

Pan-STARRS 計画と鹿林 2-m 望遠鏡の現状

木下 大輔, 吳景煌, 陳澤銓, 沈霽嫻, 黃如慧, 楊卉欣
國立中央大學天文研究所

2011 年 4 月

Abstract

Pan-STARRS 計画は全天の 75 パーセントの領域を計画的に繰り返し観測するこれまでにない掃天観測計画である。ハワイのハレアカラ山頂に設置された 1.8-m 望遠鏡と広視野カメラ Giga Pixel Camera (GPC) により、効率的な広視野撮像を行う。一台日の望遠鏡 PS1 による観測は 2010 年 5 月から開始された。この PS1 の現状について報告する。また、Pan-STARRS 計画では、多数の未知の天体の発見が期待されるが、それらの天体の特徴を明らかにするために追跡観測が必須である。國立中央大學では、主に Pan-STARRS 計画の追跡観測のために台湾国内に新たな 2-m 望遠鏡の建設を進めている。この 2-m 望遠鏡には、四色同時撮像装置が取り付けられる予定であり、その開発が進められている。この 2-m 望遠鏡計画の現状についても報告する。

1 Pan-STARRS 計画

これまでも全天サーベイは何度も行われたが、それらはそれぞれの天域についてある一つの時刻で得た撮像データから構成された全天サーベイであることが多い。それに対して、Pan-STARRS 計画では、当初から、時間軸を意識した天文学を行うことが考えられた上で、観測手順が練られた全く新しいサーベイ計画である。Pan-STARRS は Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System の略である。小惑星やカイパーベルト天体などの太陽系内の移動天体、銀河系の中の変光星、系外の超新星やガンマ線バーストなど、移動する天体や明るさを変える天体、さらに突然現れる天体などの研究に有用なデータを提供し、これらの変化を見せる天体の研究を大きく前進させることが期待されている。つまり、これまでの全天サーベイは静的な宇宙を見ることにその主眼が置かれてきたが、Pan-STARRS 計画では、もちろん静的な宇宙を見ることもその一部分ではあるが、動的な変化する宇宙を見ることその最大の特色となっている。

Pan-STARRS 計画は最終的には四台の望遠鏡による観測を行うことを目指している。そして、そのプロトタイプとしての望遠鏡が PS1 であり、PS1 はハワイのマウイ島にあるハレアカラ山頂に設置されている(図 1)。当初、PS1 は効率的な広視野撮像の技術的な検証のための望遠鏡であったが、のちに、PS1 でも科学的な観測を行うべきであるという意見が多数を占め、コンソーシアムを組織して PS1 の科学的な運用を行うこととなった。このために作られたのが PS1SC (PS1 Science Consortium) である。PS1SC には、アメリカ、イギリス、ドイツ、そして台湾の研究機関が参加している。台湾では、國立中央大學が中心となり、大學連合を組織し、コンソーシアムに参加している。当初の予定よりかは若干遅れたが、公式なサーベイ観測は 2010 年 5 月に開始された。

PS1 システムは、いくつかの部分からなっている。それらは、望遠鏡、観測機器、観測所や望遠鏡・観測機器を制御するソフトウェア、データ解析ソフトウェア、データベースシステムなどである。望遠鏡は F/4 の 1.8-m 望遠鏡であり、三つの補正光学系が含まれ、対角で三度の視野を提供する。プレートスケールは $38.5 \mu\text{m}$ である。この望遠鏡は効率的な観測を実現するため、機敏に応答することもその特徴となっている。PS1 望遠鏡には専用の観測装置が取り付けられる。それが GPC (Giga Pixel Camera) である(図 2)。GPC は合計 14 億画素からな



Figure 1: ハレアカラ山頂に設置された PS1 のドーム。

る広視野カメラである。このカメラは望遠鏡の対角三度の視野をまるごと覆い、チップやセルの間のギャップはあるものの、7平方度の領域を一度に撮像することができる。ピクセルスケールは $0.3 \text{ arcsec} / \text{pix}$ で、ハレアカラの条件で適度なサンプリングができるようになっている。GPC に用いられている CCD は、OTCCD (Orthogonal Transfer CCD) という新しい種類の CCD チップである。GPC で使われている OTCCD は、 600×600 ピクセルをその最小単位としており、これがセルと呼ばれている。一つのチップには、この 600×600 ピクセルのセルが 8×8 個集積されている。GPC 全体では、60 個の OTCCD チップが使われており、したがって画素数は約 14 億画素となる。従来の CCD では、平行方向に電荷を転送したのち、シリアルレジスター上でシリアル転送を行い、読み出しを行う。OTCCD では、積分中に上下方向にも左右方向にもどちらにでも電荷の転送を行うことができるよう設計されており、これによりオンチップのガイドが行うことができる。7平方度もの視野があると、どうしても明るい星が入り込んでしまうことが予想される。そのような場合、明るい星が写り込んでしまうセルでは、科学的なデータを取得することをやめ、ビデオレートで撮像を行うことでガイドに利用できるデータを得て、その付近のセルのガイドを行う。フィルターは *g'r'i'z'y* の五種類のフィルターが用意されている。また、太陽系天体の観測用に *w* フィルターも使われる。*w* フィルターは *g'* から *i'* にかけての透過率を持つようなフィルターである。観測所や望遠鏡・観測機器を制御するソフトウェアは OTIS (Observatory, Telescope, & Instrument Software) と呼ばれている。文字通り、観測所や望遠鏡や観測機器を動作させるためのソフトウェアである。

観測で重要になる概念は TTI (Transient Time Interval) である。ある一晩に観測される領域は、それぞれ二回の撮像が行われる。その二回の撮像は TTI で定義される時間間隔を空けて実行される。具体的には TTI は 30 分から一時間となっている。これにより、地球に近いところでは近地球小惑星の検出も行うことができるようになっている。サーベイは、 3π steradian survey, medium deep survey, solar system sweet spot survey などいくつかの異なる部分からなるが、ここでは全体の半分以上の時間がつき込まれる 3π steradian survey を中心に述べる。 3π サーベイでは、一晩にはある一色のフィルターで観測される。同じ色の同じ領域のデータは、典型的に一週間後に取得される。そのため、一つの天域についてそれぞれの色について合計で毎年四回の撮像が行われる。「典型的に一週間」と書いたが、より青いバンドでは月の影響を避けるため新月付近で撮像を行う必要があるためこの間隔は若干短くなり、

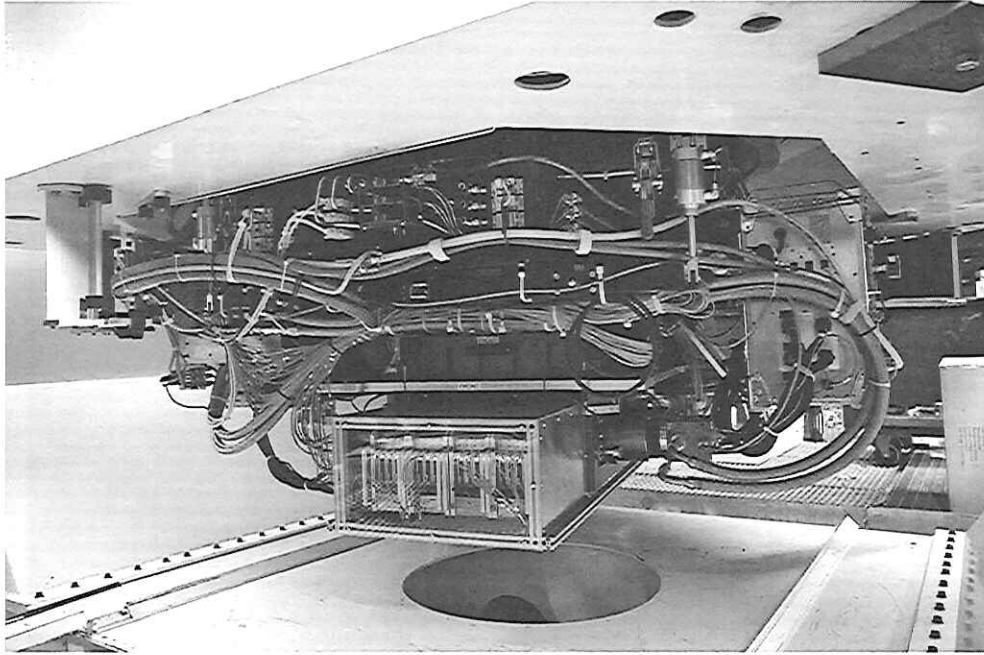


Figure 2: PS1 に取り付けられた Giga Pixel Camera 。

逆により赤いバンドでは月の影響は相対的に軽微であるので間隔がより長めになる。

得られた撮像データは、まずネットワークを使い山麓の施設に下ろされ、IPP (Image Processing Pipeline) と呼ばれるデータ解析パイプラインにより処理される。IPP の役割は、データの一次処理から始まり、位置の校正、天体の検出、測光などである。PS1 では膨大な量のデータが牛み出されるため、研究者が個人でデータを処理することは現実的ではなく、特殊な場合を除き IPP が一括してその処理を担当する。検出された天体は、PSPS (Published Science Products System) と名づけられているデータベースに登録される。研究者は PSPS と通して必要な情報を得ることとなる。場合によっては、興味のある天体の画像が必要となる場合も十分に考えられる。その場合、Postage Stamp Server を使って、対象となる領域の画像を請求する。さらに、太陽系内の移動天体については、MOPS (Moving Object Processing System) がそれらの検出、同定および軌道決定を担当する。MOPS は IPP の天体検出の結果を受け取り、TTI ペアを比較することで移動する天体を探す。移動していると思われる天体が見つかった場合、移動のベクトルが計算され、これは tracklet と呼ばれる。tracklet が見つかる と、この tracklet と接続されうる別の夜の tracklet が存在するかどうか調べられる。この作業は inter-night linking と呼ばれている。こうして移動天体の候補が探される。ここで問題となるのは、このような作業では組み合わせの数 が膨大となり、大きな計算量が要求されることである。MOPS では、KD-tree と呼ばれる手法を用い、この問題を解決している。移動天体が見つかる と、軌道決定が行われる。これには JPL のコードが用いられている。また、tracklet は、既知の天体とリンクされることももちろんある。太陽系天体の検出以外にも、必要になってくるソフトウェアがある。例えば、超新星の搜索のためのソフトウェアや恒星と銀河の分離のためのソフトウェアなどである。これらは元々の PS1 のプロジェクトには含まれておらず、PS1SC で開発することになっており、Science Analysis Server と呼ばれている。

前述の通り、PS1 によるサーベイは 2010 年 5 月に開始された。2.5 年間の運用が予定されており、状況によっては半年間の延長があり得る。MDS (Medium Deep Survey) は順調に超新星など突発天体を発見している。太陽系天体については、しばらく試行錯誤が続いていたが、2010 年の後半からより多くの天体が見つかり始めている。これには観測方針の部分的な変更も寄与している。もともとの Solar System Sweet Spot Survey では、夕方の西の低空および明け方の東の低空を狙って、近地球小惑星の観測が行われる予定であった。しかし、

この条件では困難が大きいことが明らかになり、その後、衝の付近の位置を観測するよう変更が加えられた。現在では、この衝付近の位置での太陽系天体の観測は Opposition Sweet Spot Survey と呼ばれている。また、太陽系天体の検出において障害になっていたことの一つは、GPC の filling factor の低さであった。チップやセルの間のギャップに加えて、機能していないセルもあり、視野全体に対する撮像可能な領域の面積が 100 パーセントではない。filling factor が 80 パーセント程度であると、四回の撮像でいずれもデータが得られている共通部分の領域は視野全体の 40 パーセント程度となってしまふ。この問題を解消すべく、対策が考えられた。現在では、一晩での二回の撮像による TTI pair ではなく、四回の撮像による quad が一単位としてデータが得られている。典型的にはある一つの天域について一時間のうちに四枚の撮像データが得られる。これらの観測方針の変更により、続々と太陽系天体が発見され始めている。発見された天体には、彗星 P/2010 T2 (PANSTARRS) や PHO 2010 ST3 や三個のカイパーベルト天体なども含む。また、2011 年 1 月終わりには、PS1 の太陽系天体の発見効率を実証すべく、“PS1 NEO Demo Night” が設定された。2011 年 1 月 29 日に一晩のすべての観測時間が近地球小惑星の発見のための観測に振り向けられ、その結果、19 個の近地球小惑星が発見された。これは、一つの望遠鏡で一晩に発見された近地球小惑星の数としては、現在までの最高記録となっていて、PS1 が太陽系天体の観測に極めて有効であることが示された。

2 鹿林 2-m 望遠鏡

PS1 は非常に効率的に広い領域を観測することができる強力な観測施設であるが、継続して別の領域を観測し続けたいけないため、発見した興味深い天体を自分自身でより詳細な観測をすることはできない。このため、PS1 とは別に追跡観測用の望遠鏡を準備する必要がある。国立中央大学では、独自に口径 2-m の望遠鏡を新たに建設し、この 2-m 望遠鏡に PS1 のための追跡観測という任務を持たせることとした。2-m という口径は、PS1 が口径 1.8-m であることと関係している。もちろん、台湾の鹿林という観測サイトよりも、ハレアカラの方が条件がよいのであるが、同程度の口径があり、撮像観測による追跡であれば、相当数の天体は追跡可能であるという考え方による。PS1 の 3π steradian survey の典型的な積分時間は 30 秒から 60 秒のため、鹿林での追跡観測で十分な S/N を稼ぐためにはより長めの積分が必要となる。PS1 の実効的な PSF は 1 秒角程度であり、一方、鹿林での典型的なシーイングは 1.5 秒角程度なので、2-3 倍程度の積分時間をかければ多くの天体は追跡可能であると思われる。

鹿林の 2-m 望遠鏡の特徴は以下の通りである。望遠鏡の光学系はリッチー・クレチエンの F/8 であり、F/8 という選択は既存の 1-m 望遠鏡との協調した運用を考えてのことである。架台は経緯台であり、焦点はカセグレン焦点を備える。今後、必要に応じてナスマス焦点も無理なく準備できるようになっている。鏡は Astro-Sitall によるもので、表面には SiO₂ の保護膜が形成されている。期待される結像性能は 0.35 秒角で、鹿林の典型的なシーイングを考えると十分によい。指向精度は 2 秒角 (RMS) で、追尾精度は 10 分間あたり 0.3 秒角である。指向の際の最大速度は秒速 4 度である。

鹿林での PS1 に対する追跡観測を考える際に注目したのは、対象となる天体と鹿林の空の条件の二点である。まず、対象となる天体であるが、当然、PS1 の特徴から、太陽系天体や突発天体が多く含まれることが容易に想定される。これは、つまり、刻一刻と明るさを変える天体を相手にしなければならないことを意味する。一方、鹿林という観測サイトは、世界有数の観測適地というわけではもちろんない。測光夜数は限られ、また、一晩のなかでも天気は変動し、雲が流れていくことも多い。整理すると、変わりやすい空の条件のもとで、自ら明るさを変える天体の明るさや色指数を測定しなくてはならない、ということになる。

伝統的なフィルターを取り替えながら観測する手法は以下の通りである。あるバンドでの観測ののち、フィルター交換を行い、そのあと、別のバンドで撮像を行う。この方法では、同じ天体の観測でも、異なる波長域のデータではデータ取得時間に時間差が生じる。天体自身が明るさを変えたり、空の条件が変わりやすい状況下にあつては、これは問題となる。特に、色指数を

求めるような場合には、偽の結果を生む可能性がある。

結果として観測装置として選択したのは、ダイクロイック・ミラーで光を分割して撮像を行う四色同時撮像装置である。ダイクロイック・ミラーは、ある波長を境として、それよりも短波長側の光を反射し、それよりも長波長側の光を透過させる。これにより、青い波長と赤い波長で同時に観測を行うことができる。四色同時撮像装置では、ダイクロイック・ミラーを三枚使い、四つの波長域で同時にデータを取得する。図3に、装置の構成を示す。四つに分けられた光は、四枚のバンドパスフィルターと四台のCCDカメラにより撮像される。この利点は、基本的に同時に四バンドでデータを取得されることである。厳しいことを言うと、0.1秒程度のずれは生じるかもしれないが、多くの場合問題とはならない見込みである。また、一回の撮像で四バンドのデータが取得されることから、観測効率の向上も期待される。伝統的な手法で必要となる観測時間は以下のように T_c で表される。

$$T_c = (t_{exp} + t_{ro}) \times N_{band} \quad (1)$$

ここで、 t_{exp} は各バンドでの積分時間、 t_{ro} は読み出し時間、 N_{band} は観測するバンドの数である。一方、多色同時撮像装置を用いた場合に必要となる観測時間 T_s は以下の用に示される。

$$T_s = \frac{t_{exp}}{E_{throughput}} + t_{ro} \quad (2)$$

ここで、 $E_{throughput}$ は余分に追加される光学系の部分の効率である。今、簡単のため、 t_{exp} は各バンドまったく同じとして計算してみる。 $t_{exp} = 60 \text{ sec}$, $t_{ro} = 8 \text{ sec}$, $N_{band} = 4$, $E_{throughput} = 0.8$ としてみると、必要とされる観測時間は3.3倍ほど違ってくるのが分かる。さらに、四色同時撮像装置では、多少薄雲があっても、観測できると期待されることから、観測可能な時間もより多く取れることが期待される。

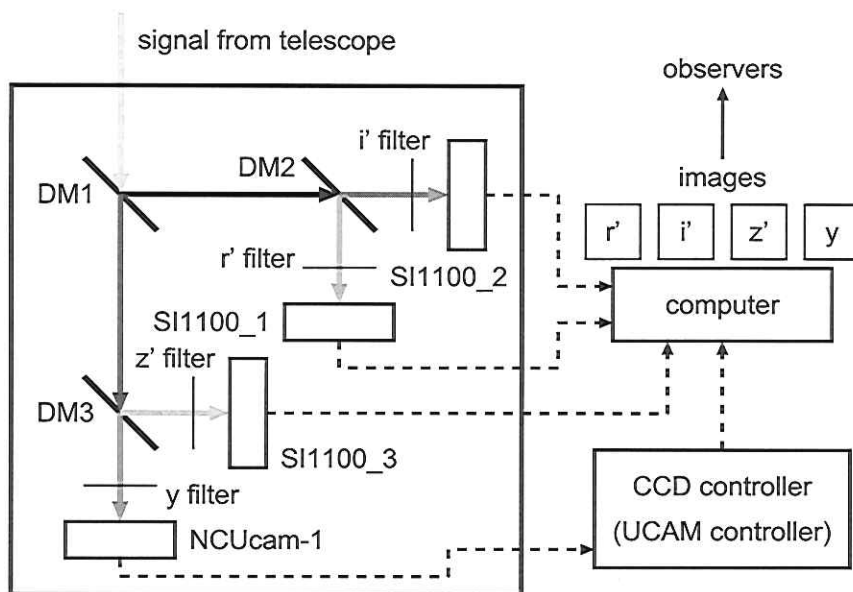


Figure 3: 四色同時撮像装置の概念図。

次に考慮したのは、開発の方針についてである。観測装置の開発を始めた段階で、開発グループには一切過去の観測装置の開発の経験がなかった。開発を始める際、以下の二つのことに注目した。まず一つの重要な点は、決められた目標の時期に観測装置を完成させ、実際の観測を首尾よく開始することである。今回の場合、Pan-STARRS計画と関連させているため、時期を逸してしまうと、相乗効果が得られない。また、研究経費は税金から得ているため、適当な時間内にきちんと研究成果を出し、それを報告する義務もある。もう一つの重要な点は、今回

の観測装置の開発を通じて、今後役に立つ経験を得るということである。すべてを購入して解決するという方法もあるかもしれない。しかし、今後、買うに買えないものもでてくるかもしれない。自分たちで開発するということを通して、この次の計画に生きる知識や経験を積み重ねるということも非常に重要であると考えた。また、実際のところ、小口径望遠鏡が特色を出して生き残っていくためには、買えるものではなく、自分たちでしか作れない観測装置を作って観測データを生み出していくことが決定的に大切であると考えた。観測装置に独特な機能があれば、生み出されるデータも特徴あるものになり、他の研究機関で得られるデータと差別化を図れると思われるからである。一見、この二つの両立は困難であると思われる。しかし、以下のような方針を取った。つまり、三台の CCD カメラは購入し、四台目のカメラは自作するというものである。三台のカメラは、CCD チップを指定して、特注品を作ることとした。購入するため、企業が納期を守ってくれれば、予定される時期に間に合わせることができ、望遠鏡の完成に合わせて、少なくとも三色同時撮像装置として、観測を開始することができる。一方、四台目のカメラは一から開発チーム内で作るため、CCD 撮像装置の製作について一通り経験することができる。この四台目のカメラの開発の遅れは、致命的な問題とはならない。また、この四台目のカメラは y-band での使用を想定しており、長波長側での感度の高い完全空乏型 CCD を使う。完全空乏型 CCD は空乏層の厚みが厚い比較的新しい種類の CCD であり、波長 $1 \mu\text{m}$ でも 40 パーセント程度の量子効率を持つ。これにより、他の装置との差別化がより容易になると考えられる。

現在、四色同時撮像装置の開発には主に六名が関わっており、エレキ担当の技術者が一人、光学担当の技術者が一人、ソフトウェア担当の技術者が一人、CCD カメラの評価と担当する大学院生が一人、事務担当者が一人、そして、プロジェクトの統括の担当が一人という構成になっている。

開発は比較的順調に進んでおり、三台のカメラ (SI1100 Series Camera) は 2010 年の初夏に納品された。これまでに三回の試験観測が行われ、データ解析が進められている。四台目のカメラは NCUcam-1 と名づけられ、開発が行われている。NCUcam-1 の概念図を図 4 に示す。2010 年 12 月に初めてエンジニアグレードの CCD チップを用いた駆動試験に成功した (図 5)。読み出し雑音は 400 kHz での読み出しの場合に $5 e^-$ 程度であり、十分に良好な値である。2011 年 4 月初めにサイエンスグレードの CCD チップも納品された。今後、読み出し試験に取りかかる予定である。

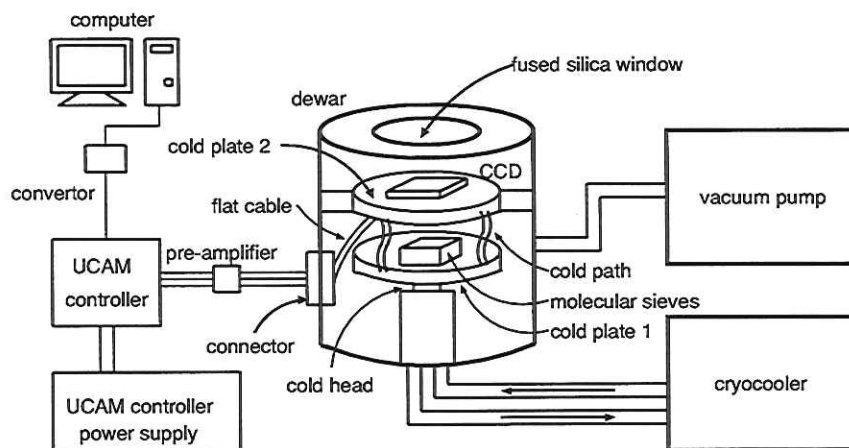


Figure 4: NCUcam-1 の概念図。

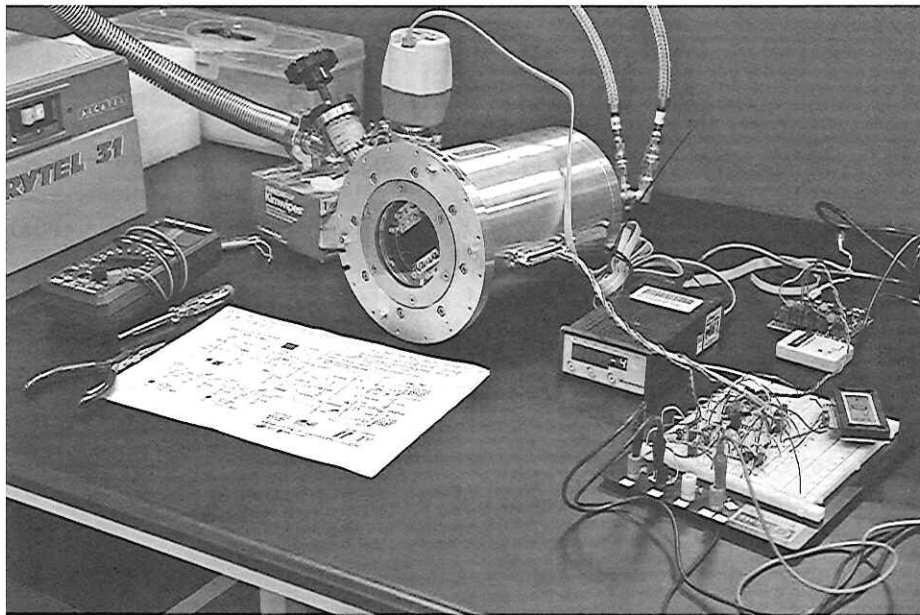


Figure 5: 実験室で駆動試験中の NCUcam-1。

3 まとめ

PS1 によるサーベイ観測は、同じ天域を計画的に繰り返し観測するという点で従来の観測とまったく異なる。このため、変化を示す天体の天文学や時間軸を意識した天文学において、大きな貢献をすることが期待される。PS1 での観測に対する追跡観測の準備も進めており、四色同時撮像装置の開発が行われている。

謝辞

本稿に関連する研究は、台湾の國家科學委員會の以下の研究経費の支給を受けています。ここに感謝いたします。“Comprehensive Understanding of Solar System Small Bodies” (ID: 96-2911-M-008-015-MY3), “Break-up of asteroids and space-weathering on their surface” (ID: 99-2112-M-008-013), “Follow-up Program for Pan-STARRS: Instrumentation Project for 2-m Telescope” (ID: 97-2911-M-008-010-MY2)。

(2011年4月19日受付, 2011年5月11日受理)