

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18624

研究課題名（和文）AI超解像技術を駆使した高速中性子イメージング

研究課題名（英文）High-speed neutron imaging by using AI super-resolution technique

研究代表者

稲田 聡明（Inada, Toshiaki）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：20779269

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、10B層での捕獲反応（ $n + 10B \rightarrow 7Li + \dots$ ）で生成される二種類の二次粒子（ $7Li$ と \dots 粒子）が与えるトラックの基礎的な理解が重要であり、当初の計画通りGEANT4によるモンテカルロ・シミュレーションによりその特性に関する調査が大幅に進展した。深層学習を用いることで、単純にクラスターサイズ及びクラスター内の総電荷量という二値の情報を用いた識別法よりも優れたID性能を達成し、従来手法による位置推定精度を上回ることを確認した。特に、超解像性に関するfeasibility studyが期待通り進行し、今後のハードウェア化に関する開発基盤を整備することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AIを活用して粗視画像の高解像化を図る技術の開発は、一次データのサイズを削減可能であるため、高いフレームレートの動画撮影や大面積のイメージングに有用となる。本研究はそのような高効率撮像技術を実現するための基礎研究として重要であり、中性子に限らず様々な2次元測定に応用可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Understanding the basic property of charge tracks generated by two kinds of secondary particles in neutron capture events in a 10B layer ($n + 10B \rightarrow 7Li + \dots$) is very important in this research. The progress of such study was obtained as planned, by using GEANT4 Monte Carlo simulations. Our deep-learning approach improved the performance of secondary-particle identification and neutron spatial resolution, compared to the conventional method using a cluster size and total charge. We obtained a steady progress in the feasibility study of AI-based super-resolution and established the R&D environment for future hardware integration.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：中性子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、 ^{10}B を含む特殊な原子核乾板を用いて、空間分解能が $1\mu\text{m}$ を下回る極めて精細な中性子画像、いわゆる「サブ μm 中性子イメージング」が可能となった[Jenke NIMA 2013, Naganawa EPJC 2018]。この手法は銀塩写真フィルムと同じ原理でフィルムの装着、露光、脱着、現像を行った後、光学顕微鏡で取得した拡大画像を解析して入射中性子と ^{10}B 原子核との反応点(バーテックス)を算出する。これにより高精細画像が取得できる一方で、露光中に発生した全ての中性子反応が積算された状態でフィルムに記録されるため、

- ・ 動画のように一連の画像として読み出すことはできない
- ・ 記録素子の定期的な入れ替えが必要
- ・ データの再現性及び記録媒体の管理・保管
- ・ 熟練した現像技術が必要

等によりその用途は限定的であった。

また従来の撮像素子である CCD や CMOS 表面に中性子反応層をコーティングすることで入射中性子から二次粒子を生成し、その飛跡によるチャージトラックを電極へ収集して読み出すことでデジタル的な撮像素子及びデータ処理が適用できる。一方、生成されたチャージトラックを電場により輸送する際に拡散や電荷反発が発生し、元々の入射位置に関する情報、すなわち空間分解能の低下は不可避となる。

上記の通り、アナログ及びデジタルそれぞれの手法で素子の取り扱いと得られる分解能にトレードオフの関係が存在し、双方の利点をカバーする「高分解能なデジタル画像」を与えるデバイスの実現が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、高精細を必要としない通常の中性子イメージングで取得されるデジタル画像に対して、深層学習によるバーテックス位置の推定を行うことで解像度をエンハンスする、いわゆる「AI超解像」技術の実現可能性を調査することを目的とする。そのために下記3つの研究項目を設定する。

- (1) GEANT4によるモンテカルロ・シミュレーション並びにシリコン内での電荷輸送を記述する方程式を数値的に解くことで、中性子の入射位置に対応するチャージクラスタパターンを生成する一連のプログラムコードを作成する。
- (2) 生成される膨大なデータセットから入射位置とクラスタパターンの対応関係を学習するソフトウェアの開発を行う。
- (3) 学習により得られたモデルを実データと比較し性能を評価する。またそのモデルをAIチップとしてFPGAへ実装し、ハードウェア化する。

3. 研究の方法

- (1) 入射中性子はCMOS表面にコーティングされた厚さ 200nm の ^{10}B 層で捕獲反応($n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$)を起こし、二次粒子である ^7Li と α 粒子がシリコン層で電離反応によるトラック($\sim 5\mu\text{m}$)を残す。
- (2) シリコン層に電圧を印加することで、生成したチャージをピクセル($\sim 10\mu\text{m}$ 角)までドリフトさせ、アンプして電圧信号として読み出す。
- (3) チャージはドリフト中に拡散及びクーロン反発(空間電荷効果)して、数ピクセルの幅に広がってしまうため、空間分解能は通常数十 μm となる。このチャージクラスタ(「粗視画像」)の重心を用いてバーテックスの位置を推定する従来の手法により数 μm の分解能を得ることができる一方、二次粒子が等方的に崩壊するため、その到来方向の不定性がこの分解能をリミットする要因となる。そこで、粗視画像のクラスタパターンから二次粒子の到来方向を推定することでさらに高い分解能を得る。
- (4) 本推定は深層学習が得意とするCNN(convolutional neural network)として定式化する。
- (5) GEANT4で生成した二次粒子トラックが与える粗視画像を電磁シミュレータにより計算し、上記バーテックス位置と対応づけたデータセットを生成する。
- (6) 本対応を学習させるソフトウェアを開発し、GPUを用いて訓練させる。
- (7) その性能を評価するため、中性子ストップであるGdを用いたナイフエッジマスクをパターンニングし、J-PARC中性子ビームラインで取得する照射データと比較する。

4. 研究成果

- (1) 本研究では、10B 層での捕獲反応 ($n+10B \rightarrow 7Li+\alpha$) で生成される二種類の二次粒子 (7Li と α 粒子) のそれぞれが与えるトラックに関する基礎的な理解が極めて重要であり、当初の計画通り GEANT4 によるモンテカルロ・シミュレーションを用いることでその特性に関する調査が大幅に進展した。
- (2) GEANT4 により 7Li 及び α 粒子それぞれで、トラックに沿ったエネルギー損失 (energy deposit) の分布を可視化することが可能となった。
- (3) チャージトラックの時間発展を記述する輸送方程式を 3 次元空間差分法に従い計算し、GEANT4 による raw データから粗視画像を生成することに成功した。
- (4) 二次粒子は back-to-back に 180 度の角度で放出されるため、入射中性子イベント毎にセンサー側で検出されるのはそのうち的一方のみである。従い、高い精度で二次粒子の種類を識別することが本開発の第一条件であり、深層学習を用いることで、単純にクラスサイズ及びクラス内の総電荷量という二値の情報を用いた識別法よりも優れた ID 性能を達成した。
- (5) 上記データセットにより訓練されたモデルを実データに適用し、従来手法である重心法による位置推定精度を上回ることを確認した。一方、中性子の照射とともにセンサー及び読み出し回路への放射線損傷による性能劣化が無視できないことが明らかとなった。従い、中性子フラックスの高い測定環境下で特に高い空間分解能を必要とする用途では照射時間とともにモデルをアップデートする、もしくは性能の変化が無視できるほどに短い照射時間でデータを区切る必要があることを確認した。

以上の通り、当初研究目的として掲げた訓練済みモデルの AI チップ化には及ばなかったが、それ以外の開発項目は概ね達成することができた。特に、超解像性に関する feasibility study が期待通り進行し、今後のハードウェア化に関する開発基盤の整備並びに技術的知見の蓄積が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Tabletop experiments https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/

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

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