Raport z zadania 1

Metodyka testowa

Platforma testowa:

- CPU: Ryzen 5 3600 3.6GHz
- OS: Linux 5.11.6-1-MANJARO
- libc: 2.33
- g++: 10.2.0
- Opcje kompilatora: `g++ src/main.cpp -Wall -Wextra -O`

Opis metody

Wymagania przypadków testowych

- niezmienność (generowanie takich samych liczb pomiędzy wywoływaniami programu, aby program pracował na tych samych danych)
- porównywalność (takie dobranie parametrów aby operacja, np. wstawiania, była bezpośrednio porównywalna między dwoma strukturami)

Plik konfiguracyjny Składnia pliku `config.ini` wygląda w następujący sposób:

```
<output_filename>
<task>
<task>
<task>
...

<task> = <type> <operation> <iterations> [instance_sizes]

<type> = "array" | "list" | "stack" | "queue"

<operation> = "create" | "push" | "insert" | "search" | "remove"

<iterations> = liczba iteracji jaka ma być wykonana dla każdego rozmiaru instancji

[instance_sizes] = <size> <size> <size> <size> ... (lista rozmiarów instancji)
```

Generowanie danych Potrzebne dane były generowane na miejscu za pomocą `std::mt19937` zainicjalizowanego stałym ziarnem, aby zapewnić niezmienność danych pomiędzy uruchomieniami programu. Dodatkowo, generator liczb pseudolosowych był resetowany do stanu początkowego po wykonaniu każdego zadania (czyli jednej linijki z pliku konfiguracyjnego) w celu określenia kryterium porównywalności; zakładając taką samą liczbę iteracji i wielkości instancji, wydajność jednej struktury może być bezpośrednio porównana do drugiej, ponieważ pracują na tych samych danych.

Mierzenie czasu Otrzymując zadanie o danej ilości iteracji oraz listy wielkości instancji, program postępuje w następujący sposób: tworzone są po kolei kolejne instancje z listy i mierzony jest łączny czas wykonania wszystkich iteracji dla danej operacji. Wyjątkiem jest operacja tworzenia, wtedy mierzony jest łączny czas utworzenia struktury i wypełnienia jej danymi testowymi określoną ilość iteracji. N.p.:

```
config.ini:
    [str]   [op]    [iter]  [instns]
    array   insert  50      1000    10000   100000

program:
    zmierz laczny czas wykonania 50 operacji wstawiania dla n = 1000
    zmierz laczny czas wykonania 50 operacji wstawiania dla n = 10000
    zmierz laczny czas wykonania 50 operacji wstawiania dla n = 100000
    etc.
```

Potencjalne źródła błędów

Implementacja malloc w libc Funkcja `malloc` nie rezerwuje od razu całej pamięci o jaką ją poprosimy, tylko aby zaoszczędzić pamięć rezerwuje kolejne bloki w momencie gdy chcemy użyć pamięci zwróconej przez `malloc`, np. wpisując do niej wartość. Skutkuje to tym, że podczas wypełniania tablicy, dla jej dużych rozmiarów, mogą być wykonywane kolejne alokacje, zwiększając w ten sposób czas wykonania.

Implementacja memcpy W konstruktorze kopiującym m.in. wektora używana jest funkcja `memcpy` aby zminimalizować czas kopiowania elementów. Analiza pamięci fizycznej wykazała że kopia wektora o wielkości 1GiB nie zużywa pamięci. Możliwe że mamy do czynienia z mechanizmem copy-on-write.

Dynamic dispatch Ponieważ używamy polimorfizmu aby nie pisać każdego przypadku testowego osobno dla każdej struktury danych, wywołanie metody związanej z daną operacją wykorzystuje Vtable i wymagają wykonania skoku. Może to zwiększać czas wywołania dla każdej iteracji o stałą wartość.

Możliwe rozwiązanie: wrzucić kod benchmarkujący do klasy, żeby wykonać dynamic dispatch tylko raz (przy wywołaniu metody benchmark) a następnie zostać w obrębie klasy.

Opis badanych operacji

Tablica

Tablica to kolekcja przechowująca elementy w ciągłym bloku pamięci w sposób uporządkowany, jeden za drugim (+padding). Ponieważ zadanie wymaga aby struktura rosła by zapewnić miejsce większej ilości elementów niż początkowo wynosiła jej pojemność, implementowana struktura jest raczej bliższa `std::vector` niż `std::array`.

Tworzenie Utworzenie pustej tablicy a następnie wpisywanie kolejnych `n` elementów.

Wstawianie Wstawianie elementów na arbitralnych pozycjach częściowo lub w pełni wypełnionej tablicy. Przesuwamy elementy od danego indeksu włącznie do ostatniego elementu o jedną pozycję w prawo, a następnie na zwolnionym miejscu zapisujemy nowy element. W przypadku częściowego wypełnienia tablicy, wstawiamy do momentu zapełnienia, po czym realokujemy tablicę tak, by jej nowa pojemność wynosiła `2 * poprzednia_pojemnosc` po czym opcjonalnie zaokrąglamy do jakiejś wielokrotności którejś potęgi dwójki żeby upewnić się że nowa pojemność jest pełną wielokrotnością wielkości linii cache.

Dodawanie To samo co wyżej, z różnicą że wstawiamy zawsze na koniec tablicy, czyli nie musimy przesuwać istniejących elementów.

Wyszukiwanie Proste przejście tablicy i zwrócenie indeksu dla danego elementu, jeżeli występuje w tablicy.

Usuwanie Zmniejszenie rozmiaru tablicy jeżeli chcemy usunąć ostani element, w przeciwnym wypadku uprzednio przesuwamy elementy od danego indeksu wyłącznie o jedną pozycję w lewo.

Lista

Podwójnie linkowana lista przechowuje swoje elementy jako zbiór pojedynczo zaalokowanych bloków połączonych ze sobą za pomocą wskaźników. Lista przechowuje wskaźniki do pierwszego oraz ostatniego elementu, a bloki zawierają wskaźniki na blok poprzedni oraz następny. W zależności od wielkości typu przechowywanego, ta struktura może narzucać spory overhead pamięci (w ekstremalnym przypadku np. podwójnie linkowanej listy `bool`i lub `char`ów, element waży 1 bajt, a para wskaźników waży 16 bajtów, dając łączny rozmiar bloku równy 17 bajtów, gdzie przechowywany element to zaledwie ~6% rozmiaru bloku) a także nie jest przyjazna pamięci cache (trawersja tej struktury wymaga skoków w możliwie dalekie od siebie obszary pamięci). W przeciwieństwie do tablicy, zapewnia jednak O(1) dla operacji wstawiania i usuwania (jeżeli mamy bezpośrednią referencję do danego bloku).

Mierzenie wydajności tej struktury jest o tyle wymagające, że zazwyczaj przypadki jej użycia są mało trywialne i zawierają wiele kroków (wyszukiwanie elementu, wstawianie elementów w jego sąsiedztwie, usunięcie elementów do których mamy już referencję, etc.), więc przypadki testowe dobrze pokrywające przypadki użycia muszą być bardzo duże i skomplikowane. Mimo tego, wydajność listy będzie mierzona w podobnie trywialny sposób jak w wypadku tablicy.

Tworzenie Tworzenie listy o wielkości `n` osiągnięte jest poprzez utworzenie pustej listy, a następnie zamienne wywoływanie metod `push_back` oraz `push_front`, aby zweryfikować poprawność działania wstawiania zarówno na początku listy, jak i na jej końcu.

Wstawianie Wstawianie elementów na arbitralnych indeksach listy wymaga najpierw jej trawersji aż do interesującego nas indeksu, zatem pomimo O(1) operacji wstawiania, w tym wypadku złożnoność będzie równa złożoności dostępu, czyli O(n).

Dodawanie Dodawanie nowych elementów na koniec lub początek listy wymaga tylko alokacji nowego bloku oraz czterokrotnego przypisania wartości potrzebnych wskaźników.

Wyszukiwanie Tak jak w wypadku tablicy, wykonujemy trawersję struktury w poszukiwaniu elementu, z tą różnicą że zamiast zwracać indeks, zwracamy referencję do bloku aby umożliwić szybkie usunięcie elementu lub dodania nowych elementów w jego sąsiedztwie.

Usuwanie Jak w wypadku wstawiania, bezpośrednie usunięcie bloku ma złożoność O(1), natomiast wstawianie używając indeksu ma złożnoność O(n), ponieważ wymaga trawersji listy.

Stos

Stos to struktura danych zapewniająca operacje push i pop, które odpowiednio dodają nowy element, oraz usuwają element z wierzchołka stosu. Elementy wrzucone na stos jako ostatnie, są jako pierwsze usuwane przez operację pop (Last In First Out, LIFO). Definicja wymaga tylko powyższych dwóch operacji i ich poprawnego działania, określa zatem tylko interfejs, stos można zaimplementować używając tablicy lub listy.

Tworzenie Jak w wypadku powyższych struktur, tworzymy pusty stos, a następnie dodajemy do niego elementy za pomocą funkcji `push()`. W tym celu inicjalizujemy podległą strukturę (tablicę lub listę) a następnie używamy właściwych im funkcji do dodawania elementów.

Wstawianie Aby wstawić element na `n`tą pozycję stosu, musimy najpierw ściągnąć `n` górnych elementów, włożyć wstawiany element, a następnie włożyć ściągnięte elementy w kolejności odwrotnej niż uzyskana (Last In First Out). Może nam do tego posłużyć kolejny stos.

Dodawanie Dodanie elementu do stosu jest tożsame z wstawieniem elementu na jego 0 pozycję. Nie musimy wyciągać żadnych elementów. Złożoność operacji wynosi O(1).

Wyszukiwanie Aby wyszukać element w stosie, musimy przejść stos w podobny sposób jak w wypadku wstawiania - usuwamy elementy z wierzchu aby uzyskać dostęp do elementów pod spodem, zapisując je na tymczasowy stos. Po znalezieniu elementu wracamy, tj. przekładamy elementy ze stosu tymczasowego z powrotem na swoje miejsce.

Usuwanie Przy usuwaniu elementu ze stosu robimy to samo co podczas wstawiania, z różnicą że zamiast dodawać element po dojściu do danej pozycji, usuwamy dodatkowy element.

Kolejka

Podobnie jak stos, to struktura zapewniająca interfejs do zapisywania i odczytywania danych. W przeciwieństwie do stosu, zapewnia kolejność First In First Out, FIFO, czyli elementy dodane do listy jako pierwsze, jako pierwsze są z niej usuwane. Podobnie może zostać zaimplementowana za pomocą listy lub tablicy.

Tworzenie Jak w wypadku powyższych struktur, tworzymy pustą listę, a następnie dodajemy do niej elementy za pomocą funkcji `push()`. W tym celu inicjalizujemy podległą strukturę (tablicę lub listę) a następnie używamy właściwych im funkcji do dodawania elementów.

Wstawianie Mechanizm jest bardzo podobny do stosu, z tą różnicą, że musimy usunąć z kolejki wszystkie elementy. Jest to spowodowane tym, że kiedy dojdziemy już do pożądanej pozycji i wstawimy element, musimy przywrócić wszystkie elementy które usunęliśmy tak, aby były one w odpowiedniej kolejności. Ponieważ kolejka jest strukturą FIFO (First In First Out), pierwszy element który ściągnęlismy, musimy wstawić jako pierwszy (czyli do pustej kolejki). W tym celu musimy ściągnąć resztę elementów by opróżnić kolejkę, a następnie dodać do niej element który usunęliśmy jako pierwszy (First In, czyli podobnie jak w wypadku stosu, możemy użyć tymczasowej kolejki do odpowiedniego uszeregowania elementów), a następnie kolejne.

Wydajność wstawiania można by było poprawić używając Double Ended Queue (deque). Ten rodzaj kolejki umożliwia dodawanie i usuwanie elementów z zarówno przodu jak i tyłu kolejki.

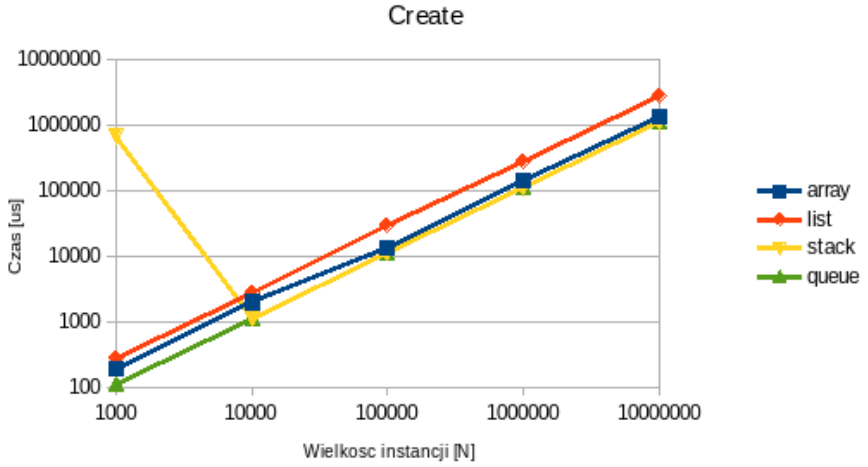
Dodawanie Dodawanie elementu do kolejki to po prostu dodanie go z tyłu kolejki. Nie usuwamy żadnych elementów zatem złożoność wynosi O(1).

Wyszukiwanie Podobnie jak ze wstawianiem, przechodzimy przez kolejkę używając tego samego sposobu, również musząc opróżnić ją w całości a następnie zrekonstruować od zera.

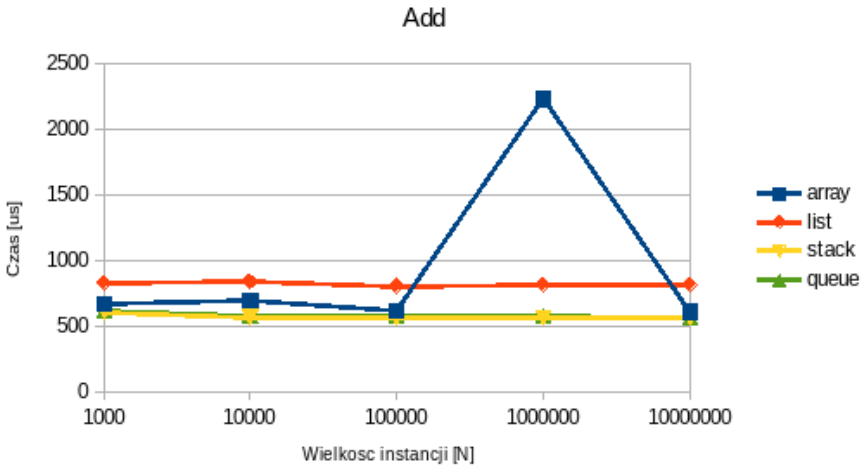
Usuwanie J.w. przechodzimy przez kolejkę, usuwamy interesujący nas element, ściągamy resztę elementów na kolejkę tymczasową, a następnie rekonstruujemy kolejkę.

Wyniki

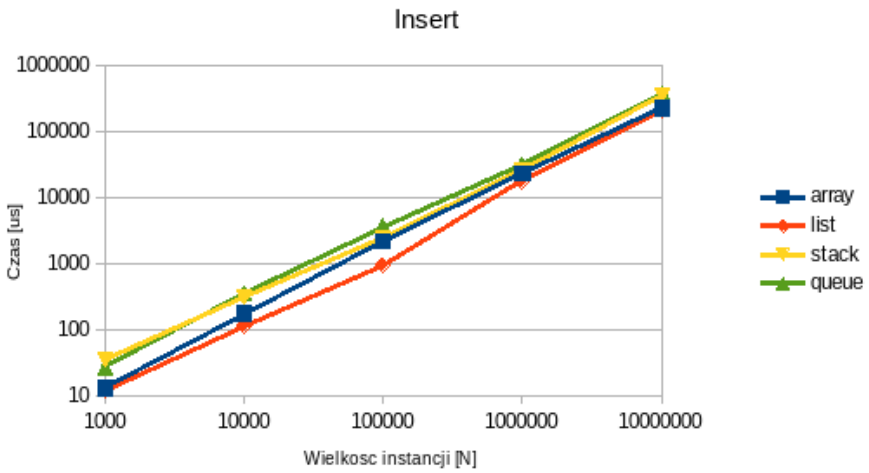
Tworzenie



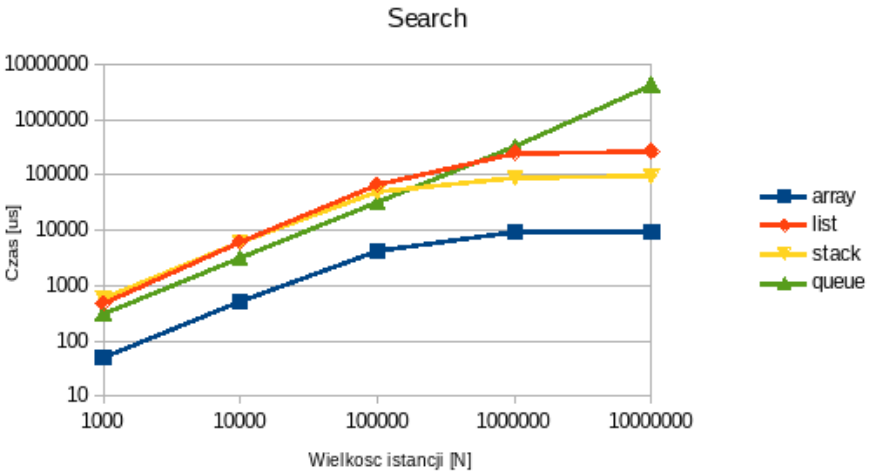
Dodawanie



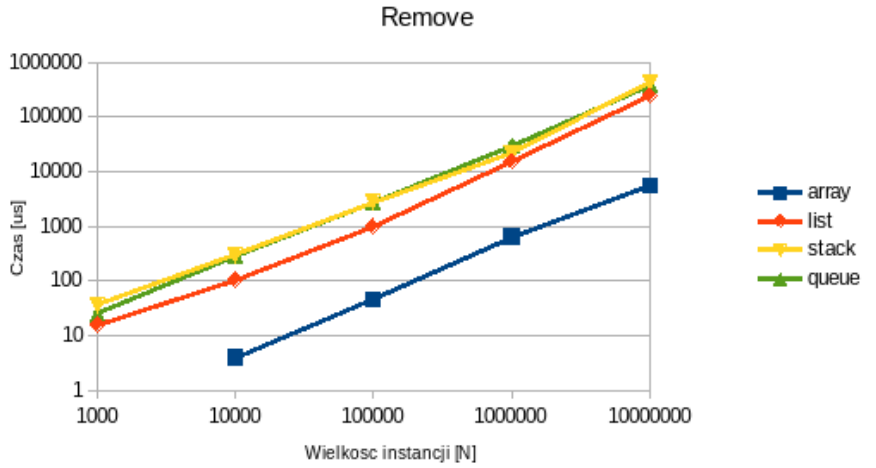
Wstawianie



Szukanie



Usuwanie



Analiza i wnioski

Tworzenie

Złożoność operacji tworzenia wynosi O(n) dla wszystkich struktur.

Jest to łatwo zrozumiałe, ponieważ wszystkie struktury tworzone są poprzez zapętlone wywoływanie funkcji `add()`, która dodaje do listy po jednym elemencie.

Czas utworzenia stosu dla najmniejszego rozmiaru instancji jest widocznie nienaturalnie wysoki. W momencie kończenia raportu nie jest znana przyczyna tego wyniku. Testy na innych wartościach ziarna nie pozbyły się problemu, zatem można wywnioskować że problem jest deterministyczny i niezależny od danych.

Dodawanie

Złożoność operacji dodawania wynosi O(1) dla wszystkich struktur.

Dodanie elementu na koniec lub początek struktury to jedna operacja i nie jest zależna od wielkości instancji. W niektórych przypadkach może skutkować realokacją i zająć bardzo długi czas (tablica dynamiczna), jednak duża szybkość dodawania reszty elementów amortyzuje ten koszt, stawiając dynamiczną tablicę pod listą jeżeli chodzi o szybkość tejże operacji.

Podobnie jak w wypadku tworzenia i stosu, nienaturalnie wysoki czas wykonania tej operacji dla tablicy o wielkości instancji 1 000 000 nie jest znany, lecz wiadomo jest że nie jest zależny od danych losowych.

Wstawianie

Złożoność operacji wstawiania wynosi O(n) dla wszystkich struktur.

W wypadku tablicy, aby wstawić element na pozycji `i`, musimy elementy `[i+1; n)` przenieść o jedną pozycję w lewo. W wypadku pozostałych struktur (wszystkie są zaimplementowane na

linkowanych listach), ponieważ wstawiamy w oparciu o indeks, musimy najpierw dostać się do niego, a operacja dostępu dla list wynosi **O(n)**.

Szukanie

Złożoność operacji wyszukiwania wynosi O(n) dla wszystkich struktur.

Ponieważ dane nie są w żaden sposób sortowane, a my szukamy zupełnie losowej wartości, złożoność wyszukiwania wynosi **O(n)**. Dla większych wielkości instancji czas wyszukiwania maleje, ponieważ test operacji wyszukiwania zaimplementowany jest w ten sposób, że losowana jest kolejna wartość i jest ona wyszukiwana w tablicy. Wiadomo że dla większych wielkości instancji mamy większą szansę że nasza szukana wartość wystąpiła pośród losowo wygenerowanych danych.

Słabą wydajność kolejki tłumaczy fakt że musimy i tak przechodzić przez całą kolejkę aby ją odbudować, opisany w opisie operacji.

Dodatkowo, przykład dobrze pokazuje zalety tablicy: lokalność elementów i brak skoków powoduje że jest o rząd wielkości szybsza od innych struktur - głównie dzięki wysokiej utylizacji cache, które zmniejsza czas dostępu do każdego elementu.

Usuwanie

Złożoność operacji usuwania wynosi O(n) dla wszystkich struktur.

Złożoność jest taka jaka jest z powodów podobnych jak w operacji wstawiania - kopiowanie danych w tablicy, dostęp do elementu w innych strukturach. Dodatkowo również tutaj widoczna jest wysoka utylizacja systemu cache przez tablicę, skutkująca rządem wielkości niższym czasem wykonania.

Z niewiadomego powodu przy wstawianiu tablica nie radzi sobie lepiej niż inne struktury. Powód nie jest znany.

Źródła

- kod źródłowy: https://github.com/Bravo555/data-structures-project