Call(callee, caller)

- caller: function making a call (呼叫 function 的一方)
- callee: function being called (被 call 的一方)

決定 caller && callee 的 register

- $\$a0$-$\$a3$: 四個 argument registers 傳遞參數，超過四個的話就用 stack (push and pop)
- $\$v0$-$\$v1$: 兩個 value registers 來回傳結果

caller && callee saves

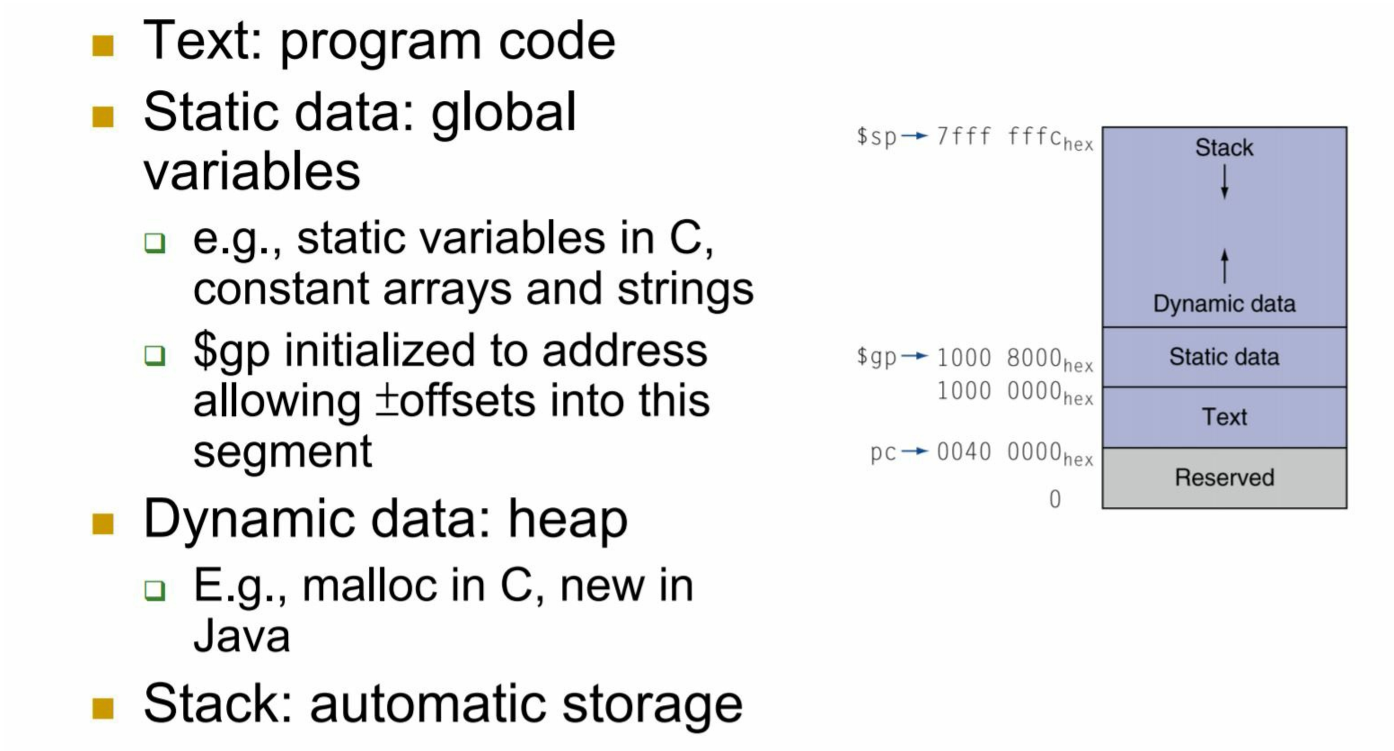
Name	Register number	Usage	
$\$zero$	0	the constant value 0	
$\$v0-\$v1$	2-3	values for results && expression evaluation	caller saves
$\$a0-\$a3$	4-7	arguments	caller saves
$\$t0-\$t7$	8-15	temporaries	caller saves
$\$s0-\$s7$	16-23	saved	callee saves
$t8-$t9	24-25	more temporaries	caller saves
$\$gp$	28	global pointer	callee saves
$\$sp$	29	stack pointer	callee saves
$\$fp$	30	frame pointer	callee saves
$\$ra$	31	return address	callee saves

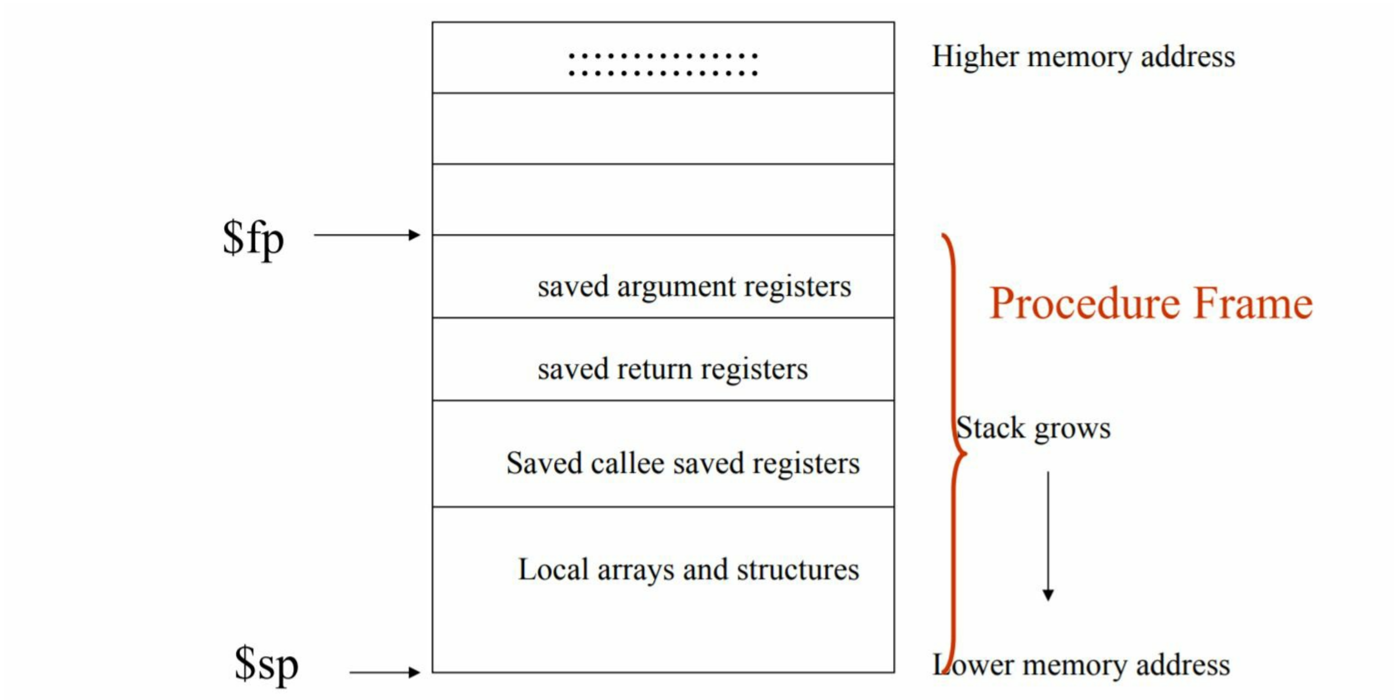
- caller saves: 由 Caller 負責清理或存入 stack frame

    - Caller 再呼叫 Callee 前，必須先將 caller-save register 的值存入 stack frame。
    - 所以 callee 便可直接使用 caller-save register 裡的值。
- callee saves: 由 Callee 負責清理或存入 stack frame
    - callee 要用 Callee-save register 前, 則需先 push 其值至 stack frame
    - 用完後再從 stack frame pop 回覆 Callee-save register 原來的值。
    - 所以對 Caller 而言，Callee-save register 的值，在 call 的前後應該是一致的。

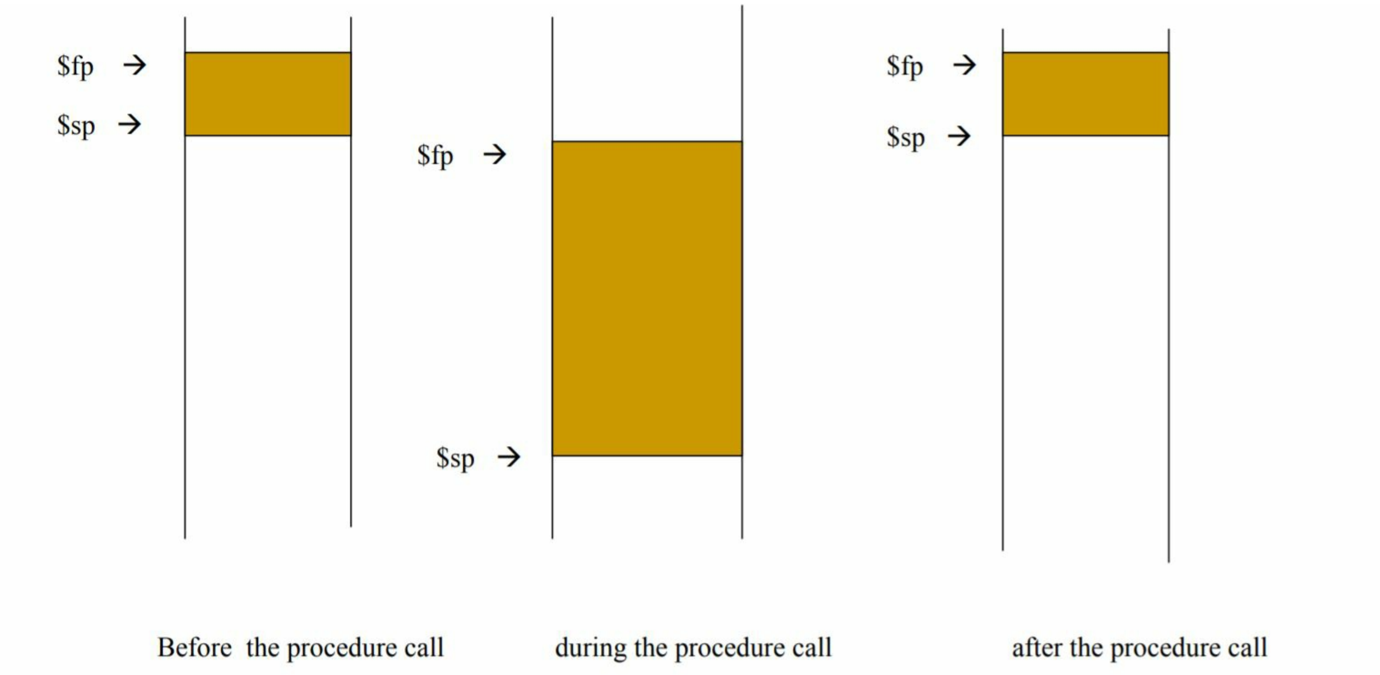
Use Stack

- Memory Layout





NOTE: $\$fp$ 和 $\$sp$ 都是 callee saves register, 所以呼叫 function 前後應該要如下圖。



How to switch control?

- How to go to the callee

```
jal procedure_address # (jump and link)
```

  - 會把 return address (PC + 4) 存在 $ra 裡
  - 設置 PC = procedure_addres，然後跳轉到該位置
- How to return from the callee
  - Callee exectues `jr $ra`

Procedure Calling Convention

- in caller:
  1. put arguments in $\$a0$ - $\$a3$ (準備傳遞的參數)
  2. push $\$a0$ - $\$a3$ to stack(need in nested call)
  3. push $\$t0$ - $\$t7$ to stack (if needed)
  4. push $\$ra$ to stack (if needed in nested call)
  5. jal Label (執行 jal instruction)
- in callee:
  6. `subi $sp, $sp <frame-size>`
     - stablish stack frame
  7. push $\$ra$, $\$fp$, $\$s0 - \$s7$ to stack
     - saved callee saved registers
  8. `Add $fp, $sp, <frame-size>-4`
     - establish frame pointer
  9. DOOOOOOOOOOO SOMETHING in call
  10. place return value in $\$v0$, $\$v1$
  11. restore $\$ra$, $\$fp$, $\$s0 - \$s7$ with pop
  12. `jr $ra`

Array vs. Pointer

> ### Example: which faster?
>
> In Array
>
> ```
> Clear(int array[], int size) {
>         int i;
>         for (i=0, i< size; i+= 1)
>                 array[i] = 0;
> }
> ```
>
> In Pointer
>
> ```
> Clear(int *array, int size) {
>         int *p,
>         for (p = &array[0]; p < &array[size]; p = p+1)
>                 *p = 0;
> }
> ```
>
> ---
>
> In Array, # of Instruction per iteration = 6
>
> ```
>         move $t0, $zero                 # i =0
> Loop :
>         sll $t1, $t0, 2                 # I * 4
>         add $t2, $a0, $t1               # t2 = address of array[i]
>         sw $zero, 0($t2)                # array [i] = 0
>         addi $t0, $t0, 1                # i = i +1
>         slt $t3, $t0, $a1               # compare i and size
>         bne $t3, $zero, loop
> ```
>
> In Pointer, # of Instruction per iteration = 4
>
> ```
>         move $t0, $a0                   # p = &array[0]
>         sll $t1, $a1, 2                 # t1 = size x 4
>         add $t2, $a0, $t1               # t2 = &array[size]
> Loop :
>         sw $zero, 0($t0)                # memory[p] = 0
>         addi $t0, $t0, 4                # p= p+4
>         slt $t3, $t0, $t2               # compare p, & array[size]
>         bne $t3, $zero, Loop
> ```
>
> Maybe pointer faster!

Synchronization in MIPS

在 MIPS 中使用特殊的 Load/Store 操作 LL（Load Linked，連結載入）以及 SC（Store Conditional，條件存儲），來達成多執行緒程式設計，對共用變數的互斥訪問。

- LL 指令的功能是從記憶體中讀取一個字，以實現接續的 RMW（Read-Modify-Write） 操作；
  - `ll rt, offset(rs)`
  - > 當使用 LL d, offset(b)，處理器會記住 LL 指令的這次操作，同時 LL 指令讀取的位址 offset(b) 也會保存在處理器的暫存器中。
- SC 指令的功能是向記憶體中寫入一個字，以完成前面的 RMW 操作。
  - `sc rt, offset(rs)`
  - > 接在 ll 後面的 SC 指令，比如 SC t, offset(b)，會檢查上次 LL 指令執行後的 RMW 操作是否是 atomic 的（即不存在其它對這個位址的操作，值沒有改變）。並且 t 值會被更新成
    >
    > 1 且 t 的值將會被更新至記憶體中, if 是 atomic 的，表示操作成功；
    >
    > 0 且 t 的值不會被更新至記憶體中, if: 不是 atomic 的，表示操作失敗；
    >
    > 判斷 t 值，再決定接下來的動作，例如失敗就在回去執行 LL 指令。達到解決同步問題的目的
  - SC指令執行失敗的原因有兩種：
    1. 在 LL/SC 過程中，發生了一個 interrupt，這些 interrupt 可能會打亂 RMW 操作的原子性。
    2. 在多核處理器中，一個核在進行 RMW 操作時，別的核試圖對同樣的位址也進行操作。

MIPS Addressing Mode

Immediate addressing

運算元是常數，且包裝在指令內部。

> Ex: addi $2, $3, 4

Register addressing

運算元是 register。

> Ex: add $r1, $r2, $r3

Base addressing

運算元存放在記憶體中，而位址本身是暫存器和指令中常數的和。

> Ex: lw $2, 100($3)

- Method 1

```
.data                    # define prog. data section
        xyz: .word 1  # some data here
        …                        # possibly some other data
.text                    # define the program code
        …                        # lines of code
        lw $5,xyz         # loads contents of xyz in r5
```

assembler 會自動把 `lw $5, xyz` 轉換成

```
lw $5, offset($gp) # gp is register 28, the global pointer
```

Note : .data, .word, .text are assembler directives.

- Method 2

或是把 Method 1 的轉換成

```
la $6, xyz              #r6 contains the address of xyz
lw $5, 0($6)    #r5 contains the contents of xyz
```

- Method 3: If the address is a constant
    - use li, if less than ±32K (2^{16} with 2's Complement)
    - use lui(load upper immediate) and ori, if large than ±32K

> ## example: load 10101010101010101010101010101010 into register $t0
>
> `10101010101010101010101010101010` large than 16 bits(32k), so use lui and ori:
>
> `lui $t0, 1010101010101010`
>
> | | 32-17 | 16-1 |
> |---|---|---|
> | 原本的 $t0 | xxxxxxxxxxxxxxxx | xxxxxxxxxxxxxxxx |
> | immediate | 1010101010101010 | 0000000000000000 |
> | 運算後 $t0 | 1010101010101010 | 0000000000000000 |
>
> `ori $t0, $t0, 1010101010101010`
>
> | | 32-17 | 16-1 |
> |---|---|---|
> | 原本的 $t0 | 1010101010101010 | 0000000000000000 |

原本的 $t0	1010101010101010	0000000000000000
immediate	0000000000000000	1010101010101010
運算後 $t0	1010101010101010	1010101010101010

PC-relative addressing

位址是 PC 和指令中 immediate 的加總。

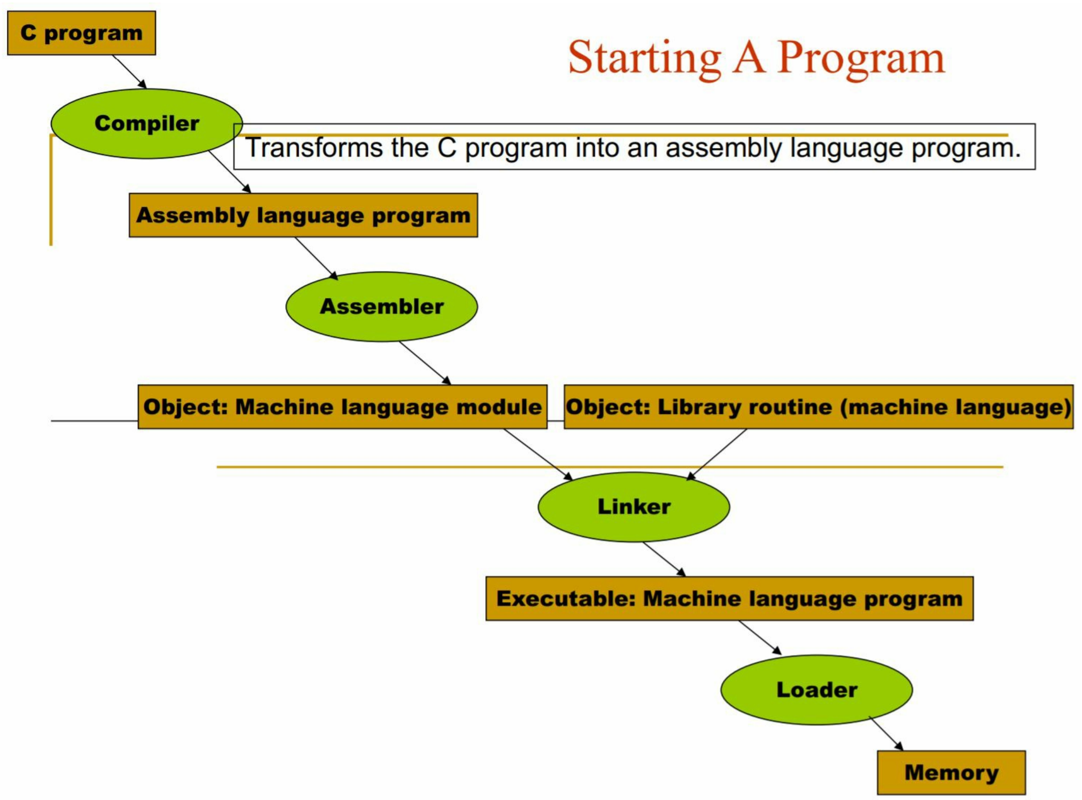
> Ex: beq $2, $3, 100

Pseudodirect addressing

跳躍位址是指令的 26 bits 再加上 PC 較高的 bits。

> Ex: j 100

Starting A Program



Assembler

將 assembly language program 轉換成 object file

Symbol table: 儲存 Label 在 memory 中實際上的位置，方便做 link

Psudoinstruction: a common variation of assembly language instructions often treated as if it were an instruction in its own right.

> **Example: move $\$t0$, $\$t1$ -> add $\$t0$, $\$zero$, $\$t1$ or blt -> slt & bne**

Linker (Link editor)

將多個 object file link 在一起，產生可以跑在電腦上的 executable file

有三個步驟:

1. Place code and data modules symbolically in memory.(把 code(text) 和 data 先放好)
2. Determine the addresses of data and instruction labels.(設置 data 和 label 的位置)
3. Patch both the internal and external references.(將其他 references patch 進來)

> ### Example: generate executable file

Object File header			
	Name	Procedure A	
	Text size	100h	
	Data size	20h	
Text seg.	Address	Instruction	
	0	lw $a0, **0**($gp)	lw $a0, x
	4	jal **0**	jal B
	...	...	
Data seg.	**0**	**X**	
	...	...	
Relocation info.	Address	Instruction type	Dependency
	0	lw	**X**
	4	Jal	**B**
Symbol table	Label	Address	
	X	-	
	B	-	

Object File header			
	Name	Procedure B	
	Text size	200h	
	Data size	30h	
Text seg.	Address	Instruction	
	0	sw $a0,**0** ($gp)	sw $a0, y
	4	jal **0**	jal A
	...	...	
Data seg.	**0**	**(Y)**	
	...	...	
Relocation info.	Address	Instruction type	Dependency
	0	sw	**Y**
	4	jal	**A**
Symbol table	Label	Address	
	Y	-	
	A	-	

and $gp = 10008000h

> 1. 先把 code(text) 和 data 先放好，先放 procsdure A 在放 procsdure B，
>   放好後 Text size = 100h+200h = 300h, Data size = 20h+30h = 50h
> 2. label X = 8000h(gp), 8000h = (.data(x) addr) - gp = 10000000h - 10008000h
>   label B = 400100h, 400100h = (400000h + 100h + 4h) - 4h
>   label Y = 8020h(gp), 8020h = (.data(y) addr) - gp = 10000020h - 10008000h
>   label A = 400000h, 400000h = (400000h + 0h + 4h) - 4h
>
>   > jal target 的 target 計算上有 -4h 的部分是因為 PC 在執行 jal 時是 PC = PC + target, 然後在更新下一個 PC 值 PC = PC + 4, 所以全部會變成 PC = PC + target + 4
>
> 3. Patch both the internal and external references.
>
> | **Executable File header** | | |
> |---|---|---|
> | | Name | |
> | | Text size | 300h |
> | | Data size | 50h |
> | Text seg. | Address | Instruction |
> | | 0040 0000h | lw $a0, 8000h ($gp) |
> | | 0040 0004h | jal 40 0100h |
> | | ... | ... |
> | | 0040 0100h | sw $a1, 8020h ($gp) |
> | | 0040 0104h | jal 40 0000h |
> | | ... | ... |
> | Data seg. | 1000 0000 | (X) |
> | | ... | ... |
> | | 1000 0020 | (Y) |
> | | | |

Loader

讀 executables file header 來確定 text and data seg. 大小

依據獨到的大小建立一個足夠大的記憶體空間給程式

複製 instructions and data 到剛剛建立的記憶體空間裡面

複製 main program 的參數(如果有的話)到 stack 裡面

初始化 machine registers 和設置 stack pointer($sp)

跳至 start-up routine 的部分然後開始執行

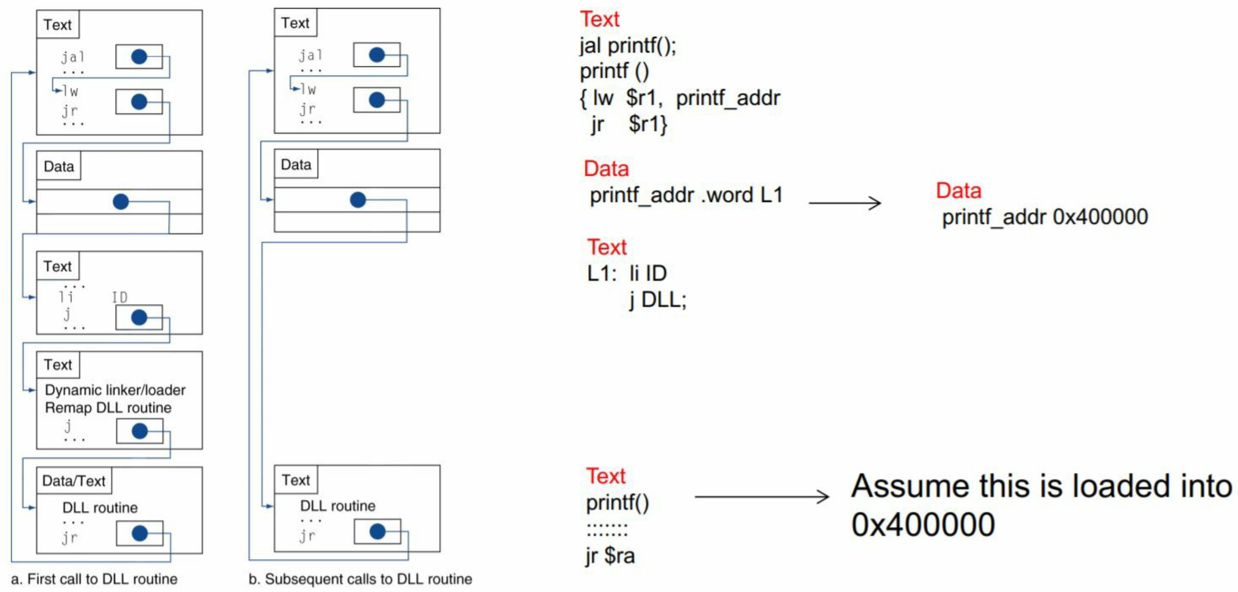
Dynamically Linked Libraries (DLL)

傳統的 statically linked library 缺點

- Library 不好更新
- 會讀進全部的 Librar，但不是全部都會用到

所以有 Dynamically Linked Libraries 的出現

- Libraries 在執行後才會 load and link
- Lazy procedure linkage
  - 被 call 過一次才會 link

> **Example**
>
> 
>