

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Łukasz Kostrzewa

Nr albumu: 1080514

Wizualizacja, edycja i przetwarzanie grafów on-line

Praca magisterska
na kierunku Informatyka stosowana

Praca wykonana pod kierunkiem
dr hab. Barbary Strug
Zakład Projektowania i Grafiki Komputerowej

Kraków 2017

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Kraków, dnia

Podpis autora pracy

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Kraków, dnia

Podpis kierującego pracą

Spis treści

Wstęp	4
1 Wprowadzenie	5
1.1 Czym są grafy?	5
1.2 Definicje	7
1.3 Przykłady grafów	13
1.4 Zastosowania grafów	15
2 Wymagania	16
2.1 Tworzenie grafów	16
2.1.1 Importowanie grafów	16
2.1.2 Generowanie grafów	16
2.2 Wizualizacja	17
2.3 Edycja	17
2.4 Przetwarzanie	18
2.5 Eksportowanie	18
2.6 Udostępnianie grafu	18
3 Istniejące rozwiązania	19
3.1 Aplikacje internetowe	19
3.2 Aplikacje desktopowe	26
4 Analiza	27
4.1 Formaty zapisu grafów	27
4.2 Biblioteki do wizualizacji grafów w JavaScript	30
4.2.1 Cytoscape.js	30
4.2.2 sigma.js	30
4.2.3 VivaGraph.js	30
4.2.4 Linkurious.js	30
4.3 Grafowe bazy danych	30

5	Projekt	31
5.1	Interfejs użytkownika	31
6	Implementacja	35
7	Testy	36
8	Wnioski	37
A	Instrukcje dla użytkowników	38
B	Instrukcje dla programistów	39
C	Użyte narzędzia	40
	Bibliografia	42

Wstęp

„This question is so banal, but seemed to me worthy of attention in that geometry, nor algebra, nor even the art of counting was sufficient to solve it¹”. Tak w 1736 roku pisał Leonhard Euler w liście do Giovanniego Marinoniego, włoskiego matematyka i inżyniera, o jednym z pierwszych problemów w teorii grafów – problemie mostów królewskich. Banalny, ale warty uwagi.

W dzisiejszych czasach teoria grafów rozwiązuje wiele nietrywialnych problemów, a część z nich nadal pozostaje otwarta. Grafy znalazły praktyczne zastosowanie w wielu różnorodnych dziedzinach nauki, takich jak informatyka, ekonomia, socjologia, jak również chemia, lingwistyka, geografia czy nawet architektura. Bez wątpienia teoria grafów jest dziedziną matematyki i informatyki, która zasługuje na uwagę, co postaram się w niniejszej pracy przedstawić.

Głównym celem mojej pracy jest stworzenie aplikacji służącej do wizualizacji i edycji grafów w przeglądarce. W przeciągu kilku ostatnich lat mogliśmy zaobserwować gwałtowny wzrost znaczenia aplikacji internetowych. Co dziwne, na dzień dzisiejszy w sieci praktycznie nie ma rozwiązania, które pozwalałoby wczytać graf, wyświetlić, w łatwy sposób przetworzyć, a następnie wyeksportować do znanego formatu. Praca ta jest odpowiedzią na ów deficyt.

W pracy dokonam również przeglądu i analizy bibliotek JavaScript oraz technologii służących do wizualizacji grafów w przeglądarce.

¹Cytat zaczerpnięty z [HW04], wyróżnienie własne.

Rozdział 1

Wprowadzenie

W tym rozdziale omówię czym są grafy – na początku przedstawię intuicyjne wyjaśnienie, po czym podam formalną definicję. Pojawia się także definicje pojęć związanych z grafami, które będą występować w kolejnych rozdziałach pracy. Następnie przytoczę przykłady znanych grafów, takich jak graf pełny czy graf cykliczny. W ostatniej sekcji przedstawię zastosowania grafów.

1.1 Czym są grafy?

Poniższy rysunek 1.1 przedstawia fragment mapy drogowej.



Rysunek 1.1: Fragment mapy drogowej [Wil07, s. 11]

Możemy ją w uproszczeniu przedstawić za pomocą punktów i odcinków, tak jak na rysunku 1.2.



Rysunek 1.2: Uprozczone przedstawienie fragmentu mapy drogowej

Punkty P, Q, R, S, T nazywamy **wierzchołkami**, odcinki nazywamy **krawędziami**, a cały wykres – **grafem**. Punkt przecięcia odcinków PS z QT nie jest wierzchołkiem (nie odpowiada on skrzyżowaniu ulic).

Ten sam graf może modelować również inną sytuację. Przykładowo wierzchołkami mogą być osoby, a krawędź może oznaczać relację znajomości. Tak więc osoba P zna osobę T , ale nie zna osoby R (choć mają wspólnych znajomych Q i S).

Tę samą sytuację obrazuje także graf przedstawiony na rysunku 1.3, w którym pozbyliśmy się przecięcia odcinków PS i QT . Jednak nadal graf ten dostarcza informacji o tym, czy dane osoby znają się lub czy pomiędzy dwoma skrzyżowaniami istnieje bezpośrednia droga. Informacje, które tracimy dotyczą własności „metrycznych” (takich jak długość¹ czy kształt drogi).



Rysunek 1.3: Fragment mapy drogowej lub relacja znajomości narysowana bez „przecięć”

Tak więc graf przedstawia pewien zbiór punktów i dostarcza informacji, które z nich są ze sobą połączone. Oznacza to, że dwa grafy, które modelują tę

¹Choć tę informację możemy zachować, przypisując do każdej krawędzi **wagę**.

samą sytuację, tak jak na rysunkach 1.2 oraz 1.3, są uznawane za identyczne² (niezależnie od sposobu w jaki narysujemy krawędzie oraz jak rozmieścimy wierzchołki).

W tym miejscu warto również wspomnieć, że podobnie jak pomiędzy dwoma skrzyżowaniami lub miastami może istnieć wiele dróg, tak i w grafach dwa wierzchołki może łączyć więcej niż jedna krawędź (tzw. **krawędzie wielokrotne**). Inną analogią są drogi jednokierunkowe – ich grafowym odpowiednikiem są **krawędzie skierowane**.

Po tej wstępnej sekcji, która miała na celu zarysować czym są grafy, nastąpi sekcja zawierająca formalne definicje oraz pojawi się więcej pojęć związanych z teorią grafów.

1.2 Definicje

Graf ogólny, graf prosty

Graf (**graf ogólny**, **multigraf**) G jest parą $(V(G), E(G))$, gdzie $V(G)$ jest skończonym, niepustym zbiorem elementów zwanych **wierzchołkami**, a $E(G)$ jest skończoną rodziną nieuporządkowanych par elementów zbioru $V(G)$ zwanych **krawędziami**³ (tj. $E(G) \subseteq \{\{u, v\} : u, v \in V(G)\}$). Zbiór $V(G)$ nazywamy zbiorem wierzchołków, a rodzinę $E(G)$ – **rodziną krawędzi** grafu G ; gdy nie ma możliwości pomyłki często są skracane do odpowiednio V oraz E . (Niektóre definicje nie wymagają, aby zbiory V oraz E były skończone⁴, ale ponieważ w naszych zastosowaniach będziemy mieli do czynienia ze zbiorami skończonymi, przyjmujemy, że zbiory te są skończone). Wierzchołki $u, v \in V$ są **połączone** krawędzią $\{u, v\}$ (lub krócej uv), gdy $\{u, v\} \in E$.

Zauważmy, że taka definicja dopuszcza sytuację, w której dwa wierzchołki są połączone więcej niż jedną krawędzią (tzw. **krawędź wielokrotna**) oraz gdy wierzchołek jest połączony z samym sobą (tzw. **pętla**). Graf, który nie posiada krawędzi wielokrotnych oraz pętli nazywamy **grafem prostym**⁵.

Sąsiedztwo

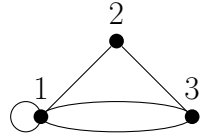
Wierzchołki $u, v \in V$ są **sąsiednie** jeśli istnieje krawędź uv (wówczas wierzchołki u i v są **incydentne** z tą krawędzią). Dwie krawędzie są **sąsied-**

²Wil07, s. 12.

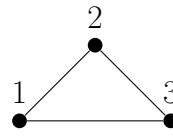
³Wil07, s. 20.

⁴RW08, s. 143.

⁵Wil07, s. 19.



Rysunek 1.4: Przykład grafu ogólnego



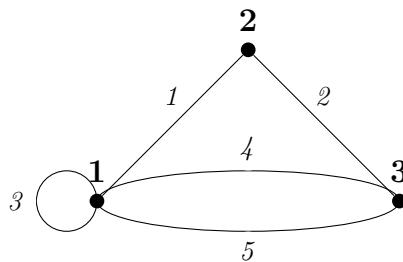
Rysunek 1.5: Przykład grafu prostego

nie, jeśli są incydentne z tym samym wierzchołkiem.

Stopień wierzchołka $v \in V$ (oznaczany jako $\deg(v)$) jest liczbą krawędzi incydentnych z v . **Wierzchołek izolowany** to wierzchołek stopnia 0, a **wierzchołek końcowy** – stopnia 1.

Istnieją dwie standardowe reprezentacje grafów w pamięci komputera: jako **listy sąsiedztwa** lub jako **macierze sąsiedztwa**⁶. Pierwsza z nich polega na zapamiętaniu dla każdego wierzchołka listy wierzchołków z nim sąsiadujących. Druga zakłada, że wierzchołki są ponumerowane liczbami ze zbioru $\{1, 2, \dots, n\}$ (gdzie n oznacza moc zbioru V) i opiera się na stworzeniu macierzy wymiaru $n \times n$, której wyraz o indeksach i, j jest równy liczbie krawędzi łączących wierzchołek o numerze i z wierzchołkiem o numerze j .

Innym sposobem reprezentacji grafu za pomocą macierzy jest **macierz incydencji**. Jeśli krawędzie oznakujemy liczbami ze zbioru $\{1, 2, \dots, m\}$ (gdzie m moc zbioru E), to jest to macierz o rozmiarze $n \times m$, której wyraz o indeksach i, j jest równy 1, jeśli wierzchołek z numerem i jest incydentny z krawędzią j , i jest równy 0 w przeciwnym przypadku⁷.



Rysunek 1.6

Macierz sąsiedztwa A i macierz incydencji M dla grafu z rysunku 1.6:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

⁶BDR99, s. 29; Cor+13, s. 600.

⁷RW08, s. 27.

Podgraf

Podgraf $G' = (V', E')$ grafu $G = (V, E)$ to graf, którego wszystkie wierzchołki należą do V , a krawędzie należą do E (tj. $V' \subseteq V$ oraz $E' \subseteq E$). Jeśli $V' = V$, to podgraf G' nazywany jest **podgrafem rozpinającym**⁸.

Podgraf jest **indukowany** przez V' , jeśli zawiera wszystkie krawędzie z grafu G o końcach w wierzchołkach z V' (tj. $E' = \{(u, v) \in E : u, v \in V'\}$)⁹.

Trasa, ścieżka, droga, cykl

Trasa w grafie G to skończony ciąg krawędzi $v_0v_1, v_1v_2 \dots v_{m-1}v_m$ (zapisywany również w postaci $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow \dots \rightarrow v_m$), w którym każde dwie kolejne krawędzie są albo sąsiednie, albo identyczne¹⁰. Trasa wyznacza ciąg wierzchołków v_0, v_1, \dots, v_m – pierwszy z nich nazywany **wierzchołkiem początkowym**, a ostatni **wierzchołkiem końcowym**. Liczba krawędzi na trasie to **długość trasy**.

Ścieżka to trasa, w której wszystkie krawędzie są różne. Jeśli również wszystkie wierzchołki v_0, v_1, \dots, v_m są różne (dopuszczając jedynie możliwość, aby wierzchołek początkowy był równy wierzchołkowi końcowemu), to ścieżka nazywana jest **drogą**. Droga (lub ścieżka) jest **zamknięta**, jeśli $v_0 = v_m$; ścieżka zamknięta, która posiada co najmniej jedną krawędź to **cykl**; droga zamknięta, która posiada co najmniej jedną krawędź to **cykl prosty**.

Jeśli istnieje ścieżka z u do v , to mówimy, że v jest **osiągalny** z u .

Cykl Eulera

Cykl Eulera to taki cykl w grafie, który przechodzi przez każdą jego krawędź dokładnie jeden raz. Graf spójny, który posiada cykl Eulera nazywany jest **grafem eulerowskim**.

Twierdzenie 1 (Euler, 1736). *Graf spójny G jest grafem eulerowskim wtedy i tylko wtedy, gdy stopień każdego wierzchołka grafu G jest liczbą parzystą.*

Twierdzenie 2. *Skierowany graf spójny G jest eulerowski wtedy i tylko wtedy, gdy każdy wierzchołek grafu G ma tyle samo krawędzi wchodzących i wychodzących.*

⁸BDR99, s. 229.

⁹Cor+13, s. 1195.

¹⁰Wil07, s. 41.

Cykl Hamiltona

Cykl Hamiltona to taki cykl w grafie, który przechodzi przez każdy jego wierzchołek dokładnie jeden raz. Graf spójny posiadający cykl Hamiltona nazywany jest **grafem hamiltonowskim**.

W przeciwieństwie do problemu stwierdzenia czy graf jest eulerowski, nie jest znany warunek konieczny i wystarczający na to, aby graf był hamiltonowski. Problem stwierdzania czy graf jest hamiltonowski należy do jednych z najważniejszych nierozwiązanych problemów teorii grafów¹¹.

Istnieją twierdzenia (np. Twierdzenie 3, 4), które na podstawie cech grafu pozwalają stwierdzić, czy graf jest hamiltonowski. Mają one postać: „jeśli graf ma wystarczająco dużo krawędzi, to ma cykl Hamiltona”¹². Są to jednak implikacje jednostronne – istnieją grafy hamiltonowskie, które nie spełniają poprzedników tych implikacji.

Twierdzenie 3 (Dirac, 1952). *Jeśli w grafie prostym G , który ma n wierzchołków (gdzie $n \geq 3$)*

$$\deg(v) \geq \frac{n}{2}$$

dla każdego wierzchołka v , to graf G jest hamiltonowski.

Twierdzenie 4 (Ore, 1960). *Jeśli graf prosty G ma n wierzchołków (gdzie $n \geq 3$), oraz*

$$\deg(v) + \deg(w) \geq n$$

dla każdej pary wierzchołków niesąsiednich v i w , to graf G jest hamiltonowski.

Graf skierowany

Graf skierowany, **digraf** (ang. *directed graph*) G to para $(V(G), E(G))$, gdzie $V(G)$ niepusty, skończony zbiór elementów zwanych **wierzchołkami**, a $E(G)$ skończony zbiór par *uporządkowanych* elementów ze zbioru $V(G)$ zwanych **krawędziami** (lub **łukami**¹³). Digraf G jest **digrafem prostym**, jeśli wszystkie krawędzie są różne oraz jeśli nie posiada pętli.

Jeśli $e = (v, w) \in E(G)$, to v nazywamy **początkiem krawędzi e** , a w – **końcem krawędzi e** .

Definicje z poprzedniej podsekcji w naturalny sposób uogólniają się na przypadek digrafów¹⁴.

¹¹Wil07, s. 54.

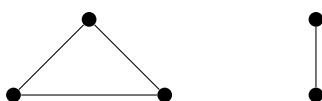
¹²Wil07, s. 54.

¹³Wil07, s. 135.

¹⁴Wil07, s. 136.

Spójność

Założmy, że mamy dwa grafy $G_1 = (V_1, E_1)$ oraz $G_2 = (V_2, E_2)$, gdzie $V_1 \cap V_2 = \emptyset$. Wówczas **sumą** tych grafów $G_1 \cup G_2$ jest graf $G = (V_1 \cup V_2, E_1 \cup E_2)$. Graf nazywamy **spójnym**, jeśli nie można przedstawić go w postaci sumy dwóch grafów, w przeciwnym razie graf jest **niespójny**¹⁵. Każdy graf niespójny G możemy przedstawić jako sumę grafów spójnych, nazywanych **spójnymi składowymi** grafu G (rysunek 1.7 przedstawia graf posiadający dwie spójne składowe).



Rysunek 1.7: Przykład grafu mającego dwie spójne składowe

Niektórzy autorzy¹⁶ podają alternatywną, równoważną¹⁷ definicję grafu spójnego – jest to graf, w którym każda para różnych wierzchołków jest połączona drogą.

Graf skierowany G jest **silnie spójny**, jeśli dla dowolnych dwóch wierzchołków v i w istnieje droga z v do w . Każdy digraf silnie spójny jest spójny, ale nie wszystkie digrafy spójne są silnie spójne.

Dwuspójną składową grafu G nazywamy maksymalny podzbiór krawędzi, taki że każde dwie krawędzie z tego zbioru leżą na wspólnym cyklu prostym¹⁸. W dwuspójnej składowej pomiędzy każdą parą wierzchołków istnieją dwie rozłączne krawędziowo drogi. Wierzchołki należące do co najmniej dwóch różnych dwuspójnych składowych nazywamy **wierzchołkami rozdzielającymi** (lub **punktami artykulacji**)¹⁹. Usunięcie wierzchołka rozdzielającego „rozspójnia” graf. Krawędzie, które nie należą do żadnego cyklu prostego nazywamy **mostami**. Ich usunięcie również „rozspójnia” graf.

Graf, który posiada tylko jedną dwuspójną składową nazywamy **grafem dwuspójnym**²⁰.

¹⁵Wil07, s. 22.

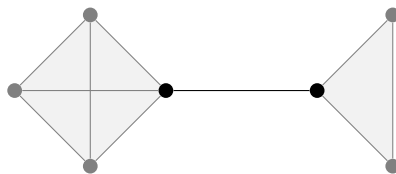
¹⁶RW08, s. 342.

¹⁷Wil07, s. 42.

¹⁸Cor+13, s. 634.

¹⁹Cor+13, s. 633.

²⁰BDR99, s. 232.

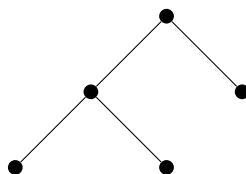


Rysunek 1.8: Przykład grafu zawierającego trzy dwuspójne składowe – punkty artykulacji i mosty zostały zaznaczone na czarno.

Drzewo, las, drzewo rozpinające

Drzewo to graf spójny nie posiadający cykli. **Las** to graf, którego spójnymi składowymi są drzewa.

Drzewem rozpinającym graf G nazywamy podgraf rozpinający G , który nie zawiera cykli²¹.

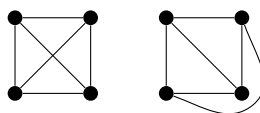


Rysunek 1.9: Przykład grafu będącego drzewem

Planarność

Graf planarny to graf, który można narysować na płaszczyźnie tak, aby żadne dwie krzywe obrazujące krawędzie nie przecinały się ze sobą. Odwzorowanie grafu na płaszczyźnie o tej własności nazywane jest **rysunkiem płaskim** (lub **grafem płaskim**)²².

Na rysunku 1.10 jest narysowany na dwa sposoby graf pełny K_4 (opisany w następnej sekcji 1.3) – drugi sposób jest przykładem rysunku płaskiego.



Rysunek 1.10: K_4 – przykład grafu planarnego

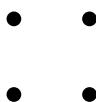
²¹WB75, s. 10.

²²Wil07, s. 82.

1.3 Przykłady grafów

Graf pusty

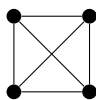
Graf pusty to graf, którego zbiór krawędzi jest zbiorem pustym. Każdy wierzchołek grafu pustego jest wierzchołkiem izolowanym. „*Grafy puste nie są zbyt interesujące*”²³.



Rysunek 1.11: Przykład grafu pustego mającego cztery wierzchołki

Graf pełny

Graf pełny to graf prosty, którego każda para różnych wierzchołków jest połączona krawędzią. Graf pełny mający n wierzchołków (oraz $\frac{n(n-1)}{2}$ krawędzi) oznacza się symbolem K_n .



Rysunek 1.12: Przykład grafu K_4

Graf regularny

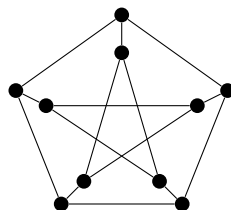
Graf regularny to graf, w którym każdy wierzchołek ma ten sam stopień. Jeśli każdy wierzchołek ma stopień r , to graf nazywa się **grafem regularnym stopnia r** (lub **grafem r -regularnym**)²⁴. Przykładem grafu regularnego stopnia 3 jest **graf Petersena** przedstawiony na rysunku 1.13. Każdy graf pusty jest grafem 0-regularnym, a graf pełny K_n jest grafem regularnym stopnia $n - 1$.

Graf cykliczny, graf liniowy, koło

Graf cykliczny to spójny graf regularny stopnia 2. Graf cykliczny mający n wierzchołków oznacza się symbolem C_n . **Graf liniowy** o n wierz-

²³Wil07, s. 30.

²⁴Wil07, s. 31.



Rysunek 1.13: Graf Petersena

chołkach (oznaczany symbolem P_n) to graf powstały przez usunięcie jednej krawędzi z C_n .

Graf powstający z grafu C_{n-1} poprzez dodanie dodatkowego wierzchołka i połączenie go ze wszystkimi pozostałymi nazywany jest **kołem** i oznaczany jest symbolem W_n .

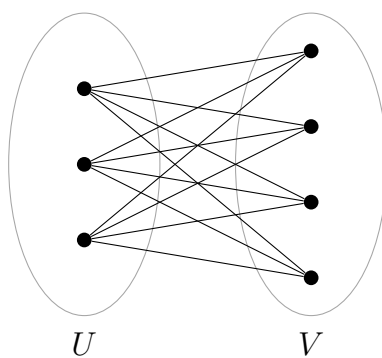


Rysunek 1.14: Przykład grafu C_4 , P_4 i W_4

Grafy dwudzielne

Graf dwudzielny to graf, którego zbiór wierzchołków może być podzielony na dwa rozłączne zbiory U i V w taki sposób, że krawędzie nie łączą wierzchołków z tego samego zbioru.

Ponadto jeśli każdy wierzchołek ze zbioru U jest połączony dokładnie jedną krawędzią z każdym wierzchołkiem ze zbioru V , to taki graf jest nazywany **pełnym grafem dwudzielnym**. Jeśli moc zbioru U wynosi r , a moc zbioru V wynosi s , to taki graf jest oznaczany symbolem $K_{r,s}$ (ma on $r + s$ wierzchołków oraz rs krawędzi).



Rysunek 1.15: Przykład grafu $K_{3,4}$

1.4 Zastosowania grafów

Rozdział 2

Wymagania

Rozdział ten zawiera wszystkie wymagania funkcjonalne, które powinna spełniać aplikacja, aby praca z grafami była możliwie przystępna i intuicyjna.

2.1 Tworzenie grafów

Podstawowym i oczywistym wymaganiem jest, aby użytkownik mógł stworzyć nowy, pusty graf skierowany oraz nieskierowany. Ponadto użytkownik powinien mieć możliwość zaimportowania istniejącego grafu oraz wygenerowania znanego grafu, np. cyklu lub grafu pełnego o zadanej ilości wierzchołków.

2.1.1 Importowanie grafów

Użytkownik powinien móc wczytać graf z komputera lub z chmury (np. Google Drive lub Dropbox) w trzech znanych formatach:

- GraphML,
- GEXF,
- JGF.

Opisy formatów znajdują się w sekcji 4.1.

2.1.2 Generowanie grafów

Użytkownik powinien mieć możliwość wygenerowania znanych grafów, dla zadanych parametrów wejściowych:

- grafu pustego,

- grafu liniowego,
- grafu cyklicznego,
- koła,
- grafu pełnego (lub turnieju dla grafów skierowanych),
- grafu pełnego dwudzielnego,
- grafu Petersena,
- drzewa (o zadanej wysokości i ilości dzieci)

Definicje i przykłady powyższych grafów znajdują się w sekcji 1.3.

Ponadto przydatnym dodatkiem w aplikacji będzie możliwość wygenerowania grafu losowego – o danej ilości wierzchołków oraz parametrem prawdopodobieństwa określającym, czy pomiędzy dwoma wierzchołkami istnieje krawędź.

2.2 Wizualizacja

Użytkownik powinien móc przesuwac widok, przybliżać i oddalać graf oraz rozmieszczać wierzchołki grafu w dowolny sposób. W aplikacji powinna istnieć możliwość zmiany układu grafu: układ oparty na oddziaływaniach (ang. *force-based layout*), układ siatki, układ okręgu, układ koncentryczny, układ hierarchiczny.

Użytkownik powinien być w stanie zmienić kategorię wierzchołka oraz typ krawędzi. Inne typy i kategorie powinny być oznaczone innym kolorem oraz powinna istnieć możliwość zmiany koloru.

Aplikacja powinna również dostarczać opcję wyszukiwania i filtrowania danych (np. tylko dany typ wierzchołków, wierzchołki o stopniu większym niż zadany parametr). Przydatną funkcjonalnością będzie wyświetlanie sąsiadów danego wierzchołka po najechaniu na niego kursorem myszy.

2.3 Edycja

W aplikacji powinien istnieć osobny tryb edycji. Gdy użytkownik jest w tym trybie, powinien móc dodawać oraz usuwać wierzchołki i krawędzie. Powinien być w stanie także dodawać oraz modyfikować etykiety wierzchołków i krawędzi.

Użytkownik powinien mieć możliwość zaznaczania wielu wierzchołków i krawędzi na raz. Użyteczną funkcjonalnością będzie również grupowanie (lub rozgrupowanie) zaznaczonych wierzchołków.

Aplikacja powinna wyświetlać ostatnio wykonaną akcję oraz udostępniać możliwość jej cofnięcia.

2.4 Przetwarzanie

Aplikacja powinna dawać możliwość wykonania podstawowych algorytmów na danym grafie:

- wyszukiwanie najkrótszej ścieżki pomiędzy dwoma wybranymi wierzchołkami,
- znajdowanie minimalnego drzewa rozpinającego,
- obliczanie algorytmu PageRank,
- znajdowanie (silnie) spójnych składowych oraz dwuspójnych składowych,
- znajdowanie cyklu Eulera,
- znajdowanie cyklu Hamiltona.

2.5 Eksportowanie

Użytkownik powinien mieć możliwość wyeksportowania do formatów, które zostały przedstawione w podsekcji 2.1.1.

Ponadto przydatną funkcjonalnością będzie możliwość wyeksportowania obecnego widoku do pliku graficznego, np. PNG lub JPG.

2.6 Udostępnianie grafu

W aplikacji powinna istnieć możliwość udostępniania grafu innym użytkownikom. Po wybraniu tej opcji, powinien zostać wygenerowany unikalny odnośnik do grafu. Po przejściu na ten adres (w podstawowej wersji) inni użytkownicy mogą wyświetlić i edytować graf.

Rozdział 3

Istniejące rozwiązania

W tym rozdziale przedstawię istniejące aplikacje internetowe [Exc] i desktopowe służące do tworzenia i wizualizacji grafów. Tabela 3.1 zawiera porównanie funkcjonalności opisywanych aplikacji internetowych.

3.1 Aplikacje internetowe

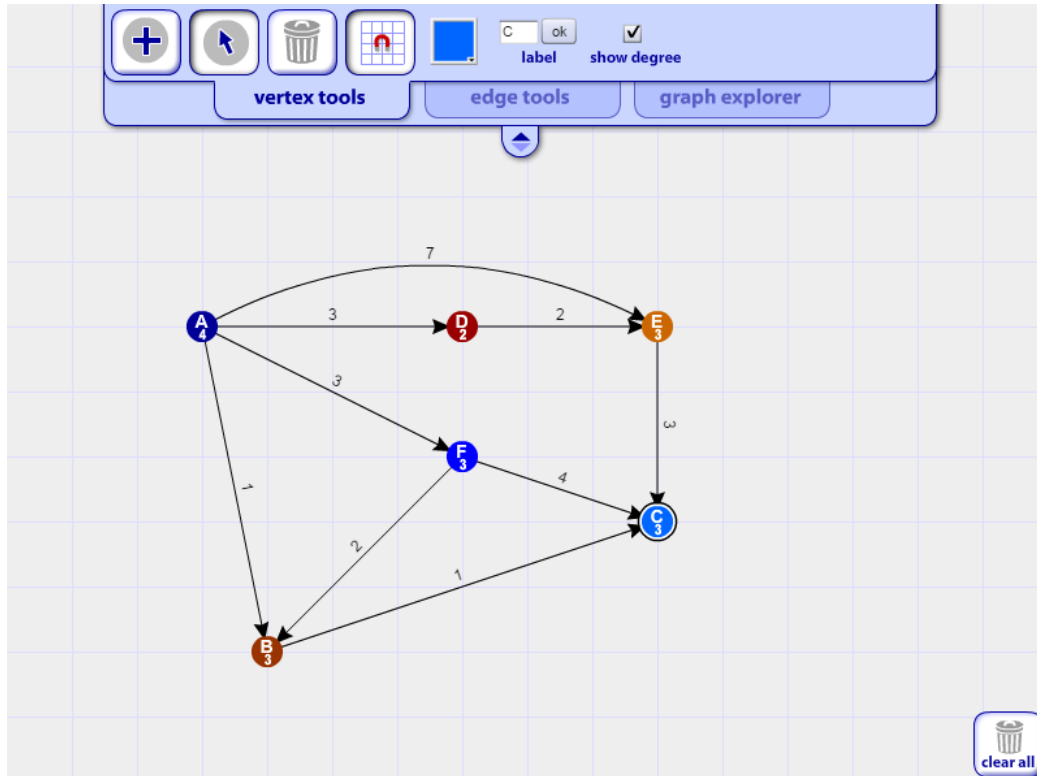
Graph Creator

Adres URL	http://illuminations.nctm.org/Activity.aspx?id=3550
Autor	National Council of Teachers of Mathematics

Aplikacja pozwala tworzyć grafy skierowane i nieskierowane. Posiada możliwość kolorowania wierzchołków, wyrównania ich do siatki oraz ustawienia wag na krawędziach i etykiet w wierzchołkach. Ponadto użytkownik może wyświetlić stopnie wierzchołków oraz wyginać krawędzie. Dodatkową funkcjonalnością jest możliwość zaznaczenia kilku wierzchołków na raz.

Graph Creator nie daje możliwości eksportowania i importowania grafów. Nie można również przesuwać widoku ani oddalać oraz przybliżać grafu. Aplikacja posiada ograniczenie liczby wierzchołków – maksymalna dozwolona ilość to 52 wierzchołki.

Rysunek 3.1: Zrzut ekranu z aplikacji Graph Creator



Graph Online

Adres URL	http://graphonline.ru/en/
Autor	Unick-soft

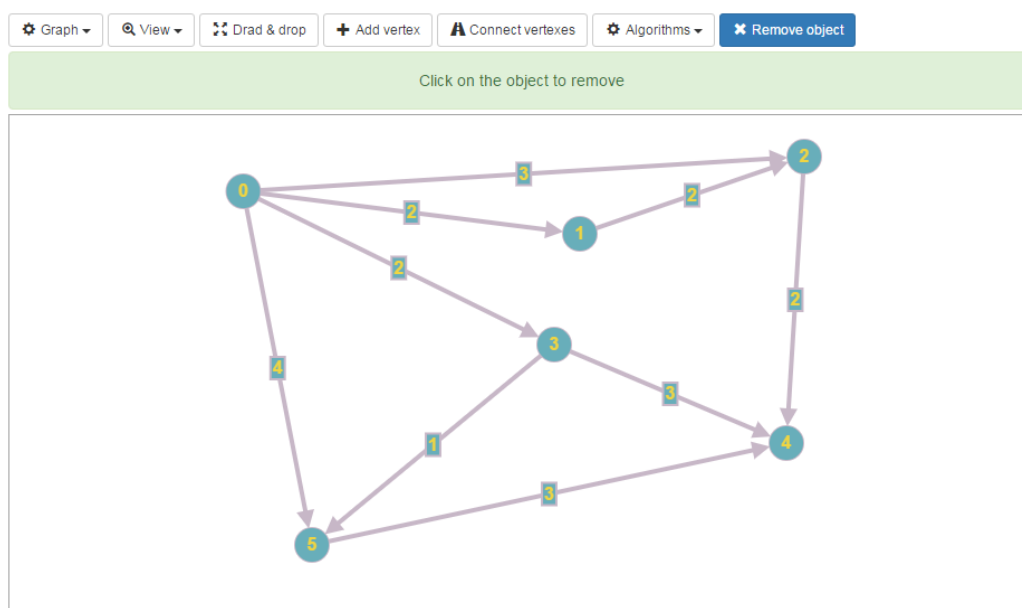
Aplikacja również daje możliwość stworzenia grafów zarówno skierowanych jak i nieskierowanych. Podobnie jak poprzednia aplikacja pozwala na zmianę etykiet wierzchołków, nadanie wag krawędziom oraz na wyświetlenie stopnia wierzchołków. Ponadto użytkownik ma możliwość przesuwania widoku oraz jego przybliżania i oddalania. Dodatkowo *Graph Online* pozwala zapisać graf jako macierz sąsiedztwa lub incydencji oraz wczytać graf zapisany w takiej postaci. Użytkownik może również zapisać graf na serwerze – po zapisaniu wyświetlany jest ogólnodostępny adres URL do grafu. Ciekawą funkcjonalnością jest eksport grafu do obrazka (plik PNG).

Graph Online posiada możliwość wykonania podstawowych algorytmów na grafie, takich jak: znajdowanie najkrótszej ścieżki pomiędzy dwoma wierz-

chołkami, znajdowanie cyklu Eulera, znajdowanie spójnych składowych, znajdowanie minimalnego drzewa rozpinającego.

W przeciwieństwie do poprzedniej aplikacji nie mamy możliwości kolorowania wierzchołków, zaznaczania kilku wierzchołków na raz oraz wyginania krawędzi. Maksymalna dozwolona ilość wierzchołków to 299.

Rysunek 3.2: Zrzut ekranu z aplikacji Graph Online



GraphJS

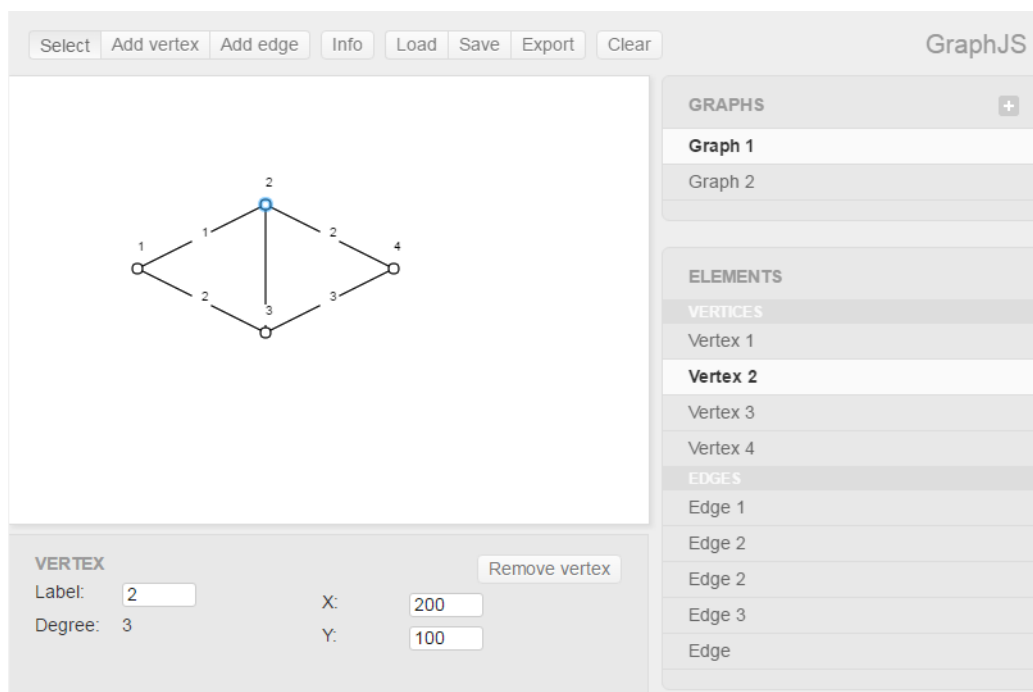
Adres URL	https://dl.dropboxusercontent.com/u/4189520/GraphJS/graphjs.html
Autor	David Kofoed Wind

Aplikacja pozwala na tworzenie grafów nieskierowanych. Podobnie jak w poprzednich aplikacjach możemy nadawać etykiety wierzchołkom i krawędziom. Niespotykaną funkcjonalnością jest możliwość stworzenia kilku grafów i przełączania się pomiędzy nimi oraz możliwość eksportu grafu do formatu \LaTeX (pakiet *TikZ*). Ponadto użytkownik ma możliwość eksportu do własnego formatu **JSON** oraz importu grafu z tego formatu. Aplikacja posiada funkcjonalność zaznaczania wielu wierzchołków na raz.

W *GraphJS* nie ma możliwości przesuwania widoku oraz przybliżania i oddalania grafu. Nie ma również możliwości kolorowania wierzchołków oraz

wyginania krawędzi. Aplikacja zdaje się nie mieć limitu na liczbę wierzchołków – udało się wczytać graf C_{1000} jednakże dodanie kolejnego wierzchołka zajmuje około 10 sekund.

Rysunek 3.3: Zrzut ekranu z aplikacji GraphJS



Graphrel

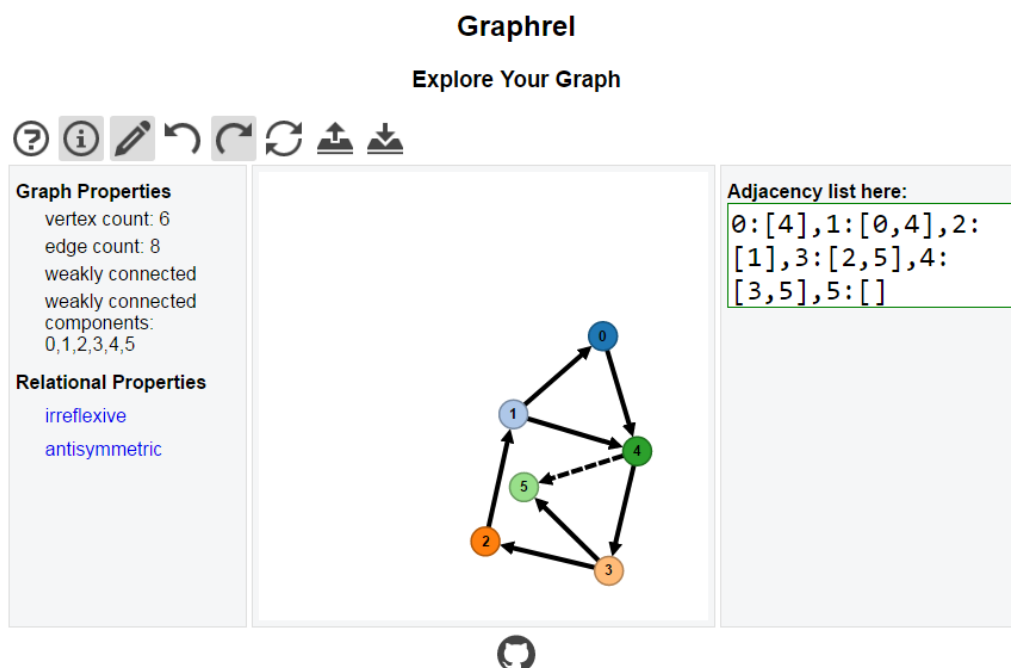
Adres URL	https://yiboyang.github.io/graphrel/
Autor	Yibo Yang

Aplikacja daje możliwość tworzenia grafów skierowanych. W przeciwieństwie do poprzednio opisywanych aplikacji posiada układ kierowany siłą (ang. *force-directed layout*), choć istnieje również opcja samodzielnego rozstawienia wierzchołków – poprzez przytrzymanie klawisza **Ctrl**. Użytkownik może zaimportować graf z formatu stworzonego przez aplikację (tablice list sąsiedztwa dla każdego wierzchołka). Bardzo przydatną i niespotykaną funkcjonalnością jest możliwość cofania oraz ponawiania ostatnich akcji.

W *Graphrel* nie możemy nadawać własnych etykiet na krawędziach ani w wierzchołkach, nie możemy przesuwac widoku ani zmieniać przybliżenia grafu. Nie ma również możliwości wyginania krawędzi, zaznaczania kliku

wierzchołków na raz oraz kolorowania wierzchołków. Do aplikacji udało się wczytać graf C_{100} , przy próbie wczytania C_{101} pojawia się informacja o niepoprawnym formacie.

Rysunek 3.4: Zrzut ekranu z aplikacji Graphrel

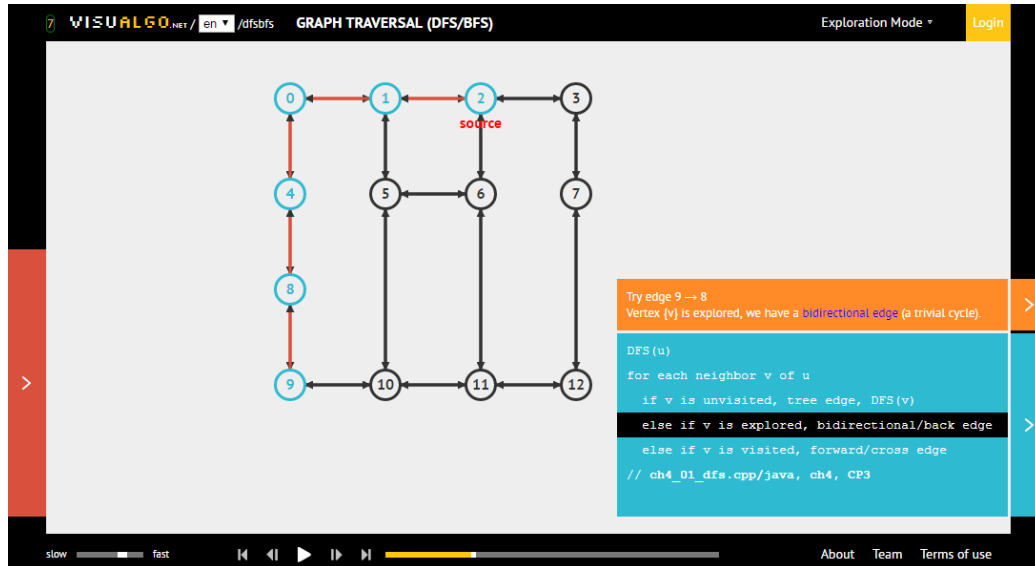


VisuAlgo

Adres URL	https://visualgo.net/en/
Autor	Dr Steven Halim

Aplikacja stworzona przez Dr Stevena Halima z National University of Singapore. Posiada możliwość tworzenia prostych grafów, jednak jej głównym celem jest wizualizacja algorytmów przez animację (nie tylko na grafach, ale również na strukturach danych). Użytkownik wraz z przebiegiem algorytmu może obserwować przebieg kodu, może zatrzymać się w dowolnym jego kroku, cofnąć się do kroku poprzedniego albo przejść do następnego.

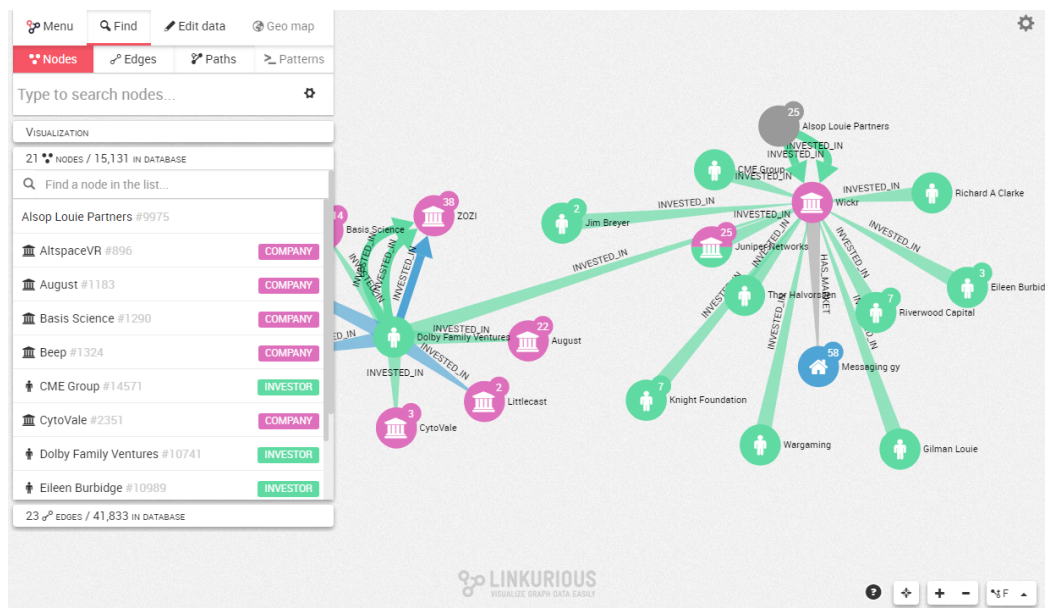
Rysunek 3.5: Zrzut ekranu z aplikacji VisuAlgo



Linkurious

Adres URL <http://linkurio.us>
Autor Linkurious

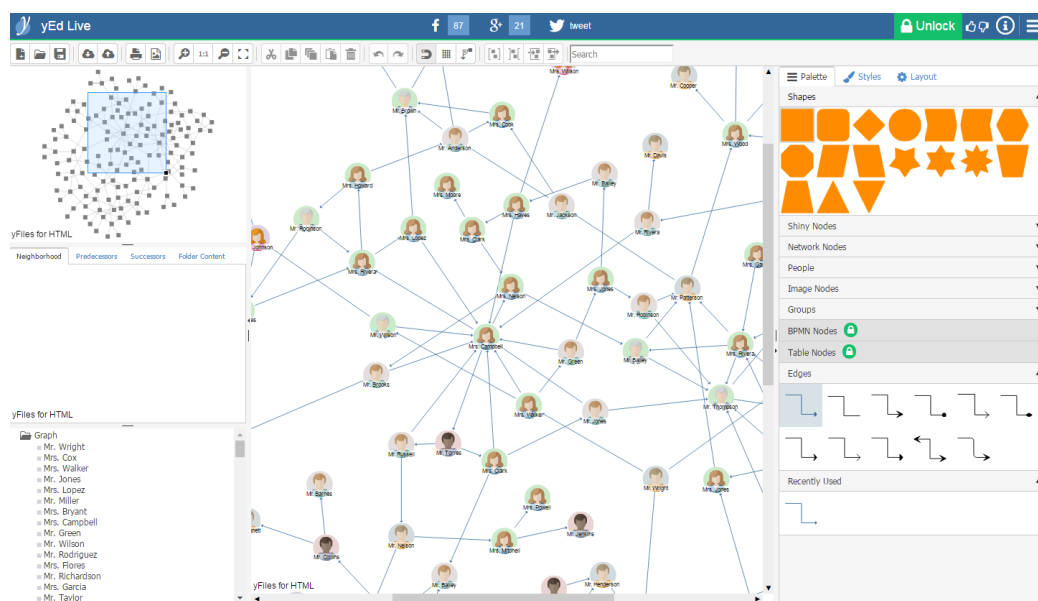
Rysunek 3.6: Zrzut ekranu z aplikacji Linkurious



yEd Live

Adres URL	https://www.yworks.com/yed-live/
Autor	yWorks

Rysunek 3.7: Zrzut ekranu z aplikacji yEd Live



Tablica 3.1: Porównanie aplikacji *Graph Creator*, *Graph Online*, *GraphJS* i *Graphrel*

	<i>Graph Creator</i>	<i>Graph Online</i>	<i>GraphJS</i>	<i>Graphrel</i>
graf nieskierowany	✓	✓	✓	–
graf skierowany	✓	✓	–	✓
etykiety na krawędziach	✓	✓	✓	–
etykiety w wierzchołkach	✓	✓	✓	–
kolorowanie wierzchołków	✓	–	–	–
wyginanie krawędzi	✓	–	–	–
zaznaczanie kilku wierzchołków	✓	–	✓	–
przesuwanie widoku	–	✓	–	–
przybliżanie/oddalanie	–	✓	–	–
zapisywanie/wczytywanie	–	✓ ¹	✓ ²	✓ ³

¹ jako macierz sąsiedztwa lub jako obrazek

² własny format JSON lub jako L^AT_EX

³ własny format (listy sąsiedztwa)

3.2 Aplikacje desktopowe

Gephi

<https://gephi.org/>

GraphTea

<http://www.graphtheorysoftware.com/>

Cytoscape

<http://www.cytoscape.org/>

yEd Graph Editor

<https://www.yworks.com>

Rozdział 4

Analiza

4.1 Formaty zapisu grafów

Istnieje wiele formatów służących do opisu grafów. Do najpopularniejszych należą [MB04; Gep]

- GraphML – *Graph Markup Language*
- GEXF – *Graph Exchange XML Format*
- JGF – *JSON Graph Format*
- DOT – format programu Graphviz
- GML – *Graph Modeling Language*
- DGML – *Directed Graph Markup Language*
- XGML – *eXtensible Graph Markup and Modeling Language*

Graph Markup Language (GraphML)

Listing 4.1: Przykład grafu w formacie GraphML

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<graphml xmlns="http://graphml.graphdrawing.org/xmlns"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://graphml.graphdrawing.org/xmlns
    http://graphml.graphdrawing.org/xmlns/1.0/graphml.xsd">
  <graph id="G" edgedefault="undirected">
    <node id="1"/>
    <node id="2"/>
    <edge source="1" target="2"/>
  </graph>
</graphml>
```

Graph Exchange XML Format (GEXF)

Listing 4.2: Przykład grafu w formacie GEXF

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<gexf xmlns="http://www.gexf.net/1.2draft" version="1.2">
  <graph mode="static" defaultedgetype="directed">
    <nodes>
      <node id="0" label="Hello" />
      <node id="1" label="Word" />
    </nodes>
    <edges>
      <edge id="0" source="0" target="1" />
    </edges>
  </graph>
</gexf>
```

JSON Graph Format (JGF)

Listing 4.3: Przykład grafu w formacie JGF

```
{
  "graph": {
    "nodes": [{
      "id": "A",
    },
    {
      "id": "B",
    }
  ],
  "edges": [{
    "source": "A",
    "target": "B"
  }]
}
```

DOT Graphviz

Listing 4.4: Przykład grafu w formacie DOT

```
graph graphname {
  a -- b -- c;
  b -- d;
}
```

4.2 Biblioteki do wizualizacji grafów w JavaScript

	Cytoscape.js	Sigma	VivaGraphJS
Licencja	MIT	MIT	BSD 3
Rozmiar	294	112,9	60,4
Renderowanie SVG	•	tak	•
HTML5 Canvas	•	tak	•
WebGL Canvas	•	tak	•
Obsługiwane formaty	•	•	•
Rozszerzalność	•	•	•
•	•	•	•

4.2.1 Cytoscape.js

4.2.2 sigma.js

4.2.3 VivaGraph.js

4.2.4 Linkurious.js

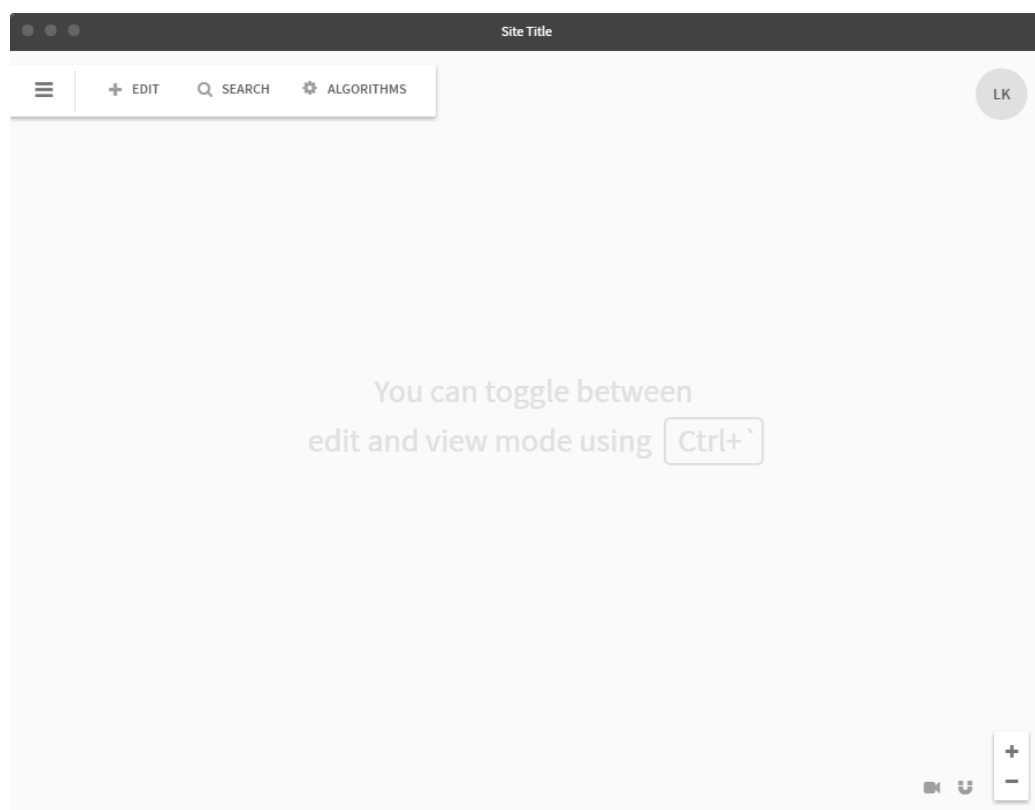
4.3 Grafowe bazy danych

Rozdział 5

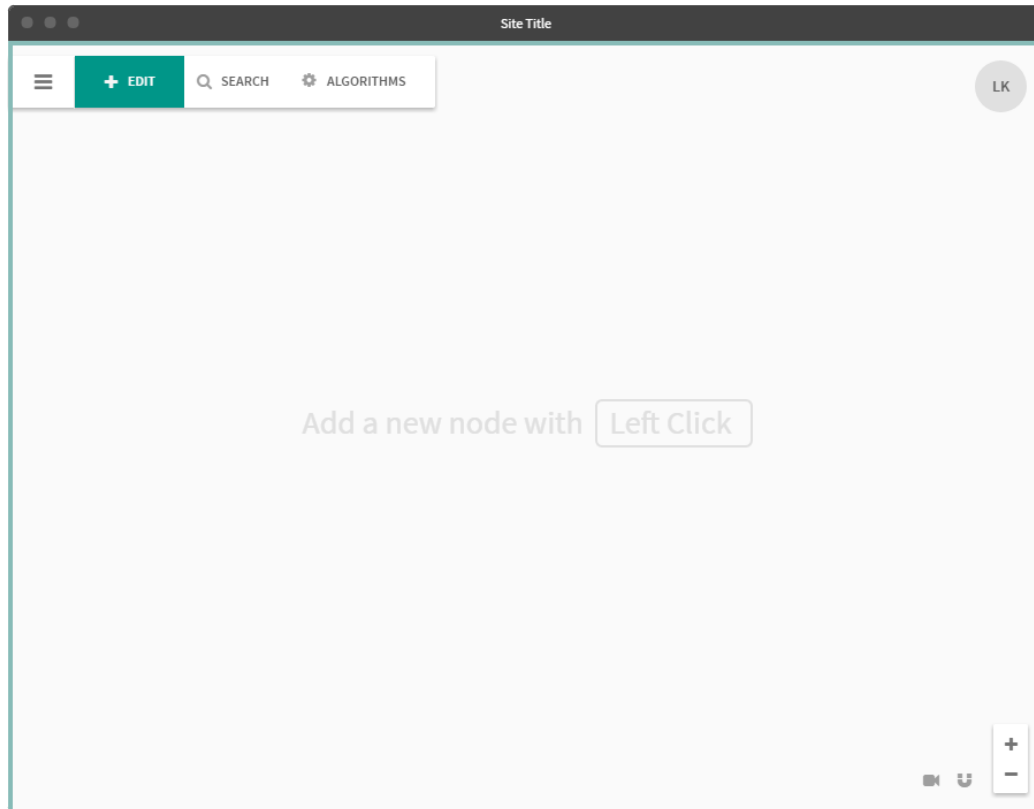
Projekt

5.1 Interfejs użytkownika

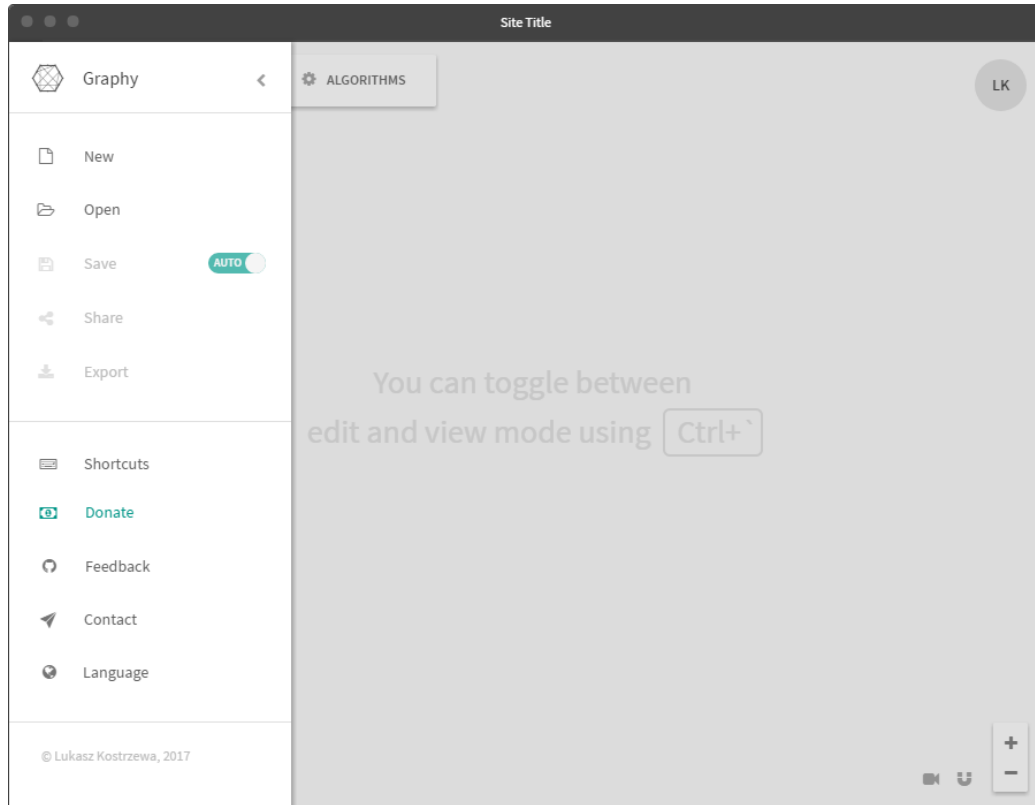
Rysunek 5.1: Tryb widoku grafu



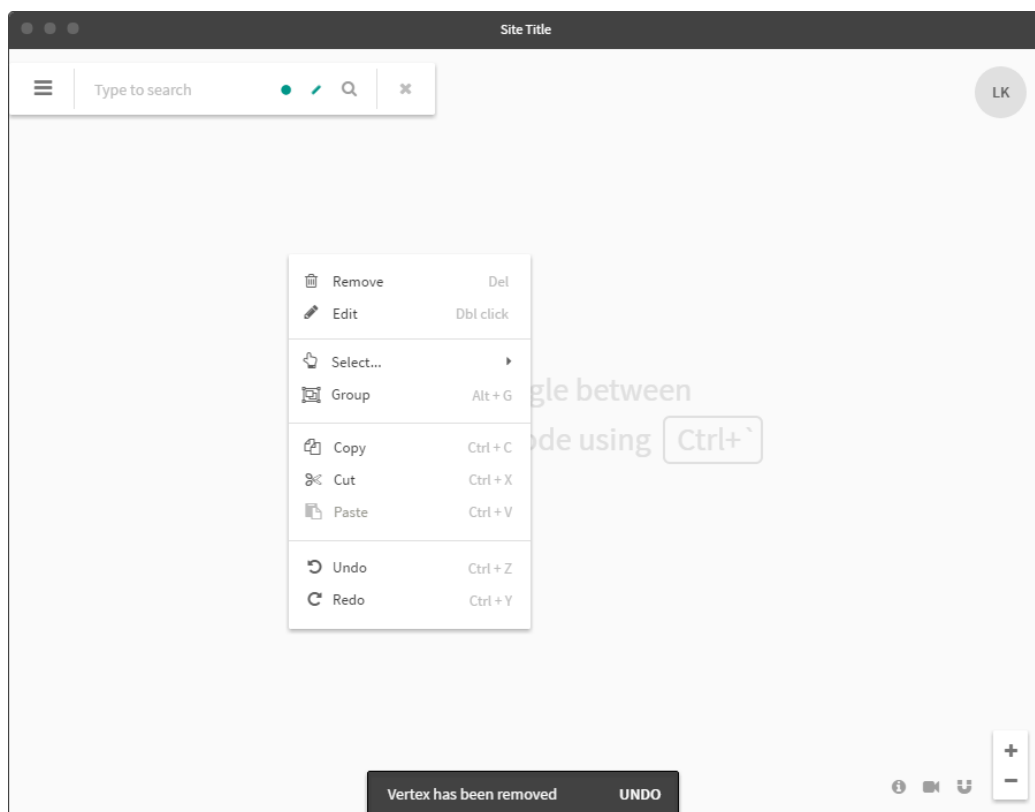
Rysunek 5.2: Tryb edycji grafu



Rysunek 5.3: Widok menu



Rysunek 5.4: Menu kontekstowe i informacja o ostatniej akcji



Rozdział 6

Implementacja

Rozdział 7

Testy

Rozdział 8

Wnioski

Dodatek A

Instrukcje dla użytkowników

Dodatek B

Instrukcje dla programistów

Dodatek C

Użyte narzędzia

Bibliografia

- [WB75] Robin J. Wilson i Lowell W. Beineke. *Applications of Graph Theory*. London: Academic Press, 1975. ISBN: 0-12-757840-4.
- [BDR99] Lech Banachowski, Krzysztof Diks i Wojciech Rytter. *Algorytmy i struktury danych*. 2 wyd. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999. ISBN: 83-204-2403-8.
- [HW04] Brian Hopkins i Robin Wilson. „*The Truth about Königsberg*”. W: *College Mathematics Journal* 35 (maj 2004), s. 198–207. URL: https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/22/Polya/hopkins.pdf (term. wiz. 29.04.2017).
- [MB04] S. Mohammed i M. Bernard. *Graph File Formats*. Spraw. tech. Mona, Kingston, Jamajka: Department of Mathematics and Computer Science, The University of the West Indies, 2004. URL: http://www2.sta.uwi.edu/~mbernard/research_files/fileformats.pdf (term. wiz. 29.04.2017).
- [Wil07] Robin J. Wilson. *Wprowadzenie do teorii grafów*. 2 wyd. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007. ISBN: 978-83-01-15066-2.
- [RW08] Kenneth A. Ross i Charles R.B. Wright. *Matematyka dyskretna*. 5 wyd. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008. ISBN: 978-83-01-14380-0.
- [Cor+13] Thomas H. Cormen i in. *Wprowadzenie do algorytmów*. 7 wyd. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013. ISBN: 978-83-01-16911-4.
- [Exc] Mathematics Stack Exchange. *Online tool for making graphs (vertices and edges)*. Stack Overflow. URL: <https://math.stackexchange.com/questions/13841/online-tool-for-making-graphs-vertices-and-edges> (term. wiz. 02.05.2017).

[Gep] Gephi. *Supported Graph Formats*. The Gephi Consortium. URL:
`https : / / gephi . org / users / supported - graph - formats /`
(term. wiz. 29.04.2017).