Eine neue Generation vollautomatischer Teleskope mit mittleren Öffnungen

für

Free-Space Laser Communication und Space Situational Awareness

David Rowe, PlaneWave Instruments
Russell Genet, California Polytechnic State University
Ruben Nunez, Argus View LLC

Abstract Eine neue Generation von Teleskopen mit mittleren Öffnungen hat die Schlüsseleigenschaften teurer Großteleskope auf entlegenen Berggipfeln übernommen und in ihr eigenes Design integriert, kombiniert mit günstigen Herstellungskosten durch größere Stückzahlen. Zu diesen Eigenschaften gehören große Gesichtsfelder, leichte Spiegel, kompakte und steife azimutale Montierungen mit Direktantrieb für sehr präzise Positioniergenauigkeit sowie hohe Schwenk- und Nachführgeschwindigkeiten. Das sind genau die Eigenschaften, die für eine hohe Kosteneffizienz bei den Teleskopen nötig sind, die für Free-Space Laser Communication und Space Situational Awareness eingesetzt werden: Maximale Beobachtungszeit bei minimalem Zeitbedarf für das Finden und Anfahren der Beobachtungsziele.

Einführung

Eine neue Generation vollautomatischer Teleskope mit mittleren Öffnungen wird nun in größeren Stückzahlen produziert und zunehmend für Breitband Free-Space Laser Kommunikation (Lasercom) mit einer rasch wachsenden Anzahl von Satelliten genutzt, die einen höheren Datendurchsatz benötigen und über eigene Lasercom Space Terminals verfügen. Diese Teleskope können auch für die Weltraumüberwachung (Space Situational Awareness – SSA) genutzt werden, um die aktuell bekannten Objekte (Resident Space Objects – RSOs) und neue Satelliten zu überwachen.

Bodengestützte Teleskope können grob in zwei Klassen unterteilt werden:

- Eine sehr große Anzahl preiswerter, kleiner Teleskope aus Massenfertigung, die von Celestron, Meade und anderen hergestellt werden. Sie werden vor allem für Hobby und Volksbildung durch Privatpersonen, Amateurastronomen, Schüler und Studenten genutzt, meist mit einem Okular oder einer kleinen Kamera. Diese vielen kleinen Teleskope werden meist in der recht angenehmen Umgebung von privaten Grundstücken oder Schulhöfen betrieben.
- Eine kleine Anzahl teurer Teleskope mit großer Öffnung, die in Einzelfertigung entstehen und von professionellen Astronomen und ihren Studenten für die astronomische Forschung genutzt werden. Diese Teleskope sind in der Regel mit einer ganzen Reihe verschiedener, oft schwerer Instrumente ausgestattet. Diese Forschungsteleskope stehen meist unter unwirtlichen Bedingungen auf abgelegenen Berggipfeln mit dunklem Himmel und hervorragender Luftunruhe ("Seeing").

Seit kurzem gibt es eine neue Klasse von Fernrohren, dank der Alt-Az Initiative — einer ehrenamtlichen Gruppe von Ingenieuren und Astronomen — und einiger kommerzieller Anbieter, die ein Jahrzehnt lang daran gearbeitet haben, die Schlüsseleigenschaften der großen, teuren Einzelanfertigungen abgelegener Sternwarten auch in mittelgroßen Teleskopen zu realisieren. Diese Teleskope werden nun in größeren Stückzahlen hergestellt, sodass die sehr erstrebenswerten Eigenschaften großer Teleskope für eine große Menge an Anwendungen verfügbar sind, inklusive kommerzieller Bodenstationen, die für die Breitband-Laserkommunikation mit Satelliten und die SSA genutzt werden.

Dieses Paper untersucht die Grundlagen des optischen, strukturellen und Steuerungs-Designs von Teleskopen sowie die Schlüsselmerkmale großer Fernrohre, die in diese neue Klasse mittelgroßer Teleskope übernommen wurden. Die technischen Details werden zur besseren Anschaulichkeit am Beispiel eines dieser Teleskope vorgestellt, dem PlaneWave Instruments PW-1000 1.0-m Teleskop. Abschließend beschreibt dieses Paper, wie diese Teleskope zu Arrays und Netzwerken robotischer Observatorien zusammengeschaltet werden können, um sie für Lasercom und SSA zu nutzen.

Optische Designs

Astronomische Linsenteleskope – beginnend mit dem von Galilei 1609 – verwendeten eine einzelne Linse (oder eine Linsengruppe), das Objektiv, als primäres lichtsammelndes Element. Diese Teleskope zeigten deutliche Farbfehler, da die verschiedenen Wellenlängen des Lichts durch das Objektiv unterschiedlich stark gebrochen wurden. Das Spiegelteleskop, das Sir Isaac Newton 1668 vorstellte, bestand aus einem parabolischen Hauptspiegel und einem kleinen, ebenen Sekundärspiegel, der das Bild vorne am Teleskop zum seitlich angebrachten Okular heraus spiegelt. Indem er das Objektiv durch einen Parabolspiegel ersetzte, löste Newton das Problem des Farbfehlers

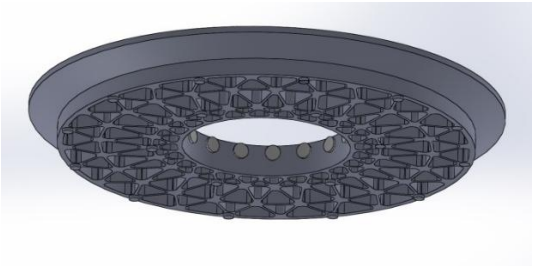
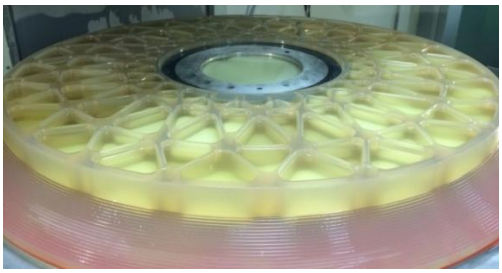
Allerdings war der Einblick am vorderen Ende der Newton-Teleskope unbequem (und sogar gefährlich), als die Teleskope immer größer wurden – ein Problem, das durch ein Design gelöst wurde, das Laurent Cassegrain zugeschrieben wird. Wie bei einem Newton ist auch der Hauptspiegel eines Cassegrains parabolisch. Jedoch ist der Sekundärspiegel kein einfacher kleiner Planspiegel, der das Licht nur zur Seite lenkt, sondern ein kleiner, konvexer hyperbolischer Spiegel, der das Licht durch ein Loch im Hauptspiegel zurück in die Bildebene hinter dem Hauptspiegel lenkt.

Sowohl Newton- als auch Cassegrain-Teleskope leiden abseits der optischen Achse unter einem als *Koma* bekannten Bildfehler. Das 24 Zoll "RC"-Teleskop, das George Ritchey und Henri Chretien 1927 vorstellten, verwendet hyperbolische Primär- und Sekundärspiegel, die (zumindest theoretisch) die Koma beseitigen – allerdings nur bei perfekt justierter Optik und auf einer gebogenen Bildfeldebene. In der Praxis mussten Korrekturlinsen nahe der Bildebene eingebaut werden, um das Bild zu ebnen, da die meisten Kameras eine flache Oberfläche haben. Außerdem war es nicht möglich, die Spiegel permanent perfekt aufeinander auszurichten.

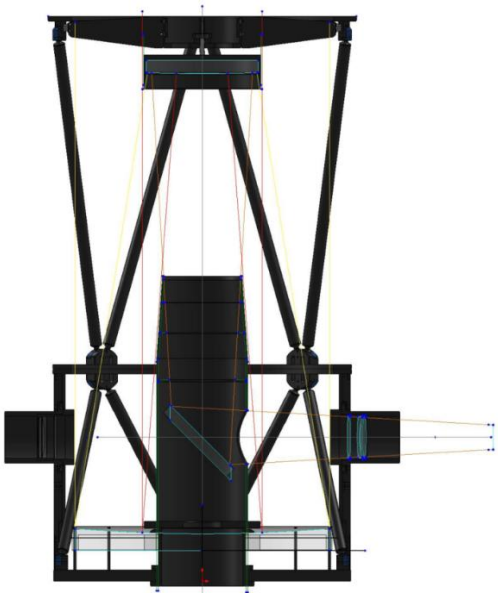
Da Korrekturlinsen für Hochleistungs-Spiegelteleskope ohnehin nötig sind, liefern Corrected Dall-Kirkham (CDK) Teleskope mit elliptischen Primär- und Sekundärspiegel eine gleichwertige oder bessere optische Leistung als korrigierte (bildfeld-geebnete) Ritchey-Chretien (RC) Teleskope. Darüber hinaus hat der optische Aufbau eines CDK drei wichtige Vorteile gegenüber der RC-Konfiguration, aufgrund derer die CDKs zunehmend beliebt sind:

- Der sphärische Sekundärspiegel eines CDKs ist viel einfacher zu kollimieren, da er im Gegensatz zu dem hyperbolischen Fangspiegel eines RCs keine bevorzugte Achse hat; jede Linie, die durch die Mitte einer Kugel verläuft, kann als Achse dienen.
- Der sphärische Sekundärspiegel eines CDKs lässt sich viel einfacher herstellen, da er keine Abweichung von der Kugelgestalt bedingt, die sich beim Spiegelschleifen automatisch ergibt.
- Die sphärischen Sekundärspiegel eines CDKs lassen sich viel einfacher testen, da man sie gegen einen sphärischen konkaven Master testen kann.

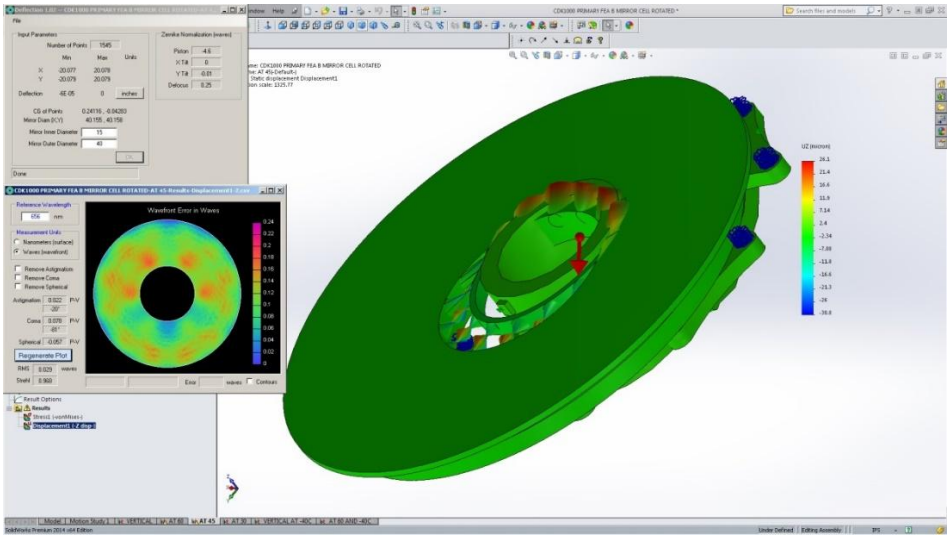
Wenn der Hauptspiegel nicht dieselbe Temperatur hat wie die Umgebung, kann er sich verformen. Durch den Einsatz von Materialien, deren Temperaturausdehnungskoeffizient nahe Null liegt, und indem man leichte, aber steife Spiegel herstellt (Wabenstruktur), kann dieses Problem verringert werden. Es sei angemerkt, dass bodengestützte Teleskope für die Laserkommunikation bei Tag und Nacht eingesetzt werden und daher großen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Daher muss diese Temperaturanpassung beim Design für diese Anwendung berücksichtigt werden.

Links: *Ein Solidworks Modell des leichten Ein-Meter Quarzglas-Hauptspiegels, der im 1.0m-Teleskop von PlaneWave Instruments verbaut ist und in diesem Paper als Beispiel verwendet wird.* ***Rechts:*** *Eine Aufnahme des Spiegels, der auf einer speziell dafür angepassten Maschine von unten geschliffen wird. Moderne Diamantwerkzeuge werden genutzt, um rasch Material abzutragen, bevor der Spiegel geschliffen und poliert wird.*



Das Optical Tube Assembly (OTA), also der Tubus mit eingebauter Optik des Ein-Meter PW 1000 Teleskops zeigt unten den Hauptspiegel (M1), oben den Sekundärspiegel (M2), und den flachen Tertiär-Spiegel (M3), der das Licht zur Seite in den drei-elementigen Korrektor umlenkt. Alle optischen Komponenten bestehen aus Quarzglas. M3 kann gedreht werden, um das Licht in jeden der beiden Nasmyth-Ports zu lenken. Für alle optischen Komponenten werden sorgfältig ausgearbeitete und am Computer simulierte Tragkonstruktionen verwendet, um sicherzustellen, dass die Leistung des Teleskops trotz Änderungen von Temperatur, Zeit und Ausrichtung konstant bleibt. Das CDK-Design verwendet einen dreilinsigen Quarzglas-Korrektor, um eine beugungsbegrenzte Abbildungsleistung über die gesamte 100 mm (1 Grad) große Öffnung zu erzielen, im gesamten Spektralbereich von 375 nm bis 1000 nm.



Die Finite Elemente Analyse (FEA) des leichten Ein-Meter-Hauptspiegels auf seiner 18-Punkt-Stützstruktur. In diesem Beispiel wird der Spiegel bei einer Teleskopneigung von 45° simuliert. Ausführliche Analysen bei der Konstruktion stellen sicher, dass das Design eine hervorragende Leistung bei allen Umgebungsbedingungen und Teleskopausrichtungen liefert.

Strukturelle Designs

Die mechanische Struktur (Montierung) hält Optik und Instrumente an ihrem Platz und ermöglicht es, sie auf Objekte am Himmel zu richten und diese zu verfolgen. Die ersten Teleskope wurden auf azimutale Montierungen (Alt-Az-Montierungen) gesetzt. Schiffskanonen sind ein gutes Beispiel für so eine Montierung, die sich in Azimut (horizontale Bewegung um 360°) und Höhe (Altitude, Bewegung um 90° vom Horizont bis zum Zenit) bewegt. Diese azimutalen Montierungen sind einfach und kompakt, aber um einen Stern zu verfolgen, müssen sich beide Achsen mit ständig wechselnden Geschwindigkeiten bewegen. Außerdem dreht sich das Bildfeld im Lauf der Zeit.

Joseph von Fraunhofer baute 1824 eine Montierung, bei der eine Achse so gekippt war, dass sie parallel zur Erdachse stand. Ein Uhrwerk mit Fliehkraftregler sorgte dafür, dass diese Achse sich exakt entgegengesetzt zur Erdrotation bewegte. Bei dieser sogenannten äquatorialen, parallaktischen oder deutschen Montierung bleiben Objekte somit ohne Bildfelddrehung immer im Zentrum des Bildfelds.

Für mehr als eineinhalb Jahrhunderte verwendeten alle großen Teleskope parallaktische Montierungen. Das 200-Zoll Hale Teleskop auf dem Mount Palomar ist bis heute das größte jemals gebaute Teleskop mit einer parallaktischen Montierung. Sobald zuverlässige computergesteuerte Motoren verfügbar waren, wurden alle späteren, größeren Teleskope azimutal aufgestellt. Dafür gab es zwei Gründe, die in erster Linie finanziell waren:

- Azimutal aufgestellte Teleskope sind viel kompakter als parallaktisch montierte Geräte. Größere Geräte und die damit verbundenen größeren Kuppeln zu ihrem Schutz sind wesentlich teurer.
- Strukturen, die nur vertikale und horizontale Achsen haben – wie azimutale Teleskope – sind einfacher (und damit preiswerter) zu konstruieren und zu bauen als solche, die – wie parallaktische Teleskope – um einen bestimmten Winkel geneigt sind.

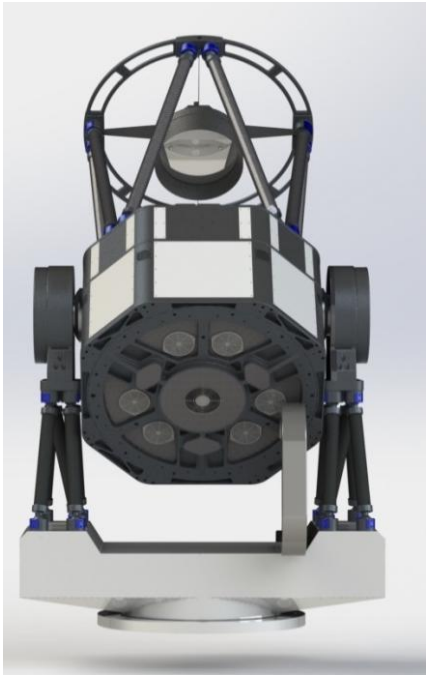
Das Problem der Bildfeldrotation bei azimutalen Montierungen konnte gelöst werden, indem Kameras und andere Instrumente auf einem computergesteuerten motorisierten Bildfeld-Derotator montiert wurden.

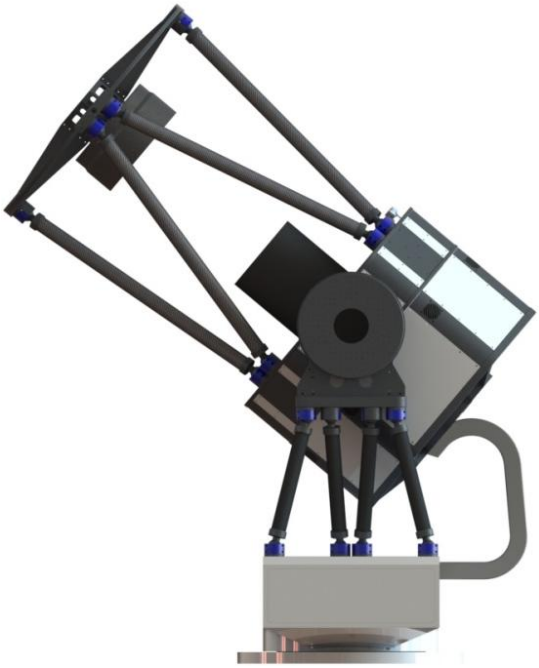
Die meisten großen azimutalen Teleskope besitzen einen kleinen, flachen Tertiärspiegel, der um 180° gedreht werden kann, um das Licht in einer der beiden Richtungen entlang der Höhenachse (Altitude-Achse) durch das Zentrum eines der Höhenlager zu den Instrumenten zu lenken, die an einem Derotator in einem der Nasmyth-Foki befestigt sind (benannt nach James Nasmyth).

Nasmyth-Foki haben vier große Vorteile:

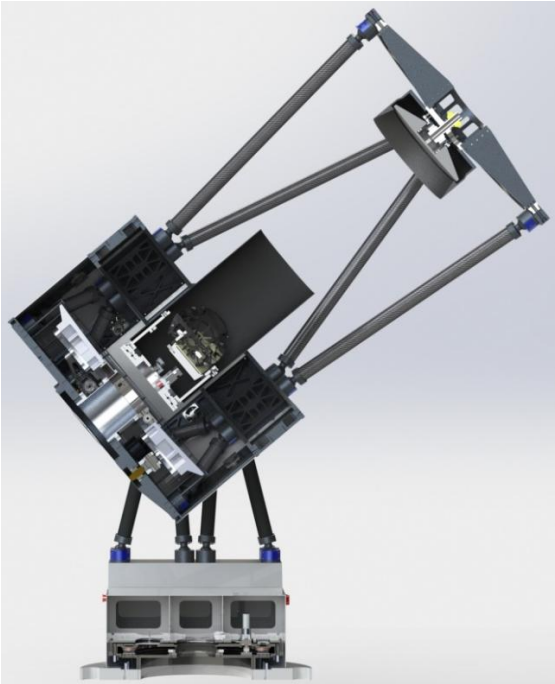
- Die Instrumente werden an den Nasmyth-Ports angeschlossen. Diese Anschlüsse liegen entlang der Höhenachse (und im Schwerpunkt) von Teleskop und Montierung, sodass das Gewicht der Teleskope (oder ein Gerätetausch) die Balance des Teleskops nicht beeinflusst.
- Instrumente können groß und schwer sein, ohne dass dies große Auswirkungen auf die Leistung oder die Kosten des Teleskops hat.
- Die Instrumente bewegen sich nicht auf oder nieder, wenn das Teleskop sich bewegt, sodass das Management von Kabeln, Kühlschlaufen und vielem mehr sehr viel einfacher wird. Außerdem bleibt die Wirkung der Schwerkraft auf eine optische Bank, die für Lasercom, SSA, Spektroskopie oder anderes genutzt wird, unverändert, sodass die Instrumente und optischen Elemente besser aufeinander ausgerichtet werden können.
- *Zwei* Nasmyth-Ports sind vielseitiger als ein einziger Cassegrain-Port. Zwei Nasmyth-Ports in Verbindung mit einem Vierfach-Instrumentenwechsler erlauben den unkomplizierten Einsatz einer Vielzahl von Instrumenten an einem Teleskop. Die Festmontage aller häufig benutzten Instrumente vermeidet Verschleiß und Abnutzungserscheinungen durch den ständigen An- und Abbau – von der Zeit- und Kostenersparnis ganz zu schweigen.

Daher ist es von Vorteil, auch in mittelgroßen Serien-Teleskopen zwei Nasmyth-Ports zu realisieren.





Anstelle einer konventionellen Gabelmontierung verwendet das PW 1000 eine extrem leichte und steife Gitterrohrkonstruktion aus Stahlrohr. Diese Gabelkonstruktion minimiert die Winkelträgheit des Teleskops und ergibt ein sehr genaues und reaktionsschnelles Servosystem mit Direktantrieb.



Dieser Querschnitt eines Solidworks-Modells des Teleskops zeigt die doppelte Gitterrohrkonstruktion des Tubus. Die Rohre bestehen aus Kohlefaser und sind über einen internen Tragering miteinander verbunden. Das gesamte Teleskop wird in Solidworks entworfen und auf minimale Verbiegung überprüft. Das Schwingungsverhalten des Teleskops wird ebenfalls untersucht, damit Windlast das System möglichst wenige beeinflusst.

Design des Steuerungssystems

Von den einfachsten und günstigsten Teleskopen einmal abgesehen gehört eine manuelle Steuerung der Vergangenheit an. Computergesteuerte Motoren bewegen das Teleskop zunächst zu einem bestimmten Punkt am Himmel und führen es dann auf die Zielobjekte nach, um sie in der Bildmitte zu halten.

Die Nachführgeschwindigkeit traditioneller Teleskope für Planeten, Sterne oder Galaxien ist sehr gering (etwa eine Umdrehung pro Tag), während Motoren sich sehr schnell drehen (viele Umdrehungen pro Minute). Daher kommt für den Teleskopantrieb in der Montierung normalerweise eine starke Untersetzung zum Einsatz. Schneckenräder und Zahnriemen funktionieren, bringen aber Getriebespiel und periodische Fehler ein. Friktionsantriebe wiederum vermeiden das Getriebespiel, können aber Durchrutschen.

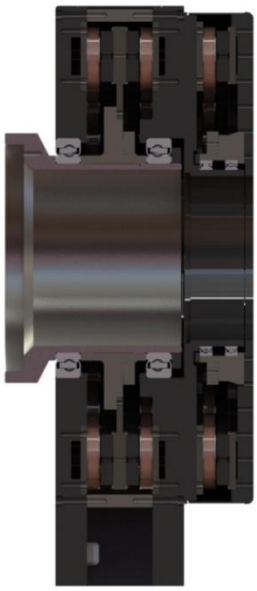
In einem einfachen Kontrollsystem kann der Computer "Open-Loop"-Kommandos ("Offene Schleife") an das Antriebssystem der Montierung senden und geht davon aus, dass die Befehle exakt umgesetzt werden, was natürlich unwahrscheinlich ist, da es Toleranzen in der mechanischen Umsetzung gibt. Alternativ können an beiden Achsen hochpräzise Positionsencoder angebracht werden, die die Schleife schließen. Wenn die Schleife geschlossen ist, kann der Computer diese Encoder ständig ausliest und so sicher stellt, dass das Teleskop auch wirklich in die gewünschte Position zeigt.

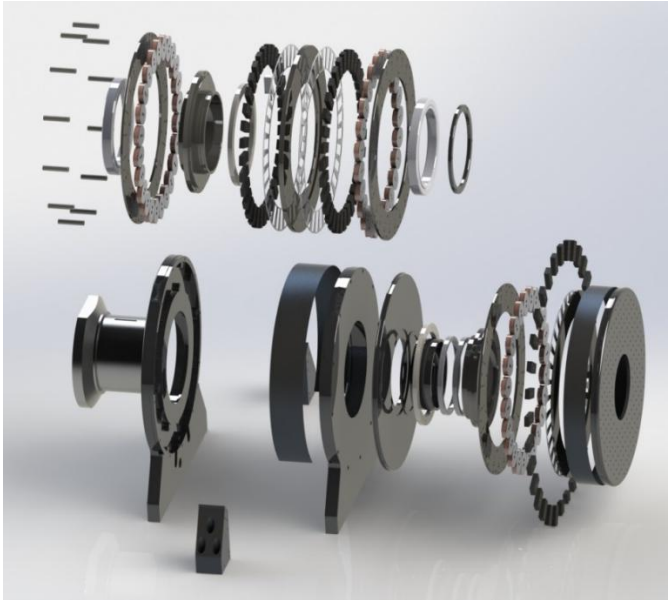
Allerdings kann es ein dynamisches Problem geben, wenn man diese Schleife mit Hochpräzisions-Encodern auf den Achsen schließt. Viele Teleskope haben eine niedrige Resonanzfrequenz, die eine zeitliche Verzögerung in die Schleife des Kontrollsystems einführt. Das kann zu einer Oszillation im Kontrollsystem führen (Der Hund jagt seinen eigenen Schwanz). Für dieses Problem gibt es zwei Lösungen:

- Ein Kontrollsystem mit zwei Schleifen. Eine innere, mit den initialen Getriebestufen gekoppelte Highspeed-Schleife, kombiniert mit einer langsameren äußeren Schleife (Feineinstellung) mit den Achsencodern. Dies ermöglicht zwar eine hohe Positionier- und Nachführgenauigkeit, aber die Auslesegeschwindigkeit der äußeren Schleife muss niedrig sein, damit das System sich nicht hochschaukelt. Daher ist das keine gute Lösung für schnelle Schwenks zwischen verschiedenen Objekten, die Verfolgung schneller Satelliten im niedrigen Erdorbit, oder bei starken Windböen, die alle kurze Reaktionszeiten verlangen.
- Ein Direct-Drive-System mit einer einzelnen Schleife mit kurzen Reaktionszeiten und hochauflösenden Encodern auf den Achsen.

Teleskope mit Direktantrieb (Direct Drive) haben keine Zahnräder, Zahnriemen, Friktionsriemen oder Untersetzungen. Die Montierung selbst wird zum Motor. Einem Ring aus starken Magneten liegt ein anderer Ring aus elektrischen Spulen gegenüber. Indem die Spannung in den Spulen verändert wird, kann die Montierung sehr schnell auf ein neues Ziel ausgerichtet werden, es mit einer fast beliebigen Geschwindigkeit verfolgen, oder komplett stillstehen. Eine geschlossene Feedback-Schleife wird durch die hochauflösenden Achsencoder ermöglicht. Man muss die hohe Geschwindigkeit und die Lautlosigkeit einer Direct-Drive-Montierung selbst erleben, um sie richtig wertschätzen zu können.

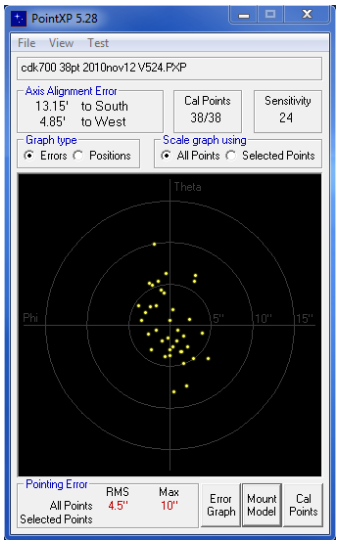
Es gibt natürlich wie immer auch einen Haken: Die Resonanzfrequenz von Direct-Drive-Teleskopen muss hoch sein, und dafür ist eine sehr steife Struktur nötig. Ein verwindungssteifes Teleskop benötigt eine leichte Konstruktion mit sehr steifen, modernen Materialien wie Kohlefaser. In dem 1m-Beispielteleskop von oben wurden die massiven Gabelarme aus Stahl durch eine Gitterrohrkonstruktion ersetzt. Das erhöht die Resonanzfrequenz der Montierung deutlich.

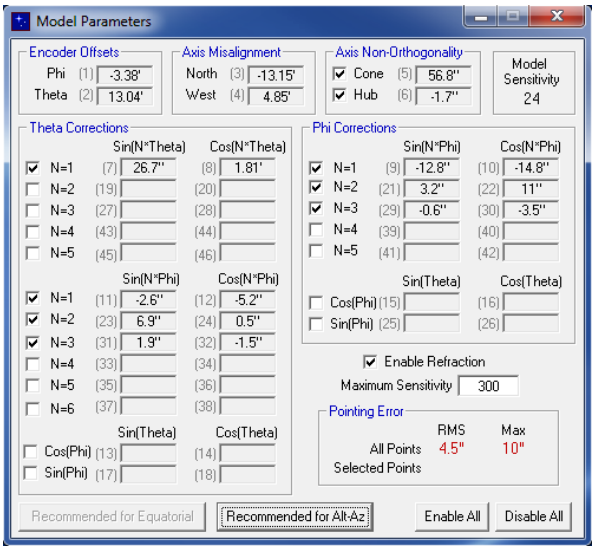




Links: *Ein Querschnitt durch die Einheit aus Höhenantrieb und Bildfeld-Derotator des PW 1000 Teleskops.* ***Rechts:*** *Eine Explosions-Darstellung dieser Einheit zeigt die Direct-Drive-Motoren, Spulen und Hochpräzisions-Encoder. Der Bildfeld-Derotator benutzt dieselbe Direct-Drive Servo-Technologie wie der Antriebsmotor der Achse, um hohe Drehgeschwindigkeiten und Präzision zu erreichen.*

Eine Direct-Drive Motoreinheit mit dem Array aus Magneten und Spulen.





PlaneWave hat eine Software entwickelt, die das Teleskop automatisch anhand von Weitfeld-Sternfeldaufnahmen kalibriert. Diese Kalibrierung dauert nicht lange und muss normalerweise nicht wiederholt werden, solange es keine Änderungen bei System oder Instrumenten gibt. Das Pointing Model kann bis zu 46 unabhängige Referenzpunkte enthalten. In der Praxis genügen 20 Punkte, um ein exzellentes Pointing Modell zu erstellen, das über den gesamten Himmel eine Genauigkeit von mehr als 5 Bogensekunden RMS liefert und in wenigen Minuten erstellt ist.

Robotische Beobachtungen

Wenn ein Teleskop, seine Instrumente und sein Schutzbau alle von einem Computer gesteuert werden, können sie mit Wettersensoren und einer Notstromversorgung kombiniert werden, um ein vollautomatisiertes, robotisches Observatorium zu bilden. In den 1980er Jahren gelang es einer größeren Gruppe von Ingenieuren und Astronomen unter der Führung des Fairborn Observatory (und mit Geldern der National Science Foundation, der Smithsonian Institution und anderer), den Betrieb kleinerer Teleskope mit Computern zu realisieren, bis hin zum vollautomatischen Betrieb im Jahr 1983. Das Array automatischer Teleskope des Fairborn Observatoriums begann den vollautomatischen Betrieb auf dem Mt. Hopkins im südlichen Arizona im Jahr 1985. In den 1990ern verbreitete sich die

Computersteuerung kleinerer Teleskope immer weiter, und voll-robotische Sternwarten mit immer größeren Teleskopen wurden zahlreicher.

Robotische Sternwarten können aus folgenden Gründen sehr kosteneffizient sein:

- Die Betriebskosten sind meist niedriger, da kein Personal vor Ort bezahlt werden muss.
- Die Wartungskosten sind ebenfalls meist niedriger, da keine Menschen die Ausrüstung stören, Instrumente vertauschen etc.
- Die Effizienz robotischer Observatorien ist oft hoch, da sie an Orten mit gutem Wetter, dunklem Himmel und ruhiger Atmosphäre (geringer Luftunruhe) aufgestellt werden können. Die Plätze können anhand historischer Wetteraufzeichnungen und Messungen der Luftunruhe ausgewählt werden. Da kein Personal vor Ort nötig ist, erhöhen auch sehr abgelegene Orte die Betriebskosten kaum.
- Die Objektauswahl und die Steuerung von Teleskop und Instrumenten durch den Computer können schneller und effizienter sein als durch Menschen.
- Robotische Teleskope mit ihren schnellen Antrieben können sich schneller bewegen, wenn keine Menschen in der Nähe sind, die gefährdet werden können, was die Beobachtungszeit erhöht.

MINERVA, das Miniature Exoplanet Radial Velocity Array auf dem Mt. Hopkins in Arizona, besteht aus vier 0.7-m PlaneWave Instruments CDK-700 Teleskopen in zwei Klappdachhütten. Über Glasfaserkabel liefert jedes Teleskop Daten an einen Spektrograph, die Ergebnisse entsprechen denen eines Teleskops mit 1,4m Öffnung. Alternativ können die vier Teleskope auch einzeln betrieben werden, wenn statt des angeschlossenen Glasfaserkabels Kameras als Beobachtungsinstrument ausgewählt werden. Das fünfte CDK-700 in der Kuppel ist nicht Teil des Vier-Teleskope-Arrays.

Robotische Teleskopes sind oft Teil von Arrays und Netzwerken. Es gibt zwei häufige Typen von robotischen Teleskop-Arrays:

- Unabhängige Teleskop-Arrays, die aus ökonomischen Gründen am selben Ort aufgestellt und gewartet werden, aber ansonsten unabhängig voneinander arbeiten.
- Zusammengefasste Arrays, die verschiedene Observatorien zusammenschalten, um das Signal/Rausch-Verhältnis (S/N-Ratio) zu verbessern. Wenn keine hohe optische Auflösung benötigt wird, können solche zusammengefassten Arrays aus kleineren robotischen Teleskopen mit großen Teleskopen in "photonenhungrigen" Szenarien konkurrieren, dank der Vorteile der Serienfertigung, die bezüglich Kosten/Öffnung-Verhältnis und Kosten/Produktionsmengen-

Verhältnis ein Array kleinerer Teleskope gegenüber einem einzelnen großen Instrument bevorzugt. Zum Beispiel kosten vier robotische 1m-Teleskope deutlich weniger als ein einzelnes 2m-Teleskop. Solch ein Array kann auf Knopfdruck von unabhängigen 1m-Teleskopen effektiv zu einem 2m-Teleskop zusammengeschaltet werden.

Im Gegensatz zu Arrays sind Netzwerke aus robotischen Teleskopen räumlich verteilt, stehen also an unterschiedlichen Beobachtungsplätzen. Zu den Vorteilen von Netzwerken aus identischen, robotischen Teleskop/Instrument-Systemen (Observatorien) gehören:

- Kontinuierliche Überwachung von Objekten, da die Objekte an andere Teleskope übergeben werden können, wenn sie für ein Teleskop durch die Erddrehung unbeobachtbar werden.
- Relative Immunität gegenüber Unterbrechungen durch schlechtes Wetter, wenn es genügend Teleskope im Netzwerk gibt, um lokale Schlechtwetterzonen zu umgehen.

Laser Kommunikation und Space Situational Awareness Anwendungen

Die Anforderungen der planetenweiten Kommunikation an die Bandbreite wachsen schnell an. Neben bodenbasierten Glasfaser-/Funkverbindungen wird für die weltweite Verfügbarkeit zunehmend auf Konstellationen aus Kommunikationssatelliten gesetzt. Die SpaceX Starlink, Telesat, Amazons Project Kuiper und die OneWeb Konstellationen, zum Beispiel, werden aus tausenden Satelliten im niedrigen Erdorbit (Low Earth Orbit – LEO) bestehen, die Highspeed-Breitbandverbindungen mit niedrigen Latenzzeiten bereitstellen sollen. Obwohl die Verbindungen zuerst über Mikrowellen realisiert werden, ist es anzunehmen, dass im Lauf der Zeit Lasercom-Verbindungen überwiegen werden, da ungenutzte Mikrowellenbereiche zunehmend knapp werden, während das Bedürfnis für immer größere Bandbreiten und mehr Sicherheit wächst.

Mit den Fortschritten bei der Leistungsfähigkeit der Teleskopsysteme, wie sie in diesem Paper beschrieben wurden, können diese Systeme in Lasercom Bodenstationen umgewandelt werden, besser bekannt als Optische Bodenstationen (Optical Ground Stations – OGSs). Die wichtigsten Bestandteile eines OGS sind das Teleskop (Optik und Montierung) sowie eine optische Bank, mittels derer das System Daten mit einem Lasercom Space Terminal austauschen kann, das sich auf dem Satellit des Endbenutzers befindet. Da Satelliten mit Lasercom Space Terminals in verschiedenen Umlaufbahnen vom Low Earth Orbit (LEO) bis zum Geostationären Orbit (GEO) zu erwarten sind, können verschiedene Teleskopgrößen eingesetzt werden, je nach dem Budget für die Kommunikationsverbindung.

Die OGSs, die gebaut und in das die Infrastruktur des Netzwerkproviders eingebunden werden müssen, dürften im kurzwelligen Infrarot (Short-Wave Infrared – SWIR) arbeiten. Die Zusammenarbeit von Netzwerk-Providern, dem Betreiber des Space Terminals und dem Betreiber der OGS ist nötig, um ein zuverlässiges Kommunikationsnetz aufzubauen.

Die Überwachung der rasch steigenden Zahl der Satelliten und ihrer wechselnden Bahnen – SSA – wird zu einer größeren Herausforderung werden. Die vorhandenen Systeme zur Weltraumüberwachung vertrauen auf Radar, um RSOs (Resident Space Objects - bekannte Objekte) zu verfolgen, sowie auf eine Handvoll optischer Observatorien, die für das Aufsuchen neuer Objekte ausgelegt sind. Das Ziel ist es, die bestehenden optischen und Radar-Kapazitäten mit diesen neuen, robotischen Teleskopen zu ergänzen. Radar- und optische Beobachtungen können zusammenarbeiten, indem Radardaten genutzt werden, um die Beobachtungspläne optischer Systeme zu erstellen, die RSOs verfolgen und ihre Bahndaten bestimmen. Mit mehreren günstigen Teleskopen und der Kombination verschiedener Sensoren können exaktere Bahndaten bestimmt werden und die RSOs besser identifiziert und charakterisiert werden.

Die hohen Schwenkgeschwindigkeiten und die Fähigkeiten zum präzisen Anfahren und Verfolgen dieser neuen Klasse mittelgroßer Serienteleskope maximiert die Beobachtungszeit gegenüber der Zeit zum

Anfahren oder Aufspüren der Ziele. Der vergleichsweise niedrige Anschaffungspreis und die hohe Zuverlässigkeit dieser Teleskope steigert ihre Kosteneffektivität. Wenn sie zu Arrays und Netzwerken zusammengeschaltet werden, können sie eine zuverlässige und ständige Überwachung vieler Satelliten ermöglichen.

Zusammenfassung

Die neue Klasse von Teleskopen mit mittlerer Öffnung hat erfolgreich die Schlüsseleigenschaften großer und teurer Teleskope übernommen, die in Einzelfertigung auf entlegenen Berggipfeln errichtet wurden, und sie in die Entwicklung und Serienfertigung relativ günstiger, mittelgroßer Teleskope integriert. Diese Eigenschaften sind:

- Ein optisches Design mit einem großen, ebenen Bildfeld und einer Optik, die vergleichsweise einfach herzustellen und zu warten ist.
- Leichte Spiegel aus Materialien mit niedriger thermischer Ausdehnung.
- Azimutale Montierungen, da sie kompakt sind, vertikale und horizontale Strukturen haben und weniger kosten.
- Zwei Nasmyth-Ports mit Derotatoren für die Instrumente, um große Instrumente an diesen beiden idealen Punkten mit gleichbleibender Höhe am natürlichen Schwerpunkt zu betreiben.
- Eine sehr steife, leichte Struktur aus modernen Materialien für eine hohe Resonanzfrequenz, die so den problemlosen Einsatz von Direktantrieben ermöglicht.
- Teleskopsteuerung mit Direktantrieb und geschlossenem Regelkreis für hochpräzise Positionierung, sanften und leisen Betrieb, schnelle Schwenks und hohe Nachführgeschwindigkeiten, bei vollständiger Vermeidung von Periodischen Schneckenfehlern, Getriebespiel oder Durchrutschen.
- Robust gegen Einflüsse von außen, inklusive Windböen.

Dank ihrer sehr exakten Positionierung und den schnellen Schwenk- und Nachführgeschwindigkeiten maximieren diese Teleskope die Beobachtungszeit, indem sie die Zeit zum Anfahren und Finden der Objekte minimieren. Wenn diese robotischen Teleskope in vollautomatisierte Sternwartenarrays und -netzwerke integriert werden, bieten sie die Möglichkeit zum dauernden, wetterunabhängigen Einsatz in Bodenstationen, die für Lasercom und SSA benötigt werden.

Die Autoren

Russell Genet ist Astronom und Research Scholar in Residence an der California Polytechnic State University. Er arbeitete viele Jahre als Research Supervisor in Forschungseinrichtungen der Regierung. Er gründete und leitete viele Jahre lang das Fairborn Observatory und gehört zu den Pionieren bei der Entwicklung robotischer Teleskope.

David Rowe, Physiker und Chief Technical Officer bei PlaneWave Instruments, war viele Jahre Chief Technical Officer bei Sierra Monolithics. Er entwickelte eine ganze Reihe einzigartiger Teleskopdesigns und leitete die Entwicklung der CDK-700 und PW-1000 Teleskope, die in diesem Paper als Beispiele verwendet wurden. Als Gründungsmitglieder der Alt-Az-Initiative arbeiteten David und Russell gemeinsam am "Cal Poly 18" Teleskop, das vor einem Jahrzehnt den Direktantrieb an einem mittlegroßen, azimutal montierten Teleskop umsetzte. In letzter Zeit haben sie an Instrumenten und Software für die Beobachtung enger Doppelsterne mittels der Speckle Interferometrie gearbeitet.

Ruben Nunez ist ein High-Tech Business Development Executive mit über zehn Jahren Erfahrung in der Weltraumindustrie. Er hat strategische Roadmaps entwickelt und umgesetzt, für die Kundengewinnung in den Märkten Free-space Laser Communication, Space Situational Awareness, DoD Engineering Services und rund um den Mond. Er war außerdem Leiter und Gründer eines formalen Google Lunar XPRIZE Teams, das mit mehreren Firmen weltweit zusammenarbeitete. Ruben ist außerdem Fürsprecher von STEM und setzt forschungsbasierte Lernmethoden um.