

修士論文
LHC-ATLAS 実験における
高速 FTK シミュレーションの開発及び構築

早稲田大学 先進理工学研究科
物理学及応用物理学専攻 修士 2 年 寄田研究室

亘 龍太郎

2017 年 2 月 8 日

概要

CERN の LHC 加速器は重心系エネルギーやビーム輝度を増強して 2015 年 6 月より Run2 実験を開始した。LHC 加速器は、2012 年に発見されたヒッグス粒子の更なる理解や新物理現象探索のために今後も増強を重ねて稼働を続ける。ATLAS は LHC 実験グループの内の一つである。ATLAS では LHC の高輝度環境化におけるトリガー効率向上のために高速飛跡トリガーシステム (FTK) の開発・構築を行ってきた。FTK の開発においてはこれまでシミュレーションを用いた性能評価・最適化や実機を用いた統合試験などが行われてきた。現在は一部領域について FTK の挿入がなされており、実機の試運転が行われている。FTK の性能評価や最適化にあたって FTK 実機の動作を模した FTK シミュレーションが開発されてきた。FTK シミュレーションは FTK 挿入後のデータ解析にも必要となる。実際に取得したデータの解析を行うためには、取得したデータと比較するためのシミュレーションサンプルが必要となる。しかし従来の FTK シミュレーションでは 1 事象の処理に時間がかかることが課題として挙げられる。必要と見積もられているシミュレーションサンプルの事象数は数億事象である。そのため取得データ解析に使用するためのシミュレーションサンプルを生成するための高速 FTK シミュレーションを作成する必要がある。高速な FTK シミュレーション (fast sim) には短時間での処理が要求される。またそれだけでなく、従来の FTK シミュレーション (full sim) の飛跡再構成率や飛跡分解能などを再現する必要がある。先行研究として、仲松弥氏の 2014 年度修士論文「ATLAS 実験における FTK によるトリガーの改善とシミュレーションの高速化」においては truth の飛跡パラメータから直接乱数で飛跡パラメータを決定する手法が研究されている。先行研究の結果において開発された fast sim は飛跡再構成率、飛跡分解能ともに full sim とよく一致しており、処理時間も十分に高速である。しかし、乱数から直接飛跡パラメータを決定しているため、full sim との相関が全くなく、また偽飛跡の再現が不可能である。そこで本研究では truth のヒット情報を使用する事で処理の高速化を行ったうえで full sim に近いアルゴリズムを使用する方法を使用して高速なシミュレーションの開発を行った。本研究では開発したシミュレーションの処理時間について ttbar 事象での評価を行った。また飛跡再構成率や飛跡分解能の fast sim(本研究) と full sim との違いを single muon 事象を用いて理解し、fast sim(本研究) に対する単純な補正を行うことで fast sim によって full sim をリーズナブルに再現し、新たな手法としての fast sim の道筋を確立した。

目次

1	序論	1
2	LHC/ATLAS 実験	2
2.1	LHC	2
2.2	ATLAS 検出器	2
2.2.1	ATLAS 検出器座標系	3
2.2.2	内部飛跡検出器	4
2.2.3	カロリメータ	8
2.2.4	μ 粒子検出器	9
2.3	ATLAS トリガーシステム	11
3	FTK	12
3.1	FTK の導入目的	12
3.2	FTK の動作原理	13
4	FTK シミュレーション	16
4.1	FTK シミュレーションの目的	16
4.2	FTK シミュレーションの実装状況	20
4.3	FTK シミュレーションの課題	20
5	FTK Fast シミュレーション	21
5.1	FTK Fast シミュレーションの目標	21
5.2	FTK Fast シミュレーションの原理	21
5.3	先行研究における FTK Fast シミュレーション	22
5.4	本研究における FTK Fast シミュレーション	22
5.5	FTK シミュレーションと FTK Fast シミュレーションの違い	23
5.6	FTK シミュレーションと FTK Fast シミュレーション (本研究) の性能比較	24
5.6.1	処理時間の評価	24
5.6.2	飛跡再構成率と飛跡分解能	25
5.7	FTK Fast シミュレーション (本研究) に対する再構成率及び分解能の補正	40
6	まとめと今後の展望	47
7	謝辞	48
	引用	49

図目次

2.1	LHC 全体像 [4]	2
2.2	ATLAS 検出器 [5]	3
2.3	ATLAS 検出器座標系 [6]	3
2.4	内部飛跡検出器の全体像 [5]	4

2.5	内部飛跡検出器のビーム軸方向断面図 [7]	4
2.6	内部飛跡検出器の横方向断面図 [5]	5
2.7	IBL モジュールの概観 [8]	6
2.8	IBL モジュール断面の概念図 [8]	6
2.9	Pixel 検出器モジュール [5]	7
2.10	バレル領域の SCT モジュール [5]	8
2.11	カロリメータの全体像 [5]	8
2.12	μ 粒子検出器 [5]	9
2.13	現行の ATLAS トリガーシステム [9]	11
3.1	FTK 挿入後の ATLAS トリガーシステム [10]	12
3.2	FTK の動作原理の流れ [11]	13
3.3	IM のクラスター化アルゴリズムのイメージと例 [12]	14
3.4	FTK による内部飛跡検出器の領域分割 [12][13]	14
3.5	FTK の飛跡パターン認識のイメージ図 [10]	15
4.1	FTK の Truth 飛跡に対する飛跡再構成率 [13]	17
4.2	FTK の Offline 飛跡に対する飛跡再構成率 [13]	18
4.3	FTK 飛跡及び Offline 飛跡の Truth 飛跡に対する分解能 [13]	19
4.4	FTK シミュレーションの処理の流れ	20
5.1	fast sim(先行研究) による飛跡再構成率及び飛跡分解能 [14]	22
5.2	fast sim(本研究) の処理の流れ	23
5.3	シミュレーション方法による違いの模式図	24
5.4	ttbar 事象の処理時間	25
5.5	muon 事象の飛跡生成領域	26
5.6	再構成された全飛跡のパラメータ分布	28
5.7	飛跡再構成率の飛跡パラメータ依存	29
5.8	full sim 飛跡の fast sim 飛跡に対する inefficiency	30
5.9	飛跡分解能の曲率依存	31
5.10	飛跡分解能の eta 依存	32
5.11	飛跡分解能の phi 依存	33
5.12	飛跡分解能の d0 依存	34
5.13	飛跡分解能の z0 依存	35
5.14	fast sim と full sim における消失座標数の違い	37
5.15	full sim における飛跡の消失座標数と飛跡の曲率依存の関係	38
5.16	full sim における飛跡の消失座標数と飛跡分解能の eta 分解能依存の関係	39
5.17	補正方法のイメージ	40
5.18	補正後の飛跡再構成率	41
5.19	補正後の飛跡分解能の曲率依存	42
5.20	補正後の飛跡分解能の eta 依存	43
5.21	補正後の飛跡分解能の phi 依存	44
5.22	補正後の飛跡分解能の d0 依存	45
5.23	補正後の飛跡分解能の z0 依存	46

表 目 次

1.1	物質の構成粒子	1
1.2	標準理論で取り扱う 3 つの力と対応する媒介粒子	1
2.1	IBL センサーの特性 [8]	5
2.2	Pixel 検出器の基本的なパラメータ [5]	7
2.3	μ 粒子検出器の主要パラメータ [5]	10
2.4	μ 粒子検出器のサブシステムのパラメータ [5]	10
5.1	FTK Fast シミュレーションの目標	21
5.2	シミュレーション方法による違い	24
5.3	muon 事象の飛跡生成領域	25
5.4	truth 飛跡によるカット	27
5.5	full sim と fast sim によって再構成された飛跡の消失座標数の関係とその比率	36

1 序論

この世界の物質を構成する最小単位 (素粒子) はどのようなものであるのか。それらの間にはどのような法則が働くのか。これらについての研究を行う学問が素粒子物理学である。現在の素粒子物理学で提唱される標準理論では、素粒子には物質の構成粒子と力の媒介粒子の2種類が存在するとされている。物質の構成粒子は強い相互作用をするクォークと強い相互作用をしないレプトンの2種類に分けられる。さらに、クォーク、レプトンのなかでもそれぞれ3種類の世代に分類することができる。現在知られている、物質の構成粒子を表1.1に示す。

表 1.1 物質の構成粒子

名称	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)
	d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

自然界には4つの力、重力、電磁力、強い力、弱い力が存在するとされている。これらの力は力の媒介粒子によって伝達される。標準理論ではこれらの内、重力相互作用以外の3つの力が取り扱われている。標準理論で取り扱う3つの力と対応する媒介粒子を表1.2に示す。

表 1.2 標準理論で取り扱う3つの力と対応する媒介粒子

力	電磁力	強い力	弱い力
力の媒介粒子	γ	g	$W^\pm, Z$

2012年には、LHC実験によって17番目の素粒子ヒッグス粒子が発見された。ヒッグス粒子は他の素粒子に作用して質量を与えられている。ヒッグス粒子の発見はなされたが、発見されたヒッグス粒子が標準理論のものであるかどうかや、結合定数、スピンなど解明されていない部分が多く存在する。これらのヒッグス機構の更なる理解や、新物理現象探索のため、より高エネルギーにおける実験を行う事と実験による取得データの統計量を増やす必要がある。

2 LHC/ATLAS 実験

ATLAS 実験は、スイス・ジュネーブ郊外に位置する LHC に設置された ATLAS 検出器と呼ばれる複合型汎用粒子検出器を用いた実験である。ATLAS 実験はヒッグス粒子、余剰次元や暗黒物質の探索など、高エネルギー物理における広範な分野をターゲットとしている。本節ではこの LHC/ATLAS 実験について述べる。

2.1 LHC

LHC は Large Hadron Collider の略称であり、スイス・ジュネーブ郊外に位置する円周 27km にも及ぶ世界最大の陽子・陽子衝突型加速器である。LHC は欧州原子核研究機構 (CERN) が保有しており、LHC を用いた実験は 7 種類存在する。主な実験としては ATLAS、CMS、ALICE、LHCb がある。ATLAS 検出器をはじめとする各実験の検出器の位置関係は図 2.1 の通りである。

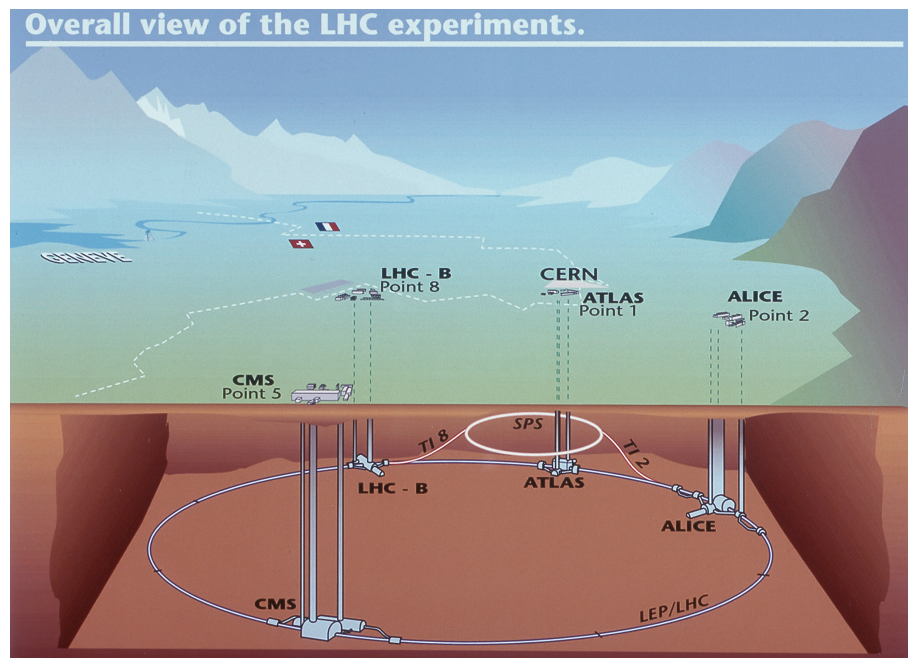


図 2.1 LHC 全体像 [4]

LHC では陽子が TeV 領域まで加速されて衝突する。LHC の到達目標としては重心系エネルギーが 14TeV 、瞬間ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ である。現在は Run2 実験が行われている。

2.2 ATLAS 検出器

A Troidal LHC ApparatuS(ATLAS) 検出器は ATLAS 実験で使用される複合型汎用検出器である。ATLAS 検出器はビーム軸から近い順に内部飛跡検出器、カロリメータ、 μ 粒子検出器で構成されており、種々の粒子のエネルギー、運動量、位置を高精度で測定することが可能である。ATLAS 検出器の構成を図 2.2 に示す。

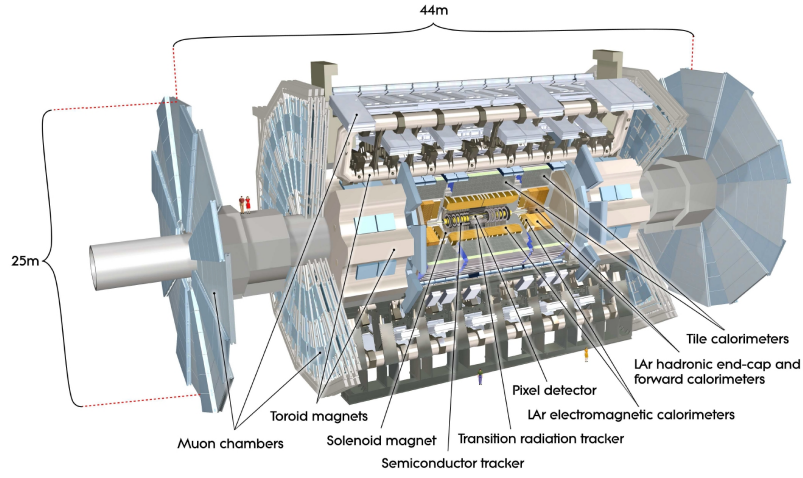


図 2.2 ATLAS 検出器 [5]

2.2.1 ATLAS 検出器座標系

ATLAS 検出器の座標系を図 2.3 に示す。ATLAS 検出器の座標系は右手系である。陽子衝突地点の中心を原点として、X 軸は LHC の中心を向く方向であり、Z 軸はビーム軸に沿っている。Y 軸は X 軸と Z 軸に垂直な方向である。また、方位角 Φ が X-Y 平面内のビーム軸周りの角度として定義され、天頂角 θ が、原点とその座標を結ぶ線と z 軸正方向とのなす角度として定義される。さらに、天頂角 θ の代わりによく使われる量として以下の擬ラピディティ η が定義される。 Φ 、 η は粒子の飛跡の方向を表現する際によく使用される量である。

$$\eta = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.1)$$

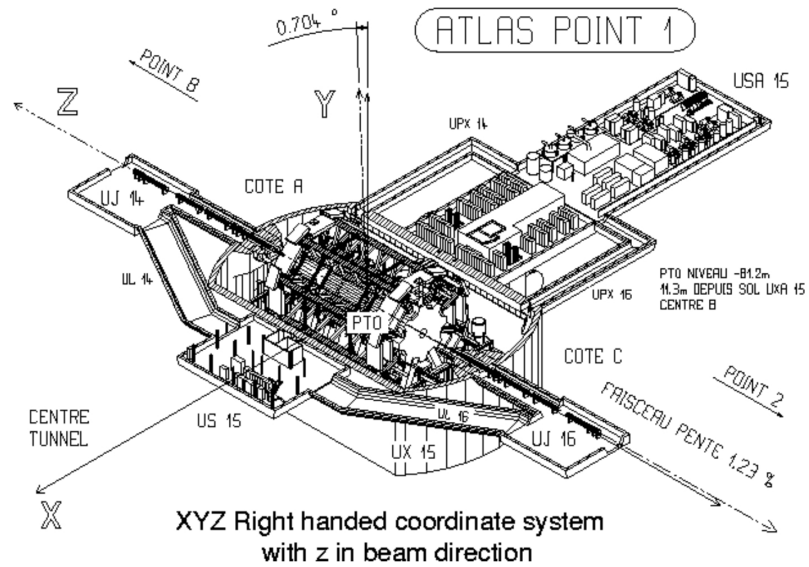


図 2.3 ATLAS 検出器座標系 [6]

そのほかに、よく用いられる量として横運動量 P_T 、横エネルギー E_T 、消失横エネルギー E_T^{miss} がある。横運動量 P_T とは運動量を x - y 平面に射影したものである。また、横エネルギー E_T とはエネルギーを運動量方向に沿ったベクトルと見なして x - y 平面に射影したエネルギーである。消失横エネルギー E_T^{miss} とは、衝突後に失ったように見える横エネルギーのことである。LHC では陽子は z 方向のみに運動量を持って衝突するため、衝突前後の粒子の横運動量のベクトル和はゼロとなる。しかし、検出器の検出効率や ν などの検出器にかからない粒子の運動量が存在するため、衝突前後の横エネルギーが保存しないように見えることがある。この際の消失したように見える横エネルギーを消失横エネルギーと呼ぶ。

2.2.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は通過した粒子の飛跡を検出する。内部飛跡検出器は 4 種の検出器から構成され、検出器内側から順に、IBL 検出器、Pixel 検出器、Semi Conductor Tracker(SCT) 検出器、Transition Radiation Tracker(TRT) が配置されている。IBL、Pixel、SCT 検出器はシリコン検出器であり、TRT は遷移放射型検出器である。内部飛跡検出器の構成を図 2.4、図 2.5 および図 2.6 に示す。

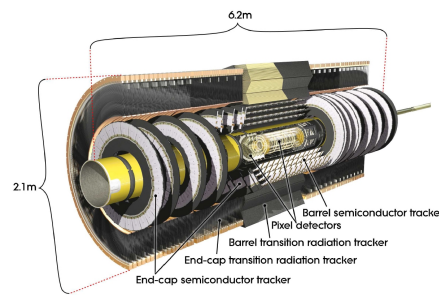


図 2.4 内部飛跡検出器の全体像 [5]

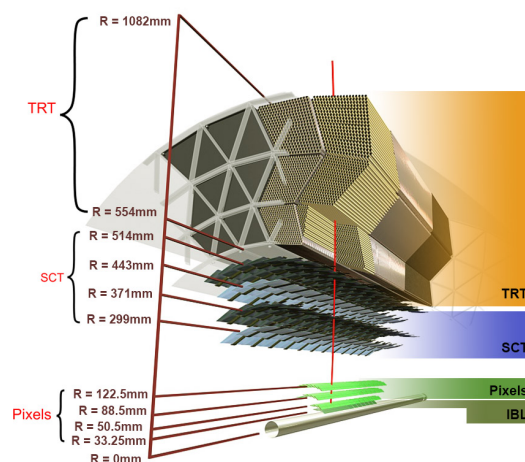


図 2.5 内部飛跡検出器のビーム軸方向断面図 [7]

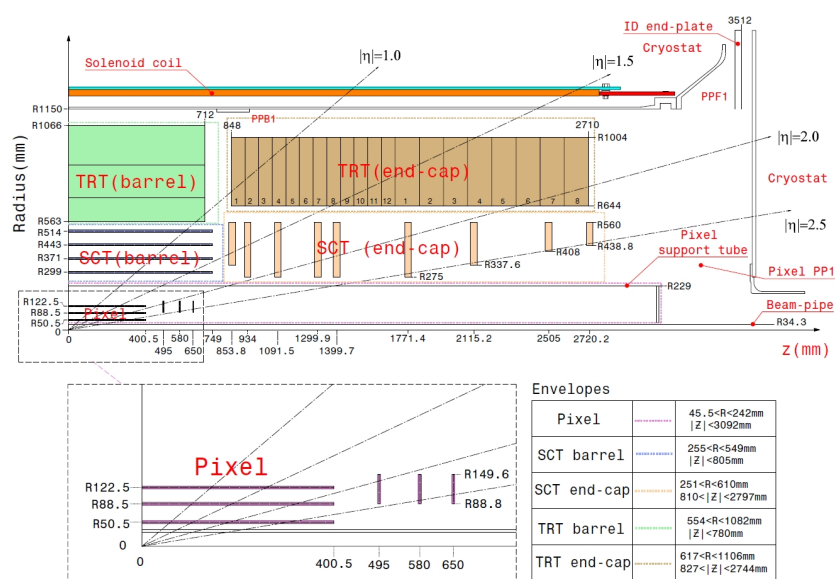


図 2.6 内部飛跡検出器の横方向断面図 [5]

IBL、Pixel、SCT は半導体シリコン検出器である。半導体シリコン検出器では、半導体中の空乏層を通過した荷電粒子によって生じる電子・正孔子が電場によって電極までドリフトされる。その信号を検出することにより荷電粒子の通過した位置を読み出す。

Insertable B-Layer (IBL) 検出器は内部飛跡検出器の最内層の検出器である。Si 検出器の中でも最内層に位置しており、高精度に位置情報を読み出す必要がある。各ピクセルにおいては η 、 ϕ について 2 次元の位置情報の読み出しが行われている。また、測定した電荷量がある閾値を越えていた時間 ToT (Time over Threshold) も記録される。ビームパイプと一体型で組み上げられており、ビーム軸から 3.3cm の距離に位置する。IBL の検出部分はセンサーモジュールが搭載された長方形のステープが円筒状に 14 枚によって構成されている。IBL 検出器にはプラナーセンサーと 3D センサーの 2 種類のモジュールが使用されており、ステープのビーム軸方向 75% の領域がプラナーモジュール、前後方の 25% が 3D モジュールである。図 2.7、図 2.7 に IBL プラナーモジュールの概観と IBL モジュール断面の概念図を示す。また、表 2.1 に IBL センサーの特性を示す。IBL は全体で 12M ピクセルとなっている。

表 2.1 IBL センサーの特性 [8]

	プラナー	3D
ピクセルサイズ (μm^2)	50 × 250	50 × 250
センサーサイズ (mm^2)	41.32 × 18.59	20.45 × 18.75
厚み (μm)	200	230
バルクの型	n 型	p 型

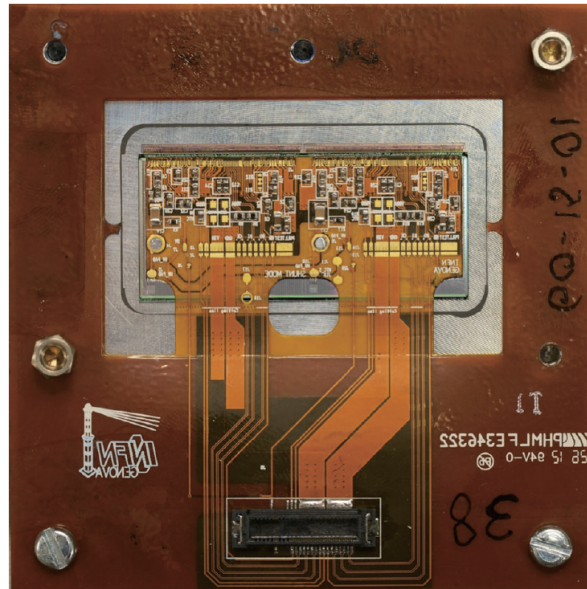


図 2.7 IBL モジュールの概観 [8]

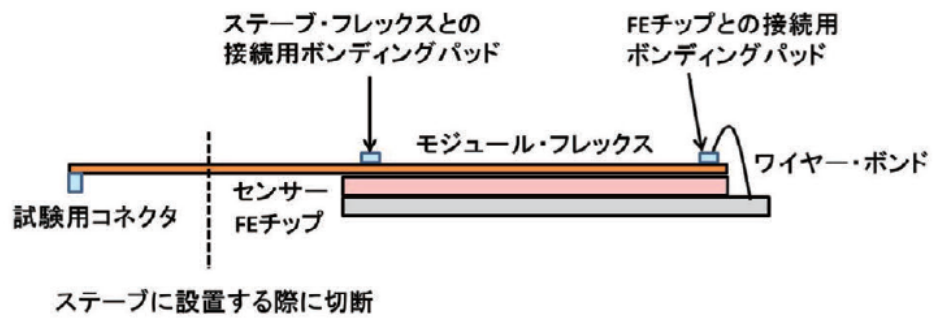


図 2.8 IBL モジュール断面の概念図 [8]

Pixel 検出器は、IBL の外側にある検出器である。Si 検出器の中でも内層部に位置しており、IBL と同様に高精度に位置情報を読み出す必要があり、2 次元の位置情報と ToT の読み出しが行われている。Pixel 検出器には全部で 1744 のモジュールがある。Pixel 検出器のモジュールはバレル領域に 3 層、2 つのエンドキャップ領域にディスク型で 3 層ずつ設置されており、80.4M チャンネルで 2 次元読み出しを行う。Pixel 検出器の基本的なパラメータを表 2.2 に示す。また、Pixel 検出器モジュールの構造を図 2.9 に示す。

表 2.2 Pixel 検出器の基本的なパラメータ [5]

Barrel	Radius(mm)	Staves	Modules	Pixels
Layer-0	50.5	22	286	13.2×10^6
Layer-1	88.5	38	496	22.8×10^6
Layer-2	122.5	52	676	31.2×10^6
End-cap	z(mm)	Sectors	Modules	Pixels
Disk 0	495	8	48	2.2×10^6
Disk 1	580	8	48	2.2×10^6
Disk 2	650	8	48	2.2×10^6
Barrel and both end-caps			1744	80.4×10^6

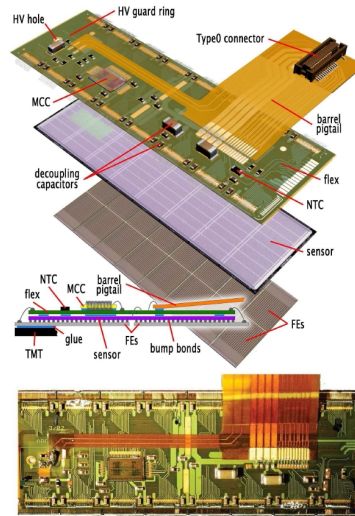


図 2.9 Pixel 検出器モジュール [5]

SCT 検出器はバレル領域に同軸円柱状に 4 層、2 つのエンドキャップにそれぞれディスク型に 9 層設けられており、合計 4088 のモジュールから成る。バレル領域の 2112 個の SCT モジュールには $80\mu\text{m}$ ピッチのマイクロストリップセンサーが使用されている。バレル領域の SCT モジュールの様子を図 2.10 に示す。バレル領域のモジュールは表・裏それぞれにセンサーを持っており、表と裏のモジュールは互いに $\pm 20\text{mrad}$ 回転して配置されている。それぞれのストリップセンサーは 1 次元読み出しであるが、このように表・裏でお互いをわずかにずらして配置することによって 2 次元的な情報読み出しを可能にしている。

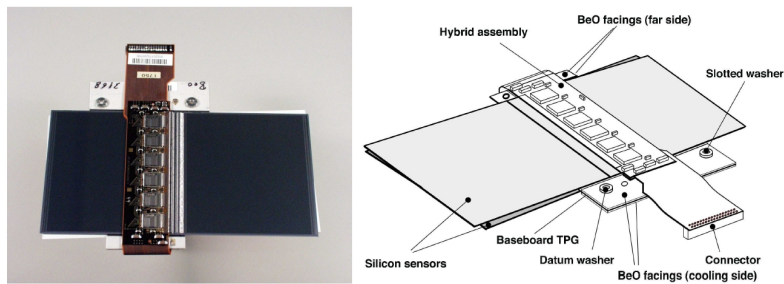


図 2.10 バレル領域の SCT モジュール [5]

TRT は遷移放射を利用した検出器である。TRT は直径 4mm のドリフトチューブから成り、チューブには Xe(70%)、CO₂(27%)、O₂(3%) の混合気体が詰められており、電子の同定などを行う。

2.2.3 カロリメータ

カロリメータでは通過した粒子のエネルギー測定を行う。ATLAS 検出器のカロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータから成る。ATLAS 検出器のカロリメータの全体像を図 2.11 に示す。

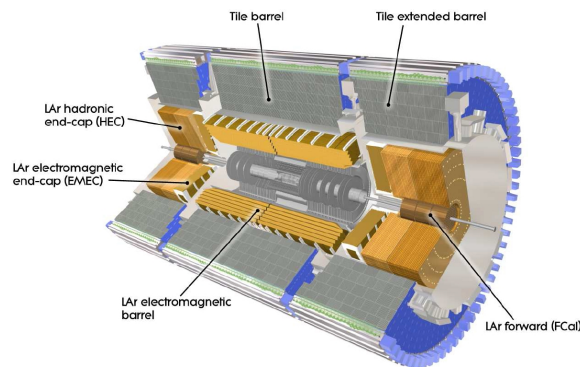


図 2.11 カロリメータの全体像 [5]

電磁カロリメータはアコーディオン型の鉛-液体アルゴンの検出器である。電磁カロリメータはバレル領域 ($|\eta| < 1.475$) に 1 つ、エンドキャップ領域 ($1.375 < |\eta| < 3.2$) にそれぞれ 1 つ存在する。

電磁カロリメータのエネルギー分解能は以下のとおりである。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \quad (2.2)$$

ハドロンカロリメータには、電磁カロリメータのちょうど外側にあるタイルカロリメータ、エンドキャップ電磁カロリメータの奥にあるハドロンエンドキャップカロリメータ (HEC)、エンドキャップ低温槽の中にあるフォワードカロリメータ (fCal) の3種が存在する。

タイルカロリメータと HEC のエネルギー分解能は以下のとおりである。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\% \quad (2.3)$$

また、fCal のエネルギー分解能は以下のとおりである。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{100\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\% \quad (2.4)$$

2.2.4 μ 粒子検出器

μ 粒子検出器は、他の検出器による測定にほとんどかかるとのことのない μ 粒子を検出する。 μ 粒子検出器は飛跡情報の測定を行う Monitored Drift Tube chambers(MDT)、Cathode-Strip Chambers (CSC) と、トリガーに使用される Resistive Plate Chambers (RPC) と Thin Gap Chambers (TGC) からなる。MDT は $|\eta| < 2.7$ の領域 (エンドキャップ領域最内層は $|\eta| < 2.0$) をカバーしている。MDT は3-8本のドリフトチューブで構成され、チューブ1本につき $80\mu\text{m}$ の分解能である。CSC は最内層のフォワード領域 ($2 < |\eta| < 2.7$) をカバーしている多線比例係数管である。これは、CSC が高レートに対応しており時間分解能が良いためである。MDT と CSC の情報はトリガーチャンバーによって補完される。 $|\eta| < 1.05$ のバレル領域を RPC が担当し、 $1.05 < |\eta| < 2.4$ のエンドキャップ領域を TGC が担当する。 μ 粒子検出器の構成を図 2.12 に示す。また、 μ 粒子検出器の基本的なパラメータを表 2.3 及び表 2.4 に示す。

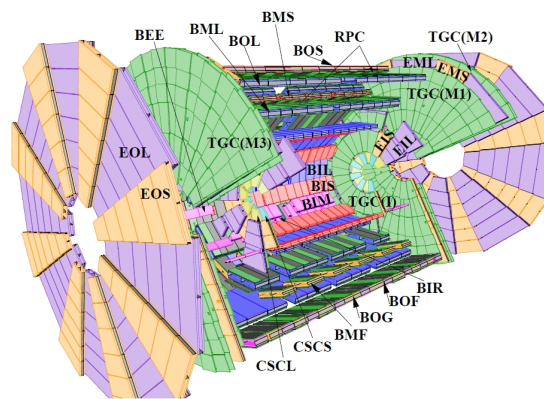


図 2.12 μ 粒子検出器 [5]

表 2.3 μ 粒子検出器の主要パラメータ [5]

Monitored drift tubes - Coverage - Numver of chambers - Number of channels - Function	MDT $ \eta < 2.7$ (innermost layer: $ \eta < 2.0$) 1088(1150) 339000(354000) Precision tracking
Cathode strip chambers - Coverage - Numver of chambers - Number of channels - Function	CSC $2.0 < \eta < 2.7$ 32 31000 Precision tracking
Resistive plate chambers - Coverage - Numver of chambers - Number of channels - Function	RPC $ \eta < 1.05$ 544(606) 359000(373000) Triggering, second coordinate
Monitored drift tubes - Coverage - Numver of chambers - Number of channels - Function	MDT $1.05 < \eta < 2.7$ (2.4 for triggering) 3588 318000 Triggering, second coordinate

表 2.4 μ 粒子検出器のサブシステムのパラメータ [5]

Type	Function	Chamber resolution (RMS) in			Measurements/track		Number of	
		z/R	Φ	time	barrel	end-cap	chambers	channels
MDT	tracking	$35\mu\text{m}(z)$	—	—	20	20	1088(1150)	339k(354k)
CSC	tracking	$40\mu\text{m}(R)$	5mm	7ns	—	4	32	30.7k
RPC	trigger	10mm(z)	10mm	1.5ns	6	—	544(606)	359k(373k)
TGC	trigger	2-6mm(R)	3-7mm	4ns	—	9	3588	318k

2.3 ATLAS トリガーシステム

検出器を用いて測定されたデータはデータ収集システム (DAQ:Data Acquisition) によって保存される。しかし、全ての事象を保存するには膨大なデータ量を保存することになるため DAQ の記録容量や処理能力の観点から現実的でない。そのためデータ取得の際には、興味のある事象のみについてデータを保存するためにトリガーシステムが用いられることが多い。ATLAS 実験でもトリガーシステムを用いている。

現行の ATLAS トリガーシステムは Level-1 Trigger と High Level Trigger (HLT) の 2 段階のトリガーから構成される。検出器から近い順に Level-1、HLT である。Level-1 トリガーは検出器に最も近く特に高速な処理が要求されるためハードウェアベースで構成されている。それに対して、HLT は汎用的な処理を可能とするためにソフトウェアベースである。現行の ATLAS トリガーシステムの構成を図 2.13 に示す。

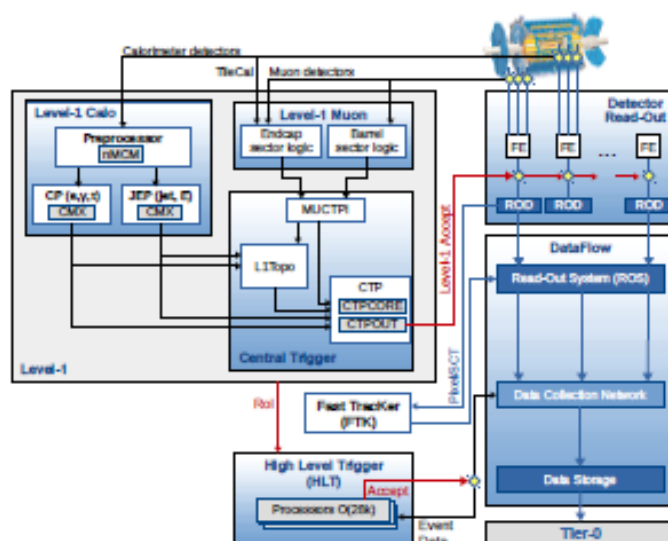


図 2.13 現行の ATLAS トリガーシステム [9]

Level-1 トリガーでは、大きな横運動量 P_T を持つ μ 粒子や、電子・光子、ジェット、ハドロン崩壊する τ 粒子を探して事象をトリガーする。また、大きな消失横エネルギー E_T^{miss} と大きな全横エネルギー E_T を持つ事象についてもトリガーする。Level-1 トリガーのアウトプットレートは $\sim 100\text{kHz}$ であり、バンチ衝突後 $2.5\mu\text{s}$ 以内の処理が要求される。また、Level-1 トリガーでは Regions-of-Interest (RoI) と呼ばれる、事象中にトリガーオブジェクトが存在すると推定される領域を定義する。HLT 以降のトリガーでは高度なアルゴリズムを使用して処理を行うため、全領域に対してのトリガー処理を行うことは処理時間・処理能力の観点から困難である。そのため、HLT 以降では RoI についてのみトリガー処理を行っている。HLT では、RoI をシードとしてトリガー処理を行う。HLT では RoI の粒子の座標、エネルギー、粒子の種類の情報などを用いて処理を行う。HLT のアウトプットレートは $\sim 1\text{kHz}$ である。

3 FTK

FTK は Fast TracKer の略であり、高速飛跡トリガーシステムとも呼ばれる。FTK は飛跡を高速で再構成するハードウェアシステムである。

3.1 FTK の導入目的

高輝度環境下での衝突粒子数増加による影響の抑制や、特徴的な飛跡を持つ粒子の同定などにおいて、粒子の飛跡情報は非常に有用な情報である。そのため、ATLAS トリガーシステムでも飛跡情報の算出を行っている。

現行の ATLAS トリガーシステムでは Level-1 トリガーを通過した事象に対して、Level-1 トリガーで定義された Region of Interest (RoI) についてのみの飛跡情報を算出している。さらに、飛跡情報の算出はソフトウェアベースである HLT にて多くの時間 ($\sim 100\text{ms}/\text{RoI}$) をかけて行われいるため、残りのトリガー処理時間には余裕が少ない。現行 ATLAS トリガーシステムの改善点として、RoI に対してのみの飛跡再構成であること、そして飛跡の再構成処理がトリガーシステムの処理時間を圧迫してしまっていることが挙げられる。

しかし、FTK を実装することによってこの両者を改善することができる。FTK は ATLAS トリガーシステムの Level-1 トリガーと HLT の間に挿入される。FTK 挿入後の ATLAS トリガーシステムを図 3.1 に示す。FTK は Level-1 トリガーを通過した事象の内部飛跡検出器からのヒット情報を入力として、横方向運動量 ($= P_T$) $> 1\text{GeV}/c$ の全飛跡情報を高速 ($\sim 100\mu\text{s}/\text{ev}$) に出力する。すなわち FTK を用いることによって、後段トリガーにおいて $P_T > 1\text{GeV}/c$ の全飛跡情報が早期に使用可能となる。これにより、従来のソフトウェアベースでの飛跡再構成に費やしていた時間をオフライン解析に近い、より洗練されたアルゴリズムに利用することが可能となる。

上記のとおり、FTK を実装することにより $P_T > 1\text{GeV}/c$ の全飛跡情報をトリガーシステムの早期に再構成することができ、後段のトリガーでの高度なアルゴリズムの使用が可能となる。これにより、粒子同定効率の改善や高輝度環境下での衝突粒子数増加による影響の抑制が見込まれる。

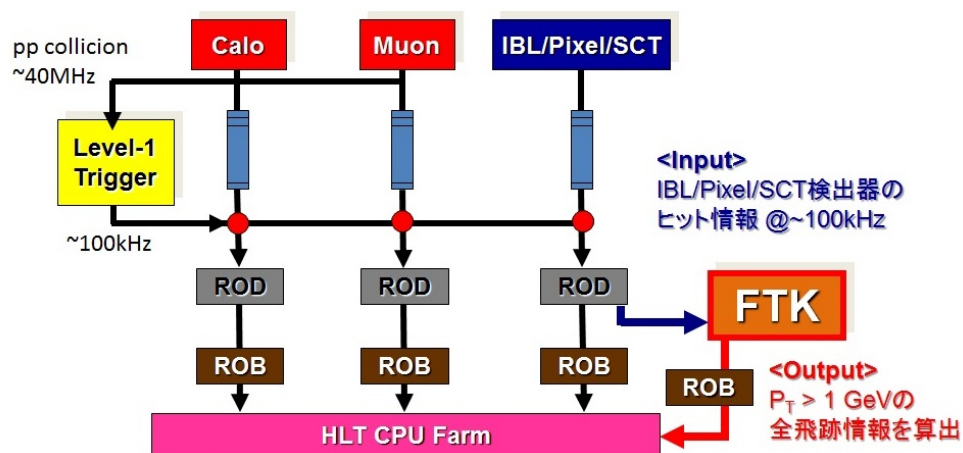


図 3.1 FTK 挿入後の ATLAS トリガーシステム [10]

3.2 FTK の動作原理

FTK の意義は粒子の全飛跡 ($P_T > 1\text{GeV}/c$) を HLT の前段階で高速に再構成できることにある。これを実現するため、高速に専用の処理が行えるハードウェアをベースとしている。この小節では高速動作のための工夫と飛跡再構成の動作原理について述べる。

FTK による処理は、大きく分けて 4 つのステップから成る。1 つ目はクラスタリング処理であり、内部飛跡検出器からの複数のヒットをまとめてクラスタを構成し、データ量を削減する。2 つ目は処理の並列化である。検出器の領域毎にクラスタを分配し、各処理ユニットにて処理を行う。3 つ目はパターンマッチングである。事前にモンテカルロサンプルを大量に使用して作成したパターンとヒットの組み合わせを照合することで飛跡らしいヒットの組み合わせを選定する。4 つ目は飛跡の線形近似である。飛跡の線形近似ではパターンと同様に事前にモンテカルロサンプルを大量に使用して作成した定数とマッチしたパターンのヒットの座標を使用する事で飛跡パラメータを算出し、飛跡を再構成する。FTK の動作原理の流れを図 3.2 に示す。FTK では、クラスタリング処理によるデータの削減、処理の並列化、2 段階の飛跡の線形近似、ハードウェアによる高速処理を行うことで高速な飛跡再構成を実現している。

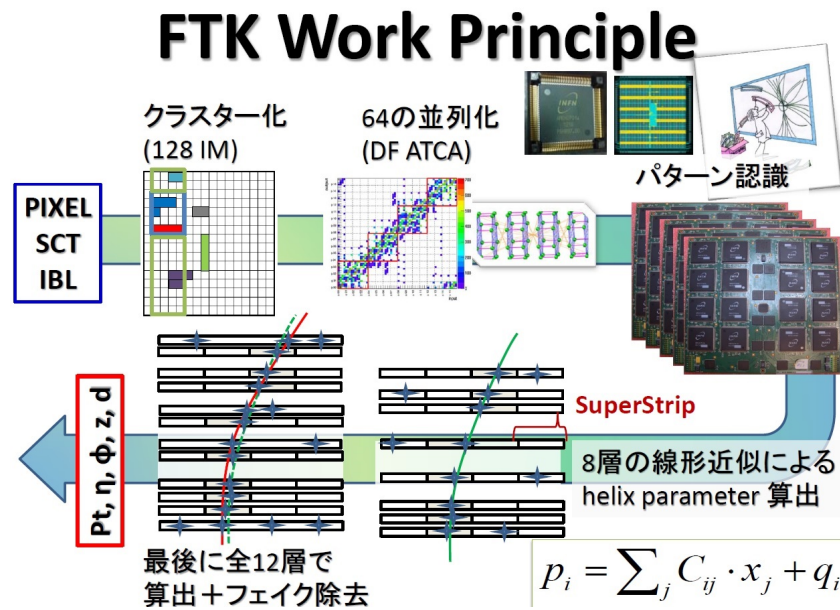


図 3.2 FTK の動作原理の流れ [11]

- クラスタリング処理

FTK は内部飛跡検出器からのヒット情報を受信後クラスタリング処理を行う。クラスタリング処理ではデータ量を削減し、またデータの形式を FTK 用のフォーマットに変更することで、FTK 後段での処理を行いやすくする。クラスタリング処理では内部飛跡検出器からの複数のヒット情報をまとめて 1 つのクラスタ情報へと変換する。複数のヒット一つ一つの位置情報から、クラスタの重心とクラスタのサイズを計算する。SCT 検出器は 1 次元のヒット情報を持つので ϕ 方向のみにクラスタ化を行い、ヒット情報をクラスタ重心とクラスタサイズに変換する。IBL/Pixel は 2 次元のヒット情報を持つので ϕ, η 方向に

ToT による重みづけを用いてクラスター化する。IM で行われるクラスター化アルゴリズムのイメージと例を図 3.3 に示す。例えば図 3.3 において、SCT ではクラスター重心 3.5、クラスターサイズ 4 である。

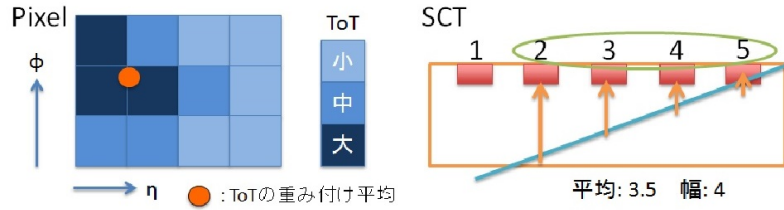


図 3.3 IM のクラスター化アルゴリズムのイメージと例 [12]

- 処理の並列化

クラスターはそれぞれの並列処理ユニットで処理される。内部飛跡検出器の領域を η 方向に 4 つ、 Φ 方向に 16 個の全 64 領域に分割し、それぞれの η - Φ タワーに対して並列で処理が行われる。FTK による内部飛跡検出器の領域分割を図 3.4 に示す。ここで η 方向と Φ 方向の領域にそれぞれ重複があるのは、 η 方向にはビーム衝突点の広がり (約 10cm)、 Φ 方向には磁場による荷電粒子の曲がり ($P_T=1\text{GeV}/c$ の荷電粒子で約 10°) が生ずるためである。これらを考慮して各領域の境目を通る粒子の飛跡も再構成するために重複領域が設けられている。各並列処理ユニットでは後述のパターンマッチング及び線形近似が行われる。

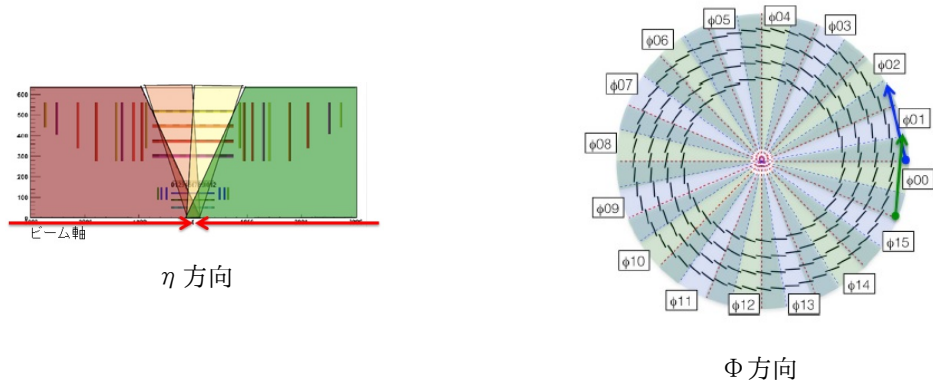


図 3.4 FTK による内部飛跡検出器の領域分割 [12][13]

- パターンマッチング

FTK はロードと呼ばれる荒い飛跡のパターンをあらかじめ保存しておき、ヒット情報がどのロードパターンと一致するかの判定を行う。ロードは各検出器層のスーパーstriップ (SS) の組み合わせから成り、シミュレーションを用いてロードのパターンを事前に用意する。SS とは、いくつかのstriップやピクセルの集合体であり、その SS 内にヒットしたstriップまたはピクセルがある場合にその SS をヒットした SS であるとみなす。このようにして、ヒットした SS の組み合わせによって飛跡のパターン認識が行われる。パターンにマッチし

たロードを保存し、その後マッチしたロード上の SS 内のクラスターの各組み合わせについて線形近似を行う。FTK による飛跡のパターン認識のイメージを図 3.5 に示す。

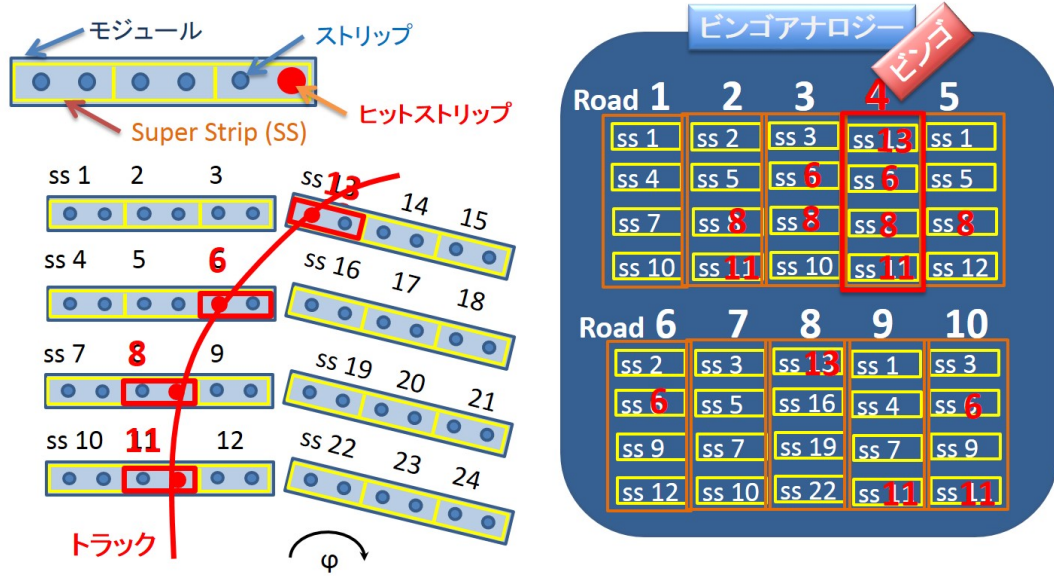


図 3.5 FTK の飛跡パターン認識のイメージ図 [10]

- 線形近似

線形近似は、8 層でのフィットと 12 層でのフィットの 2 段階で行われる。ロード情報とヒット情報を用いて χ^2 や飛跡の 5 helix パラメーター ($P_T, d_0, z_0, \eta, \phi$) を近似的に算出する。線形 1 次近似による飛跡パラメータ及び χ^2 の算出は以下の式のとおりである。

$$\tilde{p}_i = \sum_{l=1}^N C_{il} x_l + q_i \quad (3.1)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=1}^{11} S_{ij} x_j + h_i \right)^2 \quad (3.2)$$

ここで、 $\tilde{p}_i$ は観測される Track Parameter ($i=0 \sim 4$)、 N はヒット座標の数、 x_l, x_j は Hit 座標、 C_{il}, q_i, S_{ij}, h_i は各ロードの属するセクター毎に異なる定数項である。セクターとは、各層のモジュール毎の組み合わせである。 C_{il}, q_i, S_{ij}, h_i については事前に大量のモンテカルロを使って求めておく。

4 FTK シミュレーション

ATLAS のソフトウェア環境では athena と呼ばれるフレームワークが使用されている。FTK シミュレーションは FTK ハードウェアの処理をソフトウェアで模倣した、athena 環境で動作するツールである。本章では FTK シミュレーションの開発された目的や実装状況、現状の課題等を記す。

4.1 FTK シミュレーションの目的

FTK シミュレーションは FTK の性能評価や最適化のために開発され、使用されてきた。FTK シミュレーションを利用することで、ハードウェアなしでも FTK によって再構成される飛跡の再構成率や分解能を推測して評価をすることが可能である。以下にその一例としてオフラインに対する FTK の truth 飛跡に対する再構成率、オフライン飛跡に対する再構成率及び飛跡分解能のオフラインとの比較をそれぞれ図 4.1、図 4.2、図 4.3 にそれぞれ示す。

図 4.1 及び図 4.2 において縦軸は飛跡再構成率であり、横軸は粒子の各パラメータである。また黒は muon、赤は pion による truth 飛跡に対する飛跡再構成率である。図 4.1 において muon と pion では飛跡再構成率が異なり muon の方が高い飛跡再構成率となっている。これは、muon による検出器の物質との相互作用がほとんどないのに対し、pion は検出器の物質との相互作用を起こすからである。これにより、pion による hit が残されないことがあり、FTK のパターンマッチングでの inefficiency に繋がる。パラメータ依存に関しては、 p_T が高くなるほど再構成率は向上する。低い p_T の再構成には、曲率の大きな pattern を用意する必要があるためである。eta について、一部の領域で再構成率が低下しているが、これは検出器がかけている部分を含むためである。検出器の欠如はパターンマッチングでの inefficiency に繋がる。phi については領域毎の差は特にみられない。 d_0 、 z_0 については、中心から離れるにつれてわずかに再構成率が低下している。これは、用意しているパターンが特定のビームスポットを基準としているため、粒子の生成された場所が基準と大きくずれてしまうとパターンにマッチしなくなってしまうためである。

図 4.2 について、オフラインで再構成された飛跡に対しては、9 割以上を再構成出来ていることがわかる。また、muon、pion 共にオフライン飛跡に対しての飛跡再構成率は同程度の性能となっている。

図 4.3 において、FTK の飛跡分解能はオフラインの飛跡分解能よりもやや劣るが、同程度のオーダーであることがわかる。

上記のように FTK の性能を評価するうえで重要な FTK のシミュレーションは、シミュレーションサンプルを作成する際にも必要となる。作成したシミュレーションを利用して、実際に取得したデータと比較を行うことでデータの解析が可能となる。

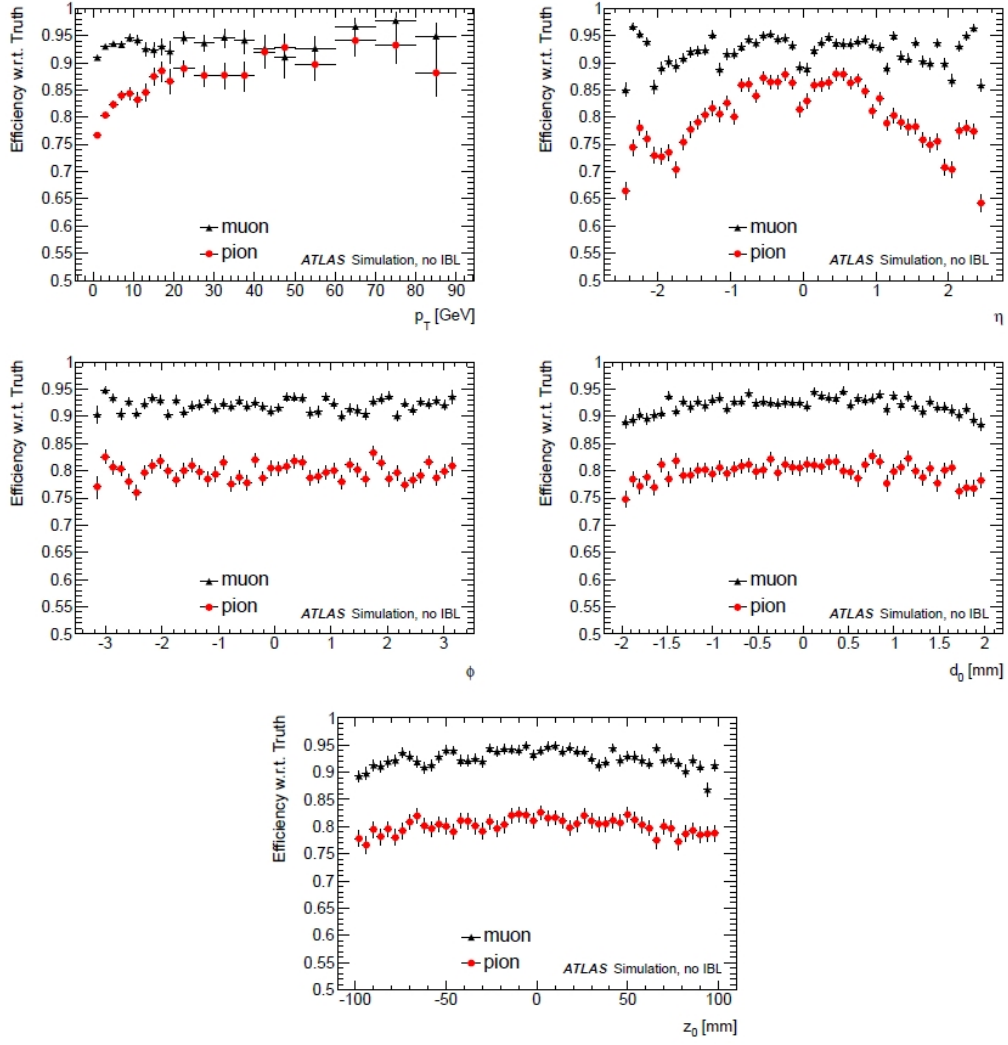


図 4.1 FTK の Truth 飛跡に対する飛跡再構成率 [13]

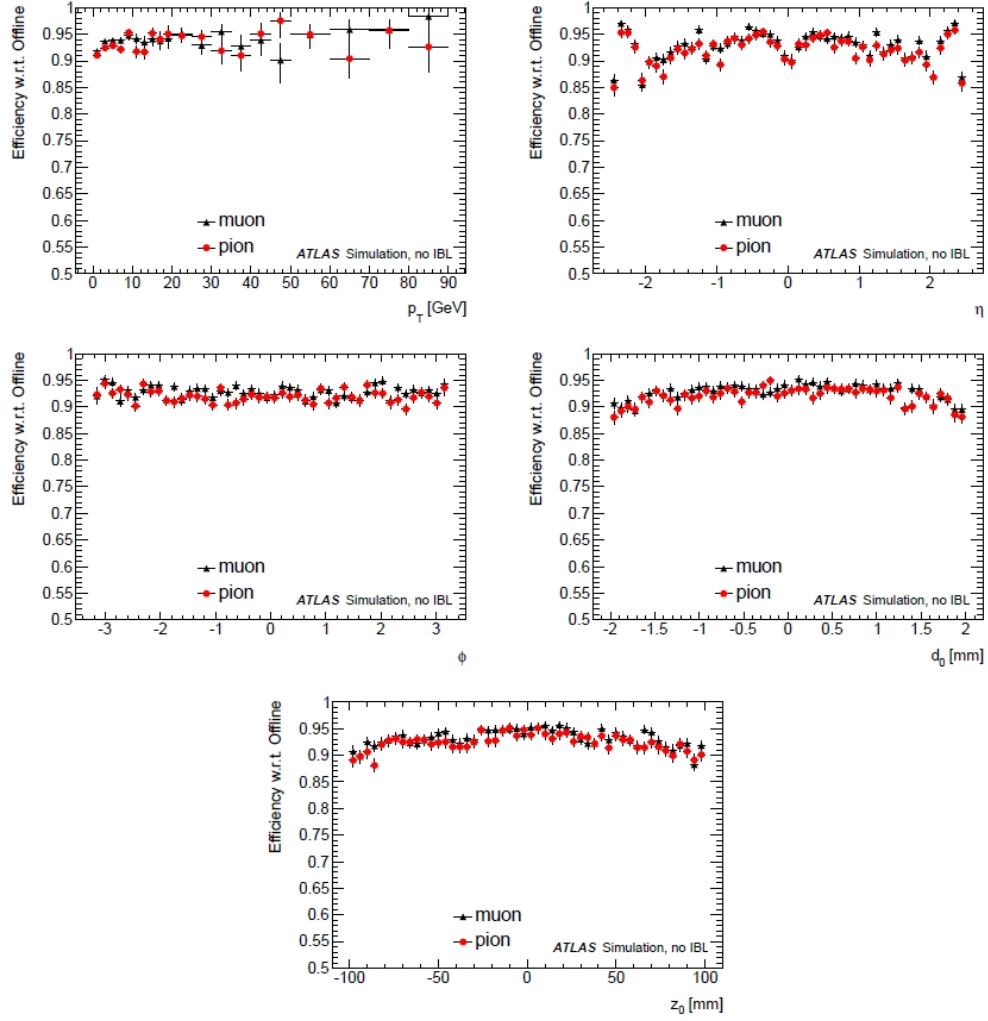


図 4.2 FTK の Offline 飛跡に対する飛跡再構成率 [13]

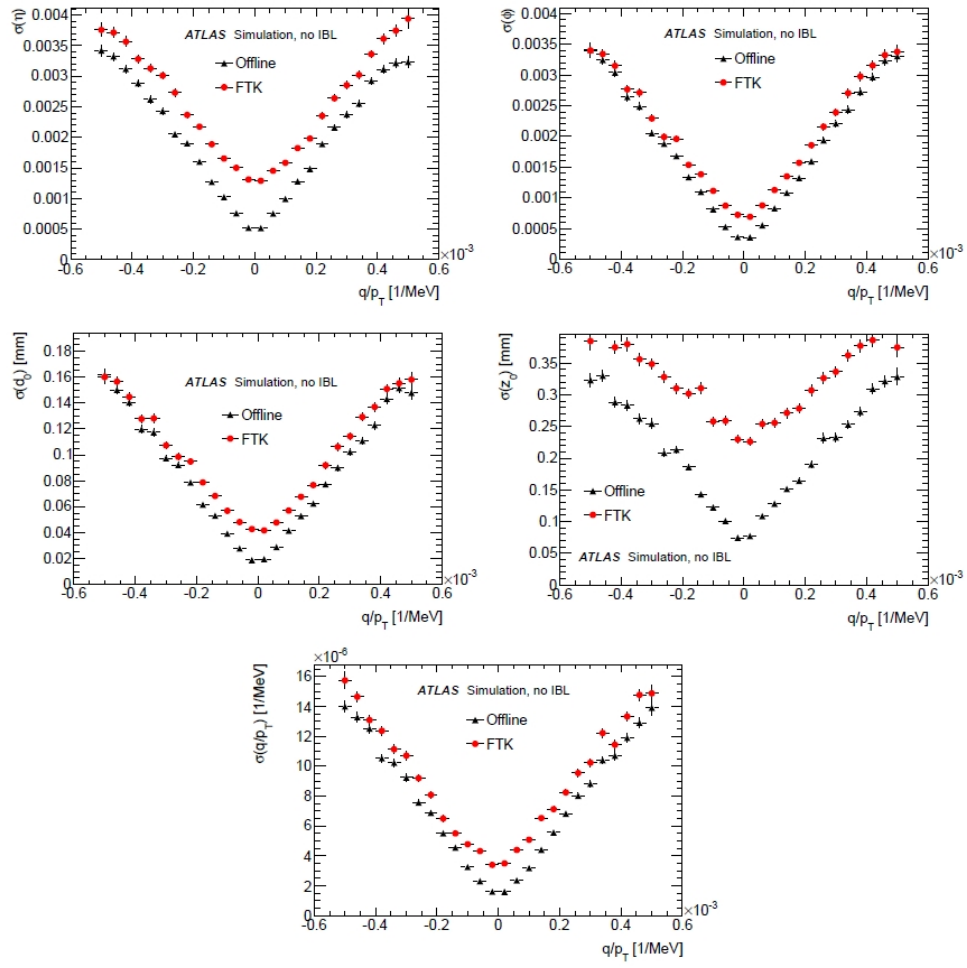


図 4.3 FTK 飛跡及び Offline 飛跡の Truth 飛跡に対する分解能 [13]

4.2 FTK シミュレーションの実装状況

現在のFTK シミュレーションは、Raw Data Object ファイルを入力としていくつかのステップを経て FTK によって再構成された飛跡をファイルに出力する。FTK シミュレーションの処理の流れを図 4.4 に示す。

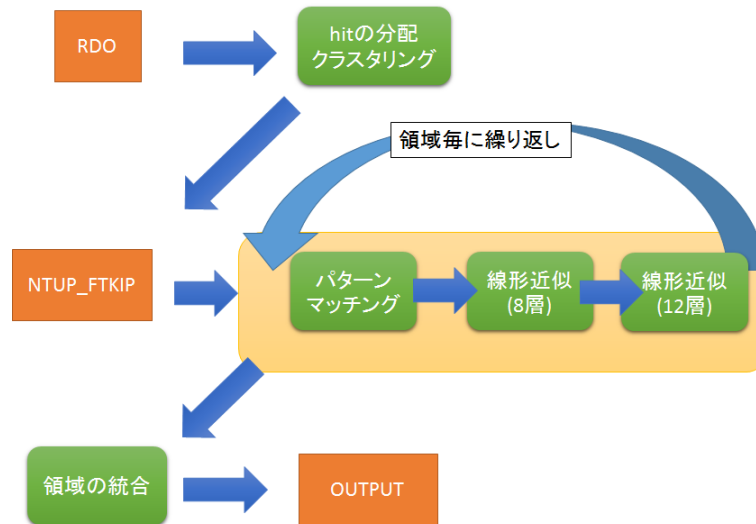


図 4.4 FTK シミュレーションの処理の流れ

RDO ファイルからヒットの情報を読み込み、各領域についてその領域に属するヒットをコピーすることで、検出器領域毎にヒットが保存された NTUP_FTKIP ファイルを作成する。その後、各領域毎について処理を行っていく。ただし、ソフトウェア環境であるため実機のように並列での処理ではなく直列での処理となる。各領域毎の処理はハードウェアと同様にパターンマッチングと線形近似である。パターンマッチングでは、8 層のヒット情報を使用して領域に属するヒットを SS に変換し、読み込んだパターン (ロード) と一致する SS の組み合わせを保存する。この際、一定数の層の不一致は認められる (基本的には 2 層)。その後、そのロードを含むセクターを検索し、対応するセクターの線形近似用の定数を用いることで 8 層における線形近似を行う。ここで、 χ^2 の値が十分な質に満たなかったものは除去される。また、同一の飛跡由来と考えられるロードも除去される。その後、残った飛跡について残りの 4 層を使用して 12 層による線形近似を行い、十分な質を持つ飛跡を保存する。これらの処理を全領域について繰り返した後、全領域分の飛跡を統合する。最後に同一の飛跡と考えられる飛跡を除去し、残った飛跡を保存・出力する。

4.3 FTK シミュレーションの課題

FTK シミュレーションの課題としては、1 事象の処理に時間がかかることが挙げられる。例えば ttbar 事象 (pile-up80) では 1 事象の処理に 1 分程度かかる。そのため、大量のイベントを処理するということが苦手分野となる。しかし、上述の通り FTK シミュレーションはシミュレーションサンプルを作成する際にも使用する必要がある。データとの比較を行うためには大量のシミュレーションサンプルを生成する必要があるため、現在の FTK シミュレーションの速度ですべての必要

なシミュレーションサンプルを作成することは困難である。従って、FTK シミュレーションを高速化するか、より高速な FTK シミュレーションを模倣したシミュレーションを作成する必要がある。

5 FTK Fast シミュレーション

FTK Fast シミュレーションは従来の FTK シミュレーション (full sim) を模倣した、より高速な FTK のシミュレーションである。本章では FTK Fast シミュレーション (fast sim) の開発について述べる。

5.1 FTK Fast シミュレーションの目標

本研究の目的は FTK を使用したデータ解析を可能にすることである。そのためには、取得したデータとの比較を行うためのシミュレーションサンプルを大量に作成する必要がある。しかし前述の通り、現在の FTK シミュレーションの課題は処理時間であり、より高速なシミュレーションを構築する必要がある。そのため、高速な FTK シミュレーションに求められる性能としては第一に処理時間が挙げられる。処理時間としては、現在の ATLAS 全体の再構成にかかる時間を考慮して、1 事象当たり 3 秒以内の処理時間が目標である。また処理時間だけでなく、full sim の性能を再現する必要がある。従って、飛跡再構成率及び飛跡分解能についても full sim の性能を考慮し、それぞれ飛跡再構成率について 1%、飛跡分解能について 5%以内のずれで full sim を再現することが目標となる。fast sim の目標を表 5.1 に示す。

表 5.1 FTK Fast シミュレーションの目標

目標	
処理時間	3 秒 / event
飛跡再構成率	full sim とのずれが 1%以内
飛跡分解能	full sim とのずれが 5%以内

5.2 FTK Fast シミュレーションの原理

高速な FTK シミュレーションを実現する手法は主に以下のようなものが提唱されている。

- truth-seeded

truth-seeded アルゴリズムは、シミュレーションレベルでのみ使用できる Truth の情報を使用する事でパターン認識を行うことなく飛跡を再構成する。これにより、時間のかかる処理を削減することで飛跡再構成の処理時間を削減する。

- Hybrid Approach

Hybrid Approach では truth-seeded と full sim を併用する手法である。この方法ではパイラルアップ事象等の重要でない事象に対しては truth-seeded を用い、重要な事象 (τ 粒子や b ジェットなど) に対しては full sim に近い方法で飛跡の再構成を行う。この方法では、RoI 等を用いて興味のある飛跡を選別しておく。それに対しては truth-seeded ではなく full sim のパターン認識を行う。

5.3 先行研究における FTK Fast シミュレーション

先行研究として、truth-seeded による非常に高速な FTK シミュレーションが仲松弥氏の 2014 年度修士論文「ATLAS 実験における FTK によるトリガーの改善とシミュレーションの高速化」にて研究されている。先行研究における手法では、truth の飛跡パラメータ (p_T , eta, phi, d_0 , z_0) から確率密度関数に応じて飛跡のパラメータを直接乱数で決定して飛跡を再構成する。確率密度関数は各パラメータによる分解能への影響やパラメータ同士の相関も考慮して算出される。FTK の飛跡再構成率、および飛跡分解能が truth の各飛跡パラメータに依存する事を利用した手法である。この手法ではまず、事前に full sim の結果を用いて飛跡再構成率を truth の各飛跡パラメータの関数として保存しておく。fast sim ではその関数を用いて、truth の飛跡パラメータに依存してある確率で飛跡を再構成するかどうか決定する。また飛跡分解能についても full sim を利用して truth の各飛跡パラメータに関する関数として保存しておく。そして fast sim において truth のパラメータからその関数に応じてパラメータを変化させた値を再構成される飛跡の飛跡パラメータとして使用する。先行研究の結果を図 5.1 に示す。青が full sim の結果であり、赤が fast sim の結果である。飛跡再構成率、飛跡分解能ともに full sim とよく一致している事がわかる。また、乱数によって直接飛跡パラメータを決定しているため、処理時間も十分に高速であり、single muon 事象に対して $30 \mu s / event$ である。しかし、乱数から飛跡パラメータを決定しているため、full sim との相関が全くなく、full sim によって再構成された飛跡パラメータと完全に一致する飛跡パラメータを持つ飛跡がない。またヒット情報を使用せずに truth 情報から飛跡を再構成するため、偽飛跡の再現が不可能であることが課題である。

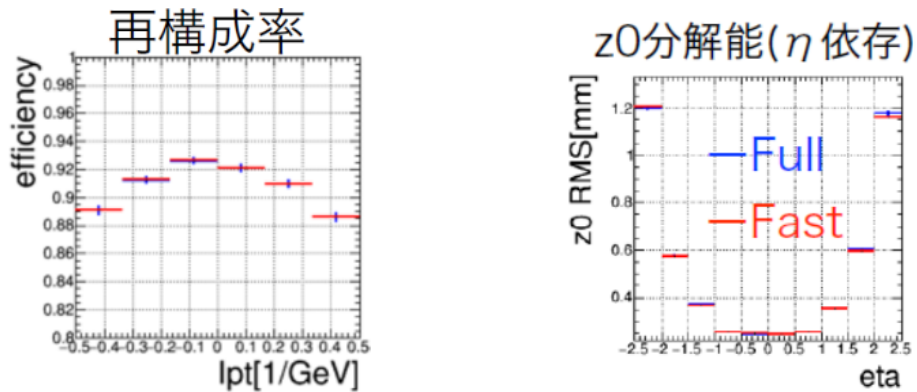


図 5.1 fast sim(先行研究) による飛跡再構成率及び飛跡分解能 [14]

5.4 本研究における FTK Fast シミュレーション

先行研究による手法では、性能としては十分なものの full sim との飛跡毎の相関や偽飛跡の再現などの課題が残る。そこで、本研究では truth-seeded による異なる手法として、truth 情報を使用した上でより実際のアルゴリズムに近い手法で fast sim の開発を行った。本研究で使用した手法では、ヒットの truth 情報を使用する。本来の処理では、ヒットがどの飛跡によるものかの判別がつかないため、飛跡らしいヒットの組み合わせを探すためにパターンマッチングが行われる。このパターンマッチの処理を truth 情報を使用した別の処理に置き換える。ヒットの truth 情報を使

用する事で、それぞれのヒットがどの truth 飛跡によるものなのかを判別する。そこで、それぞれの truth 飛跡についてヒットを結び付け、結び付けられたヒットの各層における全組み合わせについて線形近似を行う事で飛跡を再構成する。本研究における fast sim の処理の流れを図 5.2 に示す。本研究における fast sim では full sim と同一のアルゴリズムでクラスタリング処理を行う。その後、各 truth 飛跡について、その truth 飛跡起因のヒットを収集して truth 飛跡によるヒット群を構築する。truth 飛跡に起因するヒットのみを使用するため、パイルアップによるヒットやノイズによるヒットは除去される。その後各 truth 飛跡について、含まれるヒット全てを使用してセクターマッチングを行う。これは線形近似に使用する定数項はセクター毎に決まっているため、飛跡がどのセクターに所属するのかわからないと線形近似を行う事が出来ないためである。その後、マッチしたセクターについて、各層のヒットを使用して線形近似を行う。そして各 truth 飛跡について、最も質の良い飛跡をその truth 飛跡について再構成された飛跡として保存・出力する。この手法においてはヒット情報を使用しているため、将来的に偽飛跡の影響を加えることが可能である。また、full sim の飛跡再構成と同一の線形近似を使用しているため、選択したヒットが同一であれば full sim によって再構成された飛跡と同一の飛跡パラメータを持つ飛跡を再構成することも可能であり、飛跡毎の full sim との相関も再現可能である。

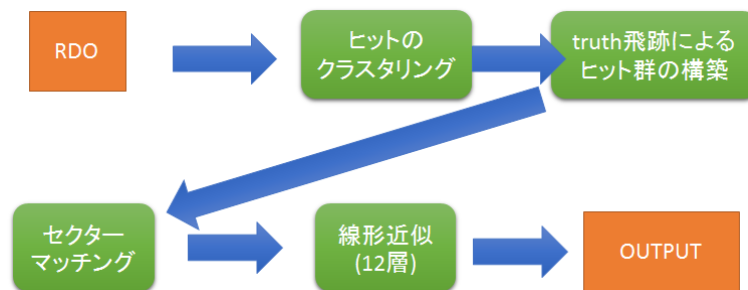


図 5.2 fast sim(本研究) の処理の流れ

5.5 FTK シミュレーションと FTK Fast シミュレーションの違い

full sim、fast sim(先行研究)、fast sim(本研究)における違いを図 5.3、表 5.2 にまとめた。full sim における処理ではパターン認識と線形近似を使用して飛跡を再構成するのに対し、先行研究における fast sim ではその両方の処理を行わずに truth の飛跡パラメータから直接飛跡を再構成する。また、本研究における fast sim ではその中間の速度の処理として truth 情報を用いるがヒット情報も用いることで、パターンマッチは省略するが線形近似は省略せずに飛跡再構成を行う。そのため、先行研究による fast sim では偽飛跡の飛跡が不可能であるのに対し、本研究における fast sim ではヒット情報を使用するため偽飛跡の影響を加えることが将来的に可能である。また、先行研究における fast sim では線形近似も省略するために飛跡毎の full sim との相関はないが、本研究における fast sim では線形近似を行うため飛跡毎に full sim との相関がある。

- full sim : 実機の動作をほぼ全て再現するが、処理時間が長い
 ■fast sim(先行研究) : 非常に高速だが、full simとの相関が全くなし
 ■fast sim(本研究) : 高速であり、full simとの相関もある

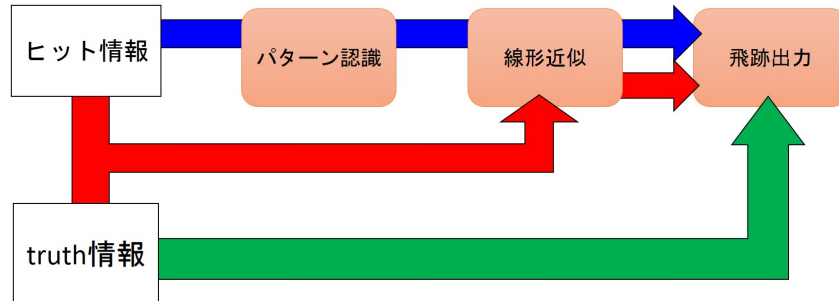


図 5.3 シミュレーション方法による違いの模式図

表 5.2 シミュレーション方法による違い

	full sim	fast sim(先行研究)	fast sim(本研究)
パターンマッチ	あり	なし	なし
線形近似	あり	なし	あり
full sim との飛跡の相関	-	なし	あり
偽飛跡の再構成	再構成される	再構成されない	将来的に再構成可能

5.6 FTK シミュレーションと FTK Fast シミュレーション (本研究) の性能比較

本研究において開発した fast sim は full sim と類似したアルゴリズムを使用しているが、処理の省略などが行われているためどの程度 full sim を再現できるか理解する必要がある。そこで本節では full sim と本研究において開発した fast sim のアルゴリズムによる飛跡再構成について性能比較を行う。

5.6.1 処理時間の評価

full sim と fast sim では処理のステップが異なる。そのため、処理時間としてどこまでを含むのか定義する必要がある。本研究では、処理時間の定義を「RDO ファイルからヒット情報を読み込み、再構成された飛跡情報をファイルに書き込み終わるまでの 1 事象あたりの処理に要する時間」とする。したがって、処理時間にはイベントを開始するまでのツールの初期化時間等は含まない。これは、大量のデータを処理する際には事象数による影響が支配的となるため、1 事象あたりの処理時間のみを評価する必要があるためである。single muon 事象では、full sim による処理に 269ms/event、fast sim による処理では 3ms/event の時間がかかった。また、ttbar 事象での処理時間を図 5.4 に示す。横軸は ttbar 事象の同事象に付随する平均パイルアップ数である。青は full sim の処理時間、赤は fast sim の処理時間である。full sim では pile-up の数に応じて急激に処理時間が増加しているが、fast sim では処理時間が線形程度にしか増加していないことがわかる。fast

sim では、ttbar pile-up80 の負荷の重い事象でも処理時間が 2.5 秒程度であった。従って、本研究における fast sim の処理時間に対する目標である 3 秒/event を達成することができた。

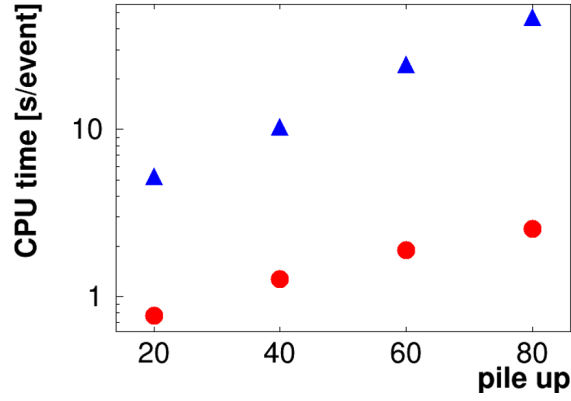


図 5.4 ttbar 事象の処理時間

5.6.2 飛跡再構成率と飛跡分解能

本節では fast sim(本研究) がどの程度 full sim の飛跡再構成率及び飛跡分解能を再現しているかどうか確認した。

- 使用サンプル

飛跡再構成率と飛跡分解能の比較において使用したサンプルは 10 万事象の single muon である。single muon 飛跡の生成領域を表 5.5、各パラメータ分布を図 5.5 にそれぞれ示す。図 5.5 の通り、サンプルの生成は飛跡生成領域についてフラットになるように生成されている。

表 5.3 muon 事象の飛跡生成領域

飛跡パラメータ	領域
P_T	$> 0.8, < 1000[GeV]$
$ \eta $	< 3.0
$ \phi $	$< \pi[\text{rad}]$
$ d_0 $	$< 2.2[\text{mm}]$
$ z_0 $	$< 120[\text{mm}]$

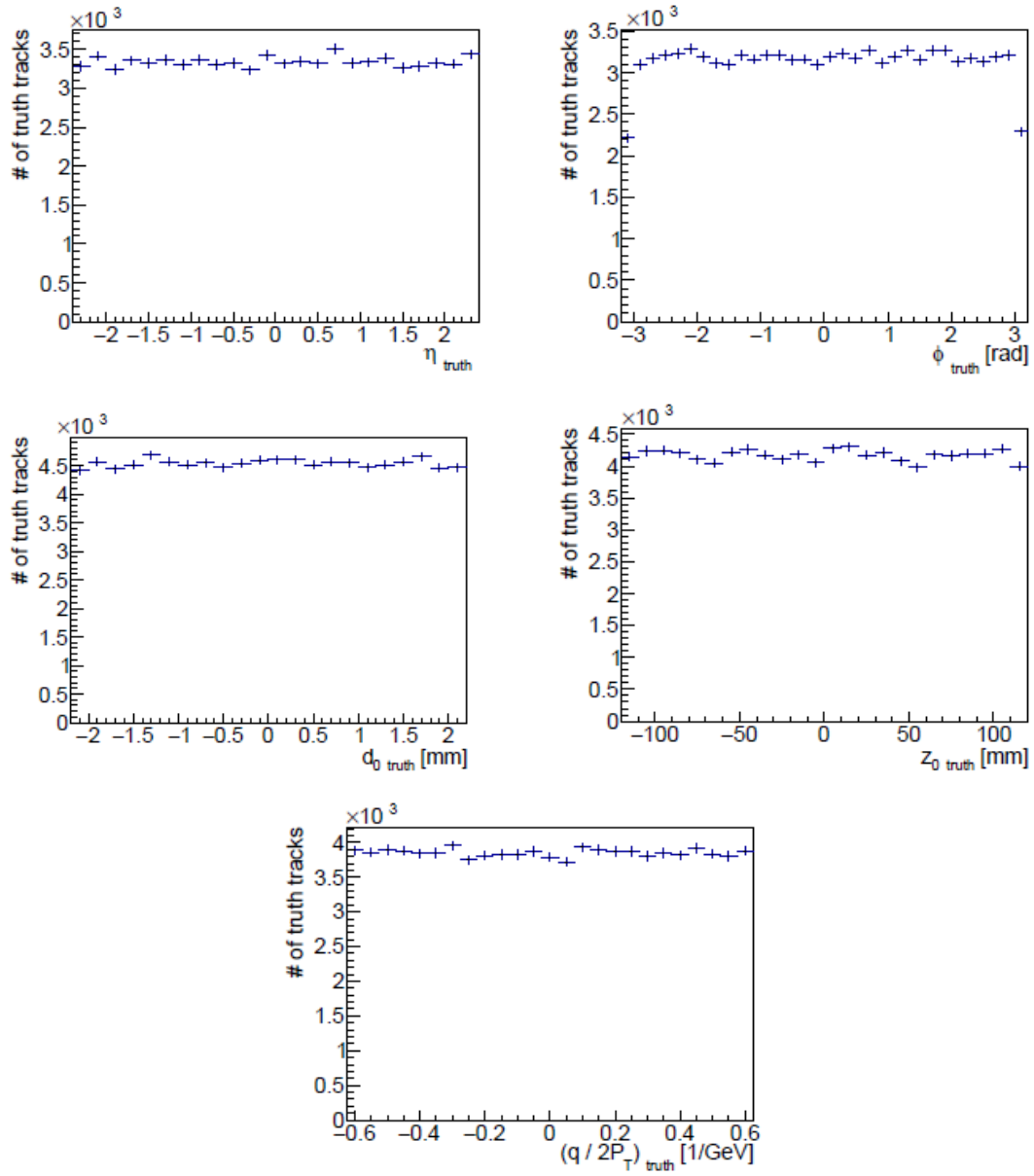


図 5.5muon 事象の飛跡生成領域

また、飛跡再構成率や飛跡分解能を算出するときには以下の条件を満たす truth 飛跡についてのみ使用した。使用した Cut を表 5.4 に示す。

表 5.4 truth 飛跡によるカット

飛跡パラメータ	領域
P_T	$> 1[GeV]$
$ \eta $	< 2.4
$ \phi $	$< 3.14[rad]$
$ d_0 $	$< 2.0[mm]$
$ z_0 $	$< 100[mm]$

- efficiency の比較

full sim 及び fast sim(本研究) において再構成された全飛跡のパラメータ分布を図 5.6 に示す。青は full sim、赤は fast sim によって再構成された飛跡である。縦軸は再構成された飛跡の数、横軸は再構成された飛跡のパラメータである。全体として fast sim の方が再構成されている飛跡の数が多い。これは、full sim でパターン inefficiency などによって落とされた飛跡についても fast sim であれば再構成出来るためである。また、full sim 飛跡の本研究における fast sim の飛跡に対する inefficiency を図 5.8 に示す。低 p_T 領域の飛跡の再構成数についても、fast sim の方が多い。これについても同様の理由で、曲率の低い低 p_T の飛跡は、特有のパターンにマッチする必要がある、パターンの inefficiency によって落とされる。次に、full sim 及び fast sim(本研究) の飛跡再構成率の truth 飛跡パラメータ依存を図 5.7 に示す。縦軸は飛跡の再構成率であり、横軸は一致した truth のパラメータである。全体的に fast sim の再構成率は fast sim よりも 5%程高く、要請に達していない。これは、上述の理由と同じである。また、full sim では d_0 、 z_0 について大きな値となるほど再構成率が低下している。これもパターンを生成する際に基準にしたビームスポットから粒子が大きくずれるに当たって、パターンによる inefficiency が発生するからだと考えられる。

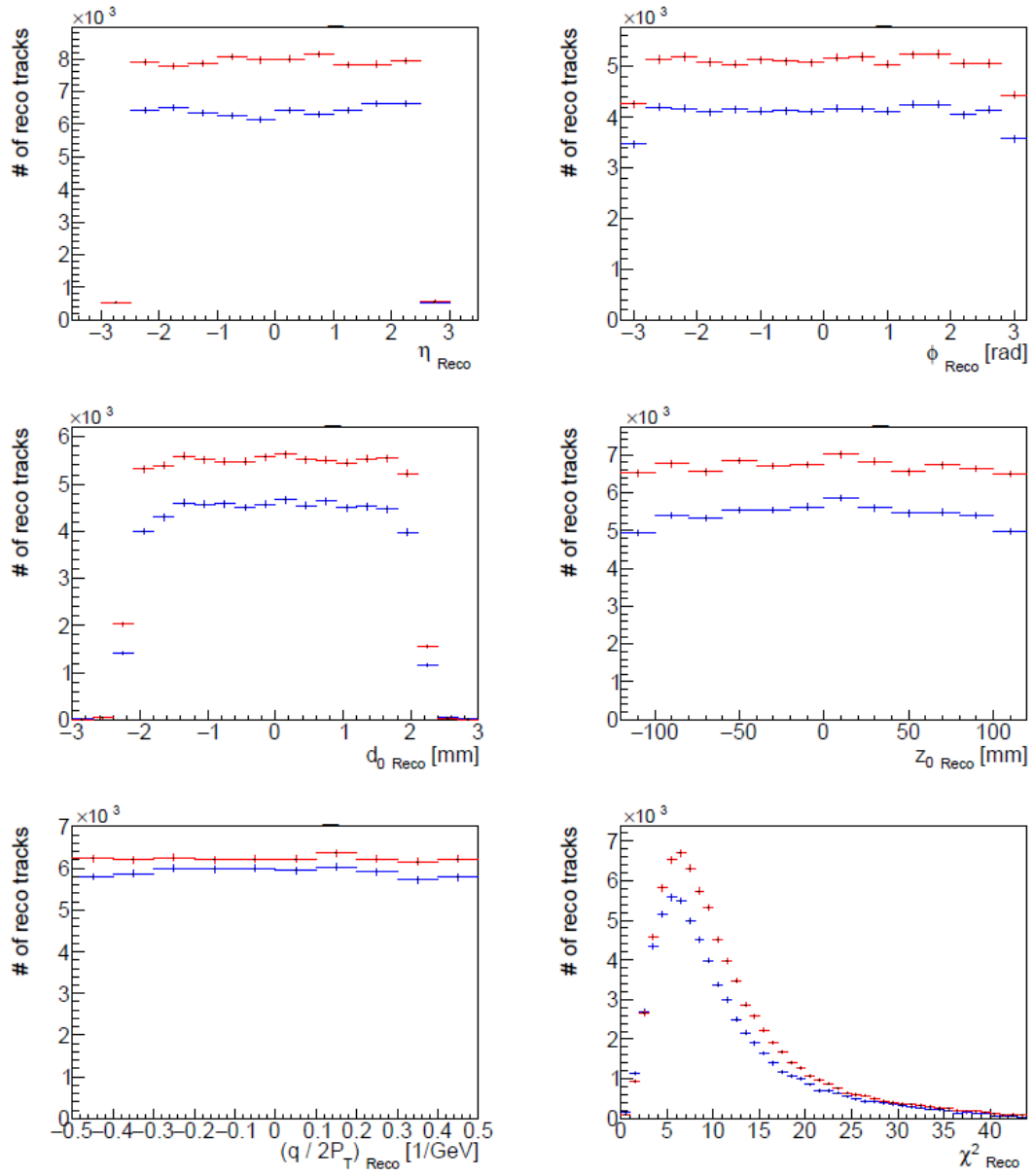


図 5.6再構成された全飛跡のパラメータ分布

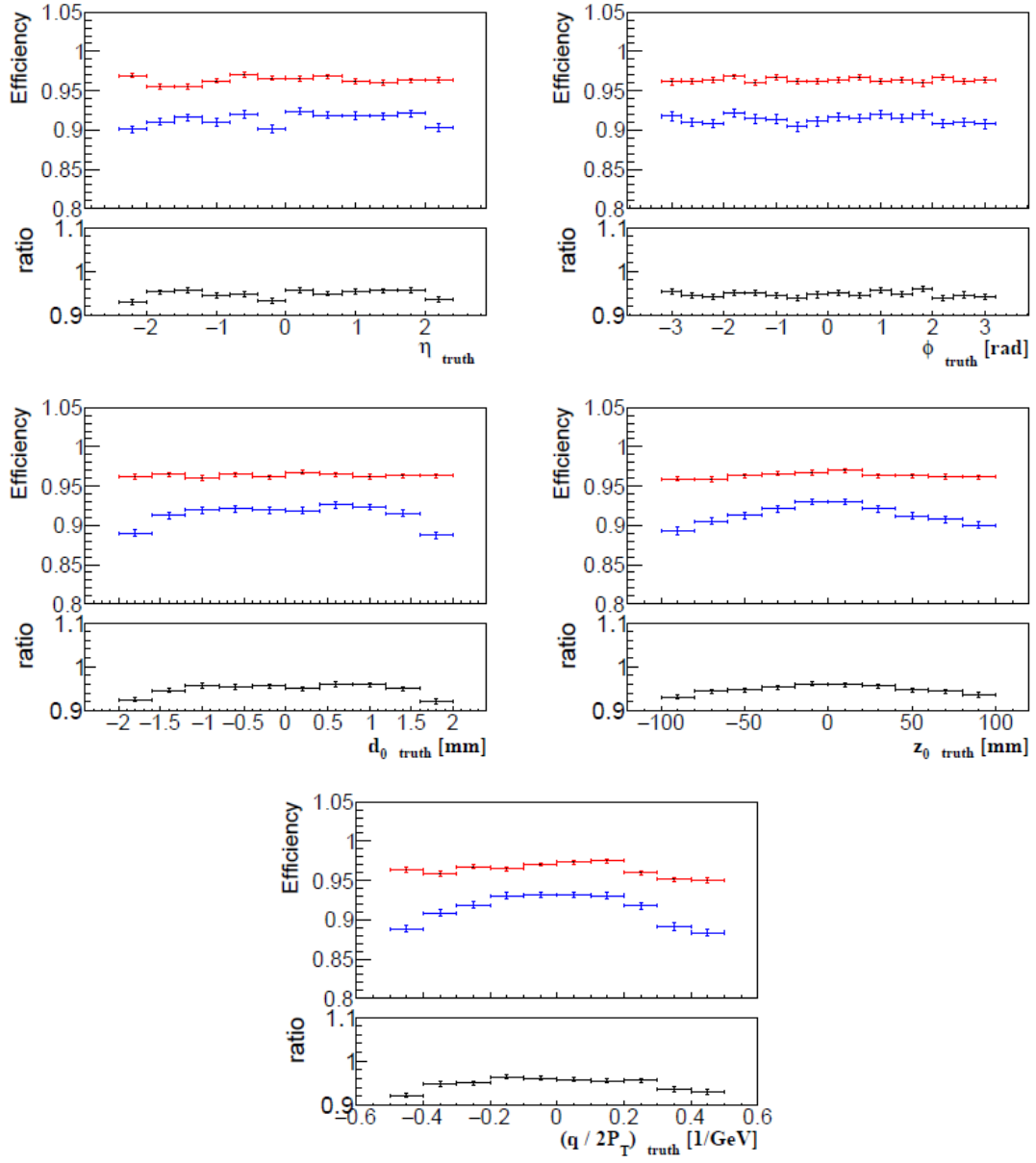


図 5.7 飛跡再構成率の飛跡パラメータ依存

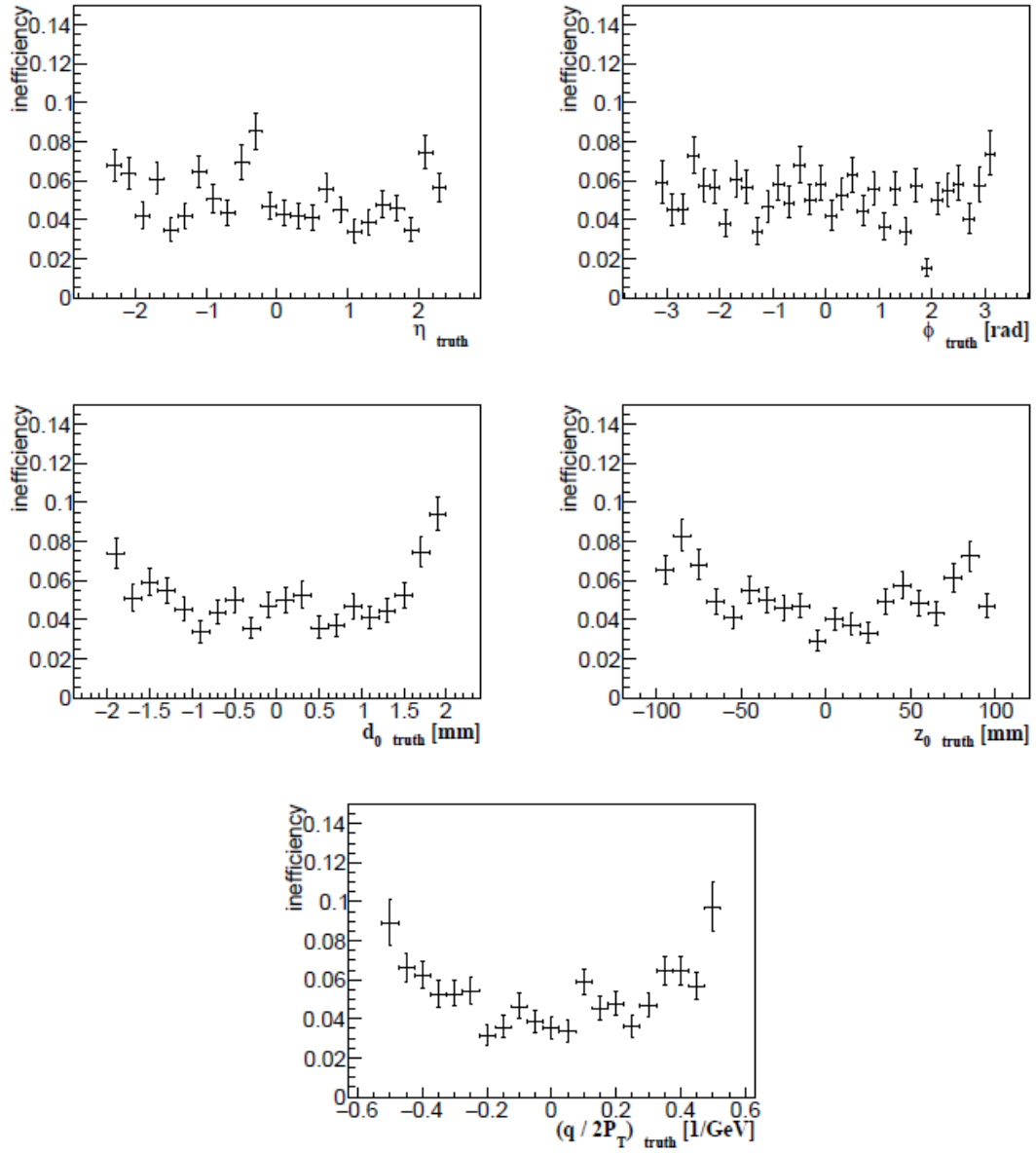


図 5.8 full sim 飛跡の fast sim 飛跡に対する inefficiency

- 分解能の比較

full sim 及び fast sim(本研究) において再構成された飛跡の分解能のパラメータ依存を図 5.9、図 5.10、図 5.11、図 5.12、図 5.13 にそれぞれ示す。青が full sim で、赤が fast sim の結果である。縦軸は、再構成された飛跡と一致した truth 飛跡とのパラメータの差の分布を mean から RMS の 3 倍の範囲で gauss フィットしたときの σ の値である。横軸は一致した truth 飛跡のパラメータである。図 5.9 及び図 5.10 から、飛跡分解能は粒子の曲率 (p_T) と eta に依存しており、曲率、eta が大きくなるほど悪くなっていくことがわかる。逆に、図 5.11、図 5.12、図 5.13 から飛跡分解能は phi、 d_0 、 z_0 に依存しないことがわかる。fast sim と full sim で比較すると、 p_T については fast sim と full sim は同程度の飛跡分解能を持つ。それ以外のパラメータ、特に d_0 や z_0 については fast sim の飛跡分解能の方が full sim よりも 10% 以上高く、要請を満たしていないことがわかる。

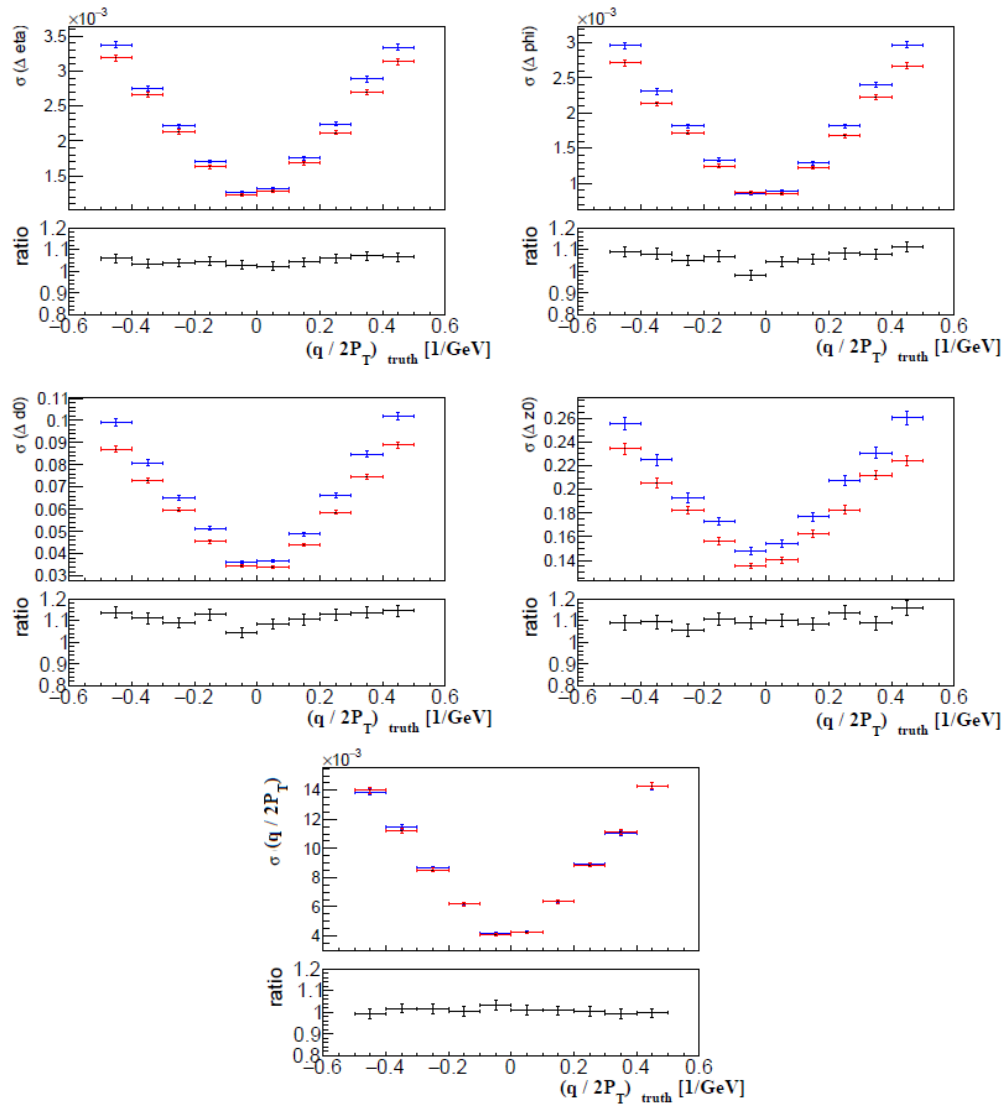


図 5.9 飛跡分解能の曲率依存

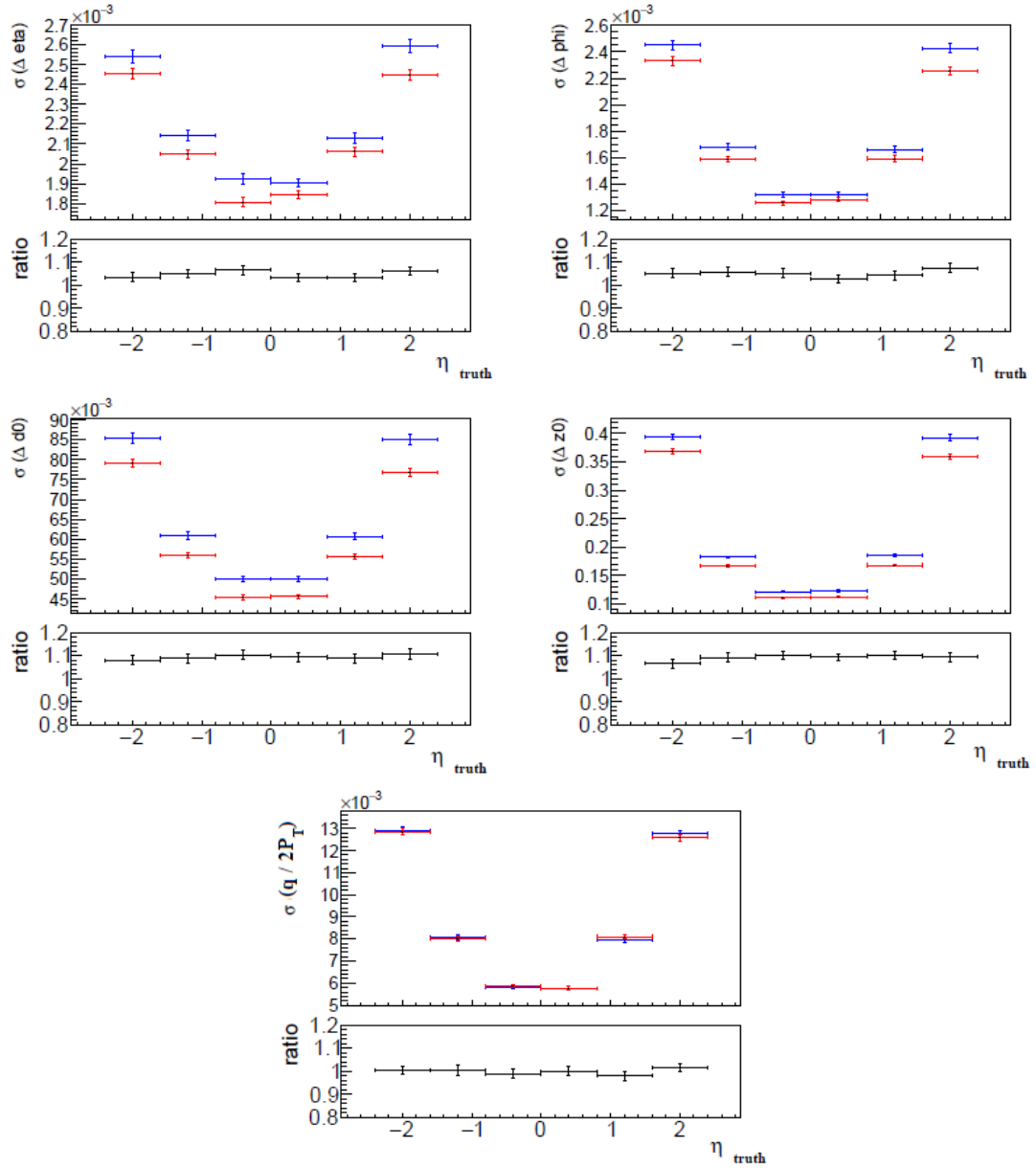
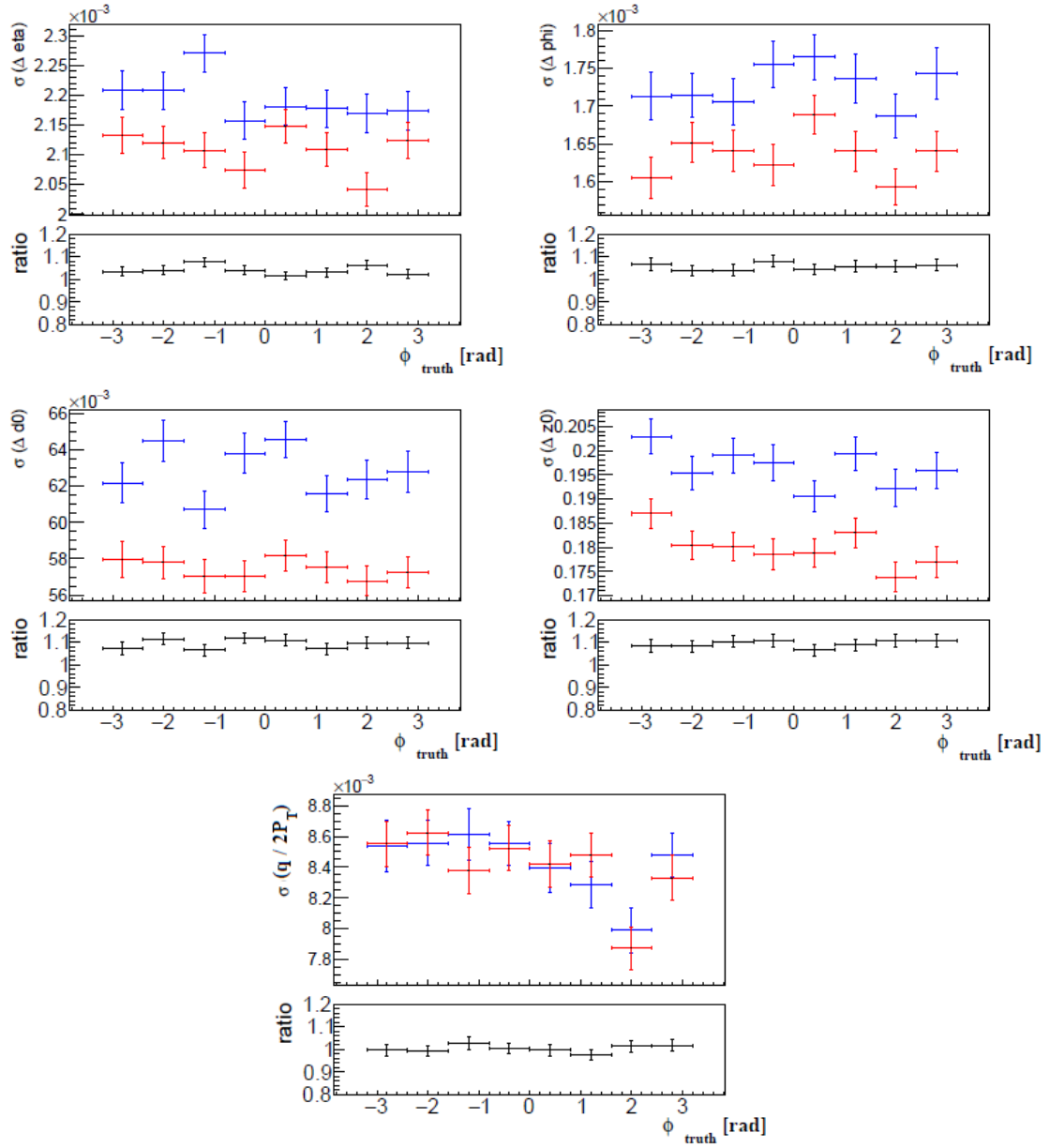
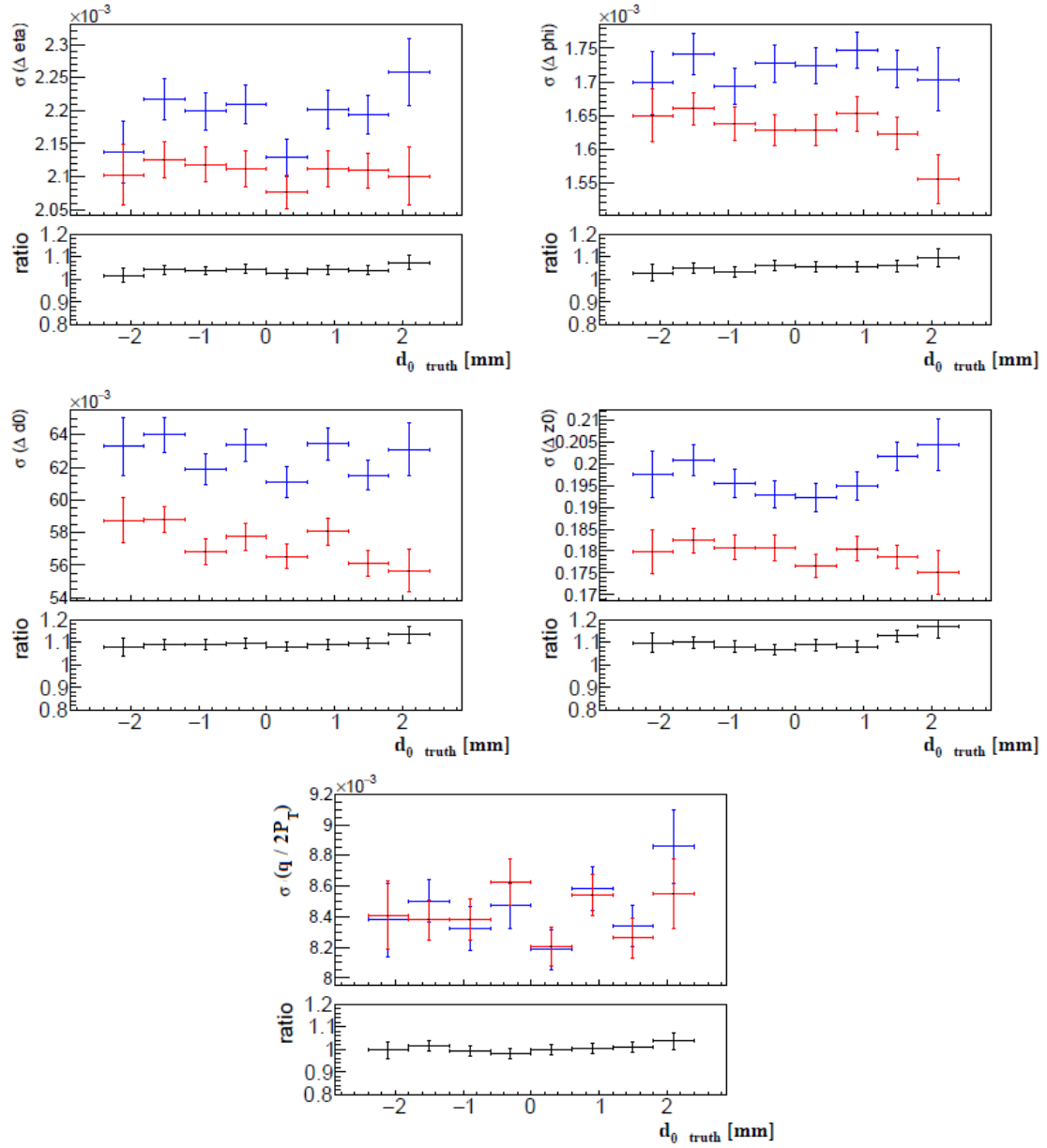
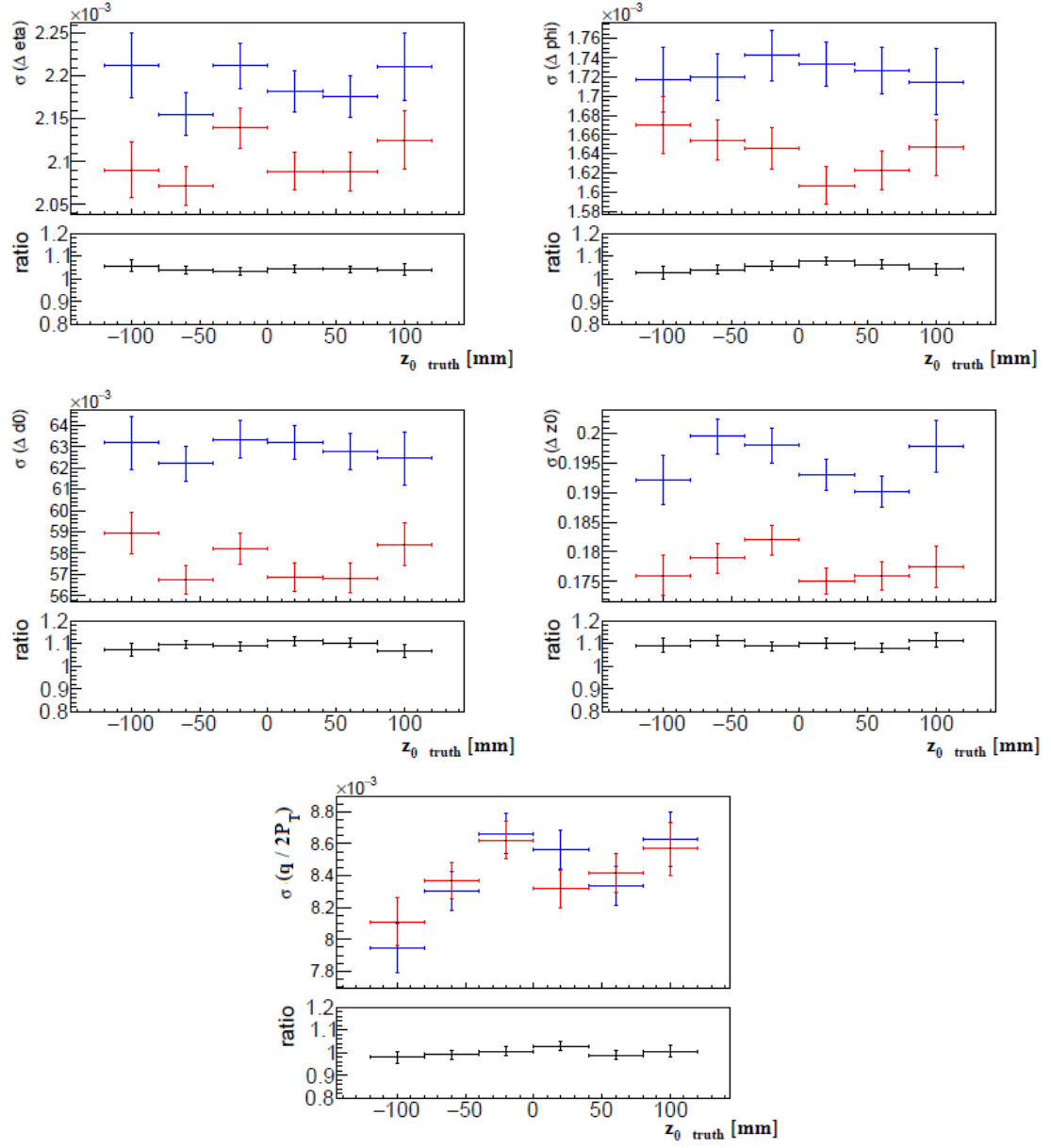


図 5.10 飛跡分解能の eta 依存

図 5.11 飛跡分解能の ϕ 依存

図 5.12 飛跡分解能の d_0 依存

図 5.13 飛跡分解能の z_0 依存

- full sim 及び fast sim における性能差に対する考察

上述の様に、飛跡再構成率、飛跡分解能共に fast sim の方が full sim より良く、それぞれ要請を満たしていない。したがって、fast sim への補正を考えていく必要がある。そこで、full sim と fast sim における違いについて考える。full sim ではパターンを使用してヒットを選択するため、モジュールにヒットは存在するがパターンには一致しない等の場合に inefficiency が発生する。そのため、fast sim では消失座標数が fast sim よりも多いことが予想される。full sim と fast sim における消失座標数の違いを表 5.5 及び図 5.14 に示す。ここでは full sim による飛跡と fast sim による飛跡の両方が存在するイベント（ノイズによる飛跡を除く）のみを考慮している。表 5.5 から、fast sim では約 85% の飛跡が消失座標数が 0 であるのに対して、full sim では約 50% の飛跡が座標を消失している。図 5.14 について、横軸は fast sim、縦軸は full sim における飛跡の消失座標数を表している。例として、左下の消失座標数 (0,0) の赤のビンではどちらの再構成方法による飛跡についても消失座標数が 0 であり、12 層全てのヒットを用いて線形近似が行われた飛跡である。これらの内、飛跡パラメータが full sim と fast sim で完全に一致していたものは、88% であった。それに対して、消失座標数 (0,2) の緑のビンでは fast sim による再構成では消失座標が無かったのに対し、full sim による再構成では消失座標が 2 つ生じており、パターンによってヒット選択の inefficiency が起きていることが予想される。また、表 5.5 及び図 5.14 から fast sim による飛跡の方が基本的には full sim による飛跡よりも消失座標数が少ないことがわかる。ここで、消失座標数 (2,1) のビンでのみ fast sim による飛跡の消失座標数が full sim による飛跡の消失層数を上回っている。これは、マジョリティリカバリーと呼ばれる特別な処理が行われたためである。

- － マジョリティリカバリー

マジョリティリカバリーでは消失座標数が 0 である飛跡候補に対して、飛跡の質が悪くて除去される場合には除去処理の前に、各層のヒットを消失座標として扱った場合の飛跡の質を考慮する。この時、どれかの層を消失座標とすることで一定以上の飛跡の質となった場合は飛跡を除去するのではなく、その層を消失座標として扱った飛跡が再構成される。

例えば full sim による消失座標数が 1、fast sim による消失座標数が 0 だった場合、このようなマジョリティリカバリーが fast sim において働いた時、消失座標として pixel 検出器の層が選択された場合に消失座標数が 2 となり、full sim よりも fast sim の方が消失座標数が大きくなる。

表 5.5 full sim と fast sim によって再構成された飛跡の消失座標数の関係とその比率

full sim \ fast sim	fast sim				
	0 座標	1 座標	2 座標	3 座標	4 座標
0 座標	48.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1 座標	10.3%	3.6%	0.1%	0.0%	0.0%
2 座標	24.4%	0.7%	5.7%	0.0%	0.0%
3 座標	2.1%	0.9%	0.2%	0.1%	0.0%
4 座標	2.0%	0.1%	1.3%	0.0%	0.1%

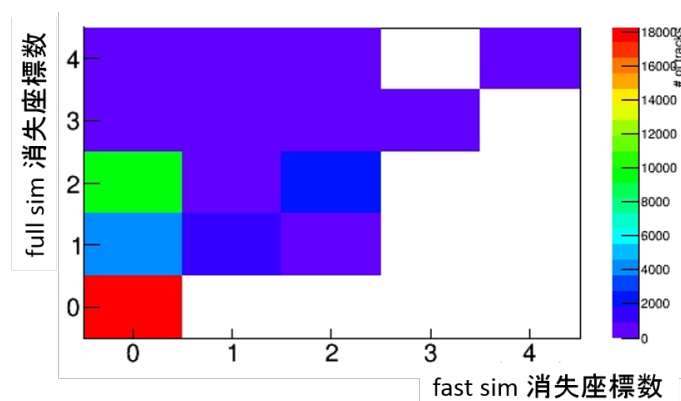


図 5.14 fast sim と full sim における消失座標数の違い

FTK では線形近似における消失層のヒット座標は推測して補い線形近似を行うことで飛跡の再構成を行う。従って、消失座標数が多いほど実際のヒットとは異なる座標が線形近似に使用される。これは飛跡の質を低下させる原因となる。そのため、消失層数による影響を調べる必要がある。そこで、full sim における飛跡の消失座標数と飛跡分解能の関係を確認した。図 5.15、図 5.16 に full sim における飛跡の消失座標数と飛跡分解能の η 、曲率依存の関係をそれぞれ示す。縦軸は各飛跡パラメータの分解能であり、横軸は truth のパラメータである。また、青、赤、黒、緑の順で飛跡の消失層数が 0、1、2、3 の場合である。図 5.15、図 5.16 において、ほとんどのパラメータについては、消失座標数 0 と 1 で同程度の分解能、消失座標数が 2 以上で分解能が大きく低下していることがわかる。ただし、消失座標数 3 の場合には飛跡数が少ないために誤差が大きくなってしまっている。また、曲率の分解能に関しては他のパラメータとは異なる挙動となっており、 η 依存に関しては消失座標が存在する場合には消失座標数が 0 の場合よりも分解能が高くなっている。また、曲率依存に関しては消失座標による影響は見られない。曲率の分解能の振る舞いに関しては詳しい原因が分かっておらず、今後より詳細に理解していく必要がある。

また以上の結果から、full sim と fast sim における消失座標の違いが飛跡分解能の差に影響を与えていると予測できる。

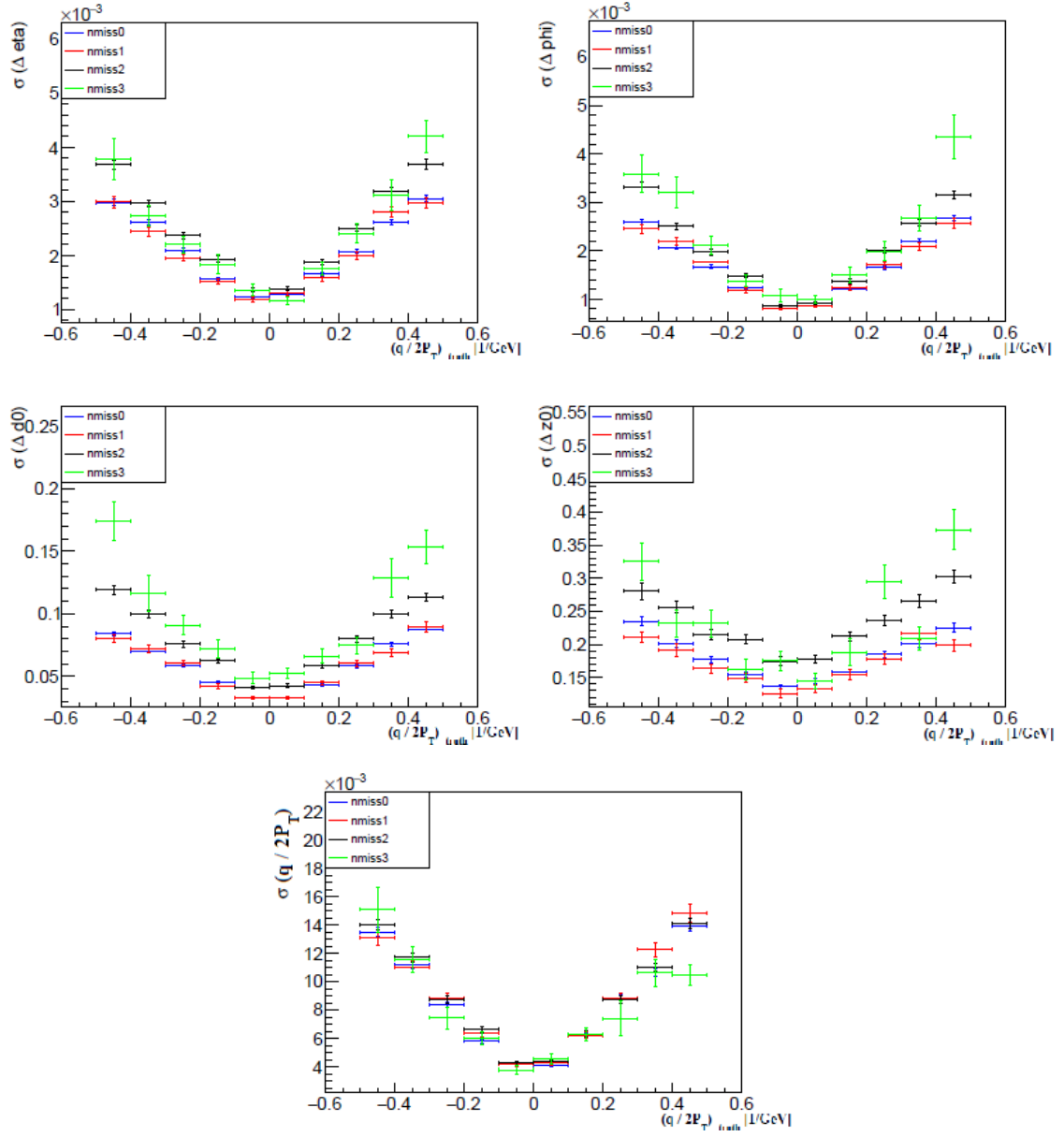


図 5.15full sim における飛跡の消失座標数と飛跡の曲率依存の関係

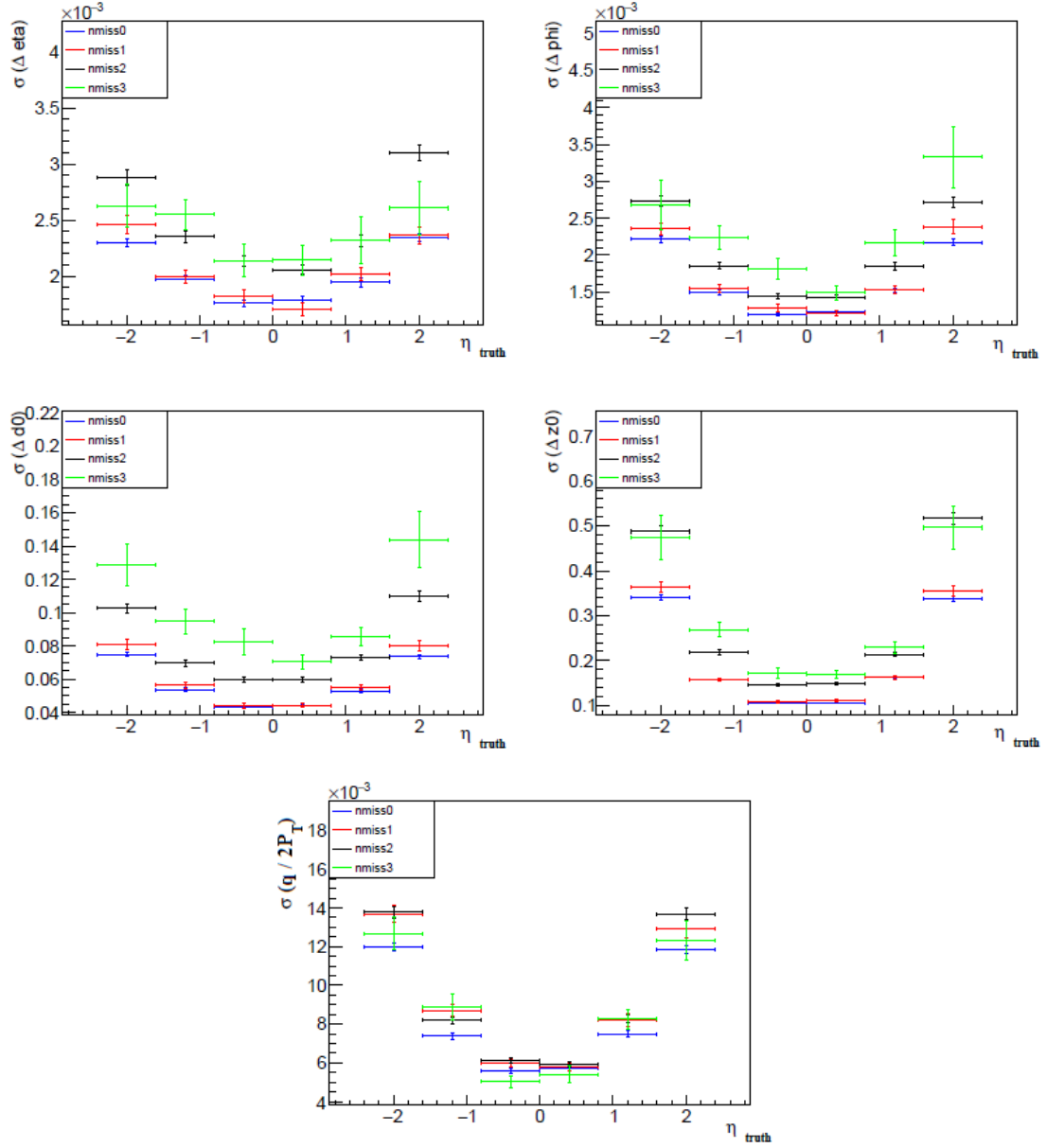


図 5.16 full sim における飛跡の消失座標数と飛跡分解能の eta 分解能依存の関係

5.7 FTK Fast シミュレーション (本研究) に対する再構成率及び分解能の補正

上記の結果をもとにして、本研究では補正方法の一つとして fast sim において消失座標数に対する補正を加えた。用いた補正方法のイメージ図を図 5.17 に示す。fast sim において 1 つの truth に対して再構成された飛跡の候補群について考える。この時飛跡候補を消失座標数毎に分類する。ここで、最も消失座標数の少ない飛跡の消失座標数に依存して、図 5.14 に対応した確率密度関数に応じて、再構成される飛跡の消失座標数を決定する。その後、決定した消失座標数を持つ飛跡候補群の中から最も飛跡の質が良いものをこの truth 飛跡に対して再構成される飛跡とする。



図 5.17 補正方法のイメージ

上記の補正を加えた後の飛跡再構成率を図 5.18 に示す。補正を加えることによって、fast sim は full sim の飛跡の再構成率を 3%以内で再現することができた。また、全体の飛跡再構成率としては full sim が 91.3%であり、補正前の fast sim が 96.3%であったのに対し、補正後には 90.8%となった。飛跡再構成率の減少は、消失座標の増加による飛跡の質の低下により、飛跡の質のカットによって飛跡が除去されたことが原因と考えられる。しかし、飛跡の質のカットにより full sim と同程度の再構成率になる程に飛跡が除去される原理はない。したがって、今回の飛跡再構成率の減少具合については今後詳細に調べていく必要がある。

次に補正後の飛跡分解能を図 5.19、図 5.20、図 5.21、図 5.22、図 5.23 に示す。fast sim は補正前より全てのパラメータの飛跡分解能について悪化させることに成功していることがわかる。また、全てのパラメータの飛跡分解能について約 10%以内のずれで fast sim は full sim を再現できている。eta,phi の分解能に関して、ずれの大きさとしては補正前と大きく差はないが、特に d_0, z_0 の分解能については補正前と比較してずれが大きく減少している。これは、消失座標数の補正により、 d_0 や z_0 の分解能悪化の原因となる消失座標の多い飛跡が増加したためである。しかし、曲率の分解能に関しては今回の補正によってずれが悪化している。これは、補正前の曲率の分解能が full sim と fast sim がよく一致していたためであると考えられる。以上の結果から、fast sim は要請を満たしてはいないが、単純な補正によって full sim の飛跡再構成率及び飛跡分解能をリーズナブルに再現することができた。

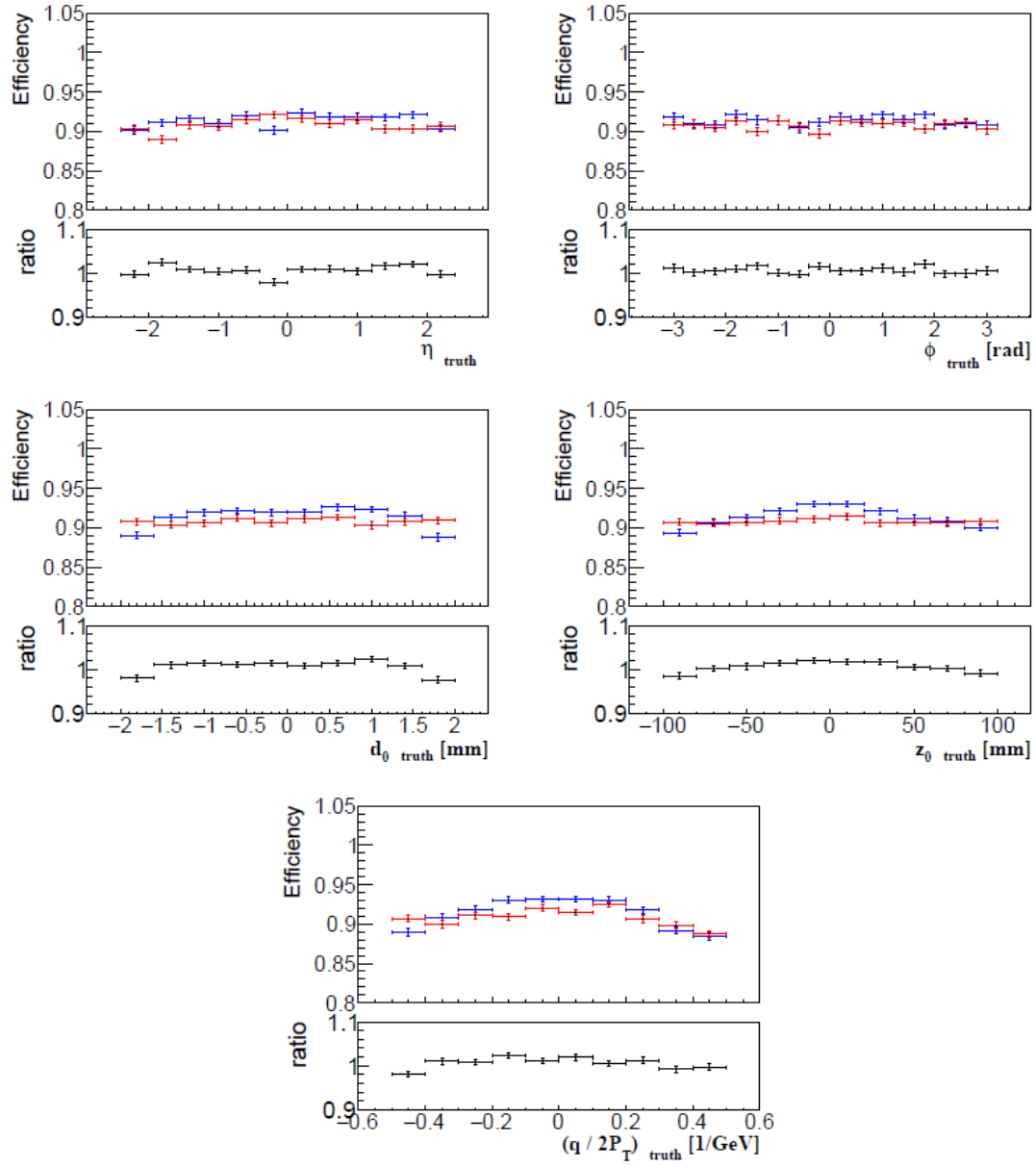


図 5.18補正後の飛跡再構成率

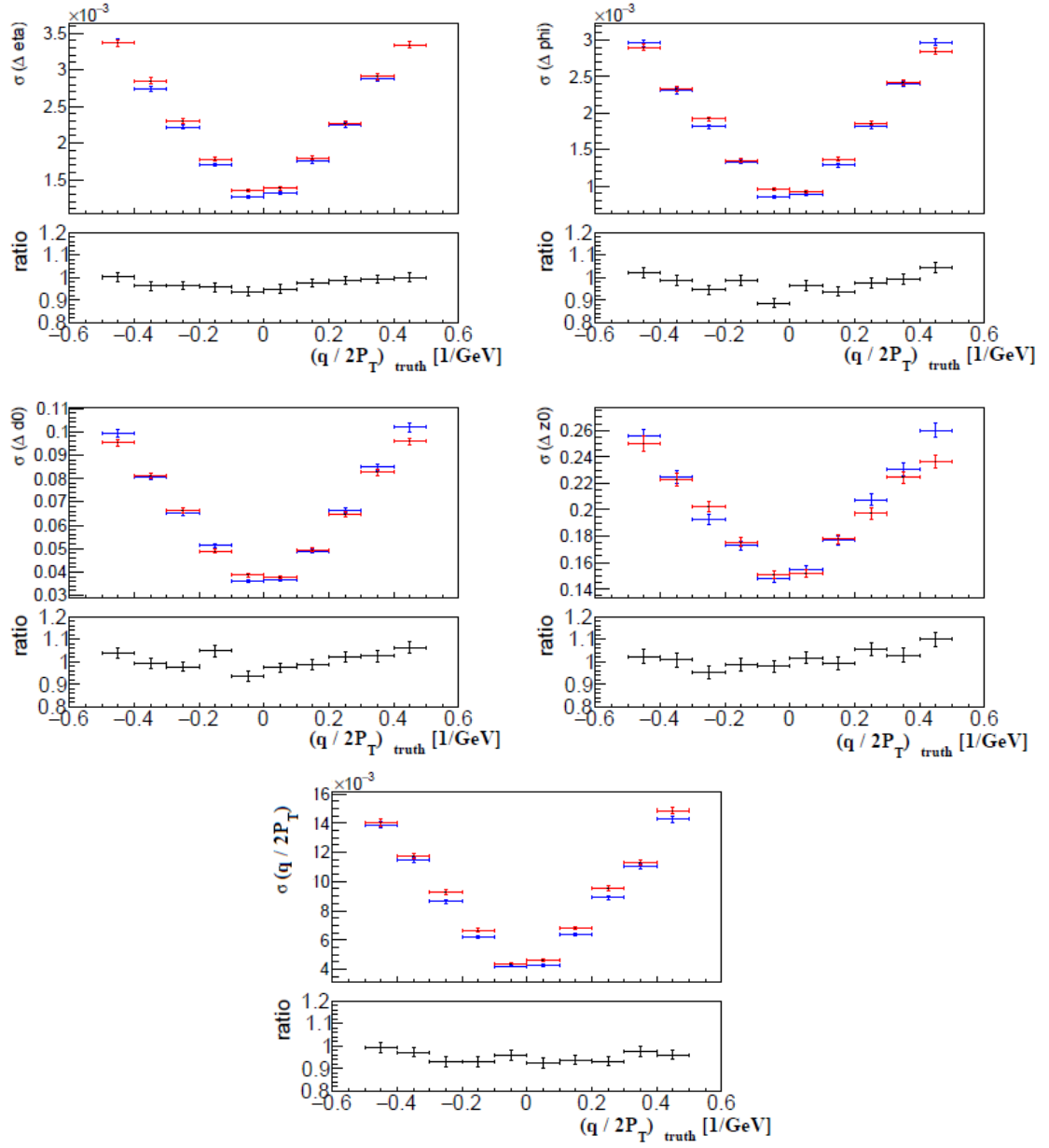


図 5.19補正後の飛跡分解能の曲率依存

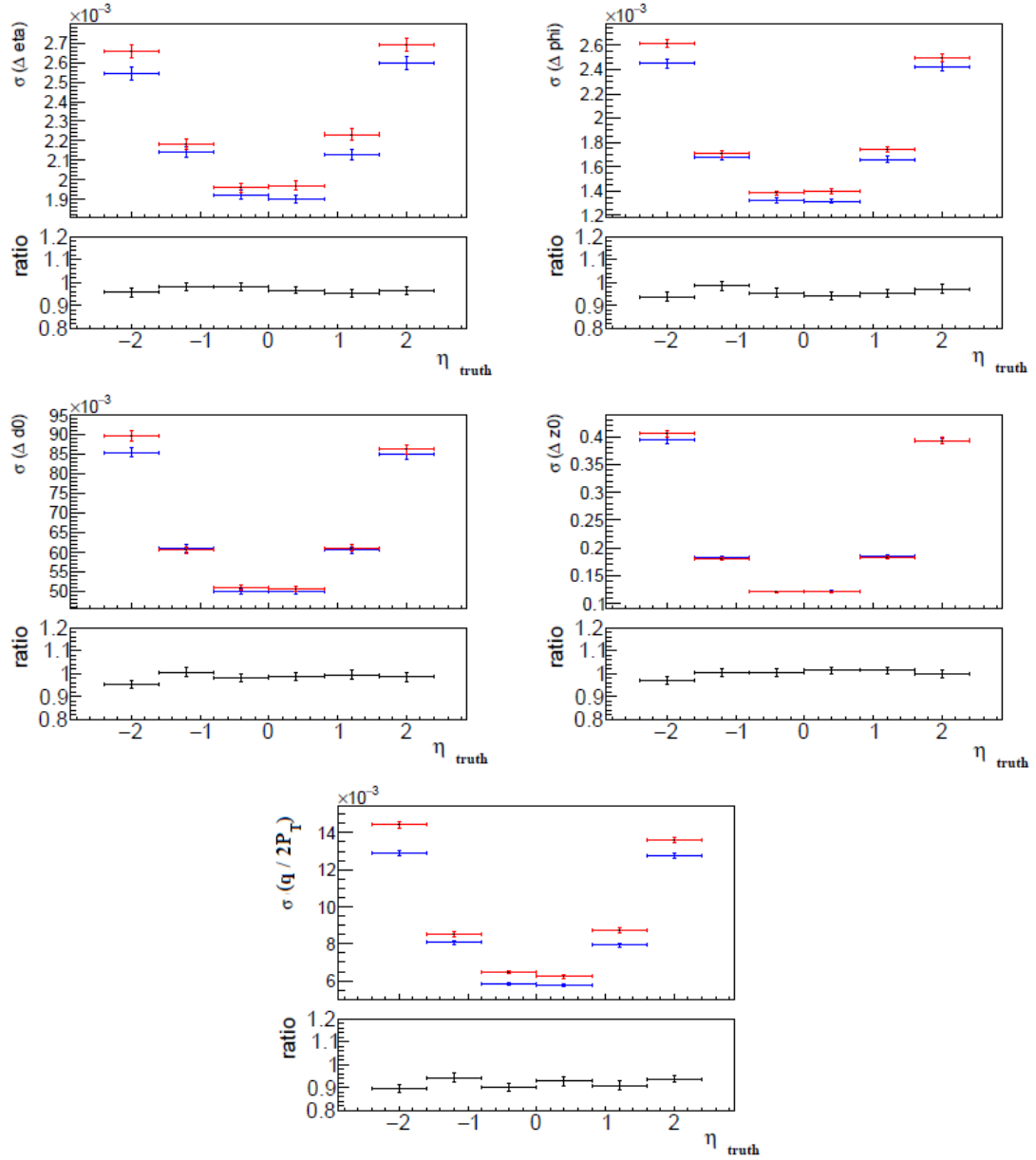
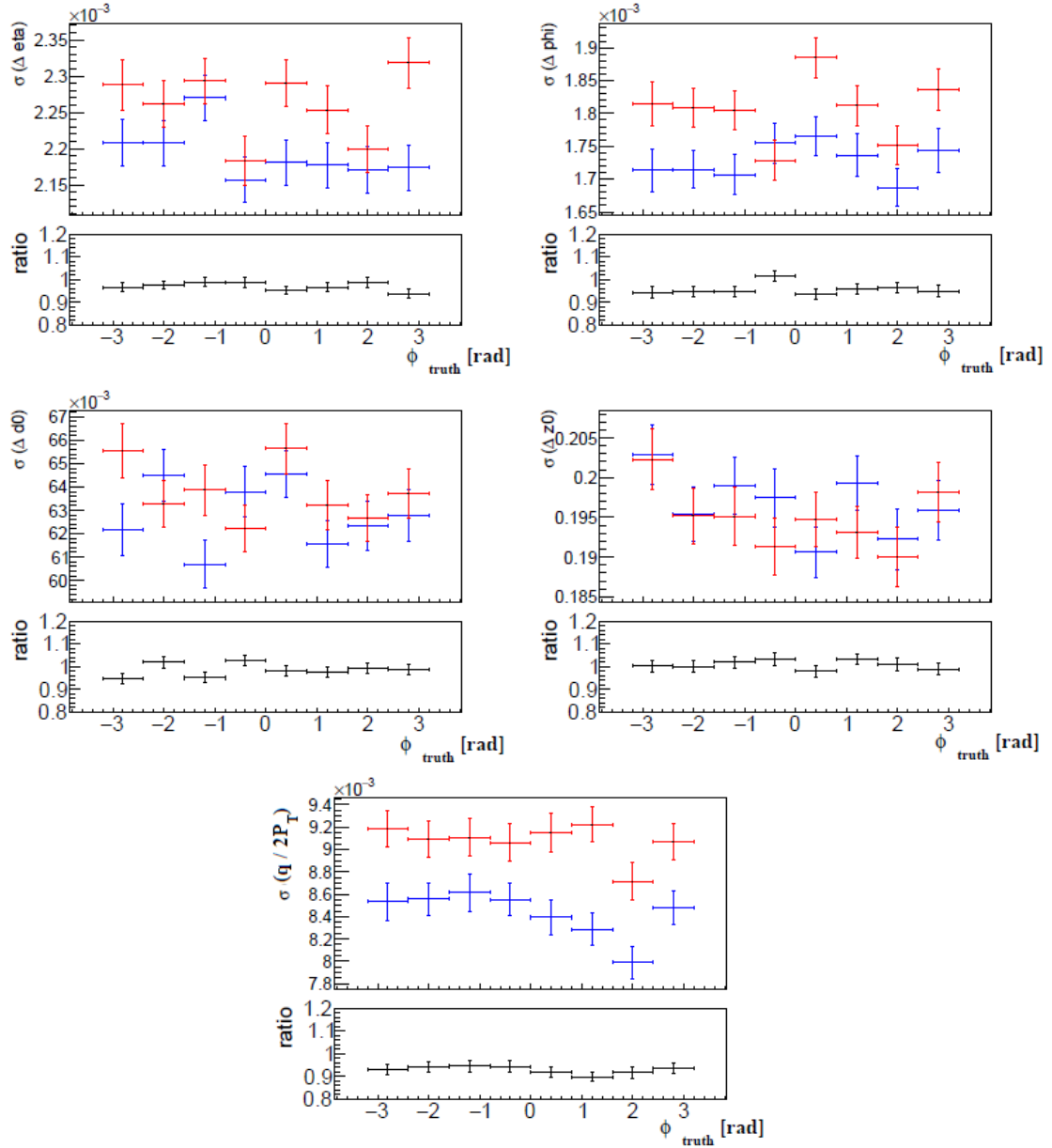
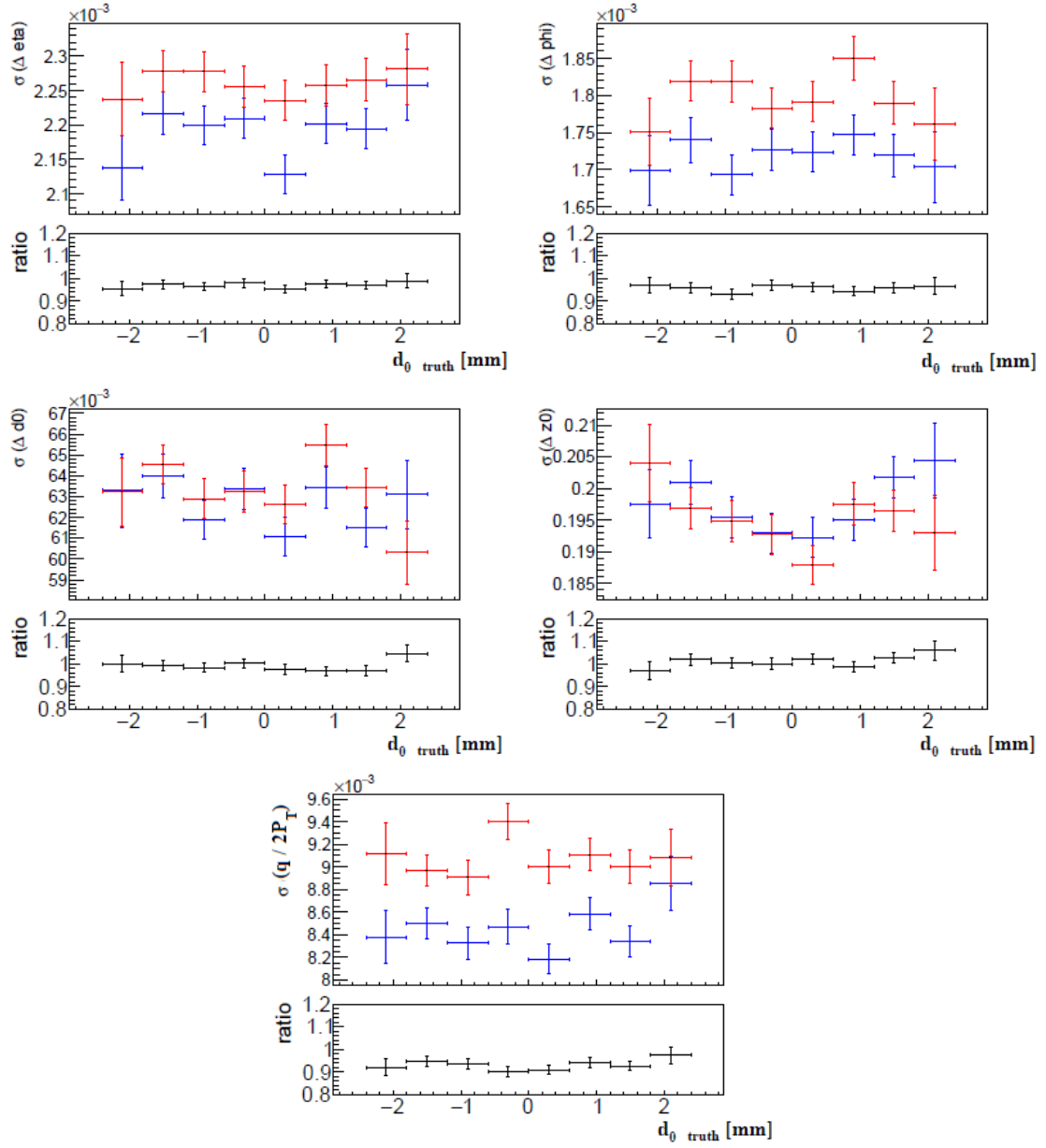
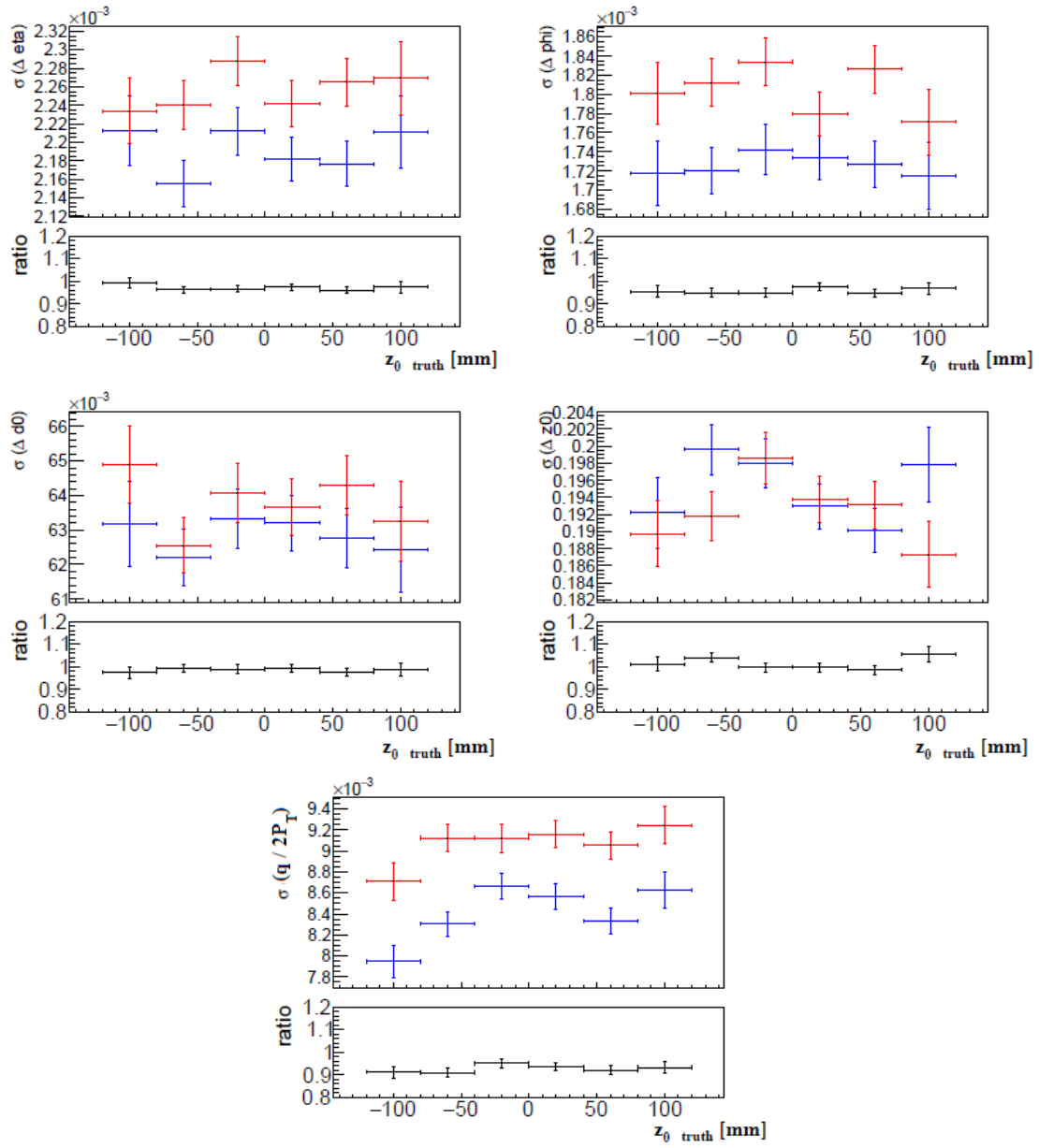


図 5.20補正後の飛跡分解能の eta 依存

図 5.21補正後の飛跡分解能の ϕ 依存

図 5.22補正後の飛跡分解能の d_0 依存

図 5.23補正後の飛跡分解能の z_0 依存

6 まとめと今後の展望

シミュレーションサンプルを大量に生成するための高速な FTK シミュレーションの開発及び構築を行った。

先行研究においては、truth 飛跡のパラメータから乱数で飛跡を再構成する手法が研究されており、非常に高速かつよく full sim を再現していたが、full sim との相関が無いことや偽飛跡を再構成できないなどの問題点があった。本研究では、full sim によるアルゴリズムと先行研究によるアルゴリズムの中間的な手法を取って高速なシミュレーションを開発した。本研究で開発した高速シミュレーションについて、処理時間については高負荷である ttbar pile up80 の事象に対して 2.5 秒/event と要請を満たす事を確認した。補正なしでは飛跡再構成率や飛跡分解能について full sim と大きな差異があったが、消失座標数による補正という単純な一つの補正を加えることで fast sim(本研究)と full sim の飛跡再構成率や飛跡分解能を、要請には満たないもののリーズナブルに一致させることができた。これにより新たな手法での高速シミュレーションの道筋を確立することができた。本研究で用いた補正後の fast sim においても未だ要請を満たしておらず種々の課題が残るため、今後はより高度な補正方法の模索が必要となる。また、今回再構成率及び飛跡再構成率の研究に使用したサンプルは single muon 事象であるため、他の事象による影響を調べていく必要がある。さらに、今回の手法では偽飛跡の効果を再現できていないため、この効果についても導入する必要がある。

そして最終的には本シミュレーションを用いて大量のシミュレーションサンプルを作成し、FTK を用いた実データの解析を実現することが目標である。

7 謝辞

まずは3年間全ての場面でお世話になった寄田先生に深く感謝いたします。寄田先生は研究室所属以降、長きにわたって厳しく指導していただきました。要点を伝えるための説明、人に伝えるためのスライド作成など、様々な点で至らない自分に根気よく指導していただきました。ただ辛いだけの厳しいではなく、相手を思い遣り、この学生にどのように接するのが最も成長に繋がるのかという寄田先生の思い遣りが伝わる厳しい指導でした。これまで本当にありがとうございました。

また、次席研究員である田中さんにもお世話になりました。ミーティングのたびに自分の発表に対して多くのコメントを下さり、時には心配して声をかけてくださったのがありがたかったです。

そして招聘研究員である蛭名さんにもお世話になりました。ソフトウェアに関する質問であったり、何げない質問にも快く答えてくださり、何度も夕食を御一緒させていただいたり一緒に遊びに行くこともあり、とても充実した研究生活を支えてくれたことに感謝しております。

そしてギリシャのアリストテレス大学に所属していらっしゃる木村さんにも大変お世話になりました。とても忙しい中、ネット通話越しで幾度も質問させていただいたり、何度もアドバイスを頂いたり本当にありがとうございました。

また本研究を行うにあたって、ATLASのソフトウェアコーディネータのJahred氏や本研究において使用した手法を開発していたstanford大学のZihao氏、Lauren氏には様々なコメントやサポートをもらい御世話になりました。

そして寄田研究室ATLASグループの先輩方である三谷さん、飯澤さん、加地さんにも大変お世話になりました。度々わからないことをお聞きしたりスライドについてアドバイスを頂いたり、非常に助けとなりました。

また、同ATLASグループ、FTKについて一緒に研究を行っている同期、川口にも非常に助けられました。一緒にFTKのことについて考えたりしながら研究を進めていける同期がいてくれてとても心強かったです。

後輩の靱山にもソフトウェアの面で様々なことを手伝ってもらうなどして助けていただきました。ありがとうございます。

さらに、研究室の同期とも仲良く楽しく過ごすことができとても充実した研究生活を過ごすことができました。その他一緒に研究室での生活を過ごした皆様、またこれまでの人生を支え続けてくれた両親、今まで自分を支えてくださり本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 長島順清, 「素粒子物理学の基礎 I」, 朝倉書店, 1998
- [2] <http://home.web.cern.ch/about/experiments/atlas>
- [3] <http://home.web.cern.ch/about/experiments>
- [4] <http://www.atlas.ch/photos/detector-site-surface.html>
- [5] ATLAS Collaboration, 「The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider」, 2008
- [6] <http://www.hep.lu.se/atlas/thesis/egede/thesis-node39.html>
- [7] <http://inspirehep.net/record/1484295/plots>
- [8] <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-2-1-ATLASIBL.pdf>
- [9] 「Performance of the ATLAS Trigger System in 2015」, <https://arxiv.org/pdf/1611.09661.pdf>
- [10] 白神賢, 「ATLAS 実験における高速飛跡トリガー (FTK) の構築状況と今後の展望」, 日本物理学会 2014 年秋季大会
- [11] 寄田浩平, 「FTK (Fast TracKer) 高速飛跡再構成システム (トリガー)」,
- [12] 白神賢, 「ATLAS 実験における FTK 受信モジュールの開発構築と実機試験」, 日本物理学会 2013 年秋季大会
- [13] ATLAS Collaboration, 「Technical Design Report Fast TracKer (FTK)」, ATLAS-TDR-021, 2013.
- [14] 仲松弥, 「ATLAS 実験における FTK によるトリガーの改善とシミュレーションの高速化」, 2014 年度修士論文