Önszerveződő kritikus jelenség a digitális evolúció folyamatában

Nagy Attila
III. programtervező matematikus - V. filozófia
Email: nagyat@dragon.klte.hu

2001. április 24.

Kivonat

Önszerveződő rendszerekben spontán módon jelenik meg valamiféle rend, valamilyen globális összefüggés a lokális interakciók révén, más megfogalmazásban a rendszer attraktorainak száma külső beavatkozás nélkül lecsökken. Sok valóságos fizikai rendszerben megfigyelhető ez a jelenség, míg másokban kérdéses az emergens tulajdonságok jelenléte. Az önszerveződés jelenségének tanulmányozása a digitális evolúcióban két okból bír kiemelt fontossággal: egyrészt további adatokat szolgáltathat a biológiai evolúció önszerveződő jellegének bizonyítására, másrészt az evolúciós programgenerálás és kódoptimalizálás csak akkor működhet, ha valamiféle önszerveződés indul be a rendszerben, hiszen egyébként a keresés reménytelenül elveszik a sokdimenziós térben.

1 Az evolúciós fejlődés

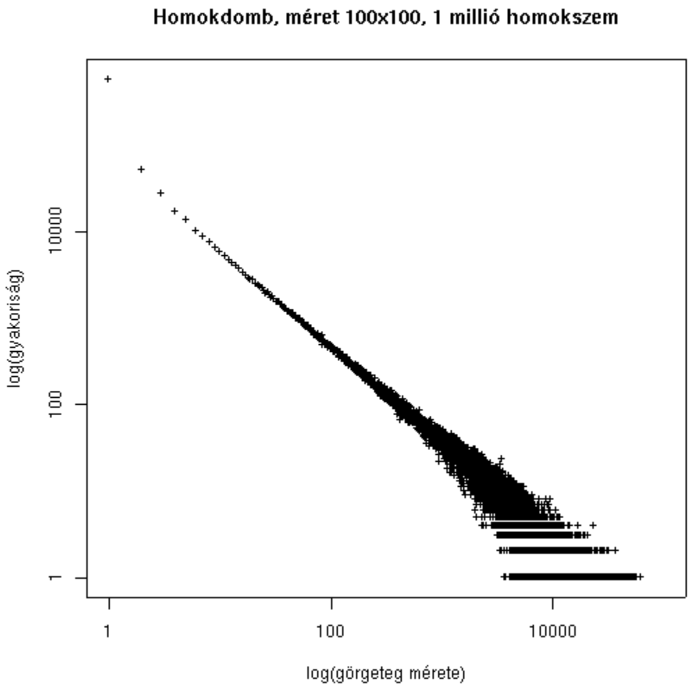
Ha az evolúció fejlődése folyamatos apró lépésekben történő folyamat, akkor hogyan magyarázható a fajgazdagság hirtelen növekedése a kambrium időszakban? Egy mára már általánosan elfogadott elképzelés szerint [7] az evolúció menetében hirtelen ugrások váltakoznak a látszólag nyugalmi állapotnak tűnő időszakokkal. A *szaggatott egyensúly (punctuated equilibrium)* gondolatának azonban sokáig hiányzott az elméleti háttere. Az *önszervező kritikusság (self-organized criticality)* jelenségével nemcsak a változások, hanem a kihalási események is magyarázhatók.[4] Ily módon a nagyméretű kihalási eseményeket nem kell mindenképpen valami külső okkal (meteorit, vulkánkitörés) magyarázni, mert az egyszerűen a komplex rendszerek dinamikájából is következhet.[8] A kövületek és néhány már elvégzett egyszerűbb kísérlet adatai alapján valószínűnek látszik, hogy a bioszféra fejlődése is egy önszerveződő folyamat dinamikáját követi. Jelen tanulmány egy digitális ökoszisztémában, a Physis-ben [1] végzett kísérletek eszközrendszerét mutatja be, mellyel önreplikáló programok fejlődése figyelhető meg egy ökológiai niche-ben.

2 Önszerveződő kritikus jelenség

Számos nagy komplexitású fizikai rendszer mutatja meglepő módon ugyanazokat a szabályszerűségeket. Hatványtörvény eloszlások figyelhetők meg a különböző nagyságú földrengések, forgalmi dugók, folyók áradásai, csillagok fényessége és ezek gyakoriságai között. Ha ezeket az értékeket logaritmikus beosztással ábrázoljuk, akkor egy egyenest kapunk, azaz a nagy méretű események ritkák, míg a kicsik gyakoribbak.

Az önszerveződő kritikus jelenségnek a legegyszerűbb modellje a homokdomb [6]. Ha egy asztalra homokot kezdünk szórni, akkor egy darabig a halom meredeksége folyamatosan nő (szubkritikus állapot), amíg el nem éri a kritikus értéket. (A szuperkritikus állapotnak a túl nagy meredekség illetve a maguktól beinduló lavinák felelnek meg.) Ha ekkor egy homokszemet rádobunk a dombra, akkor a keletkező görgetegnek a mérete nem megjósolható, azt viszont tudjuk, hogy nagy lavinák viszonylag ritkán következnek be, kicsik viszont annál gyakrabban az $1/f$ eloszlásnak megfelelően [5]. A domb ezt a kritikus állapotot önszervező módon hozta létre, nem volt szükség semmiféle paraméter finomhangolására, sőt az állapot robusztus abban az értelemben, hogy természetes módon megmarad a kritikus meredeksége a dombnak, ha folytatjuk a homok szórását.

Bizonyos értelemben a kritikus állapot legtöbbször szükséges a rendszer hatékony működéséhez. Meglepő eredmény például, hogy egy város forgalmának akkor a legnagyobb az áteresztőképessége, ha a forgalmi dugók mérete $1/f$ eloszlás szerint bármekkora méretű lehet. [3] Természetesen ez csak akkor igaz, ha a rendszer elemei önállóak, nem létezik központi irányítás.



1. ábra A homokdomb sejtautomata futási eredményei. A kritikus exponens közelítőleg 1.1

3 Jellemző mennyiségek

A következő mennyiségek alkalmasak arra, hogy vizsgálatukkal az önszerveződés globális ismertetőjegyei után kutassunk.

3.1 Életerő

Az evolúció fejlődését jellemző legfontosabb paraméter az életerő (fitness), ami durván az élőlény szaporodóképességét méri. A Physis rendszerben az i. élőlény életereje a következőképen számolható:

$$f_i = \frac{m_i}{\gamma_i} \tag{1}$$

ahol m_i az élőlény érdeme (merit), amely gyakorlatilag a számara kiosztott gépidőnek felel meg, ami arányos az élőlény effektív hosszával(végrehajtott utasítások száma), valamint az elvégzett számítási feladatok mennyiségével. A γ_i az élőlény szaporodási ideje az elhasznált processzorciklusok számában mérve. Ily módon az életerő a szaporodási sebesség mérőszáma.

Az életerőt más szinteken is mérhetjük: beszélhetünk egy genotípus és a teljes populáció[1] replikációs sebességéről. Legyen N a populáció teljes mérete, N_g a különböző genotípusok száma, n_j a j. genotípushoz tartozó egyedek száma, ekkor egy genotípus életereje, replikációs képessége a következőképpen fejezhető ki:

$$g_j = \frac{n_j}{N} f_j \tag{2}$$

Gyakorlatilag a genotípus relatív gyakoriságával szorozzuk meg annak életképességét. (Az f_j érték az adott genotípushoz tartozó egyetlen élőlény életereje.) Ily módon egy jóval nagyobb kifejezőerővel bíró mennyiséget kapunk, hiszen egy genotípus hiába rendelkezik nagy életerő értékkel, akár ki is halhat ha csak egy-két példány létezik belőle illetve egy gyengébb genotípus is lehet domináns, ha a populáció nagy részében jelen van.

A populáció teljes életerejét a következőképpen jellemezhetjük:

$$F = \sum_j^{N_g} g_j = \sum_j^{N_g} \frac{n_j}{N} f_j = \frac{1}{N} \sum_i^{N} f_i \tag{3}$$

ami a várakozásnak megfelelően az életerő átlagértékét adja a populációban.

A genotípus megadásához hasonlóan értelmezhetjük az életerő mennyiségét a faj fogalmára is. A kettő csak technikai megvalósításában különbözik, s nem matematikailag. A faj azon egyedek csoportja, melyeknek ugyanaz a fenotípusuk (az elvégzett számítási feladatok, a szaporodás módja), de a genotípusuk kis mértékben eltérhet.

3.2 Hatás (impact)

Az életerő egy időpillanatban mérhető mennyiség. Célszerűnek látszik kiterjeszteni ezt időintervallumokra. Ez a mennyiség egy konkrét genotípus hatása, ami azt mutatja, hogy az adott genotípus milyen mértékben befolyásolta saját populációját:

$$I_j = \int_0^{\infty} g_j(t) = \int_{T_c}^{T_e} g_j(t) \tag{4}$$

ahol T_c a genotípus megjelenésének az ideje (creation), T_e pedig az eltűnés időpontja (extinction). Tekintve, hogy a Physis-ben az idő diszkrét időpillanatokra van osztva az integrál egyszerű összegzéssé válik:

$$I_j = \sum_{t=T_c}^{T_e} g_j(t) \tag{5}$$

A hatásgörbék egy genotípus életciklusát írják le.

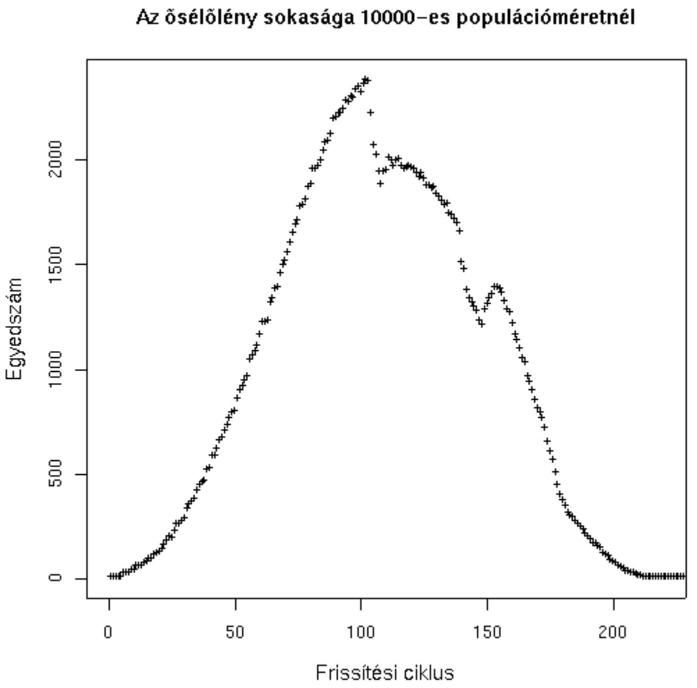
3.3 Sokaság (abundance)

A hatással analóg de egyszerűbb mennyiség a sokaság[2]:

$$A_j = \sum_{t=T_c}^{T_e} n_j(t) \tag{6}$$

A sokaság a genotípus adott időintervallumon értelmezett számbeli dominanciájáról ad információt.

[1] Biológiailag talán helyesebb lenne a társulás fogalmának használata.



2. ábra Az ősélőlény sokaságának időbeli alakulása. 200 frissítési ciklus után gyakorlatilag kihal, eltűnik a populációból.

3.4 Élethossz

A genotípus megjelenése és az eltűnés időpillanata közt eltelt időintervallum a genotípus élethossza.

$$L = T_e - T_c \tag{7}$$

3.5 Várakozási idő

Az életerő növekedésének lépései között eltelt időt a következőképpen határozhatjuk meg. Egy adott időpillanatban az a domináns genotípus, amelynek a legtöbb egyede van jelen a populációban.

$$d = \{i | max(n_i)\} \tag{8}$$

(a genotípust egyszerűen a sorszámával azonosítjuk) Egy nagyobb életerejű egyed megjelenése önmagában nem jelent evolúciós lépést, hiszen lehet, hogy a nagyon gyors szaporodási időt úgy érte el, hogy az utódai már nem képesek a szaporodásra a következő időpillanatban. Evolúciós lépésnek tehát azt nevezzük, ha a domináns genotípust felváltja egy újabb. Jelölje u_n az n és az $n+1$ váltás közt eltelt időt.

3.6 Lecsengési idő

Szigorúan véve csak a legnagyobb életerővel rendelkező életképes élőlénynek van esélye a túlélésre. A legjobb életerőhöz (f_{best}) képest megadhatók a relatív életerők:

$$E_i = f_{best} - f_i \tag{9}$$

A rendszer nyugalmi állapota ekkor a

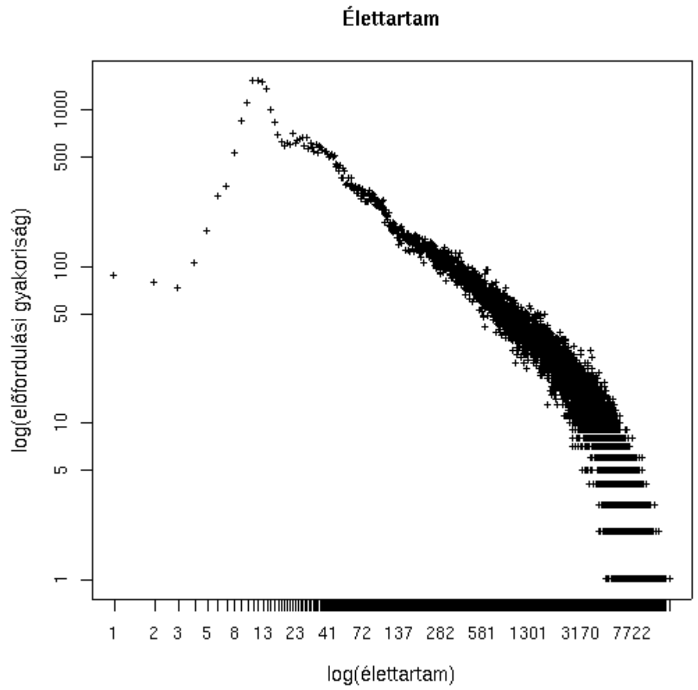
$$\langle E \rangle = 0 \tag{10}$$

egyenlőséggel írható le, ahol $\langle E \rangle$ a relatív életerők átlaga. Természetesen ez az állapot nem következik be a rendszer tényleges működése során, ezért a nyugalmi állapotnak tekinthetjük azt, ha az átlagérték valamilyen megfelelő konstans alá csökken:

$$\langle E \rangle < \delta \tag{11}$$

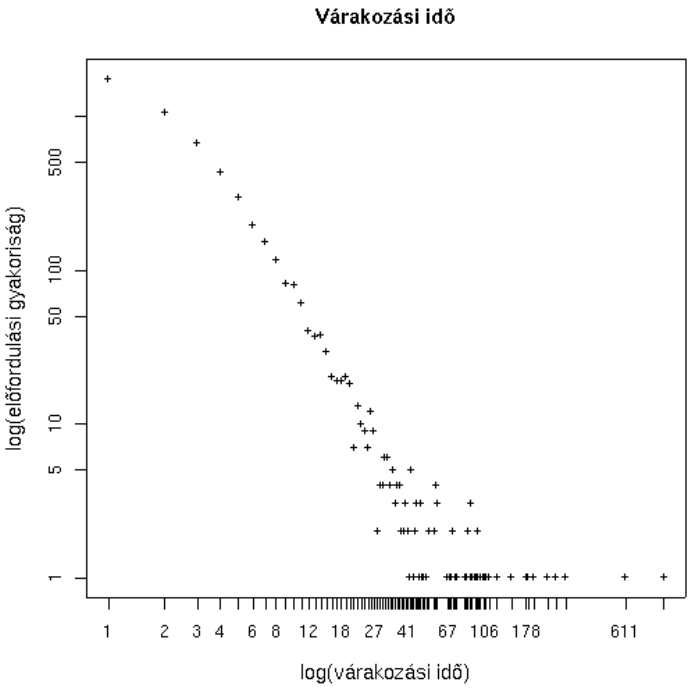
Egy új, nagyobb életerővel rendelkező genotípus megjelenése $\langle E \rangle$ drasztikus növekedését eredményezi. Jelölje r_n azon időintervallum hosszát, amennyire az n. "megzavart" állapotából a nyugalmi állapotba visszatérő rendszernek szüksége van. Ez az idő megegyezik az új genotípus szétterjedéséhez szükséges idővel. Bizonyos mértékben ez tekinthető a különböző szinteken történő fizikai energiaminimalizálás analógiájaként.

4 Mérési eredmények



3. ábra Az élethosszok gyakorisága.

A Physis rendszerrel végzett próbafutások eredményeképpen egy pár jellemző mennyiség - legalábbis első pillantásra $1/f$ eloszlást mutatnak, ami a kritikus állapot



4. ábra A várakozási idők gyakorisági eloszlása.

jele lehet. Nyilvánvalóan több, a paraméterek módszeres változtatásával történő kísérlet alapján mondhatunk biztosat az eloszlás stabilitásáról.

Némely mennyiség, például a domináns genotípus életerejének ugrási mértékei egyáltalán nem mutatnak semmiféle rendet.

5 Következtetések, továbblépés

A jelenlegi rendszer a tényleges ökológiai rendszerekhez képest durva leegyszerűsítést jelent, hiszen az élettér csak egyetlen egy ökológiai niche-ből áll. Gyakorlatilag csak egy domináns faj létezhet. Biológiailag hitelesebb eredményeket kapnánk, ha a mesterséges környezet bonyolultságát növelve több faj számára egyidejűleg élhetővé tennénk a digitális életteret. Ez történhet például különböző diszjunkt számítási feladathalmazok kijelölésével, vagy az élettér térbeli differenciálásával. Ezek a változtatások természetesen megkövetelik a mérendő mennyiségek újradefiniálását.

A modell egyszerűsége miatt kérdéses, hogy a rendszer valóban kritikus állapotban működik-e vagy található valamilyen egyszerűbb magyarázat az $1/f$ eloszlás megjelenésére. [9] Mivel rengeteg rendszerben mérhető az $1/f$ eloszlás, ezért mindenképpen hasznos lenne tisztázni, hogy az eloszlás egyértelműen az önszerveződés jele-e? Ha a válasz igenlő, akkor a feladat annak tisztázása lesz, hogy pl. a digitális ökoszisztéma milyen értelemben van kritikus állapotban.

Az ábrák az R nevű statisztikai rendszerrel készültek. `http://www.r-project.org`

Hivatkozások

[1] Physis. `http://physis.sourceforge.net`. The homepage of the open-source development.

[2] Chris Adami, Ryochi Seki, and Robel Yirdaw. Critical exponent of species-size distribution in evolution. In *Proceedings of Artificial Life VI.*, pages 221–227, 1998.

[3] Per Bak and Maya Paczuski. Self-organization of complex systems. 1999.

[4] Per Bak and Kim Sneppen. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Physical Review Letters*, 71(24):4083–4086, December 1993.

[5] Per Bak, Chao Tang, and Kurt Wiesenfeld. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters*, 59(4):381–384, July 1987.

[6] Per Bak, Chao Tang, and Kurt Wiesenfeld. Self-organized criticality. *Physical Review A*, 38(1):364–374, July 1988.

[7] Stephen Jay Gould and Niles Eldredge. Punctuated equilibrium comes of age. *Nature*, 366:223–227, November 1993.

[8] Pálfy József. *Kihaltak és túlélők – Félmilliárd év nagy fajpusztulásai*, chapter Az önszerveződés csapdája?, pages 157–160. Vince Kiadó, Budapest, 2000.

[9] M. E. J. Newmann, S. M. Fraser, K. Sneppen, and W.A. Tozier. Self-organized criticality in living systems - comment. *Physical Letters A*, 228(202), 1997.