

Evoluční Robotika

1. část'



František Mráz, KSVI MFF UK

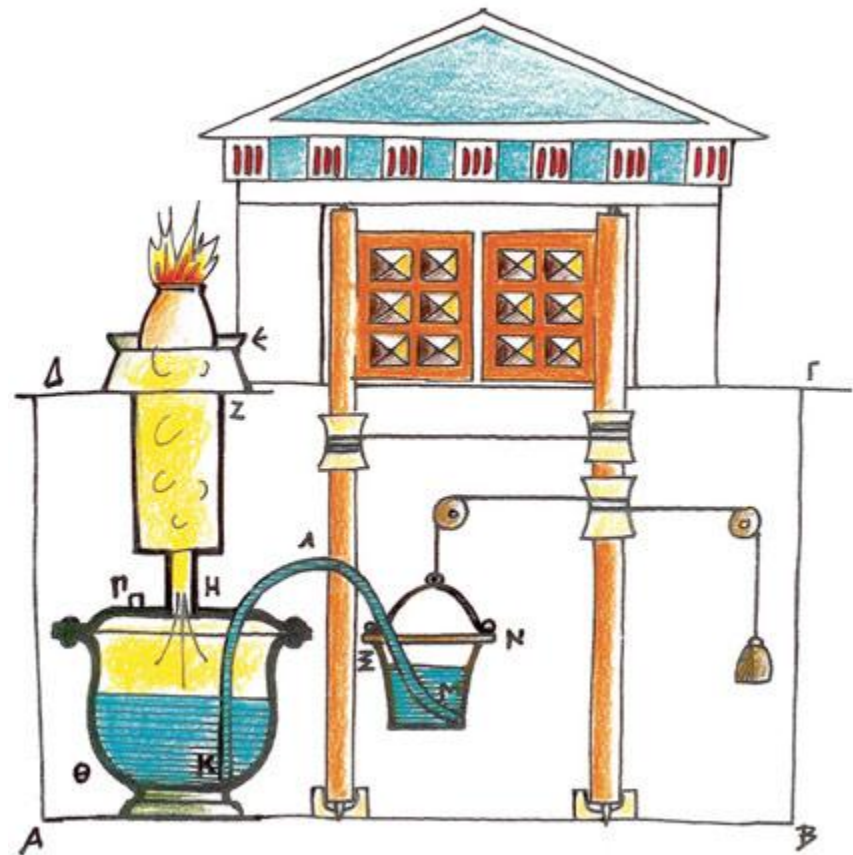
Úvod



- História robotiky
- Čo je to robot
- Evolúcia robotov
- Robotika založená na chovaní – behavior-based robotics
- Učenie robotov – robot learning
- Umelý život – artificial life

Robotika – história

- „mať tak niečo alebo niekoho, kto bude pracovať za mňa“
- Všetko začalo v starovekom Grécku ...
 - ◆ Keď horela zápalná obeť na oltári pred chrámom, tak „boh otvoril“ dvere do chrámu
 - ◆ Až obeť dohorela, chrámové dvere sa zase zatvorili



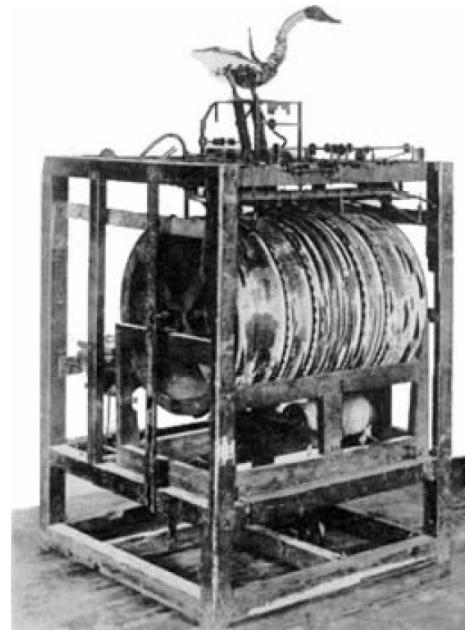
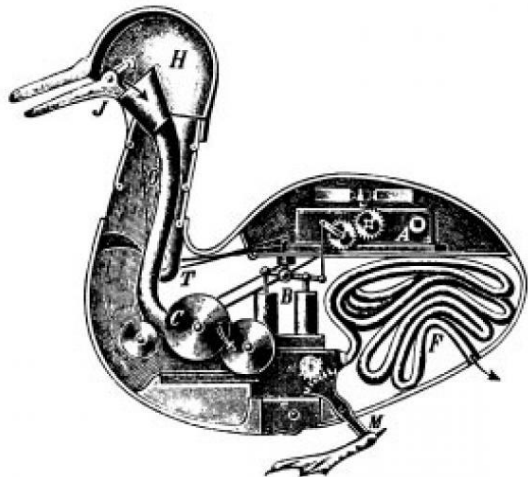
Robotika – história

- cca 1250 – Biskup Albeertus Magnus pozval k sebe sv. Tomáša Akvinského. Dvere mu otvoril kovový sluha. Keď to uvidel sv. Tomáš Akvinský, tak ho rozbil na kúsky a prehlásil biskupa za čarodejníka.
- Leonardo da Vinci (okolo r. 1495)
– rytier (rekonštrukcia)
- Cca 1640 – R. Descartes vytvoril ženský automat „Ma fille Francine“. Sprevádzala ho na ceste, kde ju kapitán hodil cez palubu, pretože si myslel, že je to Satanovo dielo.



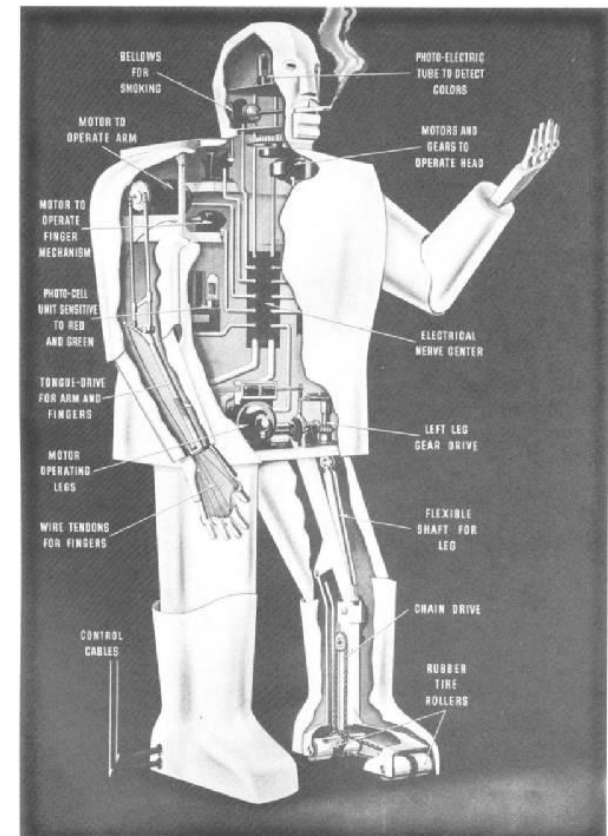
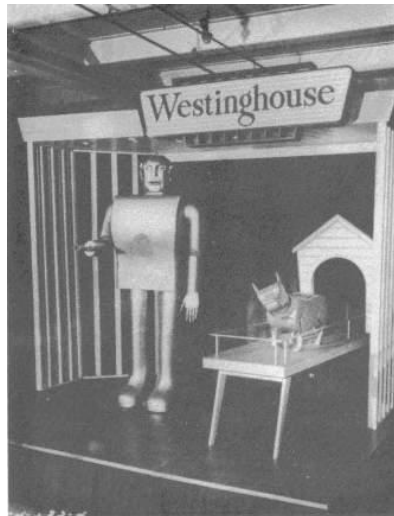
Robotika – história

- 1738 – Jacques de Vaucanson postavil niekoľko mechanických figúr (muzikantov hrajúcich na flautu a tamburínu), ale najslávnejšia bola mechanická kačica skladajúca sa z viac než 4000 dielov. Kačica vedela kvákať, zobák namáčať vo vode, prehltnúť potravu, stráviť ju a „vydať“ zvyšky trávenia. Stratila sa ... Jej reprodukcia je v múzeu v Grenobli.



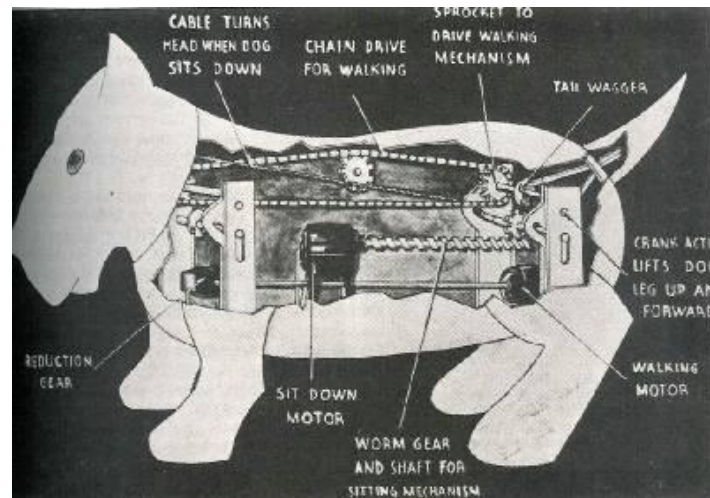
História – pokračovanie

- 1920 – Karel Čapek: R.U.R. Rossums Universal Robot
- 1939 – Elektro; firma Westinghouse pre Svetovú výstavu v New Yorku
 - ◆ 26 pohybov
 - ◆ Fajčil
 - ◆ Hlasové ovládanie
 - ◆ Detekcia farieb



História – pokračovanie

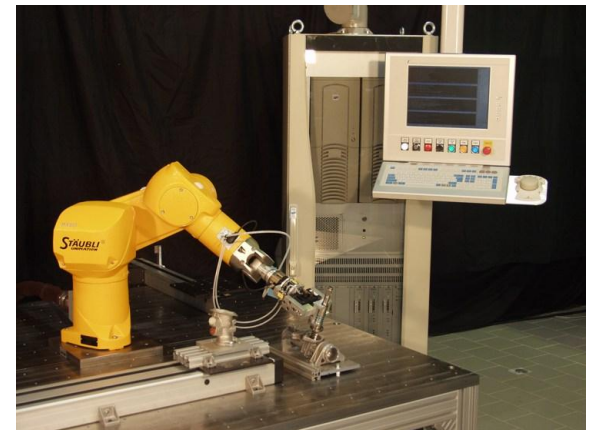
- 1940 – Sparko, Westinghauský pes; využíval mechanické i elektrické súčiastky.



- 50-te a 60-te 20. stor. – veľký pokrok v počítačovej a riadiacej technike. *Otázka: Je počítač nepohyblivý robot?*

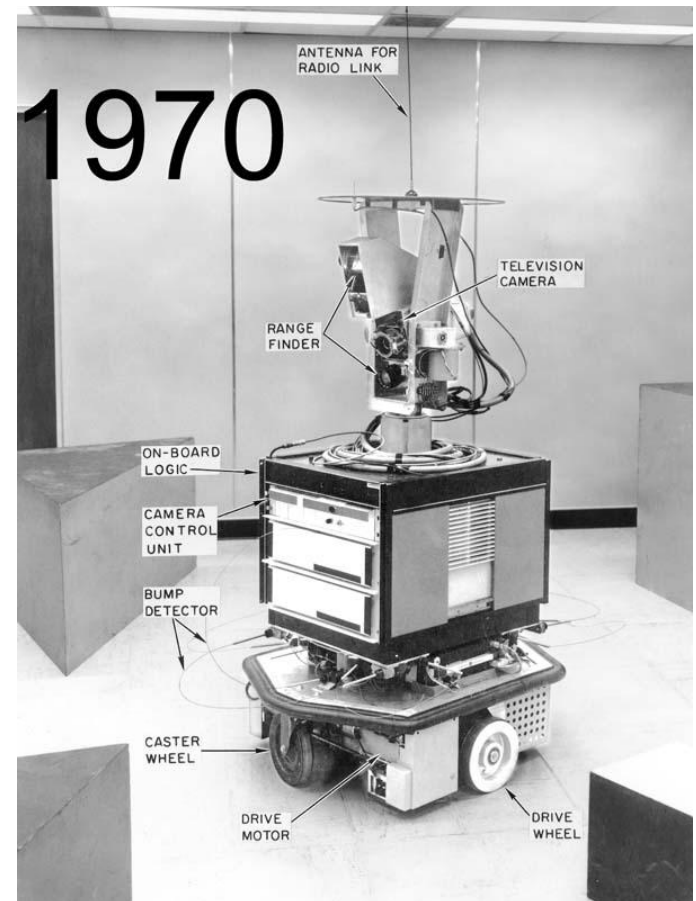
História – pokračovanie

- 60. roky 20. stor. – prvé priemyselné roboty. Americké združenie pre priemyselné roboty: „*Priemyselný robot je programovateľný, multifunkčný manipulátor určený na premiestňovanie materiálov, súčiastok, nástrojov a špeciálnych zariadení pomocou variabilných programovateľných pohybov za účelom vykonávania rôznych činností.*“
- 1956 – vedci skúšajú kombinovať automatické metódy riešenia problémov a schopnosť vnímania pomocou počítačov s použitím kamier a dotykových čidiel. Zámerom je študovať, aké inteligentné činnosti by takéto roboty mohli zvládnuť. Vznikol obor umelá inteligencia.



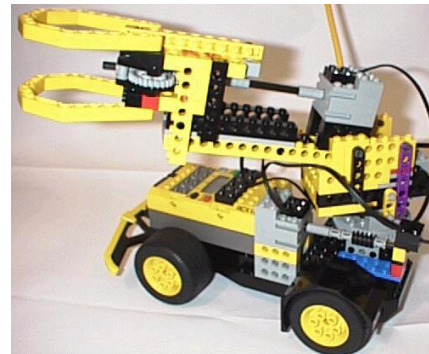
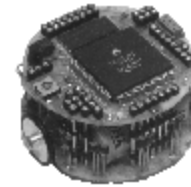
História – pokračovanie

- 1960 – v Stanforde postavili Shakeyho. Mal televíznu kameru, diaľkomer, automatické riadenie, dotykové senzory, jednotku na riadenie kamery a anténu pre rádiové spojenie s počítačom. Jeho riadiaci počítač bol vo vedľajšej miestnosti



História - pokračovanie

- 1986 – prvý kráčajúci robot - Honda
- 1993 – Khepera (simulátor)
- Sony (1998) – robotický pes Aibo
 - ◆ ovláda viacej typov chôdze, hlavne dynamické
- 1998 – LegoMindstorm



História - pokračovanie

- 2000 – Honda, robot ASIMO



- ◆ ASIMO - reklamné video
- ◆ Asimo: stav z roku 2011
- ◆ schody sú ťažké i pre Asima

- 2002 – Hemisson 2002

ASIMO

Advanced → New Era
Step in → Stepping
Innovative → Innovation
Mobility → Mobility

ASIMO stands for Advanced Step in innovative
Mobility



História - pokračovanie

- 2003 – Khepera II

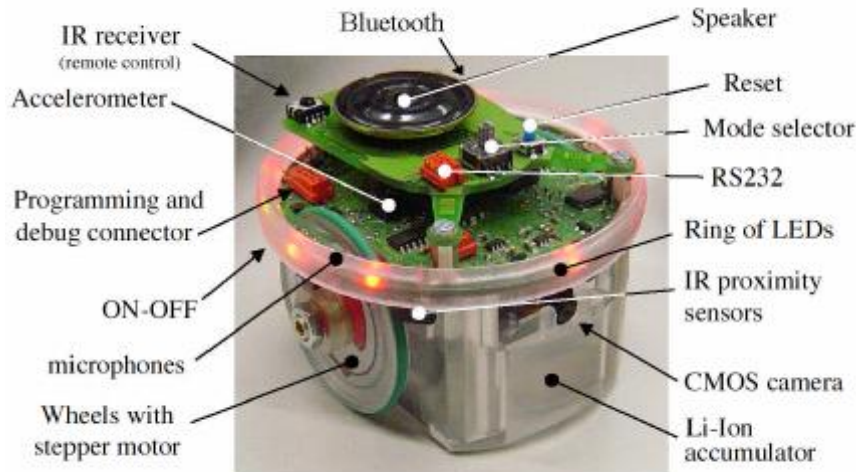


- 2006 – Khepera III (Linux)



História – e-Puck

■ 2004 – e-Puck



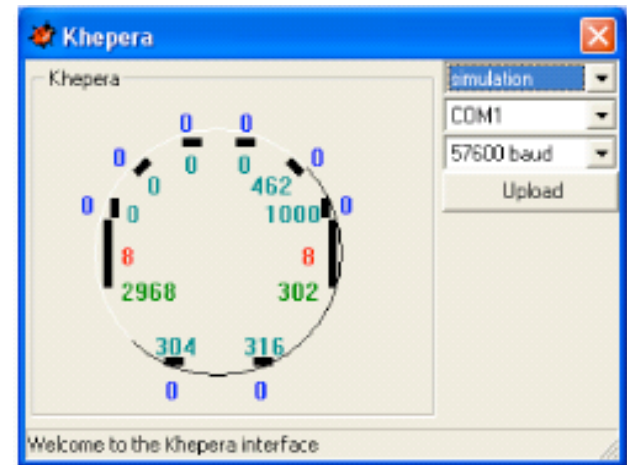
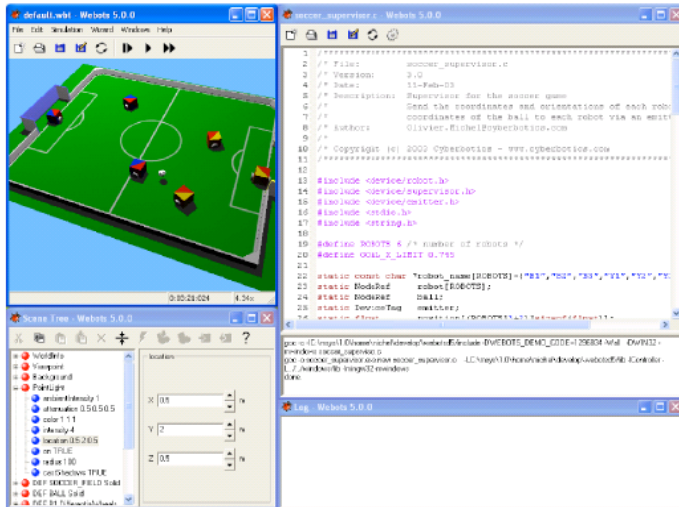
Feature	Technical Information
Size, weight	70 mm diameter, 55 mm height, 150 g
Battery, autonomy	5Wh LiION rechargeable and removable battery. About 3 hours autonomy
Processor	dsPIC 30F6014A @ 60MHz (~ 15 MIPS) 16 bit microcontroller with DSP core
Memory	RAM: 8 KB; Flash: 144 KB
Motors	2 stepper motors with a 50:1 reduction gear, resolution 0.13 mm
Speed	Max: 15 cm/s
Mechanical structure	Transparent plastic body supporting PCBs, battery and motors
IR sensors	8 infra-red sensors measuring ambient light and proximity of objects up to 6 cm
Camera	VGA color camera with resolution of 640x480 (typical use: 52x39 or 640x1)
Microphones	3 omni-directional microphones for sound localization
Accelerometer	3D accelerometer along the X, Y and Z
LEDs	8 red LEDs on the ring, green LEDs in the body, 1 strong red LED in front
Speaker	On-board speaker capable of playing WAV or tone sounds.

E-Puck – pokračovanie

Switch	16 position rotating switch
Communication	Standard Serial Port (up to 115kbps), wireless: Bluetooth
Bluetooth	Bluetooth for robot-computer and robot-robot wireless communication
Remote Control	Infra-red receiver for standard remote control commands
Expansion bus	Large expansion bus to add new possibilities to your robot
Programming	C programming with the GNU GCC compiler system, free compiler and IDE (integrated development environment)
Simulation	Webots facilitates the programming of e-puck with a powerful simulation, remote control and cross-compilation system

Simulátor - Webots

- Simuluje ľubovoľné mobilné roboty – s kolesami, nohami, ...
 - ◆ 3D editor robotov a svetov
- Knižnica senzorov a aktuátorov
- Programovanie v C/C++ (Java, Python, Matlab)
- Simulácia fyziky ODE
- Vytváranie filmového záznamu simulácie



The Khepera™ window controls both the simulated and real Khepera™ robot.

Ďalšie robotické simulátory



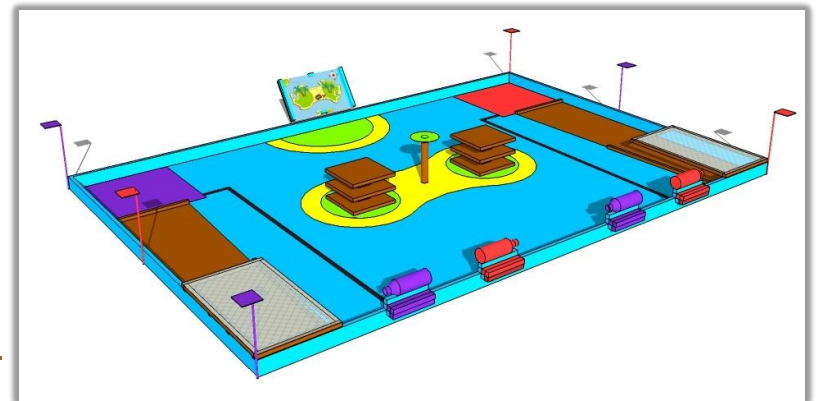
- Microsoft Robotic Studio
 - ◆ <http://www.microsoft.com/robotics>
 - ◆ Kompletné vývojové prostredie
 - ◆ Mnoho programovacích jazykov – C#, VB, Python, VPL (Microsoft Visual Language)
 - ◆ Simulátor fyziky – AGEIA PhysX
- PyRo – Python Robotics
 - ◆ <http://www.pyro.org>
 - ◆ Win i Linux
 - ◆ Viacej simulátorov – Pyrobot, Gazebo, Player/Stage
 - ◆ Programovanie v Pythone – jednotné pre všetky typy robotov, simulované i reálne

Robotické súťaže

- RoboCup
- Istrobot
- Webots – Ratslife, Robotstadium
- LEGO FIRST League

- www.robotika.cz
- www.robotika.sk

- EUROBOT - <http://www.eurobot.cz/>



Eurobot 2012 – Treasure Island

Inteligentný (autonómny) robot

- Je to stroj schopný získavať informácie zo svojho okolia a používať znalosť svojho sveta na to, aby sa bezpečne pohyboval zmysluplným a účelným spôsobom
- Navrhovanie robotov – veľmi zložitá úloha
 - ◆ hardware – mechatronika:
 - ◆ mechanika
 - trvanlivosť (odolnosť), dobré ovládanie, hmotnosť a rozmery, stupne voľnosti, pohon (kolesá, pásy, nohy,...) ...
 - ◆ elektronika
 - riadiaci počítač (rýchlosť, kapacita), senzory, ovládanie motorov, komunikácia, ...
 - ◆ riadenie: software
 - programovanie, užívateľské rozhranie, jazyky, ...
- ***ALE dá sa urobiť tak, aby to zvládlo i dieťa - robotické stavebnice***
 - ◆ LEGO – CyberMaster, Scout, **MindStorm, Dacta**

Evolučná robotika



- technika automatického vytvárania autonómnych robotov inšpirovaná darwinovskou selektívnou reprodukciou najúspešnejších jedincov
- novosť prístupu: roboty sú samostatné umelé organizmy rozvíjajúce si svoje schopnosti v tesnej interakcii s prostredím bez ľudského zásahu
- používajú sa neurónové siete, genetické algoritmy, dynamické systémy a biomorfické inžinierstvo

Evolučná robotika - história



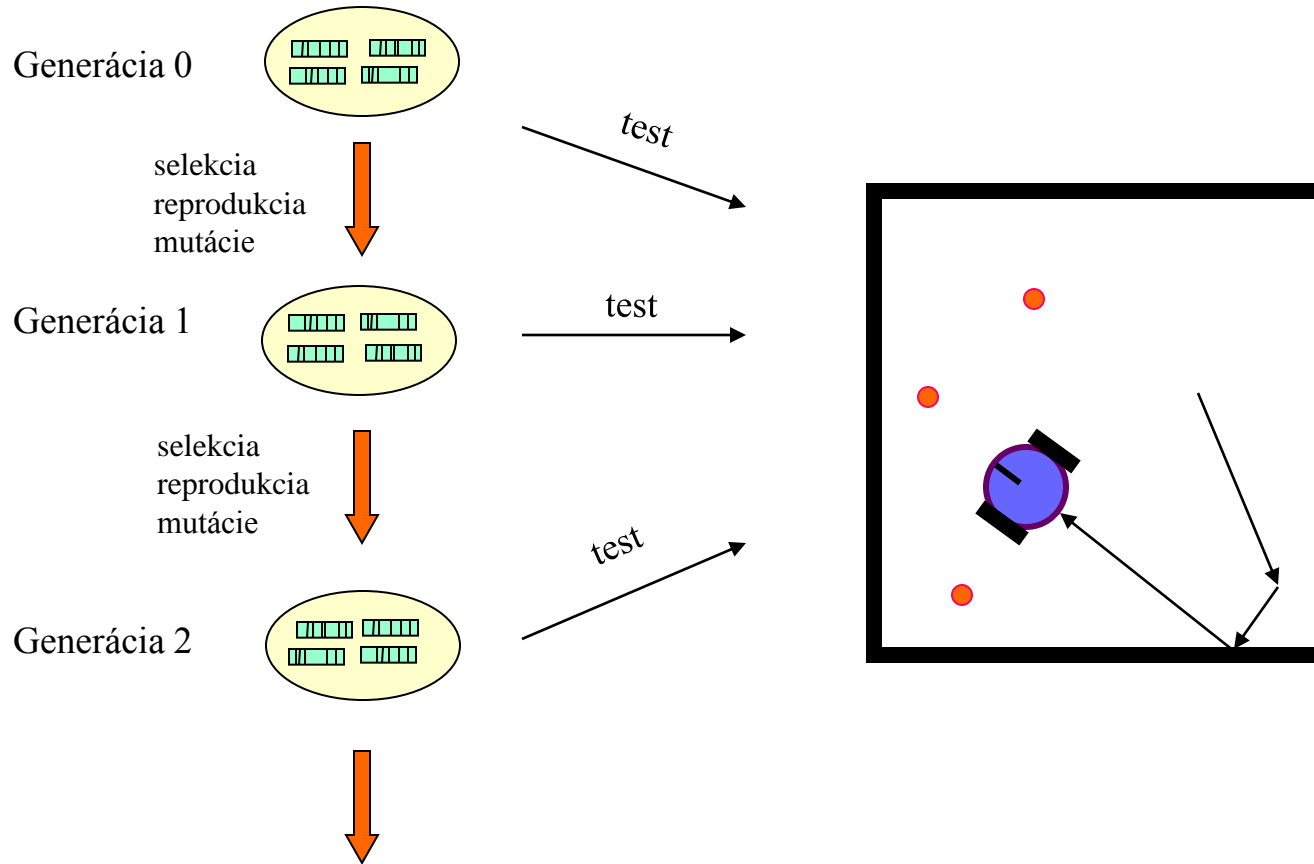
- pojem evolučná robotika – 1993 Cliff, Harvey a Husband: Explorations in evolutionary robotics, *Adaptive Behavior*, 2:73-110.
- prvé pokusy sú staršie – počítačové simulácie koncom 80. rokov
- technické predpoklady – nová generácia robotov zo začiatku 90. rokov s vlastnosťami podobnými biologickým systémom: robustnosť, jednoduchosť, malé rozmery, flexibilita, modularita
- 1992-93 prvé hardwarové pokusy
 - Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (Švajčiarsko),
 - University of Sussex, Brighton
 - University of Southern California

Samoorganizácia



- Na začiatku sa náhodne vytvorí počiatočná populácia umelých chromozómov, z ktorých každý kóduje riadiaci systém (a prípadne i morfológiu) robota, a vloží sa do prostredia.
- Každý robot (fyzicky alebo simulovaný) potom voľne funguje (pohybuje sa, pozerá sa, manipuluje, ...) podľa geneticky určeného riadenia. Pritom sa automaticky vyhodnocuje jeho výkonnosť pre rôzne úlohy.
- Najlepšie roboty sa potom môžu reprodukovať generovaním kópií ich genotypu so zmenami, ktoré vnášajú nejaké genetické operátory (mutácia, kríženie, duplikácia, ...).
- Tento proces sa opakuje počas niekoľkých generácií, dokiaľ sa "nenarodí" jedinec, ktorý spĺňa výkonnostné kritéria (*fitness* funkcia) zadané experimentátorom.

Evolúcia robotov



Robotika založená na správaniach behavior-based robotics



- robot má súbor jednoduchých základných chovaní, celkové chovanie robota vzniká interakciou týchto základných chovaní a prostredia (Brooks, 1986).
- základné chovania + koordinácia sily jednotlivých chovaní v danom momente
- koordinácia – kooperatívna vs. kompetitívna
- kompetitívna: vyhráva len jedno chovanie, napr. metóda subordinácie (Brooks, 1986)
- kooperatívna: rôzne chovania prispievajú do výsledného chovania rôznou mierou, napr. metóda fúzie cez sčítanie vektorov (Arkin, 1989)

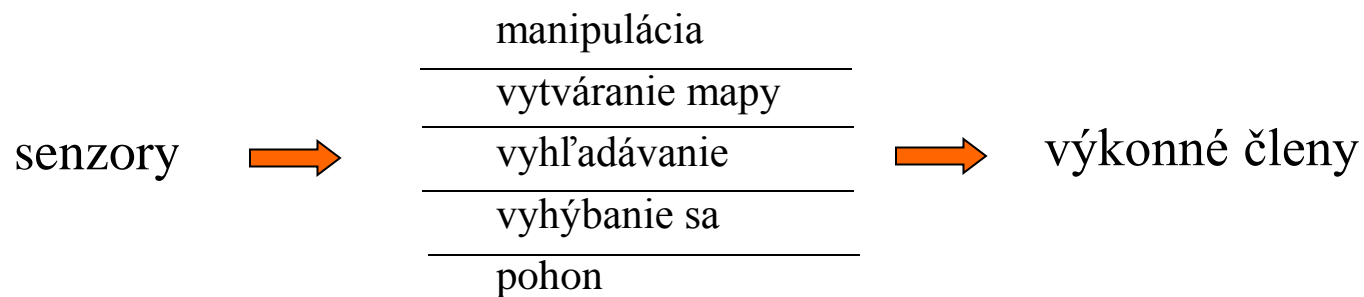
Robotika založená na správaniach



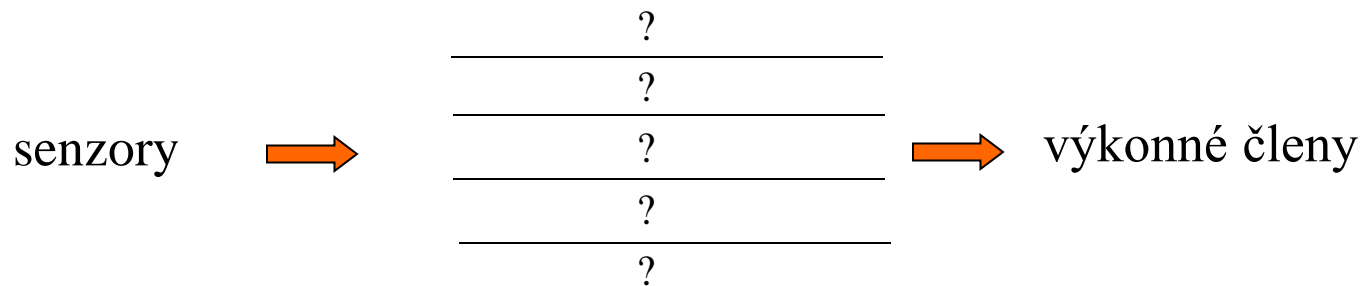
- Vnímanie tesne spojené s akciami
- Pri generovaní reakcie sa vôbec nepoužíva abstraktná reprezentácia sveta
- Modularita rovno v návrhu. Bývajú často navrhované ako hierarchické systémy
- Metóda pokusov a omylov – „ručne“
 - ◆ ktoré základné správania
 - ◆ ich koordinácia
 - ◆ vyhodnocovanie

Porovnanie

Robotika založená na správaniach



Evolučná robotika



Učenie robotov – robot learning

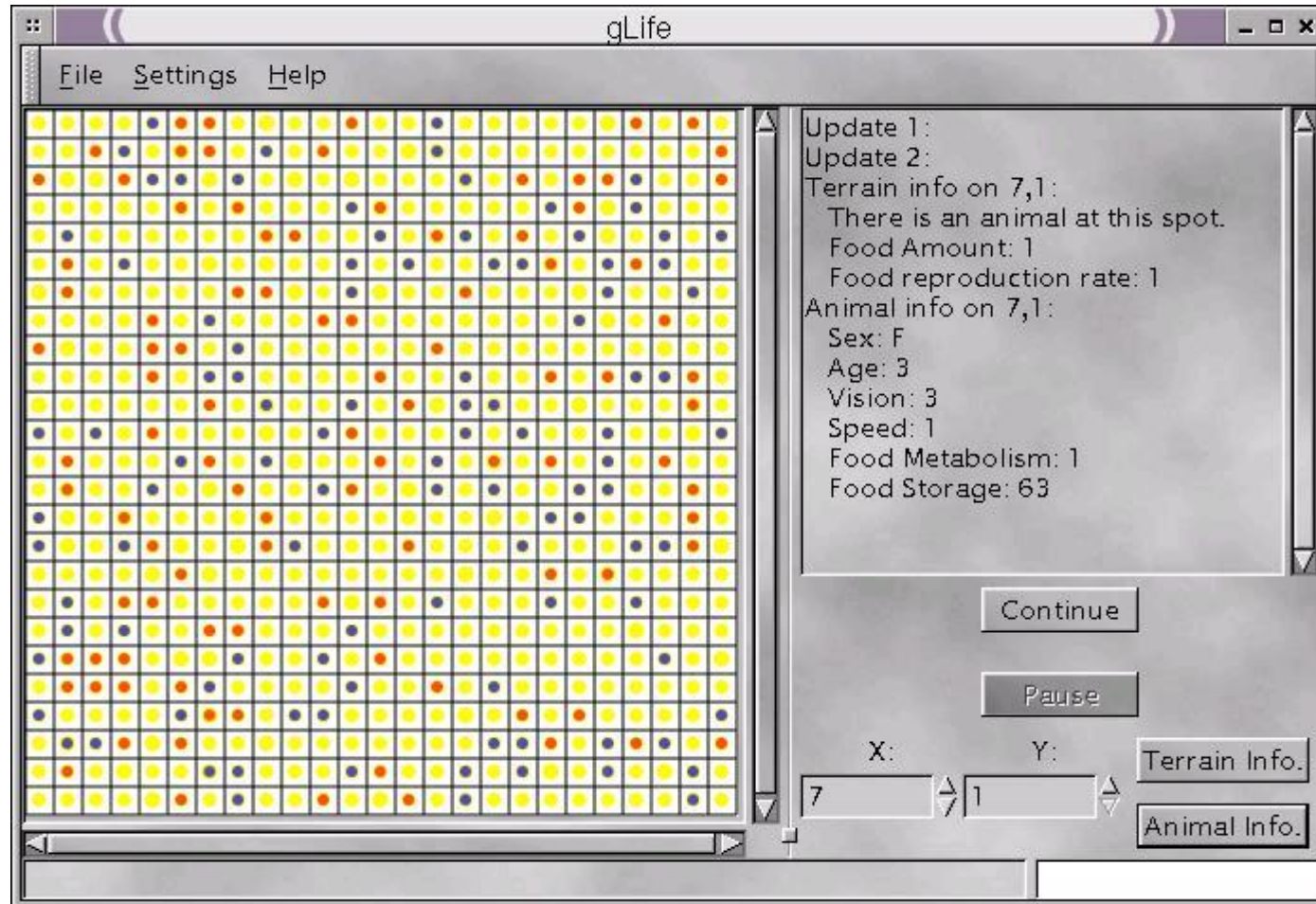
- Riadiaci systém robota (napr. neurónová sieť) je učený na neúplných dátach a potom sa spolieha na generalizáciu.
- Často sa učí zobrazenie zo stavu senzorov na stav motorov, alebo učenie nejakého subsystému.
- Od metódy učenia, napr. spätným šírením (back-propagation), odloženým učením (reinforcement learning), klasifikátory, samoorganizujúce sa mapy (self-organized maps), závisí ako sa učia.
- Samoorganizácia spoločná pre učenie robotov i ER
- rozdiely
 - ◆ miera role učiteľa
 - ◆ ER sa neobmedzuje iba na učenie riadenia (napr. i návrh hardware)

Umelý život – artificial life



- Napodobenie života simuláciou – napodobovanie vzájomných reakcií rôznych entít
- Základy
 - ◆ teória dynamických systémov – popis na viacerých úrovniach, globálne správanie na jednej úrovni vzniká lokálnou interakciou jednotlivých prvkov nižšej úrovne a v podstate sa nedá predpovedať
 - ◆ počítačové experimenty – nutné veľké zjednodušenia
- pre návrh robotov je nutné uvažovať fyzikálne vlastnosti, ER zdôrazňuje vývoj na reálnych robotoch

Umělý život – artificial life



Význam ER pre iné obory



■ Pre inžinierov:

- ◆ zložitost' návrhu reaktívnych systémov – ako rozložit' na jednoduchšie podúlohy na základe znalosti globálneho chovania
- ◆ klasický návrh – percepcia, plánovanie, vykonávanie
- ◆ novší – chovanie rozložit' na základné chovania a pridať ich koordináciu
 - ◆ možnosť postupného (inkrementálneho) návrhu
 - ◆ základné chovania a koordinácia sa dajú učiť
- ◆ aj tak ako zvoliť základné chovania?
- ◆ Popis chovania – zvonka vs. zvnútra
 - ◆ vonkajší popis vyžaduje vedieť aj niečo o vnútrajšku (robot môže napr. meniť svoje okolie)

Príklad



- Pr. úloha pre Kheperu: nájsť objekt v pravouhlom bludisku a zostať v jeho blízkosti
 - ◆ ručná dekompozícia
 1. Prieskum
 2. Vyhýbanie sa stenám
 3. Priblíženie k objektu a zotrvanie v jeho blízkosti
 4. Rozpoznanie objektu od stien
 - ◆ na každé správanie sa naučila neurónová sieť, ale dohromady sa to nepodarilo spojiť
 - ◆ ER prístup: geneticky sa hľadá riadenie iba na základe hodnotenia konkrétneho robota

Etológia – štúdium chovania živočíchov

Aj iné obory popisujú chovanie organizmov – evolučná robotika z nich môže čerpať

**Populácie
ekosystémy
spoločenstvá**

SUPERORGANIZMUS

**Evolučná biológia
ekológia
sociológia**

organizmy

**ORGANIZMUS
(správanie / vedomie)
nervový systém**

**psychológia
neuroológia**

**orgány
bunky
molekuly**

SUBORGANIZMUS

**anatómia/fyziológia
biológia bunky
genetika
molekulárna biológia**

Modelovanie chovania



- Chovanie je senzoro-motorická koordinácia
- adaptívne chovanie sa ťažko navrhuje. Každá motorická akcia má 2 následky:
 - ◆ čiastočne ovplyvňuje ako dobre agent (robot) vykonáva určenú činnosť
 - ◆ čiastočne určuje čo „ucíti“ v ďalšom kroku, čo môže rozhodnúť či agent danú úlohu vyrieši alebo nie
- elementárna akcia môže mať dlhodobé následky
- pr. krysa v bludisku

EVOLUČNÁ ROBOTIKA A BIOLÓGIA



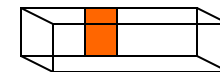
- Prirodzená evolúcia: čo umožnilo, že úspešne vyvinula výborne adaptované formy života?
- Evolúcia robotov: za akých podmienok adaptácia v umelom prostredí vedie k vývoju komplikovaných schopností?
- Možné prístupy:
 - A. postupná (inkrementálna) evolúcia spôsobená súperením v rámci jedného druhu alebo medzi rôznymi druhmi;
 - B. systém bez vonkajšieho dohľadu (riadenia), ktorý si musí sám z prostredia extrahovať informácie potrebné na riadenie vývoja
 - C. zahrnúť zobrazenie z genotypu do fenotypu do evolučného procesu

A. Inkrementálna evolúcia – bootstrap

- Problém: ako má umelá evolúcia vyberať jedincov, ktorí majú schopnosti vhodné na riešenie zložitých úloh?
- Ako sa pri prirodzenom vývoji objavujú nové schopnosti (napr. lietanie)?
 - V prírode iba jedno kritérium: schopnosť reprodukcie
- Keď chceme nájsť jedincov schopných riešiť danú úlohu, tak ich môžeme vyberať podľa ich schopnosti riešiť danú úlohu
 - funguje iba na jednoduché úlohy, pre zložité úlohy všetci jedinci v počiatočnej generácii dostanú rovnaké nulové ohodnotenie – selekcia nemôže fungovať – problém inicializácie – **“bootstrap problem”**

A.1. Bootstrapping – inkrementálna evolúcia

1. S vyššou mierou dohľadu: experimentátor do selekčného kritéria pridá ohodnotenie za podúlohy
 - **inkrementálna evolúcia**: evolúcia sa začne so zjednodušenou úlohou, potom sa postupne jej zložitosť zvyšuje zmenou selekčných kritérií (fitness funkcie)
 - Príklad: Robot má ísť k farebnému obdĺžniku a má sa vyhnúť trojuholníku
 1. Nájdi farebnú stenu.
 2. Nájdi farebný obdĺžnik.
 3. Nájdi farebný obdĺžnik a vyhýbaj sa trojuholníku.



A.2. Bootstrapping – ko-evolúcia

2. Bez zvýšeného dohľadu: inkrementálna evolúcia môže vzniknúť i samo-organizáciou pri súperiách populáciách s prepojenou fitness funkciou – ko-evolúcia
- ◆ Príklad: evolúcia dvojice „dravec – korisť“
 - ◆ fitness:
 - dravec – schopnosť chytiť korisť
 - korisť – schopnosť utiecť dravcovi
 - ◆ evolučné preteky v zbrojení
 - ◆ aj keď sa selekčné kritérium nemení, tak je adaptácia postupne ťažšia a ťažšia

B. Využitie prostredia na riadenie evolúcie

- prostredie nedáva priamo návod ako má agent postupovať, aby dosiahol cieľ
- informácia o prostredí získaná zo senzorov sa dá využiť nielen na určenie agentovej reakcie, ale i na adaptáciu na prostredie po celú dobu života agenta – **celoživotné učenie – ontogenetická adaptácia**
- principiálne každá schopnosť, ktorá sa dá naučiť pri celoživotnom učení, sa dá získať i **evolúciou – fylogenetická adaptácia**
- celoživotné učenie sa od evolučného učenia líši tým, že pri celoživotnom učení máme síce málo špecifickú, ale veľmi bohatú spätnú väzbu, pri evolúcii sú jedinci ohodnotení iba raz – jediným číslom, ktoré hovorí ako si viedli za celý život (počet potomkov pri prírodnej evolúcii, fitness pri umelej evolúcii)

Celoživotné učenie



- pri celoživotnom učení dostávame mnoho vstupov zo senzorov, ale tie o celkovej úspešnosti vypovedajú iba veľmi nepriamo a transformovať tieto vstupy na informácie ako dobre si vedie a aké akcie má agent vykonať, je veľmi ťažké
- prirodzená evolúcia to rieši tak, že vyvíja podsystemy schopné extrahovať informácie pre rýchle celoživotné učenie.
- to už bolo vyskúšané v počítačových experimentoch
 - ◆ riadiaci systém sa rozdelil na dve časti jedna počítala ako reagovať na aktuálny stav senzorov a druhá generovania učiace signály pre prvú. Každá z týchto častí bola neurónová sieť
 - ◆ podobné výsledky priniesli experimenty, keď sa evolučne vyvíjali neurónové siete, ktoré mohli meniť svoju topológiu v evolučnom vývoji a mohli sa učiť pri celoživotnom učení

Celoživotné učenie

- zrejme to čo sa dá získať evolúciou a učením, sa dá získať aj iba samotnou evolúciou
- evolúciou môžu vzniknúť dva druhy jedincov schopných dobre fungovať premenlivom prostredí
 1. **plastic general** – nemá obecnú stratégiu, ale je schopný sa prispôbiť v priebehu života prostrediu, v ktorom sa nachádza
 2. **full general** – má obecnú stratégiu vhodnú pre rôzne typy prostredí, teda sa v priebehu života nemusí prispôbovať
- Môže sa však stať, že full general sa nedá vytvoriť (neexistuje, alebo je príliš zložitý na to aby ho selekcia vybrala).
- Ukazuje sa, že v niektorých prostrediach úplne obecné stratégie neexistujú, alebo je ťažké ich nájsť, ale súbor jednoduchých stratégií vhodných v rôznych situáciách sa dá nájsť jednoducho.

Celoživotné učenie



- Zatiaľ existuje iba málo experimentálnych dôkazov, že v evolučnej robotike môže evolúcia spolu s učením vyvinúť zložitejšie schopnosti, než samotná evolúcia

C. Vývoj a evolúcia vyvíjateľnosti

- **Genotyp** – súbor charakteristických vlastností udržovaný v reprodukovanej populácii alebo tiež genetický základ jednej alebo skupiny charakteristických vlastností
- **Fenotyp** – prejav genotypu vo forme správania závislý na konkrétnom prostredí
- v prírode si jedinci s tým istým genotypom môžu v rôznych prostrediach rozvinúť rôzne vlastnosti (správania)
vývoj = rast organizmu
- v evolučnej robotike ide o problém zobrazenia z genotypu do fenotypu alebo problém reprezentácie

C. Zobrazenie genotypu na fenotyp



- najjednoduchšie je vzájomne jednoznačné zobrazenie
- v ER sa používajú aj zložitejšie formy
 - a) rôzne organizačné úrovne (genotyp, nervový systém, chovanie) usporiadané v hierarchii
 - b) inštrukcie pre rast, ktoré sú rekurzívne
 - c) plasticita
 - d) genotyp s premenlivou dĺžkou
- pri prírodnej evolúcii je do evolučného procesu zahrnuté aj samotné zobrazenie z genotypu do fenotypu
- pri umelej evolúcii je toto zobrazenie väčšinou zostavené experimentátorom