Indeksowa organizacja pliku

Dominik Lau (188697)

24 października 2023

1 Wprowadzenie

Celem projektu była implementacja indeksowo-sekwencyjnej organizacji pliku z mozliwością dodawania, usuwania i aktualizacji rekordów, a następnie zbadanie wpływu parametrów na działanie tej struktury. Wylosowane przeze mnie typy rekordów to **numery rejestracyjne samochodów**. Implementacji dokonałem w języku C++.

2 Opis działania

2.1 Struktura kodu

W moim rozwiązaniu stosuję:

- klasy rekordów indeksu i pliku z danymi, udostępniające narzędzia do serializacji
- klasę *File* z pliku *generic/File.h* zawierającą implementację pliku dyskowego o dostępie blokowym, która obsługuje logikę zapisu/odczytu stron z pliku dyskowego tak,że dostęp do niego poprzez metody *get* czy *insert* są na podobieństwo dostępu do zwykłej tablicy w pamięci RAM. Struktura ta cache'uje strony, odczytuje i zapisuje tylko w przypadku konieczności jej wymiany (ponadto zapis następuje tylko w przypadku modyfikacji "bitu" *dirty* na true)
- klasę *IndexedFile* udostępniającą m.in. metody *remove, insert, update, reorganise* (o których więcej w następnch podpunktach)
- folder *cli/* zawierający "agenty" - *InteractiveAgent, RandomAgent, FileAgent* definiujące źródło wejścia do programu, odpowiednio z wiersza poleceń, losowe oraz z pliku
- folder *time/* zawierający zegary i klasy pomiarowe do zliczania operacji dyskowych

2.2 Serializacja/deserializacja

Rekordy z pliku indeksowego składają się z dwóch 4-bajtowych pól (numer strony i klucz), których kolejne bajty umieszczam w pliku zgodnie z konwencją little endian. W przypadku rekordu z danymi mamy trzy pola do serializacji - klucz, wskaźnik na następny rekord w obszarze przepełnienia (jeśli następny taki rekord nie znajduje się w obszarze przepełnienia, to pole to ma wartość **0xFFFFFFFF**) oraz **7-bajtowe pole z danymi**. W przypadku, gdy rozmiar strony nie jest równy wielokrotności rozmiaru rekordu, reszta jest uzupełniana bajtami 0xFF.

2.3 Operacje na pliku indeksowym

- tworzenie (konstruktor) - oferuje możliwość podania liczby stron głównych do stworzenia, ilość stron przeznaczonych na obszar przepełnienia to $\lceil$il. stron głównych $* 0.2\rceil$. **Na początku działania programu tworzony jest plik o 3 stronach głównych** (a co za tym idzie jednej stronie na obszar przepełnienia).
- insert - wstawienie nowego rekordu - pierw algorytmem binary search **przeszukujemy indeks** w poszukiwaniu odpowiedniego bloku, następnie **przeszukujemy blok w poszukiwaniu poprzednika** wstawianego klucza, jeśli nie możemy wstawić rekordu bezpośrednio za poprzednikiem (np. już jest tam jakiś rekord lub strona jest pełna), **umieszczamy go w łańcuchu przepełnienia tego rekordu** , jeśli obszar przepełnienia jest pełny, przeprowadzamy reorganizację pliku indeksowego
- reorganise
    1. tworzymy tymczasowy plik indeksowy z indeksami *temp_ index i temp_ data*, z których plik data ma ilość głównych stron zgodną ze wzorem $\lceil \frac{N+V}{b \cdot \alpha} \rceil$, gdzie N, V - liczba odpowiednio rekordów głównych i rekordów w przepełnieniu, b - liczba rekordów danych na stronę, α - średnie zapełnienie strony po reorganizacji plik tymczasowy index ma odpowiednią liczbę stron tak, żeby zmieścić wskaźniki do wszystkich stron nowego obszaru głównego

2. **odwiedzamy kolejne rekordy zgodnie z kolejnością rosnących kluczy** (czyli bierzemy też po uwagę obszar przepełnienia) i umieszczamy je na kolejnych stronach nowego pliku respektując przy tym α
3. zmieniamy pliki *temp_index i temp_data* na *data i index*, w ten sposób dane po reorganizacji przypisujemy do pliku indeksowego, na którym operujemy
4. zastosowano tu optymalizację związaną z faktem, że w mojej implementacji strony są cache'owane i zapisywane tylko wtedy, gdy to konieczne (w sposób lazy) - tworzę osobny bufor na strony z obszaru przepełnienia, wówczas mam jednocześnie cache stron obszaru głównego i overflow i nie zachodzi potrzeba ciągłego ich wymieniania

- remove - znalezienie odpowiedniego miejsca w strukturze i usunięcie z niego rekordu, tutaj na miejsce, w którym był ten rekord "wciągamy" następny z łańcucha przepełnienia (jeśli taki występuje)
- update - **jeśli chcemy aktualizować klucz** dla danego rekordu to najpierw usuwamy go z pliku a następnie wstawiamy na nowo ze zmodyfikowanymi danymi; **jeśli aktualizujemy tylko dane** to pobieramy pozycję rekordu o danym kluczu i zmieniamy jego numer rejestracyjny

3 Prezentacja wyników programu

3.1 Menu wyboru źródła danych

Po włączeniu programu użytkownik ma do wyboru trzy tryby

```
[INFO] debug mode false
CHOOSE INPUT TYPE: CLI/FILE/RANDOM, set/unsets DEBUG
```

- CLI - tryb interaktywny
- FILE <nazwa_pliku> - dane z pliku o podanej nazwie
- RANDOM <N> - generacja losowej ilości poleceń (INSERT/REMOVE/UPDATE)
- DEBUG - włączenie wypisywania stanu pliku co każdą operację

Po zakończeniu dla każdego z tych plików użytkownik ma możliwość wypisania końcowej postaci pliku.

3.2 Menu interaktywne

Menu oferuje następujące komendy

```
>>HELP
INSERT <key> <value>
REMOVE <key>
UPDATE <key> <newKey> <newValue>
GET <key>
REORGANISE
INORDER
EXIT
```

komenda INORDER oferuje wypisanie pliku zgodnie z kolejnością kluczy, oto przykładowe wywołanie komendy INSERT z wyłączonym trybem debug

```
>>INSERT 3 GS2138
[Measurement] r: 1 w: 0 io(r+w): 1
```

Otrzymujemy informacje o wykonanych zapisach i odczytach (0 zapisów, ponieważ rekord jest narazie w cache'u, 1 odczyt ponieważ strona z pliku indeksowego najwyraźniej nadal jest w cache).

3.3 Dane z pliku

Plik, z którego pobierane są dane musi zawierać instrukcje w formacie takim, jak w przypadku menu interaktywnego, ponadto każda musi być w osobnej linii. Ciąg instrukcji kończyć musi instrukcja EXIT.

3.4 Wypisywanie pliku

Są dwa sposoby, w jaki program wypisuje plik, pierwszy - wypisanie struktury pliku razem z pustymi miejscami i zaznaczeniem jaki rekord jest na której stronie, oto przykład

```
___INDEXED__FILE___
-------INDEX-------
=======PAGE0======
page: 0 key: 0
page: 1 key: 98852148
page: 2 key: 198206151
-----INDEX-END-----

------PRIMARY------
=======PAGE0======
#0 key: 0 data: BRUUUUH ptr: 14
#1 key: 68030329 data: DEBUG69
#2 ********************
#3 ********************
=======PAGE1======
#4 key: 98852148 data: 4O353I3
#5 ********************
#6 ********************
#7 ********************
=======PAGE2======
#8 key: 198206151 data: P5MP165
#9 ********************
#10 ********************
#11 ********************
----PRIMARY-END----

-----OVERFLOW------
=======PAGE0======
#12 key: 68030327 data: BUP30QP ptr: 13
#13 key: 68030328 data: DEBUG70
#14 key: 35496734 data: K7302PD ptr: 12
#15 ********************
----OVERFLOW-END---
```

a oto wypisanie tego samego pliku zgodnie z kolejnością klucza

```
___INDEXED__FILE___
#0 key: 0 data: BRUUUUH
#14 key: 35496734 data: K7302PD
#12 key: 68030327 data: BUP30QP
#13 key: 68030328 data: DEBUG70
#1 key: 68030329 data: DEBUG69
#4 key: 98852148 data: 4O353I3
#8 key: 198206151 data: P5MP165
```

4 Eksperyment

4.1 Szczegóły implementacyjne

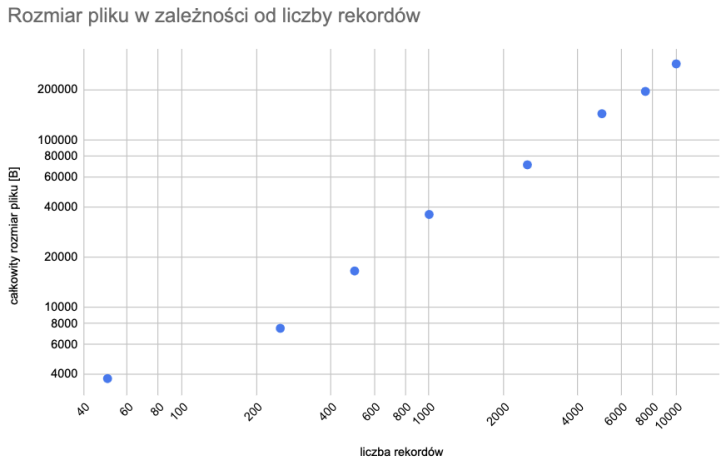
Kod przeprowadzonego eksperymentu umieściłem w pliku *perf2.cpp* jako część biblioteki *sbd_test*. Test uruchamiany jest za pomocą frameworka do testowania gtest. W celu zliczania operacji wejścia-wyjścia w *libsbd* zdefiniowałem dwa zegary: *writeClock* oraz *readClock*. W pomiarach wykorzystuję również klasę *Measurement*, która zbiera próbki na wzór paradygmatu RAII - w konstruktorze zapisywany jest aktualny stan zegara a w destruktorze nowy stan zegara jest odejmowany od starego, w ten sposób otrzymuję liczbę wywołań funkcji *tick* danego zegara. Ponadto pomiary te dodawane są do obiektu klasy *MeasurementAggregate*, który umożliwia policzenie wartości średniej z zebranych próbek.

W przypadku testów przyjęto rozmiar strony 750B.

4.2 Rozmiar a ilość rekordów

Pierwszym przeprowadzonym eksperymentem było zbadanie zależności między liczbą rekordów a rozmiarem pliku. W tym celu przyjęto $\alpha = 0.5$ i przeprowadzono N losowych operacji INSERT.

N	rozmiar indeksu [B]	rozmiar obszaru głównego [B]	rozmiar obszaru przepełnienia [B]	Σ [B]
50	750	2250	750	3750
250	750	5250	1500	7500
500	750	12750	3000	16500
1000	750	29250	6000	36000
2500	750	58500	12000	71250
5000	1500	118500	24000	144000
7500	2250	161250	32250	195750
10000	3000	236250	47250	286500

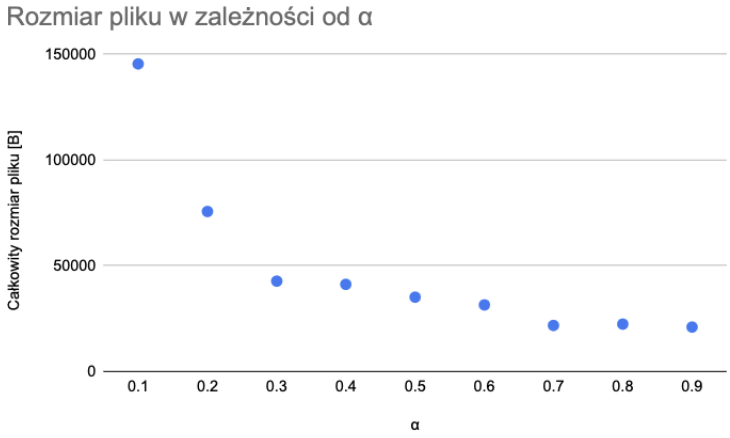


Intuicyjnie, **całkowity rozmiar pliku indeksowego rośnie liniowo względem liczby rekordów**. Warto natomiast zwrócić uwagę na rozmiar indeksu, który rośnie znacznie wolniej - dla 10000 rekordów ma on zaledwie 3000B czyli 4 strony. Stąd wniosek, że **opłacalnym jest przeszukiwanie indeksu** zarówno ze względu na jego mały rozmiar jak i na fakt, że jedna strona indeksu zawiera informacje o wielu stronach w obszarze danych.

4.3 Rozmiar a α

W następnym eksperymencie przeprowadzono 1000 losowych operacji INSERT dla różnych współczynników średniego zapełnienia bloku i zbadano końcowy rozmiar pliku

α	rozmiar indeksu [B]	rozmiar obszaru głównego [B]	rozmiar obszaru przepełnienia [B]	Σ [B]
0.1	1500	120000	24000	145500
0.2	750	62250	12750	75750
0.3	750	34500	7500	42750
0.4	750	33750	6750	41250
0.5	750	28500	6000	35250
0.6	750	25500	5250	31500
0.7	750	17250	3750	21750
0.8	750	18000	3750	22500
0.9	750	16500	3750	21000



Warto zauważyć, że dla $\alpha \in [0.1, 0.3]$ następuje **gwałtowny spadek rozmiaru pliku**. Dalej tendencja się utrzymuje jednak w mniejszym stopniu. Czym większe α, tym **reorganizacja utworzy mniej stron (które będą bardziej "upchane")**. Potencjalnym wytłumaczeniem, dlaczego tendencja spadkowa się osłabia jest np. **częstsze zachodzenie reorganizacji** wraz ze wzrostem α (szybsze zapełnianie się stron, mniejszy obszar przepełnienia). Wysnuć mozna wniosek, że chcąc zaoszczędzić pamięć dyskową, opłaca się wybrać większe α.

4.4 Średnia liczba operacji dla różnych α

W kolejnym eksperymencie wygenerowano 1000 losowych rekordów z kluczami $\in [0, 1000]$, sprawdzono złożoność dla wstawiania, a następnie badano średnią ilość odczytów/zapisów dla 100 operacji aktualizacji, usuwania i szukania (i ich różnych przypadków) dla $\alpha \in \{0.1, 0.3, 0.5\}$.

dla $\alpha = 0.1$

operacja	średnia liczba odczytów	średnia liczba zapisów	średnia liczba operacji i/o
wstawianie	3.95	2.21	6.16
rekord istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	5.98	3.41	9.39
aktualizacja (ten sam k.)	2.45	1.00	3.45
usunięcie	2.91	1.52	4.43
szukanie	2.45	0.01	2.46
rekord nie istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	2.53	0.01	2.54
aktualizacja (ten sam k.)	2.35	0.01	2.36
usunięcie	2.35	0.01	2.36
szukanie	2.35	0.01	2.36

dla $\alpha = 0.3$

operacja	średnia liczba odczytów	średnia liczba zapisów	średnia liczba operacji i/o
wstawianie	2. 957	2.019	4.976
rekord istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	4.97	2.76	7.73
aktualizacja (ten sam k.)	1.32	0.99	2.31
usunięcie	2.08	0.93	3.01
szukanie	1.32	0.01	1.33
rekord nie istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	1.8	0.01	1.81
aktualizacja (ten sam k.)	1.75	0.01	1.76
usunięcie	1.75	0.01	1.76
szukanie	1.75	0.01	1.76

dla $\alpha = 0.5$

operacja	średnia liczba odczytów	średnia liczba zapisów	średnia liczba operacji i/o
wstawianie	3.018	2.064	5.082
rekord istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	3.46	2.76	6.22
aktualizacja (ten sam k.)	1.05	0.96	2.01
usunięcie	1.21	0.9	2.11
szukanie	1.05	0.01	1.06
rekord nie istnieje			
aktualizacja (inny klucz)	1.1	0.01	1.11
aktualizacja (ten sam k.)	1.06	0.01	1.07
usunięcie	1.06	0.01	1.07
szukanie	1.06	0.01	1.07

Dla $\alpha = 0.1$ obserwujemy większą ilośc operacji niż dla pozostałych - dzieje się tak ponieważ mamy większą ilość stron a zatem i częściej zachodzą przypadki takie jak konieczność wymiany strony (odwołanie do strony, która nie znajduje się w pamięci cache), dla dużego α natomiast jest większe prawdopodobieństwo, że w kolejnej operacji nastąpi odwołanie do strony, którą akurat trzymamy w pamięci operacyjnej. Nie należy jednak wyciągać pochopnych wniosków - ta różnica może być zaniedbywalnie mała dla ogromnej ilości stron. Ponadto, **są to róznice do dwóch operacji dyskowych**.

Jeśli chodzi o same operacje to widzimy, że **najbardziej złożona jest operacja update ze zmianą klucza**. Choć w implementacji sprowadza się do wywołania remove a następnie insert to w średnim przypadku trwa mniej niż suma tych operacji ze względu na **obecność pamięci cache**. W przypadku aktualizacji danych rekordu, mamy do czynienia ze znacznie szybszą metodą (wówczas jest to znalezienie odpowiedniego rekordu i ponowne zapisanie go ze zmienionymi danymi). Pragnę również zauważyć, że w przypadku **gdy rekord nie istnieje operacje aktualizacji, usunięcia i szukania wymagają podobnej ilości dostępów** do dysku.

5 Podsumowanie

Reasumując, projekt pozwolił na głębsze zrozumienie organizacji indeksowej pliku a także ich własności. Z eksperymentów płynie uzasadnienie, dlaczego w tej strukturze używany jest indeks - umożliwia on szybkie przeszukiwanie pliku. Można poczynić również obserwacje co do rozmiaru plików w zależności od tego jak przeprowadzamy reorganizację pliku (czym większe α tym mniejszy plik). W końcu, eksperymenty potwierdziły oczekiwania co do wzajemnego stosunku średniej ilości I/O dla poszczególnych operacji.