
Modelowanie i wizualizacja obiektów (i procesów) naturalnych

Co rozumiemy przez obiekty naturalne?

- ▶ Np. (Deussen et al. [Realistic modeling and rendering of plant ecosystems.](#))



Obiekty naturalne...

- ▶ łączą się często z dynamicznymi procesami naturalnymi



Obiekty naturalne: teren



Co staramy się modelować w sposób realistyczny?

To co widać

- Powierzchnię terenu, krajobraz
- Rośliny
- Powierzchnię wody
- Chmury
- Dym

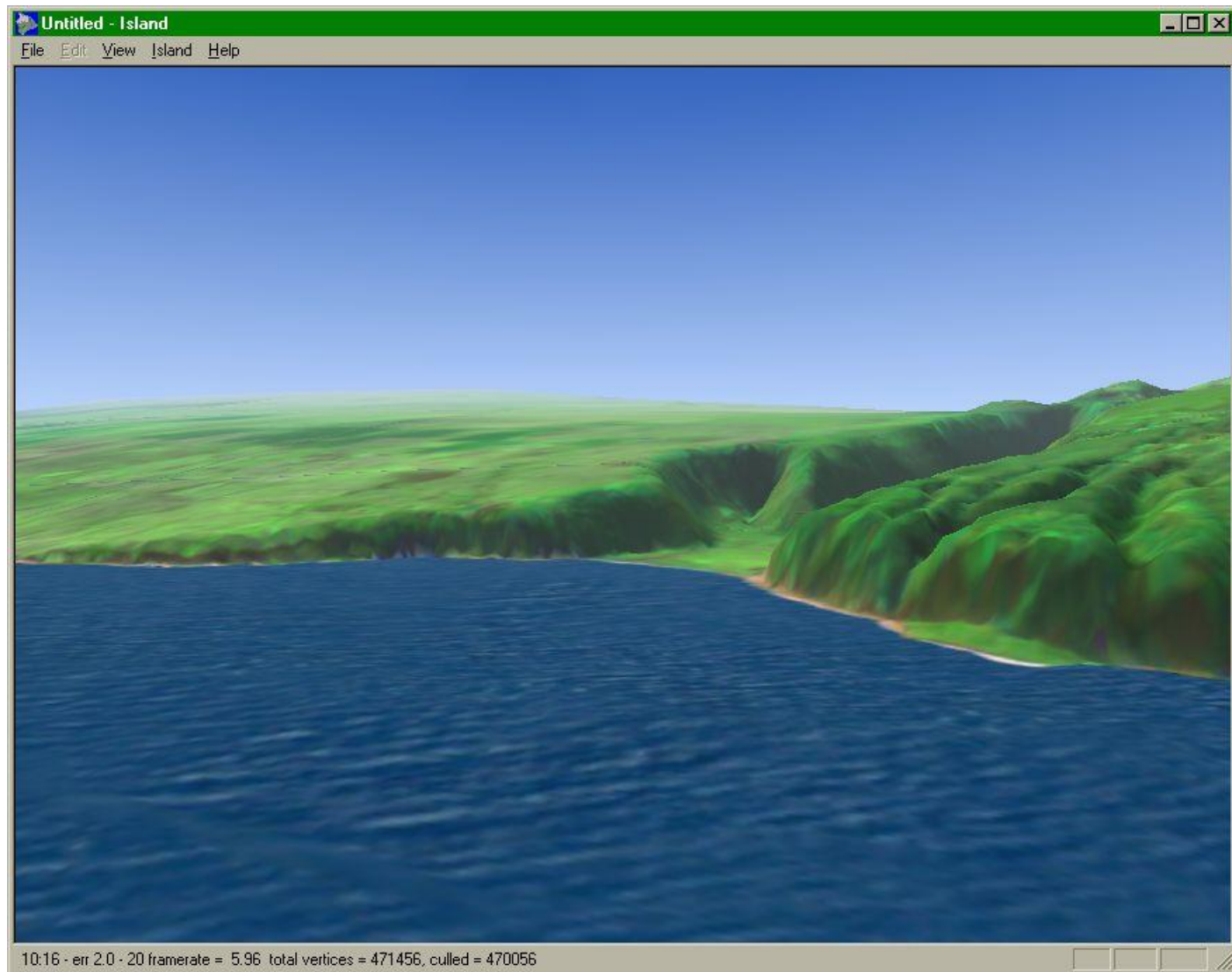


Modelowanie terenu

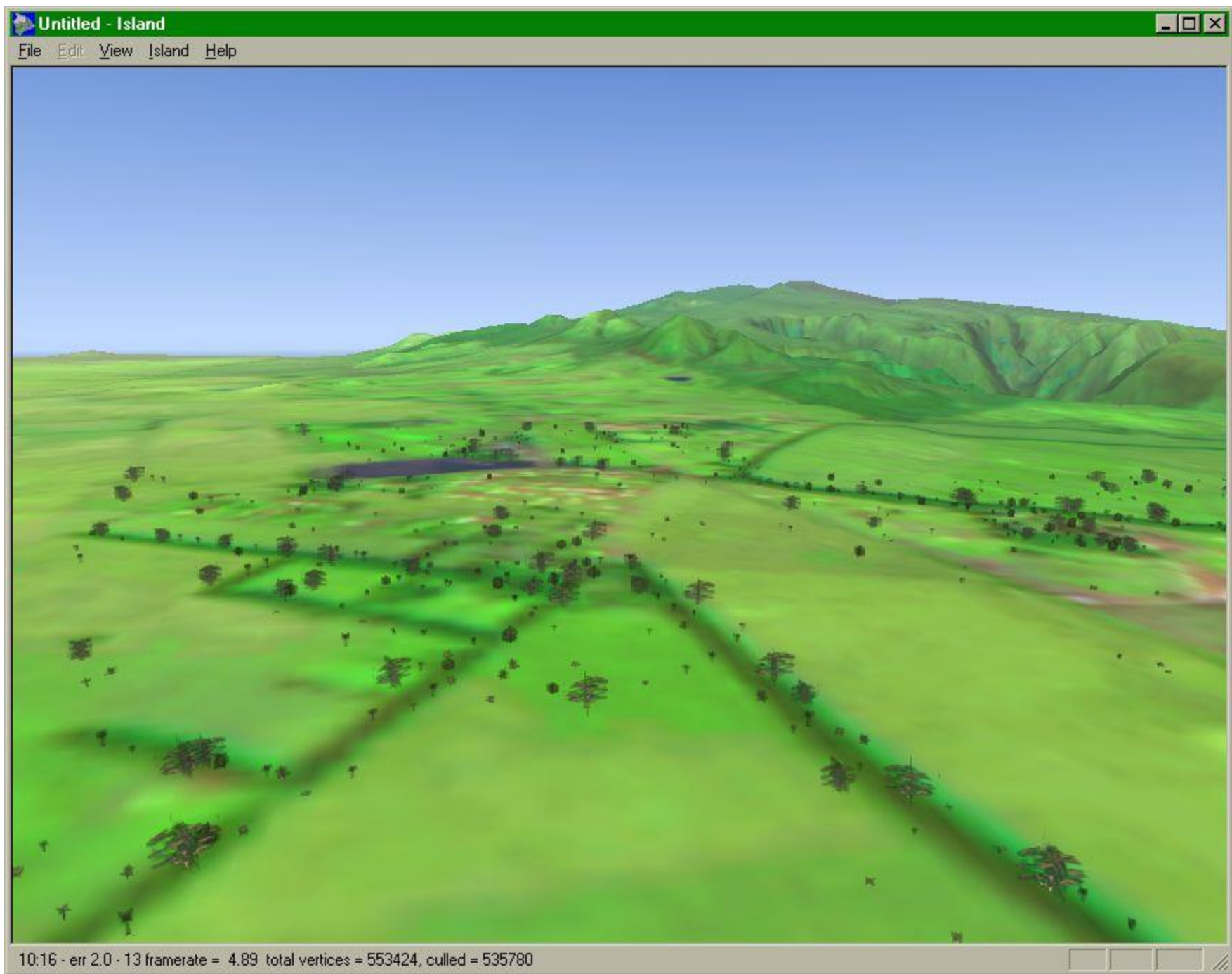


Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

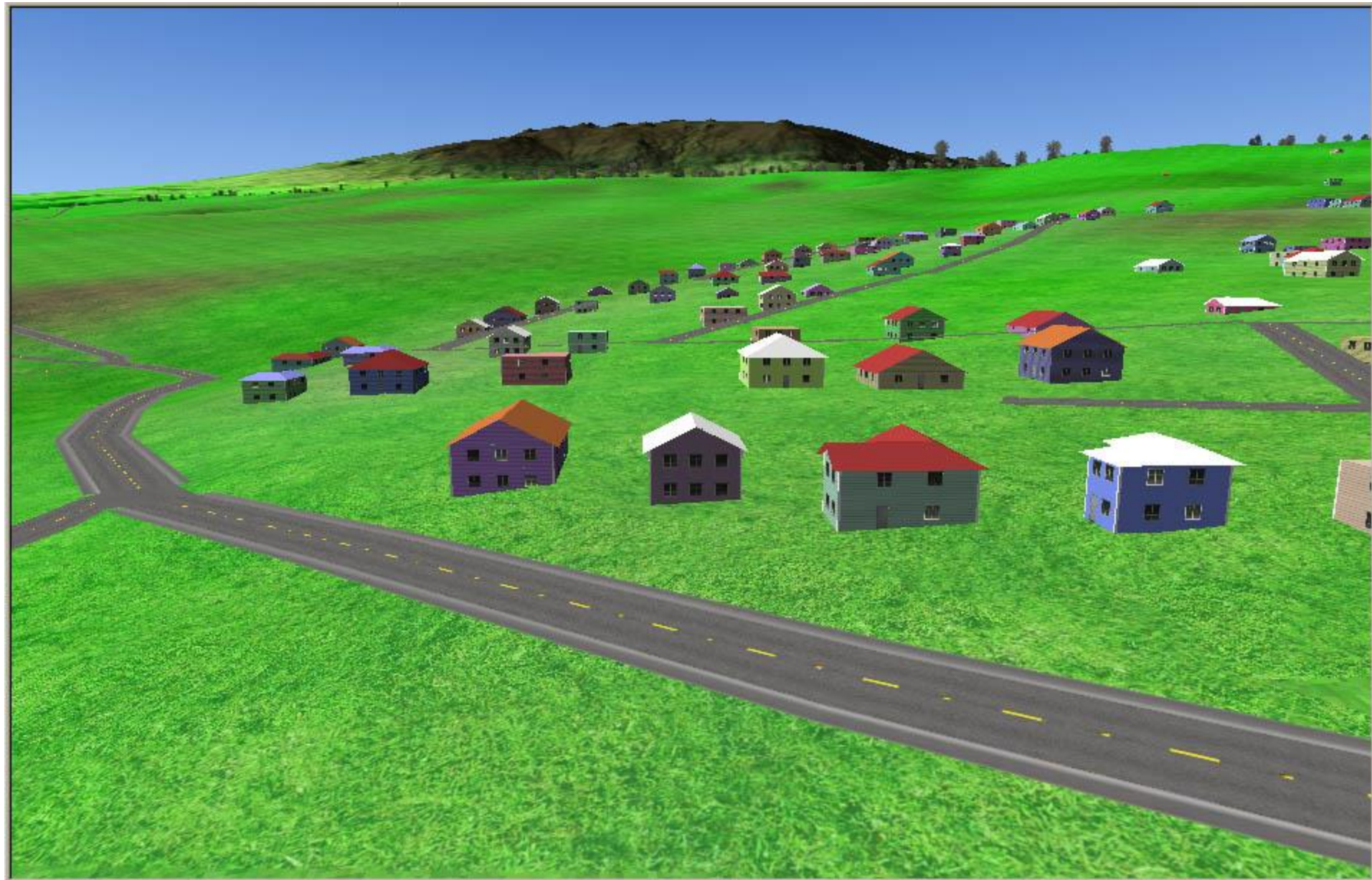
Stare przykłady z interesującej strony: www.vterrain.org



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych



procesow naturamych



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

Jak modelować skomplikowane obiekty naturalne?

- ▶ Powierzchnie parametryczne?
- ▶ Powierzchnie uwikłane?

- ▶ Trzeba znaleźć nowy sposób

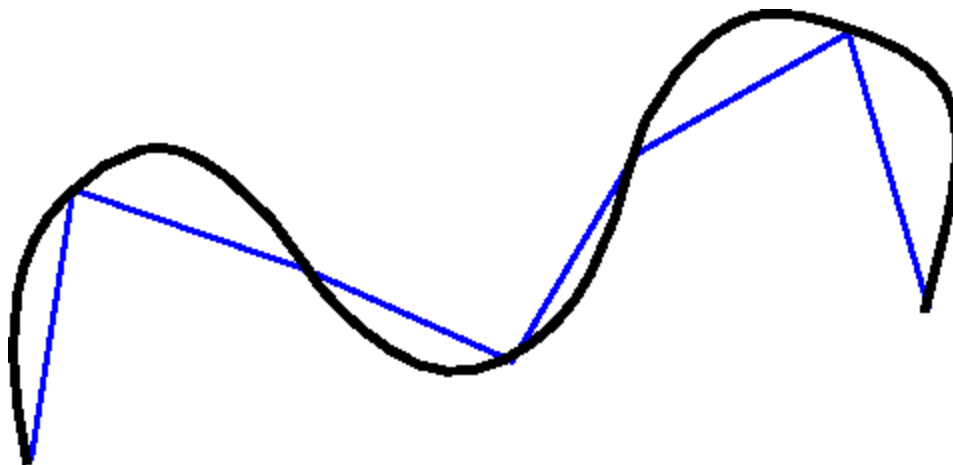
Fraktale... mają długą historię

- XVII w. Galileusz (anty - fraktale)
- przełom XIX i XX w. Koch, Sierpiński, ...
- Druga poł. XX w. - Benoit Mandelbrot

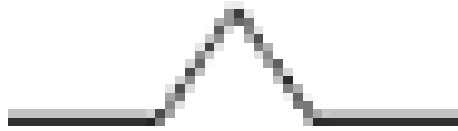


Pomiar długości

Pomiar długości
krzywej gładkiej

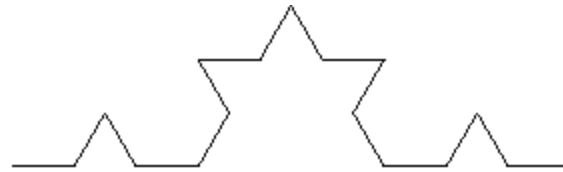


Konstrukcje matematyczne



krzywa Kocha

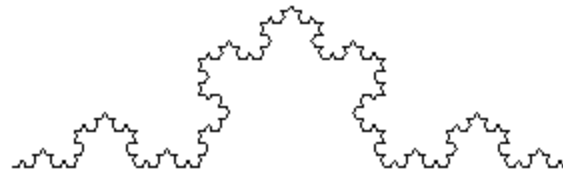
Gen. 2



Gen. 3

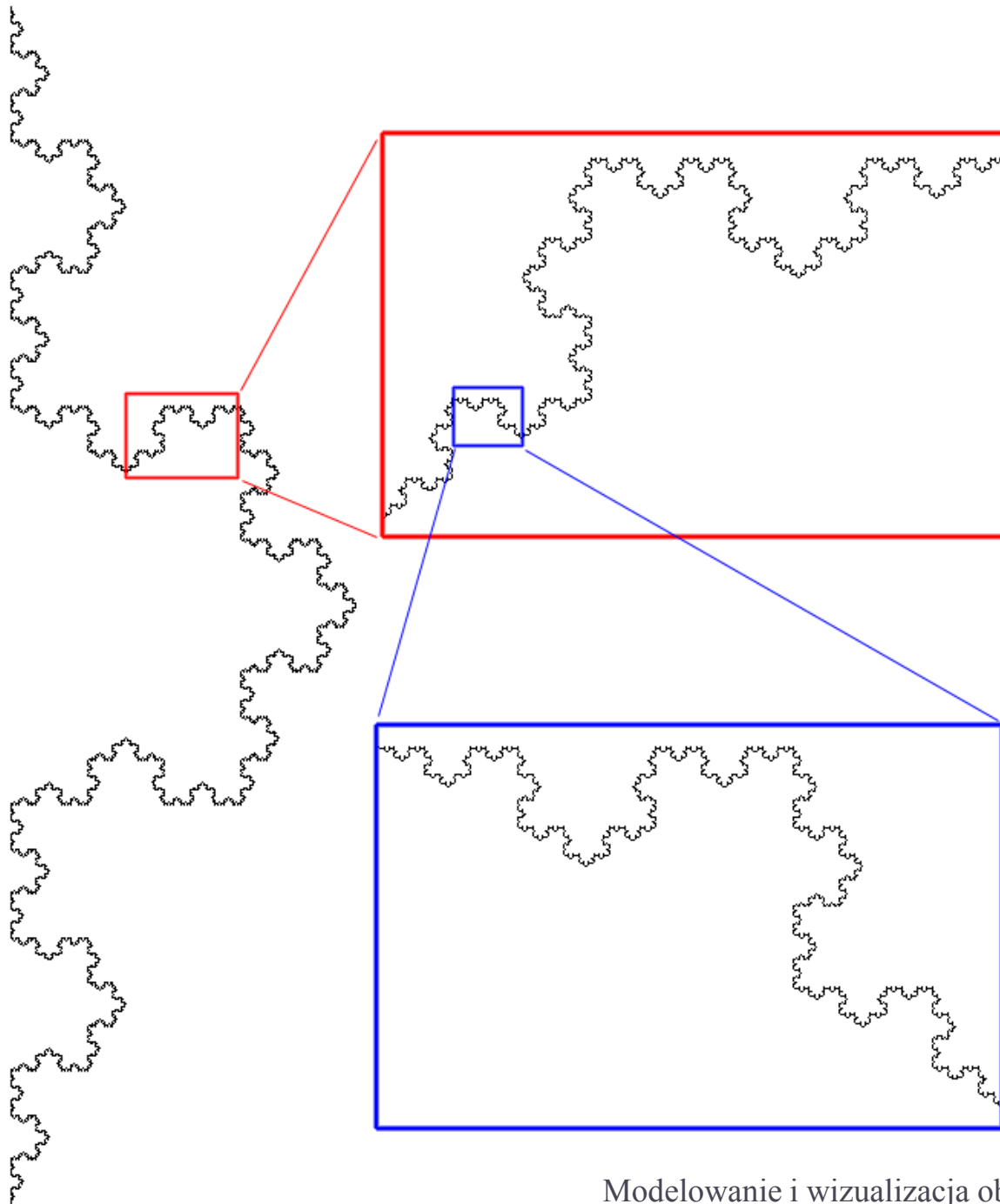


Gen. 4



Gen. 8

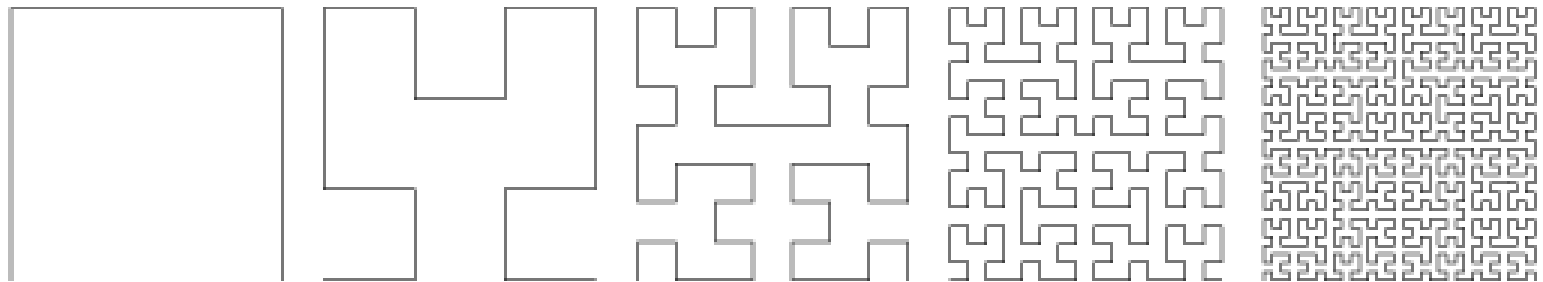




Samopodobieństwo fraktali

- dokładne – ciągnie się w nieskończoność
- Krzywa von Kocha jest tu dobrym przykładem

Konstrukcje matematyczne



krzywa Hilberta



Definicja fraktala

Nazwa *fraktal* pochodzi od łacińskiego przymiotnika *fractus*, a odpowiadający mu czasownik *frangere* znaczy “łamać”, “tworzyć nieregularne fragmenty”.

Mandelbrot definiuje fraktal, jako obiekt geometryczny posiadający cechę samopodobieństwa, którego wymiar nie jest liczbą całkowitą.



Wymiar fraktalny

Na przykładzie krzywej Kocha

$$-\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.26$$



Fraktale w przyrodzie

Benoit Mandelbrot, w opublikowanej w 1975 roku książce:

“*The Fractal Geometry of Nature*”, stwierdził:

“Ani chmury nie są kulami, góry – stożkami,
linia brzegowa kołem, kora nie jest płaska,
ani też błyskawica nie mknie po linii prostej”.

Wprowadził też w niej do szerokiego obiegu pojęcie *fraktala*, określając nim charakterystyczne własności nieregularnych brył i figur, które wyglądają podobnie lub wręcz tak samo we wszystkich skalach.

Pomiar długości, c.d.

B. Mandelbrot: How long is the coast of Britain?
Science, 155:636-638, 1967



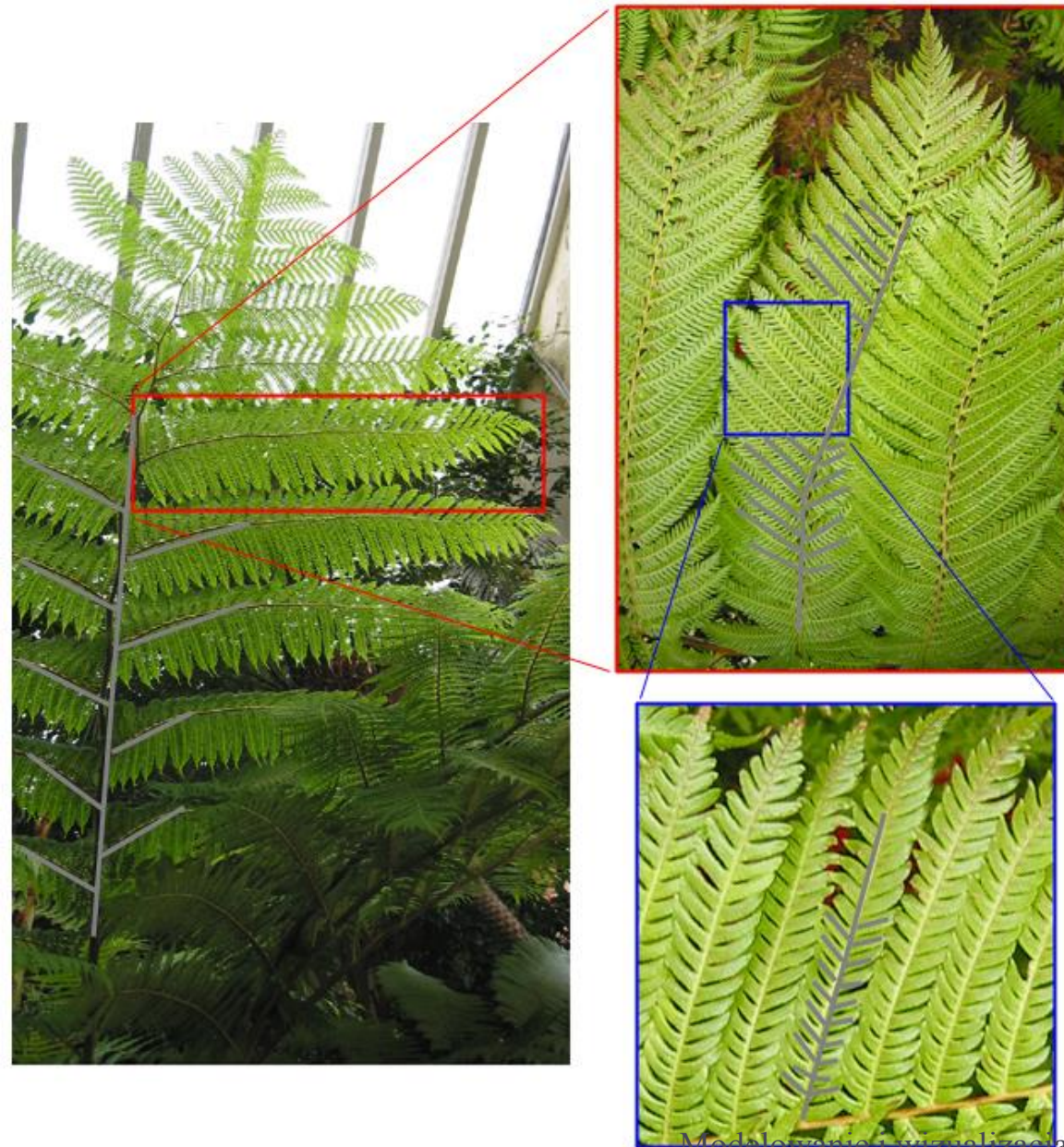


Example of the coastline paradox. If the coastline of [Great Britain](#) is measured using units 100 km (62 mi) long, then the length of the coastline is approximately 2,800 km (1,700 mi). With 50 km (31 mi) units, the total length is approximately 3,400 km (2,100 mi), approximately 600 km (370 mi) longer. (Wikipedia)



Samopodobieństwo w przyrodzie

- Ma oczywiście charakter przybliżony
- Pojawia się w kilku zaledwie skalach (trzech w przypadku paproci)
- Samopodobieństwo u roślin jest efektem ich procesu wzrostu, w którym pewne struktury regularnie się powtarzają.
(Mandelbrot, 1982)



Fractal food



<http://www.fourmilab.ch/images/Romanesco/>





Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych



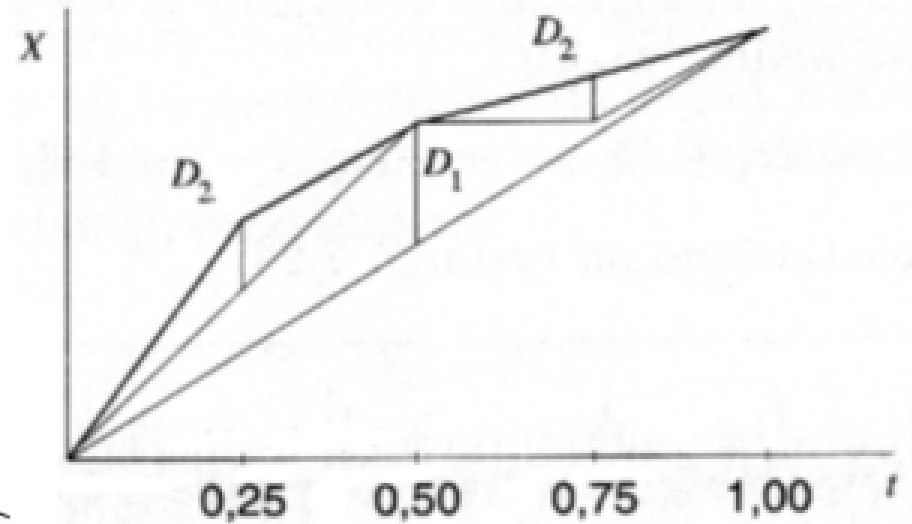
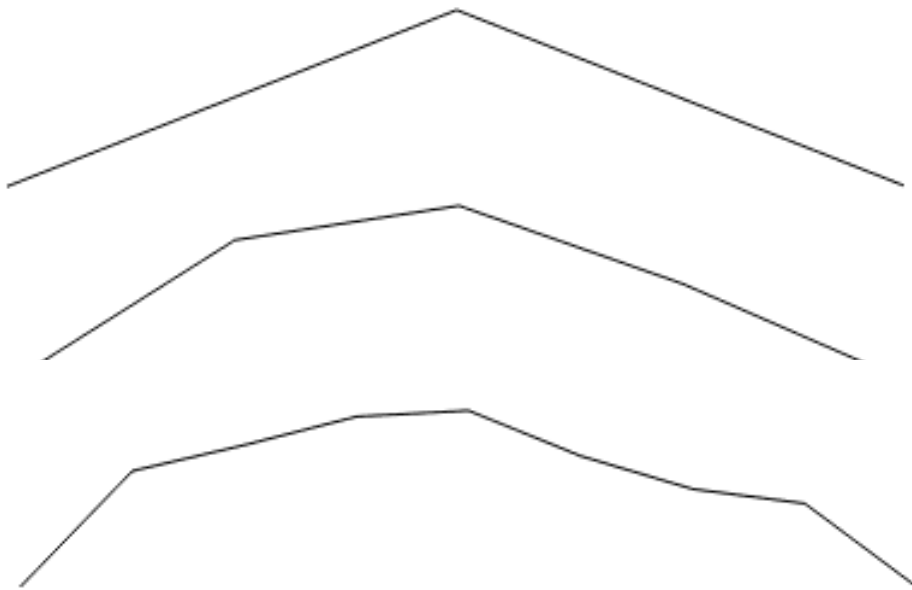


Fraktalne krajobrazy

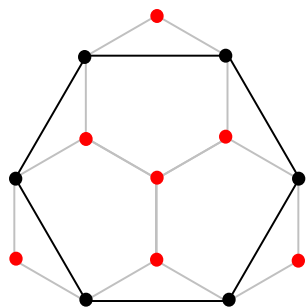
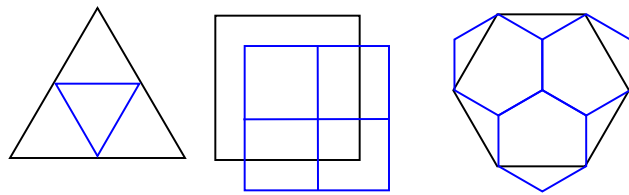
Nawiązujemy do losowych ruchów Browna



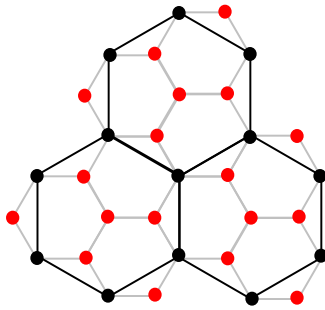
Fraktalne krajobrazy: algorytm losowego przemieszczania odcinka



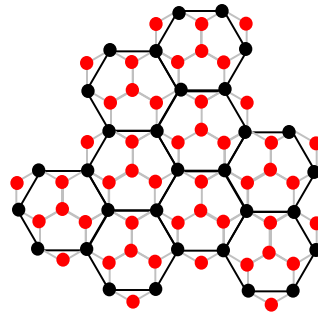
Fraktalne krajobrazy: siatka 2D



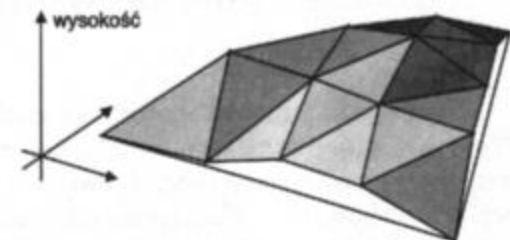
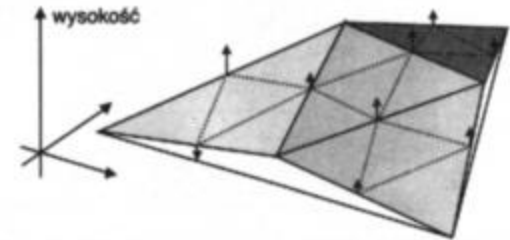
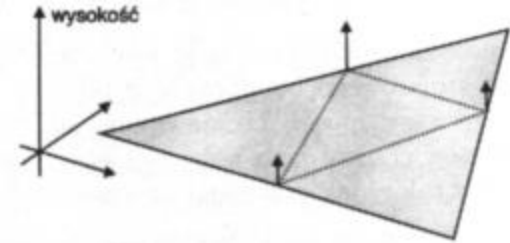
Krok I



Krok II

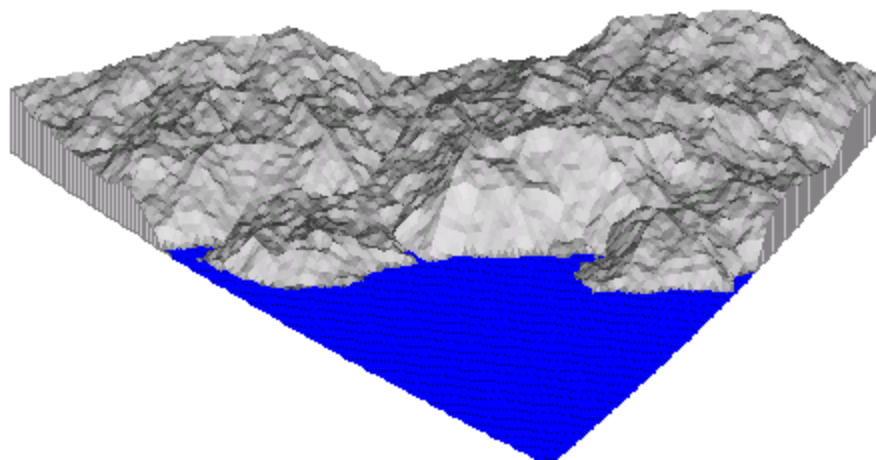
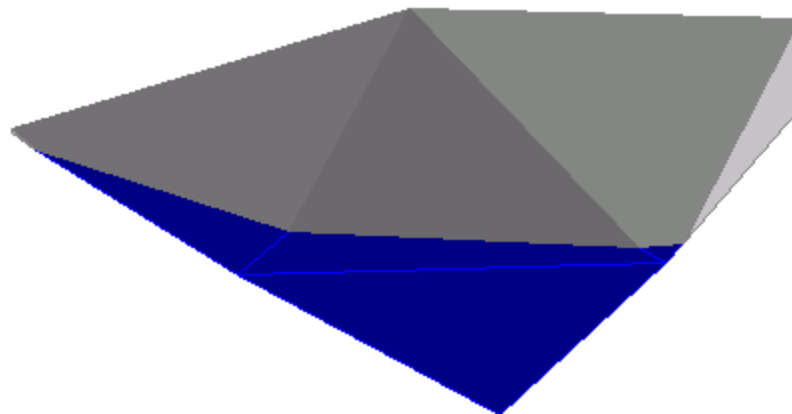


Krok III



Fraktalne krajobrazy (przykłady historyczne)

Fractal Landscapes 3.0



Do czego mniej więcej dążymy?



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

Jeden z ciągle rozwijanych programów

► Terragen, bieżąca wersja 3.1.020



Jak generować teren w Blenderze?

- ▶ Użyć dodatku (add-on) ANT landscape
- ▶ Użyć dodatku (add-on) Bsurfaces
- ▶ Użyć zewnętrznej mapy wysokości wczytanej jako obraz do modyfikatora przesunięć (displace modifier)



Generowanie i edycja terenu w WebGL

- ▶ http://callumprentice.github.io/apps/webgl_terrain/
- ▶ <http://www.webgl.com/2012/03/webgl-demo-terrain-generation-diamond-square-algorithm-and-three-js/>
- ▶ <http://codeflow.org/entries/2011/nov/10/webgl-gpu-landscaping-and-erosion/#demo>



Odwzorowanie afiniczne (na podst. J. Kudrewicza: Fraktale i chaos)

$$x' = ax + by + c$$

$$y' = dx + ey + f$$

Dowolna figura geometryczna poddana przekształceniu afinicznemu zostaje:

- ☐ przesunięta,
- ☐ rozciągnięta lub ściśnięta w pewnym kierunku,
- ☐ powiększona lub zmniejszona,
- ☐ obrócona o pewien kąt,
- ☐ lustrzanie odbita względem pewnej osi (tylko dla $ae - bd < 0$).

Wszystkie te przekształcenia geometryczne zależą od sześciu parametrów: a, b, c, d, e, f .



Odwzorowanie zwężające

Odwzorowanie afiniczne nazywamy *zwężającym*, jeśli każdy odcinek po przekształceniu jest krótszy niż przed przekształceniem.



Przykłady roślinne: choinka

| Odwzorowanie | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pierwsze | -0,67 | -0,02 | 0 | -0,18 | 0,81 | 10,0 |
| Drugie | 0,4 | 0,4 | 0 | -0,1 | 0,4 | 0 |
| Trzecie | -0,4 | -0,4 | 0 | -0,1 | 0,4 | 0 |
| Czwarte | -0,1 | 0 | 0 | 0,44 | 0,44 | -2 |

Tworzymy ciąg punktów $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), \dots$

Punkt (x_0, y_0) jest dowolnym punktem płaszczyzny.

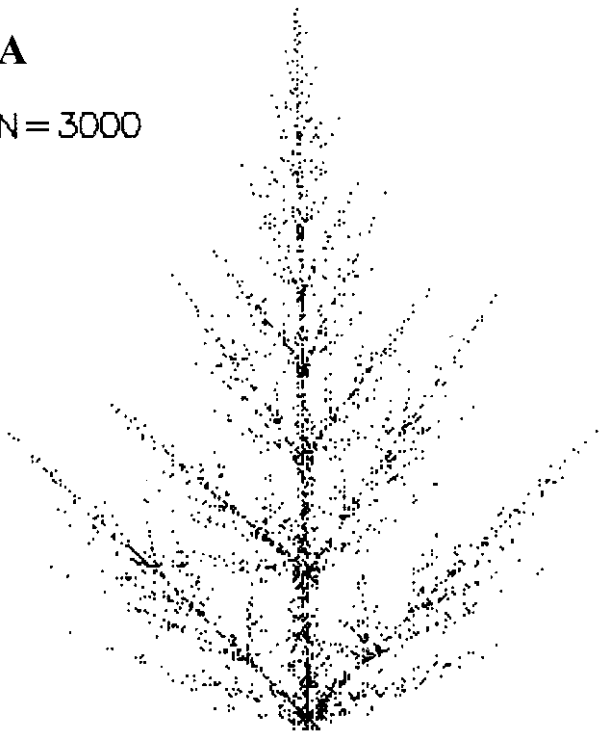
Losujemy jedno z czterech odwzorowań i według niego ustalamy punkt (x_1, y_1) jako obraz punktu (x_0, y_0) .

W ten sam sposób tworzymy następne wyrazy ciągu

Przykłady roślinne: choinka

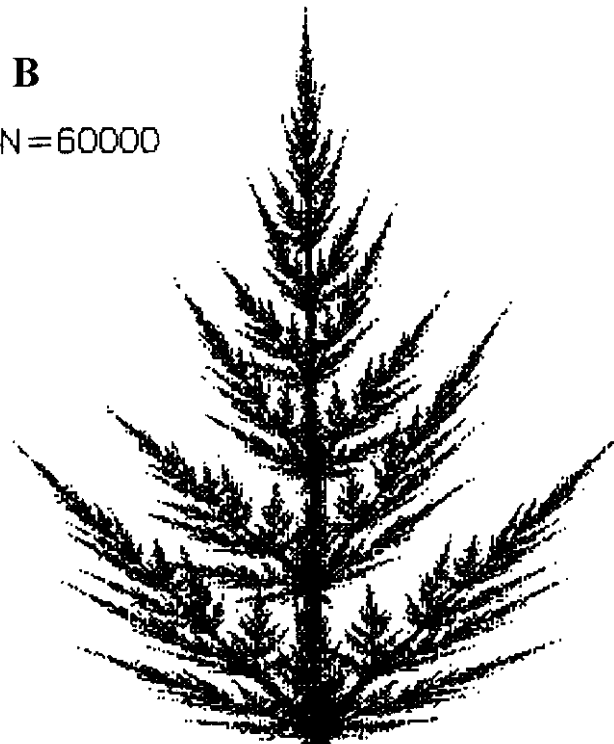
A

$N = 3000$



B

$N = 60000$



Pęczek bazi

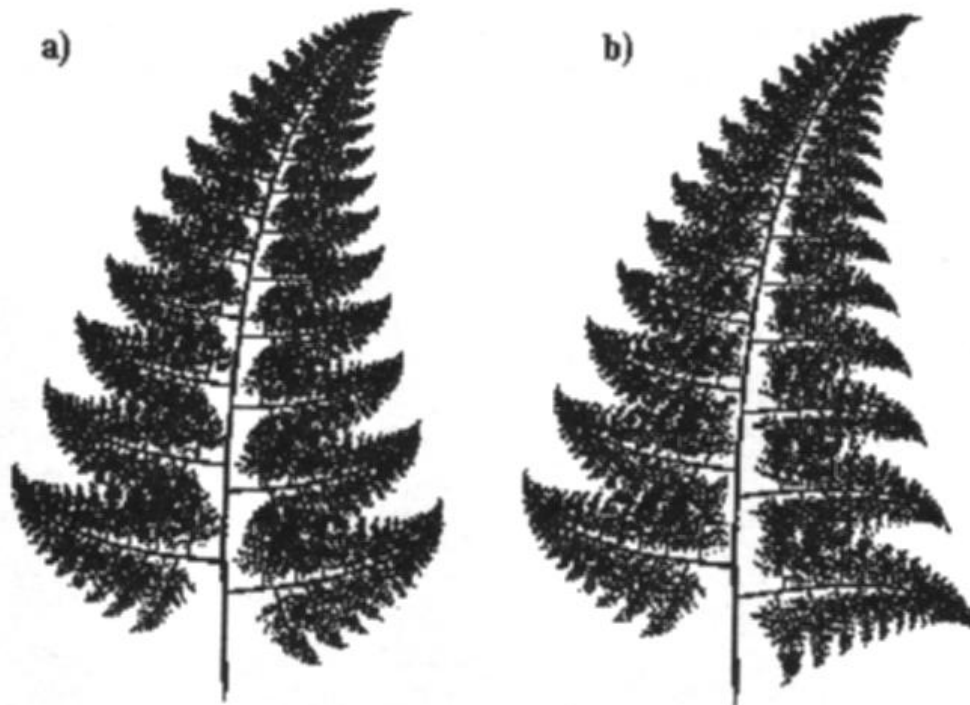
$$\begin{array}{ll} x' = 0,80x - 0,25y + 0,05 & x' = 0,80x + 0,25y - 0,05 \\ y' = 0,68x + 0,80y + 0,12 & y' = -0,68x + 0,80y + 0,12 \end{array}$$

Przekształcenia losowane z prawdopodobieństwami

$$p_1 = p_2 = 0,5.$$



Paproć Barnsley'a



a) zastosowano odbicie zwierciadlane; b) bez odbicia



Elementy L-systemów



Wprowadzenie

Proces wzrostu w świecie ożywionym może być przedstawiony w postaci struktur fraktalnych. Przykładami niech będą: rośliny, kanały w płucach, naczynia krwionośne.

W trakcie wzrostu pojawiają się różnego rodzaju podobieństwa, ponieważ wzrastanie jest związane z powtarzaniem się pewnego prostego procesu.

Taki proces może być przedstawiony z wystarczającą dokładnością jako zbiór reguł przetwarzania.



Systemy Lindenmayera

Systemy Lindenmayera, albo L-systemy są typem symbolicznych systemów dynamicznych z dodaną interpretacją geometrycznej ewolucji systemu.

Zostały wprowadzone przez Aristida Lindenmayera w roku 1968 i zastosowane do modelowania biologicznego wzrostu.



Podstawowe pojęcia

Alfabet:

Alfabet jest skończonym zbiorem V formalnych symboli. Np.
 $V = \{a, b, c\}$.

Aksjomaty:

Aksjomat, zwany też *inicjatorem* jest łańcuchem symboli ze zbioru V .

Produkcja:

Przypisuje symbolowi alfabetu łańcuch.



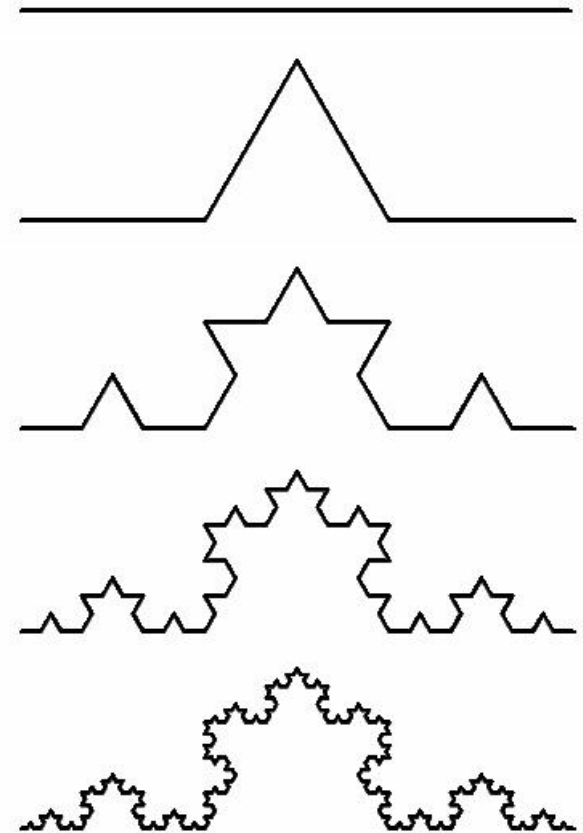
Wprowadzenie

- L-systemy (systemy Lindenmayera)
- Opracowane w 1968 roku przez duńskiego biologa Aristida Lindenmayera
- Umożliwiają symulowanie wzrostu prostych wielokomórkowych organizmów
- Stanowią swego rodzaju matematyczną teorię wzrostu roślin



Zasada działania

- Definiowanie złożonych obiektów poprzez sukcesywne podmienianie (nadpisywanie) części prostych wcześniej zdefiniowanych obiektów przy użyciu określonego zbioru reguł
- Klasycznym przykładem takiego postępowania jest *krawędź płatka śniegu* (von Koch 1905)



Gramatyki

- Gramatyką G nazywamy czwórkę uporządkowaną $G = \langle N, T, P, Z \rangle$ gdzie:
 - N – zbiór symboli nieterminalnych,
 - T – zbiór symboli terminalnych,
 - P – zbiór produkcji, z których każda ma postać $\alpha \rightarrow \beta$
 - $Z \in N$ – wyróżniony symbol początkowy (nieterminal)
- przy czym:
 - $P \subseteq (N \cup T)^+ \times (N \cup T)^*$
 - $P = \{ \alpha \rightarrow \beta \mid \alpha \in (N \cup T)^+, \beta \in (N \cup T)^* \}$

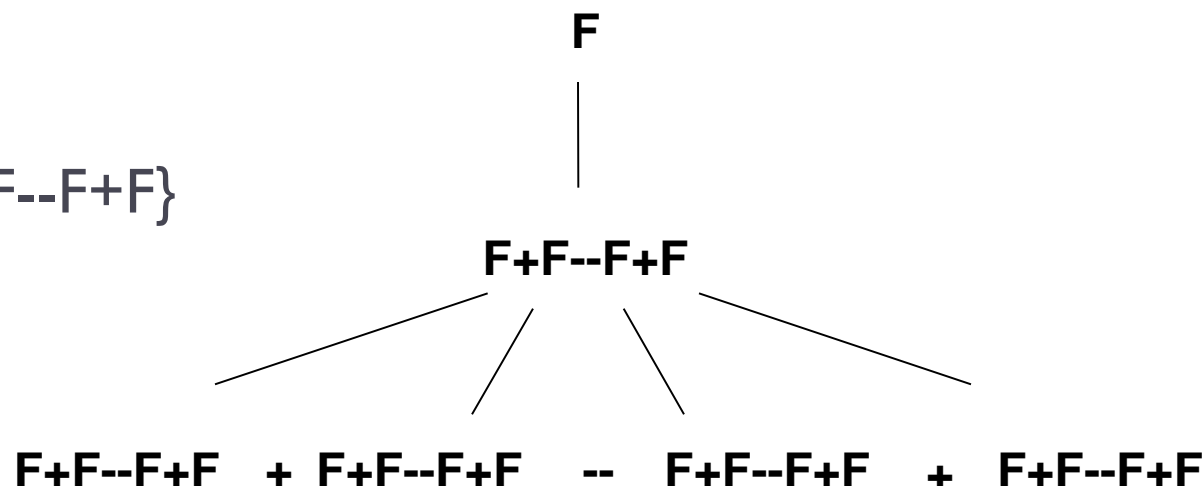


Gramatyki a L-systemy

- W L-systemach w odróżnieniu od gramatyk Chomsky'ego produkcje stosujemy równolegle.

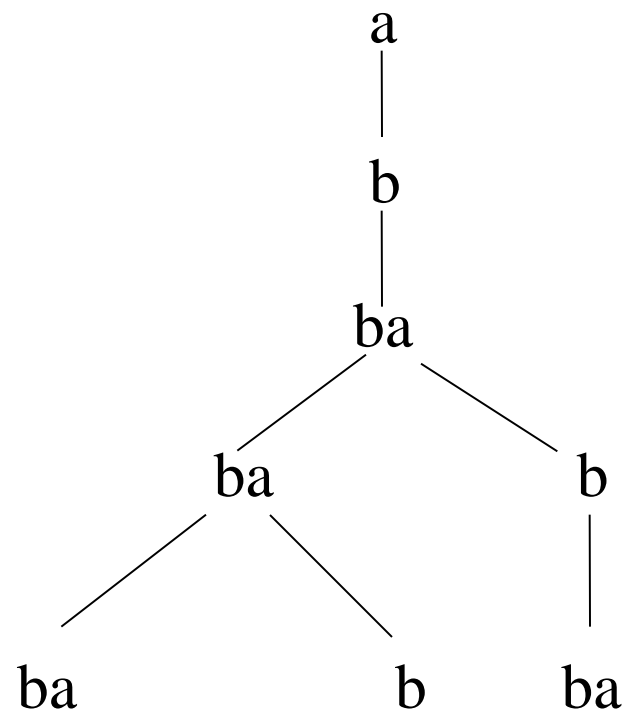
- Przykład:

- $N = \{F\}$
- $T = \{+, -\}$
- $P = \{F \rightarrow F+F--F+F\}$
- $Z = F$



Rodzaje L-systemów

- L-Systemy deterministyczne i bezkontekstowe (*DOL-systems*)
- Przykład *L-system Fibonacci'ego*
 - $N = \{a, b\}$
 - $P = \{p_1, p_2\}$
 - $p_1: a \rightarrow b$
 - $p_2: b \rightarrow ba$
 - $Z = a$



DOL-systems cd.

- ▶ Ilość znaków w kolejno wygenerowanych słowach odpowiada kolejnym liczbom ciągu Fibonacciego
 - ▶ $F_0 = F_1 = 1$;
 - ▶ $F_{n+2} = F_{n+1} + F_n$ dla $n \geq 0$
- ▶ który jak wiemy ma liczne odpowiedniki w zjawiskach przyrody, np. w biologii, w botanice.

| | |
|-------|-------------------------|
| $g0:$ | a |
| $g1:$ | b |
| $g2:$ | ba |
| $g3:$ | bab |
| $g4:$ | $babba$ |
| $g5:$ | $babbabab$ |
| $g6:$ | $babbababbabba$ |
| $g7:$ | $babbababbabbababbabab$ |

Liczby Fibonacciego w przyrodzie

- ▶ Kwiaty wielu roślin podlegają liczbom Fibonacciego:
 - ▶ Lilie mają trzy płatki,
 - ▶ Jaskry pięć,
 - ▶ Wiele ostróżek osiem,
 - ▶ Nagietki trzynaście,
 - ▶ Astry dwadzieścia jeden,
 - ▶ Stokrotki trzydzieści cztery, pięćdziesiąt pięć lub osiemdziesiąt dziewięć.
- ▶ Bardzo dobrym przykładem jest słonecznik
 - ▶ Jego pestki ułożone są wzdłuż logarytmicznych krzywych biegnących grupami w różnych kierunkach
 - ▶ Liczba krzywych w każdej grupie jest liczbą Fibonacciego, zaś liczba grup również należy do ciągu Fibonacciego



L-systemy stochastyczne

- ▶ Każdemu symbolowi może być przyporządkowana więcej niż jedna produkcja, przy czym każda z nich ma określone prawdopodobieństwo z jakim może być zastosowana.
- ▶ Przykład:
 - ▶ $N = \{F\}$
 - ▶ $T = \{+, -, [,]\}$
 - ▶ $P = \{p_1, p_2, p_3\}$
 - ▶ $p_1: F \rightarrow (0,33) F[+F]F[-F]F$
 - ▶ $p_2: F \rightarrow (0,33) F[+F]F$
 - ▶ $p_3: F \rightarrow (0,33) F[-F]F$
 - ▶ $Z = F$

L-systemy kontekstowe

- ▶ Produkcja jest stosowana wyłącznie wtedy gdy zgadza się również kontekst (lewy, prawy, bądź oba)
- ▶ Przykładowa produkcja:
 - ▶ $p: a < b > c \rightarrow a$
 - ▶ b może być zamienione na a wtedy i tylko wtedy gdy, poprzedza je a, zaś po nim następuje c
- ▶ Przykład:
 - ▶ $N = \{a, b\}$
 - ▶ $P = \{p_1, p_2\}$
 - ▶ $p_1: b < a \rightarrow b$
 - ▶ $p_2: b \rightarrow a$
 - ▶ $Z = a$

baaaaaa

abaaaaa

aabaaaa

aaabaaa

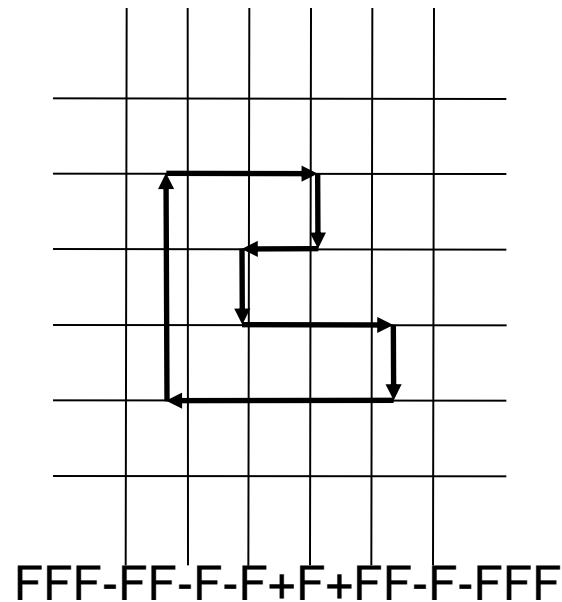
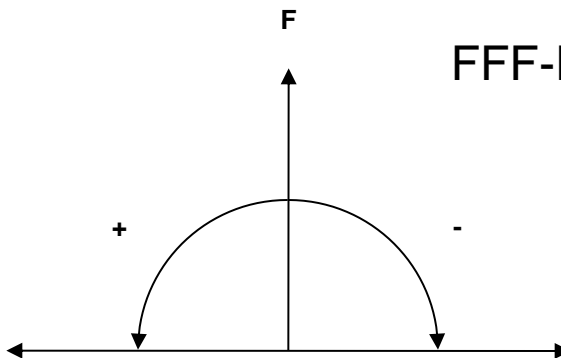
aaaabaa

L-systemy parametryczne

- ▶ Z symbolami skojarzone są pewne (jeden lub więcej) parametry.
- ▶ Produkcje stosowane są tylko wtedy gdy zgadza się liczba parametrów i określone warunki są spełnione.
- ▶ Przykładowa produkcja:
 - ▶ $p:A(t): t > 5 \rightarrow B(t+1)CD(t*0.5, t-2)$
 - ▶ A posiadający jeden parametr jest zamieniany na ciąg $B(t+1)CD(t*0.5, t-2)$ wtedy i tylko wtedy gdy wartość parametru t jest większa od 5.
- ▶ Przykładowo:
 - ▶ $A(6)$ zostanie zastąpiony przez $B(7)CD(3,4)$

Żółw w 2D

- ▶ **F** – krok do przodu
- ▶ **f** – krok do przodu bez rysowania
- ▶ **+** – skręt w lewo
- ▶ **-** – skręt w prawo



Krzywa Kocha

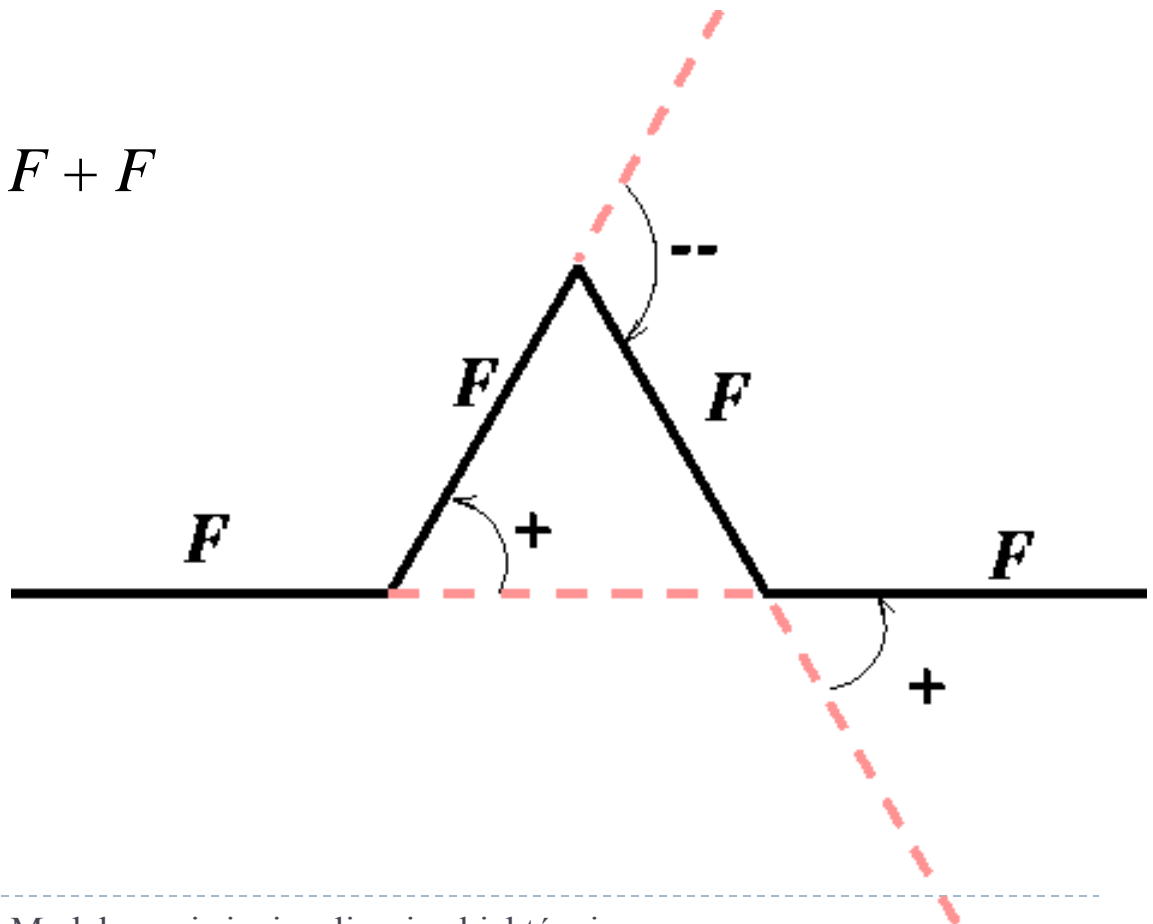
$$N = \{F\}$$

$$T = \{+, -\}$$

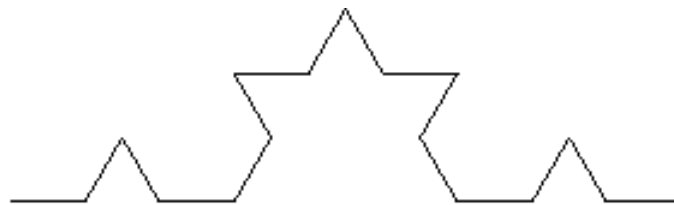
$$P = \{p\}$$

$$p: F \rightarrow F + F - - F + F$$

$$Z = F$$



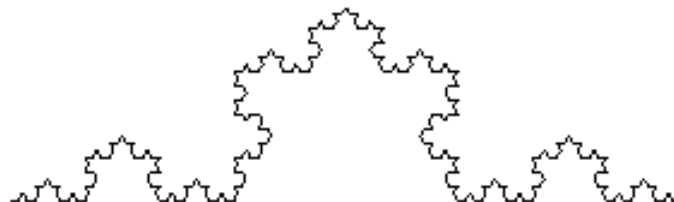
Gen. 2



Gen. 3



Gen. 4



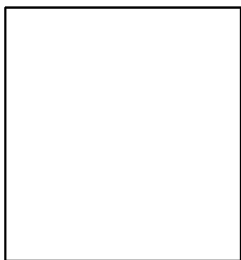
Gen. 8



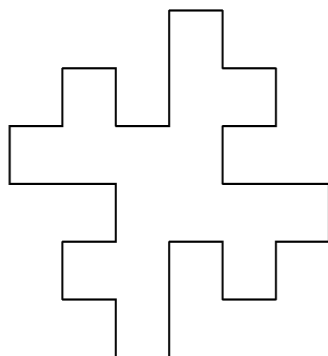
Kwadratowa wyspa Kocha

Z: $F + F + F + F$

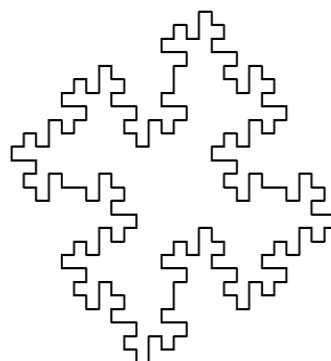
P1: $F \rightarrow F - F + F + FF - F - F + F$



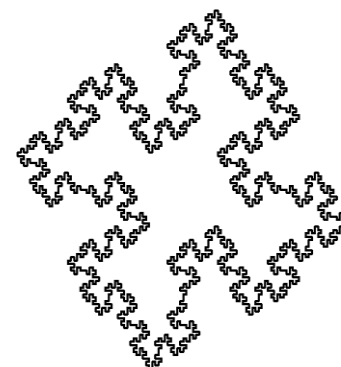
n=0



n=1



n=2



n=3



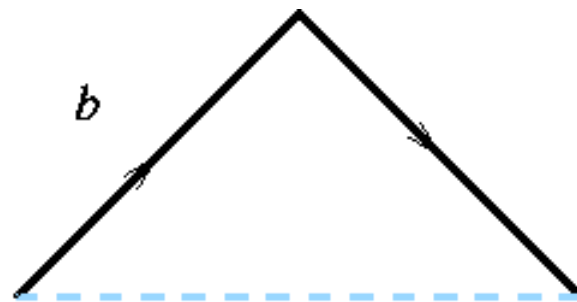
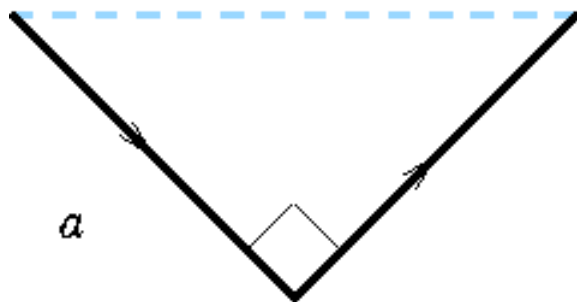
Krzywa smoka

$$V = \{a, b\}$$

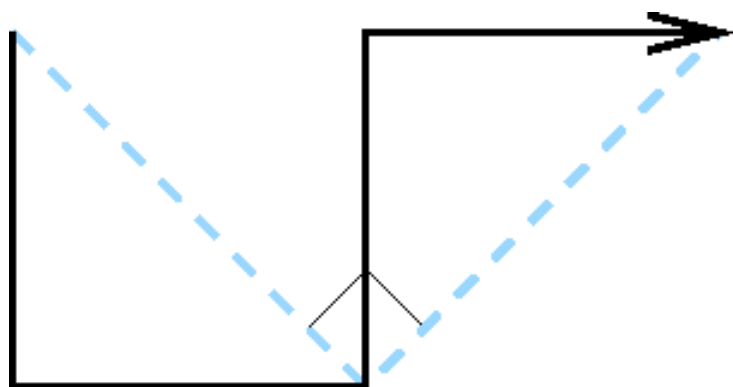
$$\omega = a$$

$$p_1 : a \longrightarrow ab$$

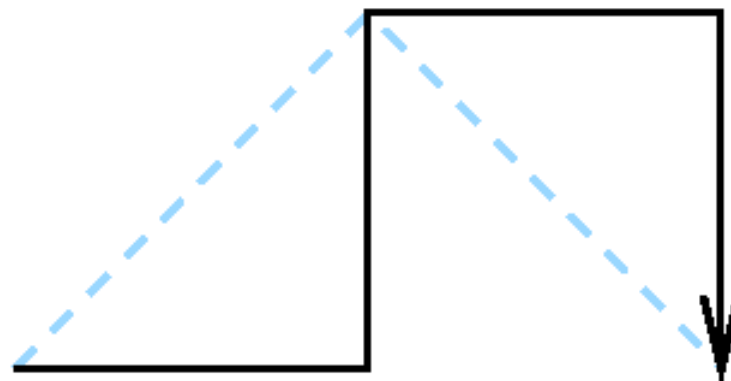
$$p_2 : b \longrightarrow ab$$



Krzywa smoka, c.d.



$a \longrightarrow ab$



$b \longrightarrow ab$



Gen. 1



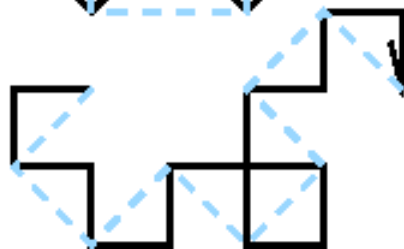
Gen. 2

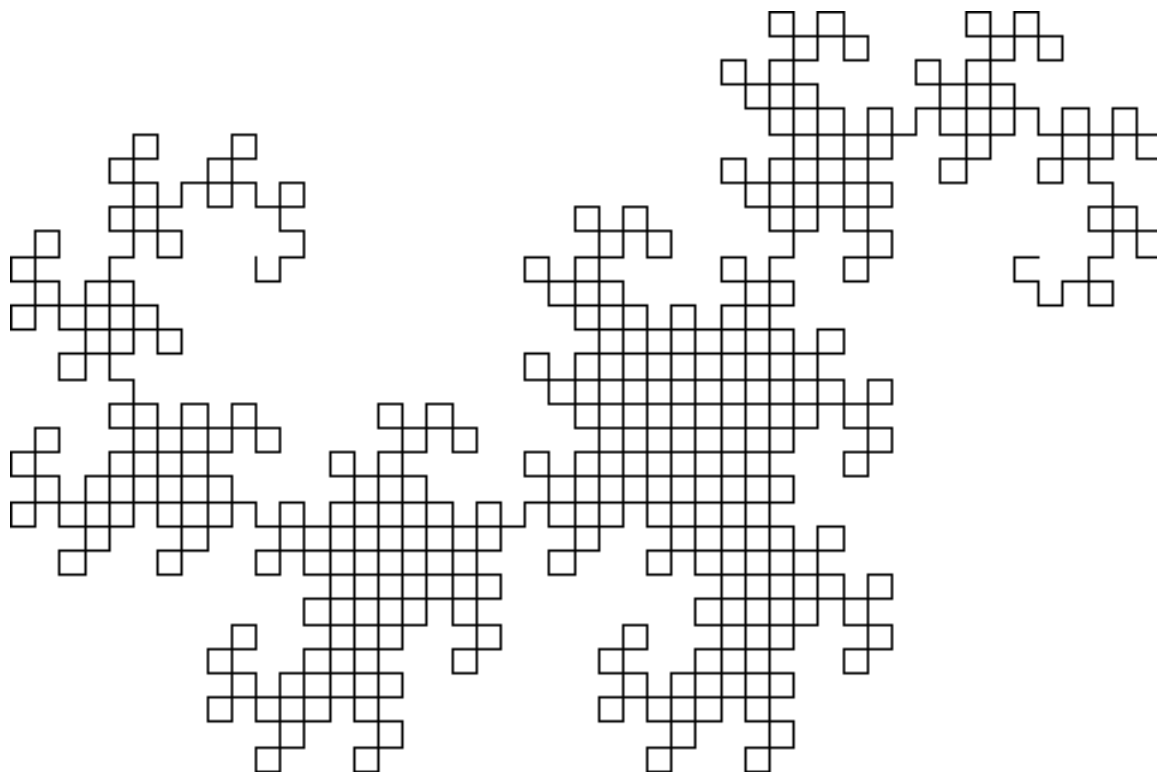


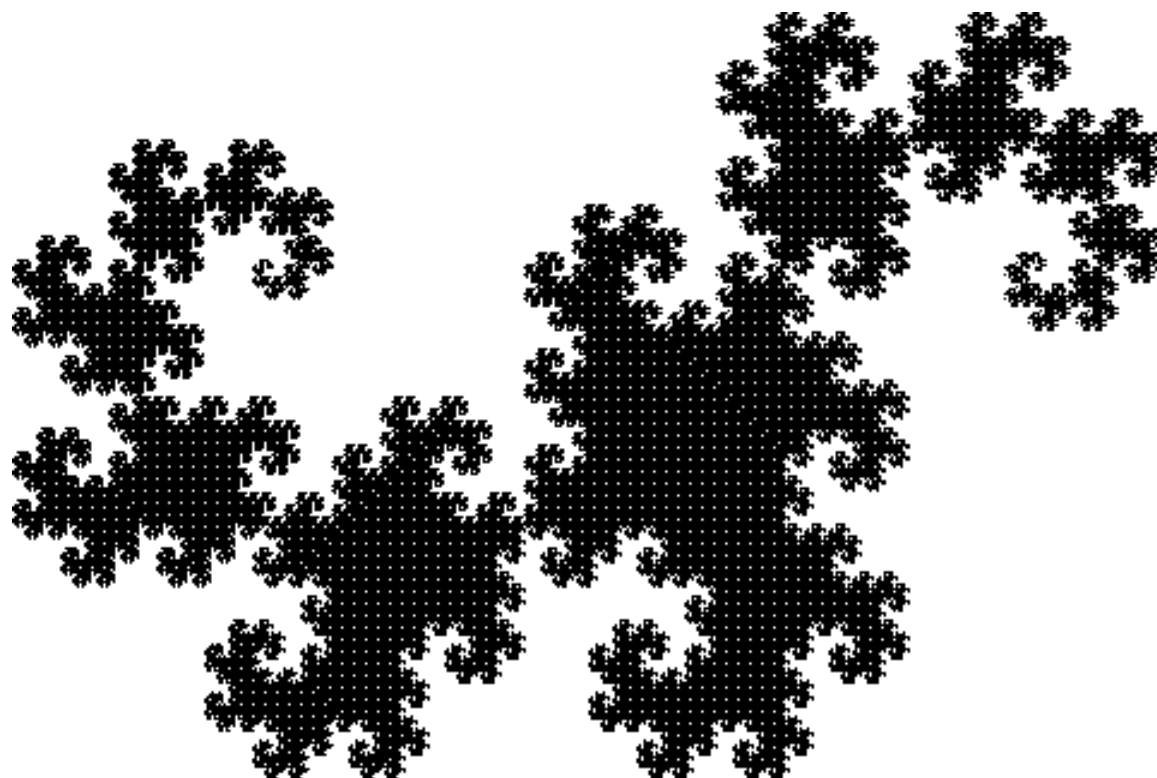
Gen. 3



Gen. 4

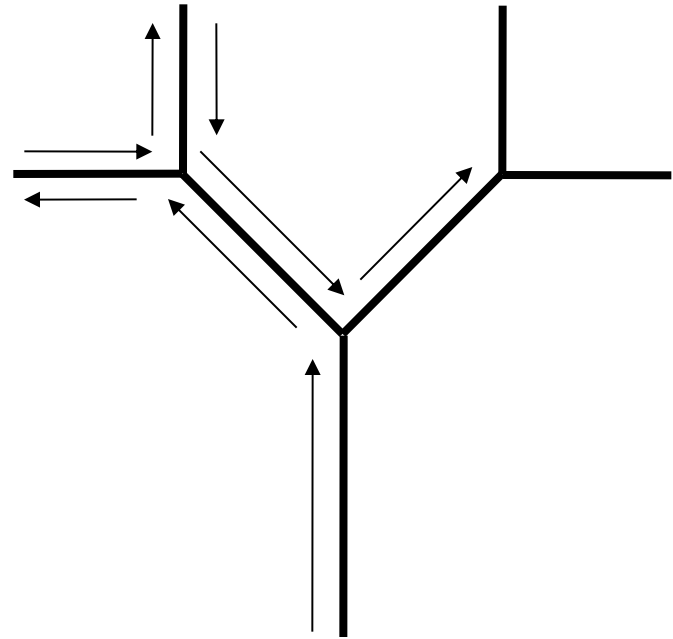






Gałęzie

- ▶ Dwa nowe symbole:
 - ▶ [- zapisz aktualny stan żółwia na stosie. położenie i orientacja żółwia, oraz inne możliwe parametry, takie jak kolor lub grubość aktualnie rysowanych linii.
 - ▶] - Zdejmij stan żółwia ze stosu. Stan zdjęty ze stosu staje się stanem aktualnym. Nie rysowana jest żadna linia, choć pozycja żółwia się zmienia.



$F+F+F----f+F----f+...$

VS.

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

$$N = \{F\}$$

$$T = \{+\}$$

$$Z = F$$

$$p: F \rightarrow F[+F]F$$

$+$ = obrót o $360^\circ / 10$



Gen. 1



Gen. 2



Gen. 3



Gen. 8



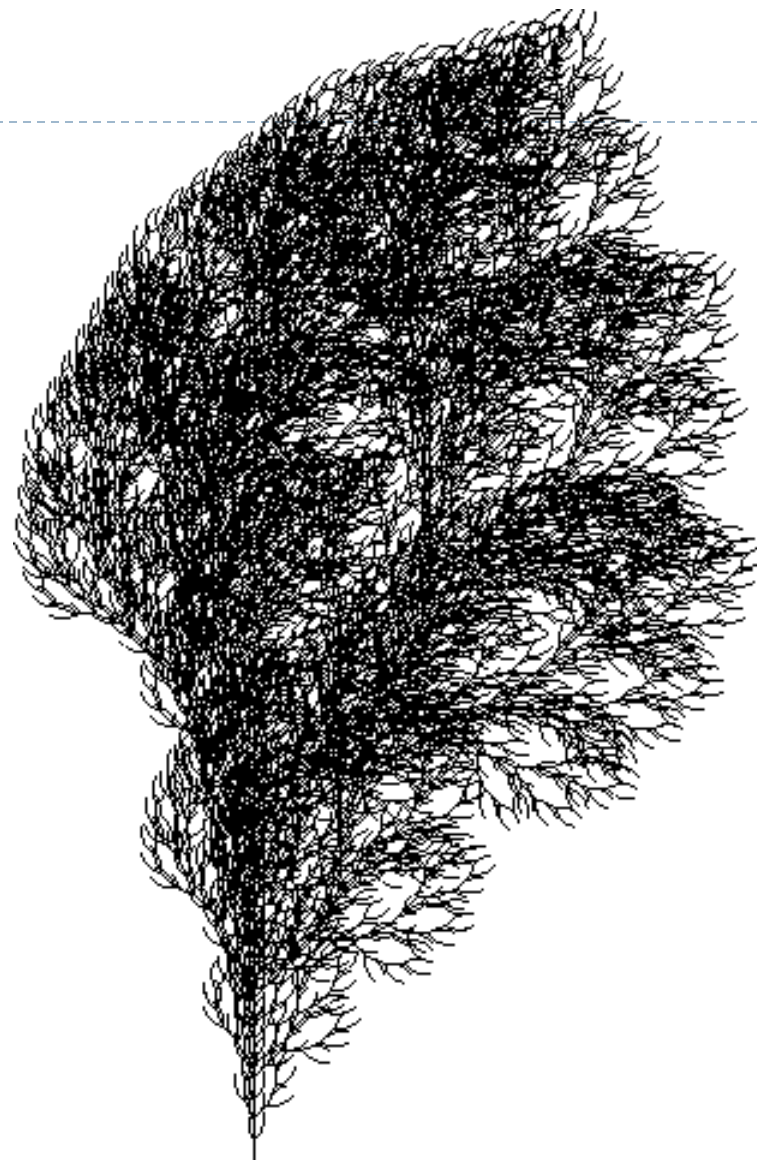
Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

$$N = \{F\}$$

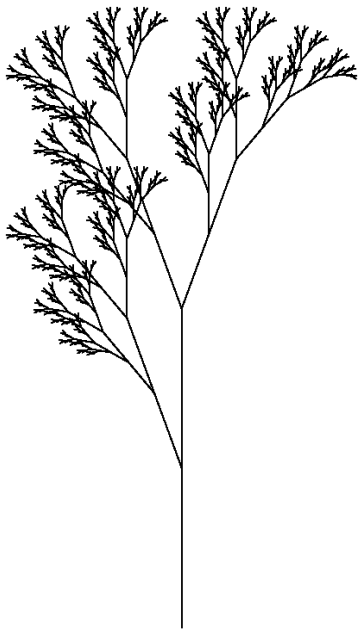
$$T = \{+\} \quad + = 360^\circ/16 = 22.5^\circ$$

$$Z = +++++F$$

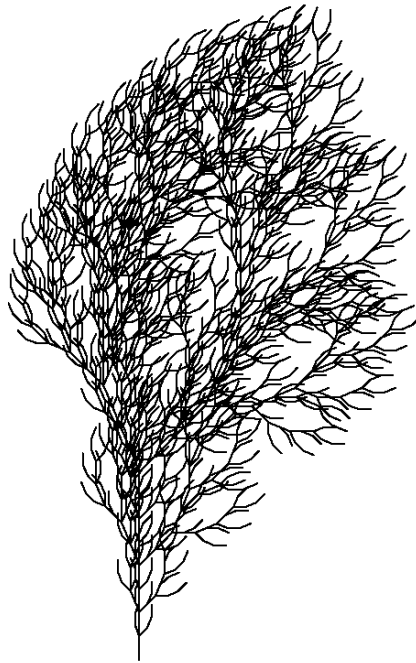
$$p: F=FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]$$



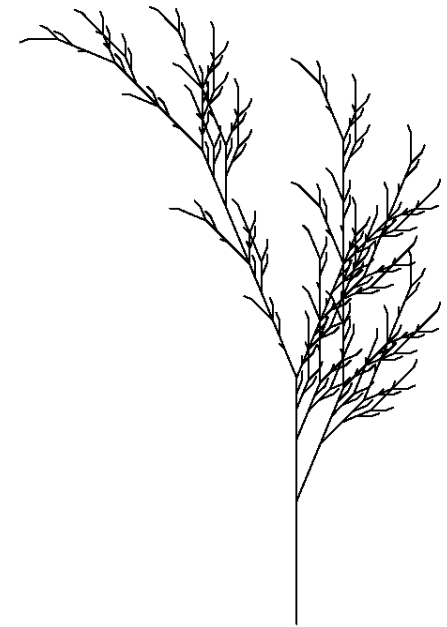
Przykładowe struktury drzewiaste



$n=7,$ $\delta = 20$
X
 $X=F[+X]F[-X]+X$
 $F=FF$



$n=4,$ $\delta = 22.5$
F
 $F=FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]$



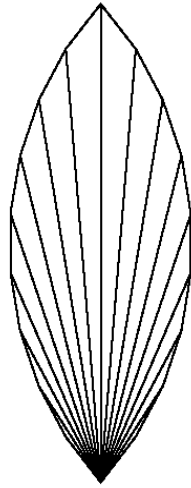
$n=5,$ $\delta = 22.5$
X
 $X=F-[[X]+X]+F[+FX]-X$
 $F=FF$

Liście

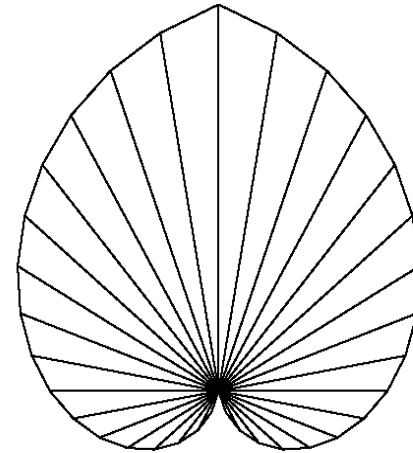
► Nowe symbole

- { - rozpoczęcie tworzenia nowego wielokąta; aktualny wielokąt zostaje zapisany na stos wielokątów
- . - dodanie wierzchołka do aktualnego wielokąta (aktualna pozycja żółwia)
- } - aktualny wielokąt zostaje narysowany na podstawie należących do niego wierzchołków; ze stosu ściągany jest wielokąt, który staje się aktualnym wielokątem
- W trybie tworzenia wielokąta, każdy ruch za pomocą **f** lub **F** powoduje zapisanie nowego wierzchołka do wielokąta. Ruch przy pomocy **g** nie powoduje zapisywania wierzchołka.

Liście - przykłady



$n=9,$ $\delta =5$
{.ala|al}
|=f++|
a=-----

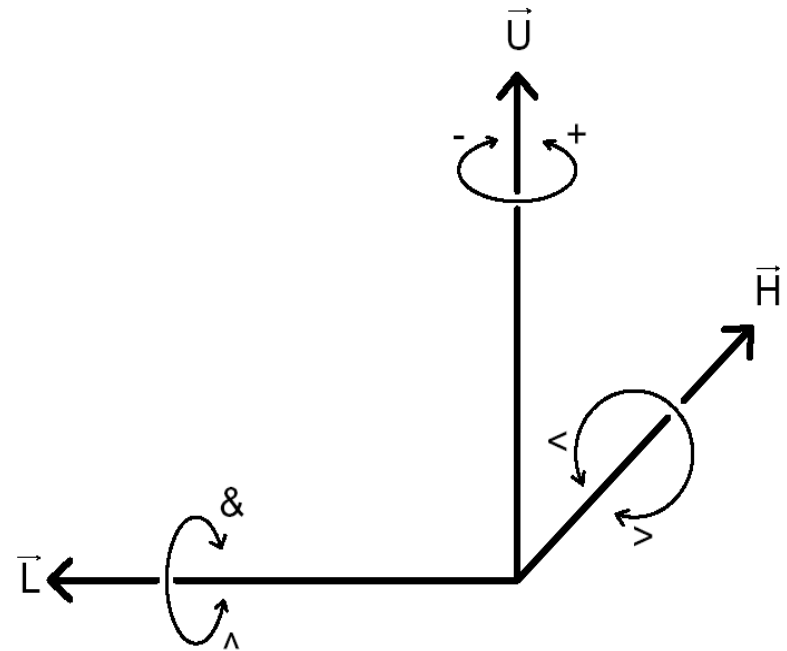


$n=18,$ $\delta =10$
[a][b]
a=[+a{.}.c.}
b=[-b{.}.c.}
c=gc



Żółw w 3D

- ▶ **+** skręt w lewo
- ▶ **-** skręt w prawo
- ▶ **&** nachylenie w dół
- ▶ **^** nachylenie w górę
- ▶ **<** przechył w lewo
- ▶ **>** przechył w prawo
- ▶ **|** zawrócenie (obrót o 180 stopni wokół wektora \vec{U})

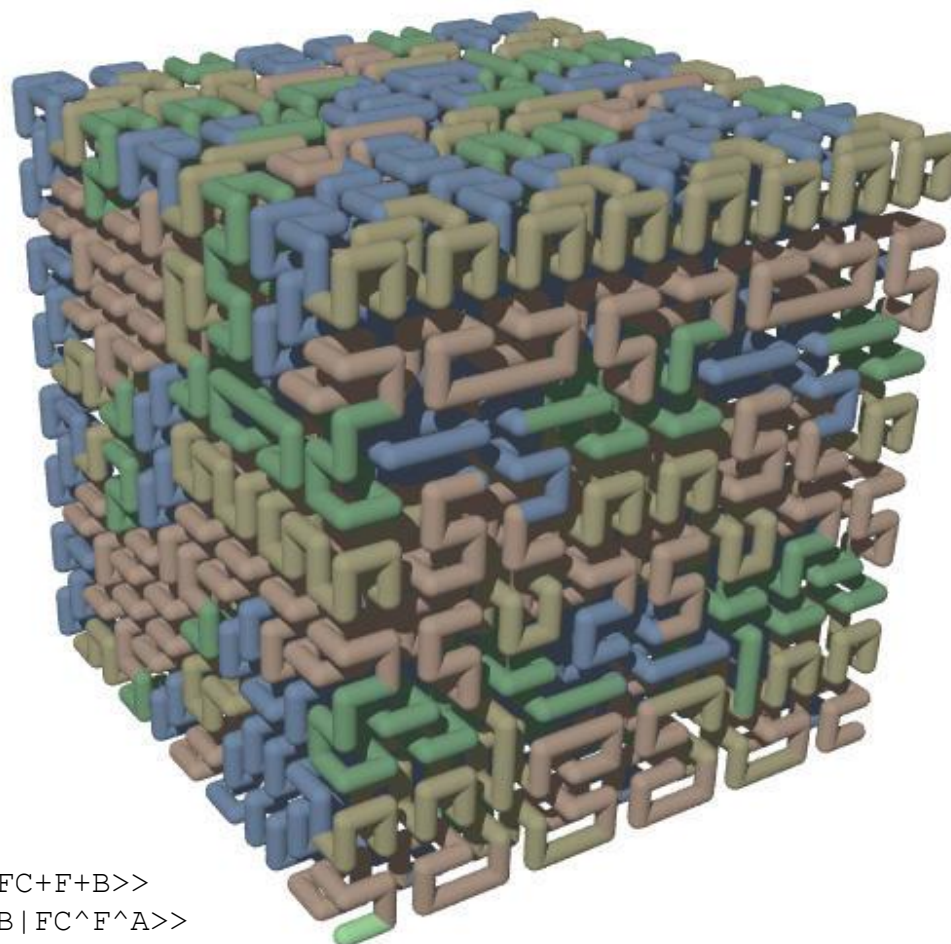


Przykłady

```
@i=6
@a=22.5
@l=2
@t=0.4
=c(#ff0000)A
A=[&FL!A]>>>>[&FL!A]>>>>>>[&FL!A
]
F=S>>>>>F
S=~(5)FL
L=[c(#00ff00)^^{.-
f(0.6)+f(0.6)+f(0.6)-|-
f(0.6)+f(0.6)+f(0.6)}]
@@
```

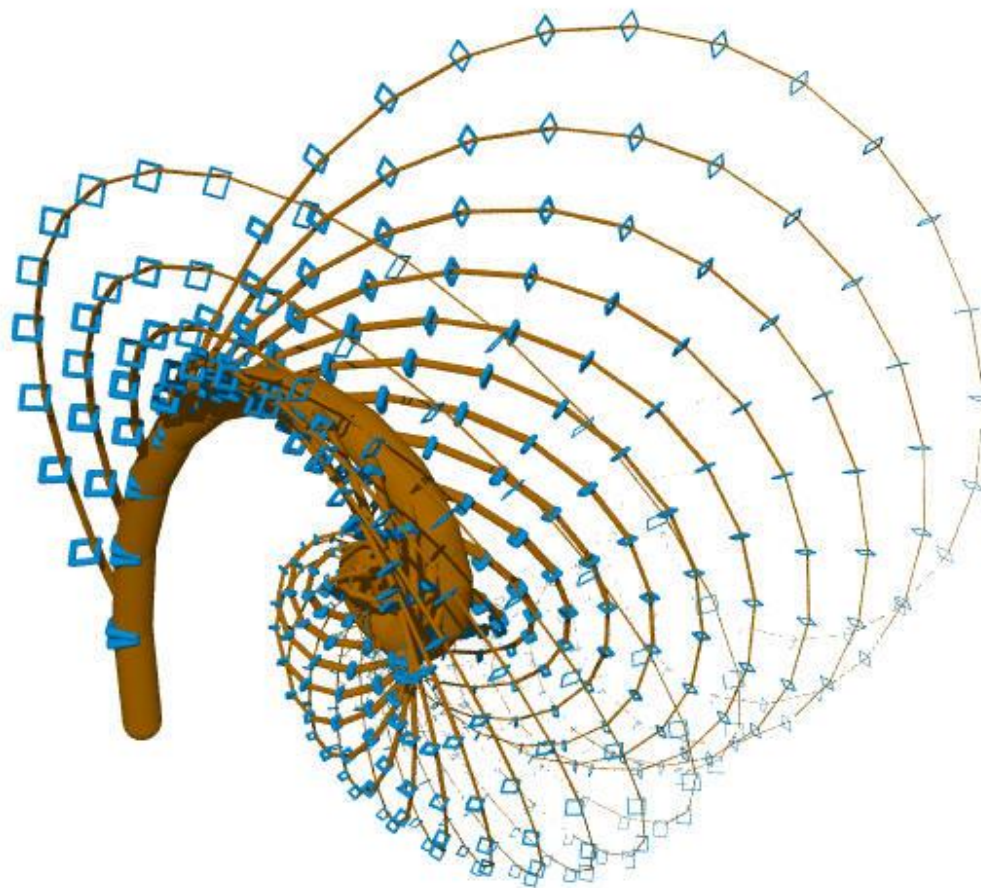


Przykłady



```
@i=4
@a=90
@l=1
@t=0.5
=A
A=c(#42844B) B-F+CFC+F-D&F^D-F+&&CFC+F+B>>
B=c(#9E755C) A&F^CFB^F^D^^-F-D^|F^B|FC^F^A>>
C=c(#416094) |D^|F^B-F+C^F^A&&FA&F^C+F+B^F^D>>
D=c(#8B844E) |CFB-F+B|FA&F^A&&FB-F+B|FC>>
@@
```


Przykłady



```
@i=20
@a=10
@l=3
@t=1
=a
a=Fs+;'a
s=[:!!!!&&[b]^^^[b]]
b=mF!+mF+;'b
m=[c(#0066FF)&(90)f(0.05)+(135)F(0.2)+(90)F(0.2)+(90)F(0.2)+(90)F(0.2)]
@@
```

Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

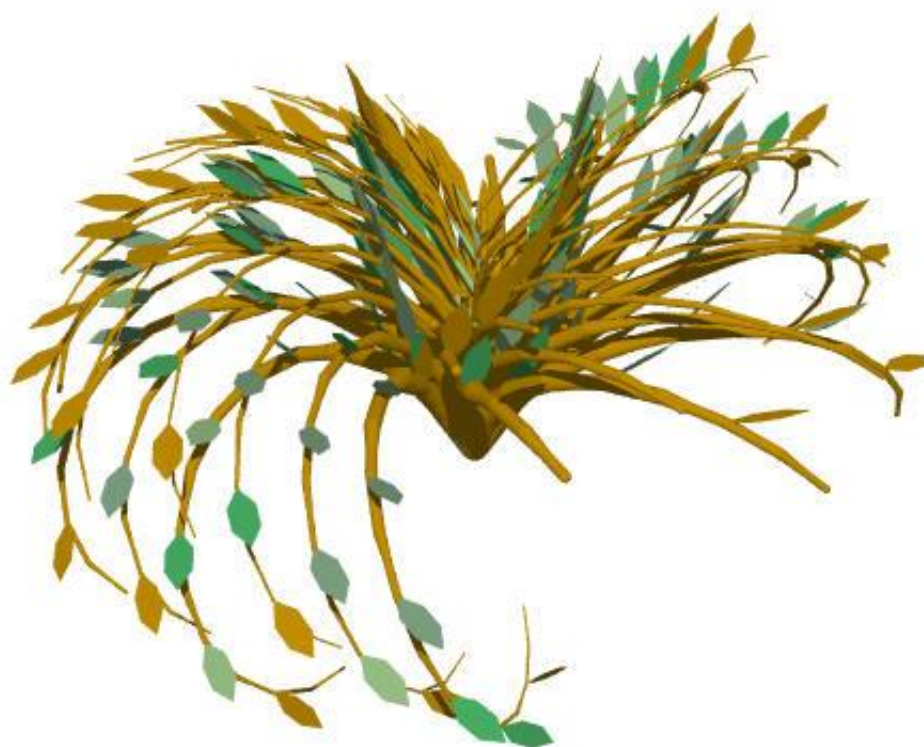
Przykłady

```
@i=11
@a=30
@l=3
@t=1
=&&&^D
D=AB!'Dc(#864740)F(0.5)O
B=[c---'':D]
A=&+^FLA
L=[---c(#6C8938){.-f+f+f-|-f+f+f}]
O=[c(#FF0000)C!iw>>w>>w>>w>>w>>w]
w=[&{.-f+f-|-f+f}]
i=i; i
C=(0.3)c(#9900FF)
C=(0.3)c(#CCFF00)
C=(0.3)c(#FF3399)
@@
```



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

Przykłady



```
@i=10
@a=10
@l=1
@t=0.8
=C
C=[c(#CC6600)H]f!>C
H=[^^^G]>(180)[^^^G]>>>H
G=FF!^+FF^+;' [&&&L]G
L=[X{--f++f++f--|--
f++f++f}]
X=(0.33)c(#508954)
X=(0.33)c(#73BF59)
X=(0.33)c(#169C2E)
@@
```


bop02



```
7
22.5
80
c(12)A
A=[&FL!A]>>>>[&FL!A]>>>
>>>>[&FL!A]
F=S>>>>F
S=FL
L=[c(8)^^{-f+f+f-|-
f+f+f}]
@
```

fern

```
20 # recursion
20 # angle
15 # thickness
# axioms
c(12)b>(60)b>(60)b>(60)b>(60)b>(60)b
# rules
b=[&(30)A]
A=~(7)$t(.1)F[+(40)C][-(
(40)C]! (.95)~(7)t(.1)FA
C=~(10)$tF[+(60)L][-(60)L]C
L=[~(15)c(4){-f+f+f-|-f+f}]
F='(1.3)F'(.77)
f='(1.3)f'(.77)
@
```

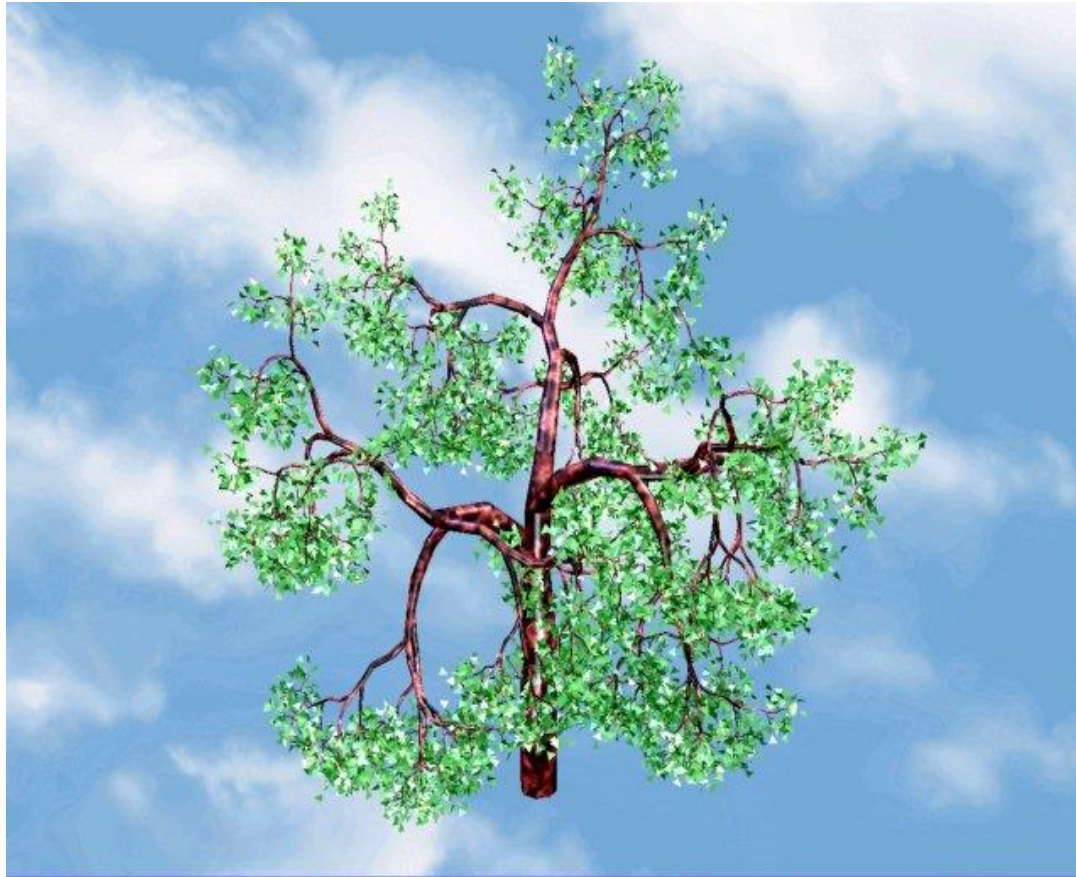


tree10

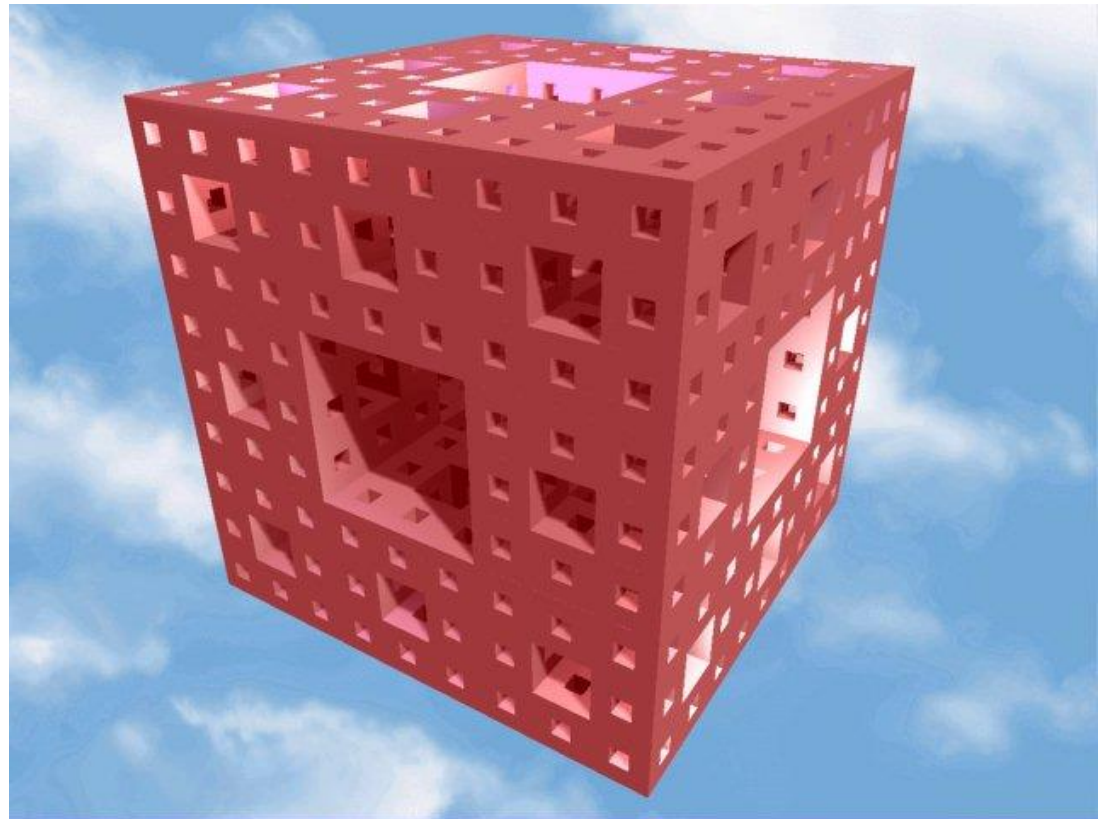
```
15
20
50
c(12) T
T=CCA
A=CBD>(94) CBD>(132) BD
B=[ &CDCD$A]
D=[g(50) Lg(50) Lg(50) Lg(50) Lg(50) Lg(50) L]
C=! (.95) ~ (5) tF
F=' (1.25) F' (.8)
L=[~f(200) c(8) {+(30) f(200) - (120) f(200) - (120) f(200) }]
f=z
z=_
@
```



tree10 + gravity



menger

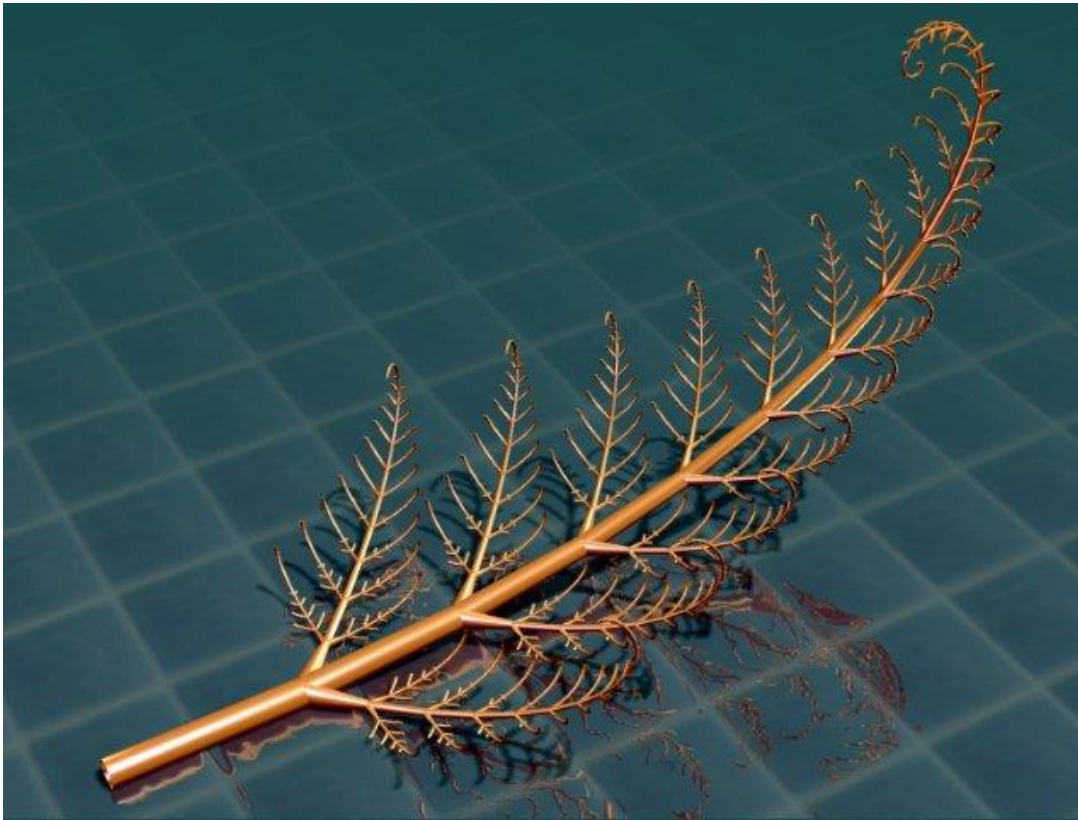


```
4
90
142.857
F
F=[ "(.333333) [-f+&f^B] ] f
B=[ FFF|z|+zFF|z|+zFF|z|+zF ] ^f & [ FfF|z|+zfF|z|+zfF ] ^f & [ FFF|z|+zFF|z|+zFF|z|+zF ]
```

@

Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

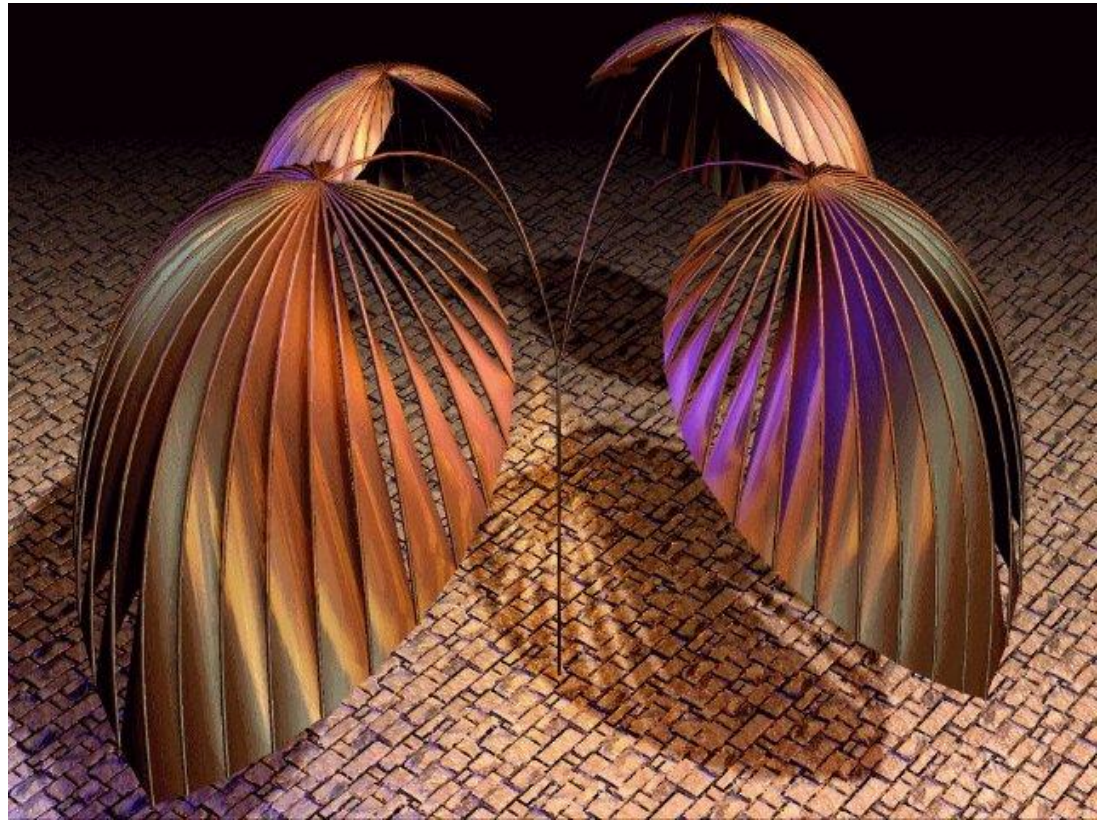
bop08

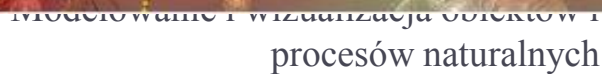


```
29
5
10
#
&(90)+(90)a
#
a=F[+(45)l][- (45)l]^;a
#           apical delay
l=j
j=h
h=s
s=d
d=x
x=a
#
F='(1.17)F'(.855)
#internode elongation rate
```


leaves

```
18      # recursion depth
10      # angle
10      # thickness as % of
length
#
#P
      # one leave
[|FFFFFFFFFFFF]P>(90)'P>(90)'P
>(90)'P  # plant
#
P=[&(10)G[ccA][ccB][a][b]]
G=tFtFtFtFtFtFtFtFtFtFtFtF
#
A=[+A{.}.C.]
B=[-B{.}.C.]
C=tfC
#
a=[+a]d
b=[-b]d
d=tFd
@
```





Przykład: modelowanie ekosystem



Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych

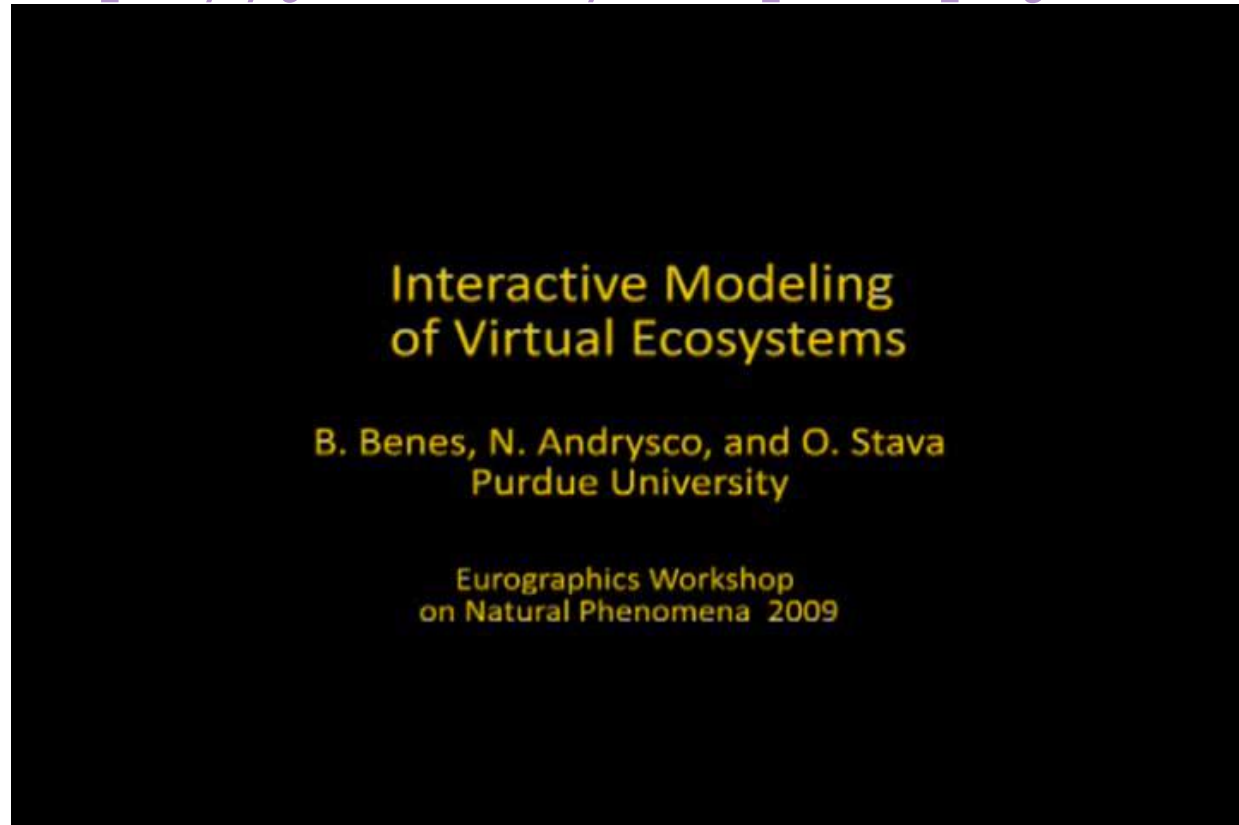
Niedostatki L-systemów

- ▶ Trudne precyzyjne sterowanie kształtem roślin. Zmiana produkcji może dać skutki dość nieprzewidywalne.
- ▶ Trudności w dostosowaniu się roślin do ograniczeń zewnętrznych, reakcji na zmienne oświetlenie, etc.
- ▶ To powoduje poszukiwanie innych metod.



Prace rozwijane przez Bedricha Benesa

- ▶ Interactive Modeling of Virtual Ecosystems, 2009: <https://youtu.be/8PRpJ1BpVjI>



Model Xfrog

- ▶ X Window Finite Recursive Object Generator
- ▶ Model stał się podstawą działalności firmy Greenworks
- ▶ Używany w wielu modelerach (pierwsza Maya)







Modelowanie i wizualizacja obiektów i
procesów naturalnych



(c) Bernd Lintermann 1985

procesów naturalnych

Drzewa w Blenderze?

- ▶ Należy użyć dodatku (add-on) Sapling
- ▶ IvyGen
- ▶ Są oczywiście inne, płatne wtyczki



Drzewa w WebGL?

► www.snappytree.com

Literatura

- ▶ P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*
- ▶ Lparser <http://home.wanadoo.nl/laurens.lapre/>

