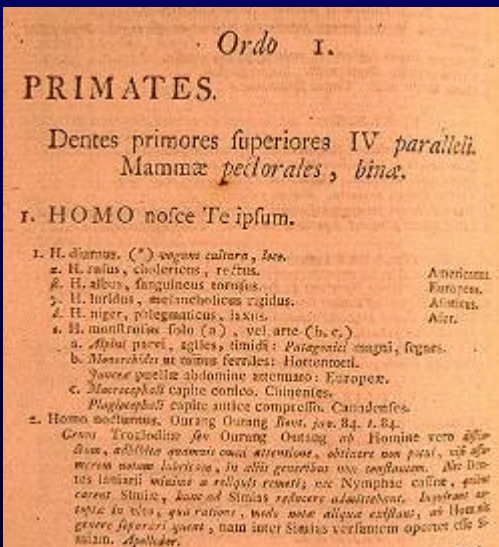
1735 Systema naturae

La classificazione naturale distribuisce le specie di organismi in entità reali, che possono essere raggruppate in categorie più ampie:

Specie, Genere, Ordine, Classe, Regno.

(la denominazione di **Phylum** è stata introdotta da *Georges Cuvier*)

Due Regni: Animalia e Plantae



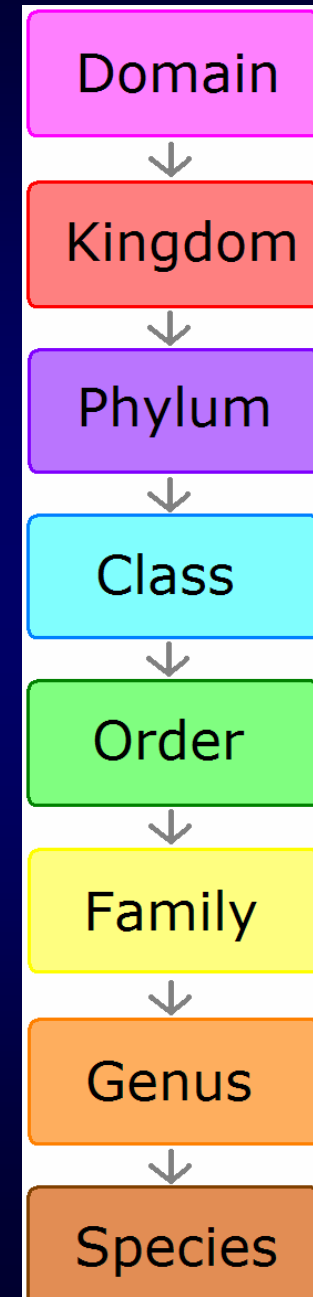
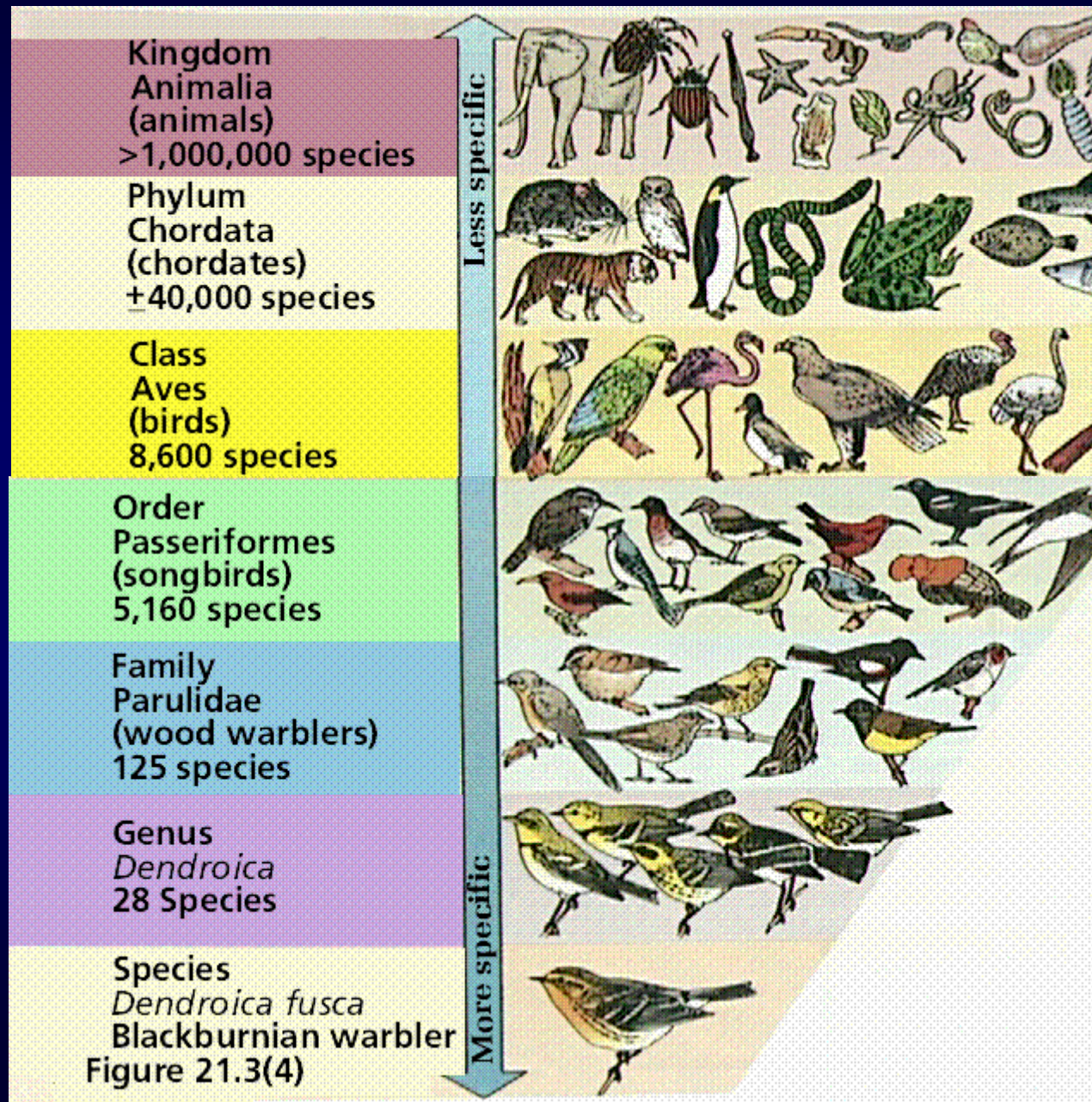
La classificazione di Linneo

Linneo aveva semplificato notevolmente la classificazione designando con un nome latino il **genere**, e con l'altro la **specie**. I due nomi formano il nome **binomiale** della specie (per es. *Homo sapiens*).

Categoria	Taxon	Caratteristiche
Regno	<i>Animalia</i>	Organismi pluricellulari che richiedono come cibo sostanze organiche complesse
Phylum	<i>Chordata</i>	Animali con cordone nervoso dorsale cavo, fessure branchiali faringee in qualche stadio del ciclo vitale
Classe	<i>Mammalia</i>	Piccoli nutriti mediante ghiandole mammarie, pelle ricoperta da pelo, temperatura del corpo elevata, cavità corporea divisa dal diaframma
Ordine	<i>Primates</i>	Animali arboricoli o loro discendenti, generalmente con dita e unghie appiattite, pollice opponibile, senso dell'odorato mediocre.
Famiglia	<i>Hominidae</i>	Faccia piatta, occhi frontali, visione a colori, locomozione bipede, stazione eretta
Genere	<i>Homo</i>	Cervello grosso, linguaggio, infanzia lunga
Specie	<i>Homo sapiens</i>	Mento prominente, fronte alta, peli sparsi sul corpo

Un particolare gruppo rappresenta un'unità tassonomica o taxon, e il livello dove è localizzato la categoria

La classificazione degli esseri viventi



La classificazione degli esseri viventi

La **Specie** è il livello tassonomico gerarchicamente più basso usato per definire gli organismi viventi. Due organismi appartengono alla stessa specie se sono in grado di accoppiarsi e di produrre prole fertile. Questa definizione ignora gli organismi più semplici (per es. i batteri) che si riproducono per fissione (asessualmente).

Il **Genere** è il primo raggruppamento di specie. Solo specie molto imparentate appartengono allo stesso genere. Il genere è come il cognome, mentre la specie è il nome. Così *Canis lupus*, il lupo, si distingue dal *Canis familiaris*, il cane domestico.

La classificazione degli esseri viventi

Specie morfologica

Una popolazione o un gruppo di popolazioni che differiscono morfologicamente da altre popolazioni.

Questo concetto di specie è molto criticato perché studi genetici recenti rivelano che popolazioni distinte geneticamente possono sembrare molto simili e, al contrario, grandi differenze morfologiche a volte esistono tra gruppi molto vicini geneticamente. Tuttavia, molte specie conosciute sono state descritte solo dal punto di vista morfologico.

Specie biologica

Un gruppo di popolazioni potenzialmente o realmente accoppiabili. Questa è generalmente la definizione più usata tra gli scienziati che lavorano con esseri viventi appartenenti a taxa elevati come mammiferi, pesci, uccelli, ma è poco utilizzabile per organismi che non si riproducono sessualmente. I risultati di esperimenti di accoppiamento possono o non possono riflettere ciò che accadrebbe se questi organismi si incontrassero nel loro ambiente, rendendo difficile valutare se i risultati di questi esperimenti possono essere applicati al mondo naturale.

La classificazione degli esseri viventi

Specie basata sul riconoscimento del compagno

Un gruppo di organismi che sono noti riconoscere un altro gruppo come potenziali compagni. Anche questa definizione si adatta solo agli organismi che si riproducono sessualmente.

Specie filogenetica / Evolutiva/ Darwiniana

Un gruppo di organismi che condividono un progenitore; una discendenza che mantiene la sua integrità rispetto ad altre discendenze nel tempo e nello spazio. Ad un certo punto, alcuni membri possono divergere gli uni dagli altri: quando questa divergenza diventa sufficientemente chiara, le due popolazioni apparterranno a due specie separate.

La classificazione degli esseri viventi

La **Famiglia** è un gruppo di organismi che hanno differenze ancora ridotte, per es. Equidae – cavalli e loro affini, *Hominidae*, uomini e ominidi.

L' **Ordine** è un gruppo di organismi, per es. Lepidoptera, Primates, ecc., che sebbene presentino significative differenze tra loro mostrano ancora un elevato grado di caratteristiche in comune (per es. tutti i Lepidoptera – farfalle e falene – hanno minute scaglie sulle loro ali, forme larvali dal corpo soffice ed erbivore –bruco-, parti della bocca dell'adulto modificate per cibarsi di nettare, ecc.).

La classificazione degli esseri viventi

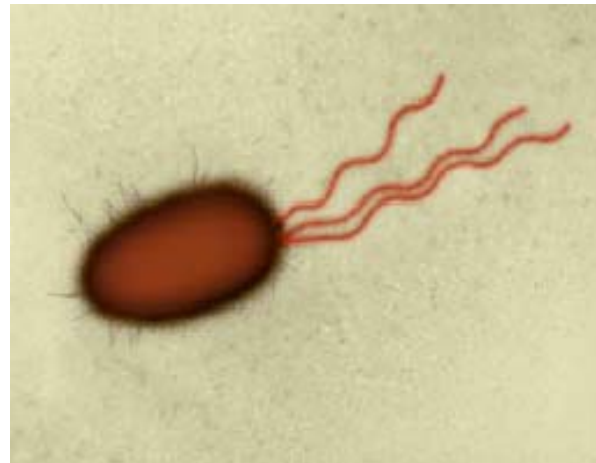
La **Classe** è il gruppo di organismi, ad es. Mammalia, Reptilia, Gastropoda, Insecta, ecc., che contiene un grande numero di diverse discendenze, ma che condividono ancora alcune caratteristiche (per es. nel caso di mammiferi, animali a sangue caldo, pelo, ghiandole mammarie nelle femmine; sei zampe e tre parti del corpo nel caso di insetti, ecc.).

Il **Phylum** è il maggiore gruppo di organismi, definito secondo il numero di parti del corpo condivise da questo gruppo, per es. Chordata (animali con notocorda - vertebrati e altri), Arthropoda (animali con esoscheletro articolato), Mollusca (animali con conchiglia secreta dal mantello), Angiosperma (piante con fiore), ecc.

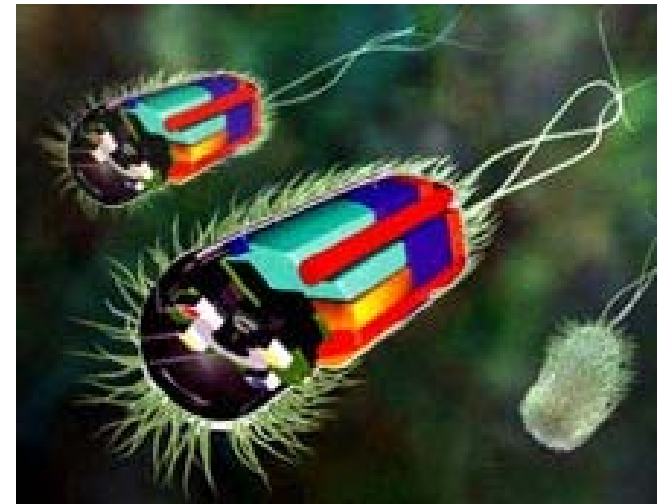
La classificazione in **Regni** è basata sull'organizzazione cellulare e sulle modalità nutrizionali.

III PART
BIOROBOTICS
MIMICKING BIOLOGY

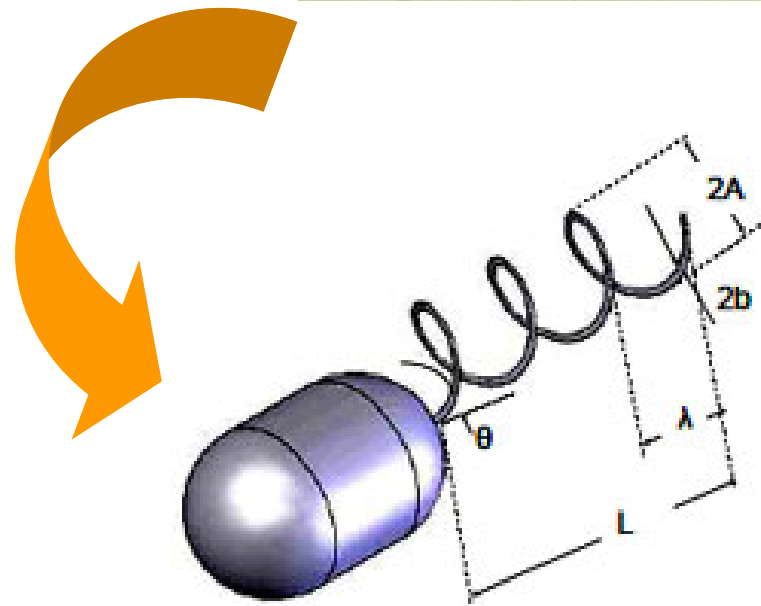
Monera - Procariota



Transmission Electron Microscopy (TEM) image of *E. Coli* (x3515)



Future Micro Swimming Robots for medical applications



Schematic of the swimming microrobot propelled by flagellar motion

Behkam and Sitti, 2004 –
Carnegie Mellon University

Swimming Microrobots

- ✓ Swimming microrobots by Fukuda *et al.*, 1994 (Nagoya University)
 - 50 mm in length, 6 mm in width. Actuated by PiezoPZT($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) (resonance condition)
- ✓ Swimming microrobots by Guo *et al.*, 2001 (Kagawa University)
 - 45 mm long, 10 mm wide, using ionic conductive polymer film (ICPF) actuators that produce undulatory motion.



PROBLEMS



FURTHER MINIATURIZATION OF THE FISH-LIKE BIOMIMETIC DEVICES
WILL MAKE THEM INEFFECTIVE BECAUSE THEY RELY ON INERTIAL
FORCES FOR PROPULSION

(AMBIENT WITH VERY SMALL REYNOLDS NUMBERS)

Swimming Microrobots

✓ Micro-swimming robots by Ishiyama et al., 1999 (Tohoku University); McNeil et al., 1995, University of Virginia; Mathieu et al., 2003, Ecole Polytechnique de Montreal

- micro-swimming robots rotated and moved by using Magnetic Resonance Imaging (MRI) for magnetic propulsion



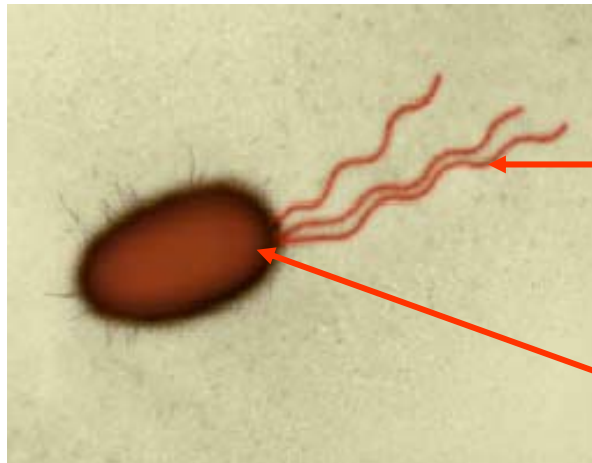
Advantages: No required on board power source or controller.

PROBLEMS



1. Dangerous for patients with pacemakers, metal implants, etc.
2. Considering the low speed of the robot, patients have to stay in the magnetic field for longer than the time allowed by FDA regulations
3. Magnetic gradient fields can produce eddy currents in the patient and cause local heating
4. Control and positioning of the magnetically propelled robot is another important unsolved problem

Monera - Procariota



Filament extended into the external medium

Long ~ 10 μm, thin ~ 20 nm

Reversible rotary motor embedded in the cell wall

E. coli size and speed yields very low Reynolds number regime ($Re = 10^{-4}$)

Helix – 2.5 μm pitch, 0.5 μm diameter

Speed ~ 100 Hz

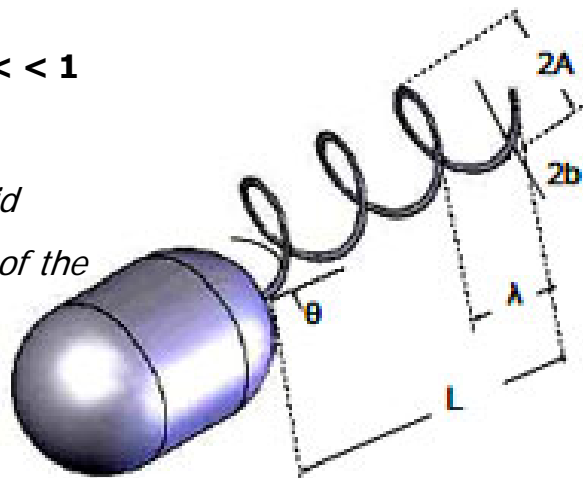
$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} \ll 1$$

ρ = density of the fluid

μ = dynamic viscosity of the fluid

V = flow velocity

l = dimension of the object



Dimension of the swimming microrobot

Half of the thickness of the flagellum, b	23 μm
Amplitude of the flagellum, A	3.3 mm
Wavelength of the flagellum, λ	3.8 mm
Length of the flagellum, L	2.3 cm

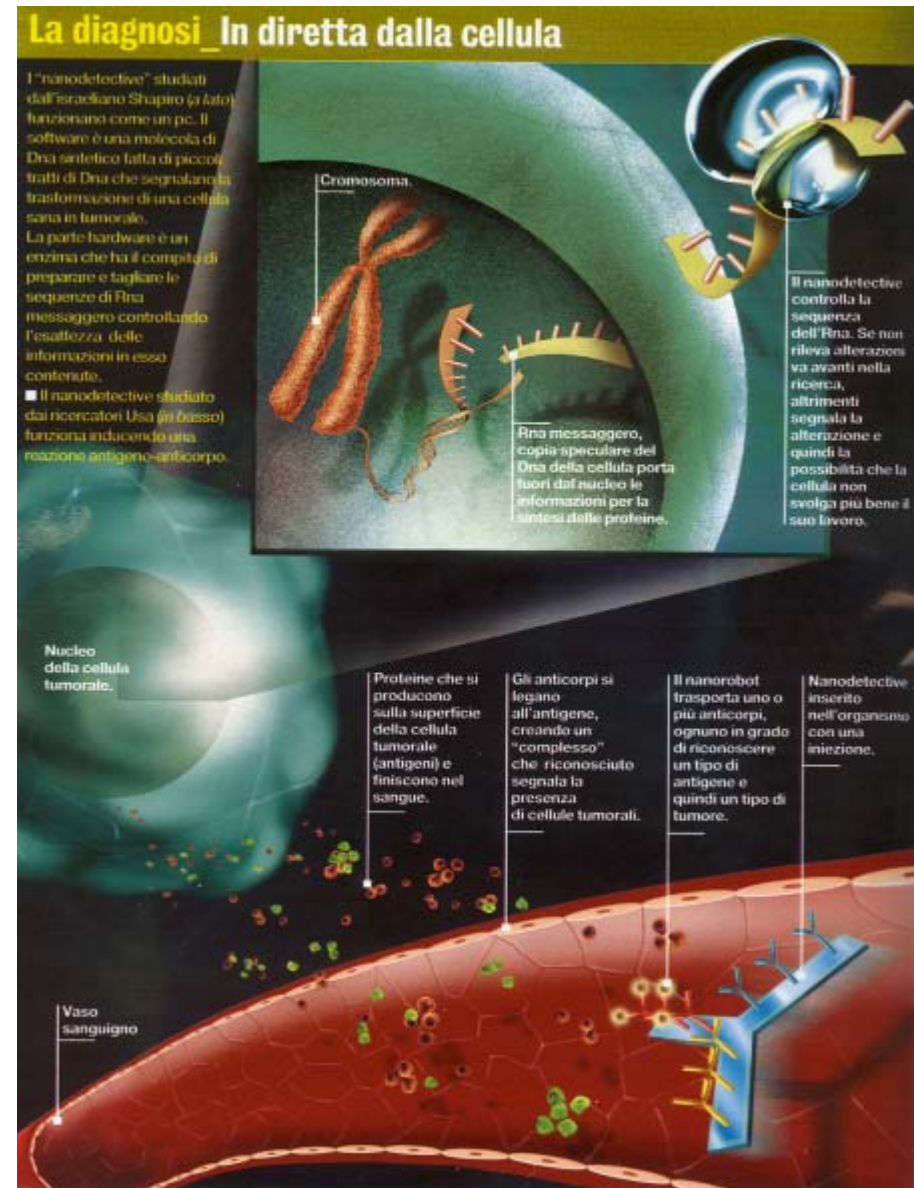
Robotic Virus



Robotic Bacteriophage



Bacteriophage



The Animal Kingdom



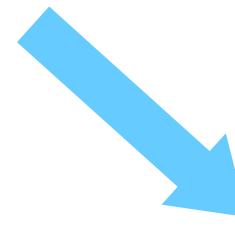
Kingdom Animalia comprises multicellular organisms developed from embryos (metazoa). Gametes grow within sexual multicellular organs. They have eucaryotic cells with a nucleus, a cell membrane, and organelles such as mitochondria. They are heterotrophic (obtain food from external sources) and utilize oxygen for energy catabolism.



INVERTEBRATES

95%

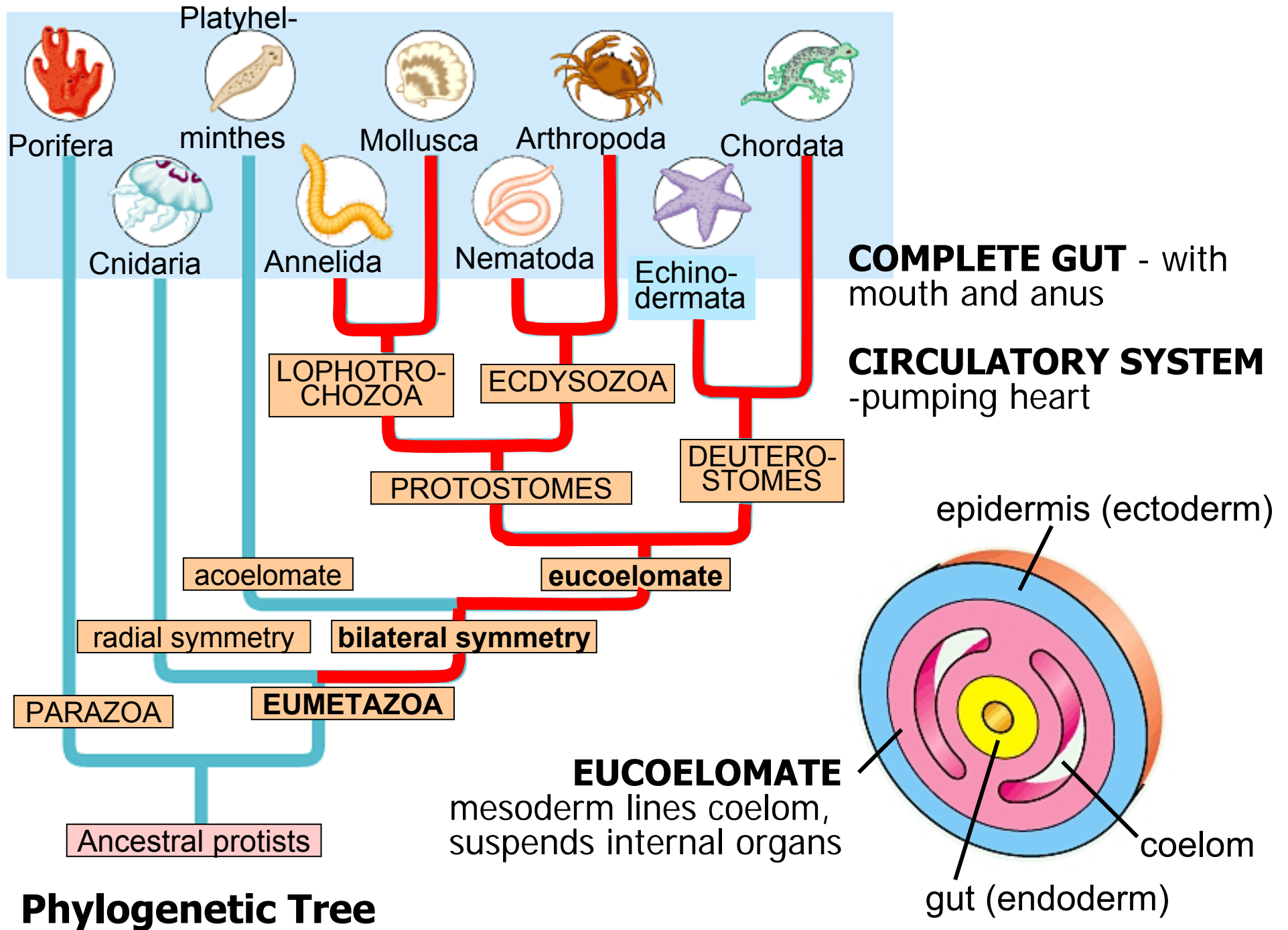
(Animals without spinal cord)



VERTEBRATES

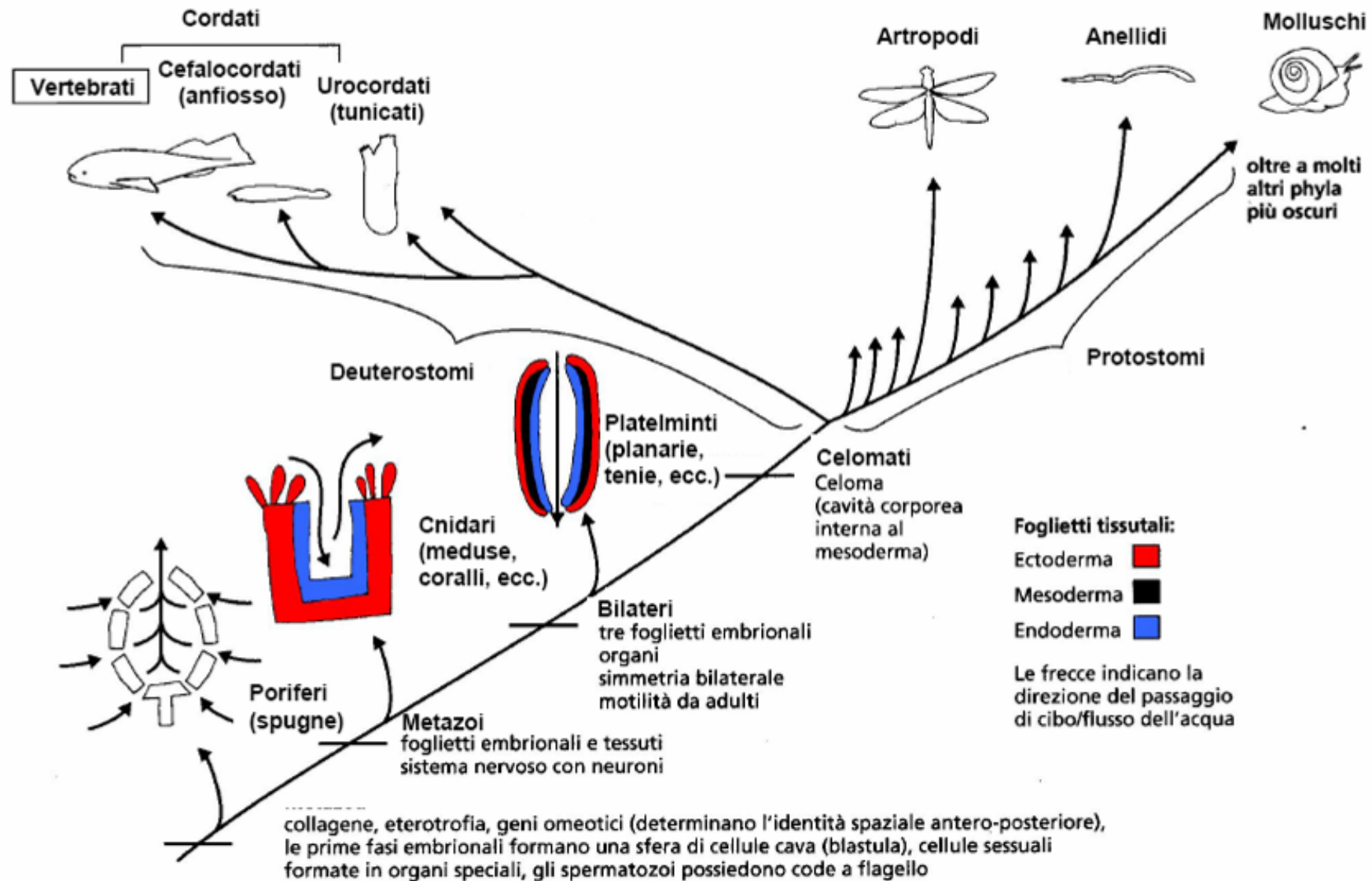
5%

(Animals with spinal cord)

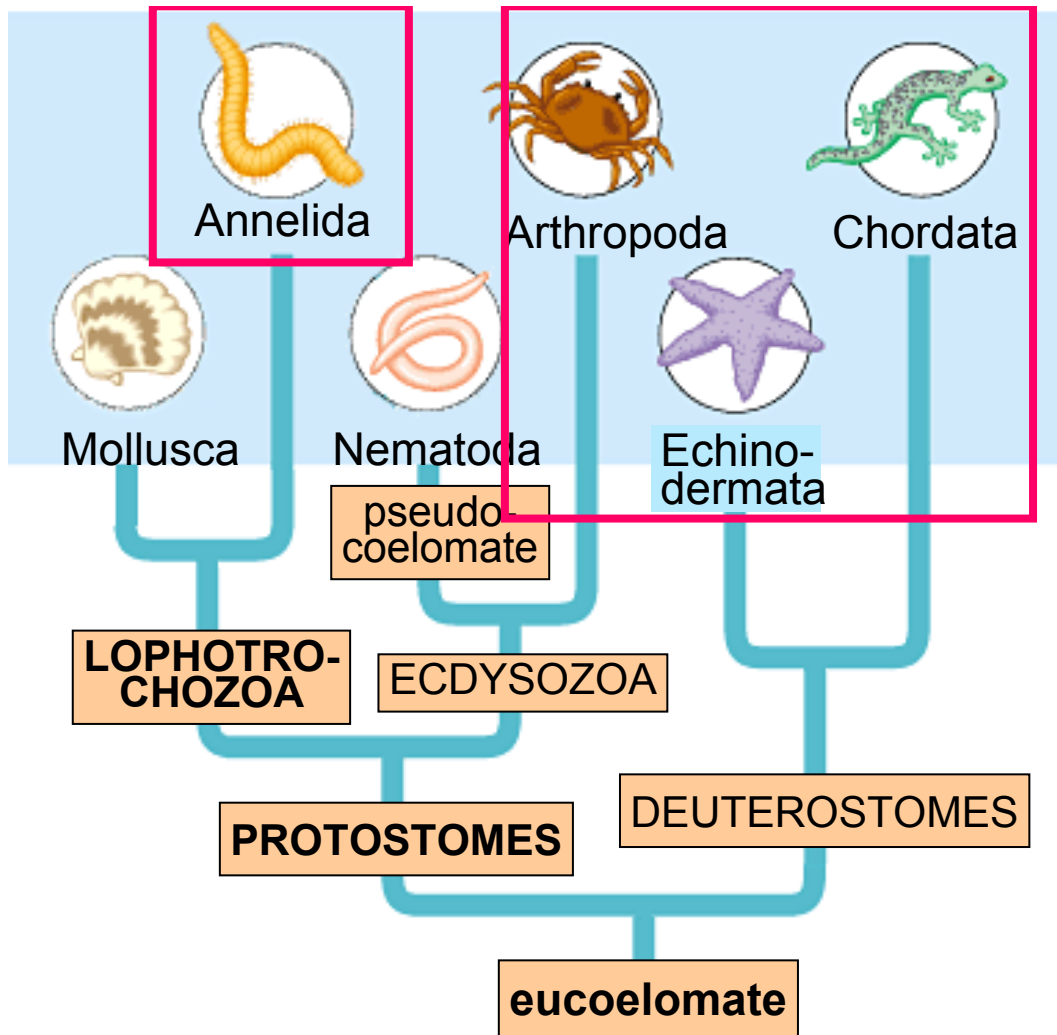


Phylogenetic Tree

Phylogenesis of Animalia Kingdom



The sequence of events involved in the evolutionary development of a species or taxonomic group of organisms



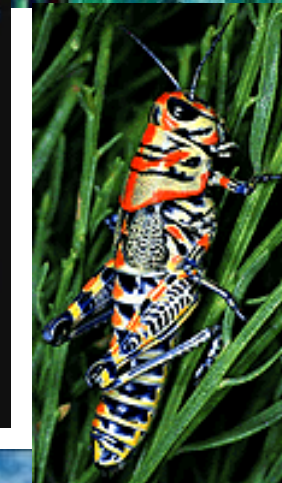
SEGMENTATION
 "serial repetition of body parts"



Chordata

Phylum Arthropoda

✓ Subphylum Trilobito



Phylum Arthropoda

Origin



Primitive stock of polychaete or common ancestor for both groups



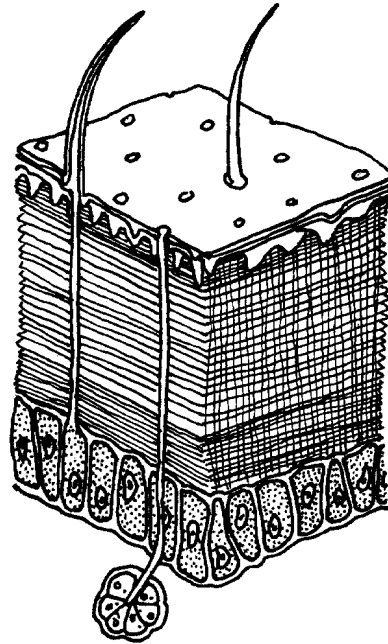
Analogy between Arthropoda and Annelida

- ✓ metameric animals
- ✓ as primitive condition, each segment has a pair of appendices
- ✓ nervous systems constitute in both groups by a front dorsal brain, followed by a ventral nervous cord with ganglionic swellings in each segment

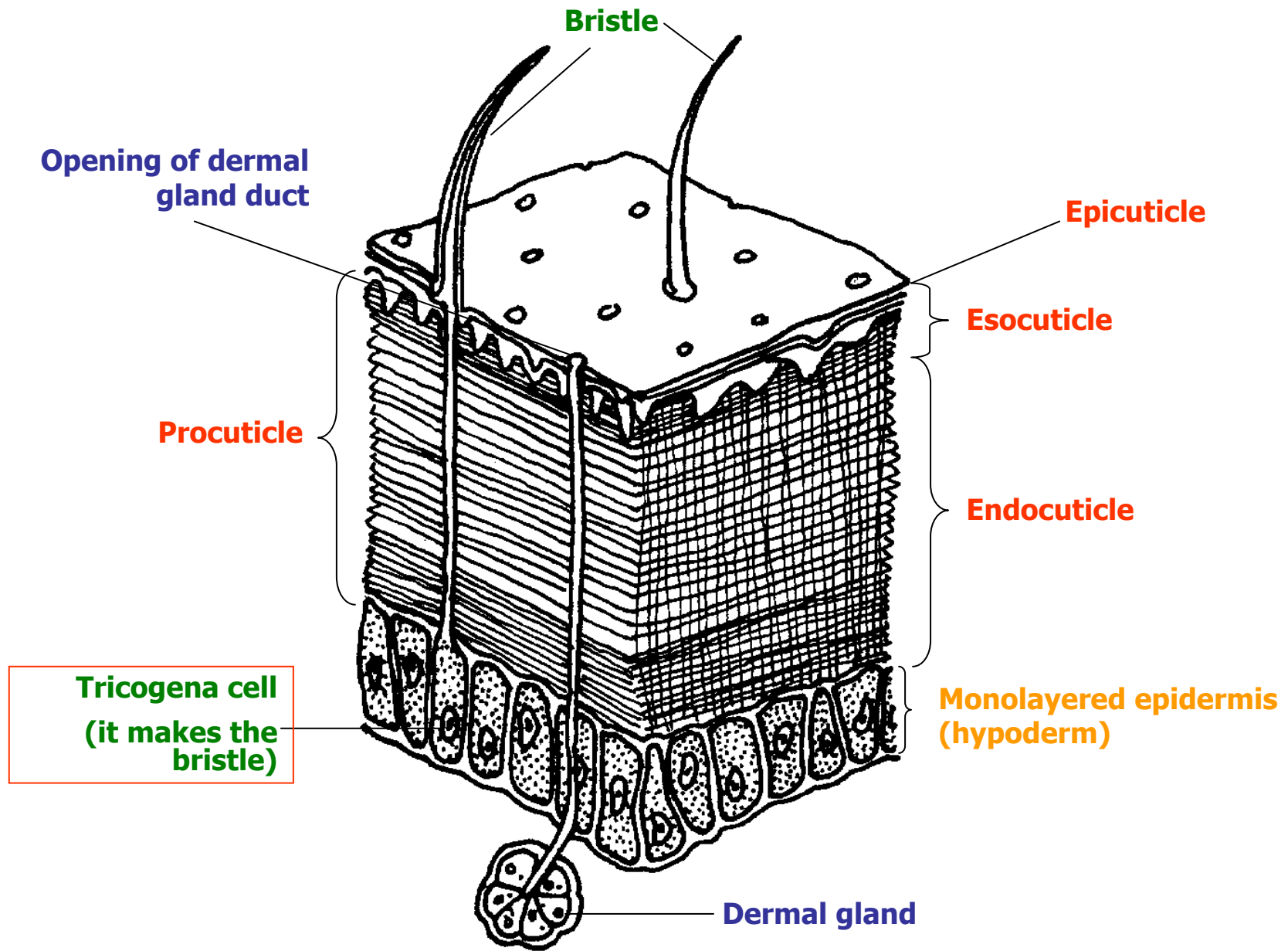
Phylum Arthropoda

Characteristics

- EXOSKELETON** In most arthropods the body is covered with **chitinous cuticle** that is hardened into an exoskeleton. In crustacea and millipedes, the cuticle is hardened by the addition of calcium; in insects, the cuticle is tanned, chemically bonded with protein. Once the cuticle is hardened it can not increase in size. Some regions of the cuticle remain unhardened to allow **flexibility and movement**. The cuticle's functions are protection, attachment for muscles, locomotion and prevention of desiccation.



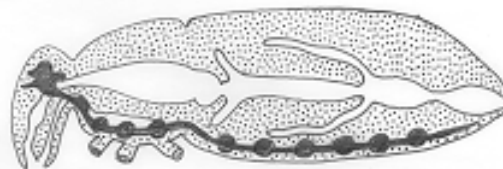
Structure of arthropoda integument



Phylum Arthropoda

Characteristics

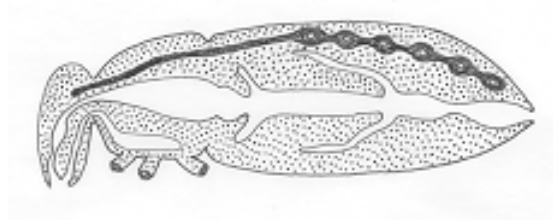
- METAMERISM** Body composed of **numerous segments** (somites), segmented condition may be concealed. In the primitive Arthropod, the body was thought to be a series of **metameres, each, except for the first and last, with a pair of appendages**. Metamerism is an example of an important biological trait, that of replication and modification to develop new traits and capabilities.
- JOINTED APPENDAGES** Jointed appendages give arthropods numerous, generalized appendages which were modified into numerous specialized organs for walking, swimming grasping, and eating. These modifications account for much of the diversity and success of arthropods.
- NERVOUS SYSTEM.** A complex nervous system with a brain connected to a ventral solid nerve cord. The head bears various sensory organs. Compound **eyes** have many complete visual units, each of which collects light independently. The lens of each visual unit focuses the image on light sensitive membranes of a small number of photoreceptors within that unit. In simple eyes (like our own), a single lens brings the image to focus into many receptors, each of which receives only a portion of the image.



Phylum Arthropoda

Characteristics

- 5. RESPIRATORY SYSTEM.** A unique respiratory system that employs a variety of respiratory organs. Marine arthropods utilize gills composed of a vascularized, thin-walled tissue specialized for gas exchange. Terrestrial forms have book lungs (e.g., spiders) or tracheae. (e.g., insects). Book lungs are invaginations to serve in gas exchange between air and blood. Tracheae are air tubes that serve as ways to deliver oxygen directly to cells.
- 6. OPEN CIRCULATORY SYSTEM** A dorsal (upper) vessel directs blood forward toward the brain, an open system allows the blood to circulate back through the body.



- 7. BILATERAL SYMMETRY** Body can be divided into two equal halves through one plane. Most animal groups that are very active are bilaterally symmetrical. But not all animals have bilateral symmetry, some have radial symmetry, e.g. jellyfish.

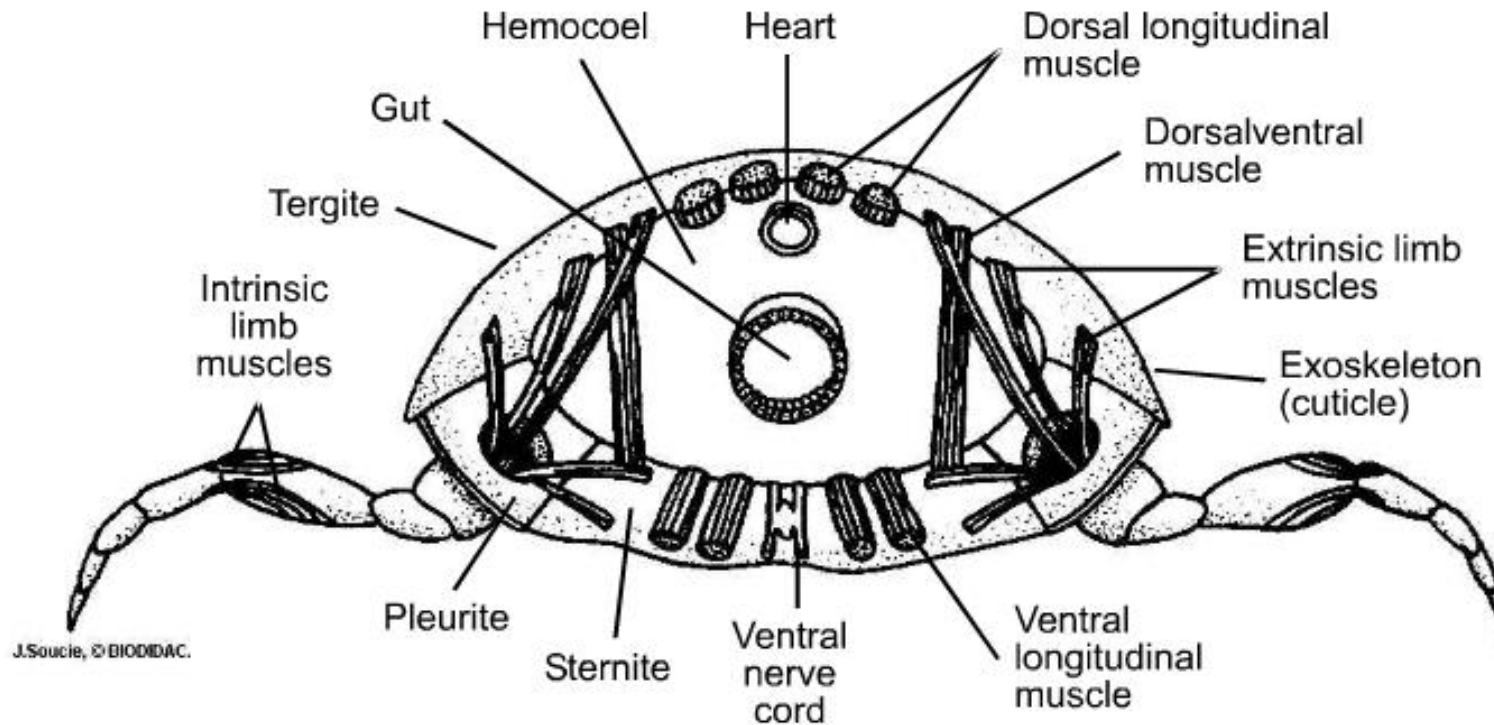


Phylum Arthropoda

Characteristics

8. **ENDOSKELETON.** At certain precise points or lines on the surface of the body, integumental invaginations extend into the haemocoel, forming either simple apodemes, or well-developed plates, or even more complex cuticular structures, all used for muscle attachments. These structures form part of the endoskeleton.
9. **MOLTING.** In order to grow, an arthropod must shed its old exoskeleton and secrete a new one. This process, molting, is expensive in energy consumption. During the molting period, an arthropod is vulnerable. Once their cuticle hardens they can't grow ever again. Their cuticles slowly expand as they increase in mass. They breakdown (digest) their cuticle every now and then when they need to grow. Their cuticle hardens at their adult size and they slowly grow to fill it up.
10. **LIFE CYCLE.** A complex, yet adaptable, life cycle. Metamorphosis is a drastic change in form and physiology that occurs as an immature stage becomes an adult. Metamorphosis contributes to the success of arthropods because the larval stage eats food and lives in environments different from the adult; reducing competition between immature and adults of a species. Reduction in competition thus allows more members of the species to exist at one time.

Phylum Arthropoda



Cross-section of a general arthropod

Phylum Arthropoda

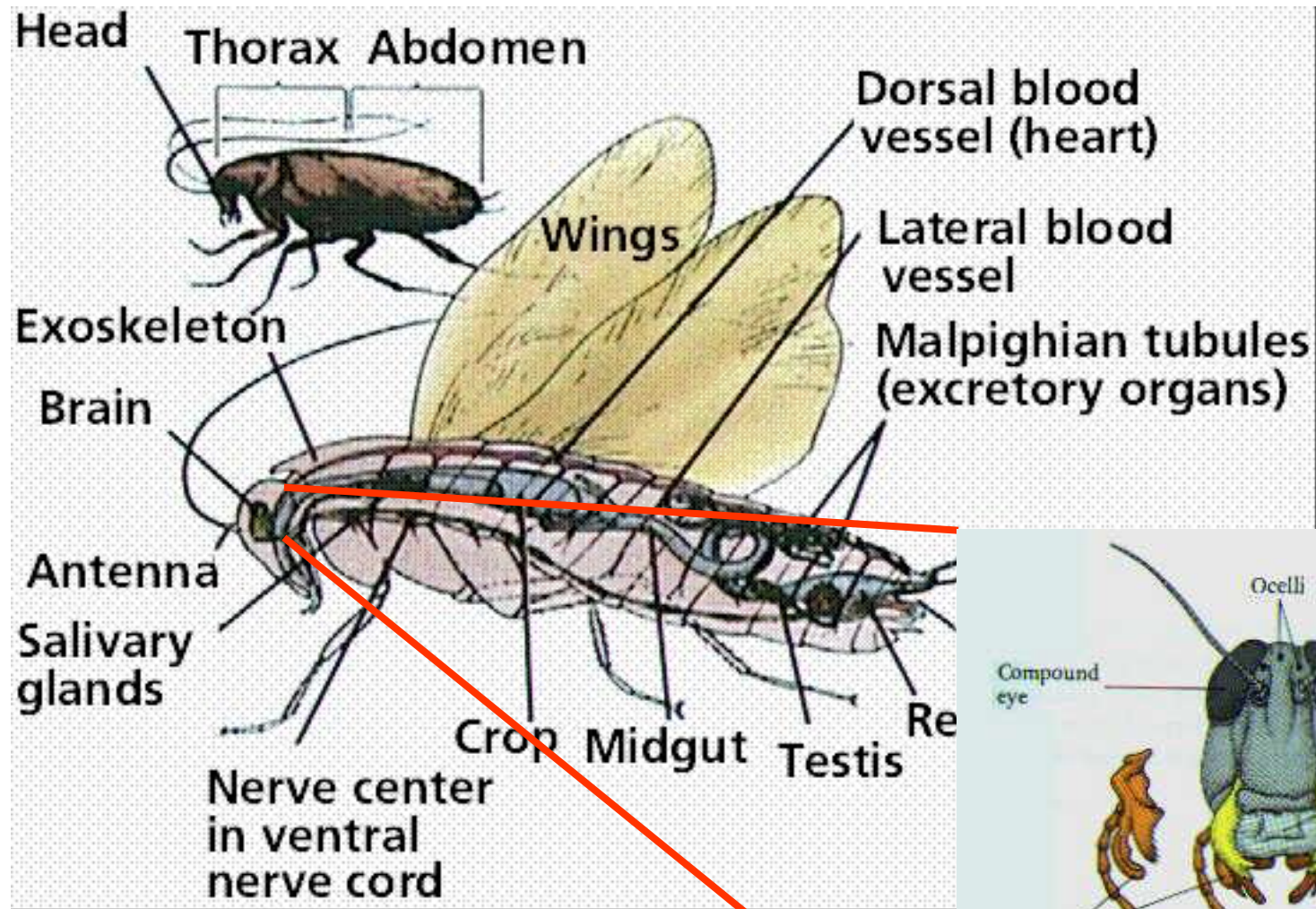
Insects

Insects display a very huge variation in body styles, although there seems to be a size limit on the insect-style of body organization. Common features shared by most living insects include:

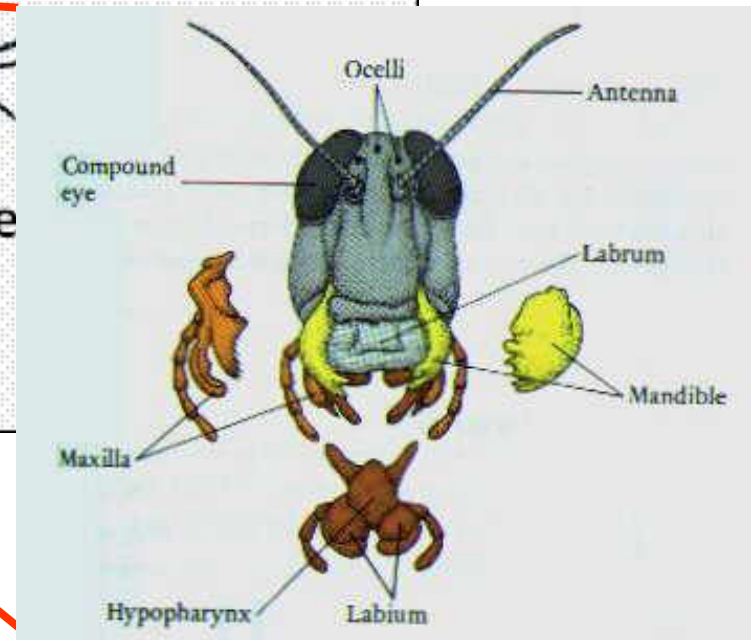
1. body composed of **three tagmata**:
 - **head**
 - **thorax**
 - **abdomen**
2. one pair of relatively large **compound eyes**
3. usually **three ocelli** located on the head
4. one pair of **antennae** on the head
5. mouthparts consisting of a **labrum**, a pair of **mandibles**, a pair of **maxillae**, a **labium**, and a **tonguelike hypopharynx**
6. two pairs of **wings** derived from outgrowths of the body wall
7. **three** pairs of walking **legs**

Insects have a complete, complex digestive system. They exchange gases through a tracheal system, with external openings called spiracles dividing into finely branched tubules that carry gases directly to metabolizing tissues. Aquatic forms may exchange gases through the body wall or may have various kinds of gills. Excretion of nitrogenous waste takes place via Malpighian tubules. The nervous system of insects is complex, including a number of ganglia and a ventral, double nerve cord. Sense organs are complex and acute. In addition to ocelli and compound eyes, some insects are quite sensitive to sounds, and their chemoreceptive abilities are excellent.

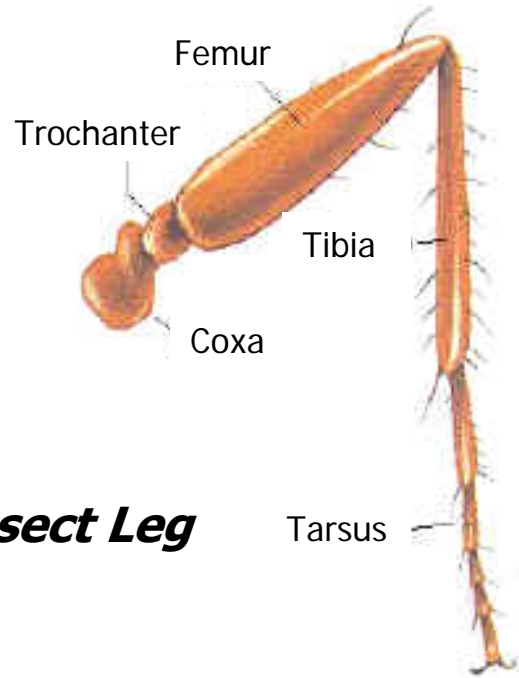
Phylum Arthropoda



Anatomy of the insect body



Arthropoda locomotion



Insect Leg



Crab Leg



Honeybee leg



Mole Cricket leg



Water Beetle leg

Artropod Inspired - Biomimetic robots

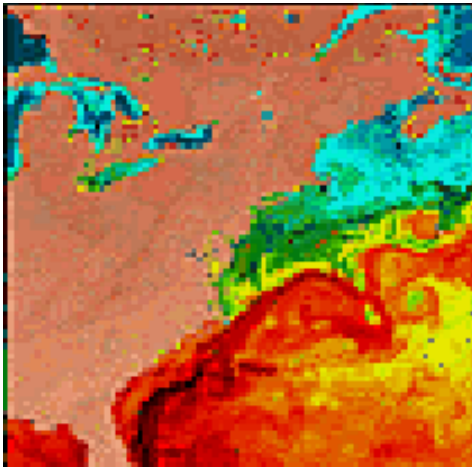
Biomimesis: to mimic life, to imitate biological systems

GOAL of the research: development of a new class of biologically inspired robots that exhibit much greater robustness in performance in unstructured environments than today's robots. This new class of robots will be substantially more compliant and stable than current robots, and will take advantage of new developments in materials, fabrication technologies, sensors and actuators.

Artropod Inspired - Biomimetic robots

A strict bio-mimicry strategy is rarely if ever successful for several reasons

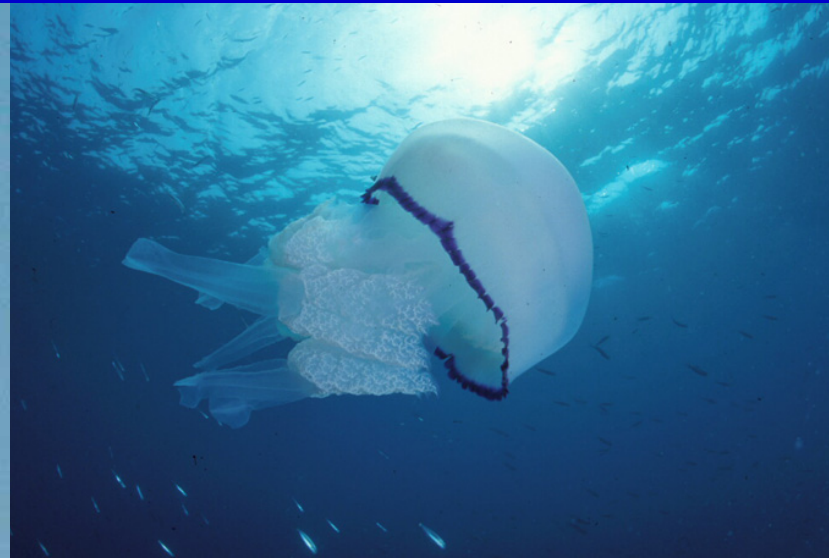
1. Even though insects are often referred to as simple animals, their **mechanical** and **nervous systems** are far more complex than that found in any current robot
2. Each **leg** has seven degrees of freedom
3. The **muscles** that control those movements are more efficient than any artificial actuators currently available
4. **Thoracic ganglia** contain thousands of neurons and head ganglia represent sophisticated sensory processing regions, memory banks and motor control centers
5. Hundreds of **sensors** are found associated with each leg and on the head, antennae may have hundreds of thousands of sensors associated with them
6. Insects are **small** creatures and body plans may be optimized for the size and materials found in their bodies. As one scales up to larger devices typical of most robots and changes to materials such as aluminum or plastic, it is not clear that these designs will still be appropriate
7. **Neural circuits** are rarely understood in their entirety and again have co-evolved with the size and materials of the insect's body



Corso di Percezione Robotica (PRo)

Prof.ssa Cecilia Laschi

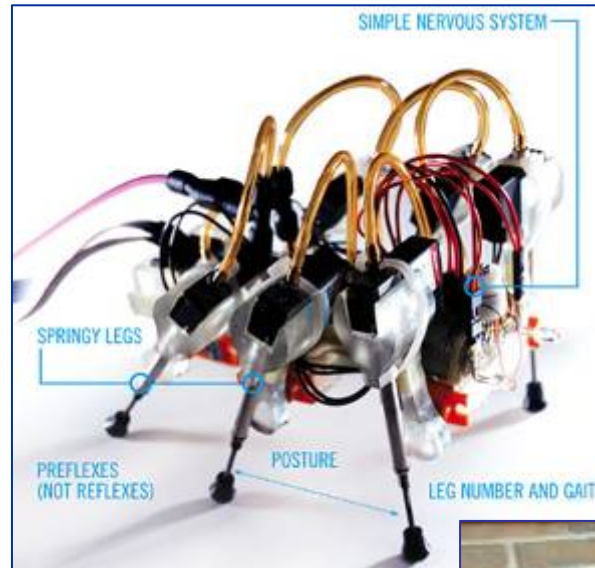
Fondamenti di Robotica Biomimetica



Stanford-Barkley approach to the problem: The Rhex and Sprowl robot series



R.J. Full
Dept. of Integrative
Biology
U.C. Berkeley



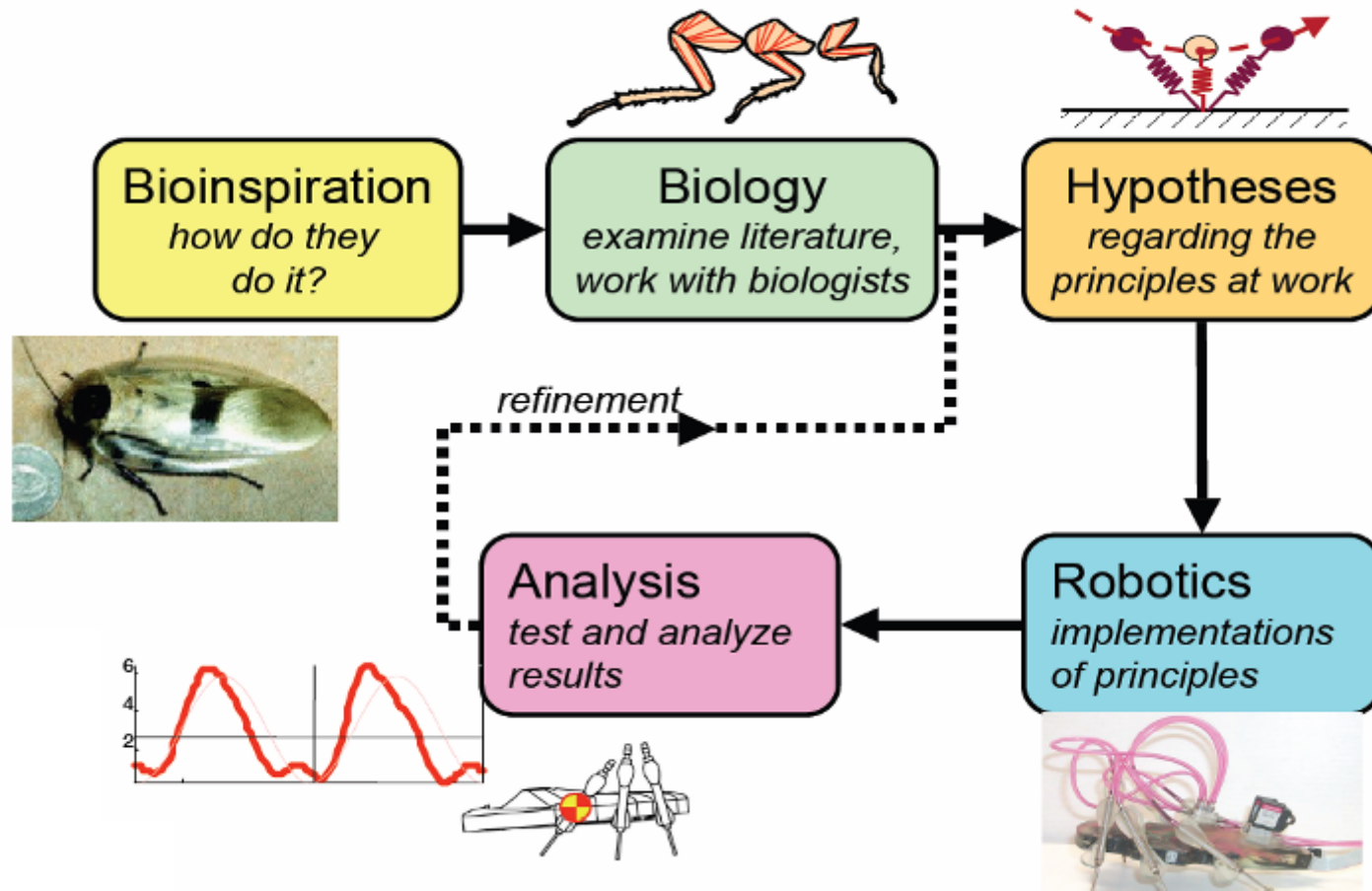
M.R. Cutkosky
Center for Design
Research
Stanford University



Aspetti meccanici del controllo locomotorio di robot su zampe

“Piuttosto che provare a copiare ogni singolo dettaglio morfologico o fisiologico, noi ipotizziamo principi funzionali del sistema biologico e testiamo la loro validità in animali e in modelli fisici”.

Bioinspiration for **hexapedal running**



L'approccio Stanford-Barkley

Progettare ispirandosi alla biologia

Obiettivo: realizzare robot in grado di muoversi velocemente su terreni non strutturati, prendendo ispirazione da piccoli artropodi.

Motivazione: gli artropodi e, in particolare, gli scarafaggi sono capaci di raggiungere velocità elevate mantenendo un'alta stabilità.

Per es. la *Periplaneta americana* può raggiungere velocità superiori a **50 volte la lunghezza del corpo al secondo – 1.5 m/s (Full and Tu, 1991)**. *Blaberus discoidalis* è capace di attraversare terreni accidentati con **ostacoli alti tre volte l'altezza del suo centro di massa** senza cadere (Full et al., 1998).



Questi studi sugli scarafaggi suggeriscono i seguenti principi per progettare robot esapodi veloci, stabili e capaci di correre:

- 1. Postura auto-stabilizzante**
- 2. Funzione delle zampe stabilizzatrice e propulsiva**
- 3. Strutture passive visco-elastiche**
- 4. Controllo diretto - open-loop**

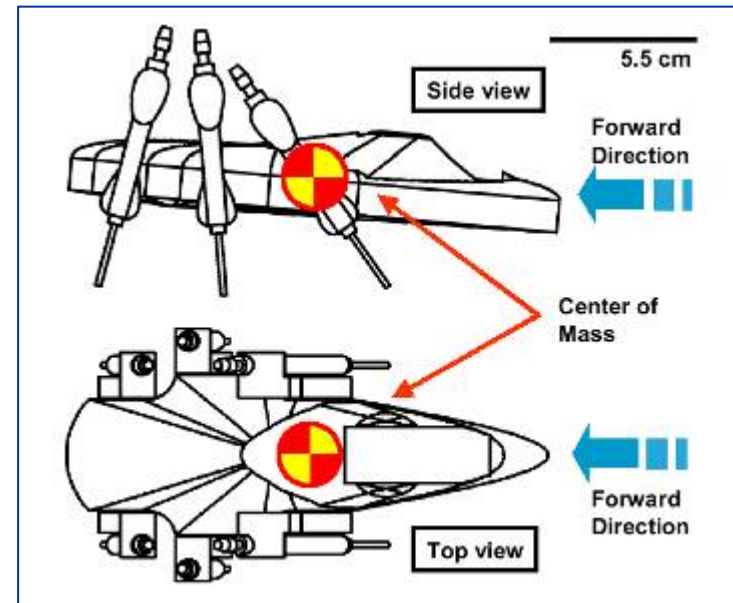
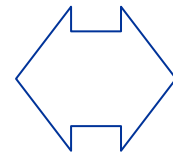
1. Postura Auto-Stabilizzante

La **stabilità** è essenziale per alte prestazioni nella locomozione terrestre. Gli artropodi sono spesso considerati come un esempio eccellente di stabilità statica. Gli artropodi hanno zampe generalmente rivolte verso l'esterno, fornendo un'ampia base di supporto. Il loro centro di massa è spesso così basso che il loro corpo tocca il terreno. La postura con le zampe rivolte all'esterno riduce i momenti di ribaltamento.



Periplaneta americana

Self-stabilizing posture: A rear and low centre of mass and wide base of support contribute to the over-all stability of locomotion.



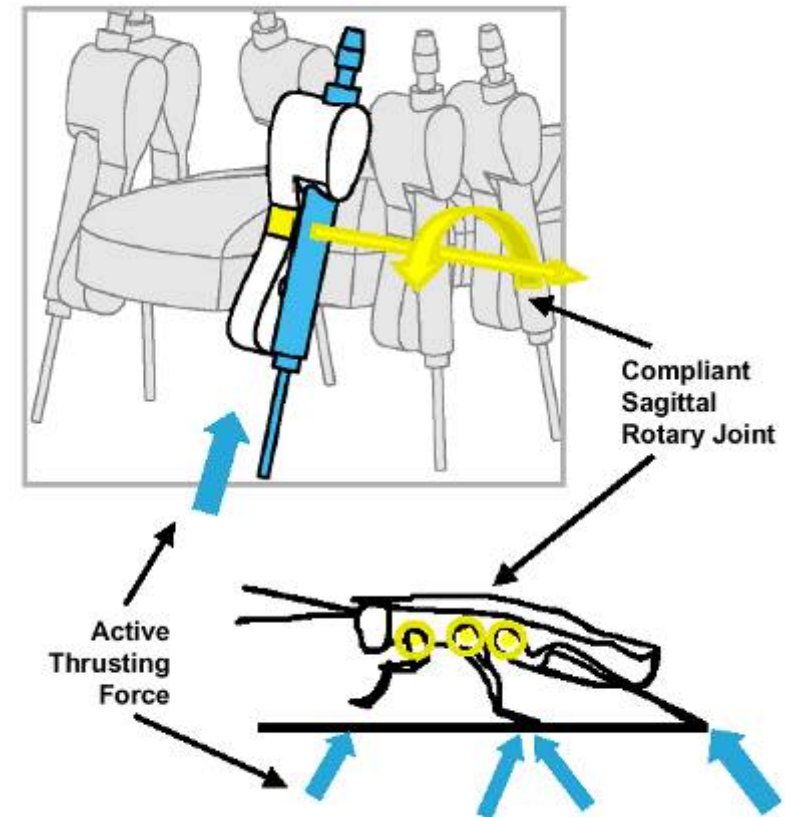
2. Funzione propulsiva e stabilizzante delle zampe (I)

La **stabilità** è aumentata dal movimento a **tripode**, formato da tre zampe (la prima e l'ultima di un lato e la mediana dell'altro).

Studi sulle forze di reazione del terreno durante la corsa hanno dimostrato che le zampe esercitano una forza propulsiva. Le **forze di reazione del terreno** agiscono in direzione dell'anca della zampa (**Full et al., 1991**).

Le zampe hanno **funzioni** diverse: le **zampe anteriori** servono per decelerare, le **zampe posteriori** hanno azione accelerante, le **zampe mediane** possono accelerare o decelerare.

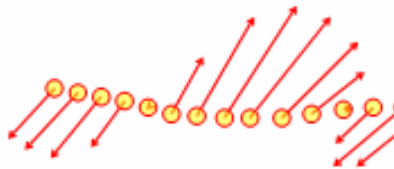
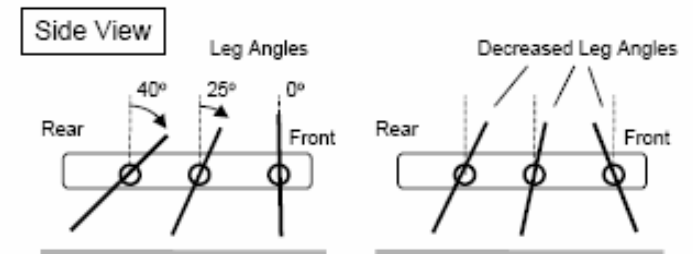
La stessa funzione delle zampe è stata implementata nel robot.



2. Funzione propulsiva e stabilizzante delle zampe (II)

Nella prima versione di **Sprawl robot**, l'azione propulsiva delle zampe era ricreata con un **pistone pneumatico**. Il pistone era attaccato al corpo attraverso un **giunto rotante cedevole** attaccato all'apice della zampa. Questo giunto non attuato riproponeva il **giunto passivo** presente negli scarafaggi tra il trocantere e il femore.

Servo motori ruotano la parte apicale della zampa così da settare l'angolo con cui la zampa ruoterà. **Cambiando l'angolo, è possibile cambiare la funzione svolta dalla zampa (dietro-accelerazione; avanti-decelerazione).**

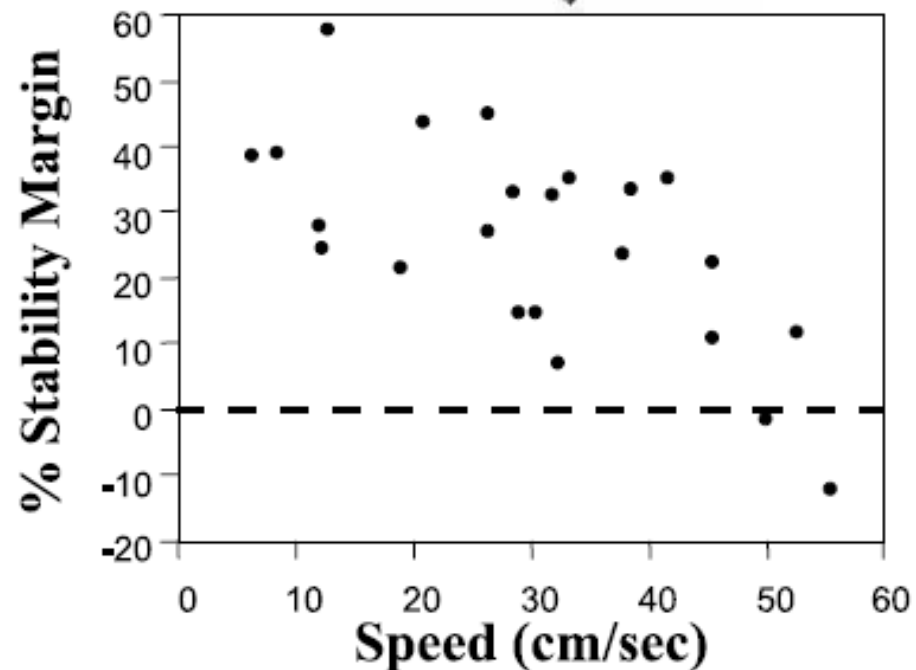


Stabilità dinamica negli artropodi

La stabilità statica di questi animali non preclude un'elevata stabilità dinamica. Il **duty factor** (la frazione di tempo che la zampa spende sul terreno rispetto ad un ciclo completo) diminuisce a 0.5 o meno, se la velocità aumenta. La **percentuale di margine di stabilità** (la distanza più corta dal centro di gravità al margine dell'animale normalizzata al massimo possibile margine di stabilità) diminuisce con l'aumentare della velocità del 60% a 10 cm s⁻¹ o a valori sotto zero per velocità superiori a 50 cm s⁻¹. Percentuali di stabilità negative indicano instabilità statica.



Questi animali rimangono **dinamicamente stabili** perché una forza in una direzione ad un dato istante è successivamente compensata da un'altra forza e distribuita dalle forze di inerzia.



Dinamica molla-massa di un artropode

In scarafaggi e granchi che si muovono velocemente, il centro di massa può essere modellato come una massa (il corpo) posto sopra una molla virtuale (che rappresenta le zampe), dove la rigidità relativa di tutte le zampe agisce come una molla virtuale con costante di **elasticità relativa** pari (k_{rel}) a:

$$K_{rel} = (F_{vert}/mg)/(\Delta l/l)$$

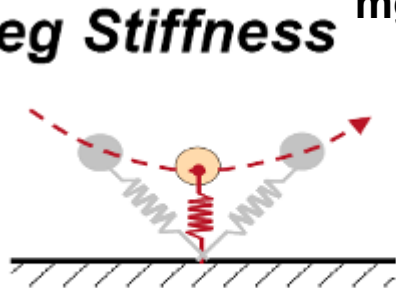
F_{vert} forza verticale di reazione del suolo, per unità di peso

Δl è la compressione della zampa-molla

l è la lunghezza della zampa-molla non compressa ($\Delta l / l$ è la % di allungamento)

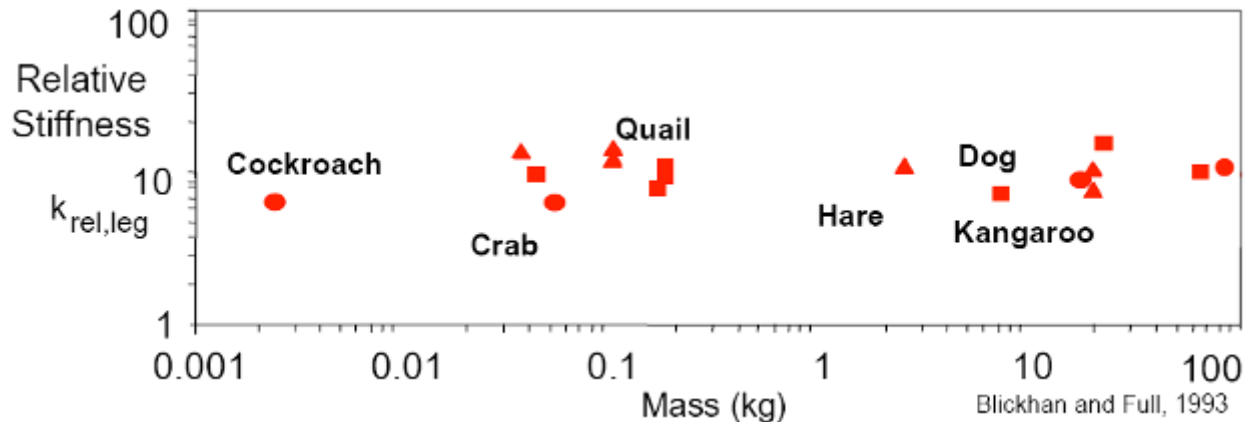
Leg Stiffness

mg è il peso



$$k_{rel} = \frac{\frac{F}{mg}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

TROTTERS	●
RUNNERS	■
HOPPERS	▲

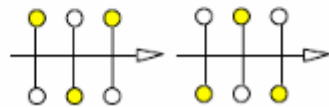


Dinamica molla-massa di un artropode

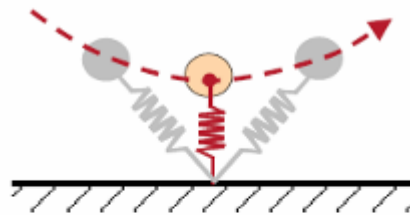
Il modello delle forze di reazione del terreno per artropodi a sei o otto zampe è fondamentalmente simile a animali a due o a quattro zampe nei vertebrati, nonostante la variazione morfologica. **Due** zampe in un quadrupede che corre, **tre** zampe in un insetto o **quattro** zampe in un granchio agiscono come **una** gamba in un uomo durante il contatto con il terreno.

Sagittal Leg Spring

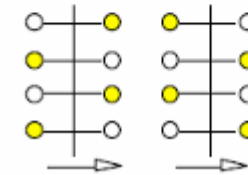
SIX- Legged



Cockroach
Full and Tu, 1990

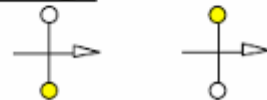


EIGHT- Legged

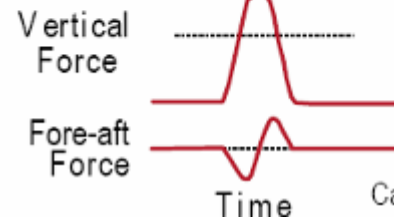


Crab
Blickhan and Full, 1987

TWO- Legged

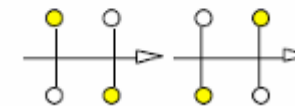


Human



Cavagna et al., 1977

FOUR- Legged

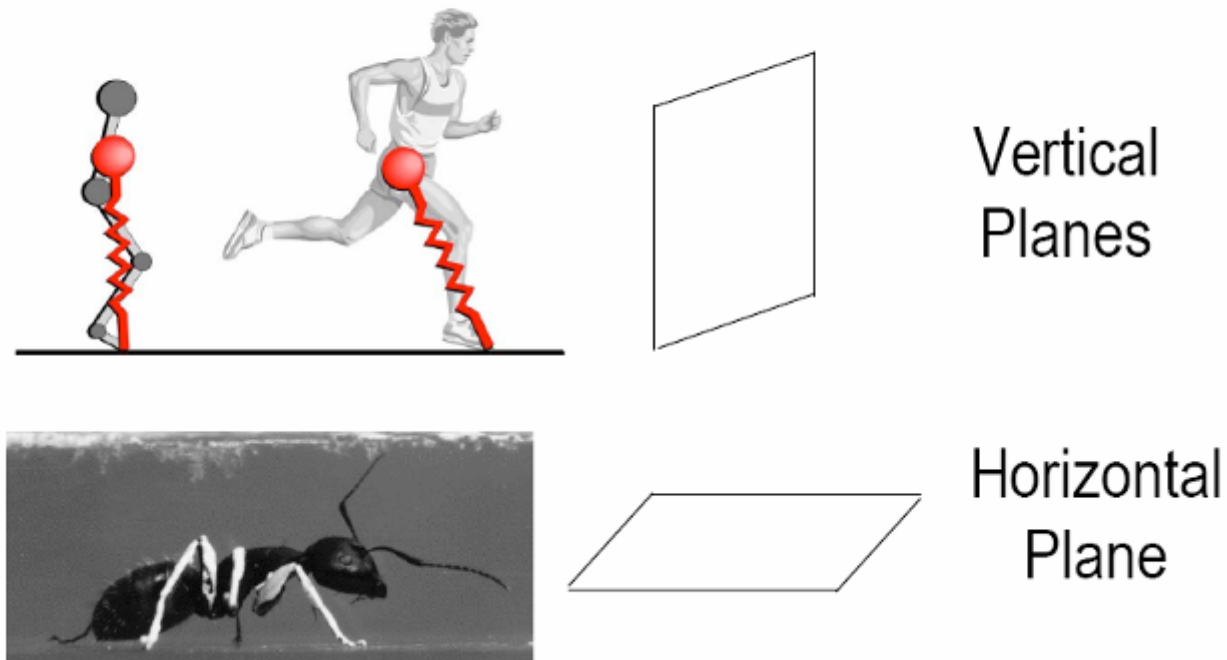


Dog

Dinamica molla-massa di un artropode

Spring-mass dynamics of the center of mass are not restricted to the sagittal plane. Sprawled-posture arthropod runners, such as insects, generate large lateral and opposing leg forces in the horizontal plane. As in the sagittal plane, the three legs of the tripod appear to function synergistically as if they were one virtual, lateral leg spring (**Schmitt and Holmes**, 2000a, 2001). **Kubow and Full** (1999) suggest a further advantage to an appropriately sprawled posture with large forces along the horizontal plane. Their studies suggest that horizontal perturbations to a steady running cycle are rejected by the resulting changes in the body's position relative to the location of the feet.

Different View of Stability



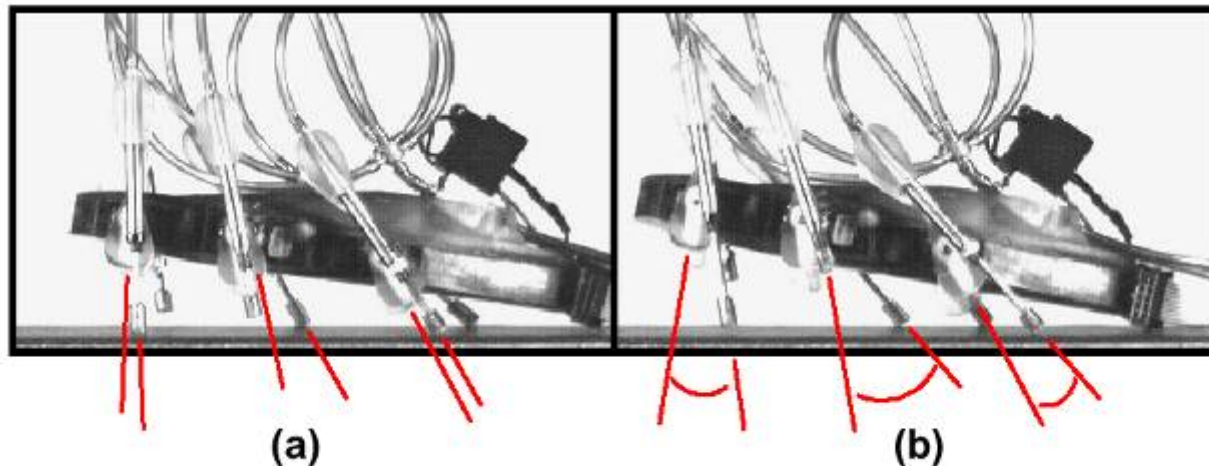
Piani sui quali avviene il moto

3. Strutture passive visco-elastiche

Studi condotti sullo scarafaggio *Blaberus discoidalis* hanno mostrato il ruolo delle proprietà visco-elastiche dei suoi muscoli e dell'esoscheletro durante il movimento (Garcia et al., 2000; Meijer and Full, 2000; Xu et al., 2000).

ROBOT: il prototipo di zampa contiene un giunto passivo cedevole e ruotante fabbricato in materiale soffice visco-elastico (poliuretano), inserito in una zampa di materiale plastico.

Sebbene la rotazione avvenga prevalentemente su un piano sagittale, il giunto consente movimenti anche in altre direzioni.



High-speed footage of the running robot in a) mid-stance and b) full extension. As shown, the compliance in the leg plays an important role in the locomotion, as evidenced by the large deflections during the stride.

4. Controllo diretto / Open-loop (I)

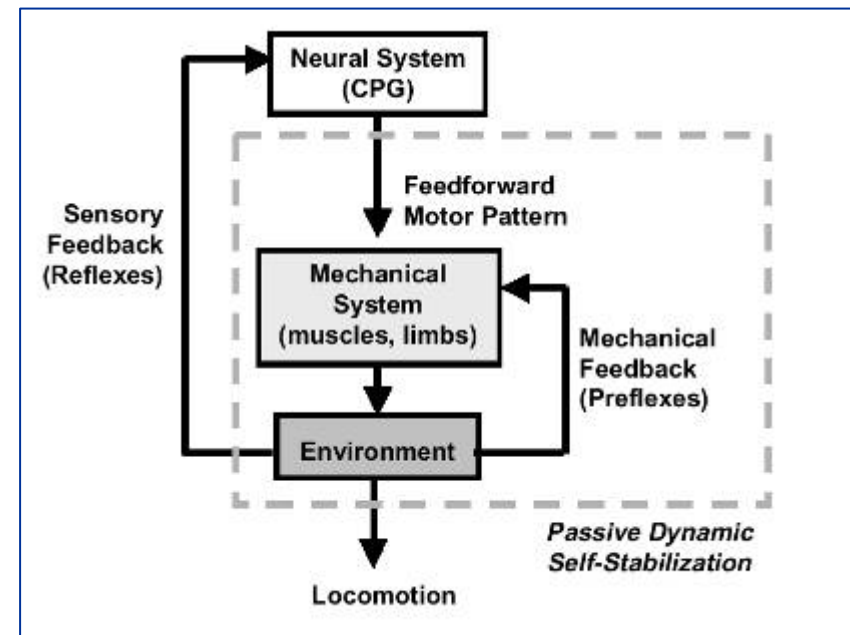
Le proprietà auto-stabilizzanti del sistema visco-elastico meccanico (chiamato **preflesso**) fornisce un' immediata risposta alle perturbazioni senza un ritardo di riflessi nervosi.

Studi sugli scarafaggi durante la corsa su terreni non strutturati suggeriscono che questi preflessi svolgono un ruolo dominante durante la locomozione.

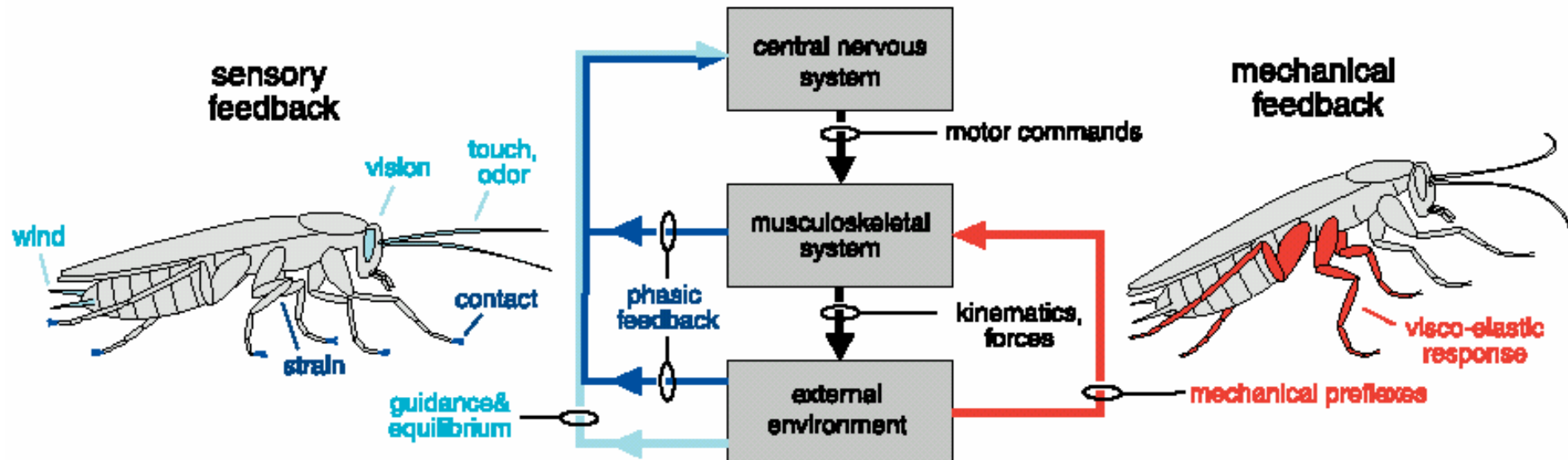
Avvengono cambiamenti minimi nei pattern di attivazione dei muscoli degli scarafaggi in relazione al cambiamento del terreno (Full et al., 1998).

Il funzionamento base durante la locomozione è assicurato da un **sistema meccanico attivato e controllato direttamente, senza ricevere feedback (open-loop).**

Informazioni sensoriali sono usate successivamente per modificare il feedforward pattern, per cambiare il comportamento dell'animale sulla base delle cambiate condizioni.



4. Controllo diretto / Open-loop (II)



<u>Mechanical System</u>		<u>Neural System</u>
<u>Feedforward</u>	<u>Preflex</u>	<u>Reflex</u>
Motor program acting through moment arms	Intrinsic musculo-skeletal properties	Neural feedback loops
Predictive	Rapid acting	Slow acting
Passive Dynamic		Active
Self-stabilization		Stabilization

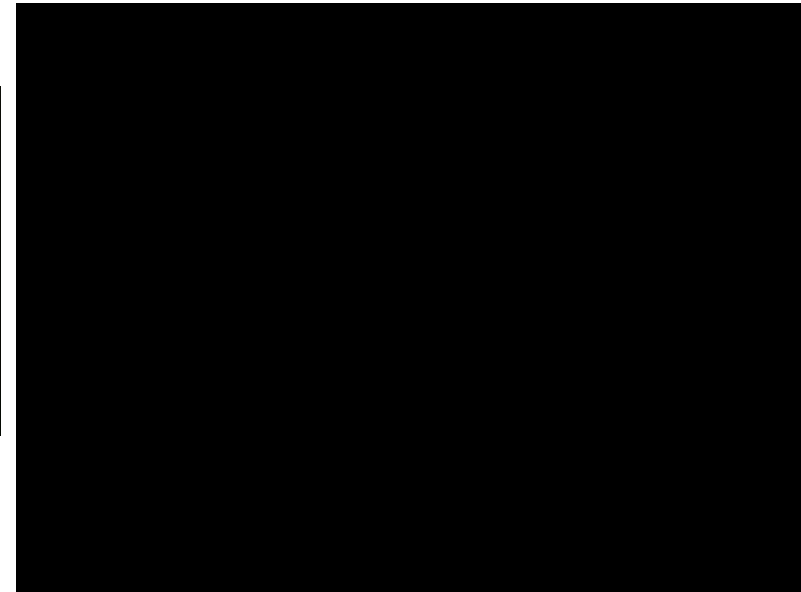
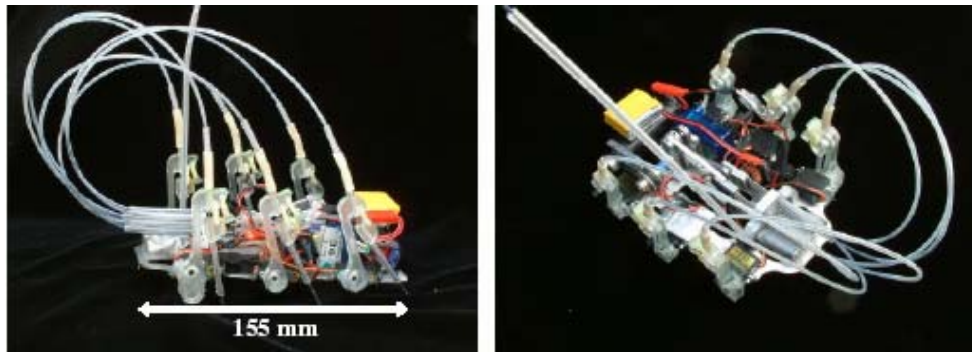
Both neural and mechanical feedback play roles in controlling locomotion

M.H. Dickinson et al., How Animals Move: An Integrative View, SCIENCE, vol 288 (2000)

4. Controllo diretto / Open-loop (III)

ROBOT: i-Sprawl, un robot esapode completamente autonomo pilotato da motori elettrici (batterie al litio) e da cavi tiranti flessibili.

Il robot è controllato da un alternante movimento a **tripode**. Il controllore **feedforward** comanda anche l'angolo nominale a ciascun apice della zampa, determinando la posizione del piede e la direzione.



Velocità di *iSprawl* robot = 15 volte la lunghezza del corpo/ secondo (2.3 m/s)

Peso = 0.3 Kg

iSprawl: Autonomous Open-Loop Running

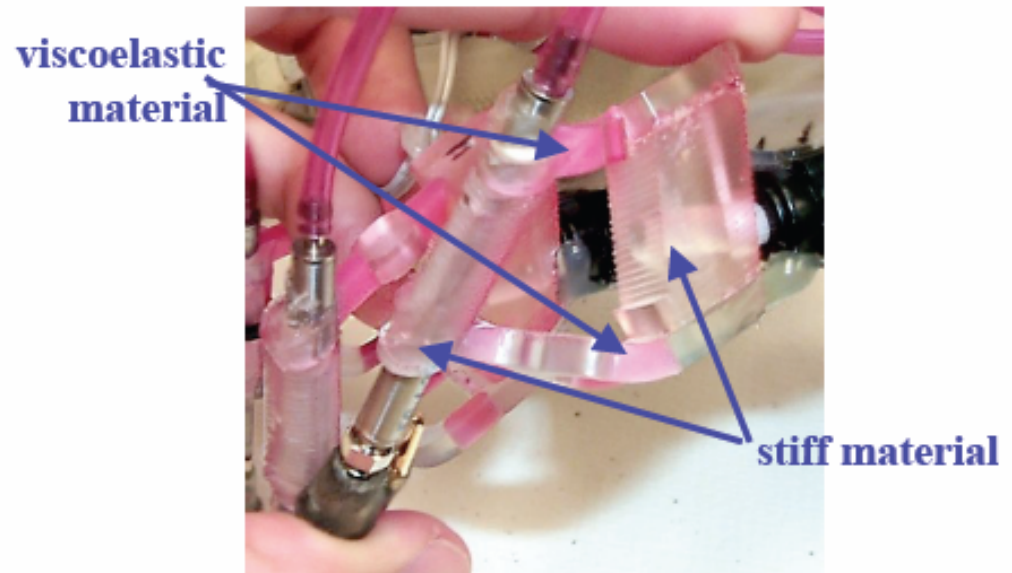
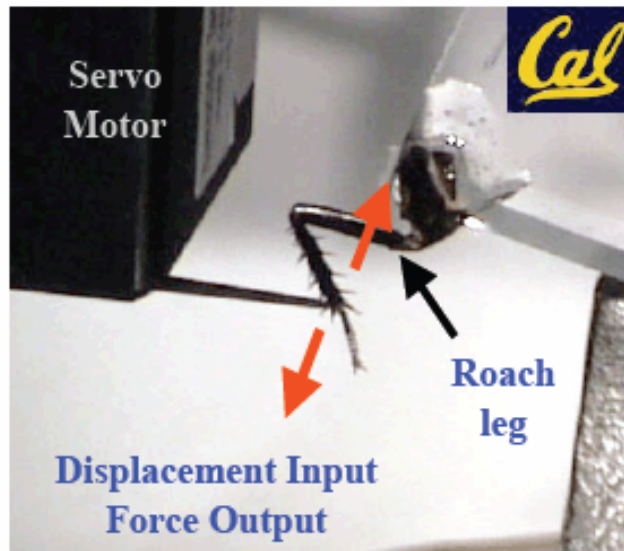
In the case of the Sprawl family of robots, the main principles adapted from insects, the cockroach in particular, are.

- a **sprawled** posture, with a wide stance and rear legs directed backward;
- a bouncing, alternating **tripod gait** based on an open-loop motor pattern;
- **specialization** in which the rear legs primarily accelerate the robot while the front legs decelerate it;
- a **single active degree of freedom** per leg, in which thrusting is directed along the axis of the leg;
- **passive "hip" joints** that swing the legs forward between steps;
- **compliance** and **damping** that absorb perturbations.

Shape Deposition Manufacturing

Study biological materials, components, and their roles in locomotion.

Study Shape Deposition Manufacturing (SDM) materials and components.

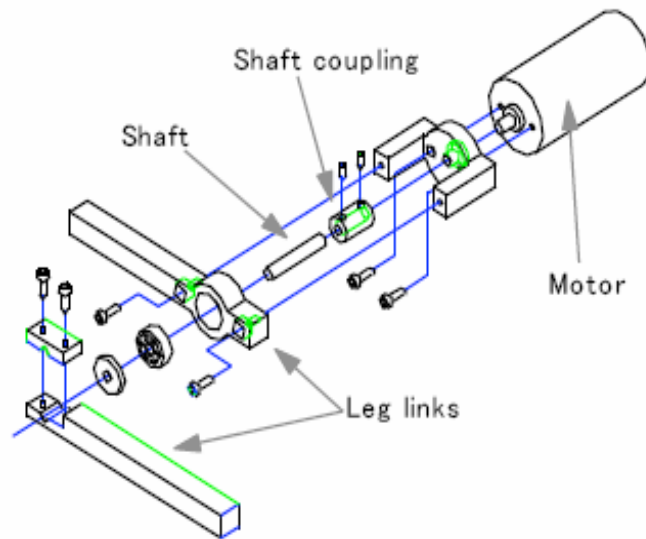


Models of material behavior and design rules for creating SDM structures with desired properties

Shape Deposition Manufacturing

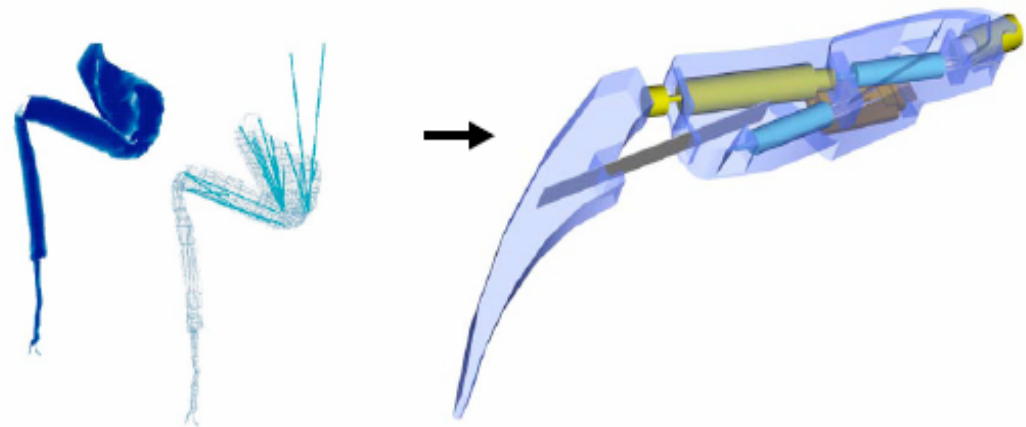
Shape Deposition Manufacturing

STANFORD UNIVERSITY
Mark Cutkosky



Shape Deposition Manufacturing allows variable stiffness materials and embedding of actuators and sensors.

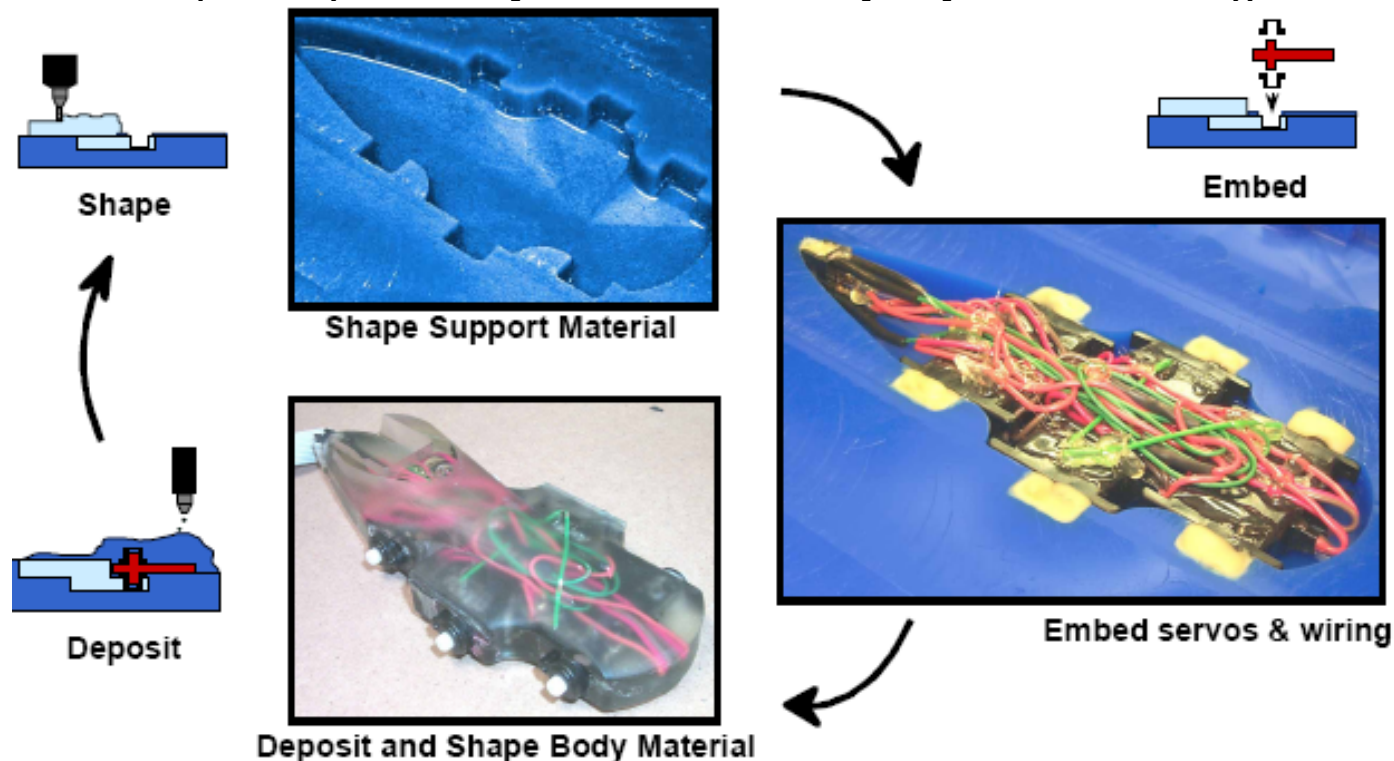
Motivation: Building robots with prefabricated components is difficult... and results are not robust.



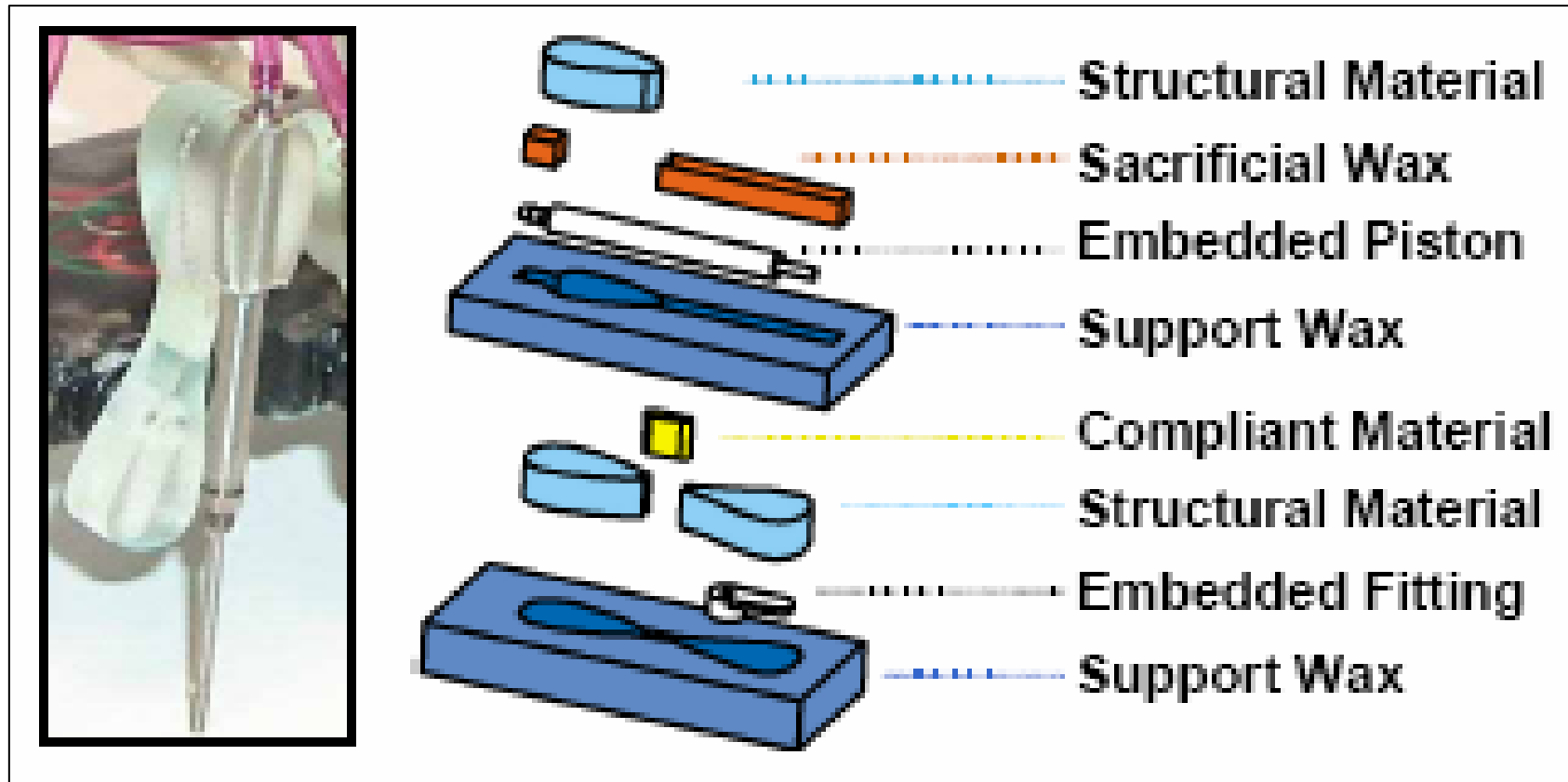
Shape Deposition Manufacturing

Shape Deposition Manufacturing (SDM) is a layered prototyping method where parts or assemblies are built up through a cycle of alternating layers of structural and support material. After a layer of material is added, it is then shaped to a precise contour before the next layer is added. Unlike many other layered processes, the material is **shaped after it is added**. SDM's capability of **embedding components** inside the part in a precise and repeatable fashion (Cham et al., 1999) was used to create the robot's body.

The construction of the multi-material compliant leg used in the robot takes advantage of SDM's capability **to vary the material properties** during construction of the part.



Shape Deposition Manufacturing



Alternating layers of **hard** and **soft** material and embedded components used to make the compliant legs.

Serie di Sprawl robot

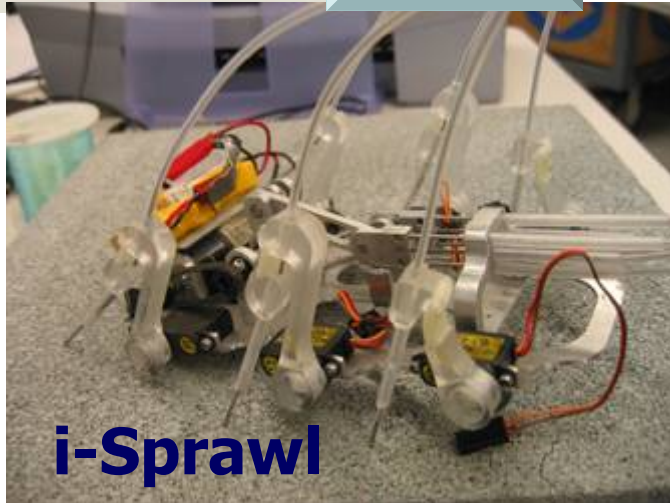
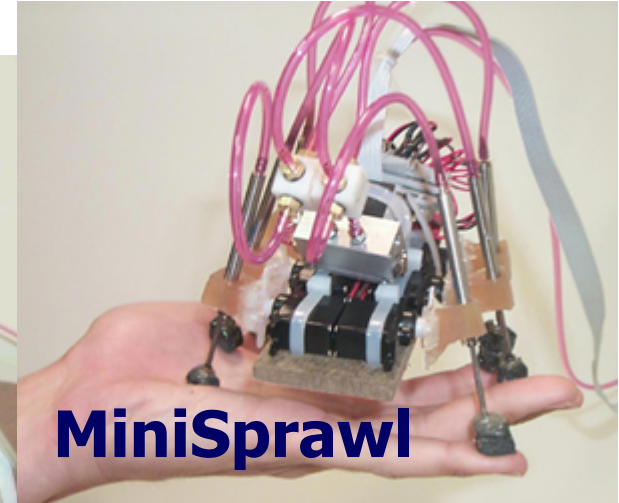
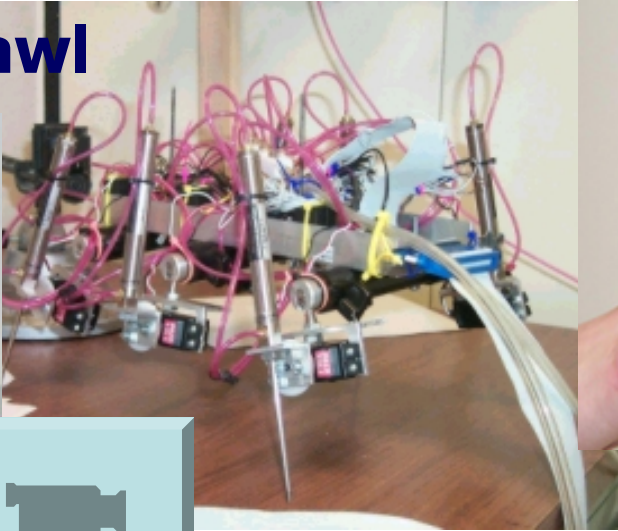
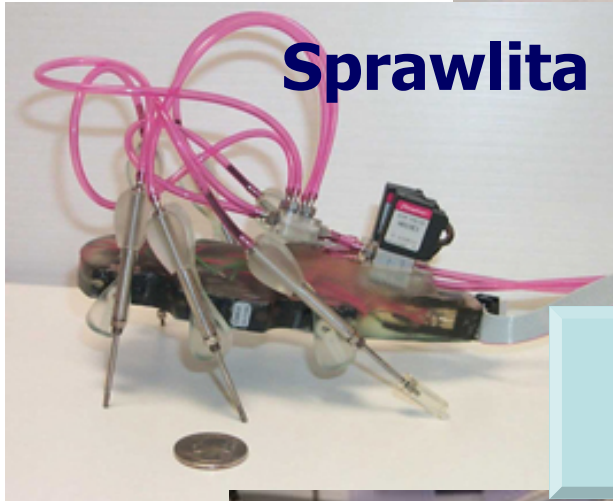
Sprawl

Sprawlita

MiniSprawl

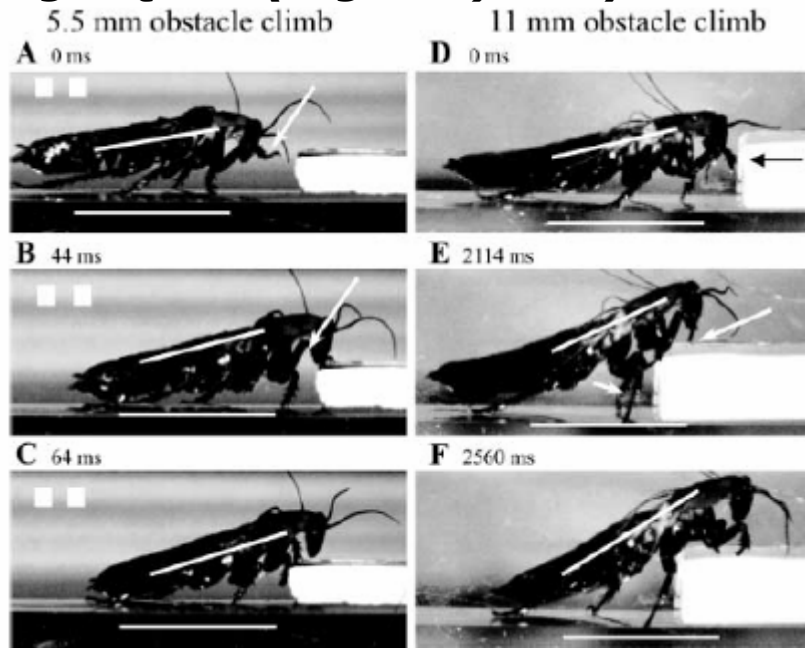
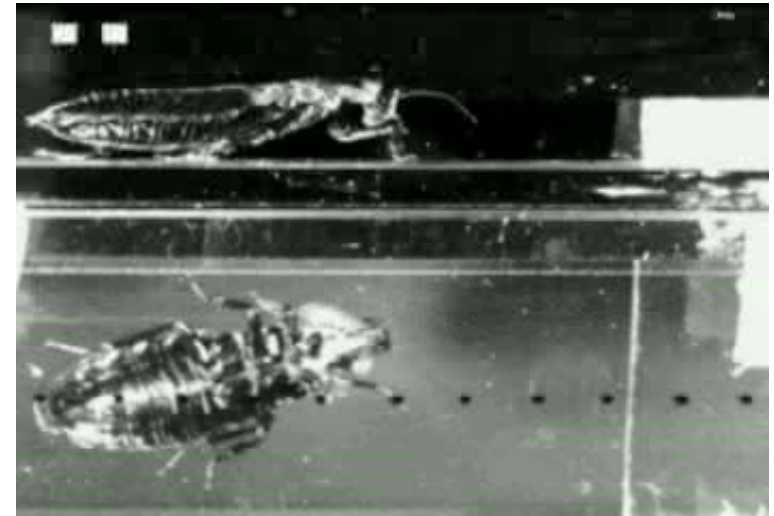
Sprawlette

i-Sprawl



Controllo degli ostacoli nello scarafaggio, *Blaberus discoidalis*

Case Western Reserve University –
Roger Quinn (engineer) – Roy Ritzmann (biologist)



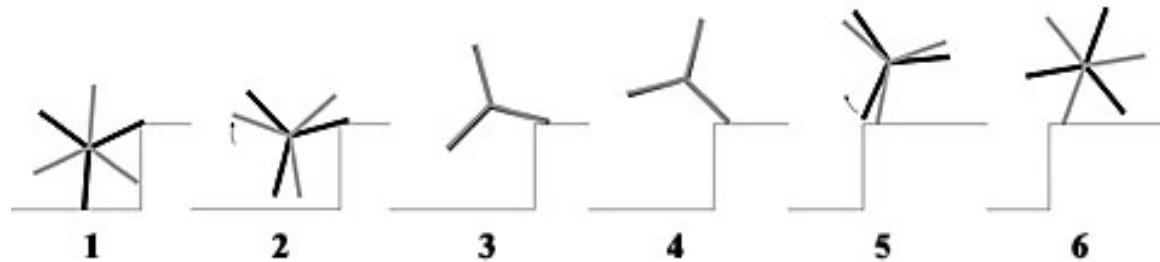
An insect that encounters an obstacle as it is walking could do one of the three things:

1. It could climb over the obstacle by making little or no modifications of the tripod gait.
2. It could change to a completely different set of leg movements.
3. It could use normal walking movements, coupled with postural adjustments to direct the movement of its body over the obstacle.

During horizontal running, the tarsi of the front legs are normally lifted higher than 6 mm. Therefore, when the cockroach approaches a 5.5 mm block, the front legs require no alteration in swing trajectory to reach the top of the obstacle. However, for 11-mm obstacles the front tarsus would encounter the vertical surface of the barrier well below the top. The body angle increases *before* the tarsus of the front leg touches the top of the 11-mm obstacles, because of the middle leg extension. Then, the front leg contacts the top of the block.

Whegs Robot (CWRU)

The Whegs™ series robots utilize a method of locomotion that combines the advantages of wheels and legs (wheel-legs). Wheels are relatively simple, and allow a vehicle to move over terrain quickly. Legs allow robots to climb obstacles that are higher than what a wheeled vehicle would be able to climb over.



Bio-inspired working principle:

1. Locomotion
 - tripod gait
2. Climbing of obstacles
 - modification of leg's movements
 - postural adjustment (body flexure)

Dynamics of Climbing Robots

Gecko

**Rapid
Wall
Running**

Vertical Climb

1 m/sec

30 steps per second

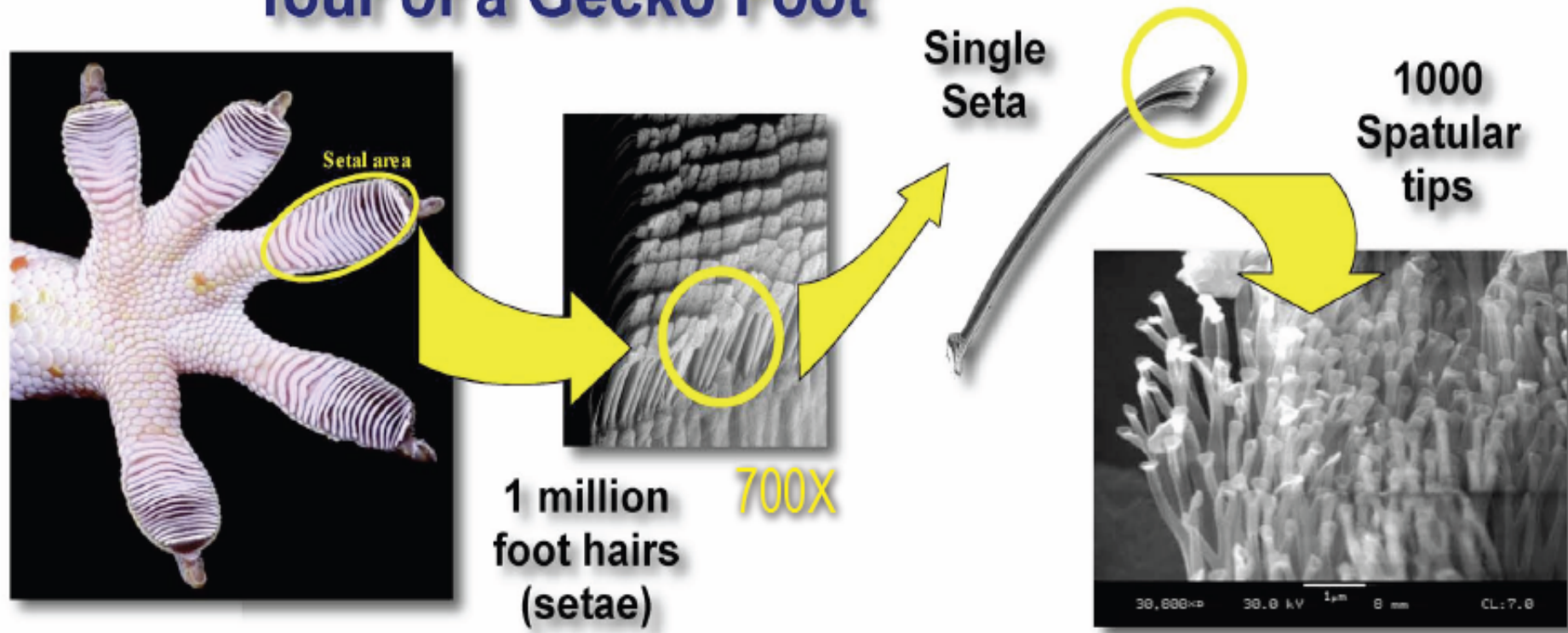
Attaches in 8 msec

Detaches in 16 msec



How Does the Gecko Do It?

Tour of a Gecko Foot

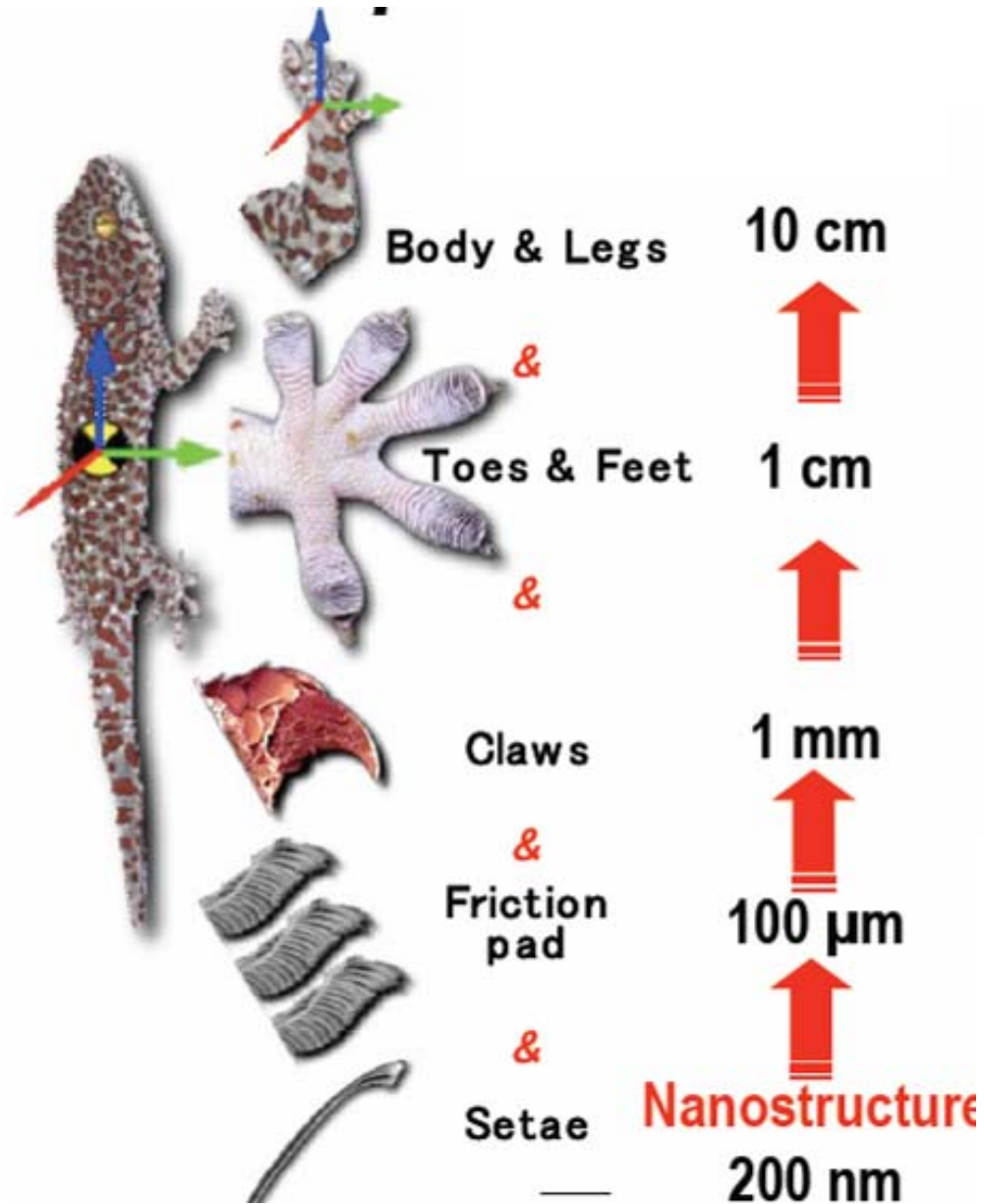


Autumn, Liang, Hsieh, Zesch, Chan, Kenny, Fearing and Full, Nature 2000

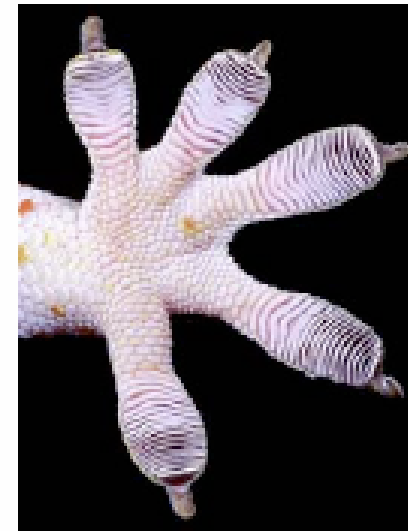
30,000X

**2 Billion Nano-sized split ends
Stick by van der Waals forces!**

Bio-inspired Climbing Robot



van der Waals hairs



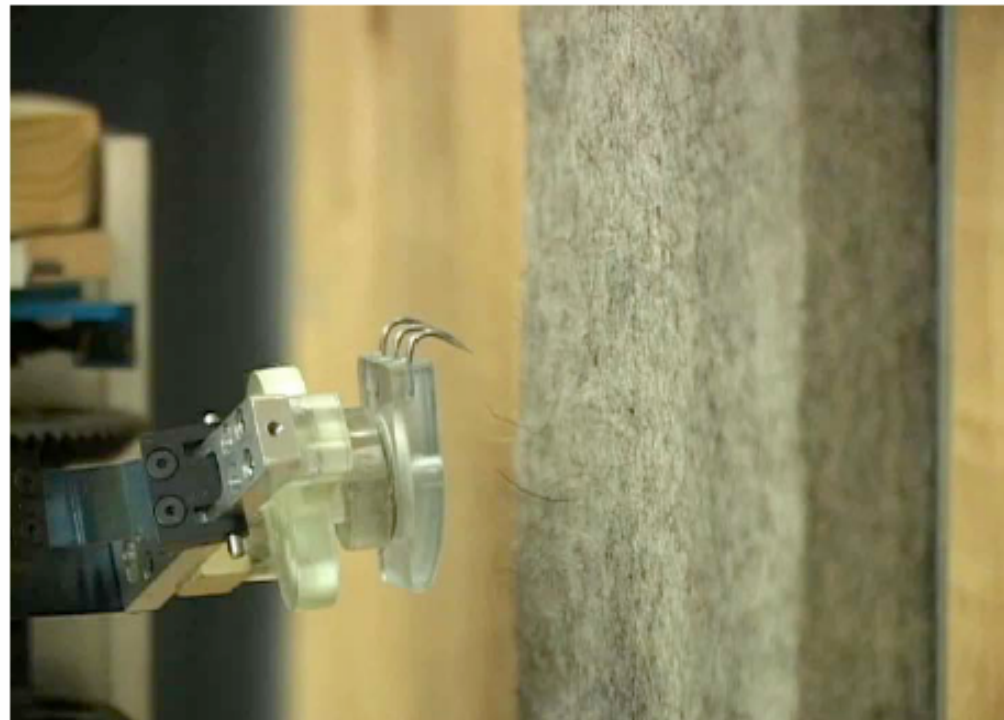
Designing Feet & Toes



Mark Cutkosky

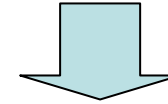
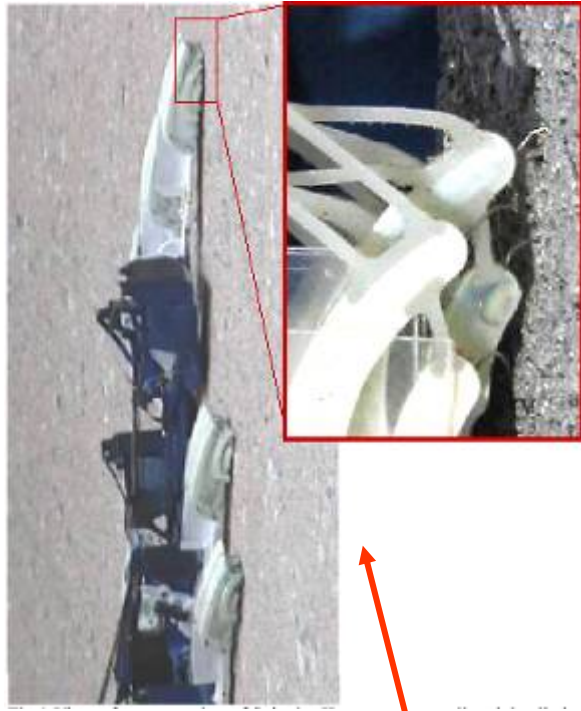
STANFORD UNIVERSITY

Shape *Deposition* *Manufacturing*
allows variable stiffness materials and
simple embedding.



Stanford Climbing Robot

Spinybot II: 2 righe di spine per ogni piede, ogni spina ha un diametro di 25 mm

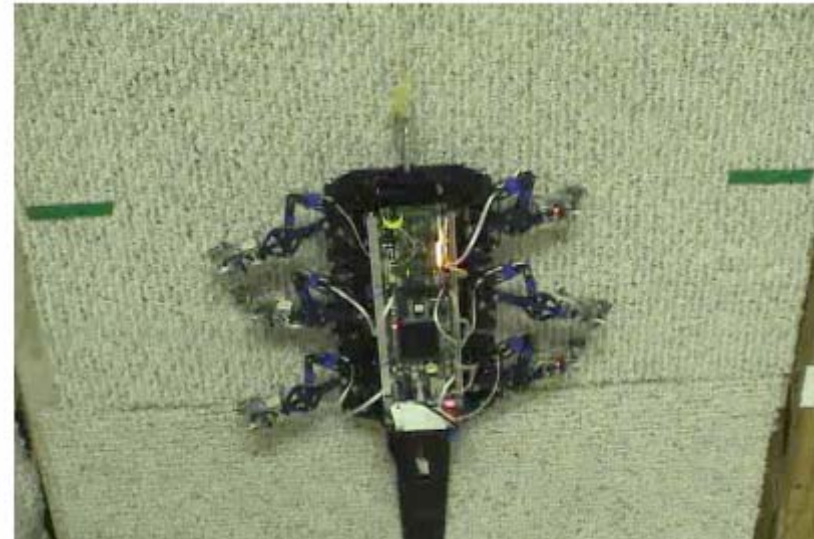


Bio-ispirazione da strategie di arrampicata di insetti e ragni:

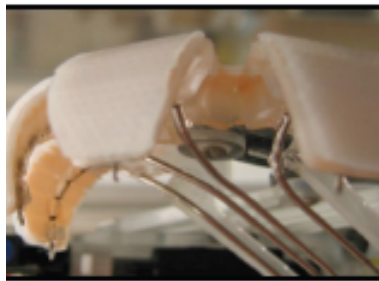
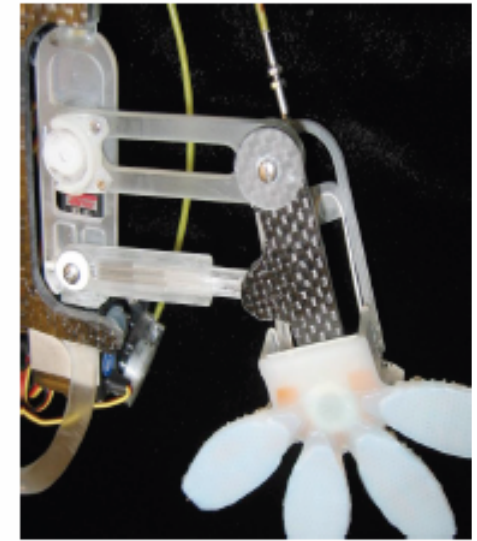
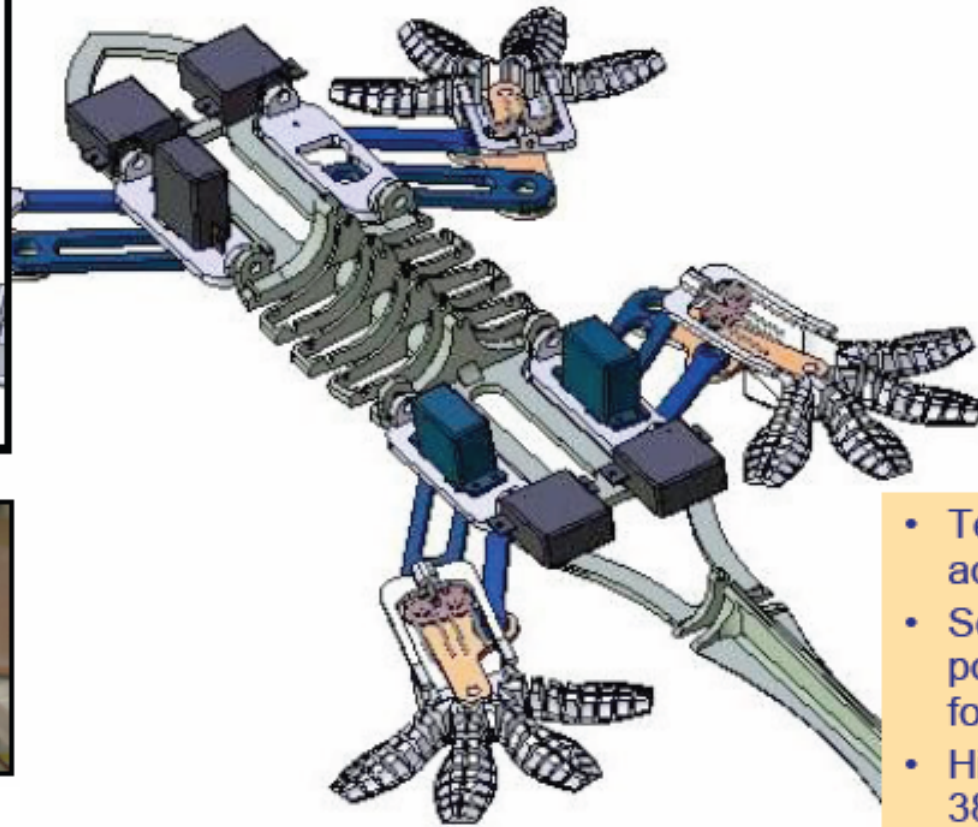
- un numero elevato di piccole spine che si attaccano alle asperità
- spine cedevoli
- totale e uniforme distribuzione delle spine sulle zampe

Spinybot II Climbing Robot Foot

S. KIM, A. T. ASBECK, M. R. CUTKOSKY and W. R. PROVANCHER, University of Stanford, 2005



StickyBot: robotic platform for investigation of directional adhesive climbing



- Test vehicle for directional adhesives
- Selectively compliant: 4 grades of polymer, carbon fibers and fabric for directional stiffening
- Highly under-actuated: 12 servos, 38 DOF.
- Double differential toe mechanism for conforming and peeling
- Limb sensors for force control.



StickyBot



RHex – an arthropod inspired dynamic robot

RHex is the world's first autonomous legged machine capable of mobility in general terrain approaching that of an animal. RHex exhibits unprecedented mobility over badly broken terrain. Its normalized speed is at least five times greater than that of any prior autonomous legged machine. The crucial new contribution RHex makes to legged locomotion lies in its ability to recruit a compliant sprawled posture for completely open loop stable dynamic operation.



Another approach to the problem: The CWRU's Robot serie

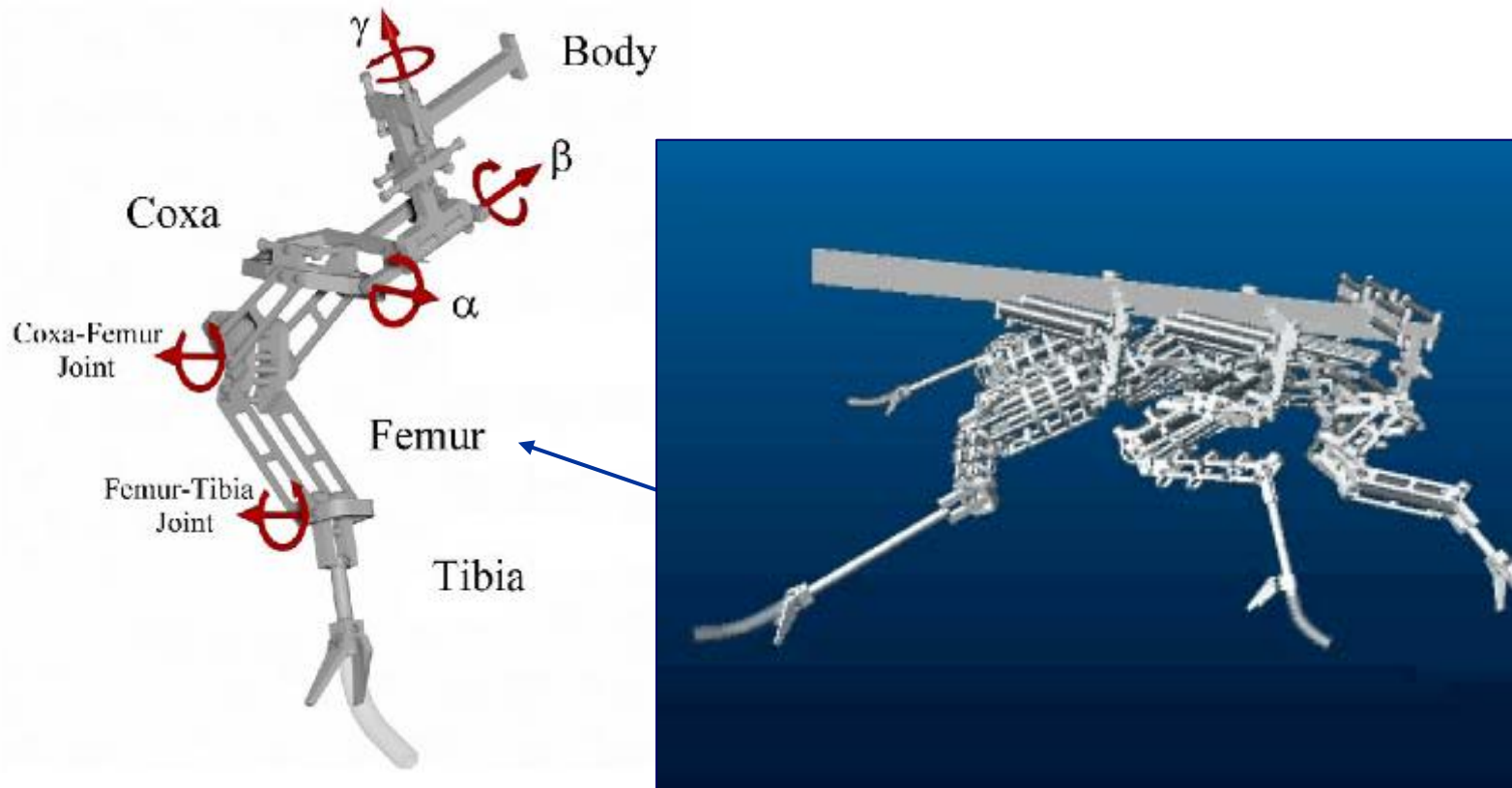
*Case Western Reserve University –
Roger Quinn (engineer) – Roy Ritzmann (biologist)*

Robot V is a hexapod with kinematics based on studies of the cockroach *Blaberus discoidalis* performed in the **Ritzmann Lab in the Biology Department at CWRU**. It has a total of **24 degrees of freedom** with **five for each front leg, four for the middle legs and three for the rear legs**. The robot is pneumatically actuated using off the shelf cylinders and blocks of **three-way pneumatic valves**. Pulse width modulation of the valves is implemented for variable position control of the cylinders. The structure of the robot is machined from high grade aluminum alloys. Weight of the robot = 15 Kg.

Robot V followed the biology as default strategy and was based **as closely as possible on the structure and walking strategies** that were observed in the death head cockroach *Blaberus discoidalis* (Watson and Ritzmann, 1998, Bachmann, 2000, Watson et al. 2002). Each pair of its six legs was designed to capture the dimensions and joint architecture that are necessary for walking and climbing. Because the leg designs of the robot capture the kinematics of the insect particularly well, problems that exist in controlling its movements are relevant to **control** of the insect's movements. This relationship allows for direct implementation of the insect's control principles into the robot. **Through study of biological control systems in nature, robust autonomous controllers capable of directing the actions of these walking robots were achieved.**



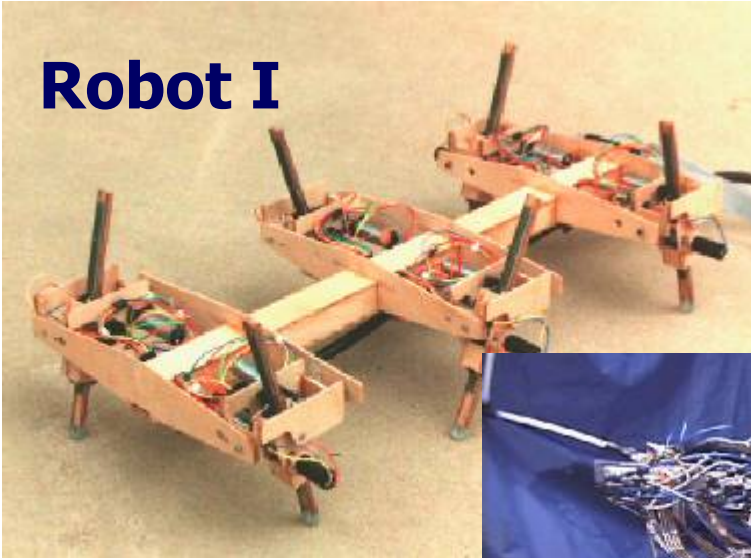
Although it is not feasible to capture the full range of motion exhibited by the insect—**up to seven degrees of freedom per leg**— analysis of leg motion during locomotion suggests that this is not necessary. This is because in many cases joints demonstrate only a small range of motion, while the majority of a leg's movement is produced by a **few joints**. On the **insect**, the **front legs** are relatively **small and weak**, but highly dexterous and are thus able to effectively manipulate objects or navigate difficult terrain. This dexterity is attained in the **robot** through **three joints** between the body and coxa (**γ , β and α**). The two remaining joints are between the **coxa and femur** and the **femur and tibia**. The **middle legs** on the **insect** play an important role in **weight support**, and are critical for **turning and climbing (rearing) functions**. On **Robot V**, the **middle legs** have only **two degrees of freedom— α and β** — between the body and coxa, and retain the single joint between the **coxa and femur** and the **femur and tibia**. Finally, the **cockroach** uses its **rear legs** primarily for **locomotion**, and these limbs are larger and much more powerful; likewise, the **rear legs** of the **robot** have only one joint between each of the segments. The body-coxa joint uses of only the **β joint**.



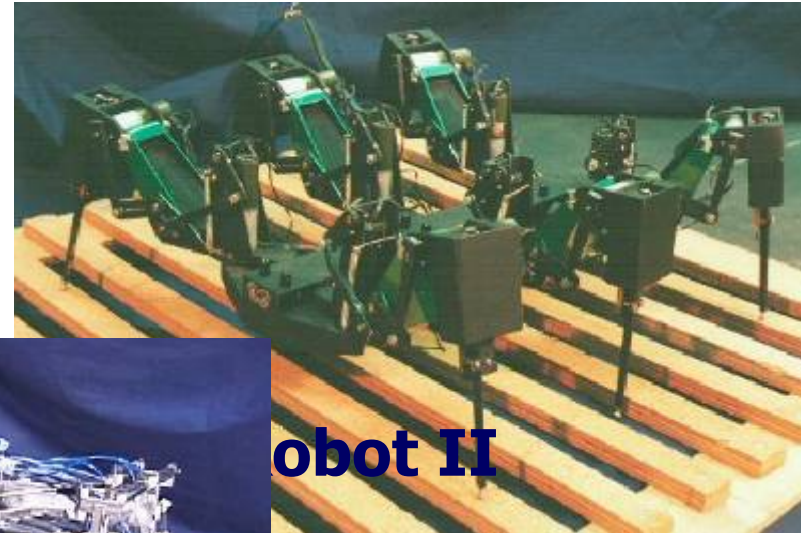
Schematic of front leg with axes of joint rotation

CWRU's Robot serie

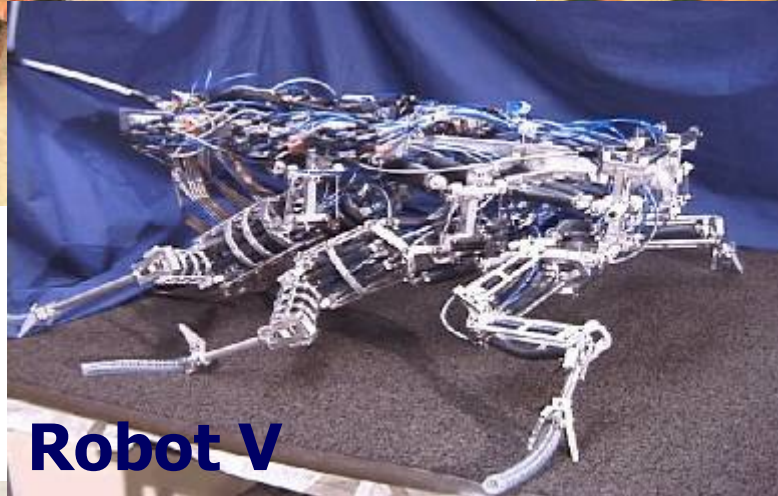
Robot I



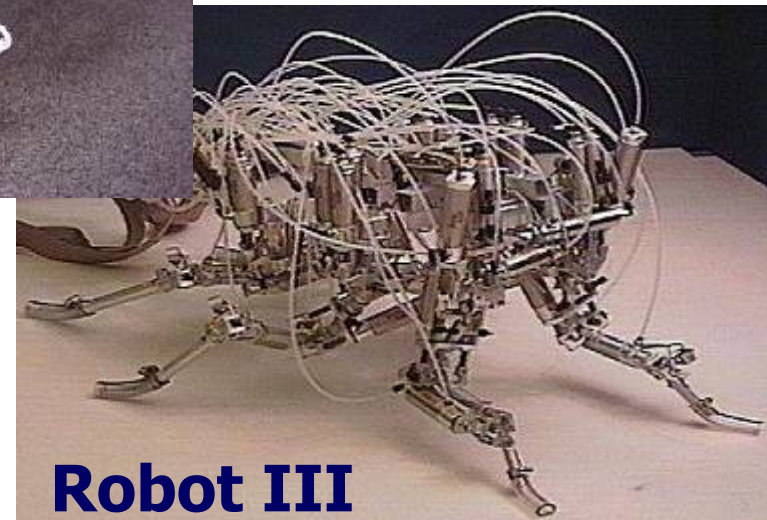
Robot II



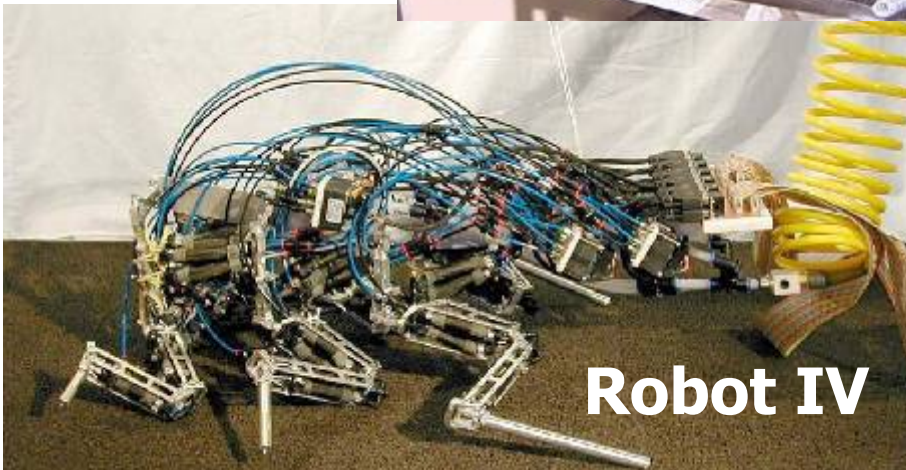
Robot V



Robot III



Robot IV



[robotiii.avi](#)

Intelligenza di sciame: dalla natura ai sistemi artificiali

Intelligenza di sciame

L'intelligenza di sciame è un approccio relativamente nuovo che prende ispirazione da comportamenti sociali di insetti e altri animali. In particolare, le formiche hanno ispirato molti metodi e tecniche. Tra queste una tecnica che ha avuto molto successo ed è molto usata è la tecnica di ottimizzazione nota come **Ant Colony Optimization** (ACO).

ACO prende ispirazione dal comportamento di molte specie di formiche usato durante la ricerca del cibo. Queste formiche depositano feromone sul terreno al fine di agevolare il ritrovamento del percorso da parte degli altri membri della colonia. Il metodo Ant colony optimization sfrutta meccanismi simili per risolvere problemi di ottimizzazione.

Comportamento delle formiche

- Rilascio di feromone

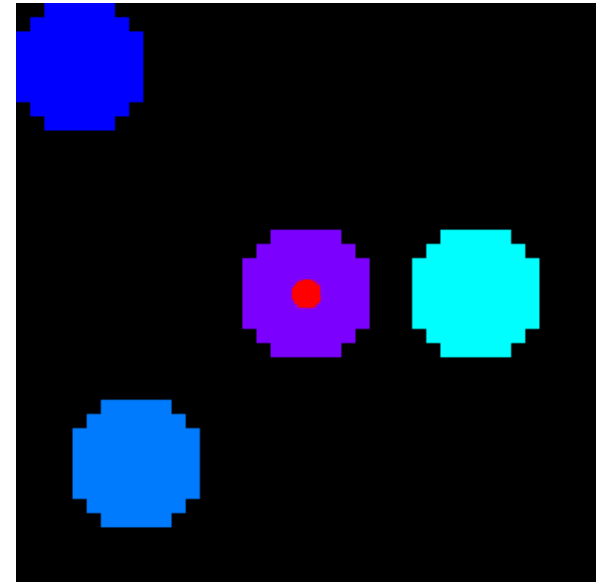
- Ciascuna formica segue semplici regole, ma tutta la colonia agisce in modo organizzato

– Cammino random

- Quando una formica trova un pezzo di cibo, porta il cibo al nido, rilasciando sostanze chimiche mentre si muove
- Quando le altre formiche annusano le sostanze, iniziano a seguire la traccia verso il cibo
- Mano a mano che le formiche portano il cibo al nido, rinforzano la traccia chimica

– Comportamento emergente

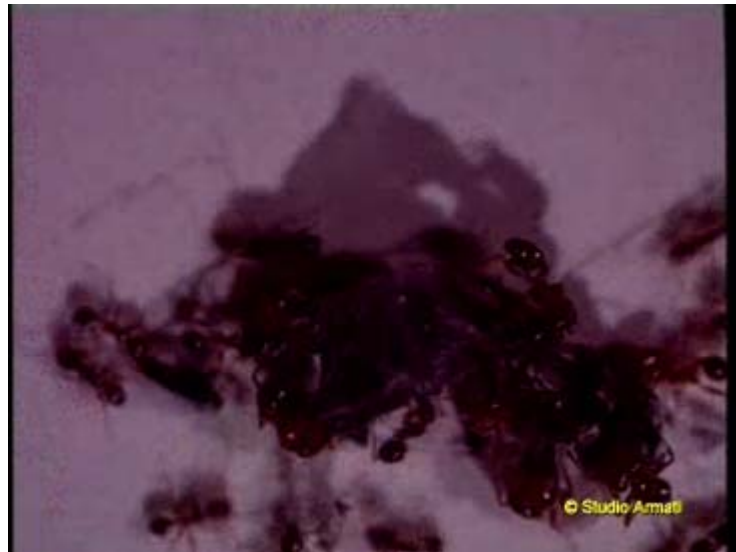
- La colonia di formiche generalmente inizia a esplorare la sorgente di cibo più vicina al nido e poi continua con quella più lontana.
- E' più difficile per una formica formare una scia di feromone stabile iniziando con il cibo più lontano al nido, dal momento che le sostanze chimiche tendono ad evaporare se non vengono rinforzate.



Comportamento delle formiche

Swarm strategies in ant colonies for:

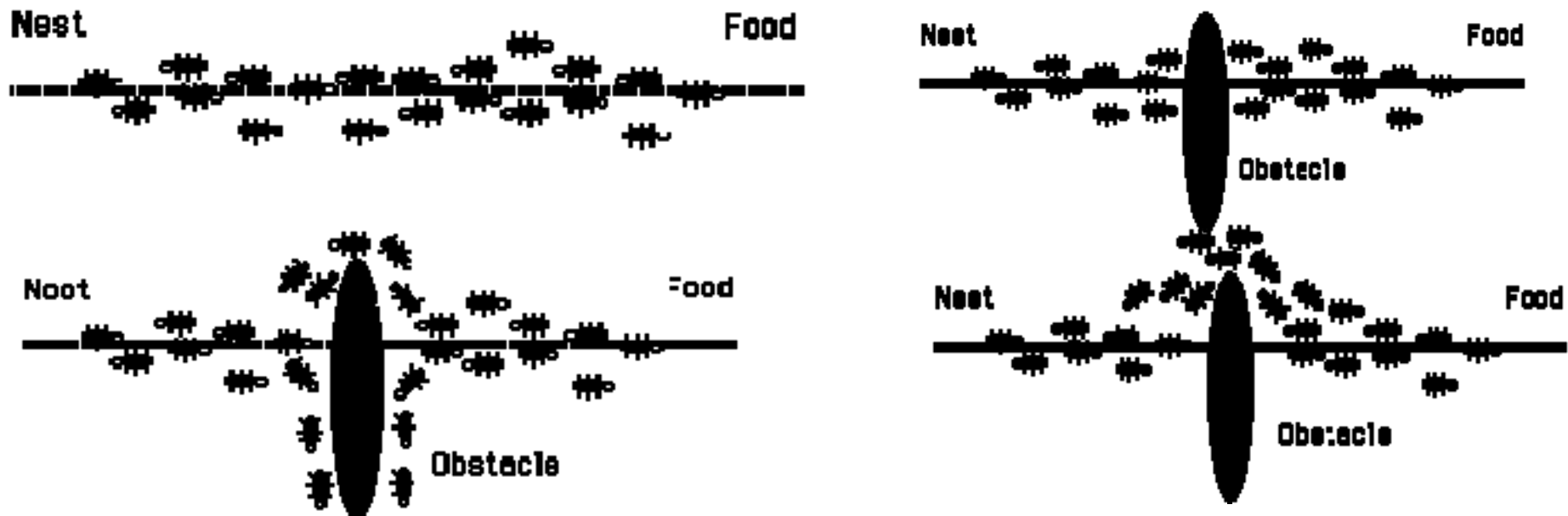
- Collective transport of food
- Clustering of larvae in nest
- Navigation (pheromone trail)



Comportamento delle formiche

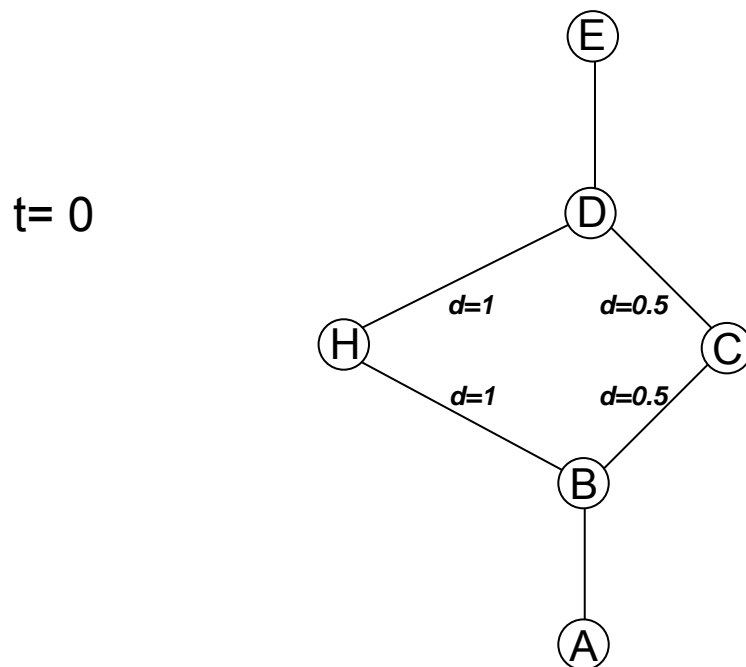
Real ants are capable of finding shortest path from a food source to the nest without using visual cues, but using as mean a **pheromone trail**. Also, they are capable of adapting to changes in the environment, for example finding a new **shortest path** once the old one is no longer feasible due to a new obstacle.

Ants deposit a certain amount of pheromone while walking, and each ant probabilistically prefers to follow a direction rich in pheromone rather than a poorer one. This elementary behavior of real ants can be used to explain how they can find the shortest path which reconnects a broken line after the sudden appearance of an unexpected obstacle has interrupted the initial path. Once the obstacle has appeared, those ants which are just in front of the obstacle cannot continue to follow the pheromone trail and **therefore they have to choose between turning right or left**. It is interesting to note that those ants which choose, by chance, the **shorter path around the obstacle will more rapidly reconstitute** the interrupted pheromone trail compared to those which choose the longer path. Hence, the shorter path will receive a higher amount of pheromone in the time unit and this will in turn cause a higher number of ants to choose the shorter path.



Esempio:

Per dare un'idea di come funziona, facciamo una semplificazione estrema di un algoritmo basato sull'idea di ACO. Uniamo sei punti come in fig. Tutte le distanze sono 1 tranne che da B a C e da C a D che sono 0.5.

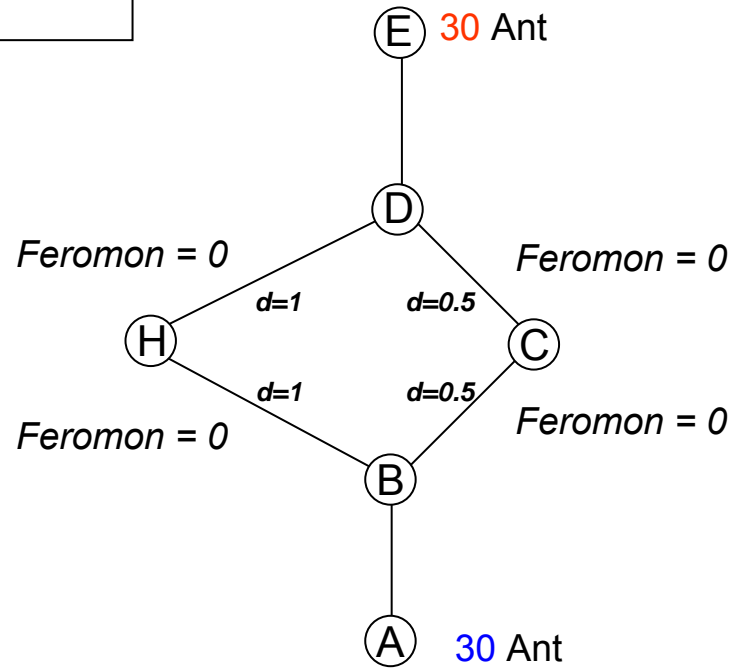


Discretizziamo il tempo in intervalli di lunghezza fissa ($t= 0,1,2,3,\dots$) e ad ogni intervallo supponiamo che ci siano 30 formiche che vanno dal punto A al punto E e viceversa. Ognuna viaggiando alla velocità di 1 per unità di tempo. Ogni formica che ha camminato lascia una traccia di feromone persistente per una unità di tempo.

Artificial Ants

t = 0

Ant ↓
Ant ↑

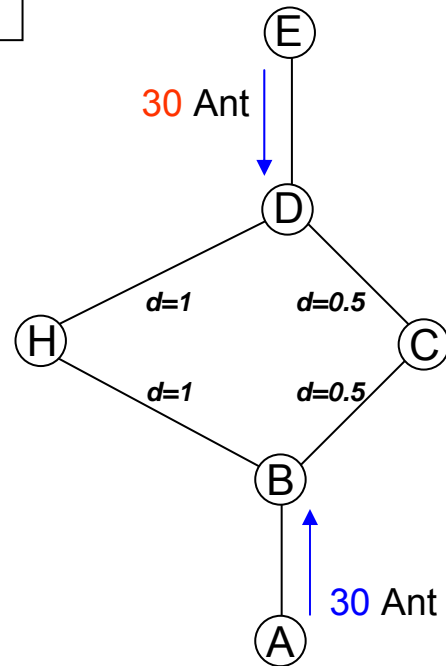


Artificial Ants

t=0 → t=1

Ant ↓

Ant ↑

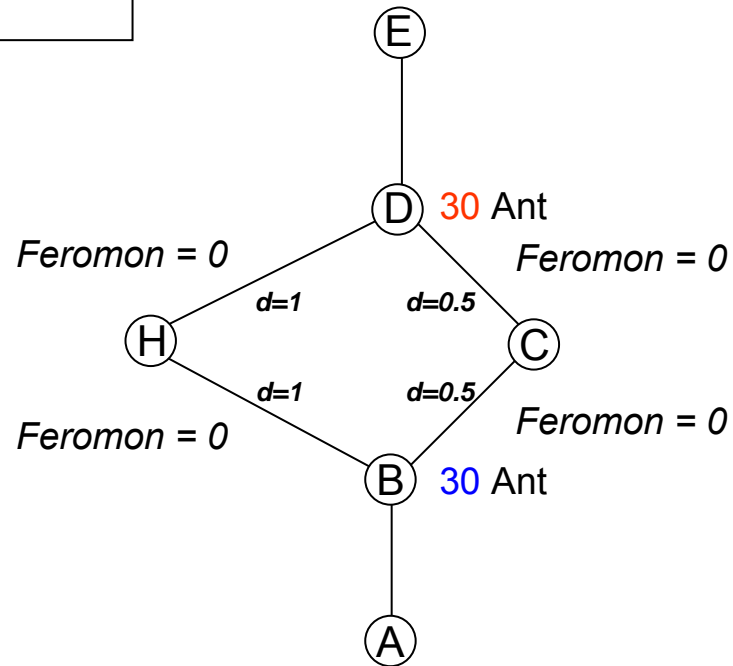


Artificial Ants

t= 1

Ant ↓

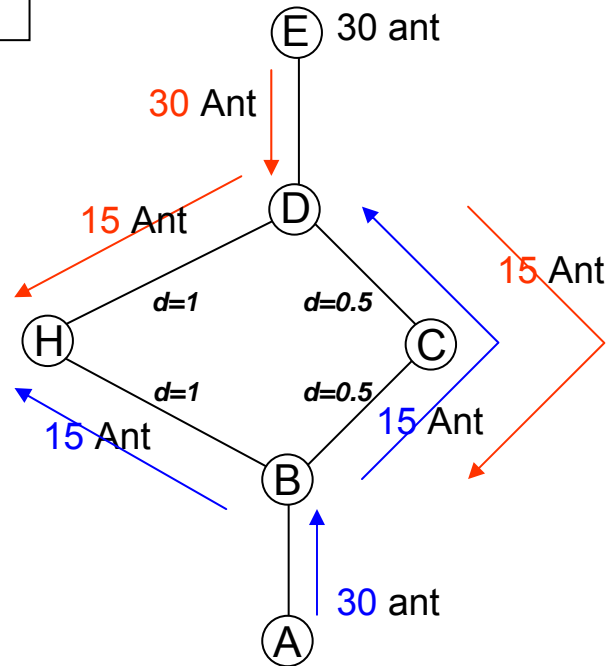
Ant ↑



Artificial Ants

t= 1 → t= 2

Ant ↓
Ant ↑

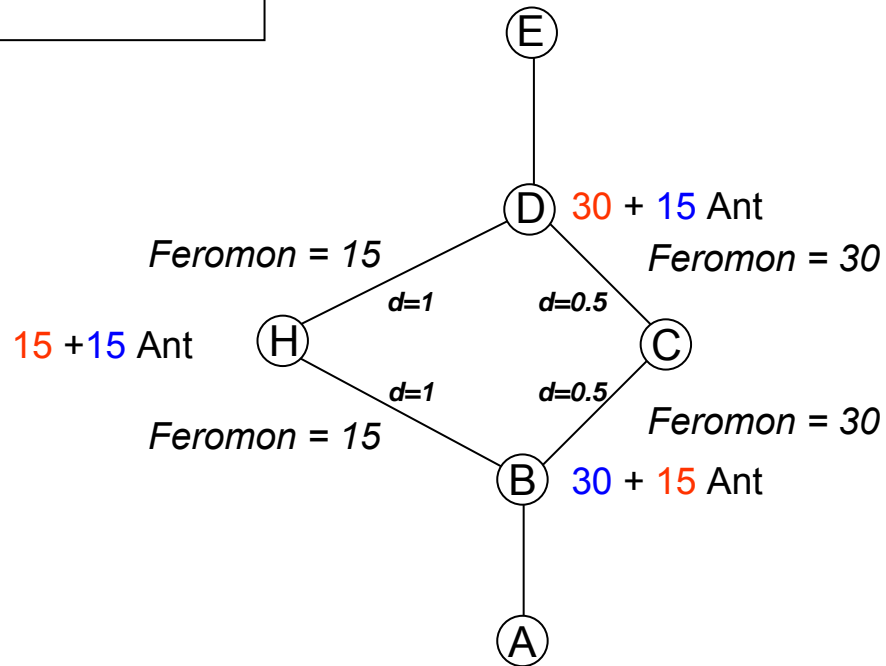


Artificial Ants

t = 2

Ant ↓

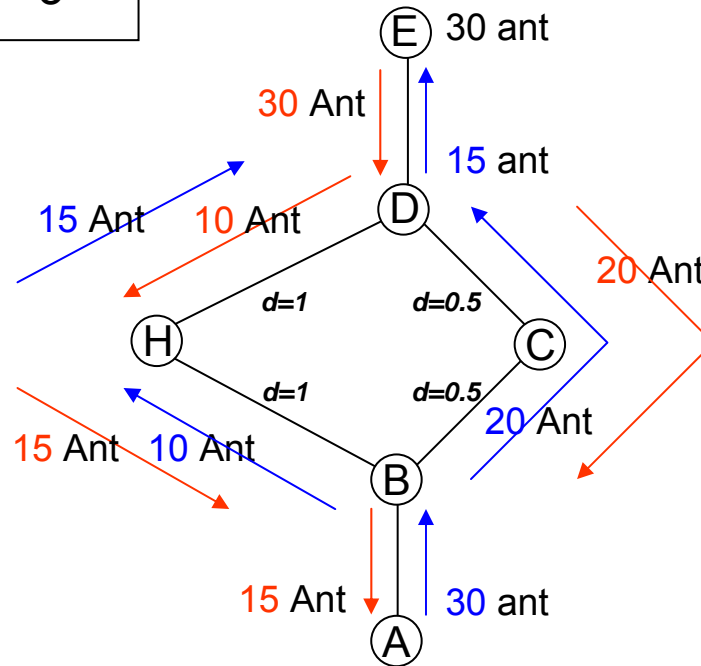
Ant ↑



Artificial Ants

t= 2 → t= 3

Ant ↓
Ant ↑

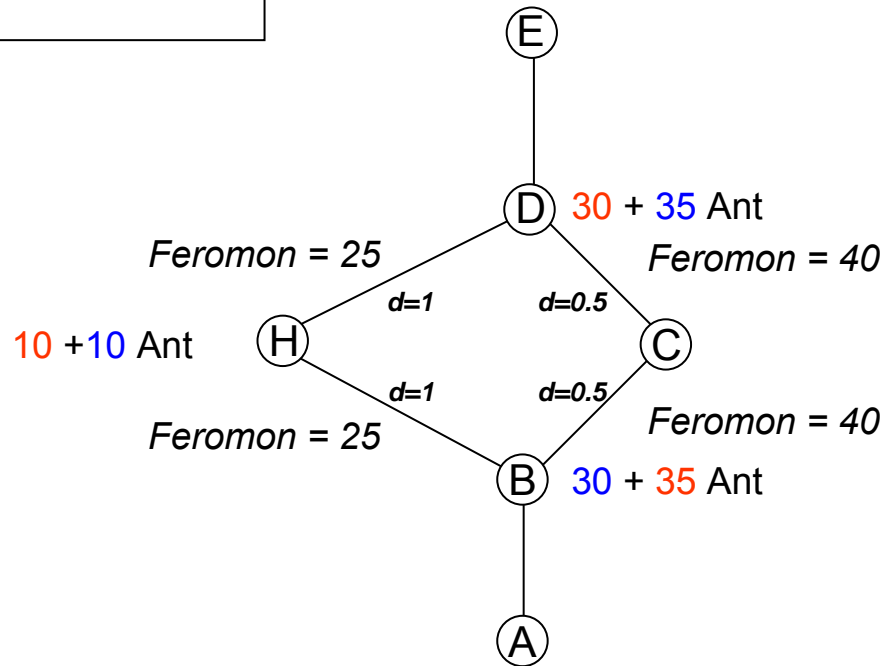


Artificial Ants

t = 3

Ant ↓

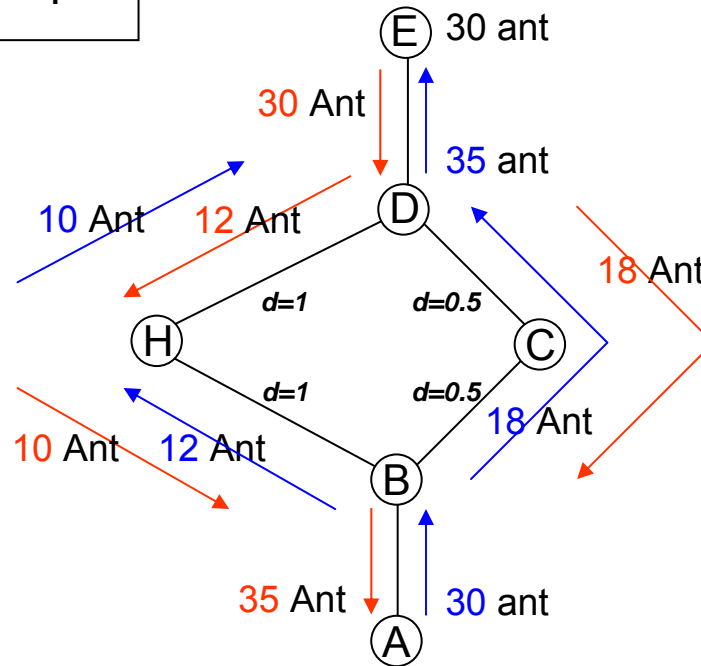
Ant ↑



Artificial Ants

t=3 → t=4

Ant ↓
Ant ↑

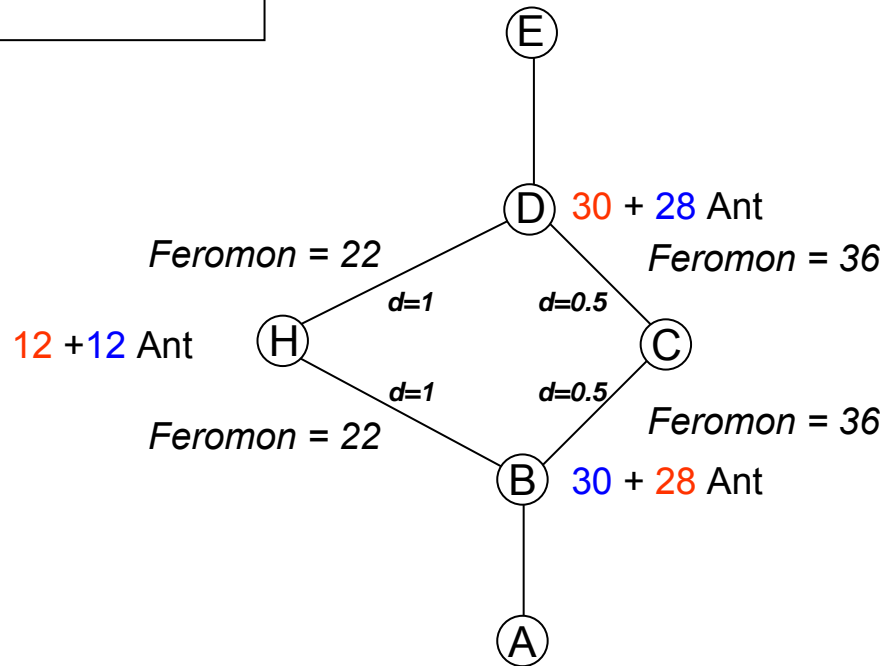


Artificial Ants

t = 4

Ant ↓

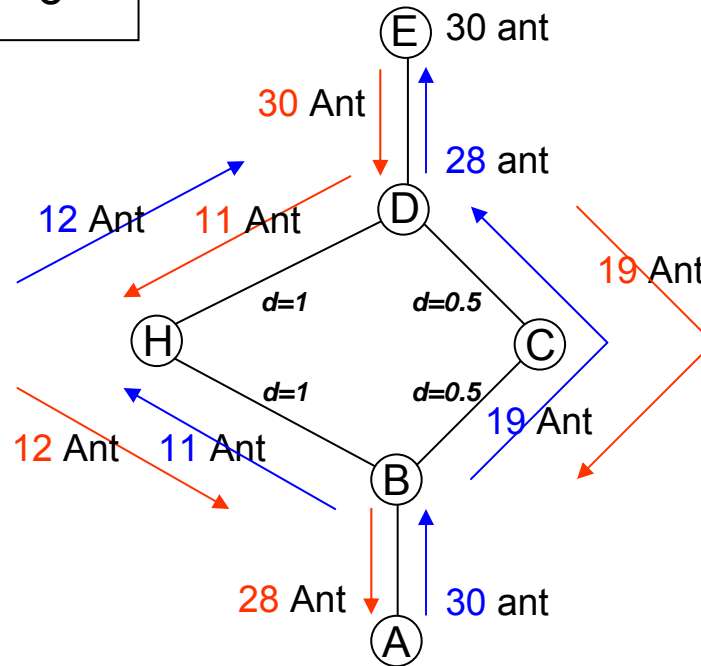
Ant ↑



Artificial Ants

t= 4 → t= 5

Ant ↓
Ant ↑



Conclusioni

- Andando avanti il processo continua fino ad arrivare a convergenza. Un numero maggiore di formiche passerà dal percorso più breve (**programma**).
- Perché non tutte passano dalla stessa parte? Esempio molto semplificato. Infatti bisogna tener conto della discretizzazione rozza dei tempi e degli spostamenti. Inoltre, il feromone non sparisce istantaneamente.
- Comunque con algoritmi basati sulla stessa idea ma più raffinati si possono affrontare problemi complessi.

Modelli computazionali ispirati al comportamento delle formiche

Algoritmi Ant Colony Optimization (ACO) usati per risolvere problemi di ottimizzazione combinatoriale, come:

- Traveling salesman problem (TSP): n città collegate tra loro in un certo modo. L'obiettivo è quello di visitarle tutte facendo il percorso più breve/meno costoso e senza ripassare da alcuna città già visitata.
- Job-shop scheduling: insieme di attività (job) (politiche di schedulazione). Ottimizzare attività, presupponendo che vi sia un'unica risorsa che eroga un servizio e tanti job che richiedono quel servizio.
- Sequential ordering: ordinamento sequenziale. TSP con inseriti alcuni vincoli di precedenza.
- Vehicle routing: trattano gli aspetti della gestione di una flotta di veicoli nell'ambito della logistica. Ottimizzazione del percorso del veicolo, come nel TSP, ma qui sono i veicoli.

<http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/index.html>

Swarm Robotics

A new paradigm for the coordination of multi-agent robotic systems

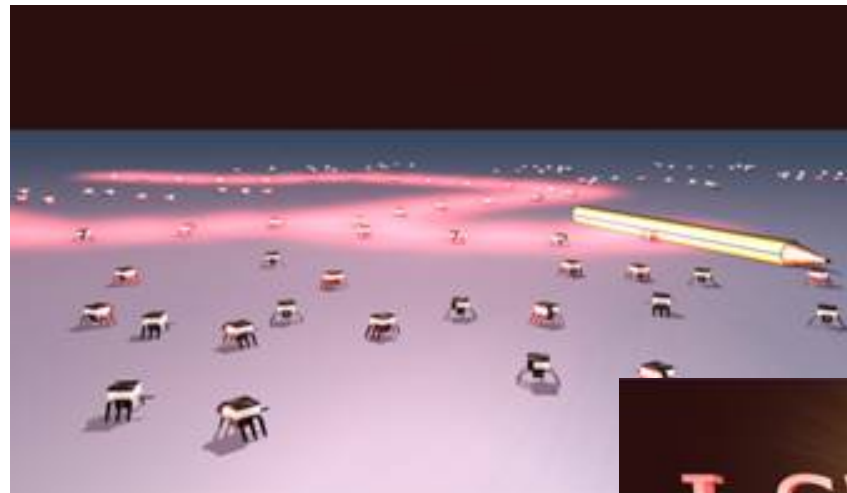
The goal: to study the design and programming of a relatively large numbers of simple physical robots such that a desired collective behavior emerges from the inter-robot interactions and the interactions of the robots with the environment, inspired but not limited by the emergent behavior observed in **social insect colonies**.

Unlike distributed multi-agent robotic systems, **swarm robotics emphasizes large number of robots**, and promotes scalability by using **local communication**.

Swarm Microrobotics

Swarm Intelligence algorithm + advanced microrobotic hardware

It is in the perspective of miniaturization that swarm-based robotics becomes meaningful. Microrobots need to “operate in very large groups or swarms to affect the macroworld” → Mass fabrication of microrobots through microtechnology.



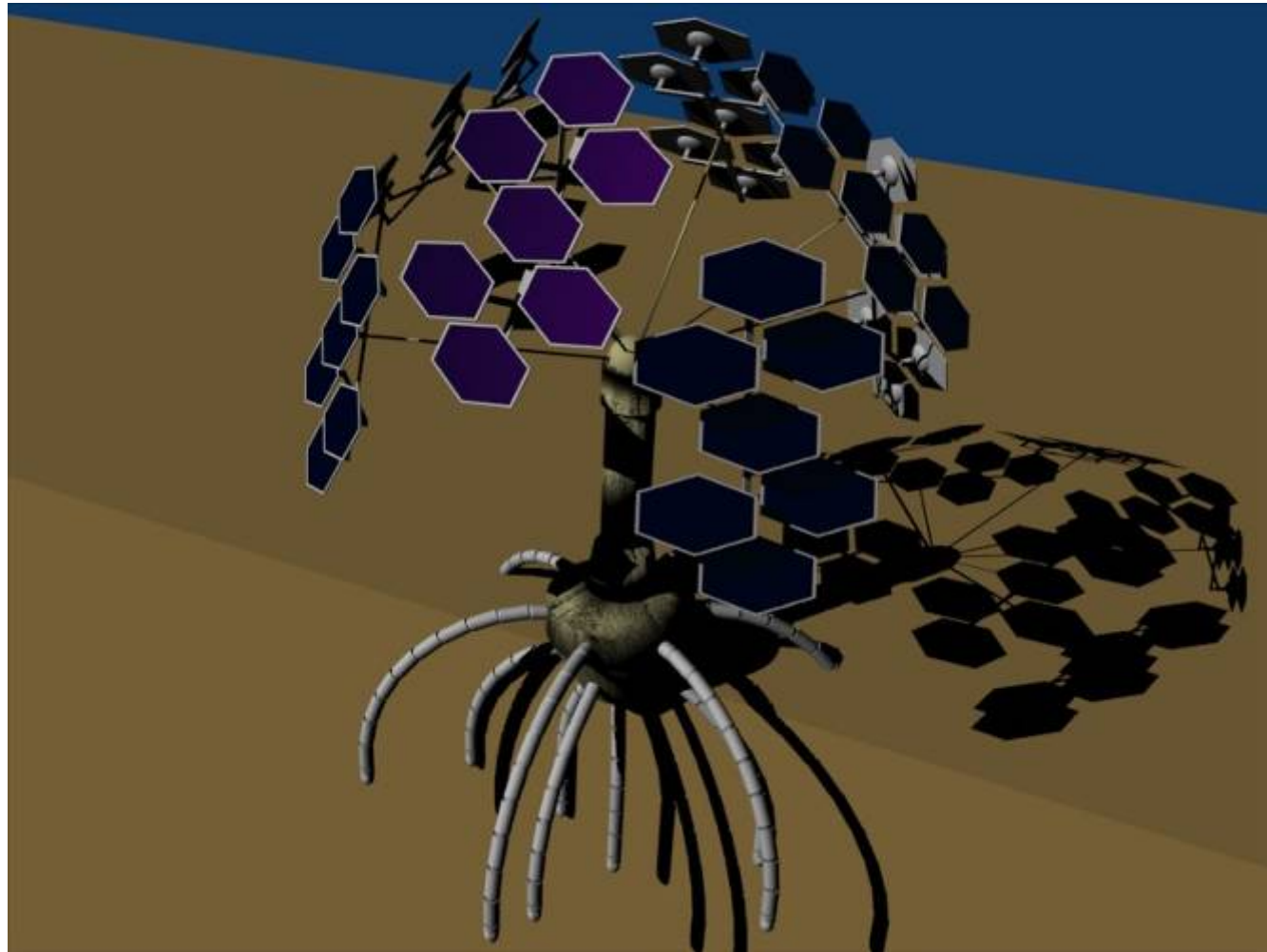
Applications:

- Inspection of engines, turbines, pipelines
- Distributed sensing tasks in micro-machinery
- Pollution measurements (“Insect robots”)
- Space exploration
- Medical applications: diagnosis, intra-corporal operation



Robot inspired to plant's roots for soil exploration:

The Plantoid



Plants

Plants are photosynthetic, eukaryotic, multicellular organisms characterized by an aerial part and a root system.

In an attempt to compensate for their sessile nature, they have developed growth response to deal with the copious and rapid changes in their environment.

These responses are known as **tropisms**.



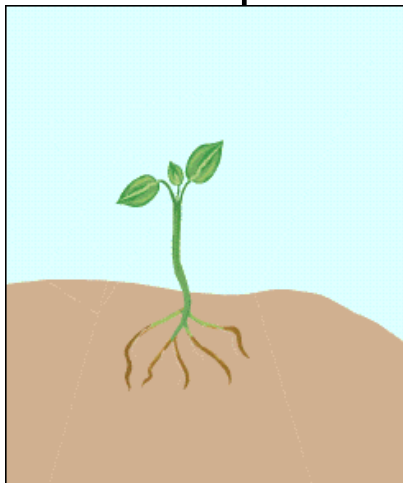
Plants biology: TROPISMS

The directional growth of plant organs in response to a directional environmental stimulus:

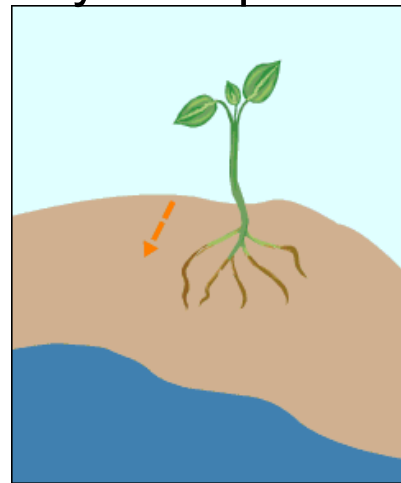
- ➡ **Phototropism:**
- ➡ **Gravitropism:**
- ➡ **Thigmotropism:**
- ➡ **Hydrotropism:**
- ➡ **Chemotropism:**

Light
Gravity
Touch
Water
Chemical

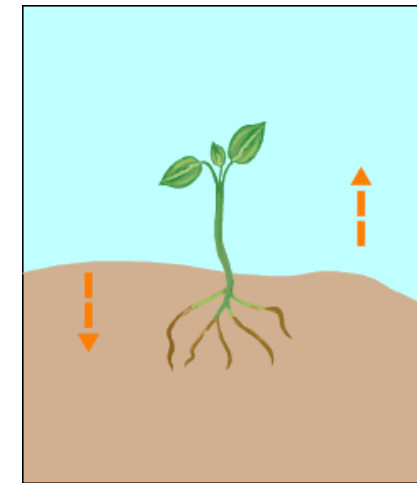
Phototropism



Hydrotropism



Gravitropism



Font: <http://virtualastronaut.jsc.nasa.gov/textonly/act25/text-plants.html>

The combination of these mechanisms allows plants to overtake hostile or inaccessible environments and colonize the soil, leading to the generation of ramified root systems that assure their stability and survival.

Moreover...

... plants demonstrate to successfully reach their needs even without a conventional **locomotion system**. Although plants cannot physically move, active root growth allows **exploration of soil** niches for nutrition. This implies that root apices are not only sites of nutrient uptake but also sites of **forward movement**.



Why keeping inspiration from plant's roots to build a robot for soil exploration?

- a. Plants use roots to penetrate soil, anchor the plant, mine the soil of minerals, and drain the soil of water for use by the plant.
- b. Plants explore soil in a capillary way by means of an expanded network of roots and sensors included in them.
- c. Plants use the root system to stock the reserves exceeding the usual consumption (several key molecules and energy) and use them when the ordinary catabolic mechanisms are damaged or cannot work.



What are the plant's behavior and mechanisms that we want to imitate in designing the robot for soil exploration?

1. A root apex, which includes:

- A gravity sensor to drive the movements of plant roots following the gravity stimulus (gravitropism)
- Sensors included in the roots to mine the soil of minerals, and to drain the soil of water for use by the plant.
- The behavior of the auxin hormone, to drive the root apex

2. The actuation mechanism based on an osmotic process.

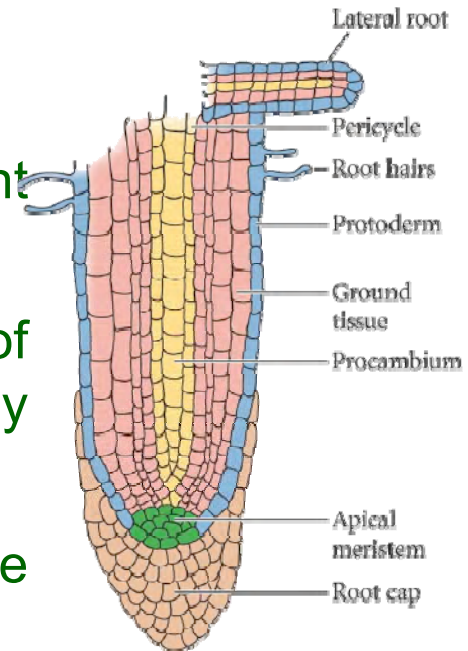
Actuation - Imitating the plants strategy:

- Very **low power consumption** (small current requirement)
- High **modulation** actuation capability (high accuracy, resolution)
- **Slow actuation**
- High **force/pressure** actuation

What are the plant's behavior and mechanisms that we want to imitate in designing the robot for soil exploration?

1. A root apex, which includes:

- A gravity sensor to drive the movements of plant roots following the gravity stimulus (gravitropism)
- Sensors included in the roots to mine the soil of minerals, and to drain the soil of water for use by the plant.
- The behavior of the auxin hormone, to drive the root apex



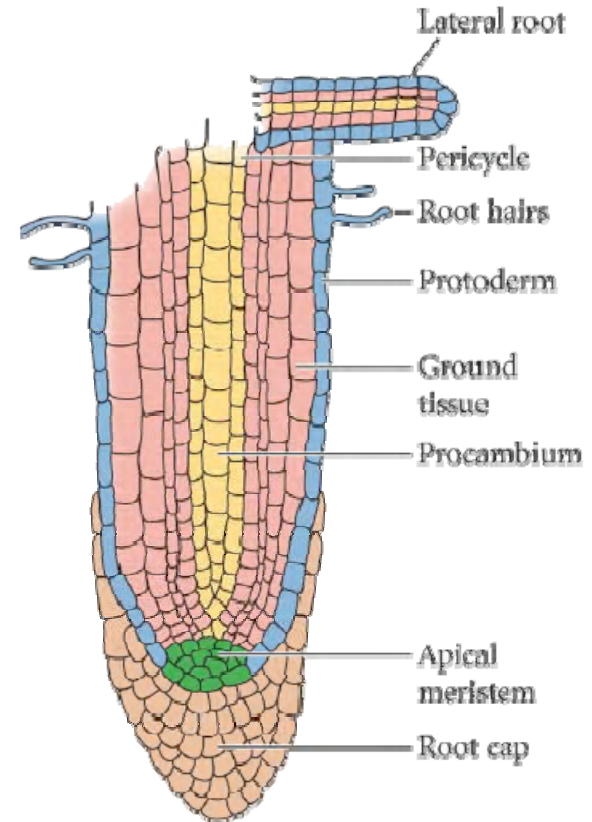
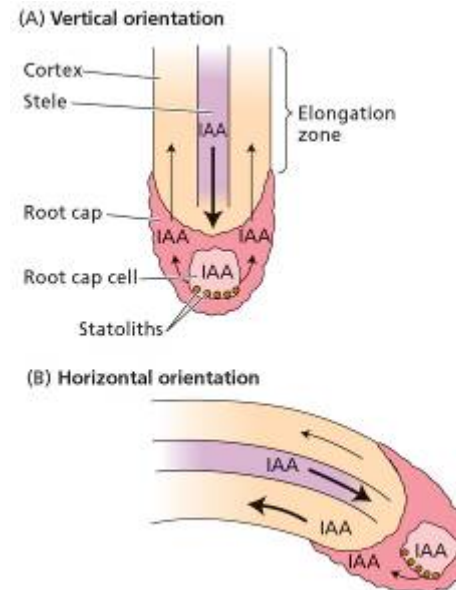
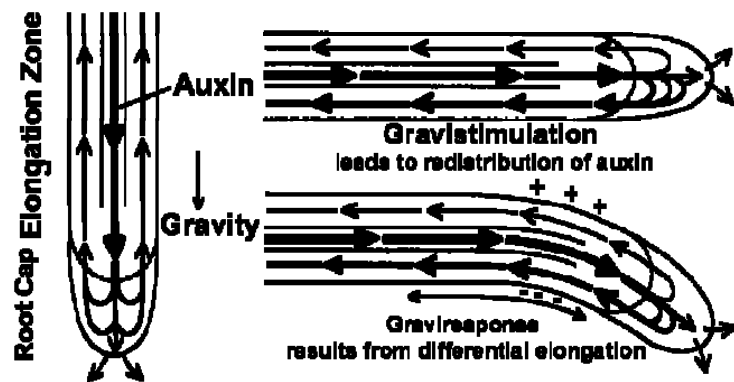
2. The actuation mechanism based on an osmotic process.

Actuation - Imitating the plants strategy:

- Very **low power consumption** (small current requirement)
- High **modulation** actuation capability (high accuracy, resolution)
- **Slow actuation**
- High **force/pressure** actuation

Plants biology: Steering of the Apex

- The directional growth response of the apex to the gravity or water gradient is **actuated** by the plants by an **osmotic process**.
- The sensors on the root cap change the flux of auxin (an hormone of the plant) and drive the bending of the apex by increasing the growing of a side of the root and decreasing the growing of the other side.

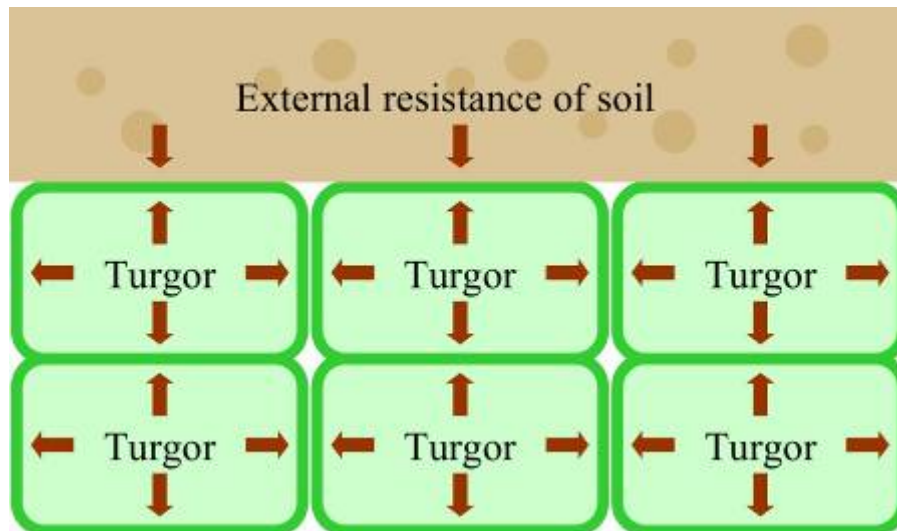


Osmotic Actuator: Motivations

The movement/growing process in plant's roots is essentially actuated by cell division and cell elongation just behind the tip. **Water influx into cells generates turgor pressure (P), which provides the driving force for elongation and root growth.**

Actuation - Imitating the plants strategy:

- Very **low power consumption** (small current requirement)
- High **modulation** actuation capability (high accuracy, resolution)
- **Slow actuation**
- High **force/pressure** actuation



$$P = \pi_O - \pi_I$$

P = Turgor

π_I = Osmotic potential inside the cell

π_O = Osmotic potential outside the cell

$$\sigma = P - W$$

W = Wall Pressure

σ = Growth Pressure

Osmotic Actuator: Scientific Problem

Osmotic pressure: *Van t'Hoff's law*

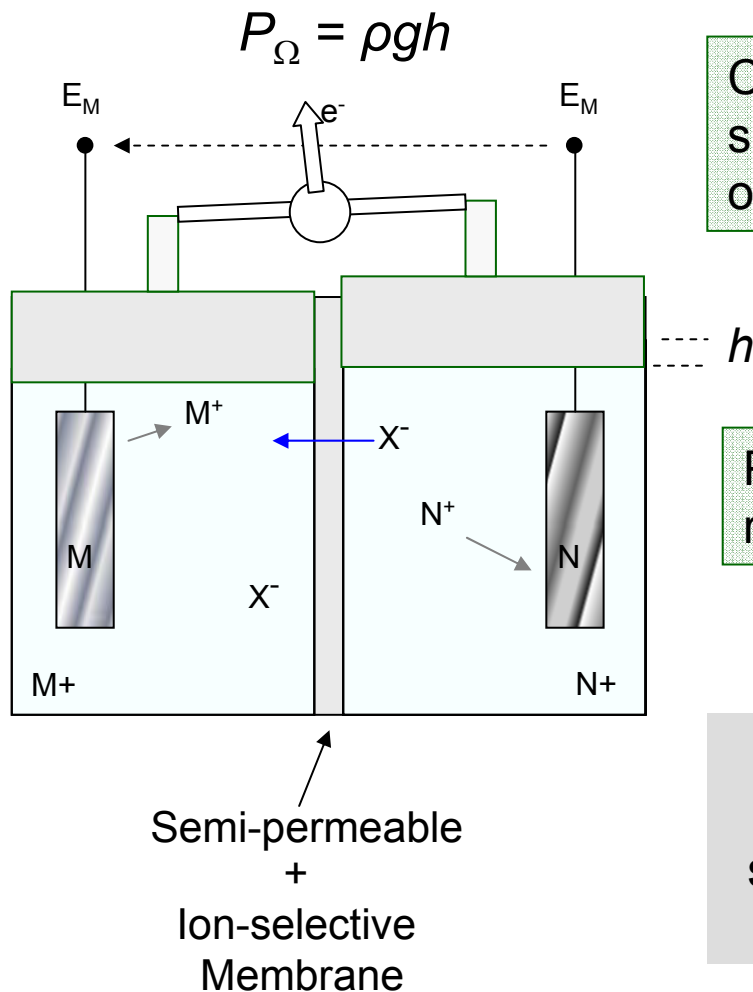
$$P_{\Omega} = \Delta C \cdot RT$$

P_{Ω} – Osmotic pressure

T – Temperature (K)

ΔC – Difference of concentration

R – Gas constant



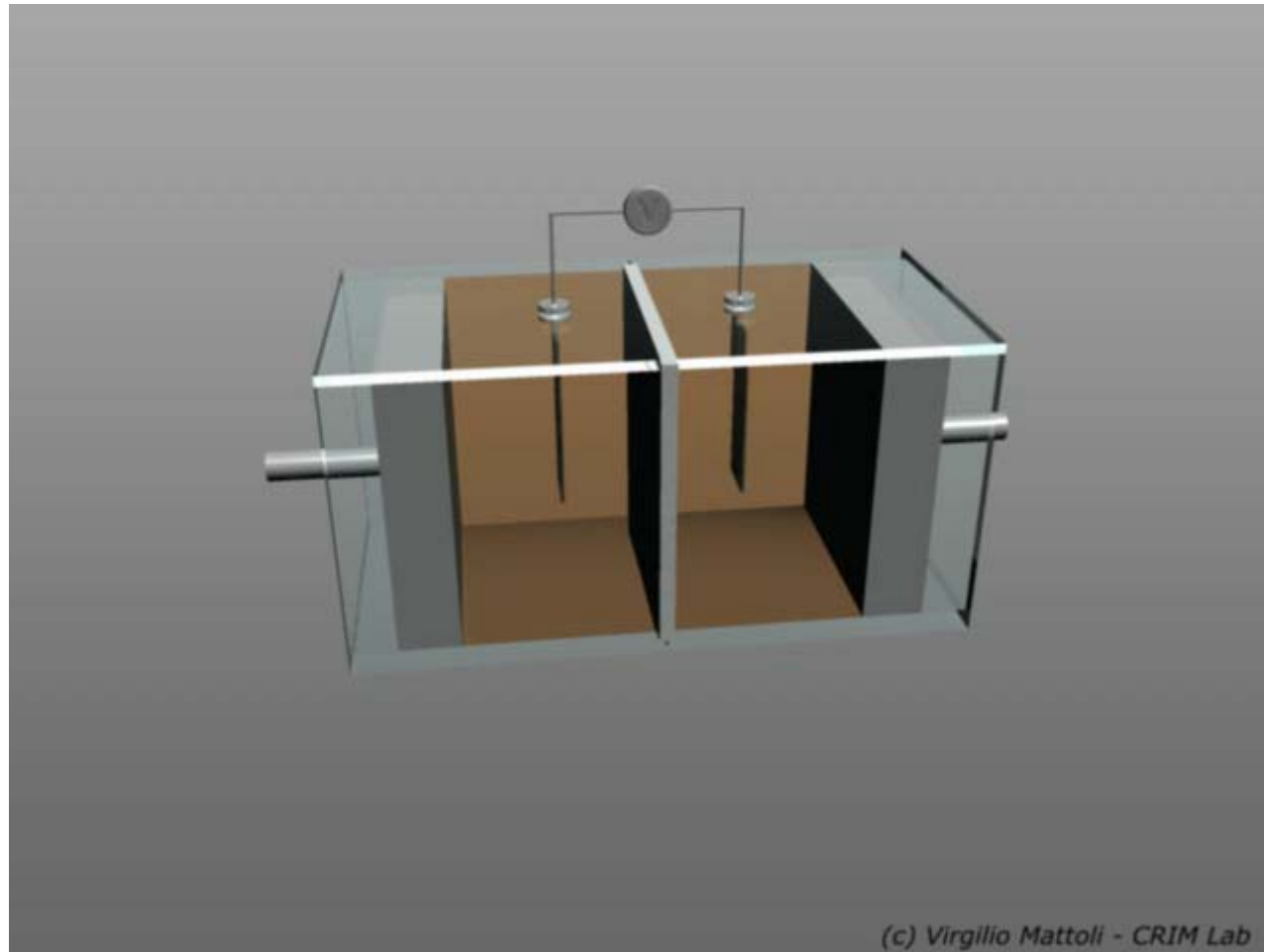
Changing the concentration of ions by using a suitable current it is possible to modify the osmotic pressure across the two cells

The difference of pressure is used for the actuation

Problem: ionic exchange membrane is required for charge transport

Osmotic pressure: is the hydrostatic pressure produced by a solution in a space divided by a semi-permeable membrane due to a differential in the concentrations of solute

Osmotic Actuator: Scientific Problem



Main Issues:

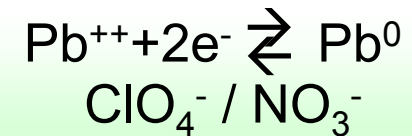
- How to use pressure for actuation?
- Membranes (double functionalities)?
- Electrolytic solution?
- Performances?

Osmotic Actuator: Design Principles

Electrolytic solution (what properties)

- Red-ox reaction must be reversible
- No affected by collateral electrochemical reactions
- No production of gas
- H₂O ionic transport increases osmotic effect

Cationic reduction
Anionic charge transport



Membrane (double functionalities): osmotic / ion-selective

- Osmotic membrane for water diffusion → Cellulose Acetate/Polyamide Composite
- Ion-selective for charge transport → Functionalised PVC/Polysulphone

Expected performances of the system:

- Pressure / force achievable → ($\Delta C = 1\text{M}$) 20-25 atm – (20-25 Kg/cm²)
- Time scale / Velocity → Volumetric H₂O flow ~ 10⁻⁷ m³/s m²
- Time scale / Displacement → Linear displacement ~ 0.1-1 mm/h
- Powers required → $\mu\text{W} \sim \text{nW}$ (depend on the conductivity)

Osmotic Actuator: Preliminary Experiments

Objective:

- Anionic membranes samples evaluation
- Preliminary characterization of membrane anions selectivity
- Preliminary characterization of osmotic transport



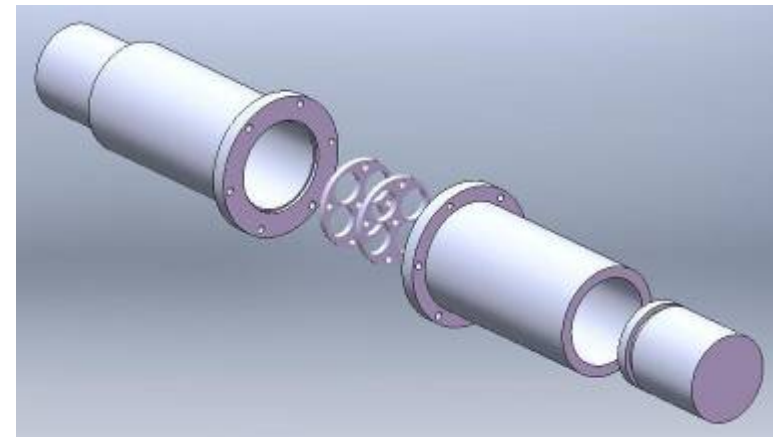
Osmotic Actuator: Experimental Set-Up

Objective:

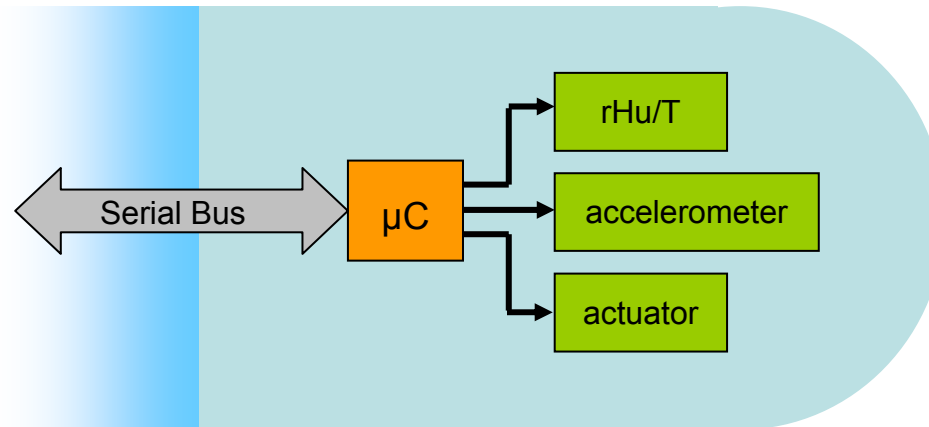
- Validation of the electro-osmotic concept
- Preliminary characterization of performances

Methods:

- Two chambers divided by a septum composed by two grids that kept the Ionic Membrane
- The two electrodes inserted in the two chambers
- The osmotic pressure can be measured by means of a differential pressure sensor or measuring the displacement of the two pistons

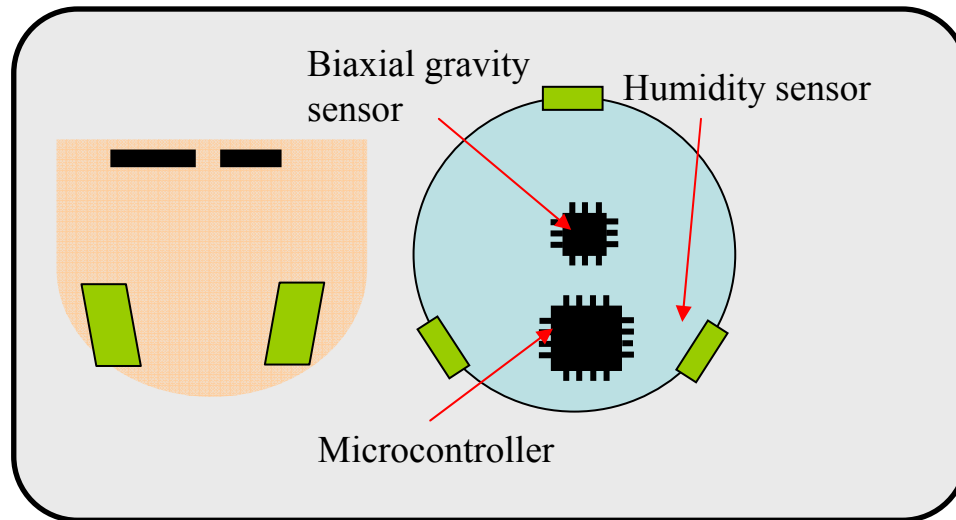


Robot Implementation: Root Apex



- rHu: humidity sensor
- Accelerometer: used like a gravity sensor
- Actuator: the system includes actuators for the steering of the apices according to the sensory gradients.
- μC : brain-like unit, used for acquire data by the sensor and send/receive data by the other apices.

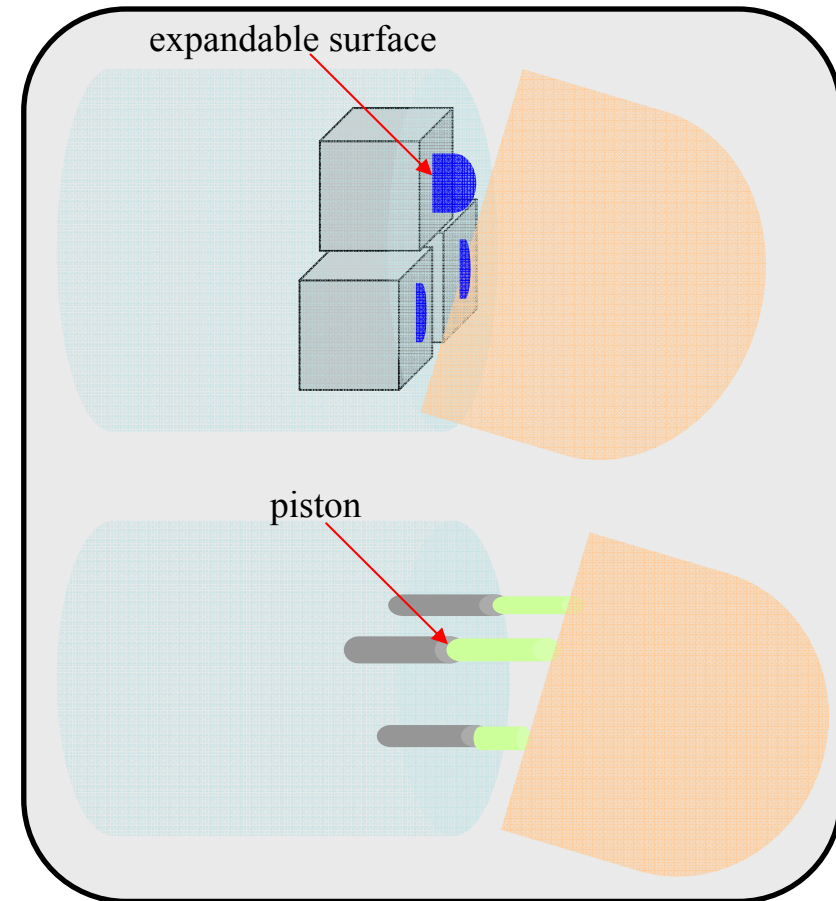
Robot Implementation: Design of Root Apex



The apex is made up by a **rigid tip** containing the electronic and the sensor for soil analysis.

This tip is driven by **electro-osmotic actuators** (pistons or expandable surfaces).

The actuators are driven on the basis of the measures performed by the sensors.





ARIADNA Programme by European Space Agency (ESA)

Bio-inspiration from Plants' Roots

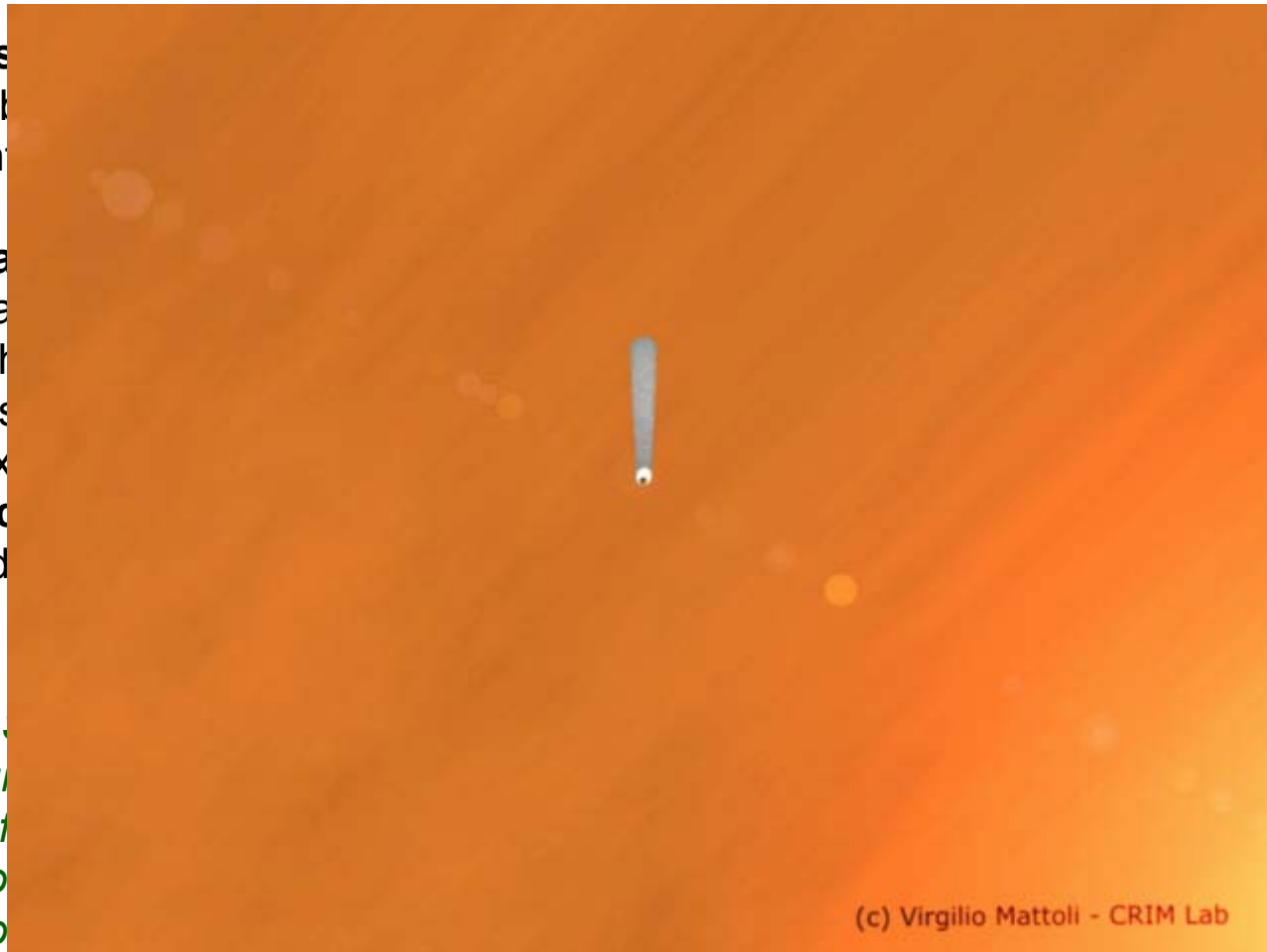
Roots do not only sense
signals by their embodiment
for plan strategy components

Applications in Space

Simple, lightweight and
present signs of life
A plant-like robotic system
inside the ground exploration
and showing **high accuracy**
The technology ready for
this topic.

Research and Development

- *review of natural*
- *assessment of*
- *identification of*
- *identification of*
- *proposal of a novel bio-inspired mechatronic system design for future space applications*



gather
d used

fast and
y move
Mars),

earch in

materials

(c) Virgilio Mattoli - CRIM Lab



Downloaded for use on TONMO.com

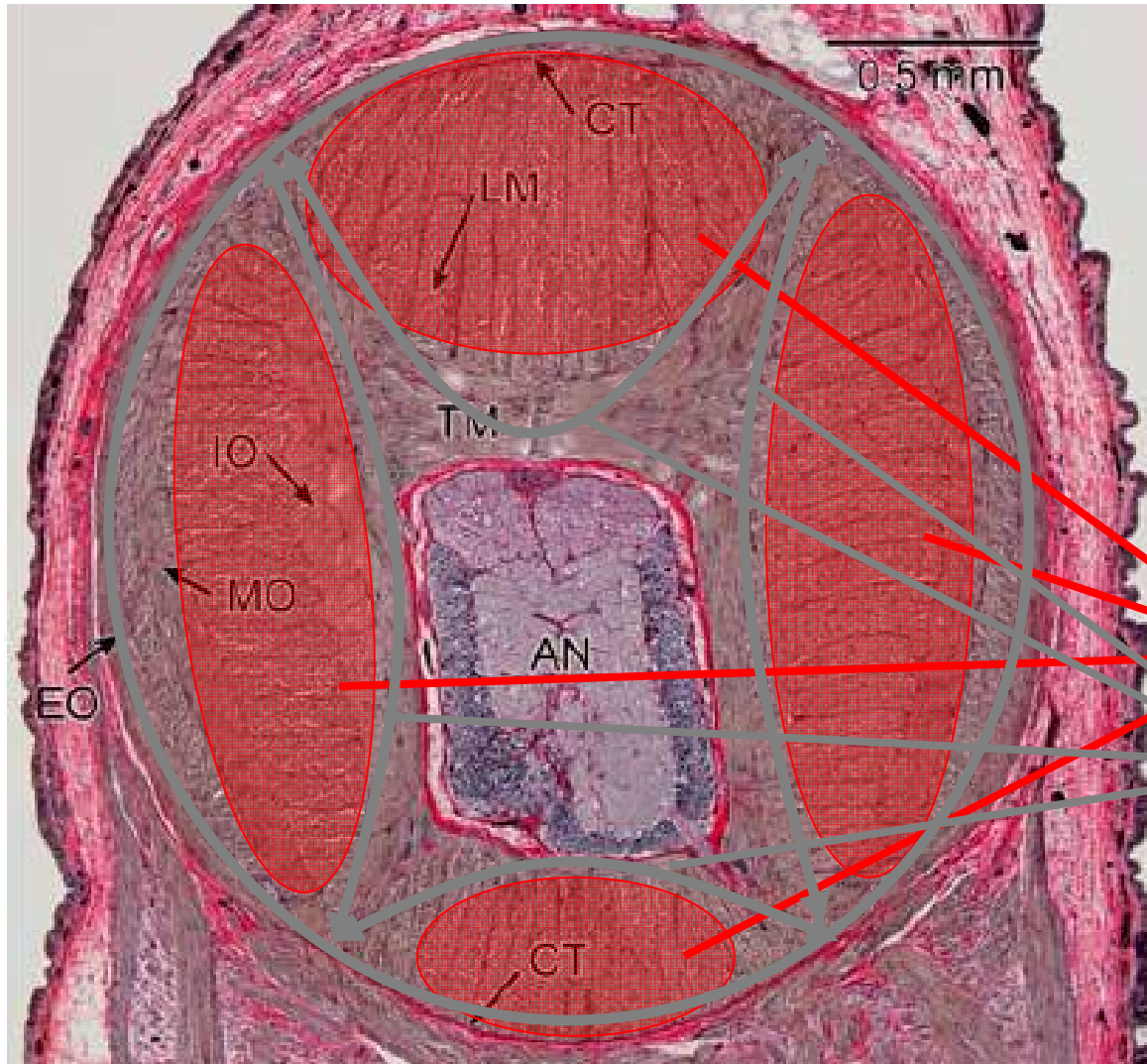
Octopus amazing features, from a robotics point of view

- Infinite number of degrees of freedom
- Variable stiffness
- Higher 'intelligence' than other animals at the same evolutionary stage
- ...



Studying the octopus
and/by building a
robotic octopus

Octopus limbs: tentacles

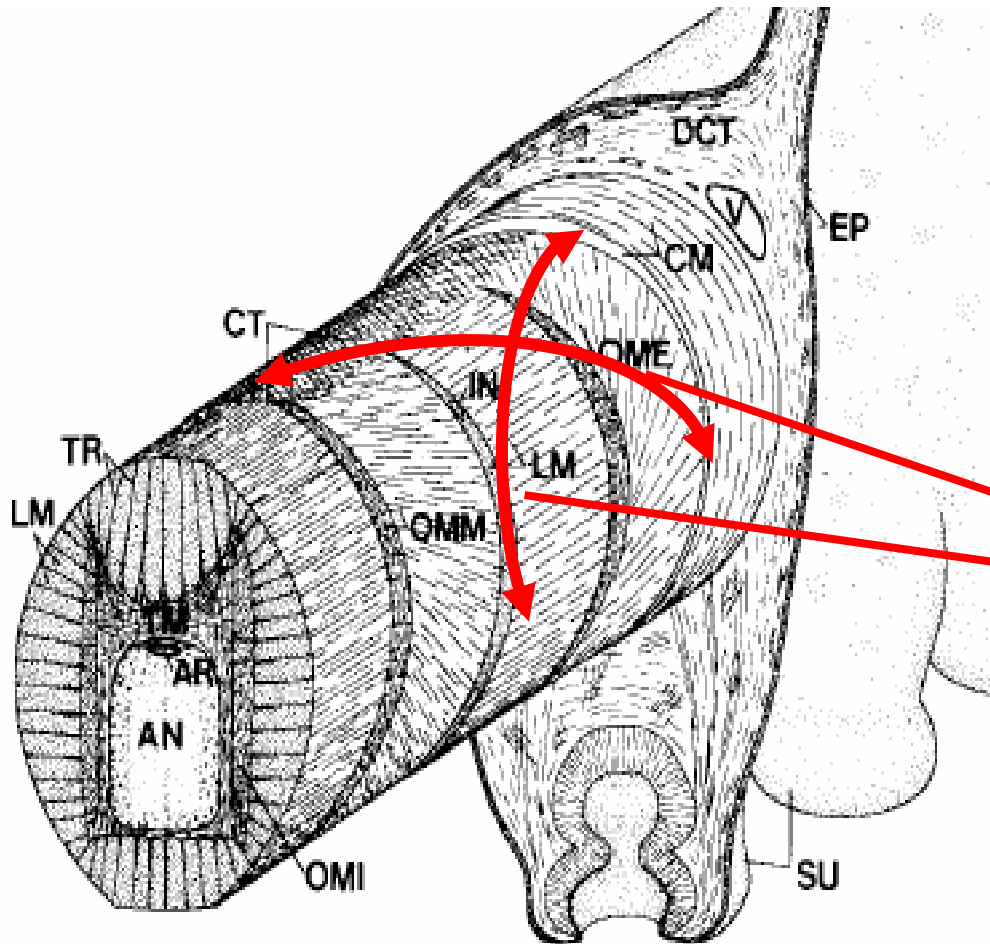


Muscular hydrostats:
constant
volume during
contractions

Longitudinal muscles

Transversal muscles

Octopus limbs: tentacles

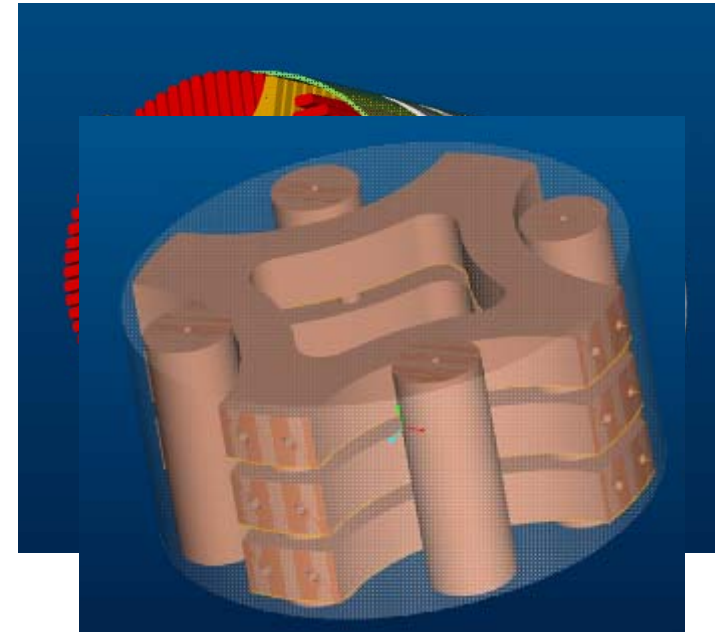


- **Muscular hydrostats:** constant volume during contractions

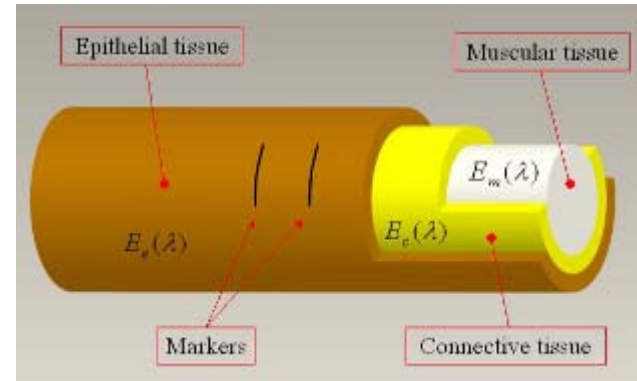
Oblique muscles

Ongoing work

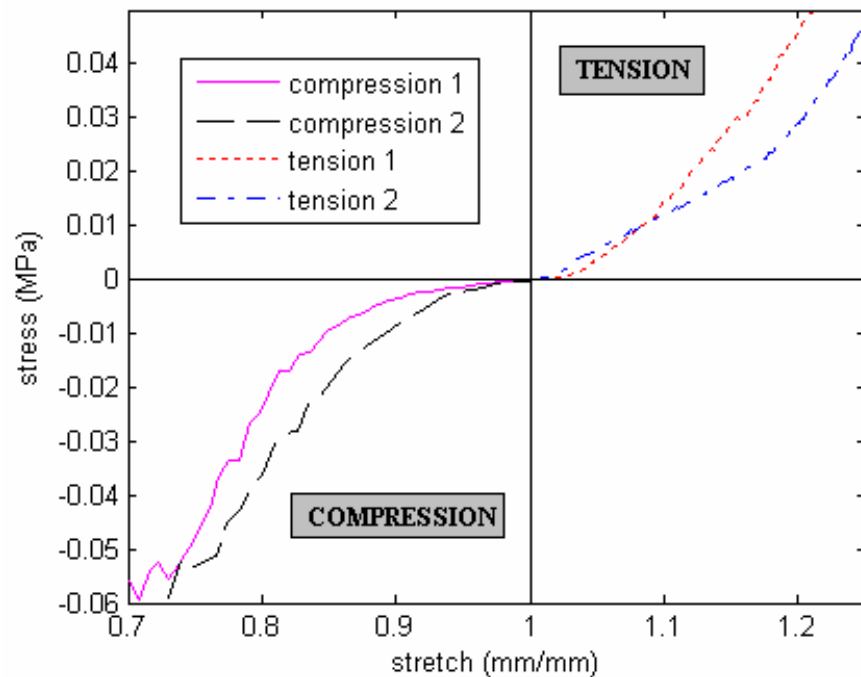
- Mechanical modeling:
 - CAD model of the octopus tentacle
 - Larger scale mock-up
 - Identification of the 3D kinematics of the octopus tentacle (in collaboration with Barry Trimmer, Tuft Univ., Boston, MA, USA)
- Materials:
 - Mechanical measurements on the tentacle tissue



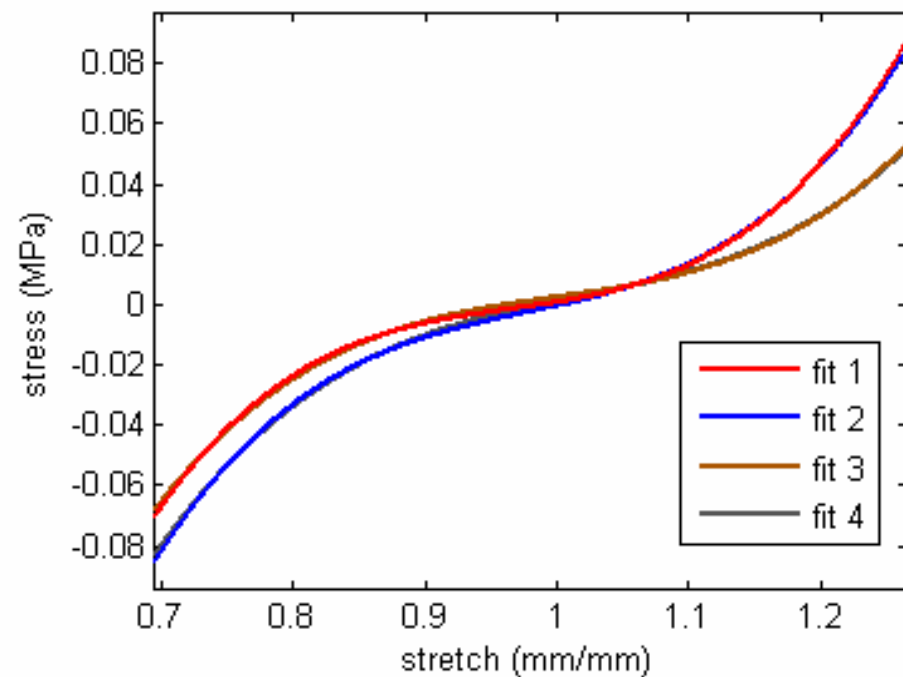
Ongoing work: mechanical measurements on the tentacle tissue



STRESS - STRETCH



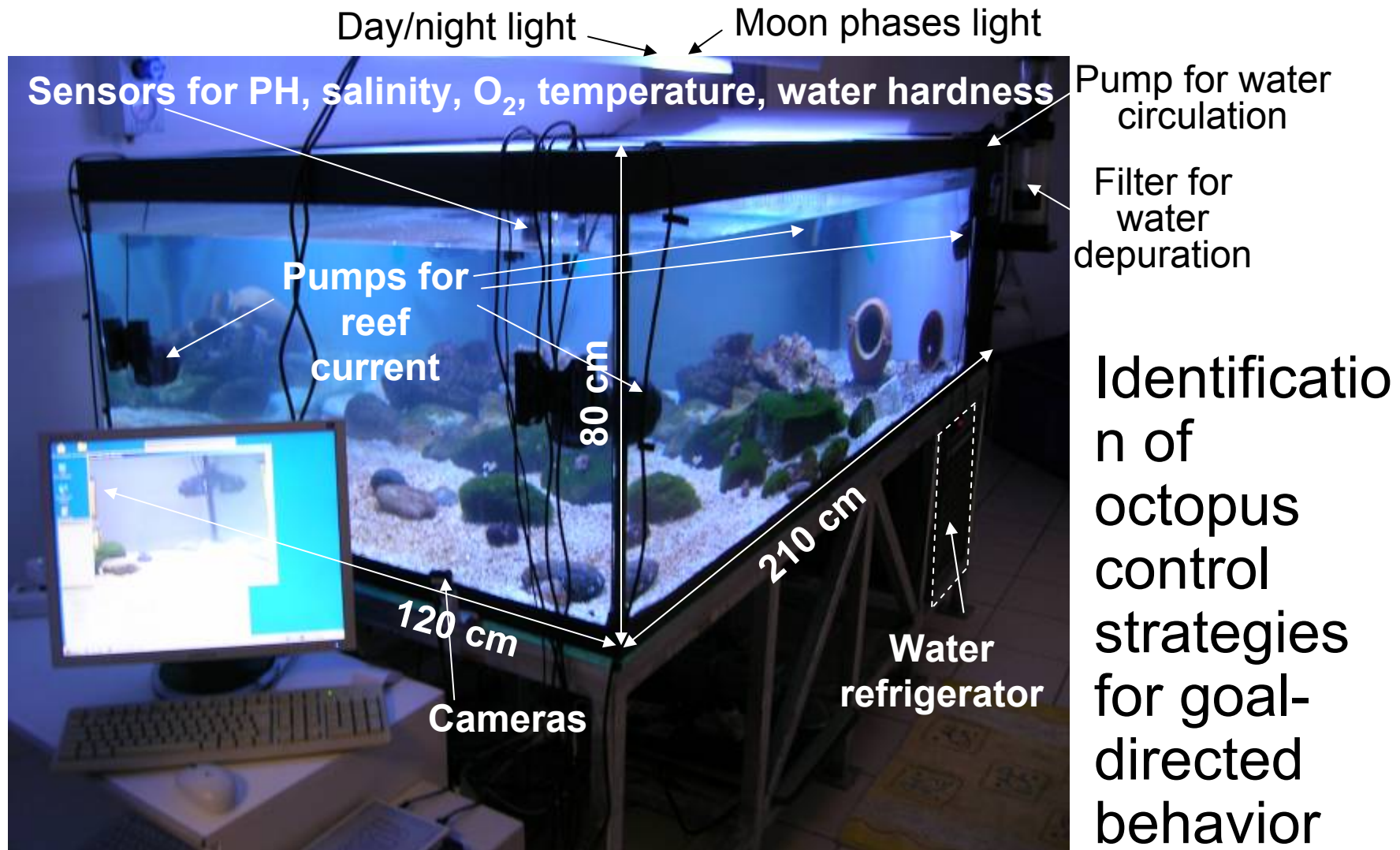
FIT STRESS - STRETCH



Ongoing work:

- Actuation:
 - Analysis of state-of-the-art actuators
 - Design of an EAP actuator with a modified geometry
- Control:
 - Observations of the living animal for identifying typical goal-directed behaviors
 - Study of octopus control strategies through focused experiments with the living animal

Ongoing work: observations of living animal



Progetti di Biorobotica presso i laboratori ARTS/CRIM

PROGETTO *OCTOPUS*



- 1. Analisi biomeccanica e cinematica del tentacolo del polpo**
- 2. Progettazione e sviluppo di un nuovo sistema di attuazione ispirato al tentacolo per lo sviluppo di un nuovo arto robotico**