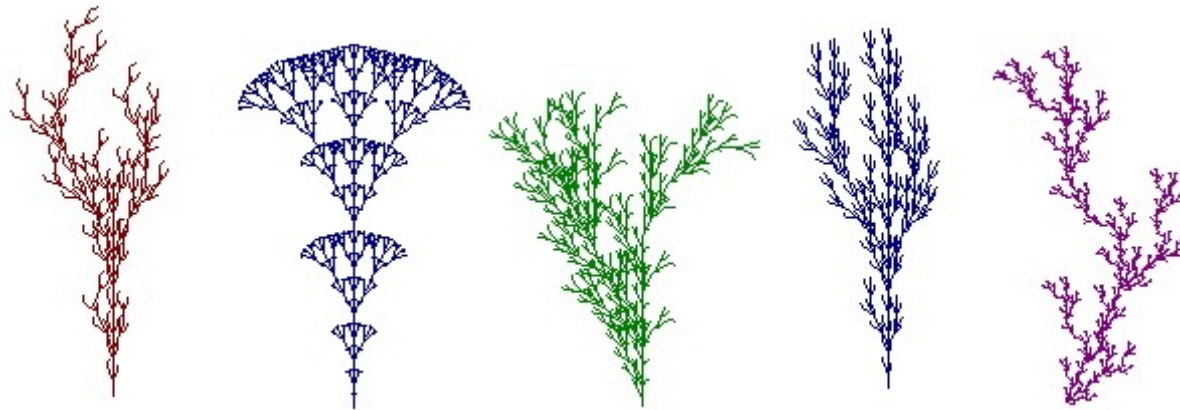


Genetikus algoritmusok az L-rendszereken alapuló növénymodellezésben



Források:

Ochoa G. (1998): On Genetic Algorithms and Lindenmayer Systems

In: Eiben et al. (eds.): Parallel Problem Solving from Nature - PPSN V,
LNCS Vol. 1498/1998, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, pp. 335 – 344

Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. (1990): The Algorithmic Beauty of Plants
Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York

Motiváció:

Procedurális modellek a növénymodellezésben:

- sok tervezési munka
- a felhasználónak ismerni kell az eljárás részleteit
- kevés ellenőrzés az eredmény felett

Megoldás lehet a biológiai evolúció szimulációja:

- növények esetében kézenfekvő analógia
- komplex objektumok hozhatók létre és vizsgálhatók
- a felhasználónak nem kell ismerni az eljárás részleteit
- részleges ellenőrzés az eredmény felett

Első kísérletek:

Karl J. Niklas botanikus:

- korai szárazföldi növények elágazási struktúráinak evolúciós szimulációja

Niklas megközelítése:

- Hipotézisek felállítása a növényi evolúcióról
- Matematikai eljárások kidolgozása a tulajdonságok okozta versenyelőnyök számszerűsítésére
- Kiválasztott paraméterek:
 1. Az elágazás valószínűsége
 2. Elágazási szög
 3. Forgási szög
- Szimuláció iterációkkal: elágazási ciklusok
- Legközelebbi szomszédok keresése determinisztikusan a paraméterterben
- A legrátermettebb szomszéd lesz a következő keresés kezdőpontja
- Folytatás a szomszédoknál sokkal hatékonyabb tulajdonságkészlet megtalálásáig

Niklas szimulációs modelljének korlátai:

- Túl kevés geometriát befolyásoló tényező figyelembe vétele
- A szimulált evolúció megragadhat egy helyi minimumnál
- Egyetlen organizmust tekint populáció helyett, nincs szexuális reprodukció

Gabriella Ochoa megközelítése:

Genetikus algoritmusok és L-rendszerek kombinálása 2D növényi alakzatok létrehozásához.

Alapfogalmak:

- Genotípus: egyfajta belső kódolás
- Fenotípus a genotípusnak fejlődési szabályok által meghatározott, esetleg külső tényezők által is befolyásolt kifejeződése
- Morfológia (alaktan): a külső megjelenés, a fenotípus vizsgálata

Az alapfogalmak megjelenése az Ochoa-modellben:

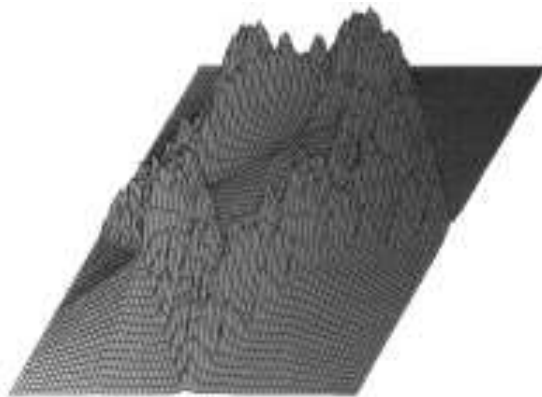
- Genotípus: a Lindenmayer-rendszerek (L-rendszerek) matematikai formalizmusa
- Fenotípus: derivációval keletkezett, grafikailag interpretált elágazási struktúrák

A mesterséges evolúció formái:

1. **Automatikus szelekció:** genetikus algoritmus, rátermettségi függvénye az aktuális evolúciós hipotézisek szerint a növényi evolúcióra legnagyobb hatást gyakorló tényezőket veszi figyelembe.
2. **Interaktív szelekció:** a felhasználó az előnyben részesített formák felé terelheti az evolúciót, a rátermetség meghatározása emberi érzékelésen alapul.

Lindenmayer-rendszerek

- Aristid Lindenmayer biológus (1968)
- matematikai formalizmus a biológiai fejlődés leírására
- széleskörű alkalmazás a számítógépes grafikában:
 - növények és egyéb elágazó struktúrák (folyók, véredényrendszer)
 - fraktálgörbék modellezése
 - terepmodellezés
 - geometriai modellezés (pl. épületek)
 - animációk
 - ornamentikák (könyv- és weboldaldíszítések)



Újraíró (helyettesítési) rendszerek (rewriting systems):

- Bonyolult objektumok leírása:
 - kiindulás egy egyszerű objektumból (axióma)
 - újraírási szabályok (produkciók) alapján az objektum egyes részeinek kicserélése (rekurzív)
- többnyire karakterláncokon dolgoznak

Legismertebb példa:

- Chomsky-nyelvtanok

L-rendszerek vs. Chomsky nyelvtenok:

- Chomsky-nyelvtanok: lépésenként szekvenciálisan egy jel kicserélése
- L-rendszerek: párhuzamosan minden karakter cseréje
⇒ Biológiai folyamatok: pl. többsejtűek sejtjeinek egyidejű osztódása

Példák az L-rendszerek típusaira:

- **Környezetfüggetlen:** produkciós szabályok mindig egy szimbólumra
- **Környezetfüggő:** produkciós szabályok alkalmazása csak akkor, ha a szimbólum megfelelő szomszédok között helyezkedik el
- **Determinisztikus:** minden szimbólumhoz pontosan egy helyettesítési szabály
- **Sztokasztikus:** szimbólumként több produkció, választás valószínűség alapján

D0L-rendszerek

Az L-rendszerek legegyszerűbb osztálya:
determinisztikusak és környezetfüggetlenek

Példa (Prusinkiewicz és Lindenmayer):

- ábécé: $\Sigma = \{a, b\}$
- helyettesítési szabályok: $a \rightarrow ab$ és $b \rightarrow a$.
- axióma: b

Az első öt levezetés karakterláncai:

b
|
 a
_ |
 $a b$
_ | |
 $a b a$
_ | | |
 $a b a a b$
_ | / _ | | _ \
 $a b a a b a b a$

A karakterláncok grafikai értelmezése

- eredetileg a fejlődés matematikai leírása geometriai vonatkozások nélkül
- időközben geometriai értelmezések is, fraktálok, növények modellezéséhez, pl.:
 - vektor interpretáció
 - turtle geometria interpretáció (LOGO nyelvből)

Turtle interpretáció (2D):

- A teknősbéka állapota: (x, y, α) – x, y a helyzetet, α szög a teknős nézési iránya
- Előzetesen megadunk még egy d lépéshosszt és egy δ szöveget

Az eredeti, két dimenzióban mozgó teknős által felismert parancsok:

F: előrelépés d távolsággal, a teknős állapota (x', y', α) -ra változik,

$$x' = x + d \cos \alpha,$$

$$y' = y + d \sin \alpha,$$

(x, y) és (x', y') pontok között vonalat rajzolunk.

f: mozgás, mint F esetében, de vonal rajzolása nélkül.

+: elfordulás balra δ szöggel, a teknős új állapota $(x, y, \alpha + \delta)$.

-: elfordulás jobbra δ szöggel, a teknős új állapota $(x, y, \alpha - \delta)$.

Zárójelezett L-rendszerek

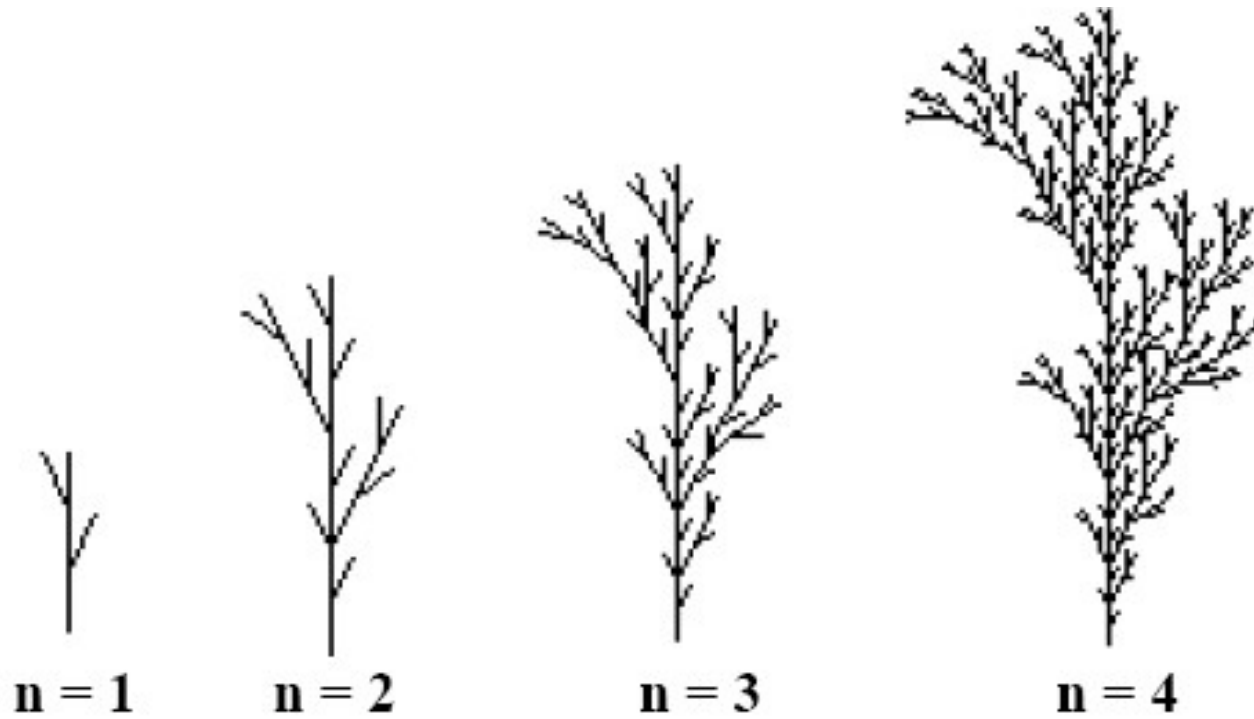
Az elágazó rendszerek reprezentálásához az ágakat lehatároló további két jel:

[: a teknős aktuális állapotát a verembe menti (push).

] : a teknős aktuális állapota a veremből kivett állapotra módosul (pop).

A teknős, adott (x, y, α) kezdeti állapot, d és δ értékek mellett rajzként interpretálja a v karakterláncot.

Példa: L-rendszer: $\{w: F, p: F \rightarrow F[-F]F[+F][F]\}$



Az első négy generáció

Ochoa modellje:

- zárójelezett D0L-rendszerekkel ír le virtuális élőlényeket
- kromoszóma létrehozása egyetlen helyettesítési szabályból álló D0L-rendszerrel
 - axiómája az F szimbólum (nem tároljuk), pl.: $F[-F]F[+F][F]$

Genetikus műveletek

Gondos megfogalmazást igényelnek, mert:

- a kromoszómák szintaxisa meghatározott (L-rendszerek formalizmusa)
- az utódok érvényes szintaxisát biztosítani kell

A modellben háromféle művelet:

- **Keresztezés:** Koza genetikus programozásában LISP részfák, itt az L-rendszerbeli bezárójelezett rész-karakterláncokat cserélünk ki egymással.

Legyenek például a szülők a következők:

$F[-FF]+[FFF]-FF[-F-F]$ és $F[+F]+[-F-F]-FF[+F][-F][F]$

Felírás hierarchikus módon, az aláhúzott szakaszokat cseréljük ki egymással:

F | + | - FF |

-FF FFF -F-F

F | + | - FF | | |

+F -F-F +F -F F

Szülők:

Utódok:



F[-FF]+[FFF]-FF[-F-F]

F[+F]+[-F-F]-FF[+F][-F][F]

F[-FF]+[FFF]-FF[+F]

F[+F]+[-F-F]-FF[-F-F][-F][F]

Mutáció: véletlen változatok a populációban, a kromoszóma jól lehatárolt részein dolgoznak

- **Szimbólum mutáció:** a kromoszóma valamely véletlenszerűen kiválasztott, az {F; +; -} halmazból származó szimbólumát cseréljük ki egy véletlenszerű, de szintaktikailag helyes karakterláncra.
- **Blokk mutáció:** a kromoszóma véletlenszerűen kiválasztott blokkját cseréljük ki egy véletlenszerű, de szintaktikailag helyes karakterláncra.

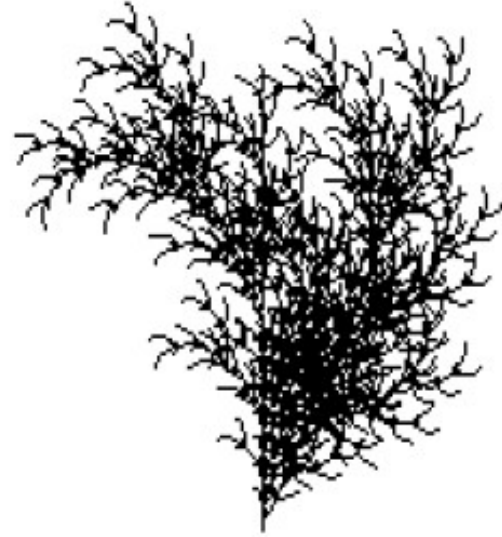
Szimbólum mutáció

Blokk mutáció



F[+F][+F-F-F]-FF[-F-F]

Szülő



F[+F][+F-F-F]-F[-F][-F-F]

Utód



FF[+FF][-F+F][FFF]F

Szülő



FF[+FF][-F+F][-F]F

Utód

Különbségek Goldberg kanonikus genetikus algoritmusaihoz képest:

- a kromoszóma hossza nem, szerkezete viszont szintaktikailag kötött
- a populációnak csak igen kis részét, legkevesbé rátermett 1/5-ét cseréli ki
- minden reprodukciós eseménynél választás a többféle genetikus művelet közül egy arányokra épülő séma alapján

A rátermettségi függvény

- nehéz a szimulált objektum esztétikai / funkcionális sikerét automatizáltan mérni
- a génekre viszonylag könnyű megfogalmazni szelekciós képletet
- a természetes kiválasztódás nem közvetlenül a génekre, hanem a fenotípusra hat
- az emberi szem könnyen felismeri és kiválasztja az alkalmas fenotípusokat,
- a fenotípus mintázatokat közvetlenül kiválasztó program írása kihívás
 - ⇒ a gyakorlatban legtöbbször az emberi érzékelésre hagyatkoznak, mint szelekciós tényezőre, ami a fejlődést a kívánt irányba viszi
 - ⇒ Ochoa: magasabb szintű automatizálásra törekszik

Szükség van a megfelelő rátermettségi függvény megtervezésére: a szimulált evolúciót terelje a természetes növényeket idéző alakzatok kialakulásának irányába.

Lépések:

- hipotézisek megfogalmazása: mely tényezők gyakorolják legnagyobb hatást a növényi evolúcióra
- a tényezők hatását számszerűsítő matematikai formulák megfogalmazása

Hipotézis megfogalmazása:

Ochoa ebben a Karl Niklas által 1985-ben leírt gondolatokra támaszkodik.

- A növények többsége szerkezeti megoldás a fotoszintézis biokémiai folyamatai által meghatározott feltételrendszerre.
- Elágazó szerkezetű növények: a legtöbb fényt begyűjtők a legsikeresebbek.
⇒ Tehát a fénygyűjtési képességet növelő változások a növény alakjában versenyelőnyöket biztosítanak számára.

További növényi „feladatok” a fényért és a térért való hatékony versengéshez:

- vertikálisan növekvő test megtartása a gravitáció ellenében

Rátermettségi függvény:

Alapja a fénygyűjtési képesség és a stabilitás, összetevői:

- a) fototropizmus
- b) kétoldali szimmetria
- c) fény begyűjtési képesség
- d) szerkezeti stabilitás
- e) elágazási pontok aránya

Számszerűsítés, képletek megfogalmazása:

- egyszerű eljárások a tulajdonságok biztosította versenyelőnyök számszerűsítésére
- a szelekciós nyomás a fenotípusokra hat, ezért az L-rendszerekkel kódolt organizmusokat kiértékelés előtt grafikusan interpretálni kell
- a rátermettségi függvény összetevőinek bemenete a rajzolás közben létrejött geometriai információ, eredménye egy 0 és 1 közé eső valós szám

Kiértékelés derékszögű koordináta-rendszerben (csúcspontok = (x, y) párok):

a) Pozitív fototropizmus:

- nagyobb maximális y-érték \Rightarrow magasabb rátermettségi érték
- motiváljuk a fény felé való növekedést
- a magas növények sikeresebbek a magok szétterjesztésében is

b) Kétoldali szimmetria:

- az y-tengely két oldalán külön-külön összegezzük az x-értékek abszolút értékeit
- a „súlyarány” közelebb van az 1-hez \Rightarrow magasabb rátermettségi érték
- a kiegyensúlyozott alakzatok előnyben részesítése

c) Fénygyűjtési képesség:

- az utolsó szegmenseket levélként értelmezzük
- a fénysugarakat felülről lefelé mutató függőleges vonalként képzeljük
- számítjuk a fény által megvilágított, más levelektől nem árnyékolt levélfelületet
- nagyobb fény által megvilágított levélfelület \Rightarrow magasabb rátermettségi érték

d) Szerkezeti stabilitás:

- az egyes elágazási pontokból kiinduló ágakat számláljuk össze
- feltehető, hogy a túl sok ágat hordozó elágazási pontok instabilak
- több instabil elágazási pont \Rightarrow alacsonyabb rátermettségi érték

e) Elágazási pontok aránya:

- az egynél több ágat hordozó elágazási pontokat számoljuk össze
- egyenes arányban áll a struktúrában található ágak számával
- feltehető, hogy a gazdagon elágazó növények hatékonyabbak a fény begyűjtésében és a magok elterjesztésében

Finombeállítás súlyozással:

- a végső rátermettségi függvényben súlyokat használnak:

$$w_a , w_b , w_c , w_d , w_e$$

- a rátermetség az alábbi képlet segítségével számítható:

$$F(\text{fenotípus}) = \frac{aw_a + bw_b + cw_c + dw_d + ew_e}{w_a + w_b + w_c + w_d + w_e}$$

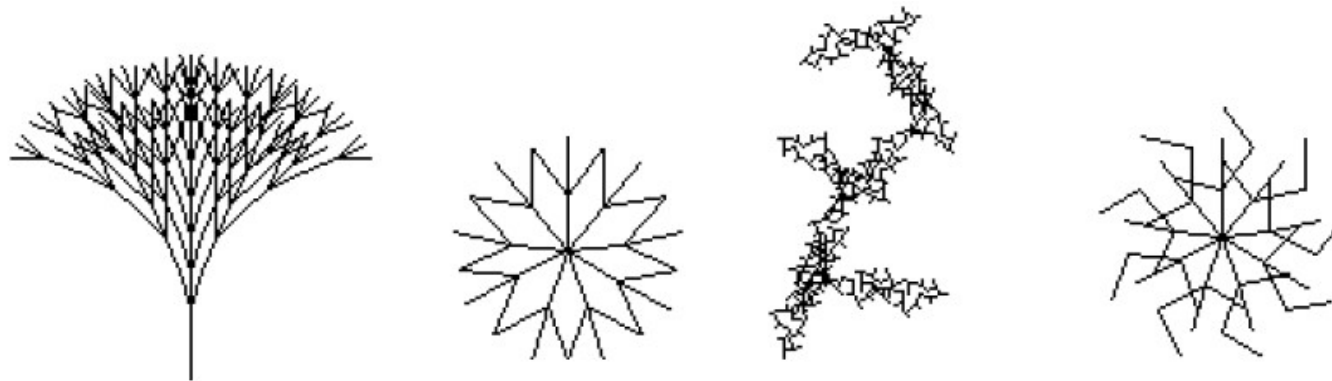
- a rátermettségi függvény közelebb visz a fenotipikus jellemzők automatikus szelekciójához, de az emberi közreműködést nem zárták ki teljesen:

⇒ a súlyok értékeit a felhasználó adja meg

Szimulációs eredmények:

- kiindulás egy véletlenszerűen generált populációból
- a genetikus algoritmus paramétereit:
 - Populáció mérete = 50
 - Generációk száma = 100
 - Generációs rés (lecserélt egyedek aránya) = 20%
 - Kromoszómahossz intervallum = 7 és 30 között

A rátermettségi függvény súlyozásának változtatása igen különböző növényyszerű struktúrákat eredményez:



$$w_a = 50, w_b = 50, w_c = 50, w_d = 50, w_e = 50$$



$$w_a = 100, w_b = 90, w_c = 40, w_d = 20, w_e = 30$$



Állati struktúrák, melyek a kétoldali szimmetriát részesítik előnyben

A modell értékelése:

- alkalmas összetett, kétdimenziós, elágazó struktúrák generálására, nehézkes felhasználói adatmegadások, tervezési erőfeszítések és az algoritmikus részletek ismerete nélkül
- a genotípus és a fenotípus élesen elkülönül, a genotípusból jól meghatározottan létrehozható a fenotípus
- a kódolás megfelelő a biológiailag motivált vizsgálatokhoz, az L-rendszerek megfelelő genetikus reprezentációt biztosítanak a természetes morfológiai evolúció szimulációjához
- az L-rendszerek zártak a definiált genetikus műveletekre
- a kis mutációs változások általában kis változásokat okoznak a fenotípusban
- a keresztezés után létrejött utódok fenotípusa a szülők fenotípusának egyfajta keverékét mutatja

A továbbfejlesztés iránya lehet a bonyolultabb L-rendszerek alkalmazása, például:

- genotípusok több helyettesítési szabállyal, környezetfüggő L-rendszerek, háromdimenziós alakzatok stb.