OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	A Trigger System with Online Track Recognition for the μ-e Conversion Search in the COMET Phase-I Experiment
Author(s)	中沢, 遊
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/81883
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　中沢　遊　）	
論文題名	A Trigger System with Online Track Recognition for the μ-e Conversion Search in the COMET Phase-I Experiment (COMET Phase-I実験におけるμ-e転換探索のためのオンライントリガーシステム)

論文内容の要旨

The COMET Phase-I experiment searches for the μ-e conversion in an aluminium muonic atom, which is strongly prohibited in the Standard Model. The goal of a single event sensitivity is 3.0×10^{-15} in a 150 day-long physics measurement. To this end, a highly intense pulsed muon beam and a detector system are constructed at the Japan Proton Accelerator Research Complex. The detector system consists of a cylindrical drift chamber (CDC) and arrays of trigger hodoscopes. The CDC measures the momentum of the conversion electrons. The hodoscopes measure their timings.

An initial simulation study indicates the use of the new muon beam gives an unacceptably high trigger rate for the data acquisition system. This issue is solved by a high-level trigger system which is called the COMET trigger (COTTRI) system. The COTTRI system consists of FPGA-based electronics and handles hit information of the CDC to make triggers only for signal-like events. The data acquisition system requires a trigger rate of less than 26 kHz. The total processing time of the full trigger system must be less than 7 μs due to the buffering time of the CDC readout electronics.

The electronics related to the COTTRI system were newly designed and produced. The firmware written in the hardware description language was also developed. Firstly, the COTTRI system was installed in the full trigger system, and the total latency time was measured to be 3.2 μs. It meets the requirement. A 12-hour operation test of the COTTRI system was performed using one-sixth of the CDC readout region in a setup of a cosmic-ray measurement. As a result, the data transfer and processing in the COTTRI system were demonstrated to be robust and stable.

The performance of the COTTRI system was estimated by applying the full simulation of the COMET Phase-I experiment. The background level in the detector system changes with time because the pulsed beam is adapted. For this reason, the trigger efficiency is estimated for possible patterns of the time window. As a result of this study, the COTTRI system is expected to provide the signal event acceptance of 86.0% to 96.8% depending on the time window while keeping the trigger rate of 13 kHz including a safety factor of two.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（中沢遊　　）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授	青木正治
	副査　教授	能町正治
	副査　教授	川畑貴裕
	副査　特任教授	久野良孝
	副査　准教授	南條創

論文審査の結果の要旨

本論文「A Trigger System with Online Track Recognition for the μ-e Conversion Search in the COMET Phase-I Experiment」は、COMET Phase-I 実験における物理測定で必須となる高レベルトリガーシステムの設計と構築、それを実現するためのハードウェアの開発と試験ならびに計算機シミュレーションを用いた当該トリガーシステムの性能評価に関して報告したものである。

COMET Phase-I 実験は、荷電レプトンフレーバを破る反応の一つであるミューオン電子転換過程を探索する実験である。荷電レプトンフレーバを破る反応は素粒子の標準理論では強く抑制されており、この反応を観測できれば素粒子物理における標準模型を越えた新しい物理現象の発見となる。現在の実験上限値は 7×10^{-13}(金標的)である。COMET Phase-I 実験では、J-PARC ハドロンホールに建設中の革新的な大強度ミューオンビームラインを活用し、ビームライン出口に設置するミューオン静止標的(アルミ製)中で発生するかもしれないミューオン電子転換反応によって放出される 105 MeV/c の電子の運動量を、ミューオン静止標的を取り囲むように設置する円筒形ドリフトチェンバー(CDC)とトリガーカウンター(CTH)で測定する。150 日間の物理測定で 3×10^{-15} の単一事象感度を達成することを目指している。

COMET Phase-I では、大強度ミューオンビームを使用することから、CTH による第一レベルトリガーの計数率が 90 kHz 程度に達すると見積もられている。このままデータを記録することは、バックエンドデータ収集システムの能力に照らして簡単なことではない。さらに、有用な物理データの計数率は高々20 Hz 程度であって、第一レベルトリガーイベントの大部分は利用価値のない背景イベントである。この状況を改善して効率的な物理測定に備えるために本論文では､約 4000 本の CDC アノード信号を段階的に分散パイプライン処理して高レベルトリガーを生成する専用ハードウェアを開発した。本ハードウェアは、隣接ワイヤーも参照して信号の特徴を抽出するルックアップテーブルを分散実装しており、短い処理時間で高い背景事象排除率を達成できる。

本論文では、新規に開発した専用トリガーハードウェアの処理時間を実際に測定し、データ収集システムから要求される 7.0 μs よりも十分小さい 3.2 μs でることを確認した。また、宇宙線を用いた総合テストにおいても、所定の性能を発揮していることを確認した。計算機を用いた性能評価では、機械学習の手法を駆使してルックアップテーブルを最適化し、90%以上の信号イベントアクセプタンスを担保しつつトリガー計数率を 13 kHz 以下に抑制することができることを示した。また、パルスミューオンビーム起源の背景ヒットが激増する早期タイミング領域においてもトリガー性能が維持されることを見出した。これは、実験感度改善の可能性や、実データを用いたビーム起源背景事象解析の高度化の可能性などを意味しており、本論文が COMET Phase-I 全体に与えた影響は大きい。

このように、申請者の研究は COMET Phase-I 実験全体に大きく貢献した。また、大強度量子ビームを用いた高統計実験に共通した話題、機械学習と FPGA を統合した効率的な雑音事象削減手法、への優れた事例にもなっている。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。