Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Laboratorium informatyki

Ćwiczenie nr 9. Typowy układ pamięci programu i operacje na pamięci

Zagadnienia do opracowania:

- architektura harwardzka i architektura von Neumanna
- segmenty pamięci, ich przeznaczenie i ułożenie w przestrzeni adresowej komputera
- struktury
- aliasy typów
- operacje na pamięci w językach *C* i *C++*

Spis treści

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z typowym układem pamięci programu – przeznaczeniem i ułożeniem w przestrzeni adresowej komputera poszczególnych segmentów pamięci oraz podstawowymi operacjami na pamięci.

2. Wprowadzenie

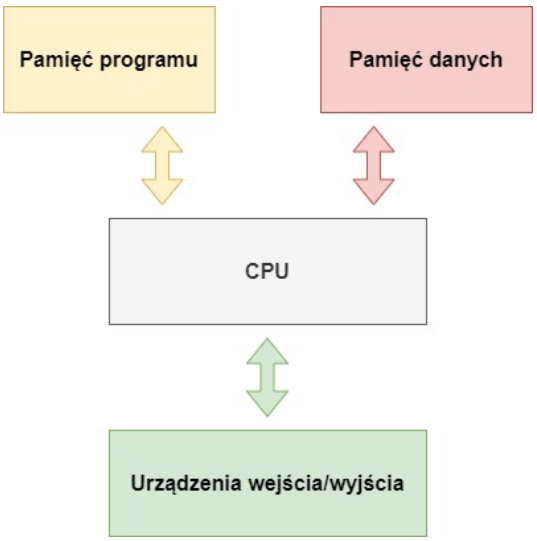
2.1. Architektura komputerów a organizacja pamięci

Architektura komputera ma wpływ na organizację pamięci i szybkość wykonywania operacji. Ze względu na sposób organizacji pamięci w komputerze można wyróżnić trzy podstawowe architektury:

- ***harwardzką***;
- ***von Neumanna (Princeton)***;
- ***zmodyfikowaną harwardzką (mieszaną)***.

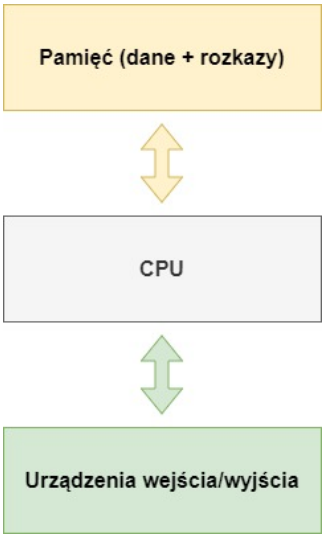
Architektura harwardzka charakteryzuje się rozdzieloną pamięcią programu (rozkazów) i pamięcią danych (rozdzielona przestrzeń adresowa rozkazów i danych). Dzięki temu procesor może jednocześnie pobierać dane i rozkazy, co skutkuje zwiększeniem szybkości wykonywanych operacji. Jednakże takie rozwiązanie uniemożliwia zmianę wykonywanego na komputerze programu (brak możliwości zapisu nowych instrukcji do pamięci programu) – komputer dostarczany jest ze stałym oprogramowaniem. ***Architektura harwardzka*** została schematycznie przedstawiona na rys. 2.1. ***Architektura harwardzka*** była stosowana w początkowych generacjach komputerów (np. *Harvard Mark I*), a obecnie wykorzystywana jest głównie w mikrokontrolerach jednoukładowych oraz procesorach sygnałowych.

Zmodyfikowana architektura harwardzka (mieszana) charakteryzuje się rozdzieloną pamięcią programu i pamięcią danych, ale wykorzystuje wspólne magistrale: danych i adresową. Dzięki temu możliwe jest pobieranie rozkazów, analogicznie jak w przypadku danych.



Rys. 2.1. Model architektury harwardzkiej

Architekturę von Neumanna, zwaną również ***architekturą Princeton***, wyróżnia wspólna pamięć dla instrukcji i danych. Możliwość wielokrotnego programowania komputera została zrealizowana kosztem braku możliwości jednoczesnego pobierania rozkazów i danych. Schemat ***architektury von Neumanna*** przedstawiono na rys. 2.2. ***Architektura von Neumanna*** jest powszechnie stosowana w konstrukcji komputerów uniwersalnych.



Rys. 2.2. Model architektury von Neumanna

Dalsza część tej instrukcji będzie odnosić się do komputera o ***architekturze von Neumanna***.

2.2. Układ pamięci programu

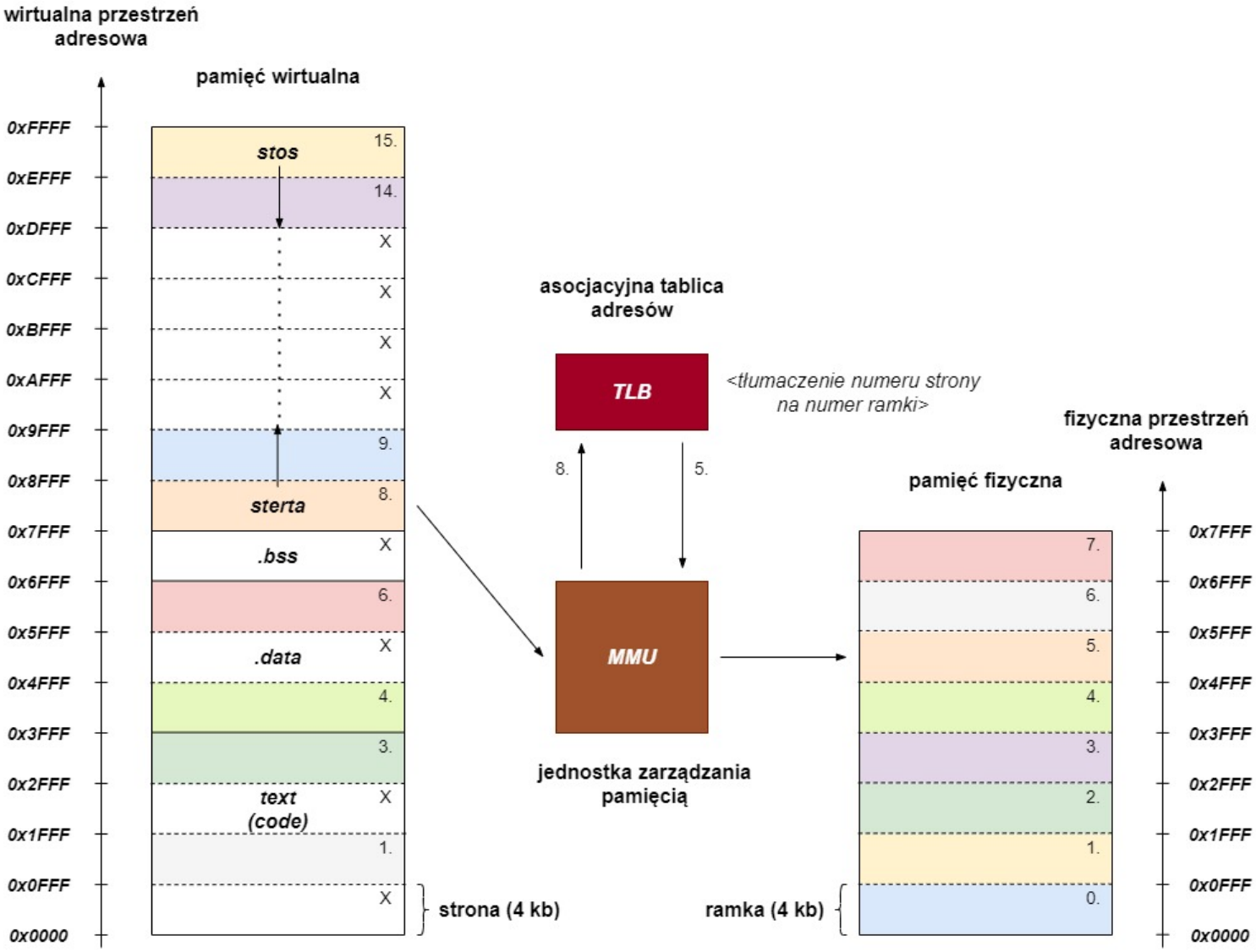
Standard języków *C/C++* nie określa jak powinien wyglądać układ pamięci programu, delegując odpowiedzialność za mapowanie zmiennych na odpowiednie segmenty pamięci do określonej implementacji kompilatora. Standard języka zakłada, że:

- w momencie deklaracji **zmiennej lokalnej** automatycznie alokowana jest potrzebna pamięć;
- pamięć zaalokowana za pomocą ***malloc()*** (***new***) może zostać zwolniona za pomocą ***free()*** (***delete***);
- w przypadku **zmiennych statycznych** pamięć alokowana jest przed wywołaniem funkcji ***main()***.

Jednakże na podstawie najpopularniejszych implementacji kompilatorów i architektur procesorów można podjąć próbę przedstawienia **typowego układu**

pamięci programu.

W pierwszej kolejności należy jednak uzmysłowić sobie, że program komputerowy **nie operuje na fizycznych adresach pamięci**. Układ elektroniczny nazywany ***jednostką zarządzania pamięcią*** (*ang. memory management unit, MMU*) przydziela programowi jego własną ***wirtualną przestrzeń adresową*** (*ang. virtual address space, VAS*) – **adresy logiczne**. Pamięć ta jest podzielona na bloki o stałej długości zwane ***stronami*** (*ang. virtual pages*). ***Strony*** stanowią ciągłe zakresy adresów pamięci, a ich rozmiar wynosi typowo od 512 B do 1 GB. **Pamięć fizyczna** podzielona jest analogicznie na bloki zwane ***ramkami*** (*ang. page frames*), których rozmiar jest równy rozmiarowi ***stron***. **Strony pamięci wirtualnej** są mapowane na **ramki pamięci fizycznej** przez ***MMU***. W wyniku tego pamięć, która z punktu widzenia aplikacji jest ciągła (np. w przypadku zmiennych tablicowych), w rzeczywistości może być podzielona na różne sektory pamięci ***RAM***. Translację adresów logicznych na fizyczne schematycznie przedstawiono na rys. 2.3. W tym przykładzie rozmiar ***stron***, a więc i ***ramek***, wynosi 4 kb (4096 b). Pierwsza ***strona*** zawiera adresy w przedziale 0x0000 – 0x0FFF (4095), druga 0x1000 (4096) – 0x1FFF (8191), itd. ***Wirtualna przestrzeń adresowa*** ma rozmiar 64 kb (16 ***stron***), natomiast ***fizyczna przestrzeń adresowa*** ma rozmiar 32 kb (8 ***ramek***). Oznacza to, że **nie wszystkie *strony* muszą być jednocześnie zmapowane na *ramki***, aby uruchomić program [10]. Mapowanie ***pamięci wirtualnej*** na ***pamięć fizyczną*** z rys. 2.3. przedstawiono w tabeli 1. Rzecz jasna w rzeczywistych systemach operacyjnych przestrzenie adresowe są dużo większe niż w opisanym przykładzie (rzędu Gb).



Rys. 2.3. Translacja adresów logicznych na fizyczne przez jednostkę zarządzania pamięcią (MMU)

Tabela 1. Mapowanie stron pamięci wirtualnej na ramki pamięci fizycznej (na podstawie rys. 2.3.)

Nr strony	**Zakres adresów wirtualnych**	**Nr ramki**	**Zakres adresów fizycznych**
0	0x0000 – 0x0FFF	–	–
1	0x1000 – 0x1FFF	6	0x6000 – 0x6FFF
2	0x2000 – 0x2FFF	–	–
3	0x3000 – 0x3FFF	2	0x2000 – 0x2FFF
4	0x4000 – 0x4FFF	4	0x4000 – 0x4FFF
5	0x5000 – 0x5FFF	–	–
6	0x6000 – 0x6FFF	7	0x7000 – 0x7FFF
7	0x7000 – 0x7FFF	–	–
8	0x8000 – 0x8FFF	5	0x5000 – 0x5FFF
9	0x9000 – 0x9FFF	0	0x0000 – 0x0FFF
10	0xA000 – 0xAFFF	–	–
11	0xB000 – 0xBFFF	–	–
12	0xC000 – 0xCFFF	–	–
13	0xD000 – 0xDFFF	–	–
14	0xE000 – 0xEFFF	3	0x3000 – 0x3FFF
15	0xF000 – 0xFFFF	1	0x1000 – 0x1FFF

Kiedy program komputerowy odwołuje się do ***adresu pamięci wirtualnej***, ***MMU*** przeprowadza jego tłumaczenie z wykorzystaniem asocjacyjnej tablicy adresów ***TLB*** (*ang. translation lookaside buffer*). Jeżeli program odwoła się do ***wirtualnego obszaru pamięci***, który nie ma mapowania w pamięci fizycznej (symbol **X** na rys. 2.3.), to system operacyjny dostaje sygnał ***page fault***. W wyniku tego przeprowadzane jest mapowanie zadanej ***strony w pamięci wirtualnej*** na aktualnie niewykorzystywaną ***ramkę w pamięci fizycznej***, a przerwana instrukcja wykonywana jest ponownie. Dla każdej ***strony MMU*** przechowuje informacje czy istnieje mapowanie na ***pamięć fizyczną*** oraz czy jest ona w użyciu (nastąpiło odwołanie do

adresu leżącego w zakresie ***strony***). Służą do tego odpowiednio **bit obecności** (*ang. present bit*) oraz **bit użycia** (*ang. accessed bit*).

Pamięć cyfrową, udostępnianą programowi przez komputer (lub mikrokontroler), można podzielić na ulotną ***pamięć o dostępnie swobodnym*** (*ang. random-access memory, RAM*) oraz nieulotną ***pamięć tylko do odczytu*** (*ang. read-only memory, ROM*). W przypadku komputerów osobistych (*PC*) cała wirtualna przestrzeń adresowa leży najczęściej w obrębie pamięci ***RAM***; niektóre segmenty mogą być dodatkowo oznaczone jako tylko do odczytu. W przypadku mikrokontrolerów populane jest umieszczanie skompilowanego kodu maszynowego i wyrażeń stałych (segmenty ***.rodata*** i ***text***) wewnątrz pamięci ***ROM***, którą stanowi najczęściej pamięć ***Flash*** lub ***EEPROM*** (*ang. electrically erasable programmable ROM*) – pamięć kasowalna elektrycznie. Pamięć ***RAM*** na mikrokontrolerach ma często ograniczony rozmiar w stosunku do pamięci tylko do odczytu. Z tego względu **bardzo istotna jest optymalizacja kodu przez stosowanie specyfikatora *const*** z wyrażeniami, których wartość jest stała przez cały czas trwania programu, ponieważ mogą być wówczas przechowywane w pamięci ***ROM***.

2.2.1. Stos

Stos (*ang. stack*) to segment pamięci zrealizowany w postaci ***liniowej struktury danych***, w której elementy są dodawane i usuwane z jej wierzchołka. Adres ostatnio dodanej zmiennej wskazywany jest przez ***wskaźnik wierzchołka stosu*** (*ang. stack pointer*). Zmienne alokowane na ***stosie*** są zwalniane automatycznie, bez ingerencji programisty. Na ***stosie*** odkładane są:

- zmienne lokalne alokowane statycznie (*ale nie zmienne statyczne!*),
- adresy powrotu z funkcji,
- kopie argumentów wywołania funkcji (w tym argumenty funkcji *main()*),

- wartości zwracane z funkcji.

Ostatni element umieszczony na ***stosie*** jest zarazem pierwszym elementem, który zostanie ze ***stosu*** ściągnięty. Stanowi to realizację bufora ***LIFO*** (*ang. Last In, First Out*). Zostało to zaprezentowane na listingu 1. Zakres wartości umieszczonych na ***stosie*** w ramach wywołania pojedynczej funkcji (w tym również adres powrotu z funkcji) nazywa się ***ramką stosu*** (*ang. stack frame*).

```
#include <iostream>

void displayStackFrame(int a, float b, short c) {
    int x = 2;
    float y = 5.5;
    short z = 112;
    std::cout << "Print variables from stack frame"
   << std::endl;
    std::cout << &x << std::endl;
    std::cout << &y << std::endl;
    std::cout << &z << std::endl;
    std::cout << &a << std::endl;
    std::cout << &b << std::endl;
    std::cout << &c << std::endl;
}

void displayStackFrame2(int a, float b, short c) {
    int x = 3;
    float y = 2.0;
    short z = 0;
    std::cout << "Print variables from stack frame"
   << std::endl;
    std::cout << &x << std::endl;
```

```
22      std::cout << &y << std::endl;
23      std::cout << &z << std::endl;
24      std::cout << &a << std::endl;
25      std::cout << &b << std::endl;
26      std::cout << &c << std::endl;
27  }
28
29  int main() {
30      displayStackFrame(0, 2.0, 5);
31      displayStackFrame2(3, 5.5, 1);
32      return 0;
33  }
```

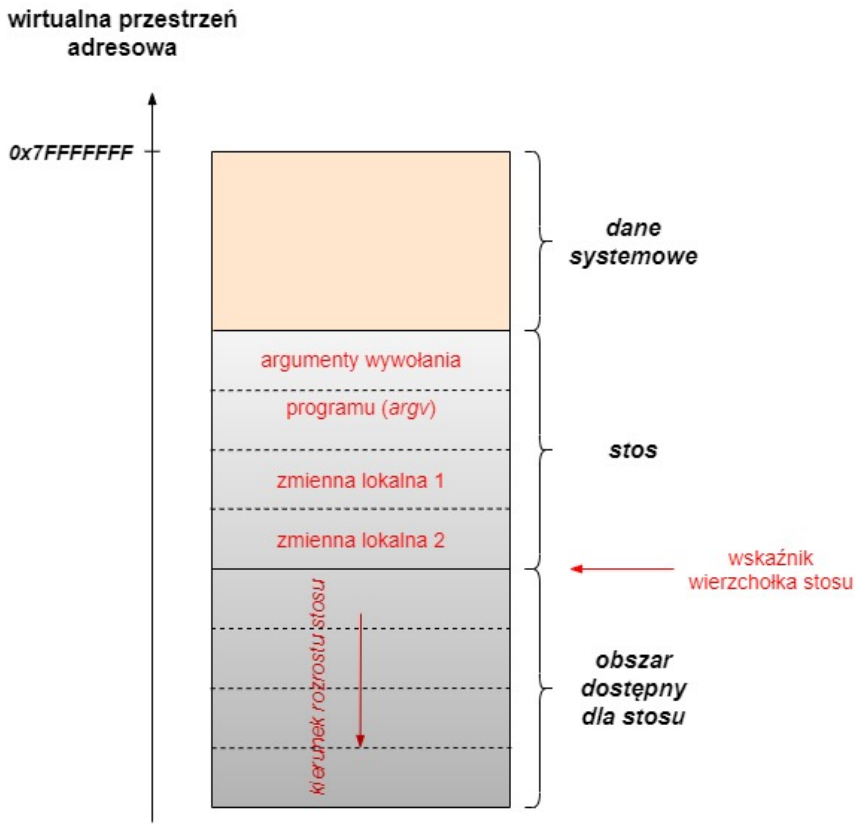
Listing 1. Stos jako bufor LIFO

Wynik wywołania programu z listingu 1. może wyglądać następująco:

```
1  Print variables from stack frame
2  0x7ffffb1c
3  0x7ffffb18
4  0x7ffffb16
5  0x7ffffb0c
6  0x7ffffb08
7  0x7ffffb06
8  Print variables from stack frame
9  0x7ffffb1c
10 0x7ffffb18
11 0x7ffffb16
12 0x7ffffb0c
13 0x7ffffb08
14 0x7ffffb06
```

Widać stąd, że po wywołaniu funkcji ***displayStackFrame()*** na stosie została zaalokowana pamięć dla trzech zmiennych lokalnych, kolejno pod adresami: 0x7ffffb1c, 0x7ffffb18 i 0x7ffffb16 oraz dla trzech kopii argumentów wywołania funkcji (adresy: 0x7ffffb0c, 0x7ffffb08 i 0x7ffffb06). Po wyjściu z funkcji pamięć została zwolniona (***wskaźnik wierzchołka stosu*** został przesunięty z powrotem przed adres 0x7ffffb1c). Dzięki temu po wywołaniu ***displayStackFrame2()*** zmienne lokalne oraz kopie argumentów w obrębie tej funkcji alokowane są pod tymi samymi adresami pamięci.

Najpopularniejsza implementacja *stosu* zakłada jego lokalizację **w górnym zakresie wirtualnej przestrzeni adresowej**. Rozmiar pamięci ***stosu*** jest znany na etapie kompilacji. Kolejne elementy dodawane na ***stos*** powodują jego rozrost w **kierunku niższych adresów**. Zostało to schematycznie przedstawione na rys. 2.4. W tym przypadku przestrzeń adresowa rozciąga się między adresami 0x00000000 a 0x7FFFFFFF (dziesiętnie 2147483647 – maksymalna wartość, jaką może przyjmować czterobajtowa zmienna typu *signed int*). W pierwszej kolejności na ***stosie*** alokowane są **argumenty wywołania programu** – argumenty, z którymi została wywołana funkcja *main()* (*int argc, char ** argv*). Następie alokowane są kolejno deklarowane zmienne lokalne, kopie argumentów wywołania innych funkcji, ich wartości zwracane i adresy powrotu. Możliwe jest ***przepełnienie stosu*** (*ang. stack overflow*) w wyniku przekroczenia obszaru pamięci przeznaczonego na rozrost ***stosu***. Może do niego dojść np. w wyniku zbyt długiego ciągu rekurencyjnych wywołań funkcji lub deklaracji lokalnej tablicy zmiennych o zbyt dużym rozmiarze. W przypadku programów uruchamianych w ramach systemu operacyjnego na szczycie przestrzeni adresowej (nad ***stosem***) umiejscowione są **dane systemowe** [8].

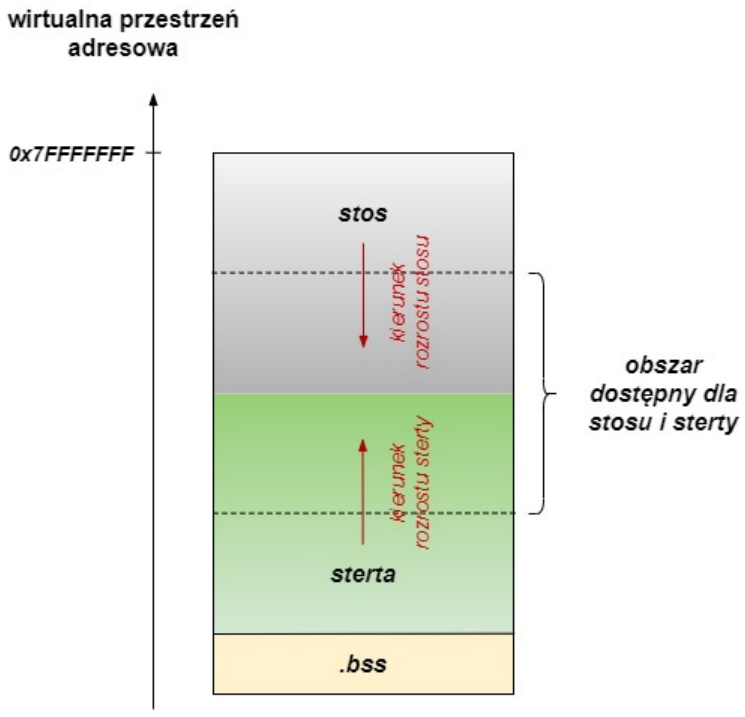


Rys. 2.4. Najpopularniejsze położenie stosu w przestrzeni adresowej komputera (mikrokontrolera)

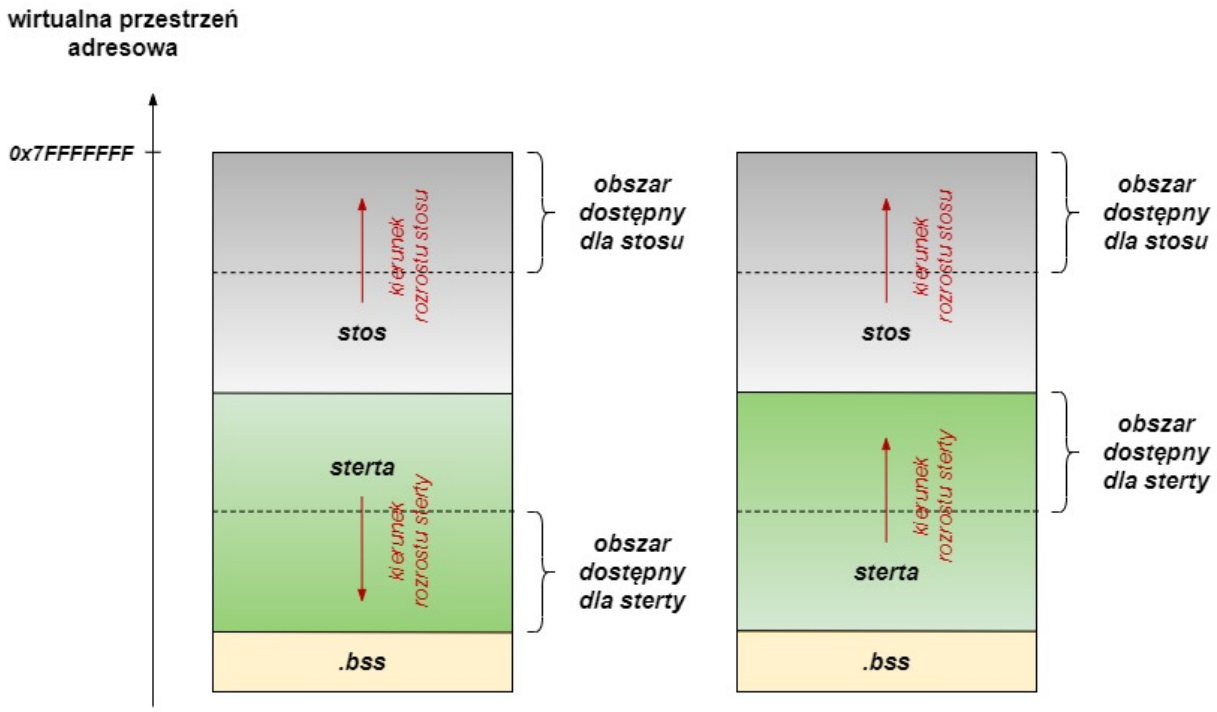
2.2.2. Sterta

Sterta (*ang. heap*) to segment pamięci przechowujący **zmienne alokowane dynamicznie**, stąd rozmiar pamięci alokowanej na ***stercie*** nie jest znany na etapie kompilacji programu. Dane alokowane na ***stercie*** nie są uporządkowane ani czyszczone w sposób automatyczny (między wywołaniami funkcji), jak ma to miejsce w przypadku ***stosu***. Możliwa jest fragmentacja pamięci ***sterty***. Konstrukcja ***sterty*** powoduje, że operacje na zmiennych zaalokowanych na niej są z reguły **wolniejsze** niż w przypadku zmiennych zaalokowanych na ***stosie*** (zmienne alokowane na ***stercie*** znajdują się dalej od pamięci podręcznej procesora – ***cache***). **Najczęściej *sterta*** zaczyna się na końcu przestrzeni adresowej segmentu ***.bss*** i rozrasta się w **kierunku**

wyższych adresów (w kierunku ***stosu***). ***Sterta*** współdzieli dostępny (na rozrost) obszar pamięci ze ***stosem***. W związku z tym teoretycznie możliwe jest **nałożenie się segmentów *stosu* i *sterty*** w wyniku jej przepełnienia (*ang. heap overflow*). Względne ułożenie ***stosu*** i ***sterty*** w przestrzeni adresowej komputera (mikrokontrolera) zostało schematycznie przedstawione na rys. 2.5. Takie ułożenie obu segmentów pamięci ma swoje uzasadnienie ze względów optymalizacyjnych. Inne kombinacje położenia ***stosu*** i ***sterty*** znacznie ograniczałyby dostępną pamięć dla obu segmentów. Szczególnie znaczenie ma to w przypadku mikrokontrolerów, gdzie dostępny rozmiar pamięci ***RAM*** jest zazwyczaj dużo mniejszy w porównaniu do rozmiaru pamięci ***ROM***. Inne (nieoptymalne) przykłady ułożenia ***stosu*** i ***sterty*** przedstawiono na rys. 2.6. Co więcej, inne rozwiązania wiążą się z niebezpieczeństwem nadpisania pozostałych segmentów pamięci przez przepełniony ***stos*** lub ***stertę***.



Rys. 2.5. Najpopularniejsze położenie sterty w przestrzeni adresowej komputera (mikrokontrolera)



Rys. 2.6. Nieoptymalne położenie stosu i sterty

2.2.3. .bss

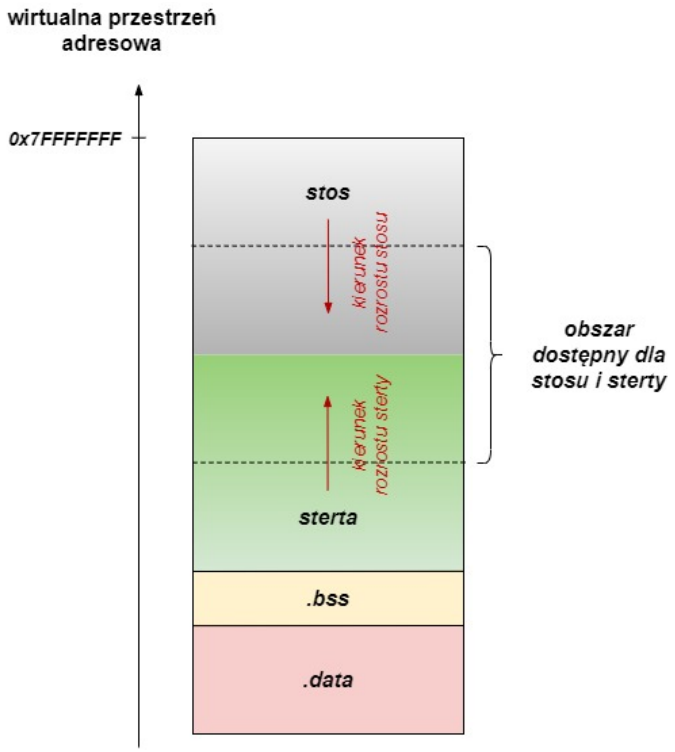
Segment ***.bss*** przechowuje **niezainicjalizowane zmienne globalne i statyczne oraz zmienne globalne i statyczne jawnie zainicjalizowane wartością 0**. Zgodnie ze standardem ***ANSI C*** globalne i statyczne zmienne są **automatycznie inicjalizowane wartością 0 przed wywołaniem funkcji *main()***. [*Uwaga: w przypadku mikrokontrolerów jednoukładowych małych mocy spotykanym zabiegiem jest rezygnacja ze wsparcia standardu ANSI C. Wówczas nie jest przeprowadzana automatyczna inicjalizacja zmiennych globalnych i statycznych wartością 0. Umożliwia to skrócenie czasu wykonania programu.*] Nazwa ***.bss*** wywodzi się od instrukcji języka assemblera, która rozwijana była jako *block started by symbol* [6]. Często plik obiektowy (*rozszerzenie .o*) nie przechowuje obrazu zmiennych z segmentu ***.bss***, a jedynie jego rozmiar. Wynika to z faktu, że wszystkie zmienne przydzielone do segmentu ***.bss*** są niezainicjalizowane lub przyjmują wartość 0.

Na listingu 2. przedstawiono przykłady takich zmiennych.

```
// Niezainicjalizowana zmienna globalna
float x;
// Zmienna globalna zainicjalizowana do 0
int y = 0;
// Niezainicjalizowana statyczna zmienna globalna
static short z;
// Statyczna zmienna globalna zainicjalizowana do 0
static unsigned int w = 0;
// Zmienne umieszczone w anonimowej przestrzeni nazw
    sa rownowazne statycznym zmiennym globalnym
namespace {
    // Zmienna niezainicjalizowana
    double a;
    // Zmienna zainicjalizowana do 0
    long b = 0;
}

int main() {
    // Niezainicjalizowana statyczna zmienna lokalna
    static long long c;
    // Statyczna zmienna lokalna zainicjalizowana do
    0
    static unsigned short d = 0;
    return 0;
}
```

Listing 2. Zmienne alokowane w segmencie .bss

Segment ***.bss*** położony jest najczęściej między segmentem ***.data*** a ***stertą*** (rys. 2.7).



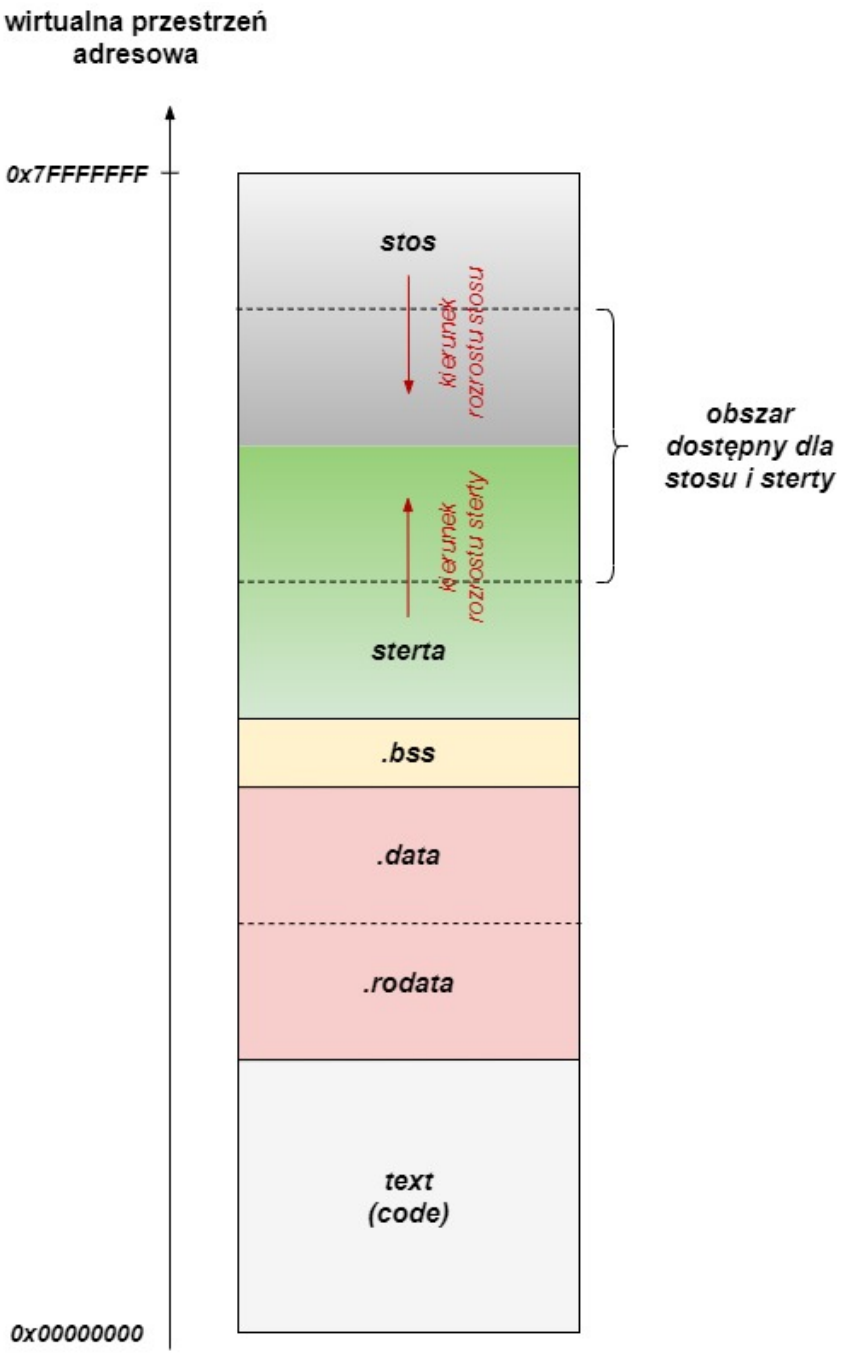
Rys. 2.7. Segment .bss w przestrzeni adresowej komputera (mikrokontrolera)

2.2.4. .data

Segment ***.data*** przechowuje **globalne i statyczne zmienne jawnie zainicjalizowane** przez programistę (wartością różną od 0). W segmencie ***.data*** można wydzielić obszar pamięci, w którym alokowane są zmienne tylko do odczytu – ***.rodata*** (*read-only data*). Alokowane są tam stałe. Typowo segment ***.data*** położony jest w przestrzeni adresowej komputera między segmentem ***.bss*** a segmentem ***text*** (rys. 2.8). Rozmiar segmentu ***.data*** (a więc i ***.rodata***) nie zmienia się w trakcie działania programu. Na listingu 3. przedstawiono przykłady zmiennych alokowanych w segmencie ***.data***.

```cpp
// Zainicjalizowana zmienna globalna
float x = 3.5;
// Zainicjalizowane statyczne zmienne globalne
static short y = 100;
namespace {
    double z = 5.5;
}
// Globalna stala (.rodata)
const int a = 111;
// Statyczna globalna stala (.rodata)
static const float b = 4.0;

int main() {
    // Zainicjalizowana statyczna zmienna lokalna
    static long w = 666;
    // Lokalna stala (.rodata)
    const unsigned short c = 1;
    return 0;
}
```

Listing 3. Zmienne alokowane w segmencie .data



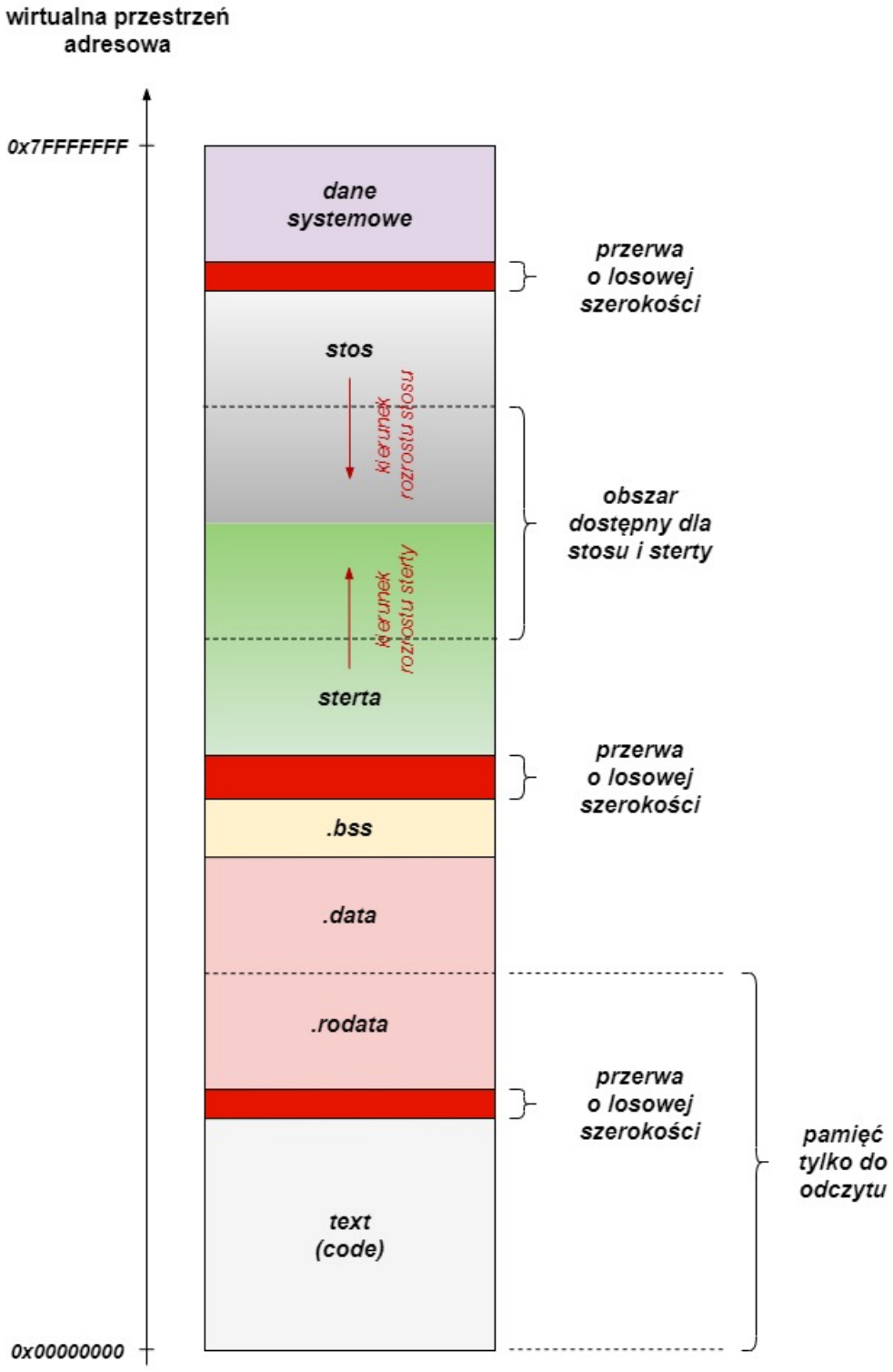
Rys. 2.8. Segment .data w przestrzeni adresowej komputera (mikrokontrolera)

2.2.5. Text (code)

Skompilowany (wykonywalny) kod maszynowy programu przechowywany jest w segmencie ***text***, znanym również z tego względu pod nazwą ***code***. Segment ***text*** położony jest najczęściej **w dolnym zakresie wirtualnej przestrzeni adresowej**, poniżej segmentu ***.data***. Jego rozmiar jest stały. W większości przypadków segment ***text*** jest obszarem pamięci **tylko do odczytu**, aby zapobiec przed nieintencjonalną modyfikacją jego zawartości w trakcie działania programu. W segmencie ***text*** położone są również adresy funkcji zdeklarowanych w kodzie programu. Na rys. 2.9. przedstawiono typowy układ pamięci programu. Niektóre segmenty pamięci są dodatkowo rozdzielone przerwami o losowej szerokości. Ma to na celu utrudnienie manipulacji z zewnątrz w wykonywanym kodzie, dzięki wprowadzeniu elementu losowości w rozmieszczeniu segmentów pamięci [8].

Rozmiar segmentów ***.bss***, ***.data*** oraz ***text*** skompilowanego programu może być sprawdzony z poziomu konsoli systemowej za pomocą polecenia ***size***. Wywołanie polecenia ***size app.exe*** może dać np. następujący rezultat:

```
C:\> size app.exe
   text    data    bss    dec    hex    filename
   3425    2344    448    6217   1849   app.exe
```



Rys. 2.9. Typowy układ pamięci programu

Programiści (w szczególności pracujący z mikrokontrolerami) często stosują pewne charakterystyczne wartości zmiennych do oznaczania skrajnych komórek zaalokowanego obszaru pamięci. Popularność w tym zastosowaniu zyskała konwencja ***hexspeak***, polegająca na tworzeniu angielskich słów z wykorzystaniem liczb systemu heksadecymalnego, np. *0xDEADBEEF*, *0xCAFEBABE*, *0xDEADC0DE* czy *0xFACEFEED*. Takie bariery na granicy obszarów pamięci (*ang. memory fences*) są łatwe do rozpoznania przez programistę w trakcie debugowania kodu, a ich naruszenie (nadpisanie) może oznaczać niepoprawne działanie programu.

2.3. Struktury

Tablice stanowią przykład zmiennych, które za pomocą pojedynczego identyfikatora (nazwy) umożliwiają odwołanie do wielu wartości jednego typu, położonych w ciągłym, liniowym obszarze pamięci komputera (mikrokontrolera). Zarówno język *C*, jak i *C++*, przewidują specjalny typ danych umożliwiający grupowanie **zmiennych różnych typów, ułożonych kolejno w ciągłym, liniowym obszarze pamięci**, pod wspólnym identyfikatorem. Zmienne takie nazywane są ***strukturami***. Przykładem może być ***struktura Student*** przechowująca dane studenta – jego imię, nazwisko oraz numer indeksu (*struktury to pierwszy krok w kierunku klas, a więc i paradygmatu programowania obiektowego*). Deklarację i instancjonowanie struktury przedstawiono na listingu 4. Struktura ***Student*** została zdeklarowana z wykorzystaniem słowa kluczowego ***struct***. Wewnątrz nawiasów klamrowych umieszczono kolejne składowe zmiennej strukturalnej (dwie tablice *char* oraz zmienną typu *unsigned int*), zwane ***polami struktury***. Deklaracja struktury **zakończona jest średnikiem**. Wewnątrz funkcji *main()* utworzono instancję (egzemplarz) struktury ***Student*** o nazwie ***wemifStudent***. Warto zwrócić uwagę, że typ instancjonowanej zmiennej zawiera słowo kluczowe ***struct*** (tu: *struct Student*). W języku *C++* zrezygnowano z tego zapisu – nazwa struktury jest pełnoprawnym typem zmiennej. Kolejne ***pola*** zmiennej ***wemifStudent*** są inicjalizowane z wykorzystaniem ***listy inicja-***

lizacyjnej zawierającej wartości kolejnych składowych ***struktury*** (umieszczone po przecinku wewnątrz nawiasów klamrowych). Do poszczególnych ***pól struktury*** można się później odwoływać za pomocą ***operatora dostępu do składowych*** – ***operator.*** oraz nazwy określonego ***pola***.

```c
#include <stdio.h>
// Struktura Student
struct Student {
  char name[10];
  char surname[20];
  unsigned int index;
};

int main() {
  // wemifStudent jest instancja struktury Student
  // w C++ dozwolone: Student wemifStudent = ...
  struct Student wemifStudent = { // Lista inicjalizacyjna
    "Adam",     // wartosc pola name
    "Kowalski", // wartosc pola surname
    251439      // wartosc pola index
  };
  // Odwolanie do pol struktury
  printf("Student's name: %s\n", wemifStudent.name);
  printf("Student's surname: %s\n", wemifStudent.surname);
  printf("Student's index: %d\n", wemifStudent.index);
  return 0;
}
```

Listing 4. Deklaracja i instancjonowanie struktury

Aby uniknąć każdorazowego powtarzania słowa kluczowego ***struct*** można skorzystać z **mechanizmu aliasów typów**. Realizowane jest to za pośrednictwem słowa kluczowego ***typedef***. Przykład przedstawiono na listingu 5., gdzie zdeklarowana została struktura ***Car***, grupująca markę i model samochodu. Wykorzystując specyfikator ***typedef*** utworzono alias ***Car_t*** na typ ***struct Car***. Dzięki temu możliwe było utworzenie instancji ***struktury*** z użyciem krótszego identyfikatora typu.

```
1  // Struktura Car
2  struct Car {
3    char brand[15];
4    char model[20];
5  };
6
7  // Car_t jest aliasem typu struct Car
8  typedef struct Car Car_t;
9
10 // Instancja struktury Car
11 Car_t car = {
12   "Ford",
13   "Mondeo"
14 };
```

Listing 5. Aliasy typów w języku *C*

Język *C++* wprowadził **równoważny mechanizm aliasów typów** z wykorzystaniem słowa kluczowego ***using***. Przykład przedstawiono na listingu 6. [*Uwaga: w związku z kompatybilnością wsteczną języka C++ z językiem C możliwe jest definiowanie aliasów typów zarówno za pomocą słowa kluczowego* ***typedef****, jak i* ***using****.*]

```cpp
// Struktura Car
struct Car {
  char brand[15];
  char model[20];
};

// Car_t jest aliasem typu Car
using Car_t = Car;

// Instancja struktury Car
Car_t car = {
  "Ford",
  "Mondeo"
};
```

Listing 6. Aliasy typów w języku *C++*

Zarówno język *C*, jak i *C++*, umożliwiają tworzenie **nienazwanych typów strukturalnych**. Anonimowa struktura może mieć swoją (jedyną) instancję utworzoną w miejscu deklaracji jej typu. Ich zastosowanie w praktyce sprowadza się do struktur ***zagnieżdżonych*** w innych strukturach (*ang. nested structures*):

```c
#include <stdio.h>
// Polaczenie deklaracji struktury Driver z deklaracja aliasu Driver_t
typedef struct Driver {
    char name[10];
    unsigned short age;
    // Zagniezdzona anonimowa struktura
    struct {
        char brand[15];
        char model[20];
    } car; // car jest instancja anonimowej struktury i polem struktury Driver
} Driver_t; // Driver_t jest aliasem na typ struct Driver

int main() {
    Driver_t driver = { // Lista inicjalizacyjna
        "Andrzej",
        54,
        { // Lista inicjalizacyjna pola car
            "Toyota",
            "Corolla"
        }
    };
    printf("Driver %s (age %d) has a red %s %s",
        driver.name, driver.age,
        driver.car.brand, driver.car.model
    );
    return 0;
}
```

Struktury mogą stanowić zarówno argumenty, jak i wartości zwracane z funkcji. Na listingu 7. przedstawiono program obliczający odległość na płaszczyźnie między dwoma punktami. Współrzędne punktów zapisywane są w strukturze ***Point*** i przekazywane jako argumenty funkcji ***calculateDistance()***.

```
#include <math.h>
#include <stdio.h>

typedef struct Point {
  double x;
  double y;
} Point_t;

double calculateDistance(Point_t first, Point_t
   second) {
  const double xDist = second.x - first.x;
  const double yDist = second.y - first.y;
  return sqrt(xDist * xDist + yDist * yDist);
}

int main() {
  Point_t first = {1.0, 2.0};
  Point_t second = {3.0, 5.0};
  printf("Distance between two points is equal %f",
   calculateDistance(first, second));
  return 0;
}
```

Listing 7. Struktura jako argument funkcji

Możliwe jest tworzenie wskaźników na ***struktury***. Przykład przedstawiono na listingu 8. Zostały w nim uwzględnione **dwa równoważne sposoby odwołania do pól struktury za pośrednictwem wskaźnika**. Pierwszy, intuicyjny, przez **wywołanie operatora dereferencji na wskaźniku i zastosowanie operatora dostępu do składowej**: **(*beer).price**. Druga metoda polega na wykorzystaniu **operatora dostępu do składowej przez wskaźnik**: **beer− >price**.

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

typedef struct Beer {
  float price;
  float alcoholContent;
} Beer_t;

int main() {
  Beer_t * beer = (Beer_t *) malloc(sizeof(Beer_t));
  (*beer).price = 5.99;
  (*beer).alcoholContent = 6.7;

  printf("Beer has %.2f%% alcohol content and costs
   %.2f zl", beer->alcoholContent, beer->price);
  free(beer);
  return 0;
}
```

Listing 8. Wskaźnik na zmienną strukturalną

Na listingu 9. przedstawiono program wyświetlający rozmiar struktury i jej poszczególnych pól (w bajtach). Program skompilowany i uruchomiony na 64-bitowym systemie operacyjnym może dać następujący rezultat:

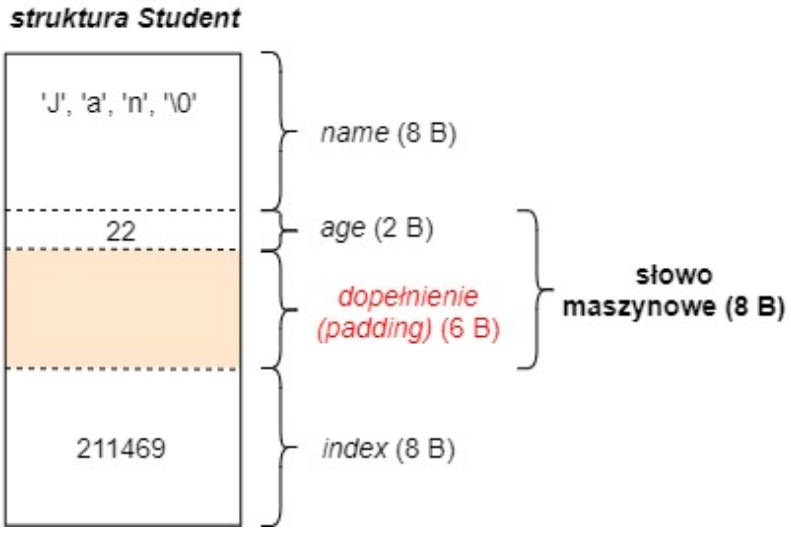
size of name equals 8 B
size of age equals 2 B
size of index equals 8 B
size of student equals 24 B

Jak widać, rozmiar zmiennej ***student*** **nie jest równy prostej sumie rozmiarów poszczególnych zmiennych** ($24 \neq 8 + 2 + 8$). Nierówność ta wynika z ułożenia ***pól struktury*** w pamięci komputera (mikroprocesora). Kolejne ***pola struktury*** ułożone są w sposób ciągły. Co więcej, ***pola*** wyrównane są do rozmiaru ***największego z pól struktury*** (tu: *long index*, 8 B). Ułożenie pól struktury z listingu 9. w pamięci komputera przedstawiono na rys. 2.10.

```
#include <stdio.h>

typedef struct Student {
  char name[8];
  unsigned short age;
  unsigned long index;
} Student_t;

int main() {
  Student_t student = {
    "Jan",
    22,
    211469
  };
  printf("size of name equals %d B\n", sizeof(
   student.name));
  printf("size of age equals %d B\n", sizeof(student
   .age));
```

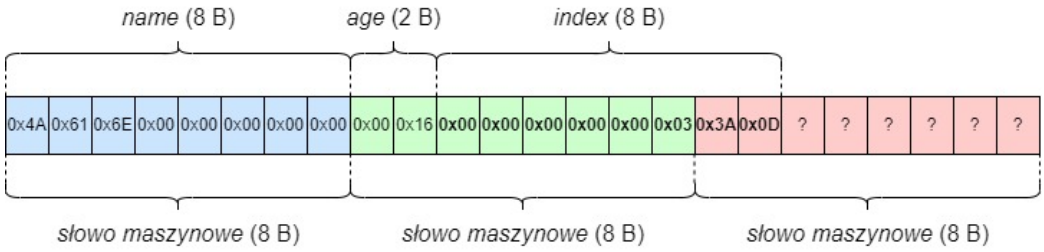
```
17    printf("size of index equals %d B\n", sizeof(
       student.index));
18    printf("size of student equals %d B\n", sizeof(
       student));
19    return 0;
20 }
```

Listing 9. Rozmiar instancji stuktury a rozmiary jej pól



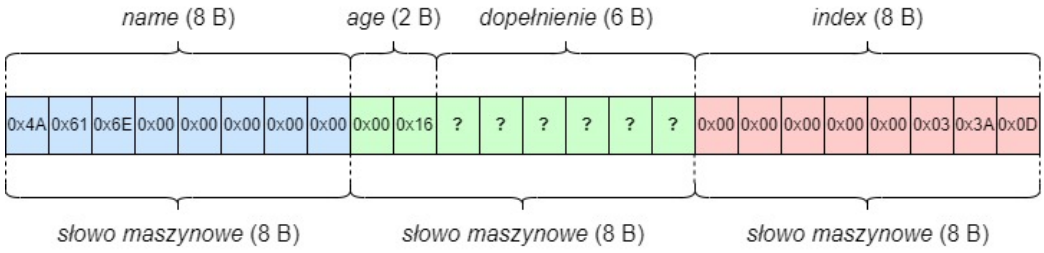
Rys. 2.10. Ułożenie pól struktury w pamięci komputera (system 64–bitowy)

Takie zachowanie jest uzasadnione ze względów optymalizacyjnych. W ciągu jednego cyklu procesor odczytuje porcję danych o rozmiarze równym rozmiarowi ***słowa maszynowego***. Rozmiar ***słowa maszynowego*** jest zależny od architektury procesora, np. dla systemu 32–bitowego rozmiar ***słowa maszynowego*** wynosi 4 B, a dla systemu 64–bitowego wynosi 8 B. Zakładając, że ***pola struktury*** z listingu 9. nie są wyrównane (rozmiar ***struktury*** wynosi 18 B), to odczyt danych w ciągu trzech kolejnych cykli procesora wyglądałby jak na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Odczyt niewyrównanych pól struktury przez procesor (system 64–bitowy)

Przy ułożeniu ***pól struktury*** w pamięci komputera, jak na rys. 2.11, odczyt wartości ***pola*** *index* zajmuje dwa cykle procesora mimo, że rozmiar zmiennej jest równy długości ***słowa maszynowego***. W celu optymalizacji czasu wykonania operacji odczytu/zapisu przez procesor, między kolejnymi ***polami struktury*** dodawane jest ***dopełnienie*** (*ang. padding*) w celu ich wyrównania do rozmiaru największego z ***pól struktury***. ***Dopełnienie*** 6 B występujące po ***polu*** *age* realizuje przesunięcie adresu ***pola*** *index*, dzięki czemu możliwy jest odczyt wartości każdego z ***pól struktury*** w ciągu jednego cyklu procesora (rys. 2.12). Standard języka nie definiuje określonej wartości dla bajtów ***dopełnienia***. W szczególności nie można zakładać, że ich wartość będzie wynosić 0. ***Dopełnienie pamięci*** nie występuje między kolejnymi elementami tablic.



Rys. 2.12. Odczyt wyrównanych pól struktury przez procesor (system 64–bitowy)

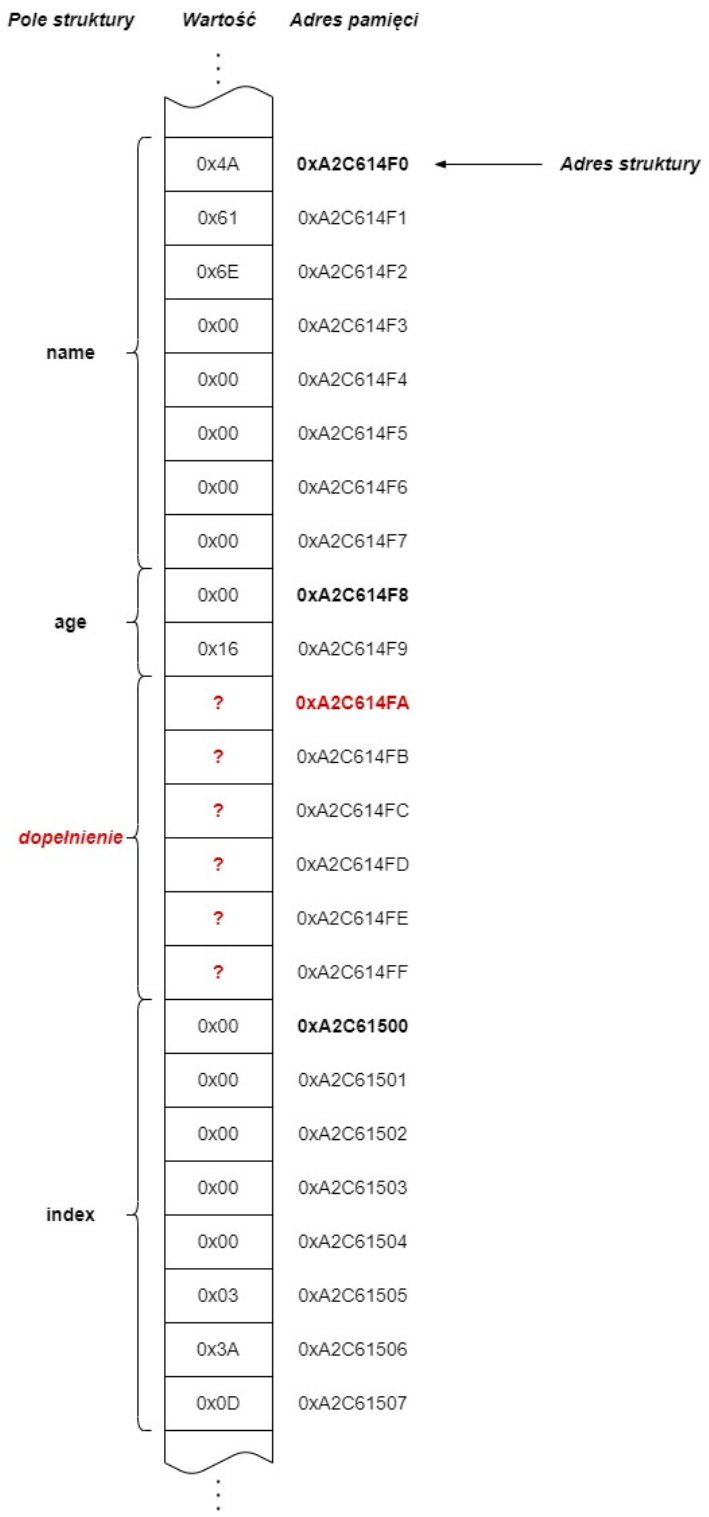
Dopełnienie pamięci nie musi być równe długości ***słowa maszynowego***. Przykład przedstawiono na listingu 10. W przypadku ***struktury*** *Ca-*

lendar ***polem*** o największym rozmiarze jest *year*. W systemie 64–bitowym zmienna typu *int* może mieć rozmiar np. 4 B, natomiast rozmiar ***słowa maszynowego*** wynosić będzie 8 B. Ponieważ ***pola struktury*** są wyrównane do rozmiaru największego z ***pól struktury***, to ***pole*** *month* zostanie wyrównane do rozmiaru 4 B. Jeżeli rozmiar zmiennej *short* wynosi 2 B, to ***dopełnienie*** wyniesie również 2 B, a rozmiar całej ***struktury*** 8 B. W ogólności rozmiar ***struktury*** zawierającej ***dopełnienia*** poszczególnych ***pól*** będzie stanowić wielokrotność rozmiaru największego z ***pól struktury***.

```
1 typedef struct Calendar {
2     short month; // np. 2 B w systemie 64-bitowym
3     int year; // np. 4 B w systemie 64-bitowym
4 } Calendar_t; // np. 8 B w systemie 64-bitowym
```

Listing 10. Dopełnienie a rozmiar słowa maszynowego

Pola struktury są najczęściej alokowane w pamięci komputera w kolejności ich deklaracji. Wiedząc, że adres ***struktury*** w języku *C* jest jednocześnie adresem pierwszego z zaalokowanych ***pól struktury*** (w języku *C++* nie musi tak być!) oraz, że adresy ***pól struktury*** są wyrównane do rozmiaru największego z ***pól struktury***, można wyznaczyć adresy kolejnych ***pól struktury***. Przykład dla ***struktury*** z listingu 9. przedstawiono na rys. 2.13. ***Stos*** jako struktura danych również uwzględnia mechanizm wyrównywania adresów zmiennych.



Rys. 2.13. Adresacja dopełnionych pól struktury

2.4. Operacje na pamięci

Biblioteka standardowa języka *C* (oraz *C++*) dostarcza gotowe funkcje, zdeklarowane w nagłówku ***string.h*** (*cstring*), realizujące podstawowe operacje na pamięci. Nagłówki funkcji przedstawiono na listingu 11.

```
1 void * memcpy (void * destination, const void *
    source, size_t num);
2 void * memmove (void * destination, const void *
    source, size_t num);
3 void * memset (void * ptr, int value, size_t num);
4 int memcmp (const void * ptr1, const void * ptr2,
    size_t num);
5 void * memchr (const void * ptr, int value, size_t
    num);
```

Listing 11. Nagłówki funkcji realizujących podstawowe operacje na pamięci

Funkcje ***memcpy()*** i ***memmove()*** realizują operację kopiowania danych o rozmiarze ***num*** bajtów z bloku pamięci wskazywanego przez ***source*** pod adres ***destination***. Różnica między tymi funkcjami polega na tym, że ***memcpy()*** kopiuje dane bezpośrednio z ***source*** do ***destination***, a ***memmove()*** pośrednio kopiuje dane do tymczasowego bufora. W związku z tym bloki ***source*** i ***destination*** **nie mogą się nakładać** w przypadku funkcji ***memcpy()***, natomiast w przypadku ***memmove()*** dozwolone jest ich nakładanie się. Zastosowanie typu wskaźnikowego ***void ** umożliwia generyczną obsługę różnych typów danych zaalokowanych pod adresami ***source*** i ***destination***. Zarówno ***memcpy()***, jak i ***memmove()***, zwracają adres ***destination*** [4][5]. Na listingu 12. przedstawiono przykładową implementację funkcji ***memcpy()*** oraz przykład jej zastosowania. Wskaźniki ***source*** i ***destination*** są w pierwszej kolejności rzutowane na typ ***unsigned char ***, w celu kopiowania danych bajt po bajcie (typ ***char*** zajmuje zawsze rozmiar 1 B [patrz: Tabela 1, Ćw. 2]). Następnie, w pętli *for*, kopiowane są

kolejne bajty bloku ***source*** bezpośrednio do bloku ***destination***.

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

void * memcpy (void * destination, const void * source, size_t num) {
    unsigned char * pSrc = (unsigned char *)source;
    unsigned char * pDst = (unsigned char *) destination;
    for (unsigned int i = 0; i < num; ++i)
        pDst[i] = pSrc[i];
    return destination;
}

int main() {
    char buffIn[] = "Ala ma kota";
    const unsigned int buffLen = strlen(buffIn) + 1;
    char buffOut[buffLen];
    memcpy(buffOut, buffIn, buffLen);
    // Wypisze "Ala ma kota"
    printf("%s", buffOut);
    return 0;
}
```

Listing 12. Przykładowa implementacja i zastosowanie funkcji *memcpy()*

Funkcja ***memset()*** inicjalizuje pierwsze ***num*** bajtów bloku pamięci wskazywanego przez ***ptr*** wartością ***value***. Funkcja zwraca adres ***ptr*** [7]. Przykładowe użycie funkcji ***memset()*** przedstawiono na listingu 13.

```
char buffer[] = "Ala ma kota";
memset(buffer, '.', 3);
// Wypisze "... ma kota"
printf("%s", buffer);
```

Listing 13. Przykład użycia funkcji *memset()*

Funkcja ***memcmp()*** porównuje pierwsze ***num*** bajtów zawartości bloków pamięci wskazywanych przez ***ptr1*** i ***ptr2***. Funkcja zwraca:

- **0** – jeżeli zawartość bloków pamięci jest identyczna
- **wartość ujemną** – jeżeli pierwszy różniący się bajt danych ma wartość większą w ***ptr1*** niż w ***ptr2***
- **wartość dodatnią** – w przeciwnym wypadku [3].

Przykład użycia funkcji ***memcmp()*** przedstawiono na listingu 14.

```
char firstBuffer[] = "Hello, world!";
char secondBuffer[] = "Hello, world! Goodbye!";
if (memcmp(firstBuffer, secondBuffer, strlen(
   firstBuffer)) == 0)
    // Wypisze "Buffers' contents are equal"
    printf("Buffers' contents are equal");
```

Listing 14. Przykład użycia funkcji *memcmp()*

Funkcja ***memchr*** przeszukuje pierwsze ***num*** bajtów bloku wskazywanego przez ***ptr*** pod kątem występowania wartości ***value***. Funkcja zwraca adres, pod którym po raz pierwszy wystąpiła wartość ***value*** w zadanym bloku pamięci. Jeżeli zadana wartość nie została odnaleziona, funkcja zwraca ***NULL*** [2]. Przykład użycia funkcji ***memchr()*** przedstawiono na listingu 15.

```
1 char buffer[] = "Ala ma kota";
2 char * found = (char *)memchr(buffer, 'k', strlen(
    buffer));
3 if (found != NULL)
4     // Wypisze "Letter 'k' found at position 7 in
    buffer"
5     printf("Letter 'k' found at position %ld in
    buffer", found - buffer);
```

Listing 15. Przykład użycia funkcji *memchr()*

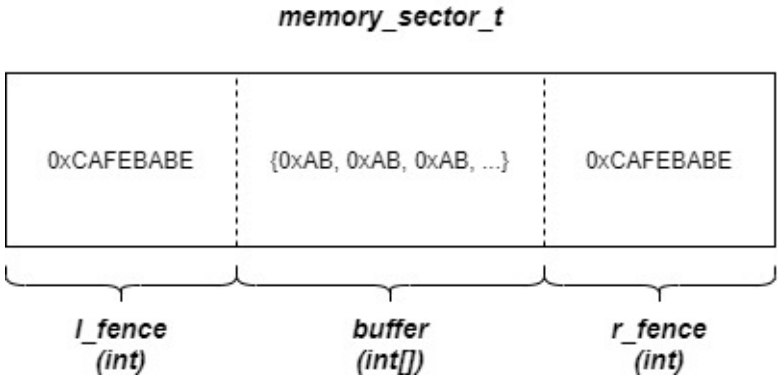
3. Program ćwiczenia

Zadanie 1. Plik ***triangle.h*** zawiera deklaracje struktury ***Point_t***, przechowującej współrzędne punktu na płaszczyźnie, oraz funkcji ***bool isRightTriangle(Point_t points[])***, która sprawdza czy trzy zadane punkty na płaszczyźnie tworzą trójkąt prostokątny. Punkty przekazywane są w postaci tablicy struktur ***Point_t***. Napisz definicję funkcji ***isRightTriangle()*** i umieść ją w pliku ***triangle.c***, a następnie przetestuj działanie zaimplementowanej funkcji. Współrzędne x, y punktów pobierz z klawiatury. Dla uproszczenia możesz przyjąć, że działanie funkcji jest *niezdefiniowane* w przypadku, gdy tablica punktów ma rozmiar różny niż 3.

Zadanie 2. Plik ***memory_sector.h*** zawiera deklarację struktury ***memory_sector_t*** symulującej liniowy obszar pamięci. Struktura składa się z trzech pól: ***l_fence*** i ***r_fence*** – przeznaczonych na inicjalizację lewej i prawej bariery pamięci, oraz tablicy ***buffer*** o losowym rozmiarze. Typ struktury jest deklarowany przez wywołanie makra ***INITIALIZE_MEMORY_SECTOR()*** (z każdą kompilacją programu losowany jest inny rozmiar składowej ***buffer***). Plik ***memory_operations.h*** zawiera deklaracje funkcji:

- ***int * get_left_fence_address(memory_sector_t *)*** – zwracającej adres lewej bariery pamięci (***l_fence***) instancji struktury ***memory_sector_t***;
- ***int * get_right_fence_address(memory_sector_t *)*** – zwracającej adres prawej bariery pamięci (***r_fence***) instancji struktury ***memory_sector_t***;
- ***size_t get_memory_buffer_size(memory_sector_t *)*** – zwracającej rozmiar bufora (***buffer***) instancji struktury ***memory_sector_t***;
- ***void initialize_memory(memory_sector_t *)*** – inicjalizującej instancję struktury ***memory_sector_t***, tj. inicjalizującej ***l_fence*** i ***r_fence*** wartością ***FENCE_INITIALIZER*** i wypełniającą tablicę ***buffer*** wartościami ***BUFFER_INITIALIZER***;
- ***address_status_t validate_address(memory_sector_t * memory_sector, const int * address)*** – sprawdzającą czy zadany adres (***address***) leży wewnątrz obszaru pamięci zaalokowanego na ***memory_sector***. Funkcja zwraca jedną z wartości typu wyliczeniowego ***address_status_t***: ***NO_ERROR*** – jeżeli zadany adres należy do struktury, albo ***ADDRESS_OUT_OF_RANGE*** w przeciwym wypadku;
- ***address_status_t read_memory(memory_sector_t *, const int * address, int * buffer)*** – zapisującą zawartość komórki pamięci leżącej pod adresem ***address*** do zmiennej pod adresem ***buffer***, jeżeli ***address*** należy do struktury ***memory_sector_t*** . Funkcja zwraca ***NO_ERROR*** – jeżeli odczyt danych się powiódł, albo wartość ***ADDRESS_OUT_OF_RANGE*** w przeciwym wypadku;
- ***address_status_t write_memory(memory_sector_t *, int * address, int value)*** – zapisującą wartość ***value*** pod adres ***address***, jeżeli ***address*** należy do struktury ***memory_sector_t***. Funkcja zwraca ***NO_ERROR*** – jeżeli zapis danych się powiódł, albo wartość ***ADDRESS_OUT_OF_RANGE*** w przeciwym wypadku.

W funkcji *main()* (plik ***main.cpp***) napisano zestaw testów funkcji z pliku nagłówkowego ***memory_operations.h***, wykorzystując makro ***assert***. Celem zadania jest napisanie definicji funkcji z nagłówka ***memory_operations.h*** (i umieszczenie ich w pliku źródłowym ***memory_operations.cpp***) tak, aby po kompilacji i uruchomieniu programu wyświetlił się napis ***All tests passed!***. Strukturę ***memory_sector_t*** schematycznie przedstawiono na rys. 3.1. [*Uwaga: nie możesz modyfikować żadnego z plików:* ***memory_sector.h***, ***memory_operations.h***, ***main.cpp***]



Rys. 3.1. Schemat struktury *memory_sector_t*

Zadanie 3. Zadanie polega na rozszerzeniu zestawu funkcji z **Zadania 2.** o funkcję ***address_status_t copy_memory(memory_sector_t *, int * destination, int * source, size_t size)***, która kopiuje dane o rozmiarze ***size*** leżące pod adresem ***source*** pod adres ***destination***, jeżeli adres ***destination*** należy do struktury ***memory_sector_t***. Funkcja zwraca enumerator ***NO_ERROR*** – jeżeli zapis danych się powiódł, albo ***ADDRESS_OUT_OF_RANGE*** w przeciwym wypadku. W ramach zadania:

- dodaj deklarację funkcji ***copy_memory()*** do pliku ***memory_operations.h***;
- dodaj definicję funkcji do pliku ***memory_operations.c*** (skorzystaj z funkcji ***memcpy()*** lub ***memmove()*** biblioteki standardowej);
- rozszerz funkcję ***main()*** o testy nowo zaimplementowanej funkcji.

4. Dodatek

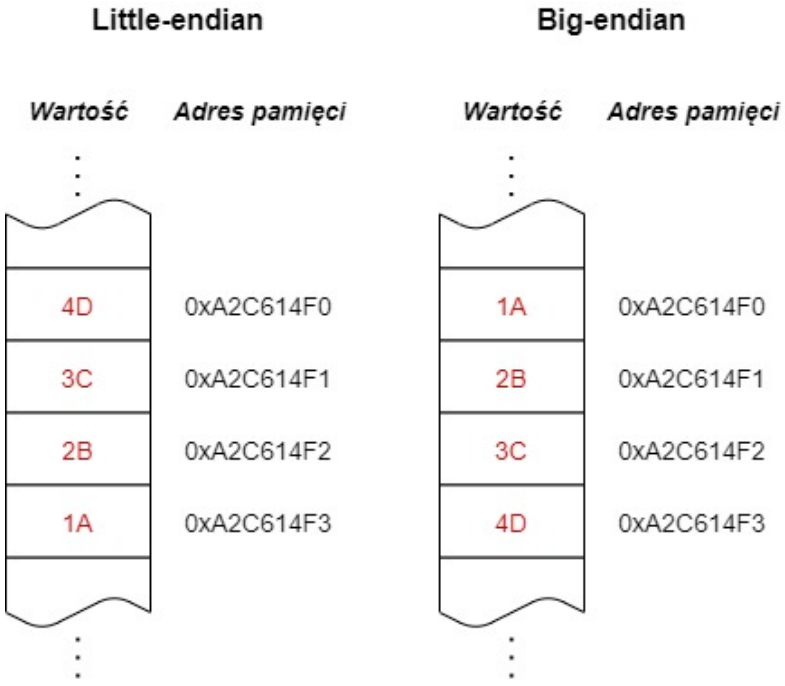
Zadanie (dla chętnych) Samodzielnie zweryfikuj układ pamięci programu na swoim komputerze. W tym celu utwórz po kilka egzemplarzy funkcji oraz zmiennych różnych rodzajów (alokowanych statycznie i dynamicznie, lokalnych, globalnych i statycznych) i na podstawie ich adresów sprawdź, w jakich obszarach przestrzeni adresowej położone są poszczególne segmenty pamięci oraz jaki jest kierunek rozrostu stosu i sterty. Adres funkcji w pamięci komputera można wyświetlić w sposób następujący:

```
#include <stdio.h>

void sayHello() {
    printf("Hello, world!\n");
}

int main() {
    sayHello();
    printf("Function address: %p", sayHello);
    return 0;
}
```

4.1. Kolejność bajtów

Istnieją dwie metody uporządkowania liczb składających się z wielu (co najmniej dwóch) bajtów podczas ich zapisu do pamięci komputera. Kolejność w jakiej bajty organizowane są w kolejnych komórkach pamięci (*ang. endianness*) nie jest ustalona przez standardy języków *C/C++* i zależy od konkretnego procesora, na którym wykonywany jest kod programu. W pierwszym podejściu najmniej znaczący bajt (*ang. least significant byte, LSB*) zapisywany jest jako pierwszy. Taka kolejność bajtów nosi nazwę ***little–endian*** (*LE*).

Odwrotny przypadek stanowi forma ***big–endian*** (*BE*), w której pierwszy zapisywany jest najbardziej znaczący bajt (*ang. most significant byte, MSB*). Obie metody organizacji bajtów w pamięci komputera dla liczby **0x1A2B3C4D** przedstawiono schematycznie na rys. 4.1. Analogiczna sytuacja, ale w przypadku kolejności bitów, ma miejsce dla transmisji danych za pomocą różnych protokołów komunikacyjnych.



Rys. 4.1. Organizacja bajtów liczby podczas zapisu do pamięci komputera

4.2. Organizacja danych w strukturach

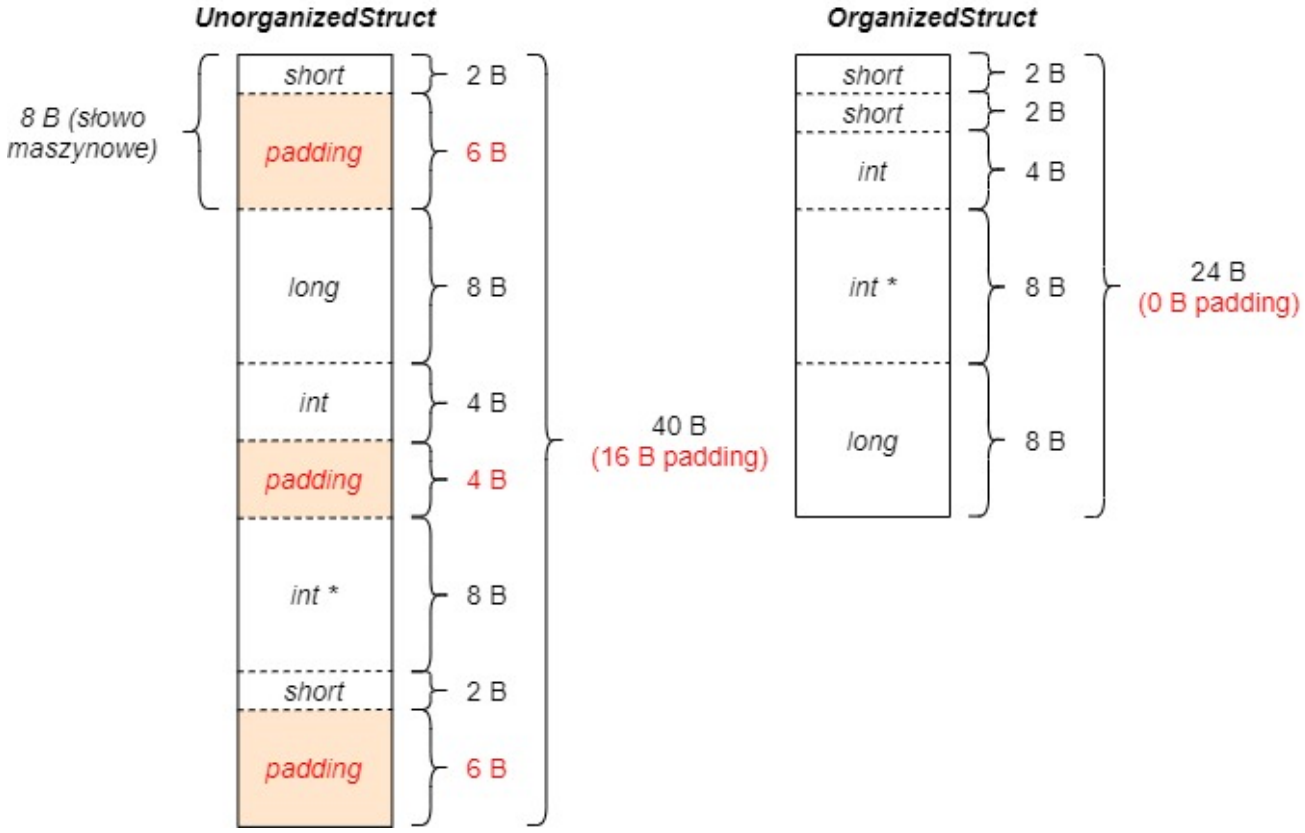
Ponieważ kolejne składowe ***struktur*** są wyrównywane do rozmiaru największego z ***pól struktury***, ich odpowiednie ułożenie może prowadzić do optymalizacji rozmiaru pamięci wymaganej do utworzenia instancji ***struktury***. Reguła ta dotyczy również ***struktur zagnieżdżonych***. Jest to szczególnie istotne w przypadku ***struktur*** o znacznych rozmiarach na mikrokontrolerach o ograniczonym rozmiarze pamięci. Eliminacja ***dopełnienia pamięci pól struktury*** może być konieczna w przypadku odczytu nagłówków

plików ELF, BMP czy JPEG lub nagłówków pakietów protokołów IP, UDP czy TCP (deserializacja danych). Na listingu 16. przedstawiono dwie deklaracje tej samej ***struktury*** z uwzględnieniem różnego ułożenia ***pól struktury*** (przykład dla architektury 64-bitowej). Dla losowego (najgorszego) przypadku ułożenia ***pól struktury*** (***UnorganizedStruct***) na trzy składowe struktury przypada dodatkowe ***dopełnienie*** przydzielonej pamięci do 8 B. W przypadku zorganizowanego ułożenia ***pól struktury*** (***OrganizedStruct***) można uniknąć zbędnego ***dopełniania pamięci***, przez co wypadkowy rozmiar ***struktury*** jest niemal dwukrotnie mniejszy (24 B a 40 B) – równy sumie algebraicznej rozmiarów poszczególnych ***pól struktury***. Schematycznie zostało to zobrazowane na rys. 4.2. W celu optymalizacji rozmiaru ***struktury*** należy deklarować jej ***pola*** tak, aby ich rozmiary tworzyły ciąg monotoniczny.

```
1  #include <iostream>
2
3  struct UnorganizedStruct {
4    short x; // 2 B (+ 6 B padding)
5    long z; // 8 B
6    int w; // 4 B (+ 4 B padding)
7    int * ptr; // 8 B
8    short y; // 2 B (+ 6 B padding)
9  };
10
11 struct OrganizedStruct {
12   short x; // 2 B
13   short y; // 2 B
14   int w; // 4 B
15   int * ptr; // 8 B
16   long z; // 8 B
17 };
18
```

```
19 int main() {
20     // 40 B
21   std::cout << "Size of unorganized struct: " <<
      sizeof(UnorganizedStruct) << " B" << std::endl;
22   // 24 B
23   std::cout << "Size of organized struct: " <<
      sizeof(OrganizedStruct) << " B" << std::endl;
24   return 0;
25 }
```

Listing 16. Ułożenie pól struktury a jej rozmiar



Rys. 4.2. Organizacja pól struktury a jej wynikowy rozmiar

Maksymalną długość ***dopełnienia*** rozmiaru pamięci dla poszczególnych ***pól struktury*** (ale również ***unii*** czy ***klas***) można modyfikować z wykorzystaniem ***dyrektywy preprocesora #pragma pack***. Ustawiany rozmiar ***dopełnienia*** musi być potęgą liczby **2**. Dyrektywa ***#pragma pack*** nie ustawia dopełnienia **większego niż rozmiar słowa maszynowego**. Na listingu 17. przedstawiono przykład zmniejszenia ***dopełnienia pamięci pól struktury*** z listingu 16. Ustawienie maksymalnej długości ***dopełnienia*** na 2 B poskutkowałoby osiągnięciem minimalnego możliwego rozmiaru ***struktury UnorganizedStruct*** (24 B - brak ***dopełnienia pamięci*** dla poszczególnych ***pól struktury***).

```
#include <iostream>

#pragma pack(4)
struct UnorganizedStruct {
  short x; // 2 B (+ 2 B padding)
  long z; // 8 B
  int w; // 4 B
  int * ptr; // 8 B
  short y; // 2 B (+ 2 B padding)
};

int main() {
    // 28 B
  std::cout << "Size of unorganized packed struct: "
    << sizeof(UnorganizedStruct) << " B" << std::
   endl;
  return 0;
}
```

Listing 17. Wykorzystanie dykrektywy preprocesora *#pragma pack*

Kompilatory rozwijane w ramach projektu *GNU* (**gcc** i **g++**) wspierają mechanizm eliminacji ***dopełnienia pamięci pól struktury*** przez zastosowanie atrybutu ***packed***. Należy pamiętać, że nie jest to rozwiązanie zagwarantowane przez standard języka (kod może się nie skompilować przy zastosowaniu innego kompilatora). Na listingu 18. przedstawiono przykład eliminacji ***dopełnienia pamięci pól struktury*** z listingu 16. z wykorzystaniem atrybutu ***packed***. Należy pamiętać, że wymuszona redukcja ***dopełnienia*** (przez zastosowanie dyrektywy ***#pragma pack*** lub atrybutu ***packed***) wiąże się ze spadkiem wydajności wykonania programu. Odwołanie do niewyrównanego adresu pamięci na niektórych architekturach procesorów (np. *SPARC*) stanowi nielegalną instrukcję [9], stąd kod wykorzystujący dyrektywę ***#pragma pack*** lub atrybut ***packed*** nie jest przenośny między różnymi architekturami procesorów.

```
1 struct UnorganizedStruct {
2   short x; // 2 B
3   long z; // 8 B
4   int w; // 4 B
5   int * ptr; // 8 B
6   short y; // 2 B
7 } __attribute__((packed));
```

Listing 18. Wykorzystanie atrybutu *packed* (kompilator g++)

4.3. Unie

Innym, podobnym w składni do ***struktur***, typem zmiennych są ***unie***, deklarowane z wykorzystaniem słowa kluczowego ***union***. ***Unia*** **może odzwierciedlać różne typy danych, ale tylko jeden naraz**. Wszystkie ***pola unii*** **współdzielą jeden obszar pamięci**, stąd rozmiar ***unii*** **jest równy rozmiarowi największej ze składowych**. Przykład deklaracji i zastoso-

wania ***unii*** przedstawiono na listingu 19.

```c
#include <stdio.h>
// Identyfikacja przez numer indeksu albo PESEL
typedef union StudentId {
  unsigned int index;
  unsigned long pesel;
} StudentId_t;

int main() {
  // StudentId_t to alias na typ union StudentId
  StudentId_t id;
  // Unia pelni role zmiennej typu unsigned int
  id.index = 253107;
  printf("Index: %d\n", id.index);
  // Unia pelni role zmiennej typu unsigned long
  // Utrata danych zapisanych w id.index
  id.pesel = 98171272137;
  printf("PESEL: %ld\n", id.pesel);
  // Rowne sizeof(id.pesel)
  printf("Union size: %d\n", sizeof(StudentId_t));
  return 0;
}
```

Listing 19. Deklaracja i zastosowanie unii

Unie bywają stosowane w programowaniu mikrokontrolerów **w celu oszczędności pamięci** (gdy funkcja wykorzystuje kilka typów zmiennych, ale nigdy więcej niż jednego z nich jednocześnie). Przykład przedstawiono na listingu 20. Struktura ***Variant*** umożliwia przechowywanie zmiennej jednego z trzech typów: *int*, *long* albo *float*. Typ wyliczeniowy ***MemberType*** wskazuje jaki typ zmiennej jest aktualnie przechowywany w strukturze ***Variant***.

Dzięki takiemu rozwiązaniu rozmiar struktury jest równy sumie rozmiarów ***MemberType*** oraz ***long*** (największy rozmiar spośród *int*, *long*, *float*), powiększonej o wyrównanie do długości słowa maszynowego. Wynikowy rozmiar jest mniejszy niż suma rozmiarów *int*, *long* oraz *float*. Funkcje ***initWithFloat()*** oraz ***initWithLong()*** umożliwiają inicjalizację instancji struktury ***Variant*** odpowiednio wartością typu *float* albo *long*. [*Uwaga: w języku C nie ma możliwości przeciążania funkcji, dlatego funkcje inicjalizujące nie mogą posiadać wspólnej nazwy*] Funkcja ***printVariant()*** wyświetla wartość aktualnie przechowywaną w strukturze ***Variant*** w zależności od enumeratora ***type***. Taką implementację można określić mianem *pseudo-polimorfizmu*, znanego z *programowania obiektowego* (np. w języku *C++*). Działanie funkcji może być różne w zależności od typu zmiennej aktualnie przechowywanej w strukturze ***Variant***.

```
#include <stdio.h>

enum MemberType {
    INT,
    LONG,
    FLOAT
};

// Przechowuje zmienna jednego z typow: int, long
   albo float
typedef struct Variant {
    MemberType type;
    union {
        int intMember;
        long longMember;
        float floatMember;
    };
```

```
17 } Variant_t;
18
19 // Inicjalizacja variant zmienna typu float
20 void initWithFloat(Variant_t * variant, float
   initializer) {
21     if (variant != NULL) {
22         variant->type = FLOAT;
23         variant->floatMember = initializer;
24     }
25 }
26
27 // Inicjalizacja variant zmienna typu long
28 void initWithLong(Variant_t * variant, long
   initializer) {
29     if (variant != NULL) {
30         variant->type = LONG;
31         variant->longMember = initializer;
32     }
33 }
34
35 void printVariant(Variant_t * variant) {
36     if (variant != NULL) {
37         switch(variant->type) {
38             case INT:
39                 printf("Variant member value: %d\n",
    variant->intMember);
40                 break;
41             case LONG:
42                 printf("Variant member value: %ld\n"
   , variant->longMember);
43                 break;
```

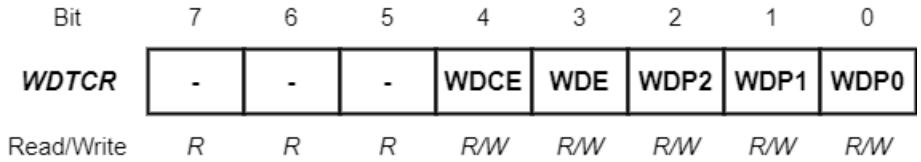
```
44              case FLOAT:
45                  printf("Variant member value: %f\n",
    variant->floatMember);
46                  break;
47              default:
48                  printf("Invalid member type\n");
49          }
50      }
51  }
52
53  int main() {
54      Variant_t variant;
55      initWithFloat(&variant, 4.5f);
56      printVariant(&variant);
57      initWithLong(&variant, 21);
58      printVariant(&variant);
59      return 0;
60  }
```

Listing 20. Pseudo-polimorfizm w języku *C* z wykorzystaniem unii

Inny przykład praktycznego wykorzystania ***unii*** w języku *C* przedstawiono na listingu 21. Ośmiobitowy rejestr ***Watchdog Timer Control Register*** (*WDTCR*) mikrokontrolera ATmega8535 służy do konfiguracji układu *watchdog*, którego zadaniem jest wykrywanie nieprawidłowego działania systemu i automatyczne przywracanie mikrokontrolera do właściwego stanu. Zawartość rejestru przedstawiono na rys. 4.3.:

- bity 0...2 (***WDP0...WDP2***) – ***Watchdog Timer Prescaler***; służą skalowaniu częstotliwości oscylatora układu *watchdog*;
- bit 3 (***WDE***) – ***Watchdog Enable***; włączenie (1) albo wyłączenie (0) układu *watchdog*;

- bit 4 (***WDCE***) – ***Watchdog Change Enable***; włączenie możliwości zmiany stanu (bitu ***WDE***) układu *watchdog* (możliwość automatycznego wyłączenia układu *watchdog*);
- bity 5...7 – zarezerwowane (nieużywane).



Rys. 4.3. Rejestr *Watchdog Timer Control Register* (*WDTCR*) mikrokontrolera ATmega8535 [1]

Unia ***WDTCR*** stanowi programową realizację rejestru ***WDTCR*** mikrokontrolera ATmega8535. Pole ***reg*** umożliwia jednoczesny zapis całego rejestru (bity 0...7), natomiast pola ***WDP0***, ***WDP1***, ***WDP2***, ***WDE***, ***WDCE*** i ***reserved*** umożliwiają zapis pojedynczych bitów. W danym momencie rejestr może przechowywać wartość zapisaną albo pod zmienną ***reg*** albo wewnątrz zagnieżdżonej struktury. Zapis *: n* obok pól struktury ogranicza wartość określonego pola do *n* bitów (tzw. *pola bitowe*), np. *uint8_t WDP0 : 1* ogranicza pole ***WDP0*** do wartości 0 albo 1 (1 bit).

```c
#include <stdint.h>

typedef union {
    struct {
        // Pola bitowe
        uint8_t WDP0 : 1;
        uint8_t WDP1 : 1;
        uint8_t WDP2 : 1;
        uint8_t WDE : 1;
        uint8_t WDCE : 1;
        uint8_t reserved : 3;
    };
    // 8-bitowa zmienna calkowita
    uint8_t reg;
} WDTCR;

int main() {
    WDTCR watchdogRegister;
    // WDP1 = 1, WDE = 1, WDCE = 1
    // Zapis calego rejestru
    watchdogRegister.reg = (1 << 1) | (1 << 3) | (1
   << 4);
    // Zapis pojedynczych bitow
    watchdogRegister.WDP1 = 1;
    watchdogRegister.WDE = 1;
    watchdogRegister.WDCE = 1;
    return 0;
}
```

Listing 21. Zapisywanie wartości rejestru z wykorzystaniem unii

Literatura

[1] *ATmega8535(L) - Complete Datasheet*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2502.pdf.

[2] *memchr*. URL: http://www.cplusplus.com/reference/cstring/memchr/.

[3] *memcmp*. URL: http://www.cplusplus.com/reference/cstring/memcmp/.

[4] *memcpy*. URL: http://www.cplusplus.com/reference/cstring/memcpy/.

[5] *memmove*. URL: http://www.cplusplus.com/reference/cstring/memmove/.

[6] *Memory Layout of C Programs*. URL: https://www.geeksforgeeks.org/memory-layout-of-c-program/.

[7] *memset*. URL: http://www.cplusplus.com/reference/cstring/memset/.

[8] *Program w C++ i jego pamięć*. URL: http://simplemesimpleit.pl/index.php/10-c/9-c-blok-obszary-rodzaje-pamieci-stos-sterta-static-bss-data-code-text.

[9] Eric S. Raymond. *The lost art of structure packing*. URL: http://www.catb.org/esr/structure-packing/.

[10] Andrew S. Tanenbaum and Herbert Bos. *Modern Operating Systems*. 4th. Prentice Hall Press, 2014.