

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17637

研究課題名(和文)次世代ガンマ線望遠鏡CTAの超高帯域データ収集システムの開発研究

研究課題名(英文)Development of high bandwidth data acquisition system for the CTA Large Size Telescope

研究代表者

中嶋 大輔(Nakajima, Daisuke)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：70720308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代高エネルギーガンマ線望遠鏡群(CTA)計画の23メートル大口径望遠鏡(LST)のための超広帯域データ収集システムの開発研究を行った。光電子増倍管1855本で構成される焦点面カメラから観測中に生成される、40 Gbpsをこえると予想される膨大なデータを超高速に収集するシステムを構築し、望遠鏡のガンマ線検出感度を最大限に引き出すための研究を行った。東京大学宇宙線研究所および、スペイン領テネリフェ島のIAC研究所において、小型の焦点面カメラを構築し、性能試験を行い、十分なデータ転送帯域を達成できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have developed a high bandwidth data acquisition system for the Large Size Telescope(LST) of the Cherenkov Telescope Array(CTA) project. In order to maximize the gamma-ray detection sensitivity of the telescope, we have developed a system that acquire more than 40 Gbps of huge amount of data expected to be generated, during observations, from the focal plane camera, composed of 1855 photomultiplier tubes. We performed some test at the University of Tokyo and at the IAC, located in Spain Tenerife, and confirmed that the developed system can achieve sufficient data transfer bandwidth.

研究分野：高エネルギーガンマ線観測

キーワード：高エネルギーガンマ線 CTA データ収集

1. 研究開始当初の背景

(1) ガンマ線天文学は 2000 年代から本格化した新しい学術分野である。研究開始時点では 100 GeV から 10 TeV のエネルギー帯域では MAGIC や H.E.S.S.、VERITAS 等の解像型大気チェレン望遠鏡(IACT)により、銀河系内外の高エネルギー天体が 150 以上検出されていた。また 2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星による 100 MeV から数十 GeV のエネルギー帯域でのガンマ線観測により、約 2000 この天体が検出されており、数十 GeV まで伸びる多数のガンマ線バースト現象や、フェルミバブルと呼ばれる、銀河中心から広がった領域での GeV 帯域での放射など、極めて興味深い発見が相次いでいた。そのような中、CTA 計画は、次世代の地上ガンマ線望遠鏡として現行のガンマ線望遠鏡よりも広いエネルギー帯域(20 GeV から 100 TeV 以上)で、10 倍以上の感度での観測を行うことを目的として、開発が進められていた。CTA では大・中・小の 3 種類の口径を持つ望遠鏡を南北半球に合計で約 100 大設置する。日本からは 100 名を超える研究者が参加しており、主に CTA 計画の中で、20GeV からの、最も低いエネルギー領域の観測を担う大口径望遠鏡(LST)を主導して開発を行っていた。20GeV 程度からの低いエネルギー領域では、銀河系外背景放射によるガンマ線吸収の影響が少ないため、現行の地上ガンマ線望遠鏡では観測例のない、ガンマ線バーストや超遠方の巨大ブラックホールなど赤方偏移 $z < 4$ の深宇宙に存在するガンマ線天体の発見、研究が可能になると期待されている。

(2) LST は現行の地上ガンマ線望遠鏡と比べ、検出器が高感度化、大型化されており、観測中に生成されるデータは 40 Gbps をこえる、現行の望遠鏡と比べて 10 倍以上のデータ量が生成されると予想されていた。この膨大なデータを高速に収集することができなければ、望遠鏡の観測の不感時間を増やす原因になってしまう。そのため望遠鏡の感度を最大限に引き出すためには、超高速のデータ収集システムを開発研究することは必然の課題であった。

2. 研究の目的

(1) CTA 計画の大口径望遠鏡 LST の焦点面には、浜松ホトニクスと共同開発した、量子効率率が 40 パーセントを超える高感度の光電子増倍管 1855 大が搭載される。LST は CTA の中でも 20 GeV という最も低いエネルギー閾値での観測を担うため、トリガー閾値を限界にまで下げて観測を行う。そのため夜光等によるバックグラウンドにより、観測の舐めのトリガー頻度は 15 kHz 程度になると予想されており、この時予想されるデータのレートは 40 Gbps を超える量に

なる。

(2) LST の焦点面に設置されるカメラは 7 本の光電子増倍管(PMT)と、それに付随する、制御用回路基板、読み出し用回路基板等をまとめた「PMT モジュール」265 台で構成されている。観測中に PMT で得られた波形信号は、読み出し回路基板に搭載されている、スイス PSI 研究所が開発した低消費電力・拘束アナログメモリの ASIC である DRS4 チップ及び 30MHz ADC により 1GSample/s でデジタル化され Field Programmable Gate Array (FPGA)に実装された SiTCP 技術[1]により、1Gbps の TCP/IP 通信により転送される。全 265 台のモジュールからのデータは焦点面カメラ内に設置した合計 6 台のイーサネットスイッチにより、44 から 45 台ごとに束ねられ、それぞれのイーサネットスイッチから 10Gbps の SFP+光ファイバー通信により地上に送られる。図 1 に、本研究計画でデザインしたデータ収集網の概略図を示す。

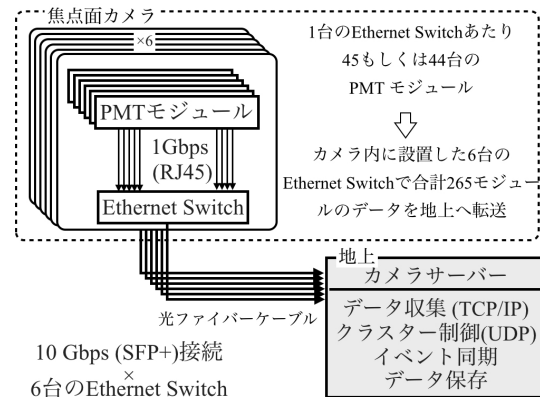


図1. カメラデータ収集ネットワークの概略図。265 台のクラスターデータは 44~45 台毎に 1 Gbps でイーサネットスイッチに繋がれ、SFP+を用いた光通信(10 Gbps)でカメラサーバーへ転送される。

(3) 各 PMT モジュールからのデータは TCP/IP 通信により非同期で地上に置かれたコンピュータ(カメラサーバー)へ送られる。モジュールからのデータを効率良く読み出し、データに記録されているイベント番号情報を用いてカメラとしての画像を再構築するために、最適なハードウェアを選定し、データ収集速度や効率を最適化するためのソフトウェアの構築を行うことを目的として兼キュを行った。

[1]T. Uchida, 2008, IEEE Trans. Nucl. Sci., 55, 1631.

3. 研究の方法

19 台の PMT モジュールを組み込んだ 1/14 スケール小型カメラを構築し、様々な条件下でのデータ収集試験を行うことで、研究開発を

行った。パルスレーザーダイオード光を、モジュールに照射し、得られたデータを非同期で読み出し、イベント番号情報を用いてイベントの再構成を行う最適なアルゴリズムを構築し検証した。当初は 45 台のモジュールを組み込んだシステムの構築を計画していたが、モジュールの取り回しや光センサーの保護、モジュールの冷却効率などの理由により、19 台での試験を行うことにした。得られた結果は外挿することができるため、台数の違いは本質的な問題ではない。

4. 研究成果

(1) 研究初年度には、東京大学宇宙線研究所において、19 台の PMT モジュール(図 2a)を 1 台のイーサネットスイッチ(図 2b)に接続したシステムを構築し、ソフトウェアのフレームワークの構築やデータ収集を行う試験を行った。必要な性能を満たすイーサネットスイッチとして Dell X1052 を選定した。またそれと並行し、中・小口径望遠鏡のデータ収集を担当するグループや、CTA の中央制御を担当するグループと議論を重ね、他の望遠鏡グループでも Dell X1052 を標準的なハードウェアとして使用するという同意を形成した。20 年を見越す CTA の運用期間でのメンテナンス性や拡張性を確保するために大きな意義を持つ合意を得られた。

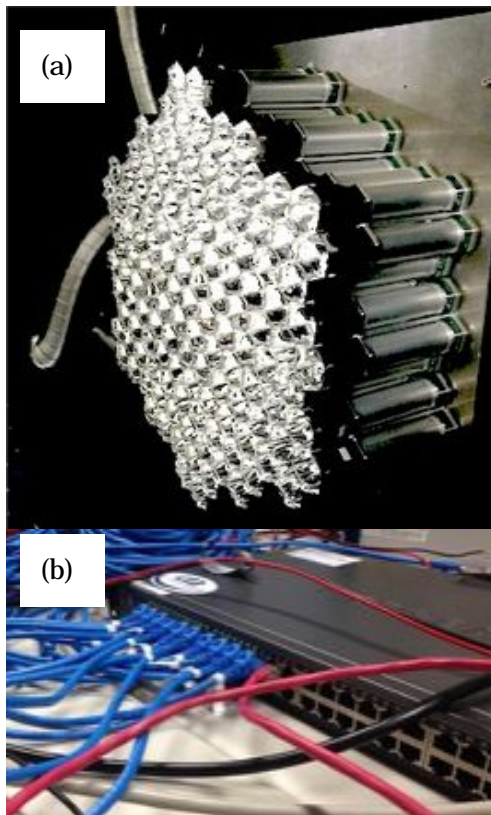


図 2. 19 モジュールを組み込んだミニカメラシステムの写真(a)および選定したイーサネットスイッチ(b)

図 3 には、試験で確認したデータ収集スループットの結果を示す。横軸は設定したトリガーレート、縦軸には設定したトリガーレートから予想されるデータ量と、実際に収集できたデータ量の比を示す。この結果、19 台のモジュールからのデータをイーサネットスイッチ 1 台あたり 50kHz 以上程度までは取りこぼすことなくデータ収集ができることを確認した。実際には 45 台のモジュールが 1 台のスイッチに接続されるため、その場合に換算すると 25kHz 程度となる。CTA で予想されるデータレートは 15kHz 程度であるため、十分な性能が得られることを確認できた。また、この時のスループットは約 9 Gbps 程度であり、使用している SFP+光ファイバー通信の最大スループットである 10Gbps の 9 割近くを達成できるハードウェア・ソフトウェア性能であることを確認した。ただし本試験では周期的なトリガーを与えたため、PMT モジュール自体が持つ読み出しにかかる不感時間(8 μ s 程度)の影響は考慮に入れていない。

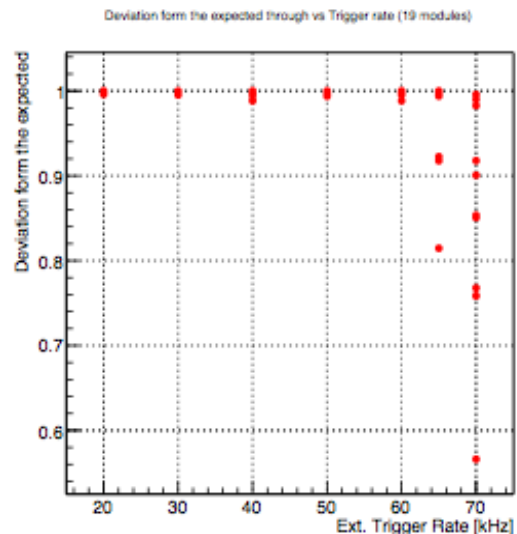


図 3. 設定した外部トリガーのレート(x 軸)と、それから期待されるスループットからのずれ(y 軸)

(2) 研究次年度には 19 モジュールシステムをスペイン領テネリフェ島のカナリア天文物理研究所(IAC)に輸送し、組み立てて統合試験を行った。LST の初号機の建設地として決まったスペイン領・ラパルマ島の隣の島である研究所である。図 4 には、IAC 研究所に設置した 19 モジュールシステムの概略図を示す。システムは 2 つの暗箱から構成されている。図中左の暗箱には焦点距離 1.65m の球面鏡が置かれており、その鏡に対し焦点位置からパルスレーザー光を照射することで反射した並行光を生成している。図中右の暗箱は移動可能になっており、ここに図 2a に示したものと同様の 19 モジュールシステムが設置される。本システムはデータ収集試験の

みではなく、光検出器の応答の試験や、トリガー分配の試験、機械的な構造などの試験も兼ねることができるようなシステムを構築することができた。

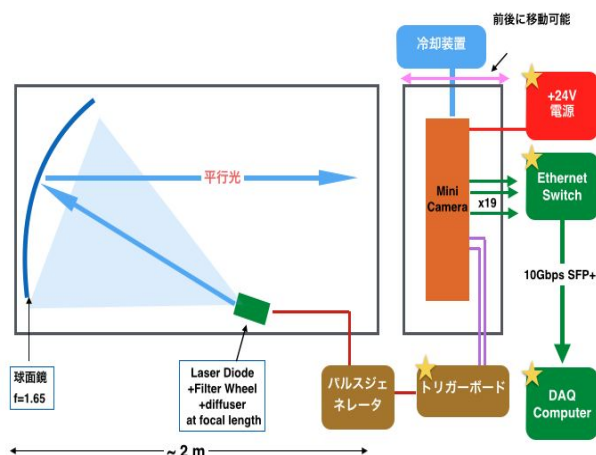


図 4. IAC 研究所に設置した、19 モジュールからなる 1/14 スケールの LST カメラ試験用セットアップ

(3) データ収集システムの将来的なメンテナンス性能を確保するために、中口径望遠鏡の焦点面カメラの 1 つである NectarCAM と呼ばれるグループのデータ収集担当グループと議論を重ねながら、共通化したソフトウェアを構築した。NectarCAM では UDP 通信によりデータ転送を行い、LST 用の PMT モジュールでは TCP/IP によるデータ転送を行うという違いがあるが、その他、使用するライブラリやイベント再構成のアルゴリズム等は共通化したソフトウェアの枠組みが完成した。平成 29 年始めからこのソフトウェアを用いた本格的な試験を IAC 研究所に設置した実機を用いて行った。データ転送スループットの要求値は達成することは確認したが、今後も継続して様々な条件下での試験を行い、最終調整を行う。平成 29 年度の夏ころには完成する予定である。

(4) TCP/IP 通信を用いたデータ転送を行い、イーサネットスイッチやネットワークインターフェースカード、SFP+光ファイバー通信など、民生規格の機器を、最大限に活用することで、十分なデータ転送帯域を確保しつつ、低コストで柔軟なシステムを構築することができた。TCP/IP 通信を用いるデータ通信は、実験の大規模化に伴い、大型物理実験の主流になりつつある。そのため本研究は、当該分野において先駆的な研究となった。

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 0 件)

[学会発表](計 2 件)

1. 中嶋 大輔 「CTA 報告 119:CTA 大口径望遠鏡初号機の焦点面カメラのシステム統合試験」日本物理学会春季大会 2017 年 3 月 17 日~2017 年 3 月 20 日 大阪大学

2. Daniela Hadash 「First results of the camera prototype for the Large Size telescope of the Cherenkov Telescope Array」日本天文学会年会 2016 年 3 月 14 日~2016 年 3 月 17 日 首都大学東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 大輔 (Nakajima, Daisuke)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号：70720308