Computer Arkitektur Eksamen

Juni 2018

- **Hovedopgavebesvarelsen skal uploades på digital eksamen.** Besvarelsen skal formatteres som en pdf fil, som bedes navngivet `'studienummer.pdf'`.
- Skriv dit studienummer på forsiden af besvarelsen.
- Du behøver ikke at gentage opgaveteksten i besvarelsen. Det er tilstrækkeligt tydeligt at identificere svaret på en opgave ved brug af nummeridentifikationen fra opgavesættet. Alternativt kan du annotere direkte i opgavearket.
- Det kan være en god ide at læse opgaverne igennem, inden du begynder besvarelsen, så du kan vurdere hvor du evt. skal prioritere for at samle flest points.
- Hvis du mener, at der er fejl i en opgave, eller at du mangler en oplysning, så skriv din antagelse for din løsning ned.
- Dette eksamenssæt er delt op i 7 dele, der i alt giver 100 points.

1 Repræsentation og manipulation af information

Opgave 1:

1. **(4 pts)** Udfyld denne tabel, således at rækkerne har den samme **6-bit** integer i de forskellige repræsentationer. Til signed anvendes "twos complement".

Nr.	Binær	Hexadecimal	Unsigned	Signed
1	011101			
2		0x11		
3			60	
4				-2

2. **(5 pts)** Lad $x = 133$ decimalt og $y =$ 0x33 hexadecimalt, begge 8-bit unsigned. Udfyld denne tabel af bitvise udtryk med svar i hexadecimalt:

Nr.	Udtryk	Svar 0x...
1	`x | y`	
2	`x & y`	
3	`x ^ y`	
4	`~x ^ ~y`	
5	`x >>3 (logisk)`	
6	`x >>3 (aritmetisk)`	

Opgave 2: Antag Signed/Unsigned Integers repræsenteret i 32 bits. Til signed anvendes two's complement.

1. **(5 pts)** Antag at følgende er erklæret i et C-program:

```
int a1, a2;
unsigned int b1, b2;
```

Hvilke af disse udsagn er altid sande? For de falske udsagn: giv værdier til variablerne der modbeviser udsagnet (brug gerne konstanterne `INT_MAX`, `INT_MIN`, `UINT_MAX`, eller potenser af 2).

Nr.	Udsagn	Sandt?	Modeksempel?
1	`b1 >= 0`		b1 =
2	`a1 >= 0`		a1 =
3	Hvis `a1 < 0` og `b1 = INT_MAX`, så vil `b1 >= a1`		a1 =
4	Udtrykket `((-a1) > (-a2))` kan altid simplificeres til `(a1 < a2)`		a1= a2=
5	Hvis `b1 >= 0` og `b2 >= 0`, så vil `b1 + b2 >= 0`		b1 = b2 =
6	Hvis `a1 < 0` og `a2 > 0`, så vil `a1 - a2 < 0`		a1 = a2 =

Solution:

Nr.	Binær	Hexadecimal	Unsigned	Signed
1	011101	1D	29	29
2	010001	0x11	17	17
3	111100	3C	60	-4
4	111110	3E	62	-2

Solution:

x = 10000101
y = 00110011
`x | y` = 10110111 = B7 = 183

x = 10000101
y = 00110011
`x & y` = 00000001 = 01 = 1

x = 10000101
y = 00110011
`x ^ y` = 10110110 = B6 = 182

x = 10000101 ∼x = 01111010
y = 00110011 ∼y = 11001100
`~x ^ ~y` = = 10110110 = B6 = 182

x = 10000101
`x >>3 (logisk)` = 00010000 = 10 = 16

x = 10000101
`x >>3 (aritmetisk)` = 11110000= F0 = 240

Nr.	Udtryk	Svar 0x...
1	`x | y`	B7
2	`x & y`	01
3	`x ^ y`	B6
4	`~x ^ ~y`	B6
5	`x >>3 (logisk)`	10
6	`x >>3 (aritmetisk)`	F0

Solution:

1. Sandt (b1 Unsigned)
2. Falsk (a1 er signed, ex -1)
3. Falsk, Udtrykket beregnes som unsigned og der er een negative værdi mere end positive) :ex `a1=INT_MIN`
4. Falsk: `a1= INT_MIN, a2=-1`: `(INT_MIN<-1)` er sandt, hvor `((-INT_MIN)>(--1))==(INTMIN>1)` `er falsk.`
5. Sand (unsigned sum er positiv)
6. Falsk: Negative Underflow: `a1=INT_MIN, a2=1: (INT_MIN {(+1))==0`

2 Assembly programmer

Opgave 3:

1. **(5 pts)**
   Angiv for hver udsagn om det er sandt eller falsk.

	Spørgsmål	Sandt	Falsk
1	Instruktionen `lea 8(%rax, %rbx, 8),%rax` gemmer addressen `8*%rbx+%rax` i `%rax`.		
2	Instruktionen `subq $32,%rsp` de-allokerer 32 bytes fra stakken		
3	%rbx skal gemmes af den kaldte procedure (Callee saved)		
4	%rsi skal gemmes af den kaldende procedure (Caller saved)		
5	Instruktionen `cmpq` udfører en sammenligning mellem værdierne af to registre ved brug af bitvis logisk 'og' (&)		

2. **(5 pts)** I det følgende er vist 2 X86-64 assembly programmer, oversat fra samme C-funktion `calc`. Ligeledes er vist et øjebliksbillede af hukommelsen. Hvilken værdi returnerer funktionen når den kaldes med argumenterne `calc(0x601060,10)` ?

Listing 1: Oversættelse 1

```
calc:
  movl   $0, %eax
  movl   $0, %edx
  jmp    .L2
.L3:
  addq   (%rdi,%rdx,8), %rax
  addq   $2, %rdx
.L2:
  cmpq   %rsi, %rdx
  jl     .L3
  ret
#
#
#
```

Listing 2: Oversættelse 2

```
calc:
  testq %rsi, %rsi
  jle    .L4
  movl   $0, %eax
  movl   $0, %edx
.L3:
  addq   (%rdi,%rdx,8), %rax
  addq   $2, %rdx
  cmpq   %rdx, %rsi
  jg     .L3
  ret
.L4:
  movl   $0, %eax
  ret
```

Hukommelsen:	
Addresse	Værdi (dec)
0x601060	1
0x601068	2
0x601070	3
0x601078	4
0x601080	5
0x601088	6
0x601090	7
0x601098	8
0x6010a0	9
0x6010a8	10
0x6010b0	11
0x6010b8	12

3. **(4 pts)** C-funktionen anvender en velkendt kontrol-struktur. Hvilken kontrol struktur er der tale om, og hvilken oversættelsesmetode (translation method) har compileren anvendt til oversættelse til assembly for de 2 listings:

Kontrol-struktur	

Variant	Oversættelsesmetode
Oversættelse 1	
Oversættelse 2	

Solution:

1. Falsk: Husk start offset 8
2. Falsk: Den allokerer på stakken (gror ned ad i hukommelsen)
3. Falsk: %rbx er Caller saved
4. Sand
5. Falsk: CMP bruger en subtraktion

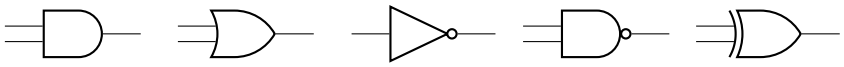
Solution:
Calling with 0x601060,10
CALC returned 25
1+3+5+7+9

Solution:

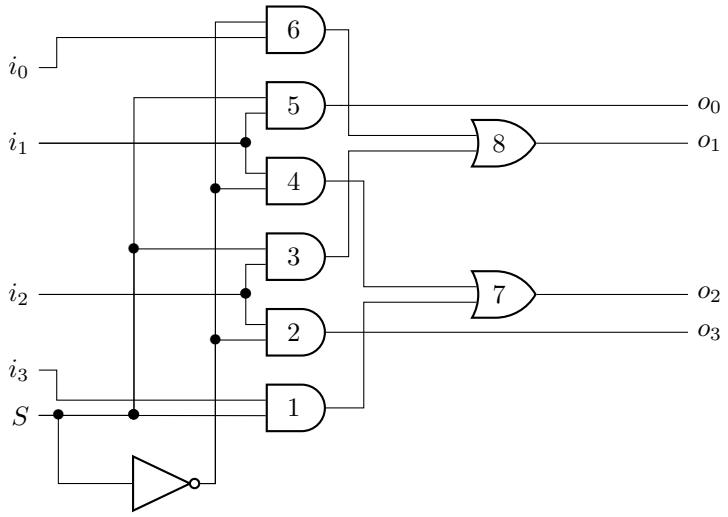
Kontrol-struktur	while-løkke

Variant	Oversættelsesmetode
Oversættelse 1	jump-to-middle
Oversættelse 2	guarded-do

3 Digital Logik



Figur 1: *And*, *Or*, *Not*, *Nand* og *Xor* gates.



Figur 2: Et digitalt logisk kredsløb.

Opgave 4: Figur 1 viser nogle logiske gates. Figur 2 viser et digitalt logisk kredsløb.

1. **(5 pts)** Betragt det kombinatoriske kredsløb i Figur 2. **Antag at S modtager input værdien 0**. Skriv formlen for output værdierne $o_0 \dots o_3$ som et udtryk i boolsk algebra ved brug af de boolske operatorer & |~^(jfv. side 87 i bogen), og reducér udsagnet.

1. $o_0 = \dots$ $= \dots$

2. $o_1 = \dots$ $= \dots$

3. $o_2 = \dots$ $= \dots$

4. $o_3 = \dots$ $= \dots$

2. **(4 pts)** Udfyld denne sandhedstabel for kredsløbet i Figur 2:

S	i_0	i_1	i_2	i_3	o_0	o_1	o_2	o_3
0	0	0	0	0				
0	1	0	0	0				
0	0	1	0	0				
0	1	1	0	0				
0	0	0	1	0				
0	1	0	1	0				
0	0	1	1	0				
0	1	1	1	0				
0	0	0	0	1				
0	1	0	0	1				
0	0	1	0	1				
0	1	1	0	1				
0	0	0	1	1				
0	1	0	1	1				
0	0	1	1	1				
0	1	1	1	1				

3. **(3 pts)** Hvilken operation implementerer kredsløbet?

Solution:

1. $o_0 = 0 \& i_1 = 0$
2. $o_1 = (i_0 \& 1) | (i_2 \& 0) = i_0$
3. $o_2 = (i_1 \& 1) | (i_3 \& 0) = i_1$
4. $o_3 = (i_2 \& 1) = i_2$

Solution:

S	i_0	i_1	i_2	i_3	o_0	o_1	o_2	o_3
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	1	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	0	1	1	1

Solution:
Logisk Højre Skifte

4 Y86-64 processor arkitektur

Stage	`OPq rA, rB`
Fetch	icode:ifun ← M_1[PC] rA:rB ← M_1[PC+1] valP ← PC+2
Decode	valA ← R[rA] valB ← R[rB]
Execute	valE ← valB OP valA Set CC
Memory	
Write back	R[rB] ← valE
PC update	PC ← valP

Stage	`addq %rdi, %r9`
Fetch	icode:ifun ← M_1[...]=... rA:rB ← M_1[...]=... valP ← ... = ...
Decode	valA ← R[...]=... valB ← R[...]=...
Execute	valE ← ... = ... ZF←..., SF←..., OF← ...
Memory	
Write back	R[...] ← ...
PC update	PC ← ...

Tabel 1: Beregningstrin for aritmetiske instruktioner, og instansen `addq %rdi, %r9`

Opgave 5: I denne opgave antager vi processor arkitekturen Y86-64, som beskrevet i lærebogen.

1. **(5 pts)**
   Spor effekten af den konkrete instruktion ved at udfylde tabellen til højre i Tabel 1 med konkrete værdier for instruktionen `addq %rdi,%r9`. Antag at instruktionen er placeret i addresse `0x82`, `%rdi` har værdien `0x100`, og `%r9` har værdien `0x108`.
2. **(7 pts)**
   Af effektivitetshensyn vil vi tilføje en specialiseret instruktion `iaddq V, rB`, der adderer en immediate værdi `V`, til et register `rB`, således at `rB` kommer til at indeholde summen af `rB` og `V`.
   Vi kan bruge byte encodingen `0x64`, som instruktions encoding for `iaddq`, med de efterfølgende bytes til at angive værdien.
   Udfyld nedenstående tabel med de nødvendige beregninger.

Stage	`iaddq V, rB`
Fetch	icode:ifun ← ... rA:rB ← ... valC ← ... valP ← ...
Decode	valB ← ...
Execute	valE ← ... ...
Memory	
Write back	... ← ...
PC update	PC ← valP

Solution:

Stage	`addq %rdi, %r9`
Fetch	icode:ifun ← M_1[0x82]=6:0 rA:rB ← M_1[0x83]=7:9 valP ← 0x82+2 = 0x84
Decode	valA ← R[7]=0x100 valB ← R[9]=0x108
Execute	valE ← 0x100+0x108 = 0x208 ZF← 0, SF← 0, OF← 0
Memory	
Write back	R[9] ← 0x208
PC update	PC ← 0x84

Solution:

Stage	`iaddq V, rB`
Fetch	icode:ifun ← M_1[PC] = 6:4 rA:rB ← M_1[PC+1]=F:rB valC ← M_8[PC+2] valP ← PC+10
Decode	valB ← R[rB]
Execute	valE ← valB OP valC Set CC
Memory	
Write back	R[rB] ← valE
PC update	PC ← valP

5 Caching

Opgave 6:

1. **(4 pts)**

   Betragt følgende C program, som beregner summen af elementer i et 2-D array.

```
long arr_sum(long a[M][N]){
  long sum, i, j;
  for(i=0;i<M;i++){
    for(j=0;j<N;j++){
      sum+=a[i][j];
    }
  }
}
```

   Hvordan vil du karakterisere programmets lokalitetsadfærd (sæt 'X')?

   - ☐ 1. Kun god temporal lokalitet.
   - ☐ 2. Kun god spatial lokalitet.
   - ☐ 3. Både god spatial og temporal lokalitet.
   - ☐ 4. Hverken god spatial eller temporal lokalitet.

2. **(8 pts)**
   I det følgende er vist en 2-vejs associative cache med 8 sets og en blokstørrelse på 8 bytes (byte med offset 0 er vist til venstre). Addresser er 8 bit. Antag i tilfælde af cache miss at den pågældende cache line fyldes med værdien 0xAABBCCDDAABBCCDD.

	Line 1			Line 2		
Set	V	Tag	Value (Hex)	V	Tag	Value (Hex)
0	0	3	12 13 14 15 A0 A1 A2 A3	1	2	C1 C2 C3 C4 C5 C6 B6 C6
1	1	2	A0 B0 C0 D0 98 97 80 81	1	3	12 23 34 45 12 34 56 78
2	1	3	00 00 00 00 B9 B1 B2 B8	1	2	76 65 54 43 65 65 87 86
3	1	0	00 00 00 00 00 01 02 03	1	3	00 01 02 03 00 00 00 00
4	0	3	22 23 24 25 B0 B1 B2 B3	1	2	BF BE BD BC BB BA B9 B8
5	1	2	A1 B1 C1 D1 88 87 86 85	1	3	11 11 11 11 01 01 01 01
6	0	3	A2 B2 B7 B8 A3 B3 B7 C1	1	2	E6 E5 E4 E3 E5 E5 E7 E6
7	1	0	FA FB FC FD FE F1 F2 F3	1	3	D8 D9 DA DB AC DC DE DF

   Udfyld nedenstående tabel med angivelse af hvilke adresse bits, der skal bruges til hhv.

   - block offset (angiv med et 'B')
   - set index (angiv med et'I')
   - tag (angive med et 'T')

7	6	5	4	3	2	1	0

   Udfyld nedenstående tabel når cache-systemet læser en byte for den angivne serie af referencer (addresser)? Tag, Set og Offset bedes angivet som decimal tal, og byte-værdi i Hex.

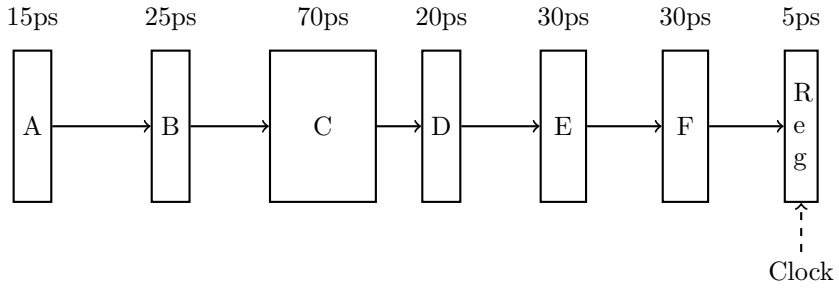
Addresse	Tag	Set	Offset	Værdi
0x8B				
0xB7				
0xE5				
0x4E				
0xE1				
0xFF				

Solution:
3. Både god spatial og temporal lokalitet.
Solution:

7	6	5	4	3	2	1	0
T	T	I	I	I	O	O	O

Addresse	Binary	Tag	Set	Offset	Værdi
0x8B	10.00 1.011	2	1	3	D0
0xB7	10.11 0.111	2	6	7	E6
0xE5	11.10 0.101	3	4	5	BB (miss invalid bit)
0x4E	01.00 1.110	1	1	6	CC (miss tag)
0xE1	11.10 0.001	3	4	1	BB (replenished)
0xFF	11.11 1.111	3	7	7	DF

6 Pipelines



Figur 3: Et digitalt kredsløb delt op i 6 funktionelle dele, med delays i pico-sekunder for de enkelte dele.

Opgave 7:

1. **(4 pts)** Figur 3 viser et digitalt kredsløb. Vi ønsker at øge dets throughput vha. en 3-trins pipeline. Optimer throughput for det digitale kredsløb i Figur 3, ved at indsætte yderligere 2 hardware registre mellem de funktionelle dele. Antag at hardware registre har delay på 5ps.
   Indiker med et "R"de positioner i nedenstående streng, hvor du vil indsætte hardware registre. Svaret kan gives som en streng med navnene på de funktionelle dele, a la "XY R Z R".

   A B C D E F

   Hvad bliver den resulterende throughput?

   Hvad bliver latency ?

2. **(7pts)**
   Antag en 5-trins pipeline arkitektur, der *ikke* har nogen form for videresendelse af data (data-forwarding) a la PIPE$^-$. Den opererer altså med følgende trin

   F Fetch

   D Decode

   E Execute

M Memory

W Writeback

Nedenstående viser et fragment af et Y86 assembler program med tilhørende naive pipeline timing.

	Program	Timing							
1	`mrmovq (%rax), %rdx`	F	D	E	M	W			
2	`subq %rdi, %rax`		F	D	E	M	W		
3	`addq %r8, %rax`			F	D	E	M	W	
4	`mrmovq (%rax),%rdi`				F	D	E	M	W

Angiv med ovennævnte timing, hvilke data-afhængigheder, der giver anledning til data-hazard:

	Spørgsmål	Sandt	Falsk
1	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 2	☐	☐
2	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 3	☐	☐
3	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 4	☐	☐
4	Der er data hazard imellem %rax i linie 2 og %rax i linie 3	☐	☐
5	Der er data hazard imellem %rax i linie 2 og %rax i linie 4	☐	☐
6	Der er data hazard imellem %rax i linie 3 og %rax i linie 4	☐	☐
7	Der er data hazard imellem %rdi i linie 2 og %rdi i linie 4	☐	☐

Antag at arkitekturen anvender *stalling* til at håndtere data-hazard. Vis via et pipeline diagram, hvordan arkitekturen kan opnå korrekt timing af instruktionerne.

	Instruktion	Timing															
1	`mrmovq (%rax), %rdx`																
2	`subq %rdi, %rax`																
3	`addq %r8, %rax`																
4	`mrmovq (%rax),%rdi`																

Solution:
Pipeline Trin: $A + B = 40, C = 70, D + E + F = 80$
Throughput: $80 + 5ps(registre) = 85ps; 1/85 * 1000ps/1ns = 11.76\ GIPS$
Latency:$3 * (85) = 255ps$ **Solution:**

	Spørgsmål	Sandt	Falsk
1	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 2	☐	X
2	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 3	☐	X
3	Der er data hazard imellem %rax i linie 1 og %rax i linie 4	☐	X
4	Der er data hazard imellem %rax i linie 2 og %rax i linie 3	X	☐
5	Der er data hazard imellem %rax i linie 2 og %rax i linie 4	X	☐
6	Der er data hazard imellem %rax i linie 3 og %rax i linie 4	X	☐
7	Der er data hazard imellem %rdi i linie 2 og %rdi i linie 4	☐	X

%rax i linie 3 kan ikke dekodes før linie 2 har passeret write-back
%rax i line 4 kan ikke dekodes før linie 2 og 3 begge har passeret write-back

	Instruktion	Timing																
1	mrmovq (%rax), %rdx	F	D	X	M	W												
2	subq %rdi, %rax		F	D	E	M	W											
3	addq %r8, %rax			F	D	D	D	D	E	M	W							
4	mrmovq (%rax),%rdi				F	F	F	F	D	D	D	D	E	M	W			

7 Praktisk Opgave

I den virtuelle maskine ligger den krypterede opgave

exam-08-06-2018-files.gpg

hvis du har downloadet den på forhånd. Den findes også på
`http://people.cs.aau.dk/~bnielsen/exam-08-06-2018-files.gpg`.
Den kan hentes med firefox browseren i den virtuelle maskine, eller i en terminal med kommanderne:

1. `cd Skrivebord/download-materiale/`
2. `wget http://people.cs.aau.dk/~bnielsen/exam-08-06-2018-files.gpg`
3. `gpg-zip --decrypt exam-08-06-2018-files.gpg`

Password til denne opgave er:

V2Wy8Um7ax

som du bliver bedt om at indtaste når filen dekrypteres. Opgaven bliver pakket ud i mappen

Skrivebord\download-materiale\exam-08-06-2018-files.gpg

Alternativt kan den hentes i bilaget på digital eksamen som zip fil.

Opgave 8:

1. **(15 pts)** Filen

   binarybomb

   er et eksekverbart terminal program. Programmet beder dig indtaste første bogstav i dit fornavn, og udskriver en velkomst hilsen med bogstavet og dets decimal værdi i ascii ('a' har værdien 97, videre til 'z' med værdien '122').

   - Programmet spørger dernæst efter 2 tal som input. Disasssembler filen med `objdump -d binarybomb`.
     Angiv dit begyndelsesbogstav, den tilhørende decimal værdi, samt de 2 inputs der bliver accepteret (decimalværdien for dit begyndelsesbogstav bliver overført som første parameter til de relevante funktioner).

Bogstav &Dec. værdi	
Input 1	
Input 2	

   - I hvilken addresse starter `main` funktionen?

   - Hvad er objekt kode indkodningen for instruktionen, der starter i addresse `0x40072d`?

2. **(10 pts)** Nedenfor er angivet en lille C-funktion, der foretager en beregning over elementerne i 2 arrays a og b, hver af længden *Length*. OmsKriv funktionen `calc`, så den benytter 2 gange udfoldning af løkken og to opsamlingsvariable (2 x loop unrolling with two accumulator variables). Funktionen kan passende kaldes `calc2x2`.

```
long calc(long*a, long*b, const int Length){
  long res=0;
  int i;
  for(i=0;i<Length;i++){
    res+=a[i]*b[i];
  }

  return res;
}
```

I filen findes et test-program`unrolling-tester.o` til virtuelle maskine, som kan hjælpe dig med at udvikle og teste din løsning. Du kan skrive din løsning i funktione `calc2x2` i filen `unroll.c`, og teste den med kommandoerne:

```
prompt> gcc unroll.c unroll-tester.o -o unroll
prompt> ./unroll
```

Du kan angive svaret nedenfor (også selvom det ikke virker, eller kører i den virtuelle maskine):

```
long calc2x2(long*a, long*b, const int length){
  long res=0;









  return res;
}
```

Hvad udskriver programmet, når du kører test-programmet?

Solution:

Init.	Dec.	ans1	ans2
a	97	382	97
b	98	386	98
c	99	390	99
d	100	394	100
e	101	398	101
f	102	402	102
g	103	406	103
h	104	410	104
i	105	414	105
j	106	418	106
k	107	422	107
l	108	426	108
m	109	430	109
n	110	434	110
o	112	442	112
q	113	446	113
r	114	450	114
s	115	454	115
t	116	458	116
u	117	462	117
v	118	466	118
w	119	470	119
x	120	474	120
y	121	478	121
z	122	482	122

Solution:

48 83 e8 2a

```
40072d: 48 83 e8 2a sub $0x2a,%rax
```

Solution:

```
000000000400887 <main>:
```

Solution:

```
long calc2x2(long*a, long*b, const int length){
  long res=0;
  long res1=0;
  const int limit=length-1;
  int i;
  for(i=0;i<limit;i+=2){
    res+=a[i]*b[i];
    res1+=a[i+1]*b[i+1];
  }
  for(;i<length;i++){
    res+=a[i]*b[i];
  }
  res=res+res1;
  return res;
}
```

Solution:

Success!!!! resultat=3174930
eller
ØV! desværre ikke korrekt