

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04005

研究課題名（和文）粒子線計測実験のためのボトルネックを持たないデータ収集システム

研究課題名（英文）A bottleneck-free data acquisition system for particle measurements

研究代表者

五十嵐 洋一（IGARASHI, Youichi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：50311121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ネットワークで接続された複数の計算機上の分散処理を行うことでボトルネックを持たない分散処理によるストリーム型データ収集システムの開発を行なった。このデータ収集システムはデータの集中する部分を持たずフロントエンド機器の読み出しから記録まで分散させることが可能でデータ流量に対してスケラブルである。そしてこのデータ収集システムの上でソフトウェアによるイベント分別処理の実現を行うことが出来た。さらには複数の実際の検出器システムに適用を行い、多彩な粒子線計測において適用可能であることを示すことが出来た。これらにより本研究の目的は達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により検出器試験から加速器実験までの様々なスケールの粒子線測定をデータ収集システムの開発の労力をかけることなく行うことが可能となった。またこのシステムではトリガーをソフトウェアで実現することによりハードウェアのトリガー回路を準備する必要がなくなりよりシンプルにデータを収集することが出来るようになった。さらに高速ネットワークでつながれた複数の計算機を用いて分散処理を行うことで、これまでのシステムに比べ10倍以上の速度でデータを収集できる。これらの特徴により J-PARC における素粒子原子核実験をはじめとする多くの実験において近い将来の粒子線計測実験の遂行が可能となった。

研究成果の概要（英文）：We have developed a streaming data acquisition system with distributed processing that does not have bottlenecks by performing distributed processing on multiple computers connected by a network. This data acquisition system does not have a centralized data point and is scalable to the data flow rate because it can be distributed from reading on front-end devices to recording data. By this data acquisition system, we were able to implement a software-based event selection process. Furthermore, we have applied the system to several actual detector systems and demonstrated that the system is applicable to a wide variety of particle beam measurements. Since these successes, the purpose of this study has been achieved.

研究分野：高エネルギー物理学実験

キーワード：データ収集システム DAQ 粒子線計測

1. 研究開始当初の背景

J-PARC 大強度陽子加速器施設は努力を重ねながらそのビーム強度を増やして来た。それに対応し、実施される実験も大強度ビームに耐える高密度検出器や高統計実験でそれに応え、成果を蓄積している。

現在 J-PARC ハドロン実験施設高運動ビームラインにおいて企画されているチャームバリオン分光実験(J-PARC E50)ではそのイベントレートと複雑さからトリガーをかけられず、すべての検出器においてその検出器自身でトリガーをかけ後段の計算機群でデータの時系列分割、イベントビルド、イベントフィルタリング(ソフトウェアトリガー)を行うことを検討している。この手法はストリーム型データ収集あるいはトリガーレスデータ収集と呼ばれている。

また一方で同施設の COMET ビームラインで準備中のミューオン電子転換事象探索実験(COMET 実験)では円筒型ドリフトチェンバー(CDC)からのデータをトリガーするためにシンチレーションカウンタを CDC の周りに配置してトリガーをかけるが、それだけでは十分にトリガーレートを落とすことが出来ず 20 kHz 程度になると見積もられている。これを解決するためにそれに加え CDC 自身のデータを用いてトリガーをかけることを検討している。

一方で現在運用しているネットワーク分散型のデータ収集システムではツリー状にデータが集められ最終的にデータがいくつか所に集まる。その部分がボトルネックとなり最終段の一つの計算機の性能でデータ収集の性能が決まってしまうためデータ収集の速度に上限が決まってしまう。

これらの問題を解決するために、複数の計算機で並列にデータ収集を行いデータを交換しながらソフトウェアでイベントを判別しデータの削減を行うようなストリーム型データ収集の研究を行った。

2. 研究の目的

本研究の特徴は少人数で開発、運用が出来、学習コストの少ないフレームワークでボトルネックのないデータ収集系を実現することにある。

ストリーム型データ収集は部分的には大型加速器実験などでは使用されているが、複数のある程度の規模の開発グループが開発しており多くのライブラリやフレームワークの上に構築されているうえ、彼らの都合でどんどん変更されて行ってしまう。

それゆえ、そのままハドロン実験施設での実験や原子核実験のような少人数のデータ収集担当者が運用するような環境では運用できない。

そのため本研究では安定し普及したライブラリや規格の上で必要な機能を実装することをベースにストリーム型データ収集を実現することを考えている。これらの特徴により、少人数で遂行している中小規模実験にもデータレート 1GB/s を超える高速データ収集への道を開くことが期待できる。その上で本研究の創造性は標準モデルでは禁止されているような稀事象が起こった場合に漏らすことなくその事象捉えることで超高エネルギー物理に迫る実験を可能としソフトウェアによる複雑なトリガーを導入することで、未知のパターンの事象を捉え未だ知られていない物理現象を探ることを可能とすることにある。

本研究のような高速データ収集システムを用いることで、高レート実験、稀現象探索実験において稀事象や複雑な事象のデータを効率良く収集できるようになり、新物理や新現象の探索を大きく進展させることが出来る。

本研究のゴールは多数の計算機を使用したストリーム型データ収集に対応可能なボトルネックのないデータ収集システムの原型を開発し、J-PARC E50 実験、COMET 実験への適用可能性を示すことである。そのうえで少人数で運用可能なデータ収集フレームワークとしてまとめていくことである。

3. 研究の方法

本研究ではストリーム型データ収集を行うことを念頭に置いて計算機クラスターを用いて並列データ収集を行うための研究を行った。

そのために、ストリーム型データ収集が可能でソフトウェアトリガーが実現できるデータ収集フレームワークソフトウェアの開発を行った。

現在、J-PARC ハドロン施設で使用されているネットワークベースデータ収集システムの構成は最終的に一つの計算機にすべてのデータが集まるためそこにボトルネックが出来る。この点を解決するために並列にデータを交換しながら受け渡し、最終的なイベントビルドやデータの記録を行う計算機を複数にしても機能するような、ネットワーク構成、ソフトウェア手法の研究をおこなった。

イベントビルドはストリーム型データ収集においてはある時間範囲を定義するタイムフレーム中のデータをすべての検出器から集めてきてビルドするタイムフレームビルドに相当する。

これを実現するために、一対多、多対一の通信をサポートした ZeroMQ ベースに新たに開発を行うことで多層の層を渡っていくあいだに同じタイムフレームに属するサブタイムフレーム(検出器システムの内一部の検出器から出力されたタイムフレームを構成するデータの断片)が複数ある計算機の中で同じ最終段の計算機に到達するようなマルチエンドポイントのタイムフレームビルダーの開発を行った。

開発はプロセス間通信に ZeroMQ を使用し、状態遷移マシンとその制御に FairMQ を用いた。ZeroMQ は広く使われだしたメッセージライブラリであり、制御、データ転送 双方を強力にアシストしてくれる。FairMQ はドイツ GSI-FAIR 計画での実験を念頭において開発中のライブラリであり、状態遷移モデルを持った多数のプロセス、多数の計算機上でデータを受け渡していくフレームワークである。そしてそれらを管理するものとしてオープンソースのキーバリュー型データベースの一つである Redis を採用した。すべてのプロセスの情報と状態遷移マシンの制御はこの Redis を使って行われる。これらを用いることでタイムフレームビルドやソフトウェアトリガーを実現するための要素プロセス(DAQ プロセス)を実行するためのデータ収集フレームワークを開発することができた。

このフレームワークは FairMQ のプラグインとして開発された。開発されたプラグインは以下の 3 つである。

(1) DAQ サービス

DAQ サービスプラグインには 2 つの機能がある。一つ目は DAQ プロセスの状態遷移マシンの制御を行うことである。すべての DAQ プロセスはこのプラグインを通して Redis からメッセージを受けて自分の状態の遷移を行うことができる。

もう一つはサービス・ディスカバリーと呼ばれる通信管理である。各々の DAQ プロセスは DAQ プロセス同士の通信の接続をこのプラグインを通して行うことができる。この部分は本研究の特徴的で独自性の高いところである。データベースには「どのプロセスのどのポートがどのプロセスのどこに繋がればよいのか」という少ない記述が記録されており、各 DAQ プロセスはその情報を元に自ら接続を作っていく。この仕組みにより DAQ プロセスの数によらず少ない記述でプロセスの通信網を構築することができる。

(2) メトリック

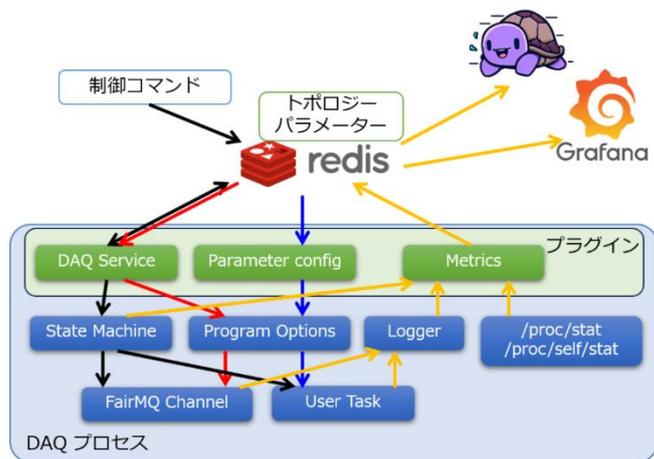
メトリックプラグインは DAQ プロセスの情報を一定期間ごとにデータベースに書き出す。これによりそれぞれのプロセスが使用している CPU やメモリ、それぞれの通信ポートにどれくらいのデータが流れているかを知ることが出来る。データベースに書かれた情報は、Grafana などのデータベースの可視化ツールを用いることにより、Web 上で確認することが出来る。

(3) コンフィグレーション

コンフィグレーションプラグインはそれぞれの DAQ プロセスが使用するパラメータを読み込む事が出来る。入力にはデータベースの値あるいはコマンドラインの引数を用いることが出来る。そして、そのプログラムインターフェースは統一されている。これにより DAQ プロセスはデータベースあるいはコマンドラインから動作に必要なパラメータを得ることが出来る。

これは、フロントエンドエレクトロニクスの初期化などにも有効に使用することが出来る。

図に DAQ プロセスの構造と通信の経路を示す。



DAQ プロセスのソフトウェア構造

これに加えデータ収集システム全体を制御するためのコントローラーの開発を行った。これは Redis のメッセージ機能を使って、すべての DAQ プロセスに対して状態遷移を起こさせるような機能を持ち、Web ブラウザから、データ収集システム全体の制御、データ収集の開始や終了などを行うことが出来る。

これは JavaScript と WebSocket を使ってユーザーインターフェースが実装されている。

これらによって一通りデータ収集システムの雛型が完成し、ストリーム型データ収集が実現可能なデータ収集ソフトウェアフレームワークを開発することが出来た。

4. 研究成果

この開発されたストリーミング型 DAQ に対応可能なフレームワークを用いてストリーム型データ収集が実際の粒子線計測に使用可能かどうかの評価を行った。

評価は以下の 3 点について行われた。

(1) ソフトウェア・トリガーを実現するためのワーカーモデル

複数のネットワークで繋がれた計算機を用いてタイムフレームビルダーを模した DAQ プロセスからデータを送り、データを記録する DAQ プロセス(Sink と呼ばれる)に対しダミーデータを送り加工して Sink

に送る様な構成を作り、実際に問題なくデータを受け渡せるかの確認を行った。サービス・ディスクバリエーションが機能しプロセスの数に寄らずデータ転送ネットワークが構築されることの確認を行った。このシステム上でワーカモデルは問題なく機能し、計算機をまたいでおよそ 700 プロセスまでのワーカが機能することが確かめられた。

(2) タイムフレームビルディング

J-PARC で始まっている E16 実験の一部の検出器に開発されたタイムフレームビルディングのシステムの適用を行い、検出器からのデータを読み出す事を行った。データ中に含まれるタイムフレーム ID 番号を利用し同じタイムフレーム ID 番号を持ったサブタイムフレームを集めタイムフレームの構築が出来る事が確認できた。

(3) 多数のプロセスの管理

Redis を使った DAQ のプロセス制御、状態の管理、ランコントロールなどを(1)と同様のセットアップにおいて確認を行った。(1)と同様に 700 プロセス程度まで問題なく稼働したがそれ以上にプロセスを増やすと、Redis のリソース使い尽くし動作が不安定になることがあったが、これは DAQ プロセスの使用するデータベースのメッセージを少なくできるように工夫すること、及び Redis のリソースを増やすことで対応可能であった。

これらの評価により開発されたデータ収集ソフトウェアは実際の検出器システムに適用可能であることを示すことが出来た。

これらによりこのデータ収集フレームワークは十分に粒子線計測に適用可能であると評価できたため、別の研究により開発されたストリーム読み出しが可能で、しきい値を超えた時間の測定が可能な時間測定機(TOT 付き TDC)と共に実際の検出器システムである大阪大学核物理センターのスペクトロメータの一つである Grand Raiden の焦点面検出器であるホドスコープとドリフトチェンバーに適用を試みた。その結果今までのシステムに比べ 40 倍の速度で安定にデータを収集することが出来、実験の統計を 40 倍することが出来た。

更には J-PARC ハドロン施設 K1.8BR エリアに置かれた E50 実験の一部の検出器のビームを用いた試験において上記の Grand Raiden の読み出しシステムと同様なデータ収集システムを構築し、検出器評価のためのデータの収集にも成功している。

また COMET 実験で用いられる予定の円筒形ドリフトチェンバーの読み出しにも適用を行った。これはトリガー型のデータ収集システムではあるがソフトウェアフレームワークは同じものを使用し問題なくデータを収集することが出来た。

これらの実績をもって目的である J-PARC E50 実験や COMET 実験への適用が期待されている。更には、このデータ収集システムは様々な原子核実験や素粒子実験に適用可能であるため、近い将来の原子核・素粒子実験により多くの統計と、より良いイベント判別をもたらすことが出来るようになった。それにより精度の高い進んだ計測や稀事象の探索への道を開くことが出来る。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomonori Takahashi, Ryotaro Honda, Youichi Igarashi, Hiroshi Sendai	4. 巻 -
2. 論文標題 Streaming DAQ Software Prototype at the J-PARC Hadron Experimental Facility	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2023.3262061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Youichi Igarashi and Hiroshi Sendai	4. 巻 68, 8
2. 論文標題 Data-Taking Network for COMET Phase-I	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1884 - 1890
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3086617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomonori Takahashi et al.	4. 巻 68, 8
2. 論文標題 Data Acquisition System in the First Commissioning Run of the J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1907 - 1911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3087635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ryotaro Honda et al.	4. 巻 2021, 12
2. 論文標題 Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123H01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. IGARASHI
2. 発表標題 A DAQ software framework for SRO
3. 学会等名 Streaming readout Workshop SRO-XI (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋智則, 味村周平, 五十嵐洋一, 大田晋輔, 小林信之, 本多良太郎, 柳善永
2. 発表標題 連続読み出しデータ収集のためのFPGA TDCを用いたsingle-slope ADCの研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古川史也, 大田晋輔, 小林信之, RYU SUN YOUNG, 白鳥昂太郎, 本多良太郎, 五十嵐洋一, 馬場秀忠, 郡司卓, 堀田智明, 宮部学, 野海博之, 堂園昌伯, J.Cai, 川田敬太, 遠藤史隆, 柴北洋明, C.Lin, 高橋智則, 庄子正剛, 池野正弘
2. 発表標題 RCNP グランドライデンでの連続読み出しDAQ のオンラインフィルタ開発
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白鳥昂太郎, 五十嵐洋一, 石川貴嗣, 宇田隆佑, 大田晋輔, 小林信之, 佐久間史典, 鈴木翔太, Lin Che-Sheng, 戸田匡哉, 富田夏希, 野海博之, 橋本直F 林双葉, 本多良太郎, 宮本憲伸, 柳善永, 他J-PARC E50コラボレーション
2. 発表標題 J-PARCにおけるチャームバリオン分光実験のための検出器・DAQテストベンチの構築
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Youichi Igarashi
2. 発表標題 A local event builder for the COMET CDC with ZeroMQ
3. 学会等名 23rd IEEE Real Time Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomonori Takahashi
2. 発表標題 Streaming DAQ software prototype at J-PARC hadron experimental facility
3. 学会等名 23rd IEEE Real Time Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Igarashi
2. 発表標題 The data taking network for COMET Phase-I
3. 学会等名 22nd Virtual IEEE Real Time Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.N. Takahashi
2. 発表標題 Data acquisition system in Run-0a for the J-PARC E16 experiment
3. 学会等名 22nd Virtual IEEE Real Time Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高橋 智則 (TAKAHASHI Tomonori) (80612134)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・協力研究員 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------