

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340066

研究課題名(和文)MPI、pythonとFermi GPUを使用したトリガーシステムの構築

研究課題名(英文)Trigger system using MPI, Python and Fermi GPU

研究代表者

片山 伸彦 (Katayama, Nobuhiko)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：50290854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、国内最大規模の加速器実験であるBelle II実験のピクセル型検出器(PXD: ビームパイプに最近接)のデータをシリコン崩壊点(SVD: PXDのすぐ外側)の情報を使って削減することを目標としている。電子-陽電子の衝突事象ごとのPXDの出力データサイズは、一切加工をしなければ800KBであり、事象レートの最大値を30kHzと設定しているBelle II実験で記録できるデータ帯域を大幅に超える。そこで4層からなるSVDの各層に残された荷電粒子の通過位置情報(4点分)をから荷電粒子の飛跡を高速に再構成し、これをPXD側に内挿して、飛跡とPXDの交点周辺のデータのみを記録する方針をとる。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to reduce the information generated by the pixel detector of the Belle II experiment using the information generated by the Silicon Vertex detector. The pixel detector is placed at the closest location from the colliding beams whereas the Silicon Vertex detector, the next closest. The size of the output data from the pixel detector is, without compression or any other means of reduction, about 800KB for each event of a collision of an electron and a positron at the rate of 30 KHz. The total amount of the data is much larger than the amount that the Belle II experiment can record. This we would like to use the information from the four layer Silicon Vertex detector to make the tracking information and estimate which region on the Pixel detector the track has passed. Then we can only keep the data in the region where the tracks have passed. The extrapolation must be done quickly so that the decision to keep/throw away is made in time.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高エネルギー実験 トリガーシステム

1. 研究開始当初の背景

Belle II 実験の背景

Belle II 実験は、Belle 実験の 40 倍の輝度を持ち、50 倍のデータを収集してハドロン・レプトンのフレーバーの物理を通して、新しい物理法則の発見を目指している。高エネルギー加速器研究機構(KEK)に於いて行われた KEKB/Belle 実験は、B 中間子に於ける CP 対称性の破れを発見し、小林・益川のノーベル賞受賞を現実の物とした。現在 KEK では、残された謎に挑戦すべく Super KEKB 加速器/Belle II 実験計画を提案している。この計画は、LHC 実験と相補性を持ちながら重要な発見を目指す、LHCb 実験という、強力なライバルが先行しており、タイムリーな建設・実験開始及び迅速なデータ解析が極めて重要である。Belle II 実験の衝突点とピクセル測定器 Belle II の最内層におかれるピクセル測定器(PXD)のデータ収集が非常に困難な状況にある。Super KEKB は、極めて細いビームを衝突させて、現在の 40 倍の輝度を得る事を目指している。それに伴って、衝突点付近の設計が大きく変わり、PXD は厳しい環境に置かれる。例えば、衝突点付近のビームパイプは $\pm 1\text{m}$ にわたり直径 1cm であり、中心から $\pm 2\text{m}$ の間は真空ポンプを設置する事が出来ず、真空度は KEKB に比べて約 100 倍から 1,000 倍悪くなると計算されている。この結果、ビーム粒子と残存ガスとの衝突によるバックグラウンドが、非常に多くなる。DEPFET デバイスによる PXD は連続読み出しである。PXD の occupancy を最大 2%、レベル 1 トリガーレート(L1)を最大 30KHz と仮定した場合に zero suppressed のデータが最大 25GB/s で出てくる。図 1 に示すように、DAQ では、このデータを他の測定器とほぼ同量の平均 100MB/s 程度に削減しなければならない。

2. 研究の目的

本研究の目的はデスクトップ PC の画像処理に使われるグラフィックス・プロセッサ(GPU)を使用したピクセル測定器の為のハイ・レベル・トリガーシステム(HLT)の開発である。GPU を使用したトリガーシステムは初の試みである。GPU の演算能力は汎用 CPU の数百倍にも達する。この圧倒的な演算能力を生かす事が出来れば、柔軟性・信頼性に富み、かつ小規模で高性能な、ソフトウェアによるオンラインまでのイベント選別を行う事ができる。これまでのシステムに比べてコスト及び電力消費量を 1/10 にする事を目指している。

3. 研究の方法

本研究では、Python、MPI、Fermi GPU という、素性の極めて良い要素技術を組み合わせることで Belle II 実験の GHLT を構築する。まず (a) PXD 用前段電子回路の完成や、Geant4 によるシミュレーションプログラムの完成を待って PXD のデータを作製し、荷電粒子と関連付けるアルゴリズムを作製する。(b) 要素技術、特に GPU についての技術修得に時間を使う。(c) 分担研究者は、ネットワークを介してのオブジェクト通信、分散処理プログラムの開発を行う。次に (d) Python と MPI を使用して、複雑な構成の GHLT システムを作る為のフレームワークを完成させる。既に開発中の Belle II 実験の為の解析フレームワーク、roobasf の GHLT への拡張である。(d) GHLT の構成の候補は、「どのでデータをどこに置き、どこで処理して、どこからどこへ通信するか」、が異なる複数の案が考えられる。これらの構成のプロトタイプシステムを実際に作り、PXD のデータの選別を行ってみる。(d) GHLT の構成が確定したら、構成要素をそれぞれ開発し、最終年度までに実際に Belle II 実験に使用出来るシステムを完成させる。

4. 研究成果

本年度は、(研究協力者の協力の下)まずシステムを実装するための各機器の接続方法について検討した。PXD の全出力は特殊な読み出しエレクトロニクス(FPGA を搭載した ATCA モジュール)で読み出されそこで一時的に保管される。SVD の出力は読み出しエレクトロニクスを経由して最終的に複数の PC から構成される「ハイレベルトリガー(HLT)」に入力され、そこで SVD の全情報を用いて荷電粒子の飛跡が再構成される。飛跡情報は Ethernet 経由で ATCA モジュールに通知され、FPGA で ROI の情報のみが切りだされ後段に出力される。上記、接続設計のほかに、ATCA モジュールの開発、同モジュール内の FPGA ファームウェアの開発、HLT の性能測定(PC 数に対するデータ転送速度の線形性)、HLT 上で荷電粒子の飛跡を再構成するソフトウェアの開発着手、ROI パケットの雛型設計など、極めて多くの進捗があった。さらに、ドイツの研究所(DESY)でビームテストを行うことを目標に、検出器を把持するシステムの設計検討なども行った。本成果には多くの研究協力者の協力がある。まずこれまでに開発した全システムをドイツの研究所(DESY)に持ち込むとともに、検出器(PXD と 4 枚の SVD)も持ち込んでこちらは検出器把持治具に載せた。PXD のデータは特殊な読み出しエレクトロニクス(FPGA を搭載した ATCA モジュール)で読み出した。他方、SVD のデータは読み出しエレクトロニクスを

經由して最終的に複数の PC から構成される「ハイレベルトリガー(HLT)」に入力させた。HLT 上では我々が開発した「荷電粒子の飛跡を再構成し、その飛跡情報を PXD 上の region of interest (ROI)に変換するソフトウェア」を走らせた。ROI 情報は Ethernet 経由で ATCA モジュールの FPGA に受信させ、同モジュールの FPGA に PXD データの切り出しを行わせた。HLT の出力データと、切り取られてサイズが小さくなった PXD のデータは PC で読み出し、HDD に記録した。本研究によって、上記の一連のメカニズムが完全に機能するという極めて大きな成果を得た。これに加え SVD のデータを直接 FPGA 搭載モジュールに注入し、FPGA で粒子の飛跡を再構成する試みも行い、これも成功させた。これは HLT と相補的に機能し、PXD のデータを過剰に取りこぼし過ぎない効果を得た。これらにより、SVD の飛跡検出ソフトウェアと同ファームウェアによって PXD の膨大なデータから ROI 部分のみを切り出し SVD のデータとともに記録するという、完全に理想的なシステムの構築に成功した。

また研究目的の GPU 使用による高速化については、ハイレベルトリガー用ソフトウェアの準備が整っていなかった為基礎的な研究を行った。GPU を使用して計算の高速化を図った。GPU を利用した一般的な数値計算、通称 GPGPU を行うために NVIDIA 社による統合開発環境 CUDA を使用した。CUDA は主に C 言語/C++ で使用することを前提にしている。よって、開発環境である Python から CUDA を利用するために、サードパーティーで開発された PyCUDA を使用して CUDA を呼び出した。PyCUDA は Ctypes という Python の標準モジュールを使用して開発されている (Ctypes は C 言語向けの外部関数呼び出しモジュールである)。我々が行いたい計算は線形行列演算であるため、加えて NVIDIA で開発された CUBLAS, CULA (有料), CUFFT, CUSPARSE と呼ばれる最適な GPGPU ライブラリを使用した。これらのライブラリの内、機能は限定的であるが CUBLAS, CUFFT, CULA は scipy (Python の科学計算用モジュール) のツールキットの一種 scikits.cuda に PyCUBLAS, PyCULA, PyCUFFT として存在するため、機能拡張して、Python から使用した。また、CUSPARSE は Ctypes を使用して独自に開発を行った。ここまでの PyCUDA + PyCUBLAS + PyCULA (+ PyCUFFT + PyCUSPARSE) を使用し、1 台の GPU で GPGPU を行った。

さらに 3 台の GPU を使用するマルチ GPU を行った。CULA, CUBLAS のマルチ GPU ライブラリ pCULA はメモリ上限の問題と機能が不十分なため、通常のマルチ GPU と並行して利用する (バインディングは独自開発)。通常は複数台の GPU を並列に使用するために、マルチスレッドもしくはマルチプロセスの各スレッド・プロセスで 1 台の GPU を統御する必要が

ある。Python では GIL (global interpreter lock) によりマルチスレッドを禁止している。よって、サードパーティーによる mpi4py (OpenMPI) を使用する場合と、C++ と openMP を使用したマルチスレッド処理を Ctypes で使用する場合の 2 通りでマルチ GPU を実現した。現在は 3 台の GPU を搭載したワークサーバ内でマルチ GPU を行っており、マルチスレッド処理を実現した手法のマルチ GPU を使用している。

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 2 件)

Development of high level trigger software for Belle II at SuperKEKB

S. Lee (Korea U.) , R. Itoh, N. Katayama (KEK, Tsukuba) , S. Mineo (Tokyo U.)

J.Phys.Conf.Ser. 331 (2011) 022015

Data Flow and High Level Trigger of Belle II DAQ System', R. Itoh, M. Nakao, S. Y. Suzuki, and S. Lee, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 60, 3720 (2013).

[査読有]

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山伸彦 (Nobuhiko Katayama)

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：50290854

(2) 研究分担者

樋口岳雄 (Takeo Higuchi)

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：40353370

伊藤領介 (Ryosuke Itoh)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：901935311

(3) 連携研究者

()

研究者番号：