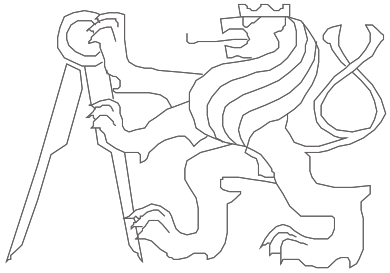
Architektura počítačů

Předávání parametrů funkcím a virtuálním instrukcím operačního systému



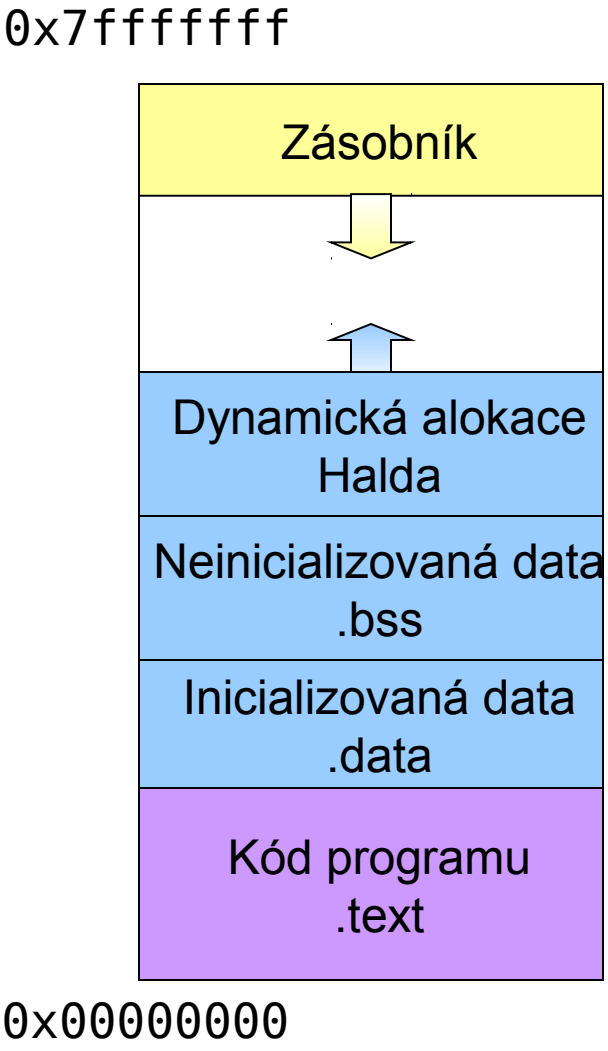
České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická

Různé druhy volání funkcí a systému

- Volání běžných funkcí (podprogramů)
  - Možnosti předávání parametrů – v registrech, přes zásobník, s využitím registrových oken
  - Způsob definuje volací konvence – musí odpovídat možnostem daného CPU a je potřeba, aby se na ní shodli tvůrci kompilátorů, uživatelských a systémových knihoven

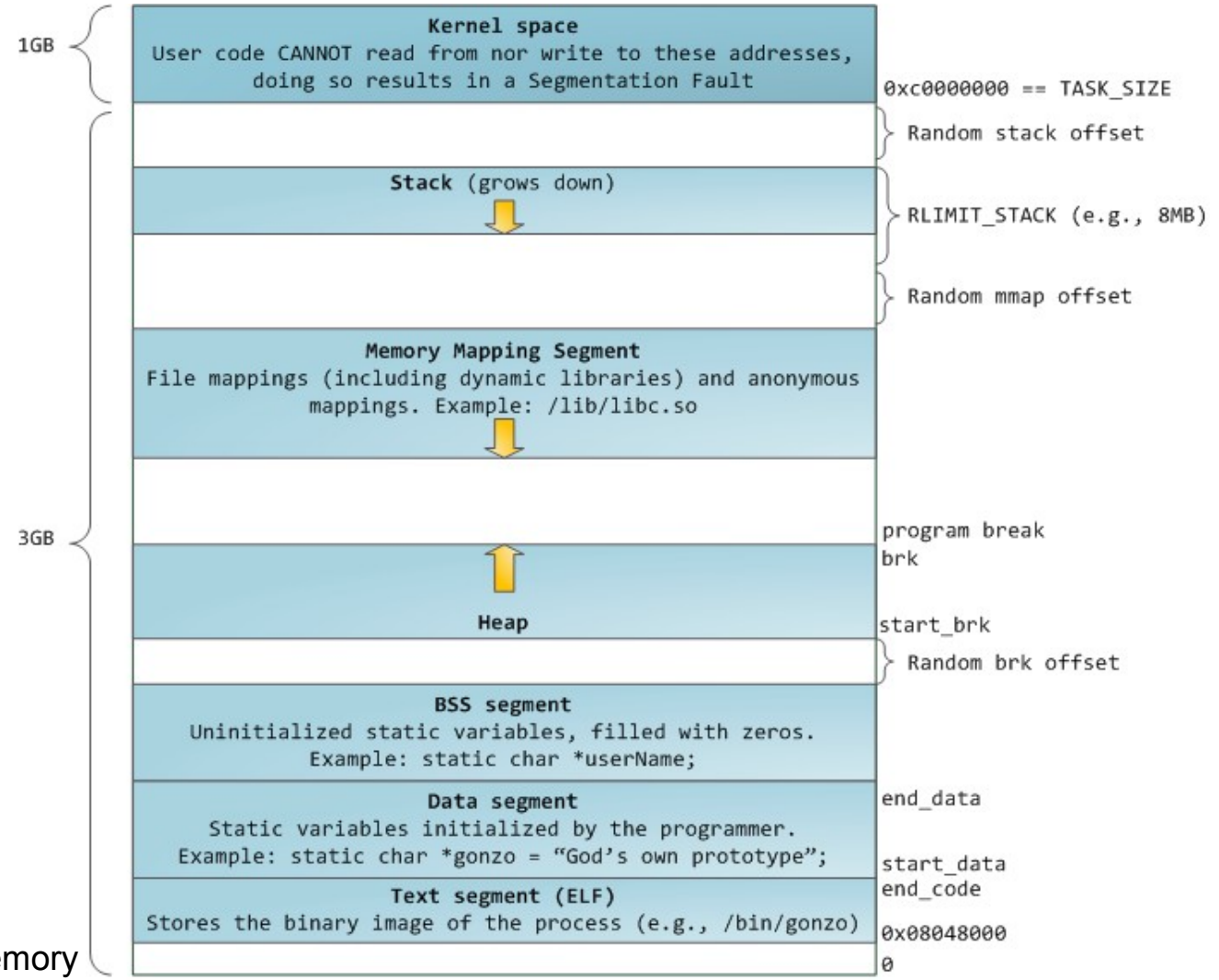
    (x86 Babylón - cdecl, syscall, optlink, pascal, register, stdcall, fastcall, safecall, thiscall MS/others)
  - Zásobníkové rámce pro uložení lokálních proměnných a alloca()
- Volání systémových služeb
  - Přechod mezi uživatelským a systémovým režimem
- Vzdálená volání funkcí a metod (volaný nemůže číst paměť)
  - Přes síť (RPC, CORBA, SOAP, XML-RPC)
  - Lokální jako síť + další metody: OLE, UNO, D-bus, atd.

Rozložení programu ve virtuálním adresním prostoru



- Do adresního prostoru procesu je nahraný – mapovaný soubor obsahující kód a inicializovaná data programu – sekce **.data** a **.text** (možnost rozdílné LMA a VMA)
- Oblast pro neinicializovaná data (**.bss**) je pro C programy nulovaná
- Nastaví se ukazatel zásobníku a předá řízení na startovací adresu programu (**_start**)
- Dynamická paměť je alokovaná od symbolu **_end** nastaveného na konec **.bss**

Adresní prostor procesu (32-bit Linux)



Převzaté z Gustavo Duarte:
Anatomy of a Program in Memory
http://duartes.org/gustavo/blog/post/anatomy-of-a-program-in-memory

Postup volání podprogramu

- Volající program vypočítá hodnoty parametrů
- Uloží proměnné alokované do registrů, které mohou být volaným podprogramem změněné (clobberable register)
- Parametry jsou uloženy do registrů a nebo na zásobník tak jak definuje použitá volací konvence (ABI)
- Řízení se přesune na první instrukci podprogramu, přitom je zajištěné, že návratová adresa je uložena na zásobník nebo do registru
- Podprogram ukládá hodnoty registrů, které musí být zachovány a sám je chce využít (callee saved/non-clobberable)
- Alokuje oblast pro lokální proměnné
- Provede vlastní tělo podprogramu
- Uloží výsledek do konvencí daného registru(ů)
- Obnoví uložené registry a provede návrat na následující instrukci
- Instrukce pro návrat může v některých případech uvolnit parametry ze zásobníku, většinou je to ale starost volajícího

Příklad: registry a volací konvence MIPS

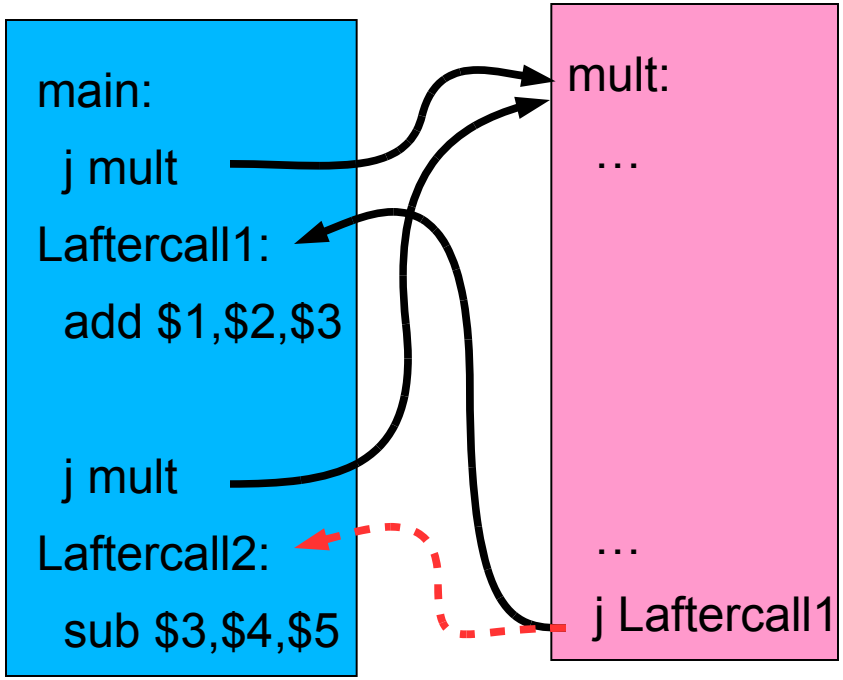
- a0 – a3: argumenty (registry $4 – $7)
- v0, v1: výsledná hodnota funkce ($2 a $3)
- t0 – t9: prostor pro dočasné hodnoty ($8-$15,$24,$25)
  - volaná funkce je může používat a přepsat
- at: pomocný registr pro assembler ($1)
- k0, k1: rezervované pro účely jádra OS ($26, $27)
- s0 – s7: volanou funkcí ukládané/zachované registry ($16-$23)
  - pokud jsou využity volaným, musí být nejdříve uloženy
- gp: ukazatel na globální statická data ($28)
- sp: ukazatel zásobníku ($29)
- fp: ukazatel na začátek rámce na zásobníku ($30)
- ra: registr návratové adresy ($31) – implicitně používaný instrukcí **jal** – jump and link

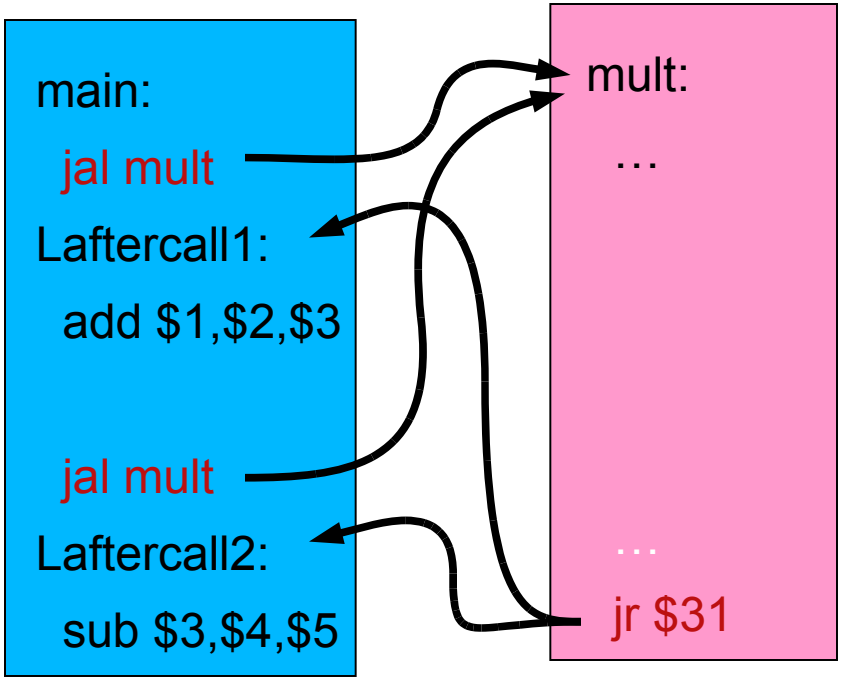
MIPS: instrukce pro volání a návrat

- Volání podprogramu: jump and link
  - **jal** ProcedureLabel
  - Adresa druhé (uvažujte delay slot) následující instrukce za instrukcí **jal** je uložena do registru **ra** ($31)
  - Cílová adresa je uložena do čítače instrukcí **pc**
- Návrat z podprogramu: jump register
  - **jr ra**
  - Obsah registru **ra** je přesunutý do **pc**
  - Instrukce je také použitelné pro skoky na vypočítanou adresu nebo adresu z tabulky – například konstrukce case/switch statements

Rozdíl mezi voláním a skokem

Skok neuloží návratovou hodnotu
kód tedy nejde využít z více míst





Autor příkladu Prof. Sirer
Cornell University

naopak volání s využitím registru **ra**
umožňuje volat podprogram tehdy,
kdy je potřeba

Příklad kódu funkce

Zdrojový kód v jazyce C:

```
int leaf_example (int g, h, i, j)
  { int f;
    f = (g + h) - (i + j);
    return f;
  }
```

Parametry **g**, …, **j** jsou uložené v registrech **a0**, …, **a3**

Hodnota **f** je počítaná v registru **s0** (proto je potřeba **s0** uložit na zásobník)

Návratová hodnota je uložená v registru **v0**

Příklad překladu pro architekturu MIPS

int leaf_example (int g, h, i, j)
g→$a0, h→$a1, i→$a2, j→$a3, $v0 – ret. val, $sX – save, $tX – temp, $ra – ret. addr

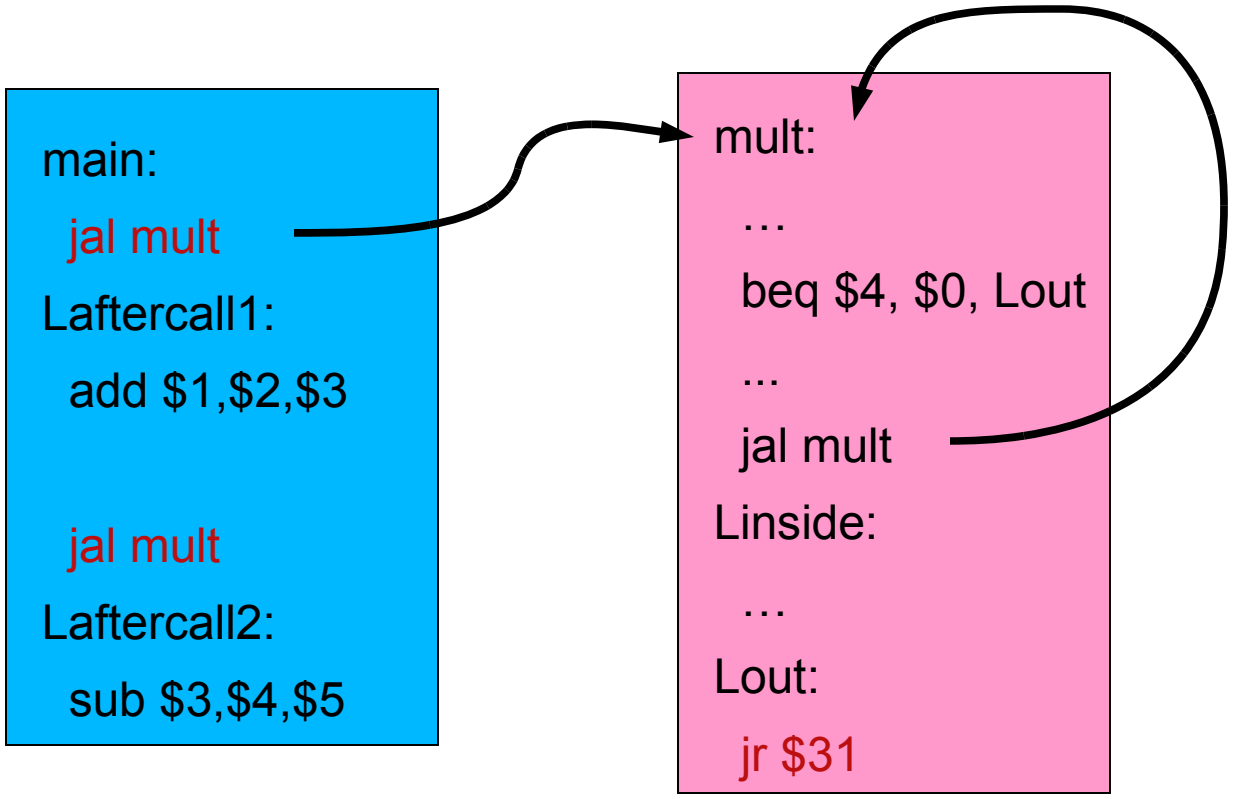
leaf_example:	
addi $sp, $sp, -4 sw $s0, 0($sp)	Save $s0 on stack

add $t0, $a0, $a1
add $t1, $a2, $a3
sub $s0, $t0, $t1
	Procedure body

add $v0, $s0, $zero	Result
lw $s0, 0($sp) addi $sp, $sp, 4	Restore $s0
jr $ra	Return

Zdroj: Henesson: Computer Organization and Design

Problém vícenásobného volání s link-registrem



Registr **ra** je potřeba někam uložit stejně jako ukládané registry **s***X*

Rekurzivní funkce nebo funkce volající další funkci

Zdrojový kód v jazyce C:

```
int fact (int n)
  {
    if (n < 1) return f;
    else return n * fact(n - 1);
  }
```

Parametr **n** je uložen v registru **a0**

Návratová hodnota v registru **v0**

MIPS - rekurzivní volání

```
fact:
    addi  $sp, $sp, -8      # adjust stack for 2 items
    sw    $ra, 4($sp)       # save return address
    sw    $a0, 0($sp)       # save argument
    slti  $t0, $a0, 1       # test for n < 1
    beq   $t0, $zero, L1
    addi  $v0, $zero, 1     # if so, result is 1
    addi  $sp, $sp, 8       #   pop 2 items from stack
    jr    $ra               #   and return
L1: addi  $a0, $a0, -1      # else decrement n
    jal   fact              # recursive call
    lw    $a0, 0($sp)       # restore original n
    lw    $ra, 4($sp)       #   and return address
    addi  $sp, $sp, 8       # pop 2 items from stack
    mul   $v0, $a0, $v0     # multiply to get result
    jr    $ra               # and return
```

Běžné C volání x86 pro 32-bit režim

- Registry $EAX, $ECX, a $EDX mohou být podprogramem modifikované
- Registry $ESI, $EDI, $EBX jsou přes volání zachované
- Registry $EBP, $ESP mají speciální určení, někdy ani $EBX nelze použít obecně (vyhrazen pro GOT přístup)
- Tři registry jsou většinou nedostatečné i pro lokální proměnné koncových funkcí
- $EAX a pro 64-bit typy i $EDX je využitý pro předání návratové hodnoty
- Vše ostatní – parametry, lokální proměnné atd. je nutné ukládat na zásobník

SYSTEM V APPLICATION BINARY INTERFACE
Intel386™ ArchitectureProcessor Supplement

x86 – volání funkce s jedním parametrem

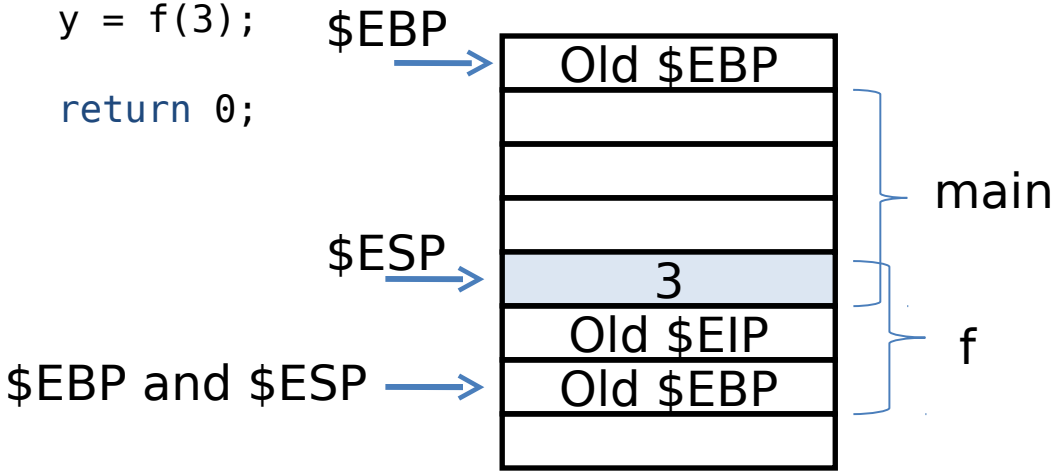
```c
#include <stdio.h>

int f(int x)
{
        return x;
}

int main()
{
        int y;

        y = f(3);

        return 0;
}
```




```
f:
        pushl   %ebp
        movl    %esp, %ebp
        movl    8(%ebp), %eax
        leave
        ret

main:
        pushl   %ebp
        movl    %esp, %ebp
        subl    $8, %esp
        andl    $-16, %esp
        subl    $16, %esp
        movl    $3, (%esp)
        call    f
        movl    %eax, -4(%ebp)
        movl    $0, %eax
        leave
        ret
```

Příklady převzaté z prezentace od autorů David Kyle a Jonathan Misurda

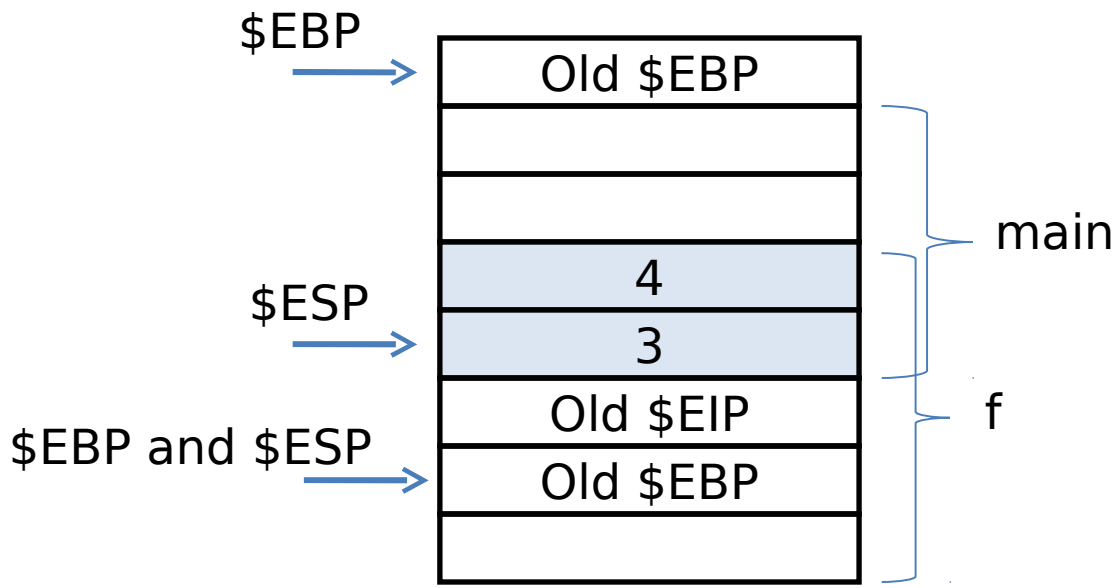
x86 – volání funkce se dvěma parametry

```
#include <stdio.h>

int f(int x, int y)
{
  return x+y;
}
```

```
int main()
{
  int y;
  y = f(3, 4);
  return 0;
}
```

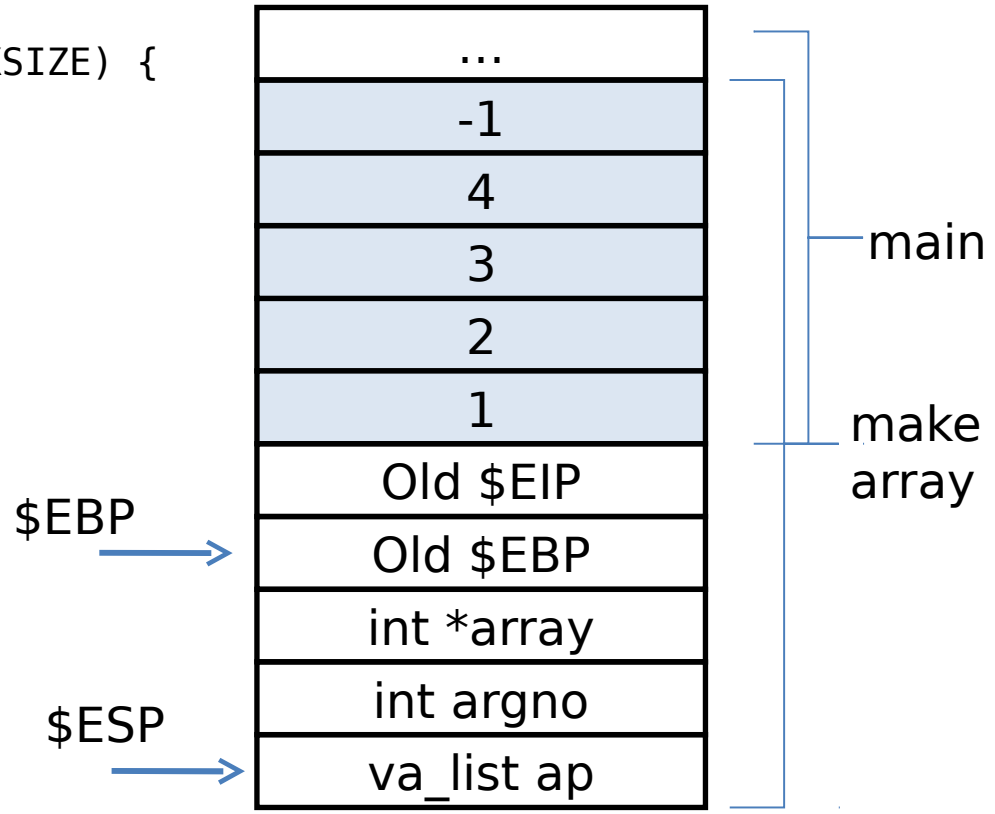
```
f:      pushl   %ebp
        movl    %esp, %ebp
        movl    12(%ebp), %eax
        addl    8(%ebp), %eax
        leave
        ret
main:   pushl   %ebp
        movl    %esp, %ebp
        subl    $8, %esp
        andl    $-16, %esp
        subl    $16, %esp
        movl    $4, 4(%esp)
        movl    $3, (%esp)
        call    f
        movl    %eax, 4(%esp)
        movl    $0, %eax
        leave
        ret
```



Proměnný počet parametrů - stdarg.h

```
int *makearray(int a, ...) {
   va_list ap;
   int *array = (int *)malloc(MAXSIZE * sizeof(int));
   int argno = 0;
   va_start(ap, a);
   while (a > 0 && argno < MAXSIZE) {
        array[argno++] = a;
        a = va_arg(ap, int);
   }
   array[argno] = -1;
   va_end(ap);
   return array;
}
```

va_list
va_start, va_arg,
va_end, va_copy



Volání

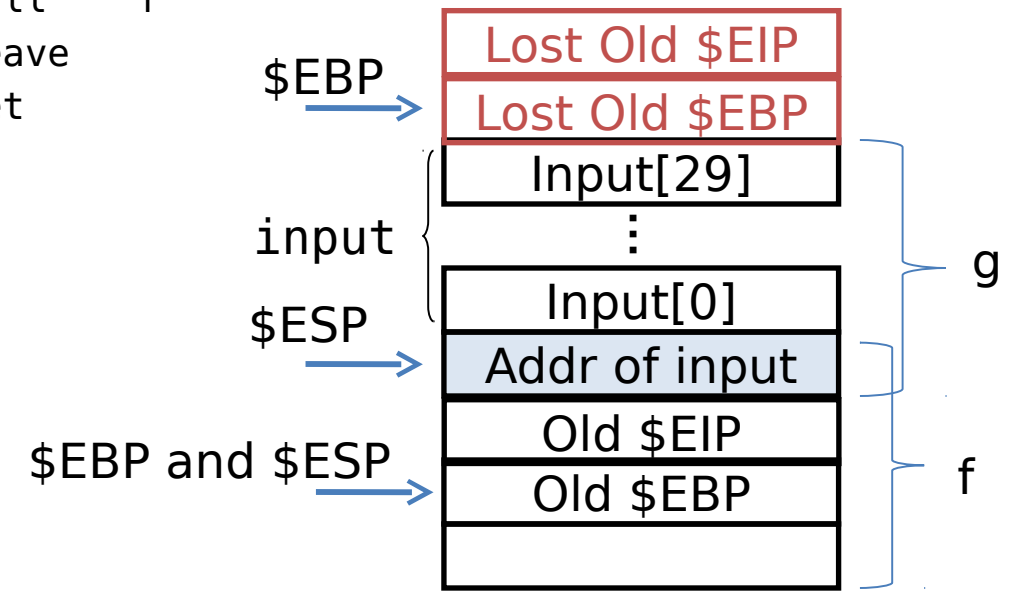
```
int *p;
int i;
p = makearray(1,2,3,4,-1);
for(i=0;i<5;i++)
  printf("%d\n", p[i]);
```

Přetečení na zásobníku – buffer overflow

```
void f(char *s)
{
  gets(s);
}

int g()
{
  char input[30];
  f(input);
}
```

```
g:
    pushl   %ebp
    movl    %esp, %ebp
    subl    $40, %esp
    andl    $-16, %esp
    subl    $16, %esp
    leal    -40(%ebp), %eax
    movl    %eax, (%esp)
    call    f
    leave
    ret
```



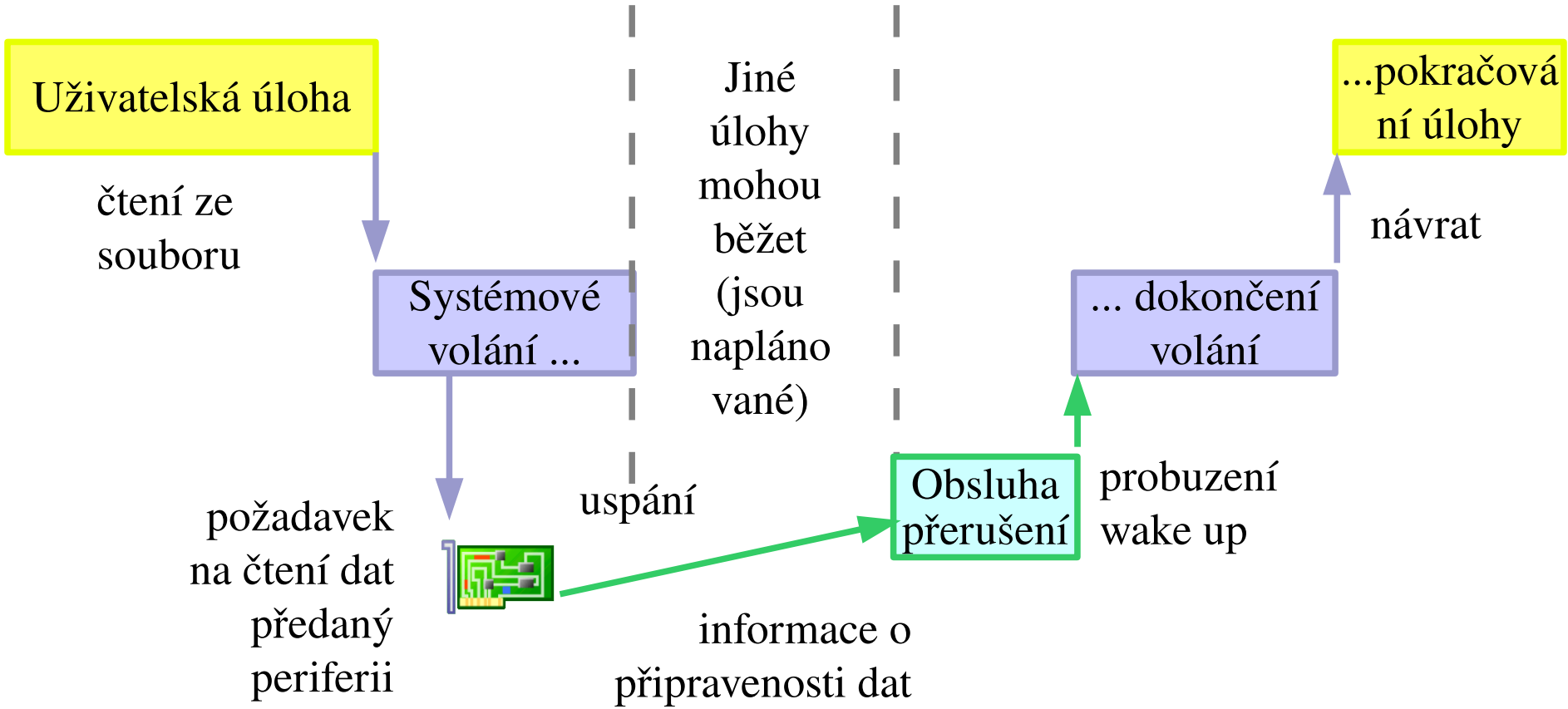
x86 v 64 bit režimu ()

System V Application Binary Interface
AMD64 Architecture Processor Supplement

- Původní 32-bit volací konvence je nevýhodná, příliš mnoho přístupů na zásobník
- 64-bitové registry $RAX, $RBX, $RCX, $RDX, $RSI, $RDI, $RBP, $RSP, $R8 až R15 a množství multimediálních registrů
- Podle AMD64 konvence až 6 celočíselných parametrů v registrech $RDI, $RSI, $RDX, $RCX, $R8 a $R9
- Prvních 8 parametrů double a float v XMM0-7
- Návratová hodnota v $RAX
- Zásobník zarovnaný na 16 bytů
- Pokud není jistota, že funkce přijímá pouze pevný počet parametrů (bez va_arg/...) je uložen do $RAX počet parametrů předaných v SSE registrech (nutnost va_copy)

Systémová volání – zopakování z přednášky o výjimkách

Systémové volání vyžaduje z důvodu ochrany paměti jádra OS přepnutí režimu procesoru z uživatelského módu do systémového.

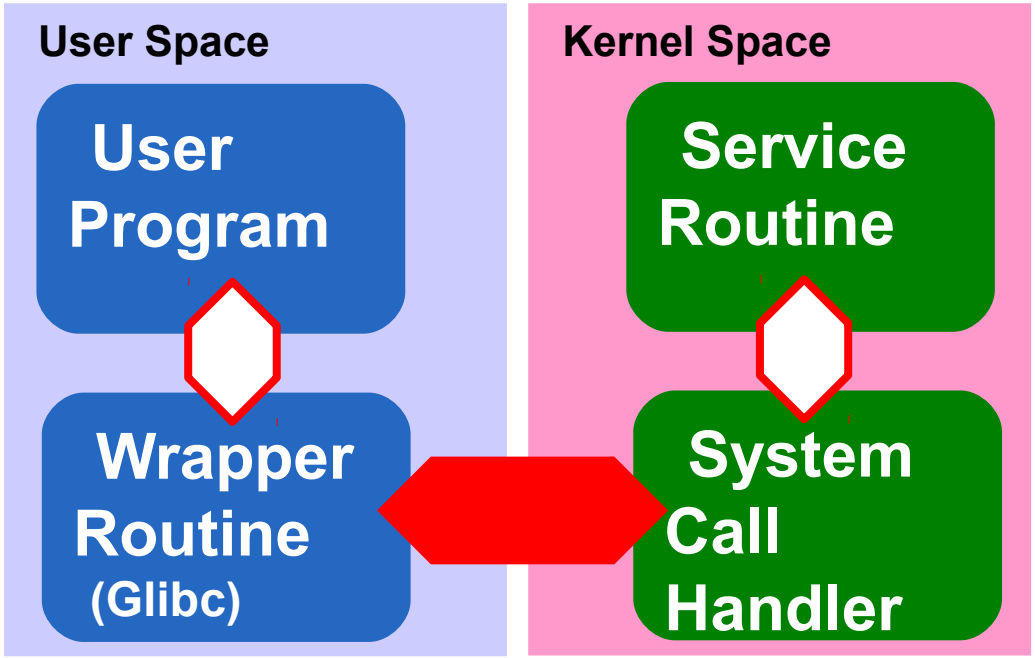


Zdroj: Free Electrons: Kernel, drivers and embedded Linux development http://free-electrons.com

Systémové volání - kroky

- Systémové služby (např. open, close, read, write, ioctl, mmap) jsou většinou běžným programům zpřístupněny přes běžné funkce C knihovny (GLIBC, CRT atd.), kterým se předávají parametry běžným způsobem
- Knihovní funkce pak přesune parametry nejčastěji do smluvených registrů, kde je očekává jádro OS
- Do zvoleného registru vloží číslo systémové služby (EAX na x86)
- Vyvolá výjimku (x86 Linux např int 0x80 nebo sysenter)
- Obslužná rutina jádra podle čísla dekóduje parametry služby a zavolá již obvyklým způsobem výkonnou funkci
- Jádro uloží do registru návratový kód a provede přepnutí zpět do uživatelského režimu
- Zde je vyhodnoceno hlášení chyb (errno) a běžný návrat do volajícího programu

Volání jádra – wrapper a obslužná rutina



Parametry některých systémových volání (Linux i386)

%eax	Name	Source	%ebx	%ecx	%edx	%esx	%edi
1	sys_exit	kernel/exit.c	int				
3	sys_read	fs/read_write.c	unsigned int	char *	size_t		
4	sys_write	fs/read_write.c	unsigned int	const char *	size_t		
5	sys_open	fs/open.c	const char *	int	mode_t		
6	sys_close	fs/open.c	int				
15	sys_chmod	fs/open.c	const char	mode_t			
20	sys_getpid	kernel/timer.c	void				
21	sys_mount	fs/namespace.c	char *	char *	char *	unsigned long	void *
88	sys_reboot	kernel/sys.c	int	int	unsigned int	void *	

System Call Number

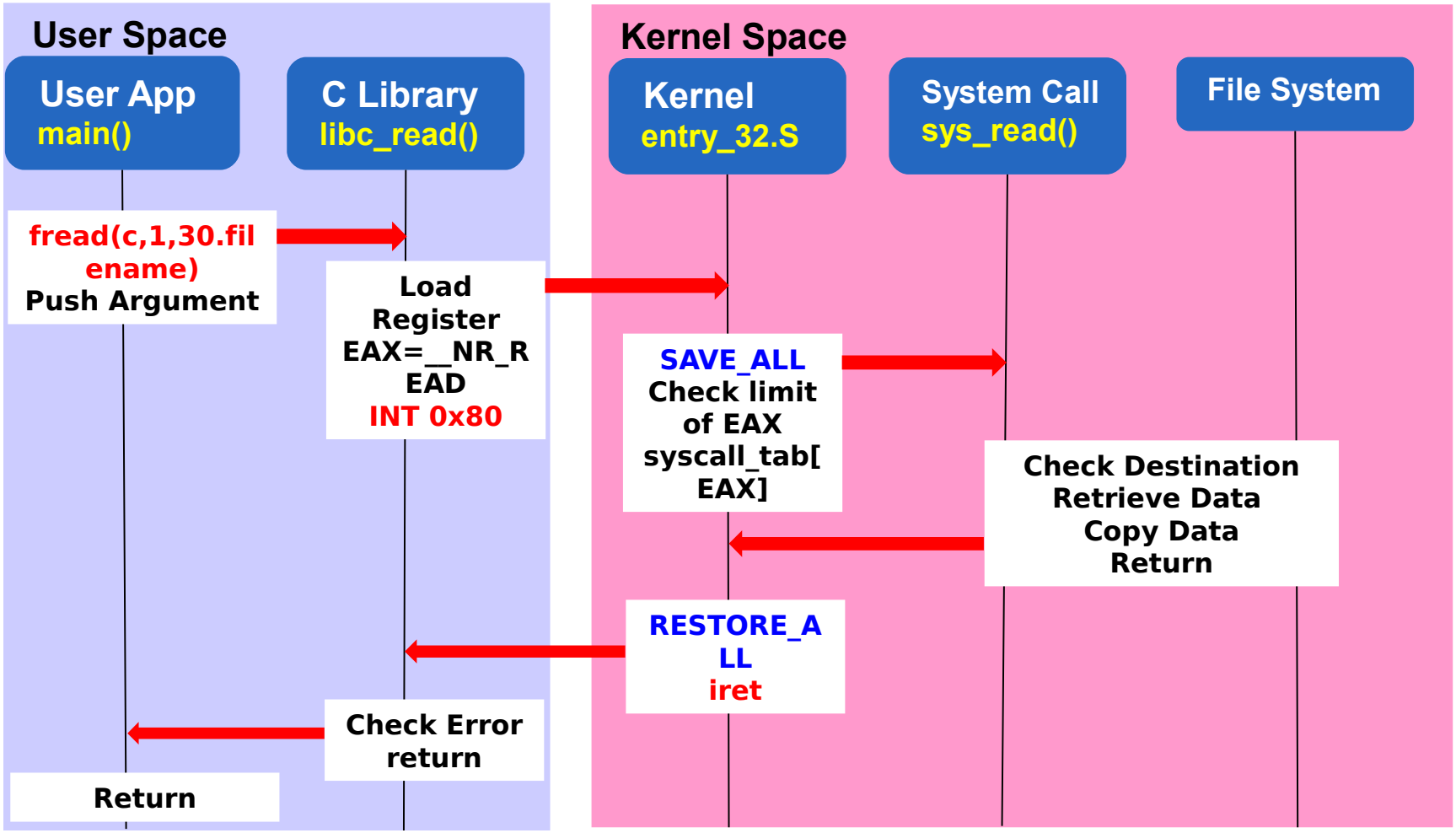
System Call Name

First parameter

Second parameter

Third parameter

Průběh volání



Systémového volání pro architekturu MIPS

Register	use on input	use on output	Note
$at	—	(caller saved)	
$v0	syscall number	return value	
$v1	—	2nd fd only for pipe(2)	
$a0 ... $a2	syscall arguments	returned unmodified	O32
$a0 ... $a2, $a4 ... $a7	syscall arguments	returned unmodified	N32 and 64
$a3	4th syscall argument	$a3 set to 0/1 for success/error	
$t0 ... $t9	—	(caller saved)	
$s0 ... $s8	—	(callee saved)	
$hi, $lo	—	(caller saved)	

Vlastní systémové volání je reprezentované instrukcí **SYSCALL**, přiřazení čísel **http://lxr.linux.no/#linux+v3.8.8/arch/mips/include/uapi/asm/unistd.h**

Zdroj: http://www.linux-mips.org/wiki/Syscall

Hello World – první MIPS program na Linuxu

```
#include <asm/unistd.h>
#include <asm/asm.h>
#include <sys/syscall.h>

#define O_RDWR              02
        .set    noreorder
        LEAF(main)
#       fd = open("/dev/tty1", O_RDWR, 0);
        la      a0,tty
        li      a1,O_RDWR
        li      a2,0
        li      v0,SYS_open
        syscall
        bnez    a3,quit
        move    s0,v0                   # delay slot
#       write(fd, "hello, world.\n", 14);
        move    a0,s0
        la      a1,hello
        li      a2,14
        li      v0,SYS_write
        syscall
```

```
#       close(fd);
        move    a0,s0
        li      v0,SYS_close
        syscall

quit:
        li      a0,0
        li      v0,SYS_exit
        syscall

        j       quit
        nop

        END(main)

        .data
tty:    .asciz  "/dev/tty1"
hello:  .ascii  "Hello, world.\n"
```