## 修士学位論文

## 高輝度LHC-ATLAS 実験に向けた Associative Memory 技術を用いたオンラインミューオン 飛跡再構成システムの性能評価及び最適化の研究

Performance study and optimization of the realtime muon tracking system with Associative-Memory for the High-Luminosity LHC in the ATLAS experiment



## 小玉 昂史

2019年1月

### 概要

LHC は欧州原子核研究機構 (CERN) に設置された陽子陽子衝突型の円形加速器である。 ATLAS 検出器はその陽子陽子衝突事象を検出するための大型汎用検出器である。LHC は 2024 年から 2 年半の Long Shutdown 期間を経て 2026 年からルミノシティを大アバに向上 させた、High-Luminosity LHC(HL-LHC) へアップグレードされる。

ATLAS 検出器はこの HL-LHC でのルミノシティの増加に伴うバックグラウンドの大幅 な増加に対応するため、様々なアップグレード (Phase2 アップグレード) が計画されてい る。その一つが 40MHz で起きる衝突事象の選別を行うトリガーシステムのアップグレー ドである。ATLAS 検出器のミューオンシステムの一つである Monitored Drift tube(MDT) はミューオンの精密測定用の検出器であり、現在のミューオントリガーシステムには MDT の情報は用いられていない。しかし Phase2 アップグレードにおいてトリガー発行のレイテ ンシーが延長され、MDT の情報を用いたハードウェアベースの初段ミューオントリガー (MDT トリガー) の導入が可能となるため、MDT の情報を用いたより高い運動量識別性能 を持つトリガーシステムの構築が可能となる。

本研究は MDT トリガーの導入に向けた Associative Memory(AM) を用いたパターン認 識による MDT のミューオン飛跡再構成についての性能評価に関するものである。AM に よる飛跡再構成アルゴリズムを再現するソフトウェアを作成し、ソフトウェアシミュレー ションによる飛跡再構成の efficiency やパターン認識の性能及び運動量識別性能を評価を 行った。

# 目 次

<b>第</b> 1章	序論	<b>4</b>
1.1	本論文の背景	4
	1.1.1 標準理論と新物理	4
	1.1.2 ATLAS 実験の目指す物理	5
1.2	本研究の目的	6
1.3	本論文の構成	7
第2章	LHC-ATLAS 実験	8
2.1	ATLAS 検出器	9
	2.1.1 内部飛跡検出器	9
	2.1.2 カロリメーター	9
	2.1.3 ミューオン検出器	12
2.2	ATLAS トリガーシステム	21
	2.2.1 Level-1 Trigger	21
	2.2.2 High-Level Trigger	22
2.3	High Luminosity LHC(HL-LHC)	22
	2.3.1 加速器のアップグレード	23
	2.3.2 HL-LHCの物理	-• 24
	2.3.3 ATLAS Phase2 アップグレード	25
第3章	ATLAS ミューオントリガーシステム	29
31	Phase2 TDAQ $\rightarrow$ $\lambda \neq \Delta$	$\frac{-5}{29}$
3.2	Level-0 $\leq 1 - \pi \sum \int dx dx dx$	30
3.3	$MDT \vdash U \mathcal{J} -$	31
0.0	3.31 MDTトリガーのチチベーション	31
	3.3.2 ハードウェアデザイン	32
	3.3. Hit Extractor	35
	3.3.4         セグメント再構成	36
第4章	Associative Memory 技術を用いたオンラインミューオン飛跡再構成	37
41	Accosiative Memory の概要	37
4.2	MDTトリガーへの応用	38
4.3	ハードウェア構成	40

第5章	ソフトウェアシミュレーションによる性能評価および最適化	<b>45</b>
5.1	パターンバンク作成	45
	5.1.1 パターントレーニングの手順	45
	5.1.2 Dummy Hit & Mask Hit	47
	5.1.3 Don't Care bit study $\ldots$	47
5.2	パターンバンクの基本的な情報	50
	5.2.1 BIL	50
	5.2.2 BML	52
	5.2.3 BOL	54
	5.2.4 EML	56
	5.2.5 EOL	58
5.3	パターンバンクの性能評価.............................	60
	5.3.1 角度分解能	67
	5.3.2 位置分解能	72
	5.3.3 $\alpha$ カットによる運動量識別性能	79
第6章	結論	83

#### 

## 第1章 序論

2012年に欧州原子核研究機構 (CERN)の Large Hadron Collider (LHC) によりヒッグス 粒子が発見されたことによって、素粒子とそれらの相互作用を記述する理論である標準模 型で予想されるすべての素粒子が実験的に発見された。しかし、標準模型では説明できな い未解決問題も数多く残っており LHC-ATLAS 実験はそういった未解決問題を解決する標 準模型を超えた新物理の探索を行っている。

ATLAS 検出器では陽子陽子衝突事象の詳細な解析のために様々な検出器を用いている。 また全ての陽子陽子衝突事象の中から興味のある事象のみを効率よく高速で取捨選択し、 データ収集するためのトリガーシステムを備えている。本研究はそのトリガーシステムの1 つである Level-1 ミューオントリガーシステムのアップグレードに関するものである。LHC は 2026 年より高輝度での運転を計画している。高輝度での運転においては背景事象が増加 し、従来のトリガーシステムでは適切に事象選択ができない状況が予想されるため、より 精度の高いトリガーシステムの構築が必要不可欠である。本研究の目的は高輝度 LHC 運転 に向けた、ミューオンの精密測定用の検出器 (MDT) との情報を統合させた新しいトリガー システムの開発とその性能評価である。

本章では、本研究の背景と目的について述べる。

### 1.1 本論文の背景

#### 1.1.1 標準理論と新物理

標準理論は素粒子とそれらの相互作用を記述する 理論である。標準模型によると、素粒子は6種類の クォークとレプトンと4種類のゲージボソン、ヒッグ ス粒子の計17種類で構成されている(図1.1)。2012 年にATLAS実験、CMS実験の両方でヒッグス粒子 の存在が確認されたことにより標準模型の17種類の 素粒子はすべて発見された。

前述のとおり標準模型は現在までの実験結果のほ とんどを説明できる一方で、重力相互作用の導入や 暗黒物質の存在、ニュートリノの質量など標準模型



図 1.1: 標準理論の素粒子

では説明できない現象も数多く残されている。この問題を解決するためにより高エネルギー での理論が求められ、世界中でこれらの新物理の探索をする実験が行われている。

#### 1.1.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験の目的は LHC による陽子-陽子衝突を用いて、TeV スケールまでの物理事象 を幅広く調べることである。超対称性粒子 (SUSY) をはじめとした新物理探索や、ヒッグ ス粒子の精密測定は ATLAS 実験にとって大きな研究対象の一つである。

#### SUSY

超対称性理論は標準模型のそれぞれの素粒子に対して、そのペアとなる素粒子を新たに 導入する理論である。この時、フェルミオンに対してはボソン、ボソンに対してはフェル ミオンのペアを導入する。これにより超対称性理論はボソンとフェルミオンの変換につい て不変となる。



図 1.2: 超対称性理論で導入される素粒子

超対称性理論を導入する大きな動機の一つは階層性問題の解決である。標準理論ではヒッ グス粒子の質量を0にするような対称性は存在しないので、ヒッグス粒子の質量は基本ス ケール(10<sup>16</sup>-10<sup>19</sup> GeV)にあるべきである。このため現在ヒッグス粒子の質量(O(10<sup>2</sup>) GeV) を得るためには10<sup>15</sup> GeV の量子補正を行い、10<sup>2</sup> GeV の質量を得るという不自然な補正が 必要になる(階層性問題)。そこで標準理論に対して新たにフェルミオンとボソンの対称性 という新たな対称性を導入することで大きな量子補正が禁止されヒッグス粒子の質量は基 本スケールよりも大幅に小さくすることが可能となる。

#### ヒッグス粒子の精密測定

2012 年に LHC によってヒッグス粒子は発見されたがその性質は未だに不明な部分が多 く、現在もヒッグス粒子の精密測定は素粒子物理における大きな課題の一つである。標準 理論を超えた新物理の理論によってヒッグスセクターの構造は大きく異なる (2HDM や複 合ヒッグス模型など)ので、このヒッグスセクターの構造を精密に測定することは新物理へ の大きな手がかりとなる。

2018年にはLHCによりヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊する事象が観測され [2](図 1.3)、すでに発見されているトップクォーク、タウレプトンへの崩壊と合わせて、第3世代 のフェルミ粒子がヒッグス機構によって質量を獲得していることが解明された。今回見つ かったボトムクォークへの崩壊チャンネルや、すでに見つかっている崩壊チャンネルに於 いて標準理論との有意なズレは見つかっておらず (図 1.4)、今後のより精密な測定によって このズレが発見されることが期待される。



図 1.3: H→bbの事象数

図 1.4: ヒッグスと粒子との結合定数

## 1.2 本研究の目的

本研究は高輝度 LHC に向けた ATLAS 検出器のミューオントリガーシステムのアップグ レードに関するものである。高輝度 LHC での高いルミノシティ状況下において、低い横 方向運動量領域における稀な現象をとらえるためには横方向運動量の閾値を上げることな くトリガーレートを抑える必要があり、より高い運動量識別性能を持つのトリガーシステ ムが求められる。そのために Phase2 における初段ト リガーのアップグレードでは Phase1 アップグレードで導入される NSW トリガーに加え、内部飛跡検出器を用いた L1Track ト リガー、カロリメーターを用いた L0Calo トリガー、MDT を用いた MDT トリガーが導入 される。

従来、ミューオン精密測定用の検出器である MDT はハードウェアによる飛跡再構成が困 難であるためハードウェベースの初段トリガーには用いられていなかったが、Phase2 アッ プグレードによって初段トリガーを発効するまでの時間 (レイテンシー) が伸びること、さ らに Associative Memory を用いたパターン認識によるハードウェアベースでの飛跡再構成 システムを導入することによって MDT の情報をハードウェアベースでのトリガーに組み 込むことが可能となる。

本研究の目的はこの AM 技術を用いた MDT トリガーの導入に向け、ソフトウェアシミュ レーションを用いて MDT トリガーの性能評価及びシステムの最適化を行うことである。



図 1.5: HL-LHC における ATLAS トリガーシステムの概念図

## 1.3 本論文の構成

本論文では、第2章でLHC-ATLAS実験の概要について述べる。第3章ではPhase2にお けるミューオントリガーのアップグレードについて述べる。第4章ではAccosiative Memory 技術を用いた飛跡再構成システムについて述べる。第5章でAM技術を用いた飛跡再構成 システムのソフトウェアシミュレーションによる性能評価及び最適化について述べ、最後 に第6章でまとめと今後について述べる。

## 第2章 LHC-ATLAS実験

LHC はスイス、ジュネーブの郊外の地下約 100 m に設置された円周約 27 km の陽子-陽 子衝突型円形加速器であり (図 2.1)、世界最高のエネルギーの加速器として素粒子物理学実 験のエネルギーフロンティアとしての役割を担っている。LHC は現在、重心系エネルギー 13 TeV、瞬間ルミノシティ2×10<sup>34</sup>cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>を超えた運転 (Run-2)を終え、2020 年からの 運転 (Run-3) にむけたロングシャットダウン期間に入っている。3 年間重心系エネルギー 14TeV、瞬間ルミノシティ2×10<sup>34</sup>cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 程度での運転 (Run-3) を行い、終了後は再びロ ングシャットダウン期間に入り、2026 年からは重心系エネルギー 14 TeV,瞬間ルミノシティ 7.5×10<sup>34</sup>cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> での HL-LHC としての運転が予定されている (図 2.2)。HL-LHC 運転に より統計量は 3000fb<sup>-1</sup> 以上であると予想され、新粒子への感度向上や高統計での精密測定 により新物理のさらなる手掛かりが得られることが期待される。また LHC の円周上には 4 つの検出器、ATLAS,CMS,ALICE,LHCb が設置されている。本章では ATLAS 検出器につ いてより詳しく記述する。



図 2.1: LHC 加速器の概略 [1]



図 2.2: LHC,HL-LHCのスケジュール

## 2.1 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は高さ 25 m、長さ 44 m、重さ約 7000 トンの円筒形の汎用大型検出器で ある (図 2.3)。その構造は主に内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメー ター、ミューオン検出器の 4 つの検出器からなる (図 2.3)。ATLAS は衝突点を中心とした 右手系の座標を採用しており、衝突点から LHC リング中心方向を x 軸、衝突点から垂直方 向を y 軸、それらと直行するビーム軸方向を z 軸としている。xy 平面においては衝突点か ら動径方向を r、ビーム軸周りの方位角を  $\phi$  とする  $(r, \phi)$  座標を用いる。また、ビーム軸を  $\theta = 0$  とする角度  $\theta$  を用いて、擬ラピディティー  $\eta$  を  $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$  と定義する。以下 ATLAS を構成する検出器について個別に記述する。

#### 2.1.1 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器の主な役割は粒子の飛跡の再構成、運動量や衝突点の検出、カロリメー ターで測られたエネルギーと飛跡検出器で測られた運動量を用いた電子の同定である。内 部飛跡検出器にはソレノイド磁場がかかっており、磁場中を通過する荷電粒子の曲がり具 合を調べることで、粒子の運動量を計測することができる。また、高い位置分解能で粒子の 飛跡を調べることができるため、衝突点の判別や、B中間子等の長寿命の粒子が衝突点から 離れたところで崩壊する際の二次崩壊点を調べることが可能である。内部飛跡検出器はシ リコンピクセル検出器 (Pixel)、シリコンストリップ検出器 (SCT)、遷移輻射検出器 (TRT) で構成される (図 2.4)。

#### 2.1.2 カロリメーター

カロリメーターは電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターの2種類からなる。電 磁カロリメーターは主に電子や光子のエネルギー測定及び飛跡検出器との情報を合わせた



図 2.3: ATLAS 検出器。中央の衝突点から外側に向け内部飛跡検出器、電磁カロリメー ター、ハドロンカロリメーター、ミューオン検出器の順番で構成されている。



図 2.4: ATLAS の内部飛跡検出器。ATLAS 検出器のもっとも内側に設置されており内側から Pixel、SCT、TRT の順に構成されている。また Endcap と Barrel に分かれる。

電子や光子の同定を行い、ハドロンカロリメーターではハドロンシャワーの測定を行い、 ハドロンのエネルギー測定を行う(図 2.5)。

#### LAr 電磁カロリメーター

ATLAS の電磁カロリメーターは液体アルゴンと鉛で構成されるサンプリング型カロリ メーターを採用している。電磁カロリメーターは Barrel 部と Endcap 部に分かれており、  $|\eta| < 1.475$ を Berrel 部がカバーし、 $1.375 < |\eta| < 3.2$ を Endcap 部がカバーしている。

#### ハドロンカロリメーター

ハドロンカロリメーターは電磁カロリメーターの外側に配置されており、ハドロンのエ ネルギー測定や、クォークやグルーオンジェットの再構成を行う。ハドロンカロリメーター は  $|\eta| < 1.7$ を覆う鉄とプラスチックシンチレーターで構成されるタイルカロリメーター と 1.5 <  $|\eta| < 4.9$ を覆う LAr カロリメーターからなる。LAr ハドロンカロリメーターはさ らに 1.5 <  $|\eta| < 3.2$ を覆う Hadronic Endcap Calorimeter(HEC) と 3.1 <  $|\eta| < 4.9$ を覆う Forward Calorimeter(FCal) に分けられる。



図 2.5: ATLAS のカロリメーター。LAr 電磁カロリメーターは Endcap と Barrel の 2 種類。 ハドロンカロリメーターはタイルカロリメーター、HEC、FCal の 3 種類で構成される。

### 2.1.3 ミューオン検出器

ATLASのミューオンシステムはATLASのもっとも外側に設置されており、Cathode Strip Chamber(CSC)、Resistive-Plate Chamber(RPC)、Monitored Drift Tubes(MDT)、Thin-Gap Chamber(TGC)の4つの検出器からなる。CSC、MDT はミューオンの精密測定用の検 出器であり、TGC、RPC はミューオンによる事象選別(トリガー)用の検出器である。ミュー オンシステムの配置図を図 2.6 から 2.8 に示す。Barrel 領域は RPC がカバーし、Endcap 領 域は TGC がカバーする。

また、Endcap 領域の磁場の内側の検出器ステーションを Small Wheel といい、2021 年 から始まる Run-3 に向けてのアップグレード (Phase1 アップグレード) では現行の Small Wheel は取り除かれ、新たに New Small Wheel(NSW) が導入される。



図 2.6: ATLASのミューオン検出器。ATLAS検出器の最も外側に設置され Endcap は TGC、 Barrel は RPC がカバーしている。トロイド磁場の内側と外側に複数の検出層を設置するこ とにより磁場によって曲げられたミューオンの飛跡を検出する。

以下に4つの検出器と新たに導入されるNSWの詳細について述べる。



図 2.7: ミューオンシステムのビーム軸に対して垂直の断面図。Barrel 部は衝突点に近い方 から Inner ステーション、Middle ステーション、Outer ステーションの3つのステーショ ンで構成される。



図 2.8: ミューオンシステムのビーム軸に対して平行の断面図。Endcap 部も Barrel 部と同様に衝突点に近い方から Inner ステーション、Middle ステーション、Outer ステーション の3つのステーションで構成される。

#### Monitored Drift Tube(MDT)

MDT はミューオン精密測定用検出器である。Barrel 部はビーム軸に近いほうから Inner、 Middle、Outer の3つのステーションで構成され、1つのステーションはドリフトチューブ 6 層 (Inner は8 層) で構成される (図 2.9、図 2.10)。Endcap 部も同様に衝突点に近いほう から Inner、Middle、Outer の3つのステーションで構成される。MDT チューブは直径約 30 mm で中心には直径 50  $\mu$ m のワイヤーが張られている。ガス増幅部に用いられるガス は  $Ar/CO_2$  の混合ガスで、ワイヤーにかかる電圧は 3080V、ガスゲインは 2×10<sup>4</sup> である。 MDT では図??のように各層のチューブの位置とドリフト半径からミューオンの飛跡 (セグ メント)を再構成し、3つのステーションからの情報を併せてミューオンの磁場による曲率 から運動量を測定する。チューブのドリフト時間は 700ns と長く、従来はトリガーには用 いられていないが、Run-3 ではハードウェアによる短時間での飛跡再構成を行い、ミュー オントリガーとして用いることを計画している。



図 2.9: MDT チューブの断面図。左図:チューブの直径方向の断面図。右図:チューブの長さ 方向の断面図。チューブの中を通過したミューオンがチューブ内のガスを電離させ、発生し た電子がアノードワイヤーで回収される。ドリフト時間からアノードワイヤーからミュー オンが通過した位置までの距離までが分かる。



図 2.10: MDT チェンバーの構造。3 層のチューブを重ねたものを 2 つ合わせたもので構成 される。4 本の光線で常にチェンバーの位置情報をモニターできる。



図 2.11: MDT によるミューオンのセグメントの再構成。6(または 8) 層のチューブのドリ フト半径の情報から直線を再構成する。

#### Cathode Strip Chamber(CSC)

CSC は ATLAS の前方領域 2.0 <  $|\eta|$  < 2.7 に設置されたミューオンの精密測定用の検 出器である。前方領域では粒子の入射レートが高く、MDT の上限である 150 Hz/cm<sup>2</sup> を超 過してしまうため、高い入射レートにも耐えることが可能である CSC が設置されている。 CSC は MWPC 型のガス検出器で、アノードワイヤ同士の間隔及びアノード面とカソード 面との間の距離は 2.5 mm と短く、応答時間が短く入射レート 1000 Hz/cm<sup>2</sup> まで耐えられる 設計となっている (図 2.12)。MDT、CSC の Endcap 部は Large chamber と small chamber がそれぞれ 8 分割され、 $\phi$ 方向に 8 回対称になるように設置されている (図 2.13)。



図 2.12: CSC の模式図。



図 2.13: CSC のレイアウト。small chamber と large chamber がそれぞれ 8 回対称になるように設置されている。



図 2.14: Barrel 部の RPC の断面図。RPC の部分を色づけして表している。

#### Resistive-Plate Chamber(RPC)

RPC は Barrel 部に設置されたミューオントリガー用の検出器である。MDT の Middle station の上下に 2つの RPC(RPC1、RPC2) が設置され Outer sation に 1つの RPC(RPC3) が設置されている (図 2.14)。Middle と Outer の情報を用いて高い横方向運動量閾値 (10-20 GeV) のトリガーを発行し、Middle の 2つの RPC で低い横方向運動量閾値 (4-10 GeV) の トリガーを発行する。RPC のチェンバーはそれぞれ 2 層の独立な検出層で構成され、それ ぞれ  $\eta$  と  $\phi$ の測定する (図 2.15)。低い横方向運動量の場合は RPC1、RPC2 の 4 層のうち 3 層のコインシデンスでトリガーを発行し、高い横方向運動量の場合、RPC3 の 2 層中 1 層 でトリガーを発行する。

#### Thin Gap Chamber(TGC)

TGC は Endcap 部に設置されたミューオントリガー用の検出器である。TGC は MWPC 型のガス検出器であり、50  $\mu$ m のワイヤーが 1.8 mm ピッチで張られており、短いピッチ により、BCID(Bunch Crossing Identification) を行うのに十分な時間分解能が得られる。 また薄いガス層のおかげで電離したイオンのドリフト時間が短く抑えられ、十分な繰り返 し呼び出し頻度を確保できる。ガス増幅部には CO<sub>2</sub> 55%、n-Pentane 45%の混合ガスで、 アノードワイヤーにかかる電圧は 2.8 kV、ガスゲインは 3 × 10<sup>5</sup> である。ワイヤー電極と ストリップ電極が直行して設置されていて、ミューオンの位置を 2 次元的に読み出すこと ができる (図 2.16)。

TGC 検出器は7つのガス層を持ち、衝突点に近いほうから Triplet、Doublet、Doublet の構造を持ち、M1、M2、M3と呼ぶ。Triplet と Doublet の構造を図 2.17 に示す。



図 2.15: RPC の構造。高抵抗のプレートによりガスギャップが形成される。ストリップは ガスギャップの両面に直行に配置され、η方向とφ方向を測定する。



図 2.16: TGCの構造。左図:ガスギャップ 2.8 mm、ワイヤー間隔 1.8 mm の MWPC の構造 をしている。右図:ワイヤー電極とストリップ電極が直行しており 2 次元読み出しが可能で ある。



図 2.17: TGC の Triplet と Doublet 構造。各ガスギャップ間はハニカム構造のパネルで仕切られている。

#### New Small Wheel

現在の Small Wheel は 2019 年から始まる Phase1 アップグレードによって新たに New Small Wheel に置き換えられる。これにより、高レート環境での飛跡測定精度の向上や、NSW と TGC との情報を統合した新しいミューオントリガーシステムの構築が可能となる。図 2.18 に NSW の構造を示す。



図 2.18: NSW 1 セクターの構造。4 層の sTGC+8 層の Micromegas+4 層の sTGC という 構成になっている。

NSW は 8 回対称に設計されており、Large セクターと Small セクターで隙間なく  $\phi$ 方向をカバーしている。図 2.18 のように NSW はトリガー検出器として用いられる small-strip TGC(sTGC) と精密測定用の検出器 Micromegas で構成されている。以下に sTGC と Micromegas について説明する [5]。

#### small-strip TGC(sTGC)

sTGC は TGC と同じくガスギャップ 2.8mm、ワイヤー間隔 1.8mm の MWPC 検出器で あるが、TGC のストリップ間隔 15mm に対して sTGC はストリップ間隔が 3.2mm と短く なっており、この細かいストリップの電荷情報により位置分解能が向上する。

またもう一点 TGC と異なる点は、sTGC にはパッドという読み出しカソードがあるとい う点である。sTGC は図 2.19 に示すように 1 層のアノードワイヤーを 2 枚のカソードで挟 む構造にっており、片方のカソードは 3.2mm ストリップで読み出し、もう片方のカソード はパッドで読み出す。パッドの大きさは η によって異なるが典型的には 80mm ほどであり、 ストリップよりも粗い読み出しとなっている。sTGC ではまずパッドを用いて粗いコイン シデンスをとって大まかな位置を決定したのちにその粗い領域内のストリップの情報を用 いてより細かな位置の計算を行う。まずはじめに粗い位置の決定を行うことでその領域に 限って飛跡の再構成をすれば良いため、より短時間での飛跡再構成が可能となる。



図 2.19: sTGC の構造

#### Micromegas

Micromegas はワイヤーチェンバー型のガス検出器であり、アノードとカソードの間に張 られたメッシュとアノード面の狭い領域で電子増幅を引き起こすことで、約200nsという短 い時間で電離したイオンを回収できるという特徴を持つ。そのためレート耐性が高く、ま た、NSW に導入される Micromegas は放電耐性の改良のため読み出し面が高抵抗ストリッ プ陽極とその下の読み出し電極に分かれている。これにより放電ダメージは直接読み出し 電極にはかからず、またストリップ陽極の高い抵抗値により放電を起こした陽極はすぐに電 位降下を起こし放電が止まるようになっている。これらの特徴により、Run-3や HL-LHC での高いレートでの運用にも耐えうる構造となっている(図 2.20)。



図 2.20: NSW に導入される Micromegas 検出器。

## 2.2 ATLAS トリガーシステム

ATLAS の高いルミノシティの状況下ではすべての衝突事象のデータを取得することは できない。LHC の陽子衝突頻度 40 MHz に対して Run-2 においてデータ取得できるイベン トレートは約 1kHz である。そのため、ATLAS 実験ではハードウェアベースでの Level-1 Trigger、ソフトウェアによる High-Level Trigger の2段階のトリガーが設けられている (図 2.21)。

#### 2.2.1 Level-1 Trigger

ATLASの初段のトリガーシステムはL1トリガーと呼ばれ、40MHz で起こる衝突事象の 最初の選別を行う。L1トリガーはハードウェアベースのシステムであり、カロリメーター の情報を用いたL1 Calo、ミューオン検出器の情報を用いたL1 Mu 及びそれらを組み合わ せたL1 Topoの3種類に分類される。L1トリガーでは2.5µs で事象選別を行い最終的に 100 kHz 程度のレートで後段の High-Level Trigger へと送られる。



図 2.21: ATLAS トリガーシステムの概要。カロリメーター、ミューオン検出器からの情報はそれぞれ最初に L1Calo、L1Muon で選別され、その後さらに L1 の情報は HLT に送られ、HLT で全ての検出器を用いた事象選別を行ったのち、ATLAS のデータストレージに保存される。

#### 2.2.2 High-Level Trigger

L1トリガーで選別された事象は High-Level Trigger(HLT) へ送られ、そこではソフトウェ アによるより高精度な事象選別を行う。HLT では内部飛跡検出器の情報も用いて荷電粒子 の飛跡再構成を行う。これによりイベントレートは約 1kHz まで落とされ、HLT を通過し た事象が物理データとして保存される。

## 2.3 High Luminosity LHC(HL-LHC)

LHCは2026年からHigh Lumminosity LHC(HL-LHC)として瞬間ルミノシティ5×10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> での運転を計画しており、10年間の運転を行い、データ統計量は3000fb<sup>-1</sup>となる見込み である。ATLAS 実験はLHC の高輝度運転に対応するため検出器及びトリガーシステム、 データ読み出しシステムのアップグレードが計画されている。本節でそのHL-LHC につい ての概要と、それに向けた ATLAS 検出器のアップグレード (Phase2 アップグレード) につ いて記述する。

#### 2.3.1 加速器のアップグレード

LHCの陽子ビームの瞬間ルミノシティは以下の式で表すことができる。

$$L = \frac{\gamma n_b N^2 f_{rev}}{4\pi \epsilon_n \beta^*} R \tag{2.1}$$

ここで、各パラメーターは以下のとおりである。

γ: ローレンツ因子	$\epsilon_n$ : 横方向規格化エミッタンス
n <sub>b</sub> : バンチ数	β*: 衝突点ベータ関数
N: バンチあたりの陽子数	R: 幾何学的減衰因子
<i>f<sub>rev</sub></i> : 1 秒当たりの周回数	

この式から、ビームのルミノシティを上げるためにはビーム電流を大きく (N、n<sub>b</sub>を大きく) し、衝突点でのビームサイズを絞る (ϵ<sub>n</sub>、β\* を小さくする) 必要がある。また、ビームの交 差角による減衰因子 R が大きくなるように設計する必要がある。そのため HL-LHC ではル ミノシティの大幅な向上のため、以下のような設計方針をとっている [4]。

- 1. HL-LHCの要求にこたえるため、LHCの前段の加速器 (Linac4, PSB, PS, SPS) のアッ プグレードを実施し、ビーム強度を増強する。
- 2. LHC 衝突点でのビームサイズを絞り込むために、ATLAS,CMS の衝突点周りに、新たに大口径かつ高磁場の磁石を挿入する。
- 3. 幾何学的減衰因子を小さくするために、クラブ空洞技術を導入する。クラブ空洞内で はビームに対して垂直に電場が生成されており、この電場によってビームのバンチが 回転し、ビームの交差角を小さくすることが可能となる。この技術により、HL-LHC ではLHCと同程度にまでRを大きくすることが可能となる。

表 2.1 に現行の LHC と HL-LHC の各パラーメーターを比較した表を記載する [3]。

パラメーター	現行の LHC	HL-LHC
陽子ビームのエネルギー (TeV)	6.5	7
バンチ数 n <sub>b</sub>	2808	2748
バンチあたりの陽子数 N	$1.15\times10^{11}$	$2.2\times10^{11}$
1 秒当たりの周回数 <i>f<sub>rev</sub></i> [kHz]	11.2	11.2
横方向規格化エミッタンス $\epsilon_n \left[ \mu  m m  ight]$	3.75	2.50
衝突点ベータ関数 β* [m]	0.55	0.15
幾何学的減衰因子 R	0.836	0.829

表 2.1: LHC と HL-LHC のパラメーターのb
-------------------------------

#### 2.3.2 HL-LHCの物理

このアップグレードの主な目的の一つはヒッグス粒子の崩壊分岐比の精密測定である。 HL-LHC実験によってヒッグス粒子の生成断面積と崩壊比の積 ( $\sigma \times BR$ )は5%以下の不確 かさで観測することができる。崩壊分岐比を正確に測定することでヒッグスセクターに含 まれる TeV スケールの新物理の直接的なな証明ができる。図 2.22 に 125GeV の標準理論 のヒッグス粒子の 300 fb<sup>-1</sup> のデータと HL-LHC の運転により得られる 3000 fb<sup>-1</sup> のデータ の相対的な信号強度の予想される測定精度を示す。特に稀崩壊チャンネルである  $H \to \mu\mu$ 崩壊は、ヒッグス粒子とミューオンの結合定数が低く、背景事象も多いことから SN 比は 0.2%ほどとされているが 2 つのミューオンから再構成される不変質量分布が鋭いピークを 作ることから、3000 fb<sup>-1</sup> の統計量で 6 $\sigma$  で観測できると予想されている。

また、もう一つの大きな目的は超対称性理論や余剰次元理論等の標準理論を超える新物 理の探索である。ベクターボソンの散乱振幅の異常性によりヒッグスセクターの電弱対称 性の破れへの寄与を調べることができる。また、トップクォークの Flavor-changing neutral current 崩壊などの稀な現象の研究によりさらなる新物理への間接的な発見となりうる。



図 2.22: HL-LHC で期待されるヒッグスの崩壊チャンネルに対する信号強度  $\mu = (\sigma \times BR)/(\sigma \times BR)_{SM}$ の測定精度 [7]

#### 2.3.3 ATLAS Phase2 アップグレード

HL-LHC へのアップグレードに伴い、ATLAS 検出器も 2024 年からアップグレードを行う (Phase2 アップグレード)。以下に主なアップグレードの内容を示す。

#### 内部飛跡検出器

現行の内部飛跡検出器は全て新しい検出器に置き換えられる。新しく導入される内部飛 跡検出器は半導体ピクセル検出器と半導体ストリップ検出器で構成される。図 2.23 に新し く導入される内部飛跡検出器の構造を示す。

#### カロリメーター

現行のカロリメーターのフロントエンドの読み出し回路は HL-LHC での高放射線状況下 での運用に耐えられるように設計されていないため、HL-LHC での運用に耐えられる高放 射線耐性を持つ読み出し回路に置き換えられる。

また、現在の Forward Calorimeter(FCal) は空間電荷効果による劣化が予測されるため、 HL-LHC に向け、FCal 前方に新たな検出器を導入するなどの対策案が考えられている。



図 2.23: 新しく導入される内部飛跡検出器のレイアウト。ピクセル検出器 (赤色) は4層の バレル、5層のディスクからなる。ストリップ検出器 (青色) は5層のバレル、7層のディ スクからなる。

#### ミューオン検出器

ミューオン検出器の Phase2 アップグレードでは新しい検出器の導入や、検出器の入れ替 え、フロントエンド回路やトリガー、読み出し回路の入れ替えなどが予定されている。回 路のアップグレードは次の章で説明するミューオントリガーの改善のために行われる。こ れにより、HL-LHC での高いレート環境においても、横方向運動量閾値を低く保ったまま トリガーレートを一定の値で抑えることが可能となる。Phase2 アップグレードでは新たに BI RPC、sMDT が導入される。Phase2 アップグレード後のミューオンシステムの構造を 図 2.24 に示す。以下それぞれの検出器について説明する。

#### • BI RPC

HL-LHC において、Barrel Inner 領域でのヒットレートは 300Hz/cm<sup>2</sup> 程度であるの に対して、現行の RPC の長期運用に適したヒットレートは 100Hz/cm<sup>2</sup> が上限である ことがわかっている [6]。そのため Phase2 アップグレードで BI 領域の RPC を導入す る。BI RPC は従来の RPC と比べてガスギャップが短く (RPC は 2mm、BI RPC は 1mm)、さらに抵抗電極も RPC は 1.8mm であるのに対して、BI RPC は 1mm と短く なっている。

また従来の RPC は1つのチェンバーにつき2層のガスギャップを持つ構造であるの に対し、BI RPC では1つのチェンバーにつき3層の高感度のガスギャップを持つ構 造になっている。3層中2層のコインシデンスを要求することにより、高い検出効率 を保ちながらも、光子や中性子などによる偶発的なコインシデンスを抑えることが可 能となる。

 $\bullet$  sMDT

Phase2アップグレードでBarrel Inner 領域のSmall セクターのMDT は small-diameter MDT(sMDT) への入れ替えが行われる。sMDT はチューブの直径が 15mm と、従来 の MDT の半分の太さとなっている (図 2.25)。これにより、短いドリフト時間での 測定が可能となる。MDT のドリフト時間は最大で 720ns であるのに対し、sMDT の ドリフト時間は最大約 200ns となる (図 2.26)。ドリフト時間を短くすることにより、 チューブの不感時間を短く抑えることが可能となり、不感時間の間にミューオンが通 過し測定が不可能になるといった現象を減らすことができる。 これにより、sMDT は高レート環境においても高いミューオンの検出効率を維持することが可能である。



図 2.24: Phase2 アップグレード後のミューオン検出器のレイアウト。上が small セクター、 下が large セクター。Phase2 アップグレードで導入される検出器を赤字で、Phase1 で導入 される検出器を緑字で示す。



図 2.25: 現行の MDT(左) と Phase2 アップグレードで新たに導入される sMDT(右)の図。 現行の MDT に比べて sMDT はチューブの太さが半分になっている。



図 2.26: MDT と sMDT のドリフト時間の比較

## 第3章 ATLAS ミューオントリガーシステム

この章ではまず、ATLAS 実験における Phase2 トリガー、データ取得システム (TDAQ) について記述する。その後、本研究に深くかかわる Level-0 ミューオントリガーシステム と、MDT トリガーについて記述する。

## 3.1 Phase2 TDAQシステム

図 3.1 に現在計画されている Phase2 アップグレード後の TDAQ システムの概要を示す。 検出器からのデータのインプットは図に示したように、Inner Tracker、Calorimeter(LAr カロリメーターとタイルカロリメーター)、Muon System(MDT、RPC、TGC、NSW)の 三つのカテゴリーに分類される。Level-0トリガーシステムは L0Calo、L0Muon、Global Trigger、Central Trigger subsystem(CTP)からなる。L0Calo、L0Muon は 40MHz で入っ てくるカロリメーターやミューオンシステムからの情報を用いて最初のイベント選別を行 う。LOCaloではカロリメーターの情報を用いた電子やタウレプトン、ジェットの同定、エ ネルギー測定を行い、また Missing E<sub>T</sub>(消失横方向運動量)の計算を行う。L0Muon ではす べてのミューオンシステムからの情報と、タイルカロリメーターからの情報を用いたミュー オンの同定、エネルギー測定を行う。Phase2 アップグレードにおける L0Muon の新しい特 徴として MDT による運動量測定を用いた MDTprocessorr が導入される。MUCTPI では Barrel と Endcap ミューオンシステムの情報を統合させて、後段の Global trigger と CTP へ の送信を行う。Global Trigger では L1Calo で選別された情報をもとにカロリメーターの最 も細分化されたデータを用いて電子、光子、タウレプトン、ジェットの同定、エネルギー測 定を行う。CTP では Global Trigger や MUCTPI からの情報をもとに L0A(Level-0 Trigger Accept) を発行する。

L0A の情報は Front-End Link eXchange(FELIX) を通じて検出器へ送られ、FELIX が受け取った検出器からのデータは Data Handlers へ送られる。Data Handlers では検出器ごと にフォーマットやモニタリングを行い、次の Dataflow サブシステムへ送られる。Dataflow ではデータのバッファ、送信、統合、圧縮を行う。Event Filter(EF) では Dataflow から送ら れてきた 1MHz のデータに対して、最終的な選別を行い、EF accept を発行する。最終的に EF を通過したイベントは Dataflow から読み出され、10kHz のレートで Permanent Srorage に保存される。



図 3.1: Phase2 アップグレード後のトリガー及びデータ読み出しシステム (TDAQ)。phase2 アップグレード後の TDAQ は Level-0 トリガーと DAQ システム (Readout システムと Dataflow サブシステムからなる)、Event Filter で構成される。

## 3.2 Level-0 ミューオントリガー

表 3.1 に Level-0 ミューオントリガーシステムを構成する検出器のリストとカバーする  $\eta$ 領域について示す。ミューオントリガーと読み出しシステムはいくつかの検出器上のフロン トエンド回路を除きすべてが Phase2 アップグレードで入れ替えが行われる。TGC と RPC のデータはすべて検出器上のフロントエンド回路より後段へ送信され、トリガー判定に用 いられる。このようにすることで、現在検出器上の接続により制限される現在のトリガー システムと比べて、より柔軟なアルゴリズムを構成することが可能となる。NSW は Micro megas、sTGC 共にトリガーと精密測定の二つの役割を持つ。NSW における最初のミュー オントリガーの情報 (トラックセグメント) は TGC のヒット情報と組み合わされて Endcap の 1.3 <  $|\eta|$  < 2.4 領域におけるミューオントリガーを発行する。

Barrel Sector Logic ボードには Banch crossing(BC) 毎に RPC からのデータとタイルカ ロリメーターの最外層からのデータが入力され、Endcap Sector Logic ボードには BC 毎 に TGC からのデータと NSW Trigger Processor を経由した NSW の情報、タイルカロリ

Subsystem	検出器	$ \eta $
NSW processor	NSW	1.3-2.7
MDT processor	MDT	< 2.4
Barrel Sector Logic	RPC and Tile,MDT	< 1.05
Endcap Sector Logic	TGC,Tile,RPC,NSW,MDT	1.05 - 2.4

表 3.1: L0 ミューオントリガーの構成。

メーターの最外層の情報、Barrel と Endcap の間の領域にある thin-gap RPC の情報が入力 される。Barrel、Endcap のミューオンの候補は FPGA ベースの Sector Logic で計算され、 MUCTPI を経由して Global Trigger へ送られる。

MDT trigger processor は RPC や TGC、NSW でのトリガーの運動量識別性能向上のため に用いられる。Barrel、Endcap Sector Logic からミューオンの情報をもとに MDT の情報を 用いて、パターン認識と飛跡再構成を行いその結果は Sector Logic に再び送られ、MUCTPI へと送られる。次の節で MDT トリガーについてより詳しく説明する。

### 3.3 MDTトリガー

MDT は現在ミューオン精密測定用の検出器として用いられているが、Phase2 アップグ レードにおいてミューオントリガーの運動量分解能の向上によるトリガーレート削減に用 いられる。

#### 3.3.1 MDT トリガーのモチベーション

現在の初段ミューオントリガーの選別能力はTGC、RPCの位置分解能により制限されている。MDTはTGCやRPCよりもよい位置分解能で測定が可能であり、Phase2 Level-0ミューオントリガーにMDT チェンバーの情報を用いることでオフラインでの再構成に近い運動量分解能でのトリガー発行が可能となる。また Barrel 部においてトロイド磁石の構造上 Barrel Middle ステーションが設置できないφ領域が存在するため、その領域では Barrel Inner と Barrel Outer の RPC コインシデンスによるトリガー (BI-BO trigger)が導入されるが、BI-BO trigger のレートはバックグラウンドによる間違ったコインシデンスによりルミノシティの増加に対して非線形に増加することが予想されている。そこで MDT の導入によりこの間違ったコインシデンスによるトリガーレートの増加を抑えることができる。図 3.2 に MDT トリガーによる運動量識別性能の向上を示した図を記載する。

図 3.3 に MDT トリガーにおけるミューオンの *p*<sub>T</sub> の測定に用いる二つの変数について示 す。一つは二つのチェンバーでのトラックセグメントの角度の差 (β) を用いた運動量測定 であり、二つ目は三つのチェンバーでのトラックセグメントを用いて、1つのチェンバーに おける、2つのセグメントを結んだ直線の距離 (sagitta) を用いた運動量測定である。この 二つの変数のレート削減性能やカバーできる領域が違うので、この二つを組み合わせて最 も良い性能を達成する。



図 3.2: MDT トリガーによる pT>20GeV における運動量識別性能向上を示した図。MDT トリガーを導入することにより pT<20GeV であるにも関わらず pT>20GeV と判定される ミューオンの割合が減少することがわかる。

#### 3.3.2 ハードウェアデザイン

MDT チェンバーは $\phi$ 方向に16分割されており、さらにBarrel、Endcap、A-side、C-side に分かれているので、MDTトリガーシステムは64のパートに分かれている。図 3.4 に 64 セクターのうちの1つのATCAブレードの概略図を示す。

ATCA のブレードには Xilinx UltraScale FPGA(Main FPGA) が一つ搭載されている。 Main FPGA ではSector Logic からの飛跡の候補及び MDT の Chamber Service Module(CSM) からの Inner、Middle、Outer 各ステーションにおける MDT ヒット情報の受信を行い、Sector Logic から送られてきた情報をもとに各ステーションごとに MDT ヒットの抽出を行う。 各ステーションごとに抽出されたヒットはメザニンへと送られそこでミューオンの飛跡 (セ グメント) の再構成を行い、再構成されたセグメントの情報が Main FPGA へと送られる。 Main FPGA は受け取った各ステーションにおけるセグメントの情報をもとに  $P_T$  の評価を 行い、再構成されたセグメントの情報と  $P_T$  の情報を Sector Logic へ送信する。また FPGA は FELIX への MDT ヒット情報の送信を行う。また Main FPGA と CSM の間にはコンフィ グレーション用のパスが繋がっており、CSM 回路のコンフィグレーションを行うことが可 能である。図 3.5 に MDT トリガーロジックのブロックダイアグラムを示す。



(a) Two-stations: deflection angle



(b) Three-stations: sagitta

図 3.3: MDT におけるミューオンの運動量測定の方法。(a) 2つのステーションで再構成さ れた飛跡の角度βを測ることでミューオンの磁場による飛跡の変化から運動量を測定する。 (b)3つのステーションでの飛跡の位置を求め、2つのステーションでの飛跡の位置を結ん だ直線と、もう1つのステーションの飛跡の位置の距離からミューオンの磁場による飛跡 の変化から運動量を測定する。



図 3.4: MDT Trigger processor に実装される ATCA ブレードの概略



図 3.5: MDT トリガーのブロックダイアグラム

#### 3.3.3 Hit Extractor

Hit Extractor(図 3.6) では Sector Logic から送られたヒットの位置情報 (Region of Interest RoI) と時間情報を用いてセグメント再構成に用いる MDT のヒットの抽出を行う。"RoI processor' は'RoI の位置の情報をその範囲の MDT チューブの ID へ変換し、"tube range LUT" と"MDT hit calibration" へと送信する。"tube range LUT" では各レイヤーにおけ る該当するチューブの ID の範囲に変換する。

Barrel 領域では Inner、Middle、Outer でそれぞれ RPC のヒット情報をもとに抽出する MDT の範囲を決定する。図 3.6(a) のように各ステーションにおける MDT の上下 2 層の RPC のヒット情報から MDT チューブにおける RoI の位置と傾きを決定し、RPC2 層にヒッ トがなかった場合、他の 2 つのステーションの情報を用いてそのステーションにおける位 置と傾きを決定する (図 3.6(b))。MDT における RoI の位置と傾きの情報から図 3.6(c) の ように抽出する範囲を決定する。抽出する領域は Inner、Middle においては各層における RoI の位置から±3 チューブ、Outer においては±6 チューブとしている。これにより本物の ミューオンに対して 95 %以上のヒットの抽出が可能であり、Outer では磁場による飛跡の変 化が大きくなるため Inner、Middle より範囲を広く取っている。Endcap 領域では Middle、 Outer での TGC のヒット情報をもとに抽出する範囲を決定する。



図 3.6: Hit Extractor のブロックダイアグラム

抽出する領域の幅は Inner と Outer でチューブ7つ分で、Outer で 13 チューブ分とする ことで本物のミューオンに対して 95%以上のマッチングが可能である。Outer では磁場の 違いにより RoI の外挿が正確にできないため、抽出する領域を広くとっている。


図 3.7: (a)Barrel Middle ステーションにおける位置と方向の決定。赤の四角が RPC、青の丸が MDT チューブを表している。白の丸が RPC のヒットであり、矢印が RPC のヒットから定められる方向を示していて、十字のマークがその RoI の位置を表している。(b)BI と BO にのみ RPC2 層のヒットがあり BM には 1 つしかヒットがなかった場合のにおける RoI の外挿法。BIL の情報から外挿した直線と BOL の情報から外挿した直線 (点線)を用いて実線のような RoI の位置と角度を決定する。(c)RoI の方向と位置による MDT ヒットの 抽出の方法。図の矢印から ±3 チューブの幅にあるヒットを抽出する。黒塗の丸が抽出する領域を決定する 2 つの MDT チューブをあらわしている。

#### 3.3.4 セグメント再構成

Hit Extractor で抽出された MDT のヒット情報を用いて、メザニンボード上でセグメントの再構成が行われる。メザニンボードのデザインは現在2つの案が存在し、一つは FPGAを用いたセグメント再構成であり、もう一つのデザインは Associative Memory を用いたセグメント再構成の方法である。本論文は AM を用いたセグメント再構成についての研究をまとめたものであり、以降の章では Associative Memory によるセグメント再構成の方法とその性能についての研究の結果を記す。

# **第**4章 Associative Memory 技術を用いた オンラインミューオン飛跡再構成

## 4.1 Accosiative Memoryの概要

Associative Memory(AM)とは、Content Addressable Memory(CAM)を用いた高エネル ギー実験の分野では主に高速で飛跡再構成を行うためのパターン認識を行う装置として用 いられている装置である。図4.1に4層の検出層を持つ検出器に対してAMを用いるパター ン認識を行う場合の例として、Associative Memoryの構造のブロックダイアグラムを示す。



図 4.1: Associative Memory のブロックダイアグラム。黄色で示した箇所及び白い四角の 部分が CAM cell

図 4.1 は 4 層の検出層を持つ検出器に対して AM を用いて飛跡再構成を行う場合の例であ る。各 CAM cell には検出層 1 層分の Hit 情報 (Hit した位置の座標など) が記憶されてお り、4 つの CAM cell を合わせて検出層 4 層分の情報を持った一つの飛跡を記憶している。 図の黄色で示した Cell word1 つが1 つのヒットパターンを記憶しており、この図では Cell 0 から Cell 3 まで 4 つのヒットパターンを記憶している。検出器に HIt があった場合それ らの Hit 情報は対応する各層ごとに全ての Cell に同時に送られ、各 word で、送られてき た Hit 情報と自身が記憶している情報とが一致するかの判定を行う。送られてきた Hit 情報 と記憶している情報が一致した場合、FF(Frip Frop) がオンになりその信号線が Majority Logic に送られ、その信号線はリセット信号が送られるまで維持される。したがってすべ てのヒット情報が CAM cell に送り終わった段階ですべての Majority Logic を通過するパ ターンが Output Bus から出力される。。また、4層全てでマッチした場合のみに限らず、 例として4層中3層がマッチした場合に Pattern Finding 出来たパターンとして後段に送る よう設定することも可能である。このように条件を緩めることにより、Pattern Finding の inefficiency を抑制することができる。

AM は現在 ATLAS の Fast Tracker System(FTK) 用いられており、さらに Phase2 アッ プグレードにおいては HTT 及び MDT トリガーへの導入が計画されている。HTT に導入 される AM と MDT トリガーに導入される AM は共通のハードウェアを用いた設計を考え ており、主なハードウェアへの制約はその共通設計に準じるものとなっている [10]。

AM に記憶されるパターンの集まりをパターンバンクといい、AM を用いた飛跡再構成 をする上で最も重要となるのは、AM の容量内で如何にパターン漏れや無駄なパターンの ないパターンバンクの作成 (パターントレーニング) できるかということである。

# 4.2 MDTトリガーへの応用

Associative Memory を MDT トリガーへ応用する場合、パターンマッチングに必要なヒット情報はチューブのチャンネル番号、 符号付きのドリフト半径の2種類である

チューブのチャンネル番号は10bitで表現され、全てのチューブ1つ1つがセクターごと に個別の番号を持っている。ドリフト半径はチューブのドリフト時間からドリフト距離を 求める関数である *r-t* function を用いて与えられる。ドリフト半径の符号は飛跡がチュー ブ中心の右側を通ったか、左側を通ったかを決める符号である。表4.1に MDT チューブの ヒット情報の内訳を示す。全16bitの内10bitでチューブ番号を表現し、4bitでドリフト半 径を表現する。MDT チューブの半径は15mm なのでもっとも細かい場合で1mm 単位でド リフト半径を表現できる。1bitはドリフト半径の符号を表現し、残りの1bitは予備として 用いる。また表4.2に CAM に記憶される18bitの情報の内訳を示す。CAM に記憶される 情報には、MDT の Hit 情報16bit に加えて後述する Ternary bit を適応する bit の情報が記 憶される。LOMDT トリガーの場合は6層情報即ち6つの CAM cell でのパターンマッチン グが行われ、6層中4層、5層、6層でのパターンマッチングを行う(図4.2)。Barrel Inner はドリフトチューブ8層の構造を持つが、ほかのステーションと同じ6層でのマッチングを するために、最内層の2つのチューブはパターンマッチングには用いない設計としている。

	spare	tube channel number	$\operatorname{sign}$	drift radius
number of bits	1	10	1	4

表 4.1: MDT チューブ	のヒット	情報の内訳
-----------------	------	-------

	spare	tube channel number	$\operatorname{sign}$	drift radius	ternary bit indication
number of bits	1	10	1	4	2

表 4.2: AM の CAM に記憶される 18bit の内訳



図 4.2: LOMDT トリガーにおけるパターンマッチング。6tube の情報が Majority Logic に送られ 4/6 もしくは 5/6、6/6 でマッチングしたパターンの情報がアウトプットされる

#### Ternary bit

Ternary bit は 1 つの bit が'0'、'1' または'X' を表現する。CAM の bit に'X' が入ってい る場合、その bit ではマッチングを行わず、その bit 以外の bit でマッチングを行う。'X' が 割り当てられた bit は Don't care bit(DC bit) と呼ばれ、MDT の場合はドリフト半径を表 す bit に最大で 2bit 分適応される。CAM cell 内にはドリフト半径を表す 4bit のうち下位 2bit を通常の bit として使うか DC bit として使うかを指定する 2bit が記憶されている (表 4.2 の ternary bit indication)。 DC bit を用いた際の利点について図 4.3 のような例を用いて説明する。図の右で示した 青、赤の2つの飛跡を記憶しようとする場合、次の二通りのやり方が考えられる。1. 図中 央上のように粗い分解能でパターンを定義し、2つの飛跡全てを2つのパターンで表現する 方法。この場合パターン数は抑えられるがノイズヒットによるミスマッチのレートが高く なる恐れがある。2. 図中央下のように細かい分解能でパターンを定義し2つの飛跡それぞ れを1パターンとして記憶する方法。この方法ではノイズヒットによるミスマッチのレー トを抑えることができるがパターン数が増加し容量を超えてしまう恐れがある。そこで検 出層の1層目と3層目にそれぞれ1bitずつDC bitを導入することで1層目と3層目のみ通 常の2倍の Bin 幅でパターンを定義することができ、パターン数を1つに抑えつつノイズ ヒットによるミスマッチのレートを抑えたパターンの作成が可能となる。



図 4.3: DC bit によるパターン数削減の例。実線の丸がヒットがあった MDT チューブ、点 線がドリフト半径の Bin 幅を表している。またヒットがあったチューブにおけるドリフト 半径を黄色で表している。本来は MDT チューブは各ステーション 6 層または 8 層だがこ の図では省略して 3 層のみを描いている。1 層目と 3 層目のドリフト半径を表す bit の下 位 1bit に Ternary bit を導入し、0b001X のようにすることで 2=0b0010 と 3=0b0011 の両 方を表現できる

# 4.3 ハードウェア構成

AM を用いた L0MDT トリガーは、Phase2 Hardware Tricking Trigger(HTT) プロジェク トで開発される Pattern Recognition Mezzanine(PRM) を用いて設計される。PRM には 24 の Associative Memory ASIC が搭載され約 9.2M のパターンを記憶している (AM ASIC1 つあたり  $4.0 \times 10^5$  個のパターンを記憶できる)。PRM では PRM 上の Mezzanine FPGA を 通じて Main FPGA と通信し Main FPGA から入力されたデータを受け取り、AM で見つ かったセグメントの候補を出力する (図 4.4)。PRM の載ったボード上には High Bandwidth Memory(HBM) が搭載されており、HBM には AM 内のパターンと 1 対 1 に紐づけされた パラメーターが保存されている。FPGA は PRM から送られてきたパターンの情報と HBM 上に保存されているそのパターンのパラメーターを次の運動量を決定するパートに送信す る (図 4.5)。PRM 上の 24 の AM ASIC は 6 つで 1 つのグループを構成し、1 つのもしくは 2 つのグループが MDT の 1 セクターを担当する。表 4.3 に各グループが担当するセクター の割り当てを示す。



図 4.4: PRM の構成。Main FPGA から受信した MDT のヒット情報は PRM 上の FPGA を通じて AM に渡され、AM からマッチした情報を受け取り、その情報を Main FPGA へ送信する。

	BL	BS	BL(sector=13)	BS(sector=12,14)	EL	ES
group1	BIL	BIS	BIL	BIL	$\mathrm{EML}(1)$	$\mathrm{EMS}(1)$
group2	BML	BMS	BME	BGM/BMF	$\mathrm{EML}(2)$	$\mathrm{EMS}(2)$
group3	BOL(1)	BOS(1)	BOL(1)	BOS(1)	EE/EIL4	EE/BIS78
group4	BOL(2)	BOS(2)	BOL(2)	BOL(2)	EOL	EOS

表 4.3: PRM 毎の AM ASIC の 4 グループの割り当て。BOL と EML は 2 グループが担当 し、それ以外のセクターは 1 グループが担当する。

AMによるパターンマッチングは6層中4層でのマッチング、6層中5層でのマッチング、 6層中6層でのマッチングの3つのマッチング条件で行う。6層中6層のマッチングができ たらそのパターンを優先し、6層でのマッチングが出来なかったら5層、5層でもマッチン グができなかったら4層というように優先順位をつける。これによりアウトプットされる パターンの数を抑えることができる。3つの条件でのパターンマッチングを並行して行う ことができるよう、1つのグループに属する6つのAMASICをさらに6層マッチングを行



図 4.5: PRM のブロックダイアグラム

う ASIC、5 層マッチングを行う ASIC、4 層マッチングを行う ASIC の 3 つに分け、2 つの ASIC で 1 つのマッチング条件でのパターンマッチングを行う。またこの時、3 つのマッチ ング条件を行う ASIC には全て同じパターンバンクが記憶されるため、1 つのセクターで 用いることができるパターンバンクは AM ASIC2 つ分となる (図 4.6)。1 つのセクターで 2 グループ用いるセクター (BOL、EML) では AM ASIC4 つ分のパターンバンクを用いるこ とができる (図 4.7)。表 4.4 に各ステーションのセクターごとに用いることができるパター ンバンクの容量を示す。

L0MDT トリガーの AM による pattern finding の手順は以下のようになる。

- TGC/RPC からの情報を元に MDT のセグメント再構成を行うヒットを選別する。
- 選別された情報を 16bit に変換 (表 4.1)。
- 選別されたすべてのヒット情報を Associative Memory に入力
- パターンバンクを参照し、パターンマッチングを行う。その際6/6マッチングの結果を優先し、6/6マッチングができなければは5/6マッチング、4/6マッチングの結果を出力する。
- FPGAはPRMから受け取ったパターンのIDを参照し、対応するトラックのパラメーターをHBMから受け取る。
- FPGA は受け取ったパラメーターを後段の運動量決定の段階へ出力する。



図 4.6: 6 つの AM ASIC をもつ1 つのグループは3 つに分けられ、それぞれ違う条件での パターンマッチングを行う。3 条件でのパターンマッチングは全て同じパターンバンクを 用いて行われる。



図 4.7: 2つのグループも同様に3つの条件でパターンマッチングを行う。この場合、1つ の条件につき4つの ASIC を用いることが可能である。

ステーション	パターンの最大数	AM ASIC の数
BIL	800k パターン	2ASICs for full set of patterns
BIS	800k パターン	2ASICs for full set of patterns
BML	800k パターン	2ASICs for full set of patterns
BMS	800k パターン	2ASICs for full set of patterns
BOL	1600k パターン	4ASICs for full set of patterns
BOS	1600k パターン	4ASICs for full set of patterns
EML	1600k パターン	4ASICs for full set of patterns
EMS	1600k パターン	4ASICs for full set of patterns
EOL	800k パターン	2ASICs for full set of patterns
EOS	800k パターン	2ASICs for full set of patterns

表 4.4: 各ステーションごとの、1 つのセクターに用いることができるパターンバンクの容量

# 第5章 ソフトウェアシミュレーションによる パターンバンク作成および最適化

本研究では Associative Memory を用いた L0MDT トリガーにおける飛跡再構成システム の導入に向け、MDT による飛跡再構成をシミュレートするソフトウェアを作成し、パター ンバンクの作成及び作成したパターンバンクを用いた飛跡再構成の性能評価を行った。

# 5.1 パターンバンク作成

この節ではソフトウェアシミュレーションにおけるパターンバンクの作成 (パターント レーニング) 方法及び作成したパータンバンクの基本的な情報について記述する。以下に LOMDT トリガーに導入する上でのハードウェアの条件についてまとめる。

- L0MDTトリガーはBarrel Small、Large、Endcap Small、Large それぞれA-side、C-side でそれぞれ8つのトリガー判定を行うセクター (トリガーセクター)を持ち、合計で64Trigger Sector を持つ。
- AMのパターンバンクはトリガーセクター内のそれぞれのステーション毎に作成する。
- 各ステーション毎のパターンバンクに収まるパターン数の上限は800kもしくは1600kのパターンが収まる。
- パターンマッチングは Majority Logic の3つの条件 (6/6、5/6、4/6マッチング)で並 列に走る。
- MDT1 層ごとに導入する DC bit の上限は 2bit、したがって1パターンごとに最大で 12bit の DC bit が導入される (2bit × 6tubes)。
- ドリフト半径は最小で 1mm の Bin 幅でパターン化される。

#### 5.1.1 パターントレーニングの手順

パターントレーニングはモンテカルロシミュレーションを用いたシングルミューオンの 大統計のサンプルを用いて行う。

- η(|η| < 2.5)、φ分布が一様となる。</li>
- $6 \text{GeV} < P_T < 500 \text{GeV}$ の範囲で $1/P_T$ が一様となる。
- Pileup や cavern backgound は考慮しない

シングルミューオンイベントの統計は約 290M イベントである。ミューオンサンプルをパ ターン化するにはまず、オフラインセグメントの直線飛跡を *z* – *r* 平面上で

$$r = p_0 \times z + p_1 \tag{5.1}$$

の式で表現し、オフラインセグメント毎にパラメーター po, p1 を決定する。次にそのセグ メントの角度、位置からチューブ中心と直線との距離を計算する。その距離が15mm以内 であったならそのチューブは直線飛跡によるヒットがあったチューブとして扱われ、チュー ブの中心と直線飛跡との距離をそのチューブにおけるヒットのドリフト半径とする。ドリ フト半径はあらかじめ決められた Bin 幅で Binning され、ヒットのあったチューブの番号 と合わせて MDT1 層分の情報が作成される。このように実際のチューブのヒット情報を用 いず、直線飛跡に対する理想的なチューブ、ドリフト半径の組み合わせを使ってパターン を定義することで、multiple scattering や $\delta$ -ray 発散の影響を受けないパターンを作成でき る。こうして得られたチューブの番号と Binning された符号付きのドリフト半径を合わせ た情報を1つのステーションにつき6層分 (Inner ステーションは8層分) 集めてそのステー ションにおけるパターンとして定義する。AM に記憶されるパターンは MDT1 層につき1 つのヒットを持つとして定義しているため、オフラインセグメントが同じ層で2つのヒッ トを残す場合、どちらのヒットをパターンとして用いるかを選択しなければならない。1層 に2つのヒットを残す場合、チューブに割り当てられる番号の小さいチューブのヒットを パターンとして用いる。得られたパターンはパターンバンクに記憶される前にパターンバ ンク内のすべてのパターンを参照し、同じパターンがすでに記憶されているかのチェック が行われる。パターンバンク内に同じパターンが入っていなかった場合はそのままパター ンバンクに記憶され、すでに同じパターンが記憶されている場合は、そのパターンの人気 度 (Popularity) を1つ上げる。290M イベント全ての計算が終わった段階でパターンバンク の作成は終了し、それぞれのパターンについて、表 5.1 に示すパターンを特徴づける量を 計算する。

パラメーター	パラメーターの意味
Popularity	パターントレーニングでそのパターンが現れた回数
$\mathrm{N}_{\mathrm{Dummy}}$	パターンに使われている Dummy hit の数
$N_{DC}$	パターンに使われている DC bit の数
$ heta_{ m pattern}$	パターン化する際に用いたオフラインセグメントの角度の平均値
RMS of $\theta$	パターン化する際に用いたオフラインセグメントの角度の分散
$\langle p_i \rangle$	パターン化する際に用いたオフラインセグメントの
	直線飛跡のパラメーターの平均値 $r=p_0 imes z+p_1$
RMS of $p_i$	直線飛跡のパラメーターの分散

表 5.1: パターンを特徴づける量。パターンバンク作成後バンク内のすべてのパターンに対して計算される。

#### 5.1.2 Dummy Hit & Mask Hit

パターンバンクを作成していく上でステーションによってはチェンバーとチェンバーの 間にギャップが存在し、オフラインセグメントがすべての MDT の層を通過しない領域が 存在する。チェンバー間のギャップの BIL の例を図 5.1 に示す。



図 5.1: BIL に存在するチェンバー間のギャップ。左:BIL のセクターごとのチェンバーの z 分布。phi =3 を除く全てのセクターで |z| = 3.3mm にギャップがあることが分かる。 右:phi =1 のギャップ付近でのチューブの構造

6層のチューブの組み合わせで定義する通常の AM のパターンでは 6 層すべてを通過し ないミューオンの飛跡のパターンを定義できない。そこでこのギャップの領域を通過する ミューオンに対してもパターンが定義できるよう Dummy Hit というものを新たに導入す る。オフラインセグメントが MDT3 層しか通過しなかった場合、通過した 3 層に対しては 通常通りチューブの番号とドリフト半径の情報を CAM cell に記憶するが、通過しなかった 3 層については実際には存在しないチューブ番号のヒット (Dummy hit) を記憶させ、6 層の パターンを構成できるようにする (図 5.2)。さらに、3 層しかヒットしなかったセグメント に対するパターンマッチングを行う際にはパターンに含まれる Dummy hit が入ったチュー ブの内 1 つのチューブを必ずマッチングができたチューブとして取り扱う (Mask hit)。こ れにより 3 層しかヒットしなかったセグメントに対しても 6 層中 4 層のマッチングが可能 となる。この Mask hit の機能は AM にすでに実装されている Wild card と言われる機能を 使うことで実現できる。

#### 5.1.3 Don't Care bit study

4.2 節で述べたように Associative Memory 内の CAM cell に記憶される情報には 2bit の Ternary bit が含まれており、ドリフト半径を表す bit に対して最大で 2bit の DC bit を適応することが出来る。4.2 節で述べたように 1 つのチューブに 1 つの DC bit を導入することはそのチューブにおける Bin 幅を 2 倍荒くすることに対応するので、2bit 導入することで最大 4 倍まで Bin 幅を大きくすることが可能となる。また 6 層のチューブに対して 6 つの CAM cell が割り当てられるので、1 つのパターンに対して最大で 12 の DC bit を導入できる。さらに CAM cell つ 1 つに DC bit を導入できるため、パターン毎に違った DC bit



図 5.2: Dummy hit を適応するパターンの例。ミューオンが MDT6 層を通過しなかった場合、通過した層は通常通りパターン化し、通過しなかった層に対しては Dummy hit を入れることで6 層通過しなかったミューオンに対しても6 層のパターンを作ることが可能となる。

の設定をすることができ、パターン毎に最適なドリフト半径の Binning を設定することが 出来る。本研究では以下の手順でパターン毎に最適な DC bit の割り当てを決定し、パター ン数の増加を抑えた最も良い分解能を持つパターンバンクを作成した。

- 1. 細かい Bin 幅でのパターンバンクを作成する。今回はすべてのステーションで 1mm の Bin 幅で作成した。
- 2. パターン毎に用いることができる最大の DC Bit の数 ( $N_{DC}^{max}$ )を設定する。 $N_{DC}^{max} = 1$ の場合、1つの DC bit を導入したパターンもしくは DC bit を導入しないパターンとなる。 $N_{DC}^{max} = 2$ のパターンバンクの場合、次の4種類のパターンとなる。1.DC bit を導入しないパターン、2.DC bit1つを導入したパターン、3.2層に1つずつ DC bit を導入したパターン、4.1つの層に2つの DC bit を導入したパターン。
- 1. で作成したパターンバンクを参照し、Popularityの順番で並べたリストを作成する。その次にリストの1番上のパターンに対して N<sup>max</sup> 個の DC bit を導入した新しいパターンを作成する。この時どの層にいくつの DC bit を導入するかの設定が複数存在するが、それらのに対して1つずつ次のようなテストを行う。
- 4. DC bit を導入した新しいパターン (new DC pattern) が二つ以上のパターンを表現で きるかのチェックを行う。もしリスト内にその DC bit の設定で表現できる別のパター ンが1つ以上見つかったなら new DC pattern は二つ以上のパターンを表現できるパ

ターンとしてパターンバンクに記憶し、new DC pattern の元となるパターンと、その見つかったパターンをリストから取り除く。もしリスト内に new DC pattern で表現できる別のパターンがなければ、次の DC bit の設定のパターンについて同じテストを行う。もしどの DC bit の設定もリスト内の別のパターンを含まない場合、そのパターンは DC bit の設定の必要のないパターンとしてパターンバンクに記憶し、リストから取り除く。

- 5. リスト内のパターンがなくなるまで 3. と 4. を繰り返す。この段階では N<sub>DC</sub> 個の DC bit を持つパターンと DC bit を一つも含まないパターンの2種類のパターンがバンク 内に記憶されている。
- 最後に Nmax 個の DC bit を持つパターンに対し、DCbit を取り除いたときにそのパ ターンに含まれるすべてのパターンを表現できるかどうかのテストをすべての DC bit について行い、そのパターンに含まれる全てのパターンを表現する最小の DC bit の 設定を見つける。

以上の手順により、パターン数を削減しつつ、より良い分解能を持つパターンバンクの作 成ができる。図 5.3 に BIL、BML、BOL、EML、EOL での DC bit によるパターン数削減 のグラフを示す。



図 5.3: BIL(station1)、BML(station3)、BOL(station5)、EML(station19)、EOL(station22) における N<sup>max</sup> とパターン数の関係のグラフ。点線はパターンバンクの容量の上限 (BIL、 BML、EOL で 800k、BOL、EML で 1600k) を示している。

DC bit を導入することにより全てのステーションにおいて最も細かい Bin 幅である 1mm の Binning でパターンバンクを作成することが可能となった。DC bit を最大の 12 まで導 入しても 800k に収まらなかった BML と Endcap 領域において用いる DC bit の数が多い EML に対しては 4 つの ASIC を用いた 1600k のバンクを用いることで、Bin 幅を最小にし つつより DC bit の数が少ないバンクを作成した。表 5.2 に各ステーションにおける N<sub>DC</sub> の数とパターン数の表を示す。

	BIL	BML	BOL	EML	EOL
$\mathrm{N_{DC}^{max}}$	2	11	11	4	6
パターン数	770827	818222	1426333	1619957	781135

表 5.2: 各ステーションにおける N<sub>DC</sub> とパターン数

## 5.2 パターンバンクの基本的な情報

本研究では 5.1 で述べた手順を用いて作成したパターンバンクの性能評価を行った。Large セクターの phi=1 のセクターのパターンバンクを作成した。Large セクターでのパターン バンクの設定 (N<sup>max</sup> 等) はそのまま Samll セクターでも用いることができる。以下に作成し た 5 つのパターンバンク (BIL、BML、BOL、EML、EOL) の基本的な情報について記述 する

#### 5.2.1 BIL

表 5.3 に BIL におけるパターン数及び、dummy hit が含まれるパターンの数、各 DC bit の数毎のパターン数を示す。表 5.4 は各層でのドリフト半径の Bin 幅を表す。

図 5.4 に BIL のパターンバンクの基本的なプロットを載せる。(a) はバンク内のパターン Popularity 分布を表している。(b) はパターンの $\eta$ 分布をパターンに含まれている Dummy hit の数毎にプロットしたものである。図中の点線はチェンバーの境界を表しており、チェ ンバーの境界付近で多く Dummy hit が使われていることが分かる。(c) はパターンの DC bit の数の分布についてプロットしたものである。図 5.3 で示すように、BIL(station1) は N<sub>DC</sub><sup>max</sup> = 2 でパターン数の上限である 800k を下回っているので、BIL のパターンには最大 で2 つの DC bit が含まれる。(d) はパターンに紐づけされた直線飛跡(表 5.1 参照)の傾き (横軸) と直線飛跡の位置の角度情報(縦軸)の関係についてプロットしたものである。(e) は DC bit の数毎にパターンに対応する直線飛跡の角度の分散をプロットしたものであり、(f) は (e) のプロットをログスケールで表したものである。このプロットから、DC bit の数が 大きくなるにつれ直線飛跡の分解能が低下し、分散が大きくなっていることが分かる。残 る 4 つの Station においても同様にバンクの基本的な情報を示す。



図 5.4: BIL におけるパターンバンクの基本的な情報. (a) Popularity, (b) Dummy hit の数 毎のパターンの $\eta$ 分布, (c) バンク内のパターンの DC bit の数の分布, (d) パターンに対応 する直線飛跡の角度と位置の関係, (e) DC bit の数毎のパターンに対応する角度の分散の分 布, (f) (e) をログスケールで表したもの

Number of patterns	770827	
Number of patterns with dummy hits	35951	0.047
Number of pattern with 0 DC bits	217022	0.282
Number of pattern with 1 DC bits	324985	0.422
Number of pattern with 2 DC bits	228820	0.297
Number of pattern with 3 DC bits		0.0
Number of pattern with 4 DC bits		0.0
Number of pattern with 5 DC bits		0.0
Number of pattern with 6 DC bits		0.0
Number of pattern with 7 DC bits		0.0
Number of pattern with 8 DC bits		0.0
Number of pattern with 9 DC bits		0.0
Number of pattern with 10 DC bits		0.0
Number of pattern with 11 DC bits		0.0
Number of pattern with 12 DC bits		0.0

表 5.3: BIL におけるパターン数。表の一番右の列はそのパターン数のバンク内のパターン 数に対する割合を示す。

(multi-layer, tube-layer)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)
binning [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 5.4: BIL 各層でのドリフト半径の Bin 幅

### 5.2.2 BML



図 5.5: BML におけるパターンバンクの基本的な情報. (a) Popularity, (b) Dummy hit の 数毎のパターンの $\eta$ 分布, (c) バンク内のパターンの DC bit の数の分布, (d) パターンに対応する直線飛跡の角度と位置の関係, (e) DC bit の数毎のパターンに対応する角度の分散の 分布, (f) (e) をログスケールで表したもの

Number of patterns	818222	
Number of patterns with dummy hits	32117	0.039
Number of pattern with 0 DC bits	167707	0.205
Number of pattern with 1 DC bits	49271	0.060
Number of pattern with 2 DC bits	73393	0.090
Number of pattern with 3 DC bits	59675	0.073
Number of pattern with 4 DC bits	82849	0.101
Number of pattern with 5 DC bits	90677	0.111
Number of pattern with 6 DC bits	91505	0.112
Number of pattern with 7 DC bits	67234	0.082
Number of pattern with 8 DC bits	67536	0.083
Number of pattern with 9 DC bits	30398	0.037
Number of pattern with 10 DC bits	18242	0.022
Number of pattern with 11 DC bits	19735	0.024
Number of pattern with 12 DC bits		0.0

表 5.5: BML におけるパターン数

(multi-layer, tube-layer)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)
binning [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 5.6: BML 各層でのドリフト半径の Bin 幅

# 5.2.3 BOL

Number of patterns	1426333	
Number of patterns with dummy hits	26525	0.019
Number of pattern with 0 DC bits	298531	0.209
Number of pattern with 1 DC bits	88020	0.062
Number of pattern with 2 DC bits	125273	0.088
Number of pattern with 3 DC bits	104802	0.073
Number of pattern with 4 DC bits	141511	0.099
Number of pattern with 5 DC bits	156286	0.110
Number of pattern with 6 DC bits	158524	0.111
Number of pattern with 7 DC bits	117880	0.083
Number of pattern with 8 DC bits	115624	0.081
Number of pattern with 9 DC bits	52304	0.037
Number of pattern with 10 DC bits	32891	0.023
Number of pattern with 11 DC bits	34687	0.024
Number of pattern with 12 DC bits		0.0

表 5.7: BOL におけるパターン数



図 5.6: BOL におけるパターンバンクの基本的な情報. (a) Popularity, (b) Dummy hit の数 毎のパターンの $\eta$ 分布, (c) バンク内のパターンの DC bit の数の分布, (d) パターンに対応 する直線飛跡の角度と位置の関係, (e) DC bit の数毎のパターンに対応する角度の分散の分 布, (f) (e) をログスケールで表したもの

(multi-layer, tube-layer)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)
binning [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 5.8: BML 谷僧でのドリフト半径の Bi	in
---------------------------	----

# 5.2.4 EML

Number of patterns	1619957	
Number of patterns with dummy hits	45423	0.028
Number of pattern with 0 DC bits	321086	0.198
Number of pattern with 1 DC bits	420695	0.260
Number of pattern with 2 DC bits	415401	0.256
Number of pattern with 3 DC bits	302162	0.187
Number of pattern with 4 DC bits	160613	0.099
Number of pattern with 5 DC bits		0.0
Number of pattern with 6 DC bits		0.0
Number of pattern with 7 DC bits		0.0
Number of pattern with 8 DC bits		0.0
Number of pattern with 9 DC bits		0.0
Number of pattern with 10 DC bits		0.0
Number of pattern with 11 DC bits		0.0
Number of pattern with 12 DC bits		0.0

表 5.9: EML におけるパターン数

(multi-layer, tube-layer)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)
binning [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 5.10: EML 各層でのドリフト半径の Bin 幅



図 5.7: EML におけるパターンバンクの基本的な情報. (a) Popularity, (b) Dummy hit の 数毎のパターンの $\eta$ 分布, (c) バンク内のパターンの DC bit の数の分布, (d) パターンに対応する直線飛跡の角度と位置の関係, (e) DC bit の数毎のパターンに対応する角度の分散の 分布, (f) (e) をログスケールで表したもの

# 5.2.5 EOL

Number of patterns	781135	
Number of patterns with dummy hits	34623	0.044
Number of pattern with 0 DC bits	178974	0.229
Number of pattern with 1 DC bits	120453	0.154
Number of pattern with 2 DC bits	91598	0.117
Number of pattern with 3 DC bits	83699	0.107
Number of pattern with 4 DC bits	163545	0.209
Number of pattern with 5 DC bits	57590	0.074
Number of pattern with 6 DC bits	85276	0.109
Number of pattern with 7 DC bits		0.0
Number of pattern with 8 DC bits		0.0
Number of pattern with 9 DC bits		0.0
Number of pattern with 10 DC bits		0.0
Number of pattern with 11 DC bits		0.0
Number of pattern with 12 DC bits		0.0

表 5.11: EOL におけるパターン数

(multi-layer, tube-layer)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)
binning [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 5.12: EOL 各層でのドリフト半径の Bin 幅



図 5.8: EOL におけるパターンバンクの基本的な情報. (a) Popularity, (b) Dummy hit の数 毎のパターンの $\eta$ 分布, (c) バンク内のパターンの DC bit の数の分布, (d) パターンに対応 する直線飛跡の角度と位置の関係, (e) DC bit の数毎のパターンに対応する角度の分散の分 布, (f) (e) をログスケールで表したもの

# 5.3 パターンバンクの性能評価

HL-LHC における Backgound 環境をシミュレートしたサンプルを用いて 5.2 で作成した パターンバンクによるオンラインセグメント再構成の性能評価を行った。

テストには  $Z \rightarrow \mu\mu$  崩壊によるミューオンと HL-LHC 環境下における Pileup と cavern backgound を再現したサンプルを用いた。TGC/RPC トリガーによる Hit Extractor の情 報も用いる代わりに、オンラインセグメントの再構成を行うヒットの選別はオフラインセ グメントの情報を用いて行う。Hit Extractor での抽出する MDT チューブの範囲とおおよ そ同じになるようオフラインセグメントと MDT チューブの中心との差が  $|\Delta\eta| < 0.08$  にあ るヒットに対して AM によるセグメント再構成を行うまたオフラインミューオンに対して 以下の条件を課す。

- Cobined muon である
- ・ true muon である
- Barrel Inner ステーションで少なくとも4層以上にヒットする。それ以外のステーションでは3層以上にヒットする。

以下に各ステーションにおけるセグメント再構成の性能評価の結果について以下のような 6つのプロットを示す。

- (a) 一つのオフラインセグメントに対してアウトプットされたパターンの数を表している。
   ??で述べたようにパターンマッチングは6層中6層マッチング、6層中5層マッチング、6層中4層マッチングの3つのマッチング条件が平行に行われる。もし6層でマッチングができればその時のアウトプットされたパターンの数をヒストグラムにFillし、5層、4層での結果はFillしない。もし6層マッチングができなかったら5層でマッチングしたパターンの数をFillする。5層マッチもできなかったら4層での結果をFillする。6層中4層でもマッチングが出来なかったらそのオフラインセグメントは再構成できなかったものとして扱い、0にFillされる。0にFillされるセグメントのうち6層中4層でマッチングができなかったセグメントのうち、3層でのマッチングができたものに関しては青でFillをし、それ以下のものは白でFillをした。
- (b) オフラインセグメントの再構成に用いられた MDT チューブの層の数を表している。青のヒストグラムは上で述べた条件を満たすオフラインセグメントの数を表しており、赤はそのうちパターンマッチングによる再構成ができたものの数を表している。
- (c) オフラインセグメントの横方向運動量分布。青と赤は(b)と同様、条件を満たしたオフ ラインセグメントの数とそのうちセグメント再構成ができたものの数を表している。
- (d) (c) のヒストグラムの青と赤の比を表している。
- (e) オフラインセグメントのη分布。青と赤は(c)と同じ。
- (f) (e) の青と赤のヒストグラムの比をとったもの

BIL



図 5.9

BML





BOL





EML





EOL





Station	Good Segment	6/4 Matching Segment	Efficiency
BIL	8051	7677	$95.35_{-0.24}^{+0.23}$
BML	6709	6651	$99.14_{-0.12}^{+0.11}$
BOL	7056	7003	$99.25_{-0.11}^{+0.10}$
EML	5408	5375	$99.39\substack{+0.10 \\ -0.11}$
EOL	4241	4216	$99.41_{-0.13}^{+0.11}$

表 5.13: 各ステーションにおけるセグメント再構成の efficiency

図 5.9 から図 5.13 の (a) のプロットを見ると一つのオフラインセグメントに対してアウ トプットされたパターンの数は1にピークが立っており、高バックグラウンド環境下にお いても1つのオフラインセグメントのうち約7割で1対1のパターンマッチング出来てい ることがわかる。また図 5.9(b)(d) のプロットのプロットを見ると、Barrel Inner における パターンマッチングの inefficiency の多くはチェンバー間の境界を通過し、MDT 4層のみ に Hit したセグメントに対するものであり、チェンバー境界におけるパターン生成方法に ついてさらなる改善が今後の課題である。

#### 5.3.1 角度分解能

表 5.1 で示したように、バンク内のパターンにはトレーニングの際に用いたオフライン セグメントの直線飛跡のパラメーターが紐づけされている。以下にオフラインセグメント の直線飛跡の角度と、そのオフラインセグメントに対してパターンマッチングができたパ ターンのパラメータから得られた直線飛跡の角度との差のプロットを示す。5.9 から 5.13 の (a) で示したように、一つのオフラインセグメントに対してパターンマッチングで見つかる パターンが 2 つ以上見つかる場合も存在するため、得られた複数のパターンから 1 つのパ ターンを選択する必要がある。以下に (a) オフラインセグメントの角度と最も近い角度の パターンを選んだ場合、(b)Popularity が最も大きいパターンを選んだ場合、(c)DC bit が 最も小さいパターンを選んだ場合、(d) パターンの角度の分散が最も小さいパターンを選ん だ場合、のパターンとオフラインセグメントの角度の差のプロットを示す。また表 5.14 に 各プロットのガウシアンフィッティングをした際のσの値を示す。

BIL



図 5.14: BIL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの角度の差

### $\mathbf{BML}$



図 5.15: BML におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの角度の差

# BOL



図 5.16: BOL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの角度の差

### EML



図 5.17: EML におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの角度の差

### EOL



図 5.18: EOL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの角度の差
Station	$Min\Delta\theta \ [\times 10^{-4} rad]$	Popularity[ $\times 10^{-4}$ rad]	DC bits[ $\times 10^{-4}$ rad]	$RMS[\times 10^{-4} rad]$
BIL	$9.484 \pm 0.096$	$10.793 \pm 0.111$	$10.805 \pm 0.113$	$10.977 {\pm}~0.118$
BML	$15.405 \pm 0.168$	$18.530 \pm 0.225$	$16.792 \pm 0.188$	$17.311 \pm 0.199$
BOL	$14.767 \pm 0.163$	$18.141 \pm 0.211$	$16.286 \pm 0.178$	$16.162 \pm 0.175$
EML	$13.950 \pm 0.152$	$15.542 \pm 0.179$	$15.546 \pm 0.177$	$15.666 \pm 0.181$
EOL	$20.472 \pm 0.309$	$22.901 \pm 0.393$	$22.256 \pm 0.361$	$22.457 \pm 0.365$

表 5.14: 各ステーションにおける角度分解能

#### 5.3.2 位置分解能

角度分解能と同様にパターンマッチングよるセグメント再構成の位置分解能の評価を行 う。位置分解能の評価はセグメントごとに直線飛跡の代表点を決めて行う。直線飛跡の位 置(代表点)は、Barrel領域の場合 *r* – *z* 平面上で代表点の *r* 座標をあらかじめ決め、式 5.1 より

$$z = (r_{\text{R}\pm n} - p_1)/p_0 \tag{5.2}$$

より代表点のz座標を決定する。Endcap領域の場合、代表点のz座標をあらかじめ決めて、

より代表点の r 座標を決定する。今回、 $z_{代表点}$ 及び  $r_{代表点}$  はそれぞれのステーションにおけるチェンバーの中心とした。以下に 5.3.1 節同様、(a) $z_{代表点}$  または  $r_{代表点}$  の差が最も小さいパターンを選んだ場合、(b)Popularity が最も大きいパターンを選んだ場合、(c)DC bit が最も小さいパターンを選んだ場合、(d) 位置の分散が最も小さいパターンを選んだ場合のパターンとオフラインセグメントの代表点の差のプロットを示す。また表 5.15 に各プロットをガウシアンフィットした際の  $\sigma$  の値を示す。

BIL



図 5.19: BIL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの位置の差

### BML



図 5.20: BML におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの位置の差

## BOL



図 5.21: BOL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの位置の差

### EML



図 5.22: EML におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの位置の差

## EOL



図 5.23: EOL におけるパターンマッチングのオフラインセグメントとの位置の差

Station	$Min\Delta$ Pos [mm]	Popularity[mm]	DC bits[mm]	RMS[mm]
BIL	$0.196 {\pm} 0.002$	$0.224{\pm}0.003$	$0.218 {\pm} 0.003$	$0.221{\pm}0.003$
BML	$0.359 {\pm} 0.010$	$0.426 {\pm} 0.018$	$0.405 {\pm} 0.015$	$0.407 {\pm} 0.016$
BOL	$0.349 {\pm} 0.009$	$0.397 {\pm} 0.015$	$0.388 {\pm} 0.013$	$0.391{\pm}0.013$
EML	$0.196 {\pm} 0.002$	$0.220 {\pm} 0.003$	$0.217 {\pm} 0.003$	$0.219 {\pm} 0.003$
EOL	$0.292 {\pm} 0.007$	$0.336 {\pm} 0.010$	$0.329 {\pm} 0.009$	$0.328 {\pm} 0.009$

表 5.15: 各ステーションにおける角度分解能

表5.14、表5.15を見ると表の一番左の、オフラインとの差が最も小さいパターンを選ん だ場合を除くと、1つのオフラインセグメントに対して複数パターンが見つかった場合、位 置分解能、角度分解能共に DC bit が最も小さいパターンを選んだ場合に最も分解能がよく なることがわかる。これによりオフラインの情報を使えない実際のシステムの場合は複数 のパターンが出力され時、DC bit が最も小さいパターンを選択することで最も良い精度で パターンマッチングができるということが分かった。

#### 5.3.3 *α*カットによる運動量識別性能

MDTにおける運動量識別は図 5.24に示すように、角度 $\beta$ もしくは sagitta を求めること で行う。 $\beta$ や sagita を用いて行う運動量識別は2つ以上のステーションでの再構成の情報 を用いて行われるため、1つのステーションでのみ再構成ができた飛跡に対しては運動量 識別を行うことができない。そこで1つのステーションでしか再構成が出来なかった場合、 角度 $\alpha$ を用いて運動量識別方法を行う。このように sagitta、 $\beta$ 、 $\alpha$ を組み合わせることで 最適な運動量識別のアルゴリズムを構成できる。本研究はその中でも角度 $\alpha$ についての性 能の確認を行った。



図 5.24: MDT における角度 β。2つのステーションにおける直線飛跡の角度の差によりそ のミューオンの磁場による曲率を測ることによって運動量の識別を行う。

### **角度** α

角度 α は図 5.25 で示すように直線飛跡の角度と直線飛跡の位置と衝突点を結んだ直線 (無限運動量直線)の角度との差で定義される。1つのステーションで見つかったパターン の直線飛跡の角度と、直線飛跡の代表点を通過する無限運動量直線の角度との差からその 飛跡の磁場による曲率を求め、運動量を推定することができる。図 5.26 に各ステーション におけるパターンの角度 α とオフラインセグメントの運動量 P<sub>T</sub> のとの関係を示す。BIL は ATLAS 検出器の構造上トロイド磁場よりも衝突点に近い位置に存在しているため、角度 α による運動量識別を行うことはできないので、残る4つのステーションについて α による 運動量識別を行う。また図 5.26 では一つのオフラインセグメントについて複数のパターン が見つかった場合、α が最もオフラインセグメントに近いパターンを採用している。

#### **MDT** chamber



図 5.25: MDT における角度 α



図 5.26: パターンマッチングで見つかったパターンの角度  $\alpha$  と 1/P<sub>T</sub>の関係。BIL を除く 4 つのステーションにおいて、1/P<sub>T</sub> が大きくなるほど (P<sub>T</sub> が小さくなるほど) 無限運動量直線と直線飛跡の角度の差  $\alpha$  が大きくなってることが分かる。複数のパターンが見つかった場合は  $\alpha$  が最もオフラインセグメントに近いパターンを採用している。

#### 角度 α による運動量識別

本研究ではこの角度  $\alpha$  を用いて各ステーションの各チェンバー毎に  $\alpha$  の閾値を設定し、 ミューオンの運動量 20GeV における運動量識別の性能を評価した。 $\alpha$  の閾値の決定はバッ クグラウンドのないサンプルを用いて行った。20GeV < P<sub>T</sub> < 21GeV において 95% 以上の efficiency となるように  $\alpha$  の閾値とし、 $\alpha > 0$ 、 $\alpha < 0$  で $\alpha$ の上限と下限を設定した。図 5.27 に設定した  $\alpha$ の閾値による運動量識別性能を示す。



図 5.27: α カットによる Efficiency の運動量分布

図 5.27 の黒のグラフは複数のパターンがある場合、 $\alpha$ が最もオフラインに近いパターン を選んだ場合の efficiency を表しており、赤は DC bit が最も小さいパターンを選んだ場合の efficiency を表している。どのステーションにおいても  $p_T 20$ GeV 付近で良い Turn on curve が得られており、1 ステーションの情報のみを用いた場合でも良い運動量識別性能が得ら れることがわかった。

# 第6章 結論

2026 年から始まる HL-LHC 運転に向け ATLAS 検出器におけるミューオントリガーの アップグレードが計画されている。私はそのアップグレード計画の一つである、MDTトリ ガーについての研究を行った。

ミューオンの精密測定用の検出器である MDT の情報は現在ミューオントリガーには用 いられていないが、HL-LHC においては MDT の情報を新たにミューオントリガーシステ ムに組み込むことで運動量分解能を向上させ、ルミノシティの増加に伴うトリガーレート の増加を抑えたトリガーシステムの向上を可能にする。本研究では MDT での Associative Memory を用いた飛跡再構成アルゴリズムを再現するソフトウェアを作成し、シミュレー ションを行い、Associative Memory に記憶されるパターンバンクの最適化を行った。その 結果 DC bit の導入により最も小さいドリフト半径の Bin 幅パターンバンクを作成すること が可能となり、AM の容量に収まる最適なパターンバンクを作成することができた。また 作成したパターンバンクの性能を評価したところ、HL-LHC でのバックグラウンド環境下 においても良い精度でパターンマッチングを行うことが可能であり、*p*<sub>T</sub>20GeV 付近での運 動量識別が可能であることを示すことができた。

今後は今回策定したシステムデザインで全てのステーションでのパターンバンクの作成 を行い、またハードウェアでのデモンストレーションを行いハードウェアリソースやレイ テンシーの評価などを行っていく予定である。

# 参考文献

- [1] CERN Document Server, http://cds.cern.ch/record/1708849
- [2] The ATLAS Collaboration, Observation of decays and VH production with the ATLAS detector Phys. Lett. B 786 (2018) 59
- [3] G. Apollinari et al. High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) Technical Design Report V. 0.1 CERN-2017-007-M, Geneva : CERN, 2017
- [4] 中本建志, LHC 高輝度化アップグレードと KEK での超伝導磁石開発
- [5] T Kawamoto, S Vlachos, L Pontecorvo, J Dubbert, G Mikenberg, P Iengo, C Dallapiccola, C Amelung, L Levinson, R Richter, and D Lellouch. New Small Wheel Technical Design Report. Technical Report CERN- LHCC-2013-006. ATLAS-TDR-020, CERN, Geneva, Jun 2013.
- [6] G. Aielli et al., New results on ATLAS RPC 's aging at CERN 's GIF, IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 567.
- [7] Collaboration ATLAS. Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment. Technical Report CERN-LHCC-2012-022. LHCC-I-023, CERN, Geneva, Dec 2012. Draft version for comments.
- [8] The ATLAS Collaboration, ATLAS TDAQ Phase-II upgrade Technical Design Report, ATL-TDR-029 LHCC-2017-020
- The ATLAS Collaboration, ATLAS Muon pectrometer Phase-II upgrade Technical Design Report, ATL-TDR-026 LHCC-2017-017
- [10] A. Annov et al, Associative Memory Design for the FastTrack Processor (FTK) at ATLAS

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である石野雅也教授には修論執筆や毎週の発表において多くの助言をいただきました。自分の要領を得ないような発表に対しても真剣に聞いてださり、貴重なアドバイスを多くいただきました。心から感謝いたします。奥村恭幸准教授には、日頃から研究の進め方やソフトウェア作成、修論執筆など多くの場面で大変お世話になりました。齋藤 智之助教には毎週の発表において大変おせわになりました。共同研究している東工大の賀雲剣氏とは、お互いに切磋琢磨しながら共に研究を進めることができました。Phase2ミューオントリガーアップグレードグループの皆様には大学の垣根を超え、多くの助言をいただきました。

また自分が初めて CERN に行った際には海外に行くのが初めてということもあり、多く の場面で戸惑うことが多くありましたが、現地のスタッフ、先輩の手助けのおかげで研究 に集中できる環境で研究を進めることができました。研究に限らず、現地での観光や食事 など多くの場面でお世話になりました。特に ICEPP の宇野健太氏、京都大の赤塚駿一氏に は大変面倒を見てもらいました。皆様のおかげで CERN での生活は大変楽しく有意義なも のとなりました。

ICEPPの秘書の方々、塩田 雅子様、加瀬 由美様、竹元 美智子様には日頃のミーティン グの部屋の予約や CERN への出張の手続き等をサポートしていただきました。色々と面倒 をかけてしまい申し訳ありません。

研究室の同期の東田旺大君、ATLASの研究をしている同期の桶作愛嬉君とは苦楽を共に しました。ICEPP 同期の小林暁君、鳥丸達郎君、藤井一毅君、辻直希君、恩田理奈さんと は日頃から研究の悩みの相談や雑談等を行い、辛い時の気持ちの入れ替えを行うことがで きました。

最後にここまで自分を育て、一人暮らしの自分を支えてくれた家族をはじめとした、友 人、先輩、後輩周りの人たちのおかげで修士生活を全うすることができました。ありがと うございます。