

Kierunek: **INF-PPT**

Specjalność: -

PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

Aplikacja rozwiązująca nonogramy

Mateusz Wałęjko

Opiekun pracy
dr Marcin Michalski

Słowa kluczowe: nonogram, solver, aplikacja

Spis treści

Spis rysunków	III
Spis tabel	IV
Wstęp	1
1 Analiza problemu	3
1.1 Przedstawienie nonogramów	3
1.1.1 Opis	3
1.1.2 Definicje	4
1.2 Wymagane zagadnienia matematyczne	4
1.3 Przypisanie problemu rozwiązywania nonogramów do odpowiedniej klasy złożoności	5
2 Projekt systemu	9
2.1 Wymagania aplikacji	9
2.2 Nawigacja pomiędzy aktywnościami	9
3 Implementacja systemu	11
3.1 Opis technologii	11
3.1.1 React Native	11
3.1.2 Dodatkowe biblioteki	11
3.2 Baza danych	12
4 Solver nonogramów	13
4.1 Wersje solverów	13
4.1.1 Solver całościowy	13
4.1.2 Solver osiowy	14
4.1.3 Solver eliminacyjny	15
4.2 Porównanie wydajności solverów	17
4.2.1 Metodyka badań	17
4.2.2 Solver całościowy	18
4.2.3 Solver osiowy	18
4.2.4 Solver eliminacyjny	20
4.2.5 Wnioski	22
4.3 Predefiniowane łamigłówki	22
4.3.1 Wymagania dla łamigłówek użytkownika	22
4.3.2 Zatwierdzenie spełniania wymienionych wymagań przez łamigłówkę	22
4.3.3 Wymagania dla łamigłówek solvera	23
4.4 Zestaw danych	23
5 Instalacja i wdrożenie	25
5.1 Środowisko	25
5.2 Instalacja	25
5.3 Obsługa	25

5.3.1	Nawigacja do łamigłówek	26
5.3.2	Rozwiązywanie łamigłówek	26
5.3.3	Wykorzystanie solvera	26
6	Podsumowanie	27
6.1	Aplikacja i praca	27
6.2	Możliwości rozwoju	27
	Bibliografia	29

Spis rysunków

1.1	Przykładowa plansza	3
2.1	Diagram zależności między aktywnościami	10
3.1	Diagram bazy danych	12
4.1	Możliwe układy dla przykładowej planszy	13
4.2	Możliwe układy dla przykładowej linii	15
4.3	Przykład wnioskowania na podstawie możliwych kombinacji	16
4.4	Wizualizacja częściowej weryfikacji	19
4.5	Przykład łamigłówki z wieloma rozwiązaniami	23
4.6	Zestaw danych	24
5.1	Wizualizacja wykorzystania gestu przesunięcia	26

Spis tabel

4.1	Wyniki testów dla solvera całościowego	18
4.2	Wyniki testów dla solvera osiowego	19
4.3	I część wyników dla solvera eliminacyjnego	21
4.4	II część wyników dla solvera eliminacyjnego	21

Wstęp

Praca poświęcona jest aplikacji rozwiązującej nonogramy. W pracy opisane są zagadnienia teoretyczne potrzebne do zrozumienia problemu, układ i sposób użycia samej aplikacji, a także porównanie algorytmów rozwiązujących nonogramy (określanych dalej jako “solvery”).

Celem pracy jest stworzenie aplikacji łączącej dwie główne funkcjonalności: udostępnienie użytkownikowi zestawu łamigłówek do rozwiązania oraz zapewnienie dostępu do solvera, dzięki któremu będzie mógł zobaczyć rozwiązanie napotkanych łamigłówek. Dodatkowym wymogiem jest łatwy dostęp do obydwu wymienionych funkcjonalności.

Aplikacje dostępne na rynku nie spełniają obydwu wymagań równocześnie. Programy dedykowane dla urządzeń mobilnych nie umożliwiają sprawdzenia rozwiązań nonogramów za pomocą algorytmu zintegrowanego z aplikacją. Rozwiązania dostępne na komputerach osobistych dzielą się na te udostępniające dostęp do solvera i na takie, które oferują zestawy łamigłówek do rozwiązania. Brakuje jednak aplikacji, która łączy te dwie funkcjonalności i jest łatwo dostępna poprzez urządzenie mobilne.

Praca podzielona jest na 6 części.

W pierwszej części opisany jest problem rozwiązywania nonogramów. Wyłuszczone są definicje potrzebne do zrozumienia problemu. Na końcu, za pomocą opisanych zagadnień, omówiona jest trudność problemu.

Druga część zawiera schematyczny opis aplikacji - listę wymagań spełnianych przez aplikację oraz zarys sposobu nawigacji po niej.

W trzecim rozdziale zawarte są informacje dotyczące implementacji: użyte technologie wraz z ich opisem oraz schemat wykorzystanej bazy danych.

Czwarta część skupia się na opisie solvera wykorzystanego w aplikacji. Nakreślona jest ewolucja solvera w trakcie rozwoju aplikacji, zaproponowane są także heurystyki mogące usprawnić działanie solvera. Różne implementacje wraz z usprawnieniami są poddane testom, by ocenić ich wydajność, oraz podane są wnioski wyciągnięte z badań. Dodatkowo nakreślone są wymagania spełniane przez łamigłówki dodane do aplikacji.

Piąty rozdział to krótka instrukcja dla użytkownika opisująca wymagania do uruchomienia aplikacji.

Na końcu, w szóstej części, zawarte jest podsumowanie pracy oraz kierunki, w których można dokonać dalszego rozwoju aplikacji.



Rozdział 1

Analiza problemu

W tym rozdziale przedstawiona jest definicja nonogramów oraz sposób ich rozwiązywania. W kolejnej części rozdziału wypisane są także definicje potrzebne do zrozumienia złożoności problemu, jakim jest rozwiązywanie nonogramów.

1.1 Przedstawienie nonogramów

1.1.1 Opis

Nonogramy (znane także jako *Paint by Number* oraz *Picross*) to łamigłówki, w których celem jest odpowiednie wypełnienie komórek na siatce tak, by uzyskać określony wzór (np. obrazek). W tym celu należy kolorować pola zgodnie ze wskazówkami umieszczonymi obok każdego wiersza oraz kolumny na siatce. Wskazówki mają postać ciągu liczb - każda z liczb oznacza liczbę wypełnionych komórek z rzędu, a pomiędzy grupami wypełnionych komórek znajduje się przynajmniej jedna pusta komórka.

Uściślając powyższą, nieformalną definicję, nonogram to łamigłówka na siatce wielkości $w \times h$, gdzie w oznacza szerokość planszy wyrażoną w liczbie komórek, a h wysokość planszy wyrażoną w liczbie komórek. Dla każdego wiersza i kolumny mamy przedstawiony ciąg liczb $(H_k) = (h_1, h_2, \dots, h_k)$ będący wskazówką dla danej linii. Dany element h_i opisuje blok stworzony z h_i wypełnionych komórek z rzędu i , jeśli h_i nie jest pierwszym elementem ciągu, to blok opisany przez h_i jest oddzielony przynajmniej jedną pustą komórką od bloku opisanego przez h_{i-1} , oraz jeśli h_i nie jest ostatnim elementem ciągu, to blok opisany przez h_i jest oddzielony przynajmniej jedną pustą komórką od bloku opisanego przez h_{i+1} . Linie spełniającą zadaną wskazówkę opisuje wyrażenie regularne: $l = 0^*1^{h_1}0^+1^{h_2}0^+ \dots 0^+1^{h_n}0^*$, gdzie 0, 1 oznaczają odpowiednio pustą i wypełnioną komórkę, h_i jest i -tym elementem ciągu (H_k) , będącego wskazówką dla wiersza/kolumny, a $|l| = n$, gdzie $n = w$ dla wiersza i $n = h$ dla kolumny. Rozwiązaniem nonogramu jest wypełnienie zadanej planszy w taki sposób, by dla każdego wiersza oraz każdej kolumny wskazówki dla nich były spełnione.

		1	3	2	4	1			1	3	2	4	1
	0								0				
	1								1				
1	1								1	1			
	3								3				
	5								5				

(a) plansza przed rozwiązaniem

(b) plansza po rozwiązaniu

Rysunek 1.1: Przykładowa plansza



1.1.2 Definicje

Definicja 1.1 Blok wypełnionych komórek w linii tworzy grupa wszystkich wypełnionych komórek z rzędu, nieoddzielonych żadną pustą komórką.

Definicja 1.2 Wskazówką nazywamy ciąg $(H_k) = (h_1, h_2, \dots, h_k)$ liczb, które opisują długości kolejnych bloków dla danej linii.

Uwaga. Dla uproszczenia opisu algorytmów następuje założenie, że pusta linia jest opisywana przez wskazówkę będącą ciągiem pustym.

Definicja 1.3 Instancją problemu nonogramu jest czwórka $N = (w, h, (R_h), (C_w))$, gdzie w i h to odpowiednio szerokość i wysokość planszy, a $(R_h) = ((H_{r_1}), (H_{r_2}), \dots, (H_{r_h}))$ i $(C_w) = ((H_{c_1}), (H_{c_2}), \dots, (H_{c_w}))$ są ciągami wskazówek dla wierszy oraz kolumn.

1.2 Wymagane zagadnienia matematyczne

Definicja 1.4 (Problem decyzyjny) Problem decyzyjny to problem, na który odpowiedź stanowi 'tak' lub 'nie'.

Problem decyzyjny to pojęcie kluczowe dla klasyfikacji problemu do wybranej klasy złożoności. By móc sklasyfikować wybrany problem (np. rozwiązanie nonogramu) do jakiejś klasy złożoności, należy przedstawić go w postaci problemu decyzyjnego.

Przykład 1.1 Czy zadany nonogram $N = (w, h, (R_h), (C_w))$ ma rozwiązanie?

Definicja 1.5 (Klasa złożoności P) Klasa złożoności P zawiera wszystkie problemy decyzyjne, których rozwiązanie można znaleźć w czasie wielomianowym.

Przykład 1.2 Znalezienie najkrótszej ścieżki między dwoma punktami w grafie należy do klasy P , ponieważ algorytm Dijkstry znajduje najkrótszą ścieżkę w czasie wielomianowym. Sformułowanie tego problemu w postaci problemu decyzyjnego mogłoby brzmieć następująco: Czy dla danego wejściowego grafu $G = (V, E)$ istnieje ścieżka z punktu $v_1 \in V$ do punktu $v_2 \in V$ o długości nie większej niż x ?

Definicja 1.6 (Klasa złożoności NP) Klasa złożoności NP zawiera wszystkie problemy decyzyjne, których rozwiązanie dla odpowiedzi pozytywnej można zweryfikować w czasie wielomianowym.

Przykład 1.3 Mając zbiór I przedmiotów, gdzie przedmiot i_n to dwójka (v_n, w_n) , gdzie v_n to wartość, a w_n to waga, oraz ograniczenie górne na sumę wag wybranych przedmiotów w_{max} , czy można wybrać przedmioty w taki sposób, by nie przekroczyć limitu wagi w_{max} , a by suma wartości wybranych przedmiotów była większa lub równa c ?

Tak zadany problem to wersja decyzyjna problemu plecakowego. Być może nie istnieje algorytm znajdujący przydział przedmiotów w czasie wielomianowym, ale mając przedstawione rozwiązanie $S \subseteq I$ można zsumować wartości przedmiotów z S i sprawdzić, czy jest to poprawne rozwiązanie.

Należy zauważyć, że każdy problem z klasy P należy także do klasy NP , ponieważ rozwiązanie problemu decyzyjnego jest jednym ze sposobów weryfikacji poprawności jego rozwiązania. To czy $P = NP$ jest jak do tej pory nierozwiązanym problemem i stanowi jeden z problemów milenijnych.

Definicja 1.7 (Redukcja wielomianowa) Problem A jest redukowalny do problemu B w czasie wielomianowym, jeśli wejścia dla problemu A można przekształcić na wejścia dla problemu B w czasie wielomianowym, a następnie rozwiązać problem A wywołując procedurę rozwiązującą problem B wielomianową liczbę razy.

Przykład 1.4 *Mnożenie liczb $a \cdot b$ można zdefiniować za pomocą operacji dodawania w następujący sposób:*

$$a \cdot b = \underbrace{a + a + \dots + a}_b$$

Należy zauważyć, że jeśli problem A jest redukowalny do problemu B w czasie wielomianowym, a problem B należy do klasy P , to problem A także należy do klasy P , jako że sposobem na jego rozwiązanie jest użycie redukcji wielomianowej, by traktować go jako instancję problemu B , a następnie rozwiązanie go za pomocą algorytmu działającego w czasie wielomianowym.

Wniosek 1.1 *Jeśli istnieje redukcja z A w B w czasie wielomianowym, to B jest co najmniej tak złożony, jak A .*

Definicja 1.8 (Klasa problemów NP-trudnych) *Problem H należy do klasy problemów NP-trudnych, jeśli każdy problem w klasie NP jest redukowalny do H w czasie wielomianowym.*

W przypadku klasy problemów NP-trudnych nie ma wymogu, by należące do niej problemy były problemami decyzyjnymi.

Przykład 1.5 *Przykładem problemu NP-trudnego jest problem spełnialności (SAT): 'Czy dla danej formuły logicznej istnieje wartościowanie, dla którego zadana formuła jest spełniona?'. Przynależność tego problemu do tej klasy została udowodniona w 1971 roku przez Stephena Cooka i Leonida Levina w dowodzie twierdzenia Cooka-Levina [1].*

Dla udowadniania przynależności problemu do tej klasy kluczowa jest obserwacja, że istnienie redukcji wielomianowej z A w B implikuje przynależność B do tej klasy, o ile A także do niej należy.

Definicja 1.9 (Klasa problemów NP-zupełnych) *Problem decyzyjny C należy do klasy problemów NP-zupełnych, jeśli należy do klas problemów NP-trudnych oraz NP.*

Wniosek 1.2 *Pokazanie, że problem decyzyjny A jest NP-zupełny sprowadza się do pokazania, że istnieje redukcja wielomianowa z problemu H z klasy problemów NP-trudnych oraz że rozwiązanie problemu A można zweryfikować w czasie wielomianowym.*

1.3 Przypisanie problemu rozwiązania nonogramów do odpowiedniej klasy złożoności

Mając zdefiniowane pojęcia potrzebne do klasyfikacji problemu do odpowiedniej klasy złożoności, należy znaleźć klasę, do jakiej należy rozwiązywanie nonogramów. Z uwagi na specyfikę klas, klasyfikacji poddana zostanie decyzyjna wersja problemu, tj. 'Czy zadany nonogram $N = (w, h, (R_h), (C_w))$ ma rozwiązanie?'.

Twierdzenie 1.1 *Problem rozwiązania nonogramu jest w NP*

Niech $M_{h,w}$ będzie macierzą oznaczającą rozwiązanie zadanego nonogramu $N = (w, h, (R_h), (C_w))$, gdzie $m_{i,j}$ oznacza stan komórki w wierszu i i kolumnie j , oraz $m_{i,j} = 1$, jeśli komórka jest wypełniona, a $m_{i,j} = 0$, jeśli komórka jest pusta. Macierz $M_{h,w}$ jest mapowana na $h + w$ list, będących ciągami stanów komórek w kolejnych wierszach, i kolumnach.



Do weryfikacji rozwiązania użyjemy następującej procedury:

Pseudokod 1.1: Poprawność rozwiązania w osi

Input: Lista linii L , lista wskazówek LH , długość linii n

Output: Poprawność rozwiązania w osi (**true/false**)

```

1  for  $i \leftarrow 1$  to  $|L|$  do
2       $Li \leftarrow L[i]$ ;
3       $Hi \leftarrow LH[i]$ ;
4       $a \leftarrow 0$ ;
5       $A \leftarrow []$ ;
6      for  $c \in Li$  do
7          if  $c = 1$  then
8               $a \leftarrow a + 1$ ;
9          else
10             if  $a > 0$  then
11                  $A.push(a)$ ;
12                  $a \leftarrow 0$ ;
13         if  $a > 0$  then
14              $A.push(a)$ ;
15         for  $j \leftarrow 1$  to  $|Hi|$  do
16             if  $A[j] \neq Hi[j]$  then
17                 return false;
18 return true;
```

W procedurze 1.1 następuje weryfikacja rozwiązania w danej osi. Przykładowo, wywołując procedurę 1.1 dla listy wierszy i ich wskazówek, weryfikujemy Poprawność rozwiązania w poziomie. Weryfikacja rozwiązania następuje przez wywołanie procedury dwukrotnie, dla wierszy oraz kolumn. Jeśli w obu przypadkach procedura zwróci **true**, to rozwiązanie jest poprawne.

Czas wykonania procedury jest zależny od wielkości planszy. Zewnętrzna pętla wykonuje się tyle razy, ile jest linii w osi (h w przypadku wierszy, w w przypadku kolumn). Na początku pętli dochodzi do ekstrakcji pewnych danych do lokalnych zmiennych oraz inicjalizacji tablicy - w zależności od języka użytego do implementacji, ta grupa operacji zajmuje czas stały bądź liniowy. Następnie uruchamiana jest pierwsza wewnętrzna pętla. W tej pętli analizowane są dane w danej linii, by zmapować układ jej komórek do wskazówki, jaką reprezentuje. Złożoność operacji w każdej iteracji jest stała, jeśli założymy, że powiększenie tablicy o dodatkowy element wymaga stałego czasu - w p.p. czas wykonania iteracji może być liniowy. Liczba wykonań tej pętli zależy od długości linii. Po wykonaniu pierwszej pętli, w zależności od układu stanu komórek w linii, może dojść do kolejnego powiększenia tablicy o dodatkowy element - złożoność nie przekracza liniowej. Na końcu zewnętrznej pętli wykonywana jest druga pętla, która iteruje po elementach wskazówki zadanej w rozwiązaniu, i porównuje ich wartość do analogicznych elementów we wskazówce odtworzonej z układu linii. Rozbieżność oznacza, że rozwiązanie nie jest prawidłowe, i procedura przedwcześnie zakańcza wykonanie. Długość wskazówki można z góry ograniczyć przez $\lceil \frac{x}{2} \rceil$, gdzie x jest długością linii.

Zadana procedura sprawdza poprawność rozwiązania nonogramów, a jej złożoność, w zależności od implementacji operacji na tablicach, może wynosić $\mathcal{O}(n^2)$ bądź $\mathcal{O}(n^3)$. Zaproponowana procedura ma złożoność wielomianową, zatem problem decyzyjny rozwiązywania nonogramów należy do klasy *NP*.

Twierdzenie 1.2 *Problem rozwiązywania nonogramu jest NP-trudny*

Dowód NP-trudności rozwiązywania nonogramów jest obszerny i wykracza poza zakres tej pracy. Przykładowy dowód jest opisany w pracy [2] i jego zarys jest następujący. Autor rozpoczyna dowód od powołania się na NP-trudność gry na grafach, nazwanej jako *Bounded Nondeterministic Constraint Logic*. Następnie, poprzez redukcję, autor udowadnia NP-trudność zmodyfikowanej wersji gry, określonej na grafach planarnych. Po udowodnieniu tego faktu autor konstruuje redukcję wielomianową z planarnej *Bounded*



Nondeterministic Constraint Logic w rozwiązywanie nonogramów, tym samym udowadniając ich przynależność do tej klasy problemów.

Twierdzenie 1.3 *Problem rozwiązywania nonogramu jest NP-zupełny*

Problem rozwiązywania nonogramu został zaklasyfikowany do klasy problemów NP, oraz klasy problemów NP-trudnych. Wobec tego, rozważany problem należy do klasy problemów NP-zupełnych.



Rozdział 2

Projekt systemu

W tej części opisane zostały wymagania dla aplikacji w kontekście możliwości interakcji przez użytkownika.

2.1 Wymagania aplikacji

W ramach stworzonej aplikacji, użytkownik ma możliwość:

1. wybrać jedną z predefiniowanych paczek łamigłówek, by przejść do wyboru łamigłówki;
2. wybrać jedną z predefiniowanych łamigłówek w paczce, by przejść do jej rozwiązywania;
3. rozwiązać łamigłównkę przy użyciu wyświetlanej planszy;
4. oznaczać pola, co do których ma pewność, że są puste;
5. zobaczyć stan łamigłównki w menu wyboru, by mógł ocenić:
 - czy łamigłównka została rozpoczęta,
 - czy łamigłównka została ukończona bez przegranej,
 - czy łamigłównka została ukończona z przegraną;
6. wprowadzić łamigłównkę dla solvera za pomocą ekranu wprowadzania łamigłównki;
7. wybrać łamigłównkę do rozwiązywania dla solvera;
8. nakazać rozwiązanie wprowadzonej łamigłównki.

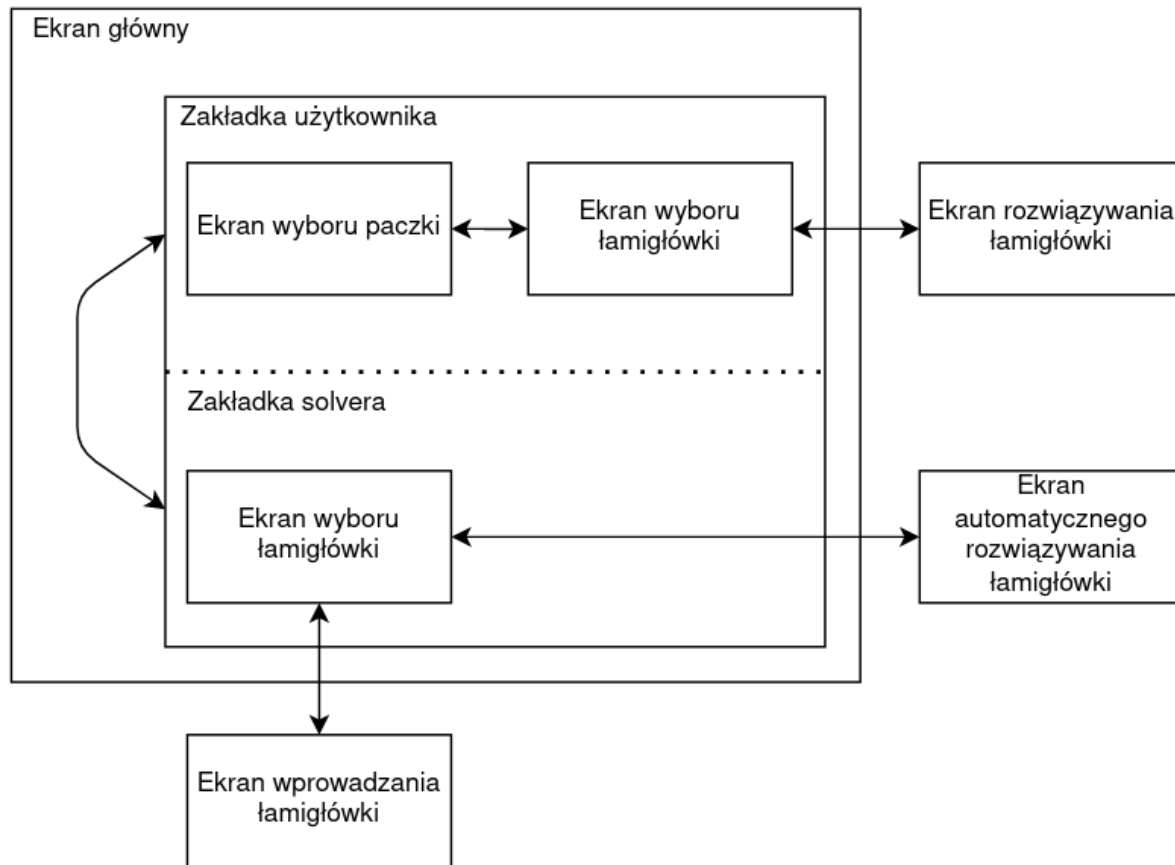
Oprócz tego, aplikacja:

1. śledzi błędy użytkownika w trakcie rozwiązywania łamigłównki i przerywa jej rozwiązywanie w przypadku popełnienia zbyt wielu błędów;
2. zapisuje postęp rozwiązywania łamigłównki przy wyjściu do poprzedniego ekranu.

2.2 Nawigacja pomiędzy aktywnościami

Aplikacja otwiera się w menu głównym. W menu głównym dostępne są dwie zakładki: zakładka użytkownika i zakładka w solvera. W zakładce użytkownika użytkownik najpierw wybiera paczkę łamigłówek, a następnie łamigłównkę do rozwiązania, po czym przechodzi do ekranu rozwiązywania. W zakładce solvera dostępna jest lista wprowadzonych i predefiniowanych łamigłówek dla solvera. Użytkownik może przejść do ekranu wprowadzania łamigłównki - by dodać kolejną łamigłównkę - bądź do ekranu automatycznego rozwiązywania, gdzie nakazuje solverowi rozwiązanie wprowadzonej łamigłównki.

Zależności między opisanymi aktywnościami są ukazane na diagramie.



Rysunek 2.1: Diagram zależności między aktywnościami

Rozdział 3

Implementacja systemu

W tym rozdziale opisane są technologie i biblioteki użyte do stworzenia aplikacji, jak i schemat użytej bazy danych.

3.1 Opis technologii

3.1.1 React Native

Aplikacja została napisana w bibliotece React Native [3]. Jest to framework umożliwiający tworzenie aplikacji mobilnych, komputerowych oraz internetowych. React Native jest oparty na bibliotece React.js [4]. Autorem pierwowzoru jest Jordan Walke i jest on obecnie rozwijany przez Meta Platforms Inc. oraz społeczność. Rozwój React Native także jest nadzorowany przez tę firmę. Framework jest dostępny na licencji MIT.

Głównymi pojęciami potrzebnymi do tworzenia aplikacji w React Native są komponenty oraz stany. Komponenty reprezentują nie tylko podstawowe składniki interfejsu graficznego, takie jak pola tekstowe czy przyciski, ale także zestawy składników realizujące określoną funkcję, np. plansza do gry lub lista gier. Komponenty opierają się o stan, czyli zestaw informacji przechowywany w komponencie i komunikowany do użytkownika za pomocą interfejsu. Framework odświeża wygląd interfejsu przy zmianie stanu, która najczęściej następuje w wyniku interakcji użytkownika z interfejsem. Wtedy to dochodzi do aktualizacji komponentów korzystających z danego stanu.

Programowanie w React Native odbywa się za pomocą języka skryptowego JavaScript. Znak towarowy należy do Oracle [5], standard jest utrzymywany przez ECMA [6], a uruchamiany jest na różnych silnikach rozwijanych zgodnie ze standardem (np. V8 [7] od firmy Google, czy SpiderMonkey [8] od Mozilli).

3.1.2 Dodatkowe biblioteki

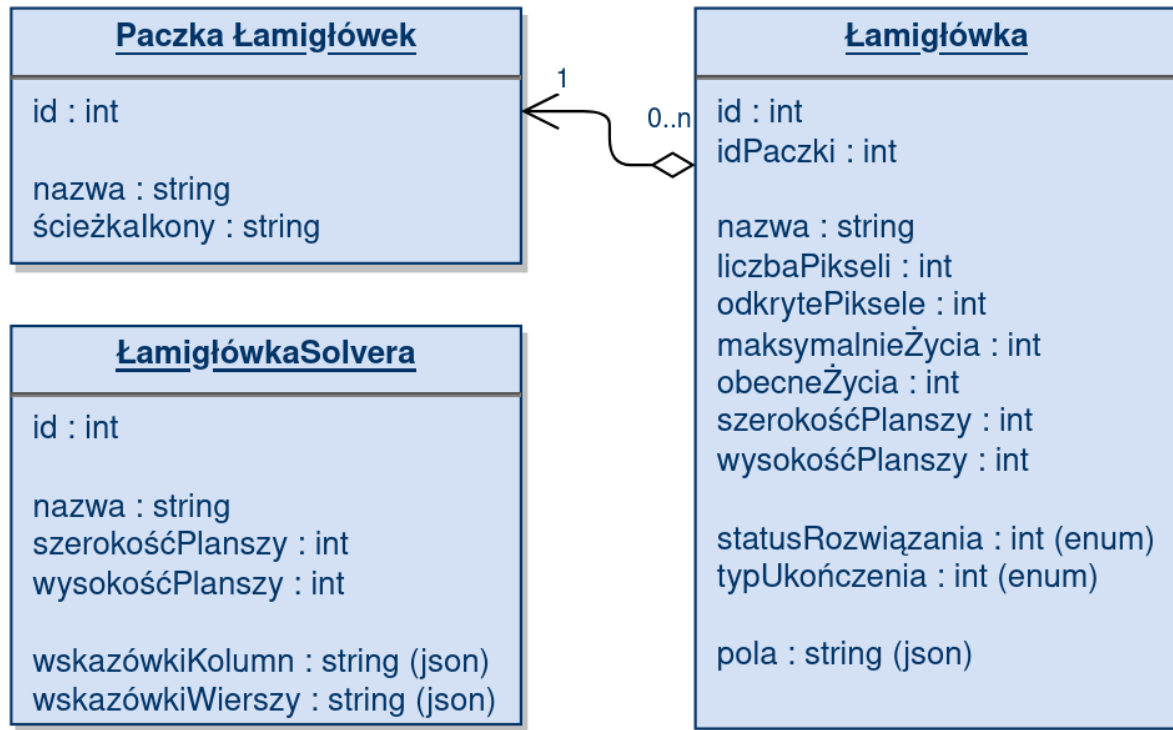
Do stworzenia aplikacji zostały wykorzystane biblioteki tworzone przez społeczność. Są to między innymi:

- React Native Elements [9] - biblioteka zawierająca podstawowe komponenty zgodne z Material Design
- React Native Icons [10] - biblioteka zawierająca ikony zgodne z Material Design
- React Native Navigation [11] - biblioteka obsługująca nawigację między aktywnościami
- React Native SQLite Storage [12] - biblioteka pozwalająca korzystać z lokalnej bazy SQLite
- React Native Zoomable View [13] - biblioteka dodająca komponent obsługujący przybliżanie ekranu



3.2 Baza danych

Dane aplikacji są przechowywane w bazie danych opartej na systemie SQLite. Schemat bazy jest przedstawiony na diagramie poniżej.



Rysunek 3.1: Diagram bazy danych

Baza składa się z 3 tabel: paczek, łamigłówek i łamigłówek solvera. Paczki zawierają jedynie niezbędne dane do reprezentacji grupy łamigłówek, czyli nazwa i ikona. W tabeli łamigłówek zawarte są proste dane takie jak nazwa, maksymalna liczba żyć (liczba błędów, po których się przegrywa). Przechowywane są tam również informacje o stanie gry, tj. **statusRozwiązania** - łamigłówka nierozpoczęta i nierozwiązana, łamigłówka rozpoczęta, łamigłówka rozwiązana - oraz **typUkończenia** - łamigłówka nieukończona bez przegranej, łamigłówka nieukończona z przegraną, łamigłówka ukończona bez przegranej, łamigłówka ukończona z przegraną. Pod zmienną **pola** przechowywana jest lista pól wraz z ich stanami, pod postacią stringa w formacie JSON. Tabela łamigłówek solvera także zawiera łamigłówki, ale w innej formie: łamigłówka zapisana jest jako listy wskazówek w formacie JSON oraz dane do identyfikacji, np. nazwa czy wielkość planszy.



Sposób działania tego solvera został przedstawiony w kodzie poniżej.

Pseudokod 4.1: SolverCałościowy

Input: Lista wierszy R , indeks pola i , lista wskazówek wierszy Hr i kolumn Hc , szerokość w i wysokość h planszy

Output: Czy znaleziono rozwiązanie **true/false**

```

1 if  $i \geq w \cdot h$  then
2   return WeryfikujRozwiazanie( $R, Hr, Hc, w, h$ );
3 else
4    $iWiersza \leftarrow \lceil \frac{i}{w} \rceil$ ;
5    $iKolumny \leftarrow i \bmod w$ ;
6    $R[iWiersza][iKolumny] \leftarrow 0$ ;
7   if SolverCałościowy( $R, i + 1, Hr, Hc, w, h$ ) then
8     return true;
9    $R[iWiersza][iKolumny] \leftarrow 1$ ;
10  return SolverCałościowy( $R, i + 1, Hr, Hc, w, h$ );
  
```

Solver ten zaczyna od pustej planszy. Następnie, dla pierwszego pola wywoływana jest rekursyjna metoda: jeśli indeks pola mieści się w zakresie planszy, to najpierw jego status ustawiany jest na pusty, i następuje wywołanie metody dla następnego indeksu, a jeśli rozwiązanie nie zostanie znalezione, to pole jest wypełniane i ponownie dochodzi do wywołania metody na następnym polu. Jeśli indeks wykracza poza zakres planszy, to znaczy, że wszystkie pola mają ustawiony status i wywoływana jest metoda sprawdzająca poprawność rozwiązania, podobna do tej opisanej w 1.1. Jeśli solver zakończy działanie zwracając **true**, to w przekazanej mu macierzy pól (równoznaczne z listą wierszy) znajdzie się rozwiązanie łamigłówki.

Ta wersja solvera cechuje się wysoką złożonością obliczeniową. Procedura sprawdzająca poprawność rozwiązania zostanie wywołana 2^n razy w najgorszym przypadku, gdzie n to liczba pól na planszy. Oprócz tego, na każdym poziomie rekursji zostaje wykonany zestaw operacji, którego złożoność można określić jako stałą. Zważywszy, że drzewo wywołań jest drzewem binarnym, a każdy poziom zostaje wywołany 2 razy rzadziej niż poprzedni, daje to dodatkowe $\frac{2^n}{2} + \frac{2^n}{4} + \dots + 1 = 2^n - 1$ operacji do wykonania. Przyjmując złożoność $\mathcal{O}(n^2)$ procedury weryfikującej, daje to złożoność $\mathcal{O}(2^n) \cdot \mathcal{O}(n^2) + \mathcal{O}(2^n) \cdot \mathcal{O}(1) = \mathcal{O}(2^n \cdot n^2)$ solvera dla najgorszego przypadku.

4.1.2 Solver osiowy

W odróżnieniu od solvera całościowego, solver osiowy korzysta ze wskazówek przy szukaniu rozwiązań. Opiera się on na fakcie, że każda linia (wiersz lub kolumna) może znajdować się w jednym z możliwych stanów, których liczba nigdy nie dojdzie do 2^x , gdzie x jest długością linii. Sprawdzając rozwiązanie w tym solverze, gwarantowana jest poprawność w jednej z osi, co dodatkowo znacząco skraca czas szukania rozwiązania.

Zarys algorytmu w tej wersji został przedstawiony w kodzie.

Pseudokod 4.2: SolverOsiowy

Input: Lista linii L , indeks linii i , lista wskazówek linii prostopadłych H , liczba linii n

Output: Czy znaleziono rozwiązanie **true/false**

```

1 if  $i = n$  then
2   return WeryfikujRozwiazanie( $L, H, n$ );
3 else
4    $linia \leftarrow L[i]$ ;
5   foreach  $komb \in linia.kombinacje$  do
6     NalozKombinacje( $linia, komb$ );
7     if SolverOsiowy( $L, i + 1, H, n$ ) then
8       return true;
9   return false;
  
```



Rysunek 4.2: Możliwe układy dla przykładowej linii

Dla linii na grafice solver osiowy sprawdza jedynie 3 stany. Dla tej samej linii solver całosciowy sprawdziłby $2^5 = 32$ stany

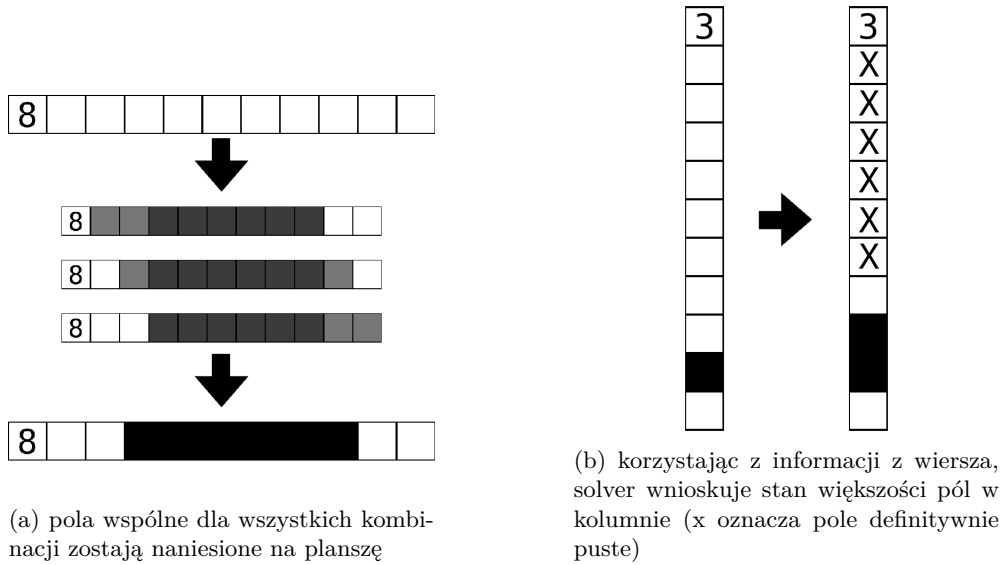
Solver zaczyna od pustej planszy. Przed rozpoczęciem rozwiązywania sprawdzana jest liczba wszystkich kombinacji w danej osi (iloczyn możliwości każdej z linii) i wybierana jest oś z mniejszą liczbą możliwości. Następnie generowane są kombinacje dla każdej z linii. Solver korzysta z rekursywnej metody i ustawia pierwszą kombinację dla pierwszej linii. Następnie wywołuje metodę dla kolejnej linii, aż do ostatniej, i wtedy weryfikuje rozwiązanie. Jeśli dla danego ustawienia w linii łamigłówka nie ma rozwiązania, to solver przechodzi do kolejnego ustawienia i wywołuje metodę w kolejnej linii.

Dzięki eliminacji kombinacji sprzecznych ze wskazówkami w danej osi, procedura sprawdzania poprawności rozwiązania jest wywoływana o wiele rzadziej niż w przypadku solvera całosciowego. O ile liczba kombinacji w linii przy rozpatrywaniu każdej komórki z osobna to 2^n , gdzie n to długość linii, tak w przypadku rozważania poprawnych kombinacji dla linii jest ona zależna od długości i zawartości wskazówki, i można ją ograniczyć z góry przez $\binom{n+1-h}{h}$, a h to ilość liczb we wskazówce dla danej linii. To przybliżenie jest zawyżone, ponieważ zakłada występowanie jedynie bloków długości jeden we wskazówce. W przeciętnym przypadku, bloki wypełnionych komórek będą dłuższe, oraz będzie ich mniej. Co więcej, jak zostało wspomniane na początku, weryfikacja jest wymagana jedynie w jednej z dwóch osi, jako że konstrukcja potencjalnych rozwiązań opiera się o zestawianie poprawnych kombinacji z linii.

4.1.3 Solver eliminacyjny

Solverem, którego wariant znajduje się w aplikacji, jest solver eliminacyjny. W przeciwieństwie do wcześniej opisanych solverów, solver ten nie zakłada układów komórek w liniach tak długo, jak to możliwe. W przypadku tego solvera, generowane są możliwe kombinacje dla każdej z linii (zarówno wierszy, jak i kolumn). W danym przejściu eliminowane są kombinacje sprzeczne z dostępnymi informacjami (np. kombinacje posiadające pełną pierwszą komórkę, podczas gdy pewne jest, że jest ona pełna) oraz wyciągane są części wspólne kombinacji (np. wszystkie kombinacje mają pustą drugą komórkę), które dostarczają informacji dla innych linii. Co więcej, w przeciwieństwie do poprzednich solverów, nie jest konieczna walidacja rozwiązania, jako że rozwiązanie jest poprawne w momencie, gdy każdy wiersz i każda kolumna ma dostępną jedną możliwą kombinację.

Główna procedura tego solvera oraz fragment odpowiedzialny za sprawdzanie danej linii zostały przed-



Rysunek 4.3: Przykład wnioskowania na podstawie możliwych kombinacji

stawione za pomocą pseudokodu.

Pseudokod 4.3: SolverEliminacyjny

Input: Lista wierszy R i kolumn C , kolejka Q

Output: Czy znaleziono rozwiązanie true/false

```

1 while  $Q.zawieraElementy()$  do
2   linia  $\leftarrow Q.pop()$ ;
3   SprawdźLinie(linia);
4 if  $(\forall linia \in R \cup C)(|linia.kombinacje| = 1)$  then
5   return true;
6 else if  $(\exists linia \in R \cup C)(|linia.kombinacje| = 0)$  then
7   return false;
8 else
9   zakładanaLinia  $\leftarrow$  pierwsza linia z wieloma kombinacjami;
10  foreach komb  $\in$  zakładanaLinia.kombinacje do
11    kopiaR  $\leftarrow$  kopiuj( $R$ );
12    kopiaC  $\leftarrow$  kopiuj( $C$ );
13    NałozKombinacje(zakładanaLinia, komb);
14    UzupełnijKolejkę( $Q$ );
15    if SolverEliminacyjny(kopiaR, kopiaC,  $Q$ ) then
16       $R \leftarrow$  kopiaR;
17       $C \leftarrow$  kopiaC;
18      return true;
19  return false;
```

Solver zaczyna od pustej planszy. Na początku generowane są wszystkie kombinacje dla każdej z linii, a linie wrzucane są do kolejki *last-in first-out*. Następnie solver przechodzi do rozwiązywania. Dopóki kolejka nie jest pusta, to są linie, których kombinacje należy zweryfikować. Z kolejki usuwana jest sprawdzana linia. Dla tej linii następują dwa kroki: najpierw, eliminowane są kombinacje sprzeczne z układem danej linii. W wypadku tego solvera, każda komórka znajduje się w jednym z trzech stanów: *pełny*, *pusty* i *nieznany*. Stan *nieznany* komórki dopuszcza kombinacje zawierające komórkę pełną lub pustą; pozostałe stany wymagają zgodności stanu ze stanem komórki w kombinacji. Po eliminacji sprzecznych kombinacji, dochodzi do porównania kombinacji. Jeśli istnieje komórka w linii, której stan jest *nieznany*, a wszystkie pozostałe

Pseudokod 4.4: SprawdzLinie

Input: Linia l

```
1 foreach  $komb \in l.kombinacje$  do
2   if  $\neg WeryfikujKombinacje(komb, l)$  then
3      $l.kombinacje.usun(komb)$ ;
4 foreach  $i \in \{1, 2, \dots, |l|\}$  do
5   if  $l[i] = \text{nieznany} \wedge$  pole identyczne we wszystkich kombinacjach then
6      $l[i] = \text{nowy stan}$ ;
7      $Q.dodaj(\text{linia prostopadła do } l \text{ o indeksie } i)$ ;
```

kombinacje mają ustawiony dla niej ten sam stan, to stan komórki jest aktualizowany, a prostopadła linia zostaje dodana do kolejki do weryfikacji (następuje przy tym upewnienie, że w kolejce nie ma powtórzeń). Kiedy kolejka zostanie opróżniona, sprawdzane są linie. Jeśli wszystkie linie mają jeden możliwy stan, to znaczy, że zostało znalezione rozwiązanie. Jeśli któraś z linii nie ma możliwej kombinacji, to nie istnieje rozwiązanie przy dokonanych założeniach. W przeciwnym wypadku, solver zakłada poprawność jednej z kombinacji dla linii o kilku możliwych kombinacjach. Jako że skutek założenia stan linii zmienił się, to do kolejki dodawane są linie prostopadłe. Następnie wywoływana jest w sposób rekursywny metoda rozwiązująca nonogram dla obecnego stanu planszy. Jeśli rozwiązanie nie zostanie znalezione w tej gałęzi, to solver zakłada poprawność kolejnej kombinacji dla tej linii.

Istotna uwaga dotyczy charakterystyki wierszy i kolumn. W celu umożliwienia działania procedury został wykorzystany mechanizm obecny w wielu powszechnie używanych językach programowania, mianowicie mechanizm płytkiej kopii. Mimo że listy wierszy i kolumn zawierają inne obiekty (listy), to obiekty komórek przechowywane w tych zagnieżdżonych listach są takie same. Dzięki temu, modyfikując stan komórki w liście wierszy w n -tym wierszu i m -tej komórce, modyfikujemy także stan komórki zawartej w n -tej komórce w m -tej kolumnie w liście kolumn.

Zaproponowany solver jest dobrze przystosowany do rozwiązywania łamigłówek, dla których nie następuje zakładanie układu dowolnej linii. W wypadku takich łamigłówek, solver ten wykonuje procedurę **SprawdzLinie** pewną liczbę razy, a następnie upewnia się, że każda linia ma jedną dostępną kombinację. Wyliczenie kombinacji dla wszystkich linii wymaga dostępu do $w + h$ zmiennych, co oznacza $w + h$ operacji wykonanych w stałym czasie. Liczbę wykonań procedury **SprawdzLinie** można ograniczyć z góry przez $w + h + n$, gdzie n to liczba pól na planszy, ponieważ pierwsze $w + h$ wykonań jest narzucone przez zapełnienie kolejki wszystkimi liniami przed przystąpieniem do rozwiązywania, a każde kolejne wykonanie jest skutkiem określenia stanu przynajmniej jednego z pól na planszy, jako że jest to jedyny sposób na dodanie linii do kolejki. Weryfikacja pojedynczej kombinacji jest wykonywana w czasie wielomianowym, jednak liczba kombinacji nie jest wielomianowa: dla wskazówek wypełnionych samymi jedynekami wynosi $\binom{n+1-h}{h}$, gdzie h to ilość liczb we wskazówce. Gdyby jednak ograniczyć ilość liczb we wskazówkach, to możliwa liczba kombinacji będzie wielomianowo zależna od wielkości planszy. Zatem dla podklasy nonogramów, która składa się z łamigłówek możliwych do rozwiązania bez dokonywania zakładania stanu jednej z linii, i w których długość wskazówki jest ograniczona, solver ten uzyskuje złożoność wielomianową.

4.2 Porównanie wydajności solverów

W tej części zbadane zostały wydajności poszczególnych wersji solverów oraz wpływ wybranych modyfikacji i heurystyk na ich wydajność.

4.2.1 Metodyka badań

Ogólna metodyka

Metoda prowadzenia badań jest następująca: dla każdej łamigłówki prowadzonych jest 5 prób rozwiązania. Próby z minimalnym oraz maksymalnym czasem rozwiązywania zostają odrzucone, w celu eliminacji



błędów powstałych na skutek zaburzeń występujących w trakcie prowadzenia testu. Następnie czas pozostałych 3 prób zostaje uśredniony i podany jako wynik badania. Jeśli czas wykonania iteracji testu przekroczy 5 minut, to test zostaje przerwany i do komórki zostaje wpisany wynik *przekroczone*.

Środowisko

Testy zostały przeprowadzone w systemie Ubuntu 20.04.3 LTS w wersji 64-bitowej. System został zainstalowany na komputerze z procesorem Intel Core i5-6300HQ, z dostępem do 16GB pamięci RAM o taktowaniu 2133Mhz. Testy zostały uruchomione w środowisku Node.js [14] w wersji v14.18.2. Czas rozwiązywania łamigłówek na urządzeniu mobilnym może znacząco odbiegać od czasów zaprezentowanych w wynikach, z powodu mniejszych zasobów i zastosowanego środowiska uruchomieniowego.

Prezentacja wyników

Wyniki zostały zaprezentowane w tabelach o następującym układzie: w pierwszych dwóch kolumnach zostały podane nazwy łamigłówek i ich wielkości (łamigłówki są zadane na planszach kwadratowych). W kolejnych kolumnach, nazwanych odpowiednio do zastosowanej modyfikacji bądź jej braku, podany jest czas rozwiązywania nonogramu wyrażony w milisekundach. Czas jest zaokrąglony do pełnych milisekund, zatem dla prostych łamigłówek może być wyrażony jako 0.

Zestaw danych

Zestaw danych użyty do testów został przedstawiony na końcu rozdziału.

4.2.2 Solver całościowy

Wydajność solvera całościowego została sprawdzona na zestawie 4 łamigłówek.

Wyniki

Nazwa	Rozmiar	Czas rozwiązywania w ms
Cross	3	1
Flame	5	46
Jellyfish	8	<i>przekroczone</i>
Candy	8	<i>przekroczone</i>

Tablica 4.1: Wyniki testów dla solvera całościowego

Interpretacja

Solver całościowy jest w stanie dość szybko rozwiązać niewielkie łamigłówki, ale czas jego pracy rośnie bardzo szybko wraz ze wzrostem wielkości planszy. Wynik taki jest oczekiwany, ponieważ z każdym dodatkowym polem, solver średnio podwaja swój czas pracy. Przejście z łamigłówki wielkości 5x5 na łamigłówkę 8x8 wiązałoby się zatem z około $2^{8 \cdot 8 - 5 \cdot 5}$ -krotnym wydłużeniem czasu pracy. Pomijając kwestię budowy samych łamigłówek, przyjmując 46 milisekund jako czas pracy dla łamigłówki wielkości 5, daje to około 800 lat pracy solvera dla łamigłówki wielkości 8.

4.2.3 Solver osiowy

Wydajność solvera całościowego została sprawdzona na pełnym zestawie 18 łamigłówek. Został on poddany jednej modyfikacji.

Modyfikacje

Częściowa weryfikacja rozwiązania polega na wykorzystaniu procedury częściowej weryfikacji. Jest ona podobna do procedury weryfikacji w osi, ale nie sprawdza poprawności całej planszy, a jedynie sprawdza, czy dany układ może prowadzić do poprawnego rozwiązania (czyli czy nie ma sprzeczności na tym etapie). Procedura otrzymuje głębokość, dla której ma zweryfikować poprawność. Jeśli do danej głębokości nie występuje sprzeczność, to rozwiązanie jest konstruowane dalej. W przeciwnym przypadku, w danej gałęzi nie może być poprawnego rozwiązania, i solver przechodzi do innej gałęzi.

			2			
		1	2	1	.	.
2	1					
2	1					
	.					
	.					
	.					

Rysunek 4.4: Wizualizacja częściowej weryfikacji

Na tym etapie można zdyskwalifikować każde rozwiązanie zawierające pierwszy i drugi wiersz w układzie widocznym na grafice

Wyniki

Nazwa	Rozmiar	Czas rozwiązywania w ms	
		bez modyfikacji	z częściową weryfikacją
Cross	3	0	0
Flame	5	0	0
Jellyfish	8	463	2
Candy	8	0	0
Shield	10	przekroczono	3
Dog	10	12004	1
Duck	16	przekroczono	12
Shrimp	16	przekroczono	14
Cherries	20	przekroczono	25
Potion	20	przekroczono	315
Tape	25	przekroczono	1091
Lighter	25	przekroczono	60945
Ghost	32	przekroczono	40040
Demon	32	przekroczono	3997
Butcher	48	przekroczono	przekroczono
Ranger	48	przekroczono	59703
Orc	64	przekroczono	przekroczono
Swordsman	64	przekroczono	przekroczono

Tablica 4.2: Wyniki testów dla solvera osiowego



Interpretacja

W podstawowej wersji solver osiowy ma niewiele lepszą wydajność od solvera całosciowego, będąc w stanie rozwiązać niektóre łamigłówki wielkości 10 przy nałożonym ograniczeniu czasowym. Jednak po dodaniu częściowej weryfikacji, wydajność solvera drastycznie wzrasta, i może zostać wykorzystany do rozwiązywania łamigłówek o wiele większych niż w przypadku podstawowej wersji. Pokazuje to, jak kluczowa jest wstępna eliminacja niepożądanych gałęzi przy rozwiązywaniu danego problemu.

4.2.4 Solver eliminacyjny

Wydajność solvera całosciowego została sprawdzona na pełnym zestawie 18 łamigłówek.

Modyfikacje

Rozwiązywanie bez przerywania (*bez przerw.*) to modyfikacja polegająca na usunięciu warunkowego przerywania szukania rozwiązania. Zamiast przerwać w momencie znalezienia kolumny niezawierającej żadnej poprawnej kombinacji, solver szuka dalej, aż do opróżnienia kolejki, i dopiero wtedy informuje o braku rozwiązania. Z uwagi na częste korzystanie z kolejki, eliminacja tej instrukcji mogłaby skrócić czas wykonywania jednego sprawdzenia linii.

Zakładanie dla kolumn (*kolumny*) zmienia kolejność zakładania. Linia z wieloma kombinacjami jest szukana najpierw na liście kolumn, a dopiero potem na liście wierszy. Ta modyfikacja opiera się na założeniu, że układ wypełnionych pól w łamigłówkach może powodować lepszą wydajność przy rozwiązywaniu z priorytetem dla osi pionowej.

Zakładanie dla linii z minimalną/maksymalną liczbą kombinacji (*min/max komb.*) dokonuje założenia dla linii z najmniejszą/największą liczbą poprawnych kombinacji. W ten sposób badany jest wpływ doboru sposobu zakładania na czas szukania rozwiązania.

Kolejność linii w kolejce to seria modyfikacji sprawdzających wpływ typu kolejki na czas rozwiązania. W kolumnie *lifo* podane są wyniki dla kolejki, w której nowo dodane bądź ponownie dodane linie są przesuwane na początek kolejki. W *fifo* przedmioty są wrzucane na koniec kolejki. *bez zm.* oznacza, że przedmioty są ustawiane na początku kolejki, ale ponowne dodanie nie zmienia kolejności przedmiotów w kolejce. W kolejnych trzech kolumnach (*śl. ind. lifo*, *śl. ind. fifo*, *śl. ind. bez zm.*) badane są te same własności kolejki, ale struktura ta zostaje zmodyfikowana tak, by śledzić linie wraz ze zmodyfikowanymi indeksami. Dzięki temu nie jest konieczne sprawdzenie każdego indeksu w linii, a jedynie tych komórek, dla których zaszła zmiana.

Wyniki

Nazwa	Rozmiar	Czas rozwiązywania w ms				
		bez modyfikacji	bez przerw.	kolumny	min komb.	max komb.
Cross	3	0	0	0	0	0
Flame	5	0	0	0	0	0
Jellyfish	8	1	1	1	1	1
Candy	8	0	0	0	0	0
Shield	10	2	2	2	2	1
Dog	10	1	0	0	0	1
Duck	16	2	1	1	1	1
Shrimp	16	1	1	1	1	1
Cherries	20	3	3	3	3	3
Potion	20	12	13	13	13	13
Tape	25	2	2	2	2	2
Lighter	25	13	13	13	12	13
Ghost	32	47	47	48	45	47
Demon	32	1787	1817	1806	1800	1822
Butcher	48	1811	1809	1819	1790	1791
Ranger	48	46	48	47	47	48
Orc	64	1463	1454	1446	1465	1456
Swordsman	64	1440	1467	1451	1429	1432

Tablica 4.3: I część wyników dla solvera eliminacyjnego

Nazwa	Rozmiar	Czas rozwiązywania w ms					
		lifo	fifo	bez zm.	śl. ind. lifo	śl. ind. fifo	śl. ind. bez zm.
Cross	3	0	0	0	0	0	0
Flame	5	0	0	0	0	0	0
Jellyfish	8	1	2	2	2	1	1
Candy	8	0	0	0	0	0	0
Shield	10	2	1	1	2	3	2
Dog	10	1	1	1	1	0	1
Duck	16	2	1	2	2	2	2
Shrimp	16	1	1	1	1	1	1
Cherries	20	3	4	4	3	4	3
Potion	20	12	13	14	16	16	13
Tape	25	2	2	2	4	3	3
Lighter	25	13	13	13	13	15	13
Ghost	32	47	47	52	56	72	54
Demon	32	1787	2380	1980	1194	1257	1127
Butcher	48	1811	1884	1798	1854	1962	1717
Ranger	48	46	44	53	61	62	59
Orc	64	1463	1413	1437	1413	1415	1311
Swordsman	64	1440	1489	1544	1534	1608	1451

Tablica 4.4: II część wyników dla solvera eliminacyjnego



Interpretacja

Solver eliminacyjny jest najszybszym z zaprezentowanych solverów. Jest w stanie rozwiązać nawet największe, 64x64 nonogramy w nałożonym ograniczeniu czasowym. Każdą ze sprawdzanych łamigłówek rozwiązuje szybciej niż solver osiowy. Na szczególną uwagę zasługuje szybkość rozwiązania nonogramów *Ghost* i *Ranger*. Dzięki oparciu się o informacje, które zostały wywnioskowane z poprzednio rozpatrywanych linii, solver może rozwiązać nawet łamigłówki o dużych rozmiarach bez zakładania poprawności kombinacji dowolnej linii, lub z minimalną jego ilością.

Pierwsza seria modyfikacji nie miała dużego wpływu na czas rozwiązywania. Część modyfikacji z drugiej serii okazała się mieć kluczowy wpływ na wydajność solvera przy rozwiązywaniu danej łamigłówki. Użycie kolejki typu *first-in first-out* z przerywaniem na koniec przy aktualizacji linii znacznie spowolniło czas rozwiązywania łamigłówki *Demon* w przypadku bazowej wersji solvera, a w przypadku wersji ze śledzeniem indeksów różnica była mniejsza, ale zauważalna. Oprócz tego, modyfikacja struktury danych w celu śledzenia modyfikowanych indeksów okazała się dobrym pomysłem, jako że solver korzystający z niej (*śl. ind. bez zm.*) osiągnął najlepsze czasy dla trudniejszych łamigłówek (np. *Demon*, *Butcher*), będąc nieznacznie wolniejszym dla łamigłówek prostszych (np. *Ghost*, *Ranger*).

4.2.5 Wnioski

Złożoność solvera całościowego bardzo ogranicza jego przydatność w rozwiązywaniu nonogramów. Solver osiowy, dzięki ograniczeniu liczby kombinacji dla danej linii, okazał się od niego lepszy, ale tylko w niewielkim stopniu. Jednak poszerzenie solvera osiowego o częściową weryfikację rozwiązania znacznie poprawiło jego osiągi. Solver eliminacyjny jest najwydajniejszym z zaproponowanych solverów. Dzięki oparciu na pewnych informacjach i ograniczeniu zakładania, a co za tym idzie back-tracking, może rozwiązać zadaną łamigłówkę szybciej niż inne solvery.

Przeprowadzane badania potwierdzają układ hierarchii solverów: solver osiowy osiąga lepsze wyniki od solvera całościowego dzięki ograniczeniu się do zakładania w jednej osi. Najlepszym okazał się solver eliminacyjny, który w miarę możliwości wyklucza zakładanie poprawności kombinacji.

4.3 Predefiniowane łamigłówki

4.3.1 Wymagania dla łamigłówek użytkownika

Łamigłówki, które zostały umieszczone w aplikacji dla użytkownika, muszą spełniać pewne wymagania.

Łamigłówka ma jedno rozwiązanie

Wynika to ze sposobu zapisu łamigłówki w aplikacji. Każda łamigłówka jest pewnym obrazkiem, zapisanym w formie siatki komórek, które są puste lub odpowiednio zakolorowane. Gdyby dopuścić łamigłówkę, która ma wiele rozwiązań, to każde rozwiązanie poza przewidzianym nie byłoby dopuszczane, mimo jego poprawności.

Łamigłówka nie wymaga zakładania

Łamigłówki wymagające założenia poprawności jednego z wariantów na pewnym etapie są zdecydowanie bardziej złożone od łamigłówek, które da się ułożyć zbierając informacje z pojedynczych wierszy i kolumn. W przypadku solvera, założenie poprawności niewłaściwej kombinacji wymaga jedynie dokonania back-tracking i sprawdzenia kolejnej kombinacji. Użytkownik musi rozwiązać taką łamigłówkę w pamięci, ponieważ zaznaczenie błędnej komórki na planszy wiązałoby się z wychwyceniem błędu przez aplikację.

4.3.2 Zatwierdzenie spełniania wymienionych wymagań przez łamigłówkę

Do weryfikacji łamigłówki użyty został zmodyfikowany solver eliminacyjny. Brak konieczności zakładania przy rozwiązywaniu łamigłówki został sprawdzony przez nakazanie solverowi rozwiązania łamigłówki. Modyfikacja solvera polega na tym, że solver odrzuca łamigłówkę, jeśli kolejka linii do sprawdzenia została

		1	1	1	1
		1	1	1	1
1	1				
1	1				
1	1				
1	1				

		1	1	1	1
		1	1	1	1
1	1				
1	1				
1	1				
1	1				

		1	1	1	1
		1	1	1	1
1	1				
1	1				
1	1				
1	1				

		1	1	1	1
		1	1	1	1
1	1				
1	1				
1	1				
1	1				

Rysunek 4.5: Przykład łamigłówki z wieloma rozwiązaniami

Łamigłówka zdefiniowana na górze ma 2 rozwiązania, z których tylko jedno pokrywa się z przewidzianym. Gdyby znalazła się w aplikacji, to rozpoczęcie rozwiązywania z założeniem poprawności prawej wersji wiązałoby się z nieuzasadnionym uznaniem błędu przez aplikację.

opróżniona, ale łamigłówka nie została rozwiązana. Jeśli łamigłówka nie została rozwiązana na tym etapie, to solver przejdzie do założeń: dla linii z wieloma poprawnymi kombinacjami zakładałby poprawność jednej z nich. Jest to jednak sprzeczne z wymaganiem.

Tak zmodyfikowany solver weryfikuje jednocześnie pierwsze kryterium. Znalezienie rozwiązania łamigłówki bez dokonania założeń oznacza istnienie wyłącznie jednego rozwiązania. Wynika to z faktu, że solver rozwiązuje łamigłówkę dokonując serii wnioskowań na liniach. W każdym wnioskowaniu solver uzupełnia jedynie te pola, co do których stanu jest pewien. Rozwiązanie całej łamigłówki w ten sposób oznacza, że każda komórka znajduje się w jedynym możliwym dla siebie stanie, co wyklucza istnienie innych rozwiązań.

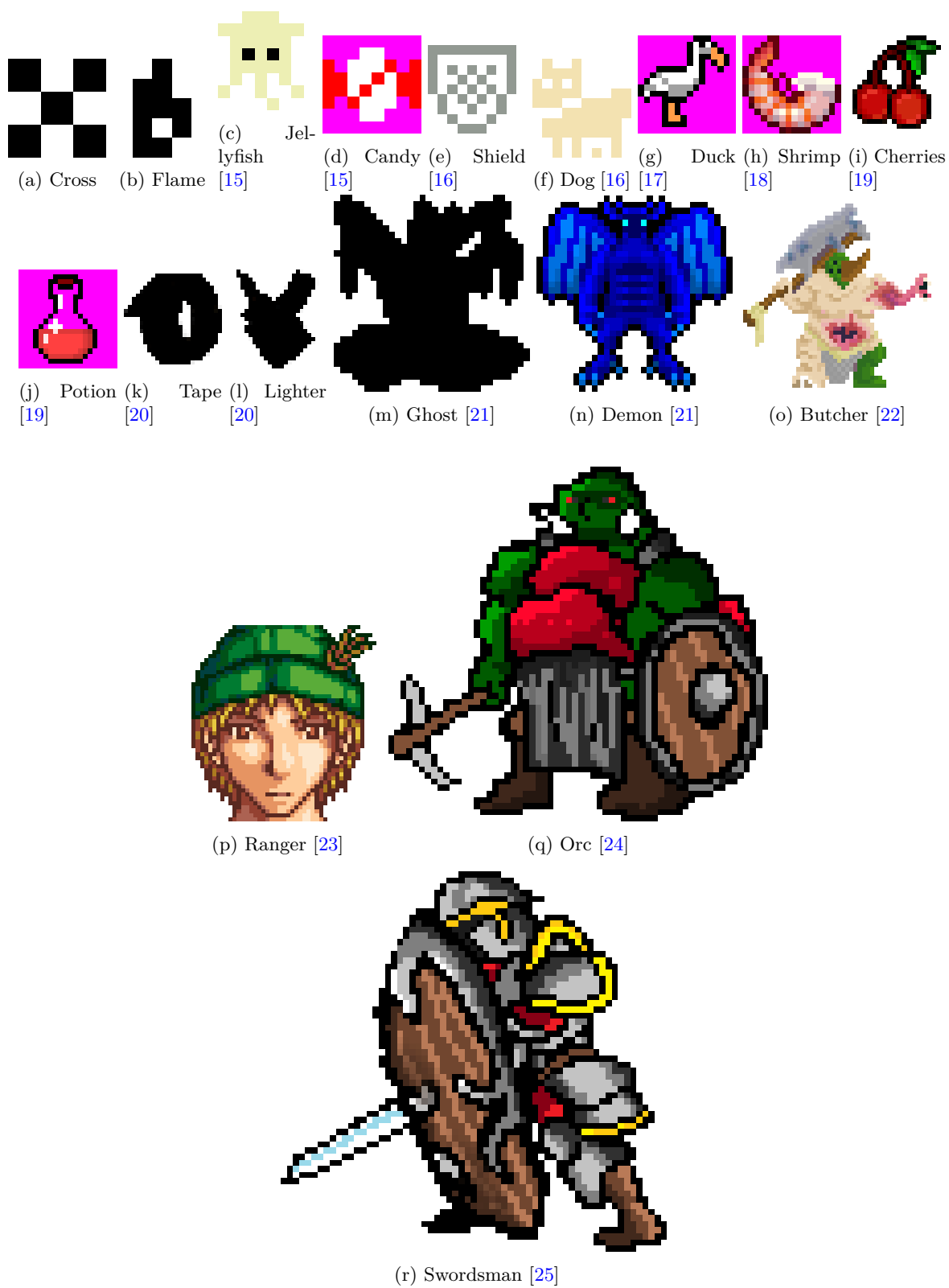
4.3.3 Wymagania dla łamigłówek solvera

Z uwagi na możliwość wprowadzania łamigłówek przez użytkownika oraz inny sposób przechowywania łamigłówek dla solvera (za pomocą wskazówek), nie jest możliwe wykluczenie konieczności rozwiązania łamigłówki z wieloma rozwiązaniami. Wobec tego solver w aplikacji został przystosowany do tego typu łamigłówek. Aplikacja udostępnia użytkownikowi opcję wygenerowania wszystkich rozwiązań danej łamigłówki, dzięki czemu może pozyskać rozwiązanie oraz zweryfikować jego unikalność. Następuje to przez prostą modyfikację algorytmu: po znalezieniu rozwiązania, solver dorzuca je do puli znanych rozwiązań i szuka dalej.

Wśród predefiniowanych łamigłówek solvera znajduje się łamigłówka z wieloma (2) rozwiązaniami, o nazwie *Cherry*.

4.4 Zestaw danych

Do przeprowadzenia badań zostały użyte następujące obrazy, które po konwersji zostały przekazane do solverów jako zestaw wskazówek. Grafiki zawierające kolor biały zostały nałożone na tło w kolorze magenta w celu wyróżnienia tego koloru na tle białej kartki.



Rysunek 4.6: Zestaw danych

Rozdział 5

Instalacja i wdrożenie

W tym rozdziale opisane zostały wymagania i kolejne kroki potrzebne do uruchomienia aplikacji oraz podstawowe operacje możliwe do wykonania w jej zakresie.

5.1 Środowisko

Aplikacja opisana w tej pracy jest aplikacją mobilną. Do jej uruchomienia potrzebne jest urządzenie mobilne z systemem Android. Działanie aplikacji zostało przetestowane na telefonie z tym systemem w wersji 8.0 i zaleca się jej uruchomienie na tej wersji systemu.

5.2 Instalacja

Proces instalacji rozpoczyna się od przeniesienia załączonego pliku **nogram.apk** na urządzenie. Kroki opisane poniżej opisują przykładowy proces instalacji i mogą różnić się w zależności od wersji systemu lub nakładki nałożonej na system.

1. Znaleźć w pamięci urządzenia przeniesiony plik instalacyjny.
2. Dotknąć ikony pliku, by rozpocząć proces instalacji.
3. Na ekranie pojawi się komunikat z zapytaniem o chęć instalacji.
4. Nacisnąć przycisk *Instaluj*.
5. Rozpocznie się proces instalacji aplikacji.
6. W trakcie instalacji może pojawić się komunikat o zablokowaniu instalacji przez Play Protect, z wyjaśnieniem, że aplikacja pochodzi od nieznanego dewelopera. Wynika to z braku zatwierdzenia aplikacji w usługach firmy Google i instalacja nie stanowi zagrożenia dla urządzenia. Kontynuacja instalacji jest możliwa po kliknięciu przycisku *Zainstaluj mimo to*.
7. System dokończy instalację aplikacji.

Uruchomienie aplikacji jest możliwe przez znalezienie jej ikony na liście aplikacji lub kliknięcie przycisku *Otwórz* na ekranie końcowym aplikacji.

5.3 Obsługa

Po uruchomieniu aplikacji wyświetlony zostanie ekran główny, czyli ekran wyboru paczki łamigłówek. Kolejne interakcje można prowadzić nawigując po systemie, zgodnie z diagramem przedstawionym w rozdziale trzecim (2.1). Podstawowe operacje możliwe do wykonania w aplikacji zostały opisane poniżej.

5.3.1 Nawigacja do łamigłówek

Będąc w ekranie wyboru paczki łamigłówek, należy wybrać jedną z paczek poprzez kliknięcie jej karty. Na ekranie wyświetli się lista łamigłówek. Kliknięcie karty jednej z nich otworzy planszę do rozwiązania.

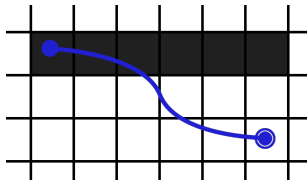
Karta łamigłówki odzwierciedla jej stan. Na domyślnym, szarym tle, zaprezentowane są łamigłówki, których nie udało się rozwiązać do tej pory. Srebrne tło oznacza łamigłówkę, która została rozwiązana, ale przynajmniej raz użytkownik popełnił zbyt wiele błędów i musiał zacząć od nowa. Łamigłówki ze złotym tłem to takie, które udało się rozwiązać za pierwszym razem. Stan łamigłówki, wraz z układem pól na planszy, jest zapisany przy wyjściu. Co więcej, o stanie łamigłówki świadczy ikona wyświetlana na jej karcie, która odróżnia łamigłówki rozpoczęte od nierozpoczętych.

Na karcie paczki łamigłówek pokazany jest postęp w jej rozwiązywaniu, czyli procent łamigłówek, które udało się rozwiązać.

5.3.2 Rozwiązywanie łamigłówek

Interakcja z planszą możliwa jest w 2 trybach: *Uncover* i *Mark*. W pierwszym trybie użytkownik deklaruje pewność co do wypełnienia danej komórki. Błędna identyfikacja komórki w tym trybie wiąże się z oznaczeniem komórki na czerwono i naliczeniem błędu. W drugim trybie użytkownik zaznacza lub odznacza pola, które uznaje za puste. W tym trybie możliwa jest zmiana stanu pola, jeśli użytkownik zmieni zdanie.

Gest przesunięcia umożliwia modyfikację stanu wielu pól w tym samym wierszu lub kolumnie bez dotykania każdego pola z osobna. Pierwsze dotknięte pole ustala modyfikację: dla trybu *Uncover* jest to wypełnianie komórek, a dla trybu *Mark* jest zależne od stanu pola. Jeśli pole jest oznaczone jako puste, to kolejne pola zostaną odznaczone, o ile zostały wcześniej oznaczone; w przeciwnym wypadku, puste pola będą oznaczane. Jeśli użytkownik dotknie drugiego pola bez odrywania palca od ekranu, to ustalona zostanie linia, w której dokonane zostaną modyfikacje. Kolejne dotknięte pola będą rozpoznawane przy wykorzystaniu pozycji palca na ekranie, ale jedynie w osi równoległej do modyfikowanej linii.



Rysunek 5.1: Wizualizacja wykorzystania gestu przesunięcia

5.3.3 Wykorzystanie solvera

Będąc na ekranie głównym można przejść do zakładki solvera poprzez naciśnięcie ikony robota. Wyświetlona zostanie lista łamigłówek dla solvera. Początkowo, lista jest pusta, i dostępne są jedynie predefiniowane łamigłówki dla solvera. Nową łamigłówkę można wprowadzić naciskając przycisk dodania łamigłówki, oznaczony symbolem $+$.

Wprowadzanie opiera się na definiowaniu wskazówek, jedna po drugiej. By dodać kolejną liczbę do wskazówki, należy nacisnąć przycisk $+$ na dole (z prawej dla wierszy). Jeśli wskazówka jest pusta (składa się jedynie z 0) to zamiast nowej liczby, aplikacja oznaczy to pole do edycji. Nowe wskazówki można dodać naciskając przycisk $+$ z prawej (na dole dla wierszy). By usunąć wskazówkę, należy przytrzymać przycisk $-$. Opcjonalnie można dodać tytuł dla łamigłówki. Kreacja kończy się przyciskiem *Add*.

Przejdzie do łamigłówki otworzy ekran solvera. Widoczna jest na nim plansza i przycisk *Solve*. Kliknięcie przycisku rozpocznie rozwiązywanie, a po rozwiązaniu plansza zostanie zaktualizowana oraz podany zostanie czas rozwiązania. Użytkownik może zaznaczyć dostępną opcję na ekranie, by znaleźć wszystkie rozwiązania danej łamigłówki. Dzięki temu można przeglądać wszystkie rozwiązania danej łamigłówki lub zweryfikować unikalność jej rozwiązania.

By usunąć łamigłówkę, należy przytrzymać jej kartę na liście łamigłówek. Aplikacja wymaga zatwierdzenia tej operacji.

Rozdział 6

Podsumowanie

6.1 Aplikacja i praca

Aplikacja przedstawiona w tej pracy umożliwia rekreacyjne rozwiązywanie predefiniowanych nonogramów oraz zapewnia dostęp do szybkiego solvera nonogramów. Dzięki zaimplementowaniu programu na urządzenia mobilne, korzystanie z tych funkcjonalności jest możliwe praktycznie wszędzie.

W pracy zostały opisane pojęcia teoretyczne związane z rozwiązywaniem nonogramów, między innymi klasy złożoności problemów. Nakreślona została złożoność tej klasy łamigłówek oraz pokazane zostały różne podejścia do ich rozwiązywania. Porównanie algorytmów rozwiązujących nonogramy oraz zbadanie wpływu heurystyk na ich wydajność pozwala lepiej zrozumieć istotę złożoności danych plansz i umożliwić łatwiejsze określenie ich trudności.

6.2 Możliwości rozwoju

Dla aplikacji przedstawionej w pracy istnieje szereg funkcjonalności, które zwiększyłyby jej atrakcyjność i konkurencyjność.

Automatyczne generowanie łamigłówek

Dzięki automatycznemu generowaniu łamigłówek o zadanych parametrach, aplikacja zyskałaby na powtarzalności. Użytkownik wybierałby trudność i rozmiar łamigłówki, a moduł zwracałby wygenerowaną łamigłówkę do rozwiązania. Wyzwaniem przy tworzeniu tej funkcjonalności byłoby takie dobranie parametrów, by użytkownik mógł oczekiwać nonogramów mieszczących się w wybranym zakresie trudności. Algorytm mógłby ocenić trudność wygenerowanej łamigłówki poprzez sprawdzenie ilości liczb we wskazówkach, liczby wypełnionych pól w liniach, ruchów potrzebnych solverowi do jej rozwiązania, bądź konieczności zakładania (lub jej braku).

Szczytywanie nonogramów ze zdjęć

Implementacja szczytywania nonogramów ze zdjęć w znaczącym stopniu ułatwiłaby wprowadzanie łamigłówek dla solvera. Dla tego modułu konieczne byłoby opracowanie rozpoznawania łamigłówek w taki sposób, by układ wskazówek i liczb we wskazówkach pokrywał się z siatką, na której zdefiniowana jest łamigłówka. Modyfikacja polegająca na rozpoznawaniu już wypełnionych pól na planszy jest także warta rozważenia.

Tworzenie łamigłówek dla innych graczy

Podobnie jak w przypadku automatycznego generowania łamigłówek, dzielenie się łamigłóvkami znacznie zwiększyłoby powtarzalność aplikacji. Jednak w odróżnieniu od wyżej wymienionej funkcjonalności, łamigłówki tworzone przez graczy mogłyby przedstawiać rzeczywiste obiekty, podobnie jak jest w przypadku łamigłówek dostępnych w aplikacji. Takie łamigłówki miałyby pewne walory estetyczne. Dodanie



tego modułu wiązałoby się z implementacją serwera, który zbierałby łamigłówki od różnych graczy. Aplikacja powinna także zostać poszerzona o możliwość oceny rozwiązanych łamigłówek.

Bibliografia

- [1] S. A. Cook, “The complexity of theorem-proving procedures,” in *Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 151–158, 1971.
- [2] J. van Rijn, *Playing games: The complexity of Klondike, Mahjong, nonograms and animal chess*. PhD thesis, Master’s thesis, Leiden University, 2012.
- [3] “React native.” <https://reactnative.dev/>.
- [4] “React.js.” <https://reactjs.org/>.
- [5] “Javascript oracle.” <https://developer.oracle.com/javascript/>.
- [6] “Javascript ecma.” <https://www.ecma-international.org/>.
- [7] “V8 javascript engine.” <https://v8.dev/>.
- [8] “Spidermonkey javascript engine.” <https://spidermonkey.dev/>.
- [9] “React native elements.” <https://reactnativeelements.com/>.
- [10] “React native icons.” <https://github.com/oblador/react-native-vector-icons>.
- [11] “React native navigation.” <https://reactnavigation.org/>.
- [12] “React native sqlite storage.” <https://github.com/andpor/react-native-sqlite-storage>.
- [13] “React native zoomable view.” <https://github.com/openspacelabs/react-native-zoomable-view>.
- [14] “Node.js.” <https://nodejs.org/en/>.
- [15] Zakchaos, “8x8 food tiles.” <https://opengameart.org/content/43-8x8-food-tiles>.
- [16] vexed, “10x10 top down rpg tiles.” <https://opengameart.org/content/bit-bonanza-10x10-top-down-rpg-tiles>.
- [17] cimeto, “16x16 strategy bronze age icons.” <https://cimeto.itch.io/16x16-strategyrpg-bronze-iron-age-icons>.
- [18] henrysoftware, “pixel food.” <https://henrysoftware.itch.io/pixel-food>.
- [19] drakzin, “20x20 tileset.” <https://opengameart.org/content/20x20-tileset>.
- [20] ikaytobello, “inventory items.” <https://ilkaytobello.itch.io/inventory-items>.
- [21] C. Hamons, “dungeon crawl 32x32.” <https://opengameart.org/content/dungeon-crawl-32x32-tiles>.
- [22] O. M. Army, “plagueking 48x48.” <https://opengameart.org/content/plagueking-48x48>.
- [23] C. Gabriel, “48x48 faces.” <http://cgartsenal.blogspot.com/>.
- [24] LordNeo, “orc 64x64.” <https://opengameart.org/content/orc-static-64x64>.
- [25] LordNeo, “swordsman 64x64.” <https://opengameart.org/content/swordsman-static-64x64>.

