

Fotometri med CCD-kamera

(del 2 av 2)

Som vi så i forrige artikkel, er fotometri en plattform for samarbeid mellom amatørastrofotografer og fagastrofotografer. Men hvordan kommer du fra et CCD-bilde til et magnituedeestimert, og hva påvirker kvaliteten til resultatet?

AV GEIR KLINGENBERG

Prinsippet er veldig enkelt. Du måler intensiteten av objektet du er interessert i, samtidig som du måler intensiteten av en stjerne med kjent magnitudo, det vi kaller en sammenlikningsstjerne. Objektets magnitudo kan dermed beregnes. I tillegg brukes en sjekkstjerne som «fasit» for å verifisere analysen.

Utgangspunktet for målingene er CCD-bilder kalibrert etter retningslinjene fra forrige artikkel. Bilder tatt med astronomiske CCD-kameraer er på FITS-formatet, og inneholder blant annet pikselverdier (intensitetsverdier) fra CCD-brikken.

Først åpner du CCD-bildet i en programvarepakke for fotometri, og legger en virtuell sirkel rundt stjernen eller asteroiden på bildet. Dette er de innerste sirklene i figur 1. Programmet beregner så intensiteten fra objektet innenfor målesirkelen.

Men lyset som måles kommer ikke bare fra stjernen, det kommer også med uønsket lys fra atmosfæren eller bakgrunns-galakser/tåker. For å bote på dette legger du til to nye konsentriske ringer rundt målesirkelen, den ene med en noe større diameter enn den andre, slik at de danner en «smultring» rundt målesirkelen, se figur 1. Bidraget fra bakgrunnen i denne smultringen beregnes og trekkes fra intensiteten i målesirkelen.

Intensiteten til sammenlikningsstjernen finnes på samme måte, og programvaren gir deg magnitudoforskjellen mellom stjer-

nene. Objektets magnitudo M_O beregnes til slutt som:

$$M_O = M_S + \text{diff}$$

der M_S er sammenlikningsstjernen kjente magnitudo, og *diff* er magnitudo-differansen som programvaren har beregnet. Enkelte programpakker gir M_O direkte etter at du har tastet inn M_S .

Diameter til besvær

Det meste av jobben gjøres altså av programvaren. Din oppgave i denne delen av analysen er å velge radius på målesirkelen og tykkelsen på ringen for måling av himmelbakgrunnen.

Selv om stjernene har langt mindre utstrekning på himmelen enn det teleskopet makter å oppløse, og derfor burde få god plass innenfor én piksel, vil de i praksis dekke flere piksler. Dette skyldes lufturo, at det er vanskelig å finne optimal fokus, samt diffraksjon i teleskopet. Figur 2 viser profilen av en stjerne på CCD-brikken, der pikselverdiene er størst i sentrum av stjernen og avtar jo lengre unna sentret man kommer. Det har vist seg at en målesirkeldiameter på 3-4 ganger FWHM fungerer best (begrepet FWHM er forklart i tekstboksen *Stjerneprofil*). For svake stjerner kan du prøve med en litt mindre diameter.

Et annet svært viktig poeng er *alltid å bruke samme diameter for alle stjernene*

som måles på bildet. Hvis ikke, brukes ikke samme andel av lyset og målingene vil ikke bli sammenliknbare. Selv om sterke stjerner ser større ut enn svake stjerner på CCD-bilder og astrofoto, har alle stjernene på samme bilde samme FWHM. Sterke stjerner synes større fordi mer av profilen stikker opp over bakgrunnsstøyen.

Når det gjelder ringen for måling av himmelbakgrunnen, bør den skilles fra målesirkelen med noen piksler, avhengig av hvor tett det er med stjerner i feltet. Ringen bør være så tykk som mulig for å få et best mulig estimert av bidraget fra himmelbakgrunnen. Det er best å unngå å ha stjerner i ringen, og i hvert fall på kantene av ringen. De fleste programvarepakke har algoritmer for å ignorere stjerner, men de fungerer ikke like bra for stjerner på kanten.

Valg av sammenlikningsstjerner

Det neste steget i analysen er å velge sammenlikningsstjerner på CCD-bildet. Det enkleste er å bruke ferdige søkekart med referanseverdier. Et eksempel er vist i figur 3. Dersom du observerer variable stjerner, er sjansene gode for at det finnes kart for den aktuelle stjernen. AAVSO har mange slike, NAS har også noen. For asteroider, ferske supernovaer og andre eksotiske objekter kan det hende du må finne sammenlikningsstjerner selv. Husk da at gode sammenlikningsstjerner:

1. Har høy SNR for ikke å innføre unødig støy i målingene (se tekstboksen *Signal-To-Noise-Ratio* for en nærmere omtale av begrepet SNR).
2. Har lik farge som objektet av interesse. Jo mindre fargeforskjellen er, jo mindre blir målefeilen som følge av avvikende spektralrespons mellom teleskopsystemet ditt og standardsystemet. Er fargeforskjellen stor vil også ulik grad av ekstinksjon kunne gi kunstige trender i lange observasjonsserier.
3. Er nær objektet på bildet. Noe av variasjonen i lysfølsomheten fra piksel til piksel vil være igjen selv etter kalibreringen, siden det er umulig å ta perfekte flattfeltsbilder. I tillegg kan strølys gi ujevn belysning av CCD-brikken. Sjansene er at variasjonen er størst for piksler langt fra hverandre. Ofte vil det også kunne være kanteffekter fra vignettering og koma, så hold deg nært objektet og fortrinnsvis nært billedsentret.

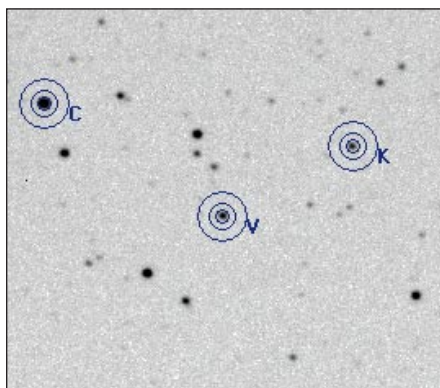
Planetarieprogrammet ditt gir deg magnitudene fra en katalog – en samling astronomiske data for et utvalg stjerner. Mange kataloger inneholder fotometriske data, men kvaliteten varierer. En som er egnet for nøyaktig fotometri er Hipparcos/Tycho-2-katalogen, som inneholder V-magnituder og fargeindeks (B-V) for stjerner ned til magnitudo 11. Katalogen er også tilgjengelig på internett.

Siden referanseverdiene kan være av varierende kvalitet, er det lurt å bruke flere sammenlikningsstjerner. Ved å bruke gjennomsnittet av målingene basert på de ulike sammenlikningsstjernene blir resultatet mindre følsomt for feil i referanseverdiene.

Husk også at referanseverdien må stemme overens med det filteret du bruker. Bruker du et V-filter må du kjenne V-magnituden til referansestjernen, bruker du R-filter må du kjenne R-magnituden, og så videre. Det

Må korrigere for påvirkninger

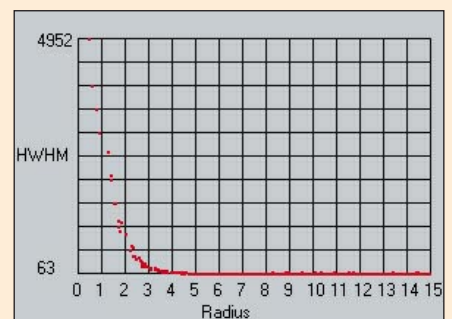
Lyset har en lang vei å vandre fra objektet og fram til CCD-brikken i kameraet ditt. Underveis påvirkes lyset av en rekke forskjellige forhold. En nøyaktig måling avhenger av at du klarer å korrigere best mulig for feilkildene, helst også minimalisere de feilkildene du *kan* påvirke.



Figur 1: Utsnitt av et CCD-bilde av stjernen BL Cam. BL Cam er identifisert (V) sammen med sammenlikningsstjerne (C) og en sjekkestjerne (K). Målesirkler og referanseverdier brukes for å finne stjernens magnitudo.

Stjerneprofil

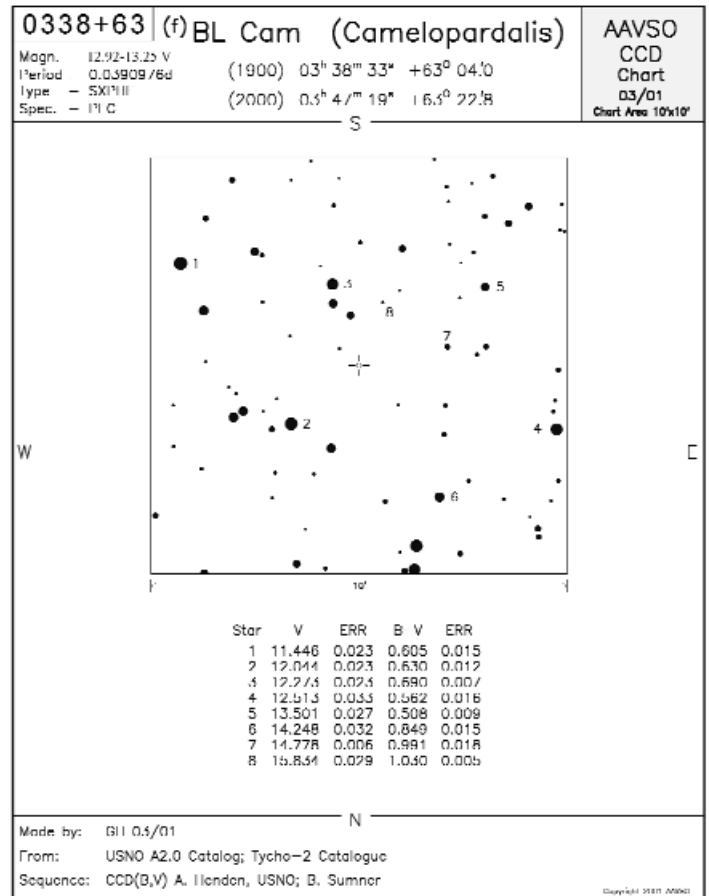
Tenk deg at vi for hver piksel innenfor målesirkelen plottet avlest verdi mot avstanden fra pikselen til senteret av stjernen. Vi får da en stjerneprofil som vist i figur 2 (avstandene er ikke heltall siden det beregnede midtpunktet til stjernen ligger mellom piksler). Vi ser at lyset spres rundt midtpunktet og avtar jo lengre unna sentret vi kommer, helt til lyset forsvinner i støyen fra himmelbakgrunnen. For eksemplet i figur 2a ser vi at halvparten av maksimal verdi er ca. 1500 og inntreffer ca. 1,5 piksler fra senteret. Denne avstanden fra sentret – som er en *radius* – er et viktig mål på spredningen av lyset, og betegnes HWHM (*Half Width at Half Maximum*). Det er også vanlig å operere med FWHM (*Full Width at Half Maximum*), som er diameteren ved halv intensitet, og er følgelig 2 ganger HWHM. Ved dårlige observasjonsforhold er FWHM større enn ved gode forhold. Dårlig fokus vil også øke FWHM.



Figur 2: Omtrent slik ser profilen av en stjerne ut på CCD-brikken. *Pikselverdiene (den målte intensiteten) er størst i sentrum av stjernen og avtar jo lengre unna sentret man kommer.*

Liten ordliste

- AAVSO:** *American Association of Variable Star Observers*, en internasjonal organisasjon for innrapportering av observasjoner av variable stjerner.
- B-verdi:** Lysstyrken til et objekt, målt med blått filter
- Diffraksjon:** Optisk fenomen som gjør at ikke alt lyset fra et punktformet objekt gjengis i et punkt. Noe av lyset fordeles i såkalte diffraksjonsringer rundt objektet.
- Ekstinksjon:** Atmosfærisk effekt som gjør at lyset fra himmelobjekter dempes. Er også årsak til at stjerner blinker når vi ser på dem uten teleskop.
- FITS:** Populært lagringsformat for astronomiske bilder (*Flexible Image Transport System*).
- Fotometri:** Måling av lysintensitet (og/eller fargespektrum) fra et astronomisk objekt.
- FWHM:** *Full Width at Half Maximum*, se forklaring i tekstboksen *Stjerneprofil*.
- HWHM:** *Half Width at Half Maximum*, se forklaring i tekstboksen *Stjerneprofil*.
- Koma:** Optisk feil som gjør at stjerner ikke gjengis punktformet, men dras ut i en oval skive.
- Magnitude:** Lysstyrken til et objekt.
- Saturering:** Metning, utbrenning, det vil si at det innsamlede lyset overstiger hva CCD-brikken maksimalt kan gjengi.
- SNR:** *Signal-to-noise-ratio*, hovedsignalens styrke i forhold til et bakgrunnssignal. Her: Måleobjektets lysstyrke i forhold til himmelbakgrunnen.
- Tracking:** Monterings evne til å følge stjernehimmelens bevegelse slik at objektet holder seg på eksakt samme sted i teleskopfeltet.
- V-verdi:** Lysstyrken til et objekt, målt med visuelt eller grønn-gult filter (slik øyet oppfatter lysstyrken).



Figur 3: Søkekart for den pulserende stjernen BL Cam med referanseverdier for B- og V-filter. Den variable stjernen er markert med et kryss, og sammenlikningsstjernene er nummerert fra 1 til 8.

Kilde: AAVSO

er vanskelig å finne gode data for R og I magnituder, men det finnes på enkelte AAVSO-kart, og i USNO-katalogene, tilgjengelig på internett eller CD-ROM.

Kjenn dine feilkilder

Når du behersker det grunnleggende er neste steg å forbedre kvaliteten på målingene. I store trekk gjøres det ved å kjenne og kontrollere feilkildene. Her er en ufullstendig liste over feilkilder du kan komme bort i. Hvor stor betydning den enkelte feilkilden har vil variere med utstyr, observasjonsforhold og observasjonsrutiner:

Lav SNR

Lite signal i forhold til støy – dvs. lav SNR – vil gi høy usikkerhet i målingene. Dette er en viktig feilkilde som du før eller siden vil få erfaring med. Lav SNR kan skyldes:

1. Svake stjerner. Jo dårligere stjernen trer fram fra bakgrunnsstøyen jo større blir usikkerheten, samt at variasjonen i selve stjernelyset er større jo svakere stjernen er. En måling vil altså inneholde usikkerhet selv uten bakgrunnsstøy! Dette kalles Poisson – eller fotonstøy. Å måle magnituder består i å telle fotoner, og nok en gang

gjelder de store talls lov; jo flere fotoner vi teller, jo mindre blir usikkerheten. Husk at vi måler både objektet og sammenlikningsstjernen, og begge SNR er like viktig for resultatet.

2. Lys himmelbakgrunn. En lys himmelbakgrunn reduserer SNR siden målingen i større grad domineres av lys fra atmosfæren; det være seg sollys, månelys, nordlys eller menneskeskapt lysforurensning. Lysutsendingen fra atmosfæren varierer tilfeldig fra måling til måling og opptrer som støy.
3. Støy fra elektronikken selv. En slik støykilde kan være varme i CCD-kameraet, som gir termoelekstrisk støy (mørkestrøm) i CCD-brikken. En annen støykilde oppstår i prosessen med å lese av pikselverdiene, denne kalles avlesningsstøy.

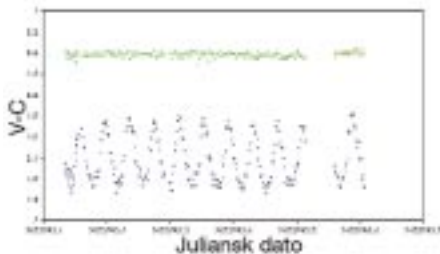
For å øke SNR kan du forlenge den totale eksponeringstiden, enten ved å ta lange enkelteksponeringer eller ved å ta flere korte eksponeringer som kombineres ved billedbehandling. Ved lengre eksponeringer vil signalet øke mer enn støyen siden signalet for objektet er «konstant», mens støyen er tilfeldig og tende-

rer til å jevnes ut over tid. Et større teleskop vil også gi høyere SNR, gitt at alle andre parametre holdes konstant.

Støyen fra elektronikken reduseres ved avkjøling, noe alle astronomiske CCD-kameraet har støtte for. Hvor effektiv avkjølingen er, varierer. Undertegnedes SBIG ST-7 kamera kjøles ned til ca. 20 grader under lufttemperaturen. Om vinteren oppnås enkelt en temperatur på rundt -30 °C, noe som reduserer støyen til et minimum. På høsten derimot oppnås kanskje bare -10 °C, med merkbart mer støy som resultat. Så de kalde vinternettene i Norge er faktisk godt for noe! I tillegg kalibrerer vi målebildene med mørkestrømsbilder, som estimerer og reduserer støyen fra mørkestrømmen i kameraet. Lesestøy reduseres også ved kalibrering siden biasbildene inneholder et estimat av lesestøyen (mørkestrømsbilder og biasbilder ble beskrevet i forrige artikkel).

Lufturo

Lufturo gjør seg gjeldende i korte eksponeringer, og skaper støy selv om SNR er høy. Du vil mest sannsynlig erfare problemet for sterke stjerner, siden eksponeringstiden da må begrenses. Denne støyen

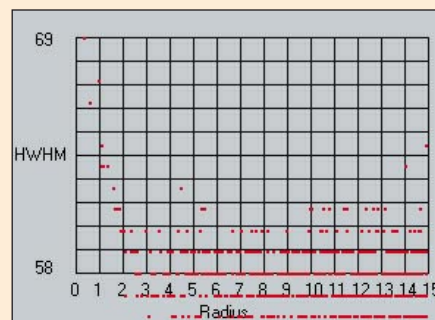


Figur 4: BL Cam har en periode på 0,039 dager. Grafen viser resultatet av 250 målinger utført i løpet av en natt. De blå punktene er magnitudedifferansen mellom BL Cam (V) og sammenlikningsstjerne nr. 1 (C). De grønne punktene er magnitudedifferansen mellom sjekkstjernen (K) og den samme sammenlikningsstjernen. For å finne magnituden til BL Cam ser vi fra figur 3 at vi må legge 11,446 til hvert datapunkt.

Signalnivå

Som navnet tilsier, er SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) et mål på hvor mye signal vi måler i forhold til støy. Alle fotometriske målinger inneholder uønsket støy som kan stamme fra stjernelyset selv, fra en lys himmelbakgrunn eller fra elektronikken. Slik støy opptrer tilfeldig og innfører variasjon i målingene. Vi ønsker mye signal og lite støy, så en høy SNR er av det gode. Dersom stjernens profil rager godt over bakgrunnsstøyen domineres signalet av stjernelyset og SNR er høy, se figur 2. Dersom profilen derimot nesten drukner i bakgrunnsstøyen har den lav SNR, se figur 5.

SNR brukes ofte som indikator på kvaliteten i fotometriske målinger. Typisk ansees en SNR på 100 for å gi utmerket resultat, mens en SNR under 15 gir høy usikkerhet (selve beregningen av SNR utføres av programvaren). SNR-beregningen tar med de fleste tilfeldige feilkilder unntatt lufturo. Den tar heller ikke høyde for systematiske feil som unøyaktige referanseverdier eller mangel på filter.



Figur 5: Dersom profilen nesten drukner i bakgrunnsstøyen, er signalnivået lavt (lav SNR).

er mer fremtredende jo mindre teleskop du har (nok en grunn til å kjøpe større!). Også her gattes støyen ut over tid, så øk eksponeringstiden så mye som mulig uten å overeksponere stjernen. Alternativet er å ta gjennomsnittlig måling fra flere korte eksponeringer. Dersom du ønsker nøyaktige målinger med en 8-tommer kan det være nødvendig med (total) eksponeringstid på over ett minutt.

Kosmisk stråling

Av og til blir CCD-detektoren truffet av kosmiske partikler som etterlater seg et spor, ofte i form av en avlang strek på bildet. Hvis et slikt spor treffer målesirkelene dine for objektet eller en av sammenlikningsstjernene, er det like greit å forkaste hele bildet.

Tynne skyer, dis og tåke

Ingenting kan øke støyen som tynne skyer, dis eller tåke. Selv om stjernene er godt synlige, vil støyen mangedobles som følge av lysere himmelbakgrunn (lavere SNR), varierende forhold over feltet som observeres, og varierende forhold fra ett CCD-bilde til neste. Ekstinksjonseffekten øker også.

Unøyaktige referansemagnituder

Dette er en av årsakene til at det er vanskelig å sammenlikne observasjoner fra ulike observatører. Dersom de bruker ulike sammenlikningsstjerner eller ulike kilder for referanseverdiene, kan avvikene bli store. For eksempel kan kataloger som blir brukt i planetarieprogramvare ha unøyaktigheter på 0,3 magnituder eller mer. Det beste du kan gjøre er å velge kilden til referanseverdiene med omhu, og å bruke flere sammenlikningsstjerner.

Ufiltrerte og

ikke-transformerte observasjoner

Dette er en annen årsak til at det er vanskelig å sammenlikne observasjoner fra ulike observatører. Det ble beskrevet i forrige artikkel, men i korte trekk vil målingene avvike fra den egentlige verdien siden ulike teleskopsystem har noe ulik følsomhet i de forskjellige delene av spektret.

Piksel-til-piksel-variasjon i lysfølsomheten

Feil kan snike seg inn på grunn variasjon i lysfølsomheten fra piksel til piksel i kameraet. Det vil også kunne være problemer med ujevn belysning av CCD-brikken på grunn av vignettering eller støy i det optiske systemet. Flattfeltsbilder brukes for å redusere slike feilkilder. Merk at strølys fra for eksempel Månen eller gate-lys ikke kan korrigeres for med flattfeltsbilder, siden strølyset ikke vil være tilstede når flattfeltsbildene tas.

Dårlig tracking

Dette kan føre til avlange stjerner og at stjernene over tid beveger seg over CCD-brikken. Dersom programvaren ikke støtter ovale målesirkler vil unødige mye av himmelbakgrunnen komme med i målesirkelen. Og siden himmelbakgrunnen er støy, øker støyen i målingen. Bevegelsen over CCD-brikken kan gi kunstige trender i lange observasjonsserier på grunn av piksel-til-piksel variasjoner som beskrevet over.

Ikke-lineær respons og saturering

Dersom du opererer utenfor kameraets lineære responsområde, vil du måle stjernen svakere enn den er, se forrige artikkel. Problemet gjelder spesielt sterke stjer-

ner, være seg objektet av interesse eller sammenlikningsstjernene.

PC-klokke (timing)

Dersom klokken på PC-en din er feil i observasjonsøyeblikket, er det fort gjort å rapportere feil tidspunkt for målingen (tidspunktet for observasjonen ligger i FITS-fila). Det er en god idé å installere programvare som automatisk synkroniserer PC-klokka mot en tidserver når PC-en startes opp. Slik programvare finnes for eksempel her:

<http://www.worldtimeserver.com/atomic-clock/>

Rapporter feilestimat!

Det er god skikk å rapportere et estimat på usikkerheten i målingene. Hvis programvaren oppgir feilestimat, kan du bruke det. Hvis ikke finnes det mange måter å beregne det selv på. En av de enkleste går ut på å bruke *standardavviket* for målingene du får ved å bruke flere sammenlikningsstjerner (se tekstboksen *Målefeil* for detaljer). Dette inkluderer de fleste feilkilder, men vær oppmerksom på at du bør bruke så mange sammenlikningsstjerner som mulig for å få et godt feilestimat (noe som også gir et bedre magnitudeestimat).

Dersom du ikke er på jakt etter nøyaktige magnitudeestimat, men heller perioder og utslag i en lyskurve, er det ikke feilen i forhold til nøyaktig *magnitude* som er viktig. Du kan like gjerne oppgi magnitodeforskjellen mellom objekt og sammenlikningsstjernen, se figur 4. Da er det tilfeldige feil som spiller inn (ikke systematiske), og et godt mål på slike feil er standardavviket til sjekkstjernen, såfremt den er av tilsvarende lysstyrke og farge som objektet.

Til sist kan du selv sjekke kvaliteten på målingene dine ved å gjøre en serie observasjoner av stjerner med kjent magnitudo. Mål så mange stjerner som mulig i hvert bilde og sammenlikn med «fasiten». For en gitt stjerne bør gjennomsnittet av alle målingene ligge tett opp til fasiten, og i tillegg bør det være liten variasjon mellom enkeltmålingene (dvs. lavt standardavvik). Det bør være mulig å få ned feilen til ca. 0,03 magnituder, avhengig av hvor mange observasjoner som inngår i gjennomsnittet. Flere observasjoner kreves for svake stjerner. NGC 7790 er en åpen hop med gode referanseverdier, som egner seg til en slik øvelse. Se nettadressen: <http://binaries.boulder.swri.edu/binaries/fields/ngc7790.html>

Målefeil

Figuren nedenfor viser 10 observasjoner av en konstant stjerne. De målte verdiene kan vi kalle x_1, x_2, \dots, x_{10} . Gjennomsnittet, eller middelverdien \bar{x} , beregnes som summen av målingene delt på antall målinger, N :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

I dette eksemplet er middelverdien 12,51. Som et mål på variasjonen i dataene brukes ofte et begrep kalt *varians*. Denne estimeres som gjennomsnittlig avstand fra en måling til middelverdien. I matematikken er en avstand mellom to punkter x og y ofte uttrykt som kvadratet av forskjellen; $(x - y)^2$. Estimert av variansen, s^2 , kan derfor skrives som:

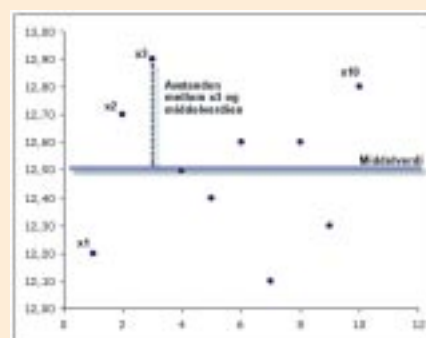
$$s^2_{N-1} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

(Merk at det deles på $N - 1$ i stedet for N , det kan vises at dette er en bedre estimator for variansen). *Standardavviket* er simpelthen kvadratroten av variansen, og gir usikkerheten på samme benevnelse som målingene. Standardavviket er

derfor et feilestimat for *en enkelt* måling i data-settet. Dersom du rapporterer middelverdien, altså gjennomsnittet av *flere* målinger, vil usikkerheten reduseres. Dette kommer til uttrykk ved at feilestimatet nå er standardavviket delt på kvadratroten av antall målinger:

$$s_{\text{middel}} = \frac{s_{N-1}}{\sqrt{N}}$$

Beregning av middelverdi og standardavvik gjøres enkelt og greit i regneark som for eksempel Excel.



Ti tenkte måleverdier av en stjerne.

Referanser:

- 1: www.astro.uio.no/nas/supernova/index.htm
- 2: www.minorplanetobserver.com/astlc/default.htm
- 3: www.aavso.org/observing/programs/ccd/manual
- 4: sus.univ.szczecin.pl/~ecliptic/vesta3en.htm
- 5: www.warren-wilson.edu/~dcollins/WebCamPub/Webcam.htm

Eksklusive håndlagede krystallfat med samlerverdi etter motiv av sort hull og t-skjorter med vakkert nordlysmotiv.

Motivet er Melkeveiens store sorte hull og det vil kun bli produsert 100 stk., nummererte, ved Magnor Glassverk. Hvert fat har et sertifikat signert av glassblåserne. I tillegg har Knut Jørgen Røed Ødegaard laget en beskrivelse av motivet som medfølger. Fatenes diameter er ca 40cm, vekt ca 4,5 kg og de leveres i flotte trekasser av furu.



Porto kommer i tillegg til oppgitte priser. Varene sendes i postoppkrav.

Vardevn. 65, 1850 Mysen | Telefon: 69 89 99 69 | Telefaks: 91 03 75 92 | E-post: post@ceyx.no | Nettbutikk: www.ceyx.no