

宇宙状況把握光学望遠鏡システム

Optical Telescope System for Space Situational Awareness

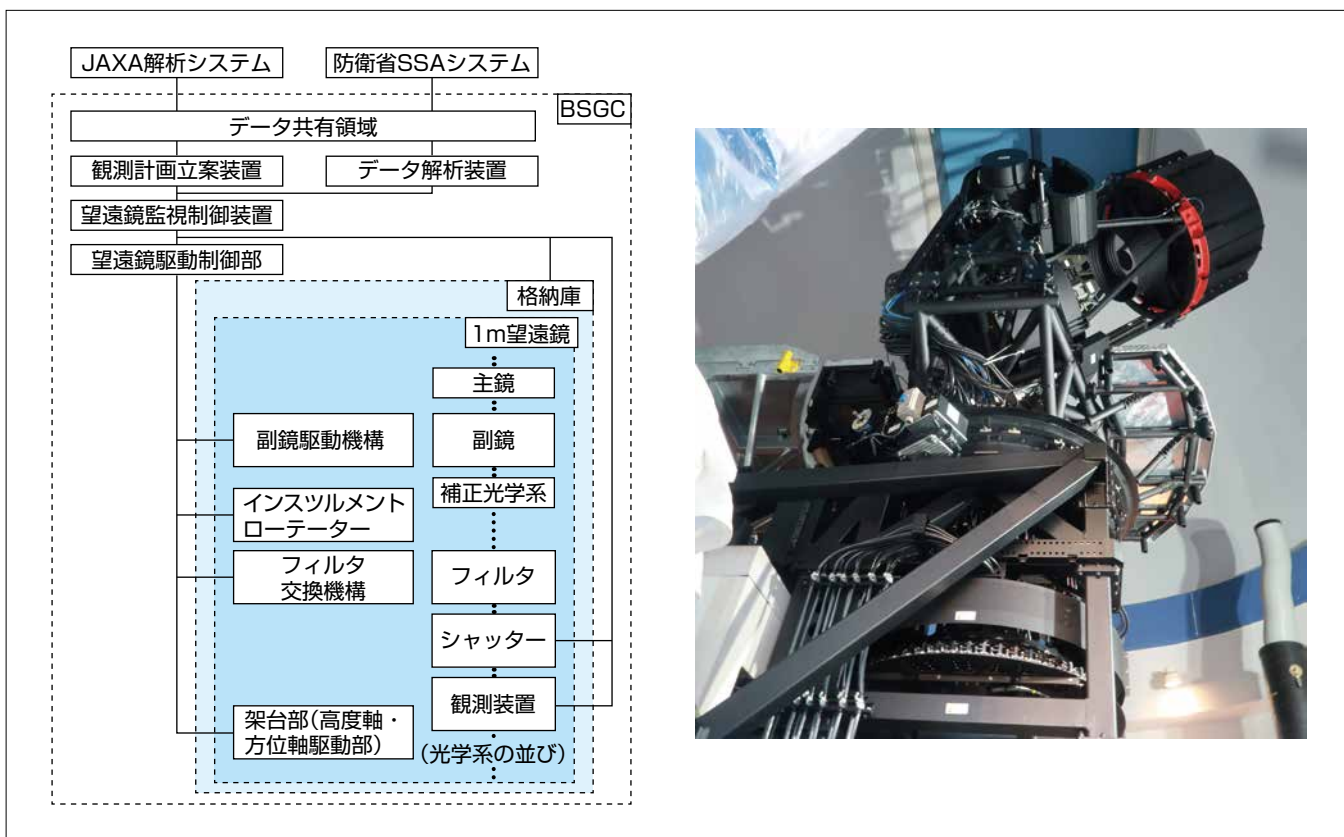
高根澤 隆*
Takashi Takanezawa
服部友哉†
Tomoya Hattori
坂本慎介†
Shinsuke Sakamoto

要旨

宇宙空間の安全利用のため、地球を周回するスペースデブリ等を把握するSSA (Space Situational Awareness, 宇宙状況把握又は宇宙状況監視などと呼ばれる) システムの整備が進められている。この光学望遠鏡システムは、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用するSSAシステムの一部をなすもので、従前からデブリや地球に接近するおそれのある小惑星を観測するために運用していた岡山県井原市にある美星スペースガードセンター (BSGC) の光学望遠鏡システムを更新するものであり、2016年度に設計を開始し、現在、2021年度末の納入に向けてBSGCでの現地調整試験を進めているところである。

このシステムへの要求は、これまでの観測運用の継続を

可能にし、かつ将来的な観測運用拡充を図るための研究開発に供する機能と性能の整備であり、開発方針として、これまでの観測運用に使用されてきた観測装置や冷却システムなどのハードウェアや、観測運用者によって継続的に整備・拡張されてきた観測計画立案や画像処理のためのソフトウェアといったレガシーを最大限活用するとともに、三菱電機の光学及び電波望遠鏡システムで培った設計資産や開発経験を適用することで応えることにした。レガシーを活用する上で必要な設計・製造上の制約への対応と、開発要素としてのデブリ観測特有の広視野光学系の採用や低軌道物体追尾用の高速駆動化がこのシステムの特徴になっている。



光学望遠鏡システム構成及び1m望遠鏡の全景

左の図は、1m望遠鏡を中心とした光学望遠鏡システムの主要構成を示す。1m望遠鏡は望遠鏡監視制御装置によって格納庫や観測装置とともに監視制御される。通常のスペースデブリ観測は、JAXA解析システムからの観測要求を基に立案した観測計画を望遠鏡監視制御装置に投入することで自動実行される。右の図が示す既設基礎構造上に設置される1m望遠鏡は、軽量化のためトラス構造を採用した。

1. ま え が き

当社がこれまでに開発を行った地上光学望遠鏡システムとしては、大型のすばる望遠鏡(口径8.3m)、TMT (Thirty Meter Telescope)(同30m、現在も開発中)、中型の赤外シミュレータ(同1.2m)、ぐんま天文台望遠鏡(同1.5m)、西はりま天文台なゆた望遠鏡(同2.0m)がある。今回の光学望遠鏡システムは、これらと比べると小口径ではあるが、SSA用途に特化した当社初の光学望遠鏡システムであり、また、既設望遠鏡の更新及びレガシーの活用という点でこれまでのシステムとは異なる開発要素及び制約条件もあり、その開発は決して容易なものではない。

本稿では、このシステムの位置付け・構成、及び特徴的な機能・性能とその実現方法について述べる。

2. 光学望遠鏡システムの位置付けと構成

2.1 光学望遠鏡のシステムの観測対象

更新前の光学望遠鏡システムの観測対象は、いわゆる地球を周回するスペースデブリや人工衛星といった静止軌道帯物体と、より遠方の地球に接近するおそれのある小惑星であり、これらの軌道決定のための位置測定、姿勢変化や形状把握のための光度変動(ライトカーブ)、物理的特徴を把握するためのフィルタ測光ほか、データベースにない未知物体のサーベイを行ってきた。更新後も継続してこれらを観測対象にしており、さらには低軌道物体も将来的な観測対象として追加されている。なお、小惑星観測はJAXA SSAシステムのミッション目標ではなく、他の研究要請によるものである。

2.2 他システムとの接続

光学望遠鏡システムはJAXA SSAシステム内で、茨城県つくば市に設置されている解析システムと接続する。解析システムは観測対象物体の軌道情報を含んだ観測要求を、日々光学望遠鏡システムに送信し、光学望遠鏡システム観測運用者はそれを基に天候や物体の可視条件を考慮して詳細な観測計画を立案する。観測計画に基づき光学望遠鏡システムを操作して取得した光学画像データは、画像処理によって精確な位置情報を持つ恒星カタログとマッチングされ、恒星以外の物体像の抽出とその位置が算出される。物体像の位置情報は解析システムに送信され、解析システムでは軌道を算出し、人工衛星及びスペースデブリのデータベースと照合して既知未知物体の判別を行い、既知であれば軌道を更新し、未知と判別された場合は光学望遠鏡シ

テムに対して追観測の要求を送信する。追観測要求に対しては、優先度に応じて日々の観測計画を組み換えて実施される。

JAXA SSAシステムは、上齋原(岡山県鏡野町)に設置される低軌道物体を観測対象とするレーダも含むが、光学望遠鏡システムとの直接的な接続はない。

また、JAXA SSAシステムは防衛省SSAシステムと接続しており、光学望遠鏡システムは防衛省の観測要求にも応じるものになっている。

2.3 光学望遠鏡システムの構成

光学望遠鏡システムは口径1m及び50cmの望遠鏡(以下、それぞれ“1m望遠鏡”“50cm望遠鏡”という。)各1台を持つ。後者については特に性能に影響を与える更新は行わないものとしたため、本稿では前者の口径1mの望遠鏡について述べる。

要旨の図に1m望遠鏡を中心とするシステム構成を示した。データ共有領域は他システムとインタフェースする領域であり、他システムからの観測要求及び望遠鏡で取得した観測画像データや解析結果を保存する。観測計画立案装置は観測条件を考慮した上で観測計画を立案するツールを提供し、データ解析装置は2.2節で述べた画像処理を行うものである。格納庫内に位置する1m望遠鏡は望遠鏡監視制御装置によって格納庫や観測装置とともに監視制御される。なお、要旨の図の“主鏡”から“観測装置”の縦の並びは光路に沿った光学系構成品の並びである。

3. 特徴的な機能・性能とその実現

3.1 検出限界等級と位置測定精度

静止軌道帯物体観測に対する総合的な性能要求として、規定の条件の下で、18等級以上の検出限界等級が要求されている。これらは更新前の望遠鏡で得られた性能に基づいて設定されており、18等級に相当する静止軌道帯のスペースデブリの大きさは、その形状や反射率、光源になる太陽との位置関係にもよるが、直径30cm程度である。位置測定精度としては、光学画像データに映り込んでいる恒星位置を基に、1秒角RMS(Root Mean Square)以下が要求されている。

3.2 広視野光学系

未知のスペースデブリや小惑星のサーベイには広い視野が有利である。更新前の望遠鏡の光学系でも広視野が実現されており、観測装置もその視野を生かすため4枚の大型CCD(Charge Coupled Device)素子がモザイク状に配

置されている。更新に当たって観測装置は流用するものとし、またそれに従って、光学系の構成は更新前の光学設計をベースとした上で、硝材の入手性や構造上の制約による見直しを行った。

図1に光学系配置図を示す。凹面鏡である主鏡と凸面鏡である副鏡、それに4枚のレンズからなる補正光学系で構成されるカセグレン光学系である。光学性能を示すスポットダイアグラムは、設計計算上では、焦点位置の視野中心で0.37秒角RMS半径、視野から1.5度離れた位置で0.48秒角RMS半径になる。広い視野にわたって高い結像性能は得られるものの、主鏡と焦点位置のバックフォーカス長が短く、これは主鏡支持方式の選定や3.3節で述べる経緯台式架台化での構造上の制約になった。

図2に主鏡の支持構造を示す。当社実績のある鏡の支持方式には、てこを使った力支持方式やアクチュエータによる能動支持方式があるが、主鏡支持方式には、焦点位置に位置する観測装置と干渉しない、省スペース化が可能な支持方式として、更新前望遠鏡と同様のウィップルツリー支持方式を採用した。ウィップルツリー支持方式は望遠鏡構造から幾重に枝分かれした構造を用いて、鏡を多点で等分の力で支持する方式である。支持点は主鏡の下面18点と

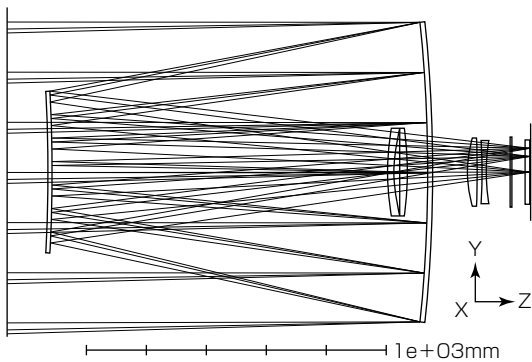


図1. 1m望遠鏡の光学系配置図

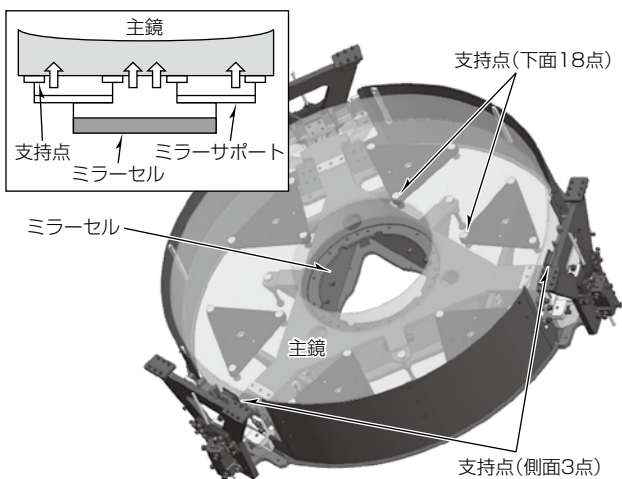


図2. 1m望遠鏡の主鏡支持構造

側面3点で構成され、過拘束を避けるように、側面で鏡平面方向と光軸周りの回転の3自由度、下面で光軸方向と光軸周り以外の回転の3自由度を拘束するものにした。また、支持位置の最適化やバイポッドの採用によって、支持反力や熱による鏡の変形を最大限抑制した。

3.3 経緯台式架台

更新前の望遠鏡の架台は1m望遠鏡、50cm望遠鏡ともフォーク式赤道儀である。赤道儀の場合、天の北極付近を通過する物体の追尾観測には極軸に対して大きな回転速度が必要であり、極軸が持つ回転速度で、その追尾観測は制限される。また、将来的な観測運用拡張として、複数の観測装置の切替えや大型の観測装置の使用が考えられるが、更新前架台が持つカセグレン焦点一つだけでは対応が難しい。

この二つの問題点の解として、1m望遠鏡には経緯台式架台を採用することにした。AZ/EL(AZimuth/ELevation)の駆動軸を持つ経緯台式架台では、天頂を通過する物体を追尾するには無限大のAZ軸回転速度が必要になるが、赤道儀式のままとする50cm望遠鏡と組み合わせることによって、システム全体としての追尾不可領域が縮小されることになる。また、経緯台式架台の場合、EL駆動軸を支持するヨーク構造にナスマス焦点用の観測装置設置スペースを設定するのが容易である。

1m望遠鏡架台の経緯台式化を実現するに当たり、二つの難点があった。一つは望遠鏡架台とインタフェースする基礎構造の強度に関する安全性のリスクであり、もう一つはバックフォーカス長の制約による狭小な空間に、観測装置を回転させる機構、すなわちインストゥルメントローターと、観測装置上に位置するフィルタ交換機構とシャッター機構を配置するという構造上の問題である。

図3に基礎構造を含めた1m望遠鏡の外観を示す。更新前望遠鏡の架台はフォーク式赤道儀であったため、格納庫

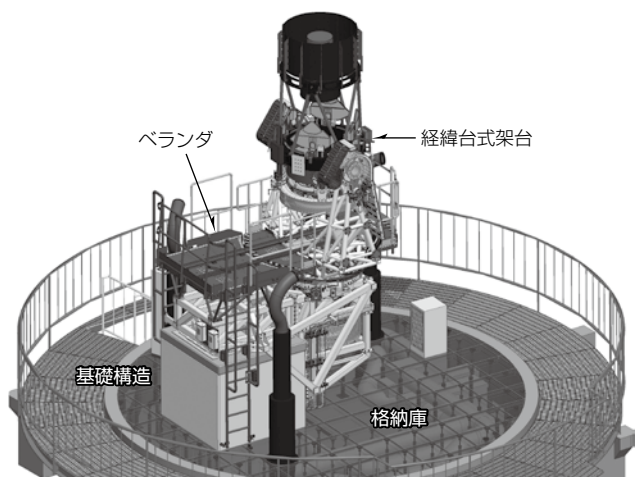


図3. 1m望遠鏡

(ドーム)の回転中心からオフセットした位置に基礎構造が位置しており、この基礎上に経緯台式架台を構成するためには、片持ちのベースフレームを設置する必要がある。最終的には建設当時の資料に立ち戻り、基礎構造の安全性がJAXAから示されたが、基本設計時点では資料の図面と実物の寸法の相違が明らかになるなど、リスクが残存している状況であったことから、精密な測量、X線による配筋調査、特性把握のための有限要素解析のほか、望遠鏡構造の軽量化設計によるリスク低減策を実施した。具体的な軽量化には、架台部のトラス構造化のほか、方位軸旋回軸受への軽量のRガイド採用、駆動方式としてダイレクトドライブを採用することによる部品削減がある。これらによって、基礎の耐荷重条件10トンに対して望遠鏡質量は5トンになり、十分な安全余裕を確保した。また、保守用足場として、基礎構造部とベースフレームの上部にベランガを設置することで、保守作業の作業性向上とドーム内空間の有効活用を図った。

図4にカセグレン焦点部の拡大図を示す。主鏡と観測装置間の狭小なスペースに、インストルメントローテーター、フィルタ交換機構、シャッター機構が配置されているのが分かる。また、観測装置への電源供給や信号送受のためのケーブルや観測装置冷却システムへHe(ヘリウム)ガスを供給するためのフレキシブルチューブを、回転に伴う過度な曲げや振(ねじ)れを発生させずに保持するための巻き取り機構もコンパクトに配置されている。

なお、インストルメントローテーターとは、赤道儀式架台とは異なり経緯台式架台で発生する指向方向に応じた視野回転を補正するための機構であり、空間的分布を持つ天体等を長時間露光する際等に、フィルタ交換機構と観測装置をこの視野回転を補正する方向に回転させる。この回転補正には、デブリ等の位置測定は恒星位置との比較で行われるため、画像上の赤経・赤緯方向が既知であり、また一定である方が観測画像内恒星像の恒星カタログ位置とのマッチングが容易になるという側面からの要請もある。ま

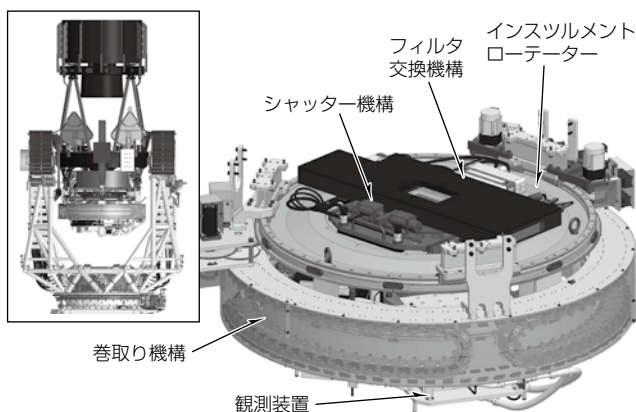


図4. カセグレン焦点部

た、他の望遠鏡にない回転補正モードとして、物体追尾中にその物体の進行方向を一方向に保つ、すなわち、望遠鏡指向方向変化に伴う物体像の回転を補正するモードも備えている。このモードはCCDのTDI(Time Delay Integration, 電荷を転送しながら露光を行う)を利用した物体の短周期の光度変動測定や低軌道衛星の撮像に利用可能である。

3.4 高速駆動と高精度指向・追尾

JAXAミッション及び政府要求にある将来の研究開発業務への光学望遠鏡システムの対応の一つとして、低軌道物体の観測を可能にする高速追尾機能の1m望遠鏡への導入がある。具体的には、レーダとの協調観測を想定した高度200kmかつ最大仰角70度の円軌道物体を追尾可能にする駆動性能が要求されている。また、指向・追尾精度の要求仕様値はそれぞれ、5秒角RMS以下、追尾速度15秒角/秒での10分間で1秒角RMS以下であり、他の中型望遠鏡と同等の高い精度が要求されている。

3.3節に述べたダイレクトドライブの採用は、高速駆動要求に十分なAZ/EL軸の角速度として、それぞれ6.5度角/秒、1.5度角/秒を持ち、かつ低速での高精度追尾要求に応じた摩擦変動の少ない駆動系の実現につながっている。高精度追尾に必要な高周波領域での機械共振成分の抑圧と制御帯域の確保は、この駆動系用に新規設計した速度制御ループ内の高次フィルタで行う。

指向精度要求は器差補正機能で満足する。この機能は、望遠鏡構造の重力変形や軸受の傾きなど、望遠鏡姿変化に伴った再現性のある指向誤差を、角度指令値に補正值を付加することで補正するものである。当社の光学及び電波望遠鏡では補正值算出式はほぼ共通化されており、恒星や電波源を使ったポインティングアナリシスで補正係数を決定し、その補正係数を用いた補正で十分な精度を得られている。しかし、この1m望遠鏡では片持ちとなるベースフレームの撓(たわ)み、複数のRガイドで構成された軸受による複雑な傾斜変化などが予測されたこともあり、ポインティングアナリシスに先立って、望遠鏡に設置した傾斜計で姿勢変化に伴う傾斜変化を高い分解能・精度で測定して指向誤差に変換した上で、それらを表現し得る、より適切な1m望遠鏡固有の補正值算出式を求めて設定している。

4. む す び

JAXA向け宇宙状況把握用の光学望遠鏡システム、及び特徴的な機能とその実現方法について述べた。1m望遠鏡本体は2020年度中に完成し、他システムとのインタフェース部と一部の装置、また、その接続試験については2021年度に完成及び実施する予定である。