

# Architektury systemów komputerowych

## Lista zadań nr 12

Na zajęcia 1 czerwca 2022

Przed przystąpieniem do rozwiązywania zadań należy zapoznać się z [1, §5.1] – [1, §5.9].

**UWAGA!** W trakcie prezentacji należy być gotowym do zdefiniowania pojęć oznaczonych **wytluszczoną** czcionką.

Kod skompilowany z opcją «-Os -mno-sse» należy prezentować przy pomocy **Compiler Explorer**<sup>1</sup> używając najnowszej dostępnej wersji kompilatora GCC.

**Zadanie 1.** Intencją procedury «swap» jest zamiana wartości przechowywanych w komórkach pamięci o adresie «xp» i «yp». Odwołując się do pojęcia **aliasingu pamięci** (ang. *memory aliasing*) wytłumacz czemu kompilator nie może zoptymalizować poniższej procedury do procedury «swap2»? Pomóż mu zoptymalizować «swap» posługując się słowem kluczowym «restrict» i wyjaśnij jego znaczenie.

```
1 void swap(long *xp, long *yp) {
2     *xp = *xp + *yp; /* x+y */
3     *yp = *xp - *yp; /* x+y-y = x */
4     *xp = *xp - *yp; /* x+y-x = y */
5 }

1 void swap2(long *xp, long *yp) {
2     long x = *xp, y = *yp;
3     x = x + y, y = x - y, x = x - y;
4     *xp = x, *yp = y;
5 }
```

**Zadanie 2.** Ile razy zostanie zawołana funkcja «my\_strlen» w funkcji «my\_index» i dlaczego? Dodaj **atrybut**<sup>2</sup> «pure» do funkcji «my\_strlen». Czemu tym razem kompilator był w stanie lepiej zoptymalizować funkcję «my\_index»? Czym charakteryzują się **czyste funkcje**? Następnie uzupełnij ciało funkcji «my\_strlen» tak, by wykonywała to samo co «strlen». Następnie usuń atrybut «pure» i dodając słowo kluczowe «static» zawęż zakres widoczności funkcji do bieżącej jednostki translacji. Co się stało w wyniku przeprowadzenia **inliningu**? Czy kompilatorowi udało się samemu wywnioskować, że funkcja jest czysta?

```
1 __attribute__((leaf))
2 size_t my_strlen(const char *s);
3
4 const char *my_index(const char *s, char v) {
5     for (size_t i = 0; i < my_strlen(s); i++)
6         if (s[i] == v)
7             return &s[i];
8     return 0;
9 }
```

**Zadanie 3.** Na podstawie kodu wynikowego z kompilatora odtwórz zoptymalizowaną wersję funkcji «foobar» w języku C. Wskaż w poniższym kodzie **niezmienniki pętli** (ang. *loop invariants*), **zmienne indukcyjne** (ang. *induction variable*). Które wyrażenia zostały wyniesione przed pętlę i dlaczego? Które wyrażenia uległy **osłabieniu** (ang. *strength reduction*)?

```
1 void foobar(long a[], size_t n, long y, long z) {
2     for (int i = 0; i < n; i++) {
3         long x = y - z;
4         long j = 7 * i;
5         a[i] = j + x * x;
6     }
7 }
```

<sup>2</sup><https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Common-Function-Attributes.html>

**Zadanie 4.** Na wykładzie została zaprezentowana funkcja «compute» i na jej przykładzie wyjaśniono optymalizacje transformacji pętli, tj. **zamiany pętli** (ang. *loop interchange*), **łączenia pętli** (ang. *loop fusion*) oraz **usuwania zmiennych indukcyjnych** (ang. *induction variable elimination*). Czy kompilator był w stanie przeprowadzić te optymalizacje na poniższej funkcji? Jeśli nie, to zoptymalizuj ją krok po kroku. Przeanalizuj dokładnie działanie funkcji, czy jesteś w stanie poczynić jakieś obserwacje, które pozwalają Ci wykonać dodatkowe optymalizacje, np. *ponowne wyliczanie wartości* (ang. *rematerialization*<sup>3</sup>)?

```

1 void compute2(long *a, long *b, long k) {
2     long n = 1 << k;
3     for (long i = 0; i < n; i++)
4         a[i * n] = a[i] = 0;
5     for (long i = 1; i < n; i++)
6         for (long j = 1; j < n; j++)
7             a[j * n + i] = i * j;
8     for (long i = 1; i < n; i++)
9         for (long j = 1; j < n; j++)
10            b[i * n + j] = a[i * n + j]
11                        + a[(i - 1) * n + (j - 1)];
12 }
```

**Zadanie 5.** Na podstawie kodu wynikowego z kompilatora odtwórz zoptymalizowaną wersję funkcji «neigh» w języku C. Kompilator zastosował optymalizację **eliminacji wspólnych podwyrażeń** (ang. *common subexpression elimination*). Wskaż w poniższym kodzie, które podwyrażenia policzył tylko raz. Pokaż, że jesteś w stanie zoptymalizować funkcję lepiej niż kompilator – przepisz jej kod tak, by generował mniej instrukcji.

```

1 long neigh(long a[], long n, long i, long j) {
2     long ul = a[(i-1)*n + (j-1)];
3     long ur = a[(i-1)*n + (j+1)];
4     long dl = a[(i+1)*n - (j-1)];
5     long dr = a[(i+1)*n - (j+1)];
6     return ul + ur + dl + dr;
7 }
```

**Zadanie 6.** Zapoznaj się z [1, §5.11.2] i na podstawie [1, §5.7.1] wyjaśnij jak procesor przetwarza skoki warunkowe. W jakim celu procesor używa **predyktora skoków**? Co musi zrobić, jeśli skok zostanie źle przewidziany? Które skoki warunkowe warto zoptymalizować do instrukcji «cmov»? Posługując się narzędziem *Compiler Explorer* z opcją «-O1» przepisz poniższą funkcję tak, żeby w wierszu 4 kompilator nie wygenerował skoku warunkowego.

```

1 void merge1(long src1[], long src2[], long dest[], long n) {
2     long i1 = 0, i2 = 0;
3     while (i1 < n && i2 < n)
4         *dest++ = src1[i1] < src2[i2] ? src1[i1++] : src2[i2++];
5 }
```

**Wskazówka:** W kodzie po optymalizacji mogą wystąpić tylko dwa skoki warunkowe.

**Zadanie 7.** Skompiluj poniższą funkcję i na podstawie wynikowego kodu maszynowego skonstruuj **graf przepływu danych** jak w [1, §5.7.3]. Wskaż w nim **ścieżkę krytyczną** na podstawie **czasu opóźnienia** przetwarzania instrukcji z tabeli [1, 5.12].

```

1 void nonsense(long a[], long k,
2               long *dp, long *jp) {
3     long e = a[2];
4     long g = a[3];
5     long m = a[4];
6     long h = k * 11;
7     long f = g * h;
8     long b = a[f];
9     long c = e * 8;
10    *dp = m + c;
11    *jp = b + 4;
12 }
```

<sup>3</sup><https://en.wikipedia.org/wiki/Rematerialization>

**Zadanie 8.** Załóżmy, że kod z poprzedniego zadania wykonuje się na procesorze **out-of-order** Core i7 z **mikroarchitekturą** Haswell opisaną w [1, §5.7.1]. Procesor potrafi w jednym cyklu zegarowym zdekodować i zlecić do wykonania maksymalnie 4 instrukcje i ma osiem **jednostek funkcyjnych** (ang. *functional units*). Jak technika **przezywania rejestrów** (ang. *register renaming*) pomaga procesorowi w usuwaniu fałszywych zależności między instrukcjami? Ile cykli zegarowych zajmie mu wykonanie instrukcji z poprzedniego zadania?

**Zadanie 9.** Posługując się programem `llvm-mca` wbudowanym w *Compiler Explorer* przedstaw symulację pojedynczego wywołania funkcji «nonsense». Do parametrów programu dodaj: «`-mcpu=haswell -timeline -iterations=1`». Na diagramie **Timeline view**<sup>4</sup> wskaż punkty **wystania** (ang. *dispatch*), **wykonania** (ang. *execute*) i **zatwierdzenia** (ang. *retire*) instrukcji. Ile czasu zajmuje wykonanie funkcji według symulatora? Wyjaśnij z czego wynikają **przestoje** (ang. *stall*) w przetwarzaniu instrukcji?

**Zadanie 10 (bonus).** Na podstawie uproszczonego (sic!) **diagramu**<sup>5</sup> mikroarchitektury Haswell postaraj się wyjaśnić jaka droga czeka instrukcję od jej pobrania z pamięci do ukończenia jej wykonywania. Powróćmy do wydruku z narzędzia `llvm-mca` z poprzedniego zadania. Przyjrzyjmy się wydrukowi z sekcji *Instruction Info* i *Resource pressure by instruction*. Która z wygenerowanych przez kompilator instrukcji zostanie rozłożona przez **dekoder instrukcji** na **mikro-operacje**? Które jednostki funkcyjne będą używane do wykonania poszczególnych instrukcji z naszej funkcji? Dlaczego kompilatory lubią umieszczać wejścia do pętli pod adresami podzielonymi przez 16?

**Uwaga!** Nie wszystkie instrukcje x86-64 można wykonać wyłącznie z użyciem jednej jednostki funkcyjnej.

## Literatura

- [1] „*Computer Systems: A Programmer’s Perspective*”  
Randal E. Bryant, David R. O’Hallaron; Pearson; 3rd edition, 2016
- [2] „*Modern Processor Design: Fundamentals of Superscalar Processors*”  
John Paul Shen, Mikko H. Lipasti; McGraw-Hill; 1st edition, 2005

---

<sup>4</sup><https://llvm.org/docs/CommandGuide/llvm-mca.html#timeline-view>

<sup>5</sup>[https://en.wikichip.org/wiki/File:haswell\\_block\\_diagram.svg](https://en.wikichip.org/wiki/File:haswell_block_diagram.svg)