Nagy Attila
Debreceni Egyetem
Matematikai és Informatikai Intézet
nagyat@dragon.klte.hu

Digitális biológia,
avagy az élet megjelenése a gépekben

2001. március 12.

> *Yet the vision of digital evolution of vast complexity is still out there, waiting for realization or disproof. We are only at the most rudimentary level of our experience with evolution in the digital medium. The possibilities are great enough to merit a serious and sustained effort.*
>
> — Thomas S. Ray

Miért hagyta abba hirtelen kutatásait egy biológus, aki 15 éven át tanulmányozta a trópusi esőerdők ökológiáját? S mi történt a rákövetkező pár év alatt, ami után még nyomatékosabban emelt szót a földi élet diverzitásának védelmében?

Manapság a számítógépek jelentős szerepe vitathatlan a biológiai kutatásokban. Az emberi génállomány feltérképezésénél a nagy mennyiségű adatok feldolgozására nélkülözhetetlen a gépek számítási ereje. Azonban jelen összefüggésben a számítógépekről nem mint eszközökről lesz szó, hiszen ez a szerep mára már általános érvényűvé vált nemcsak a tudomány, hanem a mindennapi élet szinte minden területén is. Egészen új perspektívák nyílnak meg a biológia számára, ha a gépeket mint a földitől különböző létformák potenciális élettereit tekintjük. A földönkívüli élet keresése egyelőre nem járt sikerrel, így igazi értelemben vett komparatív biológia nem lehetséges. Ezt a nehézséget próbálja feloldani a mesterséges élet kutatási programja azzal, hogy a szerves kémián alapuló élettől teljesen eltérő alapon próbálja az életjelenségeket létrehozni.

Thomas Ray-t lenyűgözte annak lehetősége, hogy egy program kettős természeténél fogva képes önmagát replikálni. Egy program ugyanis kezelhető értelmes utasítások sorozataként, azaz végrehajtható, de tekinthető puszta adathalmaznak is, ami másolható illetve átalakítható. Ily módon egy program képes lehet önmaga lemásolására. Ha vesszük ezen replikátorok – nevezhetjük őket digitális élőlényeknek – egy populációját valamely véges erőforrásokkal rendelkező környezetben, s ha a szaporodási folyamat hibákkal terhelt, akkor az evolúció folyamata szükségszerűen beindul a számítógép memóriájában is. Thomas Ray felfüggesztette az esőerdei kutatásait, hogy ezt a hipotézist leellenőrizhesse. Megtanult programozni, majd megalkotta a `Tierra` nevű programot. Azt hitte, több éves programozói munka kell majd ahhoz, hogy valami említésre méltó történjen a megalkotott digitális világban. Az eredmények azonban messze felülmúltak minden várakozást: az evolúció alkotó ereje elszabadult a gépben többszörös sebességre gyorsítva. A dzsungel élővilágához hasonló sokszínűség bontakozott ki: gazdaszervezetek és információs élősködők folyamatos harca a Lotka-Volterra ciklus szerint, a nemek létrejöttének első jelei, kihalási események.

A `Tierra` rendszer egy új kutatási irányt jelölt ki, amely azóta folyamatosan szolgáltat új eredményeket. A munka nagy része azonban még mindig előttünk van. Jelen írás megpróbálja összefoglalni a digitális biológiában rejlő lehetőségeket, a kutatás jelenlegi legfontosabb problémáit, és kísérletet tesz az előfeltevések kritikus vizsgálatára is.

1 Előfeltevések

> *Mert bármennyire hihetetlen, a tudomány úgy keresi az élet keletkezésének útjátmódját, hogy azt sem tudja, mit is keres tulajdonképpen.*
>
> — Gánti Tibor

A biológia számára az élet olyan alapvető, mint a matematika számára az axiómák. Nem vizsgálandó, nem bizonyítandó kiindulópont. Ily módon nem vetődik fel az a kérdés, hogy mi az élet általános fogalma? Természetesen a digitális biológia is előfeltételezi az életet, de még azon túl annak általános voltát, konkrét fizikai világunktól való függetlenségét, informatikai megfogalmazásban az élet implementációfüggetlenségét is.

Ha az élet jelensége elválaszthatatlan a szénatom tulajdonságaitól, akkor a digitális biológia szükségszerűen tévút, kudarcra van ítélve. Azonban még ebben a negatív esetben is hasznos lehet a kutatás, hiszen annak megértéséből, hogy miért nem lehet gépekben reprodukálni az életjelenségeket, sokat tudhatunk meg az élet általános értelméről.

2 Célok

A digitális biológia az élet jelenségét próbálja meg realizálni egy alternatív, komputációs közegben.[1] Ez az első lépés, ha úgy tetszik ez az eszköz az alábbi célok elérése érdekében.

Egy igazi értelemben vett összehasonlító biológia lehetősége. Ha lehetőségünk van a létrehozó közeg szintjén különböző életformák összehasonlítására, akkor elérhetővé válik az élet alapfolyamatainak mélyebb megértése. A biológia ily módon legsajátabb alapfeltevéseit tisztázhatja.

A tökéletes megfigyelhetőség. Egy biológiai rendszernél a puszta megfigyelés is hatással lehet a megfigyelt egyedekre, a pontos tudományos kísérlet pedig gyakran a az élőlény elpusztulását eredményezi. A digitális ökoszisztémában ez a probléma egyáltalán nem jelentkezik, a rendszer bármely eleme annak bármelyik szintjén vizsgálható bármelyik időpillanatban anélkül, hogy ez a legcsekélyebb hatással is lenne a rendszer működésére.

Szintén probléma, hogy a változások sebessége gyakran annyira csekély mértékű, hogy egy ember életében nem is figyelhető meg. Az evolúció folyamata jó példa erre. A

[1] Hangsúlyozandó, hogy ez a vállalkozás semmilyen szinten nem vállal közösséget a számítógépes vírusok létrehozásával, hiszen ott a szándék egyértelműen romboló jellegű.

komputációs közegben a fejlődés a gépek processzorainak sebességétől függ, amely a mai napig töretlenül növekszik. Az evolúció valós időben követhetővé válik.

Holisztikus szemléletű tudomány létrejötte. Az újkori tudomány alapvetően redukcionista jellegű: a bonyolultabb jelenségeket egyszerűbb részekre bontva próbál a megértéshez eljutni. Ez a megközelítés vitathatlanul jól alkalmazható és eredményes, de mindenképp szükség lenne az ellenkező irányú vizsgálódásokra is, ahol azt próbáljuk meg megérteni, hogy egyszerű elemekből miként épülhetnek bonyolult működése rendszerek. Az élet vizsgálatánál különösen fontos lenne az ilyen szintézisteremtő szemlélet, hiszen az élet maga is egyszerű elemek kölcsönhatásából kibontakozó emergens jelenség.

Mindezek a célok természetesen csak akkor érhetők el, ha a hagyományos kutatások és az új megközelítések megtalálják a közös hangot, ha úgy tetszik a biológusok és a programozók képesek lesznek együttműködni, s így a biológiailag megalapozatlan rendszerek – a programozók magánakciói – nem válnak pusztán csak látványos játékszerekké, melyek legtöbbször képernyővédőkként végzik.

Természetes módon az informatika nem teljesen önzetlenül vesz részt az ilyen jellegű kutatásban. Az evolúciós technikák alkalmasnak bizonyulhatnak hatékony, hibatűrő és alkalmazkodóképes programok fejlesztésére.

3 A kutatás lehetséges irányai

A jelenleg létező megvalósítások digitális élőlényei leginkább a vírusok fejlettségi szintjére hasonlítanak: "testük" a genetikai kód maga, melyet egy függetlenül létező virtuális processzor végrehajt. A kód a replikálódáshoz szükséges utasításokat tartalmazza. Egy fokkal magasabb szintű szerveződést jelent az, ha genetikai kódban benne van a dekódoló rendszer leírása is.

A kutatásnak és a fejlesztésnek alapvetően két irányát különböztethetjük meg. Az egyik irány az alapmodell életszerűbbé tételén fáradozik. Itt különösen fontos a biológusok közreműködése, hiszen csak a releváns biológiai elveket kell alkalmazni a digitális ökoszisztémában, s azokat is úgy, hogy a rendszer ne váljon valamiféle utánzatszerű szimulációvá. Ide tartozik a digitális világ "fizikai és kémiai" törvényeinek finomhangolása, valamint a környezet komplexitásának növelése. A másik irány a meglévő kísérleti adatok értelmezése és elemzése: magaszintű szemantikai elemzők fejlesztése a digitális élőlények struktúrális felépítésének vizsgálatára, a nagy mennyiségű adathalmaz feldolgozása pontos matematikai eszközökkel (valószínűségszámítás és a statisztika), vizualizációs eszközök fejlesztése.

Összességében elmondható, hogy az egyes részfeladatok nem oldhatók meg izoláltan, hanem csak a többi feladattal összehangolva.

3.1 Az alaptörvények finomhangolása

A digitális világ alaptörvényei nem fizikai vagy kémiai (természetesen mindig a fizikai világba beágyazottan található meg), hanem információs-logikai jellegűek. Metafora-szerű megfeleltetések könnyen megadhatók: az energia, ami gyakorlatilag a napfény a természetes biológiai világban azonosítható a processzor számítási erejével. Az anyag építőelemei az adatok, a különböző utasítások és operandusok, melyek éppen úgy kombinálódhatnak magasabb egységekbe, mint ahogyan az atomok bonyolult molekulákat építenek fel. Ha az anyagot energia járja át – a processzor az utasítások végrahajtásával megváltoztatja a memória tartalmát – akkor bonyolult folyamatok indulhatnak be. Az analógák révén teljesen nyilvánvalóvá válik, hogy a digitális világ alaptörvényeit a processzor működési szabályai adják. Nyilvánvalóan nem minden világ alkalmas az élet befogadására, ezért valószínűleg csak hosszas munkával lehet az életjelenségekre hangolt processzorok tervezési elveit kidolgozni.

3.2 A környezet komplexitásának növelése

> *az élet ugyanis nem a beléje épült "haladási" tendencia folytán, hanem csakis a fenyegető veszedelem hatására fejlődik*
>
> — Stanislaw Lem *Summa Technologiae*

Túl egyszerű környezetben nem indulhat be az élet igazi fejlődése. A digitális ökoszisztémában többféleképpen lehet növelni a környezet komplexitását. A mutációs ráta térbeli változtatásával különböző éghajlati zónákat hozhatunk létre. Az anyagcsere folyamatoknak az adattranszformációt feleltethetjük meg: egy számítási feladat végrehajtása plusz energiához juttatja a digitális élőlényt. Különböző feladatcsoportok megadásával ökológiai fülkéket implementálhatunk. A természetes kihalásokat mesterséges katasztrófák is létrehozhatják.

A környezeti komplexitás növelésére addig van szükség, amíg a biodiverzitás akkora szintig el nem jut, amikor a környezet legfontosabb jellemzőit már a többi élőlények határozzák meg. Ha ez a fejlődésbeli hirtelen ugrás – ami a földi életben a Kambrium időszakban történt meg – nem általános jellemzője az evolúciósan fejlődő rendszereknek, akkor a digitális biológia kudarcra van ítélve, hiszen a gépek nagy sebesége önmagában nem elég a nyitott végű fejlődés létrehozásához.

3.3 Magasszintű szemantikai elemzők

A digitális biológia megközelítése a hagyományos, szinte kizárólag informatikai feladatok megoldására használt genetikus algoritmusokétól radikálisan külünbözik. A hagyományos genetikus algoritmusok optimalizálási problémák megoldására alkalmasak. Egy előre definiált fitness-függvénynek keressük valamelyik szélső értékét valamilyen előre definiált formában.

A fejlődés itt tehát a megfelelő esetben konvergál valahová, és a szelekció teljeséggel mesterséges. Így a fejlődés iránya zárt. A digitális biológia rendszereiben a fitness-függvény folyamatosan változik a környezet és a többi élőlény változásaival együtt, a szelekció természetes, ebből kifolyólag a fejlődés kimenetele nyitott.

Ez a szabályozatlanság veszélyeket is rejt magában. A megfigyelő kutató könnyedén elveszítheti a fonalat, nehézzé válhat annak követése, hogy pontosan mi is történik a rendszerben. Ezért az élőlények "anatómiai" vizsgálatára magasszintű elemzőprogramokra van szükség, melyekkel könnyedén megállapítható, hogy egy adott élőlény mit is csinál tulajdonképpen. Ezen technikai eszközök nélkül könnyen abba a hibába eshetnénk, hogy egy rendszert, amit nem értünk, felcserélünk egy másikkal, amit éppúgy nem értünk.

3.4 Statisztikai elemzések

Még ha magunk jelölhetjük is ki a célt, de a hozzá vezető utat a Természet szabja meg. Repülhetünk, de nem egyszerűen a széttárt karunkkal.
— Stanislaw Lem *Summa Technologiae*

A fejlesztés mindenkori irányát a korábban már elvégzett kísérleti adatok elemzésének eredménye szabja meg, hiszen ezek nagy része mindig valamiféle új megvilágításba helyezi a rendszer elemeit. Ezért alapvető fontosságú a nagyméretű adathalmaz pontos statisztikai elemzésére.

3.5 Vizualizációs eszközök

A digitális ökoszisztémák vizsgálata kitűnően alkalmas arra, hogy a megfigyelőnek szinte pillanatok alatt pontos képe legyen az evolúciós folyamatok természetéről. Sokoldalú, könnyen kezelhető, szemléletadó vizuális eszközök kifejlesztésével ez a tulajdonság még jobban kiaknázható, s akár még az oktatásban felhasználhatóvá válnak szemléltetési eszközként a mesterséges élet rendszerek.

4 Válogatott irodalomjegyzék, kapcsolódási pontok

Jelen írásban nem szerepelnek a tudományos szabványnak megfelelő hivatkozások. Helyettük következzen a kommentált, helyenként több írást magukba foglaló kapcsolódási pontok felsorolása.

Thomas S. Ray honlapja – A Tierra volt az első szoftver, aminél a fejlesztés tisztán biológiai indítattású volt, s az eredmények igen figyelemreméltóak. Spontán módon jelent meg a parazitizmus jelensége és a nemek evolúciója.
`http://www.isd.atr.co.jp/~ray`

Digital Life Laboratory – A kaliforniai – főleg fizikusokból és molekuláris biológusokból álló – kutatócsoport először a Tierra-val folytatott kísérleteket, aztán saját kutatási platformot fejlesztettek ki: az Avida nevű szoftvert. A kísérleteket számos új szempont szerint végezték: információelmélet, termodinamika, SOC (self-organized criticality), véletlen bolyongás, káoszelmélet. Munkájuk eredményeinek egy részét 1999. augusztus 12-én a *Nature* publikálta.
`http://dllab.caltech.edu`

A Physis projekt – A szerző saját fejlesztése kutatási platformja, mely célul tűzte ki a meglévő rendszerek funkcióinak teljes integrálását egy jóval általánosabb, rugalmasan bővíthető keretrendszerbe.
`http://physis.sourceforge.net`

Gánti Tibor: Az élet általános elmélete Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000. Gánti Tibor a chemotonelmélet megalkotásával az életnek egy olyan elméletét dolgozta ki, amely magában foglalja a nem szén-alapú élet, s ily módon – természetesen kimondatlanul – a digitális biológia lehetőségét is.

5 Zárszó

Az ember tevékenységével visszafordíthatalan módon megváltoztatta környezetét, gyakran tudatlanul hatott annak működésére. A katasztrofális következmények elkerülésének most már elengedhetetlen követelménye az, hogy megértsük környezetünk bonyolult folyamatainak működését. Ezen megértés eléréséhez talán jó eszköz a digitális biológia tanulmányozása.