

氏 名 西村 龍太郎

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1993 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 SOIピクセル検出器を用いた X 線計測システムの構築と評価

論文審査委員 主 査 教授 幅 淳二
教授 新井 康夫
教授 岸本 俊二
准教授 平野 馨一
准教授 内田 智久
教授 高橋 浩之

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

KEK Photon Factory をはじめとする放射光施設では、高強度かつ高コヒーレンスの単色光が利用可能であり、これを光源に用いた X 線イメージングによって微細構造の撮像が可能である。このような目的で用いられる積分型センサとしてイメージングプレートやシンチレータと CCD を組み合わせた可視光変換型 X 線画像検出器等があるが、これらの検出器は連続撮像の制限や空間分解能等の性能上の課題が存在する。これらの課題に対応しうる検出器として、KEK を中心とする SOIPIX グループにおいて開発が進められている SOI ピクセル検出器がある。この検出器は Silicon-On-Insulator 技術を利用したモノリシック構造の検出器であり、X 線を直接電荷に変換して収集する直接変換方式であること、 $10\mu\text{m}$ 以下の位置分解能を実現可能であること、機械的接合を持たないことからピクセルサイズを縮小しやすいこと等、微細構造の X 線イメージング用撮像素子に用いるにあたって有利な特徴を多く備えている。しかし、これまで本検出器を実用的な検出装置として用いるためのデータ取得システムは存在せず、また周辺機器との連携も不十分なため、実用的な検出器としての運用は難しい状況であった。また、従来のデータ取得システムは SOI ピクセル検出器のフレームレート上限から見積もられるデータ転送レートの必要値に対してデータ取得システム側のスループットが不足しており、検出器本来の読出し性能が十分に発揮できていない状況であった。

そこで、本研究では SOI ピクセル検出器の読出し性能の上限まで対応可能、かつ周辺機器との連携等実用的な検出装置として用いるのに必要な機能を備えたデータ取得システムの構築を進め、高速・高機能な X 線計測システムの実現を目指すこととした。

【データ取得システムの高速化】

SOI ピクセル検出器の読出しには、通常 SEABAS と呼ばれる汎用読み出し基板をプラットフォームとして用いたデータ取得システム (SEABAS DAQ) が広く用いられている。本システムはその仕様から見積もられるスループット値に対して実測値が著しく低く、これが SOI ピクセル検出器を用いる際のボトルネックとなっていた。そこで、この原因を検討した結果、SEABAS DAQ システム内においてデータ取得ソフトウェアのスループットが著しく低く不安定であること、またこの変動を十分に吸収しうるバッファがシステム内に存在しないことを発見した。この問題に対する考えられる改善手法の 1 つとして、本研究ではデータ取得システムのソフトウェアに関して内部の処理構造を並列化したものを新たに開発し、スループットの低下を最小化および安定性を向上させることに成功した。

【データ取得用フレームワークの構築】

SEABAS DAQ システムは従来検出器自体の評価を主要な目的として構築されたシステムであるため、検出器単体での動作のみを想定したシステムとなっており、放射光施設での X 線イメージングのような自動での連続撮像や周辺機器との連携が必要となる実験は想定されていない。よって、実際の実験に用いるためにはこれらへの対応が必要となるが、これらの機能まで SOI 検出器用 DAQ ソフトウェアに直接組み込んでしまうことは不必要なソフ

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

トウェアの肥大化・開発コストの増大を招いてしまう。そこで、本研究においては、汎用性・拡張性を考慮したデータ取得用フレームワークを提案し、これを用いた実験セットアップの統括制御を実現することを目指すこととした。

本フレームワークはその役割に応じた機能を持つソフトウェアモジュール群とこれらを接続するコマンドパスによって構成される。ソフトウェアモジュール群は各モジュールを統括制御するマスターモジュール、及びマスターモジュールによって制御を受けるスレーブモジュールに分けられ、SOI ピクセル検出器読み出し用ソフトウェアはスレーブモジュールに含まれる。これらのソフトウェアモジュールは Windows 及び Linux 環境をサポートし、各モジュールを相互にネットワーク接続された個別のコンピュータ上に分散して稼働させることも可能であることから、柔軟なセットアップ構成に対応することが可能である。本フレームワークはこれまでに SOI 検出器を用いた各種実験で運用実績が存在し、これらの運用結果によってその有用性を確認できた。

【構築したシステムによるデータ取得実証】

本研究において構築したシステムを用いて、KEK Photon Factory BL-14B においてデータ取得試験を行った。本試験においてはサンプルの 3 次元 CT(Computed Tomography)像を得るための X 線投影像を撮像したが、このときには 181 枚(吸収イメージング法)、362 枚(Diffraction Enhanced Imaging 法)の自動連続撮像及びサンプルステージの制御が必要であった。従来のシステムを用いた場合これらの撮像には最低でも 3 時間(吸収イメージング法、1 投影像当たり露光時間 4 秒の場合)を必要とし、またその間ユーザーが撮像開始、サンプルステージの制御などを手動で行う必要があったが、本研究によるシステムでは同じ条件で 1 時間程度まで所要時間を短縮することに成功した。実質の露光時間に対しては依然として長い時間を要しているため、更なる時間短縮が課題となるが、SOI ピクセル検出器の応用に向けたプロトタイプとしては十分な性能を有することが確認できた。

【更なる高速化に向けて】

本研究において構築したシステムによって、現在応用が進められている SOI ピクセル検出器(INTPIX4 検出器)の性能に対しては十分に対応可能なスループットを確保することが可能となった。しかし、プラットフォーム基板である SEABAS 基板の性能が限界に到達しており、今後の更なる SOI ピクセル検出器の性能向上、及び更なる高機能化にはプラットフォーム基板の更新が必要となる。そこで、本研究では今後の更なる高速化に向けて、新たなプラットフォーム基板として KC705 基板の実用化を検討することとした。KC705 基板は Xilinx 社による汎用試験基板であり、SEABAS 基板搭載の FPGA(Field-Programmable Gate Array)と比較して I/O 性能、Block RAM 容量が強化された FPGA が搭載された基板である。この KC705 基板に INTPIX4 検出器用のシステムを移植して検証を行った結果、SEABAS 基板と同等のスループットが確認された。本格的な使用には時間を要するが、今後の課題として KC705 基板による性能向上、及び高機能化の可能性を示すことが出来た。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本研究は、高エネルギー加速器研究機構を中心として開発研究が進められている SOI ピクセルセンサーを使った X 線計測システムの開発を行うもので、高精細画像を高速で安定的に収集することを目指している。

SOI ピクセルは、先端的な半導体技術である Silicon-On-Insulator (SOI) ウェファを利用した次世代のピクセルセンサーで、従来に比べより高精細、高集積/高機能、厚い空乏層（検出層）などの特長を持っており、X 線イメージ検出器としてもその活用が期待されている。ピクセルセンサーとしてのこうした特長はすでに様々な試作チップにおいて実証がなされており、今後はこれをシステムとして組み上げ、多くの実践的な活用においてその有効性を実証していくことが求められている。

本研究では、これまで動作検証システムとして構築されてきた SEABAS と名付けられたベンチテストシステムの問題点を洗い出し、その性能を実用的な X 線計測システムとして活用できるレベルまで高め、実際にそれを使った測定によりその実用性を確認することを行っている。西村氏の検討により、オリジナルのシステムでは、センサーのデータ生成速度と比較してスループットが下回っているという問題があり、それがデータ転送においてその平均転送率が理想値のわずか 27% でしかも大きく脈動するという現象につながることで、明らかとなった。そこで、彼はシステム内の処理ソフトウェアのアルゴリズムに注目し、バッファを導入すると共に、一部の構造を並列化することでその処理速度が格段に向上することを見出して、処理ソフト全体を見直すことを行った。この改造により、システムの動作は平均転送効率で 97% でほとんど脈動のない安定的なものとなり、劇的な改善が実現した。

西村氏はこうして完成したシステムを使って、様々な X 線計測の応用においてシステムのパフォーマンスの実証を試みた。そのうち本学位論文において示されたのは、小魚の X 線吸収撮像による Computer Tomography (CT) で、 $17\mu\text{m}$ 角ピクセル約 45 万画素からなる X 線画像を異なる角度より 181 枚撮像したものにより再構築された。ピクセルサイズに相応わしい極めて詳細な骨格構造までも、高精細な 3 次元画像として再構築されることが示されて、システムの完成度が明確に示されるデモンストレーションとなった。もう一つの実証実験として示されたのが、放射光 BL14B における、X 線位相差イメージングによる Ti 水素化物の CT 撮像である。Ti は高機能の金属として重要な物質であるが、水素脆化の問題があるとされている。そのため水素化物となった局所構造を観察することは極めて重要であるが、高精細で高感度の X 線撮像装置が必要である。今回、西村氏はそのシステムによって、この CT 撮像に世界で初めて成功し、開発されたシステムの完成度を実証した。本研究において Ti 水素化物のこうした観察が今後可能となることを示した意義はきわめて大きい。

本研究の開発については、西村氏本人によってすでに国際会議においても 4 回の発表が行われており、その内容が和文、英文ともにプロシーディングなどの形でも公表済である。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

以上のように、西村氏による本学位論文は、学術的に大変重要な革新的 X 線計測システムの開発研究とその性能実証を行ったものであり、その内容が適切に記述されている。本論文の意義は十分に高いものと本審査委員会は認め、西村龍太郎氏の博士論文審査を合格とするとの結論に達した。