12. Generování cílového kódu

B0B99PRPA – Procedurální programování

Stanislav Vítek

Katedra radioelektroniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Program v C s více moduly

```c
int sum (int * a, int n);

int array[2] = {1, 2};

int main (void)
{
  int val = sum (array, 2);
  return val;
}
```

main.c

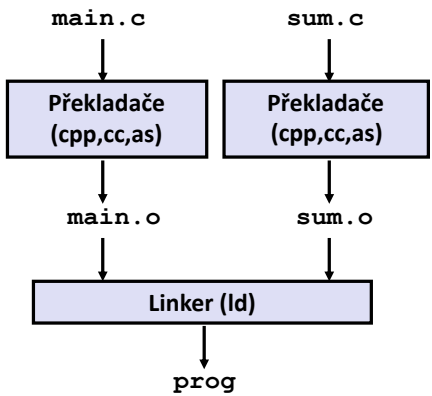
```c
int sum (int *a, int n)
{
  int i, s= 0;

  for (i = 0; i < n; i++) {
    s += a[i];
  }

  return s;
}
```

sum.c

Překlad a linkování

- Programy v C/C++ jsou přeloženy a linkovány **kompilátorem**

```
standa@teplaky:~$ gcc -Og -o prog main.c sum.c
```



Zdrojové kódy

Odděleně přložené relokovatelné objektové soubory

Spustitelný objektový soubor (obsahuje kód a data všech funkcí definovaných v main.c a sum.c)

Výhody použití linkeru

1. Modularita

- Program může být rozepsán do několika souborů (modulů)
- Lze vytvářet knihovny často používaných funkcí

2. Efektivita

- Čas kompilace – oddělená kompilace
  - změním jeden soubor → zkompiluji → přilinkuji k ostatním
  - nezměněné soubory není třeba znova kompilovat
  - lze kompilovat různé moduly nezávisle
- Velikost kódu – knihovny
  - **statické knihovny**
    - spustitelné soubory a obrazy v paměti obsahují pouze knihovní kód, který používají
  - **dynamické knihovny**
    - spustitelné soubory neobsahují žádný knihovní kód
    - za běhu může být jedna kopie knihovního kódu sdílena napříč více procesy

Co linker dělá? (1/2)

1. Rozlišování symbolů

- Programy definují a referencují symboly (globální proměnné a funkce)

```
void swap() {...}     /* define symbol swap */
swap();               /* reference symbol swap */
int *xp = &x;         /* define symbol xp, reference x */
```

- Definice symbolů jsou v umístěny v objektovém souboru (assemblerem) v **tabulce symbolů**
  - Tabulka symbolů je pole záznamů
  - Každý záznam obsahuje název, velikost a umístění symbolu

Během kroku rozlišování symbolů provede linker asociaci referencí s právě jednou definicí.

Symboly v příkladu

```c
int sum (int * a, int n);

// array - definice
int array[2] = {1, 2};

// main - definice
int main (void)
{
  // sum - reference
  int val = sum (array, 2);
  return val;
}
```

main.c

```c
// sum - definice
int sum (int *a, int n)
{
  int i, s= 0;

  for (i = 0; i < n; i++) {
    s += a[i];
  }

  return s;
}
```

sum.c

Co linker dělá? (2/2)

2. Relokace

- uspořádání objektů v adresním prostoru programu
  - strojový kód používá absolutní adresy
  - při nahrání kódu na jinou adresu by kód nefungoval
- modifikace absolutních adres
  - podle relokační tabulky nebo rozlišení symbolů
  - relokační tabulka je součástí spustitelného souboru
- spustitelný produkt linkeru může vyžadovat další relokaci při načtení do paměti
  - např. při použití dynamických knihoven
  - u hardwaru nabízejícího virtuální paměť je tento průchod obvykle vynechán – každý program je umístěn do vlastního adresního prostoru, takže nedochází ke konfliktu, i když se všechny programy načítají na stejnou základní adresu

Objektové soubory

- **Obsah objektových souborů**
  - Informace o souboru a překladači
  - Cílová architektura, struktura, ...
  - Kód
  - Data
  - Ostatní informace potřebné k běhu/linkování/debugování
    - Relokace, informace o symbolech atd.
    - Ladicí informace

Tyto informace v oddílech (sekcích)

- **Formáty objektových souborů**
  - a.out (UNIX (od 1971)/starý Linux)
  - ELF (Executable and Linkable Format, Linux, od 1988 majoritní *nix formát)
  - COM (DOS, čistě kód+data, nic víc)
  - COFF (Common Object File Format, UNIX (1983), IRIX, nahrazen formátem ELF)
  - MZ (DOS .exe)
  - PE (Portable Executable, Windows .exe, vychází z COFF)

Typy objektových souborů

Relokovatelný objektový soubor (`*.o`)

- Obsahuje kód a data v takové formě, která může být kombinována s jinými relokovatelnými objektovými soubory a společně mohou vytvořit spustitelný kód
- Každý zrojový kód (modul) produkuje právě jeden objektový kód

Spustitelný objektový soubor (`a.out`)

- Obsahuje kód a data v takové formě, která může být přímo nakopírována do paměti a spuštěna

Sdílený objektový soubor (`*.so`)

- Speciální typ relokovatelného objektového souboru, který může být nahrán do paměti a dynamicky linkován, případně nahrán za běhu programu
- Windows: Dynamic Linked Libraries (DLLs)

ELF – Executable and Linkable Format

- Hlavní souborový formát OS Linux – přenositelný, relokovatelný, rozšiřitelný
- Struktura
  - ELF hlavička – délka slova, endianita, typ objektového souboru, platforma
  - Hlavičky sekcí – velikost sekce, virtuální adresy
- Sekce
  - vytvářené překladačem/linkerem
  - čtené překladačem/linkerem

Programy pro práci s objekty

```
objdump
readelf
hd
```

Předdefinované sekce

.text	kód
.data	nekonstantní data (proměnné)
.rodata	konstantní data (řetězce apod.)
.bss	data, která se inicializují na 0
.interp	interpretr
.symtab	tabulka symbolů pro ladění (strip)
.dynsym	symboly pro dynamický linker

Symboly linkeru

Globální symboly

- Symboly definované v modulu **m**, které mohou být referencované z jiných modulů
- Např. nestatické C funkce nebo nestatické globální proměnné

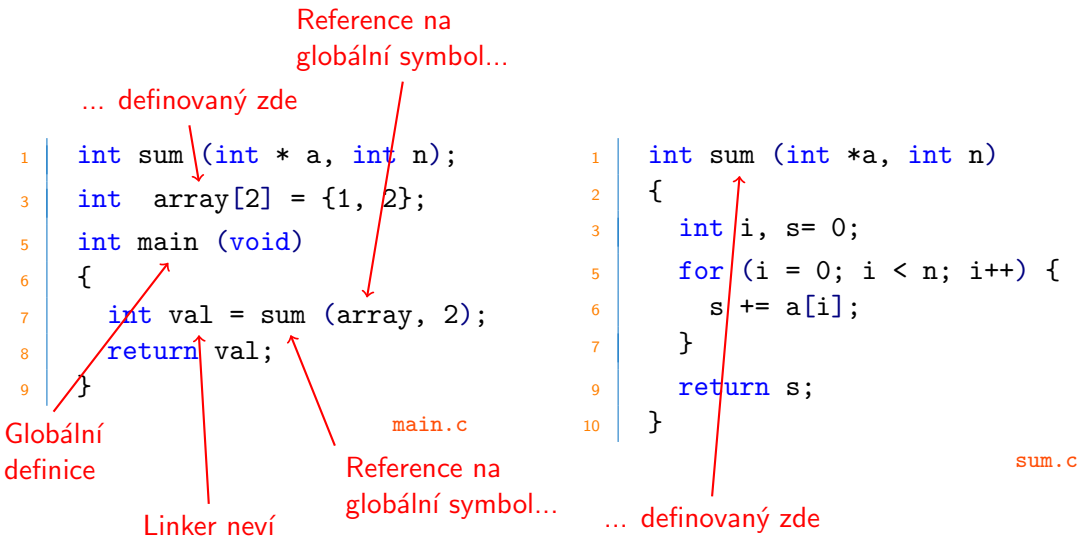
Externí symboly

- Globální symboly, na které se odkazuje z modulu **m**, ale jsou definovány v jiném modulu

Lokální symboly

- Symboly, které jsou definovény a referencovány výlučně v modulu **m**
- Např. C funkce a globální proměnné definované s atributem `static`
- Lokální symboly linkeru nejsou to samé, jako lokální proměnné programu

Rozlišování symbolů



Identifikace symbolů

- Který z následujících symbolů bude zastouper v tabulce symbolů `symbols.o`?

```
1  int incr = 1;
3  static int foo(int a) {
4    int b = a + incr;
5    return b;
6  }
8  int main(int argc,
9  char* argv[]) {
10   printf("%d\n", foo(5));
11   return 0;
12 }
```

- incr
- foo
- a
- argc
- argv
- b
- main
- printf
- "%d\n"

```
readelf -s symbols.o
```

Lokální symboly

- Lokální nestatické proměnné vs. lokální statické proměnné
  - lokální nestatické proměnné jsou uloženy v zásobníku
  - lokální statické proměnné: uložené v `.bss` nebo `.data`

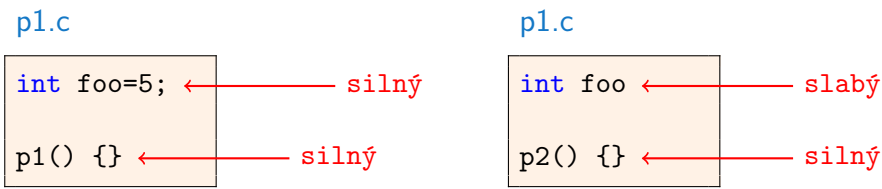
```
1  static int x = 15;
3  int f() {
4    static int x = 17;
5    return x++;
6  }
8  int g() {
9    static int x = 19;
10   return x += 14;
11 }
13 int h() {
14   return x += 27;
15 }
```

Překladač alokuje místo v `.data` pro každou definici `x`

Jsou vytvořeny lokální symboly v tabulce symbolů s unikátními jmény, např. `x`, `x.1721` a `x.1724`

Rozlišení duplicitních definic symbolů

- Symboly v programu jsou buď silné nebo slabé
  - silné funkce a inicializované globální proměnné
  - slabé neinicializované globální proměnné (nebo deklarované jako `extern`)



Pravidla pro symboly

1. Více silných symbolů se stejným jménem není dovoleno

- Silný symbol může být definován pouze jednou
- Jinak dojde k chybě při linkování

2. Pokud existuje silný symbol a více slabých, linker vybírá silný

- Reference na slabé symboly se mění na reference na silné

3. Pokud existuje více slabých symbolů, vybírá linker náhodně

- Lze potlačit při překladu: `gcc -fno-common`

Příklady

```
int x;
p1() {}
```

```
p1() {}
```

Chyba při linkování, dva silné symboly (`p1`)

```
int x;
p1() {}
```

```
int x;
p2() {}
```

Reference na `x` odkazují na tu samou neinicializovanou proměnnou `int`. To chceme?

```
int x, y;
p1() {}
```

```
double x;
p2() {}
```

Zápis do `x` v `p2` může přepsat hodnotu `y`

```
int x=7;
int y=5;
p1() {}
```

```
double x;
p2() {}
```

Zápis do `x` v `p2` může přepsat hodnotu `y`

```
int x=7;
p1() {}
```

```
int x;
p2() {}
```

Reference `x` odkazují na tu samou inicializovanou proměnnou

Příklad zmatení typů

```c
/* Slaby symbol */
long int x;

int main(int argc, char *argv[]) {
  printf("%ld\n", x);
  return 0;
}
```

```c
/* Globalni silny symbol */
double x = 3.14;
```

- Kompilace proběhne bez chyb nebo varování
- Co se vytiskne na standardní výstup?

Globální proměnné

Pokud je to možné, vyhněte se jim.

- Pokud to jinak nejde
  - používejte atribut `static`, pokud je to možné
  - pokud definujete globální proměnnou, inicializujte ji
  - použijte `extern`, pokud odkazujete na globální proměnnou v jiném modulu

```c
#include <stdio.h>
#include "global.h"

int g = 0;

int main() {
  printf("f: %i\n", f());
  return 0;
}
```

```c
#include "global.h"

int f() {
  return g+1;
}
```

Jak bude vypadat global.h?

Knihovny – distribuce funkcí

Jak připravit a distribuovat často používané funkce?

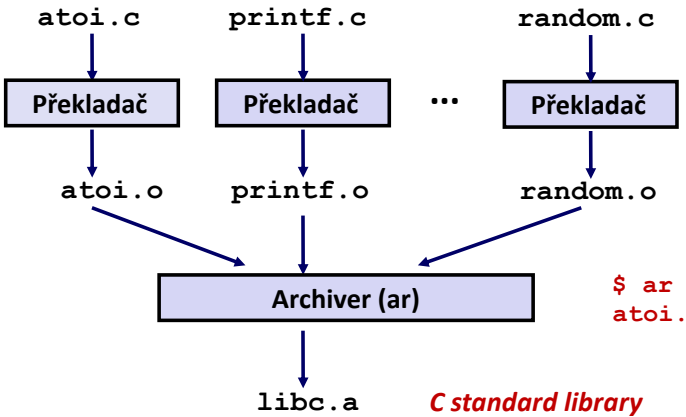
- Typicky matematické funkce, práce s pamětí, manipulace s řetězci, vstup a výstup, ...

Využití linkeru

- **1.** Vložení všech funkcí do jednoho velkého souboru
  - Programátor linkuje velký objektový soubor do svých programů
  - Není příliš efektivní
- **2.** Vytvoření více separátních souborů (třeba pro každou funkci)
  - Programátor explicitně linkuje objekty s potřebnou funkcionaliou
  - Z hlediska kódu efektivnější, z hlediska programátora moc ne :-)

Statické knihovny

- Spojení relokovatelných objektových souborů do jednoho souboru – **archivu**
- Archiv umožňuje inkrementální změny




```
$ ar rs libc.a \
atoi.o printf.o … random.o
```

C standard library

Běžně používvané knihovny

`libc.a` (standardní C knihovna)

`libm.c` (matematická knihovna)

```
$ ar -t /usr/lib/libc.a | sort
...
fork.o
fprintf.o
fpu_control.o
fputc.o
...
```

```
$ ar -t /usr/lib/libm.a | sort
...
e_acos.o
e_acosf.o
e_acosh.o
e_acoshf.o
...
```

Co dělat, když nemám knihovnu v `/lib` ani v `/usr/bin`?

```
$ gcc --print-file-name=libc.a
/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/4.8/../../../x86_64-linux-gnu/libc.a
```

Linkování se statickými knihovnami (1/2)

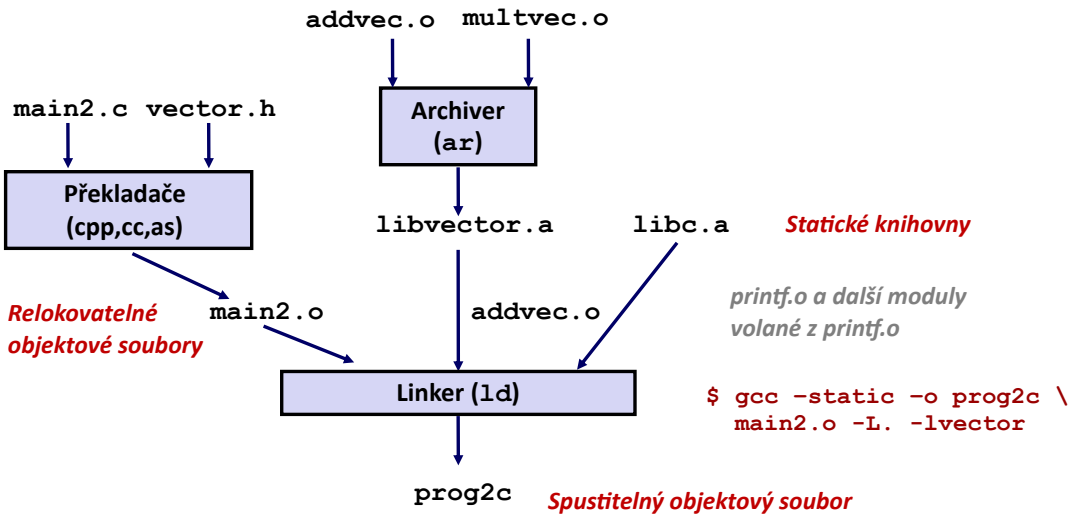
```c
#include <stdio.h>
#include "vector.h"

int x[2] = {1, 2};
int y[2] = {3, 4};
int z[2];

int main()
{
  addvec(x, y, z, 2);
  printf("z = [%d %d]\n",
  z[0], z[1]);
  return 0;
}
```

libvector.a

```c
void addvec(int *x, int *y,
int *z, int n) {
  for (int i = 0; i < n; i++)
    z[i] = x[i] + y[i];
}
```

```c
void multvec(int *x, int *y,
int *z, int n) {
  for (int i = 0; i < n; i++)
    z[i] = x[i] * y[i];
}
```

Linkování se statickými knihovnami (2/2)



Používání statických knihoven

- Algoritmus linkeru pro řešení externích referencí
  - Projdi `*.o` a `*.a` soubory v pořadí určeném příkazem kompilace
  - Během průchodu udržuj seznam nevyřešených referencní
  - Při nalezení nového `*.o` nebo `*.a` se snaž vyřešit symboly z tabulky symbolů
  - Pokud je na konci procesu nějaký nevyřešený symbol, došlo k chybě

Problém:

- Záleží na pořadí!
- Doporučení: knihovny dávejte na konec

```
$ gcc -static -o prog2c -L. -lvector main2.o
main2.o: In function ‘main’:
main2.c:(.text+0x19): undefined reference to ‘addvec’
collect2: error: ld returned 1 exit status
```

Sdílené knihovny

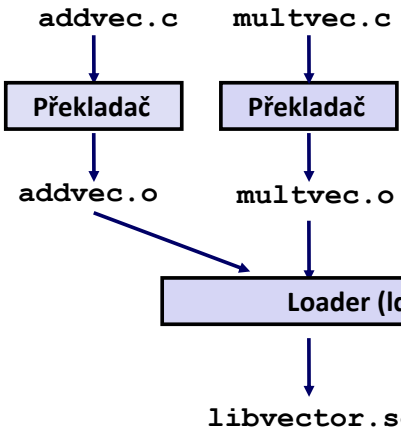
- **Nevýhody statických knihoven**
  - Duplikace ve uložených spustitelných souborech (každá funkce potřebuje `libc`)
  - Duplikace v běžících spustitelných souborech
  - I malá změna v systémové knihovně znamená nutnost přelinkování aplikace
- **Moderní řešení: sdílené knihovny**
  - Objektové soubory, obsahující kód a data, která jsou nahrávána do aplikace dynamicky (při spuštění nebo za běhu)
- **Dynamické linkování může proběhnout při zavádění do paměti (load-time linking)**
  - Typicky v Linuxu, automatizace dynamickým linkerem (`ld-linux.so`)
- **Dynamické linkování může také proběhout po startu programu (run-time linking)**
  - V Linuxu se řeší před rozhraní `dlopen()`
  - Distribuovaný SW, výkonné webové servery, ...
- **Sdílené knihovny lze sdílet mezi více procesy**
  - Pokud zbyde čas na příští přednášce

Co dynamické knihovny potřebují?

- `.interp` sekce
  - Specifikuje dynamický linker (např. ld-linux.so)
- `.dynamic` sekce
  - Obsahuje informace (jména, ...) použitých dynamických knihoven
  - Viz příklad
- Kde je možné knihovny nalézt?
  - Program `ldd`

```
$ ldd prog
 linux-vdso.so.1 => (0x00007ffcf2998000)
 libc.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6 (0x00007f99ad927000)
 /lib64/ld-linux-x86-64.so.2 (0x00007f99adcef000)
```

Příklad dynamické knihovny

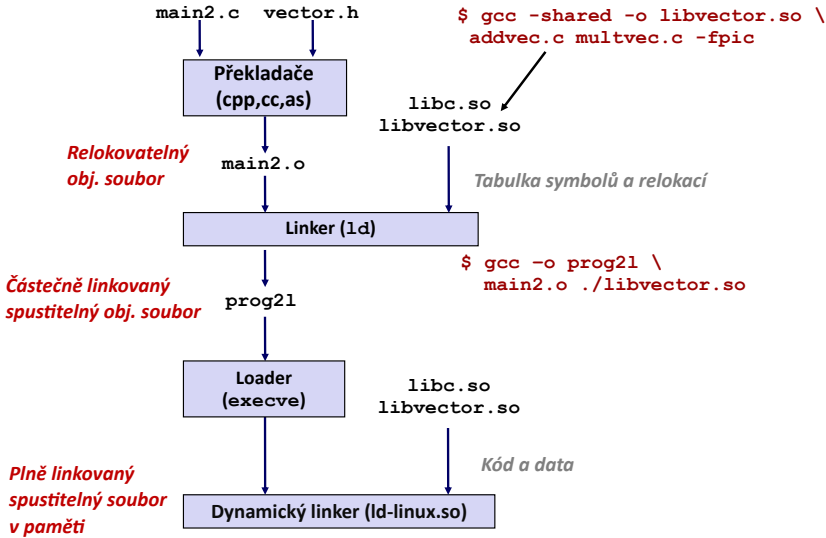



```
$ gcc -Og -c addvec.c multvec.c -fpic
```

```
$ gcc -shared -o libvector.so \
  addvec.o multvec.o
```

dynamická knihovna

Load-time dynamické linkování



Run-time dynamické linkování (1/3)

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <dlfcn.h>
5  int x[2] = {1, 2}, y[2] = {3, 4}, z[2];
7  int main(int argc, char** argv) {
8    void *handle;
9    void (*addvec)(int *, int *, int *, int);
10   char *error;
11   /* Dynamically load the shared library that contains addvec() */
12   handle = dlopen("./libvector.so", RTLD_LAZY);
13   if (!handle) {
14     fprintf(stderr, "%s\n", dlerror());
15     exit(1);
16   }
17   ...
```

Run-time dynamické linkování (2/3)

```
    /* Get a pointer to the addvec() function we just loaded */
    addvec = dlsym(handle, "addvec");
    if ((error = dlerror()) != NULL) {
      fprintf(stderr, "%s\n", error);
      exit(1);
    }
    /* Now we can call addvec() just like any other function */
    addvec(x, y, z, 2);
    printf("z = [%d %d]\n", z[0], z[1]);
    if (dlclose(handle) < 0) {  /* Unload the shared library */
      fprintf(stderr, "%s\n", dlerror());
      exit(1);
    }
    return 0;
}
```

lec01/dll.c

Run-time dynamické linkování (3/3)