

2016
2017



Astroautomasjon

ÅRSPROSJEKT TOF 2

ANDREAS K. BERG, EIVIND H. FURDAL, PEDER F. ELLEFSEN

HORTEN VGS | 3 STF



Sammendrag

Den europeiske romfartsorganisasjonen ESA har siden 2007 gående et prosjekt for å kartlegge stjernehimmelen fra bakken, som forberedelse til oppskytingen av romobservatoriet PLATO. Gjennom kontakter ved Universitet i Vilnius, har vår faglærer, Jan Kåre Qvam, deltatt på deler av denne prosessen. Selve kartleggingen har som mål å finne mulige eksoplaneter og variable stjerner, slik at PLATO-sonden vet hvilke mål som skal observeres nærmere. Bakkeobservasjonene er tid- og ressurskrevende, så det er ønskelig å automatisere deler av prosessen for å kunne observere flere sektorer på himmelen, samtidig som en høy samplingsrate opprettholdes. Som vårt årsprosjekt i Teknologi- og Forskningslære 2 har det derfor blitt utviklet et program som automatiserer observasjonsprosessen. Den oppnådde samplingsfrekvensen og presisjonen har blitt analysert og drøftet. Observasjonene ble gjennomført i januar 2017, og det ble observert på både to og seks felt i serie. Resultatene viste at observasjon av to felter ga en samplingsfrekvens på 2.38 mHz, som er høyere enn nødvendig til formålet. Analyse av presisjonen viste at feltet flyttet seg med 0.1 grad ut av bildet over tre timer. Med seks felt ble samplingsfrekvensen 0.79 mHz, noe som er for lavt til formålet og vil føre til aliasing. For denne serien var det for lite data til å kunne si noe sikkert om presisjonen, men det ble funnet indikasjoner på at den var dårligere enn ved en tofelts-serie. Ut i fra resultatene ble det konkludert med at automatiseringen av observasjonsprosessen var vellykket, og at det optimale forholdet mellom samplingsfrekvens og antall felt per observasjonsserie vil være ved fire felt, dersom observatøren klarer å ha kontroll på feilkilder til presisjonen. Dette vil primært være teleskopets poloppstilling.



Innhold

Sammendrag	1
Introduksjon	3
Teori.....	3
PLATO-prosjektet	3
Hertzsprung-Russel-diagram	3
Variable stjerner	4
Eksoplaneter.....	4
Koordinater på himmelen	5
Programmering.....	5
ASCOM.....	5
Visual Basic	5
Statistikk - Normalfordeling og standardavvik	6
Fotometri.....	7
S/N-ratio	8
CCD-brikke	8
Signalbehandling	9
Kalibrering	10
Utstyr.....	11
Metode	13
Resultater	14
Drøfting	16
Resultater og feilkilder	16
Konklusjon	19
Kilder.....	20
Litteraturliste.....	20
Bilder	21



Introduksjon

Å observere mange felter av himmelen for å finne eksoplaneter og variable stjerner er en prosess som krever mye tid, og som forutsetter en god samplingsrate. Hensikten til dette prosjektet har derfor vært å lage et dataprogram for å automatisere prosessen, og vurdere samplingen og presisjonen som oppnås med den utviklede løsningen.

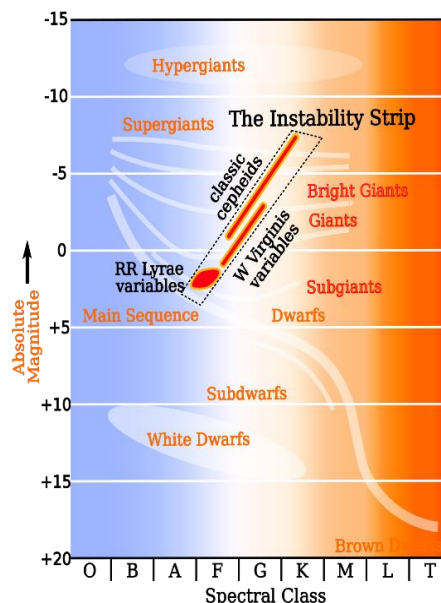
Teori

PLATO-prosjektet

PLANetary Transits and Oscillation of stars (PLATO) er et omfattende prosjekt hos European Space Agency (ESA). Hovedmålet med prosjektet er å finne jordlignende eksoplaneter. PLATO-sonden består av 34 små teleskoper, som skal rettes mot ett og ett punkt over lang tid (måneder og år). Ved å innhente informasjon om radius, masse, tetthet og alder til de enkelte plantene håper man å besvare noen fundamentale spørsmål, som: Hvordan utvikler solsystemene seg? Finnes det andre systemer som vårt, med potensielt beboelige planeter? Videre leter man også etter andre interessante objekter i rommet, som variable stjerner og galakser. Prosjektet ble startet i 2007, og frem til den planlagte oppskytningen av PLATO-sonden i 2024 skal store deler av himmelen observeres kontinuerlig fra teleskoper over hele kloden. Dette er for å kartlegge hvilke stjerner som er av interesse for nærmere observering med sonden. (ESA 2015) (Rauer et al 2014). Årsaken til at vårt prosjekt har blitt til er at vår lærer, Jan Kåre Qvam, er med som bidragsyter til disse bakkeobservasjonene. Han er blitt engasjert i PLATO-prosjektet gjennom kontakter på Institutt for teoretisk fysikk og astronomi ved Universitetet i Vilnius, som har ansvar for observasjoner av mange felt på den nordlige halvkule (Universitetet i Vilnius 2017).

Hertzsprung-Russel-diagram

Hertzsprung-Russel-diagrammet, eller HR-diagrammet, er et verktøy som ble utviklet av astronomene Ejnar Hertzsprung og Henry Russel for å sortere og systematisere stjerner. Stjernenes plassering i diagrammet avgjøres av faktorene overflatetemperatur/spektralklasse og utstrålt effekt. De fleste stjerner får en plassering langs det som kalles hovedserien, som danner en diagonal stripe på tvers av diagrammet. De variable stjernene er gjerne plassert langs ustabilitetsstripen, se figur 1. HR-diagrammet er også et viktig verktøy for å forstå hvordan stjerner utvikler seg (Callin 2007).



Figur 1: HR-diagram med ustabilitetsstripen markert.

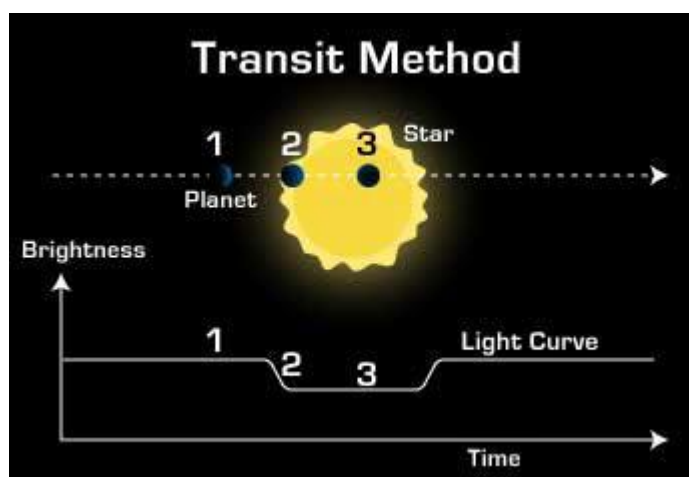


Variable stjerner

Variable stjerner er stjerner der lysstyrken varierer over tid. Disse variasjonene kan være store, fra nesten umulige å observere til store novaer med en økning på inntil tusen milliarder ganger i lysstyrke. Tiden fra minimum til maksimum i en svingning kan også variere fra brøkdelen av et sekund til tusenvis av år (Andresen 2005). Årsaken til lysvekslingen gir tre ulike hovedgrupper. Pulserende stjerner er stjerner som mer eller mindre regelmessig ekspanderer og trekker seg sammen, og dette er den største gruppen. Hos eruptive stjerner kommer lysvekslingen fra utbrudd av stråling og materie fra stjernens indre eller fra områder på overflaten. Disse utbruddene kan variere fra små utbrudd på flarestjerner til store eksplosjoner på supernovaer. Den siste hovedgruppen er formørkelsesvariable stjerner. Dette er dobbeltstjerner der komponentene periodisk formørker hverandre helt eller delvis. Dette kommer av at baneplanet ligger i eller nær synslinjen (Ringnes 2009).

Eksoplaneter

Eksoplaneter er planeter som går i bane rundt andre stjerner enn vår stjerne, Solen. Målet med å lete etter eksoplaneter er i hovedsak å finne potensielt beboelige planeter, jordlignende planeter som går i bane i den beboelige sonen rundt en sollignende stjerne (Howell 2016). Det finnes flere metoder for å finne eksoplaneter, deriblant mikrolinsing, pulsarmåling, astrometri og dopplerspektrometri, men den hittil mest effektive metoden er passasjemetoden. Denne metoden avslører en planet ved at man ser en forandring i lysstyrken til stjernen den går rundt når planeten passerer mellom oss og stjernen.



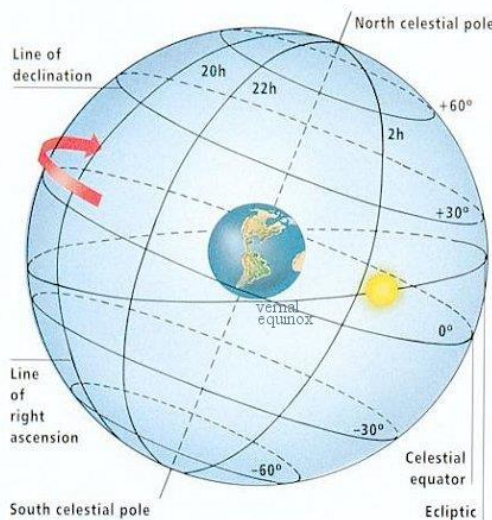
Figur 2: Oppdagelse av stjerner med passasjemetoden.

Graden av formørkelse (trinn 3, figur 2) avhenger av planetens radius, og varigheten av trinn 2 avdekker baneradius og banefart. Metoden kan også brukes til å oppdage systemer med flere planeter. Dopplermetoden, som bruker dopplereffekten i lyset fra en stjerne som blir dratt på av planeten sin, var tidligere den mest effektive metoden med 600 oppdagelser, 90% av alle oppdagelser frem til 2011 (Sannes 2011). Den ble derimot tatt igjen av passasjemetoden med Keplerprosjektet (2009-2013), hvor det ble oppdaget i overkant av 2700 eksoplaneter (NASA). Selv om passasjemetoden har vist seg som den mest effektive metoden for å finne planeter, er den begrenset om man vil finne ut mer om et solsystem. For å bygge en modell av systemet man ser på vil man da gå tilbake til dopplerspektrometri, som gir flere svar om gravitasjonskreftene som er i spill (Qvam 2017).



Koordinater på himmelen

Himmelske koordinater tilsvarer på mange måter koordinatene på jorda. Breddegradene kalles *deklinasjon*, de måles på en skala fra -90° til 90° der -90 og 90 er punktene over syd- og nordpol og 0 er punktet over ekvator. Hvilke deklinasjoner en kan se kommer an på hvilken breddegrad man befinner seg på. Fra Oslo, på 61° nord, vil man kunne se stjerner fra -31° til 29° på andre siden av jorda. Lengdegradene kalles *rektascensjon* (RA) og måles på en skala fra 0 til 24 timer, der 0 h og 12 h er punktene der jordisk ekvator møter ekliptisk (solsystemets) ekvator (Richmond 2012).



Figur 3: Grafisk fremstilling av himmelkoordinater.

Programmering

Programmering er måten en kommuniserer med en datamaskin på. Slik mennesker har språk vi snakker sammen med, har datamaskinen også språk som den forstår. Datamaskinene kan enten få eller ikke få et strømsignal. På den måten kan de kommunisere med binærkode, 0 (av) og 1 (på), og vi kommuniserer med datamaskinene med programmeringsspråk, og en kompilator som oversetter koden vår til binærkode.

ASCOM

Astronomy Common Object Model (ASCOM) er et prosjekt som har som mål å lage et standardisert utviklingsmiljø for programvare til astronomi-instrumenter som er uavhengig av programmeringsspråk og maskinvare. For enkelhets skyld brukes oftest språk med innebygd støtte for Windows COM (Component Object Model), siden ASCOM bruker dette for å snakke med astronomi-maskinvaren. Prosjektet baserer seg på åpen kildekode (The ASCOM Initiative 2014). Det at noe har åpen kildekode betyr blant annet at programmet og kildekoden skal være gratis og lett tilgjengelig for allmennheten, og at det skal være tillatt å redistribuere modifikasjoner av koden. Definisjonen på åpen kildekode er bestemt av *The Open Source Initiative* (The Open Source Initiative 2007).

Visual Basic

Språket vi har brukt for å utvikle programmet heter Visual Basic (VB). VB er et systemuavhengig, hendelsesdrevet programmeringsspråk og IDE (Integrated Development Environment), utviklet av Microsoft. Det kom for første gang i 1991, og den siste versjonen, VB 6, kom ut i 1998. Språket bygger på det eldre språket BASIC, som ble kombinert med det brukervennlige formsystemet til Alan Cooper, Tripod, og bygges ved å kombinere objekter i et vindu og tildele objektene funksjoner og variabler



(Cooper 1996). At språket er hendelsesdrevet betyr at flyten styres av hendelser, inndata fra bruker, måleinstrumenter eller fra andre programmer og tråder. Når oppgaven er ferdig kommer programmet tilbake til hovedvinduet sitt. Microsoft fjernet all utvidet støtte for VB 6 i 2008 (Microsoft 2015), men det er flere grunner til at det likevel ble brukt i dette prosjektet. Programmet skulle kommunisere med astronomiutstyret gjennom ASCOM, og VB6 sin støtte for .NET og COM-objekter var dermed en fordel (The ASCOM Initiative). I tillegg har VB den fordelen at man kunne feilsøke koden uten ekstra tillatelser i Windows på skole-pc-ene til Vestfold Fylkeskommune. Dessuten er det enkelt bygget, utviklet med intensjon om å være lett å lære, men på bekostning av mer avanserte muligheter.

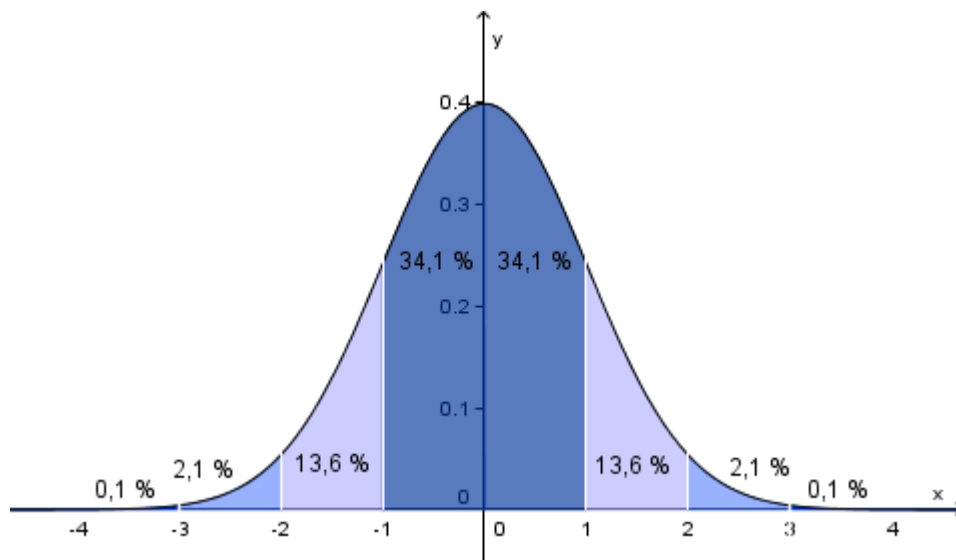
Statistikk - Normalfordeling og standardavvik

Normalfordeling er en modell som beskriver en typisk fordeling av data i et stort datasett. Modellen er gitt ved en eksponentialfunksjon:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

der σ er standardavviket, og μ er gjennomsnittet i datasettet (Aanesen og Kristensen 2017). Figur 4 viser kurven til normalfordelingsuttrykket. Standardavviket forteller noe om hvor spredt målingene er. Et standardavvik S i et datasett gir oss avstanden fra gjennomsnittet til punktet som 68% av målingene faller innenfor. 95% av målingene faller innenfor $2S$ (Vedeld og Venheim 2008). Formelen for standardavvik er gitt ved:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$



Figur 4: Normalfordelingskurve med standardavvik.

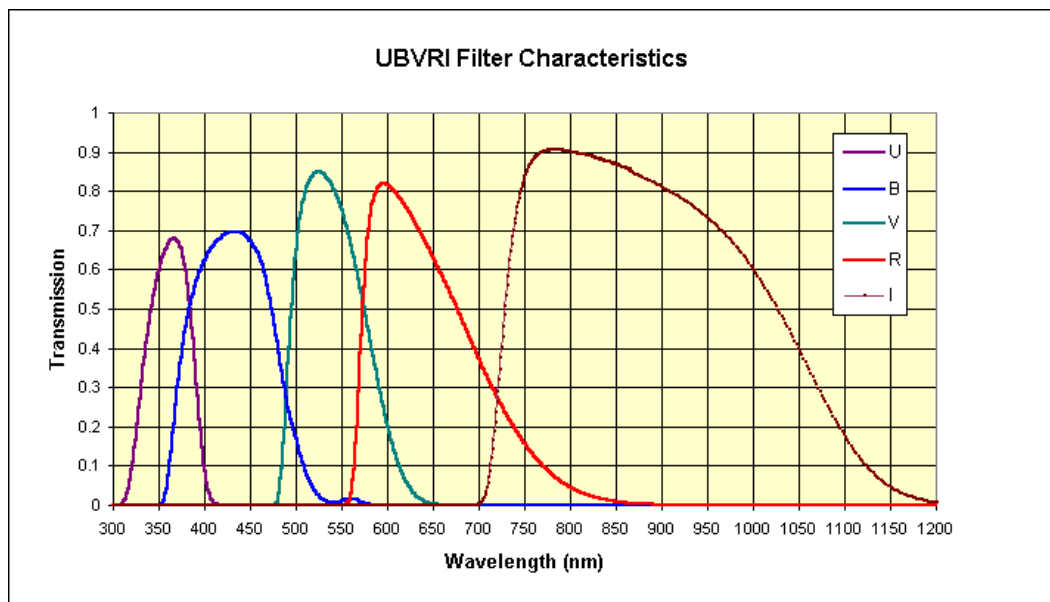
Når man analyserer en bildeserie fra et teleskop vil variable stjerner og stjerner med en planetpassasje få et høyt standardavvik, siden lysstyrken varierer sterkt. Med analyseprogrammet MuniWin kan man på den måten skille ut stjerner som burde undersøkes nærmere.



Fotometri

Selv om en del informasjon kan hentes ut fra et bilde av et objekt i verdensrommet, er det viktig å ha kvantitative data for å kunne forstå mer enn bare utseendet til objektet. Ved å måle på fluksen, energien vi mottar i form av elektromagnetisk stråling, fra en gjenstand kan det for eksempel bli funnet indikasjoner på at en stjerne har en eksoplanet i bane rundt seg, eller om en stjerne er variabel. Måling av fluksen fra himmelske objekter over store bølgelengdebånd kalles fotometri. Dersom det også blir målt på mindre intervaller av bølgelengder og spektralfordelingen til strålingen heter det spektrofotometri (Romanishin 2006).

Fotometriske observasjonsresultater av samme objekter fra forskjellige observatører vil alltid være noe forskjellige, på grunn av feilkilder som forskjellige CCD-brikker, ulik airmass¹, eller forskjellige teleskop. Det har derfor vært viktig for astronomisk fotometri som vitenskap å utvikle standardsystemer som målingene kan kalibreres mot. Et standard fotometrisk system er en liste med standardmagnituder og farger målt ved forskjellige passbånd for et sett med stjerner som er fordelt over hele himmelen. Det mest kjente og brukte fotometriske standardsystemet er UBVRI-systemet som ble utviklet av Johnson og Cousins. Passbåndene for UBVRI-systemet kan sees i figur 5 (Bessel 2005)(Romanishin 2006).



Figur 5: Passbåndene i UBVRI-systemet.

For å sample lyset fra himmelobjekter innenfor de definerte passbåndene brukes det optiske filter. Ved vanlige observasjoner brukes ofte flere filter, da endringer innenfor de forskjellige båndene kan fortelle noe om termodynamikken i en stjerne (Qvam 2017). I dette prosjektet var hovedfokus på å finne, og ikke å kartlegge alle detaljene til mulige variable stjerner eller stjerner med eksoplaneter. Derfor ble det bare brukt ett filter, og det som egnet seg best var R-filteret. En av de viktigste årsakene til dette valget var at korte bølgelengder ikke vil bli plukket opp, noe som gir mindre bakgrunnsstøy fra himmelen. Dersom V-filteret hadde blitt brukt ville himmelen på bildene blitt mye lysere, på grunn av Rayleigh-spredning. I tillegg hadde V-filteret på filterhjulet som ble brukt under observasjonene knekt, så det var ikke en mulighet å bruke det (Qvam 2017).

¹ Mengden atmosfære mellom teleskop og stjerne.



S/N-ratio

Signal-til-støy-forholdet, eller SNR (signal-to-noise-ratio) er et uttrykk som forteller om forholdet mellom signalet man måler, og bakgrunnsstøyen. Den blir oftest oppgitt i desibel og da kan man finne den ved å bruke en formel:

$$\frac{S}{N} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{V_s}{V_n}\right),$$

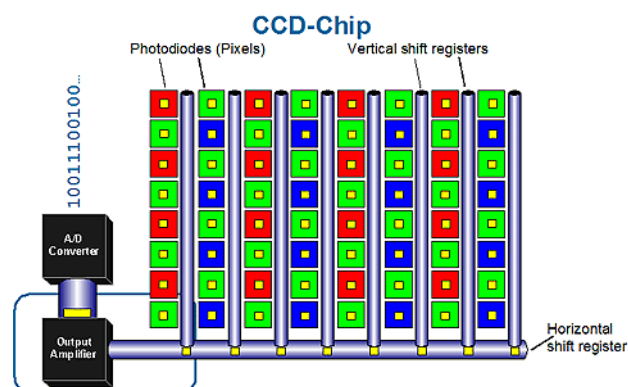
der V_s er signalstyrken som kommer inn, målt i volt, og V_n er støynivået i volt. Det er ønskelig at SNR er så stor som mulig, og en måte å gjøre dette på er å kjøle ned teleskopet til flere minusgrader, noe som minsker støyet fra instrumentet (Rouse 2016). Ifølge Nasjonal Digital Læringsarena (2011) kan man bruke denne tabellen for å si noe om signal-til-støy-forholdet.

S/N	V_s/V_n	Støy	Bildekvalitet
≥ 46 dB	≥ 200	Ikke synlig	God
37 dB	71	Synlig, ikke forstyrrende	Brukbar
30 dB	32	Synlig, forstyrrende	Dårlig
≤ 30 dB	≤ 32	Dominerende	Ubrukelig

Tabell 1: Signal-til-støyforhold.

CCD-brikke

En *charged-coupled device* (CCD), eller et ladningskoblet element, er en brikke som kan brukes til å ta bilder ved omgjøre lys til elektriske ladninger. CCD-brikken er en integrert krets som inneholder et rutenett av ørsmå fotodioder, altså dioder som kan ta til seg energi i form av lys. Den er laget av p-dopet silisium, noe som gir den frie positive ladningsbærere. Når det eksponeres for lys vil energien fra fotonene føre til at elektronene eksiteres til ledningsbåndet i denne halvlederen, gitt at fotonenergien er høyere enn energigapet i materialet. Dette kalles fotoelektrisk effekt. Den samlede ladningen i hver av fotodiodene er tilnærmet proporsjonal med lysintensiteten. Denne ladningen blir så avlest og verdiene blir digitalisert og lagret i en minnebrikke. Etter dette digitale bildet er lagret slettes ladningen i hver fotodiode, og det er klart for et nytt bilde. I fargekamera er hver diode delt opp i fire sensorer, der én registrerer rødt lys, én for blått lys og to registrerer grønt lys (Callin, et. al. 2007).



Figur 6: CCD-brikke.

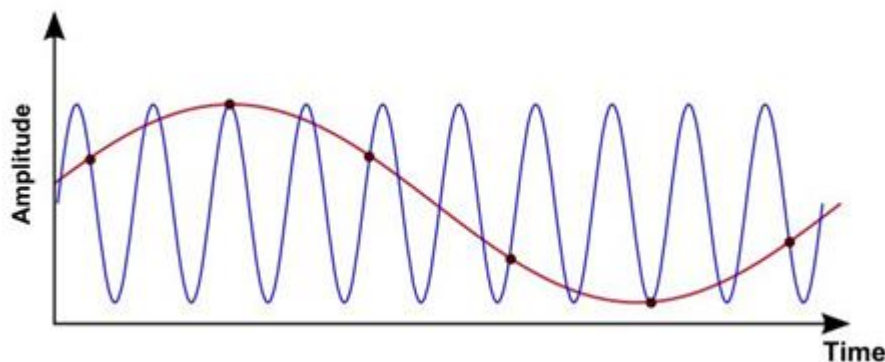


Signalbehandling

Et signal er definert som en fysisk størrelse som varierer med en eller flere uavhengige variabler, som tid eller rom. Signaler inneholder ofte mye informasjon, og det er derfor av interesse å kunne trekke ut enkelte deler av denne informasjonen. De fleste signaler som forekommer i naturen, som lyd, lys eller stjernepulsasjoner, er analoge signaler, også kalt kontinuerlige signaler. For å kunne analysere informasjonen fra disse signalene på en mest mulig nøyaktig og fleksibel måte er det ofte av interesse å gjøre dem om til tids-diskrete signaler med diskrete verdier, altså digitale signaler (Proakis og Manolakis 1989).

Omdannelsen fra analog til digital gjøres gjennom en prosess som kalles sampling. Denne prosessen går ut på å ta prøver, "samples", av det kontinuerlige signalet i diskrete tidspunkt. Hvis funksjonen $x_a(t)$ er det analoge inn-signalet i en sampler, vil det tids-diskrete ut-signalet være funksjonen $x_a(nT) = x(n)$ der T er samplingsintervallet i sekunder. Samplingsraten i hertz, eller samplinger per sekund, er gitt ved $F_s = \frac{1}{T}$ dersom samplingsintervallet er konstant (Proakis og Manolakis 1989).

Dersom samplingen av et signal blir gjort med en lav samplingsrate i forhold til signalets frekvens, vil det oppstå et fenomen som heter aliasing. Resultatet av aliasing vil i praksis være at forskjellige signaler blir "aliaser" av hverandre, noe som gjør det umulig å skille de samplede utgavene av ulike analoge signaler fra hverandre. For å unngå aliasing burde analoge signaler samples med en samplingsrate som er høyere enn Nyquist-frekvensen til signalet. Nyquist-frekvensen til et signal er gitt ved $F_N = 2 \cdot F_{max}$, der F_{max} er maksimalfrekvensen til signalet. Halvparten av samplingsfrekvensen kalles også for foldingsfrekvens. (Proakis og Manolakis 1989). Figur 7 viser eksempel på aliasing ved sampling av en sinuskurve. Dersom den blå kurven samples med intervallet gitt av prikkene, blir samplingsfrekvensen for lav ($F_s \ll 2 \cdot F_{max}$). Ved forsøk på gjenskaping av dataene vil sinuskurven bli lik den røde, som er et alias av den blå.



Figur 7: Enkelt illustrering av aliasing.

Siden dette prosjektet er en del av forstudiene til PLATO-prosjektet, er målet å kartlegge blant annet eventuelle eksoplaneter. Måten det blir kartlagt på er at det blir tatt bilder av felter på himmelen med en viss hyppighet. Samplingsraten, eller bildehyppigheten for hvert felt vil bli et kompromiss mellom å få samlet flest mulig felt av gangen og å ha en god nok samplingsrate til å unngå aliasing. I følge PLATO-prosjektets utredningsrapport, "Yellow Book", er eksoplaneters transitt-tid på over to timer, og et samplingsintervall på 10-15 minutter vil derfor være tilstrekkelig for å detektere alle typer transitter, samt å kartlegge perioder og transitt-tider (Rauer et al 2013:46). Oppdragsgiveren for dette prosjektet,

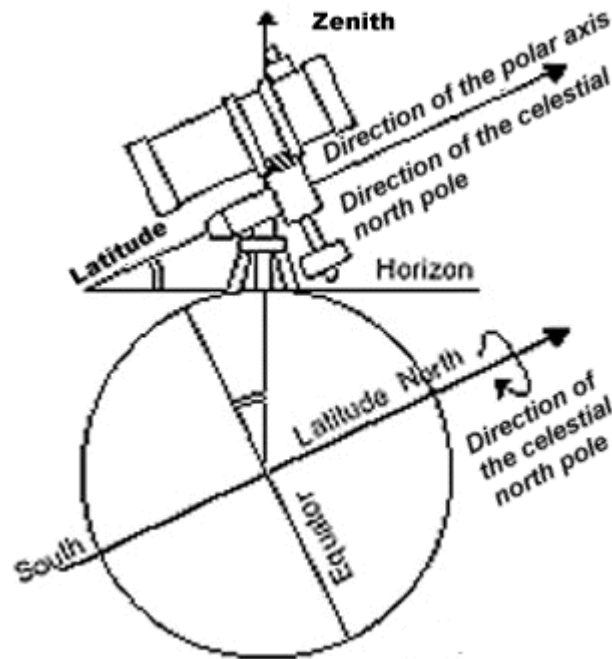


Universitet i Vilnius, har satt en øvre grense på 20 minutters samplingsintervall, og dette er for å få med så mange felt som mulig (Qvam 2017).

Kalibrering

Poloppstilling

For å kunne bruke romkoordinater og observere presist med et teleskop, må teleskopet ha en *ekvatorial* oppstilling, en av aksene må være parallell med jordrotasjonen. Dette kalles poloppstilling.



Figur 8: Illustrering av poloppstilling.

En røff poloppstilling gjøres ved å sette en akse på null grader og flytte hele monteringen til teleskopet peker mot himmelnordpolen, for oss på den nordlige halvkulen blir det polarstjernen, som er omtrent på jordas rotasjonsakse (dek $+89^{\circ}15'51''$). Hvor presis poloppstilling man gjør avhenger av formålet med oppstillingen. For å observere ett punkt vil en røff poloppstilling holde, men om man skal flytte mye rundt kan en litt skjev poloppstilling ha store konsekvenser på presisjonen. For å stille opp mer presist kan man bruke et lite pekerteleskop til å dobbeltsjekke posisjonen, deretter bruke stjernebildene Karlsvogna og Lillebjørn til å bestemme hvilken retning teleskopet skal flyttes $\frac{1}{3}$ grader. (TelescopesPlus 2015).

Kalibreringsbilder

For at et bilde tatt med en CCD-brikke skal kunne brukes til vitenskapelige formål, er det viktig at de avleste lys-verdiene representerer virkeligheten på en best mulig måte. Det er mange feilkilder som spiller inn ved eksponeringen av brikken, som feil i optikken, begrensinger i elektronikken og varmestråling, og det er viktig å få minimert virkningen av disse. Løsningen på noen av disse utfordringene er å ta kalibreringsbilder.

Bias

Siden det ikke finnes en ideell CCD-brikke, vil det nesten alltid være et avvik mellom fotoner inn på pikslene og de avleste verdiene av eksiterte elektroner. Avviket følger en gaussisk fordeling, der standardavviket er gitt ved brikkens avlesningsstøy. Dersom det blir foretatt en svært kort eksponering



og middelverdien av eksiterte elektroner per piksel er mindre enn ett standardavvik, vil dette muliggjøre avlesning av negativt antall eksiterte elektroner. Siden AD-omformere ikke kan telle noe mindre enn 0, vil en negativ avlesning være umulig, og pikseldata vil bli korrupt. For å korrigere for dette blir det til enhver tid satt en liten spenning over alle pikslenes kondensatorer, kalt bias-spenning. Denne gjør at den avleste pikselverdien uavhengig av eksponeringstid blir stor nok til at avlesningsstøyen ikke vil gi negative verdier (Littlefair).

For å korrigere for de “ekstra” verdiene hvert bilde får på grunn av bias-spenningen blir det tatt bilder med null eksponeringstid. Disse bildene vil bare inneholde avlesningen av bias-spenningen over kondensatorene pluss eventuell avlesningsstøy. Ved å ta gjennomsnittet av flere bias-bilder, et såkalt master bias, vil det være mulig å trekke de ekstra bias-verdiene fra hver piksel i bildene som skal analyseres, slik at denne feilkilden minimeres (Littlefair).

Darks

I en CCD-brikke er det ikke bare fotoner med bølgelengder innen synlig lys som vil eksitere elektroner, det vil også forekomme termisk eksitasjon, også kalt mørkespenning, som følge av temperaturen i brikken. Denne feilkilden kan minskes ved å kjøle CCD-brikken ned til svært lave temperaturer, men dette vil ikke være nok i seg selv. Ved å ta bilder med lukkeren igjen vil det naturligvis ikke slippes inn fotoner, så kun bias-spenning og mørkespenning vil bli avlest. Disse bildene kalles darks, og siden mørkespenning er en funksjon av blant annet tid, er det lurt at darks tas med samme eksponeringstid som bildene som skal analyseres. I likhet med bias-bilder tas det helst flere darks. Disse korrigeres med master bias-bildet, slik at de bare inneholder verdiene for mørkespenning, og så lages det et master dark-bilde av medianen av darks-bildene. Medianen brukes for å korrigere for eventuell kosmisk stråling som også kan forårsake eksitasjon av elektroner med lukkeren igjen (Littlefair).

Flats

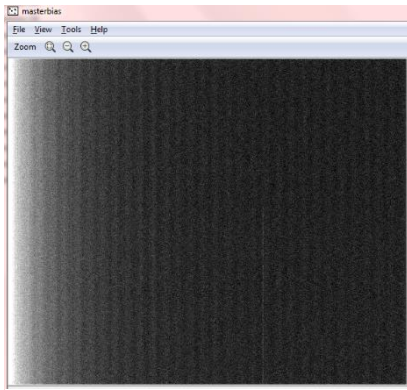
Flats er den siste typen kalibreringsbilder, og disse brukes for å korrigere for en rekke feilkilder i optikken og pikslene, som vignettering, støy i teleskopet, eller variansen mellom antall eksiterte elektroner i pikslene på grunn av ulik pikselstørrelse. Det er særdeles viktig å korrigere bildene som skal analyseres for disse feilene, slik at samme stjerne ikke får forskjellige verdier avhengig av plassering på bildet. Måten flats-bilder blir tatt på er ved å ta en kort eksponering av en helt jevnt belyst flate. Dette kan enten være himmelen ved skumring eller et flat field-panel som monteres direkte på teleskopet. Flats-bildene korrigeres ofte kun for bias, siden mørkespenningen vil være ganske lav ved kort eksponeringstid (Littlefair).

Når et bilde blir korrigert for flats utføres det noen matematiske operasjoner per piksel. Først blir det funnet en faktor for tapt lys på grunn av feilkildene i en gitt piksel:

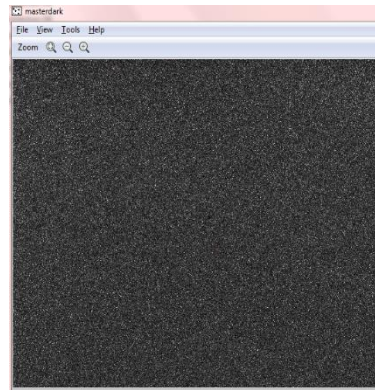
$$a(i, j) = \frac{F(i, j)}{F}$$

der $F(i, j)$ er avlest verdi for piksel (i, j) og F er middelfluks for den jevnt belyste flaten. Ved å dividere pikselverdien i et bilde som er korrigert for bias og darks på faktoren a vil man få det nærmeste man kan komme faktisk fluks inn på det gitte bildet (Littlefair).

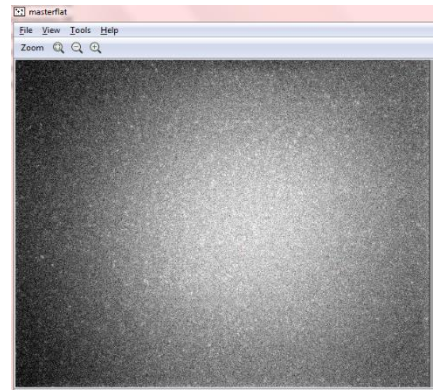




Figur 9: Master bias for SBIG STL-1301E, tatt 15.01.2017.



Figur 10: Master darks korrigert med master bias (figur 9), SBIG STL-1301E, , tatt 15.01.2017.



Figur 11: Master flat for SBIG STL-1301E, korrigert med figur 9 og 10. Tatt 15.01.17

Utstyr

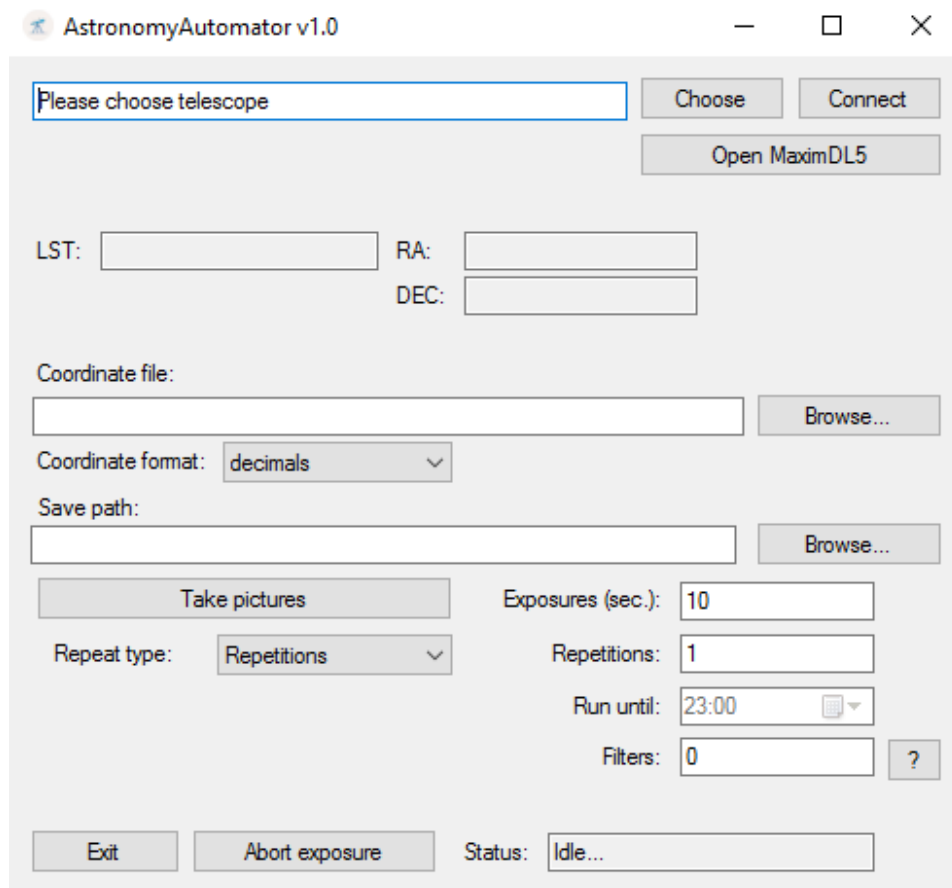
Utstyr som ble brukt til dette prosjektet:

- Datamaskin
- Nødvendig programvare
 - ASCOM-drivere
 - AstronomyAutomator
 - MaxIm DL 5
 - MuniWin
 - Visual Studio Community 2015
- Teleskop og kamera:
 - SBIG STL-1301E kamera
 - Teleskop
 - Stativ



Metode

Det ble utviklet et program som automatiserer styringen av teleskop og kamera for å gjøre samplingen av feltene raskest mulig. Programmet, kalt AstronomyAutomator (AA), ble utviklet i Visual Basic, og gir mulighet for å legge inn ønskede koordinater i en tekstfil, samt eksponeringstider, filter og hvor mange serier som skal tas (repetisjoner) i selve programmet. Kamerakontrollen blir gjort av MaxIm DL 5, men også dette blir automatisert gjennom AA. Kildekoden og .exe-filen til AA er tilgjengelig for nedlasting her: <https://github.com/akberg/AstronomyAutomator>



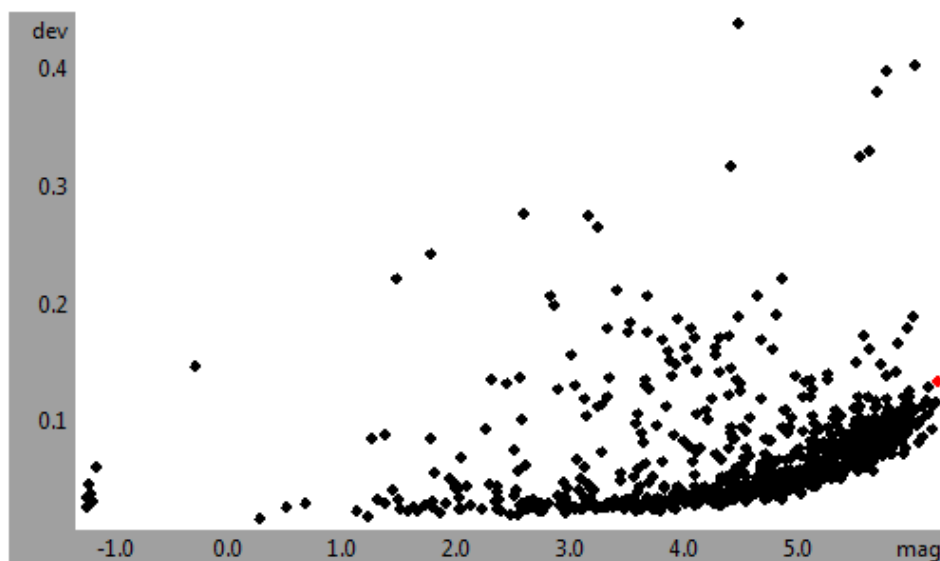
Figur 12: Brukergrensesnittet til det ferdige programmet, AstronomyAutomator v1.

Observasjonene ble gjennomført ved å først poloppstille teleskopet, og så å synkronisere det mot en kjent stjerne. Til dette ble typisk stjernen Deneb (Alpha Cygni) brukt, på grunn av sin høye luminositet. Deretter ble teleskopet videre synkronisert mot en lyssterk, kjent stjerne svært nær det første feltet i serien, som i dette prosjektets tilfelle var HIP 14417. Etter den innledende kalibreringen ble koordinatene lagt inn i en tekstfil, og AstronomyAutomator brukt for å sample feltene sammenhengende. For hver repetisjon ble det tatt bilder med fire eksponeringstider tre ganger per felt, slik at det totalt ble tatt tolv bilder per objekt per repetisjon. Eksponeringene var 2, 6, 12 og 24 sekunder. Under alle observasjonene ble det brukt et R-filter fra UBVRi-systemet.

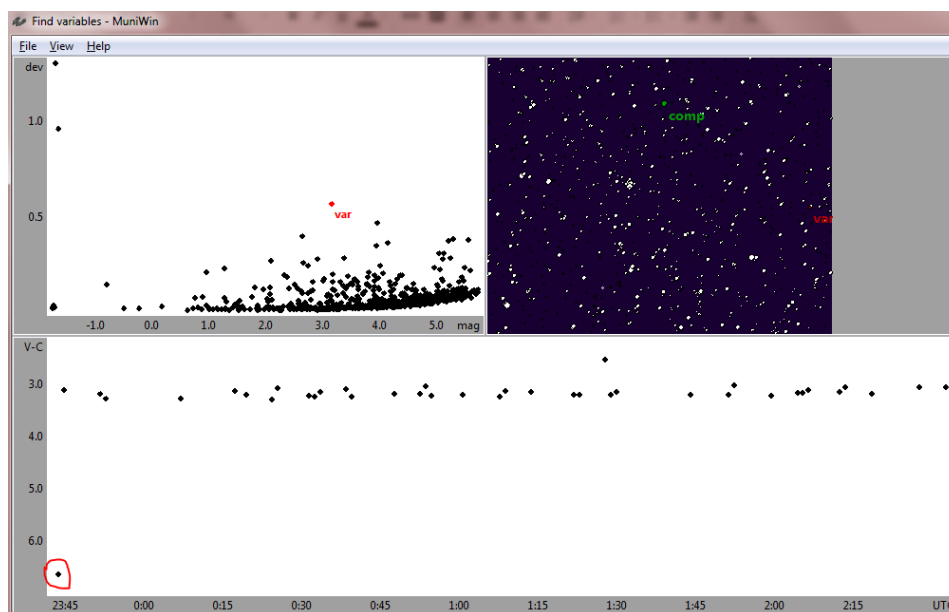
Da observasjonsprosessen var ferdig, ble alle bilder med samme eksponeringstid fra samme serie lastet inn i programmet MuniWin. Her ble verktøyet "Find variables" brukt for å få plottet et diagram med stjerners standardavvik som funksjon av magnituden, se figur 13. For å få mest plausible resultater ble sammenlikningsstjernen satt til å være en relativt lyssterk, kjent, ikke-variabel stjerne. Deretter ble tidsseriene til stjernene analysert. Siden stjerner med varierende lysstyrke vil gi et stort standardavvik,



blir stjernene med stort standardavvik analysert først. Dersom en stjerne har betraktelig større standardavvik enn resten, men bare ett bilde som avviker fra en ellers jevn lyskurve, blir dette bildet gjerne fjernet fra serien. Datapunktet med rød sirkel rundt på figur 14 er et vanlig eksempel på et bilde som fjernes.



Figur 13: Typisk plott for standardavvik (dev) og magnitude (mag) fra MuniWin.



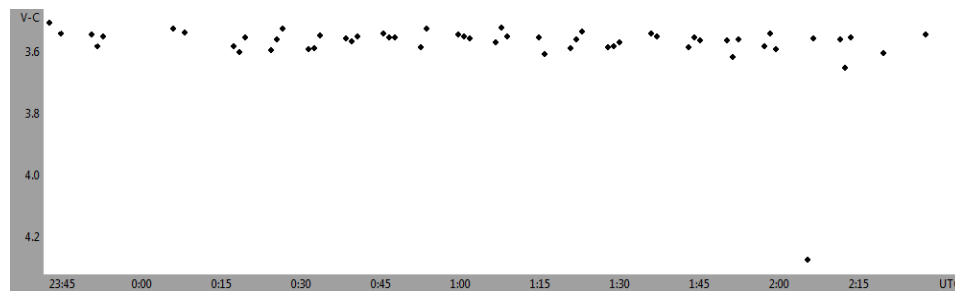
Figur 14: Eksempel på "falskt punkt", som fjernes som statistisk feil.

Resultater

De to første seriene med observasjoner ble foretatt på kveldene på 15. og 16. januar 2017. Her ble det først og fremst målt på faktorene presisjon og samplingsrate, for å se hvor godt automatiseringen av observasjonsprosessen fungerte. Testingen 15. januar ble gjort med to svært nærliggende felter. Testen varte i omtrent tre timer sammenhengende, fra 00.40 til 03.30, med noen svært korte avbrudd for restarting eller feilsøking av AstronomyAutomator. Ved å observere to felt med eksponeringer som nevnt i metoden resulterte det i en tid på syv minutter per repetisjon, som vist i figur 15. Om det blir



tatt utgangspunkt i bare én eksponeringstid på ett objekt, blir det en samplingsfrekvens på $F_s = \frac{1}{7 \cdot 60 \text{ s}} = 2.38 \text{ mHz}$.



Figur 15: Tidsserie til en stjerne fra 15/01-observasjonen.

Presisjonen til måleserien blir målt i hvor mange grader en stjerne forflytter seg i bildet i løpet av hele serien. For serien fra 15. januar flyttet en gitt stjerne seg fra pikselen (485,399) på det første bildet med 24 sekunders eksponering til (402,439) på det siste bildet med samme eksponering i serien. Forflytning blir altså på 83 piksler i x-retningen, og 40 piksler i y-retningen, eller 92 piksler totalt. Det tilsvarer at cirka 6,5% av feltet i x-retning og 3,9% av feltet i y-retning, eller totalt $\sqrt{(6.5\%)^2 + (3.9\%)^2} = 7.6\%$ av feltet forsvinner ut av bildet i løpet av tre timers observasjon. For å få resultatet i grader brukes tall fra Starizona Field of View-kalkulator (https://starizona.com/acb/ccd/calc_pixel.aspx), som gir at hver piksel på kameraet tilsvarer 4,28 buesekunder med oppsettet som har blitt brukt. Multiplisert med de 92 pikslene total forflytning gir det at feltet har blitt forflyttet med 0.1 grader.

Date and time (UTC)	Exposure	Filter
2017-01-16 18:23:10	24.000	R
2017-01-16 18:24:13	24.000	R
2017-01-16 18:25:16	24.000	R
2017-01-16 18:44:15	24.000	R
2017-01-16 18:45:17	24.000	R
2017-01-16 18:46:21	24.000	R

Tabell 2: Samplingstidspunkter fra serien 16.01.2017.

I måleserien fra 16. januar ble det observert på seks felter. På grunn av skyer ble serien avsluttet tidlig, men to sammenhengende repetisjoner ble det tid til. Syklustiden med seks felter ble 21 minutter, og med tre bilder av samme eksponering på denne tiden gir det en samplingsfrekvens på $F_s = \frac{1}{21 \cdot 60 \text{ s}} = 0.79 \text{ mHz}$. Måling av presisjonen gir at en vilkårlig stjerne flyttet seg 18.6 piksler i løpet av serien, noe som tilsvarer $2.2 \cdot 10^{-2}$ grader. Det var ikke mulig å få noen tidsserie på resultatene på grunn av mye skyer på bildene, men tabell 2 viser samplingstidspunktene for det første feltet i serien.



Drøfting

Resultater og feilkilder

Allerede i utviklingen av prosjektet ble det støtt på en rekke problemer, som fikk innvirkning på resultatene. På den første testen av programmet utenfor simulator ble det observert at når teleskopet skulle bevege seg mellom to koordinater med stor avstand, oppsto det sluring i motorene. Denne sluringen oppstod kun når monteringen beveget seg med høy fart. Siden det var ukjent hvordan monteringen til teleskopet regnet seg fram til hvor mye den hadde beveget seg, var det en viss bekymring for at den ikke ville forflytte seg til riktig koordinat på grunn av dette. Via håndkontrollen til monteringen var det muligheter for å stille på bevegelseshastigheten til motorene, men det ble ikke funnet noen støtte for det i biblioteket til ASCOM. Innstillingene fra håndkontrollen spilte heller ikke inn på koordinater som ble tilsendt monteringen fra AstronomyAutomator, noe som førte til at monteringen alltid prøvde å bevege seg med full fart. Derfor ble testingen 15. januar gjennomført med bare to felt som ligger like ved siden av hverandre. Med så kort avstand rakk ikke motorene å akselerere opp til toppfarten, og dermed ble sluringen unngått. Observasjonsserien dagen etter ble likevel gjennomført med seks felt, der noen av avstandene var betraktelig lenger enn mellom de to som ble observert 15. januar. Det oppstod en del sluring fra motorene, men bildene som ble tatt viste at monteringen klarte å finne tilbake til det samme feltet etter en full repetisjon. Hvorvidt presisjonen ble påvirket i stor grad av denne feilkilden vet vi ikke, ettersom serien var for kort til å kunne trekke noen ordentlige konklusjoner.

Den andre utfordringen som viste seg da AstronomyAutomator ble testet utenfor simulator var at monteringen av og til rapporterte tilbake feil koordinater, selv om den pekte på riktige. Dette skapte problem for koden som ble brukt for å vente med å eksponere CCD-en til teleskopet var ferdig med å flytte på seg. Programmet baserte seg nemlig på å sammenligne koordinaten som ble sendt fra programmet med den rapporterte koordinaten fra monteringen. Dermed frøs AA hver gang monteringen rapporterte feil koordinat, noe som blant annet førte til at vi kom senere i gang med observeringen 16. januar. Måten dette ble løst på var ved å hardkode en ventetid på ti sekunder for hver bevegelse av teleskopet. Årsaken til at denne varigheten ble valgt var fordi det aldri hadde blitt målt en bevegelse som tok mer enn ti sekunder, så det ble ansett som lang nok tid. Hardkodingen forårsaker en lengre serietid, men også at den vokser lineært med antallet koordinater. For koordinater som ligger nærmere hverandre vil bevegelsesventetiden kunne bli opptil fem ganger så stor, noe som fører til lavere samplingsfrekvens.

Å holde syklustiden kort nok var også en utfordring. Resultatene viste at syklustiden med seks objekter oversteg PLATO-prosjektets krav med seks minutter, og maksgrensen fra Universitetet i Vilnius med ett minutt. Samplingsfrekvensen var derfor relativt lav. Den største medvirkende årsaken til dette er at det tas 12 bilder per koordinat, som nevnt i metoden, og at det tar omtrent fem sekunder å laste ned hvert av disse. Naturligvis er det mulig å kutte ned på antall eksponeringer, og særlig burde dette gjøres med to-sekunders-eksponeringen om mulig. Denne brukes kun for å ta bilder av sterke stjerner som går i metning med en lenger eksponering enn dette. Når en stjerne metter CCD-en vil det ikke lenger være mulig å bruke tallene fra fotometri på denne stjernen, men hvis ingen stjerner i feltet metter brikken på mindre enn seks sekunder kan den korte eksponeringen fjernes for å spare tid. Programmet tillater spesielle eksponeringer for enkeltkoordinater, hvis bare noen av punktene krever en så kort eksponering.

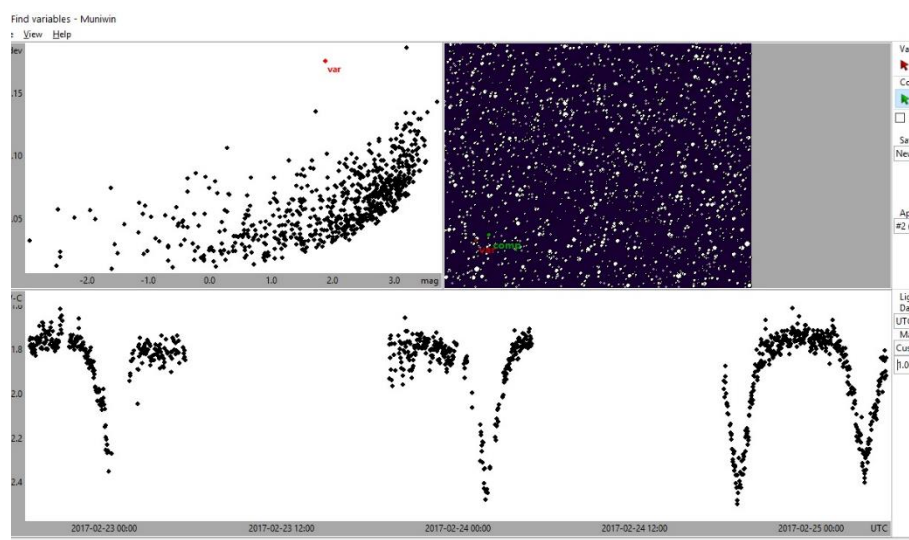
En annen måte å korte ned syklustiden på er å redusere antall koordinater. Serien med to koordinater hadde en syklustid som var langt innenfor alle krav, noe som også ga en svært god samplingsfrekvens. Den åpenbare ulempen er selvfølgelig at det må brukes mange flere kvelder for å observere på samme



mengde koordinater, men den store fordel er at det blir mindre aliasing. Dette gjør at det for eksempel vil være lettere å identifisere en rask eksoplanetpassasje, som vil vare i rundt to timer, på grunn av flere samplinger i løpet av den første delen av formørkelsen (trinn 2 på figur 2). Med samplingsraten 0.79 mHz, som utregnet i resultatene, er det ikke sikkert at denne delen i det hele tatt blir plukket opp, noe som vil gjøre det vanskeligere å konstatere at det er en passasje.

Den største praktiske utfordringen med gjennomføring av observering er været. Netter med optimale forhold som lite månelys, lav nok luftfuktighet og null skyer forekommer ikke så ofte, så det er derfor nødvendig å få samlet inn mest mulig data ved disse anledningene. Dette kan bli brukt som et sterkt argument for å observere på så mange felt som mulig per serie, og heller la dette gå litt på bekostning av samplingsfrekvens og eventuelt presisjon. Egentlig er det mer et spørsmål om ressurser, altså hvor mange teleskoper som er tilgjengelige for slik observering av store felt på netter med gode forhold. I perioder av vinteren 2016/17 hadde Universitet i Vilnius, som har ansvar for mange av feltene på den nordlige halvkule, problemer med alle sine oppsett for observering, slik at kun observatoriet på Nykirke sto for sampling. Dermed var det ønskelig å ta med flest mulig felt per serie. Ulempen med dette er at samplingsfrekvensen blir så dårlig at de samme feltene må observeres mange kvelder for å kunne få gode data. Når det blir flere teleskoper tilgjengelig vil dette gi muligheter for at hvert teleskop kan fokusere mer på færre koordinater, og dermed bruke færre kvelder på å sample disse feltene, siden samplingsfrekvensen er høyere.

En annen utfordring med været er at måleseriene med optimale forhold ikke nødvendigvis rekker å vare en hel natt, for eksempel på grunn av skyer. Ulempen med dette er at korte økter gir mye tap av informasjon, som vist i figur 16. Dette er tidsserien til en dobbeltstjerneformørkelse tatt nettene 22.-24. februar. Ut i fra de to første nettene i serien, der observasjonsperiodene var på omtrent seks timer, er det umulig å si om formørkelsen forekommer hver 24. time eller hver åttende time. Først den siste kvelden kan det bli konstatert at tiden mellom formørkelsene er på litt over ni timer, siden observasjonsperioden er lang nok. Korte observasjonsøkter vil også føre til tap av informasjon ved eksoplanetpassasjer, så det er derfor nødvendig med observering av de samme feltene over flere kvelder.



Figur 16: Tidsserie for dobbeltstjerneformørkelse 22-24 januar 2017.

Presisjonen er en stor faktor i observeringsprosessen som avgjør om automatiseringen er lønnsom. Dersom teleskopet må resynkroniseres et par ganger i timen fordi feltet flytter seg for mye ut av bildet krever det mange avbrudd, som igjen fører til en forverret samplingsfrekvens. Resultatene viste at dette ikke var noen særlig grunn til bekymring, i hvert fall ikke for observeringen 15. januar. Serien fra



dagen etter viste en større forflytning av feltet per tid enn hva 15.-observeringen gjorde. Måleperioden var egentlig litt for kort til å trekke noen ordentlige konklusjoner om presisjonen fra serien 16. januar, men dersom driftingen til feltet er lineær, var presisjonen omtrent halvparten så god per tidsenhet for denne serien som den var for serien med bare to objekter fra 15. januar. Dette kan være et argument for å holde seg til færre felt per serie, men det er som nevnt ikke nok data til å kunne konkludere.

Den største medvirkende årsaken til at feltet beveget seg ut av bildet som det gjorde, uavhengig av dag, var mest sannsynlig at poloppstillingen ikke var god nok. Dette kommer som et resultat av at det ble brukt et teleskop som står på et flyttbart stativ. Ulempene med et slikt stativ er at det er vanskelig å finjustere poloppstillingen på samme måte som det gjøres på fastmonterte teleskoper. Årsaker til dette er blant annet at teleskopet oftere tas opp og ned på det flyttbare stativet, og at man kan være uheldig og komme borti stativet, slik at det flytter på seg eller endrer høyden på ett av beina marginalt. Alt dette gjør poloppstillingen dårligere, så det blir vanskelig å noensinne få perfeksjonert denne med et flyttbart stativ. Noe annet som også kan ha påvirket presisjonen i samspill med dårlig poloppstilling er at feltene som ble samlet lå nær Polaris. Siden teleskopmonteringen som ble brukt er en ekvatorialmontering, vil den få problemer med å peke i det området, fordi den ikke kan bevege polaraksen. Dersom feltene blir spredt med litt avstand rundt Polaris vil dette i prinsippet føre til mer pekefeil (Qvam 2017).

For å oppnå den beste mulige balansen mellom samplingsfrekvens og antall felt, vil sannsynligvis en mellomting mellom to og seks felt være det optimale. Skaleringen av syklustid er lineær med antall felter, med en omtrentlig tid per felt på tre og et halvt minutt. Derfor vil fire felter muligens være den beste løsningen for å få denne balansen. Da vil det med dagens oppsett være en syklustid på 14 minutter og en samplingsfrekvens på 1.19 mHz, noe som er innenfor kravene fra både PLATO og Universitet i Vilnius. I tillegg vil det være nok felt i serien til at tiden for å komme igjennom alle feltene sannsynligvis ikke tar for mange kvelder, noe som er lønnsomt med tanke på utfordringer med været. Når det kommer til presisjonen på en større serie enn to felt er det indikasjoner på at den blir forverret noe, men ikke så mye at det ikke vil være lønnsomt å la programmet kjøre i noen timer, gitt at poloppstillingen er god.

Analyse av måledataene er også en utfordring. MuniWin bruker standardavvik i lysstyrken til å finne stjerner som burde sjekkes, men mange av stjernene får av forskjellige grunner "falske punkter", enkeltmålinger med plutselig lav lysstyrke som vi ikke kan forklare. Når vi går gjennom målingene blir disse punktene fort fjernet som statistiske feil, selv om det alltid er en sjanse for at det er riktige målinger som høyere samplingsfrekvens ville avslørt mer av. Denne feilen sikrer man seg litt mot når man tar tre bilder per repetisjon, for da vet man at bare ett utslag av tre bilder mest sannsynlig er en feil. Dette illustreres i figur 14, der man ser at et av bildene avviker veldig fra de andre nærliggende punktene. Dette kunne vært et lignende tilfelle som dobbeltstjerneformørkelsen på figur 1, men med samplingsfrekvensen vi har, burde vi ha sett mer av kurven, de nærliggende punktene viser ingen nedgang eller oppgang, eller flere tilfeller av formørkelsen, punktet avviker fra en eller rett linje. Vi antar derfor at dette er en feil, og fjerner punktet.

Vi unngår nå feil så godt det lar seg gjøre, men det er fortsatt en utfordring at analysearbeidet blir lite effektivt. Når en så stor andel av stjernene har slike feilmålinger blir grafen (figur 13) misvisende og lite leselig, og i stedet for å bare se på de stjernene som faller utenfor den egentlig veldig tydelige normalkurven, må man gå gjennom hver stjerne og fjerne feilmålingene. Dette går som sagt ut over effektiviteten i analysearbeidet, men siden slike feil kan komme av det meste, en satellitt, en sky, eller at stjernen er i kanten av bildet, er dette en feilkilde det er lite å gjøre med.



Selv om vi er fornøyd med resultatene, er det noen ting som kan gjøres i etterkant for å maksimere samplingsfrekvensen, og sikre programmet for feil, slik at man faktisk kan la programmet kjøre uten tilsyn. Endringene innebærer å:

- Fjerne den hardkodede ventetiden mens teleskopet beveger seg. På den måten vil flyttetiden kun avhenge av avstanden mellom koordinatene som skal observeres.
- Gjenkjenne når Maxim DL kobler ut kameraet, noe som skjer vilkårlig og som har vært et hinder for automatiseringen, og tvinge fram en omstart av den aktuelle eksponeringen.
- Legge til en alarm ved uventet stopp, som kan sendes over nett til en bærbar enhet. Dette gjør det mulig å forlate teleskopet mens det kjører.
- Logge alt som skjer under kjøretid til en tekstfil. Dette vil gjøre det lettere å feilsøke om noe likevel skulle skje.

Konklusjon

I dette prosjektet har det blitt utviklet et program for å automatisere en del av bakkeobserveringen til PLATO-prosjektet. Målene var å få god presisjon og høy samplingsfrekvens for å unngå aliasing. Resultatene viser at prosjektet oppfylte kravene. Ennå er det ting som kan forbedres på programvaren, men det opprettholder nå høy samplingsfrekvens ved observering av flere felt over lang tid, samtidig som presisjonen er god. For å gjøre observeringen så effektiv som mulig, er det i drøftingen satt en grense på fire koordinater i en syklus, da dette gir den beste balansen mellom samplingsfrekvens og mengden felt som blir observert. Presisjonen på en slik serie vil også være god, gitt at poloppstillingen er god nok. Syklustiden vil da være på 14 minutter, noe som er innenfor kravene fra både ESA og Universitetet i Vilnius.



Kilder

Litteraturliste

- 5 ways to find planets <https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/> [09.03.17]
- Aanesen, S. og Kristensen, O. (2017) *Normalfordelingen*. <http://ndla.no/nb/node/118878?fag=98366> [11.03.17]
- Andresen, B. (2005) *Variable stjerner, generelt*. http://www.taf-astro.no/arkiv/artikler/stjerner/varstj/vs_generelt/varstj_gen.htm [12.12.16]
- Bessel, M. S. (2005) *Standard Photometric Systems*.
<http://www.astro.caltech.edu/~george/ay122/Bessel2005ARAA43p293.pdf> [09.03.17]
- Callin, P. et al. (2007) *Ergo Fysikk 1*. Oslo: H. Aschehoug & Co.
- Callin, P. et al. (2012) *Ergo Fysikk 2*. Oslo: H. Aschehoug & Co.
- Cooper, A (1996) *Why I am "the father of Visual Basic"*, Cooper Interaction Design,
https://www.cooper.com/alan/father_of_vb.html [08.03.17]
- ESA (2015) *PLATO mission*, European Space Agency, <http://sci.esa.int/plato/42276-summary/> [12.12.16]
- Howell, E. (2016) *Exoplanets: Worlds beyond our solar system*, space.com
<http://www.space.com/17738-exoplanets.html> [14.12.16]
- Littlefair, S. *PHY217: Observational Techniques for Astronomers*.
<http://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/index.html> [01.12.17]
- Microsoft (2015) *Support Statement for Visual Basic 6.0 on Windows Vista, Windows Server 2008, Windows 7, Windows 8 and Windows 8.1, Windows Server 2012, and Windows 10*.
<https://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/ms788708.aspx> [11.03.17]
- Proakis, J. G. og Manolakis, D. G. (1989) *Introduction to Digital Signal Processing*. New York: Macmillan Publishing Company.
- Rauer, H. et al. (2013) *PLATO Assessment Study Report*. <http://sci.esa.int/plato/53450-plato-yellow-book/#> [01.03.17]
- Richmond, M. (2012) *Celestial Coordinates*.
<http://spiff.rit.edu/classes/phys301/lectures/coords/coords.html> [16.11.16]
- Ringnes, T. (2009) *Variable stjerner*. https://snl.no/variable_stjerner [14.12.16]
- Romanishin, W. (2006) *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*.
http://www.physics.csbsju.edu/370/photometry/manuals/OU.edu_CCD_photometry_wrccd06.pdf [09.03.17]
- Rouse, M. (2016) Signal-to-noise ratio. <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/signal-to-noise-ratio> [5.03.17]
- Sannes, A. M. (2011) *Metoder for å finne exoplaneter*. <http://www.starship.no/pages/metoder.html> [15.03.17]
- TelescopesPlus (2015) *Polar Alignment*. <https://www.telescopesplus.com/blogs/helpful-information/18961348-polar-alignment> [05.03.17]
- The ASCOM Initiative. *About ASCOM*. <http://www.ascom-standards.org/About/Index.htm> [16.11.16]
- The ASCOM Initiative. *Compatible Languages*. <http://ascom-standards.org/About/CompatLang.htm> [11.03.17]
- The Open Source Initiative (2007) *The Open Source Definition*. <https://opensource.org/osd> [16.11.16]
- Universitetet i Vilnius (2017) *About PLATO*.
<http://www.astrospectroscopy.tfai.vu.lt/cms/index.php/plato-texts> [14.03.17]
- Vedeld, K og Venheim R (31.03.2008) *Normalfordeling og Standardavvik*. Matematikk.org,
<https://www.matematikk.org/artikkel.html?tid=68746> [06.03.17]



Bilder

Forsidebilde: Furdal, E. H.

Figur 1: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c7/HR-diag-instability-strip.svg/2000px-HR-diag-instability-strip.svg.png> [14.03.17]

Figur 2: <http://www.starship.no/pages/metoder.html> [14.03.17]

Figur 3: <http://burro.case.edu/Academics/Astr306/Coords/I08-20-celestialsphere.jpg>
[14.03.17]

Figur 4: <http://donyayezan.com/image-ccd-i7.gif> [14.03.17]

Figur 5: <http://www.atscope.com.au/genpics/UBVRIfilters.gif> [14.03.17]

Figur 6: http://blog.dataphysics.com/wp-content/uploads/2015/12/Aliasing_1.jpg [14.03.17]

Figur 7: <http://ndla.no/nb/node/118927?fag=98366> [14.03.17]

Figur 8: <https://www.telescopesplus.com/blogs/helpful-information/18961348-polar-alignment%20%5b> [14.03.17]

Figur 9-17: Skjermdump, Furdal, E. H. og Qvam, J. K.

Tabell 1: <http://ndla.no/nb/node/79213?fag=43> [14.03.17]

Tabell 2: Skjermdump.

