

宇宙の観測と技術

第8章 望遠鏡とメカトロ

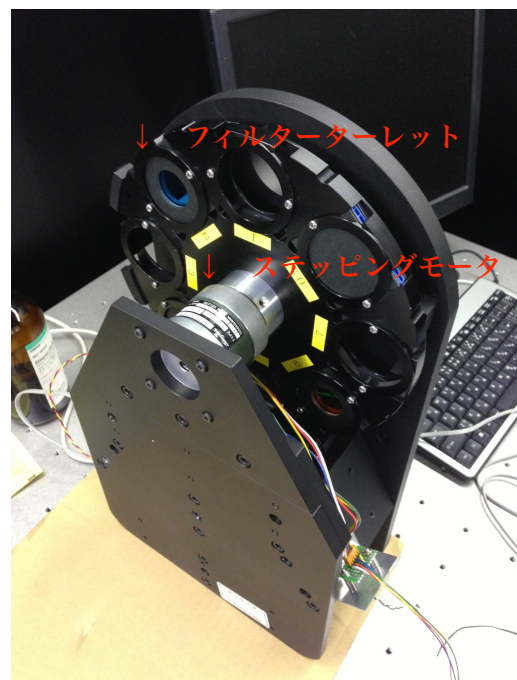
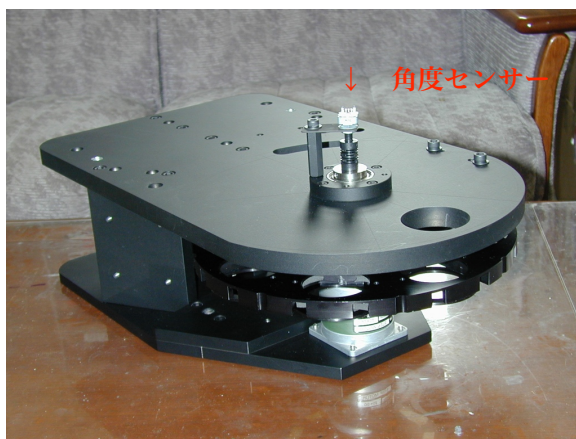
19. メカトロとは何か

メカトロニクス（メカトロ）とは機械工学（mechanics）と電子工学（electronics）を合体させた和製英語（造語）である。今や身の回りの家電製品、自動車、情報機器に至るまでメカトロニクスで成り立っていると言って良い。

19-1. 基本的メカトロの実例「VTOS のフィルター交換機構の開発」

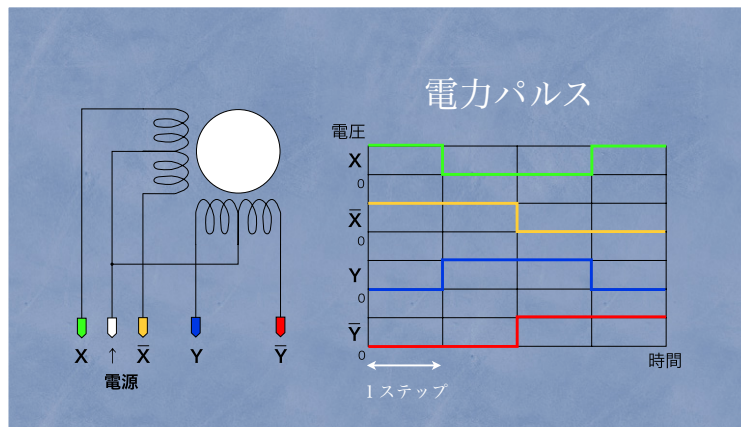
メカトロニクスの簡単な例はモーター制御である。ここでは筆者が研究に使用している観測装置 VTOS に組み込んだフィルター交換機構の開発を例に解説していく。VTOS という観測装置がどういうものかについては、ここでは置いておくとして、まずフィルター交換機構について説明しておく。フィルム式カメラのカラーフィルムと異なり、デジタルカメラの半導体撮像素子は原理的に色情報を記録しない白黒フィルムに相当する。デジタルカメラでカラー画像を得るには撮像素子の前に3原色のフィルターを代わる代わる入れ替えて、それぞれの色の白黒画像を取得し計算機上で原色をつけて、カラー画像を合成する必要がある。天体観測ではカラー画像を得る他にも、特定の波長で天体がどのように見えるのかも大切な問題であり、観測装置にはカメラ直前でフィルターを入れ替える機構が必要になる。

下の写真は VTOS のフィルター交換機構のメカであるが、要するにフィルターを複数仕込んだターレットをカメラの前で回転させる機械である。どのフィルターがカメラの前に位置しているかは角度センサーを使って判断する。

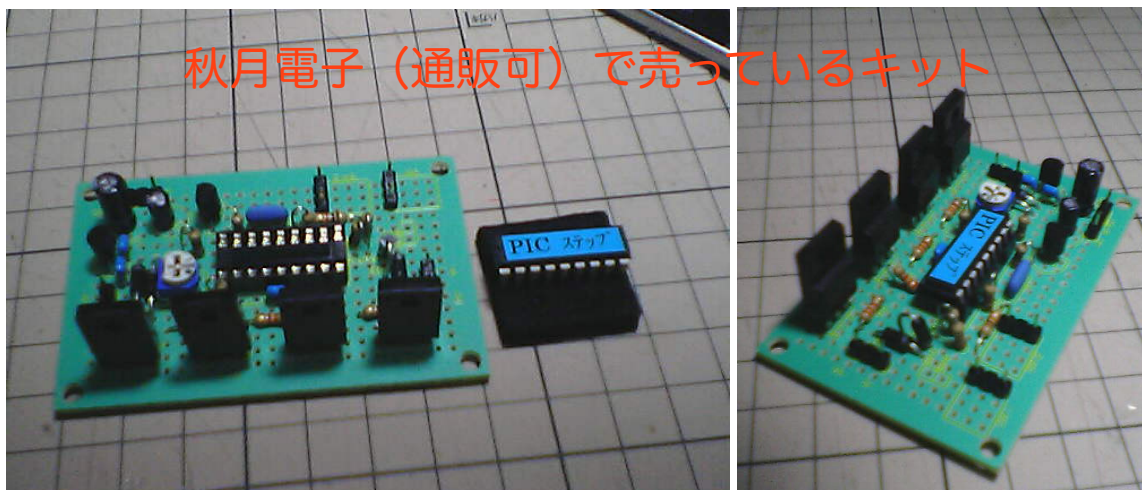


19-2. ステッピングモーターの回し方

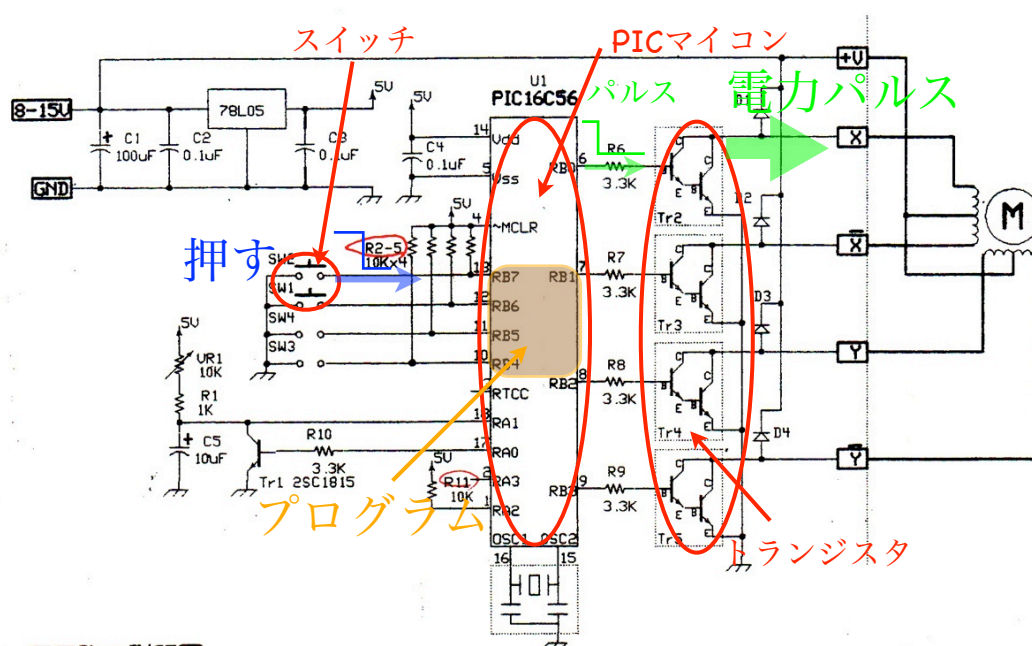
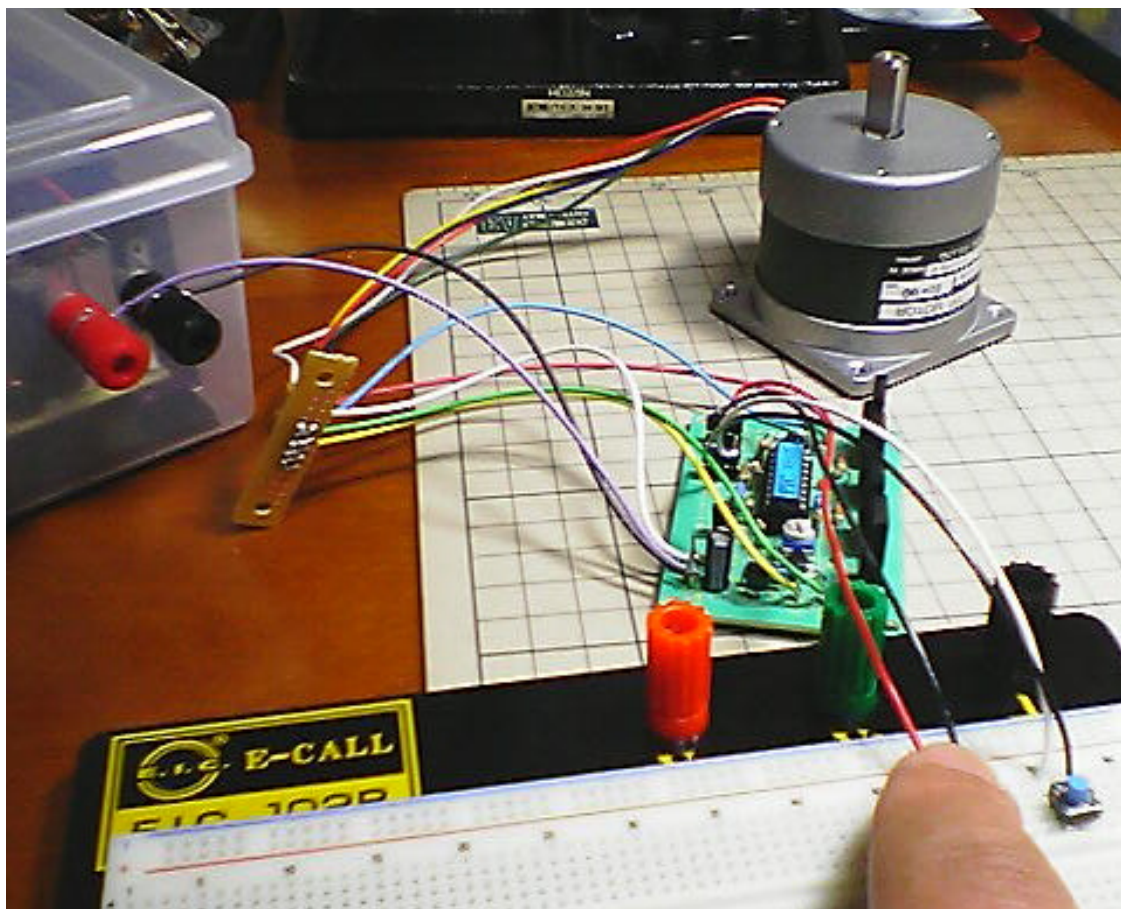
フィルターターレットを回転させる動力はモーターである。モーターと言っても「DC モーター」、「AC モーター」、「ステッピングモーター」、「サーボモーター」など大まかに言っても4種類存在する。それぞれのモーター毎に特徴があり、用途に合わせて適切なモーターを選ぶ必要がある。モーターの回し方も種類によって異なる。フィルター交換機構の駆動モーターとしてステッピングモーターを選択した。ステッピングモーターにも幾つかの形式があるが、ここで選択した“二相ユニポーラー型”ステッピングモーターの場合、モーターを駆動するには下図のように各配線に駆動パルスを送れば良い。



このステッピングモーターは決まった配線に位相をズラしたパルスを1ステップ分入力すると決まった角度（1ステップ）だけ回転する。ステップ角は非常に正確でトルクも大きいので比較的大きな機械の位置制御に便利である。ただし高速回転には向かない。モーターを駆動する電力やパルスを送出する回路のことをモータードライバ（下写真）という。



安価かつ製作が容易な秋月電子のステッピングモータードライバキットであるが、二つのスイッチを使って正転・逆転の制御が可能である。



■回路の説明■

このモータードライバの回路は非常に簡単である。それは PIC マイコンと呼ばれるプロセッサを使ってステッピングモータを動かすパルスを実ウェア的に発生させているからである。

(PIC) マイコンとはマイクロ・コントローラの略で、基本的にデジタル入力端子と出力端子を持ち、各端子の入力「0V または 5V の電圧」を 2 進数の 0 または 1 と捉える。マイコンには整数演算や条件分岐（判断）を使ったプログラムが可能なプロセッサが搭載されており、入力端子の状況に応じて、プログラムされた信号を出力端子から「0V または 5V の電圧」として発生させることができる。

このモータードライバ回路にはマイコンの入力端子のうち二つにスイッチ（正転用、逆転用）が設けてある。どちらかが押し下げられると入力端子の電圧が 5V→0V に変化する。正転に対応する入力端子が 0V になると、その間、4 つの出力端子はモータを正転させるパルス（0V-5V）を出し続ける（マイコン上のプログラムで定義）。マイコンからの出力電圧 5V ではモータを動作させることはできないので、出力パルスはトランジスタを使って増幅され、ステッピングモータの配線へ電力パルスとして供給される。

19-3. PIC マイコン

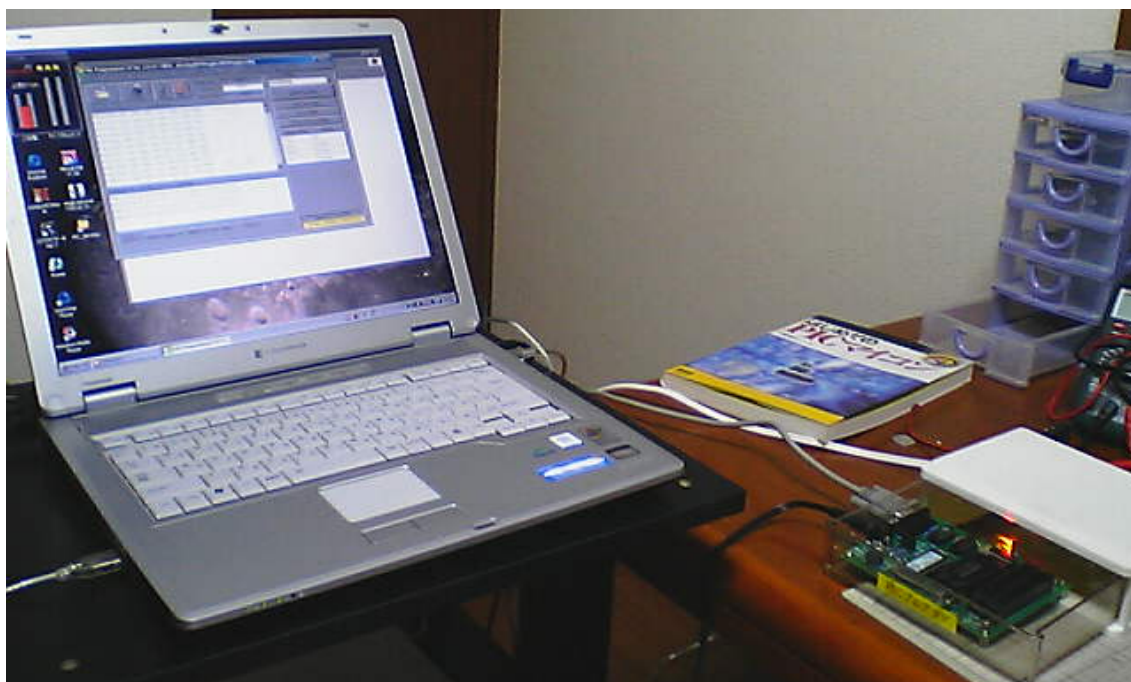
PIC マイコンの“PIC”とは“Peripheral Interface Controller”すなわち「周辺機器接続制御用 IC」のことである。実は PIC はマイクロチップ・テクノロジー社の商標であり、一般的にはマイコン（マイクロ・コントローラ）と呼ばれる。



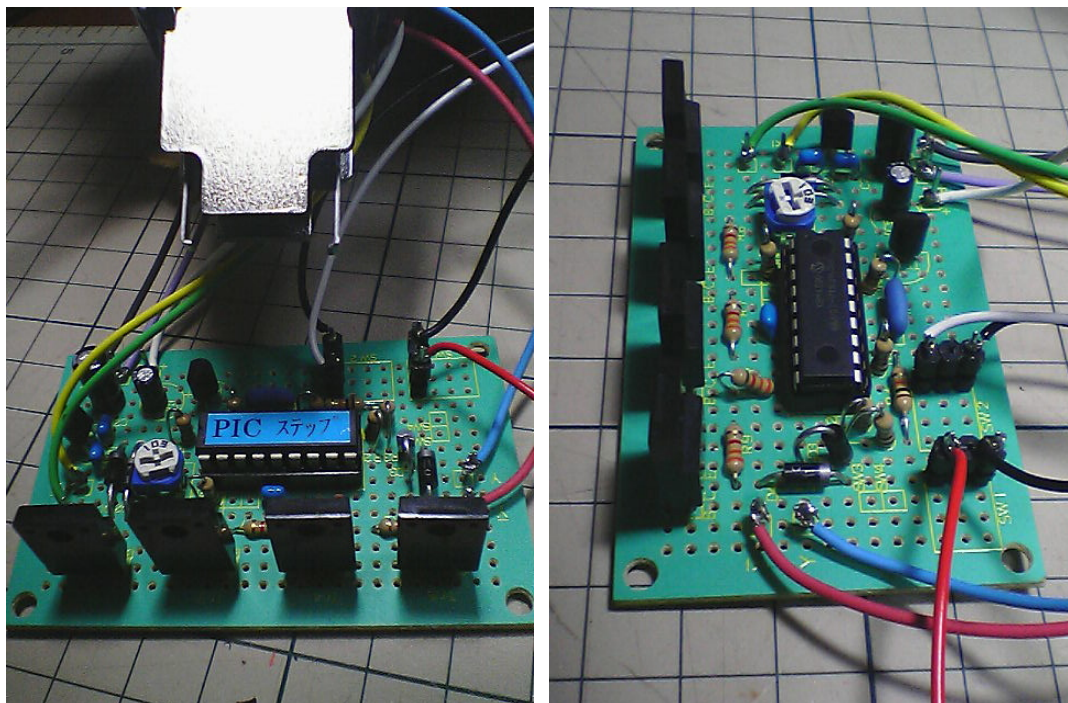
入力・出力のピン数、プロセッサの能力、便利な付帯機能（USB やシリアルポー

ト) など多くの種類から適切なものを選ぶことができる。マイコンの動作を決めるプログラムはマイコン上の ROM (読み出し専用メモリ: 書き換え不可) や EEPROM (書き換え可能の読み出し専用メモリ) に格納する。

プログラムの開発とマイコンへの書き込みは、それぞれ製造メーカーより提供されているプログラミング環境や書き込み機器、あるいは対応品を用意することによって自由に行うことができる。例えば先ほどのステッピングモーターのドライバ回路の場合、できるのは連続的な正転か逆転のみで角度制御を行うには機能的に不備がある。しかしプログラム書き換え可能な互換性のある (ピンコンパチ) 別型番のマイコンを購入し、



パソコンを使って開発したプログラムを書き込み、キット付属のマイコンと交換することで自分の用途にあった機能に変更することができる。



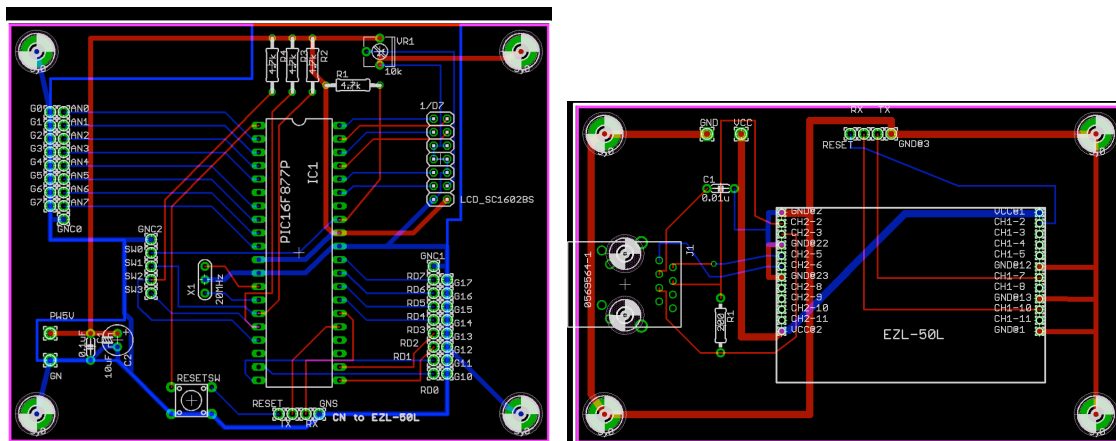
フィルター交換機構ではスイッチを1回押すと正転または逆転方向に1ステップ分だけパルスを出力するように変更した。スイッチを決まった回数押すことで「ステップ角×回数」の決まった角度を回転させることができる。

19-4. PICマイコンを使った汎用コントローラ

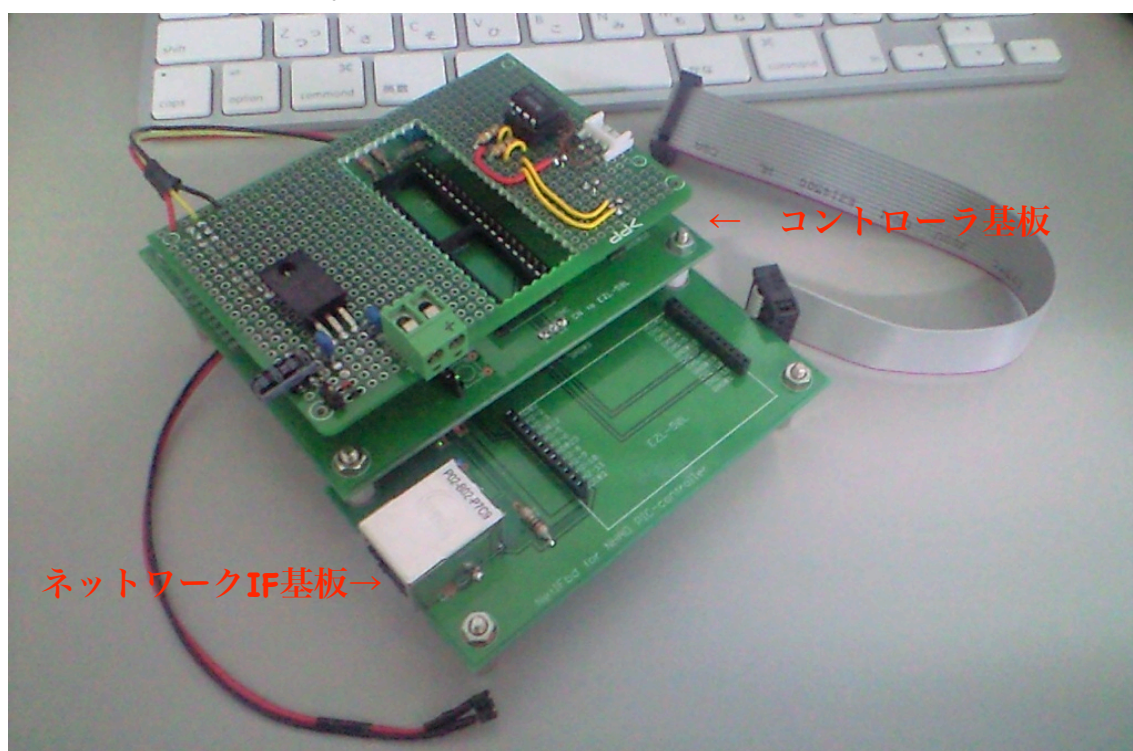
フィルター交換機構に限らずメカトロ機器にはメカの非常に複雑かつ微妙な調整・動作を司る頭脳が必要である。それにはパソコンなど演算能力が要求される場合もあるが、メカトロ機器にはサイズ制限もありパソコンを使うことは望ましくない。またプログラミングに関しても機器制御以外にOSやパソコンの規格や機能についての知識を習得したり考慮したりする必要があるため、目的達成に対して非常に遠回りになることが多い。マイコンには演算能力やパソコンとのインタフェースなど用途に応じて実用的な機能を選べるだけのラインナップがある。またOSがないためプログラミングに必要な知識習得も最小限で済むという利点がある。

よほど高度かつ複雑な制御を必要とするメカトロでない限り、上位モデルのマイコンを使えばメカトロ機器として十分な司令塔（汎用コントローラ）に仕

立てることができる。下図はフィルター交換機構を制御するために開発した PIC16F877 というマイコンを使用した汎用コントローラと、それをパソコンと通信して遠隔操作するためのネットワーク基板である。



最近では自分で回路を設計したプリント基板を個人で発注・製作することもできるようになってきた。

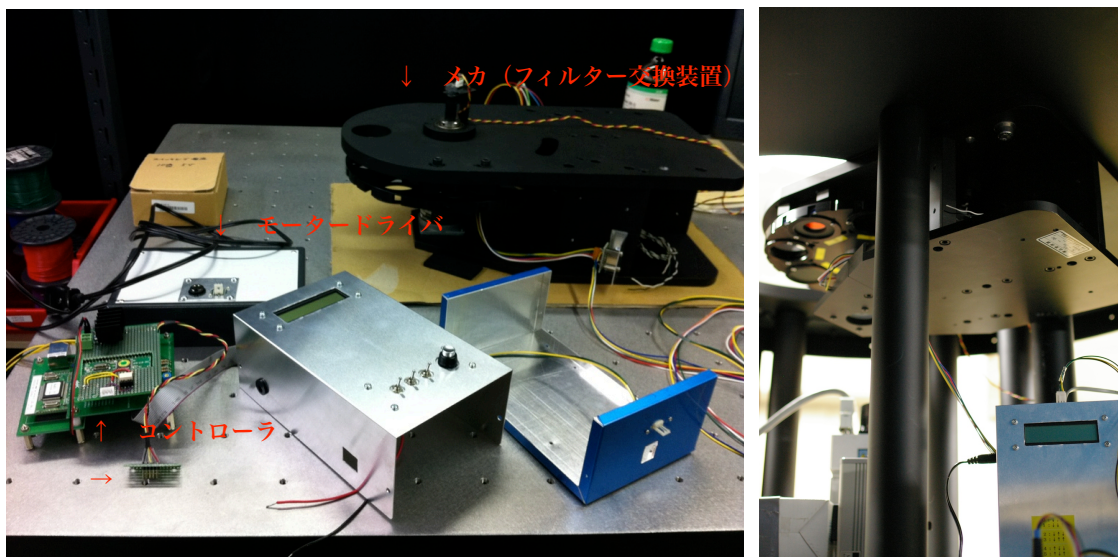


この写真は完成した汎用コントロール基板とネットワーク基板を組み立てたところである。コントローラ基板の上にユニバーサル基板が被せてあるが、この基板の上にコントローラを動かす電源回路、モータードライバの正転・逆転スイッチを ON/OFF するインタフェース回路（フォトカプラを使って絶縁）、角度

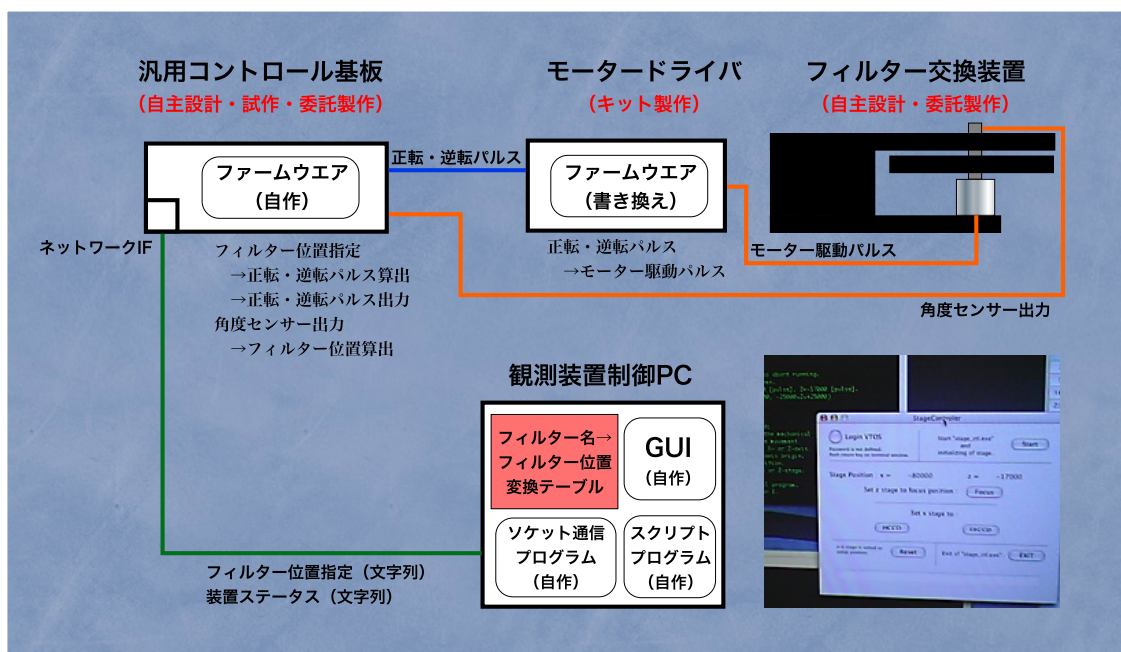
センサーを繋ぐ配線などが配置されている。

19-5. フィルター交換機構のシステム構成

フィルター交換機構のメカ、モータードライバ（箱入り）、コントローラ（箱入れ直前）の各要素を並べたのが下の写真（左）である。全てを組み立てて観測装置に搭載した状態が下の写真（右）になる。

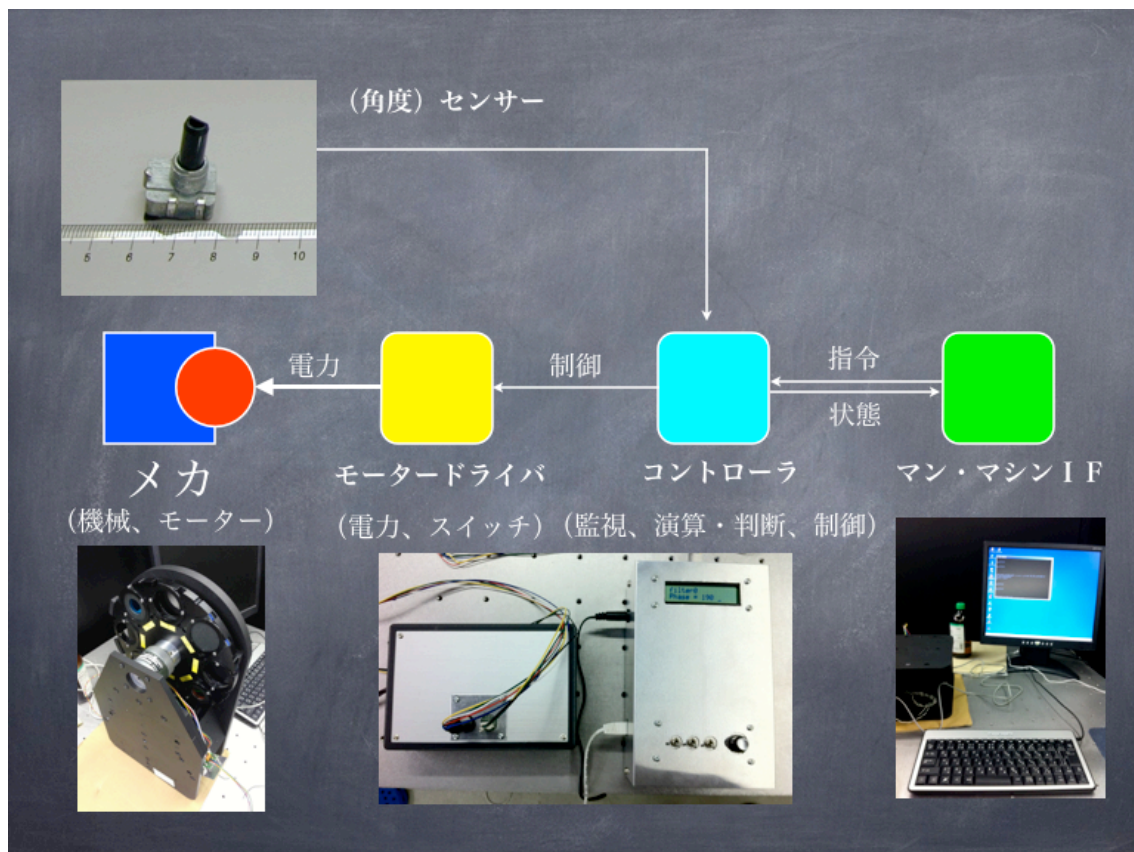


フィルター交換機構のシステム構成図を見ながら、各要素の役割（主にソフトウェア）の役割を説明してみることにする。



- 1) フィルター交換機構のメカにはフィルターターレットを回転させるステッピングモーターとターレットの回転角度を検出する角度センサーが取り付けられている。
- 2) モータードライバはステッピングモーターに配線されていて、内蔵されている PIC マイコン (PIC16F84) のプログラム (ファームウェア) により、正転または逆転スイッチが押し下げられた時 (端子電圧が 5V→0V)、ステッピングモーターを 1 ステップ角だけ回転させる電力パルスを送出する。
- 3) コントローラ (汎用コントロール基板) にはモータードライバの正転・逆転スイッチと角度センサーが配線されている。コントローラに内蔵されている PIC マイコン (PIC16F877) のプログラムでは、使用したいフィルターターレットの穴の位置を選ぶと、ターレットを所定の角度だけ回転させるのに必要な ON/OFF (5V→0V) パルス信号をモータードライバに送出する。このときコントローラは角度センサーからの信号を監視して、停止した位置が正しいターレットの穴と一致しているか判定する。位置が正しくないと判断された場合は 1 ステップ分角度を修正するパルスを送り確認を繰り返す。
- 4) コントローラはネットワークインタフェースを通してパソコンと情報をやりとりすることができる。パソコンでターレットに仕込んだフィルターの種類とターレット上の穴を対応させおき、オペレータは使いたいフィルターを選ぶことでターレットの穴やメカの仕組みを気にすることなくフィルター交換ができるようになる。このパソコン上のソフトウェアが人と機械を繋ぐ「マン・マシンインタフェース」となる。

最初に述べたようにモーターを介してメカを電子制御するのはメカトロの基本である。フィルター交換機構を例に取ったメカトロの仕組みを抽象的に表した概念図を以下に示す。

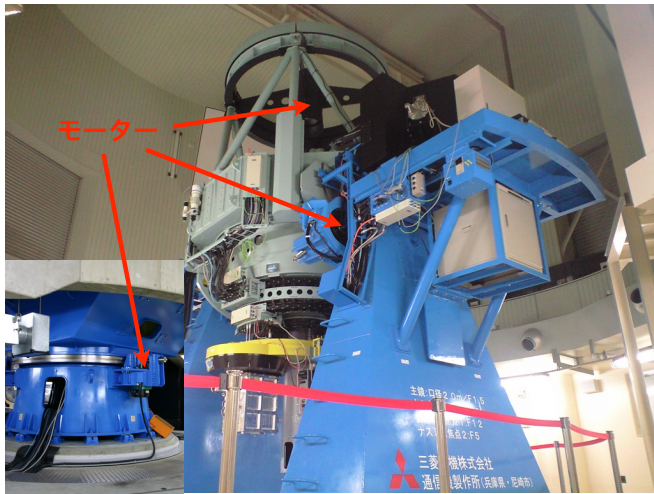


20. なゆた望遠鏡に見るメカトロ

なゆた望遠鏡は3つの焦点に5つの観測装置を搭載した汎用望遠鏡である。先ほど例にあげたフィルター交換機構とは規模・複雑・精度において全く別の次元であるが、なゆた望遠鏡もメカトロ機器であるため、その仕組みは驚くほど共通している。

20-1. なゆた望遠鏡のメカ

なゆた望遠鏡には経緯台や副鏡・第3鏡などの稼働部が非常に多く有り、それぞれには動力としてモーターが組み込まれている。さらに各モーターにはモータードライバ、モーター駆動スイッチがあり、全ての稼働部を統べるコントローラとして望遠鏡制御計算機が用意されている。



20-2. なゆた望遠鏡に繋がるセンサー機器

望遠鏡制御計算機には様々なセンサーが繋がっており、その情報を監視して、演算・判断し、稼働部の制御を行う。なゆた望遠鏡に使われている主なセンサーは角度センサーや位置検出センサーである。大掛かりで変わった機器としては時刻装置（専用の時計）や気象観測装置がある。

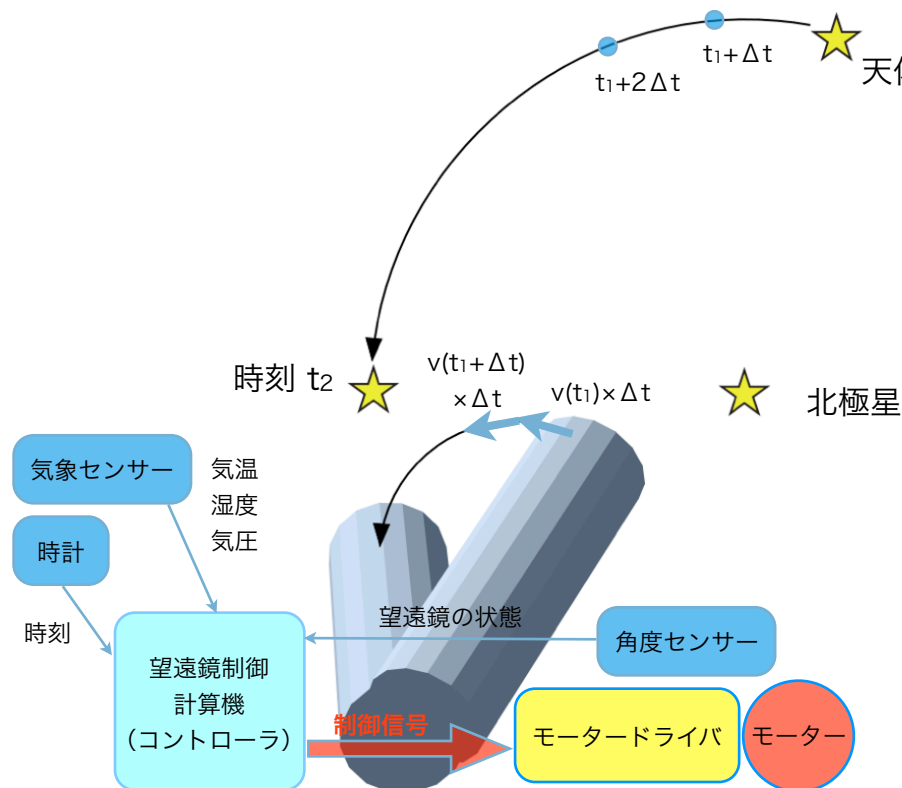


夜空に輝く天体の位置（地平座標）は、地球上の観測場所（緯度、経度など）と時刻で決まる。望遠鏡が天体を補足し追尾する時には、「何時何分にどの高度・方位」という指令を送らなければならない。時計が1分遅れていると、24時間ではほぼ1回転する地球の夜空は $1/4$ 度の自転分だけ西に向かって移動していることになる。これは、なゆた望遠鏡の有効視野程度の狂いになる。なゆた望遠鏡では $1/36000$ 度（ $=0.1$ 秒角）程度の追尾誤差しか許されない。これを達成するには 1μ 秒（ $1/1000000$ 秒）という高精度の時計が必要となる。

もう一つは気象観測装置である。これは天気予報のためのものではない。望遠鏡の保護と性能向上に必要な機器である。室内外の温度・湿度、気圧、風向・風速、降雨のあるなしは常時監視されている。

20-3. 天体の追尾

なゆた望遠鏡は経緯台式の架台を採用している。したがって天体を追尾するには方位軸、高度軸、位置角軸の3つを制御しなければならない。この制御では、まず天体の各時刻での高度、方位、位置角を計算で求め、その時刻に望遠鏡の3軸が計算値と一致する状態になるように駆動部の速度を変化させている。



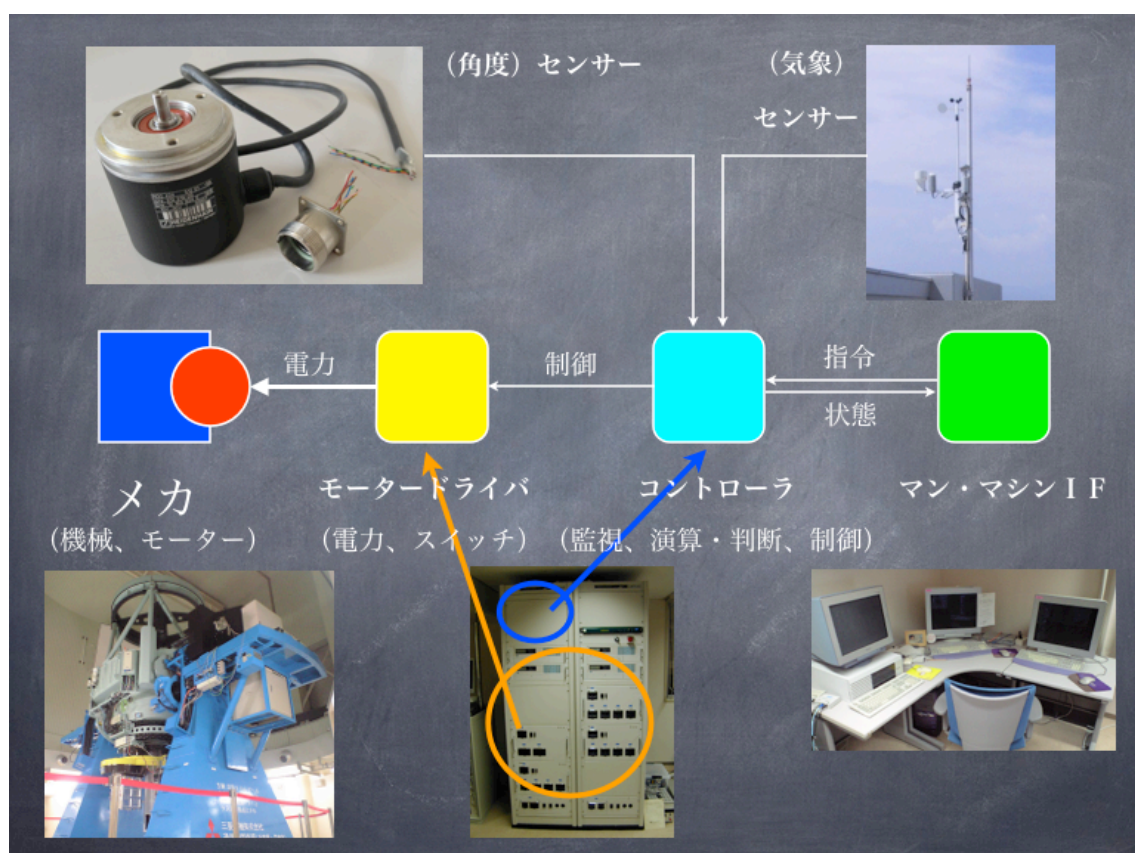
また地球には大気があるため、光の屈折によって計算による天体の高度と地上

での見かけの高度にはズレが生じる。これを大気差というが、なゆた望遠鏡が天体を捉え追尾する時には大気差の影響によって生じる狂いの補正も入る。大気差によって、天体は見かけ上少し高い位置に浮き上がって見える。これは天体の高度が低いほど大きくなる。この大気差の量は地表の気温、気圧、湿度（＝屈折率）に依存する。このズレは気象センサーから気温、湿度、気圧を読み取り、計算上の高度値を使用することで補正される。

20-4. なゆた望遠鏡に見るメカトロ～まとめ～

これまでの話を整理すると、大規模なシステムである「なゆた望遠鏡」も基本的な仕組みは単純なフィルター交換機構と共通していることがわかる。以下に、なゆた望遠鏡のメカトロとしての概念図をフィルター交換機構に倣って図示したものを示す。

基本的な仕組みが同じとは言うものの、大規模なシステムでは装置の状態を表すパラメータは膨大、駆動部も非常に多く組み込まれている。これを人間が上手く取り扱うことはメカトロにおいて最も難題ある。

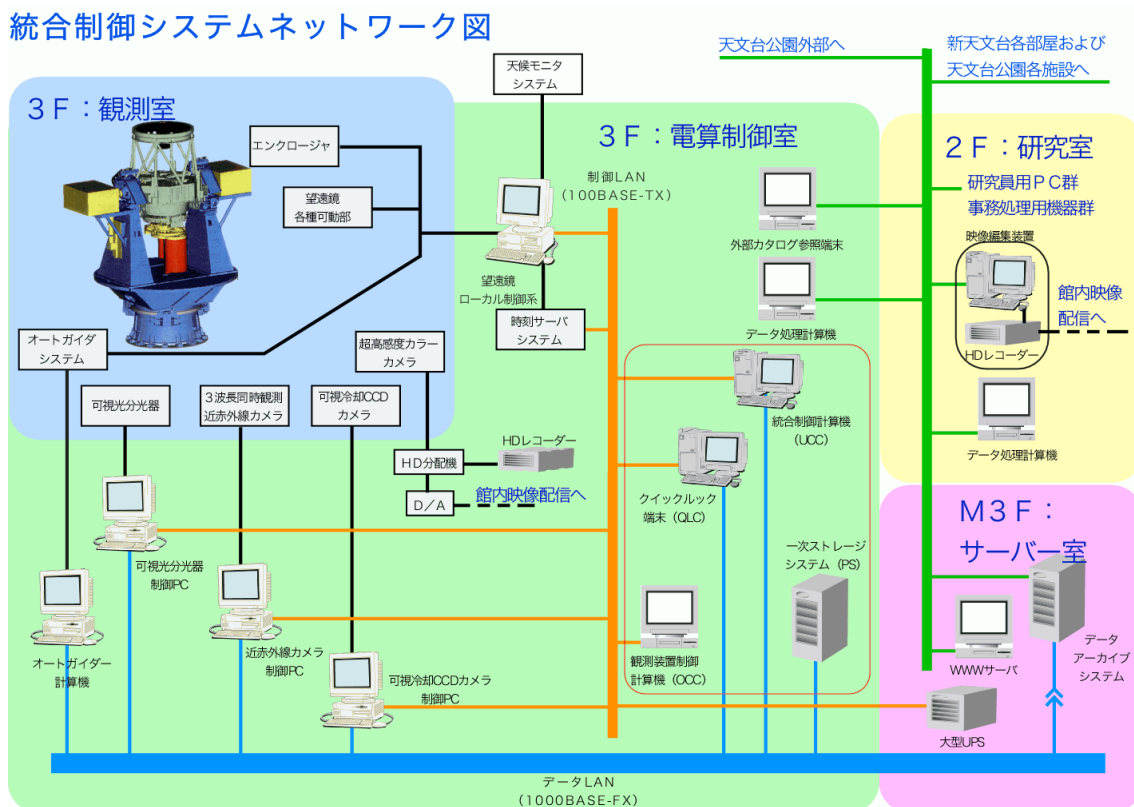


これを解決する鍵となるのがマン・マシンインタフェースと呼ばれる計算機システムとユーザーインタフェースである。この仕様を巧く定めることが、装置の寿命（運命）を決めることになる！

2 1. なゆた望遠鏡のマン・マシン I F「統合制御システム」

統合制御システムは、望遠鏡や観測装置のハードウェアを直接制御する PC 群（コントローラ）を統合制御計算機（UCC）と観測装置制御計算機（OCC）で統べる構成になっている。観測装置によって得られた観測データは、一次ストレージ（PS）とクイックルック端末（QLC）が受け持つ。望遠鏡等の機器を制御するためのコマンドとステータスの送受信は制御 LAN を使って行われる。また観測データの送受信はデータ LAN を使って行う。この 2 系統のネットワークは独立しており、互いに干渉することなく、データ転送速度を最大限確保するようになっている。

統合制御システムネットワーク図

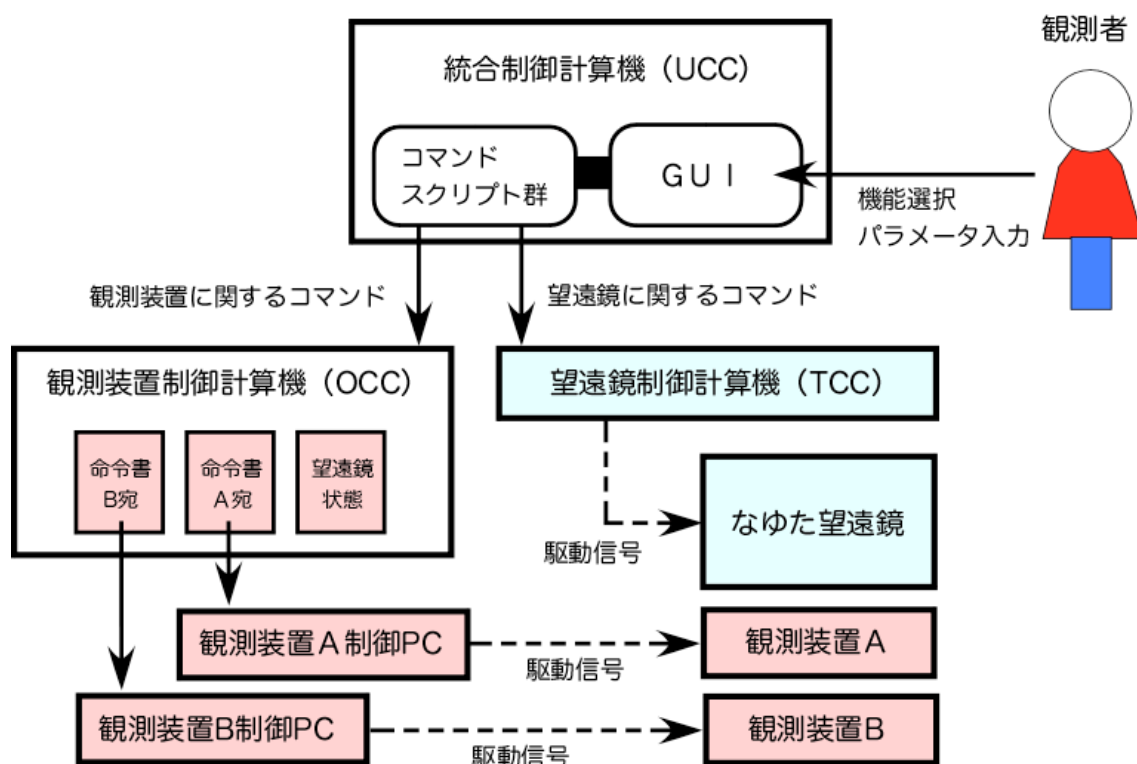


2 1-1. 統合制御システムにおけるコマンドの流れ

統合制御システムでは観測者が統合制御計算機（UCC：マン・マシン I F）を

使用して操作を行う。ここで最低限の観測要件を入力することで、UCC 統合制御プログラムに用意されたコマンドスクリプトが選択・実行され望遠鏡制御計算機（TCC：望遠鏡ローカル制御系）と観測装置制御計算機（OCC：観測装置を統括する計算機）に必要な命令が伝えられるようになっている。このことにより、観測モード（装置）の選択・変更、観測対象への指向、望遠鏡およびエンクロージャと観測装置の状態変更、データ取得といった一連の機器駆動を行なうことができる。

望遠鏡は UCC の命令を受けた TCC が制御する。観測装置は UCC から OCC にコマンドと望遠鏡の状態（ステータス）が渡され、各観測装置を直接制御する制御 PC（ローカル制御系）がその情報を読み取り装置を駆動することとなる。



2 1-2. 統合制御システムにおける観測データの流れ

観測装置ローカル制御系が観測データを取得すると、その時刻の望遠鏡ステータス情報を付け加えて、一次ストレージに転送する。一次ストレージに転送される観測データはクイックルック計算機により監視されており、新しいデータがやってくると自動的に取得データをディスプレイに表示し、観測者がデー

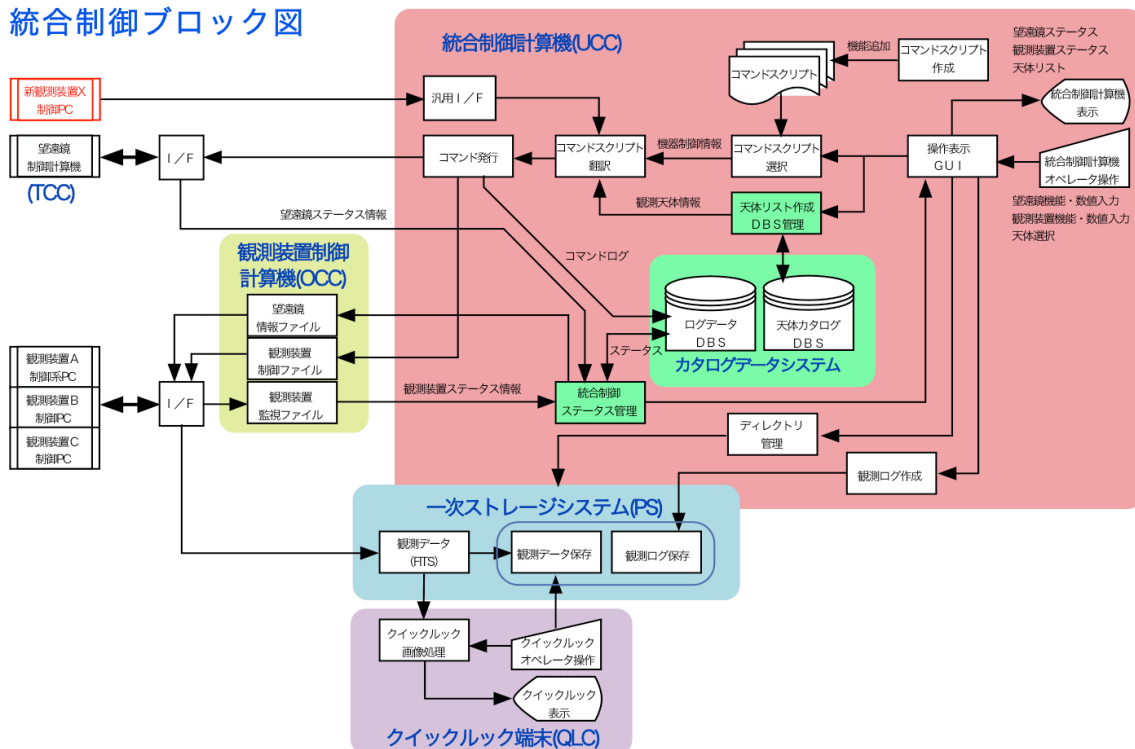
タを調べて保存するか否か判断することができる。

2 1-3. 望遠鏡が主か観測装置が主か

望遠鏡と観測装置を制御するシステムを設計する時、望遠鏡と観測装置のどちらが偉いかという議論は必ず起こる。複数の観測装置を同時に搭載できる汎用望遠鏡の場合、望遠鏡制御システムに観測装置制御を内包する設計が採られることが多い。また特定の観測プロジェクトに特化した専用望遠鏡の場合、テーマを担うのは観測装置となり、単一の観測装置制御システム中に望遠鏡制御を内包させる場合が多く見られる。

なゆた望遠鏡の統合制御システムでは、望遠鏡と観測装置に対して中立（ニュートラル）な立場を取る設計になっている。統合制御計算機（UCC）からは望遠鏡も観測装置も同格の制御機器として扱われる。この仕組みによって、なゆた望遠鏡は、汎用望遠鏡として複数の観測機器を切り替えて使う利便性ととも、ある特定の観測装置から望遠鏡の機能呼び出して使うという柔軟性も備えている。

統合制御ブロック図



なゆた望遠鏡および標準観測装置の全機能はスクリプト化されて統合制御プログラムに実装されている。従って観測プロセスで行われる一連の操作は、ス

クリプトプログラムを組むことによって、任意の回数くりかえさせるなどの半自動化が可能である。統合制御計算機から選択可能な標準観測装置（モード）は、可視光撮像装置 MINT（カセグレン 2）、3 波長同時観測近赤外線カメラ NIC（カセグレン 1）、可視光分光器 MALLS（ナスミス 1）、眼視観望装置（ナスミス 2）、高感度ハイビジョンカメラ HIVISCAS（ナスミス 2）である。

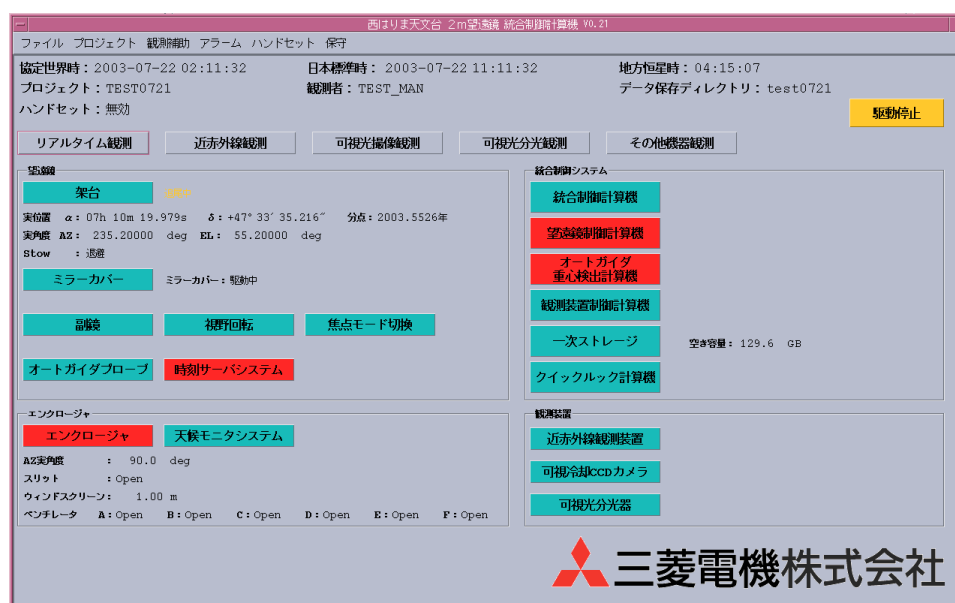
また統合制御プログラムは汎用インタフェースを備えている。この汎用インタフェースが指定する IP アドレスにコマンドスクリプトを送出することで、システム外のコンピュータから、なゆた望遠鏡（標準観測装置を含めた全機能）を制御することが可能である。つまり特殊な観測装置を持ち込んでも、その観測装置を制御する PC から統合制御システムが提供する全機能を利用することができる。

2.2. 統合制御プログラムのユーザーインタフェース

なゆた望遠鏡を日常的に運用するための操作プログラムである。天体カタログデータベース、ログファイルデータベースと通信して情報を抽出するデータベースクライアントプログラムとコマンドスクリプトを翻訳するプロセッサ、各種保守管理プログラム、汎用インタフェースおよび G U I とからなる。ここではなゆた望遠鏡の操作画面（G U I）を具体的に見ていく。

2.2-1. 統合制御プログラムメイン画面

統合制御プログラムを起動すると表示される最初の画面である。



この画面には全ての機器の状態が表示されている（緑色のボタンは、その機器が正常であることを示す。赤色のボタンは機器に何らかの異常-電源断を含む-があることを示している）。各ボタンを押すことによって各機器の詳細画面が表示され、詳細な状態と個別の駆動制御が行えるようになっている。上の方に5つのボタン（リアルタイム観測、近赤外線観測、可視光撮像観測、可視光分光観測、その他機器観測）が並んでいる。これは、なゆた望遠鏡の標準観測装置で行える観測を示す。

メイン画面では観測者は、これから行う観測に関して「プロジェクト」を定義する。ここで言うプロジェクトとは、観測テーマ、観測者、データ保存ディレクトリによって識別される観測行為である。「プロジェクトメニュー」から「プロジェクト開始」を選択すると、3つの識別情報の入力が促され、指定した保存ディレクトリに観測データと操作履歴（コマンドログとステータスログ）が書き込まれる。

2 2-2. 観測モード操作画面

メイン画面から例えば「近赤外線観測」のボタンを選んで押すと以下の画面が表示される。この画面には近赤外線カメラを使った観測に必要な情報だけが表示される。

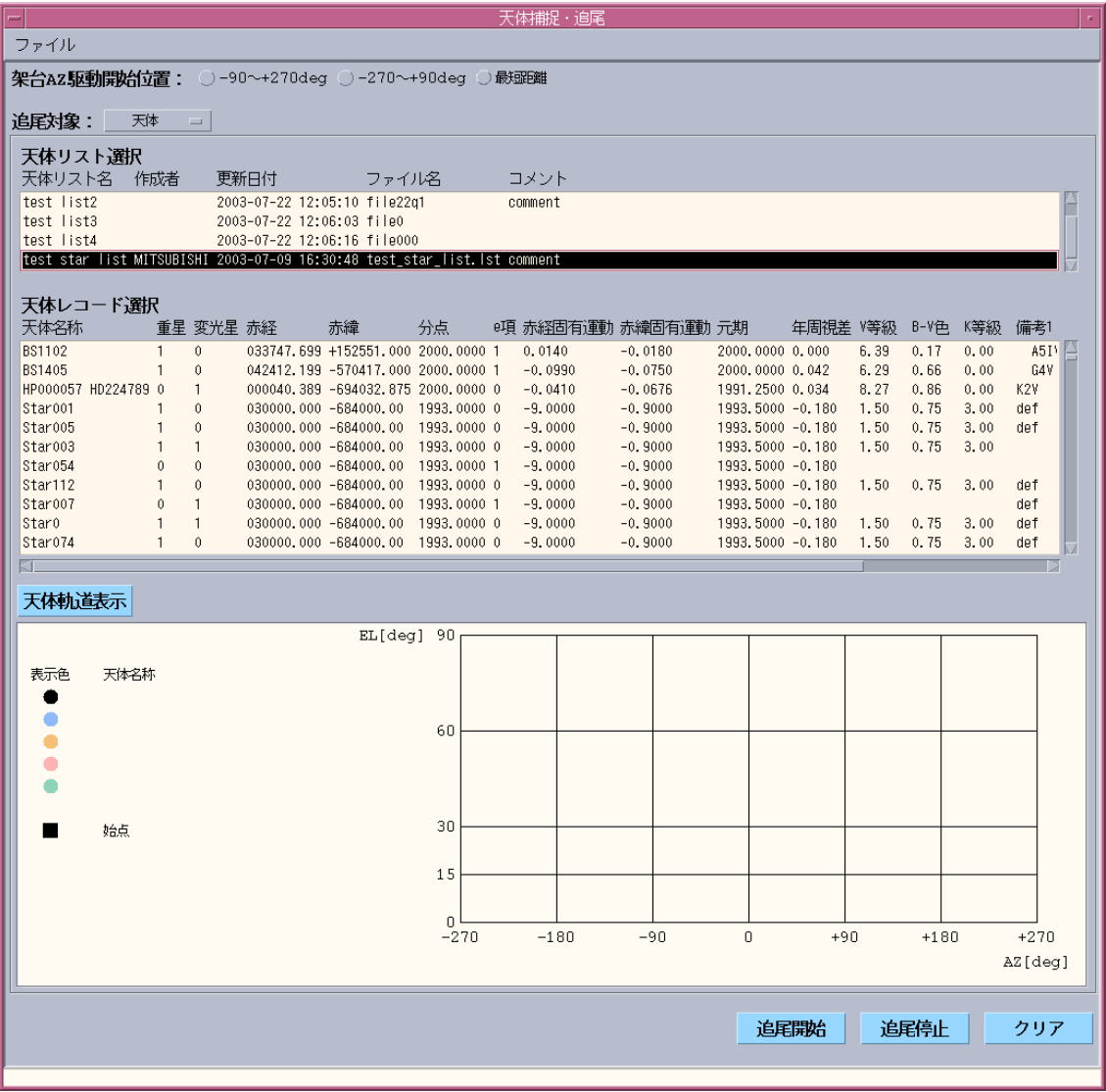
近赤外線観測モード	
ファイル プロジェクト 観測補助 アラーム ハンドセット	
協定世界時: 2003-08-20 07:16:50 日本標準時: 2003-08-20 16:16:50 地方恒星時: 11:32:11	
プロジェクト: MAINT 観測者: MAINT データ保存ディレクトリ: MAINT	
ハンドセット: 無効	
観測モード: α/δ 指令追従 オブジェクト: ***	
時角: $\sim 00:27:48$	
実位置 $\alpha: 17^{\text{h}} 22^{\text{m}} 26.516^{\text{s}}$ $\delta: +63^{\circ} 19' 47.310''$ 分点: 2003.6326年	
指令位置 $\alpha: 12^{\text{h}} 00^{\text{m}} 00.000^{\text{s}}$ $\delta: +86^{\circ} 00' 00.000''$ 分点: 2000.0000年	
オフセット入力: 無効 ☐ 有効 ☐ 無効 天体補正・追従	
オフセット $\alpha: +0.000''$ $\delta: +0.000''$ α δ	
焦点モード切替 カセグレン焦点/近赤外線観測装置	
ミラーカバー 駆動中 Open Close	
架台 Remote Drive AZ: On EL: On	
オートガイド: 停止中 開始 停止	
実角度AZ: 211.88000 deg EL: 31.90000 deg	
品検 Remote Drive: On	
Focus実位置: -22.235 mm	
Focusオフセット: +0.000 mm オフセット	
視野回転 Remote Drive: On 制御モード: 非同期	
ローテータ選択: インストルメントローテータ/カセグレン焦点	
実位置角: 178.7055 deg	
指令位置角: *** deg 位置角	
実角度: -253.2270 deg	
エンクロージャ Remote Drive: On	
制御モード: 非同期 ☐ 同期 ☐ 非同期	
AZ実角度: 90.0 deg	
架台AZ実角度との差: -121.75000 deg	
スリット: Open Open Close	
近赤外線観測装置	
取得データ種別: 標準星 半固定	
半波長板: 遮断	
偏光素子: 遮断	
露出: 停止中	
データ取得回数: 2 回 増減	
露出時間: 1.0 秒 増減	
検出露温度 Jバnf: 270.00 K Hバnf: 270.00 K Kバnf: 270.00 K	
真空度: 1.0E-04 Torr	
真空室温度監視1: 1.0 K 2: 2.0 K 3: 3.0 K	
読み出しモード: 通常 通常 高速	
オートガイドプローブ Remote Drive X: On Y: On Focus: On	
ガイド星名: *** ガイド星選択	
実位置 X: 17.677 mm Y: 42.642 mm Focus: 0.000 mm	
オートガイド重心的位置情報	
オートガイド誤差 ΔX : *** marcsec	
ΔY : *** marcsec	
望遠鏡冷却計算機 クイックルック計算機 観測装置制御計算機	
一次ストレージ 時刻サーバシステム 天候モニタシステム	
メッセージ表示欄	
露出開始 露出停止 実行 クリア	

ここで「観測補助メニュー」から「観測準備」を選ぶと、近赤外線カメラを使用するための光学系の切り替えや、望遠鏡の各種調整を行うコマンドスクリプトが実行され、数分の後に近赤外線カメラによる観測準備が完了する。

この画面は左右大きく分割されているが、左側の囲みは、それぞれ望遠鏡各部のステータス表示と詳細設定画面を開くためのボタンである。ボタンの色はメイン画面と同様の意味を持っている。右側の囲みは、それぞれ近赤外線カメラに関するステータス表示と詳細設定画面を開くボタンである。

2 2-3. 観測天体の決定

左最上段の囲み（背景が白くなっている場所）で観測天体を設定する。これは全観測モード（標準観測装置）画面に共通である。

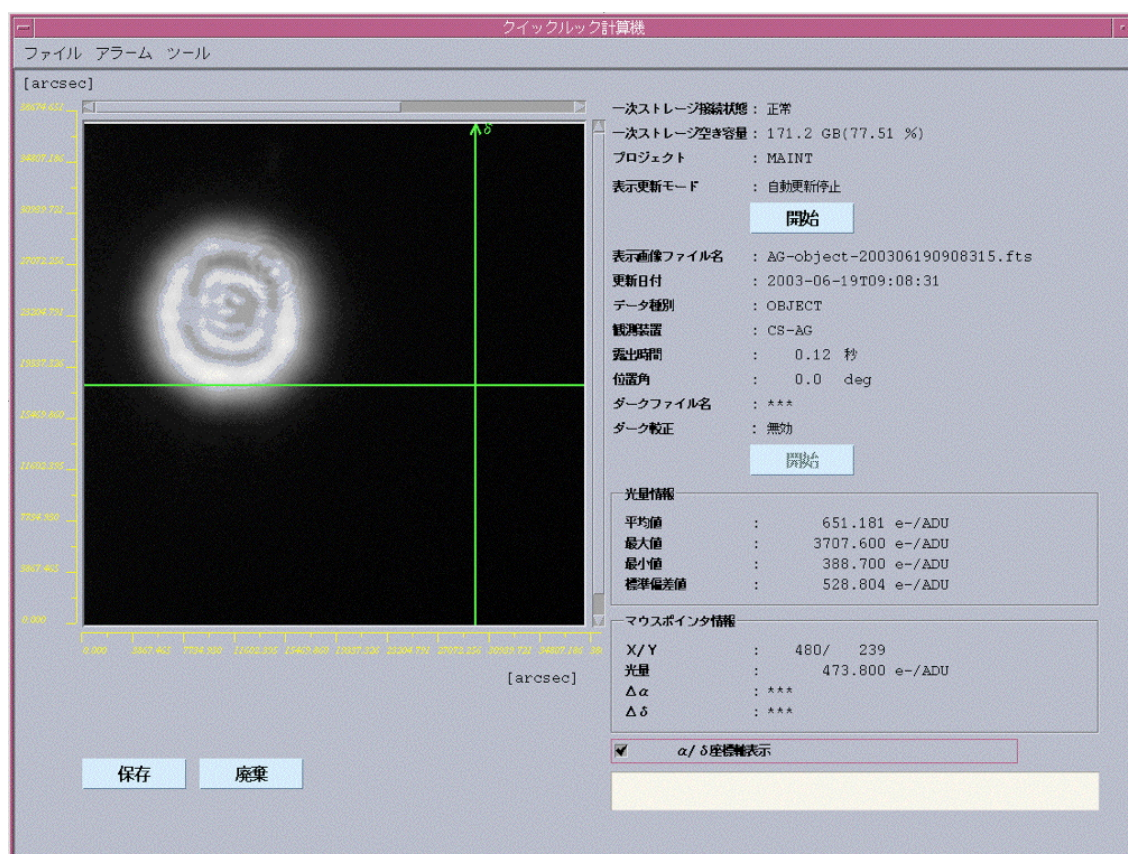


この囲み右端の青色のボタンを押すと、天体カタログデータベースから登録された天体リストが表示され、リストからの選択で観測天体を決定することができる。追尾開始ボタンを押すと、なゆた望遠鏡は観測天体を捕捉・追尾を開始する。

2 2-4. 露出開始と観測データ表示

天体を捕捉したら、右最上段の囲みで近赤外線観測をするための観測装置（近赤外線カメラ）の設定を行う。装置の持っている機能を細かく設定することもできるが、最低限、露出時間と撮影枚数（回数）を設定すれば準備完了はする。最後に画面右下の「実行」ボタンを押せば、望遠鏡と観測装置が設定通りに動き、続いて「露出開始」ボタンを押せばシャッターが開き設定枚数の観測データを取得する。

露出が終わると隣のクイックルック端末に画像が表示される。

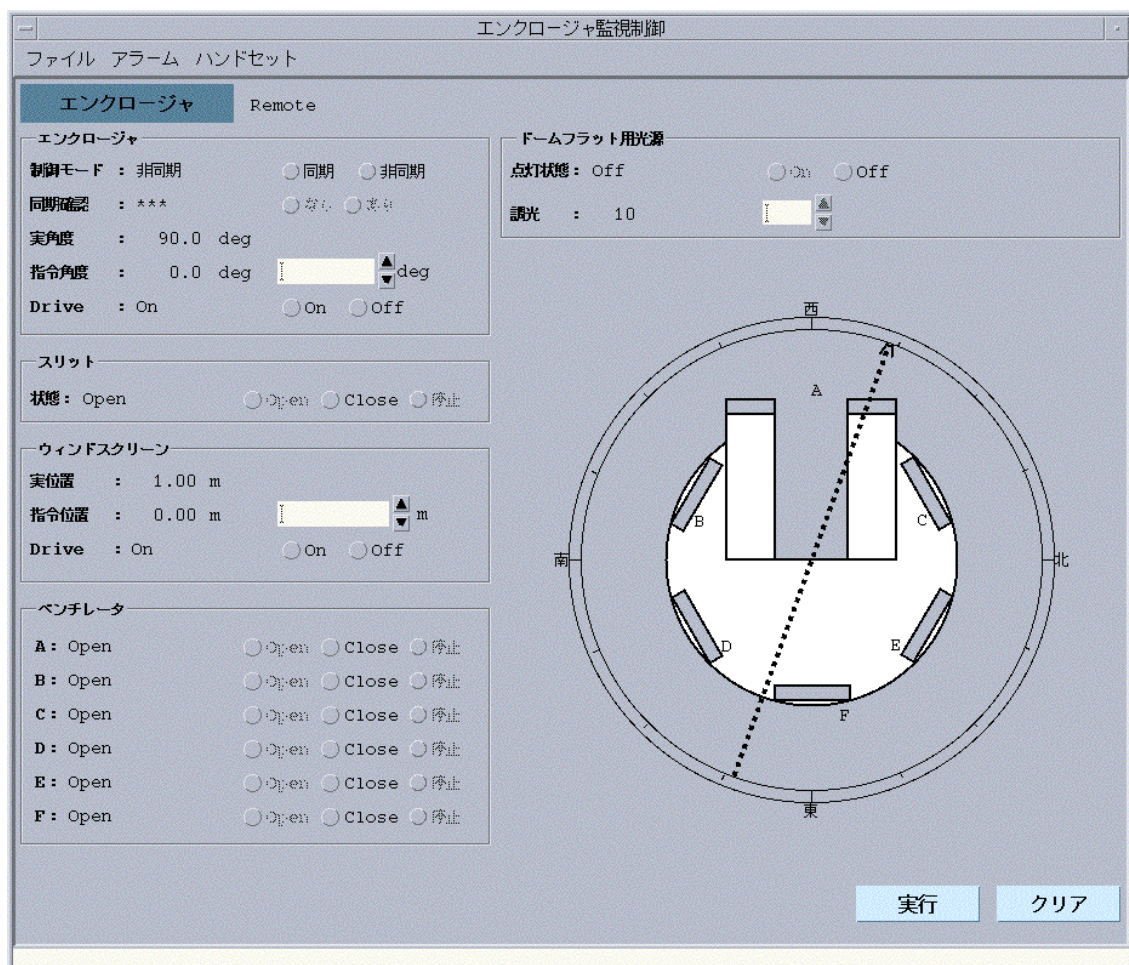


この画面上では観測データに毎回決まった処理を施してから表示させたり、画像情報を調べることが可能である。

2 2-5. 乱流の抑制とフラッシング制御

なゆた望遠鏡の性能をフルに発揮するためには、空気のゆらぎ（乱流）に対する対策が必要である。最も重要なことの一つは望遠鏡の温度管理で特に主鏡の温度を夜の外気温と同じか僅かに冷えた状態にすることである。なゆた望遠鏡のある天文台の観測室内は常に厳冬期を除き常に強冷房状態である。

観測室のエンクロージャ（ドーム）には、ベンチレータというシャッターが6つ設けられている。これは望遠鏡や観測機器が発する熱によるかげろうを、自然の風を使って観測室外に排出するために用いる。観測室の中の風の流れをスムーズにするには、風向・風速に応じて、最適なシャッターを選んで開閉する必要がある。統合制御システムでは、エンクロージャの詳細設定画面上で風向とエンクロージャの向きとをリアルタイムに重ねて表示している。



統合制御計算機に表示されるエンクロージャの制御画面。破線矢印が風向