

# Modelování evolučních procesů

Radek Pelánek

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Změny v systémech

- dosavadní modely měly **statickou** strukturu (pravidla)
- komplexní systémy se **mění**: vývoj, adaptace, učení, ...
- vztah k horizontu modelu
  - vlk: reintrodukce, lov ve smečce
  - epidemie



# Smysl modelů adaptace

- 1 pochopení přírody
  - jak funguje myšlení, evoluce, ...
- 2 lepší modely komplexních systémů
  - obohacení modelů s agenty
- 3 řešení náročných algoritmických problémů
  - modely jako výpočetní mechanismy

# Evoluce

- **základní myšlenka** evoluce je (alespoň zdánlivě) **jednoduchá**
- **důsledky** jsou však často **komplikované a neintuitivní**
- tato přednáška:
  - výběr zajímavostí, principů
  - témata se vztahem k výpočetním modelům
- rozhodně **ne** vyčerpávající pojednání o evoluci

# Evoluce: citáty

*Slepice je jenom způsob, jakým vajíčko vyrábí další vajíčko.*  
(Samuel Butler)

*Přírodní výběr je mechanismus pro generování mimořádně velkého stupně nepravděpodobnosti.* (Sir Ronald Fisher)

*Nothing in biology makes sense except in the light of evolution.* (Theodosius Dobzhansky)

# Vybrané historické poznámky

- cca 1800: Lamarck, vývoj s děděním získaných vlastností
- 1859: Darwin, Origin of species, změny + přírodní výběr
- 1865: Mendel, dědičnost
- poč. 20. stol: 'modern synthesis' předchozích dvou
- 1953: struktura DNA
- 1976: Dawkins, Selfish gene

# Příklad můry

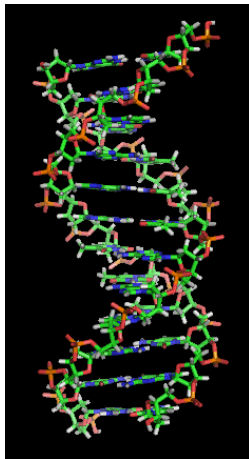
- evoluce je vesměs pomalá (rychlost  $\sim$  generacím), nejde moc pozorovat
- známá výjimka: můry v okolí Manchesteru
- průběh:
  - světlá kůra stromů  $\rightarrow$  světlé můry
  - znečištění  $\rightarrow$  tmavá kůra  $\rightarrow$  tmavé můry
  - redukce znečištění  $\rightarrow$  zpět světlá kůra  $\rightarrow$  světlé můry
- NetLogo: Biology / Evolution / Peppered Moth, Bug Hunt Camouflage





# Genetická informace

- genetická informace uložena v DNA
- DNA = řetězec „základních bloků“: adenine (A), cytosine (C), guanine (G), thymine (T)
- při reprodukci dochází ke kombinaci (křížení) DNA rodičů
- náhodné mutace



# Základy evoluce: poznámky

- **vyvíjí se populace** jako celek (nikoliv jednotlivci)
- **diverzita** je důležitá
- schopnosti získané během života se nepřenáší (až na detaily)  
srovnej: Lamarck, „kulturní evoluce“ (memy), simulovaná evoluce
- přirozený výběr  $\sim$  usměrňování vývoje

# Přirozený výběr

- **přežití nejsilnějších** (survival of the fittest) nebo spíš **přežití schopných reprodukce** (survival of the reproducers)

# Přirozený výběr

- **přežití nejsilnějších** (survival of the fittest) nebo spíš **přežití schopných reprodukce** (survival of the reproducers)
- triviální, ale zajímavé pozorování:  
*Všichni naši předci žili tak dlouho, že se stihli reprodukovat.*
- pozitivní zpětná vazba

# Koevoluce

- organismy se adaptují na měnící se okolí
- organismy současně i ovlivňují okolí
- „Red Queen effect“ (Alenka v říši divů):  
*Now, here, you see, it takes all the running you can do, to keep in the same place. If you want to get somewhere else, you must run at least twice as fast as that!*

# Koevoluce: biologické závody ve zbrojení

- **netopýři** mají **sonar**, kterým hledají můry (sonar je sám o sobě zapeklitě komplikovaný)
- **můry** vyvinuly **měkké pokrytí** těla, které absorbuje netopýří vysílání
- **netopýři** přešli na nové **frekvence**
- **můry** přišly s novým pokrytím a s „**rušičkou**“ (vlastní signál který interferuje s netopýřím)
- **netopýři** přišli s novými leteckými **manévry** a naučili se **vypínat** sonar (čímž dělají rušení méně efektivním)

# Koevoluce: biologický citát

Na počátku byla jemná křehká bylinka, kterou občas někdo sežral; na konci je trnitá a jedovatá obluda, kterou také občas někdo sežere. (J. Zrzavý, D. Storch, S. Mihulka)

# Koevoluce v IT

- viry a antivirová ochrana
- spamy a antispamová ochrana



# Typy evolučních modelů

- přežití nejsilnějších (bez vývoje) – „ekologické modely“ (např. Dilema vězně a třetí Axelrodův turnaj)
- přežití nejsilnějších + vývoj (křížení, mutace)
  - **genetické algoritmy**
  - evoluční programování
  - genetické programování
  - ...

# Interpretace evolučních principů

Lze interpretovat různě:

- „nejsilnější“ mají největší šanci reprodukce
- učení se metodou pokus-omyl (a pamatování si úspěšných)
- nápodoba úspěšných

není potřeba „racionalita“ agentů, uvědomění si, co přesně dělají (srovnej dedukce, příklad piráti)

# Genetické algoritmy: základní přístup

- Vyber počáteční populaci  $P$
- Opakuj dle potřeby:
  - Vytvoř novou prázdnou populaci  $P'$
  - Opakuj dokud  $P'$  není plná:
    - Vyber dva jedince z populace  $P$  v závislosti na kritériu **zdatnosti**
    - Volitelně: **křížení** a nahrazení potomky
    - Volitelně: **mutace**
    - Přidej do populace  $P'$
  - $P := P'$

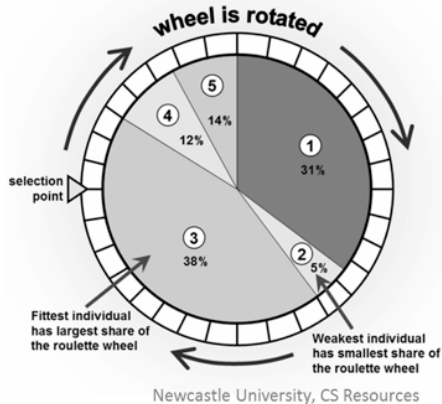
# Reprezentace

- jedinci  $\sim$  řetězce (většinou binární)
- případně vyžadovány speciální vlastnosti řetězců (např. permutace čísel)

# Výběr

- **výběr** založen na **zdatnosti** (fitness):
  - **absolutní** zdatnost (např. optimalizační problémy)
  - **relativní** zdatnost – necháme jedince spolu „soutěžit“
- **deterministický** výběr nejlepších:
  - ztráta diverzity
  - uváznutí na lokálním minimu
- používá se proto **náhodnostní** výběr s přihlédnutím k zdatnosti (ruleta)

# Výběr – ruleta





# Mutace

- **náhodná změna** v řetězci, opět mohou být potřeba speciální úpravy
- většinou nevede ke zlepšení
- může pomoci **překonat lokální optima**
- používáno, ale s malou pravděpodobností



# Praxe: volba parametrů

- základní princip genetického algoritmu jednoduchý
- avšak mnoho (skrytých) parametrů a voleb

volba reprezentace, funkce zdatnosti, přesný mechanismus křížení, mutace, výběru podle zdatnosti, velikost populace, počet generací, pravděpodobnost mutace, ...

- není jednoduché to „rozchodit“
- existují heuristiky pro volbu parametrů, např. pro velikost populace:
  - velikost populace  $\times$  počet generací  $>$  100 000
  - velikost populace  $\gg$  počet genů

# Ilustrační příklad: Hledání řetězce

Time	Average Fitness	Best Fitness	Best String
0	0.035314	0.200000	"pjrmrubynrksxiidwctxfodkodjjzfunpk "
1	0.070000	0.257143	"pjrmrubynrksxiidnybvsqc piisyexdt"
⋮	⋮	⋮	⋮
25	0.708686	0.771429	"qurmous gresn idnasvsweqt prifuseky"
26	0.724286	0.800000	"qurmous green idnasvsweqt prifuseky"
⋮	⋮	⋮	⋮
36	0.806514	0.914286	"uurious green idnas sweqt profusely"
37	0.820857	0.914286	"qurmous green ideas sweqt profusely"
⋮	⋮	⋮	⋮
41	0.895943	0.942857	"uurious green idnas sweat profusely"
42	0.908457	0.971429	"qurious green ideas sweat profusely"
⋮	⋮	⋮	⋮
45	0.927714	0.971429	"qurious green ideas sweat profusely"
46	0.936800	1.000000	"furious green ideas sweat profusely"

**Table 20.2** Evolving the text string "furious green ideas sweat profusely" from an initially random pool of strings: Fitness scores shown are for the raw fitness.

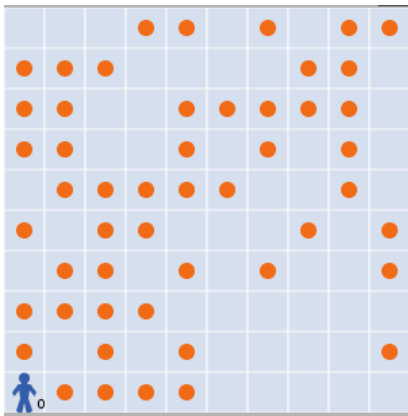
# Demo příklady

- NetLogo
  - Computer Science / Simple Genetic Algorithm
  - Biology / Evolution / Sunflower biomorphs
- demo příklady na webu: „Genetic algorithm“
- typická ilustrace: problém obchodního cestujícího (TSP, traveling salesman problem)

# Robot sbírá jídlo

- NetLogo: Computer Science / Robby the Robot
- mřížka, zdi, jídlo
- vstup: robot vidí bezprostřední okolí
- výstup: přesun na vedlejší pole
- úkol: posbírat co nejvíce jídla
- genetický algoritmus zvládne vymyslet neintuitivní „finty“

# Robby the Robot



# Robby the Robot

```

generation 54:
  best fitness = 29.5
  best strategy: [+●+†+-x●+↓xx†-↓-+x●+-↓x+†●+†-↓-
generation 55:
  best fitness = 31
  best strategy: [+●+†+-x●-↓xx†-↓-+x●+-↓x+†●+-+↓-
generation 56:
  best fitness = 30.5
  best strategy: [+●+†+-x●+↓xx†-↓-+x●+-↓x+†●+†-↓-
generation 57:
  best fitness = 32
  best strategy: [+●+†++x●+↓xx†●↓-+x●+-↓↓+†●+†-↓-
generation 58:
  best fitness = 30.5
  best strategy: [+●+†+-x●+↓x●†-↓-+x●●-↓x+†●+-+↓-
generation 59:
  best fitness = 33
  best strategy: [+●+†+-x●+↓x●†-↓-+x●●-↓x+†●-+→↓-
generation 60:
  best fitness = 34.5
  best strategy: [+●+†++x●+↓xx†●↓-+x●+-↓x+†●+†x↓-
generation 61:
  best fitness = 35.25
  best strategy: [+●+†+-x●+↓x●†-↓-+x●●-↓x+†●+-+↓-

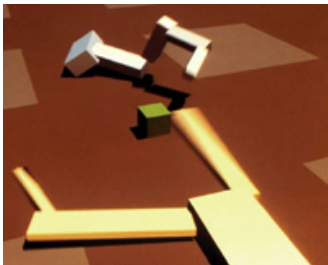
```

# Evoluce pohybu

Karl Sims: Evolved Virtual Creatures

[www.karlsims.com/evolved-virtual-creatures.html](http://www.karlsims.com/evolved-virtual-creatures.html)

[www.youtube.com/watch?v=JBgG\\_VSP7f8](http://www.youtube.com/watch?v=JBgG_VSP7f8)



# Evoluční Dilema vězně: Axelrodova studie

- otázka: jak moc byly výsledky turnajů ovlivněny tím, že lidé očekávali určité složení odeslaných strategií?
- strategie uvažující poslední 3 tahy, začíná z náhodných
- strategie, které se vyvinou připomínají charakteristiky TFT – tj. dominance principů, na kterých je TFT založena není způsobena lidskými očekáváním, kulturními hodnotami, ...



# Dilema vězně

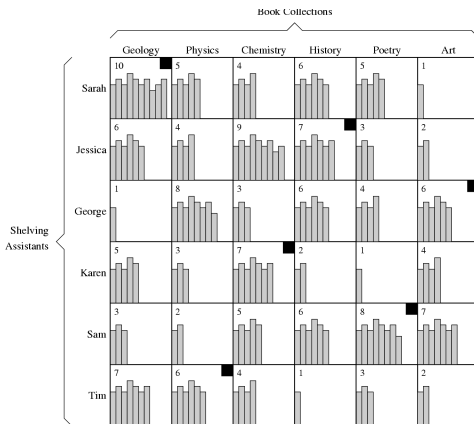
- strategie zohledňující posledních  $k$  kol – snadná reprezentace řetězcem
- např. pro  $k = 1$  řetězec 5 znaků:
  - 1 tah v prvním kole
  - 2 co dělat když minule: oba spolupracovali
  - 3 co dělat když minule: já spolupracoval on zradil
  - 4 co dělat když minule: já zradil on spolupracoval
  - 5 co dělat když minule: oba zradili
- např. TFT je “SSZSZ”
- zdatnost = průměrný bodový zisk



# Další aplikace genetických algoritmů

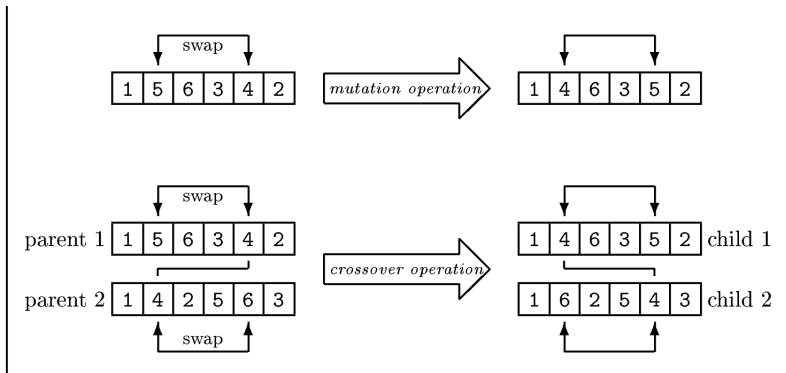
- optimalizační problémy: rozvrhy, protein folding
- učení a plánování: robotika, hry
- návrh: hardware, materiály

# Optimalizační problém



**Figure 18.6** The task assignment problem: Black squares in the entries denotes the optimal assignment with a total shelving rate of 44.

# Optimalizační problém



**Figure 20.3** The crossover and mutation operations applied to candidate solutions of a combinatorial optimization problem

# Evoluce a míra zdatnosti

- „přežití nejsilnějších“ – ale co to znamená „nejsilnější“?
- existuje absolutní míra zdatnosti? **ne**
- zdatnost organismu závisí na prostředí, ve kterém se nachází a které sám ovlivňuje (viz koevoluce)
- **evolučně stabilní strategie**

# Evolučně stabilní strategie

- pokud by do populace tvořené čistě touto strategií přišla cizí strategie, tak by se nerozšířila
- zjemnění Nashova ekvilibria (teorie her)

# Jestřáb a holubice

- agenti bojují o zdroje, úspěšní se množí, neúspěšní vymírají
- každý dodržuje jednu ze dvou strategií:

**jestřáb** vždy útočí, ze souboje utíká jen při velkých poraněních

**holubice** nikdy neútočí (vyčkává dokud to druhý nevzdá), ze souboje utíká



# Jestřáb a holubice: tabulka

Model teorie her, **průměrný** zisk ze vzájemného setkání:

	jestřáb	holubice
jestřáb	-2; -2	10; 0
holubice	0; 10	3; 3

- konkrétní hodnoty nejsou příliš důležité, hlavní je uspořádání hodnot
- jde v podstatě o hru „Kuře“ (viz slidy Spolupráce)

# Kdo je nejsilnější?

- Kdo je „silnější“? Co je výhodnější strategie: jestřáb nebo holubice?

# Kdo je nejsilnější?

- Kdo je „silnější“? Co je výhodnější strategie: jestřáb nebo holubice?
- nelze jednoduše odpovědět – záleží na složení populace
- převládají jestřábi  $\Rightarrow$  je lepší být holubice
- převládají holubice  $\Rightarrow$  je lepší být jestřáb

# Analýza hry

- podíl jestřábů v populaci je  $p$  (a podíl holubic tedy  $1 - p$ )
- průměrný zisk jestřába je:  

$$z_j = -2p + 10(1 - p) = 10 - 12p$$
- průměrný zisk holubice je:  

$$z_h = 0p + 3(1 - p) = 3 - 3p$$
- převažují jestřábi ( $p$  je blízko jedné)  $\Rightarrow$  je výhodnější být holubicí ( $z_h > z_j$ )
- převažují holubice ( $p$  je blízko nuly)  $\Rightarrow$  je výhodnější být jestřábem ( $z_h < z_j$ )

# Evolučně stabilní strategie

- jestřáb ani holubice nejsou evolučně stabilní
- jaká strategie je evolučně stabilní?

# Evolučně stabilní strategie

- jestřáb ani holubice nejsou evolučně stabilní
- jaká strategie je evolučně stabilní?
  - mixovaná strategie: chovej jako jestřáb s pravděpodobností  $7/9$ , chovej se jako holubice s pravděpodobností  $2/9$
  - odvetník: neútočí, ale útoky oplácí

# Analýza hry

- lze realizovat systémovou dynamikou (Stella) i pomocí agentů (NetLogo), viz např.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/GameTheory>
- analýza pevných bodů, dynamiky
- jeden z námětů na projekty

# Altruismus a evoluce

Může být altruismus (evolučně) výhodný? Jak se mohlo vyvinout a udržet altruistické chování při „výběru nejsilnějších“?



# Altruismus a evoluce

Může být altruismus (evolučně) výhodný? Jak se mohlo vyvinout a udržet altruistické chování při „výběru nejsilnějších“?

altruismus – silný, slabý; komplikovanější pojem než se zdá  
altruistické chování:

- zisk pro ostatní
- ztráta pro mě (nebo neutrální stav)

# Altruismus a evoluce

roli hraje více jevů, zde na modelech ilustrujeme dva:

- **vliv podmínek prostředí**
- **populační viskozita** (omezené šíření populace v prostoru)

# Altruismus – buněčný automat

NetLogo: Social Science / Altruism

- 2D model, pravděpodobnostní buněčný automat
- každá buňka používá jednu ze dvou strategií: **altruistická**, **sobecká**
- výběr strategie na další kolo: losováním s přihlédnutím k úspěšnosti **agentů v okolí** („ruleta“)
- podmínky prostředí: **nemoci**, **využitelnost**

# Altruismus: ohodnocení

- $c$  „cena altruismu“, jak moc mě altruistické chování stojí
- $b$  „zisk z altruismu souseda“, jak moc mi pomůže altruistické chování mého souseda
- $N_A$  počet altruistických buněk v okolí, včetně sebe samé

zisk:

- pro sobeckou buňku:  $1 + b \cdot N_A/5$ ,
- pro altruistickou buňku:  $1 - c + b \cdot N_A/5$ .

# Altruismus: analýza modelu

- za **dobrých** podmínek prostředí dominuje **sobecká** strategie
- za **zhoršených** podmínek prostředí dominuje **altruistická** strategie

# Krávy: popis modelu

## NetLogo: Social Science / Cooperation

- základ standardní: krávy žerou trávu
- **různá rychlost dorůstání trávy** podle délky
- **sobecké** krávy: sežerou všechnu trávu, co je k dispozici
- **spolupracující** krávy: vždycky trochu trávy nechají (aby rostla rychleji)

# Chování

- podle **podmínek prostředí** vítězí buď sobecké či spolupracující
  - rychlost růstu trávy
  - energie trávy
  - rychlost přesunu krav
- větší „populační viskozita“  $\Rightarrow$  spolupráce

# Otevřená evoluce

- evoluce nesměřuje k předem danému „vrcholu“
- **koevoluce** – každý se snaží „vylézt“ co nejvýš v aktuální krajině (která se však mění)
- modely evoluce (např. genetické algoritmy) – většinou dodáváme **externí** míru zdatnosti
- jak modelovat opravdu otevřenou evoluci?



# Tierra

- <http://life.ou.edu/tierra/>
- model digitálních organismů
- prostředí = **virtuální počítač**
- organismy = **jednoduché programy**
- soutěží o dostupné zdroje:
  - procesorový čas ~ energie
  - procesorová paměť ~ materiál

# Programy

- sekvence jednoduchých instrukcí: 32 různých 5-bitových instrukcí v **zjednodušeném assembleru**
- **prapředeck** – jednoduchý program, který **kopíruje sám sebe** (ručně vytvořen)
- dál klasický genetický algoritmus (křížení, mutace)
- kopírování a míra **zdatnosti** zadány **implicitně** – zdatný je ten, kdo se zvládne množit

# Dynamika

- **paraziti**
  - využívají pro svoje kopírování zdrojový kód jiných programů
  - jejich vlastní kód je kratší a tím jsou úspěšnější
- **hyperparaziti**
  - zneužívají parazitů
  - využijí toho, že parazit zavolal jejich kód, a pak už mu volání nevrátí zpět

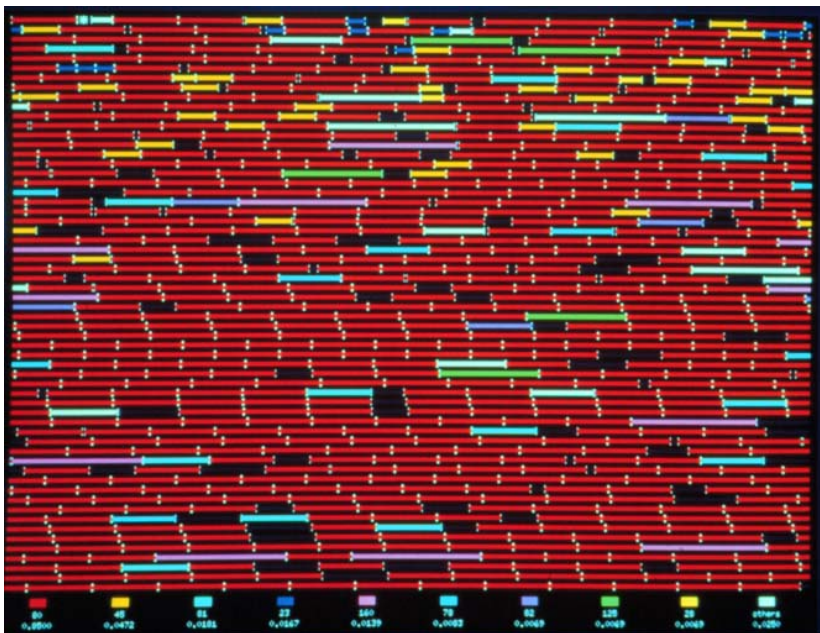
# Ilustrace

Následující ilustrace:

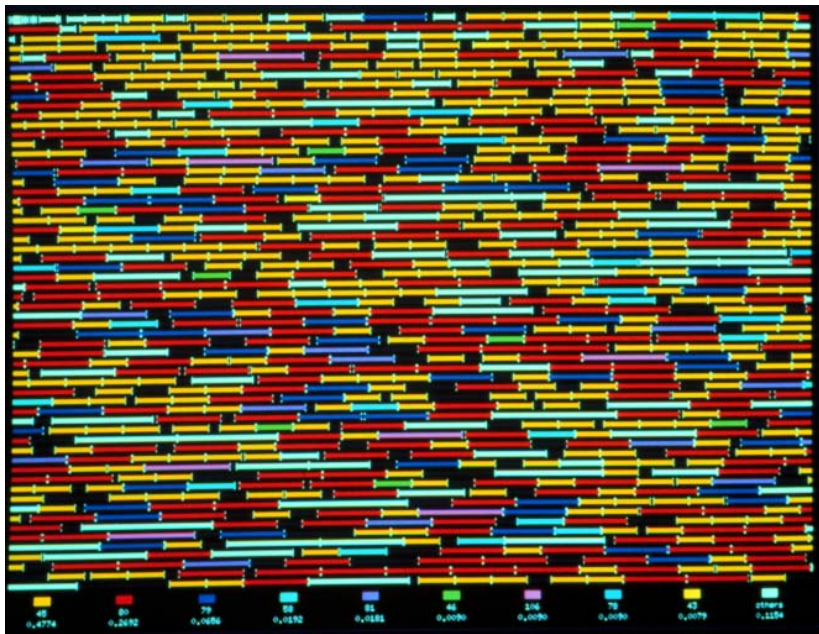
- červená: základní organismus
- žlutá: parazit
- modrá: imunní organismus

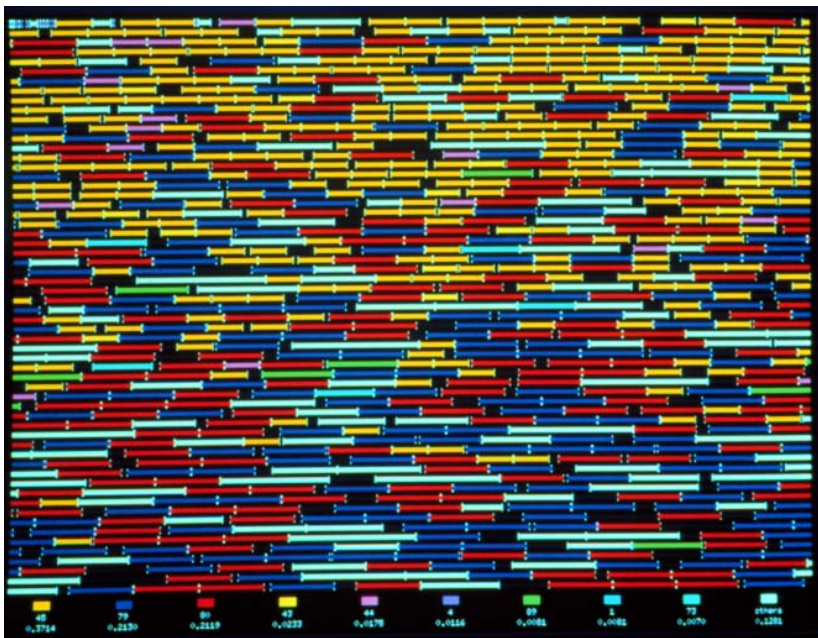
video: <https://www.youtube.com/watch?v=8jd9U8NtzxY>

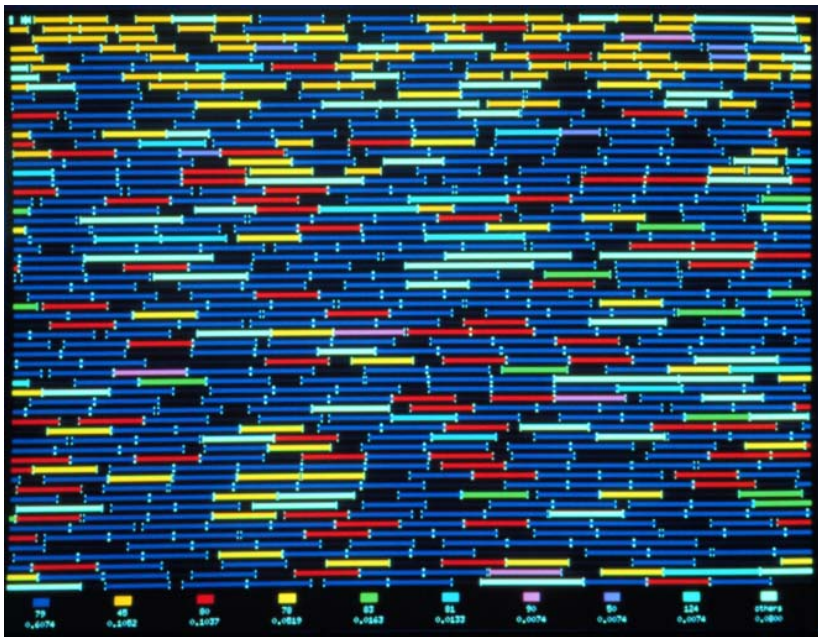
Tierra



Tierra









# Tierra: shrnutí

- bohatá a zajímavá dynamika
- existují rozšíření
- ale i tak se vývoj vždy zastaví
- nedochází tedy k opravdu otevřené evoluci

# Shrnutí

- pojmy, principy:
  - koevoluce
  - evolučně stabilní strategie
  - evoluce a altruismus
  - otevřená evoluce
- modelovací přístupy:
  - **genetické algoritmy**
  - agenti
  - teorie her
  - matematické analýzy