

冷却 CCD による天体位置観測の試み

富井清文, 鈴木充広: 航法測地課

高梨泰宏: 下里水路観測所

An experiment of astrometric observation by a cooled CCD camera system

Kiyofumi Tomii, Michihiro Suzuki: Geodesy and Geophysics Division

Yasuhiro Takanasi: Simosato Hydrographic Observatory

1. はじめに

天体観測の手法として近年脚光を浴びている技術である冷却 CCD を用いた天体位置観測法について、市販品を使ったシステムによる試験観測を行ったので紹介する。

冷却 CCD カメラは、そのすぐれた特性から、すでに天体観測の主要な技術として確立しており、さらに市販品が開発されてからは、研究者以外の一般層においても急速に普及しつつある。

冷却 CCD による天体位置観測を業務に活かす場合の最大のメリットは、汎用性が高く、観測対象・用途目的が広いことである。水路観測所がこの技術を得ることにより、従来の天体暦作成を目的とした観測はもとより、いわば天域の測量ステーションとして、より幅の広い観測活動を行うことができる。

2. 冷却 CCD と観測法の概要

(1) 冷却 CCD カメラの概要

「固体撮像デバイス」とも呼ばれる CCD は、Charge Coupled Device の略称で、電荷結合素子と訳される。CCD は写真感材と対比すると説明しやすい。写真感材はマイクロオーダーの感光粒子がばらばらに並んだものと考え、CCD は整然と並んだそのマイクロ粒子一つ一つの XY 座標値と感光量を電子的に記録できるチップである。CCD はすでに家庭用のビデオカメラなどでもなじみの深いものであるが、天体観測用には一般に冷却 CCD が使われる。天体観測には感度や解像度などに高い性能が求めら

れるので、専用に開発されたものや、汎用品の中でも性能の良いものが充てられているが、チップそのものはとりたてて特殊なものではない。普通の CCD カメラと異なるのは、チップを冷却する機構が付いている点である。CCD は常温では非常にノイズが多く、わずか 1 秒程度でもノイズだけで飽和してしまう。写真でいうならば、カメラキャップをしたままでも画面が露光しきってしまうのである。このままでは天体観測には非常に不向きであるが、チップを冷却することによってノイズを激減させることができる。これにより長時間露光が可能になり、相対的な感度が飛躍的に上がる。冷却機構には、効果の高い液体窒素が使われるものから簡易な電子冷却素子によるものまである。

(2) 観測原理と概要

冷却 CCD による天体位置観測法は、天域の狭い部分に近接した天体を同一視野内で撮影することにより相互の位置関係を測定するもので、原理的には従来の写真観測と同一で、写真感材を CCD チップに置き換えたものと考えて良い。しかし、CCD の場合は「撮影」と同時にデータがデジタルで得られ、このことによるメリットは甚大である。一旦乾板に写しとってからそれを現像し測定する従来の写真観測において、結果が数字になるまでに必要であったすべての行程の、手間、技術、時間、設備、消耗品が不要となり、途中の過程で精度を損なう心配もない。その最大のメリットは、圧倒的に高い処理速度と正確さにある。例えるならば、そろばんとコンピュータの差に等しく、同じ計算式を解くという原

理であっても、大量、正確、高速の処理が可能になり、これまで困難あるいは不可能であったことが可能になったことと、まさに同じような効果が期待できる。また、感度はたいへん高く、短時間でより暗い天体まで写し取る。階調もより豊富で、明るさも正確に描写する。

(3) 他の観測法との比較

天体位置の観測には、子午環のように絶対位置を測定するものと、食の観測や写真観測のように相対位置を観測するものがある。

絶対位置観測は、その精度が観測機器にほぼ全面的に依存する。神経と労力を使う部分がたいへん大きく、精度を上げ、労力を減らすためには高価な機器とその管理に多額の予算も必要になる。

食の観測は相対位置観測の究極と言えが、たいへん精度良く相対位置関係を定めることができる反面、頻度が低く、場所などの限定があり、社会的な生活リズムとは無関係に起こることから、合理的な観測計画が立てにくいなどの不便さがある。また、自然現象の機会をねらった観測であることから、その成果は観測時の悪天候あるいは一度の失敗により全く得られなくなる。機器に関しては、絶対位置観測と異なり、観測に使用する望遠鏡や赤道儀は精度にそれほど厳密さが要求されないという利点がある。

一般的な相対位置観測である写真観測は、観測対象が広く、また指向などの精度にはさらに許容が広く、観測自体は最も手軽な観測方法と言えが、その結果をデータにするまでに多くの過程が必要で、精度も若干劣るという欠点があった。

CCDによる観測法では、写真観測の長所を最大限に活かしながら合理的な高精度観測を行うことができる。膨大な維持費や労力を使うことなく、効率的な観測・データ処理により迅速に結果を得ることができ、また食の機会を待つ必要もない。

(4) 写真観測との比較

CCD観測法と原理的に同じである従来の写真観測と比べると、どのような差があるのかを、さらに具体的に比較してみる。

a. 観測作業

従来の写真観測と比較すると、基本的な部分は変

わらない。しかし環境管理が必要な乾板を扱わないだけでも作業効率は向上する。また CCD は制限なく何回でも観測でき、失敗しても物的損失はなく、また成否が観測直後に判る。精度に直接影響する重要な作業であるピント合わせも、観測直前の即座のフィードバックで行うことができ、現像を待つ必要も無くより正確に行うことができる。さらに、高感度のため露出時間を大幅に短縮することができ、天体の追尾も高精度を必要としない。

b. 後処理

写真は、観測作業の後処理により多くの過程を必要とする。まず最初に「現像」があり、その設備と消耗品とその管理も大がかりである。さらに現像には技術と時間を要し、そこにも観測の成否がかかっている。言うまでもなく CCD には無縁の過程である。現像を終えると、次に「座標読みとり」を行うが、この善し悪しが精度に大きく影響する。また高価な装置も必要になり、技術と時間も要する。CCD では、デジタルデータが直接得られるため読みとりを行う必要がなく、そのために精度を損なうことはない。過程が省略されるため処理速度は迅速で、プログラム次第で観測後数分の内に結果を算出することができる。

c. 精度

写真では現像においてウェットな処理を行うなど、測定までの間に観測・処理過程を通して一定な環境管理がなされないのに対し、CCD では温度環境をコントロールしてデータ取得を行うので、写真感材に比べて、伸縮の問題もなく、受光面の平面性も良好である。画素の大きさは小さいもので $9\mu\text{m}$ であり、写真の超微粒子感材 ($5\mu\text{m}$ 程度) よりはやや大きめであるが、星像は複数の画素にまたがり、また階調が豊富であることから、より正確に星像中心を求めることができる。(福島1996)

d. CCD のデメリット

現在 CCD の唯一とも言える欠点は、受光面積の狭さによる観測可能範囲の制限である。目標天体の導入にはより高い指向精度が要求され、写真観測の一つの長所である指向の許容が制限される。また、ある程度角距離の離れた天体や人工衛星のような高

速移動天体については、より広視野の光学系が要求される。観測対象と光学系の選択によっては全く問題にならない場合もあるが、対象によっては、量産品より受光面積の大きなチップの開発が必要となり、コストが増大する。

3. 撮像技術

下里水路観測所では平成7年3月に微光天体の検出のために冷却式 CCD カメラによる天体画像処理装置を導入した。この装置を使用して外惑星の観測を行ったので、この撮像技術を紹介する。

(1) 撮像システム

天体画像処理装置は、受光素子に CCD を使用し、その冷却に電子冷却素子（ペルチェ素子）を使用している。ここで出力されるデータは NTSC 方式のビデオ信号ではなくコンピュータ上のファイルとなる。使用した望遠鏡は星食観測の眼視用に使用しているもので、シュミットカセグレン方式の反射望遠鏡であり、少々視野が狭い欠点があるが CCD の有効面積が 35mm フィルムなどに比べてかなり小さいのでここでは欠点とはならない。

使用器材

冷却 CCD カメラ

SBIG 社製 ST-7

使用 CCD Kodak KAF-0400 39万画素

冷却方法 電子冷却(ペルチェ素子)+ファンによる空冷

インターフェイス パラレル端子

データ処理パソコン

IBM 社製 PC750

CPU Pentium 90MHz

メモリー 40MB

ソフトウェア

SBIG 社製 CCDOPS

ST-7の制御, 画像処理ソフトウェア

アドビ社製 Photoshop

画像処理, 印刷用ソフトウェア

Software Bisque 社製 TheSky

天文シミュレーション用ソフトウェア

望遠鏡

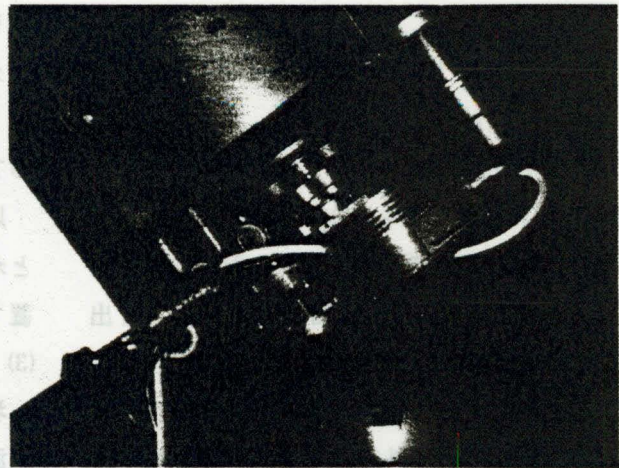


図1 下里水路観測所の冷却 CCD カメラ

セレストロン社製 C11

シュミットカセグレン式望遠鏡

焦点距離2800mm 口径280mm

62cm反射赤道儀に同架

(2) 撮像方法

簡易な方法として、撮像予定を TheSky (天文シミュレーション用ソフトウェア) を参考にし決定した。このソフトウェアは、惑星の位置を計算するだけでなく、ハッブル宇宙望遠鏡のガイド用に作成された1900万星に及ぶ星表 GSC を使用しており、約15等星の星まで表示することができる。このソフトを使用し、惑星と背景の星との位置関係をプリントアウトしておく。

データ収録時にまず必要なことは、CCD の受光面への天体の導入であるが、下里水路観測所の62cm 反射赤道儀でのエンコーダーを用いた星の導入精度は、角度にして10'程度である。それに対して写野は8.5'×5.7'であるため、完全自動で導入することは難しい。星食観測で行っているガイド星からの差動法を用いれば10"程度の指向精度が得られるが、今回は星の位置関係のプリントアウトを参考にしながら、ガイド望遠鏡により最終的には手動で微調整を行った。

天体導入後は、CCDOPS によって冷却 CCD カメラの制御を行う。なお制御、画像データのダウンロードはパラレルケーブルで接続されている PC で行う。手順は次のとおりである。

1. CCD の冷却 (温度環境調整)

2. ピントの調整
3. テスト撮影（露光時間の決定）
4. ダークフレームの撮影
5. ライトフレームの撮影（目的天体撮像）
6. フラットフィールドの撮影

まずはじめに、CCDの冷却を行う。天体撮影を目的としたST-7は、微弱な光を蓄積し画像として出力することができるが、CCDの特性として光を当てなくても出力されてしまうノイズがありダークノイズと呼ばれる。CCDは赤外領域にも高い感度を有しており、機械内部で発生する熱（赤外線）に各素子が反応したり、データの読みだし時の機械内のスイッチングにより発生するノイズに素子が反応してしまうなどがその主な原因であるが、これらはCCD自体を冷やすことによりノイズレベルを下げる事ができる。

望遠鏡のピント合わせ終了後テスト撮影を行う。ST-7に搭載されているA/Dコンバータは16bitで、65,536階調ある。露出が足りないと階調の少ない画像となり、天体の判別が難しくなってしまう、また露出が多すぎるとCCDが星の光や背景光などで飽和してしまう。よってテスト撮影を行い、画面内の最高輝度が階調幅を超えない程度に露出時間を決定する必要がある。

CCDのダークノイズのみを撮影した画像をダークフレームと呼び、目的の天体を撮影した画像をライトフレームと呼ぶ。ライトフレームには天体が写っているが、同時にノイズも乗っているため、後ほどの画像処理でダークフレーム分を引くことによりノイズをキャンセルすることができる。なお、ノイズは温度と露出時間に影響されるので、両フレームは同じ条件で撮影することが重要である。

CCDは画素ごとに感度むらがあり、望遠鏡にも収差等があるので光量のむらがある。これらの補正をするために、均一な光を望遠鏡に入射させたときの撮影フレームを用いるが、このデータをフラットフィールドと呼ぶ。データの取り方は、スカイフラットと呼ばれる薄明中の空を写す方法と、ドームフラットと呼ばれるドームの内側に散光板を置きそこへライトを照射し撮影する2つの方法があり、どち

らもディフューザーと呼ばれる光を拡散させるフィルターを望遠鏡の直前に入れる。今回の撮影は後者のドームフラットを採用し、ディフューザーは2mmのアクリル板で作成した。

以上の一連の作業により1つの画像を作成することができる。なお表紙写真は、この手順により同装置で撮影したヘール・ボップ彗星である。

(3) 撮像の実際

現在試験的に、土星以遠の外惑星を中心にCCD観測を行っているが、そのうち、冥王星の撮像例を位置測定の記事で紹介する。冥王星は約14等級の最も暗い惑星である。発見されてからまだ軌道の1/4程度しか公転しておらず、またこれまで写真しか位置観測の手段がなかったため、他の惑星に比べて位置観測データが少ない。

この冷却CCDカメラは、冷却温度が外気温に大きく左右されるタイプであるが、観測当日はドーム内気温が30℃近く、CCDの温度は-2.7℃と高かった。天候は薄曇りであり、肉眼では2等星が見える程度であった。この悪条件にもかかわらず、60秒の短時間露光で16等級以下の恒星まで写し込まれている。(図2)

(4) 画像処理

撮影した画像について、位置測定を行う直前までの画像処理を行う。基本的に行うことは次のとおりである。

(ライトフレーム - ダークフレーム)

/フラットフィールド

CCDのピクセルごとに天体の写った画像(ライトフレーム)から、光を当てずノイズのみを撮影した

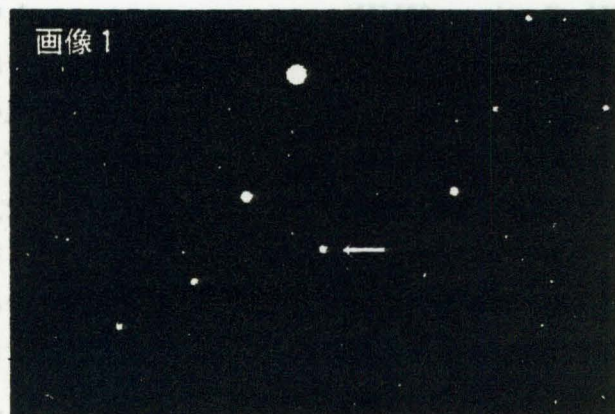


図2 冥王星画像1

画像（ダークフレーム）を引き、ノイズを減らした画像を作り、その画像を、均一な光を入射させ撮影した画像（フラットフィールド）で割ることにより均質な画像を作ることができる。

ダークフレームを引くことにより、かなりのノイズの除去ができるが、残ったノイズの内、背景光が写っているはずであるのに暗く写っているものをクールピクセルと呼ぶ。原因としては、一時的に CCD の量子効率が落ちる為と言われている。また反対に星もないのに1つのピクセルが明るく写っているものをホットピクセルと呼ぶ。原因は宇宙線によるものと言われている。これらのノイズは不規則に発生し、ダークフレームでの画像処理では改善できない。しかしほとんどの場合このノイズは1ピクセルで発生し、星の画像は数ピクセルあたり記録されるため区別できる。CCDOPS ではこのノイズを補間する機能があるため、ある程度取り除くことができる。

以上の操作を行った後、ファイルのセーブを行い撮像が完了する。

(5) 問題点等

冷却 CCD による天体位置観測を実用化、さらにレベルアップするためには、次のような改良を行っていく必要がある。

まず、観測及び処理の自動化であるが、観測・処理プログラムを独自に開発することにより、現行の機器構成でもより実用的な観測システムとなる。赤道儀のポインティング精度は、赤道儀の機械的精度を上げることのほか、前述の差動法を用いることでソフト的に上げることができる。CCD の冷却機構については、均一で質の良いデータを取得するために、低温のほか、温度の安定という機能が求められるが、市販品である現行機種では問題が多い。強力な冷却システムが望まれる。観測対象は、現在の試験的システムでは惑星・小惑星（16等級程度まで）に限られるが、対象をより広範にするためには、さらに大口径、あるいは広視野の光学系が必要になり、CCD も受光面積の大きさが求められる。またそれに伴い、画素数によっては、高速インターフェース、処理能力の高いコンピュータも必要になってくる。

今回の試験観測は、市販品と現環境をそのまま使

用しての初歩的なものであるが、専用のシステム設計さえ組めば、充分実用となる。

4. 位置測定

CCD カメラによって得られた星野像から、撮影された星の位置を求める方式について検討した。

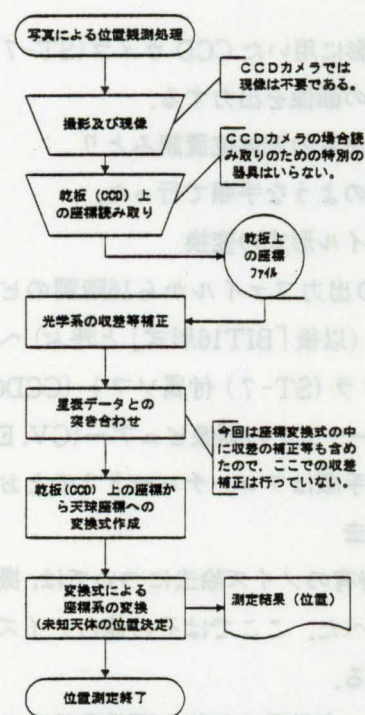
既に一部の専門家の間では、このような目的のためにシステムの開発が行われており、実用化されたものも多い。しかしながら、それらのシステムが入手困難であったり、使用する観測機器に適合していない場合も多いため、独自に位置読みとりのプログラムを作成することとした。

(1) 写真（含 CCD）による天体位置観測

天体の位置観測を写真等によって観測する場合は、次のような手順を踏む。ここでは従来の写真乾板を用いた方法を例として説明する。

- a. 撮影（および現像）
- b. 撮影星像の乾板上の座標読みとり
- c. 光学系の収差等による座標のゆがみ補正
- d. 星表データとの突き合わせ
- e. 乾板上の座標から天球上の座標系への変換式作成

写真（CCD）による天体位置観測の処理手順



フローチャート 1

f. 変換式により座標系の変換

上記の手順は一般的な方法であり、多少順序等が異なる場合もある。

さて、CCDカメラでの天体の位置観測を行った場合にも、上記の手順を踏むものと考えてよい。しかしCCDカメラの場合、受光面に整然と格子状に並んだCCD素子に蓄えられた光の量をファイルの形で保存出来るため、上記手順の中で最も時間がかかるうえに専用の機械(乾板読みとり装置)が必要となる(b)の読みとり作業が不要となる。このため、ある程度の知識と小型の計算機があれば、簡単に位置観測を行うことができる。

(2) CCDカメラの画像ファイルについて

CCDカメラによって撮影された画像は、画像ファイルとして保存される。位置観測の場合は、特にカラーである必要はないので、通常は多階調のモノクロ画像として記録されることが多い。

画像ファイルの形式は多様で、CCDカメラ毎に異なる場合もあるが、よほど特殊なものでない限り相互に変換可能であり、

今回、位置読みとりのための実験プログラムでは、ファイルの形式が公開されていること、形式が単純で取り扱いが簡単であることから、16階調のビットマップ(MS-Windows V2.0以降標準形式)を用いた。

なお、今回撮影に用いたCCDカメラ(ST-7)は、765×510ドットの画像を出力する。

(3) 撮影画像のからの天体位置読みとり

読みとりは次のような手順で行った。

(A) 画像ファイル形式の変換

CCDカメラの出力ファイルから16階調のビットマップファイル(以後「BIT16形式」と呼ぶ)への変換は、CCDカメラ(ST-7)付属ソフト(CCDOPS.EXE)及びフリーウェアの画像ビューア(GV.EXE)を用いた。変換手順はフローチャート2のとおり。

(B) ノイズ除去

CCDカメラ特有のノイズ除去については、撮像技術の項で既に述べた。ここではその他のノイズ除去について説明する。

実際の撮影は、光学系の欠陥や天候条件その他の

理由により、理想的な状態で行われるのはまれである。そのため、実際に撮影された画像には、星象以外のノイズもまた多く記録される結果となる。このため星像の読みとりに先だて、このノイズを除去しなければならない。ノイズの除去にあたっては、ノイズと星像を区別する必要があるため、星像とは次のような条件を満たすものと考えた。

- i. 一定以上の濃度(光量)を有する。
- ii. 複数の隣接するピクセルより構成される。
- iii. 形状はほぼ円盤状である。

上記の条件に基づき、これに該当しないものをノイズとして除去する。除去の手順は以下のとおり。

a. 孤立光点の除去

画像中に残る孤立した光点(撮像技術説明中のホットピクセルと思われる)を削除する操作。

連続した3つのピクセルをA, B, Cとし光点を「真」、闇点を「偽」として次の論理操作を実行する。

$$(A \&\& B) \mid \mid (B \&\& C) = B$$

ここで「&&」は論理積、「||」は論理和を表す演算子である。上記の演算結果を新たな「B」の値とすることで、連続した光点は残るが単独の光点は除去される。

今回は、この操作を単純に画像座標上のX, Y両方向に対して実行したが、光点の配列パターンによっては問題が発生するので改良の余地がある。

b. 光量平滑化

自己及びその周辺のピクセルの濃度の重み付き平均をとり、自己の濃度とする。これにより星像中のクールピクセル消去と星像周辺部分の細線構造(ヒゲ)、及びホットピクセルの濃度低減を図る。この操作は画像処理において「拡散処理」と呼ばれる操作に相当する。

c. しきい値以下の濃度の無効化

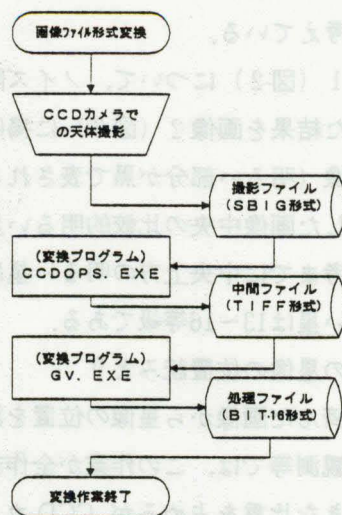
任意のしきい値を下回る濃度の箇所には星像はない(暗黒である)とする操作bで濃度の低減したホットピクセルの除去および、背景光の除去をはかる。

なお、a～cまでの処理はノイズが極端に多い場合など、必要に応じて複数回行う場合もある。

d. 画像強調化(コントラスト強化)

必ずしも必要な操作ではないが操作bのため画像

画像ファイルの
フォーマット変換手順



フローチャート 2

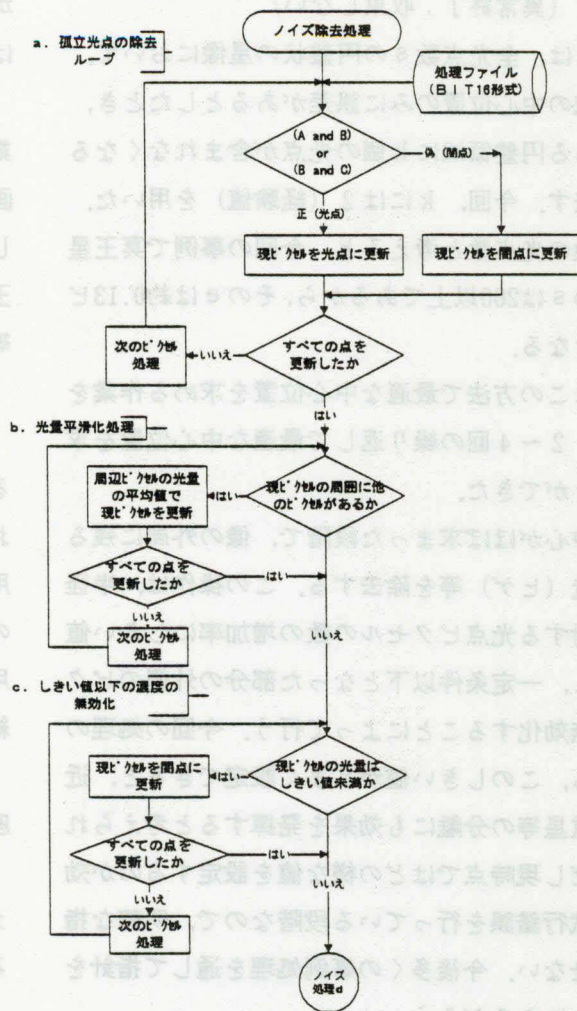
自体のコントラストが低下する傾向があるため、コントラストを強化する操作を行う。方法はいろいろと考えられるが、最も単純な方法として、各ピクセルの示す光量を n 倍する方式がある。 n は任意であるが、大きすぎると階調を失う結果となるので注意が必要である。

e. 不規則形状 (円盤状でない) 部分の削除

a ~ d の処理終了後、残った光点を表すピクセルを検索し、近接した光点をひとかたまりの光点の集団として抽出する。抽出した光点集団のひとつひとつの光点 (ピクセル) の位置を平均して集団の仮の中心位置を求めるとともに、ピクセル数からこの集団が円盤状であると仮定して、その半径を求める。位置の平均の際には、各ピクセルの示す光量によって重み付きの平均を求める方法がより实际的であるが、今回はこの処理は行っていない。

仮の中心が求まったなら、その中心から徐々に半径を大きくした円盤状領域を設定し、その領域内に含まれるピクセル数の増加の割合をチェックする。仮定の中心位置が正しければ、半径の増大にとともに、領域内のピクセル数は半径の 2 乗に比例して増加するはずである。逆にこの傾向からはずれるならば、仮定の中心位置に誤りがあるか形状が円盤状でないかである。前提として星像は円盤状を呈するとしているので、ここでは原因を、仮定した中心位置のずれと考え、新たな中心位置を仮定して、こ

ノイズ除去処理手順 (a ~ c)



フローチャート 3

の操作を繰り返す。新たな中心位置は、現在星像と仮定している円盤状の領域内の全光点の座標値の平均として求める。仮定の中心位置が真の星像中心に十分近ければ、新たに求めた中心位置と、現在の中心位置の差は極めて小さくなるので、この差が適当な値以下になった時点で繰り返し操作を打ち切り、最後に求めた中心位置を最適な中心位置とする。今回、繰り返し操作の打ち切り条件として、次の条件を用いた。

- i. 新旧の仮定中心の差が次式の値以下である場合。

$$e = k / (2 \sqrt{s/\pi})$$

e : 新旧の仮定中心の差

s : 領域内の全光点数

π : 円周率

k : 任意の数。今回は 2 (経験値)

ii. 繰り返し回数が10回を超える

(異常終了：収束しない)

i の e は、全光点数 s の円盤状の星像において、円盤領域の中心位置のみに誤差があるとしたとき、誤差のある円盤領域に k 個の光点が含まれなくなる距離を表す。今回、 k には 2 (経験値) を用いた。 s を星像の光点数と考えると、今回の事例で冥王星の星像の s は 200 以上であるから、その e は約 0.13 ピクセルとなる。

実際にこの方法で最適な中心位置を求める作業を行うと、2~4 回の繰り返しで最適な中心位置を求めることができた。

像の中心がほぼ求まった段階で、像の外周に残る細線構造 (ヒゲ) 等を除去する。この操作は、半径増加に対する光点ピクセルの数の増加率にしきい値を設定し、一定条件以下となった部分の外側のピクセルを無効化することによって行う。今回の処理の経験から、このしきい値がうまく設定できると、近接した重星等の分離にも効果を発揮すると考えられる。ただし現時点ではどの様な値を設定するのが効果的か試行錯誤を行っている段階なので、明確な指針は示せない。今後多くの事例処理を通して指針を得ることになるだろう。

なお、この処理の前提として「星像は円盤状である」としたが、この前提条件は「点对称形である」としてもよい。たとえば実際の撮影の際にしばしば起こる「星像の流れ」(追尾精度が悪い場合などに起こる)がおこっても、点对称という条件は成立するので、多少撮影に問題のある像でも用いることが可能となる。

f. その他の処理

a~e で一通りのノイズ除去作業は終了するが、これはノイズを除去することを主眼においた作業であったため、元の画像に存在していた情報のうち有用な情報 (特に、星像各部分での光量分布情報等) も幾分失なわれてしまう。これを補う方法として、a~d までの処理の終わった画像と元となった画像の重ね合わせを行うことが考えられる。

これによって不要なノイズは除去され、星像に関しては高い階調 (より詳しい光量分布) を得ること

ができる。残念ながら今回はこの操作には至らなかったが、CCD カメラでの観測が本格化するまでには対処したいと考えている。

冥王星の画像 1 (図 2) について、ノイズ除去作業を実際に行った結果を画像 2 (図 3) に掲げる。画像 2 は反転画像 (明るい部分が黒で表される) とした。矢印で示した画像中央の比較的明るい星が冥王星である。参考までに中央上方の明るい星は 10.7 等級、他の明るい星は 13~16 等級である。

(C) 画像上での星像の位置読みとり

ノイズ除去の済んだ画像から星像の位置を読みとる。従来の写真観測等では、この作業が全作業中において非常に大きな比重を占めるが、CCD カメラを用いた観測では (B) e で説明したと同様の方法で星像の中心位置を求めるだけで済む。表 1 は、画像 2 を用いてプログラムにより自動的に星像を読みとった結果の出力ファイルの内容である (ファイル名「XYZ.DAT」)。認識した星の数は 29 星であった。座標値は画面上の座標で X は写真横方向 (右向「正」)、Y は写真縦方向 (下向「正」)、単位は 1 ピクセル。P は星像中に含まれる光点ピクセル数である。ピクセル数が多い順に記した (冥王星は 4 番目)。

(D) 星表データとの突き合わせ

通常小型のカメラで星野写真を撮影すれば、写真の中に見慣れた星座の星々を見いだすことは比較的容易で、これを基にして実際の写真の視野を知ることができ、未知の天体が写っていれば既知の天体からの相対的な座標差から位置を知ることができる。

CCD カメラを用いた位置観測も、原理的な手法は小型カメラでの観測と同様である。ただし実際の観測においては、小型カメラでの撮影と比べて非常に狭い視野しか得られないこと、及び撮影される天体が暗い場合が多いことから、いくつか技術的な問題が発生する。今回の観測で用いた機器構成では、CCD カメラの視野は約 $8.5' \times 5.7'$ (全天の $1/300$ 万の面積) しかなく、このため視野内に明るい星が写る可能性はきわめて低い。また観測対象の天体も通常暗い天体が多く、この条件で位置決定を行うためには、全天について、暗い天体までカバーした星表が必要である。

幸い、近年 GSC (AURA1992) という16等星までをカバーした星表がCD-ROMのかたちで入手できる。GSCに収録された星は約1900万星あり、本装置の CCD カメラの視野内にも平均して5~6星程度の GSC 記載の星が写る可能性がある。以下に GSC

と撮影された視野内の天体の突き合わせ (同定) 作業について実際に行った内容を説明をする。

a. 撮影位置近傍の星のデータ切り出し

撮影した位置を中心に近傍の星の位置データを星表から切り出す。撮影した位置については望遠鏡の位置合わせなどに誤差があることを考慮し、切り出す範囲を広め (今回は面積にして約4倍) にとる。切り出しには、今回は GSC 付属のソフトを用いた。切り出したファイルは、以後の作業に便利のように簡単なフォーマット変換等を併せて行った結果を表2に掲げる (出力ファイル「XYZ.GSC」)。

b. 星の同定 (その1)

赤道座標に対する視野の傾き及び光学系のゆがみなど不明な点が多いので、視野の傾きの影響をあまり受けにくい数値として、星と星の間の角距離の比を

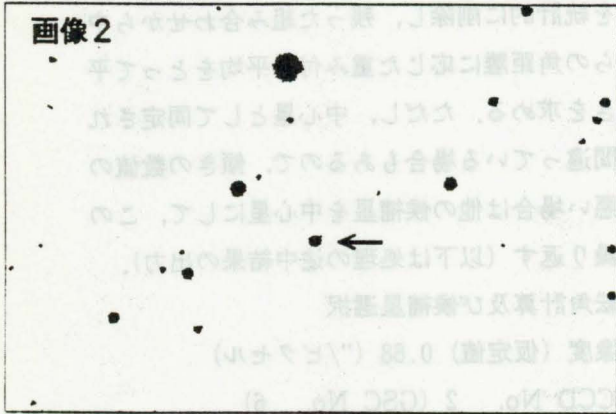
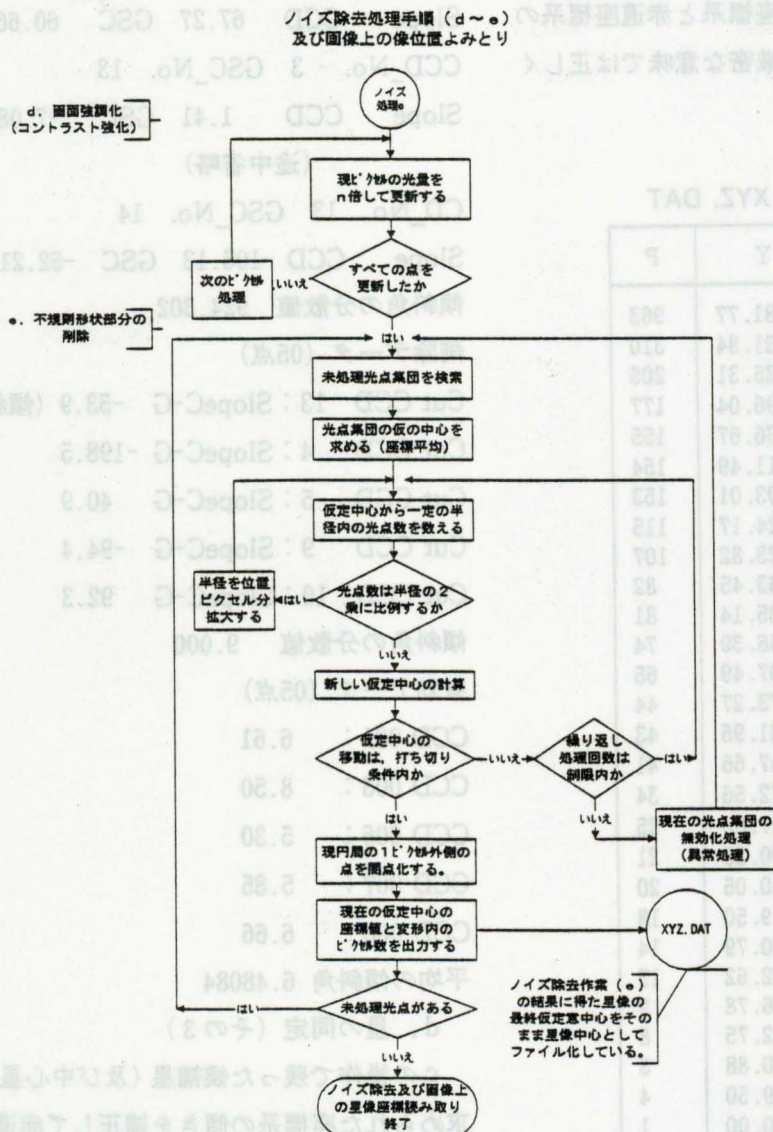


図3 冥王星画像2



フローチャート4

No.	X	Y	Z
1	387.85	81.77	303
2	394.79	82.84	310
3	388.43	82.31	308
4	392.08	80.04	177
5	390.83	78.87	185
6	382.94	71.49	184
7	393.01	80.01	183
8	381.34	74.17	118
9	381.87	82.82	107
10	383.88	80.88	83
11	389.14	80.14	81
12	381.42	74.39	74
13	342.98	407.49	82
14	80.38	73.27	44
15	331.88	73.81	44
16	380.80	74.68	44
17	373.74	73.74	44
18	321.88	73.74	44
19	38.22	310.08	40
20	323.78	310.08	40
21	370.00	310.08	40
22	8.43	320.78	40
23	302.82	320.78	40
24	471.11	320.78	40
25	88.28	300.88	40
26	621.18	300.88	40
27	373.20	310.00	40
28	100.00	320.00	40
29	34.00	303.00	40

用いて星表中の星と撮影された星とを比較する。画像から読みとられた星を星表上の任意の星だと仮定し、周囲の星までの角距離を画像上及び星表の双方で計算する（前述「XYZ. DAT」「XYZ. GSC」使用）。双方の計算結果を比較し、その差がある値（任意に指定）より小さい組み合わせの数をカウントする。仮定した星が正しければ一致する組み合わせ数が増えるので、一致数の多い星を同定する星の候補とする。

c. 星の同定（その2）

bで候補となった星から、画像の中心に近い位置の星を選ぶ。この星を仮に中心星とよび、中心星から他の候補の星へ結んだ直線を考える。この直線と画像においてはY方向(上下方向)、星表データにおいては赤経方向とのなす角をそれぞれ求め、その差を計算する。この差は画像の座標系と赤道座標系の傾きと考えることが出来る（厳密な意味では正しく

ないが今回のようなごく狭い範囲においては真の傾きとの差は無視できる）。中心星及びその他の候補星が正しければ、この傾きはどの候補星についてもほぼ同じ値となる。すべての候補星についてこの傾きを求め、その結果から他の値とかけ離れた値の組み合わせを統計的に削除し、残った組み合わせから中心星からの角距離に応じた重み付き平均をとって平均の傾きを求める。ただし、中心星として同定された星が間違っている場合もあるので、傾きの数値の収束が悪い場合は他の候補星を中心星にして、この操作を繰り返す（以下は処理の途中結果の出力）。

座標回転角計算及び候補星選択

画像解像度（仮定値）0.68（"/ピクセル）

中央星 CCD_No. 2 (GSC_No. 6)

CCD_No. 1 GSC_No. 1

Slope CCD 67.27 GSC 60.66 差 6.61

CCD_No. 3 GSC_No. 13

Slope CCD 1.41 GSC -7.08 差 8.50

(途中省略)

CD_No. 13 GSC_No. 14

Slope CCD -106.13 GSC -52.21 差 -53.92

傾斜角の分散値 924.302

削除データ (05点)

Cut CCD 13 : SlopeC-G -53.9 (傾斜角の差)

Cut CCD 4 : SlopeC-G -198.5

Cut CCD 5 : SlopeC-G 40.9

Cut CCD 9 : SlopeC-G -94.4

Cut CCD 10 : SlopeC-G 92.3

傾斜角の分散値 9.000

有効データ (05点)

CCD 001 : 6.61

CCD 003 : 8.50

CCD 006 : 5.30

CCD 007 : 5.85

CCD 008 : 6.66

平均の傾斜角 6.48084

d. 星の同定（その3）

cの操作で残った候補星（及び中心星）について、求められた座標系の傾きを補正して赤道座標への変換を行い、星表上の対応する星の赤経、赤緯との比

表1 ファイルXYZ. DAT

No.	X	Y	P
1	357.65	81.77	963
2	294.79	231.84	310
3	559.43	225.31	205
4	392.06	296.04	177
5	230.83	336.67	155
6	653.94	11.49	154
7	137.64	393.01	153
8	751.34	124.17	115
9	612.87	123.82	107
10	759.68	363.45	82
11	759.59	305.14	81
12	741.42	146.39	74
13	243.98	407.49	65
14	60.56	73.27	44
15	199.19	331.95	43
16	360.80	147.66	41
17	723.47	172.56	34
18	321.56	217.80	25
19	36.23	500.23	21
20	223.75	310.05	20
21	270.00	9.50	18
22	8.43	330.79	14
23	45.62	302.62	13
24	471.11	236.78	9
25	58.25	132.75	8
26	624.12	300.88	8
27	372.50	319.50	4
28	400.00	290.00	1
29	34.00	503.00	1

表2 ファイル XYZ. GSC

赤経	赤緯	等級	No.
16.078056	-7.37086	14.78	13
16.078208	-7.40003	14.19	85
16.082119	-7.26306	10.74	99
16.074917	-7.39972	12.62	115
16.083981	-7.40733	10.87	141
16.077117	-7.28136	15.05	157
16.084286	-7.41486	12.50	173
16.085922	-7.41242	15.45	175
16.078919	-7.39586	14.10	193
16.079756	-7.29617	14.65	205
16.085556	-7.40947	14.43	211
16.075364	-7.27958	13.79	245
16.084178	-7.30914	15.46	249
16.087697	-7.29286	15.03	261
16.083167	-7.29064	13.85	313
16.085472	-7.31728	15.01	315
16.078183	-7.25731	15.24	323
16.077328	-7.19575	13.07	894
16.074242	-7.20250	15.47	911
16.086422	-7.20328	13.87	928
16.089994	-7.20647	15.17	972
16.075883	-7.24439	14.47	976

$$Y(x, y) = dx + ey + f$$

同定された星すべてについて、上記関係を成立させるように a ~ f について解く (同定した星 3 個以上を用いて、最小二乗法で解いている)。X, Y が得られれば、あとは赤経、赤緯に変換すればよい。この $s(x, y)$ から $S(X, Y)$ への変換式は単純であり、観測機器の系全体の歪みが大きな場合にはより高次の項を追加する必要があるが、今回使用した観測機器の組み合わせであれば一次関数での近似で十分な補正が行われる。この変換式は光学系の歪み、CCD の素子配列の歪み (このようなものがあれば)、仮定した CCD 素子の間隔の誤差その他についてまとめて補正する事ができるので、使用機材それぞれの歪みについて詳しいデータが無い場合でも有効である。

これで CCD 画像の座標 (すでに幾分かの座標変換は行われているが) から赤道座標への変換は可能となる。CCD 画像に位置のわからない天体が写っているならば、その CCD 画像座標値から上記変換式を用いて、測心赤道座標値を得ることができる。

(4) 位置測定の結果

位置測定の実例として、冥王星の位置を以下のとおり求めた。比較のため天体位置表 (1996) の冥王星の位置もあわせて記す。

撮影日時 1996年7月11日

00時11分 (JST)

測定結果

赤経 16h04m55.26s

赤緯 -7° 18' 19.1"

天体位置表 (平成8年版) の補間結果

赤経 16h04m55.16s

赤緯 -7° 18' 18.8"

また、観測値と天体暦との差 (O-C) について、国立天文台において1994年に行われた CCD マイクロメーター付子午環での観測 (M. Yoshizawa etc. 1995) で求められた値と比較してみた (表3)。なお、国立天文台の値は、JPL の暦 DE200 に対してのものであるが、天体位置表 (JE) は DE200 とよく合っていると考えられる。誤差評価のない暫定的な単独値ではあるが、国立天文台の観測と概ね合っているよ

較を行う。比較結果が良好な候補星を最終的に「同定された星」とする (以下は比較中の出力例)。

CCD 001 : Ra 241.232431 Dc -7.26381

残差 Ra -0.015119 Dc 0.02683

Ra&Dc 3.6"

CCD : X 79.40 Y 142.02

GSC : X 83.43 Y 146.03

CCD 002 : Ra 241.247550 Dc -7.29064

残差 Ra -0.000000 Dc 0.00000

Ra&Dc 0.2"

CCD : X 0.00 Y 0.00

GSC : X 0.26 Y 0.00

(以下省略)

(E) CCD 画像の座標系から天球上の座標系への変換式作成

すでに星表との同定が済んだ星を用いて、上記までの処理以後に残っている歪みを補正し、赤道座標へ変換する式を作成する。(D)d までの処理を済ませた座標系で表された星を $s(x, y)$ とし、 s と同定される星表上の星 $S(X, Y)$ とする。ここでは (X, Y) は (x, y) の一次関数で表されるものとする。

$$X(x, y) = ax + by + c$$

表3 冥王星の位置観測結果 (O-C)

	今回の観測 1996.7.10 O-C(JE)	国立天文台の観測 1994.5.9 O-C(DE200)
赤経(s)	+0.10	+0.1753±0.072
赤緯(")	-0.3	-0.569 ±0.095

ンとして、より幅のある観測活動を行うことが可能となる。また、合理的かつ効率的な観測計画を立てることができるという利点は、勤務体制への好影響にもつながる。

具体的な業務への適用例として、次のようなものが考えられる。

天体暦精度維持向上

- ・外惑星、小惑星位置観測
- ・惑星の衛星位置観測
- ・ガリレオ衛星相互食観測
- ・水星金星日面経過の観測
- ・月縁地形観測 (星食観測精度向上)
- ・重星位置観測 (〃)

地球接近天体の掌握

- ・地球接近小惑星、彗星の軌道決定観測
- ・同発見捜索、追跡観測

基本座標系と SLR 座標系の結合

- ・測地衛星あじさい方位観測

天体望遠鏡制御

- ・目標天体自動導入
- ・天体高精度追尾

その他

- ・人工天体などの緊急軌道観測
- ・彗星など情報提供のための観測

外惑星・小惑星の位置観測や惑星の衛星位置観測を定常的に行うことで、天体暦の精度維持向上に資するためのデータ取得を行うことができる。また、現在光電管で行っているガリレオ衛星相互食については、光度変化をより正確に観測できる冷却 CCDの方が有利である。

さらに、この観測技術により、従来の天体暦作成というニーズの他に、近年、防災あるいは地球環境問題としてとりあげられ、国際ネットワーク構想が提唱されている地球接近天体 (NEO) の掌握・追跡監視という、防災保安目的の天体観測へも貢献が可能である。その汎用性を活かし、研究ニーズなどへの協力も行うことができ、行政機関唯一の天体観測所である水路観測所をより幅広く活かすことができ

うである。

(5) 問題点等

今回は、CCD カメラを使った天体の位置観測の可能性を試みるのが目的であり、技術的に試行錯誤を続けている途中であるが、実験的に求めた冥王星の位置に関してはよい結果が得られた。途中の処理などまだ不完全な状態であるものの結果を出せることを考えれば、CCD カメラによる天体の位置観測は、実用性の高いものであると考えることができる。今後、より意味のある結果を得るために、測定誤差や GSC 星表の基本座標系との系統誤差の評価方法などの検討を行う必要がある。また、処理を自動化することにより、観測後数分から数十分で結果を算出することも可能になるであろう。

5. 今後の展望

(1) 試験観測計画

これまで述べてきたように、現在試験観測はまだ初期の段階であり、観測の実用性を示すに留まった。今後、ある程度撮像システムが完成したところで、外惑星の集中的な観測を行い、天体暦との比較を行う予定である。またその後は、より微光な小惑星についても観測を試行し、木星の衛星についても実用の試験観測を行う予定である。併行して、冷却 CCD をはじめ観測機器、データ処理法についても充分研究を行い、より実用性の高い観測への検討を進めていく。

(2) 業務への応用

冷却 CCD による天体位置観測は、汎用性が高い「天域の測量」技術であり、水路観測所がこの観測技術を得ることにより、従来の天体暦作成を目的とした観測はもとより、いわば天域の測量ステーショ

る。

参 考 文 献

渡部潤一：太陽系天文学. シュプリンガー・フェア
ラーク東京. 147-167. (1995)

福島英雄：冷却 CCD 入門. 誠文堂新光社. 52-188.
(1996)

AURA : The Guide Star Catalog (GSC) Ver. 1.
1 (1992)

M. Yoshizawa, M. Soma, S. Suzuki : The Astro-
nomical Journal vol. 110, No.6
3050-3053 (1995)

海上保安庁水路部：平成 8 年天体位置表 (1996)