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

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 prędzej czy później wymagała matematycznego opisu 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 Lindenmaiera, który umożliwia opis struktur fraktalnych, w szczególności roślin na poziomie gramatyki formalnej.

Celem tej pracy jest analiza i zapoznanie się z systemem Lindenmayera, możliwościami jego rozbudowy i wykorzystania do generowania roślin, a konkretnie drzew. Ponadto należy opracować oprogramowanie umożliwiające tworzenie trójwymiarowych modeli drzew z możliwością modyfikacji parametrów drzew i symulacji ich wzrostu. 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 Linedmayera (L-Systemy) zostały wprowadzone i rozwinięte w 1968 roku przez Aristida Lindenmayera, 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.

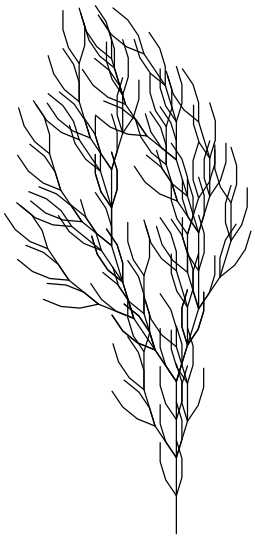
Na rysunku 1.1 jest przykład zastosowania L-systemu dla stworzenia fraktalnej struktury, która przypomina drzewo.

1.2 Struktura L systemu

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

$$G = (V, \omega, P), \tag{1.1}$$

gdzie



Rysunek 1.1: Przykład stworzonej struktury za pomocą L-systemu

- 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:

$$v \rightarrow \omega, \tag{1.2}$$

gdzie v jest znakiem danego alfabetu V, $\omega \in V^*$ jest łańcuchem znaki (ewentualnie puste) w tym samym alfabecie. 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.

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

Tabela 1.1: Przykład stworzonej struktury za pomocą L-systemu

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

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 $\ulcorner X\lrcorner$, dla których nie istnieje reguła jawna, obowiązuje reguła domyślna: $\ulcorner X\lrcorner \rightarrow \ulcorner X\lrcorner$. Jeśli zostanie znaleziona pasująca reguła, znak poprzednika jest zastępowany przez łańcuch następnika z tej reguły.

Dla ilustracji rozważmy następujący L-system (nazywamy go glon (łat. *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
$\ulcorner A\lrcorner$	$\ulcorner A\lrcorner \rightarrow \ulcorner B\lrcorner$ $\ulcorner B\lrcorner \rightarrow \ulcorner AB\lrcorner$

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

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. Ciągami 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.

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

Generacja	Stan
0	$\ulcorner A \lrcorner$
1	$\ulcorner B \lrcorner$
2	$\ulcorner AB \lrcorner$
3	$\ulcorner BAB \lrcorner$
4	$\ulcorner ABBAB \lrcorner$
5	$\ulcorner BABABBAB \lrcorner$
6	$\ulcorner ABBABBABABBAB \lrcorner$
7	$\ulcorner BABABBABABBABBABABBAB \lrcorner$
8	$\ulcorner ABBABBABABBABBABABBABABBABBABABBAB \lrcorner$

Funkcja zwraca stan łańcucha po podanej liczbie iteracji.

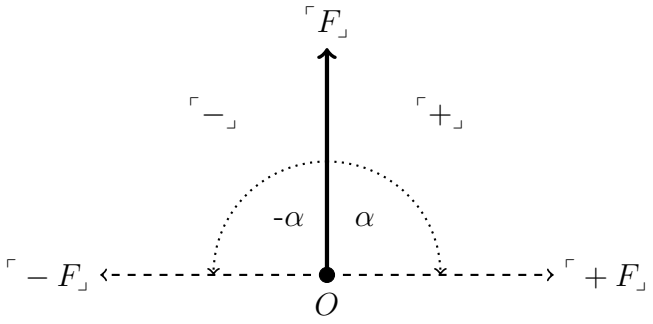
```
def iter(axiom: str, rules: dict, iterations: int) -> str:
  if iterations == 0: return axiom
  returnString = ''
  for i in axiom:
      if i in rules:
          returnString += rules[i]
      else:
          returnString += i
  return iter(returnString, rules, iterations-1)
```

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.

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



Rysunek 1.2: Przykładowa interpretacja symboli

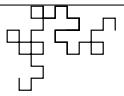
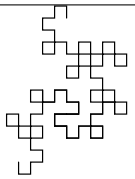
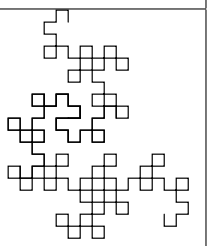
- $\ulcorner F \lrcorner$ oznacza przejście do przodu i narysuj linię,
- $\ulcorner - \lrcorner$ oznaca obrót w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara na kąt o mierze α,
- $\ulcorner + \lrcorner$ oznaca obrót zgodnie z ruchem wskazówek zegara o α.

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
$\{ \ulcorner F \lrcorner, \ulcorner X \lrcorner, \ulcorner Y \lrcorner \}$	$\ulcorner FB \lrcorner$	$\ulcorner A \lrcorner \rightarrow \ulcorner FBFA + HFA + FB - FA \lrcorner$ $\ulcorner B \lrcorner \rightarrow \ulcorner FB + FA - FB - JFBFA \lrcorner$ $\ulcorner F \lrcorner \rightarrow \ulcorner \lrcorner$ $\ulcorner H \lrcorner \rightarrow \ulcorner - \lrcorner$ $\ulcorner J \lrcorner \rightarrow \ulcorner + \lrcorner$

Tabela 1.5: krzywa smoka w iteracji 1-7

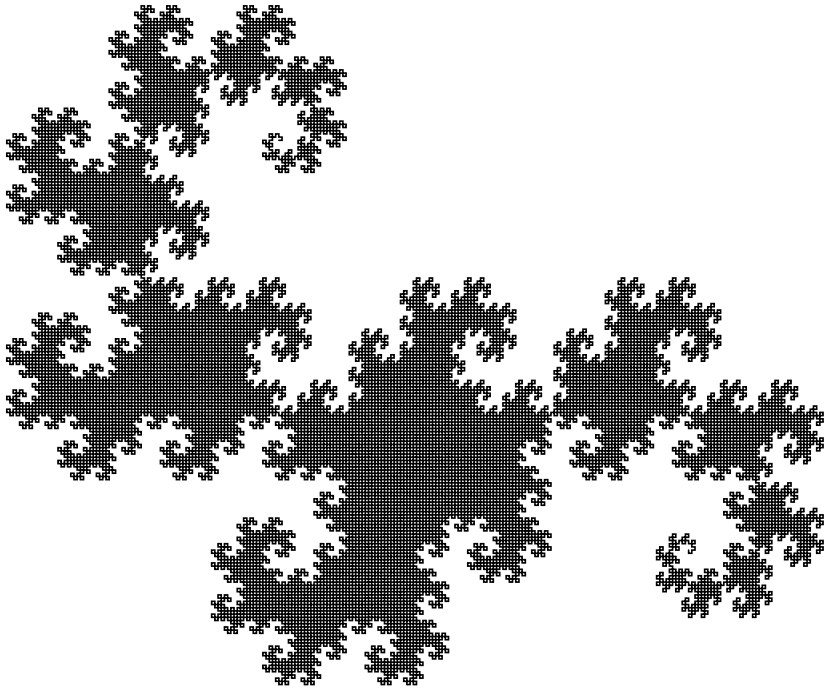
Iteracji	Stan
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

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

W przykładzie krzywej smoka (rysunek 1.3) żółw zawsze porusza się na 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) zademonstruje przykład tworzenia struktury przypominającej drzewo. Przykład zaczerpnięty z książki "Alogirytmiczne piękno roślin"[2] *(ang. "Alogirthmic Beauty of Plants")*, której współautorem jest sam Aristid Lindenmayer. W przykładzie tego l-systemu do alfabetu wprowadzane są nowe znaki. Ich interpretacja przez żółwia jest następująca:

- ⌜[⌟ oznacza "zapisać bieżący stan żółwia do stosu",



Rysunek 1.3: Wynik piętnastu iteracji

- $\ulcorner]\lrcorner$ oznaca “odczytać bieżący stan żółwia do stosu”,

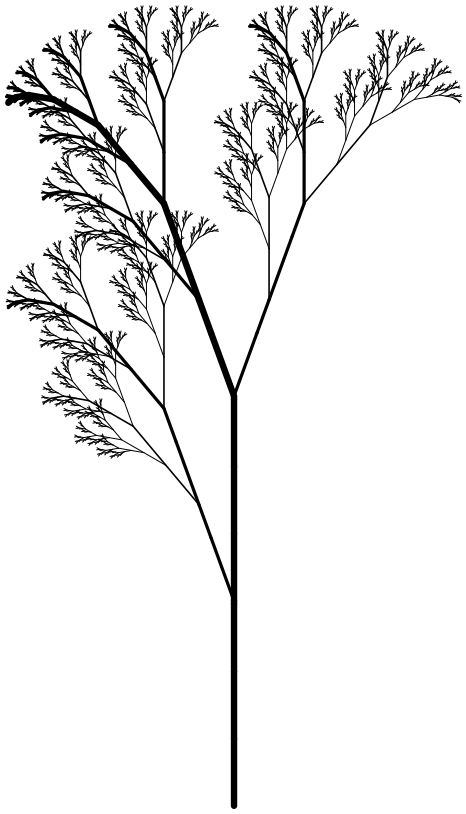
- $\ulcorner X\lrcorner$ jest ignorowany przez żółwia.

W przykładzie przedstawionym w książce 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
$\{ \ulcorner F\lrcorner, \ulcorner X\lrcorner, \ulcorner [\lrcorner, \ulcorner]\lrcorner \}$	$\ulcorner X\lrcorner$	$\ulcorner X\lrcorner \rightarrow \ulcorner F[+X]F[-X]+X\lrcorner$ $\ulcorner F\lrcorner \rightarrow \ulcorner F\lrcorner$	Kąt powrotu = 20° Grubość linii = 6px Czynnik grubości = 0.5



Rysunek 1.4: Utworzona struktura na podstawie reguł z tabeli 1.6

Rozdział 2

Implementacja

W zakresie implementacji stworzyłem oprogramowanie, które pozwala na wizualizację przyległego terenu do nieróchomości 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 wersji 17. Użyłem Qt Creator w wersji 6.0.1 jako zintegrowanego środowiska programistycznego.

C++ jest kompilowanym, statycznie typowanym językiem programowania. Jest on wykorzystywany w różnych dziedzinach oprogramowania. C++ łączy w sobie właściwości języków programowania wysokiego i niskiego poziomu.[3] Duża ilość algorytmów i struktur jest zawarta w standardowej bibliotece języka. C++ obsługuje również wielowątkowość. Autorem języka jest duński programista Bjorn Straustrup.

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

Qt Creator to międzyplatformowe zintegrowane środowisko programistyczne. Qt Creator pozwala programistom tworzyć oprogramowanie na platformach stacjonarnych, mobilnych i wbudowanych. obsługuje dużą liczbę kompilatorów takich jak GCC, Clang, MinGW, MSVC, Linux ICC, GCCE, RVCT, WINSCW. Ponadto Qt Creator wykorzystuje zestaw bibliotek, które umożliwiają tworzenie międzyplatformowego GUI dla oprogramowania.

2.1.2 Biblioteka Proctree

Proctree.js to biblioteka dla języka programowania javascript, która pozwala na tworzenie drzewa jako siatki wierzchołków.[4] 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.[5]

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. [6] 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 prostych 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.

Rysunek 2.1: Główne okno programu

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:

- suwak do regulacji drzew,
- suwak do zmiany wieku drzewa,
- lista utworzonych drzew,
- przycisk symulacji wzrostu drzew,
- przycisk do zmiany tekstur,
- pasek menu.

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 zdejmowania wyżej. Aby obniżyć kamerę niżej, użyj klawisza Alt. Kamerę można obracać za pomocą myszy z wciśniętym lewym przyciskiem.

2.2.1 Planowanie drzew

Aby posadzić drzewka, najpierw za pomocą myszy i klawiatury ustawiamy kamerę tak, aby widoczny był obszar, w którym chcemy posadzić drzewko. Następnie umieszczamy kursor w miejscu, w którym chcemy posadzić drzewo i klikamy prawym przyciskiem myszy.

Nie ma ograniczeń co do liczby drzew w programie, ale należy pamiętać, że duża liczba drzew może wpłynąć na wydajność, a w szczególności na symulację wzrostu.

2.2.2 Symulacja wzrostu

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] P. P. and L. A., *The Algorithmic Beauty of Plants.* Springer-Verlag, New York, 1990.

[3] H. Schildt, *C++ The Complete Reference Third Edition.* Osborne McGraw-Hill, 1998.

[4] P. Brunt, "proctree.js." https://github.com/supereggbert/proctree.js, 2012. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].

[5] J. Komppa, "proctree." https://github.com/jarikomppa/proctree, 2015. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].

[6] N. Lohmann, "Nlohmann json." https://github.com/nlohmann/json, 2015. [Online; dostęp 19 czerwca 2022].