



Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Institutt for datateknologi og
informatikk

TDT4102 Prosedyre-
og objektorientert
programmering
Vår 2021

Øving 9

Frist: 2021-03-19

Mål for denne øvingen:

- Dynamisk minnehåndtering med pekere
- Implementering av kopikonstruktør og `operator=`
- Mer om operatoroverlasting

Generelle krav:

- Bruk de eksakte navn og spesifikasjoner gitt i oppgaven.
- Teorioppgaver besvares med kommentarer i kildekoden slik at læringsassistenten enkelt finner svaret ved godkjenning.
- **Denne øvingen skal implementeres uten hjelp fra `std_lib_facilities.h`.**
- 70% av øvingen må godkjennes for at den skal vurderes som bestått.
- Øvingen skal godkjennes av stud.ass. på sal.
- Det anbefales å benytte en programmeringsomgivelse (IDE) slik som Visual Studio Code.

Anbefalt lesestoff:

- Kapittel 17 og 18 i PPP.

Når man implementerer klasser er det vanlig å lage seg én .h-fil og én .cpp-fil per klasse. F.eks. hvis klassen heter `Car`, lager man `Car.cpp` og `Car.h`, og skriver all koden for klassen `Car` i disse filene. Du bør følge denne normen i oppgaver der det bes om å skrive klasser.

I denne øvingen skal vi ikke bruke `std_lib_facilities.h`. Du må derfor inkludere bibliotekene du trenger, og holde orden på navnerom selv.

1 Dynamisk minnehåndtering (15%)

I denne deloppgaven skal vi lage noen funksjoner for å bli kjent med dynamisk minnehåndtering. For en kjapp oppfriskning av hvorfor dette er nyttig, og hvordan dette gjøres, kan du se i vedlegget bakerst i øvingen. Det står også godt forklart i kapittel 17 i boken (spesielt 17.4).

- a) **Lag en funksjon `void fillInFibonacciNumbers(int result[], int length)`.** Funksjonen skal regne ut `length` antall tall i Fibonacci-tallfølgen og lagre disse i tabellen (array) `result`.
Fibonaccifølgen er følgen av tall som starter med 0 og 1 og der hvert påfølgende element er summen av de to foregående: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34 osv. Funksjonen skal ikke selv gjøre noe minnehåndtering, og skal lagre verdiene i tabellen som tas inn som argument.
- b) **Lag en funksjon `void printArray(int arr[], int length)`.** Funksjonen skal skrive ut `length` elementer fra tabellen.
- c) **Lag en funksjon `void createFibonacci()`.** Funksjonen skal be brukeren om lengden på tallrekka, dynamisk allokere en tabell av riktig størrelse, fylle denne med tall og skrive ut. Funksjonen kan oppføre seg omtrent som dette, erstatt kommentarene med din kode:

```
void createFibonacci() {
    // 1. Spør brukeren hvor mange tall som skal genereres
    // 2. Allokere minne til en tabell som er stor nok til tallrekka
    // 3. Fyll tabellen med fillInFibonacciNumbers()
    // 4. Skriv ut resultatet til skjerm med printArray()
    // 5. Frigjør minnet du har reservert
}
```

Test funksjonene ved å kalle `createFibonacci()` fra `main()`.

2 En generell matriseklasse (25%)

I denne øvingen skal vi implementere en generell matriseklasse for å gjøre det mulig å representere matriser av vilkårlig størrelse.

- a) **Lag en klasse kalt `Matrix`.** Klassen skal inneholde lagringsplass for $M \times N$ tall av typen `double`, som skal dynamisk allokere ved instansiering. M og N er to vilkårlige heltall større enn 0.

I matriseoperasjoner kommer vi til å henvise til elementene i matrisen etter rad og kolonne. Derfor er det nyttig å ordne medlemmene i matrisen som en tabell. Siden M og N er dimensjonene på matrisen er det lurt å ta vare på disse verdiene i medlemsvariabler.

Tips: Ikke bruk M og N som navnene på medlemsvariablene. Det er enkelt å bytte om på dem, noe som vil føre til bugs. Benytt heller mer beskrivende navn, f.eks. `rows` og `columns`.

Nyttig å vite: Dynamisk allokerede todimensjonale tabeller

Det er to forskjellige teknikker for å lage dynamisk allokerede todimensjonale tabeller:

- Allokere en lang endimensjonal tabell og regne om fra todimensjonal indeks til endimensjonal indeks.
- Du kan brukere peker til peker teknikken. Her vil du få en «tabell av tabeller» og kan bruke todimensjonale indekser direkte.

En lang endimensjonal tabell vil gi bedre ytelse siden det gjøres færre minneallokeringer og all dataen ligger på samme plass i minnet, noe som er bra for **cache friendliness**. Peker til peker er bra hvis du vil øve deg på å jobbe med pekere siden konstruktør og destruktør krever litt mer jobb.

Forskjellen i indeksering kan abstraheres vekk ved hjelp av en funksjon.

Du husker kanskje at en peker bare er en variabel som inneholder en «minneadresse», altså hvor i datamaskinen noe ligger lagret. F.eks.

```
int a = 5; // En variabel av typen int med verdien 5
int* pa = &a; // Variabel av typen int-peker,
// pa inneholder adressen til a.
```

På samme måte kan vi ha en peker med adressen til en annen peker:

```
int** ppa = &pa; // Peker til peker til int
//ppa vil nå inneholde adressen til pa
```

For å hente ut verdien til a kan vi nå bruke derefereringsoperatoren på følgende måte

```
cout << a;           // 5
cout << *pa;         // 5
cout << **ppa;       // 5
```

På denne måten kan vi for eksempel lage et array som inneholder pekere, hvor hver av pekerne inneholder adressen til et annet array.

b) Lag følgende konstruktører og destruktør for matrisen:

Matrix(int nRows, int nColumns)

- Skal konstruere en nRows x nColumns-matrise, initialisert som 0-matrisen (alle elementer er lik 0). Her må du allokere en matrise og initialisere verdiene.

Nyttig å vite: Delegerende konstruktør

For å forenkle denne oppgaven kan du gjenbruke kode for å lage de ulike konstruktørene. Imidlertid er det generelt smart å ikke kopiere kode rundt omkring i kodebasen din. For å unngå dette kan man for eksempel bruke en felles medlemsfunksjon som begge konstruktørene kaller. I C++11 kan man også bruke en *delegerende konstruktør*. Her er et eksempel på bruk av en slik konstruktør:

```
class Eksempel {
public:
    Eksempel(int a) {
        // Kode for konstruktør én
    }

    Eksempel(int a, int b) : Eksempel{a} {
        // Kode for konstruktør to
        // Konstruktør én brukes for å behandle
        // det første argumentet
    }
}
```

```
explicit Matrix(int nRows)
```

- Denne skal konstruere en `nRows` x `nRows`-matrise, initialisert som identitetsmatrisen. *Bruk delegerende konstruktør.*

I lineær algebra er **identitetsmatrisen** (også kjent som enhetsmatrisen) en $N \times N$ -matrise med verdien 1 på diagonalen og 0 på de resterende plassene. Identitetsmatrisen har samme funksjon i matrisemultiplikasjon som tallet 1 i vanlig multiplikasjon: når en kvadratisk matrise multipliseres med enhetsmatrisen får man den opprinnelige matrisen som svar.

Vi bruker her `explicit`-nøkkelordet, som ikke dekkes av pensum. Dette nøkkelordet gjør at den aktuelle konstruktøren ikke kan brukes til å «automatisk» konvertere andre typer til den aktuelle klassen. I denne oppgaven bruker vi `explicit` for å unngå potensielle feil som kan være vanskelig å oppdage. Se **C++ Core Guidelines C.64** hvis du er interessert.

```
~Matrix()
```

- Destruktøren til `Matrix`. Denne skal frigi/slette alt dynamisk allokert minne.

Tips: Siden en matrise med 0 eller negativt antall rader eller kolonner ikke gir mening kan det lønne seg å legge inn `assert()` på starten av konstruktørene. Da vil programmet avslutte hvis et argument har en ugyldig verdi, og det blir enklere å debugge programmet. Dette gjelder også andre funksjoner der noen verdier for argumentene ikke er gyldige. Se forelesning 6 eller **cppreference** for mer informasjon om `assert()`. Se også §5.10 i læreboka om pre- og postconditions.

- c) **Lag set- og get-funksjoner for matrisen.** `get`-funksjonen skal hente ut verdien til ett element i matrisen, uttrykt ved rad og kolonne. Tilsvarende skal `set`-funksjonen sette verdien til ett element. Funksjonene skal ha følgende prototyper:

```
double get(int row, int col) const;
void set(int row, int col, double value);
```

- d) **(Valgfritt) Overlast operator[] for matriseklassen.** Man kan da slå opp i vår matriseklasse på samme måte som i blant annet `std::vector`. Eksempel på bruk:

```
Matrix A{4};
std::cout << A[0][2] << ", " << A[3][3];
```

Skriver ut 0, 1

Tenk over: Hvilken type må `Matrix::operator[]` returnere for at man skal kunne bruke `operator[]` på returverdien og få ut en `double`?

- e) **Lag medlemsfunksjonene `getRows() const` og `getColumns() const`.** Disse skal returnere henholdsvis antall rader og kolonner i matrisen.
- f) **Overlast `operator<<`.** Å overlaste denne operatoren lar oss bruke `Matrix` med `cout`, som lar oss skrive ut matrisen på en enkel måte. Dette gjør også testing av koden vår enklere.
- g) **Test funksjonene dine.** Lag en `main()`-funksjon, og opprett i den matriser med hver av konstruktørene. Skriv så ut verdiene fra hver av matrisene.
- Test også at medlemsfunksjonene til `Matrix`-klassen gjør det de skal.

3 Intermezzo: kopiering og tilordning (15%)

Merk at vi i denne oppgaven skal fremprovosere noen feil, så programmet ditt kan og skal oppføre seg litt rart.

- a) Gitt følgende kode, hva forventer du at skrives ut når `dummyTest` kjører?

```

class Dummy {
public:
    int *num;
    Dummy() {
        num = new int{0};
    }

    ~Dummy() {
        delete num;
    }
};

void dummyTest() {
    Dummy a;
    *a.num = 4;
    Dummy b{a};
    Dummy c;
    c = a;
    cout << "a: " << *a.num << '\n';
    cout << "b: " << *b.num << '\n';
    cout << "c: " << *c.num << '\n';

    *b.num = 3;
    *c.num = 5;

    cout << "a: " << *a.num << '\n';
    cout << "b: " << *b.num << '\n';
    cout << "c: " << *c.num << '\n';
}

```

- b) Opprett en ny kildefil (.cpp) med tilhørende headerfil, og skriv koden fra forrige oppgave inn der. Kall deretter `dummyTest()` fra `main()`.

Stemte output med det du forventet? Kan du forklare hvorfor/hvorfor ikke?

NB: Programmet krasjet sannsynligvis i slutten av `dummyTest`. Kan du forklare hvorfor?

- c) Implementer kopikonstruktøren for `Dummy`.

Hint: Det kan være lurt å se i vedlegget dersom du er usikker på hvordan du skal gjøre dette. Det står også mer om dette i kapittel 18 i boken.

Kjør programmet - skriver programmet ut noe annet enn forrige gang?

Programmet krasjer trolig fremdeles, da vi ikke har overlaster kopioperatoren (`operator=`) enda.

- d) Implementer `operator=` for `Dummy`.

Programmet skal nå kunne kjøre fra start til slutt uten å krasje. Skriver programmet nå ut det du forventet?

4 Overlaste kopiering og tilordning (25%)

Når vi har dynamisk allokert minne, må vi ordne enkelte ting selv som før ble gjort automatisk for oss. I tillegg til å passe på allokering og deallokering av minne, må vi også bestemme hvordan objektene våre skal kopieres. Vedlegget bakerst i øvingen gir en mer utfyllende beskrivelse av hvorfor og hvordan de følgende oppgavene skal implementeres.

- a) Implementer kopikonstruktøren til `Matrix`-klassen. Konstruktøren skal implementeres i henhold til prinsippene bak dyp kopiering (deep copying), som beskrevet i vedlegget.

```
Matrix(const Matrix & rhs)
```

Kopikonstruktøren skal sørge for at det blir instansiert en ny matrise av samme størrelse som `rhs` og at alle verdier blir kopiert fra `rhs`.

- b) **Implementer `operator=` for `Matrix`-klassen.** Denne operatoren skal også implementeres i henhold til prinsippene bak dyp kopiering.

Pass på at operatoren din ikke lekker minne. En enkel måte å implementere operatoren riktig på er å bruke copy-and-swap-teknikken, som er forklart i vedlegget.

Tips: Test også funksjonene for ikke-kvadratiske matriser. Dette er en god måte å finne feil på. De påfølgende oppgavene kan ikke gjøres uten problemer hvis denne oppgaven ikke er gjort.

5 Operatoroverlasting (20%)

De fleste operatorene kan implementeres både som en medlemsfunksjon og som en fri funksjon. Merk at hvis en operator implementeres som en medlemsfunksjon må de ta inn en parameter mindre. `*this` vil være venstresiden i uttrykket. `cppreference` inneholder en del nyttig informasjon om overlasting av de aritmetiske operatorene.

- a) **Overlast `operator +=`.** Operatoren skal summere to matriser elementvis og tilordne resultatet til venstresiden i uttrykket.
- b) **Overlast `operator +`.** Operatoren skal summere to matriser elementvis.
- Tips:** Prøv å gjenbruke implementasjonen av `+=`. Bruk også gjerne kopikonstruktøren.
- c) **Test løsningen din.** Definer matrisene `A`, `B` og `C` som følger, og sjekk at du får svar som forventet av `A += B + C`.

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & 2.0 \\ 3.0 & 4.0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 4.0 & 3.0 \\ 2.0 & 1.0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1.0 & 3.0 \\ 1.5 & 2.0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Svar: } B \text{ og } C \text{ skal være uendret. } A = \begin{bmatrix} 6.0 & 8.0 \\ 6.5 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- d) **(Valgfritt) Implementer operatorene `-`, `-=`, `*` og `*=`.**

Merk: Det finnes to versjoner av `operator-`. En som kun har en høyreside, og en med både venstre- og høyreside.

Vedlegg: Forklaring av dynamisk minne, kopikonstruktør og operator =

Dynamisk minnehåndtering

Hittil i øvingsopplegget har vi blant annet brukt `std::vector`, som tar seg av minneallokering automatisk. Likevel er det ikke alltid `std::vector` egner seg eller er tilgjengelig, f.eks. i innebygde systemer (embedded systems). Dermed er det nyttig å kjenne til bruk av dynamisk allokert minne, uten `std::vector`. Merk at ytelse *ikke* er fokus i dette emnet.

Du lurer nå kanskje på hva som er poenget med å lære seg dynamisk minnehåndtering når vi kan bruke `std::vector` istedenfor. Vi lærer det bort fordi det gir en forståelse for hvordan f.eks. `std::vector` er bygd opp. `std::vector` kan fra nå av tenkes på som noe annet enn en «black-box», du lærer hva som foregår «bak kulissene». Du lærer også om lavnivå programmering, som kan være nyttig å kunne hvis du f.eks. skal jobbe med innebygde systemer.

Vi kan reservere minne mens programmet kjører, men vi kan ikke lage nye variabelnavn «på sparket». Derfor er pekere vesentlig når vi skal bruke dynamisk minne. For å reservere dynamisk minne i C++ bruker vi operatoren `new`, som returnerer en peker til begynnelsen av det minnet programmet har fått tildelt. Uten å ta vare på denne pekeren i en pekervariabel har vi ingen måte å lese fra eller skrive til dette minnet.

Merk at når vi reserverer minne med `new` kan ikke kompilatoren vite hvor lenge programmet har bruk for minnet, og vi må selv ta ansvar for å rydde opp etter oss. Det gjør vi med `delete`-operatoren:

```
void newAndDelete() {
    // Allokere minne for en int med new
    int *x = new int {};

    cout << "Skriv inn et heltall: ";
    cin >> *x;
    cout << "Takk! Du skrev: " << *x;

    // Frigjør minnet når vi er ferdig med det
    delete x;
    x = nullptr;
}
```

Dersom man ikke gjør dette vil det over programmets levetid bli allokert mer og mer minne som ikke blir frigitt, helt til datamaskinen er tom for minne og programmet krasjer. Dette kalles en minnelekkasje. Minnelekkasjer er også i mange tilfeller en sikkerhetsrisiko. Det oppstår lett minnelekkasjer når man bruker dynamisk minne, så beste praksis er å kun bruke det der det er absolutt nødvendig. I eksempelet over er bruk av dynamisk minne helt unødvendig, men det er kun ment som et trivielt eksempel for å demonstrere syntaksen.

Konvensjonen er at den delen av programmet som reserverer minnet «eier» minnet og er derfor også ansvarlig for å frigjøre minnet. I prosedural kode vil det som regel bety at funksjonen der minnet blir reservert også frigjør minnet, og i objektorientert kode (som bruker klasser) betyr det at man allokere minne i konstruktøren til et objekt og frigjør det i destruktøren.

For å allokere minne til en tabell gjør man følgende:

```
void dynamicArrayExample() {
    int n = 0;
    cout << "How many numbers do you want to type? ";
    cin >> n;

    // Allocate memory for double array of size n
    double *numbers = new double[n] {};
    for(int i = 0; i < n; i++) {
        cout << "Input number: ";
        cin >> numbers[i];
    }

    cout << "You entered: ";
    for(int i = 0; i < n; i++) {
        cout << numbers[i] << " ";
    }
    cout << '\n';

    // Release the memory when we're done with it
    delete[] numbers;
    numbers = nullptr;
}
```

Legg merke til at når vi frigjør minnet som er reservert for et array så må vi bruke `delete[]` og ikke `delete`!

Introduksjon til klasser med dynamisk allokerede medlemsvariabler

Det oppstår et spesialtilfelle vi må ta hensyn til når vi har dynamisk allokerede medlemsvariabler i en klasse.

Se på følgende eksempel:

```
class Example {
    private:
        int *anInt;

    public:
        Example(int i) {
            anInt = new int{i};
        }

        Example() {
            anInt = new int{0};
        }

        ~Example() {
            delete anInt;
        }

        int get() const { return *anInt; }
};
```

Ved første øyekast ser dette ut som en veldefinert klasse. Den konstrueres riktig, og dersom konstruktøren fullfører kan vi være sikre på at vi alltid har et initialisert heltall lagret i `anInt`. Problemet vi ser etter dukker først opp når vi skriver denne koden:

```
Example a{ 5 };
Example b;

b = a; // Hva skjer her?
```

Når vi skriver `b = a` kaller vi på `operator =`. Vi har imidlertid ikke definert noen slik operator. Operatoren som blir kalt er da en som kompilatoren lager automatisk. Denne operatoren tar en binær kopi, som vil si at den kopierer medlemsvariabel for medlemsvariabel uten å bry seg om noen av dem er dynamisk allokert.

Dette er et problem fordi den eneste medlemsvariabelen i klassen `Example`, `anInt`, er en peker. Dermed er det *pekeren* og *ikke* minnet pekeren peker til som blir kopiert. Resultatet er at `b` og `a` begge har en peker som peker til nøyaktig samme instans av det dynamisk allokerede heltallet!

La oss ta en kikk på følgende kodesnutt:

```
Example a{ 50 };
if (a.get() > 0) {
    Example b = a;
    cout << b.get();
}
```

Hva skjer i koden over?

Først legger vi merke til at blokken til if-setningen kommer til å bli kjørt siden vi vet at `a` er 5, og derfor større enn null. Vi kopierer `a` til `b`, `b` skrives ut, og idet vi forlater blokken vil `b` bli destruert. Med andre ord vil `b` sin destruktør bli kalt. Husk fra definisjonen av klassen at destruktøren sletter minnet som er dynamisk allokert og pekt på av `anInt`.

Hva skjedde med `a` sin `anInt`? Siden `b` og `a` hadde pekere til det samme dynamisk allokerede heltallet, vil pekeren i `a` nå være ugyldig.

Hvordan kan vi fikse dette? Det vi har beskrevet over kalles en *grunn kopi* (shallow copy), og er ikke alltid en dårlig løsning. I så fall må man holde nøye orden på hvor mange pekere som peker til det samme minnet, og det er utenfor pensum i dette emnet.

Løsningen er å implementere såkalt *dyp kopiering* (deep copying) i `operator =`. En dyp kopi av en peker kopierer også *minneområdet* som pekeren peker til. Når vi kopierer et objekt vil medlemsvariablene i det nye objektet peke til nye, dynamisk allokerede minneområder, og vi unngår problemene beskrevet over.

Kopikonstruktør og operator =

For å implementere dyp kopiering for `Example`-klassen, må vi legge til eksplisitte implementasjoner av en *kopikonstruktør* og `operator =`.

Kopikonstruktøren har alltid formen `Klassenavn(const Klassenavn &)`. Det er denne som kalles når du initialiserer et objekt med et annet objekt av samme type, for eksempel ved å skrive `Example b{a};`.

```
Example::Example(const Example &other) : anInt{ nullptr } {
    this->anInt = new int{}; // Vi allokterer det vi trenger av minne
    *anInt = other.get();    // Vi kopierer verdier fra other til this
}
```

Tilordningsoperatoren kan implementeres på forskjellige måter, en måte er vist i forelesning 10. Der allokterer tilordningsoperatoren nytt minne, kopierer over verdiene fra høyresiden og til slutt frigjør det gamle minnet.

En annen vanlig og god teknikk å bruke er «copy-and-swap». Kort fortalt bruker vi en call-by-value parameter for høyreoperanden, da tar vi inn en kopi (`rhs`) som automatisk opprettes med bruk av kopi-konstruktøren.

Deretter swapper vi alle medlemsvariabler (inkl. pekere til allokert data) mellom de to objektene. Dermed får `this` (venstresiden) tilordnet høyresidens verdier (og allokerede data) og `rhs` ender opp med det som skal slettes. Siden `rhs` er en lokal variabel vil destruktøren dens automatisk bli kalt når den går ut av scope.

```
Example &Example::operator=(Example rhs) {
    // Vi tar inn rhs som call-by-value
    std::swap(anInt, rhs.anInt) // Vi swapper pekere
    return *this;
}
```

`std::swap` ligger i biblioteket `<utility>`, og er veldig nyttig i dette tilfellet, den er deklarerert slik:

```
template<class T> void swap( T& a, T& b);
```

Deklarasjonen viser at `swap` tar inn to referanser som argumenter, disse kan være av hvilken som helst type, inkludert brukerdefinerte typer, men `a` og `b` må ha samme type. `swap` returnerer ingenting, men den bytter om `a` og `b`, det vil si at alle medlemsvariabler flyttes fra den ene til den andre. Dette gjelder også dynamisk allokert minne, da vil de bytte pekere til de ulike minneområdene. Funksjonen har samme effekt på `a` og `b` så det har ingenting å si hvilken variabel som kalles først i argumentlisten. Eksempelet under viser hva som skjer når man kaller `swap` på to objekter fra klassen vår `Example`.

```
Example a{1};
Example b{2};
cout << "Initial values: a= " << a.get() << "b= " << b.get() << '\n';
swap(a, b);
cout << "Values after swap: a= " << a.get() << "b= " << b.get() << '\n';
}
```

Dette vil bli skrevet ut når koden kjøres:

```
Initial values: a= 1 b= 2
Values after swap: a= 2 b= 1
```

Vi ser at verdiene til `a` og `b` ble byttet om som vi ville og de peker nå til motsatt minneområde av det de gjorde i sted. Husk at i overlastingen av `operator=` er `rhs` en call-by-value parameter og dermed en kopi av det objektet vi setter `this` lik. Dermed vil `swap` bytte minneområdet til kopien og ikke det faktiske objektet og det er sånn vi unngår flere pekere til samme minneområde.