Paralelní a distribuované výpočty (B4B36PDV)

Jakub Mareček, Michal Jakob

jakub.marecek@fel.cvut.cz

Artificial Intelligence Center
Department of Computer Science
Faculty of Electrical Engineering
Czech Technical University in Prague

Dnes s využitím materiálů Brana Bošanského: https://cw.fel.cvut.cz/b192/courses/b4b36pdv/lectures/start

Dnešní přednáška

Souběžný přístup k datovým strukturám

Vícero vláken chce přistupovat ke společné datové struktuře

- např. zásobník, fronta, spojový seznam
- binární vyhledávací strom, jiné vyhledávací stromy
- haldy
- …

Dnešní přednáška

Souběžný přístup k datovým strukturám

Vícero vláken chce přistupovat ke společné datové struktuře

- Potřebujeme zabezpečit korektní operace s datovou strukturou sdílenou několika vlákny
- Nechceme celou strukturu zamknout při každém přístupu, alebrž navrhnout co nejefektivnější práci více vláken nad společnou datovou strukturou bez zámků (tzv. lock-free datové struktury)
- Do C++17 to nebylo standardem. Od GCC 9.1 (květen 2019) a Microsoft Visual Studio 2017 standardní. Nezávisle: Intel Parallel STL, boost::compute, NVIDIA Thrust, atp.

Souběžný přístup k datovým strukturám

Co chceme dosáhnout?

- Hlavní myšlenka

Vlákna optimisticky předpokládají, že vše bude v pořádku (modifikace DS budou konzistentní)

- … ale nemůžeme se na to spolehnout, takže

V případě detekce nekonzistence ji vlákno vyřeší/opraví

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1: vyhledání maxima

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	12	42	91	74	24	91	66	19	32

- Společná datová struktura
  - Dvě čísla – maximální hodnota & index

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1 – vyhledání maxima

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	12	42	91	74	24	91	66	19	32

- Společná datová struktura
  - Dvě čísla – maximální hodnota & index
  - Jedno číslo – index aktuální maximální hodnoty

- Jak na to?

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky

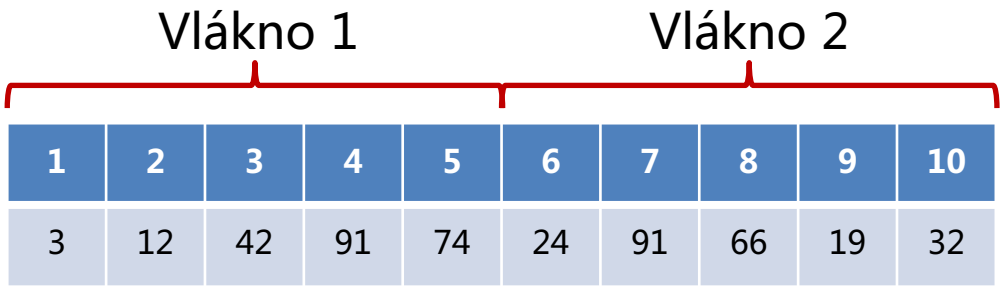
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	12	42	91	74	24	91	66	19	32

max index
-1

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky



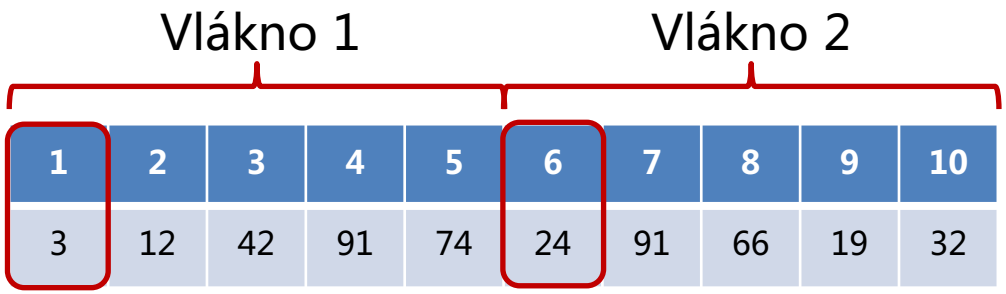
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	12	42	91	74	24	91	66	19	32

max index
-1

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky

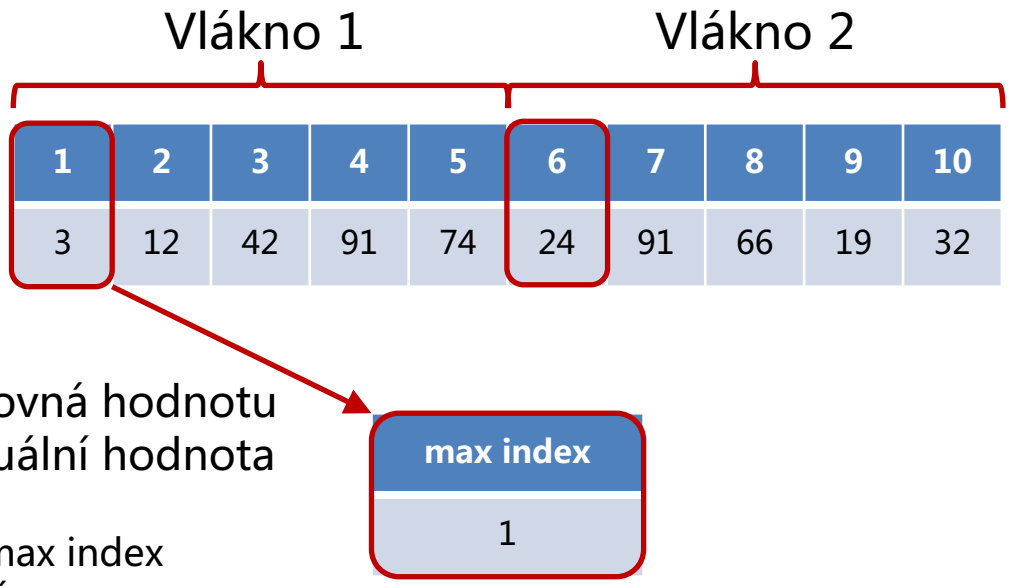


max index
-1

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky

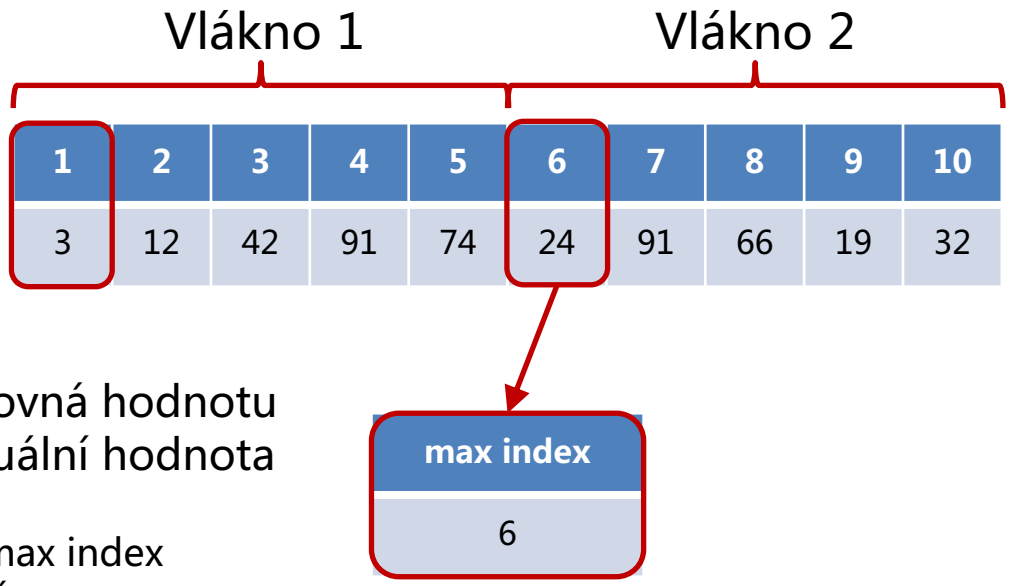


- vlákno 1 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu
  - odemkne max index

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky

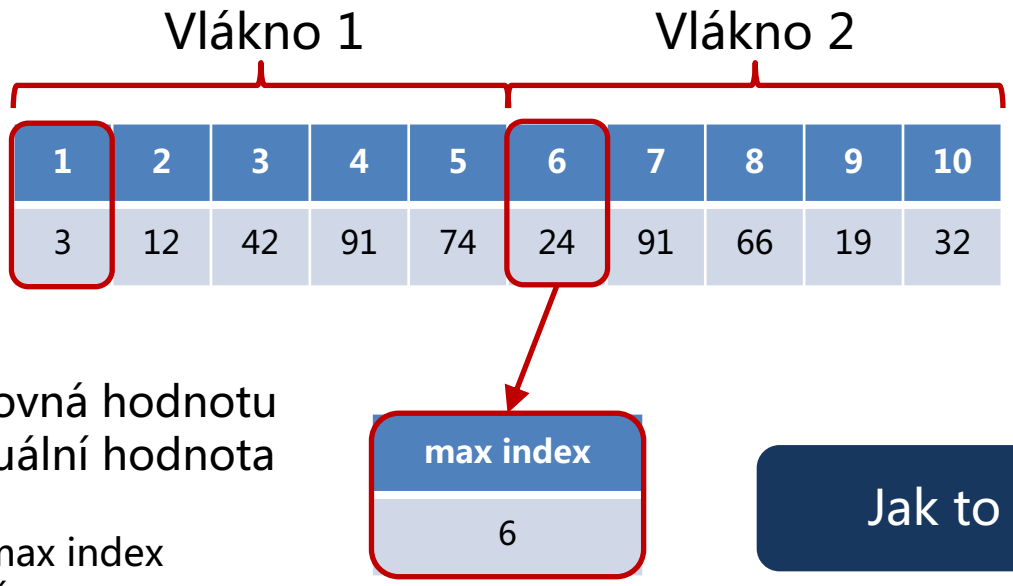


- vlákno 2 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu
  - odemkne max index

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Vyhledání maxima v seznamu čísel
  - Chci najít maximální hodnotu a index na kterém se nachází
  - V případě rovnosti, chci co možná největší index
- První řešení - zámky



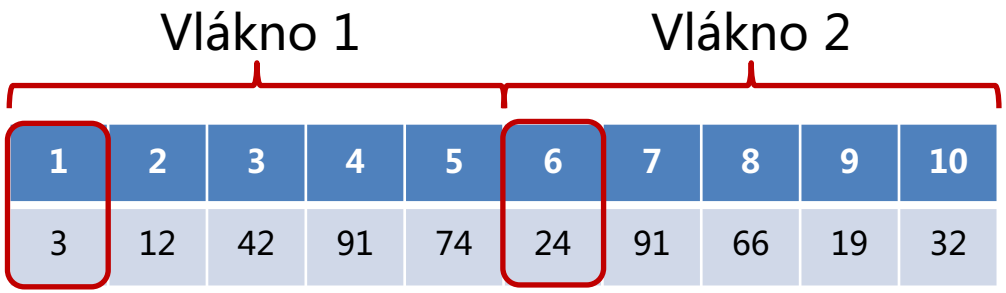
- vlákno 2 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu
  - odemkne max index

Jak to bude fungovat?

Souběžný přístup k datovým strukturám

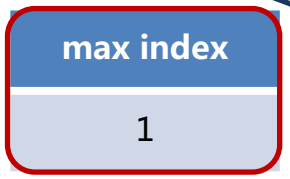
Příklad 1

- Může vzniknout nekonzistence



- vlákno 1 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu na hodnotu 1
  - odemkne max index

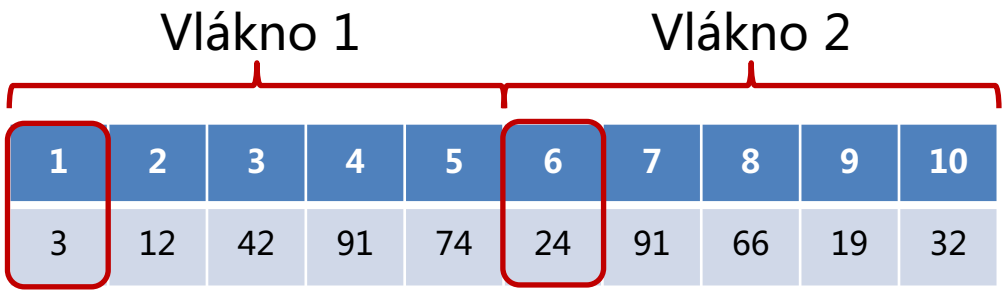
- vlákno 2 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu na hodnotu 6
  - odemkne max index



Konkurentní datové struktury

Příklad 1

- Může vzniknout nekonzistence



- vlákno 1 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu na hodnotu 1
  - odemkne max index

- vlákno 2 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - provede úpravu na hodnotu 6
  - odemkne max index

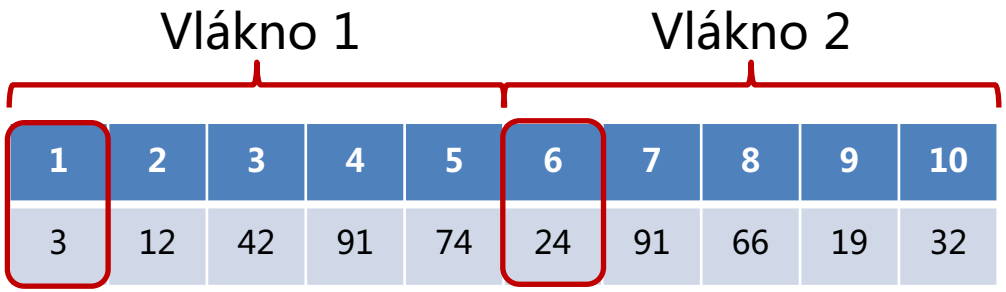
max index
1

Výsledek může být nesprávný

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- možné řešení:
  - vlákna budou zamykat max index před kontrolou – pomalé ☹
  - po získání zámku vlákno opět zkontroluje jestli je update aktuální



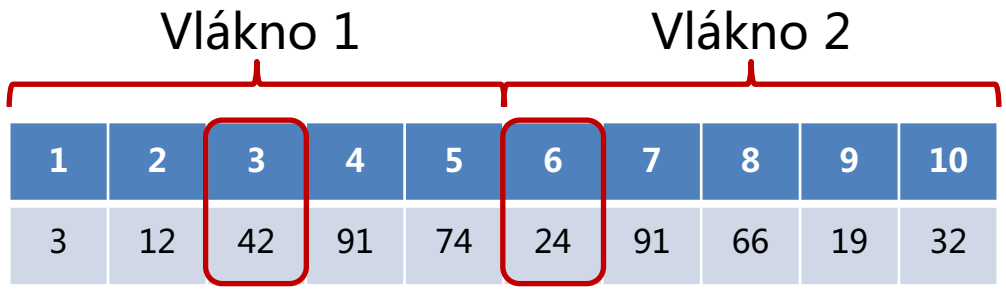
- vlákno 1 porovná hodnotu
- pokud je aktuální hodnota větší
  - zamkne max index
  - zkontroluje, jestli je aktuální hodnota stále větší
  - provede úpravu na hodnotu 1
  - odemkne max index

max index
1

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 1

- Jde to i bez zámků?
- K nekonzistenci může dojít mezi kontrolou jestli je aktuální hodnota větší než v maximu a případnou výměnou
  - Nechť je aktuální hodnota **max index** == 2 a vlákno 2 testuje podmínku
  - Výměnu vykoná pouze tehdy, pokud je **max index** pořád 2



Můžeme použít atomické proměnné

max index
2

Parallel STL

Nová specifikace

Pro všechny algoritmy ve standardní šablonové knihovně bychom měli mít možnost specifikovat "Execution Policy Value" :

- seq: jako do C++17.
- par: paralelní verze s několika thready.
- unseq: vektorizace (SIMD), pokud jsou předané funkce SIMD-safe.
- par_unseq: paralelní a vektorizovaná verze.

Plus řada nových algoritmů (např. reduce, které odpovídá foldl v Haskellu).

Od verze GCC 9.1 je možné použít vestavěné paralelní STL, pokud člověk má nainstalované OpenMP 4.0 a Intel Threading Building Blocks (TBB) 2019.

```
sudo apt install gcc libtbb-dev
g++ -ggdb3 -O3 -std=c++17 -Wall -Wextra -pedantic -o main.out
main.cpp -ltbb ./main.out
```

https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/documentation/oneapi-dpcpp-library-guide/top/parallel-stl-overview.html

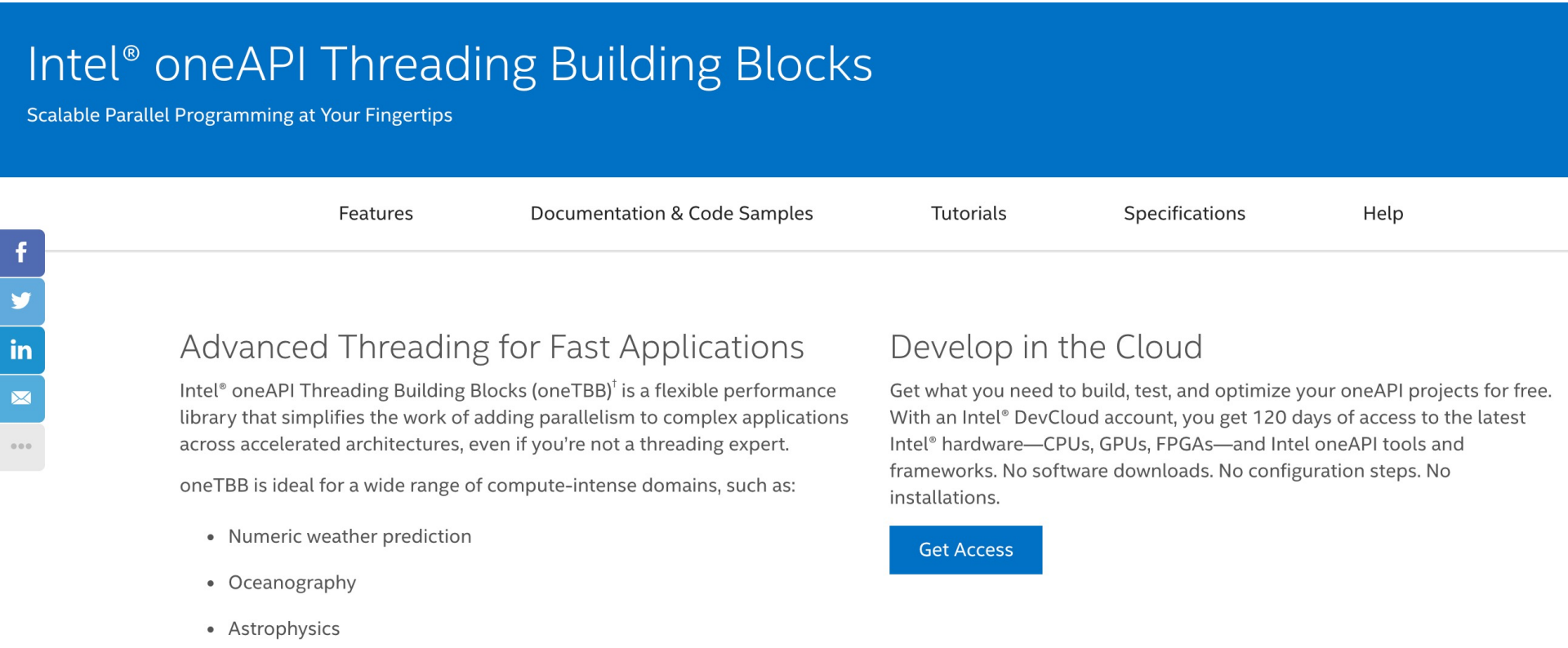
Parallel STL

Nová specifikace

```cpp
#include <algorithm>
#include <chrono>
#include <execution>
#include <iostream>
#include <random>
#include <vector>

using namespace std::chrono;

int main() {
    const int N = 1000000;
    std::vector<int> v(N);
    std::mt19937 rng;
    rng.seed(std::random_device()());
    std::uniform_int_distribution<int> dist(0, 255);
    std::generate(begin(v), end(v), [&]() { return dist(rng); });

    auto start = high_resolution_clock::now();
    std::sort(std::execution::par, begin(v), end(v));
    // std::reduce(std::execution::par, begin(v), end(v), 0.0, std::plus<>{});
    auto finish = high_resolution_clock::now();
    auto duration = duration_cast<milliseconds>(finish - start);

    std::cout << "\nElapsed time = " << duration.count() << " ms\n";
    return 0;
}
```

Parallel STL

Nová specifikace



https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/tools/oneapi/components/onetbb.html

Compare and Swap

Hlavní nástroj

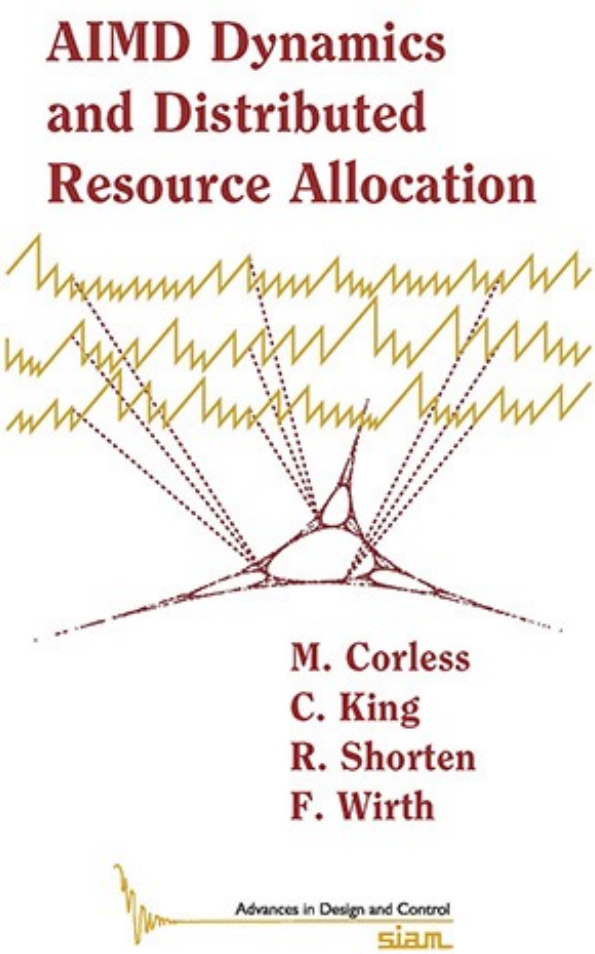
Hlavní nástroj: Atomické „compare and swap “ (CAS) atomicky porovná zda hodnota dereferencovaného ukazatele na atomickou proměnnou odpovídá očekávané hodnotě. Pokud ano, provede změnu na novou hodnotu. Typicky:

1. Deklarujeme atomickou proměnnou.
2. Uložíme hodnotu atomické proměnné (např. dereferencováním ukazatele na atomickou proměnnou).
3. Na základě uložené hodnoty napočítáme novou hodnotu, kterou bychom chtěli uložit do atomické proměnné.
4. Použijeme CAS: Pokud dereferencováním ukazatele stále dostaneme uloženou hodnotu, přepíšeme uloženou hodnotu napočítanou hodnotou.
5. Pokud dereferencování ukazatele nevrací uloženou hodnotu, počkej (malé náhodné, ale rostoucí) množství času. Jdi na (2).

Compare and Swap

Hlavní nástroj

- Čekání v rámci nějakého „contention resolution scheme “ je dobře prostudované.
- Standardem (např. v TCP) je „Additive increase/multiplicative decrease “, který na rozdíl od mnoha alternativ má záruky pěkného chování (ergodicity).
- Viz např. kniha prof. Shortena.



Compare and Swap

Hlavní nástroj

Hlavní nástroj: Atomické „compare and swap “ (CAS). V C++ v hlavičce atomic šablonové funkce:

- bool compare_exchange_strong(atomic<T>* uka, T* chce, T val, *std::memory_order ano, std::memory_order ne*) noexcept;
- bool compare_exchange_weak(atomic<T>* uka, T* chce, T val, *std::memory_order ano, std::memory_order ne*) noexcept;

kde “uka” musí být ukazatel na atomický objekt,

kde nepovinné std::memory_order pro obě návratové hodnoty nabývá hodnot od std::memory_order_relaxed (bez záruk na vedlejší účinky) po std::memory_order_seq_cst (sekvenčně konsistentní)

kde funkce “weak” mohou selhat ve smyslu, že i pokud “uka” ukazuje na “chce”, můžeme občas dostat návratovou hodnotu false.

Compare and Swap

- Atomická operace **compare and swap** (CAS)
  - Atomicky porovná jestli hodnota proměnné odpovídá očekávané hodnotě a pokud ano, provede změnu na novou hodnotu

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
    for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
        int tmp_index = atomic_max_index.load();
        while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
                !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
            tmp_index = atomic_max_index.load();
        }
    }
}
```

Compare and Swap

- Atomická operace **compare and swap** (CAS)
  - Atomicky porovná jestli hodnota proměnné odpovídá očekávané hodnotě a pokud ano, provede změnu na novou hodnotu

- V C++, compare_exchange_strong

podmínka pro maximum

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
    for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
        int tmp_index = atomic_max_index.load();
        while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
                !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
            tmp_index = atomic_max_index.load();
        }
    }
}
```

hodnota indexu

Compare and Swap

Příklad 1

- Atomická operace **compare and swap** (CAS)
  - Atomicky porovná jestli hodnota proměnné odpovídá očekávané hodnotě a pokud ano, provede změnu na novou hodnotu

- V C++, compare_exchange_strong

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
   for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
      int tmp_index = atomic_max_index.load();
      while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
             !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
         tmp_index = atomic_max_index.load();
      }
   }
}
```

compare and swap – pokud je v proměnné **atomic_max_index** hodnota **tmp_index** (kterou jsme použili), tak provedeme update

Compare and Swap

Příklad 1

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
   for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
      int tmp_index = atomic_max_index.load();
      while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
             !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
         tmp_index = atomic_max_index.load();
      }
   }
}
```

výsledek je **true** pokud se operace povede, **false** v opačném případě

Compare and Swap

Příklad 1

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
   for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
      int tmp_index = atomic_max_index.load();
      while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
            !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
         tmp_index = atomic_max_index.load();
      }
   }
}
```

Pokud je výsledek **false**, jiné vlákno mezičasem změnilo **atomic_max_index**. Musíme aktualizovat hodnotu **tmp_index** a provést kontrolu znovu.

výsledek je **true** pokud se operace povede, **false** v opačném případě

Compare and Swap

Příklad 1

```
std::atomic_int atomic_max_index;

void find_max_cas(std::vector<int> & vector) {
#pragma omp parallel for num_threads(thread_count) shared(vector, atomic_max_index)
   for (int i=0; i<SIZE; ++i) {
      int tmp_index = atomic_max_index.load();
      while ((vector[i] > vector[tmp_index] || (vector[i] == vector[tmp_index] && i > tmp_index)) &&
            !atomic_max_index.compare_exchange_strong(tmp_index,i)) {
         tmp_index = atomic_max_index.load();
      }
   }
}
```

Pokud je výsledek **false**, jiné vlákno mezičasem změnilo **atomic_max_index**. Musíme aktualizovat hodnotu **tmp_index** a provést kontrolu znovu.

výsledek je **true** pokud se operace povede, **false** v opačném případě

Kontrola je ve **while** cyklu!
(nekonzistence se může vyskytnout opakovaně)

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 2: zásobník

Souběžný přístup k datovým strukturám

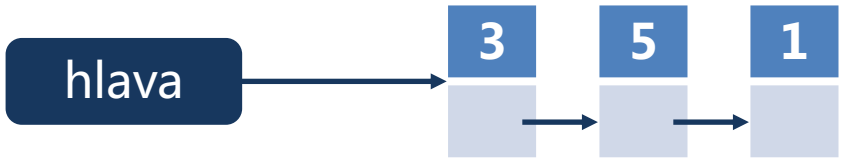
Příklad 2: zásobník

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 2: zásobník

Zásobník

```
struct Node {
    int value = 0;
    Node* successor = nullptr;

    Node(int _value, Node* _successor) : value(_value), successor(_successor) {}
};
```



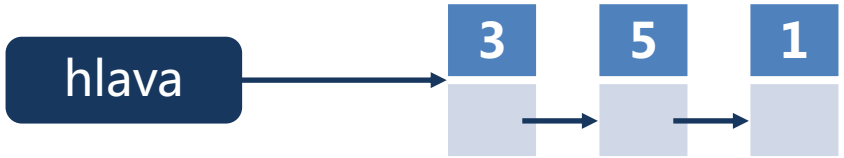
Kritické místo je při vkládání a odebírání do/z vrcholu zásobníku

Pro jednoduchost pracujme jen se zásobníkem celých čísel.

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 2

Zásobník



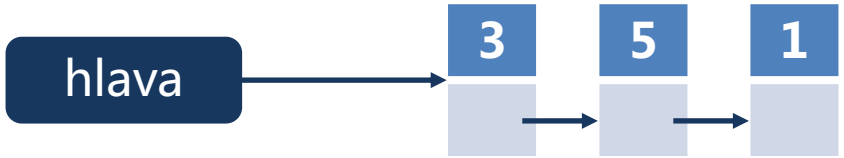
Řešení pomocí zámků

```
void add_to_stack_locks(int new_value) {
    m.lock();
    head = new Node(new_value, head);
    m.unlock();
}

int pop_from_stack_locks() {
    m.lock();
    if (head == nullptr) {
        m.unlock();
        throw std::out_of_range("The stack is empty.");
        return -1;
    } else {
        Node* tmp = head;
        int val = head->value;
        head = head->successor;
        delete tmp;
        m.unlock();
        return val;
    }
}
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 2

Řešení pomocí atomických proměnných



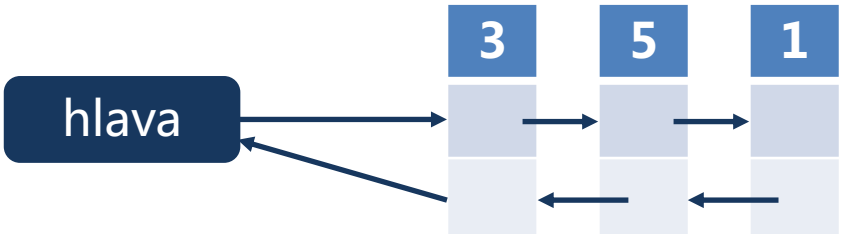

```
std::atomic<Node*> head2;

void add_to_stack_cas(int new_value) {
    Node* p = new Node(new_value, head2.load());
    while (!head2.compare_exchange_strong(p->successor, p)) {
        p->successor = head2.load();
    }
}

int pop_from_stack_cas() {
    if (head2.load() == nullptr) {
        throw std::out_of_range("The stack is empty.");
        return -1;
    } else {
        Node* h = head2.load();
        while (!head2.compare_exchange_strong(h, h->successor)) {
            h = head2.load();
        }
        int val = h->value;
        delete h;
        return val;
    }
}
```

Jak to bude fungovat?

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Obousměrný spojový seznam

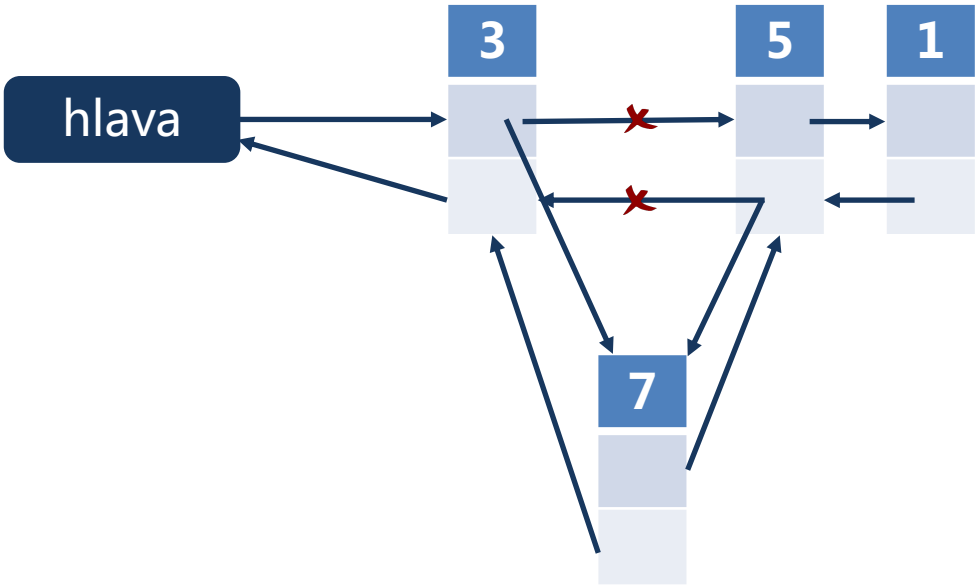


Operace přidání

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

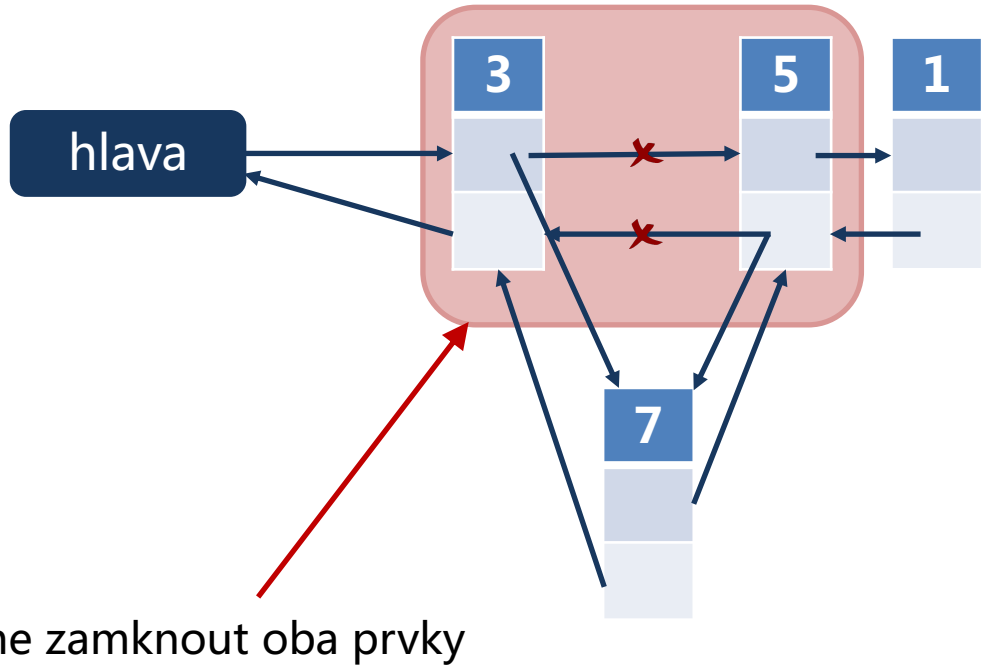
- Operace přidání pro obousměrný spojový seznam



Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

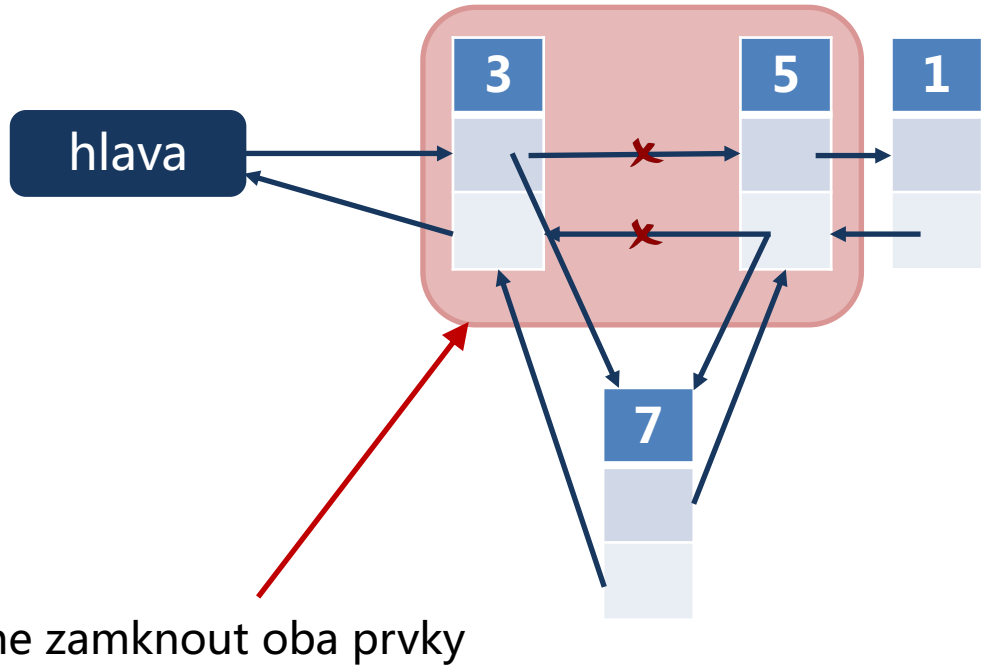
- Operace přidání pro obousměrný spojový seznam



Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Operace přidání pro obousměrný spojový seznam



Musíme zamykat oba současně nebo stačí vždy nejdřív prvek blíž k hlavě a pak jeho následovníka?

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Řešení pomocí zámků

```
struct Node {
    std::mutex m;
    int value = 0;
    Node* successor = nullptr;
    Node* predecessor = nullptr;
    Node(int _value, Node* _predecessor, Node* _successor) :
                value(_value), predecessor(_predecessor), successor(_successor) {}
};
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

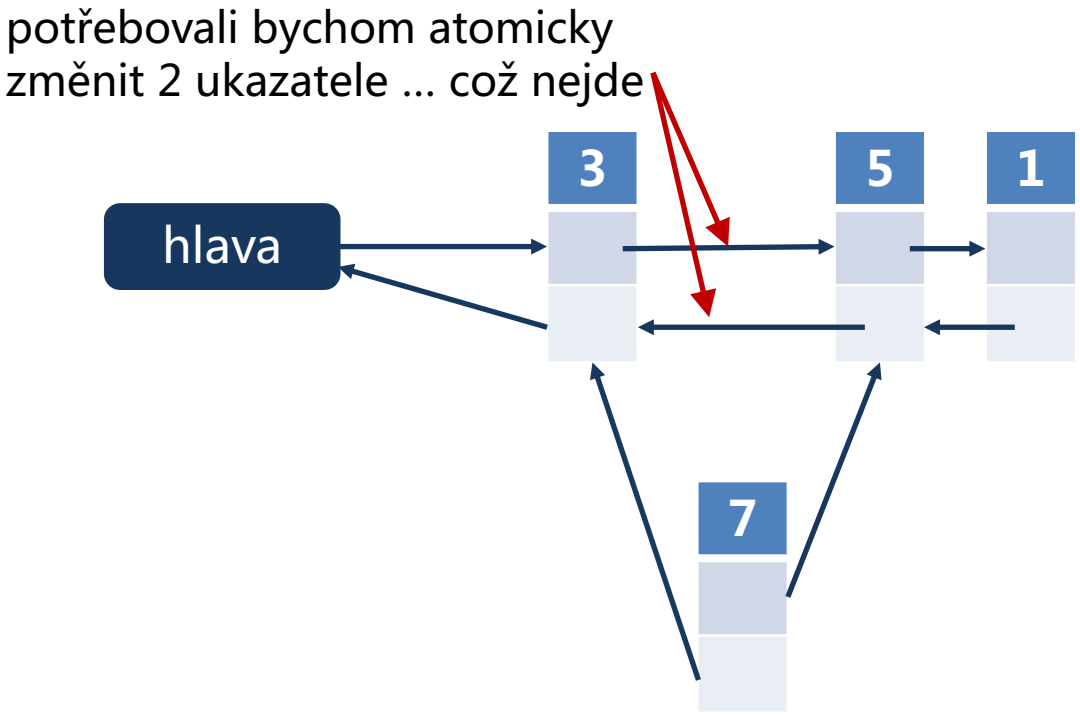
- Řešení pomocí zámků

```
Node* add_to_list_after(Node* _previous_node, int _new_value) {
   assert (_previous_node != nullptr);
   _previous_node->m.lock();

   Node* new_successor = _previous_node->successor;
   bool is_there_successor = new_successor != nullptr;

   if (is_there_successor) {
      new_successor->m.lock();
   }

   Node* new_node = new Node(_new_value, _previous_node, new_successor);

   if (is_there_successor)
      _previous_node->successor->predecessor = new_node;
   _previous_node->successor = new_node;

   if (is_there_successor)
      new_successor->m.unlock();
   _previous_node->m.unlock();
   return new_node;
}
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

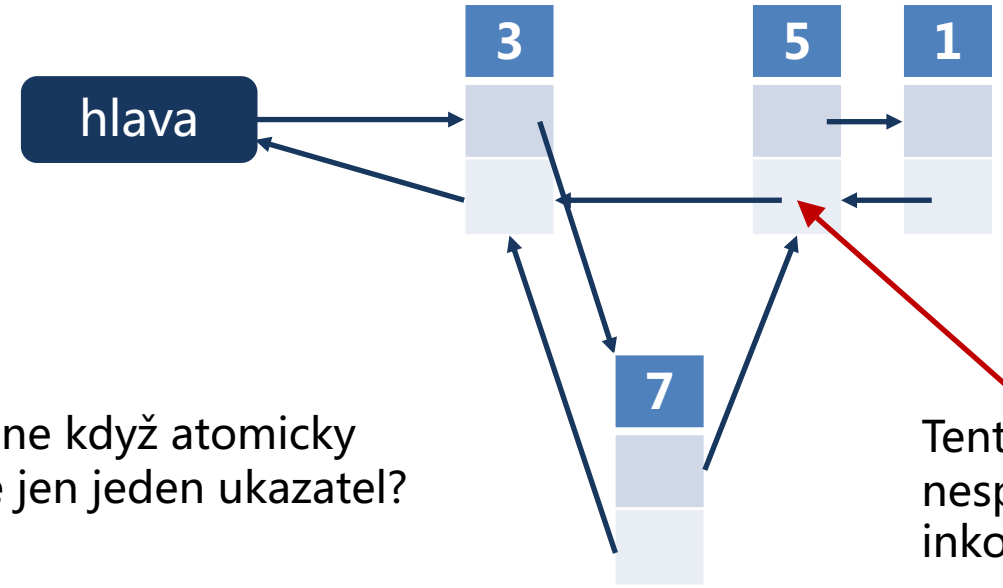
- Jak řešit pomocí atomických operací?



Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Jak řešit pomocí atomických operací?



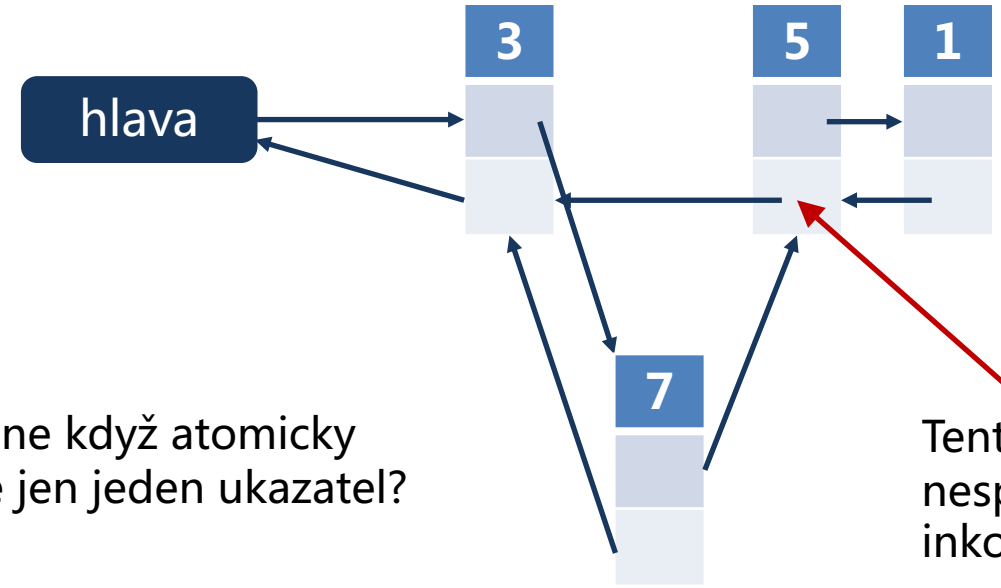
Co se stane když atomicky změníme jen jeden ukazatel?

Tento ukazatel je nesprávný. Kdy nám tato inkonzistence může vadit?

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Jak řešit pomocí atomických operací?



Co se stane když atomicky změníme jen jeden ukazatel?

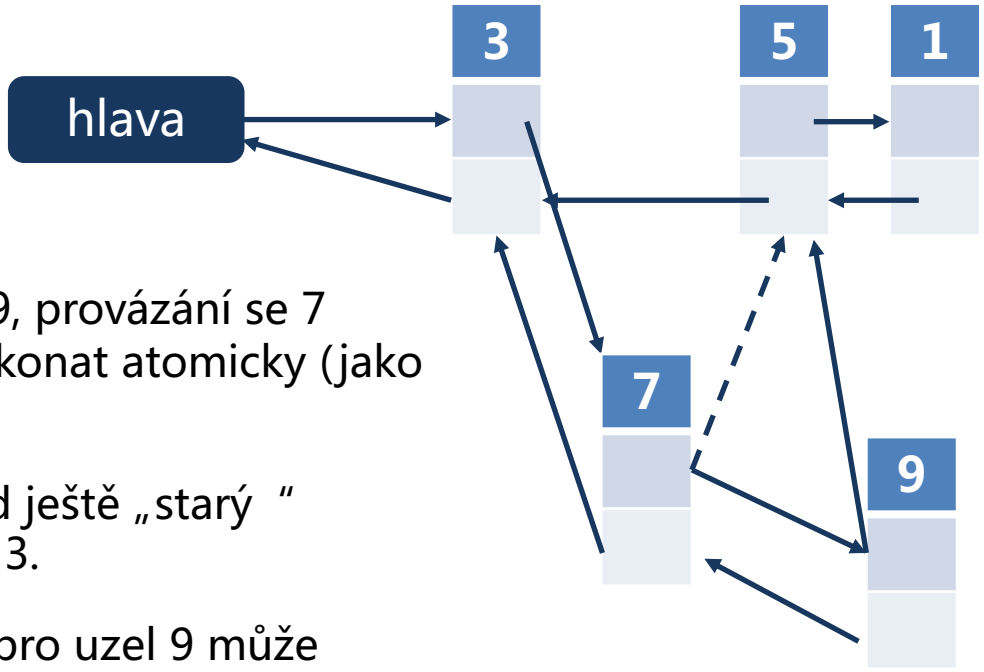
Tento ukazatel je nesprávný. Kdy nám tato inkonzistence může vadit?

Když chceme přidávat mezi 7 a 5.

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Jak řešit pomocí atomických operací?



Přidáváme 9, provázání se 7 můžeme vykonat atomicky (jako předtím).

U 5 je pořád ještě „starý “ ukazatel na 3.

Dokončení pro uzel 9 může počkat, až bude v 5 správný ukazatel (na 7).

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Řešení pomocí CAS

```
struct AtomicNode {
    int value = 0;
    std::atomic<AtomicNode*> successor;
    std::atomic<AtomicNode*> predecessor;

    AtomicNode(int value) {
        successor.store(nullptr);
        predecessor.store(nullptr);
    }

    AtomicNode(int _value, AtomicNode* _predecessor, AtomicNode* _successor) : value(_value) {
        successor.store(_successor);
        predecessor.store(_predecessor);
    }
};
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Řešení pomocí CAS

```
AtomicNode* atomic_add_to_list_after(AtomicNode* _previous_node, int _new_value) {
   assert (_previous_node != nullptr);

   AtomicNode* old_successor = _previous_node->successor;
   AtomicNode* new_node = new AtomicNode(_new_value, _previous_node, old_successor);

   while (!_previous_node->successor.compare_exchange_strong(old_successor, new_node)) {
      old_successor = _previous_node->successor;
      new_node->successor.store(old_successor);
   }

   if (old_successor != nullptr) {
      while (!old_successor->predecessor.compare_exchange_strong(_previous_node,new_node))
         ;
   }

   return new_node;
}
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Řešení pomocí CAS

```
AtomicNode* atomic_add_to_list_after(AtomicNode* _previous_node, int _new_value) {
   assert (_previous_node != nullptr);

   AtomicNode* old_successor = _previous_node->successor;
   AtomicNode* new_node = new AtomicNode(_new_value, _previous_node, old_successor);

   while (!_previous_node->successor.compare_exchange_strong(old_successor, new_node)) {
      old_successor = _previous_node->successor;
      new_node->successor.store(old_successor);
   }

   if (old_successor != nullptr) {
      while (!old_successor->predecessor.compare_exchange_strong(_previous_node,new_node))
         ;
   }

   return new_node;
}
```

Změna ukazatele v prvním prvku (před vkládaným uzlem).

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Řešení pomocí CAS

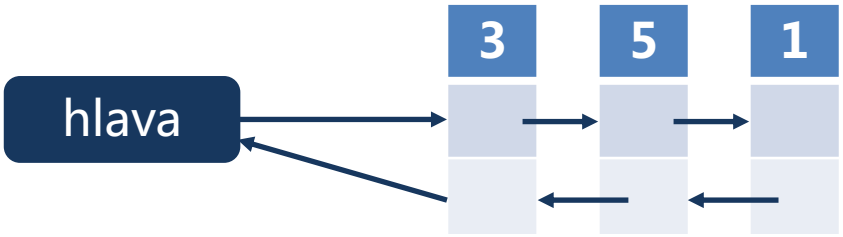
```
AtomicNode* atomic_add_to_list_after(AtomicNode* _previous_node, int _new_value) {
   assert (_previous_node != nullptr);

   AtomicNode* old_successor = _previous_node->successor;
   AtomicNode* new_node = new AtomicNode(_new_value, _previous_node, old_successor);

   while (!_previous_node->successor.compare_exchange_strong(old_successor, new_node)) {
      old_successor = _previous_node->successor;
      new_node->successor.store(old_successor);
   }

   if (old_successor != nullptr) {
      while (!old_successor->predecessor.compare_exchange_strong(_previous_node,new_node))
         ;
   }

   return new_node;
}
```

Změna ukazatele v druhého prvku (za vkládaným uzlem).

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Obousměrný spojový seznam



Operace mazání – komplexnější

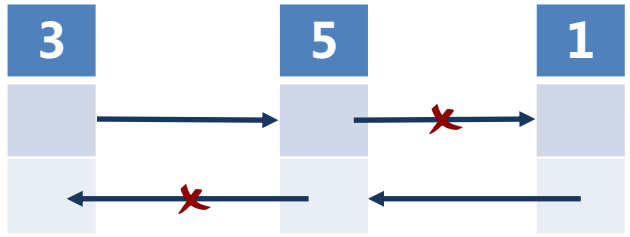
Musíme označit které uzly (ukazatele) budou smazány

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Mazání v obousměrném spojovém seznamu

1.



2.

3.

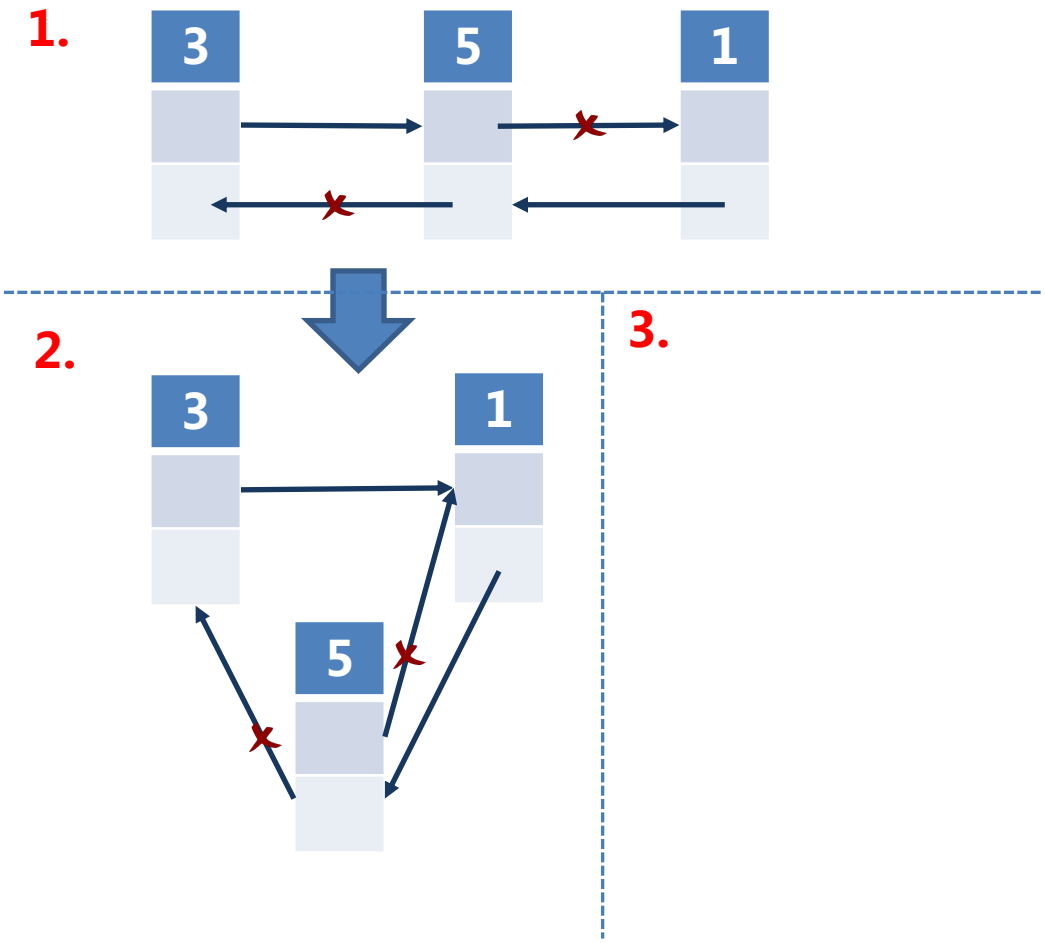
Provedeme následující atomické operace:

1. Označíme ukazatele mazaného uzlu jako „ke smazání “

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Mazání v obousměrném spojovém seznamu



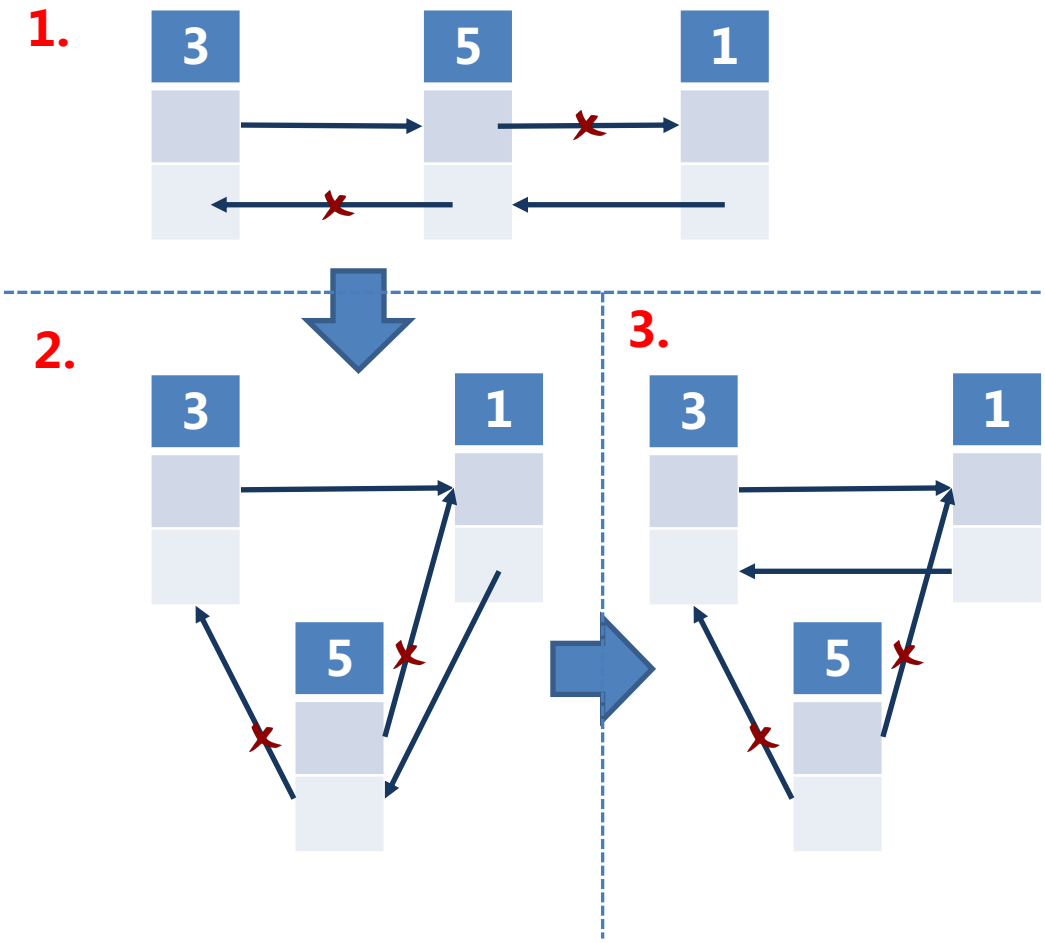
Provedeme následující atomické operace:

1. Označíme ukazatele mazaného uzlu jako „ke smazání “
2. Převedeme ukazatel předchůdce

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 3

- Mazání v obousměrném spojovém seznamu



Provedeme následující atomické operace:

1. Označíme ukazatele mazaného uzlu jako „ke smazání “
2. Převedeme ukazatel předchůdce
3. Převedeme ukazatel následovníka

Souběžný přístup k datovým strukturám

Příklad 4

V posledku všechny případy výše jde zobecnit s pomocí šablon

```
/* podle https://en.cppreference.com/w/cpp/atomic/atomic/compare_exchange */
#include <atomic>
template<typename T>
struct Node {
    T data;
    Node* next;
    Node(const T& data) : data(data), next(nullptr) {}
};

template<typename T> class stack {
    std::atomic<Node<T>*> head;
public:
    void push(const T& data) {
        Node<T>* new_node = new Node<T>(data);
        new_node->next = head.load(std::memory_order_relaxed);
       while(!head.compare_exchange_weak(new_node->next, new_node,
                                         std::memory_order_release,
                                         std::memory_order_relaxed));
    }
};
int main() {
    stack<int> s; s.push(1); s.push(2); s.push(3);
}
```

Souběžný přístup k datovým strukturám

Závěr

V posledku všechny případy výše jde zobecnit s pomocí šablon. Tím se bychom se začali blížit STL.

V některých překladačích můžeme využít paralelní STL.

Našim cílem ale bylo poznat atomické „compare and swap “ (CAS) a porozumět jeho použití v návrhu datových struktur pro souběžný přístup.

Typicky atomicky porovnáváme, zda hodnota dereferencovaného ukazatele na atomickou proměnnou odpovídá očekávané hodnotě.