Computer Arkitektur
Maskin-niveau programmering II
Kontrol and Arrays

Forelæsning 4
Brian Nielsen

Credits to
Randy Bryant & Dave O'Hallaron (CMU)

Idag

- Hvordan laves højniveau kontrol-strukturer i assembler ?
  - If-then-else
  - while(){}
- Hvordan håndterer maskinen betingelser?
  - if(a<b) ..
- Hvordan repræsenterer maskinen sammensatte datatyper?
  - Arrays i 1D og 2D'
  - Structs

Kursusgang 3-5: x86-64 Assembler

Intro til x86 Assembler: Adressering

- X86 Historik
- Assembly og objekt kode
  - gcc,as,gdb,objdump
- Instruktionsæt arkitektur
- Words (Q,L,W, B)
- Registre
- Addressering
  - Immediate,
  - Registre
  - Mem
- Aritmetiske operationer
- Logiske operationer

X86 Assembler: Kontrol- og data-strukturer

- Sammenligner
- Betingelsesflag
- Selektion
  - if-then-else
  - Betinget tildeling
- Iteration
  - While
  - Do-while
  - For
- Data-strukturer
  - Layout af Arrays i 1D og 2D
  - Indeksering
  - Structs
  - Alignment

X86 Assembler: Procedurekald

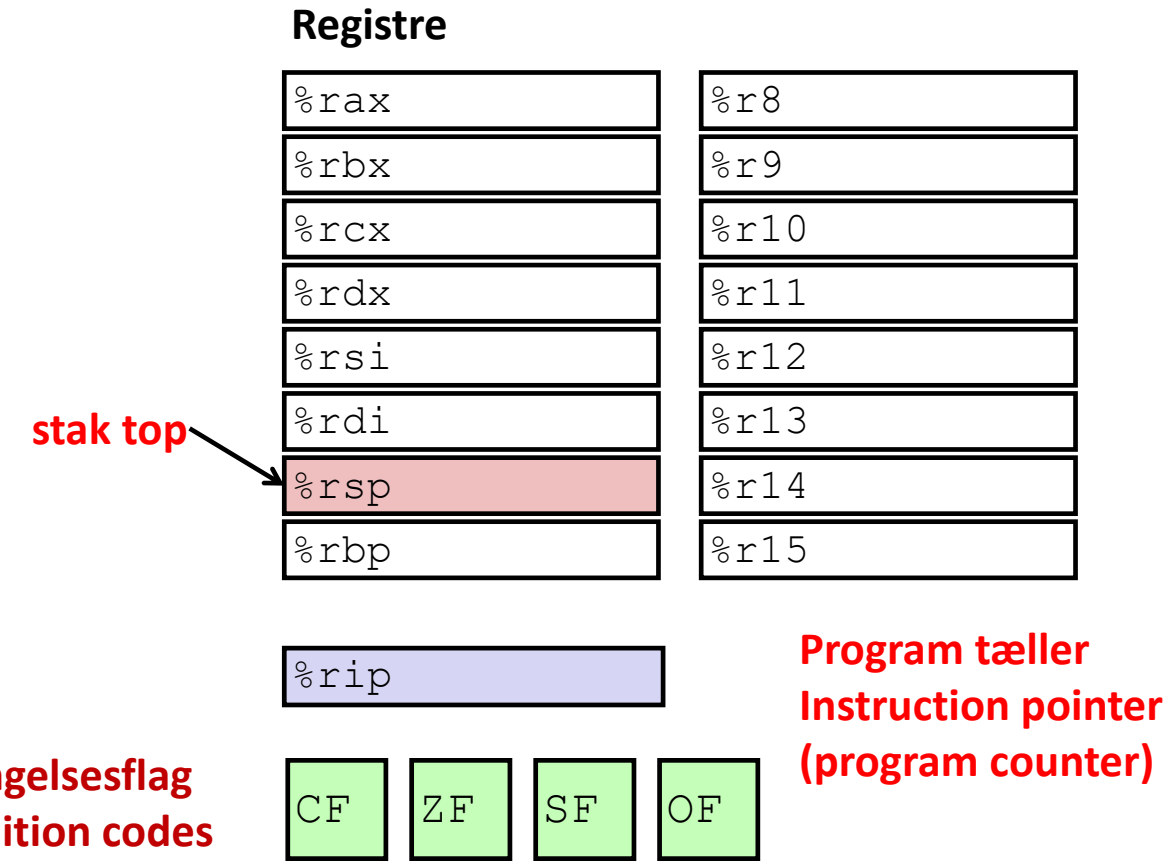
- Køretidsstak
- Push/Pop
- Kald og retur
- Parameteroverførsel
- Kalder/kaldte gemte registre
- Lokale variable
- Stack-frame
- Rekursion
- Buffer-overløb
  - Sikkerhedshuller og angreb
  - Kanarier
  - Addresserums randomisering
  - Non-executable stak beskyttelse

- **Hvordan ser maskinens grænseflade ud overfor programmøren?**
- **Hvad er en Instruktionssæt Arkitektur?**
- **Hvordan kodes høj-niveau (C) kontrol strukturer op?**
- **Hvordan opstår og forebygges sårbarheder ved bufferoverløb?**

Betingelser

Processor tilstand (x86-64)

- Information om det kørende program program
  - Temporære data (`%rax`, …)
  - Placering af køretidsstak top (`%rsp`)
  - Nuværende kontrol punkt (`%rip`, …)
  - Status på nyligt udførte tests (**CF, ZF, SF, OF**)



Condition Codes (Implicit tildeling)

- Enkelt-bit registre
  - **CF** Carry Flag (for unsigned)
  - **SF** Sign Flag (for signed)
  - **ZF** Nul (Zero) Flag
  - **OF** Overløb (Overflow) Flag (for signed)

Mente-flag
Fortegns-flag
Nul-flag
Overløbs-flag

- Implicit sat af aritmetiske operationer
  - Tænk på dem som en sideeffekt
- Eksempel: **`addq`** *Src, Dest* ↔ **`t = a+b`**

CF sat til 1 hvis der er mente fra mest betydende bit (unsigned overløb)
ZF sat til 1 hvis `t == 0`
SF sat til 1 hvis `t < 0` (fortolket som signed)
OF sat til 1 hvis two's-complement (signed) overløb, dvs. hvis

```
(a>0 && b>0 && t<0) || (a<0 && b<0 && t>=0)
```

- NB: Påvirkes ikke af `leaq` instruktionen

Condition Codes (Explicit tildeling: Compare)

- Explicit sat af Compare Instruktion
  - `cmpq` *Src2*, *Src1*
  - **`cmpq b,a`** beregner **`a-b`** (som `subq b,a`), uden at ændre destination!

  - **CF sat** hvis mente fra mest betydende bit (anvendt som sammenligning af unsigned)
  - **ZF sat** hvis `a == b`
  - **SF sat** hvis `(a-b) < 0` (som signed)
  - **OF sat** hvis two's-complement (signed) overløb. Dvs. når

`(a>0 && b<0 && (a-b)<0)  || (a<0 && b>0 && (a-b)>0)`

```
cmp b,a =a-b
burde give positivt tal, når a>0&&b<0
cmpq  -4, 5
5- (-4) =9
```

```
cmp b,a =a-b
burde give negativt tal, når a<0&&b>0
cmpq  5, -4
-4 - (5) = -9
```

Fortolkning af Condition Codes v. **CMP**

Betingelse (efter cmp)	Beskrivelse
ZF	**Equal / Zero**
~ZF	**Not Equal / Not Zero**
SF	**Negative Sign**
~SF	**Nonnegative Sign**
~(SF^OF)&~ZF	**Greater (Signed)**
~(SF^OF)	**Greater or Equal (Signed)**
(SF^OF)	**Less (Signed)**
(SF^OF)|ZF	**Less or Equal (Signed)**
~CF&~ZF	**Above (unsigned)**
CF	**Below (unsigned)**

```
cmpq b,a   #compare a:b
           #a-b
```

ZF sand hvis a==b

```
cmpq b,a   #compare a:b
           #a-b
```

SF xor OF sand hvis a<b

OF	SF	a<b?	a-b tilfælde
0	0	0	a størst
0	1	1	b størst
1	0	1	(a<0 && b>0 && (a-b)>0)
1	1	0	(a>0 && b<0 && (a-b)<0)

NB: **TEST** instruktion analog (bruger AND)

Aflæsning af Condition Codes

- **`SetX Dst`** instruktioner, X angiver variant
  - Sætter destination byte til 0 or 1 afhængigt af kombinationer af condition codes
  - Dst er et ”byte” register (eller byte destination i hukommelsen)
  - Hvis resultat skal leveres som 64-bit: resterende (7) bytes nulstilles med `movzbl`

SetX	Betingelse (efter cmp)	Beskrivelse
sete	ZF	Equal / Zero
setne	~ZF	Not Equal / Not Zero
sets	SF	Negative Sign
setns	~SF	Nonnegative Sign
setg	~(SF^OF)&~ZF	Greater (Signed)
setge	~(SF^OF)	Greater or Equal (Signed)
setl	(SF^OF)	Less (Signed)
setle	(SF^OF)|ZF	Less or Equal (Signed)
seta	~CF&~ZF	Above (unsigned)
setb	CF	Below (unsigned)

```
long gt (long x, long y)
{
  return x > y;
}
```

```
#%rdi=x, %rsi=y
#%rax=result

cmpq    %rsi, %rdi #Compare x:y (x-y)
setg    %al        #Set when >
movzbl  %al, %eax  #Zero rest of %rax
ret
```

Forgrening og kontrol strukturer

Ubetinget Program forgrening: “Jumping”

- Ubetingede hop
  - Direkte
    - **Jmp** Addresse/label
  - Indirekte
    - **Jmp** *operand

```
#jmp mylabel

#jmp *%rax
#jmp *(%rax)
```

C-variant

```
long x=0;

loop:
  x++;
goto loop;
```

ASM

```
movl $0, %eax

loop:
  incq %rax
jmp loop
```

Assembler/Linker erstatter labels med adresser i objekt-koden
(typisk indkodet som PC relative hop, jvf afsnit 3.6.4)

Betinget Program forgrening: “Jumping”

- Betingede Hop til andet sted i koden eller ej, afhængigt af aktulle værdier af “condition codes flag”

jX	Betingelse	Beskrivelse
jmp	1	**Unconditional**
je	ZF	**Equal / Zero**
jne	~ZF	**Not Equal / Not Zero**
js	SF	**Negative Sign**
jns	~SF	**Nonnegative Sign**
jg	~(SF^OF)&~ZF	**Greater (Signed)**
jge	~(SF^OF)	**Greater or Equal (Signed)**
jl	(SF^OF)	**Less (Signed)**
jle	(SF^OF)|ZF	**Less or Equal (Signed)**
ja	~CF&~ZF	**Above (unsigned)**
jb	CF	**Below (unsigned)**

Betinget forgrenig ”if-statements”

Generelt format

C kode

```
If (cond)
   then-blok
Else
   else-blok
```

- Kode-blok

```
{
   Statement1;
   Statement2;
      …
   Statementn;
}
```

Betinget forgrening: Eksempel

- Oversættelse fra C til ASM **`gcc -Og -S absdiff.c`**

Original

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
  long result;
  if (x > y)
    result = x-y;
  else
    result = y-x;
  return result;
}
```

ASM

```
#%rdi=x, %rsi=y
#%rax=result
absdiff:
   cmpq    %rsi, %rdi   # x:y
   jle     .L4
   movq    %rdi, %rax
   subq    %rsi, %rax
   ret
.L4:                    # x <= y
   movq    %rsi, %rax
   subq    %rdi, %rax
   ret
```

C "goto" version

```
long absdiff_j
  (long x, long y)
{
    long result;
    long ntest = x <= y;
    if (ntest) goto Else;
    result = x-y;
    goto Done;
 Else:
    result = y-x;
 Done:
    return result;
}
```

NB: Negering af test til at springe over "then-blok"

Ingen ELSE blok

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

```
long absdiff_j
  (long x, long y)
{
    long result;
    long ntest = x <= y;
    if (ntest) goto Else;
    result = x-y;
    //goto Done
Else:
Done:
    return result;
}
```

Fordelagtigt

- Når der ingen "Else" blok undgåes "goto Done"
- Goto's/Jumps er skidt for pipeline og performance

PP 3.17

Oversættelse af generel betinget tildeling (Ved brug af forgrening)

C kode

```
val = Test ? Then_Expr : Else_Expr;
```

```
val = x>y ? x-y : y-x;
```

Goto Version

```
  ntest = !Test;
  if (ntest) goto Else;
  val = Then_Expr;
  goto Done;
Else:
  val = Else_Expr;
Done:
  . . .
```

- Strategi a la if-then-else
- Skriv separate kode blokke for then & else udtryk
- Udfør den rigtige

Anvendelse af betinget tildeling "Conditional Moves"

- Conditional Move instruktioner
  `cmovX Src, Dest`
  - Instruktionen understøtter:
    `if (Test) Dest ← Src`
  - X angive betingelsen: e(qual), le, ge, …
  - GCC forsøger at anvende dem
    - Men kun når den ved at det er sikkert

- Hvorfor?
  - Forgrening via jumps er meget forstyrrende for instruktions-flow igennem processorens pipeline
  - Conditional move kan ofte undgå ændring af kontrol-flow

C Kode

```
val = Test
    ? Then_Expr
    : Else_Expr;
```

Goto Version

```
result = Then_Expr;
eval = Else_Expr;
nt = !Test;
if (nt) result = eval;
return result;
```

NB: beregner både "then", og "else" udtryk
Udvælger den version, der skal bruges

Eksempel på Conditional Move

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

```
#%rdi=x, %rsi=y
#%rax=result

absdiff:
    movq    %rdi, %rax  # x
    subq    %rsi, %rax  # result = x-y
    movq    %rsi, %rdx  # y
    subq    %rdi, %rdx  # eval = y-x
    cmpq    %rsi, %rdi  # x:y
    cmovle  %rdx, %rax  # if <=, result = eval
    ret
```

Hvor Conditional Move IKKE bør anvendes

Dyre beregninger

```
val = Test(x) ? Hard1(x) : Hard2(x);
```

- Begge værdier beregnes!
- Kun gavnligt når beregningerne er simple

Risikable Beregninger

```
val = p ? *p : 0;
```

- Begge værdier beregnes!
- Kan have uønskede side-effekter

Beregninger med side effekter

```
val = x > 0 ? x*=7 : x+=3;
```

- Begge værdier beregnes!
- Skal være fri for side-effekter

Iteration

General oversættelse af"Do-While"

C kode

```
do
   Body
   while (Test);
```

Goto Version

```
loop:
   Body
   if (Test)
      goto loop
```

- Body:

```
{
   Statement1;
   Statement2;
      …
   Statementn;
}
```

“Do-While” Eksempel

C kode

```
long pcount_do
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  do {
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
  } while (x);
  return result;
}
```

Goto Version

```
long pcount_goto
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
 loop:
  result += x & 0x1;
  x >>= 1;
  if(x) goto loop;
  return result;
}
```

ASM

```
#%rdi=x
#%rax=result
 movl    $0, %eax    #  result = 0
.L2:                 # loop:
 movq    %rdi, %rdx  #  t= x
 andl    $1,%edx     #  t= x & 0x1
 addq    %rdx, %rax  #  result += t
 shrq    %rdi        #  x >>= 1
 jne     .L2         #  if (x) goto loop
 ret
```

jne	~ZF	Not Equal / Not Zero

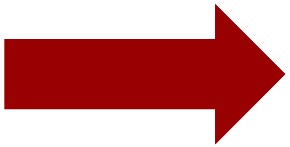
- Tæl antallet af of 1-bits’s i argument x (“popcount”): $0110.1110_2 \Rightarrow 5$
- Betinget forgrening bestemmer om løkken skal fortsætte eller stoppe

Generel oversættelse af "While" #1

- "Jump-to-middle" oversættelse
- Bruges med **-Og**

While version

```
while (Test)
  Body
```



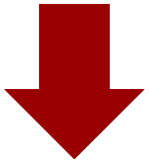
Goto Version

```
  goto test;
loop:
  Body
test:
  if (Test)
    goto loop;
done:
```

General oversættelse af "While" #2

While version

```
while (Test)
  Body
```



Do-While Version

```
  if (!Test)
    goto done;
  do
    Body
    while(Test);
done:
```

Goto Version

```
  if (!Test)
    goto done;
loop:
  Body
  if (Test)
    goto loop;
done:
```

- "Guarded do-while" konvertering
- Brugt med **–O1**

Tillader at compiler ofte kan optimere løkken, da det er et faktum at !test holdt.
Se simpelt eksempel i bog

“For” Loop → While Loop

For Version

```
for (Init; Test; Update)
    Body
```

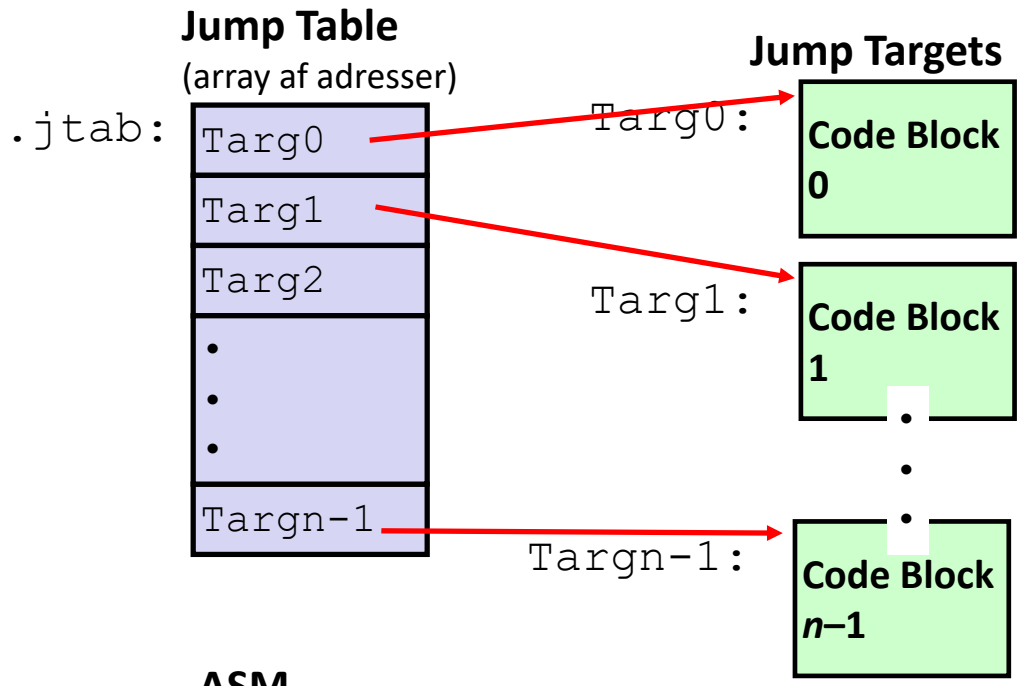
While Version

```
Init;
while (Test) {
    Body
    Update;
}
```

Switch med "Jump Tabeller" (indirekte jmp)

Switch Form

```
switch(x) {
  case val_0:
    Block 0
  case val_1:
    Block 1
    • • •
  case val_n-1:
    Block n–1
}
```



Translation (Extended C)

```
goto *JTab[x];
```

Indirekte hop

ASM

```
switch_eg:
   #x in %rdi
    …
    jmp      *.jtab(,%rdi,8) # goto *JTab[x]
```

Resultat: O(1)
If-then-else kæde kræver O(n) evalueringer

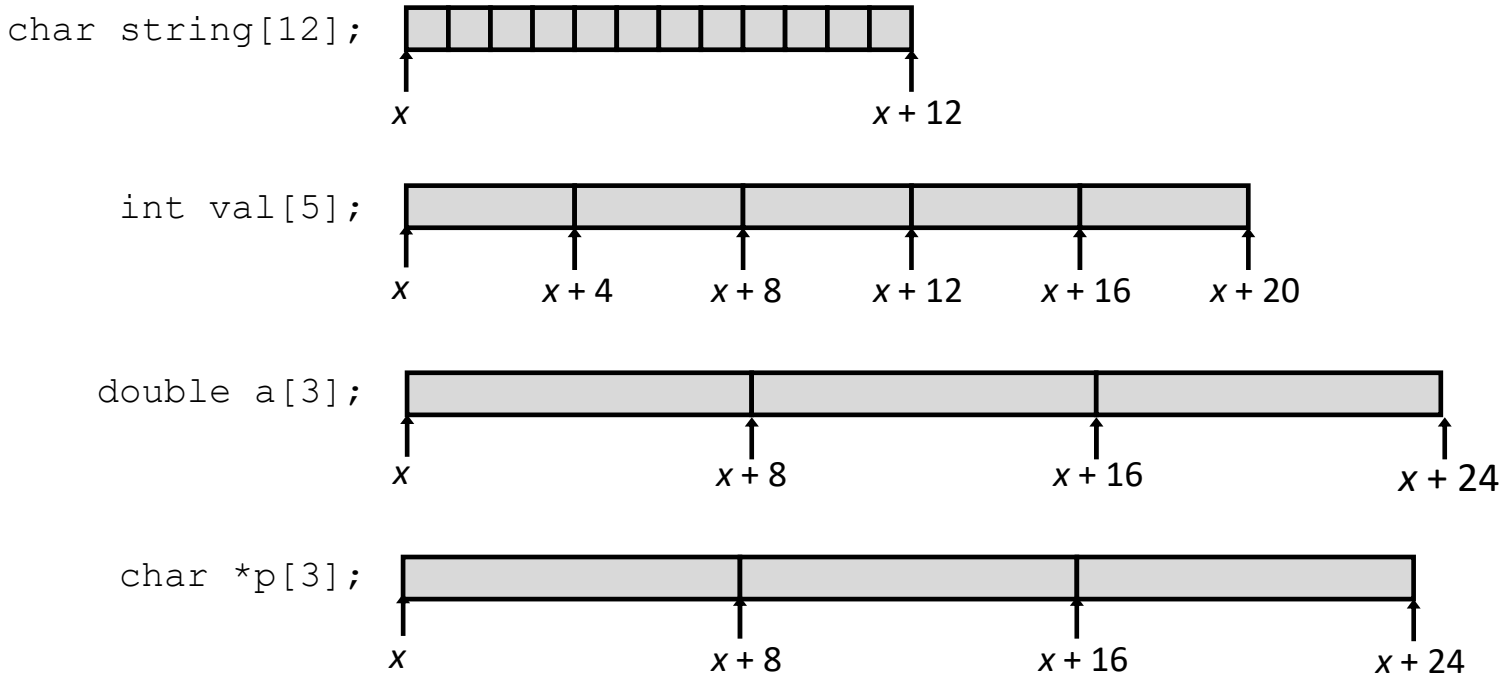
Arrays

Array Allokering

- Grundlæggende princip

  T **a[***L***];**

  - Array med navnet *a* af data typen *T* og længde *L*
  - Sammenhængende allokeret blok af størrelsen *L* * **sizeof**(*T*) bytes i hukommelsen
  - ***a*** udpeger startadressen på blokken



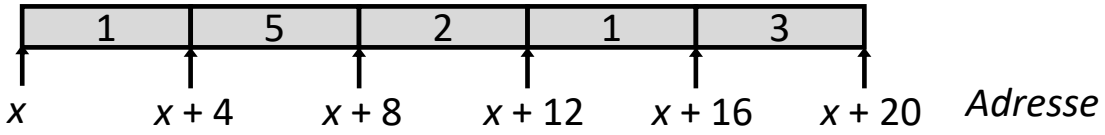
Array indeksering

- Grundlæggende princip for array af data typen *T*, længde *L*

  `T a[L];`

  - Identifier **`a`** kan anvendes som pointer til array element 0: Type *T**

`int val[5];`



- C-Reference Type Værdi

`val[4]`	`int`	3
`val`	`int *`	*x*
`val+1`	`int *`	*x* + 4
`&val[2]`	`int *`	*x* + 8
`val[5]`	`int`	??
`*(val+1)`	`int`	5
`val + i`	`int *`	*x* + 4 *i*

//NB! Pointer Aritmetik!

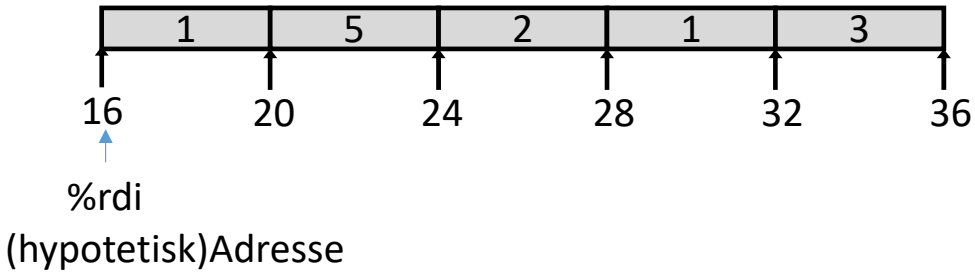
a[i] ækvivalent med*(a+i) //M[a+i*sizeof(a)]

&a[i] =a+i //effektiv adresse=a+sizeof(a)*i

Eksempel på array indeksering

Zip codes=post numre
CMU=Carnigie Mellon Uni

```
#define ZLEN 5
typedef int zip_dig[ZLEN];

zip_dig cmu = { 1, 5, 2, 1, 3 };
```




```
int get_digit (zip_dig z, int digit){
  return z[digit];
}
```

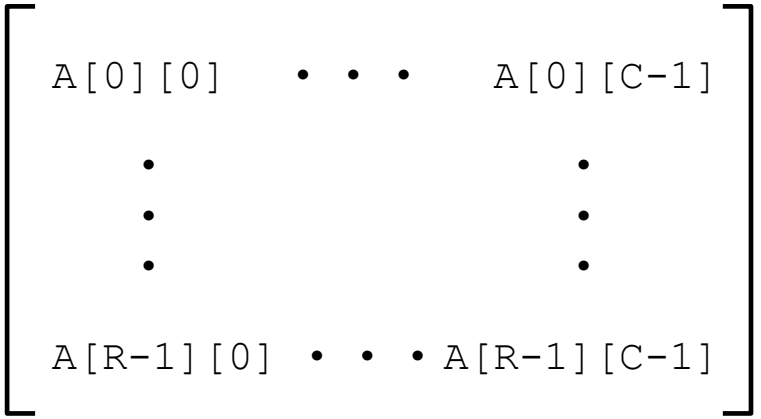
Assembler

```
  # %rdi = z
  # %rsi = digit
movl (%rdi,%rsi,4), %eax  # z[digit]
```

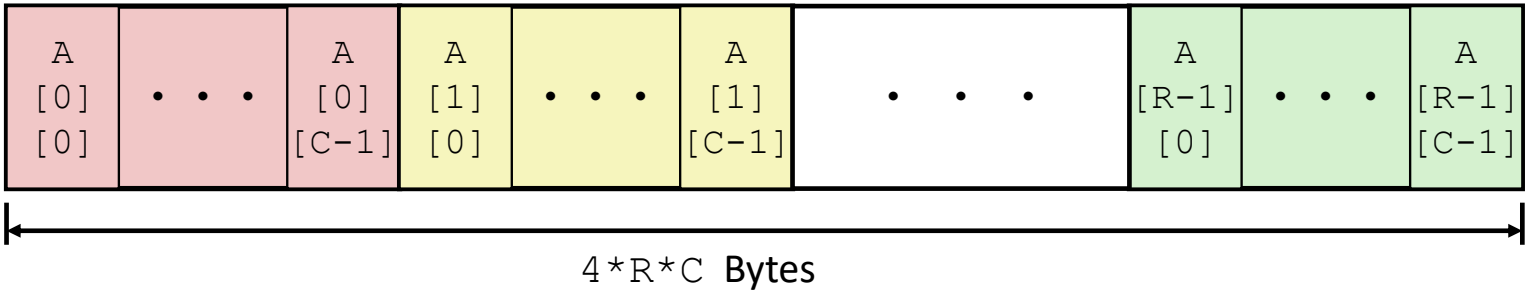
- Register `%rdi` indeholder start adresse på array
- Register `%rsi` indeholder array indeks
- Ønsket ciffer på `%rdi + 4*%rsi`
- Brug adresseringen `(%rdi,%rsi,4)`

Multi-dimensionelle (Nestede) Arrays

- Erklæres i C med
  T **A**[*R*][*C*];
  - 2D array af data typen *T*
  - *R* rækker, *C* kolonner
  - Type *T* element kræver *K* bytes
- Array Størrelse
  - *R* * *C* * *K* bytes
- Hukommelseslayout
  - Række-baseret
  - "Row-Major"



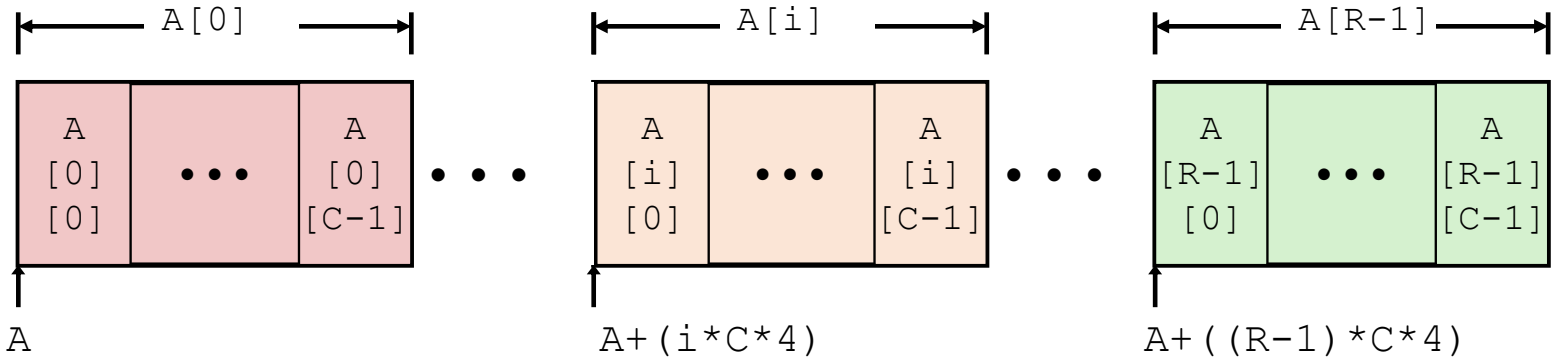

```
int A[R][C];
```



Indeksering af rækker i nested array

- Rækkevektorer
  - **`A[i]`** er et array af *C* elementer
  - Hver element af type *T* kræver *K* bytes
  - Start adresse **`A`** **`+`** *i* * (*C* * *K*)

```
int A[R][C];
```

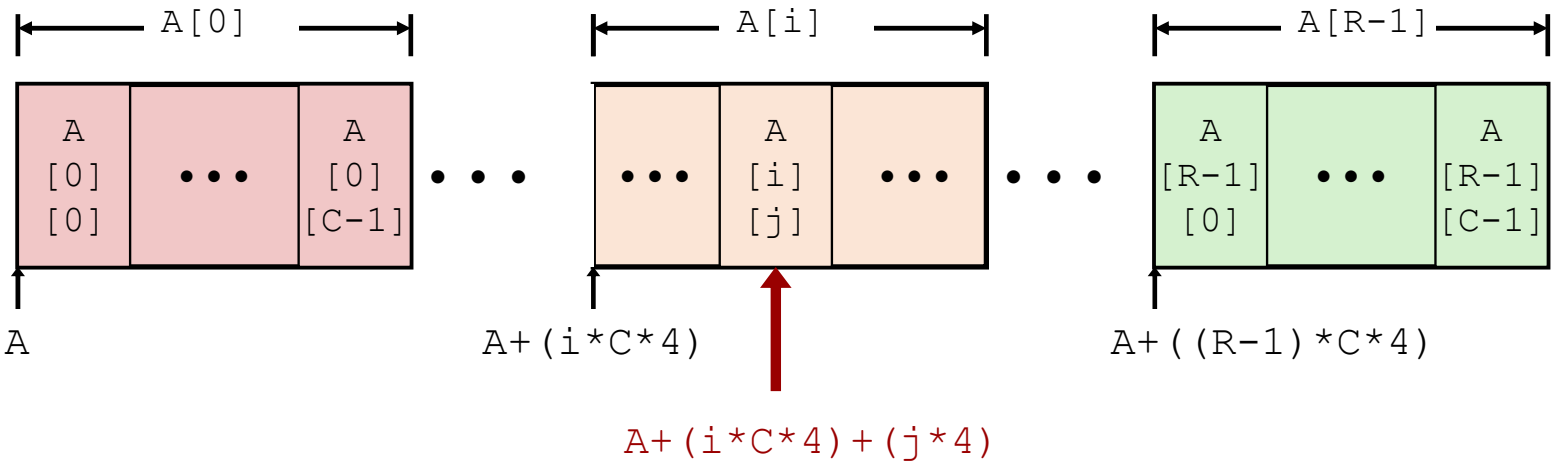


Adgang til element i Nested Array

- Array elementer
  - **`T A[R][C]; //K=sizeof(T)`**
  - **`A[i][j]`** er et element af type *T,* som optager *K* bytes
  - Adresse **`A +`** $i * (C * K) + j * K = A + (i * C + j) * K$

Adresse af element *i,j* :
start + skip *i* rækker af C elementer af størrelse K plus *j* kolonner af størrelsen K

```
int A[R][C];
```

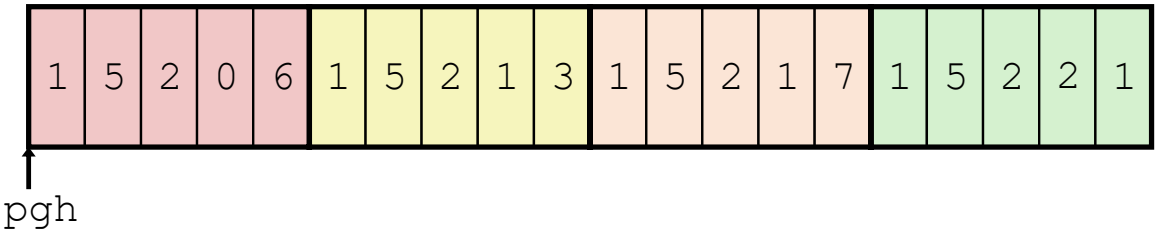


Eksempel på adgang til element i Nested Array

```
#define PCOUNT 4
zip_dig pgh[PCOUNT] =
  {{1, 5, 2, 0, 6},
   {1, 5, 2, 1, 3 },
   {1, 5, 2, 1, 7 },
   {1, 5, 2, 2, 1 }};
//samme som int pgh[4][5]
```

Zip codes=post numre
PGH= Pittsburgh (CMU)

"Row-Major" layout i hukommelsen

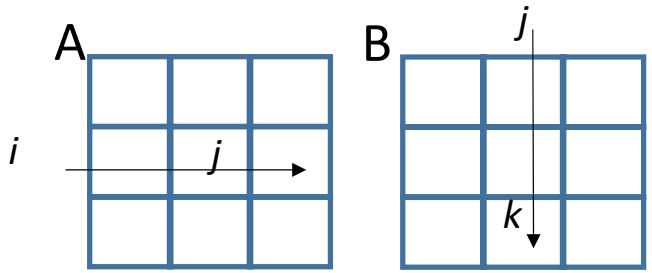



```
int get_pgh_digit
  (int index, int dig)
{
  return pgh[index][dig];
}
```

- **`pgh[index][dig]`** er en **`int`**
- Adresse: skip `index` rækker med 5 elementer+`dig` elementer af 4 bytes
  - **`= pgh + 4*(5*index + dig)`**

```
# %rdi = index, %rsi=digit
 leaq   (%rdi,%rdi,4), %rax      # 5*index
 addl   %rax, %rsi               # 5*index+dig
 movl   pgh(,%rsi,4), %eax       # M[pgh + 4*(5*index+dig)]
```

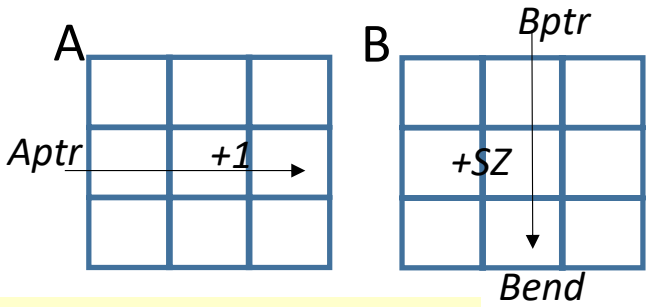
Optimeret adgang



- Indre produkt af A række i og B kolonne j

```
#define SZ 16;
typedef int matrix[SZ][SZ];//define type 16*16matrix

int fix_prod_ele(matrix A, matrix B, long i, long k){
 long j;
 int result=0;
 for (j = 0; j < SZ; j++)
      result +=A[i][j]*B[j][k];
 return result;
}
```

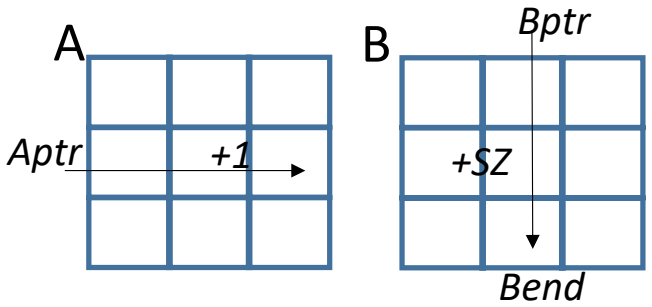
Optimieret adgang ved brug af pointers




```
int fix_prod_ele(matrix A, matrix B, long i, long k){
int* Aptr=&A[i][0];      //points to elements in A row i
int* Bptr=&B[0][k];      //points to elements in B col k
int* Bend =&B[SZ][k];    //marks stopping point for Bptr

 int result=0;
 do {
      result+= (*Aptr) * (*Bptr); //compute sum of products
      Aptr++;      //advance to next A col
      Btr+=SZ;     //advance to next B row
 } while(Bptr!=Bend) //test stopping point

return result;
}
```

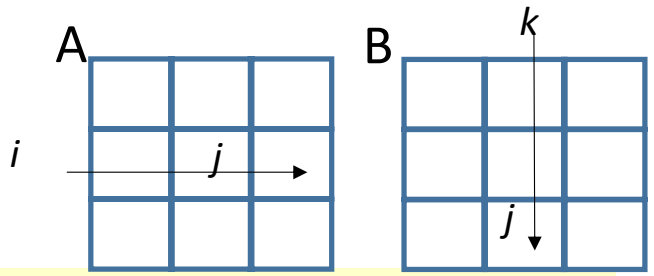
Anvendes af compiler med ”–O1” når den kan gennemskue gennemløbet.

Optimeret adgang "–O1"




```
#%rdi A, %rsi B, %rdx i, %rcx k
fix_prod_ele:
  salq $6, %rdx                 #64*i: skip i rows of 16*4 bytes (SZ=16)
  addq %rdx, %rdi               #Aptr=A+64i
  leaq (%rsi,%rcx,4), %rcx      #Bptr=B+4k
  leaq 1024(%rcx), %rsi         #Bend=Bptr+16*16*4
  movl $0, %eax                 #res=0
.L3:                            #do {
  movl (%rdi), %edx             #read *Aptr
  imull (%rcx), %edx            #mult *Aptr by *Pptr
  addl %edx, %eax               #add to res
  addq $4, %rdi                 #incr Aptr by one col=4 bytes
  addq $64, %rcx                #incr Bptr by 1 row=4*16
  cmpq %rsi, %rcx               #compare Bptr w. Bend
  jne .L3                       #While != goto L3
  rep ret
```

Direke oversættelse "-Og"




```
#%rdi A, %rsi B, %rdx i, %rcx k
fix_prod_ele:
        movl    $0, %eax                #res=0
        movl    $0, %r8d                #j=0
        salq    $6, %rdx                #i=i*64
        addq    %rdx, %rdi              #A+64i A[i,0]
        jmp     .L2                     #while
.L3:
        movq    %r8, %r9                #j
        salq    $6, %r9                 #j*64
        addq    %rsi, %r9               #B+64j
        movl    (%r9,%rcx,4), %r9d      #*(B+64k+4k)
        imull   (%rdi,%r8,4), %r9d      #Mult by *(A+64i+4*j)
        addl    %r9d, %eax              #res+=product
        addq    $1, %r8                 #j++
.L2:
        cmpq    $15, %r8                #compare 15:j
        jle     .L3                     #while (j<=15) goto L3
        rep ret
```

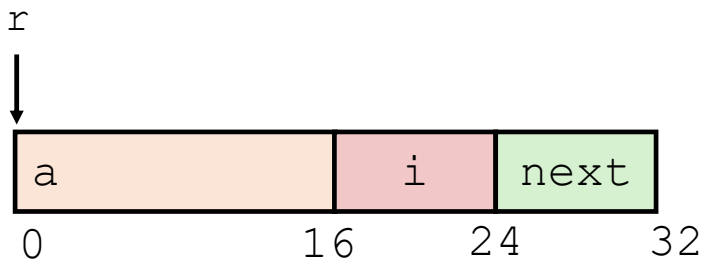
```
result+=
A[i][j]*B[j][k];

A+4(16i+j)=A+64i+4j

B+4(16j+k)=B+64j+4k
```

7 instruktioner i løkken vs. 5
~2/7 = 29% forbedring

Strukturer – heterogene datatyper

Repræssentation af Structs

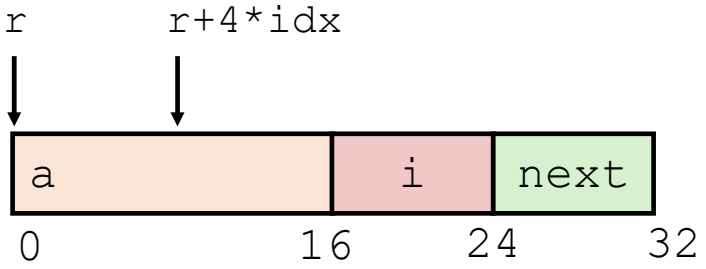
```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```



- Strukturer repræsenteres som en sammenhængende blok hukommelse
  - **Stor nok til at indeholde alle medlemmer**
- Medlemmerne udlægges i same rækkefølge som deres erklæring
  - **Selvom anden ordning kunne give mere kompakt repræsentation**
- Compiler udregner størrelse + positioner af medlemmer
  - **Maskin niveau programmer kender intet til structs fra kildekode, kun medlemmernes (relative) start position**

Generering af pointer til struktur medlem

```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```



- Hvert medlems ”offset” (relativ position til start på struct) kan bestemmes på compile tid
- Generering af pointer til array element a
  - Offset 0
  - Beregn som: **`r + 4*idx`**
- Dereferering af ”next” pointer
  - Offset 24
  - `r=r->next`

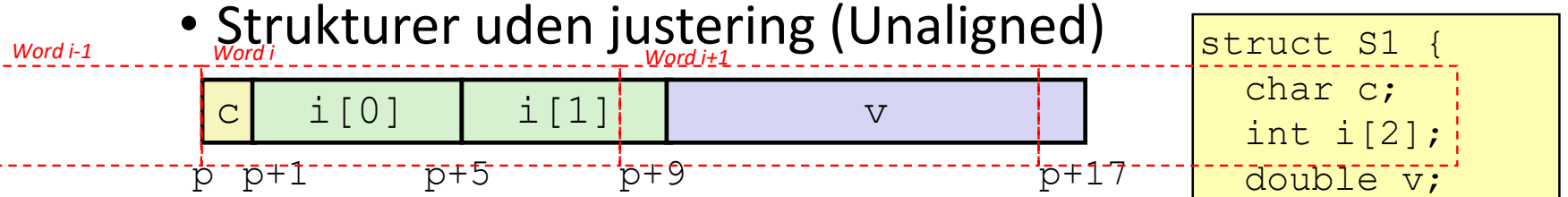
```
int *get_ap
  (struct rec *r, size_t idx)
{
  return &r->a[idx];
}
```

```
  # r in %rdi, idx in %rsi
  leaq  (%rdi,%rsi,4), %rax
  ret
```

```
movq    24(%rdi), %rdi
```

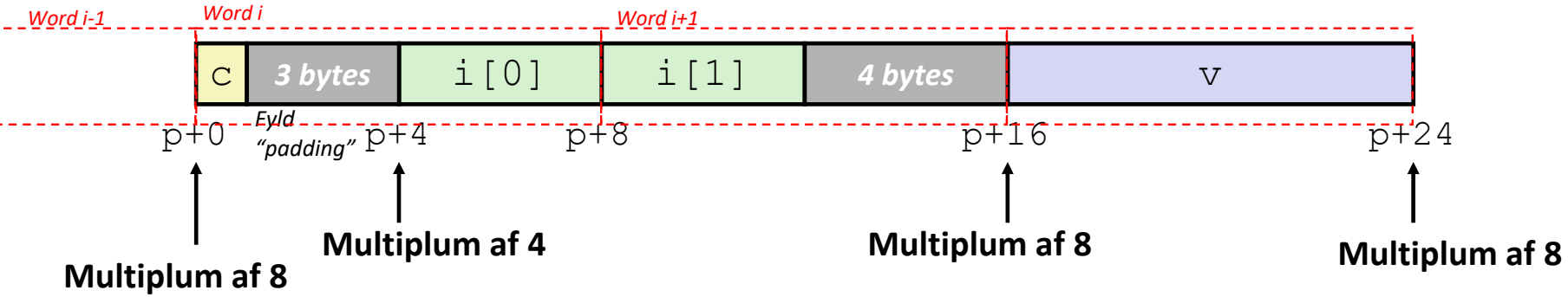
Strukturer & Justering (Word Alignment)

- Strukturer uden justering (Unaligned)




```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```

  - ”Skæv” adressering
- Justeret (Aligned)
  - En primitive data type, der kræver ***K*** bytes, skal udlægges på adresse, som er et multiplum af ***K***
  - Start adresse & struktur længde skal være multiplum af største **K**



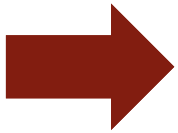
Justeringsprincipper (Alignment)

- Justeret Data
  - Kræves på nogle arkitekturer; tilrådeligt på x86-64
- Motivation for justering:
  - Data overføres fra hukommelsen i (aligned) bidder på 4 el- 8 bytes (system afhængigt)
    - Ineffektivt at hente / gemme data som deler sig over (quad) word grænser
    - Virtual hukommelse også trickier når et data-element strækker sig over 2 pages
- Compiler
  - Indsætter ”fyld” (padding) i strukturen for at sikre korrekt justering af medlemmerne

Simpelt trick til pladsoptimering

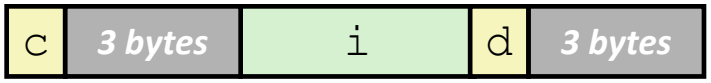
- Programmør oplister de største medlemmer først!

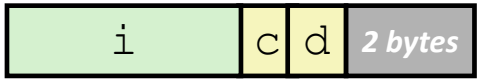
```
struct S4 {
  char c;
  int i;
  char d;
} *p;
```



```
struct S5 {
  int i;
  char c;
  char d;
} *p;
```

- Effekt (K=4)





- Effekt ved Arrays

```
struct S4 arr1[1000000]; 12MB
struct S5 arr2[1000000]; 8MB = 33% mindre
```

Demo alignment.c

Fín

- Betingelser
- Kontrolstrukturer
  - If-then-else
  - Betinget assignment
  - Do-while
  - While-do
  - For
  - Switch
- Arrays
  - One-dimensional
  - Multi-dimensional (nested)
- Data Structures
  - Allokering
  - Adgang
  - Alignment