Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Laboratorium informatyki

Ćwiczenie nr 13. Implementacja i konsolidacja bibliotek programistycznych

Zagadnienia do opracowania:

- biblioteka standardowa języków *C* i *C++*
- biblioteki statyczne i dynamiczne
- biblioteka a framework
- interfejs programistyczny (API)
- położenie funkcji bibliotecznych w wirtualnej przestrzeni adresowej

Spis treści

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest opanowanie umiejętności implementacji oraz konsolidacji własnych bibliotek programistycznych w językach *C/C++*.

2. Wprowadzenie

2.1. Biblioteki programistyczne

Biblioteki programistyczne (*ang. libraries*) stanowią zbiór zdefiniowanych *funkcji*, *stałych* i *typów danych*, wykorzystywanych w kodzie źródłowym aplikacji. Skompilowany kod ***biblioteki*** nie stanowi samodzielnego **pliku wykonywalnego** – nie posiada zdefiniowanej funkcji *main()*. ***Biblioteki programistyczne*** pozwalają na użycie tego samego kodu przez wiele różnych aplikacji. Przykładem może być ***Standardowa Biblioteka Szablonów*** (*ang. Standard Template Library, STL*) języka *C++*, dostarczająca sprawdzone implementacje *kontenerów* (struktur danych) czy popularnych *algorytmów*. ***Biblioteki*** można podzielić na:

- ***statyczne*** (*ang. static libraries*) – dołączane do aplikacji na etapie ***konsolidacji*** kodu, w wyniku czego kod ***bibliotek statycznych*** jest zawierany w wynikowym kodzie wykonywalnym programu. Skutkuje to zwiększeniem rozmiaru aplikacji. W systemie operacyjnym Windows ***biblioteki statyczne*** mają najczęściej rozszerzenie ***.lib*** albo ***.obj***, natomiast w systemach z rodziny Unix rozszerzenie ***.a*** (z *ang. archive*);

- ***dynamiczne*** (*współdzielone*) (*ang. dynamic libraries, shared libraries*) – dołączane do aplikacji na etapie jej uruchomienia. W systemie operacyjnym Windows ***biblioteki dynamiczne*** mają rozszerzenie ***.dll*** (z *ang. dynamic–link library*), natomiast w systemach z rodziny Unix rozszerzenie ***.so*** (z *ang. shared object*). Pojedyncza instancja ***biblioteki dynamicznej*** może być współdzielona przez wiele aplikacji jed-

nocześnie (kod ***biblioteki*** nie jest zawierany w kodzie wykonywalnym aplikacji).

Zbliżonym pojęciem do ***biblioteki programistycznej*** jest ***framework***, znany również pod pojęciem ***platformy programistycznej***. Różnica między ***biblioteką*** a ***frameworkiem*** polega na tym, że ***framework*** wykorzystuje wzorzec ***odwróconego sterowania*** (*ang. inversion of control, IoC*). W klasycznym podejściu program wywołuje określone funkcje biblioteczne. W przypadku ***odwróconego sterowania*** to ***framework*** przekazuje sterowanie do kodu aplikacji i decyduje o wykonaniu kodu użytkownika.

Aby zaimplementować ***bibliotekę programistyczną*** i wykorzystać ją w kodzie aplikacji należy:

1. zdeklarować ***interfejs*** biblioteki
2. zaimplementować zdeklarowane funkcje biblioteczne
3. skompilować kod do postaci ***biblioteki statycznej*** bądź ***biblioteki dynamicznej***
4. załączyć ***interfejs*** biblioteki w kodzie aplikacji
5. dołączyć ***bibliotekę*** do aplikacji na etapie konsolidacji kodu lub wykonania programu

Interfejs programistyczny (*ang. application programming interface, API*) określa w jaki sposób zachodzi komunikacja między programami lub, jak w tym przypadku, między programem a ***biblioteką***. Wprowadzenie ***interfejsu programistycznego*** umożliwia rozdzielenie deklaracji funkcji bibliotecznych od ich implementacji. Przykładem może być ***biblioteka standardowa***, która posiada wiele niezależnych implementacji, ale jeden, ściśle zdefiniowany ***interfejs***, wykorzystywany przez aplikacje języka *C* (lub *C++*). Dzięki temu możliwe jest tworzenie ***bibliotek*** dla różnych systemów operacyjnych, architektur procesorów czy języków programowania, jak również zmiana zasady działania aplikacji przez wymianę implementacji ***biblioteki*** z zachowaniem tego samego ***interfejsu programistycznego*** (nie ma

konieczności modyfikacji kodu źródłowego aplikacji). ***Interfejs*** powinien cechować się małym stopniem skomplikowania i być dobrze udokumentowany. Dobrze przygotowany ***interfejs*** jest wystarczający dla programisty, aby skorzystać z funkcji udostępnionych przez ***bibliotekę***, bez oglądania ich implementacji (która często jest ukryta). Jako przykład może posłużyć prosta ***biblioteka libmath*** implementująca podstawowe operacje matematyczne. Jej ***interfejs***, zawarty w pliku nagłówkowym ***math_functions.h***, przedstawiono na listingu 1.

```
1  #pragma once
2
3  /**
4   * adding two double-precision floating-point
      numbers
5   * @param x first addent
6   * @param y second addent
7   * @return sum of addents x and y
8   */
9  double add(double x, double y);
10
11 /**
12  * subtracting two double-precision floating-point
      numbers
13  * @param x minuend
14  * @param y subtrahend
15  * @return difference of minuend and subtrahend
16  */
17 double subtract(double x, double y);
18
19 /**
```

```
20  * multiplying two double-precision floating-point
      numbers
21  * @param x first factor
22  * @param y second factor
23  * @return multiplication of factors x and y
24  */
25 double multiply(double x, double y);
26
27 // Function pointer type of the illegal division
      operation handler
28 typedef double (*IllegalOperationHandler)();
29
30 /**
31  * dividing two double-precision floating-point
      numbers
32  * @param x dividend
33  * @param y divisor
34  * @param illegalOperationHandler handler to be
      called on division by zero
35  * @return value returned by the
      illegalOperationHandler invocation in case of
      division by zero or quotient of divident and
      divisor otherwise
36  * The function invocation result is undefined if
      illegalOperationHandler is NULL
37  */
38 double divide(double x, double y,
      IllegalOperationHandler illegalOperationHandler);
39
40 /**
```

```
41  * modulus of a double-precision floating-point
      number
42  * @param x number for which the modulus is to be
      calculated
43  * @return modulus of x
44  */
45 double modulus(double x);
```

Listing 1. Interfejs biblioteki *libmath*

Implementacje funkcji bibliotecznych ***libmath***, zawarte w pliku źródłowym ***math_functions.c***, przedstawiono na listingu 2. Należy mieć na uwadze, że użytkownik ***biblioteki libmath*** może nie mieć dostępu do nieskompilowanych plików źródłowych. Plik nagłówkowy ***interfejsu*** (listing 1) powinien zawierać objaśnienia poszczególnych funkcji, a w razie bardziej skomplikowanych implementacji, również przykłady ich użycia w postaci komentarzy w kodzie ***interfejsu***.

```
1  #include "math_functions.h"
2
3  double add(double x, double y) {
4    return x + y;
5  }
6
7  double subtract(double x, double y) {
8    return x - y;
9  }
10
11 double multiply(double x, double y) {
12   return x * y;
13 }
14
```

```
15 double divide(double x, double y,
      IllegalOperationHandler illegalOperationHandler)
      {
16    if (y == 0)
17      return illegalOperationHandler();
18    else
19      return x / y;
20 }
21
22 double modulus(double x) {
23    return x < 0 ? -x : x;
24 }
```

Listing 2. Implementacja funkcji bibliotecznych *libmath*

Kompilacja plików ***math_functions.h*** oraz ***math_functions.c*** do postaci ***biblioteki statycznej*** (przy użyciu pakietu *GNU*) w systemie Windows i Unix odbywa się jednakowo. W pierwszym kroku należy skompilować pliki źródłowe do postaci pliku obiektowego (tu: *math_functions.o*). Można to zrobić wykorzystując flagę ***-c*** kompilatora ***gcc*** (kompilacja bez konsolidacji):

gcc -c math_functions.c

Jeżeli ***biblioteka*** zawiera więcej niż jeden plik źródłowy, to powyższy krok należy powtórzyć dla każdego z nich. W kolejnym etapie łączy się poszczególne pliki obiektowe do jednego pliku ***biblioteki statycznej*** (archiwum). W tym celu można posłużyć się programem ***ar*** (pakiet *GNU*). Składnia wywołania programu jest następująca

ar [flagi] [nazwa_biblioteki] [pliki_obiektowe]

Dla ***biblioteki libmath***:

ar -cvru libmath.lib math_functions.o

[*Uwaga: w przypadku systemu Unix libmath.a*]

Zastosowane w przykładzie flagi określają odpowiednio:

- ***c*** – nie ostrzegaj, jeżeli biblioteka musiała zostać utworzona;
- ***v*** – zwiększ szczegółowość komunikatów;
- ***r*** – zamień lub dodaj nowe pliki do archiwum;
- ***u*** – zamień wyłącznie te pliki, które są nowsze niż obecna wersja archiwum.

Zawartość archiwum można wyświetlić za pomocą flagi ***-t***:

ar -t libmath.lib

W przypadku ***biblioteki dynamicznej***, w pierwszym kroku kompilacji należy dodatkowo uwzględnić flagę ***-fPIC*** (*position-independent code*), która określa, że działanie wygenerowanego kod maszynowego funkcji bibliotecznych nie jest zależne od konkretnego położenia w wirtualnej przestrzeni adresowej (cecha charakterystyczna ***bibliotek dynamicznych***):

gcc -fPIC -c math_functions.c

Łączenie plików obiektowych można przeprowadzić przy pomocy kompilatora ***gcc***, wykorzystując flagę ***-shared***:

gcc -shared -o libmath.dll math_functions.o

[*Uwaga: w przypadku systemu Unix libmath.so*]

Aby skorzystać z funkcji ***biblioteki libmath*** w kodzie aplikacji, należy dołączyć nagłówek (***interfejs***) ***math_functions.h*** za pomocą dyrektywy ***#include*** (np. w pliku ***main.c***). Przykład przedstawiono na listingu 3.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

// Zalacz API biblioteki libmath
#include <math_functions.h>

// IllegalOperationHandler
double onDivisionByZero() {
  printf("Illegal operation\n");
  return 0.0;
}

int main() {
  double divident, divisor;
  printf("Put divident: ");
  scanf("%lf", &divident);
  printf("Put divisor: ");
  scanf("%lf", &divisor);
  // Uzycie funkcji divide() z biblioteki libmath
  printf("Quotient equals: %lf", divide(divident,
   divisor, onDivisionByZero));
  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Listing 3. Użycie funkcji bibliotecznych *libmath* w kodzie aplikacji

Próba kompilacji programu z listingu 3. zakończy się następującym błędem:

gcc -o app main.c
main.c:(.text+0x88): undefined reference to 'divide'
main.c:(.text+0x88): relocation truncated to fit: R_X86_64_PC32
against undefined symbol 'divide'
collect2: error: ld returned 1 exit status

Pomimo, że kompilator poprawnie dołączył nagłówek ***math_functions.h***, to próba odnalezienia definicji funkcji ***divide()***, wywołanej w funkcji *main()*, zakończyła się błędem (**undefined symbol 'divide'**). Nazwa ***ld*** wskazuje na błąd konsolidatora.

Poprawna kompilacja aplikacji może wyglądać następująco:

- jeżeli plik ***biblioteki*** położony jest w tym samym katalogu, co pliki źródłowe aplikacji:

  gcc -o app main.c libmath.lib
  gcc -o app main.c libmath.dll

- jeżeli plik ***biblioteki*** położony jest w innym katalogu niż pliki źródłowe aplikacji, należy skorzystać z flagi ***-L***:

  gcc -o app main.c libmath.lib -L[ścieżka_do_biblioteki]
  gcc -o app main.c libmath.dll -L[ścieżka_do_biblioteki]

Można zauważyć, że rozmiar pliku wykonywalnego (***app.exe***) jest większy w przypadku dołączania ***biblioteki statycznej*** niż ***biblioteki dynamicznej*** – funkcje ***biblioteki dynamicznej*** zostaną dołączone na etapie uruchomienia aplikacji.

Stosowanie ***bibliotek statycznych*** i ***dynamicznych*** ma swoje wady i zalety:

- ***biblioteki dynamiczne*** są dołączane do aplikacji na etapie jej uruchomienia, dzięki czemu kod ***biblioteki*** nie jest zawierany w kodzie wynikowym programu, zmniejszając rozmiar pliku wykonywalnego. Pojedyncza instancja ***biblioteki dynamicznej*** może być współdzielona przez wiele aplikacji jednocześnie. Wykorzystanie ***bibliotek dynamicznych*** wiąże się z dodatkowym narzutem czasowym wynikającym z wczytania i wykonania funkcji bibliotecznych

- ***biblioteki statyczne*** są zawierane w pliku wykonywalnym, zwiększając jego rozmiar. Dzięki temu, że ***biblioteka statyczna*** dołączana jest na etapie konsolidacji, może zachodzić optymalizacja rozmiaru pliku wykonywalnego przez dołączanie wyłącznie definicji funkcji bibliotecznych użytych w kodzie programu (a nie wszystkich dostępnych funkcji). ***Biblioteki statyczne*** nie posiadają dodatkowego narzutu czasowego wynikającego z wykonywania funkcji bibliotecznych

Warto również wspomnieć, że pliki ***.dll*** (*Windows*) i ***.so*** (*Unix*), choć koncepcyjnie podobne, są obsługiwane nieco inaczej. Mechanizm obsługi ***bibliotek dynamicznych*** w systemie Windows jest istotnie ograniczony w porównaniu z systemami Unix pod kątem obsługi offsetów symboli ***biblioteki dynamicznej*** (problem z odczytywaniem adresów funkcji i zmiennych bibliotecznych). Do poprawnego działania ***biblioteki*** wymagane jest deklarowanie symboli z użyciem atrybutu **__declspec(dllexport)**, np.:

```
1 __declspec(dllexport) void func();
```

Niektóre środowiska, jak **MinGW**, poza kompilatorami języków *C* i *C++* dostarczają również oprogramowanie stanowiące warstwę pośrednią między systemami Windows i Unix. Umożliwia ona automatyczne „tłumaczenie" kodu ***bibliotek dynamicznych .so*** na kod wspierany przez system operacyjny Windows (***.dll***). Dzięki temu kod ***biblioteki*** nie musi być jawnie deklarowany przy użyciu atrybutów **__declspec(dllexport)**, jeżeli posługujemy się kompilatorami ***gcc*** lub ***g++***.

2.2. Biblioteka standardowa

Zarówno język *C*, jak i *C++*, posiadają swoje ***biblioteki standardowe***, które stanowią integralną część **standardu ISO** (*ang. International Organization for Standardization*). ***API biblioteki standardowej*** zawiera się w szeregu plików nagłówkowych. Pliki nagłówkowe ***biblioteki standardowej języka C*** posiadają rozszerzenie ***.h***, np. ***stdio.h***, ***stdlib.h***, ***math.h***. Konwencja nazewnictwa nagłówków ***biblioteki standardowej języka C++*** odrzuca jakiekolwiek rozszerzenia plików, np. ***iostream***, ***memory***, ***string***, a w przypadku nagłówków zaadaptowanych z ***biblioteki standardowej języka C*** stosowany jest przedrostek ***c***, np. ***cmath***, ***ctime***. ***Biblioteka standardowa*** posiada jeden ściśle zdefiniowany ***interfejs***, ale wiele implementacji (*GNU libc*, *BSD libc*, itp.) i może być zarówno ***biblioteką statyczną***, jak i ***dynamiczną***.

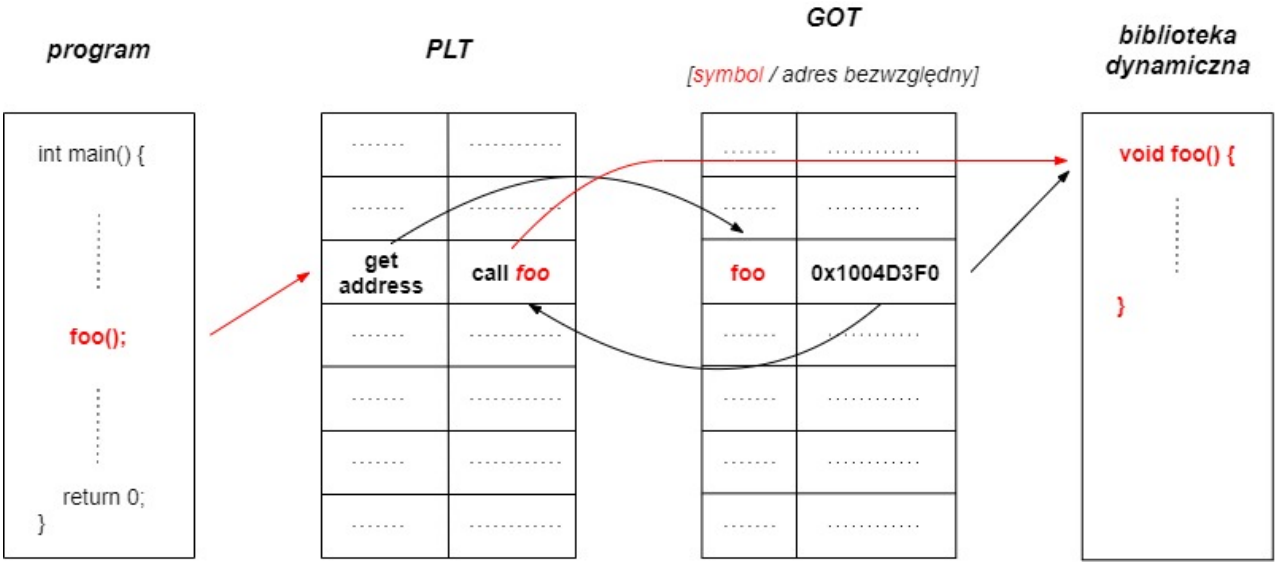
Celem istnienia ***biblioteki standardowej*** jest zapewnienie programistom sprawdzonych i zoptymalizowanych rozwiązań podstawowych algorytmów, struktur danych czy funkcji operujących na pamięci. ***Biblioteka standardowa*** jest automatycznie dołączana do programu podczas jego kompilacji. Aby przeprowadzić kompilację programu bez konsolidacji ***biblioteki standardowej*** należy (w przypadku kompilatorów ***gcc*** i ***g++***) skorzystać z flagi ***-nostdlib***:

```
gcc main.c -nostdlib -o app
```

2.3. Funkcje biblioteczne a pamięć programu

Kod ***bibliotek statycznych*** zawierany jest w wynikowym kodzie wykonywalnym aplikacji. W związku z tym, kod funkcji bibliotecznych położony jest razem z kodem funkcji programu w segmencie ***text*** (***code***). W przypadku ***bibliotek dynamicznych*** sprawa jest nieco bardziej skomplikowana. Kompilacja z użyciem flagi ***-fPIC*** wyklucza odwoływanie się do bezwzględnych adresów funkcji bibliotecznych. Problem ten rozwiązywany jest przez zastosowanie tzw. ***globalnej tablicy offsetów*** (*ang. global offset table, GOT*),

w której mapowane są *symbole* funkcji bibliotecznych na ich adresy bezwzględne. Adresy te nie są znane na etapie kompilacji programu, dlatego w momencie jego uruchomienia wywoływany jest ***konsolidator dynamiczny*** systemu operacyjnego (*ang. dynamic linker*), którego zadaniem jest wypełnienie komórek tablicy ***GOT***. ***Konsolidator dynamiczny*** jest w stanie obliczyć adresy bezwzględne funkcji bibliotecznych, ponieważ zna adresy wszystkich zaalokowanych segmentów pamięci. Adresy funkcji ***bibliotek dynamicznych*** mogą zostać umieszczone w różnych segmentach pamięci, ale są niezmienne w ramach pojedynczego wykonania programu. Odwołanie się do funkcji bibliotecznej zachodzi z wykorzystaniem ***tablicy powiązań*** (*ang. procedure linkage table, PLT*). W momencie wywołania funkcji sterowanie przekazywane jest do odpowiedniej komórki tablicy ***PLT***. Tam zachodzi odczytanie bezwzględnego adresu funkcji z tablicy ***GOT*** i wykonanie zawartych pod nim instrukcji [2]. Na rys. 2.1. zilustrowano schematyczną zasadę działania mechanizmu tablic ***PLT/GOT***.



Rys. 2.1. Schemat działania mechanizmu tablic *PLT/GOT*

W celu szczegółowej analizy pamięci programu należy w pierwszej kolejności wygenerować plik ***.map***. Można to osiągnąć przekazując do konsolidatora flagę ***-Map***. Przykładowe wywołanie:

gcc -o app main.c libmath.lib -Xlinker -Map=output.map

poskutkuje wygenerowaniem pliku ***output.map*** zawierającego układ pamięci programu. Opcja ***-Xlinker*** określa, że następne argumenty wywołania mają zostać przekazane do konsolidatora (*linkera*). Wygenerowany plik zawiera sekcję ***Memory Configuration***, w której znajdują się symbole programu w formacie:

Name Origin Length Attributes,

gdzie:

- **Name** – *Nazwa segmentu pamięci*;
- **Origin** – *Adres początkowy*;
- **Length** – *Rozmiar*;
- **Attributes** – *Atrybuty.*

W przypadku konsolidacji ***statycznej biblioteki libmath*** przez aplikację z listingu 3., plik ***output.map*** będzie zawierał informacje o położeniu funkcji bibliotecznych w segmencie pamięci ***.text***:

```
1 .text    0x0000000100401140        0xe0 libmath.lib(
     math_functions.o)
2                0x0000000100401140             add
3                0x000000010040115a             subtract
4                0x0000000100401174             multiply
5                0x000000010040118e             divide
6                0x00000001004011e5             modulus
```

Dołączony kod ***biblioteki*** zwiększa rozmiar aplikacji o 224 B (0xe0). Wywołana w funkcji *main()* funkcja biblioteczna ***divide()*** leży pod adresem 0x000000010040118e i zajmuje maksymalnie 87 B (0x57; różnica adresów funkcji ***divide()*** i ***modulus()***). W przypadku konsolidacji ***biblioteki dynamicznej*** plik ***output.map*** zawiera tylko jedną funkcję ***biblioteki libmath*** – ***divide()***. Tylko ta funkcja jest wykorzystywana przez aplikację:

```
1 .text    0x0000000100401790        0x8 d000001.o
2          0x0000000100401790            divide
```

Z analizy pliku ***output.map*** wynika, że również w tym przypadku leży ona w segmencie ***.text***, ale pod adresem 0x0000000100401790 i zajmuje 8 B. Ta „anomalia" wymaga komentarza. Jeżeli implementacja funkcji w obu przypadkach była taka sama, to skąd wzięła się różnica w rozmiarze kodu funkcji w pamięci komputera? Aby to sprawdzić należy posłużyć się programem do analizy plików obiektowych, np. *GNU objdump*. Wywołanie:

objdump -CS app.exe >"C:\User\dump.txt"

przeprowadzi ***deasemblację***[1] programu ***app.exe*** i zapisze rezultat do pliku tekstowego ***dump.txt***, leżącego pod ścieżką C:\User\. Zastosowane w przykładzie flagi określają odpowiednio:

- ***C*** – przeprowadź dekodowanie udekorowanych symboli (patrz: Ćw. 5, Dekorowanie nazw);
- ***S*** – połącz kod źródłowy z kodem asemblera (dla łatwiejszego nawigowania w utworzonym pliku).

W przypadku ***biblioteki statycznej*** plik ***dump.txt*** zawiera kod asemblera funkcji ***divide()***:

[1] tłumaczenie kodu maszynowego na kod asemblera

```
000000010040118e <divide>:
   10040118e: 55                    push   %rbp
   10040118f: 48 89 e5              mov    %rsp,%rbp
   100401192: 48 83 ec 30           sub    $0x30,%rsp
   100401196: f2 0f 11 45 10        movsd  %xmm0,0x10(%
   rbp)
   10040119b: f2 0f 11 4d 18        movsd  %xmm1,0x18(%
   rbp)
   1004011a0: 4c 89 45 20           mov    %r8,0x20(%
   rbp)
   1004011a4: 66 0f ef c0           pxor   %xmm0,%xmm0
   1004011a8: 66 0f 2e 45 18        ucomisd 0x18(%rbp)
   ,%xmm0
   1004011ad: 7a 18                 jp     1004011c7 <
   divide+0x39>
   1004011af: 66 0f ef c0           pxor   %xmm0,%xmm0
   1004011b3: 66 0f 2e 45 18        ucomisd 0x18(%rbp)
   ,%xmm0
   1004011b8: 75 0d                 jne    1004011c7 <
   divide+0x39>
   1004011ba: 48 8b 45 20           mov    0x20(%rbp),%
   rax
   1004011be: ff d0                 callq  *%rax
   1004011c0: 66 48 0f 7e c0        movq   %xmm0,%rax
   1004011c5: eb 0f                 jmp    1004011d6 <
   divide+0x48>
   1004011c7: f2 0f 10 45 10        movsd  0x10(%rbp),%
   xmm0
   1004011cc: f2 0f 5e 45 18        divsd  0x18(%rbp),%
   xmm0
   1004011d1: 66 48 0f 7e c0        movq   %xmm0,%rax
```

```
21    1004011d6: 48 89 45 f8          mov    %rax,-0x8(%
      rbp)
22    1004011da: f2 0f 10 45 f8       movsd  -0x8(%rbp),%
      xmm0
23    1004011df: 48 83 c4 30          add    $0x30,%rsp
24    1004011e3: 5d                   pop    %rbp
25    1004011e4: c3                   retq
```

Warto zwrócić uwagę, że adres funkcji ***divide()*** (0x000000010040118e) jest zgodny z adresem zawartym w pliku ***output.map***. Widać teraz również, że rozmiar pamięci który zajmuje funkcja wynosi dokładnie 87 B. Dla ***biblioteki dynamicznej*** kod funkcji ***divide()*** zawarty w pliku ***dump.txt*** różni się znacząco:

```
1 0000000100401790 <divide>:
2    100401790: ff 25 ea 69 00 00     jmpq   *0x69ea(%
     rip)        # 100408180 <__imp_divide>
3    100401796: 90                    nop
4    100401797: 90                    nop
5    100401798: 0f 1f 84 00 00 00 00  nopl   0x0(%rax
     ,%rax,1)
6    10040179f: 00
```

Pierwsze polecenie asemblera, jakie wykonywane jest w ramach funkcji to **jmpq *0x69ea(%rip)**. Jest to instrukcja skoku do adresu zapisanego pośrednio jako suma stałej i wartości zapisanej pod zmienną ***rip***: **0x69ea + %rip**. Pod tym adresem znajduje się symbol o identyfikatorze **__imp_divide**. Symbol ten nie ma więcej wystąpień w pliku ***dump.txt***, można go jednak odszukać przenosząc się ponownie do pliku ***output.map***:

```
1 .idata$5    0x0000000100408180     0x8 d000001.o
2             0x0000000100408180          __imp_divide
```

Segment ***.idata*** to segment pamięci zawierający listę symboli importowanych z ***bibliotek dynamicznych*** (*ang. imports data*), w tym importowanych funkcji (tu: ***divide()***). Podczas wywołania funkcji ***divide()*** przez program z listingu 3., w miejsce symbolu **__imp_divide** podstawiany jest adres bezwzględny funkcji znajdującej się w instancji ***biblioteki dynamicznej***, obliczony przez mechanizm ***PLT/GOT***. Jest to właściwa implementacja funkcji ***divide()***. Funkcja ***divide()*** o rozmiarze 8 B, znajdująca się w pamięci aplikacji pod adresem 0x0000000100401790, stanowi jedynie adapter, służący do wywołania kodu funkcji bibliotecznej.

3. Program ćwiczenia

Zadanie 1. Dany jest interfejs ***math_utils.h*** biblioteki dynamicznej ***libmath***. Biblioteka udostępnia dwie funkcje:

- ***int gcd(int x, int y)*** – wyznaczającą największy wspólny dzielnik dwóch liczb całkowitych;
- ***int lcm(int x, int y)*** – wyznaczającą najmniejszą wspólną wielokrotność dwóch liczb całkowitych.

W ramach zadania:

- umieść implementacje funkcji ***gcd()*** oraz ***lcm()*** w pliku ***math_utils.c***, a następnie skompiluj otrzymany kod źródłowy do postaci **biblioteki dynamicznej**;
- napisz aplikację, która pobierze z klawiatury dwie liczby całkowite, a następnie, wykorzystując bibliotekę ***libmath***, wyznaczy NWD i NWW tych liczb.

Zadanie 2. Dany jest interfejs (***sort.h***) oraz implementacja (***sort.cpp***) biblioteki ***libsort***. Biblioteka udostępnia trzy funkcje realizujące odpowied-

nie algorytmy sortowania: ***bubbleSort()***, ***quickSort()*** oraz ***mergeSort()***. W ramach zadania:

- skompiluj kod źródłowy bilioteki ***libsort*** do postaci **biblioteki statycznej**;
- napisz aplikację, która korzystając z biblioteki ***libsort***, posortuje rosnąco trzy tysiącelementowe tablice liczb zmiennoprzecinkowych podwójnej precyzji. Każdą z tablic posortuj za pomocą innej funkcji z biblioteki ***libsort***. Tablice zainicjalizuj wykorzystując generator liczb pseudolosowych (patrz: Ćw. 3);
- zbadaj położenie adresów funkcji ***biblioteki statycznej libsort*** w wirtualnej przestrzeni adresowej (położenie względem segmentów pamięci).

Zadanie 3. Skompiluj plik ***sort.cpp*** z **Zadania 2.** do postaci **biblioteki dynamicznej**, a następnie:

- porównaj rozmiar plików wykonywalnych obu aplikacji;
- porównaj czas wykonania funkcji sortujących dla obu aplikacji (patrz: Ćw. 5) [*Uwaga: aby wielokrotnie wylosować ten sam zbiór liczb, zainicjalizuj PRNG za pomocą stałej wartości, np. srand(0)*], w tym celu rozpatrz następujące warunki:
  - rozmiar sortowanego zbioru liczb równy odpowiednio {10, 100, 1000, 10000, 100000} elementów;
  - sortowanie w kolejności rosnącej dla zbioru nieposortowanego oraz dla zbioru wstępnie posortowanego w kolejności malejącej (najgorszy przypadek);
  - wyznacz statystykę czasu wykonania funkcji ze 100 powtórzeń dla pojedynczego przypadku testowego.

  Otrzymane wyniki przedstaw na wykresach korzystając z dowolnego arkusza kalkulacyjnego.

4. Dodatek

4.1. Biblioteki dynamiczne jako wtyczki

Wtyczkami (*ang. plug–ins*) nazywa się moduły programistyczne wczytywane w trakcie działania programu w celu rozszerzenia bądź zmiany jego funkcjonalności. W językach *C/C++* takimi modułami mogą być ***biblioteki dynamiczne***. W zależności od systemu operacyjnego, w ramach którego ma być uruchamiany program, do wczytywania bibliotek mogą posłużyć odpowiednio funkcje ***LoadLibraryA()*** (*Windows, Win32 API, windows.h*) oraz ***dlopen()*** (*Unix, dlfcn.h*).

Program obsługujący ***bibliotekę libmath*** z listingu 1. w systemie operacyjnym *Windows* przedstawiono na listingu 4. (zawartość pliku *main.c*). Funkcja ***LoadLibraryA()*** jako argument przyjmuje nazwę (lub ścieżkę do) wczytywanego ***modułu DLL*** i zwraca uchwyt (wskaźnik) typu ***HINSTANCE***. Jeżeli moduł został wczytany poprawnie, to zwrócony wskaźnik ma wartość różną od **NULL**. Funkcja ***GetProcAddress()*** zwraca adres, pod którym znajduje się określony symbol z wczytanego modułu. Na listingu 4. pobierany jest adres do funkcji ***multiply*** z ***biblioteki libmath***. Istotne jest, aby symbol, przekazany do funkcji ***GetProcAddress()*** za pomocą łańcucha znaków, był w pełni zgodny z ***interfejsem biblioteki***. Zwrócony adres należy rzutować na typ wskaźnika funkcyjnego odpowiadającego nagłówkowi funkcji bibliotecznej. Jeżeli adres jest różny od **NULL**, to symbol został pobrany poprawnie i można wywołać określoną funkcję biblioteczną wykorzystując wskaźnik funkcyjny. Po zakończeniu pracy z modułem należy go zwolnić wywołując funkcję ***FreeLibrary()***, przyjmującą uchwyt zwrócony z funkcji ***LoadLibraryA()***. Funkcja ***FreeLibrary()*** usuwa moduł z przestrzeni adresowej programu i zwraca wartość różną od 0 w przypadku powodzenia. Aby korzystać z opisanych funkcji należy zaimportować nagłówek **windows.h**.

```c
#include <stdio.h>
#include <windows.h>

#include "math_functions.h"

// Typ wskaznika funkcyjnego zgodny z naglowkiem funkcji multiply z biblioteki libmath
typedef double (*FcnPtr)(double, double);

int main() {
  // Wczytaj modul biblioteki libmath.dll
    HINSTANCE library = LoadLibraryA(TEXT("libmath.dll"));

  // Jezeli poprawnie wczytano modul biblioteki
  if (library != NULL) {
    // Pobierz adres do funkcji multiply z biblioteki libmath
    FcnPtr handle = (FcnPtr) GetProcAddress(library, "multiply");

    // Jezeli pobrany adres jest poprawny
    if (handle != NULL) {
      // Wywolaj funkcje biblioteczna przez wskaznik funkcyjny
      printf("3.78 * 7.12 = %f\n", handle(3.78, 7.12));
    } else
      printf("Failed to get the address of the library function\n");

```

```
25      // Zwolnij modul biblioteki libmath.dll
26      if (FreeLibrary(library) == 0)
27        printf("Failed to release the DLL module\n");
28    } else
29      printf("Failed to load the DLL module\n");
30
31    return 0;
32  }
```

Listing 4. Użycie funkcji bibliotecznych *libmath* w postaci wtyczki w systemie Windows

Pracując w systemach *Unix* można wczytywać moduły ***bibliotek dynamicznych*** w czasie wykonania programu wykorzystując funkcję ***dlopen()*** z ***biblioteki libdl***. Program obsługujący ***bibliotekę libmath*** z listingu 1. przedstawiono na listingu 5. Funkcja ***dlopen()*** jako argumenty przyjmuje nazwę (lub ścieżkę do) wczytywanego ***modułu biblioteki*** oraz flagi konfigurujące sposób obsługi modułu. Na listingu 5. zastosowano flagę **RTLD_LAZY**, która określa, że wiązane będą wyłącznie symbole biblioteczne wywoływane w kodzie aplikacji [1]. Funkcja ***dlopen()*** zwraca wskaźnik typu ***void ****, którego wartość jest różna od **NULL**, jeżeli moduł został wczytany poprawnie. Funkcja ***dlsym()*** stanowi odpowiednik funkcji ***GetProcAddress()*** z systemu *Windows*. Weryfikacja poprawności pobranego adresu do symbolu z ***modułu biblioteki*** odbywa się dodatkowo przez sprawdzenie ostatniego błędu ***biblioteki libdl***. Służy do tego funkcja ***dlerror()***, która zwraca łańcuch znaków zawierający opis ostatniego błędu lub wartość ***NULL*** w przypadku braku błędów. Aby zwolnić wczytany ***moduł biblioteki*** należy posłużyć się funkcją ***dlclose()***, zwracającą wartość równą 0 w przypadku powodzenia. Aby korzystać z opisanych funkcji należy zaimportować nagłówek **dlfcn.h**.

```c
#include <stdio.h>
#include <dlfcn.h>

#include "math_functions.h"

// Typ wskaznika funkcyjnego zgodny z naglowkiem funkcji multiply z biblioteki libmath
typedef double (*FcnPtr)(double, double);

int main() {
  // Wczytaj modul biblioteki libmath.dll
    void * library = dlopen("libmath.so", RTLD_LAZY);

  // Jezeli poprawnie wczytano modul biblioteki
  if (library != NULL) {
    // Wyczysc dotychczasowe flagi bledow
    dlerror();

    // Pobierz adres do funkcji multiply z biblioteki libmath
    FcnPtr handle = (FcnPtr) dlsym(library, "multiply");

    // Jezeli pobrany adres jest poprawny
    if (handle != NULL && dlerror() == NULL) {
      // Wywolaj funkcje biblioteczna przez wskaznik funkcyjny
      printf("3.78 * 7.12 = %f\n", handle(3.78, 7.12));
    } else
```

```
26        printf("Failed to get the address of the
    library function\n");
27
28      // Zwolnij modul biblioteki libmath.dll
29      if (dlclose(library) != 0)
30        printf("Failed to release the library module\n
    ");
31    } else
32      printf("Failed to load the library module\n");
33
34    return 0;
35  }
```

Listing 5. Użycie funkcji bibliotecznych *libmath* w postaci wtyczki w systemie Unix

W obu przypadkach ***biblioteka libmath*** została wstępnie skompilowana do postaci ***biblioteki dynamicznej*** (***libmath.dll*** w systemie *Windows*, ***libmath.so*** w systemie *Unix*). Ponieważ plik biblioteki wczytywany jest dynamicznie w trakcie działania programu, to kompilację pliku wykonywalnego aplikacji można przeprowadzić wywołując:

gcc -o app main.c (w systemie *Windows*)
gcc -o app main.c -ldl (w systemie *Unix*; konsolidacja ***biblioteki libdl***)

Literatura

[1] *dlopen(3) - Linux man page*. URL: `https://linux.die.net/man/3/dlopen`.

[2] *Dynamic Linking*. URL: `https://refspecs.linuxfoundation.org/ELF/zSeries/lzsabi0_zSeries/x2251.html`.