

OAOWFC の無人観測

○柳澤顕史（岡山天体物理観測所）

概要

岡山天体物理観測所の 91cm 反射望遠鏡を広視野赤外線カメラに改造して、2 年半余り無人で自動観測をしている。この無人観測を支えるのは、自動天候判断と、自動焦点調節機能、そしてハードウェアの協調動作を実施する仕組みである。

1. はじめに

岡山天体物理観測所の 91cm 反射望遠鏡は、1959 年に日本光学(現 : Nikon)によって製作された国産初の 1 メートル級の望遠鏡である。この望遠鏡は、主として可視測光や可視分光観測に多用され成果をあげてきたが、我々赤外屋にとっては、我が国初の近赤外線観測が行われた記念すべき望遠鏡でもある。

この望遠鏡を世界で 2 番目の視野をもつ広視野近赤外 (0.9-2.5 μm , Y,J,H,Ks-band) カメラ OAOWFC: Okayama Astrophysical Observatory Wide Field Camera に改造した。光学系はフォワードカセグレンと準シュミット光学系を組み合わせた様式を採用しており、最終口径比は $f/2.5$ と近赤外では世界で最も早い光学系の一つである。焦点には HAWAII (HgCdTe 1K \times 1K) を設置しており、 $0.48 \times 0.48 \text{ sq.deg.}$ の視野を 1.67 arcsec/pix の画素分解能で撮像できる。

この望遠鏡は、変光星探査に基づく銀河系円盤構造の研究を目的として改造された。これまでの 2 年半ほどの期間で銀河系内側方向 30 平方度の銀河面 ($|b| < 1$) を Ks-band で繰り返しモニタ観測した結果、90 個程度のセファイド型変光星候補を見つけることに成功した。これらの候補星の 9 割は Gaia 衛星 (可視光で観測) では見えていない。言い換えると、近赤外線波長域で観測することで初めて見えてきた天体が殆どを占めている。また、OAOWFC のような無人近赤外ロボット望遠鏡は未だに少なく、おそらく OAOWFC は、MAGNUM, REM に続いて史上 3 例目であり、広視野の特徴をもつのは OAOWFC のみである。つまり、北天の銀河面を近赤外でモニタサーベイできる装置は OAOWFC の他にはないので、今後もエリアを拡張し、広域のセファイド分布を明らかにしたい。

ロボット望遠鏡のすることは単純で、観測に適した気象条件であれば観測データを取得し、雨が降りそうならドームシャッターを閉めて休む。また、ピント調節を自動で行えばよい。前者は主として中間赤外雲モニタ、後者はオートフォーカス機能により実現できる。そして、望遠鏡、ドーム、撮像装置などの制御要素を、協調動作させる仕組みをつくり、永続化させることも重要である。以下、中間赤外雲モニタ、オートフォーカス機構、そして機器の協調動作の仕組みについて記述する。

2. 中間赤外線雲モニタによる天候判断

木曾観測所における自動観測と同様、天候判断には中間赤外線雲モニタを使用している。当観測所では Boltwood Cloud Sensor II (米国 Diffraction Limited 社製品 : 図 1 参照) を使用している。この製品は、単素子(8~12 μm)のセンサを 2 個内蔵しており、地上放射温度に対する空の放射温度を相対値で出力する。図にスカイモニタ画像と対応する Tsky を示した。雲量に応じて Tsky が変化する様子が判る。雨を降らせるような雲は、地上からそう高くなくところにあり暖かい。よって、地

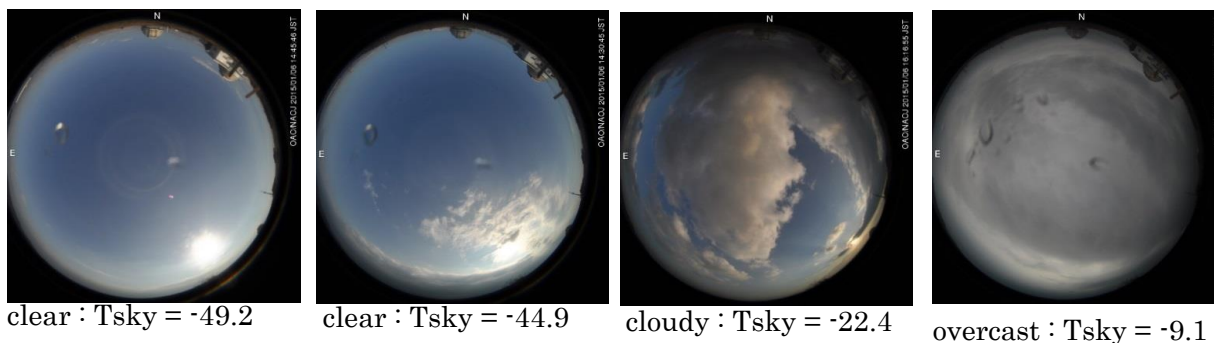


図 1 : スカイモニタ画像と、BWCSII が計測した Tsky.

上温度に対する空の温度差は小さくなり、Tsky が大きくなる。そこで、Tsky に適切な閾値を設けることにより、曇っているかどうかを判断することができる。OAO WFC は Tsky が -15 度より大きくなったらドームシャッターを閉じて観測を停止している。

3. オートフォーカス機構

オートフォーカス機構は、鏡筒の伸縮計測に基づく副鏡位置のフィードバック機構と、二次的なフォーカスずれを計測してフィードバックする 2 段階構成で実現している。

まず、望遠鏡鏡筒の伸縮を計測し、主鏡と副鏡の距離を一定に保つ仕組みを実現するために距離原器を用意し鏡筒に平行に設置した (図 2 参照)。距離原器は、低膨張ガラス (クリアセラム) の棒で、長さは 3,200mm である。この長さは、主鏡-副鏡間の規定距離と同じで、気温が 40 度変化しても伸縮はわずか 4μm である。一方、鏡筒 (材質は炭素鋼) は年に 1.3mm 程度伸縮し、一日でも 0.2mm 程度の変化を起こす。距離原器は、下側端面を主鏡凹面の頂点と一致するように取り付けられている。鏡筒側のトップエンドには非接触のレーザー変位センサ (計測精度 1μm) が取り付けられており、距離原器の上側端面との距離変化をモニタしている。この仕組みにより、距離原器に対する鏡筒の伸縮が定量的に評価できて、副鏡位置を鏡筒が伸びただけ副鏡を主鏡に近づけることで、オートフォーカスが実現できる。

運用したところ、本オートフォーカス機構は期待通りに機能していることが確認できたが、完全なるピント調整はできないことが判った。おそらく、気温変化に伴い主鏡 (材質パイレックス) 形状が変化して焦点距離が変化することや、常温部にあるフィールドレンズの、主鏡・副鏡に対する相対位置が変化することが原因であると思われる。幸か不幸か OAO WFC には主鏡に起因する非点収差があり、焦点位置を挟んで星像の伸びる方向が変化する。この星像の伸びの位置角とフォーカスずれには一意の関係がある。そこで、定期的 (現在は 10 分おき) に画像を解析して星像の位置角を評価して、フォーカスずれを算出し、そのずれ量を副鏡位置にフィードバックしている。こうして、平均的には星像の FWHM を 2.5 画素から 3 画素に制御できている。

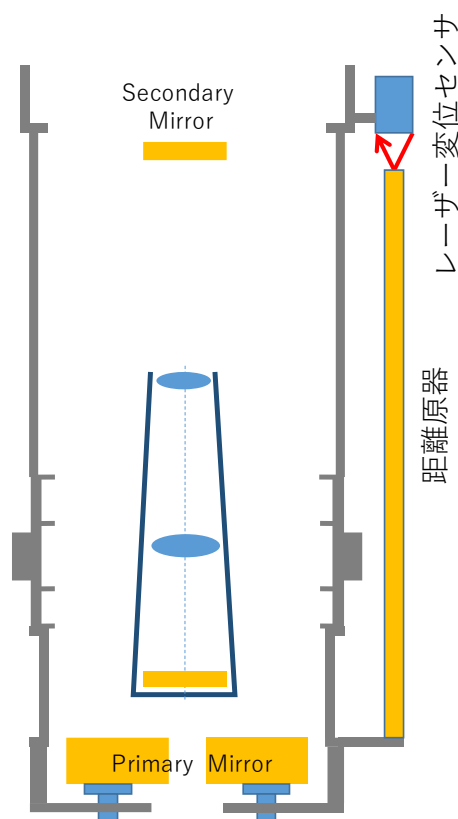


図 2 : 鏡筒に並行に設置した距離原器と変位センサで測る鏡筒の伸縮

4. ソフトウェアによる統合制御

OAOWFC の無人制御を実現する仕組みの肝は、ハードウェアの分散制御と、ソフトウェアによる並列制御にある。ここではハードウェア構成を概観し、ソフトウェアの仕組みについて解説する。

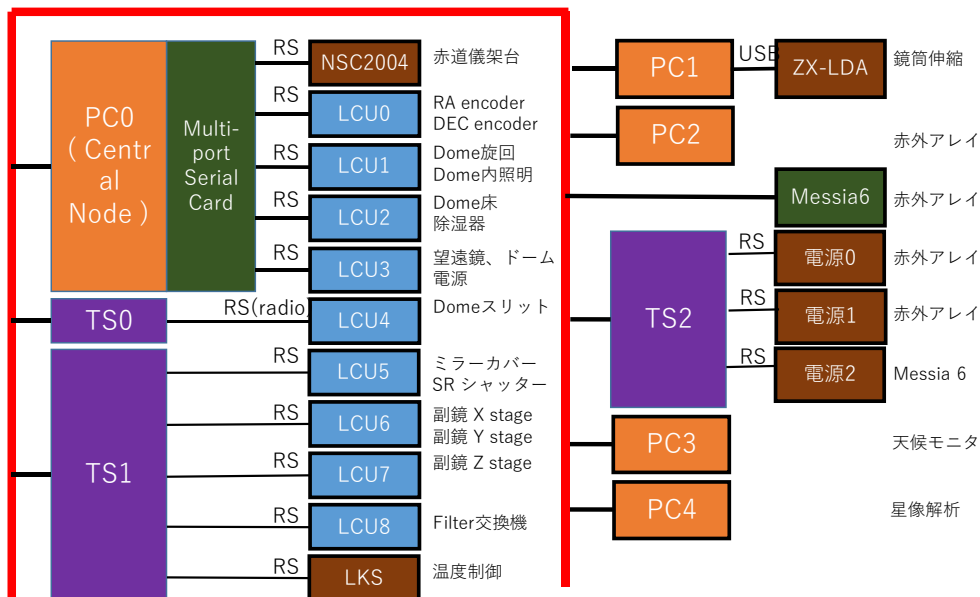


図3 : OAOWFC のハードウェアブロックダイアグラム。すべての機器は、LAN でつながっている。

ハードウェア構成は分散制御を念頭に設計した。分散制御とは、構成要素ごとにコントローラを割り当て、それぞれのコントローラをネットワーク接続し、相互に通信しあう制御の様式である。図3は、OAOWFC のハードウェア・ブロック図である。OAOWFC の制御要素は、赤道儀架台、副鏡 XYZ ステージ、ドームシャッター、ドーム旋回装置、鏡筒伸縮計測装置、赤外アレイなど、全部で 14 あり、それぞれにコントローラが割り当てられている。コントローラには PC の他に、LCU# とラベルされたものがある。LCU とは Local Control Unit の略であり、その実体は岡山天体物理観測所で設計・製作されたワンチップ・マイコン (H8) ボード (通称: 清水ボード) である。このボードは、シリアル (RS232C) 通信機能と、約 50 の I/O を備えている。よって、接続されているエンコーダの読み取りやスイッチ類のステータスの読み込み、さらには各種モーターの制御や、スイッチの切り替え制御をコマンドにて実現できる。TS# とラベルされた機器は Terminal Server であり、TCP/IP とシリアル通信 (RS232C) の変換を行う機能をもつ。以上の構成により、すべてのコントローラは LAN に接続され、計算機からステータスの把握と制御が可能となっている。

分散制御を実現するのに必要なソフトウェア ContWFC は、スクリプト言語 Ruby にて記述した。Ruby は、まつもとゆきひろ氏が開発したオブジェクト指向言語である。Ruby を採用した理由は主に二つある。一つ目は、柔軟で表現力に富んでいるからである。この性質により、コード行数が少なく済むため、開発時間が短縮され、容易なメンテナンスが実現される。二つ目は、機器の非同期制御を実現するために役立つ、並列処理のクラス・ライブラリ Rinda を標準的にサポートしているからである。

Rinda は、タプルスペースと呼ばれる分散共有メモリに、タプルと呼ばれるデータを読み書きすることで並列制御を実現する環境を提供する。例えるならば、タプルスペースはネットワーク・アクセス可能な掲示板である。この掲示板には、様々な情報 (タプル) が書き込まれており、その掲示板を見に来た人 (プロセス) は誰でもすべてのタプルを見ることができ、またタプルを書き込むことが可能である。掲示板には管理人がいて、指定の期限 (通常 60 秒) を過ぎたタプルは消去される。

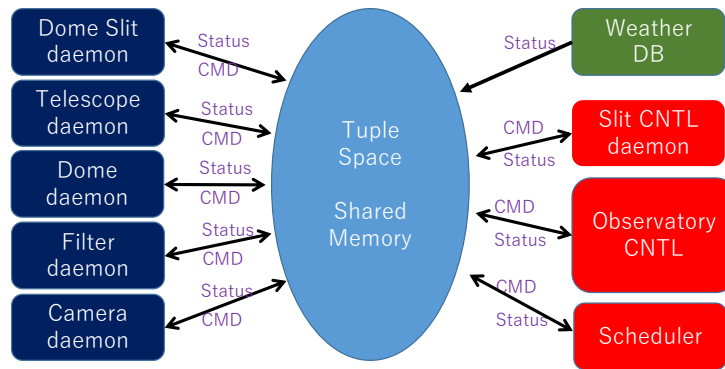


図4：ソフトウェア構造。すべての情報（ステータス、コマンドなど）はタプルスペースを介してやり取りをする。常駐する専用プロセスは Linux ではデーモン(daemon)と称される。

また、セキュリティ維持の観点から、管理人は掲示板にアクセス可能な人を限定することもできる。こうすることで、安全で大きな混乱なくメッセージの交換ができる環境が整えられている。

ContWFC は、Rinda の提供するタプルスペースでメッセージ交換をすることにより、各コントローラの協調動作を行っている。先ほどの例で、掲示板を見に来る人々の実体は、コントローラとの通信を媒介するプロセス達である。プロセスはタプルスペースを見張っていて、自分宛ての命令が来たら、その内容をコントローラに連絡して実行させ、結果を聞いてタプルスペースに書き込む作業を実施するほか、定期的にコントローラにステータスを問い合わせ、その返答をタプルスペースに書き込むことにより、そのステータスを必要とするほかのプロセスに周知をする。また、気象装置のように出力一辺倒の機器については、ステータスを書き込むのみである。

図4は、タプルスペースと、コントローラとの通信を媒介するプロセス群の関係を模式的に描いたソフトウェア・ブロック図である。協調動作は次のように行われる。例えば、ドームシャッターの動作を決める Slit CNTL daemon は Weather DB からの入力をモニタし、雲が厚くなったらシャッターを閉め、天候が回復したら開ける操作をする。画像データする際は、次のようになる。Scheduler が天体の位置情報、データ取得方法を指定したキュー（タプル）を投げる。Observatory CNTL は、キューを受け取り観測が可能と判断すれば、ドーム旋回装置にスリットの方角を指令、赤道儀架台に姿勢を指令する。両者からの終了メッセージ（タプル）を受けたら、今度は Camera daemon に撮像を指示する。終了のメッセージを受けたら、Scheduler に終了通知のメッセージを送る。通知を受けた Scheduler は、次の観測キューをタプルスペースに投げることで、観測が続いてゆく。ContWFC では、常に 300 程度のタプルが存在するが、これらの通信に伴う遅延が観測効率に与える影響は、赤外アレイの読出しオーバーヘッドと比較すると微小である。Rinda が提供する協調の仕組みは、コーディングの観点からも有益である。各プロセスのコードは互いに依存度の少ない疎結合の関係にある。インターフェースの仕様をきっちり決めれば、バグが入りにくく、保守がしやすい。また必要に応じて機器を付け加えることも容易であり、拡張性も高い。

タプルスペースを提供するプロセスや、コントローラとの通信を媒介するプロセス群、さらに制御をおこなう Scheduler や CNTL プロセス達は、計算機内に常駐している。こうした常駐プロセスはデーモンと呼ばれる。これらデーモンの死活監視を行い永続化させる役割は、プロセス監視デーモン Monit が担っている。おかげで ContWFC は常に正気が保たれている。

5. まとめ

OAOWFC は世界で 2 番目に視野の広い広視野赤外線カメラで、大過なく無人で観測を実施している。無人観測は、天候判断機能と自動頂点調節機能、さらに機器類の協調動作を実現するソフトウェアによって実現されている。そのソフトウェアの中核は Ruby/Rinda が担っている。