

Dokumentacja Implementacji Drzewa Czerwono-Czarnego (Red-Black Tree)

Autor: Marian Wąchała

Data: 15 stycznia 2025

Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Drzewo czerwono-czarne	2
1.2	Założenia drzewa czerwono-czarnego	2
1.3	Podstawowe pojęcia w drzewie czerwono-czarnym	2
2	Opis Implementacji	2
2.1	Rola NIL jako strażnika	2
2.2	Podstawowe metody	3
2.2.1	Wstawianie elementu	3
2.2.2	Naprawa drzewa po wstawieniu (fixInsert)	3
2.2.3	Usuwanie elementu	4
2.2.4	Naprawa drzewa po usunięciu elementu (fixDelete)	4
2.2.5	Wyszukiwanie elementu	5
2.3	Metody pomocnicze	5
3	Przykładowe Testy	5
4	Podsumowanie	8
4.1	Złożoność operacji dodawania i usuwania elementów z drzewa czerwono-czarnego	8
5	Źródła	8

1 Wstęp

1.1 Drzewo czerwono-czarne

Drzewo czerwono-czarne (ang. *Red-Black Tree*) to samobalansujące się drzewo BST (ang. *Binary Search Tree*), które zapewnia średni czas wstawiania, usuwania i wyszukiwania na poziomie $\mathcal{O}(\log n)$.

Zachowanie równowagi jest możliwe dzięki specjalnym regułom związanym z kolorowaniem węzłów na kolor czerwony (RED) lub czarny (BLACK) oraz dzięki odpowiednim operacjom rotacji (lewo- i prawostronnej).

1.2 Założenia drzewa czerwono-czarnego

Drzewa czerwono-czarne opierają się na następujących regułach:

1. Każdy węzeł jest **czerwony** lub **czarny**.
2. **Strażnik NIL** jest zawsze czarny i działa jako końcowy węzeł (liść) w każdej ścieżce.
3. Korzeń drzewa jest zawsze **czarny**.
4. Każda ścieżka od węzła do liścia zawiera taką samą liczbę **czarnych węzłów**.
5. Czerwony węzeł nie może mieć czerwonych rodziców ani dzieci (własność **Black Depth**).

1.3 Podstawowe pojęcia w drzewie czerwono-czarnym

Podczas opisywania operacji na drzewie czerwono-czarnym używane są następujące terminy:

- **Ojciec (Parent)** – bezpośredni przodek danego węzła w drzewie.
- **Dziadek (Grandparent)** – przodek węzła będący ojcem jego ojca.
- **Wujek (Uncle)** – węzeł będący drugim dzieckiem dziadka, który nie jest ojcem danego węzła.
- **Brat (Sibling)** – inne dziecko tego samego ojca co dany węzeł.

2 Opis Implementacji

2.1 Rola NIL jako strażnika

W implementacji zastosowano specjalny węzeł NIL, który:

- Działa jako wskaźnik na wszystkie puste liście w drzewie.
- Upraszcza implementację, eliminując konieczność sprawdzania, czy wskaźniki są `nullptr`.
- Wspiera zachowanie spójności drzewa podczas operacji naprawczych (`fixInsert` i `fixDelete`).

2.2 Podstawowe metody

2.2.1 Wstawianie elementu

Proces wstawiania polega na dodaniu nowego węzła do drzewa zgodnie z zasadami BST, a następnie naprawie potencjalnych naruszeń zasad drzewa czerwono-czarnego za pomocą metody `fixInsert`.

```
1 void insert(const T& key);
```

Metoda wykonuje następujące kroki:

1. Tworzy nowy węzeł o wartości `key` z kolorem RED.
2. Znajduje odpowiednie miejsce w drzewie dla nowego węzła.
3. Wywołuje `fixInsert` w celu przywrócenia właściwości drzewa czerwono-czarnego.

2.2.2 Naprawa drzewa po wstawieniu (`fixInsert`)

Gdy nowy węzeł zostanie wstawiony, może dojść do naruszenia reguł drzewa czerwono-czarnego. Naprawa odbywa się w następujących krokach:

Przypadek A: Ojciec węzła jest lewym dzieckiem dziadka.

- 1. Wujek jest czerwony:
 - Zmieniamy kolor dziadka na czerwony.
 - Zmieniamy kolor ojca na czarny.
 - Zmieniamy kolor wujka na czarny.
 - Przechodzimy do dalszego przetwarzania od dziadka.
- 2. Wujek jest czarny:
 - a. Węzeł jest lewym dzieckiem ojca:
 - * Wykonujemy rotację w lewo na ojcu.
 - * Aktualizujemy odniesienia do węzła i jego rodzica.
 - b. Węzeł jest prawym dzieckiem ojca:
 - * Wykonujemy rotację w prawo na dziadku.
 - * Zamieniamy kolory ojca i dziadka.
 - * Przechodzimy do dalszego przetwarzania od ojca.

Przypadek B: Ojciec węzła jest prawym dzieckiem dziadka.

Wykonujemy to samo, tylko, że podmieniamy left z right.

2.2.3 Usuwanie elementu

Proces usuwania obejmuje:

```
1 bool remove(const T& key);
```

1. Wyszukanie węzła o wartości `key`.
2. Przypadek dla węzła z jednym dzieckiem lub bez dzieci:
 - Usunięcie węzła i podłączenie jego dziecka.
3. Przypadek dla węzła z dwoma dziećmi:
 - Znalezienie najmniejszego węzła w prawym poddrzewie (`minValueNode`).
 - Zastąpienie wartości usuwanego węzła wartością znalezionego węzła.
 - Usunięcie znalezionego węzła.
4. Wywołanie `fixDelete` w celu przywrócenia właściwości drzewa.

2.2.4 Naprawa drzewa po usunięciu elementu (`fixDelete`)

Podobnie jak w przypadku wstawiania, po usunięciu elementu może dojść do naruszenia własności drzewa czerwono-czarnego. Naprawa po usunięciu elementu odbywa się w następujących krokach:

Przypadek A: Węzeł jest lewym dzieckiem rodzica.

- **1. Brat węzła jest czerwony:**
 - Zmieniamy kolor brata na czarny.
 - Zmieniamy kolor rodzica na czerwony.
 - Wykonujemy rotację w lewo na rodzicu.
 - Aktualizujemy odniesienie do brata (teraz jest to prawy syn rodzica po rotacji).
- **2. Brat węzła jest czarny i ma dwóch czarnych synów:**
 - Zmieniamy kolor brata na czerwony.
 - Przechodzimy do dalszego przetwarzania od rodzica.
- **3. Brat węzła jest czarny i jego prawy syn jest czarny, ale lewy syn jest czerwony:**
 - Zmieniamy kolor lewego syna brata na czarny.
 - Zmieniamy kolor brata na czerwony.
 - Wykonujemy rotację w prawo na bracie.
 - Aktualizujemy odniesienie do brata (teraz jest to prawy syn rodzica po rotacji).

- **4. Brat węzła jest czarny i jego prawy syn jest czerwony:**

- Zmieniamy kolor brata na kolor rodzica.
- Zmieniamy kolor rodzica na czarny.
- Zmieniamy kolor prawego syna brata na czarny.
- Wykonujemy rotację w lewo na rodzicu.
- Przerywamy pętlę (ustawiamy węzeł na korzeń).

Przypadek B: Węzeł jest prawym dzieckiem rodzica.

Postępujemy analogicznie jak w przypadku A, zamieniając kierunki rotacji oraz role lewego i prawego syna.

2.2.5 Wyszukiwanie elementu

Metoda wyszukuje element w drzewie:

```
1 Node<T>* search(Node<T>* root, const T& key);
```

Wyszukiwanie odbywa się rekurencyjnie w oparciu o reguły BST:

- Jeśli wartość **key** jest równa wartości bieżącego węzła, zwracany jest wskaźnik do węzła.
- Jeśli wartość **key** jest mniejsza, wyszukiwanie kontynuowane jest w lewym poddrzewie.
- Jeśli wartość **key** jest większa, wyszukiwanie kontynuowane jest w prawym poddrzewie.

2.3 Metody pomocnicze

- `rotateLeft(Node<T>* node)` – Rotacja w lewo względem węzła `node`.
- `rotateRight(Node<T>* node)` – Rotacja w prawo względem węzła `node`.
- `minValueNode(Node<T>* node)` – Znajduje węzeł o najmniejszej wartości w poddrzewie.
- `transplant(Node<T>* u, Node<T>* v)` – Zamienia węzeł `u` z węzłem `v`.

3 Przykładowe Testy

Poniżej przedstawiono przykładowe scenariusze testowe dla drzewa czerwono-czarnego (Red-Black Tree). Każdy scenariusz zawiera opis operacji, wizualizację drzewa przed i po wykonaniu danej operacji.

Scenariusz 1: Usuwanie korzenia z drzewa z jednym węzłem

Opis: Usuwamy węzeł 42 z drzewa, które zawiera tylko jeden węzeł (korzeń).

Drzewo PRZED usunięciem 42:



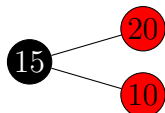
Drzewo PO usunięciu 42:

(empty tree)

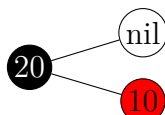
Scenariusz 2: Usuwanie czerwonego liścia

Opis: Usuwamy czerwony węzeł 15 z drzewa.

Drzewo PRZED usunięciem 15:



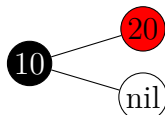
Drzewo PO usunięciu 15:



Scenariusz 3: Usuwanie pojedynczego czerwonego liścia

Opis: Usuwamy czarny węzeł 20 z drzewa.

Drzewo PRZED usunięciem 20:



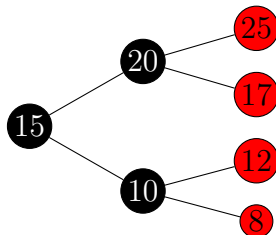
Drzewo PO usunięciu 20:



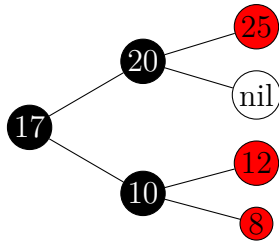
Scenariusz 4: Usuwanie węzła posiadającego dwoje dzieci

Opis: Usuwamy węzeł 15, który ma dwoje dzieci.

Drzewo PRZED usunięciem 15:



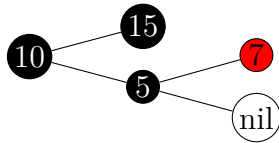
Drzewo PO usunięciu 15:



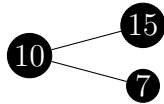
Scenariusz 5: Usuwanie węzła z jednym dzieckiem

Opis: Usuujemy węzeł 5, który posiada jedno dziecko.

Drzewo PRZED usunięciem 5:



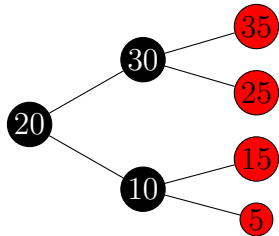
Drzewo PO usunięciu 5:



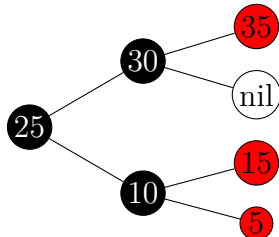
Scenariusz 6: Usuwanie korzenia z dwojgiem dzieci

Opis: Usuujemy korzeń drzewa (węzeł 20), który posiada dwoje dzieci.

Drzewo PRZED usunięciem 20:



Drzewo PO usunięciu 20:



4 Podsumowanie

4.1 Złożoność operacji dodawania i usuwania elementów z drzewa czerwono-czarnego

Drzewa czerwono-czarne są niezwykle efektywnymi strukturami danych, które dzięki swoim właściwościom zapewniają, że operacje wstawiania i usuwania są wykonywane w czasie $\mathcal{O}(\log n)$. Utrzymanie zrównoważenia drzewa poprzez odpowiednie rotacje i zmiany kolorów węzłów gwarantuje, że nawet w najgorszym przypadku wysokość drzewa pozostaje na poziomie logarytmicznym względem liczby jego elementów.

5 Źródła

- GeeksforGeeks, *Introduction to Red-Black Tree*, <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-red-black-tree/>.
- Wikipedia, *Drzewo czerwono-czarne*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Drzewo_czerwono-czarne.
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., Stein, C., *Wprowadzenie do algorytmów*, PWN, 2022.
- University of San Francisco, *Red-Black Tree Visualization*, <https://www.cs.usfca.edu/~galles/visualization/RedBlack.html>.