

令和 4 年 8 月 24 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03675

研究課題名(和文)「AIトリガー」による将来の先端加速器実験に向けたトリガー技術の革新

研究課題名(英文) Innovations in trigger technology for future advanced accelerator experiments with "AI Trigger"

研究代表者

戸本 誠 (Tomoto, Makoto)

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・教授

研究者番号：80432235

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)：高輝度LHC実験などの将来のエネルギーフロンティア実験において、興味ある物理事象とともに増大する背景事象をより強力に削除するトリガー技術の開発を進めた。大規模FPGAと高速・多入出力光トランシーバとを組み合わせた汎用的なトリガーボード試作機を製作した。高輝度LHC実験で導入予定の"Track Fit Trigger"による $\mu$ 粒子トリガーアルゴリズムを完成させ、トリガーボード試作機に実装した。"Track Fit Trigger"に変わるConvolutional Neural Network (CNN)などを取り入れた「AIトリガー」アルゴリズムを考案し、将来実験での実装可能性を追求した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高輝度LHC実験において最初に導入するミュオントリガーアルゴリズムとして"Track Fit Trigger"を使って物理データを収集することが国際共同研究者から認められた。さらに、トリガーボードを完成させ量産準備に取り掛かることができた。単純な検出器セットアップによる検証ではあるが、「AIトリガー」が"Track Fit Trigger"以上の性能を出せる可能性を持つことを立証し、学術論文としてまとめ投稿した(論文は承認待ち中)。また、このアルゴリズムは、ミュオントリガーだけでなく、シリコン検出器などを用いて実現する荷電粒子飛跡トリガーへの波及効果など応用性があることが認められた。

研究成果の概要(英文)：We have developed the new trigger technique to remove more effectively background events that increase along with interesting physics events in future energy frontier experiments such as the high-luminosity LHC experiment. A prototype of a general-purpose trigger board carrying a high-end FPGA and high-speed and multi-input/output optical transceivers was produced. The "Track Fit Trigger" algorithm for the muon trigger, which will be introduced to the high-luminosity LHC experiment, was completed and implemented on the prototype trigger board. An "AI trigger" algorithm incorporating Convolutional Neural Networks (CNN) and other technologies was devised to aim to replace the "Track Fit Trigger", and the feasibility of implementing this algorithm in the future energy frontier experiments was explored.

研究分野：素粒子実験

キーワード：Trigger LHC/ATLAS実験

### 1. 研究開始当初の背景

**CERN** の **LHC** 加速器実験は、**2012** 年にヒッグス粒子を発見し、標準模型を完成に導いた。同時に、発見した **125 GeV** のヒッグス粒子の質量を自然に説明できないこと、暗黒物質の候補となる素粒子が存在しないなど、標準模型を超える新しい物理(新物理)がないと解決できない問題が存在することも明らかになった。諸問題を解決する新物理を発見し、より根本的な素粒子や宇宙の原理を構築するため、さらに高いエネルギースケールの新物理を直接的に探索する超高エネルギー実験、ヒッグス粒子、トップクォーク、新しく発見した粒子を大量に生成して、それらの精密測定から新物理現象が存在するエネルギースケールを解明する超高輝度加速器実験が不可欠である。

現在の **LHC** 実験は **40 MHz** の頻度で陽子ビームが交差しているが、一回のビーム交差に平均 **40** を超える低いエネルギーでの陽子陽子衝突(パイルアップ事象)が起こる。一方で、上述の興味ある物理事象の頻度は **1 Hz** に満たない上に、その貴重な事象もパイルアップ事象とともに生成される。パイルアップ事象のみの背景事象と、パイルアップ事象の中に興味ある事象が混ざった信号事象を効率よく区別する「トリガー」は、これからの超高輝度加速器実験と超高エネルギー実験において極めて重要となる。

### 2. 研究の目的

高輝度 **LHC** 実験、および将来の高エネルギー加速器実験での新物理発見を確実なものとするために、以下の **2** つの研究目的を設定する。

(1) **2022** 年から開始する高輝度 **LHC** 実験のトリガー性能を飛躍的に引き伸ばす“Track Fit Trigger”による  $\mu$  粒子トリガーのアルゴリズムを開発する。

(2) 機械学習を積極的に取り入れた「AI トリガー」のアルゴリズムを新しく考案し、将来の先端加速器実験における実用性を追求する。

### 3. 研究の方法

本研究は、**LHC** 実験のエンドキャップ部で用いられている **7** 層のワイヤー読み出し層と **6** 層のストリップ読み出し層からなる **Thin Gap Chamber** ガス検出器(**TGC**)による  $\mu$  粒子トリガーを基礎とする(図 1)。この検出器は高輝度 **LHC** 実験でも用いられる予定で、トリガーと読み出しエレクトロニクスを刷新する。**TGC** を研究の目的の(1)と(2)それぞれに対応し、以下の方法で研究を進める。

(1) “Track Fit Trigger”による  $\mu$  粒子トリガーアルゴリズムは、さまざまな  $\mu$  粒子飛跡の位置、運動量を想定して予め準備したヒットパターンからのリストから通過した  $\mu$  粒子の位置、運動量などを

計測し、高運動量  $\mu$  粒子の存在を判断するものである。基礎的なアルゴリズムの開発は済みであり、これを大規模 **FPGA** の論理回路に組み込みその実現性を追求する。最初は、大規模 **FPGA** 搭載の市販評価ボードでアルゴリズムを検証しつつ、実際の高輝度 **LHC** 実験での仕様を満たすトリガーボードの試作機を作製し、その上での検証も行う。

(2) 実際に **LHC** 実験で用いている **TGC** 検出器を単純化した検出器セットアップを用いて、機械学習を取り入れた「AI トリガー」のアルゴリズムを考案し、考案したアルゴリズムをファームウェア化し大規模 **FPGA** に組み込む。組み込んだアルゴリズムの動作検証を行いハードウェアトリガーとしての「AI トリガー」として実用可能か検証する。考案するアルゴリズムは、高エネルギー実験の荷電粒子のオフラインでの飛跡再構成で頻りに用いられる **Hough** 変換後のヒットパターンをインプットにして畳み込みニューラルネットワーク(**CNN**)を用いるもの、検

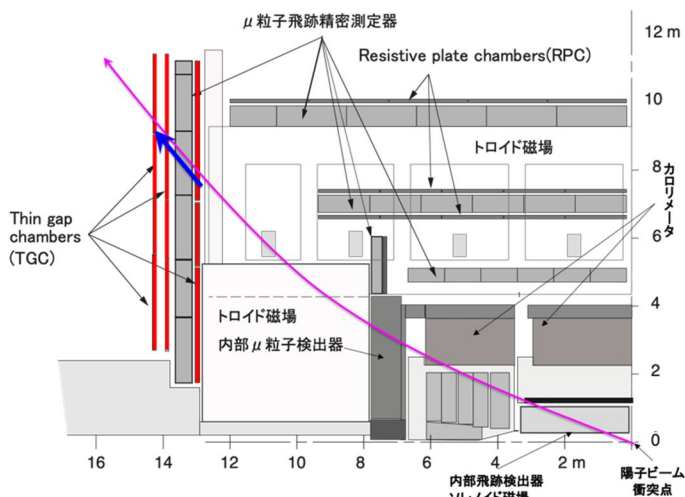


図 1: **Thin Gap Chamber** を用いた  $\mu$  粒子トリガーの概念図。本研究は、**7** 層の **TCC** のヒットパターンを使って、“Track Fit Trigger”、あるいは、機械学習を駆使した「AI トリガー」を使って、 $\mu$  粒子による直線飛跡の再構成アルゴリズムを構築する。

出器のヒットパターンをインプットにして **CNN** を用いるものなどがあげられる。

#### 4. 研究成果

“Track Fit Trigger”と「**AI** トリガー」によるアルゴリズムの両方を組み込むような大規模 **FPGA** と合計 **1.2** テラビット毎秒以上のデータ転送を可能にする多入出力高速光トランシーバを搭載したトリガープロセッサボード試作機の設計と製作に貢献した(図 2)。この試作機や大規模 **FPGA** を搭載した市販評価ボードを用いた研究方法の (1) と (2) に対応して、以下にあげる研究成果を出した。

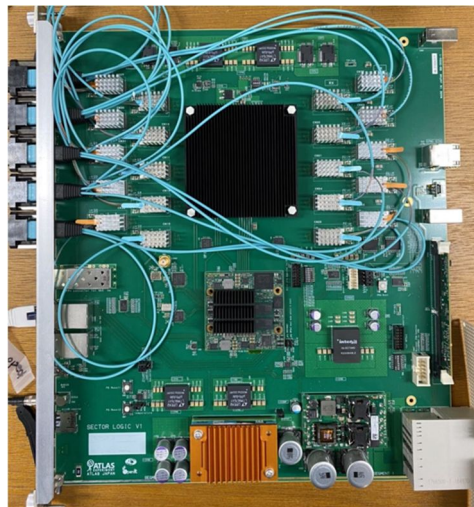


図 2: トリガープロセッサボード

(1) “Track Fit Trigger”による  $\mu$  粒子トリガーのアルゴリズムを完成させ、**24** 分の **1** セクターの領域における全アルゴリズムを **1** 枚のトリガープロセッサボードに導入可能であることを示した(図 3)。また、シミュレーションにより生成した  $\mu$  粒子飛跡に対してヒットした検出器ヒットパターンをインプットにして、飛跡再構成の性能を検証したところ、 $\mu$  粒子飛跡の入射角度分解能が **3 mrad** であることを示した。これは、**TGC** のチャンネル幅が数 **cm** であることを考えると限界値まで性能が出ていると理解できる。これにより、**LHC/ATLAS** 実験の国際共同研究者から高輝度 **LHC** 実験用の  $\mu$  粒子トリガーアルゴリズムとして“Track Fit Trigger”が認められた。

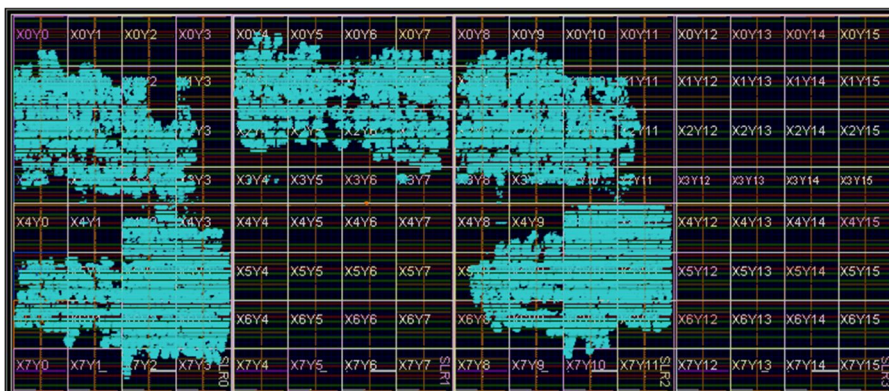


図 3: 大規模 **FPGA** 上での“Track Fit Trigger”の回路全貌。青色の領域で回路構成している。空き領域は、読み出し回路やその他のトリガー回路のために用いられる予定で、それらを考慮しても適切なリソースで“Track Fit Trigger”が実現されていることがわかる。

(2) **TGC** 検出機がカバーする限られた領域内で限られたハードウェア資源を用いて行う場合、検出器のヒットパターンを **Hough** 変換するアルゴリズムは性能が向上する利点以上にアルゴリズムの複雑さの欠点が目立つことがわかった。そのため、検出器ヒットパターンをそのままインプットにして、そのヒットパターンから **CNN** を用いて学習する「**AI** トリガー」のアルゴリズムを考案した。限界まで性能を引き出すようにニューラルネットワークのハイパーパラメータを最適化した場合、オフライン解析で直線フィットして得られる性能と同程度の  $\mu$  粒子飛跡入射角度分解能を有していることを示した。この時の角度分解能は **2** ミリラジアンを下回るほど良いが、現在入手できる **FPGA** のリソース量内にアルゴリズムを組み込むことができないことがわかった。そこで、**FPGA** のリソースでも同様のアルゴリズムを組み込むようにハイパーパラメータのビット数を制限して、ニューラルネットワークを構成したことにより、トリガープロセッサボードに搭載している **FPGA** に「**AI** トリガー」を導入できることがわかった。この時の分解能は、**2.5** ミリラジアンから **3** ミリラジアン程度にまで落ちるが、これは“Track Fit Trigger”と同程度であることがわかった。さらに、**160MHz** のクロックでロジックを処理した場合、**100** ナノ秒程度の遅延時間でロジックを動作させることができることがわかった。以上により、高輝度 **LHC** 実験や将来のエネルギーフロンティア実験において、「**AI** トリガー」の実用性を立証することができた。これらの成果を学術論文としてまとめている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中島 拓海
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS 実験のTGC 検出器トリガーにおける機械学習を用いた飛跡再構成手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三森 由暉
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験に向けた $\mu$ 粒子トリガーのための飛跡再構成ファームウェアの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 綿井 稜太
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験に向けた初段ミュオントリガーの多チャンネル信号処理ファームウェアの開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加納 勇也
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験に向けたTGC検出器読み出しファームウェアの開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 綿井稜太
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験のための大規模光通信を実装した初段ミュオントリガーボードの設計
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻田晴香
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験に向けた $\mu$ 粒子トリガーのための高速飛跡再構成ファームウェアの開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Asada
2. 発表標題 ATLAS Level-0 Endcap Muon Trigger for HL-LHC
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Kano
2. 発表標題 ATLAS Level-0 Endcap Muon Trigger for HL-LHC
3. 学会等名 Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻田晴香
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験に向けたTGC検出器による $\mu$ 粒子飛跡トリガーの大規模FPGAへの実装
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若松一輝
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験のルミノシティ向上を見据えたTGC検出器による $\mu$ 粒子飛跡再構成トリガーアルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻田晴香
2. 発表標題 高輝度LHC-ATLAS実験のミュオン飛跡トリガーにおけるVirtex UltraScale+ FPGA利用法の研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruka Asada
2. 発表標題 Development of the muon tracking trigger based on Thin Gap Chamber for the ATLAS experiment at High-Luminosity LHC
3. 学会等名 KMI 2019 International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	堀井 泰之 (Horie Yasuyuki)  (80616839)	名古屋大学・理学研究科・准教授   (13901)	

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
---------	---------