Opis zajęć laboratoryjnych z projektowania systemów czasu rzeczywistego

Jarosław Majchrzak, Mateusz Michalski, Michał Kowalski, Tomasz Gawron
Katedra Sterowania i Inżynierii Systemów, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska

1 Przedmowa

Drogi Studencie!
Poniższy tekst stanowi jednocześnie materiał uzupełniający treści podawane na wykładzie oraz ujednolicony przebieg zajęć laboratoryjnych. Kurs laboratoryjny składa się z dwóch części. Pierwsza stanowi wprowadzenie do ogólnych zagadnień programowania współbieżnego na przykładzie języka C# i platformy .NET 5.0, druga część ma natomiast formę projektu wymagającego zastosowania dotychczas zdobytej wiedzy do budowy prostego rozproszonego systemu czasu rzeczywistego przy użyciu łatwo dostępnych otwartych technologii stosowanych powszechnie w robotyce. Współpraca na zajęciach przebiegać będzie zgodnie z poniższymi zasadami:

- Zadania opisane w dalszej części wykonywane są kolejności zgodnej z ich numeracją. Kod stanowiący rozwiązanie każdego zadania powinien być autonomiczny, tj. rozwiązania kolejnych zadań nie mogą psuć i wpływać na rozwiązania zadań poprzednich. Mogą one jednak oczywiście współdzielić swój kod poprzez odpowiednie wykorzystanie funkcji i klas. **Na koniec kursu studenci muszą dostarczyć prowadzącemu archiwum zip zawierające projekt z działającymi rozwiązaniami wszystkich podanych zadań.**
- Studenci nie składają pisemnych raportów. Postępy w pracach raportowane są na bieżąco podczas zajęć i **obowiązkowo pod koniec każdych zajęć**. Na ich podstawie studenci zbierają oceny cząstkowe.
- Studenci pracują w swoim tempie. Zajęcia laboratoryjne bedą postępować z prędkością dostosowaną do większości grupy. **Do ukończenia kursu wymagana jest dodatkowa praca poza godzinami zajęć.**
- Nieznajomość sposobu działania dostarczonych programów zaliczeniowych przez ich autorów jest równoznaczna z niedostarczeniem programu. Udowodnienie splagiatowania programu zaliczeniowego skutkuje oceną niedostateczną.
- Do wykonania zadań potrzebne jest studiowanie dokumentacji wykorzystywanych programów i bibliotek oraz podawanej na życzenie studentów literatury uzupełniającej.
- Studenci mogą używać własnych komputerów jeśli wykorzystają podane w zadaniach metody i środowiska programistyczne.

2 Podstawy programowania współbieżnego

2.1 Środowisko symulacyjne i sposób realizacji zadań

Zadania wykonujemy w jednym rozwiązaniu („solution"). Każdy kolejny podrozdział przewidziany jest na jeden projekt „C# console application". Kolejne podrozdziały stanowią konty-

nuację dotychczas wykonanych prac, dlatego wskazane jest korzystanie z klas zdefiniowanych w projektach przygotowanych na poprzednich zajęciach. Dostęp do nich można uzyskać poprzez podlinkowanie projektów wykonywane prawym kliknięciem na projekt w widoku solution i wybraniem „Add reference...". Ważne jest, aby kod przygotowywać w sposób rzetelny i przemyślany, gdyż wszelkie zaniedbania z poprzednich zajęć mogą utrudniać wykonanie kolejnych zadań. W pierwszej kolejności rozwiniemy prostą strukturę ramową („framework"), która posłuży najpierw do testowania różnych mechanizmów współbieżnego wykonywania kodu i synchronizacji, a w późniejszym etapie do rozwiązywania coraz to bardziej skomplikowanych praktycznych problemów. Podstawową jednostką wykonującą obliczenia będzie *agent*, który odpowiada obiektowi odpowiedniej klasy. Agent wyposażony będzie w zależny od jego rodzaju stan oraz metody pozwalające na jego uruchomienie i zatrzymanie. Uruchomiony agent pracuje w trybie ciągłym i niezależnie od obecności innych agentów. Poniższe podrozdziały nie są przyporządkowane do jednostek zajęć. Może się więc zdarzyć, że będą wykonywane dłużej (maks. 2 jednostki). Zachęca się do dyskusji z prowadzącym nt. pytań pojawiających się w treści zadań.

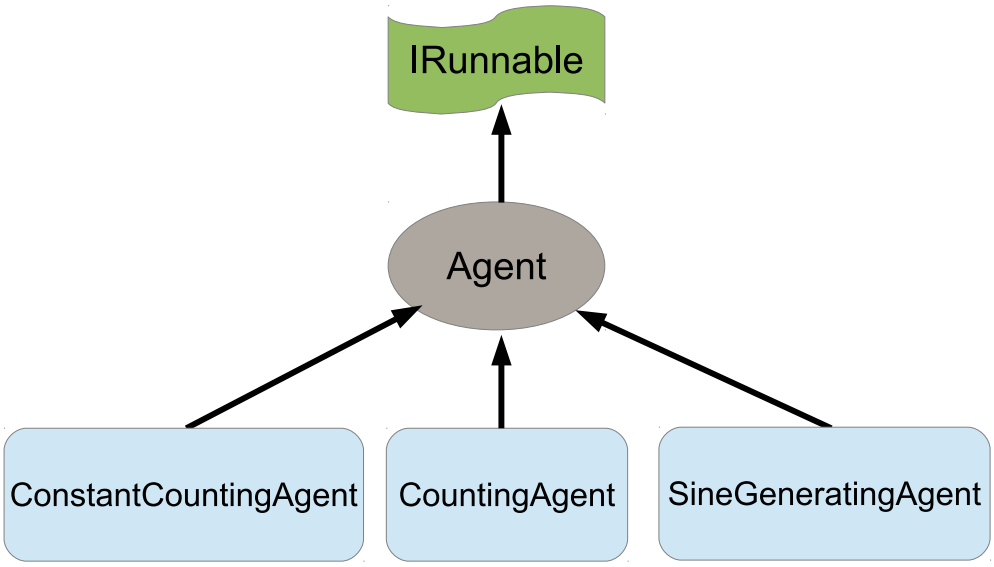
2.2 Sposoby współbieżnego wykonywania kodu: wątki, włókna i procesy

Wymagania wstępne:

- Znajomość podstaw programowania w C# lub C++, tj. pętle, instrukcje warunkowe, definiowanie klas.
- Znajomość podstaw programowania obiektowego, tj. dziedziczenie, polimorfizm, zasady enkapsulacji.

Przewidywany czas realizacji: 2×90 min
Zadania:

1. Założyć rozwiązanie i projekt typu console application z nazwiskami autorów w nazwie.
2. Przygotować interfejs IRunnable zawierający podstawowy protokół komunikacji z agentem (tj. uruchomienie w 2 trybach - wywłaszczanie dobrowolne i wywłaszczanie wymuszone). *Wskazówka:* Zdefiniować metodę Run, której implementacje będą zawierały blokujące pętle. Zdefiniować metodę CoroutineUpdate zwracającą IEnumerator typu float (patrz wiadomości z labotatorium n.t. iteratorów oraz dokumentacja MSDN). Zdefiniować własność HasFinished, która określać będzie czy agent zakończył swoją pracę.
3. Zaimplementować interfejs IRunnable w klasie abstrakcyjnej Agent z abstrakcyjną metodą Update. Metoda Update zawierać będzie logikę poszczególnych agentów i implementowana będzie w klasach pochodnych od Agent. Klasa pochodna od Agent zawsze odpowiedzialna jest za ustawianie wartości własności HasFinished. Założyć pracę w reżimie stałej częstotliwości 10 Hz z możliwością zmiany na inną stałą częstotliwość. Każdy agent powinien również przyjmować podczas konstrukcji wartość identyfikatora (zmienna typu int) używaną do jego rozróżnienia. *Wskazówka:* Zarówno implementacje Run jak i CoroutineUpdate powinny być pętlami stopowanymi zależnie od wartości HasFinished. Należy użyć słów kluczowych „yield return" i „yield break" przy implementacji metody CoroutineUpdate. Trzeba wykorzystać informacje o częstotliwości pracy agentów do odpowiedniego wywłoywania Thread.Sleep, aby zapewnić ich prawidłową pracę.
4. Zaimplementować 3 konkretne agenty. Pierwszy to ConstantCountingAgent zliczający od 0 do 10 i potem kończący pracę wypisaniem swojego identyfikatora do konsoli. Drugi to CountingAgent działający podobnie, lecz liczący od 0 do wartości swojego identyfikatora.



Rysunek 1: Diagram klas dla zadań z podrozdziału 2.2 (klasy abstrakcyjne - szary, interfejsy - zielony).

Ostatnim jest SineGeneratingAgent generujący sygnał sinusoidalny widoczny na jego własności Output przez Id mod 10 sekund. Każdy agent musi wypisywać co najmniej jedną linię do konsoli po zakończeniu pracy.

5. W klasie Program dodać statyczną metodę GenerateRunnables przygotowującą od zera listę agentół do uruchomienia. Zakładamy 10 CountingAgent, 10 SineGeneratingAgent i 10 ConstantCountingAgent, wszystkie z identyfikatorami rosnącymi monotonicznie od 0.

6. Dodać do klasy Program statyczną metodę RunThreads, która korzystając tylko z IRunnable uruchomi każdego agenta w osobnym wątku i poczeka na zakończenie pracy wszystkich agentów. Wywołać GenerateRunnables i RunThreads w metodzie Main. Przetestować działanie powstałego programu.

7. W analogiczny sposób dodać metodę RunFibers. *Wskazówka:* Implementując RunFibers należy pamiętać o utrzymaniu referencji IEnumerator generowanych przez poszczególne obiekty Runnable. Wykonuje się to analogicznie do listy obiektów Thread potrzebnej przy RunThreads. Dodatkowo należy odpowiednio skorzystać z MoveNext obiektu Enumerator (patrz przykłady na MSDN).

8. Porównać wyniki działania RunThreads i RunFibers.

9. Porównać zajętość pamięci w przypadku wykonania tylko RunThreads i tylko RunFibers. Skąd wynikają różnice?

10. Zwiększyć ilość ConstantCountingAgent do 100 i powtórzyć eksperymenty. Gdzie występują potencjalne problemy z synchronizacją agentów?

Treści wymagane po wykonaniu zadań w formie przykładowych pytań:

- Podać różnice pomiędzy procesami, wątkami i włóknami (koprocedurami) w następujących kategoriach: stopień separacji i tolerancji na błędy, obciążenie procesora, zależność od systemu operacyjnego, zajętość pamięci, skomplikowanie implementacji, możliwości wykorzystania wielu sprzętowych wątków. Na tej podstawie wymienić przykładowe zastosowania procesów, wątków i włókien.

- Dlaczego wyniki obliczeń agentów uruchamianych w wątkach są czasami wypisywane do konsoli w kolejności innej niż ta wyniakająca z ich zamierzonego czasu działania i kolejności uruchomienia? Jakie są konsekwencje tego zjawiska w przypadku obliczeń na zmiennych współdzielonych między wątkami bez dodatkowych mechanizmów synchronizacji? Dlaczego problem ten nie występuje w przypadku wykorzystania samych włókien?

- Jak system operacyjny zapewnia współbieżne wykonywanie liczby wątków większej niż liczba sprzętkowych wątków (np. jąder CPU)?

- Jak dokładna jest funkcja Thread.Sleep? Czy czas widziany przez wątek może chwilowo maleć? Czy można uśpić wątek na 0.01 ms?

- Czym różni się wywłaszczanie dobrowolne (voluntary preemption) od wywłaszczania wymuszonego (preemption)? Które z nich stosuje większośc systemów operacyjnych? Jakie zadania spoczywają na użytkowniku a jakie na systemie operacyjnym w obu przytoczonych modelach wywłaszczania?

Praktyczne umiejętności wymagane po wykonaniu zadań:

- Umiejętność zakładania, startowania, wstrzymywania i niszczenia wątków/
(klasa Thread)

- Umiejętność symulacji współbieżnego wykonywania kodu poprzez implementację włókien opartych o iteratory C#/
(klasy Enumerator, IEnumerable wykorzystanie słowa kluczowe yield)

- Umiejętność diagnozy zużycia pamięci przez proces i podstawowa obsługa debuggera w Visual Studio.
(okno zajętości pamięci, okno wizualizacji przebiegu wątków, okno podglądu zmiennych, ustawianie pułapek)

- Umiejętność wykorzystania interfejsów, klas abstrakcyjnych i własności do implementacji prostych hierarchii klas.
(patrz interfejs IRunnable, klasy dziedziczące z Agent)

- Podstawowa znajomość LINQ. (konstrukcja prostych wyrażeń lambda, metody Select, Any, Where, Count - patrz implementacja metody RunThreads)

2.3 Przetwarzanie równoległe poprzez mapowanie i redukcję

Przewidywany czas realizacji: 90 min
Zadania:

1. Dopisać do metody GenerateRunnables kod generujący losową listę 1000 liczb całkowitych.

2. Zaimplementować procedurę równoległego sumowania elementów wyżej wygenerowanej listy. W GenerateRunnables powinno nastąpić stworzenie 4 agentów i wyznaczenie obszarów

listy im podległych. Każdy z agentów powinien obliczyć sumę elementów ze swojego obszaru listy w pierwszym swoim cyklu pracy. Wynik powinien być umieszczony w zmiennej publicznej danego agenta lub jego właściwości (property). Osobny, piąty agent powinien czekać na zakończenie pracy (sprawdzamy HasFinished). Po zakończeniu pracy pozostałych 4 agentów powinien on obliczyć sumę końcową na podstawie wyników uzyskanych przez pozostałych agentów.

3. Przygotować powyższy algorytm do pracy z parametrami: dowolne $N > 1$ agentów, dowolny rozmiar listy $M > 1$, dowolna ilość etapów przetwarzania $E \geqslant 1$. *Wskazówka:* Poprzednie rozwiązanie zakładało 1 etap przetwarzania ($E = 1$), tj. np. dla listy 1000 liczb każdy agent przetwarzał 250 liczb. W przypadku $E = 2$ każdy z agentów sumowałby najpierw 125 liczb w pierwszym etapie, a potem 125 liczb + wynik cząstkowy (z poprzedniego etapu) w drugim etapie.

4. Zaimplementować procedurę zliczania słów w tekście w sposób analogiczny do wyżej przygotowanej procedury sumowania. Wczytać tekst z dowolnie wybranego pliku i podzielić go na słowa w osobnym agencie (użyć String.Split). Przygotować osobnych agentów wykonujących etap mapowania (tj. odwzorowania/przeliczenia) z listy słów (IEnumerable(string) lub List(string)) na ilość wystąpień poszczególnych słów (użyć Dictionary(string, int)). Dodatkowy agent (lub agenci) powinien być odpowiedzialny za proces redukcji, tj. łączenia Dictionary(string, int) wygenerowanych poszczególnych agentów w czasie etapu mapowania w jeden końcowy Dictionary(string, int) reprezentujący wynik.

Treści wymagane po wykonaniu zadań w formie przykładowych pytań:

- Co oznacza określenie „perfekcyjnie/wstydliwie równoległy algorytm/problem" (embarassingly parallell)?
- Wyjaśnić krótko prawo Amdahla. Jak można go użyć przy analizie skalowalności i wydajności rozwiązań powyższych zadań?
- Gdzie zachodzi synchronizacja w przypadku algorytmów implementowanych w tym podrozdziale?
- Czy każdy algorytm można przedstawić jak ciąg mapowanie – redukcja – mapowanie – ... ? Dlaczego taka procedura mapowania i redukcji jest skalowalna (wskazówka: rekursywny podział etapów)?

2.4 Metody synchronizacji współbieżnego dostępu do zmiennych

Przewidywany czas realizacji: 3×90 min
Zadania:

1. Przygotować agenta utrzymującego stan konta bankowego (dalej zwany bankiem) jako właściwość publiczną. Agent ten powinien wypisać stan konta do konsoli co 2 s.

2. Przygotować kilku agentów, którzy powinni współbieżnie zmieniać stan konta na podstawie prostych, dowolnie wybranych deterministycznych zależności matematycznych (np. zwiększanie o stałą, zmniejszanie o procent, etc.) Każdy z tych agentów powinien co 2 s wypisywać do konsoli aktualny jego zdaniem stan konta (zaleca się wykorzystanie dziedziczenia do uproszczenia implementacji wspólnej części agentów). Uwaga: Przy wypisywaniu stanu konta nie powinno się korzystać ze zmiennej udostępnianej przez agenta, który ten

stan utrzymuje. Każdy agent powinien sam pamiętać stan konta na podstawie wykonywanych przez siebie operacji i stanu konta z chwili ich wykonania (prosta historia - 1 zmienna jako aktualny stan konta). Ze względu na np. zjawisko hazardu wartości te mogą się różnić przy nieprawidłowej synchronizacji.

3. Przetestować (nie-)poprawność synchronizacji.
4. Wprowadzić synchronizację dodając do agenta banku publiczny semafor (System.Threading.Mutex). Sprawdzić wyniki.
5. Dodać wersję stosującą sekcję krytyczną (instrukcja lock). Sprawdzić wyniki.
6. Sprawdzić wydajność systemu (zajęta pamięć/obciążenie CPU) w przypadku jednego agenta banku i dużej ilości agentów modyfikujących.
7. Dodać wersję stosującą spinlock. Sprawdzić wyniki oraz wydajność. Przetestować 3 strategie pracy spinlocka: anulowanie operacji po nieudanej próbie, ciągłe ponawianie próby (busy-waiting) i ponawianie próby co cykl pracy agenta (tj. co wywołanie Update).
8. Dodać wersję korzystającą ze zmiennych atomowych (atomic compare-exchange z klasy Interlocked). Sprawdzić poprawność i wydajność.
9. Dodać wersję wykorzystującą własną implementację algorytmu piekarnianego (inaczej algorytm Lamporta). Sprawdzić poprawność.
10. Dodać wersję korzystającą z pełnych sprzętowych barier zapisu i odczytu (memory barrier/fence). Sprawdzić poprawność i wydajność.
11. Dodać wersję stosującą zmienne typu volatile generujące częściowe bariery zapisu/odczytu. Sprawdzić poprawność i wydajność.
12. Wyjaśnić (omówić z prowadzącym) problemy zachodzące dla przypadku jednego agenta banku z wieloma kontami w przypadków dwóch poprzednich podejść (tzw. cache pollution).
13. Dodać wersję, w której agent bank kolejkuje operacje na koncie w bezpiecznej współbieżnej kolejce System.Collections.Concurrent.ConcurrentQueue i przetwarza je sekwencyjnie (tzw. transaction log). Sprawdzić wyniki.
14. Dodać wersję, w której agent bank obsługuje wiele kont jednocześnie i nie kolejkuje operacji. Użyć System.Collections.Concurrent.ConcurrentDictionary w agencie banku. Zmodyfikować pozostałych agentów, tak aby używali oni różnych kont i sami odpowiednio kolejkowali/ponawiali operacje na koncie w przypadku braku przyznania dostępu do konta na skutek synchronizacji (kolejkowanie wyłącznie po swojej stronie). Sprawdzić wyniki.
15. Dodać wersję odporną na nagłe wyłączenie PC/aplikacji. Poprzez utrzymywaną w pliku historię operacji (persistent transaction log). Przed implementacją omówić format pliku z prowadzącym. Wyłączyć write-caching (użyć metody Flush i podobnych).

Treści wymagane po wykonaniu zadań w formie przykładowych pytań:

- Wyjaśnić zjawisko hazardu (race conditions) i podać przykładowy scenariusz, w którym ono zachodzi.

- Wyjaśnić zjawisko zakleszczenia (deadlock) i podać przykładowy scenariusz, w którym ono zachodzi.
- Jak można wykorzystać spinlock do uniknięcia zjawiska zakleszczenia (patrz 3 strategie wykorzystania spinlocków)?
- Wyjaśnić oraz porównać paradygmaty współbieżności ACID i BASE.
- Co oznacza określenie operacja atomowa?
- Wyjaśnić na czym polega koncepcja algorytmów z nieblokującą synchronizacją (lockless/lock-free algorithms).
- Na czym polega synchronizacja dostępu do zmiennych poprzez sprzętowe bariery odczytu/zapisu? Wyjaśnić zjawisko „cache pollution".
- Porównać (prostota implementacji/wydajność/skalowalność) poznane metody synchronizacji dostępu do zmiennych.
- Dlaczego nie trzeba synchronizować dostępu do zmiennych w wypadku, gdy agenci są uruchomieni w postaci włókien (fibers)?
- Dlaczego w praktycznym zastosowaniu stan konta należałoby utrzymywać w zmiennej decimal (zamiast float/double/int, etc.)?
- Jak zaimplementować własny Dictionary(string, int) (tzw. tablica hashująca - co najmniej 2 możliwości)?
- Czy synchronizacja dostępu do zmiennych jest potrzebna również w przypadku systemów wbudowanych z 1 sprzętowym wątkiem i mechanizmem przerwań (np. mikrokontrolery, procesory DSP, etc.)? Jeśli tak to podać przykład takiej sytuacji i sposób jej rozwiązania (patrz kontrola przerwań)?
- Jaki problem rozwiązuje prymityw synchronizacji zawarty w klasie ReaderWriterLockSlim? Kiedy taki problem zachodzi (patrz zmienne atmomowe)?

3 Metody szeregowania zadań w systemach czasu rzeczywistego

Praktyczne systemy czasu rzeczywistego wymagają często wymagają często współbieżnej realizacji wielu procesów o różnej charakterystyce działania i dostępu do danych. Przykładem może być system pokładowy robota mobilnego prowadzący współbieżnie akwizycję danych z sensorów takich jak skanery laserowe, bardzo wrażliwe na opóźnienia obliczenia sygnałów sterujących kołami robota oraz obliczeniochłonne lecz mało wrażliwe na opóźnienia obliczenia związane z planowaniem ruchu (tj. planowaniem bezkolizyjnych ścieżek przejazdu). W celu zapewniania prawidłowej pracy takiego systemu niezbędna jest odpowiednia synchronizacja dostępu do danych oraz optymalizacja wykorzystania cennych zasobów takich jak np. czas procesora. Ze względu na różnorodność dostępnych systemów operacyjnych, platform sprzętowych oraz różną specyfikę końcowych aplikacji, ważna jest znajomość najważniejszych algorytmów szeregowania zadań. Biorąc pod uwagę specyfikę szeregowanych zadań (tj. wrażliwość na opóźnienia i możliwość zrównoleglenia) oraz możliwość współpracy z procesem szeregowania zadań (z ang. *scheduling*) prowadzonym przez system operacyjny, można podzielić interesujące nas algorytmy szeregowania zadań na dwie grupy: algorytmy szeregujące dynamicznie obliczenia równoległe i algorytmy szeregujące zadania z twardymi ograniczeniami na czas ich wykonania. Poniżej rozpatrujemy najistotniejszych przedstawicieli obu tych grup.

3.1 Dynamiczne szeregowanie obliczeń równoległych strategią *work stealing*

Przewidywany czas realizacji: 2×90 min
Strategia work stealing (tj. zawłaszczanie pracy) służy do balansowania obciążenia obliczeniowego pomiędzy wieloma wątkami. Jest ona przydatna w przypadku prowadzenia obliczeń równoległych, które nie są wrażliwe na opóźnienia (brak tzw. „twardegoćzasu rzeczywistego) i charakteryzują się nieprzewidywalnym przebiegiem obliczeń.

Przykładem takiego scenariusza jest symulacja wielu spadających na ziemię pudeł. Dla każdego pudła zdefiniować należy prowadzić obliczenia takie jak całkowanie modelu dynamicznego oraz odpowiednie transformacje jednorodne reprezentacji pudła. W przypadku pudeł, które nie mogą się rozpadać można łatwo rozwiązać taki problem przez metodę mapowania i redukcji badaną podczas poprzednich zajęć - mamy tutaj znaną wcześniej liczbę pudeł, które można optymalnie rozdzielić między dostępne sprzętowe wątki/agentów. W przypadku gdy pudła mogą się rozpadać problem staje się bardziej złożony, gdyż nie można wcześniej przewidzieć, które z nich uderzą w ziemię w taki sposób, że będą musiały się rozpaść. Należy zauważyć, że rozpadnięcie pudła powoduje wygenerowanie dużej liczby odłamków, z których każdy jest osobnym ciałem sztywnym, które podobnie jak pudło musi być osobno symulowane. Jeśli rozpadnie się tylko mała liczba pudeł, to większość agentów pozostanie bez pracy w końcowej fazie symulacji, podczas gdy pozostali będą maksymalnie obciążeni. Zjawisko to jest niekorzystne ze względu na asymetryczne wykorzystanie dostępnych zasobów obliczeniowych (m.in. czasu procesora), które prowadzi do dłuższych obliczeń i większej wrażliwości wynikowego systemu na dane wejściowe.

Strategia work stealing pozwala na zniwelowanie powyższego negatywnego zjawiska poprzez zastosowanie innego podejścia do prowadzenia obliczeń. Każdy agent wyposażony jest we współbieżną kolejkę utrzymującą zadania, które ma on wykonać. W ogólności kolejka ta powinna mieć pełen dostęp do końca i początku - dla uproszczenia zakładamy dostęp tylko do końca. Praca agenta dzielona jest na zadania, które definiowane są funkcjami zwykle zapisywanymi w postaci wyrażeń lambda. Zamiast prowadzić swoje obliczenia sekwencyjnie, każdy agent prowadzi tylko część obecnie potrzebnych obliczeń i dodaje ich następny krok jako funkcję do swojej kolejki. Funkcje te są cyklicznie zdejmowane z kolejki i wykonywane przez tego agenta. Kolejne funkcje mogą w sposób dowolny dodawać do kolejki kolejne zadania. Ten rekursywny proces stanowi łatwą metodę zapisywania obliczeń, które mogą być wznawiane w innych wątkach oraz rozgałęziane na wiele wątków. Jeśli kolejka danego agenta zostanie przez niego wyczerpana, to wybiera on jednego z pozostałych agentów i pobiera zadania z jego kolejki aż do jej wyczerpania lub odpowiedniego wypełnienia swojej własnej kolejki. To właśnie ten mechanizm zmiany kolejki, z której pobierane są zadania jest odpowiedzialny za wyrównanie obciążenia obliczeniowego pomiędzy poszczególnymi agentami. Do niego odnosi się również nazwa „work stealing". Sposób wyboru agentów, na których kolejki należy się przełączać może być wybrany dowolnie, jednak wpływa on znacząco na wydajność tej strategii w danym scenariuszu. Zachęca się do przetestowania kilku możliwości podczas wykonywania zadań.

Zadania:

- Wykorzystując dotychczas zbudowaną infrastrukturę agentów przygotować klasę WorkStealingAgent, która zawierać będzie jedynie *publiczną* kolejkę zadań (tj. kolejkę funkcji) typu $ConcurrentQueue < Action < WorkStealingAgent >>$ o nazwie Queue. Przy problemach z obsługą $ConcurrentQueue$ należy odnieść się do zadań z poprzedniego rozdziału.

- W metodzie Update dla WorkStealingAgent zaimplementować pętlę pobierającą cyklicznie zadania z kolejki i wykonującą je w kolejności pobrania.
  Wskazówka: Wykorzystać metodę TryDequeue kolejki. Element zdjęty z kolejki jest typu $Action < WorkStealingAgent >$, co oznacza że jest on gotową do wywołania funkcją.

Wykonanie zadania z odbywa się więc przez wywołanie „z(this)", czyli podanie do funkcji referencji do agenta realizującego obecnie zadanie.

- Korzystając z dotychczasowej infrastruktury przygotować program tworzący 2 agentów *WorkStealingAgent* i dodający do kolejki jednego z nich funkcję obliczającą silnię z 10. Funkcja ta dobrana jest celowo tak, aby jej wykonanie nie było zrównoleglone. Powinna ona jednak obliczać silnię krokowo, tj. każde kolejne mnożenie powinno generować nowe zadanie w kolejce agenta WorkStealingAgent. Pozwala to na przetestowanie przygotowanego mechanizmu i sprawdzenie brzegowego przypadku działania algorytmu. Funkcja ta może być napisana jako wyrażenie lambda zdefiniowane przed funkcji *Main* konstrukcją *WorkStealingAgent*. Przykładowa implementacja:
  var wynik = 1;
  var i = 1;
  var silnia = (WorkStealingAgent ag) $\Longrightarrow$ {};
  silnia = (WorkStealingAgent ag) $\Longrightarrow$
  {
  wynik *= i;
  ++i;
  if($i < 10$) ag.Enqueue(silnia);
  else Console.WriteLine(wynik);
  };
  Powyższe wcześniejsze zdeklarowanie wyrażenia silnia jako funkcja pusta jest konieczne ze względu na rekursywne wystąpienie tego wyrażenia w jego własnej definicji.

- Dodać do WorkStealingAgent listę pozostałych agentów WorkStealingAgent dostępnych w aplikacji. Powinna być ona przekazywana w konstruktorze (patrz mapowanie i redukcja). Zmienić implementację metody Update w WorkStealingAgent tak, aby uzyskać tzw. work stealing. Oznacza to, że w przypadku wyczerpania kolejki agent powinien wyszukać lub wylosować z listy innego agenta z niepustą kolejką i zaczać pobierać jego zadania. Przetestować modyfikację z obliczeniami silni.

- Przygotować klasę TreeNode reprezentującą węzeł drzewa liczb całkowitych. Klasa powinna mieć zmienną typu int reprezentującą dane, zmienną Parent typu TreeNode reprezentującą przodka w drzewie (null dla korzenia) oraz zmienną Children bedącą listą typu TreeNode (lista pusta dla liści drzewa).

- Przygotować funkcję generującą losowe drzewo o zadanej głębokości (ilość skoków od korzenia do liścia) i współczynniku rozgałęzienia (tzw. *branching factor* - maksymalna wielkość listy Children dla dowolnego TreeNode).

- Rozwinąć przygotowany program tak, rozpoczynało go (bez współbieżności) losowanie drzewa i obliczenie sumy jego wszystkich elementów (dla celów weryfikacji). W dalszej części program powinien współbieżnie posumować wszystkie elementy drzewa korzystając z przygotowanej strategii work stealing.

3.2 Szeregowanie zadań z twardymi ograniczeniami czasowymi

Przewidywany czas realizacji: 2×90 min
Zadania zostaną podane 23.05.16.

4 Projekt systemu czasu rzeczywistego

Przewidywany czas realizacji: 2×90 min + praca własna
Zadania zostaną podane 23.05.16.