

CCD解体新書 その6

「CCDのハードウェア」

上野 宗孝

〈東京大学教養学部宇宙地球科学・〒153 東京都目黒区駒場3-8-1〉

E-mail : ueno@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

シリーズ最後の今回は CCD のハードウェアについて紹介します。一口にハードウェアと言っても CCD 素子そのものから、その素子の最適な動作環境を実現する筐体（デュアー・チェンバー）、CCD を駆動するための電気回路、CCD 駆動回路とコンピューターを接続するためのインターフェイスそして全体のシステムを制御するコンピューターまでを含みます（図1）。

1. デュアー

天文観測に CCD を用いる際には暗電流を小さくする目的から、素子を冷却して用いることが必要であることは暗電流の項で触れました。このような動作温度を実現するため、天文観測用のカメラでは CCD が真空断熱された冷却チェンバーに封入されて用いられるのが一般的です。素子の冷却には液体窒素などの冷媒のほか、ジュールトムソン冷凍機、機械循環式冷凍機、電子冷却素子（ペルチエ）等が用いられます。いずれの場合においても CCD の温度制御は重要で、この制御が不十分な場合には前回のフラットフィールドニングの項で紹介したように、暗電流差し引き時の不定性が生じて観測データの質を著しく低下させてしまう可

能性があります。特に CCD 素子の暗電流が比較的大きな領域の温度範囲で用いられるペルチエ冷却の CCD カメラでは、素子の温度制御が非常に重要になります。また CCD 内部に用いられている読みだし回路中の FET は、CCD の温度変化中に雑音が増加するという傾向があり¹⁾、暗電流の無視できる温度範囲の使用においても、温度の安定性を良好にすることが重要になります。

2. CCD 駆動回路

（電気回路のハードウェア）

本特集最初の項で紹介したように、CCD 上には大規模なものでは一千万を越える検出素子が並んでおり、それらの素子から画像情報を得るためには各画素の信号をそれぞれ外部に取り出す必要があります。CCD 素子内部における電荷の移送に関しては既に詳しく触れましたが²⁾、外部に取り出された信号は電圧の変化となります。例えば 1024 × 1024 画素の CCD の出力は、約 100 万回繰り返す時系列信号となります。その各々の電圧信号が、それぞれの画素からの信号を表現しています。従って CCD の出力信号を受け取るためには、この時系列信号をコンピューターで扱うことのできるデジタル信号に変換する必要があります。

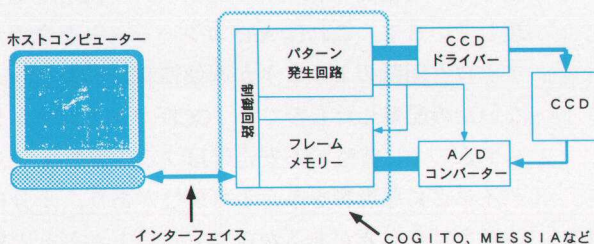


図1 天文観測用 CCD カメラの標準的なハードウェア

さらに CCD の信号を取りだすためには、既に触れたように複雑な制御クロックを CCD に与える必要があります。このクロックは各画素の電荷を縦方向に転送し、水平 CCD のチャンネルに渡し、さらに水平方向の転送を行い、最終的に出力アンプへと送ることを実現します。この制御クロックは一般的に CCD の種類（品種）毎に大幅に違ってきます。これは単に CCD 素子の画素数の違いだけで無く、CCD の方式や素子内部の電気的なポテンシャルの与え方によっても変わります。民生用のテレビカメラでは CCD を開発すると同時に、その CCD に必要なクロックを発生する専用の IC (LSI) が並行して開発されるのが普通です。専用 IC があれば、簡単な電気回路で容易に CCD を駆動することができます。しかしこの専用 IC では通常のテレビフォーマット以外の駆動、つまり天文観測で必要な長時間露出などに対応させることができません。このため製品化された天文観測用の CCD カメラでは、その CCD 素子の動作に最適化された CCD コントロール回路が付属しているのが一般的です。つまり、CCD 毎に専用のコントロール回路を用意してやる必要があります、このことが CCD カメラを製作する上での敷居を高くしています。実際に我々が最初に PtSi 検出器³⁾を用いた赤外線カメラの開発を行った際⁴⁾にも、天文観測に用いることができるコントロール回路が存在しなかったため、コントロール回路の部分から開発を始める必要がありました⁵⁾。

しかしこのハードウェア開発は、天文観測用カメラの開発に当たって必ずしも本質的な開発ではありません。さらにハードウェア自身はかなりの汎用化も可能です。現に我々が最初に開発したコントロールシステムも、PtSi 検出器を含めたほとんどの CCD に対応可能となるように設計していました。その後我々はこのシステムを改良して、現在では完全に汎用の CCD コントロールシステム【COGITO】を使用しています⁶⁾。この汎用コントロールシステム【COGITO】は現在では我々のグループだけ

ではなく、PtSi 赤外線カメラの国内外での共同開発研究⁴⁾や TOMBO 計画のプロトモデル、そして IRIS 等の天文衛星計画の検出器の評価に用いられています。また同様に国立天文台の関口真木氏らも汎用 CCD コントロール回路【MESSIA】を開発しており、モザイク CCD カメラやすばる望遠鏡の観測装置に用いられつつあります。

CCD の駆動回路の基本を理解していただくために、COGITO を例として CCD コントロール回路の動作を説明します。COGITO では CCD の駆動に必要な情報は、論理回路の積み重ねで発生させているのではなく、メモリー上に用意された何種類かのパターンを組み合わせて信号を発生させています。このメモリー内の情報はホストコンピューターから自由に変更することができます。これらの情報を適当な回数決められた順番で繰り返すことにより、CCD 動作に必要な制御クロックを得ています。このような回路を一度開発すると、新しい CCD に必要な駆動信号をソフトウェアの変更のみで自由に作成することが可能になり、極めて効率的です。この汎用のパターン発生器からの信号は CCD ドライバー回路へと送られます。CCD ドライバー回路はパターン発生器からの TTL レベルのデジタル信号を CCD に必要な電圧振幅に変換し、CCD のクロック入力端子に供給します。この駆動信号によって CCD は時系列に各画素からの信号を出力します。この時系列信号をデジタル情報に変換するのが A/D コンバーター回路です。COGITO では A/D コンバーターを各画素信号毎に 2 回動作させて相関ダブルサンプリング (CDS) を実現しています。これは A/D コンバーターを含めたアナログ回路のドリフトが画像情報に影響を与えないため配慮したものです。CCD コントロールシステムの DC 特性の不安定性はフラットフィールドインジケーションに悪影響を与える可能性があり、十分に注意を払う必要があるからです⁷⁾。しかしその反面 A/D コンバーターの最高使用周波数の半分の速度までしか CCD のデータを受け取ることができま

せん。我々のハードウェアでは最高速度よりも全体の安定性の方を優先して設計をしています。

さらにA/Dコンバーターから得られたデジタル信号はフレームメモリーと呼ばれるメモリーに一時的に格納されます。A/Dコンバーターからの信号を直接コンピューターに送らないのは、汎用のコンピューターが決まった時間毎に来る信号の受信に適していないためです。CCDの画素情報のように規則正しく送られてくる信号を受け取るためには、受け取る側が常に準備のできた状態で待ち受けていないと、データ飛びが起こる可能性があります。データ飛びが無作為に起こると画像処理をきちんと行うことが不可能になります。このような現象はUNIXのようなマルチユーザー・マルチタスクのオペレーティングシステムでは言うまでもなく、パソコンなどのシングルタスクのオペレーティングシステム（MS-DOSなど）においても、CPUにはハウスキーピングのための割り込みが頻繁に掛けられており、フレームメモリーを用いずに直接データを受け取ることは困難です。従って必ずバッファの役目を果たす一時的なメモリーが必要となります。

3. インターフェイス

CCDコントロール回路は通常CCDカメラの近傍に設置されることが望ましいと考えられます。これはCCDの駆動のための信号線やCCDから出力される信号線がアナログ信号であり、長い距離の引き回しを行うとノイズが多くなることを避けられないためです。しかしドーム内熱源除去や観測者の快適性のため、CCDコントロール回路を制御するホストコンピューターは望遠鏡の制御室に設置されることが好ましいでしょう。このためこれら2つのユニット間は数十m程度の距離を持って設置されることになります。このためこれら2つのユニットの間には、何らかのインターフェイスが必要となります。

パソコンやワークステーションが備えている通信

回線として有名なものに、RS232Cがあります。しかし、これらのシリアル回線は、速度があまりにも遅いため画像転送の使用に適しません。例えば2048×2048画素のCCD画像を16ビットのデータ長で取得すると、CCDフレーム1枚当りのデータ量は8Mバイトとなります。これをシリアル通信回線の標準的な速度である9600bpsで転送を行うと、1枚の画像を送るのに100分以上の時間を要してしまいます。このような速度の通信回線を用いてデータの転送を行うと、データの一時置場であるはずのフレームバッファの内容をコンピューターに転送する以前に次々とデータが溢れてしまうことになるでしょう。

このような問題を生じないためにCOGITOやMESSIAでは標準バスとしてVMEバスを用いています。VMEという規格のバスは、計測器の分野や産業用分野で有名で、ほとんど全てのコンピューターとのインターフェイスが製品化されています。我々がCOGITOを用いる際にはSVA-100やBIT-3というインターフェイスを用いて、COGITOユニットとワークステーションの間を接続しています。特にBIT-3インターフェイスは高速の光ファイバー延長線を用いているため、CCDコントロール回路とホストコンピューター間の距離が100m以上離れていても、高速データ通信が可能です。このシステムを用いた際の転送速度は転送方式に依存しますが、数Mバイト/秒以上の速度画像表示を達成することが可能です。

この方法以外にもVMEバスの中に汎用のボードコンピューターを搭載してイーサネット回線を通じて観測室までデータを転送するという方法も考えられます。この方法の方がホストコンピューターに対する制限も少なく好ましい面もありますが、通常のイーサネット回線はBIT-3インターフェイスの速度と比較すると劣りますので、高速のデータ取得の用途には適さないでしょう。

また我々のグループではCCDコントロール回路の標準インターフェイスとしてSCSIバスも検討し

たことがあります。VMEバスを用いる替りに SCSIバスを用いることは、CCDコントロール回路の汎用化にとって好ましいかも知れませんが、接続ケーブル長に制限があり、ホストコンピュータからの距離を稼ぐことができないため現在では開発を進めておりません。

また MESSIA を標準ハードウェアに用いる予定のすばる望遠鏡計画では、光ファイバーを用いた超高速のデータハイウェイが望遠鏡の各焦点部に用意される予定で、非常に大規模な画像を非常に高速に観測用のホストコンピュータまで転送することが可能となる見込みです。

4. ホストコンピューター

我々が最初に PtSi 赤外線カメラのコントロール回路を開発した時には、ホストコンピューターとしてパソコン (X-68000) を用い、MS-DOS タイプのオペレーティングシステム (HUMAN-68K) を使用しました。これは当時 UNIX ワークステーションが非常に高価であったことと、汎用のインターフェイスが普及していなかったためでした。

しかし現在では数年前のパソコンの価格で高性能なワークステーションを購入できるばかりでなく、PCの上でも UNIX 環境が普通に実現でき、IRAF などの汎用の画像処理パッケージが動作する環境になっています。このような状況では UNIX が動作する環境でデータを取得する方が、画像表示などのソフトウェア開発にも汎用のパッケージの財産を活かすことができ、省エネルギーです。また次のフレーム取得中に、簡単な画像処理を行いデータの確認を行うこともできます。

さらにホストコンピューターは得られた画像データに、データ解析の際に必要な情報をデータのヘッダー情報として付加してやる必要もあります。そのためには望遠鏡制御のコンピューターとの通信や、CCDカメラのフィルター制御のソフトウェアとの通信も必要になるでしょう。画像デ

ータのヘッダー情報をきちんと整備することは、CCDデータ画像を生きたデータとする上で極めて重要なことです。このため COGITO にもフィルター制御などに用いることができる汎用のパラレル通信ポートを付加してあります。これを用いて CCD の温度測定やフィルター位置の確認などができるようになります。

以上のハードウェアにより CCD カメラの動作が実現されます。度々繰り返した言葉なので蛇足ですが、しっかりと設計されたハードウェアはデータの質を高めると共にデータ処理の効率を向上させます。

さて6回に渡って続けてきた短期連載 CCD 解体新書は、これをもって終了させていただきます。拙文に最後までお付き合いいただきましてどうも有難うございました。この連載が CCD カメラの製作や CCD カメラでの観測の際に少しでも役立てば幸いです。尚この連載は、私のソウル長期滞在中を含めて、天文月報編集委員の中川貴雄氏他の多大なるご協力のおかげで続けることができました。また日本電気(株)・マイクロエレクトロニクス研究所・センサ研究部・川上幸也氏には貴重なご意見をいただきました。また CCD の電荷転送に関する部分は三菱電機(株)・木股雅章氏から貴重な情報をいただきました。この場を借りて、お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) L. J. Kozlowski, 1996 SPIE vol. 2745 in press
- 2) 上野宗孝, 1996, 天文月報, vol. 89, No. 1
- 3) Kimata, M., Denda, M., Yutani, N., Iwade, S., Tsubouchi, N., 1987 IEEE Journal of Solid-State Circuits, sc-22, No. 6
- 4) 上野宗孝, 1995, 天文月報, vol. 88, p.399
- 5) Ueno, M., Ito, M., Kasaba, Y. & Sato, S., 1992 SPIE vol 1762, p.423
- 6) Miura, H., Narumi, T., Ohho, Y., Wada, T. and Ueno, M., 1996 P.A.S.P. in press
- 7) 上野宗孝, 1996, 天文月報, vol. 89, No. 1