

GRAINE 2015 年豪州気球実験 超高速飛跡読取装置 HTS による データ取得

吉本 雅浩 (名古屋大学), and GRAINE collaboration
愛知教育大, ISAS/JAXA, 宇都宮大, 岡山理科大, 神戸大, 名古屋大

1 概要

GRAINE 計画はエマルジョン望遠鏡を用いた宇宙ガンマ線観測計画である。新たに開発した超高速原子核乾板飛跡読み取り装置 HTS は、大面積の原子核乾板の読み取りを必要とするこの計画において重要な役割を果たしている。GRAINE 計画は 2015 年 5 月にオーストラリアのアリススプリングスで気球フライトを行い、現在回収した原子核乾板の解析を行っている。HTS でコンバータ部の四分の一をスキャンし、検出効率の評価を行った。その後さらなる高速化を行い、読み取り速度 $0.4 \text{ m}^2/\text{h}$ で残る四分の三のフィルムをスキャンを行っている。

2 GRAINE 計画

原子核乾板望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion (GRAINE) は、ガンマ線天体を高い角度分解能でイメージングすることにより、高エネルギー天体物理学における重要な課題の一つである、一次宇宙線の加速起源と加速のメカニズムの解明を含めた、ガンマ線天体や宇宙線に関する様々な課題に挑むものである。原子核乾板は高い空間分解能をもち、他の検出器と比較しても極めて良いガンマ線の到来方向決定精度をもつ。しかし、原子核乾板自身に時間分解能がなく、観測後に現像や読み取りが必要であるという課題があった。タイムスタンプ手法の開発によりサブミリ秒の時間分解能を実現し [1]、気球によるガンマ線天体観測への可能性を開いた。読み取りに関しては、次世代飛跡読み取り装置 HTS の提案により従来装置と比較して 2 桁の速度向上が見込まれることで、科学観測が可能な大口径エマルジョン望遠鏡が可能になった。

科学観測では、口径面積 10 m^2 のエマルジョンガンマ線望遠鏡で約一週間の気球フライトを繰り返し、宇宙ガンマ線 (10 MeV - 100 GeV) の観測を行う。エマルジョン望遠鏡のコンバータ部は 100 層のエマルジョンの積層構造となっており、エマルジョンの総面積は 1000 m^2 となる。すなわち、 1000 m^2 のエマルジョンをフライトの間隔より十分短い期間で読み取りを完了できる性能が超高速飛跡読み取り装置 HTS には求められている。

3 超高速飛跡読み取り装置 HTS

HTS は、原子核乾板を用いた次世代の実験でその読み取りを担う装置として 2011 年頃より名古屋大学で開発を進めている。目標とするスペックは従来装置の 100 倍以上となる $0.9 \text{ m}^2/\text{h}$ を目標にしており、年間数 1000 m^2 の読み取りを可能にする。原子核乾板の飛跡読み取り装置の世代ごとの読み取り速度を図 1 で示す。このように、読み取り速度は年々飛躍的に向上している。

飛跡読み取り装置の主なコンポーネントは、原子核乾板 (フィルム) をサブミクロン精度で精密に動かすステージ、光源・レンズ・カメラを含めた顕微鏡、読み取ったデータをオンラインで解析するコンピュータである。HTS のコンセプトは、従来装置である S-UTS と

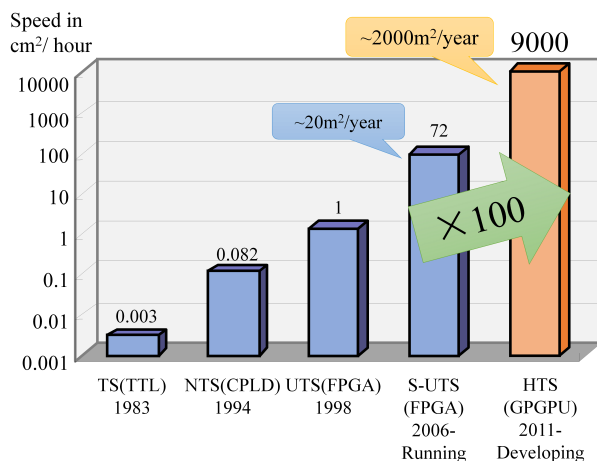


図 1: 原子核乾板の飛跡読み取り装置の世代ごとの読み取り速度。HTS の値は設計値

比較して一度に撮像できる視野面積を約 600 倍に向上させたことにある。視野面積は 5 ミリ四方となり、顕微鏡の回折限界である 0.4 μm 相当のピッチで読み取るためには 1 億ピクセルを超える撮像素子が必要となる。これを一個の素子で担うと高いフレームレートが達成できないため、図 2 のように視野を 72 個に分割し、それぞれ 2M ピクセルのセンサを配置した。センサ間の隙間はプリズムを用いて結像面を 6 つ作り、センサを 12 個ずつ配置したモザイクカメラを用意し、それらをずらして配置することで隙間のない撮像面を形成した。

カメラから読み出された画像は 36 台のコンピュータと 72 個の市販の GPU を用いて飛跡情報 (位置や角度等) に変換している。まずは並列処理を得意とする GPU で二次元フィルタや二値化などの画像処理を行い、次にある角度空間に対して総当りで飛跡を探索 (飛跡認識) する。その後 CPU で似た位置・角度の飛跡をクラスタリングした後、ストレージサーバへ転送する。従来装置である S-UTS は画像処理や飛跡認識を専用に開発した FPGA で行っていたが、HTS では入手性や設計のフレキシビリティで優位な GPU を採用した。以上の機能を搭載した自動飛跡読み取り装置 HTS (図 3) を開発し 2015 年より運用を行っている。

4 HTS の高速化

HTS の速度はステージとコンピュータに搭載するソフトウェアがリミットしている。スキームのシーケンスは、1. フィルムをマウントしたステージをフィルムに対して水平方向に移動し、2. 振動が十分に収まった後ステージを垂直方向に動かしながら断層映像を取得し、3. 画像処理を行い、4. 撮像した画像中に乳剤層があれば次の視野にフィルムを移動させながら同時に飛跡認識を行う。断層映像取得と画像処理を並列化することで、断層映像取得後即座にステージを次の視野に移動できるようにした。次に、ステージの移動を完了させるまでにかかる時間と、飛跡認識にかかる時間をそれぞれ高速化する必要がある。遅いほうがりミットになり、次の映像取得が開始できないからである。

HTS のオンライン処理である画像処理及び飛跡認識は GPG を用いて処理を高速化している。画像処理は OpenCV のライブラリを使用し、飛跡認識は専用に開発し最適化した飛

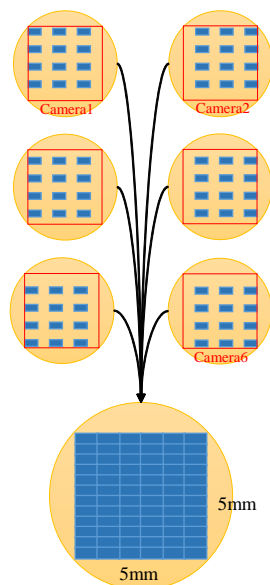


図 2: HTS のモザイクカメラによる撮像面の形成方法

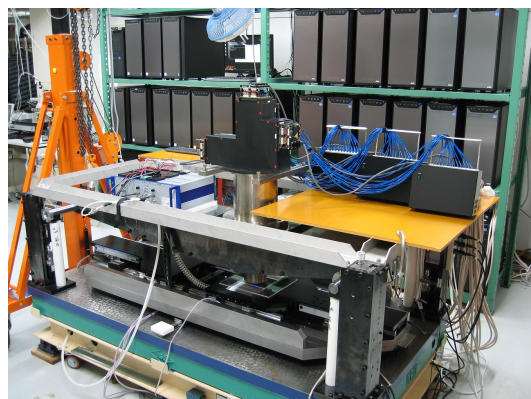


図 3: HTS の外観。手前が顕微鏡とステージで奥が 36 台のオンライン用コンピュータ

跡探索ソフトウェアを CUDA によって実装した。GPU で実行する CUDA の関数には他の処理と同時実行が可能な非同期版と不可能な同期版があり、画像の GPU への転送および画像処理において非同期版を用いることで高速化を行った。オンライン処理だけのテストでは $0.7 \text{ m}^2/\text{h}$ を超える処理が可能となった。

ソフトウェアの高速化によりステージ駆動が高速化のボトルネックになったため、駆動パラメータの調整を行っている。移動頻度の多い X 軸ステージの加速度を $5 \text{ m}^2/\text{s}$ に設定し、モータドライバへの信号払い出し後のインターバルを 0 msec から 70 msec まで条件を変えて検出効率の評価を行った。条件を変えた時の検出効率を図 4 で示す。インターバル時間が短くなるにつれ検出効率が徐々に落ちていることがわかる。許容できる条件は実験により異なるものの、速度と検出効率のバランスを考え、GRAINE フィルムのスキャンはインターバルを 50 msec とし 4.3 Hz の繰り返し周波数で行うことにした。この時の読み取り速度は $0.4 \text{ m}^2/\text{h}$ である。10 月下旬よりこの速度でスキャンを開始し、年末までにコンバータ部の残り 3 ユニット 300 枚 の読み取り完了を目指している。

5 GRAINE 2015 フィルムの読み取り

2015 年 5 月 12 日にオーストラリアのアリススプリングスで 14.4 時間の気球フライトを行ったフィルム (GRAINE フィルム) は、現像や読み取りに最適化させるための膨潤などの処理を行った後、8 月より本格的なスキャンを開始した。順調に読み取りを進め、4 個に分割されているコンバータ部の四分の一にあたる Unit3 100 枚 (Plate 1 - 100) の読み取りを 1ヶ月で完了した。読み取った総面積は約 11 m^2 で、角度空間はフィルムの垂直方向に対して $\pm 45^\circ$ を十分カバーする範囲まで読み取っている。この時のスピードはソフトウェアの最適化前であり約 $0.2 \text{ m}^2/\text{h}$ であった。GRAINE フィルムの大きさは $25 \text{ cm} \times 38 \text{ cm}$ であり、HTS は $13 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ まで一度に読み取ることができる。そこで 1 枚の GRAINE フィルムを 9 分割 (Area 1 - 9) して読み取ることにした。各領域には領域間を接続するのに十

分なオーバーラップを確保している。HTSは構造的な制約からフィルムを交換する際オイルの注入作業を伴うため、5分程度の時間が最低でもかかるが、分割した領域間の移動はオイルの注入作業の必要がなく、1分程度で完了することができる。当初の読み取り時間9分、高速化した後の読み取り時間5分に対し、1分×8の領域間の移動と5分のフィルム交換で、GRAINEフィルム1枚にかかる実質的な読み取り時間はそれぞれ約90分、約60分になる。

これまでにスキャンしたUnit3の真ん中の領域であるArea5の100枚に対する検出効率は図5のようになり、フィルムに依存するエラーを除いて $|\tan\theta| < 1$ までの角度範囲において95%以上の検出効率を達成した。一部のフィルムで検出効率が95%より低くなっているのはフィルムの膨潤処理による問題であった。以上の結果により、HTSでGRAINEフィルムを読み取ることができることを示した。

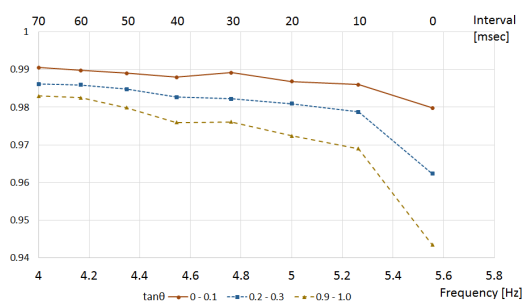


図4: インターバル時間に対する角度ごとの検出効率。上の横軸はインターバル時間。下の横軸はHTSの繰り返し周波数

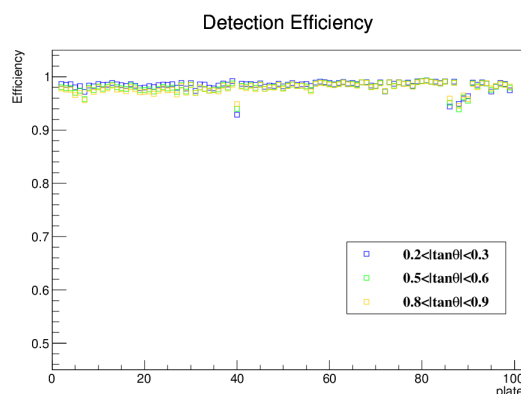


図5: GRAINE 2015 フィルム Unit3 Area5 における Plate 1 - 100 の検出効率

6 まとめ

エマルジョン望遠鏡を用いた宇宙ガンマ線観測計画であるGRAINE計画は、2015年5月にオーストラリアのアリスプリングスで気球フライトを行い、フィルムを回収し原子核乾板の読み取りを進めている。名古屋大学で開発を進めている超高速飛跡読み取り装置HTSでGRAINEフィルムのコンバータ部の四分の一の読み取りを行い、検出効率95%を達成した。2015年の年末までに読み取り速度0.4 m²/hで残るフィルムの読み取り完了することを目指しスキャンを行っている。

参考文献

[1] H. Rokujo, S. Aoki, S. Takahashi, K. Kamada, S. Mizutani, R. Nakagawa, and K. Ozaki. Multi-stage shifter for subsecond time resolution of emulsion gamma-ray telescopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 701:127–132, 2013.