



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学40cm望遠鏡の観測システムの開発

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-12-28 キーワード (Ja): キーワード (En): astronomical telescope, astronomy education, science education 作成者: 富田, 飛翔, 土橋, 一仁, 川崎, 優太, 西浦, 慎悟 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/2309/00174486 |

東京学芸大学40cm望遠鏡の観測システムの開発

富田 飛翔*¹・土橋 一仁*²・川崎 優太*¹・西浦 慎悟*²

宇宙地球科学分野

(2022年6月27日受理)

TOMTIA, T., DOBASHI, K., KAWASAKI, Y., and NISHIURA, S. : Development of the 40cm Telescope at Tokyo Gakugei University. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 74 : 85-93. (2022) ISSN 2434-9380

Abstract

In 2020 March, we replaced an old telescope which had been used for more than 40 years at Tokyo Gakugei university with a new telescope (40cm in diameter). The new telescope itself can be controlled by a PC, but other related machines and facilities such as the dome are old, and they are mostly operated manually, which makes it insufficient to perform astronomical observations. We therefore tried to realize an automatic observational system by (1) preparing the dome-flat screen, (2) equipping the motor system of the dome with an inverter, (3) synchronizing the dome with the telescope, (4) developing the software for observations, and (5) improving the observational efficiency through maintenance of the related instruments. Owing to these developments, we can now control the telescope mostly automatically without operating the telescope and the related instruments by hand, for which we can perform astronomical observations more sufficiently than before. In this paper, we introduce these developments and also some examples of actual observations of astronomical objects such as Jupiter with the telescope.

Keywords: astronomical telescope, astronomy education, science education

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要 旨

2020年3月、設置以来40年以上経過した古い望遠鏡を更新する形で東京学芸大学に口径40cmの新しい望遠鏡（以下、新40cm鏡）が納入された。新40cm鏡はPC制御が可能であるが、それが収められているドーム等の旧来の設備は手動のまま、本格的な天体観測を行うのに不都合が多かった。そこで本研究では、①ドームフラット撮影のための環境整備、②ドーム回転用モーターへのインバーターの取り付け、③望遠鏡とドームスリット位置の連動、④システム全体としての観測プログラムの構築、⑤雨滴センサーの開発とミラーカバーの開発、⑥遠隔操作のためのインターネットへの接続に取り組み、半自動的にデータを取得することのできるシステムを開発した。このシステ

* 1 東京学芸大学大学院 教育学研究科

* 2 東京学芸大学 広域自然科学講座 宇宙地球科学分野 (184-8501 東京都小金井市貫井北町4-1-1)

ムを用いることで、観測の際に手動で操作する場面を大幅に削減することができた。本論文では、開発したシステムで行った木星等の観測事例も紹介する。

キーワード：天体望遠鏡，天文教育，科学教育

1. はじめに

東京学芸大学天文学教室では、旧来用いられてきた40cm望遠鏡（以下、旧40cm鏡，図1）に代わり，新しい40cm望遠鏡（以下，新40cm鏡，図2）を2020年3月に導入した。新40cm鏡は比較的小口径ではあるが，小中学校及び高等学校の児童生徒を対象とした月や惑星，星雲などの教材開発のための観測には十分な性能を有している。

最近の一般的な天文教材の開発例としては，伊藤ら（2015）が行ったHR図に関する教材開発などが挙げられる。彼らは東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の口径105cmシュミット望遠鏡と，尾鷲市立天文科学館の口径81cm反射望遠鏡を利用して教材開発を行ったが，同様の教材開発を新40cm鏡でも行える。また，望遠鏡をインターネット経由で遠隔制御する研究も行われている（例えば，大羽ほか 2019）。望遠鏡を遠隔制御することで，学校の正規の時間内に天体観測を行えるようになり，生

徒たちの興味関心や学びの質の向上につながることを期待される。最近では機器を制御するためのPCをインターネットへ接続するためのソフトウェアも普及はじめており，新40cm鏡も容易にインターネット望遠鏡として活用することができる。

また，新40cm鏡は小口径ながら天文学の学術的な研究活動への利用も期待される。系外惑星探索手法の一つであるトランジェット法は，惑星が恒星の前を通過する際の減光を検知するものである。HD209458bは，この手法で発見された最初の系外惑星である（Charbonneau et al. 2000）。また，過去に東京学芸大学では，塚田（2008）が国立天文台の口径50cm社会教育用公開望遠鏡を用いて，トランジェット法による系外惑星の観測を行った。これと同様に，新40cm鏡を用いて系外惑星の観測を遂行することも，十分可能であると思われる。

新40cm鏡は，赤道儀，フィルターホイール，カメラ等（図3）をPCから制御することが可能である。しかしながら，旧来のままのドーム等（図4）の周辺機器は，PCからの制御を行うことができない状態であった。そのため，観測の際はマニュアルで操作を行う場面が多く，観測の効率が良いとは言えない状況であった。そこで本研究では，田中光化学工業（株）からの協力を得て，ドームを望遠鏡の姿勢に合わせて回転させるための開発を行った。また，新40cm鏡で採用している制御用ソフトウェア「AstroArt7」には，赤道儀，フィルターホイール，CCDカメラを制御するためのスクリプト言語が用意されている。本研究で



図1 旧40cm鏡



図2 新40cm鏡

は、これを用いて、事前に設定した観測指示書に合わせて各種機器を一元的に制御するプログラムを開発した。

2. 開発

2. 1 開発前の状況

新40cm鏡は、Orion Optics社製のカセグレン式の反射望遠鏡である。フィルターは、Jhonsen-Cousinsシステムに準拠したAstrodon社製のBVRcIcの4つのフィルターが搭載されている。冷却CCDカメラは、Finger Lakes Instrumentation社製のML8300が搭載されており、視野はおよそ22.7×17.0分角である。赤道儀は、Mathis Instruments社製のMI-500である。その他、観測機器の仕様の詳細については、川崎（2021）や土橋ら（2022）の論文に記載されている。

赤道儀、CCDカメラ等の新しく導入した機器は全てPCに接続されており、AstroArt7に用意されているスクリプトで制御することが可能である。しかしながら、望遠鏡を風雨から防ぐドームは建築から半世紀ほど経っており、新40cm鏡導入当初はPCからの制御を行うことができない状態であった。そのため、手動で望遠鏡の方向とドームのスリットを一致させる必要があり、観測する際の負担の増加と観測効率の悪化の原因となっていた。そこで、ドームの方向と望遠鏡の方向を連動させるために各種機器を一元的に操作するシステムを開発し、観測の効率化を図る必要があった。また、フラットフィールド撮影用のスクリーンも当初は設置されておらず、本格的な測光観測を行うためには、これも新たに設ける必要があった。

新40cm鏡の開発については、本研究に先立ち、川崎（2021）が撮像スクリプトの試作や気象データ取得のテストを行った。また、ドームの回転については、

ロータリーエンコーダーで読み込んだ信号からドームの位置を決定することを提案したが、実現には至っていなかった。本研究では、川崎（2021）が提案した方法に沿って、ドーム制御のための開発を行った。

2. 2 ドームフラット撮影のための環境整備

他の望遠鏡と同様に、新40cm鏡で撮影したデータには、光学系の特性やCCDカメラの感度むら、フィルター等についた埃により、一定のパターンが生じる。このパターンは、広がった様な光源を撮影してフラット補正を行うことにより除去することができる。そのためのデータを、フラットフィールドと呼ぶ。フラットフィールドとしては、薄明時の空を撮影したトゥワイライトフラットや、多数の星野写真から合成するスカイフラットなどがある。しかしながら、これらには天候や撮影時間などの制約がある。また、現状の新40cm鏡では、カメラを取り付ける度に位置（光軸に対する回転角）が変わってしまうので、観測日毎にフラットフィールドを取得する必要がある。そこで、ドームの壁面に白い反射板（以下、フラットスクリーン）を設置し、それを白熱電球等（以下、フラットランプ）で一様に照らしたものを撮影してドームフラットを取得できるようにした。フラットスクリーンは、軽い木材を骨組みとし、発泡スチロールの板に白い紙を貼り付けた素材を利用して作成した。十分軽く、強度もあるため、磁石を取り付けたフックで四隅を吊り上げ、ドーム壁面に固定した（図5）。また、フラットランプには、市販の100w白熱電球を用いた。フラットランプからの光を直接フラットスクリーンに当てるのではなく、フラットランプにフードを被せた間接照明（図6）を制作してドームの反対側に設置することで、より一様な光でフラットスクリーンを照らせるように工夫した。Bバンドのドームフラットの例を、図7に

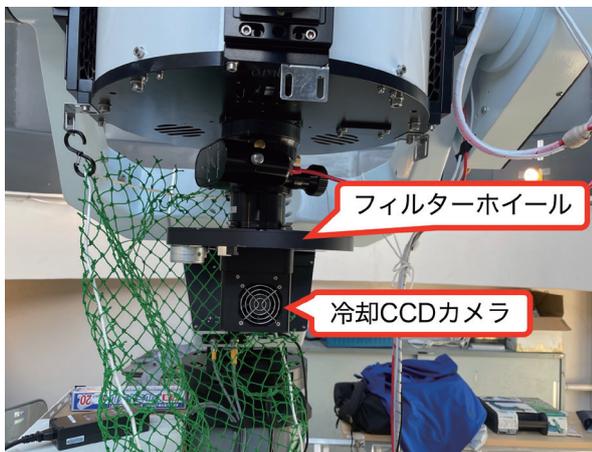


図3 CCDカメラ，フィルターホイール



図4 東京学芸大学6m天文ドーム

示す。

このフラットスクリーンとフラットランプを用いることで、現実的な露光時間で安定してドームフラットを取得することができるようになった。作成したフラットスクリーンの平坦性を調べるために、鈴木 (2022) は、ドームフラットとトゥワイライトフラットの比較をBバンドで行った。その結果、トゥワイライトフラットとドームフラットにほとんど違いがなく、ドーム

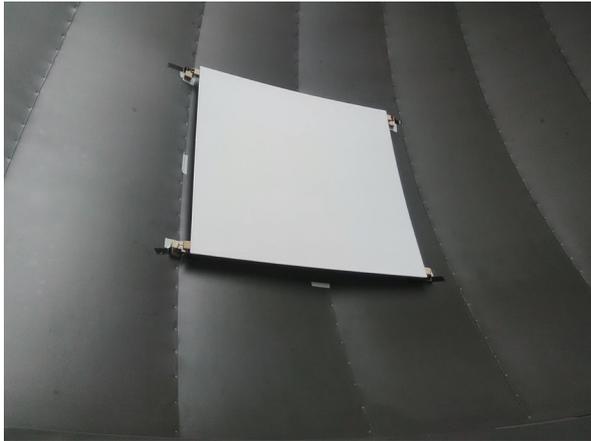


図5 フラットスクリーン (サイズは90cm×90cm)



図6 フラットランプ



図7 取得したBバンドのドームフラット

フラットをトゥワイライトフラットの代用とすることができたことがわかった。

2. 3 インバーターの取り付け

旧来のドームの回転スイッチ (ハンドパット) を ON・OFFすると、ドームは急回転・急停止し、その突入電流のために強い電磁波ノイズが発生していた。この電磁波ノイズが赤道儀を制御する基盤と制御用 PC 間の通信を妨害し、接続が切れてしまうという問題が頻繁に発生していた。ドーム回転の始動・停止をゆっくり行い電磁波ノイズを低減するためには、ドームの駆動用モーターにインバーターを取り付ける必要があった。

東京学芸大学のドームは、回転の駆動用として3相交流200Vのモーターが2つ搭載されているので、東芝インバーター社製のVF-nC3 (図8) を2個設置することにした。このインバーターのターミナル(端子)を, velleman k8055 I/Oボード(図9)のリレーに接続し, PCから左右の回転を行えるようにした。また, PCが壊れた場合でも手動で規定位置に戻ることができるよう, ハンドパット (図10) でも操作できるようにした。

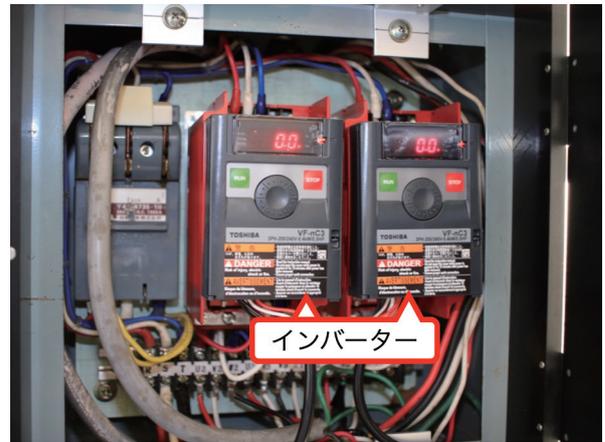


図8 分電盤に搭載したインバーター (VF-nC3)

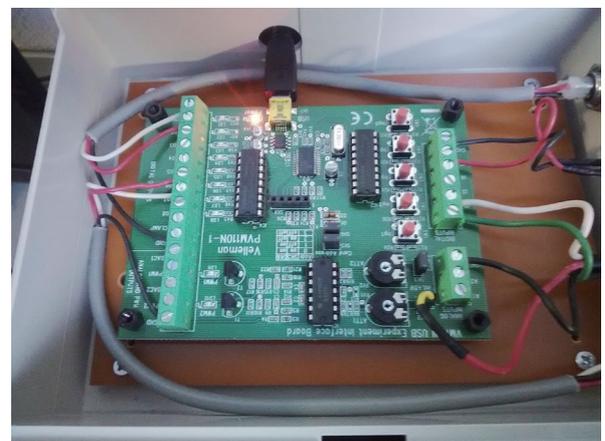


図9 velleman k8055 I/Oボード

2. 4 望遠鏡とドームスリット位置の連動

望遠鏡が向いている方向とドームのスリット方向を同期させるためには、ドームの回転位置をPCに認識させる必要がある。そこで回転位置の基準となる原点を検知するホームセンサーと、ドームの回転角を検知するロータリーエンコーダーを設置した。ホームセンサーはドームに取り付けた突起物が、センサーの棒を倒したときに信号を出力するようになっている(図11)。また、電磁波ノイズによる誤作動を防ぐため、ホームセンサーにはコンデンサーを取り付けた。ロータリーエンコーダーは、ドームのレールの下面にバネで密着させた車輪が回転すると、回転数に応じてパルスを出力するセンサーである(図12)。各種センサーからの信号は、velleman k8055 I/Oボードのデジタルインプットに接続し、信号を読み込んでいる。また、velleman k8055 I/Oボードは、入力されたデジタル信号の回数をカウントする機能がついており、それを読み込むことでロータリーエンコーダーからのパルス数を読み込むことができる。

上記のホームセンサーとロータリーエンコーダーが



図10 非常時にドームをホームポジションに戻すためのハンドパッド

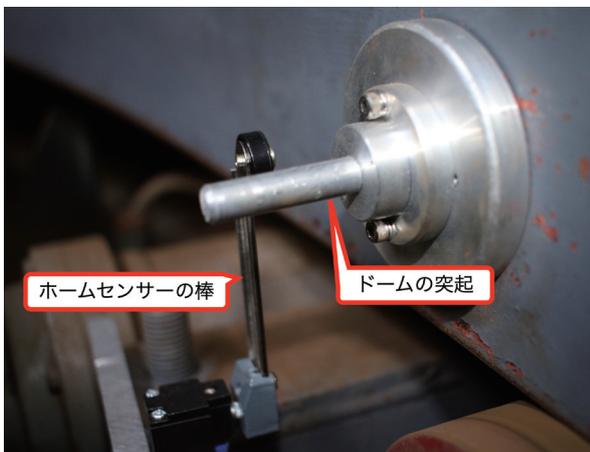


図11 原点を検出するためのホームセンサー

らの情報をもとに、原点位置からのドームの回転角を計算することで、ドームの向いている方向を算出する。望遠鏡が向いている方向は、望遠鏡を制御しているプログラム(AstroArt7)から方位角(北を0度とし時計回りに測定)としてテキストファイルに書き出すことができる。ドームを制御するプログラムは、方位角が記述されたテキストファイルを定期的に監視し、望遠鏡の方位角が更新された場合はドームを回転させ、望遠鏡の方向と一致させる。

2. 5 システム全体としての観測プログラムの構築

ドームと望遠鏡を連動させることが可能となったので、これらを含め、観測に必要な各種機器を制御するプログラム群を作成した。このプログラ群は、新40cm鏡本体を制御するプログラムである“auto_observe”と、ドームの回転を制御する“uc2”から成る。auto_observeはAstroArt7で書いたスクリプトであり、uc2はBorland C++ Builder (BCB) で作成したプログラムである。これらのフローチャートを、図13に示す。

これらプログラムでは、まず、auto_observeにより望遠鏡の現在の方位角を記述したテキストファイルを出力し、ドームを制御するuc2がそのファイルを5秒に一回の割合で読み、望遠鏡が向いている方位へとドームを回転させる。auto_observeが方位角を書き出すタイミングは、観測開始時と、各天体を望遠鏡の視野に導入する時と、CCDカメラで撮影する直前である。プログラムの都合上、カメラの露光中は望遠鏡とドームの方位角を一致させることはできないが、スリットの幅が十分広いため、実用上の問題はない。

観測する天体は、2000年分点の赤道座標(赤経・赤緯)で指定する。複数の天体を順番に登録することも可能であり、それぞれの天体について、個別に露光時間や使用するフィルター、撮影枚数等を指定すること



図12 ドームの回転を検知するロータリーエンコーダー

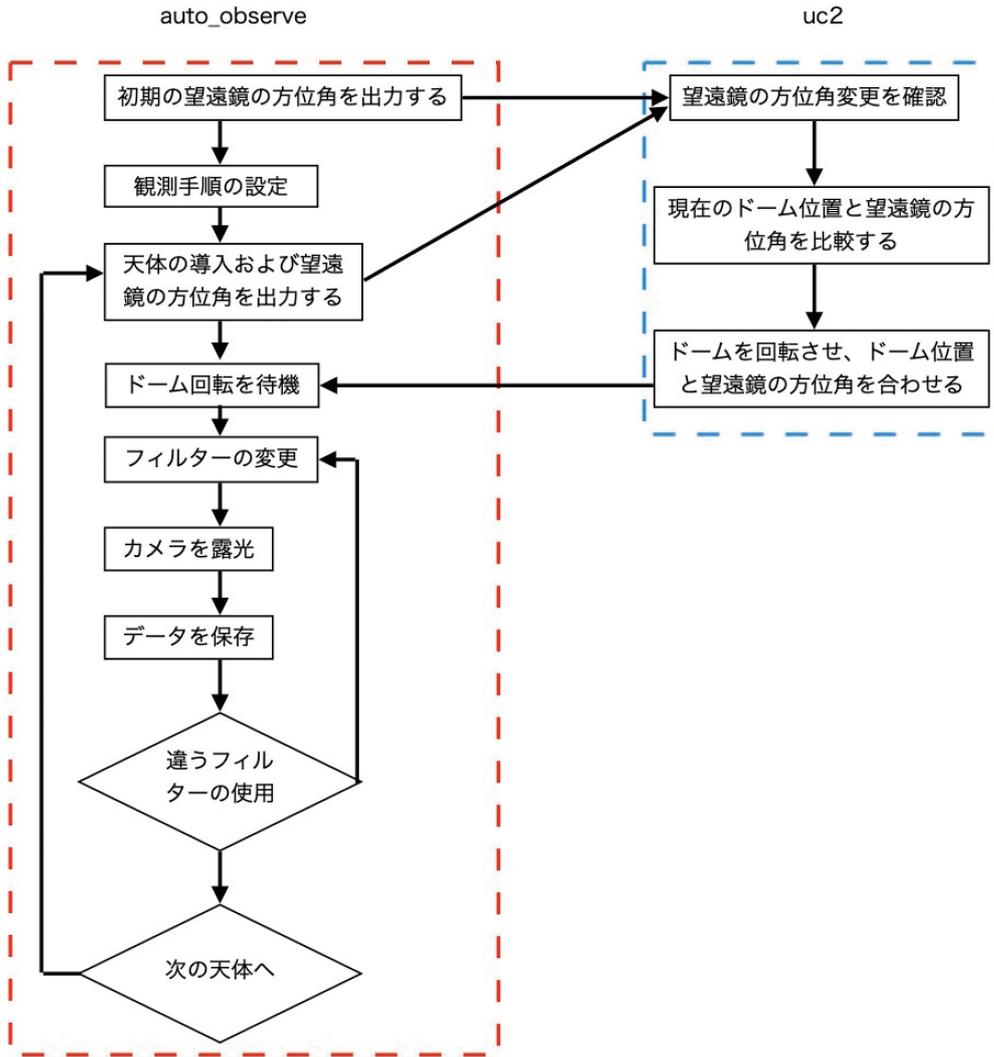


図13 プログラムのフローチャート

ができる。また、機器の状態をチェックするために、CCDカメラのシャッターを閉じたまま撮影して暗電流のデータ（ダークカレント）も取得可能である。

開発したauto_observeでは、赤経・赤緯それぞれの方向の観測点数（N×M点）とグリッド間隔を設定して、広い領域のマッピング観測を行うことができる。特定の天体の撮像を行う際は、測光精度を高めるために複数枚撮影した画像を合成して新たな画像を作成することがある。そのような場合、上記のマッピング観測でグリッド間隔を小さくにとって、CCD上の特定の不良ピクセルを避けるためのディザリング観測を行うこともできる。

撮影したFITS画像に対しては天体の画像データだけではなく、解析をする際に必要な各種情報をヘッダーに書き込む必要がある（図14）。AstroArt7では、露光時間やフィルターの種類など基礎的なパラメータが、自動的にヘッダーに書き込まれるようになってい

る。auto_observeでは、さらにユリウス日や方位角・高度、CCDカメラの温度などの数値をヘッダーに追記するようにした。

天体の観測をする際は、数日に渡って継続的に観測をする場合も多い。そのため、天体情報やマッピング方法の観測手順をテキストファイルとして保存したり、読み出したりする機能を追加した。

2. 6 雨滴センサーの開発とミラーカバーの制御

降水でPCや望遠鏡が濡れることで、故障してしまう恐れがある。そこで、本研究では、雨滴センサーの開発も行った。センサー本体は市販のものを用いており、素子表面のセンサー部に水滴が当たると、端子に信号（5V）を出力する（図15）。これをvelleman k8055 I/Oボードのデジタルインプットから読み取ることで、降水の有無がわかる。雨滴センサーが反応した際は、降水があることを制御用PCの画面に表示す

```

SIMPLE = T
BITPK = -32
NAXIS = 3
NAXIS1 = 3326
NAXIS2 = 2594
NAXIS3 = 3
EXPTIME = 20.0
TEMPERATURE = 10.062000000000000
DATE-OBS = 2021-08-04T11:31:33.4 / UT
JD = 2459430.98024880000
DATE-LO = 2021-08-04T02:31:33.4 / LT
FILTER = V-VISUAL
RA = 20:24:54.7
DEC = +38:35:37
OBJECTRA = 20:24:54.7
OBJECTDEC = +38:35:37
BLUNT = NO
ORIGIN = TGU Observatory
OBSERVAT = TGU40cm
INSTRUME = FU M4350-GPS
DATA_TYP = SKY
OBJECT = M29
EQUINOX = 2021.686493151000000
ZD = 32.425129831080000
ZD_STR = 32.4614924747800000
ZD_END = 32.3887671873700000
AZMUTH = 72.0325764156600000
AZ_STR = 72.032573302700000
AZ_END = 72.0411795010600000
ALTITUDE = 57.5748701689200000
ALT_STR = 57.538601629200000
ALT_END = 57.6112328126300000
OBSERVER = Arakawa Tomita Dobaishi
UT_STR = 20210804113137
UT_END = 20210804113155
JST_STR = 20 31 33
JST_END = 20 31 55
MJD_STR = 2459430.98024590000
MJD_END = 2459430.98025700000
FOC_LEN = 2720.0
FOC_VAL = 10000.0
DETECTOR = XAF-8300
CTYPE1 = RA-TAN
CTYPE2 = DEC-TAN
CDELT1 = 1.1361000000000000E-004
CDELT2 = 1.1361000000000000E-004
CLINT1 = 0deg
CLINT2 = 0deg
CRPIX1 = 1663.500000000000000
CRPIX2 = 1292.500000000000000
CRVAL1 = 26.959611111100000
CRVAL2 = 18.0
CROTA1 = 0.0
CROTA2 = 30.391000000000000
NDFILTER = 0.0
AVISUMIN = 2400.0
AVISUMAX = 2586.0
AVISUTYP = 0.0
O_BZERO = 32768.0 / Original BZERO Value
END
    
```

図14 FITSヘッダーのサンプル

る“rain_checker”というプログラムを作成した。

新40cm鏡の鏡筒先端には、半手で操作できるミラーカバーが取り付けられている。ミラーカバーは、信号線をショートさせるとカバーが閉じるように設計されている。本研究では、velleman k8055 I/Oボードのデジタルアウトプットに信号線を繋ぐことで、ミラーカバーの開閉も、PCから行えるようにした。

2. 7 遠隔操作のためのインターネットへの接続

Googleから公開されている“chrome remote desktop”を利用して、新40cm鏡を遠隔制御できるように設定を行った。この機能を利用すれば、ドームに来ることなく、望遠鏡の制御用PCにアクセスすることが可能である。このようなインターネットへの接続は、単に観測時の利便性を高めるだけでなく、新40cm鏡のような本格的な天体望遠鏡を小学校～高等学校までの学校教育に活用するための新たな方法を提供するものになると期待される。

遠隔観測時の安全確保のため、本研究では、新40cm鏡を監視するためのウェブカメラをドーム内に設置した。

3. 観測事例

開発したシステムを利用すると、様々な観測を半自動的に行うことができる。ここでは、これまでに行った観測事例を紹介する。

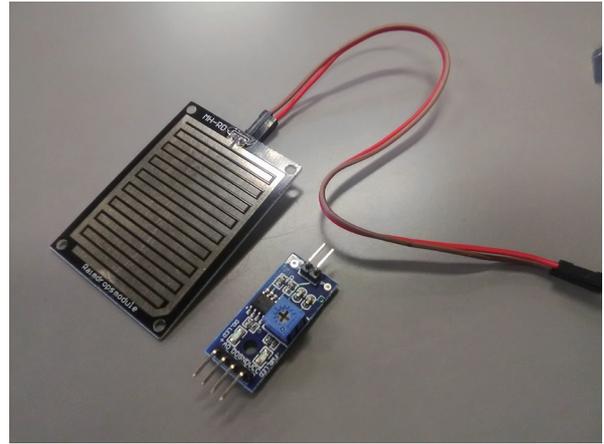


図15 雨滴センサー

3. 1 木星の教材用データの取得

木星は自転周期が約10時間と短く、数時間連続して観測を行うと、大赤斑などの表面の構造が動いていく様子がわかる。また、木星のガリレオ衛星の公転についても、公転周期が短く、一番短いイオでおよそ1.76日なので、その動きを比較的容易に観察することができる。芹澤 (2022) は、卒業研究の一環として木星のモニター観測を行い、木星本体の自転およびガリレオ衛星の公転の教材開発に利用できる素材を収集した。この観測では、木星とガリレオ衛星を1つの視野に納め、BVRcIcの4バンドで3時間ほど連続して撮影し、木星の自転やガリレオ衛星の公転をカラームービーとして観察できるデータを取得した(木星は明るいので、濃度100のNDフィルターを併用した)。得られたデータの一部を、図16に示す。

3. 2 月面の観測

芹澤 (2022) は月の満ち欠けの教材作成のために、月面の撮影も行った。月の視直径はおよそ30分角である。新40cm鏡の視野は約22.7×17.0分角なので、月面全体を一度に撮影することはできない。そこで、望遠鏡の視野を10～15分角ずつ動かしながら、月の部分毎に撮影を行い、それらの画像を合成して月全体の画像を取得する必要がある。開発したプログラム (auto_observe) を使い、観測時の月の中心の赤経・赤緯、マッピング観測のためのグリッド数とグリッド間隔を設定し、撮影を行った。図17は、合成した月の全体像である。さらに、芹澤 (2022) は様々な月齢で同様の撮像を行い、表計算ソフトExcelと組み合わせることで、任意の年月日の月齢と月の見え方が分かる「月齢カレンダー」を作成した。



図16 大赤斑の移動



図17 合成した満月

3. 3 アルゴルの変光観測

新40cm鏡のテストを兼ねて、松井(2022)は変光星として有名なアルゴルの測光観測を行った。アルゴルは比較的短い周期(68時間49分)で変光する食連星であり、過去のデータの蓄積も多く、初心者向けの観測対象である。

アルゴルの観測は、アルゴルとその近傍の比較星を交互に撮像し、比較星の見かけの等級を基準としてアルゴルの等級を測定した。この観測では、アルゴルと比較星の連続撮影を継続的に行わなければならないが、本研究で開発したauto_observeは複数天体の観測にも対応しているので、「アルゴルの測光→比較星の測光→フィルターの交換」という一連の観測を、自動的に行うことができる。これにより、手順を間違える等のヒューマンエラーを劇的に低減することができた。

4. 今後の課題

本研究での開発により、開発前と比べ観測効率が大幅に向上した。しかし、まだ以下のような課題が残されている。

天体は日周運動によって、天球上で時事刻々と位置が変化している。そのため、星像を点源として撮影するためには、カメラの露光中に望遠鏡を日周運動に合わせて動かす必要がある(トラッキング)。しかし、現時点での新40cm鏡の駆動系は、日周運動との同期が十分ではなく、30秒程度露光すると、星像が流れてしまいがちである。これには複数の要因が考えられるが、主要な原因としては、赤経軸周りのウォームギアの偏心等の僅かな歪みによる周期的なトラッキングエラーが考えられる。ウォームギアにセンサーを取り付け、このエラーをソフト的に補正することで、トラッキング精度を上げることが可能になるものと考えられる。

また、ドームの回転についてはPCから制御することが可能となったが、ドームのスリットについては、未だに手動式である。スリットも同様にPCから開閉することが可能であるが、予算の関係でまだ実現していない。ドームのスリットの開閉もPCから行えるようにすることで、急な降水の際にスムーズに観測を終了することが可能となり、機器の故障を防ぐことにつながる。

最後の問題として、NDフィルターを収めたフィルターホイールの自動化が挙げられる。月や金星などの明るい天体は、学校での学習対象として有益であるが、CCDカメラを簡単に飽和させてしまう。これらの明るい天体に対しては、光量を適度に減らすためのNDフィルターをBVRcIcバンドのフィルターと併用する必要がある。現時点では、NDフィルターは手動式の

フィルターホイールに入れて、BVRcIcバンド用のフィルターホイールの前に設置して使用しているが、これもPC制御可能にすれば、より観測効率を高めることができる。

これらの課題については、令和4年度中にできるだけ解決しておきたい。

5. まとめ

本研究では、東京学芸大学に設置された新40cm鏡の観測プログラムや、その周辺機器の開発を行った。具体的には、①ドームフラット撮影のための環境整備、②ドーム回転用モーターへのインバーターの取り付け、③望遠鏡とドームスリット位置の連動、④システム全体としての観測プログラムの構築、⑤雨滴センサーの開発とミラーカバーの開発、⑥遠隔操作のためのインターネットへの接続を行った。これにより、新40cm鏡を用いて半自動的にデータを取得することが可能となり、観測効率が飛躍的に向上した。今後は、開発したシステムを用いて、各種教材開発や教育実践を行う予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、田中光化学工業（株）の田中一幸氏には、ドーム回転の制御を始め、様々な技術的指導を頂きました。ここに感謝致します。本研究は、

放送大学教育振興会助成金（2021年度）、公益財団法人カシオ科学振興財団研究助成金（助39-52）、公益財団法人柏森情報科学振興財団研究助成金（K33研X XVI第584・591号）、東京学芸大学連合大学院広域科学教科教育学研究経費（令和3年度）の資金的な援助を受けました。

引用文献

- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M (2000), *Astrophysical Journal*, Vol.529, pp.L45-L48.
- 伊藤信成, 高田碧郎 (2015), *地学教育* 第68巻 第2号, pp. 69-91.
- 大羽徹, 仁田野竜太, 迫田誠治, 表實 (2019), *物理教育* 第67巻 第3号, pp.151-158.
- 川崎優太 (2021), 東京学芸大学 修士論文 (令和2年度), pp. 1-55.
- 鈴木海哉 (2022), 東京学芸大学 卒業論文 (令和3年度), pp. 1-38.
- 芹澤来渡 (2022), 東京学芸大学 卒業論文 (令和3年度), pp. 1-58.
- 土橋一仁, 西浦慎悟, 川崎優太, 富田飛翔 (2022), *東京学芸大学紀要 自然科学系*, 第74集, pp.77-84.
- 塚田健 (2008), 東京学芸大学 修士論文 (平成19年度), pp.1-67.
- 松井ひなた (2022), 東京学芸大学 卒業論文 (令和3年度), pp.1-40.