



UMCS

**UNIWERSYTET MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ
W LUBLINIE**
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki

Kierunek: **Informatyka**

Specjalność: –

Aleh Hutsko

Nr albumu: 296609

**Symulacja wzrostu roślin generowanych
przez system Lindenmayera**

Simulation of the growth of plants generated by the
Lindenmayer system

Praca licencjacka

napisana w Katedrze oprogramowania systemów informatycznych
pod kierunkiem dr Krzysztofa Dmitruka

LUBLIN 2022

Spis treści

Wstęp	5
1 System Lindenmayera	7
1.1 Informacje wstępne	7
1.2 Struktura L-systemu	8
1.3 Interpretacja ciągu znaków	11
1.3.1 Trójwymiarowe generowanie drzew	14
2 Implementacja	17
2.1 Wykorzystane narzędzia	17
2.1.1 Język i zintegrowane środowisko programistyczne	17
2.1.2 Biblioteka Proctree	17
2.1.3 Biblioteka Nlohmann JSON	18
2.1.4 OpenGL	18
2.2 Funkcjonalność aplikacji	18
2.2.1 Planowanie drzew	19
2.2.2 Symulacja wzrostu	21
2.2.3 Ustawianie parametrów	23
2.2.4 Ustawianie tekstur	23
2.2.5 Zapis do pliku	23
2.3 Struktura programu	23
3 Testy i rezultaty	25
3.1 Wydajność	25
3.2 Porównanie z innymi rozwiązaniami	25

4 Podsumowanie	27
Bibliografia	29

Wstęp

Rośliny to rozległa grupa organizmów żywych, występujących na większości lądów na Ziemi, a także w środowisku wodnym. Należą do nich trawy, drzewa, kwiaty, krzewy, paprocie, mchy i wiele innych. Istnieje około 391.000 gatunków roślin, z których zdecydowana większość, około 369.000 (94%), wytwarza nasiona [1]. Rośliny można znaleźć na całym świecie, na wszystkich kontynentach. Rośliny dostarczają znaczną część tlenu na świecie i stanowią podstawę większości ekosystemów na Ziemi. Tak ważna część świata rzeczywistego doczekała się opisanego matematycznie modelu i dalszego zastosowania w różnych rodzajach nauki, w szczególności w informatyce. Modelowanie roślin w informatyce jest szeroko stosowane w wielu dziedzinach, takich jak gry, przemysł filmowy, agrokultura i architektura. Rośliny charakteryzują się złożoną, zwykle fraktalną strukturą, która jest trudna do modelowania. Z tego powodu opracowano różne systemy opisywania modeli roślin, aby uporządkować i uprościć pracę z modelowaniem drzew. Jednym z takich systemów jest system Lindenmayera, który umożliwia opis struktur fraktalnych, w szczególności roślin na poziomie gramatyki formalnej.

Celem pracy jest zastosowanie i ewaluacja systemu Lindenmayera do generowania roślin w aplikacji do planowania przestrzeni zielonych. Specyfikacja programu została przygotowana we współpracy z pracownikami Instytutu Nauk Biologicznych Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie. Oprogramowanie powinno posiadać następujące funkcje:

- możliwość wyświetlania drzew w przestrzeni trójwymiarowej,
- możliwość modyfikowania drzew przy użyciu różnych parametrów,
- możliwość wyboru tekstur dla pnia drzewa i liści,
- możliwość symulacji wzrostu drzew,
- możliwość zapisywania i wczytywania drzew o określonych parametrach.

Rozdział 1

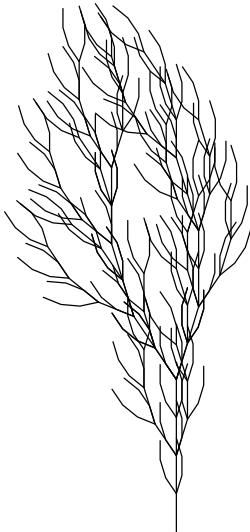
System Lindenmayera

1.1 Informacje wstępne

Systemy Lindenmayera (L-Systemy) zostały wprowadzone i rozwinięte w 1968 roku przez Aristida Lindenmayera [2], węgierskiego biologa teoretycznego i botanika z Uniwersytetu w Utrechcie. Lindenmayer wykorzystał L-systemy do opisu zachowania komórek roślinnych i modelowania procesów wzrostu w rozwoju roślin.

Reguły L-systemu reprezentują rekurencję. Prowadzi to do samopodobieństwa, a więc formy fraktalne można łatwo opisać za pomocą L-Systemu. Modele roślin, komórek i innych form organicznych naturalnie występujących gatunków można łatwo zdefiniować za pomocą L-systemu, ponieważ wraz ze wzrostem poziomu rekurencji forma powoli ”rośnie” i staje się coraz bardziej złożona. Systemy Lindenmayera są również popularne w symulowaniu sztucznego życia [3].

Na rysunku 1.1 jest przykład zastosowania L-systemu dla stworzenia fraktalnej struktury, która przypomina drzewo.



Rysunek 1.1: Przykład stworzonej struktury za pomocą L-systemu

1.2 Struktura L-systemu

L-systemy są obecnie powszechnie nazywane parametrycznymi L-systemami, definiowanymi jako krotka:

$$G = (V, \omega, P), \quad (1.1)$$

gdzie

- V (alfabet) – to zbiór symboli zawierający zarówno elementy, które można zastąpić (zmienne), jak i te, których nie można zastąpić ("stałe" lub "terminale"),
- ω (początek, aksjomat lub inicjator) – to ciąg symboli z V , który określa stan początkowy systemu,
- P – to zbiór reguł produkcji lub produktów określających sposób zastępowania zmiennych przez kombinacje stałych i innych zmiennych. Produkcja składa się z dwóch ciągów: poprzednika i następnika. Dla każdego symbolu A , który jest członkiem zbioru V i nie występuje po lewej stronie żadnego iloczynu w P , zakłada się tożsamość iloczynu $A \rightarrow A$; symbole te nazywamy stałymi lub terminalnymi.

W standardowej wersji L-systemów reguły wnioskowania są następujące:

$$v \rightarrow \omega, \quad (1.2)$$

gdzie v jest znakiem danego alfabetu V , $\omega \in V^*$ jest łańcuchem znaków (ewentualnie pustym) w tym samym alfabetie. Każdą regułę można więc interpretować jako podział komórki ($|\omega| > 1$), lub jej modyfikację ($|\omega| = 1$), lub jako jej śmierć ($|\omega| = 0$).

Na tabeli 1.1 przedstawiono przykład L-systemu.

Tabela 1.1: Przykład stworzonej struktury za pomocą L-systemu

Alfabet	Aksjomat	Reguły
$\{ 'A', 'B', 'F', 'H', 'J', '+', '-' \}$	$'FB'$	$'A' \rightarrow 'FBFA + HFA + FB - FA'$ $'B' \rightarrow 'FB + FA - FB - JFBFA'$ $'F' \rightarrow '$ $'H' \rightarrow '-'$ $'J' \rightarrow '+'$

Po zdefiniowaniu L-systemu, zaczyna ona ewoluować zgodnie ze swoimi zasadami. Stanem początkowym L-systemu jest jego aksjomat. Wraz z dalszym rozwojem ta linia opisująca stan ulegnie zmianie. Rozwój L-systemu odbywa się cyklicznie. W każdym cyklu rozwoju ciąg jest oglądany od początku do końca, symbol po symbolu. Dla każdego znaku wyszukiwana jest reguła, dla której ten znak jest poprzednikiem. Jeśli taka reguła nie zostanie znaleziona, znak jest pozostawiony bez zmian. Innymi słowy, dla tych znaków $'X'$, dla których nie istnieje reguła jawną, obowiązuje reguła domyślna: $'X' \rightarrow 'X'$. Jeśli zostanie znaleziona pasująca reguła, znak poprzednika jest zastępowany przez łańcuch następnika z tej reguły.

Dla ilustracji rozważmy następujący L-system (nazywamy go glon (łac. *algæ*), ponieważ jego rozwój modeluje wzrost pewnego gatunku alg) w tabeli 1.2:

Tabela 1.2: Przykład stworzonej struktury za pomocą L-systemu

Aksjomat	Reguły
$'A'$	$'A' \rightarrow 'B'$
	$'B' \rightarrow 'AB'$

W tabeli 1.3 przedstawiono stany tego L-systemu odpowiadające pierwszym dziesięciu cyklom rozwoju systemu.

Tabela 1.3: Wyniki L-systemu z tabeli 1.2 od zera do ośmiu iteracji

Generacja	Stan
0	A
1	B
2	AB
3	BAB
4	$ABAB$
5	$BABABBAB$
6	$ABABBBABABABAB$
7	$BABABBABABBABBABABBAB$
8	$ABBABBABABBABBABABBABABBAB$

Można zauważyć, że długości ciągów kodujących stan takiego L-systemu tworzą ciąg liczb Fibonacciego, czyli ciąg liczbowy, w którym każda liczba jest równa sumie dwóch poprzednich. Ciągiem Fibonacciego będą także numery znaków A i B w tych ciągach. Bardziej zaskakujący jest fakt, że ciąg ciągów ma taką samą prawidłowość jak ciąg liczb Fibonacciego: każdy ciąg jest sumą (konkatenacją) dwóch poprzednich.

Aby uzyskać stan L-systemu po określonej liczbie iteracji, napisałem funkcję (listing 1.1), do której można wstawić aksjomat, zbiór reguł L-systemu oraz liczbę iteracji. Funkcja zwraca stan łańcucha po podanej liczbie iteracji.

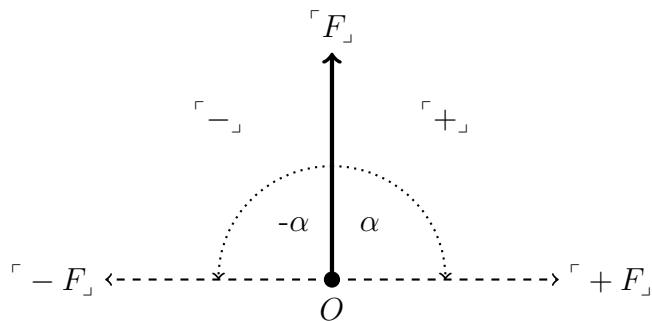
```
1 def iter(axiom: str, rules: dict, iterations: int) -> str:
2     if iterations == 0: return axiom
3     returnString = ''
4     for i in axiom:
5         if i in rules:
6             returnString += rules[i]
7         else:
8             returnString += i
9     return iter(returnString, rules, iterations-1)
```

Listing 1.1: Funkcja, która zwraca stan systemu po określonej liczbie iteracji

1.3 Interpretacja ciągu znaków

W celu dalszej graficznej interpretacji otrzymanych ciągów należy wprowadzić pojęcie grafiki żółwia. Grafika żółwia to zasada organizacji graficznej biblioteki wyjściowej oparta na metaforze żółwia, wyimaginowanego (a w niektórych eksperymentach rzeczywistego) urządzenia przypominającego robota, które porusza się po ekranie lub papierze i obraca w zadanym kierunku, pozostawiając za sobą (lub opcjonalnie nie pozostawiając) narysowaną linię o zadanym kolorze i grubości. Nawiązanie do żółwia inspirowane jest powstającym w latach 60. językiem Logo, służącym do nauki programowania, który wykorzystywał grafikę żółwia jako dwuwymiarowy kurSOR.

Interpretacja znaków polega na zdefiniowaniu operacji dla symboli (nie jest konieczne dla wszystkich) w alfabetie. Czynności, podobnie jak symbole, są z kolei definiowane przez autora systemu. Rysunek 1.2 przedstawia przykład interpretacji symbolu (z kątem $\alpha = 90^\circ$) w następujący sposób:



Rysunek 1.2: Przykładowa interpretacja symboli

- F oznacza przejście do przodu i narysuj linię,
- $-$ oznacza obrót w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara na kąt o mierze α ,
- $+$ oznacza obrót zgodnie z ruchem wskazówek zegara o α .

Zdefiniujemy również zbiór reguł L-systemu w tabeli 1.4. Łącząc wyże wymieniony zestaw reguł z interpretacją symboli z rysunku 1.2, otrzymujemy strukturę rekurencyjną zwaną krzywą smoka (tabela 1.5).

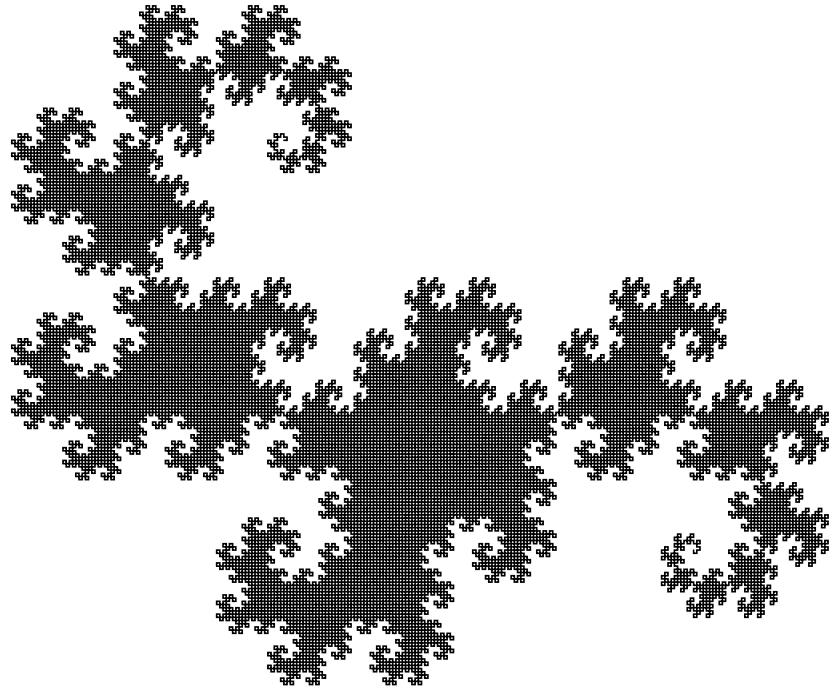
Tabela 1.4: Zestaw reguł L-system dla krzywej smoka (ang. *dragon curve*)

Alfabet	Aksjomat	Reguły
$\{ \text{'F}', \text{'X'}, \text{'Y'} \}$	'FB'	$\text{'A'} \rightarrow \text{'FBFA + HFA + FB - FA'}$ $\text{'B'} \rightarrow \text{'FB + FA - FB - JFBFA'}$ $\text{'F'} \rightarrow \text{' }$ $\text{'H'} \rightarrow \text{'-'}$ $\text{'J'} \rightarrow \text{'+'}$

Tabela 1.5: Krzywa smoka w iteracji 1-7

Iteracji	Stan
1	'
2	$\text{'-}'$
3	$\text{'--}'$
4	$\text{'---}'$
5	$\text{'----}'$
6	$\text{'-----}'$
7	'-----'

Widać, że po każdej iteracji struktura staje się coraz bardziej złożona. Wynik piętnastu iteracji pokazano na rysunku 1.3.



Rysunek 1.3: Wynik piętnastu iteracji krzywej smoka

W przykładzie krzywej smoka (rysunek 1.3) żółw zawsze porusza się o tę samą odległość, a jego linie mają tę samą grubość. Jednak w świecie rzeczywistym rośliny i drzewa mają zasadniczo strukturę rozgałęzioną. W strukturze fraktalnej roślin każda pojedyncza gałąź może być przedstawiona jako osobna roślina, choć w zredukowanej formie. Dlatego, aby symulować drzewa, do L-systemu należy dodać parametry długości i grubości linii utworzonej przez żółwia.

Kolejny zestaw reguł (tabela 1.6) demonstruje przykład tworzenia struktury przypominającej drzewo [4]. W przykładzie tego L-systemu do alfabetu wprowadzane są nowe znaki. Ich interpretacja przez żółwia jest następująca:

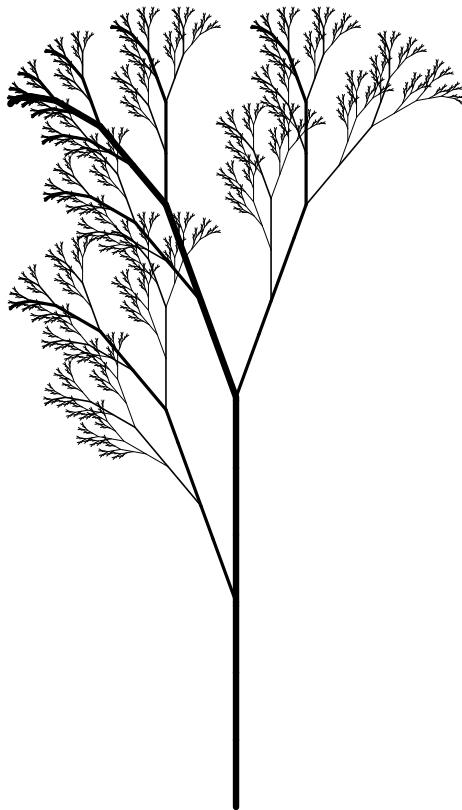
- 「[」 označa “zapisać bieżący stan żółwia do stosu”,
- 「]」 označa “odczytać bieżący stan żółwia do stosu”,
- 「 X 」 jest ignorowany przez żółwia.

W przykładzie przedstawionym w książce [4] grubość linii narysowanej przez żółwia nie zmienia się. Rozszerzyłem przykład z podręcznika i dodałem czynnik grubości, przez który będzie mnożona grubość w zależności od zagnieżdżenia gałęzi.

W wyniku zastosowania wszystkich powyższych reguł powstaje struktura przypominająca drzewo (rysunek 1.4)

Tabela 1.6: Zestaw reguł L-system dla przykładowego drzewa

Alfabet	Aksjomat	Reguły	Konstanty
$\{ 'F', 'X', '[', ']' \}$	$'X'$	$'X' \rightarrow 'F[+X]F[-X]+X'$ $'F' \rightarrow 'F'$	Kąt powrotu = 20° Grubość linii = 6px Czynnik grubości = 0.5



Rysunek 1.4: Utworzona struktura na podstawie reguł z tabeli 1.6

1.3.1 Trójwymiarowe generowanie drzew

Aby utworzyć trójwymiarowe drzewa, należy zdefiniować symbole dla żółwia, który będzie odpowiedzialny za obroty w przestrzeni trójwymiarowej. Jednym ze sposobów byłoby zdefiniowanie obrotów żółwia na każdej osi (X, Y, Z), a także możliwość ustalenia kąta obrotu. Dzięki temu żółw może poruszać się we wszystkich możliwych kierunkach. Podczas budowania drzewa, w momencie gdy gałąź się rozgałęzia, należy, podobnie jak w przypadku 2D, ustawić kąty dla każdej z nowych gałęzi. Lindenmayer

sugeruje użycie trzech wektorów do reprezentowania kierunku żółwia (przód, lewo i góra) [4].

W tym przypadku obroty żółwia będą reprezentowane przez następujące równanie:

$$[\vec{H}' \ \vec{L}' \ \vec{U}'] = [\vec{H} \ \vec{L} \ \vec{U}] R, \quad (1.3)$$

gdzie

- H jest wektorem wskazującym góre żółwia,
- L jest wektorem wskazującym lewą stronę żółwia,
- F jest wektorem wskazującym przód żółwia,
- R jest macierzą trójwymiarową.

Macierz R, w zależności od osi obrotu, może wyglądać w następujący sposób:

$$R_H(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$R_L(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$R_U(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Rozdział 2

Implementacja

W zakresie implementacji stworzyłem oprogramowanie, które pozwala na wizualizację przyległego terenu do nieruchomości w trójwymiarowej przestrzeni, na której można umieścić drzewa. Drzewa można zmieniać za pomocą różnych parametrów i symulować ich wzrost.

2.1 Wykorzystane narzędzia

2.1.1 Język i zintegrowane środowisko programistyczne

Do stworzenia programu wykorzystałem język programowania C++ w standardzie 17. Użyłem Qt Creator w wersji 6.0.1 jako zintegrowanego środowiska programistycznego.

Stworzone oprogramowanie wykorzystuje język C++ dla całej logiki aplikacji.

2.1.2 Biblioteka Proctree

Proctree.js to biblioteka dla języka programowania javascript, która pozwala na tworzenie drzewa jako siatki wierzchołków [5]. Biblioteka posiada dużą liczbę parametrów, które wpływają na ostateczny wynik drzewa. Autorem biblioteki jest brytyjski programista Paul Brunt. Później fiński programista Jari Komppa zrobił port tej biblioteki dla C++. Biblioteka w wersji C++ jest szybsza [6].

Biblioteka Proctree jest głównym narzędziem do tworzenia siatki wierzchołków, normalnych i mapowania UV dla drzewa w programie.

2.1.3 Biblioteka Nlohmann JSON

Nlohmann Json to biblioteka do obsługi danych formatu json [7]. Biblioteka ma wiele zalet: Intuicyjna syntaktyka, Łatwa integracja, Wydajność pamięci, Szybkość. Autorem biblioteki jest niemiecki programista Niels Lohmann.

Biblioteka Nlohmann Json jest używana w programie do zapisywania i ładowania parametrów drzewa w postaci pliku json.

2.1.4 OpenGL

OpenGL jest specyfikacją definiującą niezależny od platformy interfejs programowania aplikacji do pisania aplikacji wykorzystujących grafikę komputerową 2D i 3D. Twórcą jest amerykańska firma Silicon Graphics. OpenGL pozwala na tworzenie złożonych scen 3D za pomocą prymitywów. Wykorzystuje do tego zasoby karty graficznej. Wykorzystywany jest do tworzenia gier komputerowych, wirtualnej rzeczywistości, w projektowaniu.

Powstałe oprogramowanie wykorzystuje OpenGL wersji 3.3 Core do renderowania trójwymiarowej przestrzeni i drzew.

2.2 Funkcjonalność aplikacji

Stworzone oprogramowanie posiada szereg funkcji, które pozwalają na zaprojektowanie rozmieszczenia drzew w otoczeniu przy budynku.

Na rysunku 2.1 można zaobserwować główne okno programu. Konwencjonalnie okno główne można podzielić na dwa obszary – obszar ustawień i obszar roboczy.

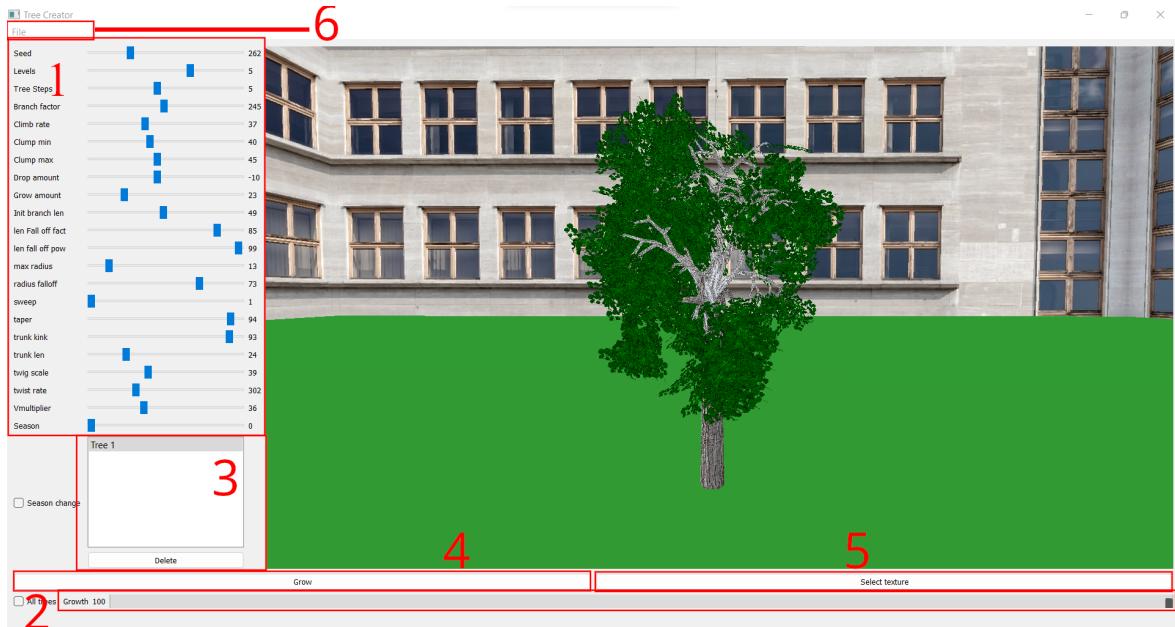
Część ustawień znajduje się po lewej i dolnej stronie okna. Obszar roboczy zajmuje większość okna i znajduje się po prawej stronie okna.

Obszar ustawień obejmuje:

1. suwak do regulacji drzew,
2. suwak do zmiany wieku drzewa,
3. lista utworzonych drzew,
4. przycisk symulacji wzrostu drzew,

5. przycisk do zmiany tekstur,

6. pasek menu.



Rysunek 2.1: Główne okno programu

Obszar roboczy to trójwymiarowa przestrzeń, która symuluje obszar wokół budynku drzewa. Kamerę można przesuwać za pomocą klawiatury. Klawisze W, A, S, D służą do poruszania się odpowiednio do przodu, w lewo, do tyłu i w prawo. Klawisz Shift służy do poruszania się wyżej. Aby obniżyć kamerę niżej, użyj klawisza Alt. Kamerę można obracać za pomocą myszy z wcisniętym lewym przyciskiem.

2.2.1 Planowanie drzew

Aby posadzić drzewa, najpierw za pomocą myszy i klawiatury ustawiamy kamerę tak, aby widoczny był obszar, w którym chcemy posadzić drzewko (rysunek 2.2). Następnie umieszczaćmy kurSOR w miejscu, w którym chcemy posadzić drzewo i klikamy prawym przyciskiem myszy (rysunek 2.3).



Rysunek 2.2: Okno programu przed posadzeniem drzewa



Rysunek 2.3: Okno programu po posadzeniu drzewa

Nie ma ograniczeń co do liczby drzew w programie, ale należy pamiętać, że duża liczba drzew może wpływać na wydajność, a w szczególności na symulację wzrostu. Rysunek 2.4 pokazuje 50 posadzonych drzew.



Rysunek 2.4: 50 posadzonych drzew

2.2.2 Symulacja wzrostu

Na potrzeby demonstracji ustawiłem trzy drzewa i zmieniłem ich parametry, aby były różne (rysunek 2.5).



Rysunek 2.5: Trzy różnych drzewa

Symulacja wzrostu może odbywać się na dwa sposoby: ręcznie, poprzez ustawienie "wieku" drzewa (rysunek 2.6, 2.7), oraz automatycznie, poprzez naciśnięcie przycisku

“Rosnąć” (*ang. Grow*) (rysunek 2.8). Każda z tych metod ma dwa tryby: zmiana wzrostu pojedynczego wybranego drzewa (rysunek 2.6) lub zmiana wzrostu wszystkich drzew (rysunki 2.7, 2.8). Tryb jest przełączany za pomocą przycisku wyboru “Wszystkie drzewa” (*ang. All trees*).



Rysunek 2.6: Ręczna zmiana wzrostu jednego drzewa



Rysunek 2.7: Ręczna zmiana wzrostu wszystkich drzew



Rysunek 2.8: Automatyczny wzrost drzew

Nie wiem czy lepiej robić każdy rysunek z 2.8 osobno, czy w jednym. Chyba tak jak jest (w jednym) będzie lepiej

Liczba drzew wpływa na to, jak szybko będą generowane. Dzieje się tak dlatego, że każde drzewo jest generowane inaczej, biorąc pod uwagę to, jak będzie wyglądało pod koniec wzrostu. Nie udało mi się tego zoptymalizować.

Podczas zmiany wzrostu można również poruszać kamerą, ale ponieważ proces wzrostu wymaga dość dużej wydajności, kamera może poruszać się wolniej.

2.2.3 Ustawianie parametrów

2.2.4 Ustawianie tekstur

2.2.5 Zapis do pliku

2.3 Struktura programu

Rozdział 3

Testy i rezultaty

3.1 Wydajność

3.2 Porównanie z innymi rozwiązaniami

Rozdział 4

Podsumowanie

Bibliografia

- [1] C. M. and B. W. J, “The number of known plant species in the world and its annual increase.” https://www.researchgate.net/publication/303371386_The_number_of_known_plant_species_in_the_world_and_its_annual_increase, 2016. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].
- [2] L. A., “Interactive modeling of plants,” *Journal of Theoretical Biology*, 1968.
- [3] C. R.C., C. N., and L. Consularo, “Visualization and simulation of 3d artificial neural structures generated by l-system,” *Virtual Reality*, 2010.
- [4] P. P. and L. A., *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, New York, 1990.
- [5] P. Brunt, “proctree.js.” <https://github.com/supereggbert/proctree.js>, 2012. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].
- [6] J. Komppa, “proctree.” <https://github.com/jarikomppa/proctree>, 2015. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].
- [7] N. Lohmann, “Nlohmann json.” <https://github.com/nlohmann/json>, 2015. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].