





C++17 i STL

Programowanie współbieżne




Synchronizacja wątków

- ▶ Korzystanie z wielu wątków niemal zawsze wiąże się z równoległym dostępem do danych – rzadko się zdarza, aby wiele wątków działało całkowicie niezależnie od siebie.
- ▶ Wątki mogą dostarczać danych albo modyfikować dane, które są przetwarzane przez inne wątki – obliczenia te nie powinny jednocześnie pracować na tych samych danych.
- ▶ Techniki synchronizacji pracy wątków:
 - ▶ muteksy i blokady, włącznie z funkcją `call_once()`;
 - ▶ zmienne warunkowe;
 - ▶ zmienne atomowe.




Synchronizacja wątków

- ▶ **Jedynym bezpiecznym sposobem współbieżnego dostępu do tych samych danych przez wiele wątków bez stosowania synchronizacji jest sytuacja, kiedy wszystkie wątki jedynie czytają dane.**
- ▶ Jednak jeśli więcej wątków współbieżnie korzysta z tych samych danych i co najmniej jeden z wątków wprowadza modyfikacje, możemy łatwo wpaść w kłopoty, jeśli nie zadamy o synchronizację tego dostępu.
- ▶ **Wyścig o dane** zachodzi wtedy, gdy dwie ścieżki obliczeniowe w różnych wątkach kolidują ze sobą (współdzielą dane), z których co najmniej jedna nie jest atomowa i żadna nie jest wykonywana wcześniej niż druga – wyścig o dane zawsze kończy się niezdefiniowanym zachowaniem/stanem.



Problem jednoczesnego dostępu do danych

- ▶ **Niezsynchronizowany dostęp do danych:** gdy dwa wątki działające równoległe czytają i zapisują te same dane, pozostaje otwartą kwestią to, która instrukcja będzie wykonana w pierwszej kolejności.
- ▶ **Dane w trakcie zapisywania:** gdy jeden wątek czyta dane, które inny wątek modyfikuje, wątek czytający może odczytywać dane nawet w trakcie zapisywania przez drugi wątek – zatem odczytywana wartość nie jest ani nowa, ani stara.
- ▶ **Zmieniona kolejność instrukcji:** można zmienić kolejność instrukcji i operacji w taki sposób, że zachowanie każdego pojedynczego wątku będzie poprawne, ale po połączeniu wszystkich wątków zachowanie będzie różne od oczekiwanego.



Niezsynchronizowany dostęp do danych (1)


- ▶ Standardowe funkcje biblioteczne C++ zazwyczaj nie wspierają współbieżnego zapisywania lub odczytywania w przypadku realizowania zapisu do tej samej struktury danych.
- ▶ Współbieżny dostęp do różnych elementów tego samego kontenera jest możliwy (z wyjątkiem klasy `vector<bool>`) – tak więc różne wątki mogą jednocześnie czytać lub zapisywać różne elementy tego samego kontenera.
- ▶ Jednoczesny dostęp do strumienia łańcuchów znaków, strumienia pliku lub bufora strumienia skutkuje niezdefiniowanym zachowaniem.

Dane w trakcie zapisywania (2)

- ▶ Przykład:
Założmy, że mamy następującą zmienną:
`long long x = 0;`
oraz jeden wątek zapisujący dane:
`x = -1;`
i drugi, który te dane odczytuje:
`std::cout << x;`
Jaki jest wynik działania programu?
- ▶ Wynikiem może być dowolna inna wartość, jeśli drugi wątek czyta zmienną `x` w czasie przypisywania wartości `-1` przez pierwszy wątek.
- ▶ Standard C++ nie gwarantuje, że odczyt bądź zapis będzie atomowy nawet w przypadku podstawowych typów danych.


Zmieniona kolejność instrukcji (3)

- ▶ Przykład:
Założmy, że mamy następujące zmienne:
`long data;`
`bool ready = false;`
oraz w wątku dostarczającym dane znajdują się:
`data = 42;`
`readyFlag = true;`
natomiast w wątku konsumującym dane:
`while (! readyFlag) { // do kiedy dane będą gotowe`
`}`
`foo(data);`
- ▶ Uwaga, kompilator lub sprzęt mógł zmienić kolejność instrukcji, tak że w rezultacie sekwencja niekolidujących z pozoru instrukcji mogła zostać wykonana w odwrotnej kolejności.
- ▶ Zmiana kolejności instrukcji jest dozwolona ze względu na reguły języka C++, które wymagają jedynie, aby obserwowane zachowanie wewnątrz wątku wygenerowanego kodu było poprawne.



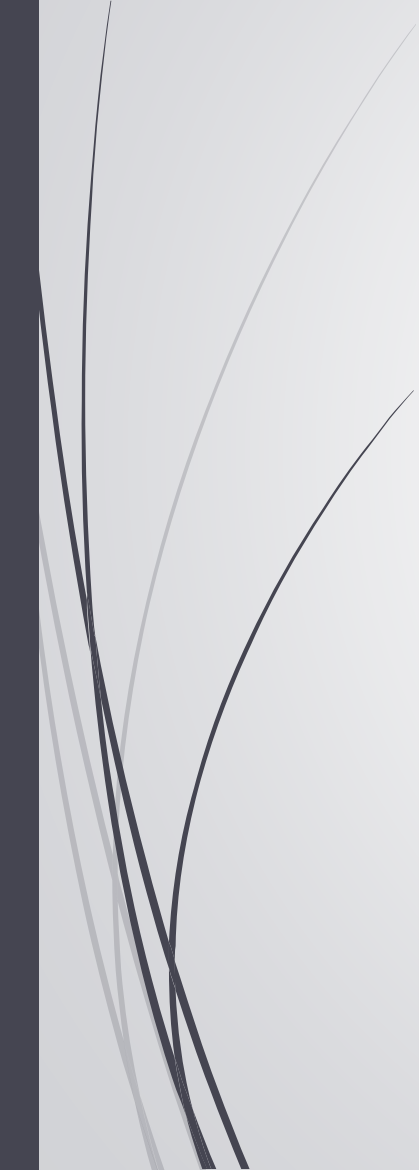
Mechanizmy pozwalające na rozwiązanie problemów

- ▶ Aby rozwiązać trzy główne problemy współbieżnego dostępu do danych, potrzebujemy następujących mechanizmów:
 - ▶ Niepodzielność: oznacza ona, że odczyt lub zapis do zmiennej lub wykonanie sekwencji instrukcji dzieje się w sposób wyłączny i bez żadnych przerw, dzięki czemu jeden wątek nie może czytać stanów pośrednich spowodowanych przez inny wątek.
 - ▶ Kolejność: potrzebujemy mechanizmów, które gwarantują kolejność wykonania określonych instrukcji bądź grup określonych instrukcji.



Mechanizmy pozwalające na rozwiązanie problemów

- ▶ Biblioteka standardowa C++ dostarcza różnych sposobów obsługi tych mechanizmów, dzięki czemu programy mogą korzystać z dodatkowych gwarancji dotyczących współbieżnego dostępu do danych:
 - ▶ Można skorzystać z **futur** i **promes**, które gwarantują zarówno niepodzielność, jak i kolejność.
 - ▶ Można skorzystać z **muteksów** i **blokad** w celu obsługi sekcji krytycznych lub stref chronionych, w których możemy zagwarantować wyłączny dostęp.
 - ▶ Można skorzystać ze **zmiennych warunkowych**, aby umożliwić jednemu wątkowi oczekiwanie na to, aż pewien predykat kontrolowany przez inny wątek stanie się prawdziwy.
 - ▶ Można skorzystać z **atomowych typów danych**, aby w ten sposób zapewnić niepodzielność każdego dostępu do zmiennej bądź obiektu.





Współbieżność



- ▶ Nowoczesne architektury systemów zazwyczaj umożliwiają uruchomienie wielu procesów i wielu wątków w obrębie każdego procesu jednocześnie.
- ▶ Wykorzystanie wielu wątków może przyczynić się do poprawy czasu realizacji zadania, zwłaszcza wtedy, gdy komputer dysponuje wieloma procesorami/rdzeniami.
- ▶ Obliczenia równoległe generują jednak problemy przy dostępie do tych samych zasobów w pamięci (operacje tworzenia, czytania, pisania i usuwania mogą odbywać się w nieoczekiwanej kolejności, co może prowadzić do nieoczekiwanych rezultatów).
- ▶ W C++11 wprowadzono klasę `thread` reprezentującą wątek w programie.




Współbieżność

- ▶ W C++11 wprowadzono obsługę programowania współbieżnego – biblioteka STL zapewnia wsparcie dla:
 - ▶ uruchamiania wielu wątków,
 - ▶ mechanizmy do synchronizacji wątków,
 - ▶ przekazywanie argumentów, zwracanie wartości i zgłaszanie wyjątków poza granicami wątków.
- ▶ Biblioteka STL zapewnia wsparcie dla współbieżności na wielu poziomach:
 - ▶ z jednej strony interfejs wysokiego poziomu umożliwia rozpoczęcie wątku, przekazanie do niego argumentów i obsługę wyników i wyjątków;
 - ▶ z drugiej strony, istnieją również własności niskiego poziomu, takie jak muteksy lub atomowe typy danych obsługujące swobodny dostęp do pamięci.



Interfejs wysokiego poziomu

- ▶ W pliku nagłówkowym `<future>` zdefiniowane są podstawowe narzędzia do wysokopoziomowej pracy z wątkami.
- ▶ Funkcja `async()` umożliwia uruchomienie pewnej funkcjonalności w osobnym wątku.
- ▶ Klasa `future<>` pozwala czekać na zakończenie wątku i zapewnia dostęp do jego wyników – zwróconej wartości lub wyjątku.



Interfejs wysokiego poziomu – futury


- ▶ Szablon klasy `future<>` udostępnia mechanizm dostępu do wyniku operacji asynchronicznych:
 - ▶ operacja asynchroniczna utworzona za pomocą funkcji `async()` lub obiektu `promise()` może dostarczyć obiekt futury do kreatora tej operacji asynchronicznej;
 - ▶ kreator operacji asynchronicznej może następnie użyć różnych metod do zapytania o wynik lub oczekiwania na wynik z futury (te metody mogą być blokowane, jeśli operacja asynchroniczna nie dostarczyła jeszcze żadnej wartości);
 - ▶ gdy operacja asynchroniczna jest gotowa na wysłanie wyniku do kreatora, może to zrobić poprzez modyfikację stanu współdzielonego, używając na przykład `promise<>::set_value()`, który jest powiązany z futurą kreatora.
- ▶ Obiekt futury odwołuje się do stanu współdzielonego, który nie jest współdzielony z żadnymi innymi asynchronicznymi obiektami zwracanymi (w przeciwieństwie do `shared_future<>`).

Interfejs wysokiego poziomu – wykonanie asynchroniczne

- ▶ Szablon funkcji `async()` uruchamia zadaną funkcję asynchronicznie (potencjalnie w oddzielnym wątku, który może być częścią puli wątków) i zwraca future, która ostatecznie przechowa wynik wywołania tej funkcji.
- ▶ Funkcja `async()` jest przeciążona:
 - ▶

```
template< class Function, class... Args >  
future<std::invoke_result_t<decay_t<Function>, decay_t<Args>...>>  
    async( Function&& f, Args&&... args );
```
 - ▶

```
template< class Function, class... Args >  
std::future<invoke_result_t<decay_t<Function>, decay_t<Args>...>>  
    async(launch policy, Function&& f, Args&&... args );
```



Interfejs wysokiego poziomu – wykonanie asynchroniczne

- ▶ Strategię uruchamiania obliczeń w wątku możemy komponować za pomocą dwóch strategii:
 - ▶ `launch :: async` – włącza obliczenia asynchroniczne,
 - ▶ `launch :: deferred` – włącza obliczenia leniwe.
- ▶ Jeśli przy wywołaniu funkcji `async()` strategia nie zostanie określona, to funkcja zachowuje się tak, jakby obydwie flagi zostały włączone.
- ▶ Jeśli flaga `launch :: async` jest ustawiona, to funkcja `async()` wykonuje funkcję zdefiniowaną w obiekcie `Function` w nowym wątku.
- ▶ Jeśli flaga `launch :: deferred` jest ustawiona, to funkcja `async()` wykonuje funkcję zdefiniowaną w obiekcie `Function` w bieżącym wątku w odroczonej terminie.
- ▶ Jeśli obie flagi `launch :: async` i `launch :: deferred` są ustawione, to od implementacji zależy, czy zadanie wykona się asynchronicznie czy z opóźnieniem.

Interfejs wysokiego poziomu – przykład


- ▶ Przykład 1 [C++ biblioteka standardowa. Josuttis]:

```
int doSomething(char c) {
    default_random_engine dre(c);
    uniform_int_distribution<int> id(10,1000);
    for (int i=0; i<10; ++i) {
        this_thread::sleep_for(chrono::milliseconds(id(dre)));
        cout.put(c).flush();
    }
    return c;
}
int func1() {
    return doSomething('-');
}
int func2() {
    return doSomething('+');
}
```

Interfejs wysokiego poziomu – przykład

- ▶ Przykład 1 [C++ biblioteka standardowa. Josuttis]:

```
int main() {  
    cout << "uruchomienie funkcji func1() w tle,"  
        << " a funkcji func2() na pierwszym planie:" << endl;  
    future<int> result1(async(func1));  
    int result2 = func2();  
    int result = result1.get() + result2;  
    cout << "\nwynik sumy func1()+func2(): " << result << endl;  
}
```



Interfejs wysokiego poziomu – przykład

- ▶ Przykład 1 [C++ biblioteka standardowa. Josuttis]:
`future<int> result1(async(func1));`
Jeśli funkcja `async()` nie może uruchomić przekazanej funkcjonalności natychmiast, odracza wywołanie do chwili jawnego zażądania wyniku przekazanej funkcjonalności za pomocą funkcji `get()` lub `wait()`.
- ▶ Przykład 1 [C++ biblioteka standardowa. Josuttis]:
`future<int> result1(launch::async, async(func1));`
Jeśli należy wykonać przekazaną do funkcji `async()` funkcjonalność natychmiast, to trzeba określić strategię wykonania na `launch::async`.

Interfejs wysokiego poziomu – przykład

- ▶ Przykład 2 [C++ biblioteka standardowa. Josuttis]:

```
auto f1 = async(launch::deferred, task1);
```

```
auto f2 = async(launch::deferred, task2);
```

```
...
```


```
auto val = thisOrThatIsTheCase() ? f1.get() : f2.get();
```

- ▶ W tym przypadku mamy gwarancję, że funkcje `func1()` oraz `func2()` nie zostaną wywołane bez wywołania `get()` lub `wait()` – ta strategia umożliwia leniwe wartościowanie.

Futury – obsługa wyjątków


- ▶ Zgłoszenie wyjątku spowoduje zakończenie pracy wątku, o ile wyjątek ten nie zostanie złapany w samej funkcji realizującej zadanie.
- ▶ Wywołanie funkcji `get()` dla futur obsługuje również wyjątki. Jeśli nastąpi wywołanie `get()`, a operacja w tle zostanie przerwana przez wyjątek, który nie został obsłużony wewnątrz wątku, to ten wyjątek będzie propagowany dalej.
- ▶ W celu obsługi wyjątków operacji wykonywanych w tle należy postępować z funkcją `get()` w taki sposób, w jaki postąpilibyśmy, gdyby operacja była uruchomiona synchronicznie.
- ▶ Przykład:

```
auto f = async(task);  
...  
try { f1.get(); }  
catch (const exception &e) { ... }
```



Futury – oczekiwanie i odpytywanie

- ▶ Funkcję `get()` w odniesieniu do obiektu `future<>` można wywołać tylko raz.
- ▶ Po wywołaniu funkcji `get()` futura jest nieważna.
- ▶ Ważność futury można sprawdzić jedynie poprzez wywołanie funkcji `valid()`.



Futury – oczekiwanie i odpytywanie

- ▶ Wywołanie funkcji `wait()` wymusza uruchomienie wątku reprezentowanego przez future i oczekiwanie na zakończenie operacji w tle.
- ▶ Funkcje `wait_for()` i `wait_until()` nie wymuszają uruchomienia wątku, jeśli nie został on uruchomiony wcześniej.
- ▶ Zarówno funkcja `wait_for()` jak i `wait_until()` zwracają status futury:
 - ▶ `future_status::deferred` – jeśli funkcja `async()` odroczyła operację i żadne z wywołań `wait()` lub `get()` jeszcze nie wymusiło jej startu;
 - ▶ `future_status::timeout` – jeśli operacja została uruchomiona asynchronicznie, ale jeszcze się nie zakończyła;
 - ▶ `future_status::ready` – jeśli operacja zakończyła się.

Futury – oczekiwanie i odpytywanie

- ▶ Funkcja `wait_for()`, do której przekazujemy czas oczekiwania, pozwala czekać na asynchroniczne uruchomienie operacji przez ograniczony czas.


Przykład:

```
future<...> f(async(func));  
...  
f.wait_for(chrono::seconds(10));
```

- ▶ Funkcja `wait_until()` pozwala czekać do określonego punktu w czasie.

Przykład:

```
future<...> f(async(func));  
...  
f.wait_until(system_clock::now() + chrono::minutes(1));
```





Futury – przekazywanie argumentów

- ▶ Do przekazania argumentów do zadania można wykorzystać lambdy.
- ▶ Przykład 1:

```
auto f = async([]{ doSomething('.'); });
```
- ▶ Przykład 2:

```
char c = '@';  
auto f = async([=]{doSomething(c); });
```



Futury – przekazywanie argumentów

- ▶ Funkcja `async()` dostarcza standardowego interfejsu obiektów wywoływalnych – jeśli prześlemy wskaźnik do funkcji zadaniowej jako pierwszy argument, argumenty samego zadania możemy przekazać jako kolejne argumenty funkcji `async()`.
- ▶ Przykład 3 (przekazanie argumentu przez wartość):

```
char c = '#';  
auto f = async(doSomething, c);
```
- ▶ Przykład 4 (przekazanie argumentu przez referencję):

```
char c = '#';  
auto f = async(doSomething, ref(c));
```

Futury współdzielone

- ▶ Obiekt klasy `future<>` zapewnia możliwość przetwarzania wyniku futury dla współbieżnych obliczeń – jednak ten wynik możemy przetwarzać tylko raz, ponieważ drugie i kolejne wywołanie funkcji `get()` spowoduje niezdefiniowane zachowanie.
- ▶ Czasem jednak potrzebne jest przetwarzanie wyniku współbieżnych obliczeń w wielu różnych wątkach – do tego celu należy użyć obiektu klasy `shared_future<>`, wtedy możliwe jest kilkukrotne wywołanie funkcji `get()`.
- ▶ Funkcja `get()` w klasie `future<>` ma sygnaturę:
`T future<T>::get();`
a w klasie `shared_future<>` jej sygnatura wygląda następująco:
`const T& shared_future<T>::get();`