

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：31302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800144

研究課題名(和文) X線CCDの新駆動方法による高速応答の実現

研究課題名(英文) Improvement of the time resolution for X-ray CCD camera by new clocking mode

研究代表者

村上 弘志 (Murakami, Hiroshi)

東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号：00415902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：X線天文学で広く使われているCCDカメラには、一撮像あたりの時間が長くなるという短所があり、明るさが激しく変化する天体の時間変動を追えない問題がある。また、撮像中に複数のX線が同じピクセルやその近傍に入射すると一つにまとまって見えるという問題もある。これらの問題に対し、撮像中に少しかだけ転送を行いX線の入射場所をずらすという新しい転送方法を考えた。この方法で得られる効果を評価し、また実際にCCDを駆動して実証実験を行い、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：CCD camera is the standard detector in X-ray astronomy. The problem of the CCD camera is long exposure time of the frame. We cannot observe rapid variation of the X-ray objects with CCD cameras. The long exposure time also invoke another problem. If two or more X-ray photons irradiate narrow region, the X-ray events are mixed, and cannot be distinguished. To avoid these problem, we try new clocking method. During the exposure, several lines are transferred, and X-ray photons irradiate elongated region. We estimate the effectivity of new clocking mode. We also drive CCD camera with new clock, and confirm the availability of the mode.

研究分野：X線天文学

キーワード：CCD X線天文学 人工衛星 電子デバイス・機器

1. 研究開始当初の背景

CCD カメラは、数十 μm というピクセルサイズによる優れた空間分解能と、半導体検出器として実現される良いエネルギー分解能 (6 keV 付近で百数十 eV) をあわせ持つ万能検出器であり、X 線天文学において主要検出器として使われている。サイズや駆動電圧が小さいことから消費電力も小さく人工衛星搭載にも向いており、ほぼ全ての X 線天文衛星に使用されている。特に X 線反射望遠鏡など集光系と組み合わせた場合にはこの小型で解像度が高いという特長を活かすことができ、広く使われている。

これらの長所に対し、最大の欠点は時間分解能に劣ることである。およそ 1000×1000 ピクセルを数カ所の読み出し口へ転送して各ピクセルの電荷量を計測する方式であるため、全体を読み出すには数秒程度必要となる。一画面あたりの撮像時間は読み出し時間によって制限され、通常の駆動方法では時間分解能も 1 秒を切ることは難しい。X 線天文学の主要な観測対象であるブラックホールや中性子星など極めて小さな天体では変動が激しく、ミリ秒スケールの変動を観測することが重要であるが、一般に CCD では不可能である。また、撮像中に X 線が入射したピクセル周辺にまた別の X 線が入射し、複数の X 線が縮退して観測されるパイルアップという問題も生じる。近年、反射鏡の大型化や結像性能の向上により、単位時間・単位面積あたりの X 線量は増加し、前述の二つの問題点が今後ますます厳しい制限となり、CCD での観測は困難となる。

本研究以前にも、CCD の駆動方法を変更することで問題の解決が試みられてきた。一つは、転送方向に足し合わせることで撮像領域中の転送時間を減らす方法である。この方法では、足し合わせるにより一次元の情報が失われてしまう代わりに読み出すピクセル数を実質的に減らすことができるため時間分解能が向上する。また、CCD の一部を繰り返し読み出す、あるいは撮像時間の一部を一旦捨て、特定の時間帯だけ読み出す方法も用いられている。これらはパイルアップを防ぐことに対して有効であるが、観測領域や観測時間帯の一部を捨てることとなる。

これらの方法はパイルアップには有効であるが、引き換えに捨てなければいけないものも多い。特に時間分解能の向上は一次元の情報を捨てるという方法のみで可能であり、CCD の優れた点を捨てることとなっていた。そこで、さらに新しい駆動方法を開発することで、極力情報を捨てることなく時間分解能の向上やパイルアップへの対処を目指した。

2. 研究の目的

- (1) 光学系の撮像能力が向上し少ないピクセル領域に X 線が集中する場合でもパイルアップを防ぎ、同時に時間分解能をあげることを目指し、新しい駆動方法を考案する。また、現在運用中、あるいは計画中の天文衛星搭載の CCD 検出器に適用した場合の効果計算しメリット・デメリットを定量的に評価する。
- (2) 新しい駆動方法を利用して実際に CCD を駆動し、タイミングやピクセルあたりの光量を計測することで想定通りの動作を確認することを確認する。
- (3) 既知のエネルギーの X 線を新読み出し方法で測定する。X 線イベントの抽出に支障がないことを確認し、エネルギー分解能やゲインなどの諸性能を従来の駆動方法と比較する。これにより新駆動方法の有効性を結論づける。

3. 研究の方法

- (1) まず、新しい駆動方法の効果については実際に点状の天体を観測した場合に得られる像を計算し、広がりや光量を予測する。これは光学系の結像性能に大きく依存するため、既存の衛星で点源を観測した場合の広がりを示す Point Spread Function (PSF) を利用する。新駆動方法で変化した PSF を計算することでパイルアップの割合がどう変化するか計算可能である。

- (2) 新しい駆動方法を試すため、既存の駆動装置ではなく独自に開発したものを利用する。FPGA を用いており、駆動クロックは自由に変えられる。CCD の駆動装置は大きく駆動クロック生成部と読み出し部に分けられるが、いずれも基礎となるものはすでに開発済みである。新駆動方法を試すためには撮像領域と蓄積領域に分けて転送する必要があるため、それに合わせた改修を行うことで実験に供することができる。

タイミングを確認するためには LED を光源とした照射装置を用いる。駆動クロックと同期させることでタイミングの検証が効果的に実施できる。

- (3) ついで X 線を照射するための試験環境を整備する。放射性同位体などを利用し、既知のエネルギーの X 線を照射する。これにより従来の駆動方法と新駆動方法でのエネルギー応答など X 線を観測した場合の分光性能を評価する。

4. 研究成果

- (1) 新駆動方法として撮像中に任意のピクセル数分縦方向に転送するものを考えた。それぞれのイベントは従来のものと同じ電荷分布を示すが、蓄積したイメージでは縦方向に伸びた像が得られる。このため、流し撮りを意味する Panning mode と呼んでいる。新駆動方法としてまずこれを検討することとし、ひとみ衛星の PSF を利用してパイルアッ

プの見積もりを行なった。

通常は撮像中は転送を実施せず撮像終了後に 1 frame 分をまとめて撮像領域から蓄積領域に転送する Frame mode と呼ばれる駆動を行うが、これを Normal として示している。これに対し Panning mode は撮像中に 10, 30, 50, 100, 150, 300 ピクセル転送したものを検討した。

図 1 に PSF の変化を示す。Normal では中心に集中し、なだらかな曲線を描くが、Panning mode では縦に伸びるため転送回数 n に応じてフラットな部分が生成される。

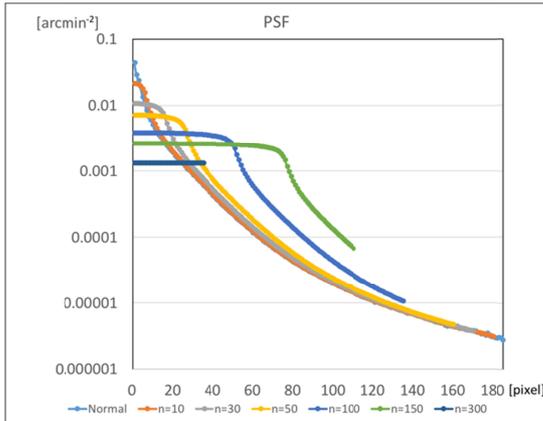


図 1 Panning mode での PSF の変化。従来の駆動方法(Normal)と任意の n ピクセル転送した場合の Panning mode ($n=10, 30, 50, 100, 150, 300$) について示した。横軸は像の中心からのピクセル数、縦軸は光量である。

この PSF をもとにある明るさの X 線像についてパイルアップの割合を計算したのが図 2 である。

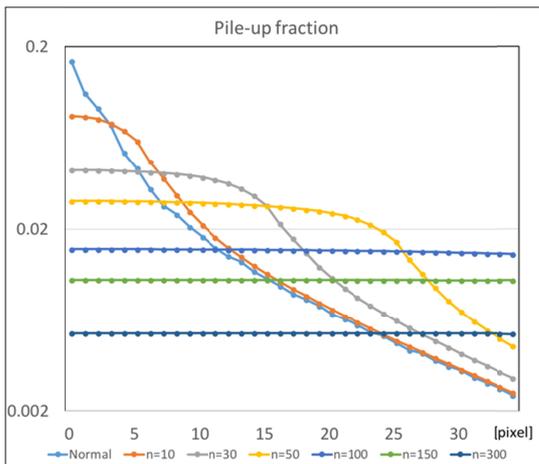


図 2 Panning mode でのパイルアップ確率。図 1 と同様に Normal と Panning mode ($n=10, 30, 50, 100, 150, 300$) について示した。横軸は像の中心からのピクセル数、縦軸はパイルアップの割合である。

Normal では中心において 20%程度のパイルアップが見られるが、 n ピクセル転送するこ

とで PSF がフラットになるのにしたがってパイルアップの割合も低くなっている。ことがわかる。これにより Panning mode の有効性が定量的に評価できた。また、パイルアップの割合は X 線像の明るさによるため、逆に明るさに対して一定以下のパイルアップ割合になるように n を決定することも可能である。

(2) CCD の駆動装置を整備し、LED を利用した照射装置と組み合わせて実際に転送できることを確認した。従来の駆動方法である Frame mode (Normal mode) と、あすか、すざく衛星などで採用された P-sum mode (撮像中常に縦方向に転送し、最終行で足し合わせたものを順次読み出す) と Panning mode の比較を行なったのが以下の図 3, 4, 5 である。

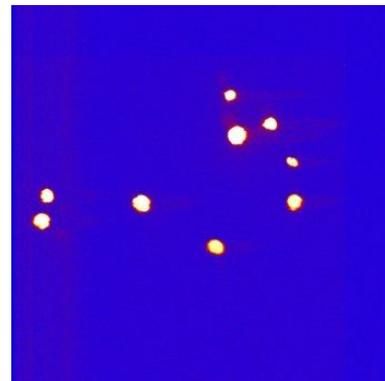


図 3 Frame mode

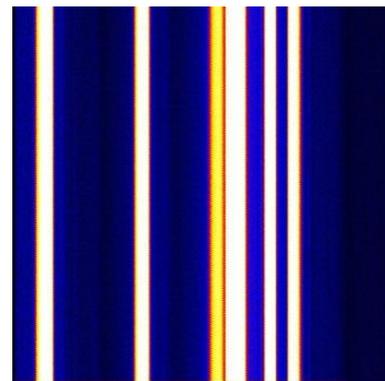


図 4 P-sum mode

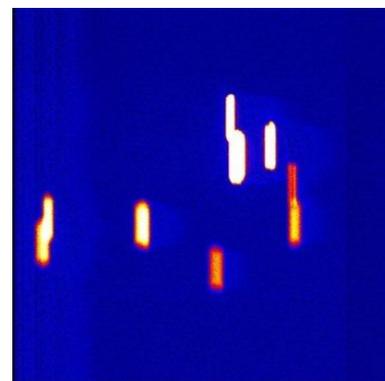


図 5 Panning mode

Normal mode では像が点状に見えるが、P-sum

mode では縦方向に射影され完全に一次元の情報を失ってしまう。それに対し、Panning mode は位置情報を失わない程度に縦に伸びていることがわかる。これにより Panning mode で実際に駆動できること、光量の分散に効果的であること、が示された。

これらの結果を受け、ひとみ衛星の後継となる天文衛星など実際の観測における新駆動方法の使用を検討中である。

(3) X 線に対する応答については、現在実施中である。特に、前述の実機での観測の検討のため衛星搭載と同等の CCD での性能評価も予定している。従来 of P-sum mode では電荷も足し合わされエネルギー応答が大きく変化したが、Panning mode ではイベントごとの電荷分布は変わらないため Normal とあまり変化しないことが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

A new clocking method for a charge coupled device, Umezumi Rika, Kitamoto Shunji, Murakami Hiroshi, Review of Scientific Instruments, Volume 85, 075103, 2014, 査読有り
DOI: 10.1063/1.4885468

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ipc.tohoku-gakuin.ac.jp/Hmurakami/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 弘志 (MURAKAMI, Hiroshi)

東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号：00415902

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

梅津 里香 (UMEZU Rika)