

Kierunek: **Informatyka Stosowana (IST)**  
Specjalność: **Inżynieria Oprogramowania (IO)**

**PRACA DYPLOMOWA**  
**MAGISTERSKA**

**Porównanie wybranych mechanizmów  
programowania współbieżnego i  
równoległego w językach Rust i C++**

**Comparison of selected concurrent and  
parallel programming mechanisms in  
Rust and C++**

Rafał Jasiński

Opiekun pracy  
**dr inż. Zdzisław Sławski**



## Streszczenie

TEMPLATE Praca skupia się na projekcie i implementacji aplikacji wykorzystującej algorytmy genetyczne wraz z ich wizualizacją. Pierwsza część obejmuje teoretyczne podstawy tych algorytmów, porównując je do mechanizmów biologicznej genetyki. Omówiono schemat działania, historię oraz kluczowe elementy, takie jak osobnik, populacja, selekcja, krzyżowanie, mutacja i funkcja celu. Następnie przedstawiono założenia projektowe, obejmujące kodowanie osobnika, metody selekcji, operatory krzyżowania, opcje mutacji, funkcję celu, interfejs użytkownika, przykład użycia i strukturę aplikacji. Zawierają one opis ich zasady działania.

Implementacja aplikacji została opisana w kolejnym etapie, prezentując użyte technologie, wybrany język programowania wraz z interfejsem użytkownika i inne narzędzia. Szczegółowo omówiono implementację osobnika w kodowaniu binarnym, wybór wariantów operacji, metody selekcji, krzyżowania, mutacji, funkcji przystosowania oraz wygląd interfejsu użytkownika wraz z opisem.

Analiza wyników pracy obejmuje testy na danych testowych oraz porównanie różnych metod selekcji, krzyżowania i mutacji. Wnioski z porównań są przedstawione dla każdej badanej metody, dostarczając czytelnikowi kompleksowego spojrzenia na skuteczność poszczególnych elementów algorytmów genetycznych.

Całość pracy zawiera podsumowanie, gdzie prezentowane są główne osiągnięcia oraz wnioski podczas pisania pracy. Praca dostarcza wartościowego spojrzenia na zastosowanie algorytmów genetycznych w projektowaniu aplikacji, a także oferuje praktyczne wskazówki dotyczące implementacji i optymalizacji tych algorytmów.

## Abstract

TEMPLATE The thesis focuses on the design and implementation of an application utilizing genetic algorithms along with their visualization. The first part covers the theoretical foundations of these algorithms, comparing them to the mechanisms of biological genetics. The operation scheme, history, and key elements such as individual, population, selection, crossover, mutation, and fitness function are discussed. The design assumptions are then presented, including individual encoding, selection methods, crossover operators, mutation options, the fitness function, user interface, usage example, and application structure. They contain a description of their principles of operation.

The application implementation is described in the next stage, presenting the technologies used, the chosen programming language along with the user interface, and other tools. The implementation of the individual in binary encoding, the selection of operation variants, selection methods, crossover, mutation, fitness function, and the appearance of the user interface are discussed in detail.

The results analysis includes tests on test data and a comparison of different selection, crossover, and mutation methods. Conclusions from the comparisons are presented for each investigated method, providing the reader with a comprehensive view of the effectiveness of individual elements of genetic algorithms.

The entire thesis includes a conclusion where the main achievements and conclusions drawn during the writing process are presented. The paper provides a valuable perspective on the application of genetic algorithms in application design and also offers practical guidance on the implementation and optimization of these algorithms.

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	<b>6</b>
1.1. Problem badawczy	6
1.2. Struktura pracy	7
1.3. Słownik wybranych pojęć	8
<b>2. Cel oraz zakres pracy</b>	<b>9</b>
<b>3. Wprowadzenie</b>	<b>10</b>
3.1. Programowanie współbieżne	11
3.1.1. Mechanizmy realizujące współbieżność	11
3.1.2. Zastosowania programowania współbieżnego	11
3.1.3. Zalety z programowania współbieżnego	12
3.1.4. Wady programowania współbieżnego	12
3.2. Programowanie równoległe	12
3.2.1. Zasady programowania równoległego	12
3.2.2. Zastosowanie programowania równoległego	13
3.2.3. Zalety programowania równoległego	13
3.2.4. Wady programowania równoległego	14
<b>4. Przegląd literatury</b>	<b>15</b>
4.0.1. Metodologia przeglądu literatury	15
4.0.2. Kryteria selekcji oraz wyłączenia	16
4.0.3. Baza Scopus	16
4.0.4. Baza Google Scholar	17
4.1. Porównanie Rust oraz C++	18
4.1.1. Bezpieczeństwo	18
4.1.2. Czas wykonania	18
4.1.3. Programowanie współbieżne oraz równoległe	19
4.2. Podsumowanie	20
4.2.1. Kierunki dalszych badań	23
<b>5. Wybrane mechanizmy w języku Rust</b>	<b>24</b>
5.1. Podejście do współbieżności i równoległości	24
5.1.1. Ownership oraz borrow	24
5.1.2. Nieustraszona współbieżność	25
5.1.3. Inteligentne wskaźniki (ang. <i>Smart Pointers</i> )	25
5.2. Programowanie współbieżne	27
5.2.1. Model własności pamięci	27
5.2.2. Biblioteki	28
5.2.3. Wątki	28
5.2.4. Kanały	28
5.2.5. Synchronizacja	31
5.2.6. Mutex i RwLock	31

5.2.7. Wartości atomiczne . . . . .	31
5.2.8. Bariery i semaforey . . . . .	31
5.2.9. Asynchroniczność . . . . .	31
5.3. Programowanie równoległe . . . . .	31
5.3.1. Biblioteki . . . . .	31
<b>6. Wybrane mechanizmy w języku C++ . . . . .</b>	<b>32</b>
6.1. Programowanie współbieżne . . . . .	32
6.2. Programowanie równoległe . . . . .	32
6.2.1. OpenMP . . . . .	32
<b>7. Porównanie mechanizmów w językach Rust oraz C++ . . . . .</b>	<b>33</b>
7.1. Programowanie współbieżne . . . . .	33
7.1.1. Zarządzanie wątkami . . . . .	33
7.1.2. Wydajność synchronizacji . . . . .	33
7.1.3. Narzut bezpieczeństwa . . . . .	33
7.1.4. Wybrane algorytmy do analizy wydajności . . . . .	33
7.2. Programowanie równoległe . . . . .	34
7.2.1. Wydajność obliczeniowa . . . . .	34
7.2.2. Wydajność sprzętowa (GFLOP/s) . . . . .	34
7.2.3. Zasoby systemowe . . . . .	34
7.2.4. Wybrane algorytmy do analizy wydajności . . . . .	34
7.3. Metodologia badań . . . . .	34
<b>8. Analiza wyników . . . . .</b>	<b>35</b>
8.1. Programowanie współbieżne . . . . .	35
8.2. Programowanie równoległe . . . . .	35
<b>9. Wnioski oraz rekomendacje . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>10. Podsumowanie . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>Spis rysunków . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>Spis tabel . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>Spis listingów . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>41</b>

# Rozdział 1

## Wstęp

### 1.1. Problem badawczy

Wraz z rozwojem nowoczesnych technologii informatycznych i rosnącą złożonością systemów obliczeniowych, znaczenia nabierają paradygmaty programowania, które pozwalają na maksymalne wykorzystanie zasobów współczesnego sprzętu komputerowego — w szczególności architektur wielordzeniowych. Programowanie współbieżne i równoległe stanowią obecnie podstawę projektowania wydajnych i niezawodnych aplikacji w wielu obszarach, od systemów operacyjnych, przez serwery wysokiej dostępności, aż po rozwiązania z zakresu sztucznej inteligencji czy gier komputerowych.

W kontekście tych wyzwań szczególnie interesujące staje się porównanie narzędzi, jakie oferują współczesne języki programowania. Niniejsza praca magisterska koncentruje się na analizie dwóch języków: Rust oraz C++, które – mimo odmiennej filozofii projektowej – są powszechnie wykorzystywane w systemach wymagających wysokiej wydajności. Rust, jako stosunkowo młody język [?], zdobywa coraz większą popularność[?] ze względu na nowatorskie podejście do bezpieczeństwa pamięci i współbieżności, opierające się na systemie własności ((ang. *ownership*)) oraz sprawdzaniu poprawności kodu na etapie kompilacji. Dzięki temu minimalizuje ryzyko wycieków pamięci, błędów synchronizacji czy wyścigów danych. Z kolei C++ – język dojrzały, o długiej historii i ugruntowanej pozycji w przemyśle – oferuje niezwykle szeroki wachlarz możliwości, jeśli chodzi o zarządzanie zasobami i niskopoziomą optymalizację, jednak często kosztem większego ryzyka błędów programistycznych.

Wybór tych dwóch języków podyktowany jest ich rosnącym znaczeniem w obszarach wymagających efektywnego zarządzania współbieżnością i równoległością. Rust jest promowany jako bezpieczna alternatywa dla C i C++ w systemach krytycznych [?], natomiast C++ nadal pozostaje filarem wielu aplikacji, w tym tych o kluczowym znaczeniu dla infrastruktury informatycznej. Porównanie ich możliwości w zakresie programowania współbieżnego i równoległego dostarcza cennych informacji dla praktyków inżynierii oprogramowania, projektantów systemów oraz badaczy eksplorujących nowe podejścia do zarządzania złożonością kodu.

W związku z powyższym, głównym problemem badawczym pracy są następujące pytania:

**PB1:** *Jakie są różnice i podobieństwa w podejściu do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++ pod względem efektywności, bezpieczeństwa oraz dostępnych narzędzi?*

**PB2:** *W jaki sposób wybór konkretnego języka wpływa na wydajność i stabilność aplikacji współbieżnych oraz równoległych?*

Odpowiedź na to pytanie zostanie udzielona poprzez analizę teoretyczną, przegląd literatury oraz eksperymentalne porównanie konkretnych mechanizmów oferowanych przez oba języki. W ramach pracy przeprowadzone zostaną testy wydajnościowe oraz analiza, które pozwolą na

identyfikację różnic w podejściu do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++.

## 1.2. Struktura pracy

Struktura pracy została zaplanowana w sposób umożliwiający systematyczne przedstawienie zagadnienia oraz przeprowadzenie kompleksowej analizy porównawczej. Po niniejszym wprowadzeniu, rozdział drugi precyzuje cel oraz zakres pracy, określając, które aspekty mechanizmów współbieżności i równoległości będą poddane szczegółowej analizie. Następnie, w rozdziale trzecim, przedstawione zostały podstawowe pojęcia związane z programowaniem współbieżnym i równoległym – zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej – w celu zbudowania wspólnego kontekstu dla dalszych rozważań.

Rozdział czwarty zawiera przegląd literatury oraz wcześniejszych badań dotyczących wykorzystania języków Rust i C++ w projektowaniu systemów wielowątkowych. Zidentyfikowano w nim również istniejące luki badawcze oraz przedstawiono różnice w podejściu do bezpieczeństwa, wydajności i zarządzania pamięcią.

W dalszej części pracy – odpowiednio w rozdziałach piątym i szóstym – zaprezentowano konkretne mechanizmy programowania współbieżnego i równoległego dostępne w językach Rust oraz C++. Każdy z tych rozdziałów zawiera szczegółowe omówienie modeli pamięci, używanych bibliotek (np. Tokio, Rayon, `std::thread`, OpenMP), metod synchronizacji (mutexy, kanały, wartości atomowe), a także wybranych konstrukcji językowych wspierających bezpieczne współdzielenie danych między wątkami.

W rozdziale siódmym dokonano bezpośredniego porównania omawianych mechanizmów, koncentrując się na takich kryteriach jak zarządzanie wątkami, efektywność synchronizacji, narzut związany z bezpieczeństwem, a także wydajność obliczeniowa i sprzętowa.

Rozdział ósmy poświęcony jest analizie wyników eksperymentów, w ramach których porównano działanie wybranych algorytmów zaimplementowanych w obu językach, ze szczególnym uwzględnieniem czasów wykonania, zużycia zasobów oraz stabilności działania.

W końcowej części pracy, rozdział dziewiąty prezentuje wnioski oraz rekomendacje dotyczące praktycznego zastosowania języków Rust i C++ w projektach wymagających wysokiej wydajności i bezpieczeństwa współbieżnego. Pracę zamyka rozdział dziesiąty, który podsumowuje najważniejsze osiągnięcia badawcze oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych analiz i rozwijania proponowanych rozwiązań.

## 1.3. Słownik wybranych pojęć

- **Własność (ang. *ownership*)** - system zarządzania pamięcią, który eliminuje konieczność używania automatycznego odśmiecania, jednocześnie zapobiegając błędom takim jak użycie po zwolnieniu czy podwójne zwolnienie.
- **Pożyczanie (ang. *borrow*)** - również występujący pod inną nazwą jako przenoszenie własności [16], jest to mechanizm pozwalający na używanie wartości bez przejmowania jej na własność. Dzięki temu możemy przekazywać dane do funkcji lub między częściami programu bez ich kopiowania czy przenoszenia.
- **Programowanie współbieżne** - to sposób wykonywania wielu zadań jednocześnie lub przeplatania ich w czasie, co zwiększa wydajność programu. Może być realizowane za pomocą wątków, procesów lub programowania asynchronicznego.
- **Programowanie równoległe** - to sposób wykonywania wielu zadań jednocześnie, co zwiększa wydajność programu. W odróżnieniu od programowania współbieżnego, programowanie równoległe polega na wykonywaniu zadań w tym samym czasie, a nie przeplataniu ich w czasie.
- **Wątek** - to pojedynczy proces, który może być wykonywany równoległe z innymi procesami. Wątki mogą współdzielić zasoby, takie jak pamięć, ale wymagają synchronizacji, aby uniknąć wyścigów danych.
- **Proces** - to instancja programu, która jest wykonywana w systemie operacyjnym. Procesy są izolowane od siebie i mają własne zasoby, takie jak pamięć i przestrzeń adresowa.
- **Wyścigi danych (ang. *Race conditions*)** - to sytuacja, w której dwa lub więcej wątków lub procesów próbuje modyfikować wspólną zmienną w tym samym czasie, co prowadzi do nieprzewidywalnych wyników.
- **SIMD** - (ang. *Single Instruction, Multiple Data*) - pojedyncza instrukcja wykonywana na wielu danych jednocześnie. Jest to technika optymalizacji wydajności obliczeń, która wykorzystuje jednostki wektorowe dostępne w nowoczesnych procesorach.
- **Licznik Redis** - to mechanizm wykorzystujący bazę danych Redis do przechowywania i aktualizowania liczników w czasie rzeczywistym. Redis, jako szybka baza typu klucz-wartość, pozwala na błyskawiczne operacje inkrementacji i dekrementacji wartości przypisanej do danego klucza.



# Rozdział 2

## Cel oraz zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie pogłębionej analizy oraz wszechstronnego porównania mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w dwóch językach programowania: Rust i C++. Celem jest przedstawienie kluczowych różnic oraz podobieństw w podejściu do zarządzania wielowątkowością, analizując jednocześnie efektywność, bezpieczeństwo oraz wygodę stosowania narzędzi dostępnych w obu językach.

W ramach pracy szczególną uwagę poświęcono omówieniu wybranych bibliotek i frameworków, które wspierają tworzenie aplikacji wielowątkowych w Rust (np. Tokio, Rayon) i C++ (np. `std::thread`, OpenMP, TBB). Przeanalizowane zostaną mechanizmy bezpieczeństwa oraz zarządzania pamięcią i wątkami, które odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu stabilności i wydajności aplikacji współbieżnych i równoległych.

Dodatkowym celem jest przeprowadzenie analizy wydajności oraz efektywności implementacji aplikacji wielowątkowych, co pozwoli na ocenę szybkości działania i efektywnego zarządzania zasobami w obu językach. Badanie uwzględni również aspekty praktyczne, takie jak łatwość użycia narzędzi, dostępność wsparcia ze strony społeczności oraz dojrzałość ekosystemu każdego z języków.

Aby zilustrować wyniki teoretyczne w praktyce, przeprowadzona zostanie implementacja aplikacji współbieżnych i równoległych w obu językach, co umożliwi porównanie osiągniętych wyników wydajnościowych oraz analizę różnic w strukturze i stylu kodu. Efektem pracy będzie również identyfikacja scenariuszy, w których jeden z języków może przewyższać drugi pod względem wydajności, bezpieczeństwa, czy wygody stosowania, co pozwoli na sformułowanie rekomendacji dotyczących wyboru języka w zależności od specyficznych wymagań projektowych.

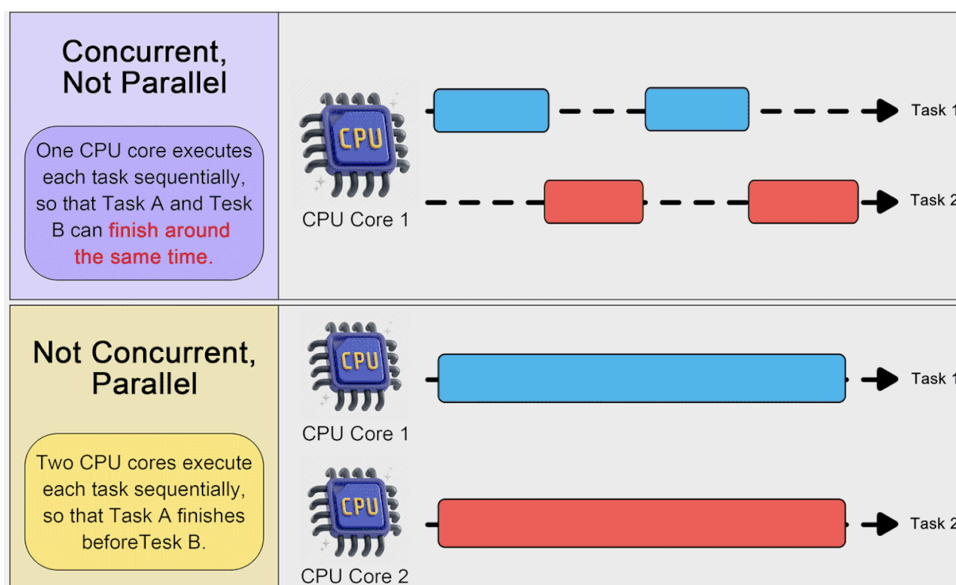
# Rozdział 3

## Wprowadzenie

Rozdział ten został poświęcony przybliżeniu czytelnikowi zasad działania programowania współbieżnego oraz równoległego, a także omówieniu tych mechanizmów w kontekście języków Rust i C++.

Współczesne systemy komputerowe stają się coraz bardziej złożone, a jednocześnie coraz bardziej wydajne dzięki rozwojowi technologii wielordzeniowych i wieloprocesorowych. W tej sytuacji programowanie współbieżne i równoległe zyskało kluczowe znaczenie, umożliwiając pełne wykorzystanie możliwości sprzętowych. Umiejętność projektowania oraz wdrażania aplikacji, które skutecznie zarządzają równoczesnym wykonywaniem wielu zadań, stała się niezbędna dla programistów tworzących oprogramowanie wymagające wysokiej wydajności oraz możliwości dalszego rozwoju [17, 54, 20, 53]. W niniejszej pracy autor postanowił zbadać te dwa podejścia zarówno w kontekście języka Rust, jak i C++. Rust jest relatywnie młodym językiem, zaprojektowanym z myślą o bezpieczeństwie pamięci i unikaniu typowych błędów wielowątkowych. Z kolei C++ to język o ugruntowanej pozycji, znany z elastyczności i wysokiej wydajności, co czyni go popularnym wyborem dla aplikacji wymagających precyzyjnego zarządzania zasobami.

Programowanie współbieżne (ang. concurrent programming) oraz programowanie równoległe (ang. parallel programming) to dwa różne, lecz uzupełniające się podejścia, które umożliwiają organizację pracy wielu zadań w aplikacji - poglądowa różnica została zamieszczona na rysunku 3.1. Chociaż często używa się ich zamiennie, ich cechy i cele różnią się znacznie.



Rys. 3.1: Różnice między wykonywaniem zadań współbieżnie a równoległe [19]

### 3.1. Programowanie współbieżne

Programowanie współbieżne to podejście w projektowaniu aplikacji, które umożliwia równoczesne wykonywanie wielu zadań, choć faktycznie procesor wykonuje tylko jedno zadanie na raz. Dzięki technice tzw. "quasi-równoległości" [43] użytkownik ma wrażenie, że zadania te są realizowane jednocześnie, ponieważ procesor przełącza się między nimi w bardzo krótkich odstępach czasu. Takie podejście jest kluczowe w aplikacjach interaktywnych, takich jak gry komputerowe, aplikacje mobilne czy serwisy internetowe, które muszą błyskawicznie reagować na różne zdarzenia (np. żądania użytkowników, kliknięcia czy komunikaty sieciowe) bez zauważalnych opóźnień [26].

Programowanie współbieżne pozwala na lepsze zarządzanie zadaniami w aplikacjach, które muszą obsługiwać wiele operacji jednocześnie, choć nie zawsze są to zadania wymagające intensywnych obliczeń. Przykładami takich aplikacji mogą być systemy obsługi żądań użytkowników na serwerach, aplikacje multimedialne czy interfejsy graficzne [17].

#### 3.1.1. Mechanizmy realizujące współbieżność

Współbieżność różni się od programowania równoległego tym, że nie wymaga fizycznej wielordzeniowości procesora. Nawet na jednordzeniowym procesorze możliwe jest uzyskanie współbieżności, ponieważ procesor może w bardzo szybki sposób przełączać się między różnymi zadaniami. Tego rodzaju przełączanie nazywane jest "wirtualnym przełączaniem" i odbywa się na poziomie systemu operacyjnego, który odpowiedzialny jest za przeprowadzanie tego procesu w sposób niewidoczny dla użytkownika. Dzięki tej technice użytkownik nie zauważa, że procesor w danym momencie wykonuje tylko jedno zadanie, mimo że wiele z nich jest obsługiwanych "po kolei" w bardzo krótkich cyklach [54, 18].

Kolejnym istotnym mechanizmem, który wspiera współbieżność, jest harmonogram zadań (ang. scheduler). Harmonogram jest odpowiedzialny za zarządzanie dostępem do procesora i przydzielanie zasobów obliczeniowych poszczególnym zadaniam. Dzięki zaawansowanym algorytmom harmonogramowania, system operacyjny decyduje, które zadanie ma być wykonane w danym czasie, jak długo ma trwać jego wykonanie, oraz kiedy procesor ma przełączyć się na inne zadanie. Harmonogram zadań może być dostosowywany w zależności od wymagań aplikacji, co pozwala na osiągnięcie optymalnej wydajności i minimalizację opóźnień [54].

#### 3.1.2. Zastosowania programowania współbieżnego

Programowanie współbieżne jest niezwykle ważne w aplikacjach, które muszą reagować na różne wydarzenia użytkownika lub zewnętrzne zdarzenia w czasie rzeczywistym. Typowe zastosowania programowania współbieżnego obejmują [49, 54]:

- Aplikacje interaktywne – gry komputerowe, aplikacje mobilne, aplikacje desktopowe, które muszą natychmiast reagować na akcje użytkownika, jak kliknięcia, gesty czy komendy wprowadzane z klawiatury.
- Systemy serwerowe – serwisy internetowe, bazy danych, aplikacje chmurowe, które muszą jednocześnie obsługiwać wielu użytkowników, wykonując różne operacje, takie jak przetwarzanie zapytań, zapisywanie danych, czy obsługę sesji użytkowników.
- Przetwarzanie zdarzeń w czasie rzeczywistym – systemy monitoringu, systemy alarmowe, aplikacje do analizy danych strumieniowych, które muszą przetwarzać i reagować na dane napływające w czasie rzeczywistym.
- Multimedia – odtwarzanie wideo, transmisje strumieniowe, edycja audio i wideo, gdzie aplikacje muszą równocześnie obsługiwać wiele wątków.

### 3.1.3. Zalety z programowania współbieżnego

Główne zalety stosowania programowania współbieżnego w aplikacjach to [7, 54]:

- Zwiększenie responsywności – dzięki szybkiemu przełączaniu między zadaniami aplikacje stają się bardziej responsywne i wydajne, co jest szczególnie ważne w przypadku interfejsów użytkownika oraz aplikacji reagujących na dynamicznie zmieniające się dane.
- Lepsze wykorzystanie zasobów procesora – współbieżność pozwala na efektywne wykorzystanie mocy obliczeniowej procesora, nawet w przypadku procesorów jednordzeniowych. Przełączanie między zadaniami pozwala na ich efektywne wykonywanie w krótkich cyklach czasowych.
- Lepsze wykorzystanie zasobów procesora – współbieżność pozwala na efektywne wykorzystanie mocy obliczeniowej procesora, nawet w przypadku procesorów jednordzeniowych. Przełączanie między zadaniami pozwala na ich efektywne wykonywanie w krótkich cyklach czasowych.
- Skalowalność – aplikacje wykorzystujące współbieżność mogą być łatwiej skalowane na wiele rdzeni procesora lub urządzeń, dzięki czemu mogą obsługiwać większą liczbę użytkowników lub większe ilości danych.

### 3.1.4. Wady programowania współbieżnego

Pomimo wielu korzyści, programowanie współbieżne wiąże się również z pewnymi wyzwaniem [7, 50]:

- Złożoność synchronizacji – w przypadku współdzielenia zasobów, takich jak pamięć, konieczne jest odpowiednie zarządzanie dostępem do nich. Błędy synchronizacji mogą prowadzić do problemów takich jak wyścigi danych (ang. race conditions) lub zakleszczenia (ang. deadlocks), które mogą uniemożliwić poprawne działanie aplikacji.
- Problemy związane z wydajnością – chociaż współbieżność pozwala na szybsze przetwarzanie wielu zadań, jej realizacja może prowadzić do narzutów związanych z przełączaniem kontekstu i synchronizacją. W aplikacjach o dużym stopniu współzależności zadań, narzut ten może negatywnie wpływać na wydajność.
- Trudności w debugowaniu – aplikacje współbieżne są trudniejsze do debugowania, ponieważ błędy mogą występować sporadycznie i w zależności od kolejności przełączania wątków, co utrudnia ich wykrywanie i naprawę.

## 3.2. Programowanie równoległe

Programowanie równoległe to technika, która umożliwia równoczesne wykonywanie wielu zadań, wykorzystując wiele jednostek obliczeniowych. W tym podejściu zadania są fizycznie realizowane jednocześnie na różnych rdzeniach procesora lub innych jednostkach przetwarzających. Programowanie równoległe jest szczególnie użyteczne w aplikacjach wymagających znacznej mocy obliczeniowej, takich jak obliczenia w dziedzinie uczenia maszynowego, symulacje naukowe, przetwarzanie dużych zbiorów danych, rendering grafiki oraz aplikacje o wysokiej wydajności. Dzięki tej technice możliwe jest zredukowanie czasu wykonywania obliczeń, które w tradycyjnym, sekwencyjnym modelu zajmowałyby znacznie więcej czasu [26, 10].

### 3.2.1. Zasady programowania równoległego

Programowanie równoległe opiera się na podziale złożonych zadań na mniejsze części, które mogą być realizowane jednocześnie. Aby osiągnąć równoległość, aplikacje muszą być zaprojektowane w sposób umożliwiający rozdzielenie obliczeń pomiędzy liczne rdzenie procesora

lub urządzenia obliczeniowe, takie jak karty graficzne (GPU). Każda część zadania, tak zwany wątek, może wykonywać obliczenia na niezależnych danych, a na końcu wyniki są zbierane i łączone, aby uzyskać końcowy rezultat [10].

### Modele pamięci

W kontekście programowania równoległego, istnieje szereg modeli pamięci, które definiują metody przechowywania oraz dostępu do danych przez jednostki przetwarzające [10]:

- Pamięć współdzielona (ang. Shared Memory Model) – wszystkie jednostki obliczeniowe dzielą wspólną pamięć, co umożliwia łatwą wymianę danych, ale wymaga odpowiedniej synchronizacji.
- Pamięć rozproszona (ang. Distributed Memory Model) – każda jednostka obliczeniowa ma swoją własną pamięć, a komunikacja między jednostkami odbywa się za pomocą przesyłania wiadomości (np. przy użyciu protokołu MPI – Message Passing Interface).
- Model hybrydowy – łączy elementy obu powyższych modeli, gdzie pamięć współdzieloną wykorzystują jednostki w ramach jednego węzła, a komunikacja między węzłami odbywa się przez przesyłanie wiadomości.

### Taksonomia Flynn’a

#### Zrównoleglenia

#### 3.2.2. Zastosowanie programowania równoległego

Programowanie równoległe znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, w których wymagana jest ogromna moc obliczeniowa oraz szybkie przetwarzanie dużych zbiorów danych. Jednymi z kilku najczęściej wykorzystywanych zastosowań są [42]:

- Uczenie maszynowe i sztuczna inteligencja (ang. AI) – w szczególności w kontekście głębokiego uczenia (ang. deep learning), gdzie trening modeli na dużych zbiorach danych wymaga wykonywania tysięcy operacji matematycznych jednocześnie. Dzięki równoległości można przyspieszyć proces uczenia, wykorzystując jednostki GPU, które są zoptymalizowane do obliczeń równoległych.
- Symulacje naukowe – w dziedzinach takich jak fizyka, chemia, biologia, gdzie tworzenie symulacji wymagających obliczeń na dużą skalę (np. symulacje molekularne, modelowanie zjawisk atmosferycznych, dynamika płynów) są realizowane na dużych klastrach komputerowych.
- Przetwarzanie dużych zbiorów danych (ang. Big Data) – analiza danych w czasie rzeczywistym lub w partiach, które pozwalają na rozdzielanie zadań przetwarzania danych na wiele maszyn.
- Rendering grafiki 3D – w grach komputerowych, filmach animowanych i inżynierii wizualnej, gdzie renderowanie obrazów i animacji wymaga intensywnych obliczeń graficznych. Programowanie równoległe umożliwia szybkie generowanie wysokiej jakości obrazów przez równoczesne przetwarzanie wielu elementów obrazu.

#### 3.2.3. Zalety programowania równoległego

Poprzez wykorzystanie programowania równoległego można się spodziewać następujących korzyści [42]:

- Zwiększenie wydajności – dzięki równoczesnemu przetwarzaniu wielu zadań, czas realizacji obliczeń jest znacznie skrócony.

- Lepsze wykorzystanie zasobów obliczeniowych – współczesne procesory, w tym wielordzeniowe CPU i GPU, oferują dużą moc obliczeniową, którą można efektywnie wykorzystać przy pomocy technik równoległych.
- Skalowalność – aplikacje równoległe mogą być skalowane w zależności od dostępnych zasobów obliczeniowych, umożliwiając zwiększenie wydajności przy rozwoju systemu.

### 3.2.4. Wady programowania równoległego

Każde rozwiązanie niesie ze sobą zalety jak i wady czy też wyzwania implementacyjne, które się z nim wiążą. Programowanie równoległe wiąże się z kilkoma wyzwaniami, które wymagają szczególnej uwagi projektanta systemów [42, 10]:

- Złożoność projektowania – projektowanie systemów równoległych jest bardziej skomplikowane niż projektowanie aplikacji sekwencyjnych. Należy odpowiednio podzielić zadania na mniejsze jednostki, które można wykonać jednocześnie, oraz zadbać o ich synchronizację.
- Synchronizacja danych – w przypadku używania pamięci współdzielonej, należy odpowiednio synchronizować dostęp do danych, aby uniknąć błędów takich jak wyścigi danych (race conditions), które mogą prowadzić do nieprzewidywalnych wyników.
- Problemy komunikacyjne – w systemach rozproszonych, komunikacja między jednostkami przetwarzającymi może stać się wąskim gardłem, obniżającym wydajność systemu. W takich przypadkach konieczne jest optymalizowanie przepływu danych i unikanie zbędnych operacji komunikacyjnych.
- Overhead związany z równoległością – chociaż programowanie równoległe przyspiesza obliczenia, wprowadza również dodatkowy narzut związany z przełączaniem kontekstu między zadaniami, synchronizacją wątków i komunikacją. W przypadku niewielkich zadań, zysk z równoległości może nie przewyższać kosztów narzutu.

Technologie i narzędzia do programowania równoległego Do realizacji obliczeń równoległych dostępnych jest wiele narzędzi i bibliotek wspierających programistów w implementacji równoległych aplikacji. Do najpopularniejszych należą:

- OpenMP (Open Multi-Processing) – biblioteka dla języków C, C++ i Fortran, która umożliwia programowanie równoległe w modelu pamięci współdzielonej. [53, 20]
- CUDA – platforma stworzona przez firmę NVIDIA, przeznaczona do programowania na procesorach graficznych (GPU), wykorzystywana głównie w zastosowaniach związanych z uczeniem maszynowym i obróbką grafiki [10].
- MPI (Message Passing Interface) – standard komunikacji w systemach z pamięcią rozproszoną

# Rozdział 4

## Przegląd literatury

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie dotychczasowych badań i publikacji dotyczących mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++. Analiza literatury umożliwi zrozumienie aktualnego stanu wiedzy w tej dziedzinie, a także wskazanie na występujące luki badawcze, które niniejsza praca postara się wypełnić. Na samym wstępie zostały postawione następujące pytania do przeglądu literatury, które pomogą zrozumieć oraz sprawdzić aktualny stan wiedzy jeżeli chodzi o porównanie języków Rust oraz C++:

**PPL1:** *Jakie główne koncepcje/teorie dominują w literaturze dotyczącej porównania języków Rust oraz C++?*

**PPL2:** *Jakie metody badawcze są najczęściej stosowane do analizy różnic pomiędzy językami?*

**PPL3:** *Jak wygląda porównanie dostępności i dojrzałości bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w obu językach?*

**PPL4:** *Czy istnieją systematyczne metodologie porównywania języków programowania w kontekście współbieżności, które można zastosować do analizy Rust i C++?*

**PPL5:** *Jakie aspekty programowania współbieżnego i równoległego w Rust i C++ nie zostały dostatecznie zbadane w literaturze?*

**PPL6:** *Jaki jest stan wiedzy na temat wykorzystania programowania współbieżnego w ramach GPU w językach Rust i C++?*

Odpowiedzi na powyższe pytania pozwolą na zidentyfikowanie kluczowych obszarów, które wymagają dalszych badań oraz na wskazanie na potencjalne kierunki rozwoju w dziedzinie programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++.

### 4.0.1. Metodologia przeglądu literatury

Proces przeglądu literatury został zrealizowany zgodnie z zasadami przeglądu systematycznego, co oznaczało zastosowanie jasno określonych kryteriów selekcji i wyłączenia. Główne źródła literaturowe obejmowały artykuły naukowe, materiały konferencyjne oraz dokumentację techniczną. Wyszukiwanie przeprowadzono w renomowanych bazach danych naukowych oraz repozytoriach zawierających publikacje z zakresu inżynierii oprogramowania i języków programowania. Dodatkowo zostały również uwzględnione źródła internetowe oraz dokumentacje techniczne.

Przegląd literatury odbywał się z wykorzystaniem narzędzi baz danych oferujących wyszukiwanie, filtrowanie oraz przegląd prac: Scopus, Google Scholar.

#### 4.0.2. Kryteria selekcji oraz wyłączenia

W procesie selekcji literatury uwzględniano przede wszystkim publikacje wydane po 2012 roku, co wynika z faktu, iż w tym właśnie roku zadebiutował język Rust [6]. Wyjątek stanowiły prace o charakterze ogólnym lub takie, które nie odnosiły się bezpośrednio do języka Rust, lecz zawierały istotne informacje dla problematyki badawczej niniejszej pracy.

Analiza obejmowała literaturę w języku polskim oraz angielskim, przy czym zdecydowana większość źródeł stanowiły publikacje anglojęzyczne. Selekcja materiałów opierała się na zgodności tematycznej z zakresem badań. W przypadku wątpliwości co do adekwatności danej pozycji, decyzja o jej włączeniu do przeglądu podejmowana była na podstawie analizy streszczenia. Jeśli po tej analizie publikacja wydawała się istotna, przechodzono do pełnej oceny jej treści.

Publikacje, które po dogłębnej analizie okazywały się nieodpowiednie dla głównego problemu badawczego, nie były uwzględniane w zasadniczej części pracy. Niemniej jednak, jeśli przyczyniły się do lepszego zrozumienia badanego zagadnienia lub pomogły w odpowiedzi na pytania do przeglądu literatury 4, były one odnotowywane jako materiały pomocnicze. Prace niepełniające powyższych kryteriów lub te, które nie są dostępne za pośrednictwem dostępnych metod (bądź też braku odpowiedzi twórców o prośbę udostępnienia pracy) były wykluczane z dalszej analizy.

#### 4.0.3. Baza Scopus

W ramach bazy scopus wykorzystano następujące kwerendy do wyszukiwania - tabela 4.2

Tab. 4.1: Kwerendy użyte w bazie Scopus <sup>1</sup>

Lp.	Kwerenda	Liczba wyników
1	ALL ("concurrent programming" OR "parallel programming") AND (ALL ("Rust") AND ALL ("C++"))	444
2	ALL ("concurrent programming" OR "parallel programming") AND (ALL ("Rust") AND ALL ("C++") ) AND ( ALL ("compare"))	28
3	(TITLE-ABS-KEY(("concurrent programming" OR "parallel programming") AND ("Rust" AND "C++"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "evaluation" OR "benchmark"))	6
4	(TITLE-ABS-KEY(("thread" OR "async" OR "future" OR "actor model" OR "message passing" OR "shared memory") AND ("Rust" AND "C++"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "performance" OR "evaluation"))	50
5	(TITLE-ABS-KEY(("Rust" AND "C++") AND ("concurrency model" OR "parallel constructs" OR "multithreading"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "study"))	2

W celu identyfikacji literatury związanej z porównaniem wybranych mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++, opracowano pięć zapytań w bazie Scopus, z których każde miało określony cel badawczy. Pierwsze zapytanie miało na celu uzyskanie ogólnego przeglądu literatury, wyszukując wszystkie dokumenty, w których występują jednocześnie zagadnienia programowania współbieżnego lub równoległego oraz języki Rust i C++, niezależnie od kontekstu. Pozwoliło to oszacować ogólną skalę badań łączących

<sup>1</sup> Ilość wyników dla poszczególnych zapytań może się różnić w zależności od daty (wyszukiwanie przeprowadzono w okresie listopad-luty 2024/25).



te zagadnienia. Drugie zapytanie zawężyło zakres wyszukiwania poprzez dodanie słowa kluczowego „compare”, co umożliwiło wyodrębnienie publikacji, w których dokonano bezpośredniego porównania języków Rust i C++ w kontekście współbieżności lub równoległości. Dzięki temu uzyskano bardziej ukierunkowany zbiór literatury odnoszącej się do analizy porównawczej. Trzecie zapytanie charakteryzowało się większą precyzją, ograniczając wyniki do tytułów, streszczeń oraz słów kluczowych, i uwzględniało wyłącznie publikacje zawierające odniesienia do ewaluacji, porównań bądź benchmarków języków Rust i C++. Takie podejście pozwoliło wyselekcjonować najbardziej tematycznie powiązane prace. Czwarte zapytanie miało charakter bardziej techniczny, koncentrując się na konkretnych mechanizmach współbieżności, takich jak wątki, asynchroniczność, obiekty typu futury, model aktorów, przesyłanie komunikatów czy pamięć współdzielona, w połączeniu z terminami dotyczącymi wydajności i oceny. Umożliwiło to dotarcie do badań analizujących niskopoziomowe aspekty działania tych mechanizmów w obu językach. Piąte zapytanie skupiało się na poziomie koncepcyjnym, wyszukując publikacje zawierające takie terminy jak model współbieżności, konstrukty równoległe czy wielowątkowość, wraz z frazami dotyczącymi porównań lub analiz. Celem było zidentyfikowanie prac badających różnice w podejściu do współbieżności na poziomie architektury języka i jego konstrukcji wewnętrznych.

Autor zdecydował się również użyć nowego, wbudowane narzędzia w systemie Scopus - Scopus AI. Narzędzie to oparte na sztucznej inteligencji, wspomaga eksplorację akademicką w oparciu o dane z platformy Scopus. Dzięki integracji z narzędziem Copilot optymalizuje wyszukiwania, łącząc metody semantyczne i dopasowanie słów kluczowych. Choć Scopus AI ułatwia badania, jego wyniki warto weryfikować, ponieważ mogą zawierać nieścisłości lub stronniczość. Po wprowadzeniu tytułu pracy w języku angielskim jako kwerendę, Scopus AI zwrócił 9 wyników, biorąc pod uwagę kwerendę stworzoną na podstawie tytułu pracy, zamieszczoną w listingu 4.1. Zwrócone prace pokrywają się z przeglądem umieszczonym w tabeli 4.2

Listing 4.1: Kwerenda wygenerowana przez AI

```
("concurrent programming" OR "parallel programming" OR "
  ↳ multithreading" OR "asynchronous")
AND ("Rust" OR "C++" OR "programming languages" OR "software
  ↳ development")
AND ("performance" OR "efficiency" OR "scalability" OR "resource
  ↳ management")
AND ("synchronization" OR "thread safety" OR "deadlock" OR "race
  ↳ condition")
AND ("libraries" OR "frameworks" OR "tools" OR "APIs")
```

#### 4.0.4. Baza Google Scholar

Tab. 4.2: Kwerendy użyte w bazie Scopus <sup>2</sup>

Lp.	Kwerenda	Liczba wyników
1	Comparison of selected concurrent and parallel programming mechanisms in Rust and C++	321

Ze względu na dużą ilość wyników zostało wzięte pod uwagę pierwsze 10 stron bazy. Po uwzględnieniu kryterium selekcji oraz wyłączenia, które zostały opisane w podrozdziale 4.0.2,

uzyskano 12 wyników.

## 4.1. Porównanie Rust oraz C++

Porównanie języków programowania Rust i C++ jest przedmiotem licznych publikacji, które analizują ich różnorodne aspekty, takie jak struktura kodu, sposób kompilacji, bezpieczeństwo, wydajność oraz obsługa współbieżności i równoległości. Niestety wśród prac naukowych zidentyfikowanych w bazach danych Scopus oraz Google Scholar, nie znaleziono prac, które jednoznacznie porównywałyby oba języki w kontekście programowania współbieżnego i równoległego.

W literaturze można znaleźć prace, które analizują różnice między Rustem a C++ w kontekście bezpieczeństwa, wydajności, zarządzania pamięcią oraz obsługi błędów.

### 4.1.1. Bezpieczeństwo

Bezpieczeństwo języków Rust i C++ jest jednym z najczęściej analizowanych tematów w literaturze. W przypadku Rusta duży nacisk kładziony jest na eliminację całych klas błędów, takich jak null pointer dereferencing, data races oraz wycieki pamięci. Mechanizmy takie jak ownership, borrow checker oraz obowiązkowa mutowalność zmiennych (explicit mutability) są wymieniane jako kluczowe elementy zapewniające bezpieczeństwo oraz minimalizując ryzyko wycieków pamięci [34].

Z drugiej strony, C++ umożliwia większą kontrolę nad pamięcią, co może być zaletą w systemach wymagających maksymalnej wydajności, ale jednocześnie wiąże się z koniecznością samodzielnego zarządzania zasobami przez programistów. W literaturze [27, 24] często podkreśla się, że to właśnie większa złożoność i ryzyko błędów w kodzie C++ skłoniły społeczność do stworzenia języków takich jak Rust.

Przykładowo, badania [25, 44, 30] wskazują, że aplikacje napisane w Rusta są mniej podatne na błędy związane z wyścigami danych (ang. *data races*), co ma szczególne znaczenie w środowiskach wielowątkowych. Z kolei w C++ stosowanie bibliotek takich jak `std::thread` czy frameworków typu OpenMP pozwala na osiągnięcie podobnych celów, choć wymaga od programistów większej uwagi w zakresie synchronizacji. Dodatkowo są również prace [55, 48], które przedstawiają próby implementacji mechanizmów wbudowanych w język Rust (prawo własności, pożyczka) do języka C.

### 4.1.2. Czas wykonania

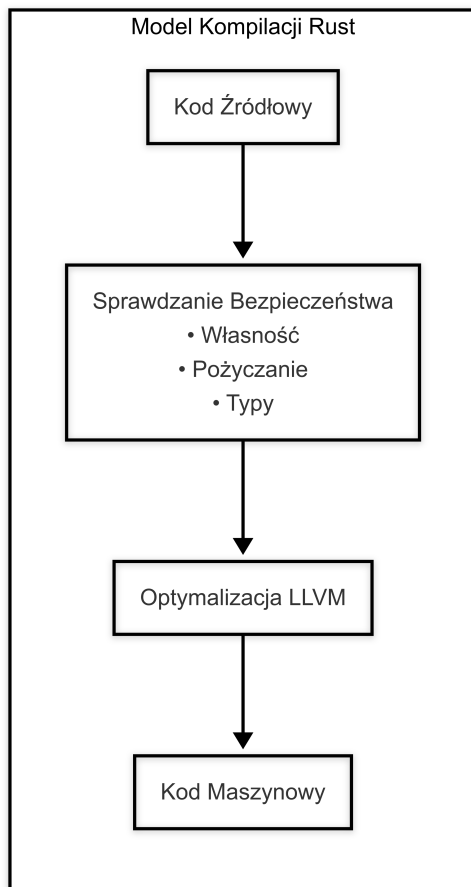
Porównania czasów wykonania programów napisanych w Rust i C++ są częstym tematem analiz [52, 33, 22, 36]. W badaniach tych zostało wykazane, że pod względem wydajności Rust jest konkurencyjny wobec C++, co wynika z mechanizmów kompilacji i optymalizacji kodu.

Jednak kluczową różnicą jest to, że Rust wprowadza pewne narzuty związane z kontrolą bezpieczeństwa w czasie kompilacji, które mogą wydłużyć czas budowania programu, ale nie wpływają znacząco na czas wykonania.

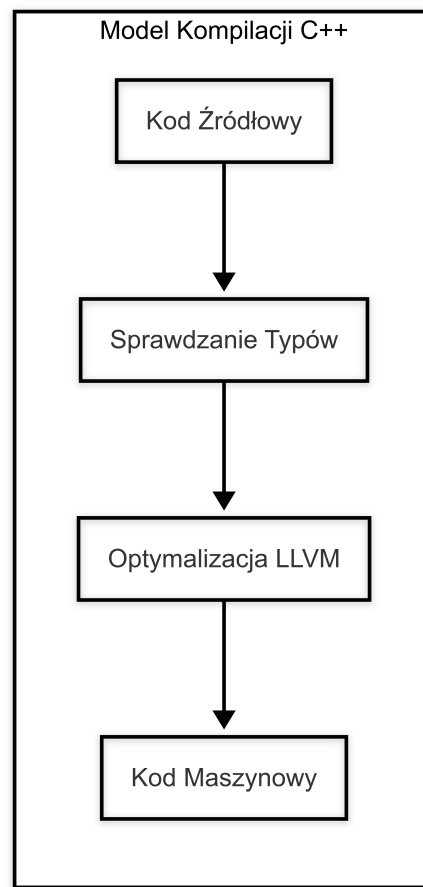
Rust i C++ są językami kompilowanymi, co oznacza, że dedykowany kompilator tłumaczy kod źródłowy na kod maszynowy przed jego wykonaniem. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wysokiej wydajności programów. W literaturze [35] często podkreśla się, że Rust, w odróżnieniu od C++, kładzie większy nacisk na bezpieczeństwo pamięci oraz typów w czasie kompilacji,

<sup>2</sup>Ilość wyników dla poszczególnych zapytań może się różnić w zależności od daty (wyszukiwanie przeprowadzono w okresie marzec-kwiecień 2025).

co ma kluczowe znaczenie w nowoczesnym oprogramowaniu. W kontekście C++ wskazuje się na jego większą elastyczność oraz bogaty ekosystem, który pozwala na szeroką gamę zastosowań, ale jednocześnie wymaga większej uwagi programistów w zakresie zarządzania pamięcią i synchronizacji wątków.



Rys. 4.1: Kroki kompilacji w języku Rust



Rys. 4.2: Kroki kompilacji w języku C++

Rys. 4.3: Porównanie kroków kompilacji w językach Rust i C++

Informacje o procesie kompilacji pochodzą z [35, 16, 31], które opisują integrację z LLVM i różnice w sprawdzaniu bezpieczeństwa. Na diagramie 4.1 drugi blok reprezentuje dodatkowe etapy sprawdzania bezpieczeństwa w Rust, które nie występują w C++. Z kolei na diagramie 4.2 drugi blok pokazuje podstawowe sprawdzanie typów w C++, które jest mniej rygorystyczne niż system Rust. Ze względu na różnicę w procesie kompilacji kodu powstają główne różnice w bezpieczeństwie i wydajności obu języków.

C++ nadal pozostaje językiem preferowanym w projektach o krytycznym znaczeniu wydajnościowym, takich jak gry komputerowe, symulacje fizyczne czy systemy wbudowane, choć Rust zaczyna zdobywać popularność w tych obszarach ze względu na większe bezpieczeństwo przy porównywalnej wydajności.

### 4.1.3. Programowanie współbieżne oraz równoległe

Współbieżność i równoległość to kluczowe elementy programowania w językach Rust i C++. Oba języki oferują zaawansowane narzędzia i biblioteki do zarządzania wielowątkowością.

Rust wyróżnia się systemem własności (ang. *ownership*) i wbudowanym mechanizmem wykrywania błędów współbieżności, co eliminuje wyścigi danych w czasie kompilacji. Narzędzia takie jak Tokio i Rayon pozwalają na łatwe tworzenie i zarządzanie zadaniami asynchronicznymi

i równoległymi. C++ z kolei oferuje wsparcie dla wielowątkowości poprzez standardową bibliotekę (`std::thread`) oraz zaawansowane szkielety aplikacyjne (frameworks), takie jak OpenMP czy TBB (Threading Building Blocks). Choć te narzędzia są niezwykle potężne, nie zapewniają automatycznej ochrony przed błędami współbieżności, co wymaga większej ostrożności ze strony programistów.

Strona [37] szczegółowo analizuje różnice w podejściu do współbieżności w obu językach, podkreślając, że Rust dzięki swojemu modelowi zarządzania pamięcią oferuje większe bezpieczeństwo, podczas gdy C++ pozostaje bardziej elastyczny, co może być korzystne w bardziej specyficznych scenariuszach. Jednak jak sam autor [37] wskazuje, należy zwrócić uwagę, że większość sztuczek optymalizacyjnych pokazanych w tym porównaniu to jedynie adaptacje oryginalnych rozwiązań C++ w języku Rust. Koncentruje się ona na praktycznym porównaniu języków Rust i C++ pod względem równoległego przetwarzania, szczególnie na poziomie niskopoziomowych operacji i synchronizacji wątków. Znajdują się tam benchmarki pokazujące różnice w czasie wykonywania programów, narzędzia diagnostyczne oraz zestawienie wydajności w kontekście SIMD, wątków, oraz komunikacji międzypamięciowej.

W pracy akademickiej Brandefelta i Heymana [28] dokonano porównania wydajności oraz złożoności implementacyjnej aplikacji wielowątkowej napisanej w trzech językach: Rust, C++ oraz Java. Badanie to wykazało, że Rust oferuje zbliżoną wydajność do C++, przy jednoczesnym znacznym uproszczeniu kodu (mniejsza liczba linii kodu), co przekłada się na łatwiejsze utrzymanie i potencjalnie mniejszą podatność na błędy. Autorzy wskazują, że Rust, dzięki swojemu systemowi własności (ang. *ownership*), eliminuje całe klasy błędów związanych z zarządzaniem pamięcią, bez konieczności stosowania odświeczania.

Kolejne istotne opracowanie przedstawiono w publikacji Martinsa et al. [38], gdzie zaprezentowano implementację zestawu NAS (NASA Advanced Supercomputing) Parallel Benchmarks (NPB) w języku Rust. Zestaw NPB stanowi uznany w środowisku naukowym standard do oceny wydajności systemów równoległych. W badaniach wykazano, że Rust osiąga porównywalną, a miejscami wyższą wydajność względem C++ i Fortrana (w wersjach OpenMP i sekwencyjnych), co wskazuje na jego rosnący potencjał w dziedzinie wysokowydajnych obliczeń (HPC - High-Performance Computing). Jednocześnie zwrócono uwagę na trudności implementacyjne, związane z restrykcyjnym modelem bezpieczeństwa języka Rust, które jednak mogą być złagodzone poprzez zastosowanie odpowiednich bibliotek (np. Rayon).

Równolegle, w pracy Besoziego [15] zaprezentowano bibliotekę Paralelo Parallel Library (PPL) – autorskie rozwiązanie do strukturalnego programowania równoległego w języku Rust. Biblioteka ta opiera się na wzorcach programowania równoległego takich jak skeletons i design patterns, oferując wysokopoziomowe abstrakcje ułatwiające implementację złożonych aplikacji równoległych. Przeprowadzone testy wykazały, że PPL dorównuje lub przewyższa popularne biblioteki takie jak Rayon, jednocześnie zachowując zgodność z idiomami języka Rust i zasadą *fearless concurrency*. Zastosowanie takich abstrakcji sprzyja zwiększeniu czytelności i poprawności kodu, co może mieć szczególne znaczenie w kontekście projektów systemowych.

Można również znaleźć pracę, która przedstawia wykorzystanie biblioteki odpowiedzialnej za współbieżność FastFlow przez oba języki Rust oraz C++ [45]. Pokazuje ona, że język Rust jest dobrą alternatywą dla języka C++ w kontekście współbieżności.

## 4.2. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu literatury oraz zadanych pytań do przeglądu literatury można wskazać na następujące odpowiedzi

### **PPL1: Jakie główne koncepcje/teorie dominują w literaturze dotyczącej porównania języków Rust oraz C++?**

W literaturze dominują badania porównawcze bezpieczeństwa, wydajności oraz zarządzania pamięcią w językach Rust i C++ [55] - szczegółowo opisane w podrozdziałach 4.1.1 oraz 4.1.2. W kontekście współbieżności i równoległości brakuje systematycznych analiz porównawczych.

### **PPL2: Jakie metody badawcze są najczęściej stosowane do analizy różnic pomiędzy językami ?**

W literaturze oraz w dotychczasowych analizach [12, 13, 2, 4] wskazano szereg kryteriów istotnych przy porównywaniu lub ocenie języków programowania ogólnego przeznaczenia. Do najważniejszych należą:

- Prostota konstrukcji języka, mająca bezpośredni wpływ na łatwość programowania i zrozumiałość kodu
- Czytelność kodu, związana z jego późniejszą konserwacją i rozwijaniem
- Dostosowanie języka do konkretnego zastosowania, co wpływa na wydajność i efektywność programów
- Szybkość kompilacji
- Efektywność działania programu, zarówno pod względem szybkości, jak i zużycia zasobów systemowych,
- Dostępność i jakość bibliotek, frameworków oraz narzędzi wspierających rozwój oprogramowania
- Wsparcie w procesie debugowania, profilowania i testowania kodu
- Bezpieczeństwo języka, związane z eliminacją błędów w czasie kompilacji oraz wykrywaniem zagrożeń w trakcie działania programu
- Długowieczność języka oraz narzędzi kompilacyjnych, co wpływa na stabilność i przewidywalność rozwoju oprogramowania
- Przenośność między różnymi platformami i architekturami sprzętowymi.

Wszystkie te kryteria mają istotny wpływ na całkowity koszt i nakład pracy związany z tworzeniem oraz utrzymaniem oprogramowania, a także na jego jakość i przydatność w długim okresie użytkowania.

Doświadczenie wskazuje również, że te same kryteria można stosować do oceny innych komponentów wspomagających proces tworzenia oprogramowania, takich jak biblioteki klas obiektowych czy projekty typów abstrakcyjnych. Wykorzystanie odpowiednich, zewnętrznych komponentów oraz dobrze zaprojektowanych rozwiązań przyczynia się do poprawy czytelności, utrzymywalności i ogólnej jakości kodu, jednocześnie przyspieszając proces jego tworzenia.

### **PPL3: Jak wygląda porównanie dostępności i dojrzałości bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w obu językach?**

Porównując dostępność i dojrzałość bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++, zauważyć można istotne różnice wynikające zarówno z historii rozwoju tych języków, jak i ich podejścia do bezpieczeństwa, abstrakcji oraz zarządzania zasobami.

W przypadku języka C++, biblioteki takie jak OpenMP, Intel TBB czy pthreads cechują się dużą dojrzałością oraz szerokim zastosowaniem w przemyśle, zwłaszcza w kontekście obliczeń naukowych, symulacji fizycznych i systemów o wysokiej wydajności. Są one dobrze udokumentowane, posiadają wsparcie komercyjne (np. TBB) oraz charakteryzują się dużą kompatybilnością z istniejącą infrastrukturą sprzętową i programową. Niemniej jednak, wymagają od programisty głębszej wiedzy w zakresie zarządzania pamięcią oraz synchronizacji, co przekłada się na wyższy próg wejścia i podatność na błędy (np. wyścigi danych czy zakleszczenia).

Z kolei Rust, jako język nowszy, oferuje bardziej nowoczesny zestaw narzędzi do programowania równoległego, w tym biblioteki takie jak Tokio, Rayon czy Crossbeam. Mimo mniejszej liczby lat rozwoju, biblioteki te szybko dojrzewają i zdobywają popularność dzięki silnym gwarancjom bezpieczeństwa pamięci na poziomie kompilatora oraz ergonomicznemu API. Rust promuje bezpieczne podejście do współbieżności poprzez system własności (ang. *ownership*) i brak domyślnego współdzielenia zasobów, co w praktyce eliminuje całą klasę błędów typowych dla C++. Dzięki temu biblioteki w Rust, choć mniej rozpowszechnione w starszych zastosowaniach, zyskują przewagę w projektach tworzonych od podstaw, zwłaszcza w środowiskach wymagających wysokiej niezawodności.

#### **PPL4: Czy istnieją systematyczne metodologie porównywania języków programowania w kontekście problemu pracy, które można zastosować do analizy Rust i C++?**

W literaturze istnieje ograniczona liczba systematycznych metodologii porównujących języki programowania pod kątem programowania współbieżnego i równoległego. Większość badań koncentruje się na analizie wydajności i bezpieczeństwa, nie przyjmując jednolitego podejścia metodologicznego.

W ramach porównania mechanizmów równoległości w obu językach, opisanych na stronie [37] zastosowano konteneryzację obrazu programu a następnie uruchomienie go na maszynie testowej. Jednak jak podaje artykuł na stronie Medium [23] może to prowadzić do nie uwzględnienia wpływu takich czynników jak czas uruchamiania, rozmiar obrazu i zużycie pamięci. Podaje również metodę *Rainbow*, która testuje przepustowość, uruchamiając kontenery na podobnej infrastrukturze i używając licznika Redis do śledzenia obliczeń.

#### **PPL5: Jakie aspekty programowania współbieżnego i równoległego w Rust i C++ nie zostały dostatecznie zbadane w literaturze?**

badania skupiały się przede wszystkim na ogólnych aspektach porównawczych bezpieczeństwa pamięci, zarządzania zasobami oraz wydajności kompilacji i wykonania w językach Rust i C++. Niemniej jednak, istnieją wyraźne luki badawcze, które wymagają pogłębionej analizy, w tym

- Systematyczne porównanie specyficznych mechanizmów synchronizacji i zarządzania wątkami, takich jak mutexy, semaforey, bariery czy kanały komunikacyjne. Brakuje kompleksowych studiów empirycznych, które umożliwiłyby ocenę efektywności oraz narzutu związanych z implementacją tych mechanizmów w obu językach.
- Niedostatecznie zbadany wpływ przyjętych modeli programowania współbieżnego i równoległego na skalowalność i stabilność systemów wielowątkowych, szczególnie w kontekście aplikacji o wysokiej konkurencyjności oraz dynamicznie zmieniających się obciążeniach.
- Ograniczona liczba badań eksperymentalnych, które wykorzystują benchmarki do porównania realizacji konkretnych konstrukcji językowych (np. asynchroniczności, operacji atomowych) w Rust i C++. Taka analiza mogłaby uwzględniać zarówno aspekty wydajnościowe, jak i bezpieczeństwa wykonywania.

#### **PPL6: Jaki jest stan wiedzy na temat wykorzystania programowania współbieżnego w ramach GPU w językach Rust i C++?**

W literaturze przedmiotowej oraz w praktyce programistycznej, zagadnienie wykorzystania programowania współbieżnego na GPU ewoluuje w różnym tempie w zależności od języka programowania. W przypadku języka Rust obserwujemy dynamiczny rozwój narzędzi, które umożliwiają wykorzystanie mocy obliczeniowej kart graficznych przy jednoczesnym zachowaniu wysokich gwarancji bezpieczeństwa pamięci i wątków.

Projekty takie jak `rust-gpu` [5] dążą do umożliwienia pisania shaderów w języku Rust, oferując podejście, które integruje możliwości GPU z bezpiecznymi konstrukcjami języka. Dokumentacja dostępna na stronie github [5] wskazuje na intensywne prace nad przeniesieniem wielu korzyści wynikających z systemu własności i typowania Rust na środowisko GPU, co może przyczynić się do zmniejszenia ryzyka błędów współbieżności, które są szczególnie krytyczne w obliczeniach równoległych.

Równolegle, biblioteka Vulkano (dostępna m.in. poprzez dokumentację [8]) stanowi wysokopoziomowy, bezpieczny interfejs do API Vulkan, które jest standardem w programowaniu GPU. Vulkano umożliwia abstrakcję złożoności niskopoziomowych interfejsów, jednocześnie oferując możliwość pełnego wykorzystania równoległości GPU. W podobnym nurcie znajduje się projekt `wgpu`, który implementuje standard WebGPU, umożliwiając przenośne aplikacje graficzne i obliczeniowe, a jednocześnie integrując współczesne podejścia do zarządzania zasobami i synchronizacji.

W przeciwieństwie do podejścia Rust, w środowisku C++ dominującym rozwiązaniem jest platforma CUDA, rozwijana i wspierana przez firmę NVIDIA [3]. CUDA oferuje bardzo dojrzały, zoptymalizowany i szeroko stosowany framework, który pozwala na bezpośrednią implementację algorytmów równoległych na GPU. W odróżnieniu od narzędzi rozwijanych dla Rust, CUDA posiada ugruntowaną pozycję w środowisku przemysłowym, co przekłada się na bogatą dokumentację, szerokie wsparcie techniczne oraz liczne biblioteki wspomagające rozwój aplikacji wykorzystujących GPU.

Podsumowując, stan wiedzy dotyczący programowania współbieżnego na GPU w języku Rust znajduje się na etapie intensywnego rozwoju i eksperymentacji, gdzie projekty takie jak `rust-gpu`, Vulkano oraz `wgpu` [9] pokazują potencjał tego podejścia, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa i nowoczesnych abstrakcji. Z kolei w C++ platforma CUDA, dzięki swojej dojrzałości oraz szerokiemu wsparciu ze strony przemysłu, pozostaje głównym narzędziem wykorzystywanym do implementacji wysokowydajnych obliczeń równoległych na GPU.

#### 4.2.1. Kierunki dalszych badań

Na podstawie przeglądu literatury oraz odpowiedzi na pytania do przeglądu literatury można wskazać na kilka kierunków dalszych badań w dziedzinie programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++:

- Systematyczne porównanie mechanizmów współbieżnych i równoległych w językach Rust i C++
- Analiza wydajności i bezpieczeństwa konkretnych mechanizmów współbieżnych (np. `std::thread` vs `std::thread` w Rust, OpenMP vs Rayon, `async` w Rust vs `futures` w C++20)
- Badania eksperymentalne z wykorzystaniem benchmarków oraz analizy kodu źródłowego w celu porównania języków Rust i C++ w kontekście współbieżności i równoległości
- Analiza wykorzystania programowania współbieżnego w ramach GPU w językach Rust i C++

# Rozdział 5

## Wybrane mechanizmy w języku Rust

o czym rozdział

### 5.1. Podejście do współbieżności i równoległości

Rozwój języka Rust oferuje szereg funkcji, które czynią go dobrym wyborem do programowania współbieżnego oraz równoległego. Kluczowymi elementami, które wyróżniają go na tle innych języków programowania są [16]:

1. Własność (ang. *ownership*) i pożyczanie (ang. *borrow*): Model własności języka Rust zapewnia, że dane są bezpiecznie współdzielone między wątkami bez ryzyka wyścigów danych (ang. *races*).
2. Nieustraszona współbieżność (ang. *Fearless Concurrency*): System typów Rusta wymusza reguły w czasie kompilacji, pozwalając programistom na pisanie współbieżnego kodu bez obawy o typowe pułapki.
3. Inteligentne wskaźniki (ang. *smart pointers*): Abstrakcje wspierające korzystanie oraz przesyłanie danych w programowaniu współbieżnym oraz równoległym.

#### 5.1.1. Ownership oraz borrow

Własność (ang. *ownership*) jest fundamentalnym konceptem w języku Rust, który zapewnia bezpieczeństwo pamięci bez konieczności stosowania mechanizmu odśmiecania (ang. *garbage collection*). Każda wartość posiada jednego właściciela, który jest odpowiedzialny za zwolnienie pamięci zajmowanej przez tę wartość, gdy wychodzi ona z zakresu (ang. *scope*). Model własności zapobiega wyścigom danych i zapewnia efektywne zarządzanie pamięcią.

Kluczowe zasady własności:

- Każda wartość ma jednego właściciela.
- Gdy właściciel wychodzi z zakresu, wartość zostaje usunięta (ang. *ropped*).
- Własność może zostać przeniesiona (ang. *moved*) na inną zmienną.

Pożyczanie (ang. *borrowing*) umożliwia tworzenie referencji do wartości bez przejmowania jej własności. Jest to kluczowe dla umożliwienia różnym częściom programu dostępu do danych bez ich duplikowania. Rust pozwala na pożyczanie wartości według dwóch zasad:

- Pożyczanie niemutowalne (domyślne) (ang. *immutable*): Można utworzyć wiele referencji, ale żadna z nich nie może modyfikować wartości.



- Pożyczanie mutowalne (ang. *mutable*): W danym momencie może istnieć tylko jedna mutowalna referencja, co zapobiega wyścigom danych.

Listing 5.1: Przykład mechanizmu borrow

```
fn main() {
    let s1 = String::from("Hello_World");
    let s2 = &s1; // Immutable borrow - pożyczka niemutowalna
    println!("{}", s2); // Ok
    // let s3 = &mut s1; // Error
}
```

W powyższym listingu 5.1 zaprezentowano element dotyczący użycia pożyczki w języku Rust. Błąd, oznaczony jako *Error* wynika z faktu, iż nie jest możliwe pożyczanie obiektu *s3* jako mutowalnego, ponieważ jest on jednocześnie pożyczany jako niemutowalny do obiektu *s2* (domyślnie)

### 5.1.2. Nieustraszona współbieżność

Mechanizm ten wynika bezpośrednio z rygorystycznych reguł systemu typów i modelu własności, które są integralną częścią tego języka. Dzięki temu Rust pozwala na tworzenie kodu współbieżnego, minimalizując ryzyko wystąpienia typowych błędów, takich jak wyścigi danych czy nieokreślone zachowanie wynikające z użycia wskaźników do już zwolnionej pamięci (ang. *dangling pointers*).

Rust wymusza bezpieczeństwo współbieżności w czasie kompilacji poprzez analizę własności i okresu życia danych (ang. *lifetimes*). Mechanizm ten zapobiega jednoczesnemu mutowalnemu dostępowi do tych samych danych w różnych wątkach (opisane w punkcie 5.1.1), co eliminuje potrzebę ręcznego zarządzania pamięcią czy synchronizacji przez programistę. Takie podejście czyni współbieżność w Rust nie tylko bezpieczną, ale również przewidywalną, co znacząco ułatwia jej implementację. [56]

↑ <b>Fearless:</b>	Concurrency errors get caught at compile time
↑ <b>Comfortable:</b>	Errors get caught at run time (symptoms close to cause)
↑ <b>Scared:</b>	Concurrency errors may happen without being detected

Figure 2: A spectrum of fear in parallel programming.

Rys. 5.1: Spektrum nieustraszonej współbieżności [11]

Autorzy [11] uważają, że nieustraszona współbieżność jest lepiej interpretowana jako spektrum, zilustrowane na 5.1 idealnie eliminując wszelkie obawy przed błędami współbieżności w czasie kompilacji (Fearless), ale jeśli nie jest to możliwe, utrzymując objawy błędów w czasie wykonywania blisko ich przyczyn (Comfortable) lub w inny sposób nie dając gwarancji odtworzenia przyczyny ani objawu (Scared).

Przetłumaczono z DeepL.com (wersja darmowa)

### 5.1.3. Inteligentne wskaźniki (ang. *Smart Pointers*)

Smart pointery w języku Rust stanowią zaawansowane abstrakcje, które poszerzają funkcjonalność tradycyjnych wskaźników poprzez wbudowane automatyczne zarządzanie pamięcią oraz semantykę własności. Stanowią one kluczowy element gwarantujący bezpieczeństwo pamięci w Rust, umożliwiając pisanie bezpiecznego oraz odpornego na błędy kodu bez konieczności

korzystania z garbage collector. Ponadto, smart pointery są wykorzystywane zarówno w programowaniu współbieżnym, jak i równoległym, wspierając kontrolowaną oraz bezpieczną wymianę danych. Poniżej omówione zostaną trzy najczęściej używane smart pointery w Rust: Box, Rc oraz Arc.

## Box

Własność Danych na Stercie Smart pointer Box służy do alokacji pamięci na sterzie, oferując prosty i efektywny sposób zarządzania własnością dużych struktur danych lub typów rekurencyjnych. Przenosząc dane na stertę, Box redukuje wykorzystanie stosu, co czyni go idealnym rozwiązaniem w sytuacjach, gdy rozmiar danych może się zmieniać lub nie jest znany w czasie kompilacji.

Wykorzystuje się go do przechowywania dużych struktur danych, obsługi typów rekurencyjnych, których rozmiar nie może być określony w czasie kompilacji.

Listing 5.2: Box smart pointer

```
fn main() {
    let b = Box::new(5); // Alokacja liczby całkowitej na sterzie
    println!("{}", b);  // Dostęp do wartości za pomocą wskaźnika Box
}
```

## Rc: Wskaźnik z Liczeniem Referencji

Smart pointer Rc (Reference Counted) umożliwia współdzielenie własności danych przez wiele części programu. Automatycznie śledzi liczbę referencji do danych i usuwa je dopiero wtedy, gdy ostatnia referencja zostanie usunięta. Rc nie jest jednak bezpieczny dla wątków i powinien być używany tylko w przypadkach programów jednowątkowych.

Najczęściej wykorzystywany podczas współdzielenia danych pomiędzy różnymi częściami programu w środowiskach jednowątkowych, implementacji struktur danych, takich jak grafy czy drzewa z węzłami współdzielonymi.

Listing 5.3: Rc smart pointer

```
use std::rc::Rc;

fn main() {
    let a = Rc::new(5); // Utworzenie licznika referencji
    let b = Rc::clone(&a); // Klonowanie zwiększa licznik referencji
    println!("{}", b);    // Dostęp do współdzielonych danych
}
```

## Arc: Atomowy Wskaźnik z Liczeniem Referencji

Dla programowania współbieżnego Rust oferuje Arc (Atomic Reference Counted), czyli wersję Rc, która jest bezpieczna dla wątków. Wykorzystuje operacje atomowe do bezpiecznego współdzielenia danych pomiędzy wątkami, gwarantując poprawne aktualizacje liczników referencji bez ryzyka wyścigów danych.

Listing 5.4: Arc smart pointer

```
use std::sync::Arc;
```

```

use std::thread;

fn main() {
    let a = Arc::new(5);      // Utworzenie atomowego licznika
    ↪ referencji
    let a_clone = Arc::clone(&a); // Klonowanie dla bezpiecznego współ
    ↪ dzielenia

    let handle = thread::spawn(move || {
        println!("{}", a_clone); // Dostęp do współdzielonych danych w
    ↪ nowym wątku
    });

    handle.join().unwrap(); // Oczekiwanie na zakończenie wątku
}

```

### Niebezpieczny Rust (Unsafe Rust)

TBD [14]

## 5.2. Programowanie współbieżne

Współbieżność to zdolność systemu do obsługi wielu zadań, które potencjalnie mogą się nakładać w czasie. Współbieżność odnosi się do zdolności systemu do jednoczesnego obsługiwanie wielu zadań, które mogą mieć miejsce w tym samym czasie. Język Rust został zaprojektowany z uwzględnieniem bezpieczeństwa i wydajności w kontekście współbieżności, co czyni go niezwykle atrakcyjnym narzędziem dla programistów zajmujących się systemami wielowątkowymi.

### 5.2.1. Model własności pamięci

Centralnym elementem podejścia Rusta do współbieżności jest model własności pamięci, który umożliwia programistom tworzenie kodu współbieżnego bez ryzyka wystąpienia błędów związanych z niebezpiecznym dostępem do współdzielonej pamięci. Mechanizm ten, oparty na koncepcjach własności, pożyczania oraz systemu typów, pozwala kompilatorowi Rust na statyczne wykrywanie potencjalnych problemów, takich jak wyścigi danych (data races). Własność pamięci zapewnia, że tylko jeden wątek może posiadać mutowalny dostęp do danej zmiennej w danym czasie, eliminując tym samym możliwość niespodziewanej ingerencji ze strony innych wątków 5.1.1.

### 5.2.2. Biblioteki

`std::thread`

Tokio

Rayon

`crossbeam::channel`

`actix`

### 5.2.3. Wątki

Pule wątków (ang. *Thread Pools*)

Kradzież zadania (ang. *Work Stealing*)

### 5.2.4. Kanały

Kanały (ang. *channels*) to mechanizm w języku Rust, który umożliwia bezpieczną i efektywną komunikację między wątkami. Kanały są jednym z kluczowych elementów modelu współbieżności w tym języku, zapewniając sposób przesyłania danych z jednego wątku do drugiego, jednocześnie minimalizując ryzyko problemów związanych z współdzieleniem pamięci. Kanały są oparte na wzorcu producenta-konsumenta, gdzie jeden wątek (producent) wysyła dane, a inny wątek (konsument) je odbiera.

W Rust kanały są częścią standardowej biblioteki i implementują model komunikacji oparty na kolejkach **FIFO** (*First In, First Out*). W kontekście Rust'a kanały są realizowane przez struktury **Sender** (nadawca) i **Receiver** (odbiorca), które stanowią mechanizm do przesyłania danych między wątkami. Kanały zapewniają synchronizację pomiędzy wątkami, eliminując potrzebę bezpośredniego współdzielenia pamięci w sposób, który mógłby prowadzić do niepożądanych efektów ubocznych, takich jak błędy związane z równoległym dostępem do tej samej przestrzeni pamięci.

Kanały w Rust działają na zasadzie przekazywania wartości z wątku do wątku. Są one bezpieczne, ponieważ Rust zapewnia, że nie wystąpią wyścigi danych — Sender jest odpowiedzialny za wysyłanie danych, a Receiver za ich odbiór. Rust automatycznie zapewnia synchronizację, więc nie ma potrzeby stosowania dodatkowych mechanizmów, jak blokady mutexów, do zarządzania dostępem do pamięci.

#### Tworzenie kanałów

Kanał można stworzyć za pomocą funkcji `mpsc::channel()` z modułu `std::sync`. Ta funkcja zwraca dwie wartości: nadawcę (Sender) i odbiorcę (Receiver).

Listing 5.5: Przykład tworzenia kanału

```
use std::sync::mpsc;
use std::thread;

fn main() {
    // Tworzenie kanału
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    // Tworzenie wątku producenta
```

```

thread::spawn(move || {
    let value = String::from("Hello_from_the_producer!");
    tx.send(value).expect("Failed_to_send_message");
});

// Odbiór wiadomości w wątku konsumenta
let received = rx.recv().expect("Failed_to_receive_message");
println!("Received: {}", received);
}

```

Opis wykonanych kroków w celu utworzenia kanałów w listingu 5.5:

1. Tworzymy kanał za pomocą `mpsc::channel()`, który zwraca parę (tx, rx) — tx jest nadawcą, a rx odbiorcą.
2. Tworzymy nowy wątek (producenta), który wysyła wiadomość ("*Hello from the producer!*") do kanału.
3. W głównym wątku (konsument) odbieramy wiadomość za pomocą `recv()` i drukujemy ją na ekranie.

### Wysyłanie i odbieranie danych

Nadawca (Sender) jest używany do wysyłania danych do kanału. Można wysłać dowolny typ, który jest przesyłany przez kanał. Funkcja `send()` jest używana do wysyłania wartości, a `recv()` w odbiorcy blokuje wątek do momentu otrzymania danych.

Odbiorca (Receiver) odbiera dane z kanału. Jest to blokująca operacja, co oznacza, że wątek odbiorcy będzie czekał, aż dane będą dostępne do odebrania.

### Przykład wielokrotnego odbioru

Kanały w Rust są domyślnie jednokierunkowe, co oznacza, że tylko jeden odbiorca może odbierać wiadomości z kanału. Możemy jednak tworzyć wiele kanałów i różne wątki odbiorcze, aby efektywnie rozdzielać zadania.

Listing 5.6: Przykład z wieloma wątkami

```

use std::sync::{mpsc, Arc, Mutex};
use std::thread;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();
    let rx = Arc::new(Mutex::new(rx));

    // Tworzenie 3 wątków konsumentów
    for i in 0..3 {
        let rx = Arc::clone(&rx); // Klonowanie Arc, nie Receiver
        thread::spawn(move || {
            let message = rx.lock().unwrap().recv().expect("Failed_to_
↪ receive_message");
            println!("Consumer {} received: {}", i, message);
        });
    }

    // Wysyłanie wiadomości do konsumentów

```

```

for i in 0..3 {
    let message = format!("Message_{}", i);
    tx.send(message).expect("Failed_to_send_message");
}

// Zatrzymanie wątku głównego, aby konsument mógł zakończyć pracę
thread::sleep(std::time::Duration::from_secs(1));
}

```

W tym przykładzie 5.6 tworzymy trzy wątki konsumentów, z których każdy odbiera wiadomości z tego samego kanału. Wątek główny wysyła trzy wiadomości, które są odbierane przez konsumentów.

- Dodatkowo została użyta struktura **Arc<Mutex<Receiver>** 5.1.3 do umożliwienia współdzielenia odbiorcy (Receiver) między wątkami. Mutex zapewnia synchronizację dostępu do kanału, dzięki czemu tylko jeden wątek na raz może odbierać wiadomości.
- **Arc::clone** klonuje Arc, a nie Receiver. Arc tworzy nowy uchwyt do tego samego obiektu w pamięci, dzięki czemu wszystkie wątki mogą uzyskać dostęp do tego samego kanału.
- **lock()** Każdy wątek przed odebraniem wiadomości blokuje mutex, aby uzyskać dostęp do kanału w bezpieczny sposób.

Przykładowa odpowiedź programu:

```

Consumer 0 received: Message 0
Consumer 2 received: Message 2
Consumer 1 received: Message 1

```

### Zakończenie pracy z kanałami

Kanał w Rust jest "ograniczony"— po wysłaniu wszystkich danych nadawca (sender) automatycznie zakończy swoje działanie, co powoduje, że funkcja `recv()` w odbiorcy zwróci błąd, jeśli nie będzie więcej wiadomości. Można także zakończyć kanał, jeśli w danym wątku nie ma już nadawców.

Listing 5.7: Zakończenie kanału

```

use std::sync::mpsc;
use std::thread;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    thread::spawn(move || {
        tx.send(String::from("End_of_messages")).expect("Send_failed")
        ↪ ;
    });

    match rx.recv() {
        Ok(msg) => println!("Received: {}", msg),
        Err(_) => println!("No more messages!"),
    }

    match rx.recv() {
        Ok(msg) => println!("Received: {}", msg),

```

```

        Err(_) => println!("No_more_messages!"),
    }
}

```

W tym przykładzie 5.7 po wysłaniu wiadomości przez nadawcę wątku głównego, kanał zostaje zamknięty, co sprawia, że dalsze wywołanie `recv()` w odbiorcy zwróci błąd.

Odpowiedź programu:

```

Received: End of messages
No more messages!

```

## Kanały poprzeczne (ang. *Crossbeam Channels*)

### Aktorzy

### 5.2.5. Synchronizacja

### 5.2.6. Mutex i RwLock

Dla sytuacji wymagających współdzielenia pamięci Rust oferuje synchronizowane struktury, takie jak `Mutex` (ang. *mutual exclusion*) oraz `RwLock`. Umożliwiają one zarządzanie dostępem do danych w sposób bezpieczny, jednocześnie wymagając od programisty jawnego określenia momentów blokady i odblokowania zasobów.

### 5.2.7. Wartości atomiczne

Rust obsługuje także operacje na typach atomowych, które pozwalają na wykonywanie niepodzielnych operacji na współdzielonych zmiennych bez potrzeby stosowania bardziej zaawansowanych mechanizmów synchronizacji.

### 5.2.8. Bariery i semaforey

### 5.2.9. Asynchroniczność

Chociaż współbieżność i asynchroniczność nie są tożsame, w Rust oba te podejścia są ze sobą ściśle powiązane. Rust implementuje asynchroniczność za pomocą konstrukcji takich jak `async/await` oraz bibliotek takich jak `Tokio` czy `async-std`. Podejście to pozwala na wykonywanie wielu operacji współbieżnie w ramach pojedynczego wątku, eliminując narzut związany z tworzeniem wielu wątków.

## 5.3. Programowanie równoległe

### 5.3.1. Biblioteki

## Rozdział 6

# Wybrane mechanizmy w języku C++

### 6.1. Programowanie współbieżne

### 6.2. Programowanie równoległe

#### 6.2.1. OpenMP

Biblioteka ta pozwala uruchomić wybraną część kodu na wielu wątkach. Działa to podobnie do uruchamiania kody z wykorzystaniem GPU - kod, który zostanie uruchomiony na wielu wątkach umieszczany jest w specjalnym zakresie (ang. *scope*). Kompilacja kodu z OpenMP odbywa się z wykorzystaniem flagi `-fopenmp` w przypadku kompilatora g++.

Użycie pamięci cache może pomóc w zwiększeniu wydajności czasowej programu kosztem pamięci. W przypadku OpenMP, zmienna `shared` oznacza, że zmienna jest współdzielona pomiędzy wątkami, a `private` oznacza, że każdy wątek ma swoją kopię zmiennej?



# Rozdział 7

## Porównanie mechanizmów w językach Rust oraz C++

W tym rozdziale przedstawiono metryki oraz algorytmy do analizy wydajności mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++.

### 7.1. Programowanie współbieżne

#### 7.1.1. Zarządzanie wątkami

Porównanie tworzenia i zarządzania wątkami obejmuje następujące parametry:

- czas tworzenia wątku (w mikrosekundach),
- narzut pamięciowy na wątek (w KB)

#### 7.1.2. Wydajność synchronizacji

Kluczowe aspekty synchronizacji to:

- liczba operacji blokowania i odblokowywania mutexa na sekundę,
- opóźnienie przesyłania wiadomości przez kanały (w mikrosekundach),
- czas przełączania kontekstu pomiędzy wątkami (w mikrosekundach).

#### 7.1.3. Narzut bezpieczeństwa

W kontekście narzutu związanego z mechanizmami bezpieczeństwa w językach Rust i C++ analizowane będą następujące metryki:

- czas kompilacji kodu współbieżnego (w sekundach),
- rozmiar pliku binarnego (w KB),
- zużycie pamięci podczas wykonywania programu (w MB).

#### 7.1.4. Wybrane algorytmy do analizy wydajności

Dla porównania mechanizmów współbieżności wybrano następujące algorytmy:

- Model producent-konsument (z wykorzystaniem aktorów),
- Problem filozofów (synchronizacja dostępu do zasobów).

Algorytmy te pozwalają na analizę zdolności języków Rust i C++ do efektywnego zarządzania współbieżnością w obliczeniach numerycznych.

## 7.2. Programowanie równoległe

### 7.2.1. Wydajność obliczeniowa

Główne metryki oceny wydajności algorytmów równoległych to:

- czas wykonania algorytmów równoległych (w milisekundach),
- współczynnik przyspieszenia ( $T_1/T_n$ ) dla różnych liczby wątków,
- efektywność (przyspieszenie/liczba procesorów).

### 7.2.2. Wydajność sprzętowa (GFLOP/s)

Wydajność obliczeniowa mierzona w jednostkach GFLOP/s (gigaflops per second) pozwala na ocenę efektywności wykorzystania sprzętu:

- wydajność w pojedynczym wątku,
- wydajność wielowątkowa,
- efektywność skalowania (GFLOP/s na rdzeń).

Dodatkowo przeprowadzona zostanie analiza zgodnie z prawem Amdahla w celu określenia teoretycznych ograniczeń przyspieszenia obliczeń.

### 7.2.3. Zasoby systemowe

Analiza zużycia zasobów przez algorytmy równoległe obejmuje:

- procentowe wykorzystanie CPU,
- zużycie pamięci w warunkach obciążenia,
- współczynnik nietrafień w cache,
- liczbę operacji wejścia-wyjścia na sekundę.

### 7.2.4. Wybrane algorytmy do analizy wydajności

Dla porównania mechanizmów równoległości wybrano następujące algorytmy:

- Mnożenie macierzy (Matrix Multiplication),
- Transformata Fouriera (Fast Fourier Transform, FFT).

Algorytmy te pozwolą na analizę efektywności zarządzania zasobami oraz synchronizacji w językach Rust i C++.

Wybór powyższych benchmarków pozwoli na szczegółową analizę wydajności oraz stabilności obu języków w kontekście programowania współbieżnego i równoległego, umożliwiając sformułowanie rekomendacji dotyczących wyboru narzędzi w zależności od specyfiki projektu.

## 7.3. Metodologia badań

W celu zminimalizowania wpływu czynników zewnętrznych na wyniki badań, wszystkie testy zostaną przeprowadzone na tej samej konfiguracji sprzętowej oraz oprogramowania (instancje maszyn EC2 w usłudze Amazon Web Services - AWS) oraz z tymi samymi danymi testowymi. Wyniki badań zostaną przedstawione w formie tabel i wykresów, co pozwoli na łatwe porównanie wyników oraz wyciągnięcie wniosków dotyczących wydajności języków Rust i C++ w kontekście programowania współbieżnego i równoległego.

## **Rozdział 8**

# **Analiza wyników**

**8.1. Programowanie współbieżne**

**8.2. Programowanie równoległe**

## **Rozdział 9**

# **Wnioski oraz rekomendacje**

The option of developing new computer languages may be the cleanest and most efficient way to provide support for parallel processing. However, practical issues make the wide acceptance of a new computer language close to impossible. Nobody likes to rewrite old code to new languages. It is difficult to justify such effort in most cases. Also, educating and convincing a large enough group of developers to make a new language gain critical mass is an extremely difficult task.

# Rozdział 10

## Podsumowanie

W trakcie realizacji pracy udało się osiągnąć zrealizować wszystkie postawione cele, którym było stworzenie aplikacji umożliwiającej wizualizację zmian w populacji dla różnych wariantów algorytmu genetycznego. W ramach projektu udało się skutecznie zaimplementować interaktywne narzędzie, umożliwiające śledzenie dynamiki ewolucji populacji w czasie rzeczywistym. Wykonanie tego zadania nie obyło się jednak bez wyzwań implementacyjnych. Jednym z głównych problemów był wstępny brak używania konstruktora kopiującego, co wprowadziło nieścisłości podczas analizy wyników. Dodatkowo literatury, który reprezentowały selekcję rankingową znacząco się od siebie różniły, co wprowadzało pewne zamieszanie podczas interpretacji. Implementacja algorytmów genetycznych, różnych wariantów selekcji, krzyżowania i mutacji, wymagała skrupulatnego podejścia do detali oraz zoptymalizowania procesów obliczeniowych. Podczas pracy nad projektem jak i ich praktyczna implementacja pozwoliła na głębsze zrozumienie działania algorytmów genetycznych oraz ich zastosowań w dziedzinie optymalizacji. Praca ta stanowiła również doskonałą okazję do rozwinięcia umiejętności programistycznych, szczególnie w obszarze tworzenia interfejsu graficznego i manipulacji danymi w czasie rzeczywistym.

W kontekście dalszego rozwoju projektu sugeruje się rozważenie dodania nowych wariantów parametrów algorytmów genetycznych (selekcja, krzyżowanie, mutacja), tak aby użytkownik miał możliwość porównania ich efektywności. Jeżeli chodzi zaś o architekturę projektu, to można by wydzielić komponenty, aby umożliwić w przyszłości wymianę biblioteki odpowiedzialnej za interfejs użytkownika. Pozwoli to na implementację zaawansowanych funkcji wizualizacyjnych, które mogą ułatwić zrozumienie procesu ewolucji populacji.

Podsumowując, praca na projektem aplikacji pozwoliła na pogłębienie wiedzy z zakresu algorytmów ewolucyjnych oraz rozwinięcie umiejętności programistycznych w języku Java. Praca ta stanowi dobrą podstawę do dalszych badań nad algorytmami genetycznymi i ich praktycznym zastosowaniem.

# Spis rysunków

3.1. Różnice między wykonywaniem zadań współbieżnie a równoległe [19] . . . . .	10
4.1. Kroki kompilacji w języku Rust . . . . .	19
4.2. Kroki kompilacji w języku C++ . . . . .	19
4.3. Porównanie kroków kompilacji w językach Rust i C++ . . . . .	19
5.1. Spektrum nieustraszonej współbieżności [11] . . . . .	25

# Spis tabel

4.1. Kwerendy użyte w bazie Scopus <sup>1</sup>	16
4.2. Kwerendy użyte w bazie Scopus <sup>2</sup>	17

# Spis listingów

4.1. Kwerenda wygenerowana przez AI . . . . .	17
5.1. Przykład mechanizmu borrow . . . . .	25
5.2. Box smart pointer . . . . .	26
5.3. Rc smart pointer . . . . .	26
5.4. Arc smart pointer . . . . .	26
5.5. Przykład tworzenia kanału . . . . .	28
5.6. Przykład z wieloma wątkami . . . . .	29
5.7. Zakończenie kanału . . . . .	30



# Bibliografia

- [1] C++ - Wikipedia — en.wikipedia.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>. [Dostęp 16-03-2025].
- [2] Comparing Programming Languages — cs.ucf.edu. <https://www.cs.ucf.edu/~leavens/ComS541Fall198/hw-pages/comparing/>. [Dostęp 16-03-2025].
- [3] CUDA Toolkit - Free Tools and Training — developer.nvidia.com. <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>. [Dostęp 22-03-2025].
- [4] How do you compare programming languages in a coding interview? — linkedin.com. <https://www.linkedin.com/advice/1/how-do-you-compare-programming-languages-coding>. [Dostęp 16-03-2025].
- [5] Rust GPU — rust-gpu.github.io. <https://rust-gpu.github.io>. [Dostęp 22-03-2025].
- [6] Rust (programming language) - Wikipedia — en.wikipedia.org. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rust\\_\(programming\\_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rust_(programming_language)). [Dostęp 16-03-2025].
- [7] Safety: A comparison between Rust, C++ and Go | Hacker News — news.ycombinator.com. <https://news.ycombinator.com/item?id=32285122>. [Dostęp 13-03-2025].
- [8] vulkano - Rust — docs.rs. <https://docs.rs/vulkano/0.12.0/vulkano/>. [Dostęp 22-03-2025].
- [9] wgpu: portable graphics library for Rust — wgpu.rs. <https://wgpu.rs>. [Dostęp 22-03-2025].
- [10] *Professional CUDA C Programming*. Wrox Press Ltd., GBR, wydanie 1st, 2014.
- [11] J. Abdi, G. Posluns, G. Zhang, B. Wang, M. C. Jeffrey. When is parallelism fearless and zero-cost with rust? *Proceedings of the 36th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*, SPAA '24, strona 27–40, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [12] S. Ali, S. Qayyum. A pragmatic comparison of four different programming languages, 06 2021.
- [13] Z. Alomari, O. Halimi, K. Sivaprasad, C. Pandit. Comparative studies of six programming languages. 04 2015.
- [14] V. Astrauskas, C. Matheja, F. Poli, P. Müller, A. J. Summers. How do programmers use unsafe rust? *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 4(OOPSLA):1–27, 2020.
- [15] V. Besozzi. Ppl: Structured parallel programming meets rust. *2024 32nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP)*, strony 78–87, 2024.

- 
- [16] J. Blandy, J. Orendorff, L. Tindall. *Programming Rust*. O'Reilly Media, 2021.
- [17] K. Bobrov. *Grokking Concurrency*. Manning, 2024.
- [18] M. Bos. *Rust Atomics and Locks: Low-Level Concurrency in Practice*. O'Reilly Media, 2022.
- [19] ByteByteGo. EP108: How do we design a secure system? — [blog.bytebytego.com](https://blog.bytebytego.com/p/ep108-how-do-we-design-a-secure-system?utm_campaign=post&utm_medium=web). [https://blog.bytebytego.com/p/ep108-how-do-we-design-a-secure-system?utm\\_campaign=post&utm\\_medium=web](https://blog.bytebytego.com/p/ep108-how-do-we-design-a-secure-system?utm_campaign=post&utm_medium=web). [Dostęp 09-03-2025].
- [20] R. Chandra. *Parallel Programming in OpenMP*. High performance computing. Elsevier Science, 2001.
- [21] T.-C. Chen, M. Dezani-Ciancaglini, N. Yoshida. On the preciseness of subtyping in session types: 10 years later. *Proceedings of the 26th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming*, PPDP '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [22] M. Costanzo, E. Rucci, M. Naiouf, A. De Giusti. Performance vs programming effort between rust and c on multicore architectures: Case study in n-body. *2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)*, strony 1–10. IEEE, 2021.
- [23] R. DeWolf. Introducing Rainbow: Compare the Performance of Different Programming Languages — [medium.com](https://medium.com/better-programming/introducing-rainbow-compare-the-performance-of-different-programming-languages-f08a67453cd4). <https://medium.com/better-programming/introducing-rainbow-compare-the-performance-of-different-programming-languages-f08a67453cd4>. [Dostęp 16-03-2025].
- [24] Z. Fehervari. Rust vs C++: Modern Developers' Dilemma — [bluebirdinternational.com](https://bluebirdinternational.com/rust-vs-c/). <https://bluebirdinternational.com/rust-vs-c/>. [Dostęp 28-01-2025].
- [25] K. R. Fulton, A. Chan, D. Votipka, M. Hicks, M. L. Mazurek. Benefits and drawbacks of adopting a secure programming language: Rust as a case study. *Seventeenth Symposium on Usable Privacy and Security (SOUPS 2021)*, strony 597–616, 2021.
- [26] M. Galvin. *Mastering Concurrency And Parallel Programming: Attain Advanced Techniques and Best Practices for Crafting Robust, Manintainable, and High-Performance Concurrent Code in C++*. 2024.
- [27] Y. Gusakov. C++ Vs. Rust: 6 Key Differences — QIT — [qit.software](https://qit.software/c-vs-rust-6-key-differences/). <https://qit.software/c-vs-rust-6-key-differences/>. [Dostęp 28-01-2025].
- [28] H. Heyman, L. Brandefelt. A comparison of performance & implementation complexity of multithreaded applications in rust, java and c++, 2020.
- [29] R. Innovation. Mastering Rust Concurrency & Parallelism: Ultimate Guide 2024 — [rapidinnovation.io](https://www.rapidinnovation.io/post/concurrent-and-parallel-programming-with-rust#2-basics-of-rust-for-concurrent-programming). <https://www.rapidinnovation.io/post/concurrent-and-parallel-programming-with-rust#2-basics-of-rust-for-concurrent-programming>. [Dostęp 23-12-2024].
- [30] R. Jung, J.-H. Jourdan, R. Krebbers, D. Dreyer. Safe systems programming in rust. *Communications of the ACM*, 64(4):144–152, 2021.
- [31] S. Klabnik, C. Nichols. *The Rust Programming Language*. No Starch Press, USA, 2018.
- [32] B. Köpcke, S. Gorlatch, M. Steuwer. Descend: A safe gpu systems programming language. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 8, 2024. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.

- 
- [33] S. Lankes, J. Breitbart, S. Pickartz. Exploring rust for unikernel development. *Proceedings of the 10th Workshop on Programming Languages and Operating Systems*, strony 8–15, 2019.
- [34] P. Larsen. Migrating C to Rust for Memory Safety . *IEEE Security & Privacy*, 22(04):22–29, Lip. 2024.
- [35] K. Lesiński.
- [36] Y. Lin, S. M. Blackburn, A. L. Hosking, M. Norrish. Rust as a language for high performance gc implementation. *ACM SIGPLAN Notices*, 51(11):89–98, 2016.
- [37] M. Lindgren. Introduction - Comparing parallel Rust and C++ — parallel-rust-cpp.github.io. <https://parallel-rust-cpp.github.io>. [Dostęp 28-01-2025].
- [38] E. M. Martins, L. G. Faé, R. B. Hoffmann, L. S. Bianchessi, D. Griebler. Npb-rust: Nas parallel benchmarks in rust, 2025.
- [39] M. Mitzenmacher, E. Upfal. *Probability and Computing: Randomization and Probabilistic Techniques in Algorithms and Data Analysis*. Cambridge University Press, 2017.
- [40] S. Nanz, F. Torshizi, M. Pedroni, B. Meyer. A comparative study of the usability of two object-oriented concurrent programming languages. *Information and Software Technology*, 55, 11 2010.
- [41] S. Nanz, F. Torshizi, M. Pedroni, B. Meyer. Design of an empirical study for comparing the usability of concurrent programming languages. *Information and Software Technology*, 55(7):1304–1315, 2013.
- [42] P. Pacheco. *An Introduction to Parallel Programming*. Morgan Kaufmann, 2011.
- [43] W. Paluszynski. Systemy Czasu Rzeczywistego i Sieci Komputerowe - Witold Paluszynski — [kcir.pwr.edu.pl](https://kcir.pwr.edu.pl/~witold/scrsk/#literatura). <https://kcir.pwr.edu.pl/~witold/scrsk/#literatura>. [Dostęp 10-03-2025].
- [44] A. Pinho, L. Couto, J. Oliveira. Towards rust for critical systems. *2019 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, strony 19–24. IEEE, 2019.
- [45] L. Rinaldi, M. Torquati, M. Danelutto. Enforcing reference capability in fastflow with rust. *Advances in Parallel Computing*, 36:396 – 405, 2020. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access.
- [46] M. P. Rooney, S. J. Matthews. Evaluating fft performance of the c and rust languages on raspberry pi platforms. *2023 57th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, strony 1–6, 2023.
- [47] J. Sible, D. Svoboda. Rust software security: A current state assessment. Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute’s Insights (blog), Dec 2022. [Dostęp: 2025-Mar-12].
- [48] T. Silva, J. Bispo, T. Carvalho. Foundations for a rust-like borrow checker for c. strona 155 – 165, 2024. Cited by: 0; All Open Access, Hybrid Gold Open Access.
- [49] H. Team. Rust vs C++: A Quick Guide for Developers | Hostwinds — [hostwinds.com](https://www.hostwinds.com/blog/rust-vs-c-a-quick-guide-for-developers). <https://www.hostwinds.com/blog/rust-vs-c-a-quick-guide-for-developers>. [Dostęp 13-03-2025].
- [50] B. Troutwine. *Hands-On Concurrency with Rust: Confidently build memory-safe, parallel, and efficient software in Rust*. Packt Publishing, 2018.

- 
- [51] T. Vandervelden, R. De Smet, D. Deac, K. Steenhaut, A. Braeken. Overview of embedded rust operating systems and frameworks. *Sensors*, 24(17), 2024. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access.
- [52] R. Viitanen. Evaluating memory models for graph-like data structures in the rust programming language: Performance and usability, 2020.
- [53] V. Q. T. (vuquangtrong@gmail.com). Introduction to Parallel Programming in C++ with OpenMP - Stephan O'Brien — physics.mcgill.ca. <https://www.physics.mcgill.ca/~obriens/Tutorials/parallel-cpp/>. [Dostęp 23-12-2024].
- [54] A. Williams. *C++ Concurrency in Action*. Manning, 2019.
- [55] X. Yin, Z. Huang, S. Kan, G. Shen. Safemd: Ownership-based safe memory deallocation for c programs. *Electronics*, 13(21), 2024.
- [56] Z. Yu, L. Song, Y. Zhang. Fearless concurrency? understanding concurrent programming safety in real-world rust software. *arXiv preprint arXiv:1902.01906*, 2019.