

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740131

研究課題名(和文) ハードウェアロジックによる専用計算機を用いた粒子飛跡再構築の開発研究

研究課題名(英文) Research on a programmable logic computer for the application of charged track reconstruction in high energy physics.

研究代表者：千代 勝実 (KATSUMI SENYO)

名古屋大学・教養教育院・講師

研究者番号：80324391

研究成果の概要(和文)：

高エネルギー物理学実験における粒子の軌跡再構築の数値計算において、PLDを用いたハードウェアによる数値計算や計算機に装備されているSIMDインストラクションベースの計算手法により、フィット計算の部分の速度が従来のソフトウェアによる方式より50-100倍程度高速化できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：

In order to accelerate numerical curve fit on tracking of highenergy physics experiments, we have developed PLD-based computing device and SIMD-based algorithm, and expect 50 to 100 times faster than that with traditional software-based computing method at our project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：素粒子物理学実験

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子の飛跡は、ドリフトチェンバーやシリコンストリップ検出器などに残された点としての位置情報の集合を、直線・曲線などの関数でフィットすることにより再構築する。このようなフィットの計算は比較的単純であるものの、現在までソフトウェアで計算されてきた。ところがフィットのための計算時間はノイズも含めたヒット・飛跡の数に対する組み合わせであるため、ベキや指数的ではなく、階乗で組み合わせが増えていく。このため、同じ測定器でもルミノシティが向上するとアクシ

デンタルなヒットが増え、飛跡再構築に膨大な時間がかかるようになる。

典型的な例として、KEK-Bファクトリーはルミノシティが2000年から2007年で10倍以上の $1.5 \times 10^{34}/\text{cm}^2$ に達したが、現在シリコンストリップ検出器の再内層は1万チャンネルの内15%がアクシデンタルバックグラウンドで常に鳴っている状態で、オンラインでのデータ量抑制のための簡易な飛跡再構築にかかる時間は、検出器デッドタイム(5-10%)の大半を占めている。オフラインでの飛跡再構築はさらに深刻で、実験当初はデータ取

得とほぼ同時に行っていた飛跡再構築が、現在の実験データでは半年から1年余分にかかっている。またモンテカルロシミュレーションについては3年以上生成・飛跡再構築が遅れており、今後も改善する見込みはない。この問題は、稀崩壊現象の探索や、運動量の小さい多数の娘粒子で構成される崩壊の精密測定など、バックグラウンドの解析が重要になる研究においてすでに致命的となっている。これは国際競争という観点から見てもゆゆしき事態である。

現状のスキームでは計算機の数を増やすという対症的な解決しか行えないが、今後徐々にルミノシティが向上し $10^{35}/\text{cm}^2$ に達した場合、計算時間は極めて楽観的に見積もっても、のべ20倍以上になる。つまりこのままでは運転時間・データ取得時間よりもオフラインでのデータ解析時間、特に知的作業とは言えない飛跡再構築にかかる時間が大幅に長くなってしまふ。これは本来競うべき加速器や検出器の性能ではなく、計算機の能力で物理探索の上限がついてしまうことを意味する。

以上のような計算時間の問題は、Bファクトリーだけでなく多くの固定標的実験や TEVATRON、LHC およびリニアコライダーなどのコライダー実験においても予見され、もしくはすでに直面している課題であり、現在では数十万～数百万に達する無数の計算機を世界中に分散運用することによって力づくで乗り切ろうとしている。しかし、民生分野でもっとも計算機クラスターを装備していると思われる Google ですら 30 万台であり、コストやエネルギー、設置施設の面から、高エネルギー物理学実験における計算のパラダイム転換を行う時期に来ていることは、誰の目にも明らかである。

2. 研究の目的

以上のような状況から、飛跡再構築の高速化の手段として、単純な計算を繰り返して行うための専用ハードウェアを開発し、利用することを考え

た。

現在の計算スキームでは、それぞれの計算機の中でソフトウェアによって構築された飛跡再構築アルゴリズムにより、再構築が行われている。この場合、アルゴリズムに従ってすべて順番に行われ、計算内容の複雑さに関係なく同じ時間をかけて処理される。そして足し算やかけ算など単純な計算では、計算機の機能はごく一部しか使われず、ほとんどが遊んでいる状態になっている。従って市販されている計算機が汎用計算向けにデザインされているため、飛跡再構築のような単純な演算の繰り返しには向いていない。

実はこのような単純計算は、一般に市販されているパソコンなどでも 3D 表示やマルチメディアの処理などにも多く出現するため、現代の計算機 CPU はそれぞれの単純処理に最適化した多重パイプライン演算機能 (SIMD、SSE などと呼ばれる) を備えている。従って一部の計算についてはこれらの機能を利用することにより高速化することが期待できる。ただしそのようなパイプラインは民生の汎用用途に最適化して設計されており、高エネルギー物理学実験向けの計算を網羅しているわけではないし、もちろん最適化されているわけでもない。

以上のような状況を参考に、次のような専用計算機ボードを作成し、一般の計算機をホストとして付加することで、飛跡再構築計算の多重化・高速化をねらう。

3. 研究の方法

飛跡再構築の試行計算は総当たりで行われる。つまり個々の試行計算が独立しているためパラレル化・パイプライン化が容易である。また、この試行計算自体もすべてのヒットにおいて全く同じ計算式であり、計算の順番やアルゴリズムも一定である。ただそれぞれのヒットによってパラメータが異なるだけである。したがって試行計算をアルゴリズムの順にパイプライン化し、それを LSI チッ

プの上にハードウェアとして複数本を構築し、完全に並列計算することにより、飛跡再構築が高速化される。また、最後にどの試行計算が最適か判断するといった複雑な判断が必要な計算は、専用計算機で大量の試行計算を行った後、1回行うだけであるのでホスト計算機で計算する。つまりパイプライン化できる計算のみを専用計算機ボードで構築する。

このような方法をとることによって、専用計算機をいたずらに複雑にすることなく計算を高速化することが期待できる。さらに、飛跡再構築の律速過程は上述の専用計算機で行う試行計算なので、専用計算機の LSI チップを単純に増やすだけで、計算にかかる時間をチップの個数に反比例して短縮することが可能である。

専用計算機の LSI チップは、ロジックの書き換えが可能なプログラマブルな LSI チップ(PLD)を用いて作成する。現在の半導体技術の発達により、このような PLD においても、フィットの試行計算を十分な速度で行うことが可能となった。したがって計算のアルゴリズムが変更されても、専用計算機上の LSI チップのロジックをオンラインで書き換えて対応することができる。さらに PLD は回路の動作をパソコンでシミュレーションすることができるので、設計の際の試行錯誤をシミュレーション上で完了させることができる。もちろん、これらのツール、PLD は ASIC (特定用途向け集積回路)を作成するための前段階・プロトタイプ用としても開発されているので、さらなる高速化・大量生産化が必要な場合には、設計をそのまま ASIC として作成可能である。

また、この研究の重要性について指摘しておきたい。今後の高ルミノシティ加速器実験では飛跡構築の精度も要求されることから、検出器のチャンネル数が飛躍的に増大し、データ 1 イベントあたりの検出器のヒット数が数万～数十万ヒット、再構築されるべき飛跡の本数が数百本に達しつつある。すでに BaBar

実験や CDFII 実験での B 中間子崩壊に関する研究ではすでに致命的な問題となっているため、飛跡再構築の高速化を行い、早急に手を打っておく必要がある。

また、高速で飛跡を再構築できるようになれば、データを取得と同時にオンラインで解析が可能になる。もちろんこのまま論文クォリティの結果は出せないにしても、データを取得後即座に詳細なデータクォリティの確認、稀崩壊や非対称現象などの予備研究などにも生かすことができる。また民生転用として、医療や非破壊調査などでの、リアルタイム内部 3D イメージングにも活用できる。

4. 研究成果

高エネルギー物理学実験における高輝度加速器実験で大量に処理を行う必要がある荷電粒子の飛跡再構築について、計算機の CPU に含まれているマルチメディア計算機能 (SIMD) に加え、プログラマブルロジックデバイスを使用した計算速度の高速化を検討した。そもそも荷電粒子の飛跡再構築は演算相互に依存性があるわけではなく、単純に逆行列の計算に類した演算を行うだけであるので、そのフィッティングの試行それぞれについて大量の四則演算や二乗平均演算が発生する割に、並列演算が比較的容易である。またこれらの計算は現在使われているいくつかのフィッティングの方法それぞれにおいてもほとんど違いがなく、最後の求められた軌跡の品質を表す評価関数を本体の計算機で計算させるだけで対応できる。この単純計算の部分はソフトウェアで実行する場合に比べて 100 倍から 1000 倍の速度が期待できる。このためすべての試行計算をプログラマブルロジックデバイスおよび高速なメモリ上で展開・実施することにより、現在のソフトウェアベースのものより高速化でき、

リアルタイムのイベント再構築などにも利用できる。以上のような目的で、プログラムブルロジックデバイス上に試作的な計算ユニットを製作した。これは上記で述べた単一の計算を行うだけであり、最適化も超並列化も行っていないが、計算機上のフィッティングアルゴリズムからテスト用のデータを送り、実際に 50-100 倍の計算速度で計算できることを確認した。また、超並列化および計算性能の最適化の評価も行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

A. Sokolov, K. Senyo 他 **Measurement of the branching fraction for the decay $Upsilon(4S) \rightarrow Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$** Physical Review D79 051103-1(2009)

S. Uehara, K. Senyo 他 **High-statistics measurement of neutral-pion pair production in two-photon collisions.** Physical Review D78 052004-1(2008)

P. Goldenzweig, K. Senyo 他 **Evidence for Neutral B Meson Decays to ωK^0 .** Physical Review Letters 101 231801-1(2008)

C.P. Shen, K. Senyo 他 **Evidence for a New Resonance and Search for the $Y(4140)$ in the $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ Process** Physical Review Letters 104, 112004(2010)

P. Chen, K. Senyo 他 **Observation of $B^+ \rightarrow p \bar{1} \pi^+ \pi^-$ at Belle** Physical Review

D80 111103(2009)

Y. Miyazaki, K. Senyo 他 **Search for Lepton Flavor and Lepton Number Violating tau Decays into a Lepton and Two Charged Mesons.** Physics Letters B 682 355-362(2010)

K. Hara, K. Senyo 他 **Evidence for $B^+ \rightarrow \tau^+ \bar{\nu}_\tau$ with a Semileptonic Tagging Method.** Physical Review D82 071101(2010)

K. Hayasaka, K. Senyo 他 **Search for Lepton Flavor Violating Tau Decays into Three Leptons with 719 Million Produced $\tau^+\tau^-$ Pairs** Physics Letters B687 139-143(2010)

A. Poluektov, K. Senyo 他 **Evidence for direct CP violation in the decay $B \rightarrow D^{(*)} K$, $D \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$ and measurement of the CKM phase ϕ_3 .** Physical Review D81 112002(2010)

[学会発表] (計 1 件)

K. Senyo **Recent results on ϕ_3 at Belle Lake Louise Winter Institute 2010** 2010 年 2 月 17 日 Lake Louise, Alberta, Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千代 勝実 (SENYO KATSUMI)

研究者番号 : 80324391

(2) 研究分担者 なし
()

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

研究者番号 :