Systemy operacyjne

Współbieżność i synchronizacja procesów

Wykład prowadzą:
Jerzy Brzeziński
Dariusz Wawrzyniak

Systemy operacyjne

Plan wykładu

- Abstrakcja programowania współbieżnego
- Instrukcje atomowe i ich przeplot
- Istota synchronizacji
- Kryteria poprawności programów współbieżnych
- Klasyfikacja mechanizmów synchronizacji
- Wzajemne wykluczania
- Algorytmy wzajemnego wykluczania (alg. Petersona i alg. Lamporta)
- Złożone instrukcje atomowe (**`test&set`**, **`exchange`**)

Systemy operacyjne

Wprowadzenie do abstrakcji przetwarzania współbieżnego

- Realizacja przetwarzania polega na wykonywaniu instrukcji przez jednostkę przetwarzającą (procesor).
- Instrukcje wykonywane są w kontekście jakiegoś procesu.
- Wykonanie instrukcji (akcja) oznacza zajście zdarzenia w procesie, skutkiem czego jest zmiana stanu procesu.
- Zajście zdarzenia jest zdeterminowane poprzedzającym je stanem procesu.
- Na stan procesu wpływają pośrednio akcje innych procesów w systemie, przejawiające się w stanie współdzielonych zasobów.

Systemy operacyjne

Podstawowe definicje i oznaczenia

- C — zbiór instrukcji (operacji), możliwych do wykonania przez jednostkę przetwarzającą (np. dodawanie, odejmowanie, skok, rozgałęzienie warunkowe)
- D — zbiór danych, przetwarzanych (modyfikowanych lub czytanych) w ramach wykonywania operacji przez jednostkę przetwarzającą
- $e_i(c, O)$ — wykonanie w ramach procesu P_i instrukcji atomowej $c \in C$ na operandach ze zbioru $O \subseteq D$

Współbieżność i synchronizacja procesów (4)

Systemy operacyjne

Stan procesu i zdarzenie

- Stan procesu obejmuje te elementy (wartości zmiennych, rejestrów, stan zasobów), które między innymi determinują następną instrukcję do wykonania.
- Wykonanie instrukcji określane jest jako *zdarzenie* lub *akcja*.
- Zbiór instrukcji do wykonania oraz zależności pomiędzy nimi określone są przez program procesu.
- Zajście zdarzenia zdeterminowane jest zatem przez program oraz bieżący stan procesu.

Współbieżność i synchronizacja procesów (5)

Systemy operacyjne

Proces sekwencyjny

- Proces (wątek) sekwencyjny jest wykonaniem ciągu instrukcji, opisanych przez program dla tego procesu (procedurę dla wątku), w taki sposób, że następna akcja nie rozpocznie się, zanim nie skończy się poprzednia.
- Zdarzenie (akcja) w procesie P_i oznacza zmianę stanu tego procesu, co formalnie opisane jest poprzez odwzorowanie (przejście, tranzycję):
  L: $S_i \times E_i \rightarrow S_i$, gdzie
  S_i — zbiór stanów procesu P_i
  E_i — zbiór zdarzeń w procesie P_i

Współbieżność i synchronizacja procesów (6)

Systemy operacyjne

Relacja lokalnego porządku

- Proces P_i jest ciągiem (skończonym lub nieskończonym) następujących po sobie naprzemiennie stanów i zdarzeń $s_i^0, e_i^1, s_i^1, e_i^2, s_i^2, ...,$ gdzie:
  s_i^0 — stan początkowy procesu P_i
  $\forall_{k\geq 0}\ s_i^k \in S_i$
  $\forall_{k>0}\ e_i^k \in E_i$
  $\forall_{k\geq 0}\ L(s_i^k, e_i^{k+1}) = s_i^{k+1}$
- Relacja porządku w procesie P_i — odzwierciedlająca kolejność stanów i zdarzeń w ciągu — nazywana będzie lokalnym porządkiem i oznaczana symbolem $\rightarrow_i$

Współbieżność i synchronizacja procesów (7)

Systemy operacyjne

Współbieżna realizacja zbioru procesów

- Zdarzenie w systemie współbieżnym, złożonym z procesów sekwencyjnych $P_1, P_2, ..., P_n$, oznacza zajście zdarzenia w jednym z procesów.
- Zdarzenie, zmieniając stan jednego procesu, zmienia stan całego systemu, co formalnie opisane jest poprzez odwzorowanie (przejście, tranzycję):
  $G: \Sigma \times \Lambda \rightarrow \Sigma$, gdzie
  $\Sigma \subseteq S_1 \times S_2 \times ... \times S_n$ — zbiór stanów systemu
  $\Lambda = E_1 \cup E_2 \cup ... \cup E_n$ — zbiór zdarzeń w systemie

Współbieżność i synchronizacja procesów (8)

Systemy operacyjne

Relacja globalnego porządku

- Przetwarzanie współbieżne zbioru procesów sekwencyjnych $P_1, P_2, ..., P_n$, jest ciągiem (skończonym lub nieskończonym) następujących po sobie naprzemiennie stanów systemu i zdarzeń
  $\sigma^0, e^1, \sigma^1, e^2, \sigma^2, ...,$ gdzie:
  σ^0 — stan początkowy $\langle s_1^0, s_2^0, ... , s_n^0 \rangle$
  $\forall_{k\geq 0}\ \sigma^k \in \Sigma$
  $\forall_{k>0}\ e^k \in \Lambda$
  $\forall_{k\geq 0}\ G(\sigma^k, e^{k+1}) = \sigma^{k+1}$
- Relacja porządku w systemie — odzwierciedlająca kolejność stanów i zdarzeń w ciągu — nazywana będzie globalnym porządkiem i oznaczana symbolem $\rightarrow$

Współbieżność i synchronizacja procesów (9)

Systemy operacyjne

Niedeterminizm przetwarzania

- Zdarzenie, które może pojawić się w określonym stanie przetwarzania, określane jest jako zdarzenie dopuszczalne.
- W przetwarzaniu współbieżnym z każdym sekwencyjnym procesem w danym stanie związane jest jedno zdarzenie. W stanie całego przetwarzania jest zatem zbiór zdarzeń dopuszczalnych.
- W zależności od dostępności zasobów (procesora, magistrali systemowej) oraz decyzji planisty, wykonywany będzie jeden z procesów gotowych. Należy więc przyjąć, że zajście jednego ze zdarzeń dopuszczalnych ma charakter losowy.

Systemy operacyjne

Przeplot i osiągalność stanu

- Przeplotem jest zbiór zdarzeń Λ, uporządkowany przez relację globalnego porządku $\rightarrow$, spełniającą następujący warunek:

$$\forall_{e,\, e' \in \Lambda}\ \exists_i\ e \rightarrow_i e' \Rightarrow e \rightarrow e'$$

- Stan σ' systemu jest osiągalny ze stanu σ, co będzie oznaczone przez $\sigma \rightsquigarrow \sigma'$, jeśli zachodzi jeden z warunków:
  1) są to te same stany, czyli $\sigma \equiv \sigma'$
  2) $\exists_{e \in \Lambda}\ G(\sigma, e) = \sigma'$
  3) $\exists_{\sigma'' \in \Sigma}\ \sigma \rightsquigarrow \sigma'' \wedge \sigma'' \rightsquigarrow \sigma'$

Systemy operacyjne

Procesy niezależne a procesy współpracujące

- Niech $D_i \subseteq D$ oznacza zbiór danych przetwarzanych przez proces P_i, czyli dla ciągu instrukcji procesu P_i: $e_i^1(c_i^1, O_i^1)$, $e_i^2(c_i^2, O_i^2)$, ...

$$D_i = \bigcup_k O_i^k$$

- Dwa procesy, P_i i P_j, są **niezależne**, jeśli

$$D_i \cap D_j = \varnothing$$

- Dwa procesy, P_i i P_j, **współpracują** (są w interakcji), jeśli

$$D_i \cap D_j \neq \varnothing$$

Systemy operacyjne

Dane współdzielone a lokalne

- Dane lokalne (prywatne) procesu P_i to takie, które są przetwarzane wyłącznie przez P_i, formalnie zatem jest to zbiór:

$$D_i \setminus \bigcup_{1 \le j \le n, j \ne i} D_j$$

- Dane współdzielone przez proces P_i to takie, które przetwarzane są oprócz P_i przez co najmniej jeszcze jeden inny proces, formalnie zatem jest to zbiór:

$$D_i \cap \bigcup_{1 \le j \le n, j \ne i} D_j$$

Współbieżność i synchronizacja procesów (13)

Systemy operacyjne

Dane wejściowy i wyjściowe

- Niech $D_i^R \subseteq D_i$ oznacza zbiór danych czytanych przez proces P_i, a $D_i^M \subseteq D_i$ oznacza zbiór danych modyfikowanych przez proces P_i
- Dane wejściowe procesu P_i to takie dane współdzielone, które są czytane przez proces P_i, formalnie zatem jest to zbiór:

$$D_i^R \cap \bigcup_{1 \le j \le n, j \ne i} D_j$$

- Dane wyjściowe procesu P_i to takie dane współdzielone, które są modyfikowane przez proces P_i, formalnie zatem jest to zbiór:

$$D_i^M \cap \bigcup_{1 \le j \le n, j \ne i} D_j$$

Współbieżność i synchronizacja procesów (14)

Systemy operacyjne

Przykład przetwarzania współbieżnego

```
n: integer := 0; /* zmienna współdzielona */
```

wątki / instrukcje	wątek A	wątek B
wysokopoziomowe	`n := n + 1`	`n := n + 1`

RISC	`load R_A, n`
	`add R_A, 1`
	`store R_A, n`
		`load R_B, n`
		`add R_B, 1`
		`store R_B, n`

CISC	`inc n`	`inc n`

Współbieżność i synchronizacja procesów (15)

Systemy operacyjne

Przykład przeplotu instrukcji RISC

	przeplot 1	przeplot 2
przepływ sterowania	{A} load R_A, *n* {A} add R_A, 1 {A} store R_A, *n* // *n = 1* {B} load R_B, *n* {B} add R_B, 1 {B} store R_B, *n*	{A} load R_A, *n* {A} add R_A, 1 // *n = 0* {B} load R_B, *n* {B} add R_B, 1 {A} store R_A, *n* {B} store R_B, *n*
wartość *n*	2	1

Współbieżność i synchronizacja procesów (16)

Systemy operacyjne

Przykład przeplotu instrukcji CISC

	przeplot 1	przeplot 2
przepływ sterowania	{A} inc n {B} inc n	{B} inc n {A} inc n
wartość *n*	2	2

Współbieżność i synchronizacja procesów (17)

Systemy operacyjne

Istota synchronizacji

- Celem synchronizacji jest kontrola przepływu sterowania pomiędzy procesami tak, żeby dopuszczalne stały się tylko przeploty instrukcji zgodne z intencją programisty.
- Synchronizacja na najniższym poziomie polega na wykonaniu specjalnych instrukcji, które powodują zatrzymanie postępu przetwarzania.
- Synchronizacja na wyższym poziomie polega na użyciu specjalnych konstrukcji programotwórczych lub odpowiednich definicji struktur danych.

Współbieżność i synchronizacja procesów (18)

Systemy operacyjne

Poprawność programów współbieżnych

- Własność bezpieczeństwa (ang. safety) — w każdym osiągalnym stanie przetwarzania muszą być spełnione pewne warunki.
- Własność żywotności (ang. liveness) — w wyniku przetwarzania muszą w końcu zajść pewne warunki.

Systemy operacyjne

Własność uczciwości programów współbieżnych

- Uczciwość słaba — nieprzerwanie zgłaszane żądanie procesu będzie kiedyś obsłużone.
- Uczciwość mocna — nieskończenie wiele razy zgłaszane żądanie procesu będzie kiedyś obsłużone.
- Oczekiwanie liniowe — żądanie procesu będzie obsłużone po najwyżej jednokrotnym obsłużeniu żądań innych procesów.
- FIFO — żądania będą realizowane w kolejności zgłoszeń.

Systemy operacyjne

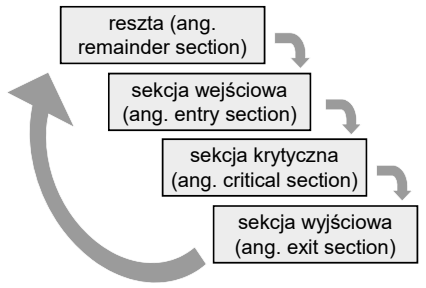
Klasyfikacja mechanizmów synchronizacji

- Zapis lub odczyt współdzielonych danych
- Złożone operacje atomowe na współdzielonych danych (np. **`test&set`**, **`exchange`**)
- Mechanizmy wspierane przez system operacyjny
  - semafory
  - mechanizmy POSIX (zamki oraz zmienne warunkowe)
- Mechanizmy strukturalne (wspierane przez wysokopoziomowe języki programowania)
  - monitory
  - regiony krytyczne

Wzajemne wykluczanie — sformułowanie problemu

- W systemie działa *n* procesów P_0, P_1, ..., P_{n-1}.
- W programie każdego procesu znajduje się fragment kodu zwany sekcją krytyczną (ang. critical section).
- Sekcja krytyczna wykonywana jest w danej chwili przez co najwyżej jeden proces.

Ogólna postać algorytmu wzajemnego wykluczania



Poprawność rozwiązania problemu wzajemnego wykluczania

- Wzajemne wykluczanie — warunek bezpieczeństwa,
- Postęp (ang. progress) — warunek żywotności z punktu widzenia systemu,
- Ograniczone czekanie (ang. lockout-freedom) — warunek żywotności z punktu widzenia procesu.

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 1

Algorytm dla procesu P_i przy dwóch procesach P_i i P_j

```
shared numer: Integer := i;

while numer ≠ i do          } sekcja wejściowa
   nic;
sekcja krytyczna_i;
numer := j;                 ← sekcja wyjściowa
reszta_i;
```


Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 2

Algorytm dla procesu P_i przy dwóch procesach P_i i P_j
(dla uproszczenia prezentacji założono, że $i = 0$, a $j = 1$)

```
shared znacznik: array [0..1] of
                 Boolean := false;

znacznik[i] := true;        }
while znacznik[j] do        } sekcja wejściowa
   nic;
sekcja krytyczna_i;
znacznik[i] := false;  ← sekcja wyjściowa
reszta_i;
```


Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 3

```
shared znacznik: array [0..1] of
                 Boolean := false;

znacznik[i] := true;        }
while znacznik[j] do        }
begin                       }
   znacznik[i] := false;    } sekcja wejściowa
   znacznik[i] := true;     }
end;                        }
sekcja krytyczna_i;
znacznik[i] := false;   ← sekcja wyjściowa
reszta_i;
```

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 4

```
shared znacznik: array [0..1] of Boolean;
shared numer:    Integer;

znacznik[i] := true;                          } sekcja wejściowa
numer := j;                                   }
while znacznik[j] and numer ≠ i do            }
   nic;                                       }
sekcja krytyczna_i;
znacznik[i] := false;        ← sekcja wyjściowa
reszta_i;
```


Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 4 z zamianą kolejności operacji podstawienia

```
shared znacznik: array [0..1] of Boolean;
shared numer:    Integer;

numer := j;                                   } sekcja wejściowa
znacznik[i] := true;                          }
~~numer := j;~~                               }
while znacznik[j] and numer ≠ i do            }
   nic;
sekcja krytyczna_i;
znacznik[i] := false;        ← sekcja wyjściowa
reszta_i;
```


Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie *n* procesów — algorytm piekarni (1)

Algorytm dla procesu P_i przy n procesach ($i = 0 \ldots n-1$)

```
shared wybieranie: array [0..n-1] of
                   Boolean := false;
shared numer: array [0..n-1] of Integer := 0;

local  k: Integer;

wybieranie[i] := true;                        } drzwi
numer[i] := max(numer[0],numer[1], ...) + 1;  }
wybieranie[i] := false;                       }
```

Wzajemne wykluczanie *n* procesów — algorytm piekarni (2)

```
1)  for k := 0 to n-1 do begin
2)     if k ≠ i then begin
3)        while wybieranie[k] do nic;
4)        while numer[k] ≠ 0 and
5)              (numer[k],k)<(numer[i],i) do
6)           nic;
7)     end;
8)  end;
9)  sekcja krytyczna_i;
10) numer[i] := 0;        ← sekcja wyjściowa
11) reszta_i;
```

sekcja wejściowa

Operacja test&set

```
function test&set(var l: Boolean): Boolean;
   begin
      test&set := l;
      l := true;
   end;
```


Operacja exchange

```
procedure exchange(var a,b: Boolean);
   var tmp: Boolean;
   begin
      tmp := a;
      a := b;
      b := tmp;
   end;
```

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie z użyciem instrukcji `test&set`

```
shared zamek: Boolean := false;

while test&set(zamek) do      } sekcja wejściowa
   nic;
sekcja krytyczna;
zamek := false;               ← sekcja wyjściowa
reszta;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (34)

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie z użyciem instrukcji `exchange`

```
shared zamek: Boolean := false;
local klucz: Boolean;

klucz := true;                } sekcja
repeat exchange(zamek, klucz); } wejściowa
until klucz = false;
sekcja krytyczna;
zamek := false;       ← sekcja wyjściowa
reszta;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (35)