慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	自律航法による屋内測位性能向上のためのIMESキャリブレーションシステムの設計と実装
Sub Title	Design and implementation of IMES calibration system for improving positioning performance using Dead Reckoning
Author	日髙, 正貴(Hidaka, Masaki) 神武, 直彦(Kotake, Naohiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・ マネジメント研究科
Publication year	2012
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2012年度システムエンジニアリング学 第113号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002012-0049

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2012 年度

自律航法による屋内測位性能向上のためのIMESキャリブレーションシステムの設計と実装

日高　正貴

(学籍番号：81133508)

指導教員　准教授　神武 直彦

2013 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン･マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

論　　文　　要　　旨

学籍番号	81133508	氏　名	日高正貴

論　文　題　目：
自律航法による屋内測位性能向上のための IMES キャリブレーションシステムの設計と実装

(内容の要旨)

本研究の目的は，屋内外シームレス測位を将来的に実現でき，スマートフォン単独による屋内測位システムの性能を向上させることである．

近年，目的地までのナビゲーションやチェックインサービスといった位置情報サービスが急速に普及している．これらのサービスは GPS(Global Positioning System)がスマートフォンを始めとする GPS 受信機を搭載したデバイスの普及により，位置情報の利用がしやすくなったことに端を発している．しかしながら GPS は，屋内環境下において使用できないという弱点を持ち，屋内において位置情報サービスを使用することができない．この問題に対して様々な屋内位置測位手法が提案されてきたが，ユーザーのニーズを十分に満たしているシステムが提案されていないという問題を抱えている．

本研究では，この問題に対してステークホルダーの要求を明確にし，要求に基づいた上で有効な屋内位置測位技術の提案を試みた．提案するシステムは Dead Reckoning(以下 DR)と IMES(Indoor MEssaging System)と呼ばれる二つの手法を用いて構築したシステムである．DR は自律航法と呼ばれる測位方法であり，センサ群を使用することでコストが安いことやメンテナンスの手間がかからないという反面，誤差がたまりやすいという欠点を有する．IMES は GPS と同じ周波数帯を利用しているため，GPS センサによる測位が可能であり，屋内外シームレス測位が容易であることを見込まれている．

本研究ではスマートフォン単独測位が可能であるスマートフォン向けの DR を設計し，さらに上述した DR の弱点を，IMES による位置情報データを用いて補正することで克服できるシステムをデザインした．さらに単純に組み合わせることで補正を実現するのではなく，効果的な補正を実現するために信号強度に着目し，補正のタイミングをより正確にすることでたかい位置精度を得ることができるシステムを設計した．本システムは補正のために IMES を採用することで従来のシステムに比べ，コストやメンテナンスの手間といった負担が小さい．またスマートフォン単独での測位が可能であるため，ユーザーに何らかのスマートフォン以外のデバイスを装着させる必要もないという利点を持つ．

本稿ではこのシステムのプロトタイプを作成し，本システムの有効性をコストや実現性等の様々な観点から考察し，特に測位精度に関してはいくつかのパターンにおいて実証実験を行うことで検証と評価を行った．

結果，システム要求を満たすとともに本システムの有効性を確認することができ，210m の歩行実験において IMES を二つ設置することで平均誤差を 4%未満に抑えることができた．

キーワード(5 語)
屋内位置情報サービス，屋内外シームレス測位，IMES(Indoor Messaging System)，Dead Reckoning(DR)，センサ群

SUMMERY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81133508	Name	Masaki HIDAKA

Title :
Design and Implementation of IMES Calibration System for Improving Positioning Performance Using Dead Reckoning

(Abstract)

The purpose of this study is that to improve the performance of the indoor positioning system using only smart phone to realize seamless indoor positioning in the future,

Recently, location-based services such as the navigation to destination and check-in are rapidly spreading. These services have roots that the spread of the devices with a GPS receiver and we can know our positioning easier by using GPS. Although the GPS has a large contribution to the spread of location-based services as mentioned above, it has a weak point not to catch the positioning data and we can't use location-based services in indoor. The various studies aiming for building of indoor positioning system and technology have been done, there is nothing that satisfies the requirements of stakeholders and has strong possibility as social infrastructure.

To solve this problem, we propose a new indoor positioning technology by use two methods called the Dead Reckoning (DR) and IMES (Indoor MEssaging System). An IMES is a positioning system that can transmit to an area absolute position data using latitude, longitude and floor level data and enables positioning by the GPS receiver even in indoor locations where the GPS signal does not reach.

Dead reckoning (DR) is a technique for deriving cumulatively how much a person has moved from the position he or she was at just before. It is derived by detecting pace, direction, and steps using data provided by a sensor group such as an acceleration sensor and gyro sensor included in a smart phone. However, DR tends to accumulate errors as it is used, as pointed out in a previous study.

In this study, we have designed a positioning system (IPSUIC) that can overcome the weakness of the DR to correct location by using the location data by IMES. In this study, we have designed a positioning system (IPSUIC) that can overcome the weakness of the DR to correct location by using the location data by IMES. IPSUIC is consisted of sensors included in smart phone. In addition, IPSUIC gets high accuracy by using signal strength of IMES to achieve calibration in effective timing. In this paper, we have made a prototype of IPSUIC, and evaluated the accuracy by experiment. As a result,it achieve less than 4% average error and we confirmed the effectiveness of IPSUIC.

Key Word(5 words)
Indoor Location Based Service, Indoor-Outdoor seamless Positioning, IMES(Indoor Messaging System), Dead Reckoning(DR), Sensors

目次

1　序論 1
1.1　研究の背景と問題意識 1
1.1.1　位置情報サービスの普及とその事例 1
1.1.2　位置情報サービスが抱える問題 3
1.2　本研究の目的 3
1.3　本稿の構成 3
2　実用化が進む屋内位置情報サービスとその課題 5
2.1　実用化が進む屋内位置情報サービス 5
2.1.1　複雑な地下街や駅，空港などでの屋内ナビゲーション 5
2.1.2　情報配信補助サービス 6
2.1.3　人間行動把握サービスの活用 7
2.1.4　勤怠管理や物品管理 9
2.2　屋内位置情報サービス実現への課題 10
3　屋内測位に対する要求分析 11
3.1　屋内測位に対するステークホルダー分析 11
3.2　屋内測位に対する要求分析 13
4　屋内測位技術に関する関連研究 18
4.1　自律航法 Dead Reckoning 18
4.1.1　センサ固定型 18
4.1.2　手に保持されたセンサによる DR 20
4.1.3　DR 手法とその一覧 22
4.2　外部インフラ使用型測位技術 23
4.2.1　携帯基地局による測位 23
4.2.2　無線 LAN 23
4.2.3　Radio Frequency Identification　(RFID) 24
4.2.4　赤外線 25
4.2.5　可視光通信 25
4.2.6　QR コード 26
4.2.7　UWD 27
4.2.8　Bluetooth 28
4.2.9　超音波 29
4.2.10　Indoor Messaging System (IMES) 30
4.3 インフラ型測位一覧 32
4.4　DR へのキャリブレーション手法 33

4.5　キャリブレーション手法の一覧 38
4.6　従来法の問題点まとめ 38
5　自律航法による IMES キャリブレーションシステムのデザイン 40
5.1　自律航法と IMES による屋内測位システム 40
5.2　IPSUIC (Indoor Positioning System Using IMES Calibration) 41
5.3　測位システムのアルゴリズム 44
5.3.1　自律航法の測位アルゴリズム 45
5.3.2　IMES による位置測位 49
6.1　プロトタイプの作成 54
6.2　プロトタイプにおけるデータの処理方法 58
6.3.1　DR アルゴリズム構築のための実証実験 59
6.3.2　IMES キャリブレーションシステム構築のための実証実験 77
7　IPSUIC による評価のための実験 85
7.1　横方向の移動も含めた移動ルート Mapping による屋内測位性能の評価のための実験 85
7.2　移動ルート Mapping による適用性評価のための実験 91
7.3　実験結果のまとめと考察 93
8　考察と評価 97
8.1　IMES 配置位置に関する考察 97
8.2　人間の様々な動きに対する対応への考察 102
8.3　システムに対する統合評価 104
9　まとめ 107
10　参考文献 108
11　謝辞 112
付録 I　アンケート 113
付録 II　実験結果 115

図目次

図 1　モバイル位置情報ビジネスの市場規模予測[7] 2
図 2　東京駅構内図[17] 5
図 3　羽田空港構内図[18] 6
図 4　東日本大震災時の人の流れ[21] 7
図 5　屋内行動ログ取得による知見[21] 8
図 6　物品管理パッケージ「Simple RFID Lite」[23] 9
図 7　Customer Value Chain Analysis(CVCA)によるステークホルダーの関係性分析 12
図 8　重要なステークホルダーのニーズ 13
図 9　屋内測位インフラに対して求められる性能[25] 14
図 10　腰部に固定された PDR 装置[25] 19
図 11　Helmet-Mounted タイプの PDR 装置[26] 20
図 12　上坂らの手法による DR[29] 21
図 13　RFID Tag[35] 24
図 14　可視光通信の様子[41] 26
図 15　QR コードの例[42] 27
図 16　Ultra-Wide Band アンテナ[43] 28
図 17　Cobra Tag[45] 29
図 18　超音波を利用したナビゲーションシステム[47] 30
図 19　IMES によるシームレス測位[50] 31
図 20　RFID によるキャリブレーション[51] 33
図 21　屋内地図によるキャリブレーション[52] 34
図 22　風力センサを用いた PDR 装置[53] 35
図 23　視覚障害者向けの測位システム(PDR 装置，LRF などを使用) [54] 36
図 24　IMU と UWB を組み合わせた技術よる屋内測位技術 37
図 25　要求開発ツリー 42
図 26　機能設計ツリー 43
図 27　物理設計ツリー 44
図 28　提案する測位システムのアルゴリズム 45
図 29　DR アルゴリズムの処理フロー 46
図 30　加速度センサによる重力加速度方向の検出(ピーク) 47
図 31　歩行検出のアルゴリズム 47
図 32　方向成分決定のアルゴリズム 48
図 33　IMES による受信信号強度の例 50

図 34　キャリブレーションのための工夫 51
図 35　本研究の流れ 53
図 36　屋内測位システムのプロトタイプ 54
図 37　SuperStar2[57] 55
図 38　SuperStar2 によって得られるデータ見本 56
図 39　小型無線マルチセンサ TSND121(ATR-Promotions) [58] 56
図 40　TSND121 の仕様(ATR-Promotions の HP より抜粋) [58] 57
図 41　マルチセンサのデータ見本(Sensor Controller の画面) [58] 58
図 42　実験コース概要 60
図 43　実験場所の様子(歩行経路のためのマーク) 60
図 44　実験の様子 61
図 45　直角な曲がり角右折歩行コース 62
図 46　直角な曲がり角右折実験の結果 62
図 47　直角な曲がり角右折歩行コース 63
図 48　直角な曲がり角左折実験結果 63
図 49　緩やかな曲がり角右折歩行コース 64
図 50　緩やかな曲がり角右折実験結果 64
図 51　緩やかな曲がり角左折歩行コース 65
図 52　緩やかな曲がり角左折実験結果 65
図 53　急激な曲がり角右折歩行コース 66
図 54　急激な曲がり角右折実験結果 66
図 55　急激な曲がり角左折歩行コース 67
図 56　急激な曲がり角左折歩行コース 67
図 57　半円周り(時計回り)歩行コース 68
図 58　半円周り(時計回り)実験結果 68
図 59　半円周り(反時計回り)歩行コース 69
図 60　半円周り(反時計回り)実験結果 69
図 61　直進+後退歩行コース 70
図 62　直進+後退歩行コース 70
図 63　全円時計回り(2 周)歩行コース 71
図 64　全円反時計回り(2 周)実験結果 71
図 65　全円反時計回り(2 周)歩行コース 72
図 66　全円反時計回り(2 周)実験結果 72
図 67　ジグザグ歩行歩行コース 73
図 68　ジグザグ歩行実験結果 73
図 69　実際に人間の動きに近い歩行コース 74

図 70　緩やかな曲がり角右折における角速度 75
図 71　緩やかな曲がり角左折における角速度 75
図 72　直角な曲がり角右折における加速度 76
図 73　直角な曲がり角左折における加速度 76
図 74　慶應義塾大学協生館における実験コース[59] 77
図 75　実験コース概観 78
図 76　実験の様子 79
図 77　ATT=30 の時の IMES 受信信号強度 79
図 78　ATT=15 の時の IMES 受信信号強度 80
図 79　ATT=0 の時の IMES 受信信号強度 80
図 80　ATT=30 の時の測位誤差 81
図 81　ATT=15 の時の測位誤差 82
図 82　ATT=0 の時の測位誤差 83
図 83　鉄道博物館ヒストリーゾーン[60] 85
図 84　実験コース概要 86
図 85　鉄道博物館においての実験の様子 87
図 86　鉄道博物館における実験(被験者 A；反時計回り) 88
図 87　鉄道博物館における実験(被験者 B；反時計回り) 89
図 88　鉄道博物館における実験(被験者 A；時計回り) 90
図 89　鉄道博物館における実験(被験者 B；時計回り) 91
図 90　慶應義塾協生館 3 階における実験コース 92
図 91　実験結果(被験者①往路) 92
図 92　実験結果(被験者①復路) 93
図 93　APIA の地下街マップ[61] 97
図 94　新橋 WING　地下街マップ[62] 98
図 95　誤差の大きさ(緩やかな曲がり角左折の場合) 99
図 96　IMES 配置の最適性評価 100
図 97　理想配置モデルと角に対して前後 5m ずらしたモデルの精度比較 101
図 98　理想配置モデルと配置個数の多いモデルの精度比較 101
図 99　実験の様子(展示物が右にある場合) 102
図 100　実験結果(進行方向に対して左に展示物がある場合) 103
図 101　実験結果(進行方向に対して右に展示物がある場合) 104
図 102　被験者②の実験結果(往路) 115
図 103　被験者②の実験結果(復路) 115
図 104　被験者③の実験結果(往路) 116
図 105　被験者③の実験結果(復路) 116

図 106　被験者④の実験結果(往路)....117
図 107　被験者④の実験結果(復路)....117
図 108　被験者⑤の実験結果(往路)....118
図 109　被験者⑤の実験結果(復路)....118

表目次

表 1　屋内測位システムに対する要求一覧 15
表 2　DR 手法とその一覧.... 22
表 3　インフラ使用型測位技術一覧 32
表 4　DR へのキャリブレーション手法一覧 38
表 5　7.1 節における実験データまとめ 93
表 6　7.2 節における実験結果まとめ.... 95
表 7　IMES と IPSUIC のコスト評価[万円] 105

1　序論

1.1　研究の背景と問題意識

本節では本研究が対象とする分野の背景に関して触れ，その問題点を挙げる．

1.1.1　位置情報サービスの普及とその事例

古来より，人間の生活において位置を知る事は重要であるとされてきた．例えば自己の位置や仲間の位置，動物の位置，目的地の位置など様々な位置と目的地までの道程を把握することで効率的な移動が可能である．これらは人間にとって非常に重要な能力であり，技術であるともいえる．

また海上においては明確なランドマークを見つけにくいため方位などが分かりづらく[1]，位置を知る技術は必要な技術であるといえる．この意味から見ても羅針盤の発明が重要な技術として，歴史上大きな役割を果たしている事が分かる．近年でも船舶や航空機を対象とした世界的な測位システムとして，超長波を利用したオメガシステム[2]等のシステムが構築され運用されてきた．

1974 年，アメリカ海軍は，人工衛星を利用した測位システムである Global Positioning System(GPS)[3]の開発に着手した．このシステムは 1993 年から正式に運用が開始され，その機能の一部を世界中の一般の人々にも無料で使うことができるように開放した．当初は民間で使用した場合，位置精度は 100m 程度であったが，2000 年には意図的に精度を劣化させる要因になっていた「選択的利用性」を解除し，その位置精度は 15m 程度と飛躍的に向上することとなった．これをきっかけとして民生品の GPS 受信装置が発達することで屋外での高精度な位置情報を取得することはより容易となり，位置情報サービスとして様々なサービスが普及することとなった．

その代表例として考えられるものがカーナビゲーションシステム[4]である．カーナビゲーションシステムは周知の通り，運転中にドライバーに自己位置と目的地までの道程を教えるシステムである．カーナビゲーションシステムは 1981 年にはホンダがジャイロ式のカーナビゲーションシステムをアコードに搭載したことを発端としており，1990 年にはマツダが GPS に対応したカーナビゲーションシステムを搭載したユーノスを発表している．

位置情報サービスが普及するきっかけとなったのはカーナビゲーションシステムだけではない．普及率が高まった携帯電話[5]においては 2007 年より，緊急通報時には自動的に位置が通知されるシステムが稼働したため，第 3 世代以降の携帯電話には GPS モジュールの

搭載が義務化されることとなった．これにより自動車乗車時だけではなく，携帯電話でも簡易に現在地を知る事ができるようになり，携帯電話の位置情報を利用した新しいサービスが様々な形で実現している．

また日本では現在準天頂衛星システム[6]への着手が進んでおり，すでに準天頂衛星初号機となるみちびき(QZS-1)が打ち上げられている．準天頂衛星システムは，日本で常に天頂付近に１機の衛星が見えるように，複数の軌道面にそれぞれ配置された衛星を組合せて利用する衛星システムであり，これらの軌道は軌道傾斜角（赤道面からの軌道面の傾き）を持って，地球の自転と同じ周期で地球を回っている．衛星が常に天頂方向にあるため，山やビル等に影響されず全国をほぼ 100%カバーする，高精度の衛星測位サービスの提供を可能とするシステムである．2011 年 8 月には日本政府の宇宙開発推進本部の最重要課題として準天頂衛星が取り上げられ，G 空間プロジェクト[6]が推進されるなど，位置情報サービスへの注目度は高まっていると言える．

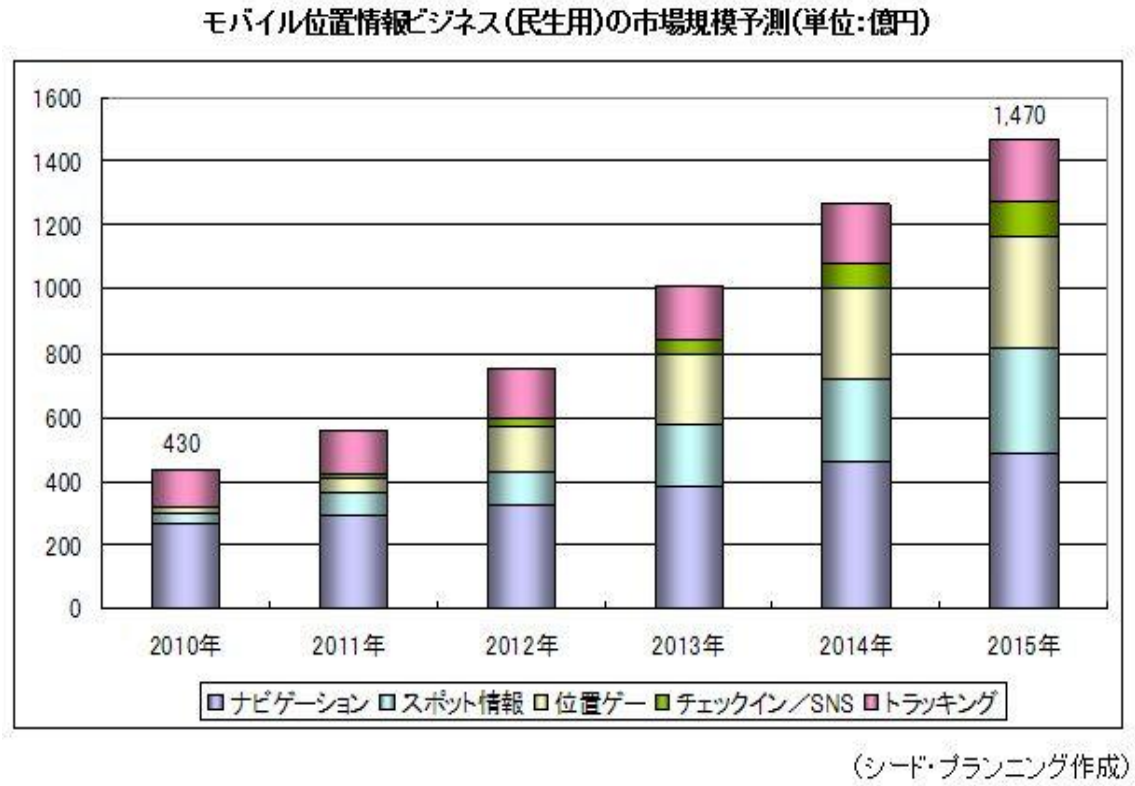

図 1　モバイル位置情報ビジネスの市場規模予測[7]

このように現在では，位置情報サービスは非常に目覚ましい進歩を遂げていると同時に，すでに欠かすことのできない社会インフラとして認識されている．

上記の図 1 のように，位置情報ビジネスの市場規模は年々増え続けており，2015 年には 2010 年の 3.5 倍ほどになる事が予測されている．

1.1.2　位置情報サービスが抱える問題

しかしながら，GPS や準天頂衛星といった位置情報サービスの普及の原動力となったシステムは屋内では使うことができないという問題点を抱えている．また使うことができたとしても高精度を実現することは難しい. [8]防災分野におけるシームレス測位技術の利活用に関する研究会報告書(2010 年 6 月) [9]によれば，東京における人間の活動の 8 割以上は屋内で行われているという報告が出ている.

このような背景を受けて，現在様々な位置情報システムが提案されており，一部は実用化されているものの，社会インフラと呼べるシステムの実現には至っていない．[10]屋内と屋外の位置情報システムのもっとも大きな差異となっているのは，インフラ側のシステム構築コストの負担構造である. [11]屋外位置情報システムの代表格である GPS のインフラコストはアメリカが構築及び運用のすべてを負担しており，その一部を無料で全世界に対して開放していることはすでに上記で述べた.

それに対して，屋内位置情報システムはインフラ構築コストを負担する構造がなく，一部の事業者が限られた屋内空間に対して適用をした場合(RFID[12]を用いた病院の機材管理や工場の在庫管理)や，一般に無料で位置情報サービスを開放しているものの信頼性や精度が荒い例(Wi-Fi[13]，無線 LAN[14]等による測位サービスであり 15m~100m ほどの精度)がある程度である.

1.2　本研究の目的

本研究では屋内外シームレスな位置情報サービスの実現を目指して研究を進めており，特に，スマートフォン単独で行うことができる，地下街や駅構内といった屋内における人間向けナビゲーションの実現を目指して測位技術の研究を進めている.

よって本稿では，屋内位置情報サービスの要素技術である屋内測位に焦点を置く．そしてステークホルダーの要求を捉えたうえで，ニーズを満たし，屋内外シームレス測位を実現することができる測位技術の開発を目指す.

本研究の目的は，屋内外シームレス測位を将来的に実現でき，スマートフォン単独による屋内測位システムの性能を向上させることである．そのために，本稿では Dead Reckoning[15]と IMES[16]を用いて屋内測位システムを構築した.

1.3　本稿の構成

まず第 1 章では序論として屋内外の位置情報サービスの重要性と測位技術に関しておおよその流れと現状を説明した．またその上で本研究の目的を説明した．次より述べる第 2 章では屋内位置情報サービスができるとどのようなよいことがあるのかを具体例をもとに示し，また現在できていない原因に関して述べる．第 3 章では屋内位置情報サービスを実現するうえで重要なステークホルダーに関して挙げ，さらにステークホルダーが持つ要求からシステム要求を整理する．また第 4 章では現在すでに提案されている屋内測位技術を始めとした関連研究に関して述べる．そしてそれぞれの課題に関してまとめる．次に第 5 章では 3 章で把握した要求と 4 章で述べた技術に基づいて筆者が新しく提案する屋内測位技術システムに関して説明する．第 6 章では第 5 章において提案したシステムのプロトタイプの作成について詳しく述べる．またプロトタイプ作成のために行った予備実験についても述べる．第 7 章ではプロトタイプの評価と実証実験を行い，その実験から得られる知見をまとめて考察を行う．第 8 章では本章のシステム全体に対する考察，構築したシステムに関する評価を行う．第 9 章で本稿のまとめを記し，また今後実用化に向けてどのような課題があるかを明確にする．

2　実用化が進む屋内位置情報サービスとその課題

本節では，我々が研究を進める屋内位置情報サービスの例として幾つかの具体案を述べ，その有益性を説明するとともに，なぜ現状では実装がされていないかということを具体的な例をもって示す．

2.1　実用化が進む屋内位置情報サービス

2.1.1　複雑な地下街や駅，空港などでの屋内ナビゲーション

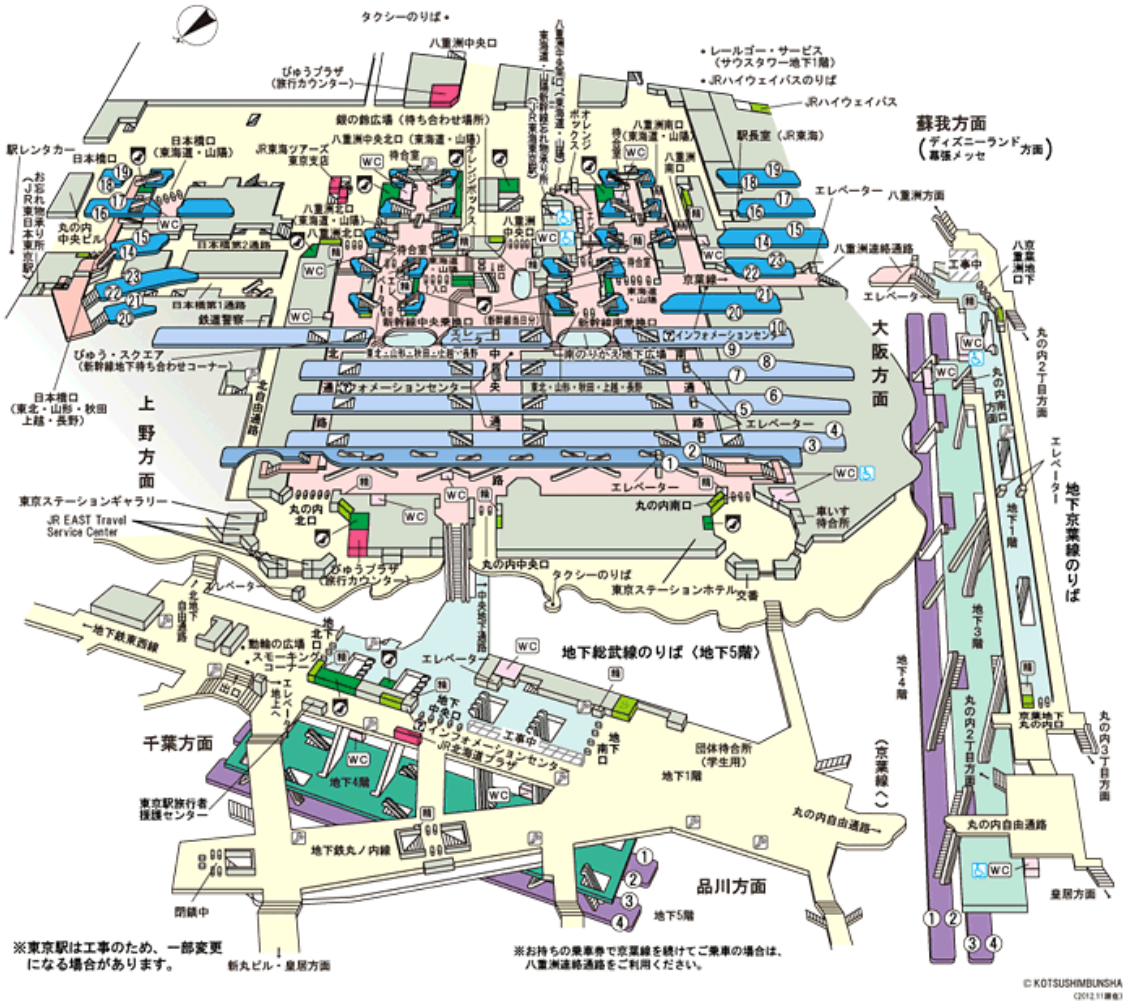

図 2　東京駅構内図[17]

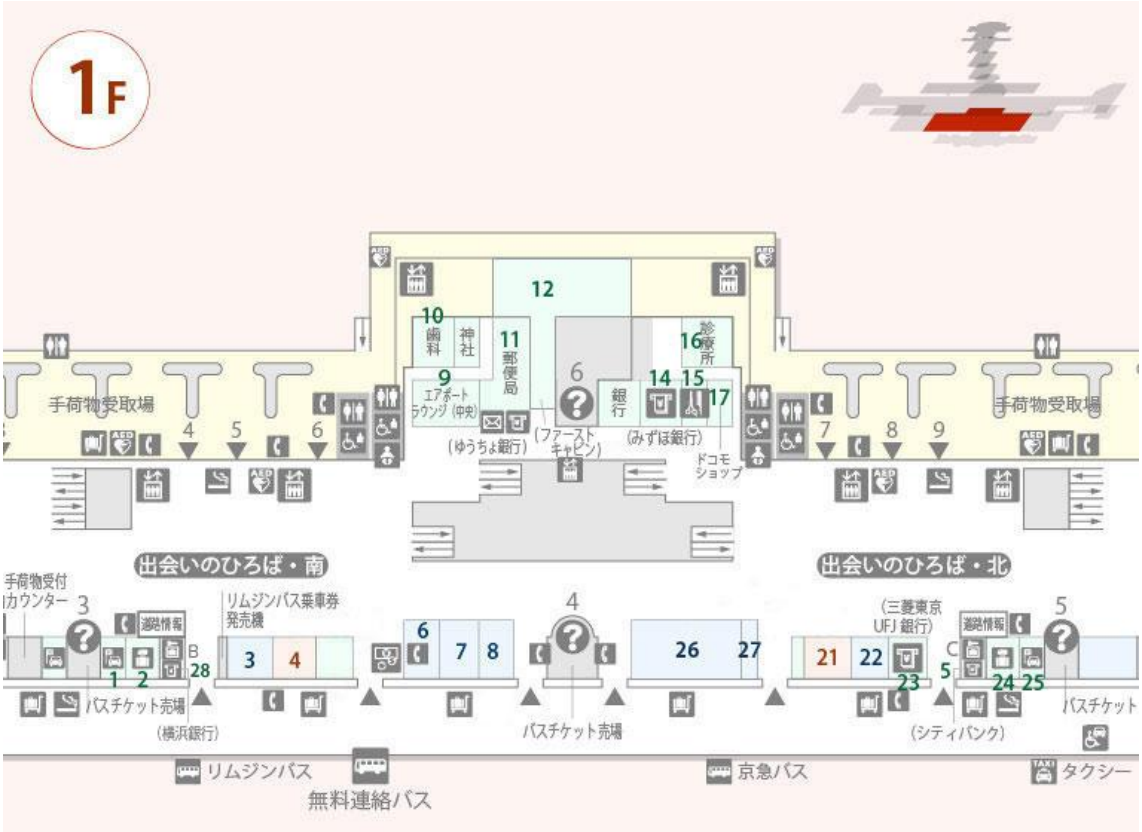

図 3　羽田空港構内図[18]

GPS 受信機を搭載した携帯電話とその普及に関してはすでに上記で述べた通りである．これに伴い移動通信サービスは大きな発展[4]を見せたが，それは屋内に限ったことであり，屋内における移動をサポートするシステムは実用段階にあるとは言えない現状にある．[11]また図 2 に示す東京駅の屋内地図や図 3 に示す羽田空港の屋内地図からわかるとおり，屋外環境に比べて屋内環境は非常に複雑であり，このような場所でのナビゲーションはユーザーを安心して目的地に案内することができるサービスであるといえる．

2.1.2　情報配信補助サービス

現在先進的な小売業においては，すでに会員が持ち歩くスマートフォンに内蔵された GPS センサを活用して，位置連動クーポンの配布サービスを開始し始めている．例えば foursquare[19]など，利用者同士が位置を共有する SNS(Social Networking Service)や，スマートフォン向けクーポンアプリケーションを介して，会員が入店する際にチェックイン（その場にいることを記録する機能）を行い，その場でしか得られないクーポンを提供するサービスが始まっている．

しかしながら現状においては，屋内においてユーザーに負担なく，位置を正確に把握す

る実用的な方法はないと言ってよい．また携帯基地局を利用した測位[20]などを用いて測位することが可能ではあるが，数百メートルほどのずれを起こすこともあり，サービス会員が店舗の前まで来たのか，店舗に入店したのか，特定の売り場を訪れたのかといった，具体的な実店舗への導線の過程や状況を把握することはできない．

2.1.3　人間行動把握サービスの活用

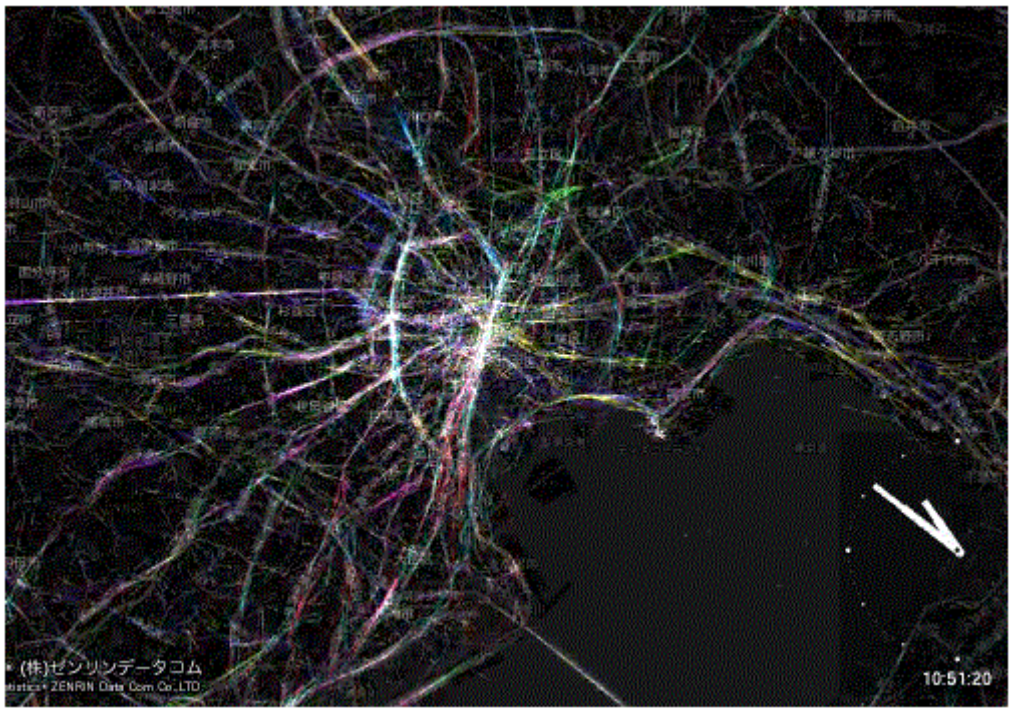

図 4　東日本大震災時の人の流れ[21]

人々がどのような行動を行っているのかというビッグデータを取り続けていることで，様々な知見が得られることがある．東京大学空間情報科学研究センターの柴崎研究室[21]では 2011 年度 3 月 11 日に勃発した東日本大震災の際，首都圏内における人々の移動の様子をデータとして記録し，都市域全域におけるヒトやモノの活動状況や分布を再現・推定している．

このような技術は屋内において実現することで，例えば 20 代の女性がショッピングセンターでどのように移動し，モノを購入したかなどを理解し，適切なマーケティングやテナントの配置などを知る事ができる．すでに国際航業株式会社[22]が主導で行った実験において成果が得られており，その図を以下の図 5 として示す．

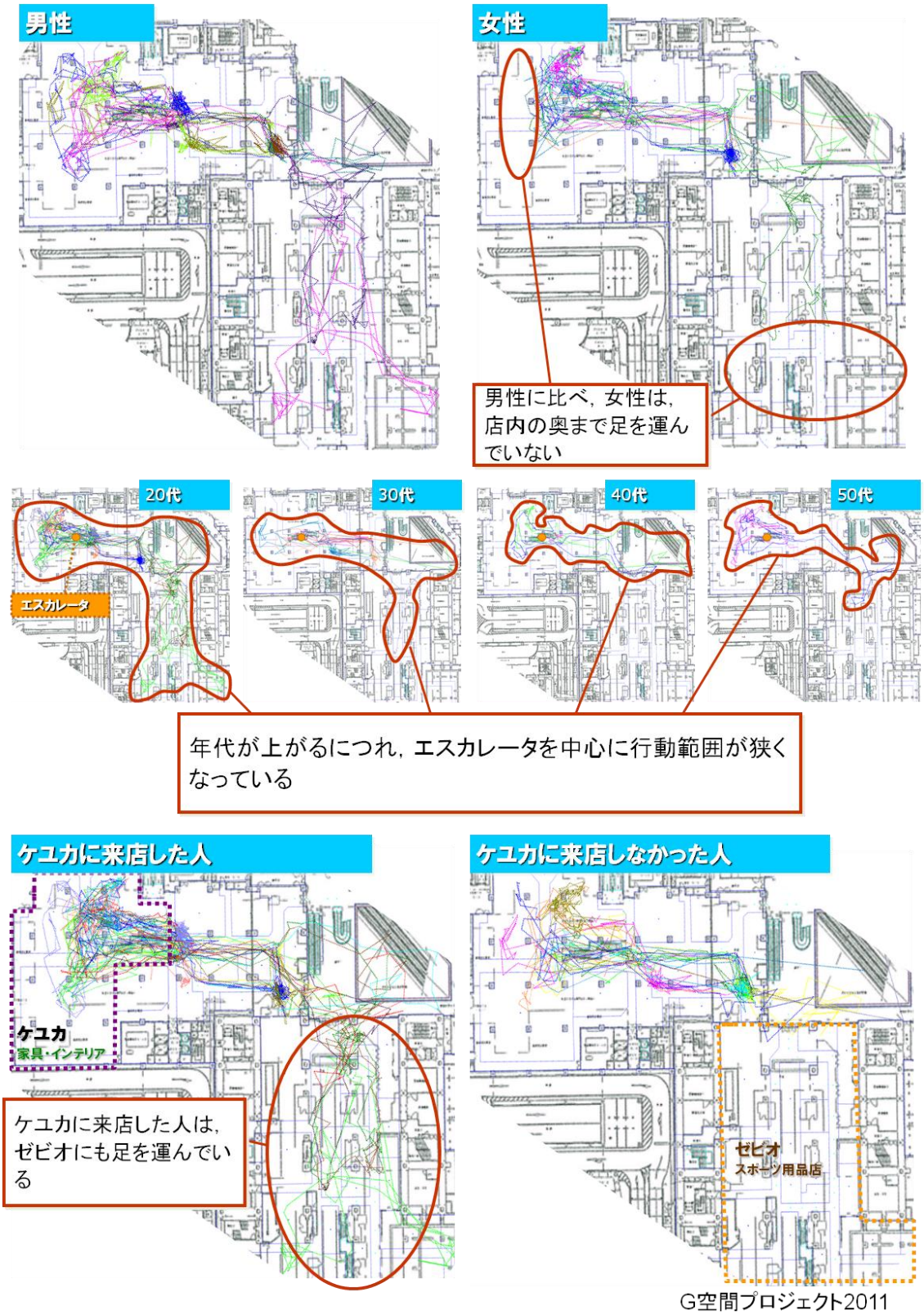

図 5　屋内行動ログ取得による知見[21]

図 5 からわかるとおり，男性と女性による行動の違いや，また年齢による違い，嗜好に

よる違いなどで適切なテナント配置，さらにはマーケティングプランを考えることができる．

しかしながらこのようなマーケティングを行う際には，多くの人々からデータを取得することが前提であるが，現状において屋内測位技術は普及しているとはいえない状態にある．

2.1.4　勤怠管理や物品管理

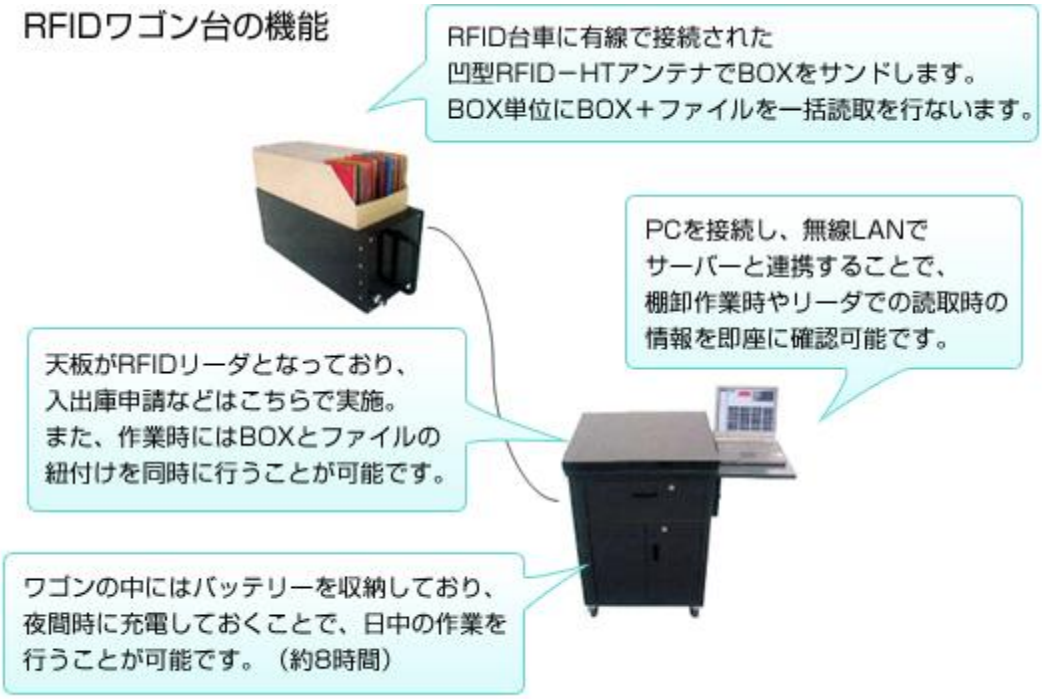

図 6　物品管理パッケージ「Simple RFID Lite」[23]

近年では RFID-Tag などの測位にも利用される技術を用いた物品管理などが注目を受けている．例えばこのようなシステムでは作業員による物品の持出しに際して，当該作業を行う作業員と，取り扱われる物品の種別，シリアル番号を特定し，作業記録として蓄積し，また権限を超過した作業に対して警告を与えるなどのシステムを考えることができる．またこのようなシステムはモノに限った話ではなくヒトに対する勤怠管理などに用いることができる．例えばスマートフォンを通して，どの従業員がどの部屋に，どれくらいの時間いるのかということを知る事ができると考えられる．

2.2　屋内位置情報サービス実現への課題

近年，GPS 受信機が搭載された携帯電話の普及やスマートフォンの増加といった，人々にサービスを展開する下地が出来上がってきているにもかかわらず，屋内位置情報サービスとして多くの人々に利用されているサービスはほとんどない．この理由として考えられるものは屋内位置情報を展開するうえで実用的な技術がでそろっていないことに起因すると筆者は考えている．

例えば，2.1.1 節で紹介した屋内ナビゲーションサービスの実現には，自己位置を知るための屋内測位技術と，目的地と目的地に至るまでの適切なルートを知るための屋内経路探索技術，そして屋内において位置を表示するための屋内地図という 3 つの要素が実現されていないことに起因する．もちろんこのような原因は実現を目指すサービスによって変化するが，屋内位置情報サービスの展開を目指す以上，屋内測位技術は必須であり，特に重要度が高いと筆者は考えている．　そこで本稿ではこの問題のうち，本サービスを実現するために屋内測位技術に焦点を絞る．

屋内測位技術の現状は 4 章で詳しくその現状に関して触れられているが，精度は非常に高いがユーザーに何らかのデバイスの装着を想定していたり，手軽に使うことができるが精度が低かったりなどという問題を抱えている．本稿ではステークホルダーのニーズを満たし，この問題を解決できる測位技術を構築する．

3　屋内測位に対する要求分析

本節では本システムを導入するうえで重要であると考えられるステークホルダーについて考察を行い，その関係性，および重要であると考える理由について触れる．またステークホルダーが持つニーズからシステムズエンジニアリングに沿ってシステムデザインを行うために，要求分析を行う．

3.1　屋内測位に対するステークホルダー分析

おもに重要になってくるステークホルダーは下記の通りである．

・ユーザー

屋内位置情報サービスを使用するユーザー．様々なサービスを利用し，購入する．スマートフォン・携帯電話・Tab などの普及率が日本では非常に高く，これらを用いてサービスを利用する．

・施設管理者

ユーザーが使用する駅や地下街，ショッピングモールなどの屋内施設を管理する団体，個人．

・アプリ作成者

屋内測位技術を用いたナビゲーションなど様々なサービスを提供するアプリケーション製作会社．

・メーカー

屋内測位技術，屋内測位システムを製作，販売，取り付け工事やメンテナンスを実施する会社．

・テナント

施設管理者が管理する施設などにおいて，販売，情報発信，サービスの提供を行っている．

・日本行政

日本国政府および，政府管理下の団体．すでに 2011 年度には G 空間プロジェクトの予算を組むなど，積極的に位置情報サービスの構築を支援している．(国土交通省)

・GPS 管理者(アメリカ)

日本で位置情報サービスの普及を支えている GPS を管理するアメリカ(国防総省)．

GPS は国防に使用するシステムであるため，GPS に支障をもたらすシステムの提供に関しては反対的である．

以上が，屋内位置情報サービスおよび屋内測位システムを導入する際に重要となる中心となるステークホルダーである．これらのステークホルダーのそれぞれの関係性(金銭，情報，サービス)のやり取りなどを以下の図 7 として Customer Value Chain Analysis(以下 CVCA)を用いて分析した．

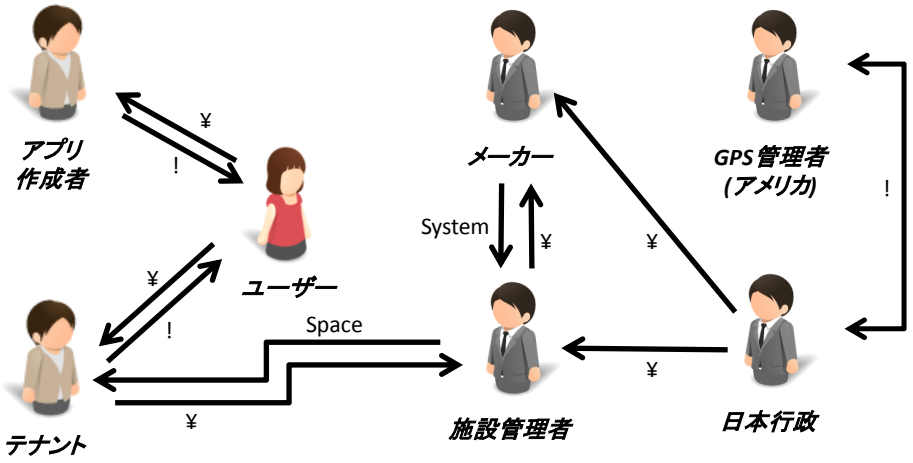

図 7　Customer Value Chain Analysis(CVCA)によるステークホルダーの関係性分析

CVCA の結果から，もっとも重要なステークホルダーはユーザーと施設管理者であると考えられる．

屋内位置情報サービスの普及が促進しなければ，これらの CVCA のような関係性が確立することはない．そのためには，初期導入と継続的発展がスムーズに行われなければならない．初期導入を行うためには，施設管理者が測位システムをメーカーから購入し，自身が管理する屋内施設に導入することが重要である．そのため施設管理者としては当然投資のリスクを有する．このリスクを少しでも減らすためには，コストの回収が可能であるように継続的発展を示せることが重要である．

そして，継続的発展を行うためにはユーザーが屋内測位システムによってもたらされる情報や様々なサービスの価値に対して対価を支払わなければならない．ユーザーから得た対価を持ってテナントやアプリ開発者，さらには施設管理者と市場が潤っていき，屋内位

置情報サービスは継続的な発展を遂げると考えられるからである．

また屋内位置情報サービスは継続的に使われれば使われるほど様々なサービスが発案されていく上に，屋外での位置情報サービスにおいてすでに様々なアプリケーションに対して対価を支払っていることから，生活の依存度が高い屋内においては十分利用者の獲得が見込める．つまり継続的に使用されるためにはユーザーが不快感を持たず，「使いやすい」という感想を持てるようなシステムである必要がある．

3.2　屋内測位に対する要求分析

上記のステークホルダー分析を行ったうえで，本システムが導入され継続的に利用されていくためには，ユーザーと施設管理者が重要なステークホルダーであり，彼らの要求に関して分析を行う必要がある．

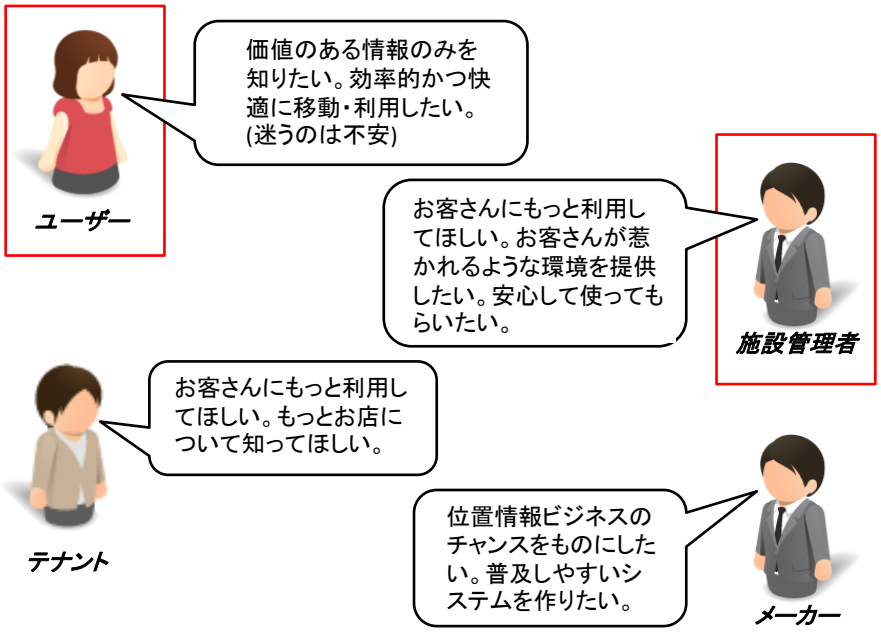

図 8　重要なステークホルダーのニーズ

図 8 に重要なステークホルダーが持つニーズを示す．特に重要と思われる施設管理者とユーザーの要求に関しては枠で囲っている．これらのニーズから屋内測位システムのシステムデザインを行うために，要求に関して分析を行う．

施設管理者に関しての要求分析はすでに先行研究で行われている．財団法人ニューメディア開発協会が発表している「屋内測位普及発展に関する調査研究報告書」[24]では 45 の地下街，および 24 の複合商業施設に関して整理し，その中でも日本有数の地下街を要する大阪の梅田地区にある地下街の施設管理者に対して訪問調査を実施している．調査を行った

項目は屋内インフラに対する要求や提供したい位置情報サービス，さらには屋内測位インフラの設置環境など 25 項目を挙げている．その調査結果から施設管理者から出る屋内測位システムに求められる性能として以下の表のとおりまとめている．

項目		要件
屋内測位デバイス		市販の携帯電話
測位精度	平面	5m～10m 程度
	高さ	フロア識別レベル
測位品質		測位できない場所はなるべく少ない方が望ましい。 安定した測位品質が望ましい。
測位スピード		2～3 秒程度
測位の連続性	屋内外	屋外・屋内の測位の連続性は必要
	屋内	屋内の測位の連続性は必要
屋内測位設備の環境性能	温度	－10℃～50℃程度
	湿度	40%～70%程度
	防塵	防塵対策は必要
	防水	少なくとも防滴レベルは必要
屋内測位設備の大きさ		天井、壁、既存設備への組込み、景観への配慮を考えると、なるべく小型のものが望ましい。
屋内測位設備の重量		天井、壁、既存設備への組込みを考えるとなるべく軽量のものが望ましい。
電源		2～3 年間交換不要ならばバッテリタイプが望ましい
工事	設置	支持具などにより容易に設置できることが望ましい。
	配線	配線は無いか無線化することが望ましい。
測位インフラの管理		技術基準を設け、社会インフラとして、国や専門団体で管理されることが望ましい。

図 9　屋内測位インフラに対して求められる性能[25]

図 9 には記載がされていないが，ナビゲーションやガイド，さらには広告や弱者見守り，避難誘導のサービスに利用したいとの意見を述べている．

また測位インフラに対する導入費用(装置，工事，保守)に関しては「インフラに投資する

ことは難しい.」という意見を述べている．Wi-Fi など測位以外の仕様が考えられるインフラも含めて，現在考えられている DR 以外の屋内測位システムはどうしてもコストがかかってしまう．つまりこの要求を完全に満たすためには DR に頼るほかないが，DR は後述するように誤差の累積による精度低下という弱点を持つため望まれる精度を保つことは難しく，望んでいるサービスの構築はできない．よって本稿では，この要求を「サービスを提供できるだけの十分な測位システムであり，なおかつできるだけ安価に実現できること」を求めていると捉えた.

またユーザーに対するアンケートとして，筆者らは街においてアンケートを行った．アンケートの結果は付録として示す.

現在，屋内位置情報サービスはほとんどの人々には利用できない状況にある．つまりほとんどのユーザーが屋内位置情報サービスは未知の領域である．よってこれらのニーズ(アンケートの結果)からシステムに対する要求を類推した結果，上記の施設管理者から析出したシステム要件と矛盾することがないと判断した.

ここで，図 9 に代表される要件とニューメディア開発協会が調べたステークホルダーのニーズから，その一部となる以下の部分を達成するシステムを構築することを本稿での目的とした.

表 1　屋内測位システムに対する要求一覧

1.実現性
•スマートフォンに内蔵されうるセンサを利用すること
•利用者が意識することなく測位が可能であること
•充電することなしに終日利用可能な消費電力であること
2.コスト
•持続可能な初期投資および運用費用であること
3.測位精度
•5m 以下（店舗を識別できる程度）であること
4.初期測位速度
•利用者の歩行速度に遅れることなく初期測位ができること
5.高さ（階数）の定義
•同じ緯度経度での高さ（階数）の識別ができること

上記の表 1 は図 9 の中でも，特にナビゲーションなどのサービスを実現するうえで重要であると考えられるものを筆者らが任意に抜き出した．また例えば測位のスピードにおい

ては図 9 では 2~3 秒と書いているが，ナビゲーションなどのサービスは連続的に測位を行う必要があり，より厳しい条件ではあるが歩くスピードについていくことが必要であると感じたため，一部改訂がされている．また「フロアの識別などがしてほしい」というニーズなどは図 9 に記載がされていないが，ニューメディア開発協会の調べによると施設管理者が持つニーズであり，重要であると考えたため項目に入れることとした．以上の表 1 が本稿で提案するシステムの達成するべきシステム要件である．

本システムに対する要求は以下の二つになる．番号は 5 章のアーキテクチャの要求設計に対応している．

① ユーザーは快適にいつでも自身の位置を知れること

① ’施設管理者はシステムを導入しやすいこと(施設管理者のみが持つ要求)

システムズエンジニアリングに沿って考えると上記の①，①’から，機能設計は下記の状況によって分解が始まる．

1，システムは，表 1 の性能を満たすこと

2, システムは, 導入しやすいものであること(施設管理者が導入を試みてくれるよう，導入費用・ランニングコストともに安価であること，取り付けやメンテナンスがしやすいこと)

1 に関しては現在の GPS での屋外位置情報サービスと同様であり，人々にとって不快感なく，位置の測位が可能であり，それによって何かしらの価値を提供できることが重要である．例えば多くのユーザーが持っている携帯電話以外のデバイスを持つことを強要すれば，経済的にも肉体的にもユーザーに負担がかかることとなり使用してくれるユーザーの数は限られる．多くのユーザーに利用してもらうためにはスマートフォンに内蔵されているセンサのみで測位ができることが求められる．よって今現在搭載されていないセンサを使うことは現実的ではなく，使い続けられるシステムを構築するために多くのセンサを使い測位を行うことも電力消費の観点から敬遠されてしまう理由となってしまう．また精度が悪ければ，ユーザーにとって価値をもたらすことがないためシステムはあまり使用されず上記の CVCA を実現することはできない．

一方，2 の要求は完全に解決することは難しい．屋内測位システムの特性上何かしらの測位インフラ型のシステムを導入することが精度の点などから考えて現実的である．コストがかからない方法として DR が有望であり，DR の弱点である誤差の累積を補うために，従来のものと比較して少ない数のインフラ設置型測位システムと組み合わせて，導入をしや

すく設計を行うことが試みとして考えられている．

以上に述べられた理由は，重要なステークホルダーである施設管理者とユーザーのニーズに適応していると考えられる．

5 章ではこれらについて，システムズエンジニアリングに沿って要求設計，機能設計，物理設計という順を踏んで，システムのアーキテクチャに関して詳しく述べる．

4　屋内測位技術に関する関連研究

本節では現在すでに提案されている屋内測位技術を始めとした関連研究に関して述べる．すでに述べた通り，屋内測位に関する技術は様々なものがすでに提案されている．本稿ではこれらを，測位においてインフラを使用するかしないかという観点から分類を行い，インフラを使用するものを外部インフラ使用型測位技術，インフラを使用しないものを自律航法として紹介する．

4.1　自律航法 Dead Reckoning

本節では上記に述べてきたインフラ使用型測位と比較して，自律航法(Dead Reckoning :DR)について，二つのタイプに分けて述べる．また本節では DR の欠点ある累積誤差に対してキャリブレーションの方法を紹介する．

DR は加速度センサやジャイロセンサを始めとする様々なセンサを任意に利用することにより行動の特徴量を検出し，累積的に自己の位置を求める技術である．DR はスマートフォンなどに内蔵されたセンサ群を利用するため測位インフラ設置や整備にかかるコストがかからないという点で非常に安価に実現が可能である．またスマートフォンに内蔵されたセンサ群以外のデバイスでもセンサ自体は非常に安価であるため実現がしやすいという利点を持つ．また，DR 自体はユーザーの特徴量から移動距離を推測して累積的に位置を求める方法であり，「いつでも，どこでも」測位を実行できるというのも大きな強みである．[15] しかしながらコストや「いつでも，どこでも」測位が可能であるという大きな強みを持つ半面，DR はセンサが受けるノイズの影響を非常に受けやすく，また測位において誤差がたまりやすいため，実位置から算出距離が剥離しやすいという欠点を持っている．[15]

従来は航空機や船舶などにおいて利用されてきた技術であるが，近年では人間の行動を推測するために研究がすすめられている．本稿では特に人間向け自律航法 PDR(Pedestrian Dead Reckoning)に焦点を置く．

4.1.1　センサ固定型

従来研究されてきたものの多くが，センサを人体の一部に固定することで安定的に人間行動の特徴量を取得するというものである．センサを固定する部位は胸部にセンサを巻きつける方法や，腰部に携帯電話用固定具を利用してベルトに固定する方法，靴にセンサを仕込んで使う方法，さらにはヘルメットと一体化させたセンサを人体に固定する方法など

がとられており，安定的な DR を実現しているものの，携帯電話以外に何かしらのデバイスを人体に固定することをユーザーに強いることとなる．

これまで提案されてきたシステムの例として，代表的なものを示す．興梠らは，加速度と角速度，および地磁気のデータを用いることで進行方向と歩行速度，歩幅を推定する手法を提案している．しかしながらセンサ群は歩行者の腰部に固定されることを前提としている．[25]

図 10　腰部に固定された PDR 装置[25]

また Beauregard は GPS と IMU(Inertial Measurement Unit;慣性計測装置)を組み合わせた手法を提案しているが，これは警察や消防，救助活動や軍用向けの用途を想定しているため，歩行者はセンサが搭載されたヘッドギアを装着する必要がある．[26]

図 11　Helmet-Mounted タイプの PDR 装置[26]

4.1.2　手に保持されたセンサによる DR

本節で扱う DR は，上記のセンサ固定型 DR に対し，スマートフォンに内蔵されたセンサ群に着目し DR の実施を行う．ほとんどスマートフォンにはすでに加速度センサを始めとしていくつかのセンサが内蔵されているため，センサ固定型と違い人間の体の一部に何らかのスマートフォン以外のデバイスを使用する必要がなく，また固定する必要もない．しかしながら，人間の手は多様な動きを行うため人間行動の特徴量にノイズが入りやすく，精密な DR が実現しにくいことや，DR の欠点である累積していく誤差が大きくなりやすいという欠点がある．

これまでに提案されてきたシステムの例として，代表的なものを示す．4.1.1 節で触れたように体の一部に固定されているシステムに対し，Blanke[27]らや Steinholf[28]らの研究ではセンサを自然な持ち方で利用できる歩行者向け DR を提案しているが，その検討・評価は十分ではない．さらにこれを受けて上坂らの研究[29]では，携帯電話を持ち方によって分けて考え，多くの人が携帯電話を持つスタイルである手持ちの方法と手ぶりの方法において，センサーデータから測位を可能にする手法を提案し，評価実験を実施した．所持方法推定の精度は 90%以上であり，二つの保持方法において非常に大きな誤差を得たという報告はされていないが，DR の欠点である蓄積誤差の検討はされておらず，キャリブレーションの手法を検討する必要があることを指摘している．

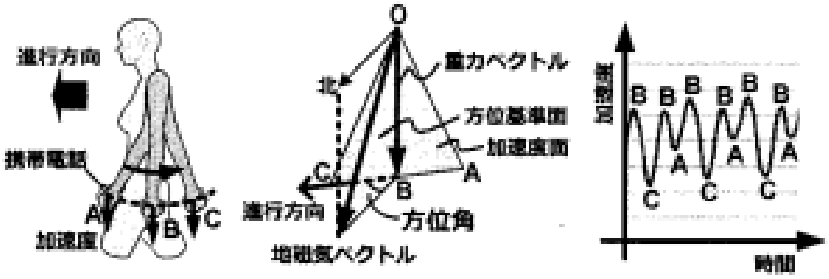

図 12　上坂らの手法による DR[29]

本稿ではスマートフォンのみによる屋内測位を目標としているため，本 DR を研究対象として扱った.

4.1.3　DR 手法とその一覧

これまで述べてきた DR による測位手法の一覧を表 2 として示す.

表 2　DR 手法とその一覧

発表者名	興梠・蔵田ら	上坂ら	Beauregard	Feng Hong[30]
概要	DR の誤差を IMES で Calibration	「手振り」「手持ち」状態においての PDR	Helmet-Mounted タイプの PDR 装置	ポケット内の Smartphone で測位
測位方法	加速度センサ，ジャイロセンサ，地磁気センサ，気圧センサ	地磁気センサ，加速度センサ	GPS と IMU	DR;加速度，ジャイロ
測位精度	数 m 以内	進行方向誤差が 20 度以内(90%)	20m-30m の誤差	数 m 程度のずれ(コース周回において)
初期測位速度	処理速度に依存	処理速度に依存	処理速度に依存	処理速度に依存
必要機材	自蔵センサモジュール	センサを搭載したデバイス	デバイスを搭載したヘルメット	ポケット，スマートフォン
制約と課題	腰部への固定	キャリブレーションの方法等	ヘルメットの装着	(課題などについては未記入)

4.2　外部インフラ使用型測位技術

4.2.1　携帯基地局による測位

NTT Docomo は，屋内の携帯電話基地設備[20] (Inbuilding Mobile Communication System)を利用して，位置情報を取得するシステムを提案している．基地局とは携帯キャリアが携帯電話間の通話を取り持つ通信網の末端で直接携帯電話と無線通信をする装置とそれを備える建造物のことを指す．直接各ユーザーの携帯電話とやり取りをすることが可能である．NTT Docomo が提案するサービスではインターネット接続サービスで子供の位置を探索することができる「迷子探しサービス」[31]として実証実験が行われており，すでに携帯基地局を用いた測位は利用することが可能である．しかしながら測位精度は数百メートルといわれており，詳細な位置を知る事は難しいとされている．

4.2.2　無線 LAN

無線 LAN を用いた位置推定は，基本的に以下の事実によって行われている．[32]

1, すべての無線 LAN 基地局は固有の ID として BSSID(MAC アドレス)を持つ

2，無線 LAN 基地局は，BSSID を定期的にブロードキャストしている

3, 無線 LAN 端末は, 近傍の無線 LAN 基地局からブロードキャストされている BSSID を受信することができる.

無線 LAN 機能を持つ端末ならば, どのような端末でも, 基本的な機能として BSSID を受信できる. これにより, BSSID と基地局の位置を示したデータベースを保持していれば, BSSID を受信しただけで，端末の位置を推定することが可能になる．すでにサービス化されており，日本で一番初めに実用化した「Place Engine」[33]は Wi-Fi 機器を用いたアクセスポイントからの伝即情報を用い，屋内や地下街などの場所においても位置測位を可能としている．10m~100m ほどの測位精度を実現しているが，高精度な測位を実現するためには，正しい位置を覚えこませる作業が必要であるという問題を持つ．また多数の Wi-Fi 機器の設置が必要である．

また，フィンランドの Ekahau 社[34]が展開している Ekahau Positioning Engine は病院やオフィスなど限られた空間において，高精度の位置精度(0m~5m)を実現している．
本システムはリアルタイムに物品管理を行うサービスにすでに用いられており，稼働状況のチェック，メンテナンス状況のチェックなどを行うことができる．

4.2.3　Radio Frequency Identification　(RFID)

図 13　RFID Tag[35]

RFID は近距離の無線通信を用いて情報をやり取りするシステムである．近年では定期券や電子マネーなどによって利用が広がっている非接触型 IC もこの一種である．RFID は二つのタイプに分けることができ，電源を持たない Passive 型と電源を持つ Active 型に分けられる．Passive 型は受ける電波によって電力を得るため，Active 型に比べて 通信距離が短くなり，数 cm 程度となるものがほとんどであるが，Active 方は数 km の通信距離も実現できる．RFID に位置情報を送信する場合は，通信距離が短くなればなるほど，位置精度は高くなると言えるが，その場を探し出して端末を近づけるというアクションをユーザーに強いることとなる．

すでに実用化されている例として，アメリカの小売業最大手のウェルマート[36]では RFID の一種である IC タグを利用して，商品管理を行っている．このように従来のバーコードに代わる技術として RFID を実用化する動きは出てきている．

また，国土交通省の「自律移動支援プロジェクト」[37]は平成 16 年度に始まった「身体的状況，年齢，言語等を問わず，「いつでも，どこでも，だれでも」移動等に関する情報を入手することを可能にする」プロジェクトであり，RFID の一種である IC タグを用いた位置情報システムを利用している．

4.2.4　赤外線

赤外線通信は現在，テレビのリモコンや携帯電話にも搭載される，広く普及した技術である．赤外線通信の規格としては IrDA がある．また転送速度を速めた IrSimple も実用化されている．[38]

この赤外線通信に位置情報を載せて送信することで，それを受信した端末に位置情報を伝えることができる．実際に東京ミッドタウンでは，東京との「東京ユビキタス計画」[38]の一環として，端末としてユビキタス・コミュニケーターを利用した「ユビキタス・アートツアー」が運営されている．これは NEC スマートロケーターという屋内位置管理システムを採用したものである．このシステムも限られた空間を前提としているが，すでに科学館や美術館などにおいての実績を有する．[39]

4.2.5　可視光通信

可視光通信は人間の身の回りにあふれている目に見える光「可視光」を利用して通信を行うという最新の通信技術であり，屋内の照明を利用した通信方法として注目を集めている．[40]この照明からの光に位置情報を載せることで，受信した端末に位置情報を伝えることができる. また近年, 傾向等に代わって可視光通信に適した LED 照明が普及しつつある. 特に，2011 年に勃発した東日本大震災の折から電力の節約に対する意識が国民の間に広がり，従来型の照明よりも電力消費を抑えられる LED 照明の普及に拍車をかけているため, 可視光通信による位置情報サービス普及が期待される.

さらに将来的にはイメージセンサと組み合わせることで，cm 単位の位置情報を伝えることができる研究も進んでいる．また可視光通信を用いて視覚障害者への屋内移動システムの研究などが行われている．[41]

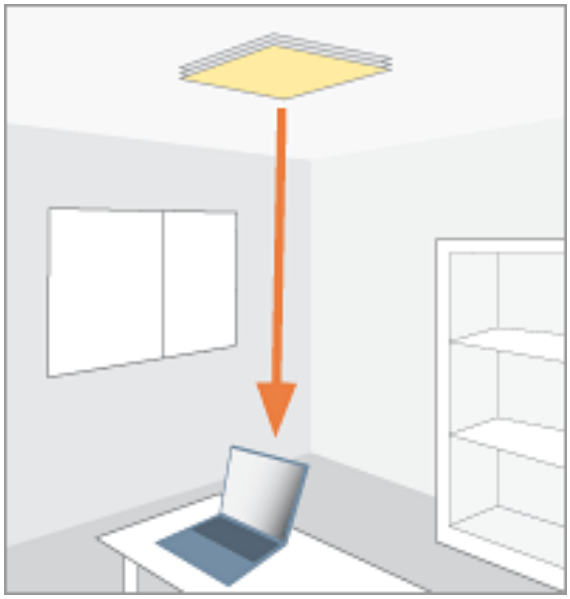

図 14　可視光通信の様子[41]

4.2.6　QR コード

QR コード[42]は 2 次元コードの一種であり，QR コードリーダーにより読み取りやすいコードを主眼に置いて，株式会社デンソーウェーブによって開発された．現在では携帯電話やスマートフォンに搭載されたカメラを利用して QR コードからの情報を読み取る事が可能であるため，広く普及した技術であると言える．

あらかじめ QR コードに位置情報を記録しておき，携帯電話等のカメラで読みだせば位置情報を取得することができる．一方位置情報を取得したいときにこの QR コードを探し出して読みだす必要があるため，そこまでたどり着ければ非常に正確な位置情報を取得できるが，見つけることができなければ位置情報を取得することさえできない．また，RFID と同じく読みだすというアクションをユーザーに強いることとなる．さらに，QR コードの作成は難しくないため，必ずしも信頼性の高い情報といえないことが欠点としてあげられる．

図 15　QR コードの例[42]

4.2.7　UWD

UWD(Ultra Wide Band) [43]は無線通信の方式のひとつで，データを 1GHz 程度の極めて広い周波数帯に拡散して送受信を行うことができる．それぞれの周波数帯に送信されるデータはノイズ程度の強さしかないため，同じ周波数帯を使う無線機器と混信することがなく，消費電力も少ない．位置測定，レーダー，無線通信の 3 つの機能を合わせ持っている．

屋内における測位技術として, 研究がすすめられ 1m 以下の精度を実現するシステムも提案されている．すでにアメリカではマイクロ波帯の UWB を利用した無線タグの測位システムが商用化されている．

図 16　Ultra-Wide Band アンテナ[43]

しかしながら課題としてマルチパスが可能な環境において正確な位置推定を行うことが難しくなっている．

4.2.8　Bluetooth

Bluetooth[44]は近距離通信用無線通信規格の一つであり，数 m から数十 m 程度の距離の情報機器間で，電波を使い簡易な情報のやりとりを行うのに使用される．当初エリクソン，インテル，IBM（現 レノボ），ノキア，東芝の 5 社（プロモーター企業）によって策定された技術である．すでに様々なデジタル機器に採用されているため身近な技術の一つといえる．また，下記の図 17 のように，紛失しやすいかぎなどに対して Bluetooth 通信を用いて位置を特定する技術もある．

図 17　Cobra Tag[45]

屋内測位においては，小型・低コスト・低消費電力であるという強みを持つ．精度として 10cm から 100m 程の精度を実現している．

4.2.9　超音波

超音波は人間の耳には聞こえない高い振動数をもつ弾性振動波(音波)である．超音波は指向性が高くうまく使えば高解像度な探知に利用することができる．そのため，すでに利用されている例として医療用の検査，魚群探知，水深測定などに使用されているほか，小さなモーターやリモコンなどの通信や骨伝導スピーカーといった様々な用途を持つ．

超音波測位[46]の原理は，「タグ」と呼ぶ送信機から発信した超音波を，「リーダ」と呼ぶ受信機最低 3 個以上で受信し，各々のリーダまでの超音波の到達時間の違いを利用して，それぞれのリーダまでの距離を算出する．この距離をもとに GPS と同様に 3 点測量の要領で音源の X，Y，Z の 3 次元位置を特定するという方式を用いている．

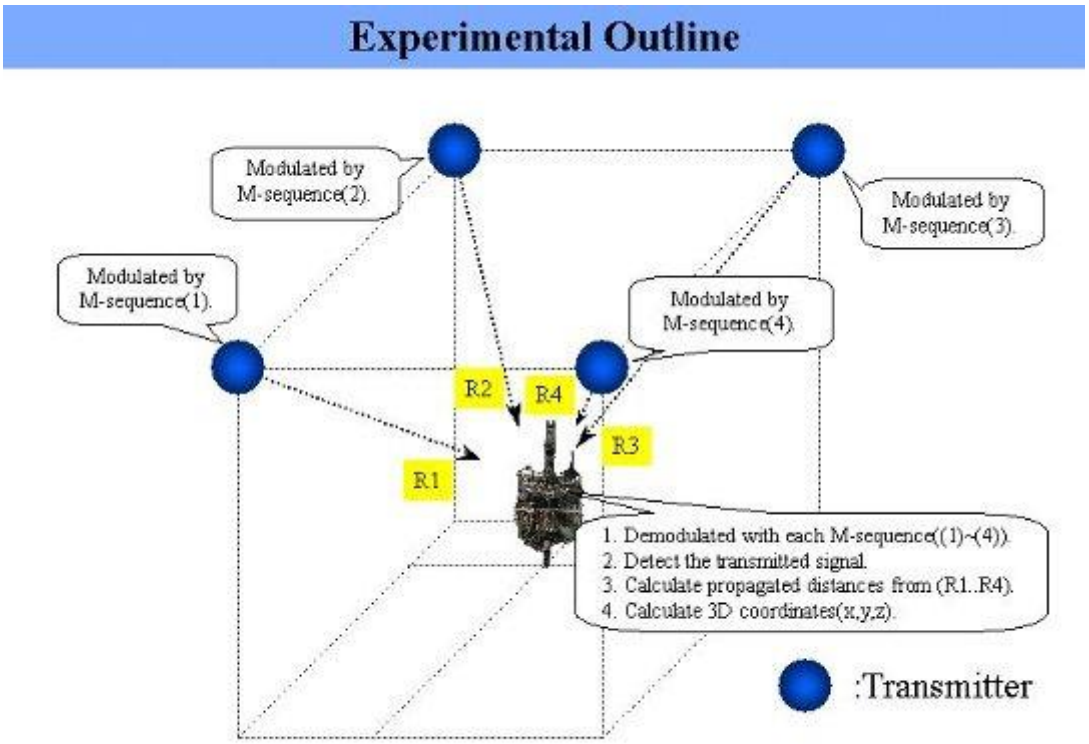

図 18　超音波を利用したナビゲーションシステム[47]

4.2.10　Indoor Messaging System (IMES)

IMES(Indoor Messaging System) [16]は GPS と互換性のある信号を利用して，位置情報を送信することができるシステムである．よって屋内に送信機を設置することで，GPS 受信機単一で屋内外をシームレスに測位できることが見込まれている．また，もうひとつの IMES の特徴として，緯度，経度，高さ，フロア階などの情報をメッセージとして送信するために固定された空間に同一の情報を送信するために，非常に信頼性の高い情報を送る事ができるというのも一つの特徴である．

IMES は独立行政法人宇宙航空研究開発機構[48] (Japan Aerospace Exploration Agency：JAXA)によって仕様が提案されており，日本においては電波法で規定されている微弱電波を使用するため，無線局免許不要で設置，運用が可能になっている．PRN 番号(Pseudo-Random Noise Number)として 173 から 182 までの 10 の番号を使用することができる．また信号強度を変化させることで任意に位置情報を送信する範囲を変えることができるが，送信範囲を広げすぎるとメッセージによって得られる位置情報との誤差が大きくなってしまうというトレードオフの関係を抱えている.すでに二子玉川 RISE においては実際に設置が行われている．[49]

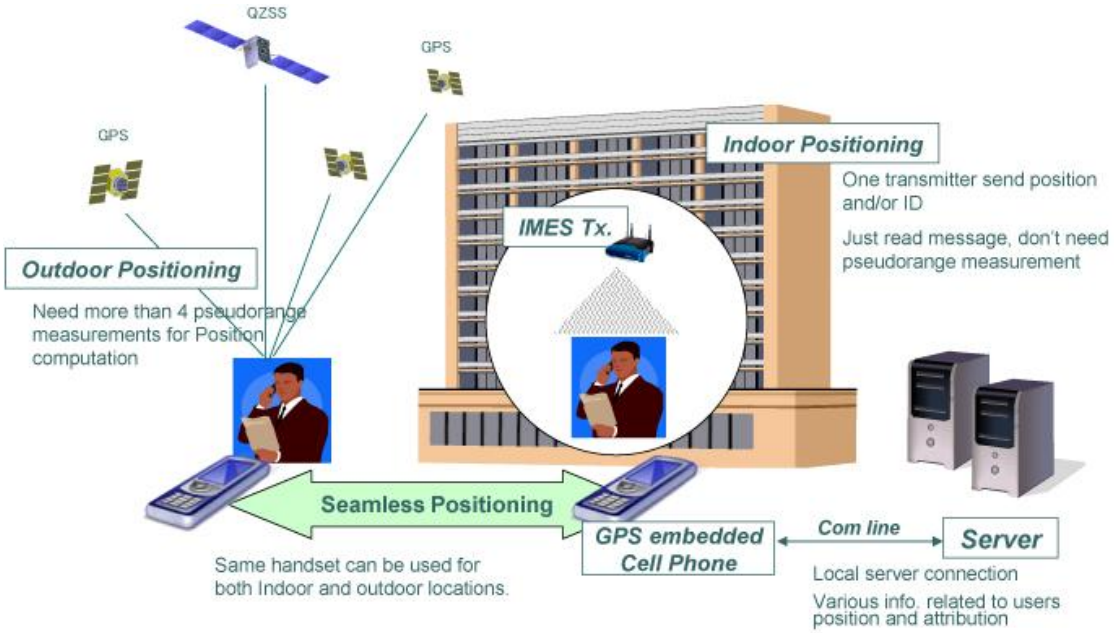

図 19　IMES によるシームレス測位[50]

4.3 インフラ型測位一覧

表３にこれまで述べられてきたインフラ使用型屋内測位技術についてまとめて記述した.

表 3　インフラ使用型測位技術一覧

測位方法	手法	精度	備考
携帯電話基地局	フロアを一定エリアに分割して検索する。	10m-1km	株式会社NTTdocomoが埼玉イオンレイクタウンにて2009年より「迷子探しサービス」を実施
無線LAN	無線LANの電波状況を専用サーバに問い合わせて位置情報を得る。	10m-100m	PlaceEngineとSkyhookWirelessが実用化。既存の無線LAN曲を利用するため設置費用は大きくならないが信頼性に乏しい。Ekahauが専用端末を使用することで実用化。100万円以上
RFID(passive)	ICタグをリーダに触れさせることにより、位置情報を取得する。	1cm-10cm	Suicaなどで実用化済。その場で触れる必要がある。
RFID(active)	ICタグから電波を出し、位置情報を知らせる。	1m-10m	実用化。継続的に電池交換などが必要になる。
赤外線	送信機から赤外線を出し、位置情報を知らせる。	1m-10m	Smart Locatorなどで実用化。専用受信機が必要。多くの携帯電話にも採用。
可視光通信(フォトダイオード)	照明のLEDから位置情報を受信する。	1m-10m	LED証明設備を利用可能。
可視光通信(イメージセンサ-)	2点のLEDから位置情報を得て画像処理をする。	0.1m以下	2点のLEDから位置情報を得て、画像処理を行う。
QRコード	二次元バーコード。カメラが認識するまで近づく必要がある。	1cm-10cm	携帯電話の内蔵カメラなどで実用化。
UWD	超広帯域無線を利用して、TDOA方式を用いて測位するシステムが商品化されている。	0.1m-1m	無線ICタグを利用。
Bluetooth	Bluetooth通信を利用して位置情報を送信する。	1m-10m	様々な通信機器において実用化済み。
超音波	人間の耳には聞こえない複数の音波を利用し、位置を推定する。	1cm-10cm	超音波を発生させる装置を屋内に設置させる必要がある。
IMES	屋内に設置した専用送信機からGPSと互換性のある電波を送信する。	1m-10m	GPS受信機が活用可能。

本稿では歩行者向けのサービスを念頭に置いて研究を進めている．よって cm の精度が必ずしも必要になるわけではない．実際に 4 章で詳しく記述するが求められているニーズでは，精度で言えば 5m から 10m 以内にある誤差である．よって実用化の目処や使いやすさの観点から判断を行う必要がある．

4.4　DR へのキャリブレーション手法

上記のように DR には使い続けるうちに実位置から剥離しやすいという欠点があることはすでに述べたが，これに対して 4.1 で取り扱ったインフラ設置型測位技術と併用することによってある一定の精度を確保することを目指した研究がなされている．これまで提案されてきたシステムの例として，代表的なものを示す．

Jimenez Ruiz らの研究[51]では靴に固定されたセンサによる DR と併用して RFID を歩行コースに多数設置することで，位置推定精度を非常に高いものとして実装している．しかしながら図のように RFID リーダを同時に用いる必要があることや多数の RFID の設置やメンテナンスの難しさから実装は難しいと言える．図 20 に Jimenez Ruiz らの研究から，RFID の設置場所が書かれた地図を示す. 図の赤い点ように多くの RFID を設置する必要があることがうかがえる．

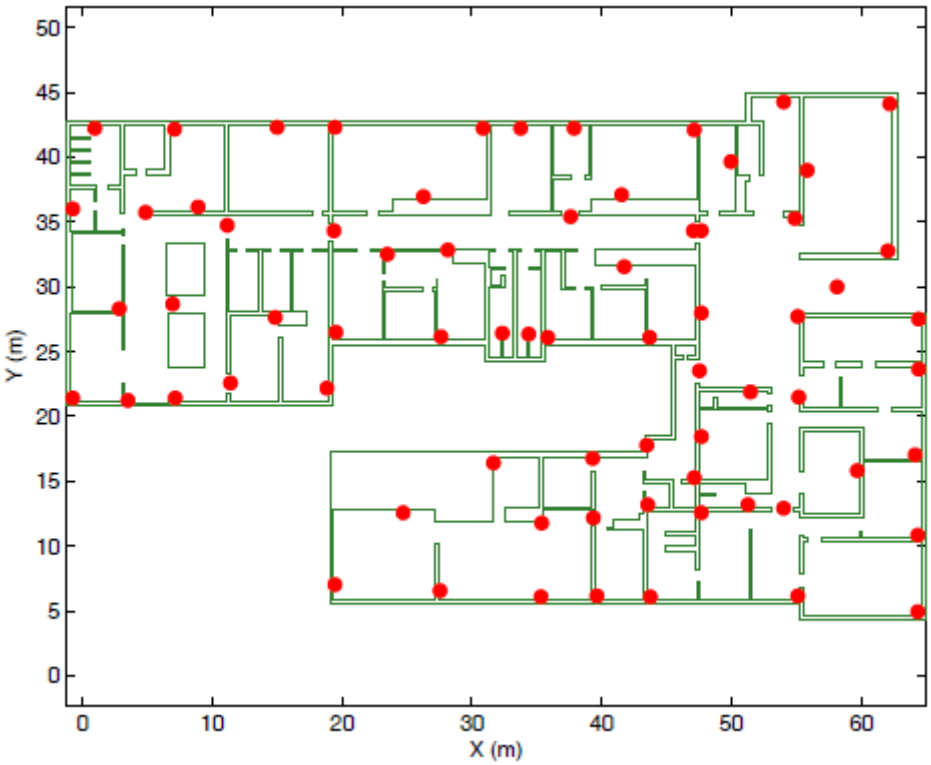

図 20　RFID によるキャリブレーション[51]

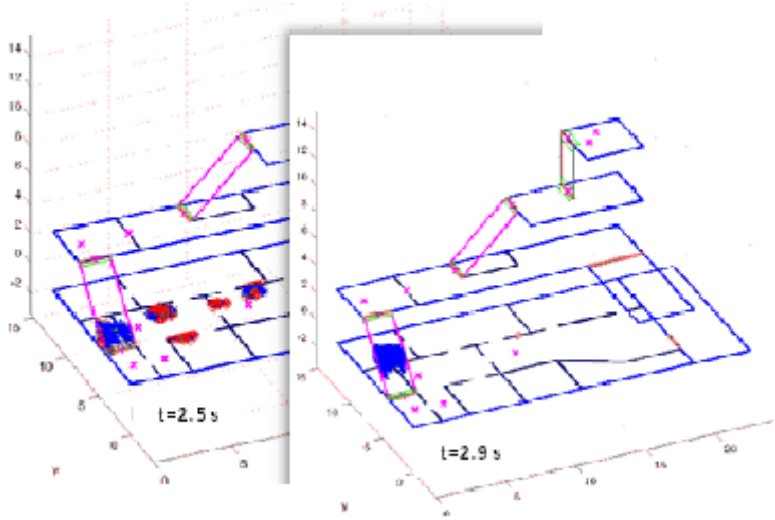

図 21　屋内地図によるキャリブレーション[52]

また Ascher らの研究[52]では，胸部に固定した IMU による DR と併用して，あらかじめ用意しておいた地図の情報から人間の歩行では立ち入ると考えにくい場所などを排除するなどの処理を行うマップマッチングという方法で精度を向上させている研究がある．図 21 として Ascher らが利用した屋内地図を示す．　この研究では将来的に屋内地図の整備に伴って非常に実現性が高いと言えるが，膨大な屋内環境地図のデータ化等を考えるとまだ実装が難しいと言える．

Fig. 10. An overview of the device orientation according to the measurement direction

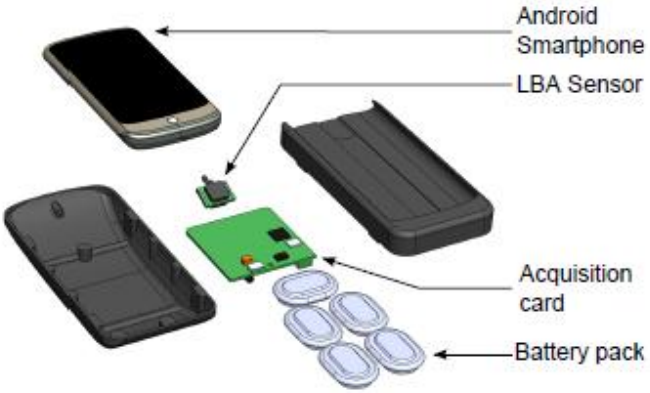

Fig. 11. Detailed view of the main parts of our prototype

図 22　風力センサを用いた PDR 装置[53]

また，Trehard らはこれまでにない試みとして，風力センサを併用することで PDR(Pedestrian Dead Reckoning)の実現に取り組んでいる．[53]Trehard らが提案しているシステムでは図 22 に表されている通り，スマートフォンなどの手に保持できる装置に外付けする形で風力センサを取り付け，風力によって測位者の移動などを知るシステムの構築を試みている．しかしながら Trehard らが提案しているシステムは環境への依存が強く，乱流の影響なども考慮する必要があるため，実用性が高いシステムとは言い難い．

図 23　視覚障害者向けの測位システム(PDR 装置，LRF などを使用) [54]

蔵田らの研究[54]では，視覚障害者向けの測位システムとして PDR 装置と GPS，Wi-Fi，RFID やレーザー式測域センサ(LRF)を併用したシステムを構築し，それぞれの実験結果および統合結果，さらにはルートマッチングを行った場合の比較実験を報告している．統合された結果では平均 6.7m の測位精度を実現しているものの，図 23 の通り測位者の胸部や背中などに大きなシステムを設置する必要がある．

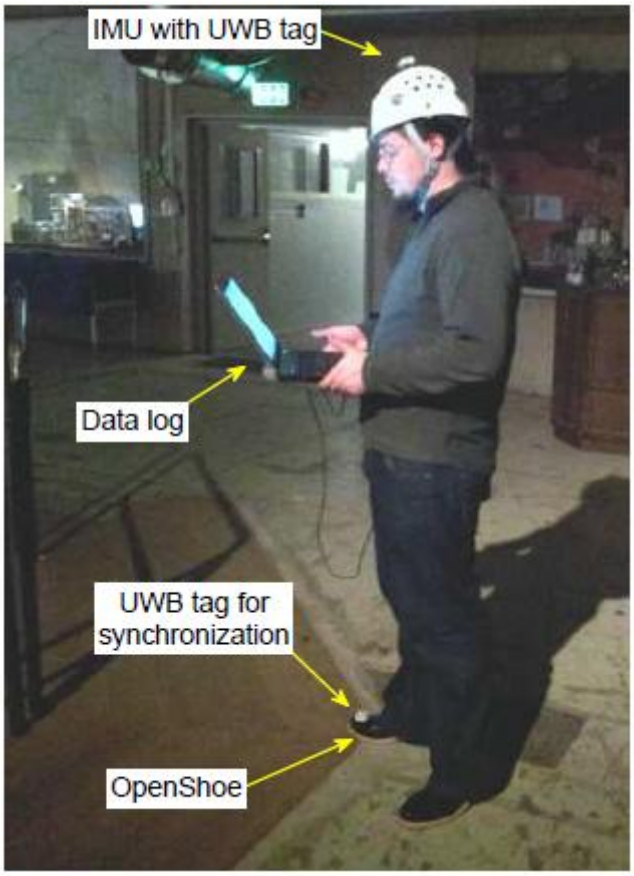

図 24　IMU と UWB を組み合わせた技術よる屋内測位技術

また Zampella ら[55]は頭に付けられた IMU(Inertial Measurement Unit)装置に対して，UWB を併用することでキャリブレーションを実現するアルゴリズムを構築しているが，図 24 の通り，Helmet-Mounted タイプを想定しているため，蔵田らの研究と同様に一般のユーザーへは負担が大きいものと考えられる．

本稿の研究も，これらの研究コンセプトと同様に DR 単体だけではなく，他の装置と併用することでより実用的な測位を目指す研究であると言える．次の 4.5 節に表 4 としてこれらの技術を一覧としてまとめた．

4.5　キャリブレーション手法の一覧

これまで述べてきた DR へのキャリブレーション手法の一覧を表 4 として記述した.

表 4　DR へのキャリブレーション手法一覧

発表年	2011	2010	2012	2010	2012
発表者名	Jimenez Ruiz	Ascher	Trehard	蔵田	Zampella
概要	RFIDタグをあらかじめ設置した場所をPDRで測位	IMUとマップマッチング	Androidに外付けしたMEMSを用いたPDR	PDRとWi-Fi, RFID, LRFを併用した測位システム	IMUとUWBを併用した測位システム
測位方法	IMU, RFID	IMU, 地図データ	DR;マイクロフローセンサ	ジャイロ, 地磁気, 加速度, RFID等	DR;加速度, ジャイロ
測位精度	数m以下	精度に関しては未記述	総走行距離の6%(最適)	数m以下	数m程度のずれ(コース周回)
初期測位速度	処理速度に依存	処理速度に依存	処理速度に依存	処理速度に依存	処理速度に依存
必要機材	RFID, RFIDリーダー, IMU	IMU装置	ジャイロ, 風速計(外付け)	PDR装置, LRF等	IMU装置, UWBアンテナ
制約と課題	多くのRFIDを設置	マップデータの整備	環境, 乱流の変化	体に固定	体に固定
考察	多くすることで2m以下まで精度を高められる	整備方法の考察が必要	環境に対応可能な補正方法の検討	腰部固定型のPDR	Head-MountedタイプのPDR

4.6　従来法の問題点まとめ

本章ではこれまで現在までに提案されている様々な技術に関して触れてきた.

上記のように従来のインフラ利用型システムではメンテナンスの手間やコストが大きく負担となっていた．また，スマートフォンに実装されないデバイスを使用することからユーザーになんらかのスマートフォン以外のデバイスを持たせることを強いるシステムとなっていた．また DR では誤差が累積しやすく精度に信頼性が持てないという問題があり，この問題に対して様々な手法を用いてキャリブレーションを実施するという試みがなされている．しかし，スマートフォン単独で測位が可能でなかったり，たくさんのインフラ設置型測位システムを設置する必要があったりと実現性に乏しいと言わざるを得ない問題を

抱えている． これらの課題を解決し，3 章で述べた要求を満足するためにはスマートフォンに内蔵されたセンサである加速度センサやジャイロセンサを用いての DR と何かしらのインフラ設置型を用いて組み合わせることが有効である．

そこで，本稿では DR に IMES を組み合わせることを提案する．IMES は GPS と互換性を持つため GPS センサを使用できる点で，将来的にシームレスな測位を実現することを考えるともっともユーザーが利用しやすいと判断できる．また，精度においても最大で 10m 程度の誤差であると言われていることから適することが分かる．詳しいシステムに関しては 5 章で述べるが，以下に本システムを利点に関して触れる．

それに対して，本システムでは以下の点を実現していると考えられる．

・スマートフォンでの実装を想定し，実装可能なセンサの身を用いたシステムであること

・従来の DR の弱点であった累積誤差を補正するため実用的なインフラ測位システムを利用し，従来のインフラ設置型測位システムを導入するより低いコスト，かつ DR より高い精度を実現すること

・ユーザーに負担をかけず(ユーザーが意識することなく)，将来的にシームレスに屋内外を測位できる屋内測位システムであること(GPS との互換性)

5 章では，これらの本稿で提案するシステムに関して述べる．

5　自律航法によるIMESキャリブレーションシステムのデザイン

5.1　自律航法とIMESによる屋内測位システム

これまで3章では屋内測位システムに求められる要求に関しての整理を行い，4章ではそれが現状提案されているシステムでは満たしていないことを述べ，本稿ではIMESによってDRをキャリブレーションすることで解決しようとしていることを述べた．IMESを提案する理由は主に3つある．

一つは実現性の高さである．まず測位デバイスを提供する側としては，屋内と屋外で測位技術を逐一切り替えるようなシステムならば，その分センサなどを多く組み込む必要が出てくる．　本稿ではスマートフォンでのサービス提供を視野に入れているため，すでにたくさんのセンサが内蔵されているスマートフォンにおいて新たなデバイスを入れるということは厳しいと考えられる．またもし多くのセンサの実装が可能，もしくは既に入っているものであっても，多くの情報を取り入れられる分，どのセンサの情報に優先順位を持たせるかということも考える必要がある．この点に関してはIMESにおいてもGPSとのマルチパスという問題が考えられるが，これは森本の提案システム[56]を使うことで解決できると考えられる．

またこのような測位技術をインフラとして屋内環境に整備するにはある一定の初期投資コストと継続するためのコストがかかり，実現の妨げの一つとなっていることと，サービスを実際に使用するユーザーにとっては，いちいち切り替えの意識をせず簡単に使用できることや少ない測位技術であればその分電池の消費量を抑えられることが考えられることも問題である．上記のような理由から，今現在広く普及している屋外位置情報サービスを支えるGPSと同時に使用することができる技術が望ましいと考えられる．

これに対してIMESならばGPSセンサを使用することが可能であるため，新たなセンサを内蔵させる必要性もなく，　屋内外をシームレスに測位することができると思われる．さらには電池の消費量も単一で済むため少ない．また，IMESの送信範囲は半径1~10mであるためRFIDやBluetoothなどと比較してもより多くの送信機を設置する必要がなく，DRへのキャリブレーションを目的としているので密に設置する必要がない．これらの点からIMESは他の測位技術に比較して要求を満たすシステムを実現しやすいと考えられる．

またもう一つの利点は，IMESがDRと相性が良いシステムであるからである．DRはシステムデザインを行う上で，いつでもどこでも測位できることやそのコストから 3 章で提

示した要求を満たす上で欠かすことができない測位システムであると言えるが，しかしながら特に人間向けの DR は，人間な複雑な行動の影響を受け正しい位置を継続的に導き出すことができないという弱点があり，それに対して様々な方法でキャリブレーション方法を提案している事をすでに述べた．また DR には初期位置(つまり測位を開始する位置)を自身で入力してそこから位置を推測する必要がある．

これに対して IMES は同じく緯度，経度，階数などの位置情報メッセージをスポットに入った測位者に対して送るというシンプルなシステムであり，送信可能な 1m～10m の範囲に測位者がいることを教える堅実性の高いシステムであるため，DR の誤差を要求の精度の範囲でキャリブレーションすることが可能であり，さらには DR に，確実性の高い初期位置を教えることができる．

つまり本システムのコンセプトは，DR の誤差を IMES で補正するとともに，DR を併用することで IMES の設置間隔を広げて送信機の個数を減らし，コストを少なくすることを目的としている． 以下に本システムにおいて予想される性能の比較表を示し，6 章における実験により検証を行う．

5.2 IPSUIC (Indoor Positioning System Using IMES Calibration)

本稿では提案するこのシステムの名称を Indoor Positioning System Using IMES Calibration(以下 IPSUIC)とした．本節では IPSUIC のアーキテクチャに関して，3 章で扱った要求から機能設計を行い，物理設計と経ることで記述する．システムの構成についても説明する．

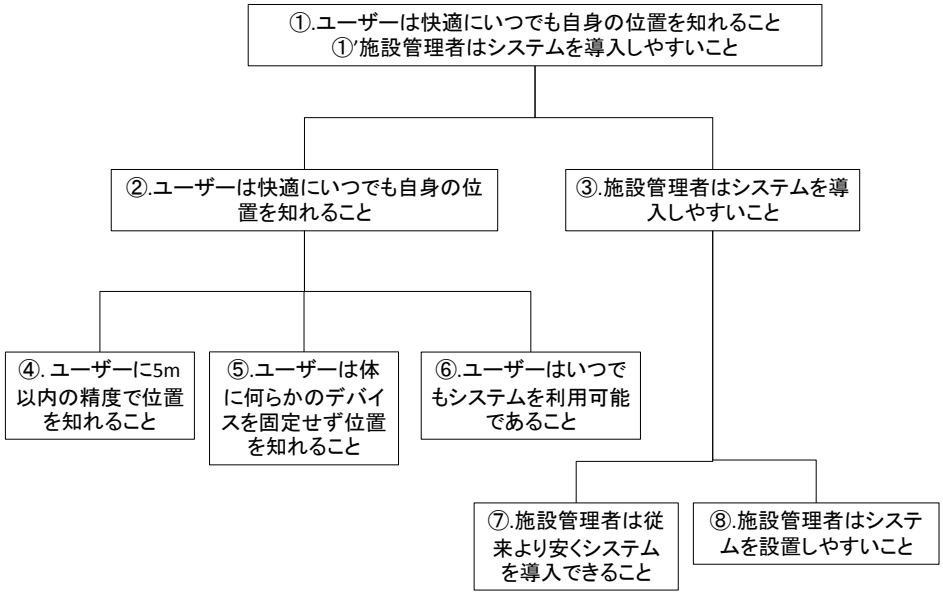

図 25　要求開発ツリー

本システムの最重要ステークホルダーは，ユーザーと施設管理者としている．よってツリー構造の最上部に二つの要求を設置し，ユーザーの要求を左部，施設管理者の要求を右部として記述した．下記に上記のツリーを作る上で構造を明確にするために，言葉の定義を示す．

② ユーザーは快適にいつでも自身の位置を知れること

この要求において「快適」とは，ユーザーが使い続けるにあたって十分な精度をもち，スマートフォンなど手に保持することができるデバイス単一で実現が可能であるということを指す．また「いつでも」とは，本システムが導入可能な，手に保持されたデバイスが利用可能なときである．これらはこのツリー構造を用いた設計過程において同様の定義とする．

これらの定義をもって②は④，⑤，⑥に分解される．十分な精度としてニーズから 5m 以下の精度を達成することを目標とした．また⑤もニーズから考えて，ユーザーに負担がないよう手に保持されるデバイス以外使用しないことを念頭に置いて記述した．また⑥は，場所によって限定されることなく本システムが使用可能な場所ならばいつでも，どこでも利用可能であることを考慮した．

③ 施設管理者はシステムを導入しやすいこと

施設管理者のシステムが導入しやすいということは，設置の際に手間がかからずメンテナンスなどが簡易であることや，初期投入およびランニングコストが安価

であることが求められている．しかしながら具体的な価格などは施設管理者ごとによって違うため断定することができない．よってこれらは⑦および⑧に分解され，本稿では従来のシステムに比べて提案するシステムを適用することでどれくらいコストに対して低下させられることができるのかを考察する．

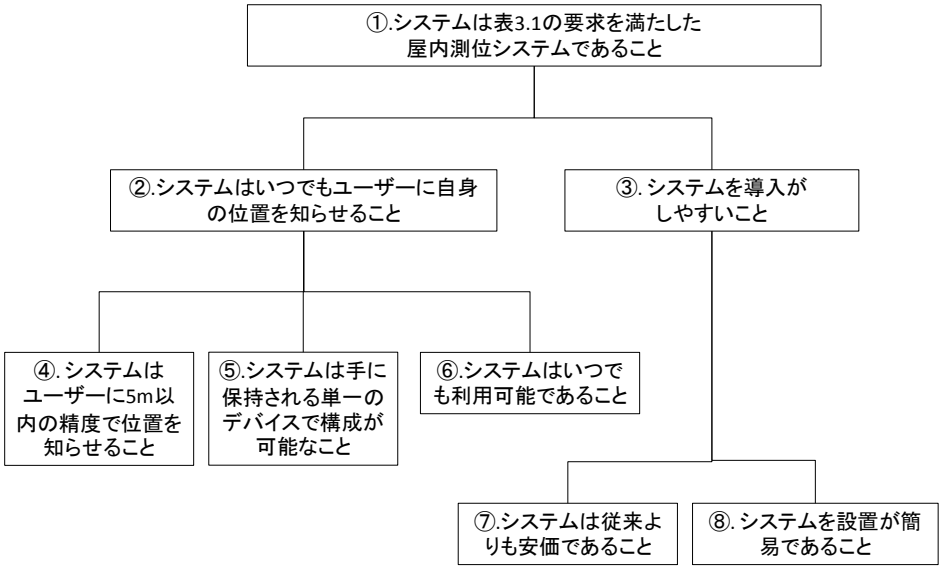

図 26　機能設計ツリー

図 26 の機能設計のツリーでは要求ツリーで分解された要求を満たすための機能を示している．また，示された機能は，要求と一対一に対応がなされていることが分かる．これらのなかで使われている言葉の定義は要求と同様のものとして扱う．

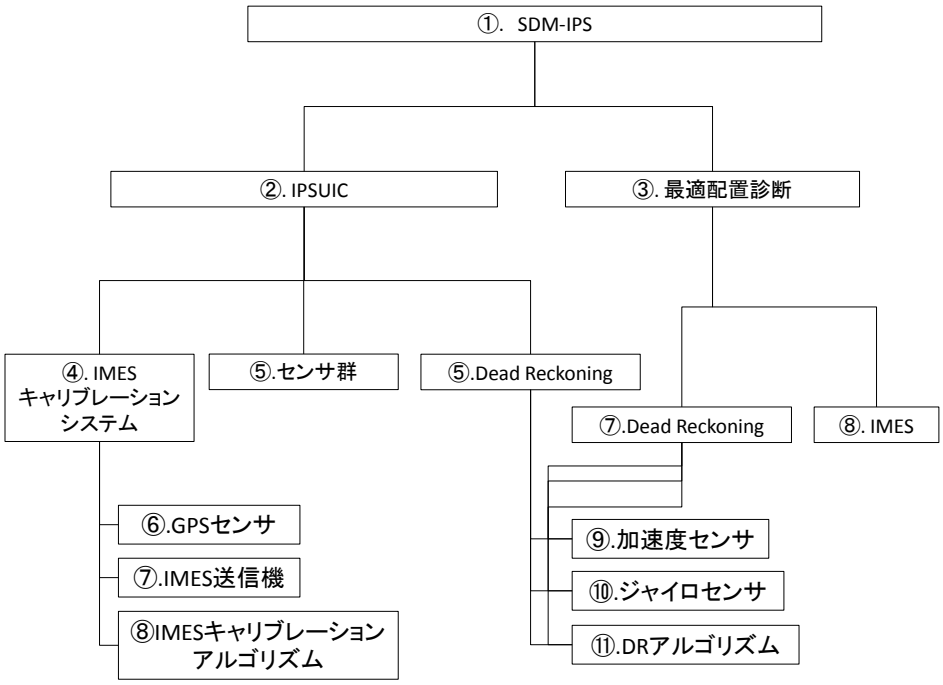

図 27　物理設計ツリー

図 27 の物理設計においては機能設計において表示された機能を実現する具体的なシステム名やデバイス名を示す．本システムでは具体的に IMES 送受信機，加速度センサやジャイロセンサなどのセンサ群などが物理的なデバイスであり，これらによって IMES のキャリブレーションシステムや Dead Reckoning が実現されている．

5.3　測位システムのアルゴリズム

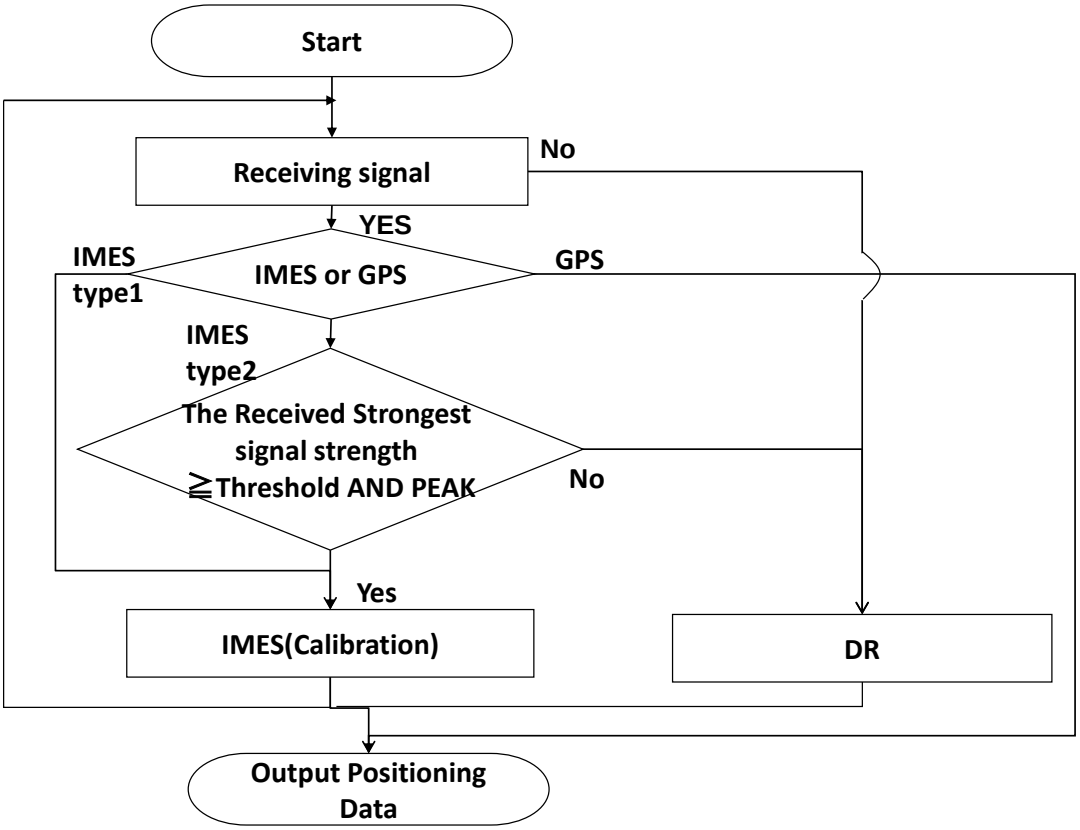

図 28　提案する測位システムのアルゴリズム

本稿では 2 つのキャリブレーションシステム(Type1 と Type2)と DR を用いて構築された測位システムを提案する．5.3.1 節からはこのシステムを構築する DR のアルゴリズムについて述べ，5.3.2 節からは IMES によるキャリブレーションとそのタイミングについて述べる．

5.3.1　自律航法の測位アルゴリズム

本システムを構成する DR(自律航法)は上坂[29]らによるシステムを参考としている．センサと推察によって歩数，進行方向，歩幅の三つのデータを取得することで移動距離を算出する．歩数によって検出した一歩を歩幅との単純な掛け算によって一歩の距離を算出し，さらに進行方向のデータを用いて直前の位置からどれほど移動したかを決定する．

具体的には位置の絶対座標を $p=(x,y)$ とし，直前の位置からの変位を d，進行方向の方位角を θ，歩幅を l とすると $n+1$ 歩目の位置 p_{n+1} は以下の式より得られる．

$$
\begin{aligned}
p_n &= (x_n, y_n) \\
p_{n+1} &= p_n + d_{n+1} \qquad \cdots\cdots (5\text{-}3\text{-}1\ 式) \\
d_{n+1} &= (l_{n+1}\sin\theta_{n+1}, l_{n+1}\cos\theta_{n+1})
\end{aligned}
$$

つまり，本アルゴリズムによって位置を知るためには歩数，進行方向，歩幅推定のデータを取得することが肝要である．

上坂らが提案するものは地磁気センサを使用しているものであり，地磁気センサは場所に応じて強弱のある電磁波の影響を受けてしまうため普遍的なシステムを構成できないと考えられる．よって本稿では DR を構成するためのデバイスとして加速度センサと角速度センサを用いた．本稿で提案するアルゴリズムの全体図を下記の通りに処理フローとして示す．なお，点線で囲まれた歩幅入力と人間の行動が Input であり，太い枠で囲まれている算出された位置が Output である．

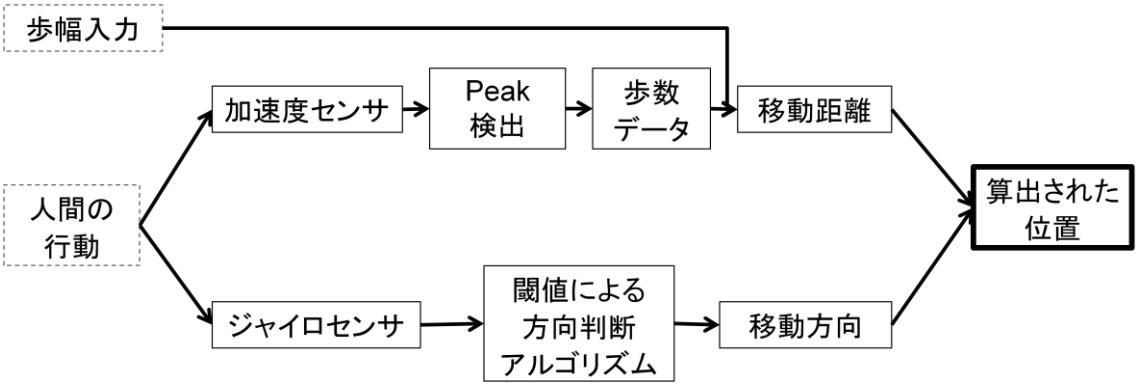

図 29　DR アルゴリズムの処理フロー

5.3.1.1　歩数の検出と加速度センサ

加速度センサには多くのスマートフォンに内蔵されている加速度センサを使用する．しかしながら本稿ではスマートフォンに内蔵された加速度センサでは仕様が分からなかったため別個にセンサを用意することでプロトタイプとした．(詳しくは 6 章にて後述する)

加速度センサを使用することで，図 30 のように重力加速度方向の検出が可能であり，人の歩行データを取得することができる．これによって人が歩行するたびにピーク値を検出することができ，ピークの数を数えることでユーザーの歩数を知ることができる．もちろん保持しているユーザーがセンサを振ってしまうと歩数がずれることがあるが，将来的には現在あるナビシステムなどと同様に画面を見ながら使用することを想定しているため最小限に手ブレによる歩数認識は抑えられると考えられる．　この上述した手によるブレの影響と IMES キャリブレーションによる精度向上を評価するために実験 6.4 を行い検証した．

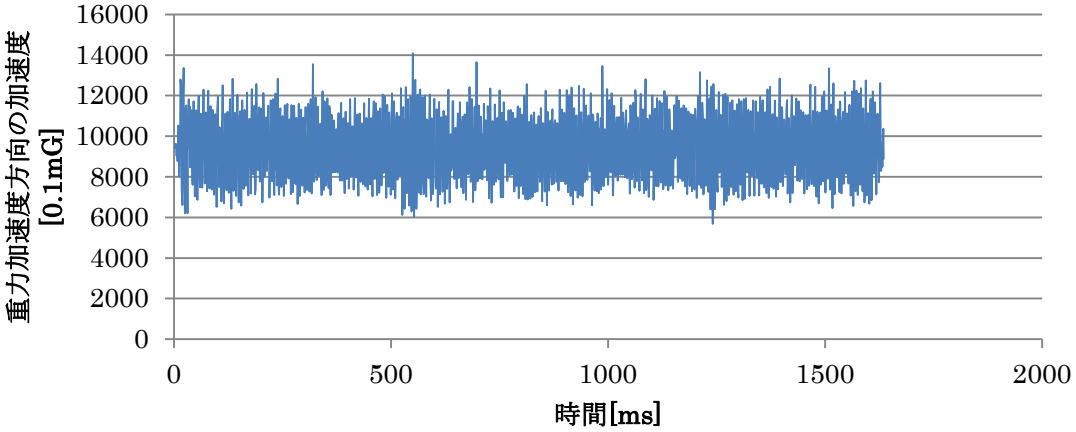

図 30　加速度センサによる重力加速度方向の検出(ピーク)

図 30 のようにピークを検出するために加速度の値を用いて図 31 のアルゴリズムを用いて歩数の検出を行っている．歩数を検出するためには，任意の時間において得られた加速度が 0.1 秒前と 0.1 秒後の値に比べて大きければよく，歩数を認定するのは少なくとも 0.1 秒後となってしまう．しかしながら人間の歩行を対象としているため，0.1 秒のタイムラグは無視してよいと思われる．

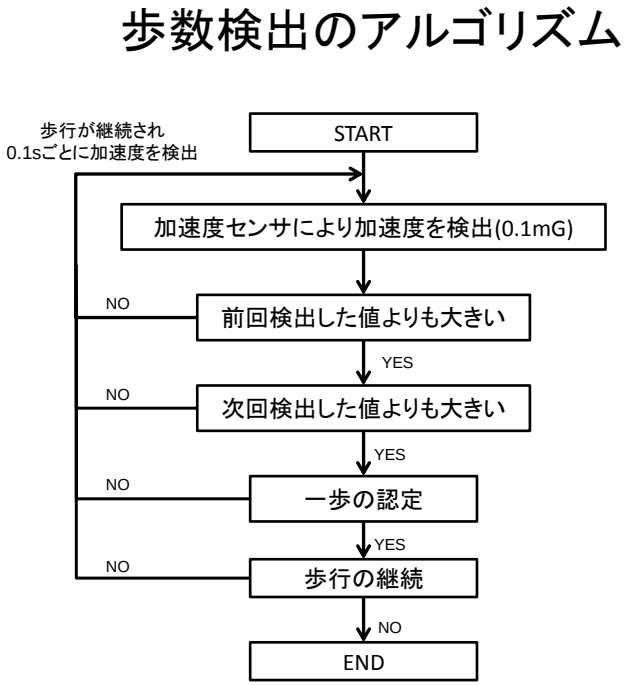

図 31　歩行検出のアルゴリズム

5.3.1.2　方向の検出と角速度センサ

角速度センサは上記の加速度センサと同様にスマートフォンにすでに内蔵されているも

のが多いため将来的にはスマートフォンに内蔵されたものを使用することが望ましい．しかしながら本稿では同様に仕様が分からなかったため別個のセンサによってプロトタイプとして作成している．

角速度センサによってわかる情報は曲がったこと，およびどれほど曲がったのかということである．しかしながら人間の行動は複雑であり，さらにセンサがプロトタイプにおいてもスマートフォン内蔵の場合でも，多くの場合手に保持されているため角速度センサによる方向の推定は精密な位置測位にとっては致命的なミスになりかねない．

よってこれらの状況と実現したいサービスを考慮し，本稿では従来に利用された角速度センサがはじき出す細かい値を利用して方向を計算するよりも，実験的に様々なアクションを行い，どのような運動をした場合どれほどのデータを記録するかということを実験的に記録して行動を推察することにした．このアルゴリズムを構築するために行った予備実験が実験 6.3.1 である．

実験の結果から，一度停止したのち直角な曲がり角右左折した場合と，人が自然な形で歩行してウ左折する場合は違う値が出ることが分かった．今回作成するアルゴリズムはナビゲーションなどを考慮して，人が自然な形で曲がることを意識した．その結果，右左折と直進を判断する基本的なアルゴリズムを採用した．アルゴリズムの詳細は下記の図 32 である．0.1 秒ごとに角速度の値が得られ，

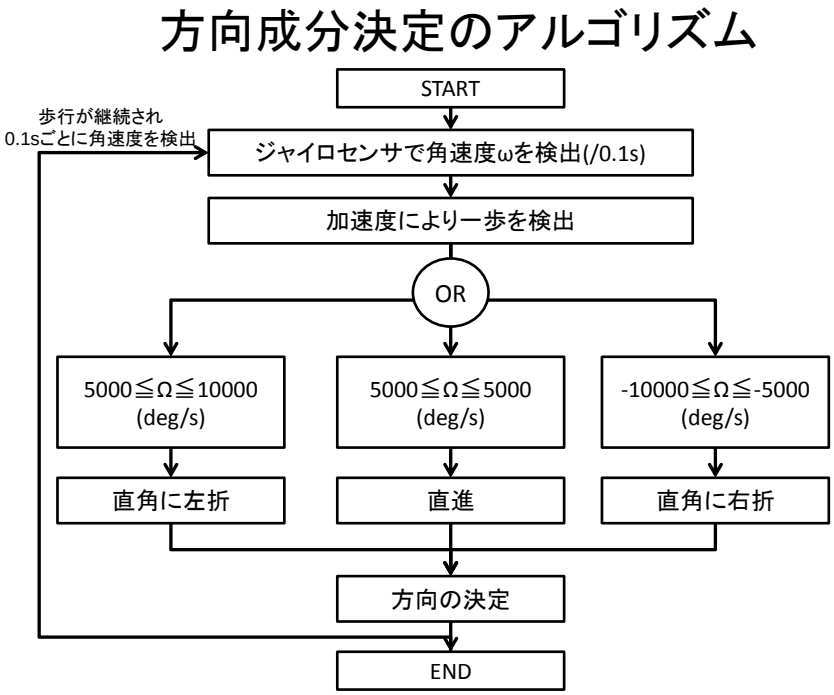

図 32　方向成分決定のアルゴリズム

5.3.1.3　歩幅の検出

歩幅は歩行距離を決定する重要な要素の一つであり，同じ歩行者であってもタイミングの違いや長さの変位が生まれてしまうなど固定されるものではない．これまでの研究では年齢や性別，身長，地面のこう配や靴，心理状態など様々な影響を受けて変化をすることが分かっている．本稿では上坂らの研究と同じくもっとも原始的な歩幅推定手法を用いる．すなわち歩幅と身長の関係を利用する．理学的にはこれらを支持する定量的なデータはないとされているが，上坂らの論文では実験的に大きな誤差が生まれていないことを示している．これらの歩幅のデータに関する詳細な考察は上坂らの論文を参考にされたい．
本稿のアルゴリズムでは歩幅は既知のものとし，身長から推察し歩幅と考えることとした．また乱数によって，±15cm の範囲で変動させるものとする．

5.3.2　IMES による位置測位

IMES による測位には，まず送信機として測位衛星株式会社製の IMES 送信機を想定している．また現在スマートフォンなどに内蔵されている GPS 受信機はソフトウェア上の PRN 番号による設定から，IMES による測位を可能としていない．よって将来的にはスマートフォンに内蔵される IMES 対応型の GPS 受信機を使用することができると考えられるが，本稿では SuperStar2(詳しくは 6 章に後述)を使用してデータを取得した．

5.3.2.1　IMES による自律航法の累積誤差キャリブレーションシステム

本システムでは IMES によって DR の累積誤差をキャリブレーションすることが特徴の一つとなっている．しかしながら以前筆者らは，単純に IMES の信号が取れた場合には IMES によって得られた位置情報を使用するというアルゴリズムを構築した. このシステムを Type1 とする．しかし屋内環境によっては IMES の信号が遠方でも取れることがあるなど，DR による誤差の方が IMES の持つ固定誤差よりも小さくなってしまい，キャリブレーションすることで逆に誤差が増えるなど，有効なキャリブレーションが得られないことを報告している．

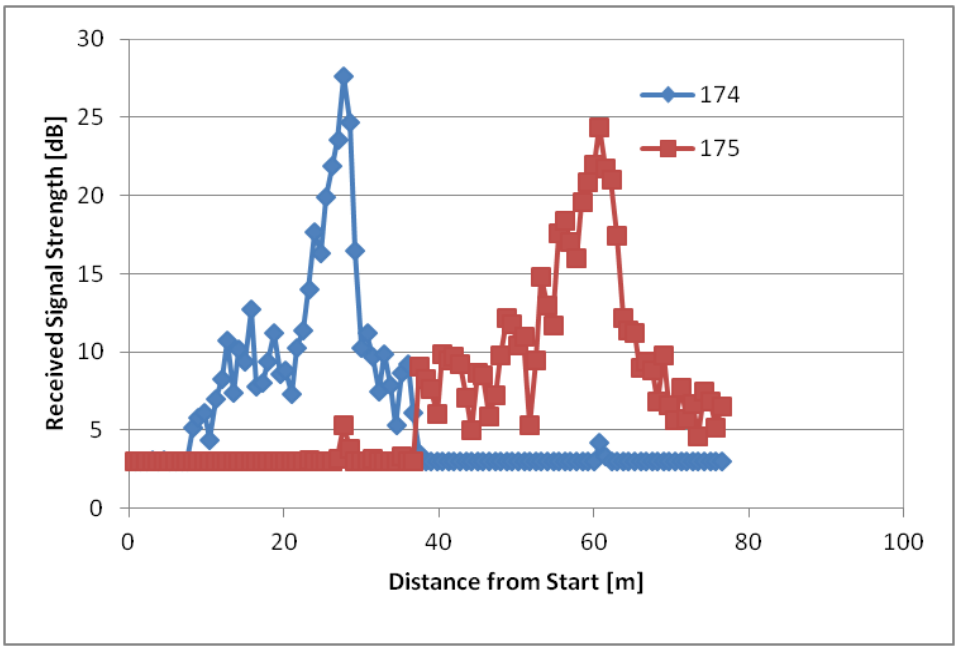

図 33　IMES による受信信号強度の例

そこで，本稿で提案するキャリブレーションシステムには補正のタイミングをより高精度なものとするため信号強度によるタイミング判断を行った．つまり，図 33 のように IMES 送信機に近ければ近いほど強い信号強度によるメッセージを受信することが可能である．これを有効に生かすため，二つのアルゴリズムをキャリブレーションシステムに組み込んだ．これらを図 33 の図を用いて具体的に示したものが図 34 である．

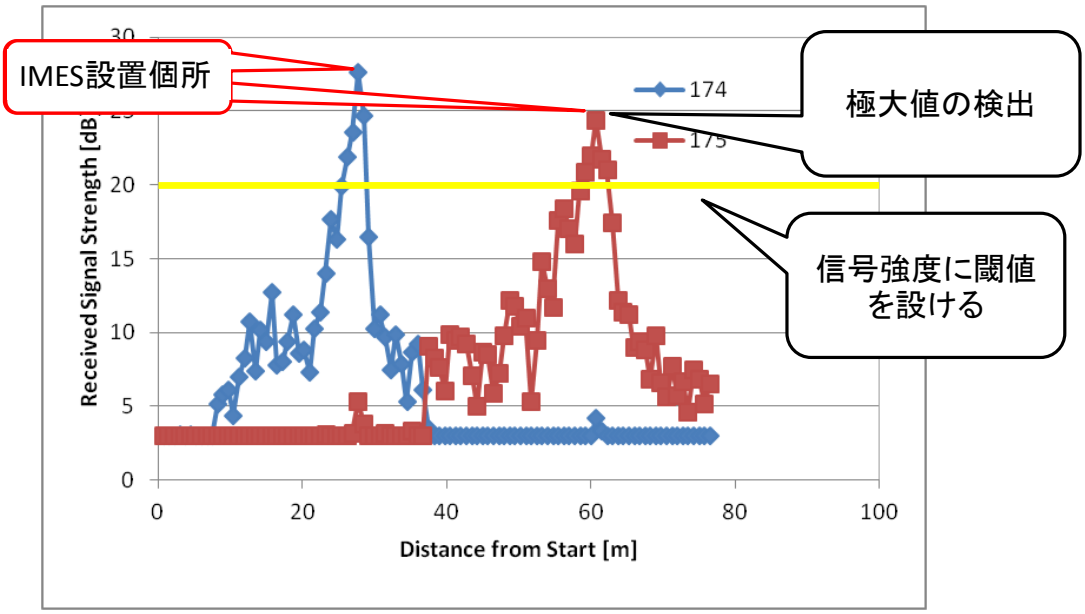

図 34　キャリブレーションのための工夫

一つは閾値による判断である．弱い信号強度を持つ IMES による信号は図 33 および図 34 のように単調に増加するものではなく，ある程度振れ幅を持ちながら受信強度が増加し，設置個所を過ぎると減少していく．そこである一定以上の信号強度の閾値を超えた場合にのみキャリブレーションを行うことを許可するものである．しかしながらこれでは IMES によるキャリブレーションのチャンスを少なくするものであるため，適切な値を知ることが重要であり，本稿では実験的に最適な閾値を求めた．また閾値以下の信号を受信した場合の対応策を考える必要がある．

もうひとつは単調増加による極値の検出である．ある一定の値(閾値)以上を超えると，それまでにぶれていた信号強度がある程度安定して単調に増加を行う．これによって極大値を検出し，もっとも強い信号強度を得られるところでのキャリブレーションを実施できる可能性が高まる．これら二つの工夫によってキャリブレーションのタイミングをより高精度に行うことを意図したシステムを本稿では Type2 として扱う．6.3.2 節の実験では，Type2 によって得られた精度を，従来の DR および Type1 と比較することで評価した．

5.3.2.2　IMES の配置アルゴリズム

後述する予備実験の結果から本システムにおける IMES 送信機の適切な配置方法は以下のように考えられる．

① 屋内空間に入る部分(出入り口など)に初期位置として設置

② IMES 送信機を 35m 間隔に設置

③ 曲がり角がある場合に設置

上記の②において 35m という距離になっているのは，実験 6.3.2 の考察による結果を反映している．この具体的な数値は任意に決定することが可能である．それらは以下の公式による．

計算上，システムで扱う歩幅(計算上の歩幅)を一定値として与える．またこの値は既知であるとした．すると

(一歩辺りの誤差)=(実際の歩幅)-(計算上の歩幅)　・・・・・(5.3.2.2-1)

ここで n を任意の歩数であり，自然数で与えられると定め，また α を目標とする許容誤差の値とする．(α は正の整数とする)

DR の誤差を α 以下で使いたいと考えれば(累積誤差)＜m(許容誤差)を満たす必要があり補正のために置くべき IMES の間隔(補正間隔)は

$$\sum_{1}^{n}\{(\text{実際の歩幅})-(\text{計算上の歩幅})\} = (\text{累積誤差}) < \alpha \quad \cdots\cdots(5.3.2.2\text{-}2)$$

を満たす時の n×(歩数)×(歩幅)で与えられる．

上記の(5.3.2.2-2)式を用いて 5m の精度を常に実現することを目指したいとした場合，いま，6.3.2 節の実験結果から 75m の歩行に対して 15m のずれが起こることが分かり，歩数は 150 歩であることから，一歩辺りの誤差は 10cm で与えられる．これが累積して 5m を超えるのは 50 歩目であり，50 歩目は一歩辺りを 70cm と仮定しているので 35m と与えられる．よって，補正距離を 35m と仮定した．

6　IPSUIC プロトタイプの実装

第 5 章において本稿において提案する新しい屋内測位システムを記述した．本節では提案システムのコンセプトを実現したプロトタイプを実装した．また提案システムとの差異などについて説明する．

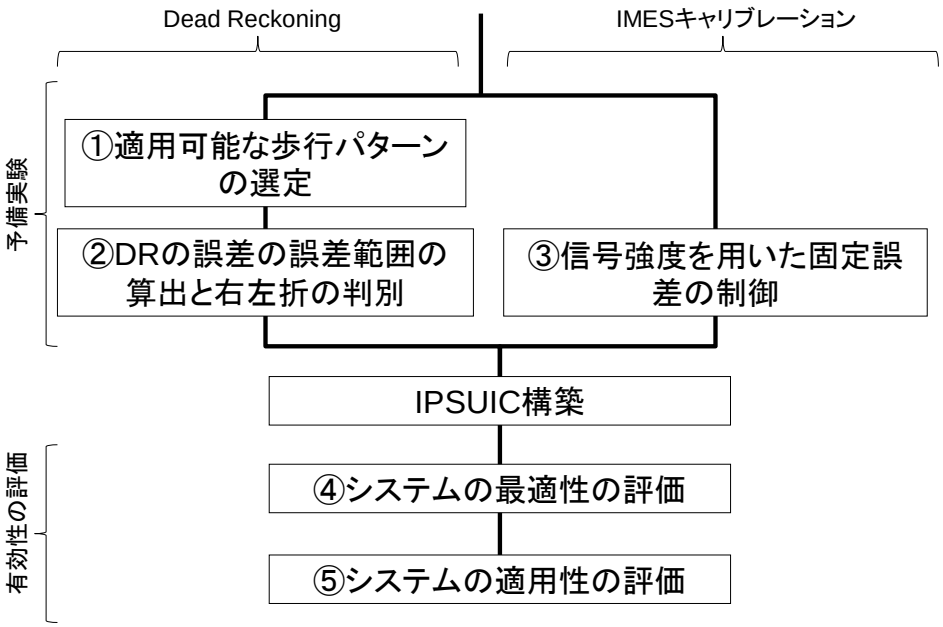

図 35　本研究の流れ

図 35 に本研究の流れを示す．本研究では予備実験として①，②，③の実験を行った．①における内容は 6.3.1 節，③の内容は 6.3.2 節に示し，②の内容は同様のコースで評価実験を行ったことから 7.1 節の一部に記載した．

実験①では DR のアルゴリズムを作成することが目的であり，選定可能な歩行パターンを選び，選び出した歩行パターンを見分けるジャイロセンサの値を実験値から決定した．

次に②では①で作成したアルゴリズムを評価する実験である．7.1 で評価のための実験を行ったコース(鉄道博物館ヒストリーゾーン)で実施され，選び出したパターンの選別精度，さらには直線の累積誤差の蓄積を評価した．

③の実験では IMES のキャリブレーションが可能であるかどうかを評価し，さらに信号強度を用いた閾値によるキャリブレーション実施のタイミングを工夫したことの影響を評価するための実験を実施した．

これらの予備実験の結果から，本稿で提案するシステム・IPSUIC を構築した．なお，IPSUIC にはこれらの実験結果から類推される配置アルゴリズム(5.3.2.2 節)も含まれる．こ

れらの評価を行うために④と⑤の実験を行った. ④は 7.1 と 8.1 の考察において IPSUIC の中の配置方法の最適性を評価する．また異なる屋内環境，および異なる被験者が実施することで IPSUIC の適用性を評価した.

6.1　プロトタイプの作成

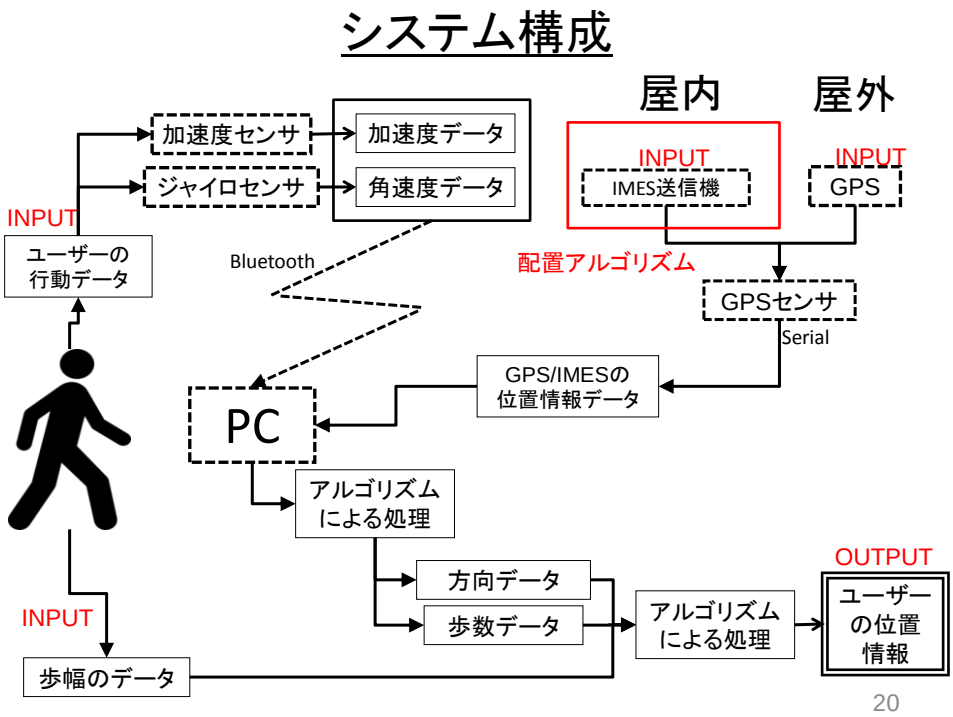

図 36　屋内測位システムのプロトタイプ

図 36 に屋内測位システムのプロトタイプを示す. プロトタイプを構成しているに当たり，IMES 受信機と小型無線マルチセンサを用いた．それぞれを図 37，図 38 に示す.

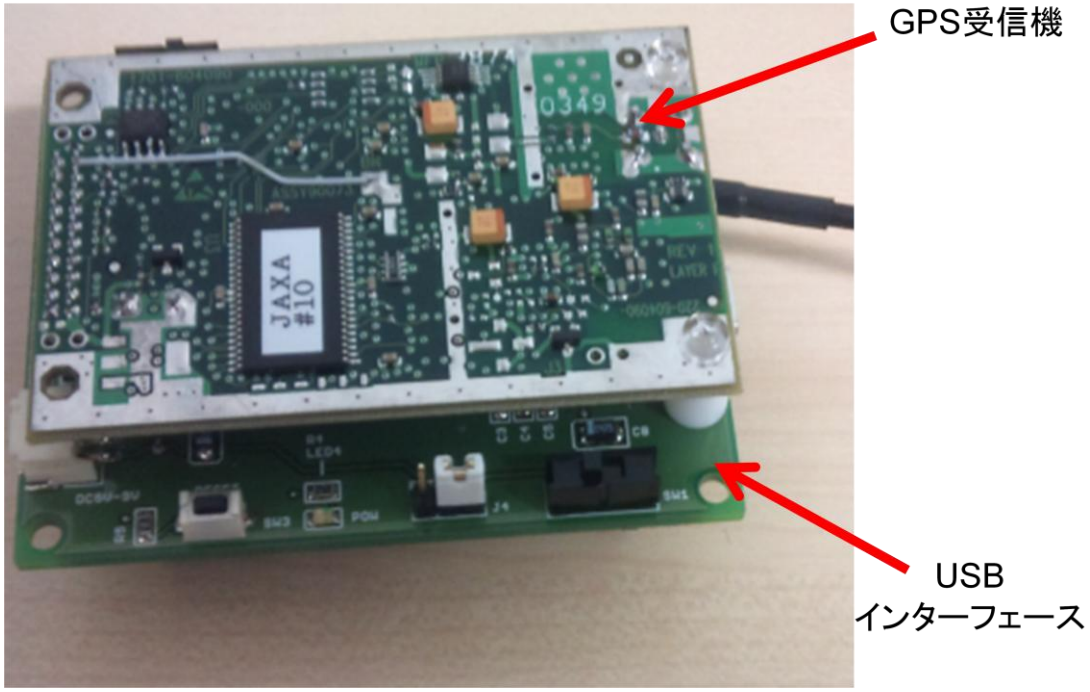

図 37　SuperStar2[57]

プロトタイプでは NovAtel 社製の GPS 受信機を IMES および準天頂衛星に対応するファームウェアを書き替えた基盤を使用した．SuperStar2 は一秒ごとに IMES と GPS からの信号受信をデータとして得ることができ，さらに受信強度に関しても知る事ができる．PC と Serial コードによって接続する．上面が GPS 受信機，下面が USB インターフェースとなっている．また，SuperStar2 の仕様と SuperStar2 によって得られるデータの見本をそれぞれ図 38 および図 39 として示す．

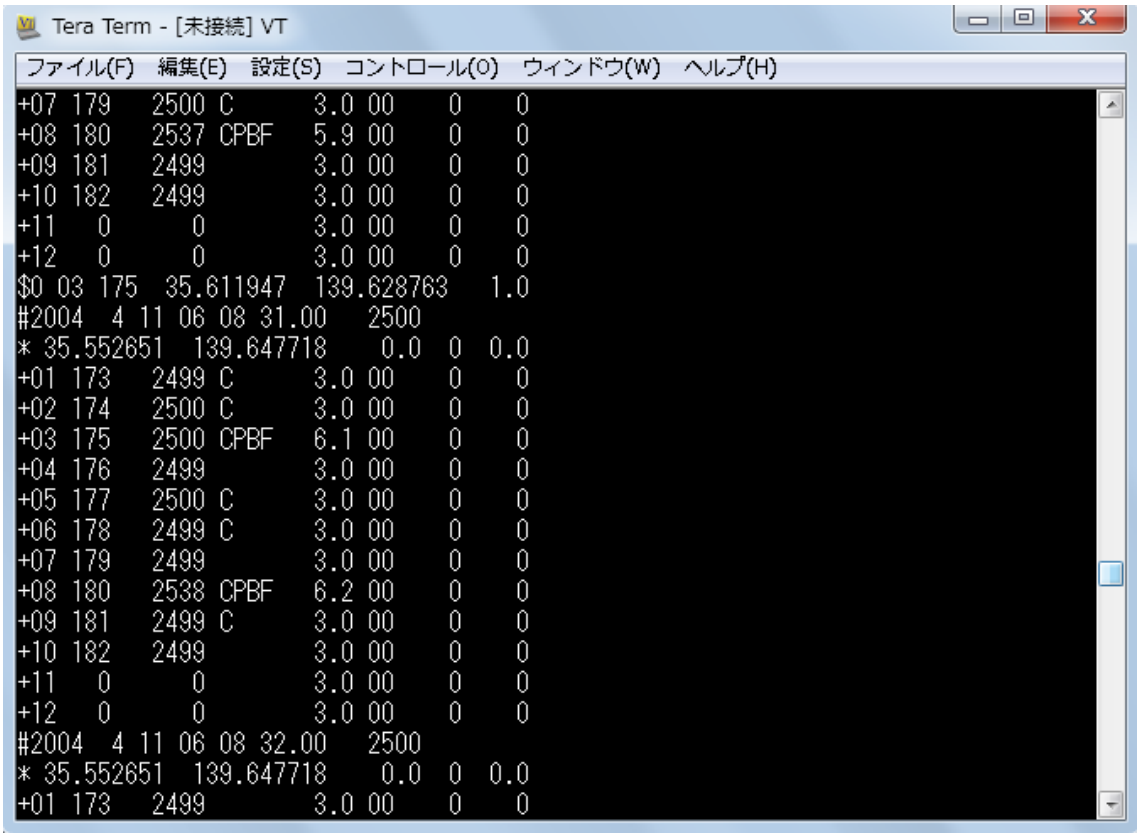

図 38　SuperStar2 によって得られるデータ見本

図 39　小型無線マルチセンサ TSND121(ATR-Promotions) [58]

センサ群としては上記の小型無線マルチセンサを利用した. ATR-Promotions から商品化された本センサは加速度センサ，ジャイロセンサ，気圧センサ等を搭載しており，データをリアルタイムで表示が可能であり，かつ PC にデータとして送信することができる．本稿では DR に加速度センサとジャイロセンサによって得られる 6 軸(x 軸加速度，y 軸加速度，z 軸加速度，x 軸角速度，y 軸角速度，z 軸角速度)の値をもとに人間行動の特徴量として利用した．また内蔵されている加速度センサ，ジャイロセンサの仕様と本センサから得られるデータの見本をそれぞれ図 40，図 41 として示す.

基本仕様		
	CPU	ルネサステクノロジ社 RX621
	稼働時間	約6時間　※1
外形・重量		
	サイズ	37mm(W) × 46mm(H) × 12mm(D)
	重さ	約22g
データ送受信方法		
	無線送信	Bluetooth Ver2.0+EDR Class2（通信距離最長　10m）※2
	メモリ保存	512Mbyte（加速度・角速度　100Hzで約5.8時間）
	有線接続	USBシリアル通信
搭載センサ		
	加速度・角速度センサ	InvenSense MPU-6050
		サンプリング:　最大 1000Hz（1～255msec周期）
		加速度レンジ:±2G/±4G/±8G/±16G
		角速度レンジ:±250dps/±500dps/±1000dps/±2000dps
	地磁気センサ	愛知製鋼　AMI306
		サンプリング:最大 100Hz（10msec～255msec周期）
		検出範囲:±1200μT
	気圧センサ	Freescale MPL3115A2
		サンプリング:最大 25Hz（40～2550msec周期）
		検出範囲:500～1100hPa
外部端子		
	拡張I/O	GPIO　4ch　（内2chはADと共用）、I2CBus × 1　※3
付属品		
	USB充電ケーブル	microUSB Bタイプ

図 40　TSND121 の仕様(ATR-Promotions の HP より抜粋) [58]

今回は上記の中でも加速度・角速度センサのみを使用している.

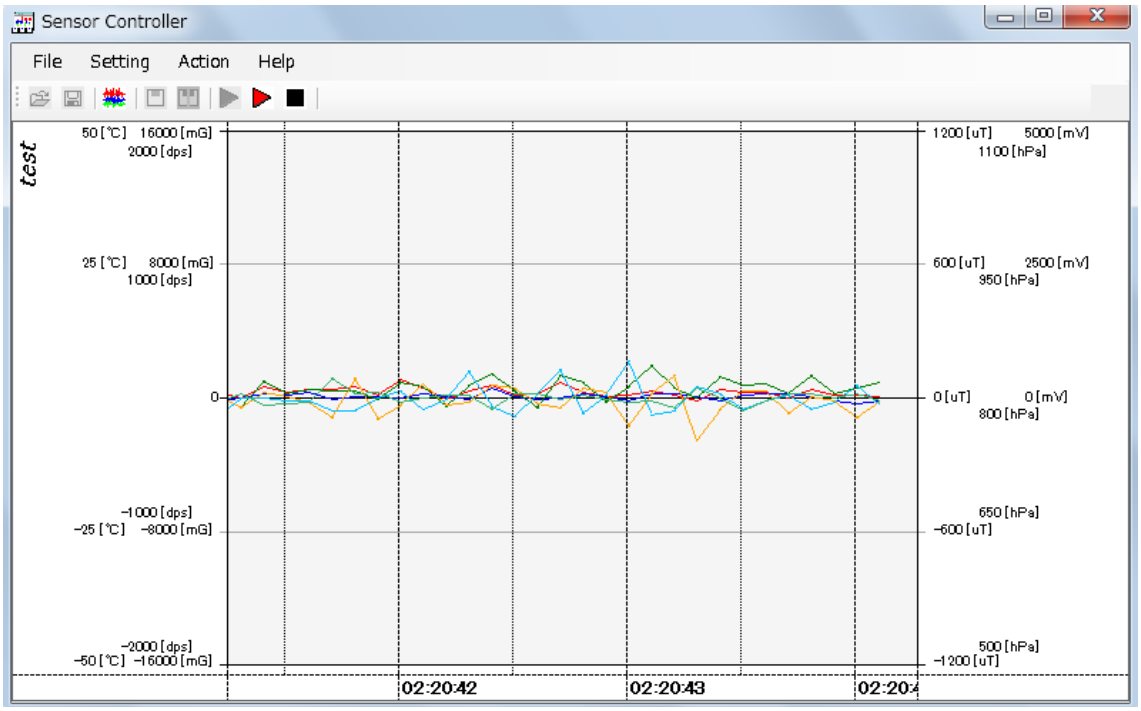

図 41　マルチセンサのデータ見本(Sensor Controller の画面) [58]

図 41 のデータは後々，csv 形式で PC 上に保存される．また Bluetooth を介して PC に保存する以外にも，センサ内にデータを蓄積することも可能である．今回は Bluetooth を介して直接結果を送信する機能を利用したため，被験者以外に実験の補助を行う人間が必要となった．(役割は PC の保持など)

6.2　プロトタイプにおけるデータの処理方法

本プロトタイプにおいては，SuperStar2 と TSND121 という二つのデバイスからデータを受信して，データを後処理することで位置情報のデータとしている．本節では処理方法について詳しく説明する．

外部に設置された IMES 送信機から受信したデータと TSND121 のデータを歩いた位置において同時に記録することによって記録することでこのプロトタイプの根幹としているが，本システムを構成する二つのデバイスは記録できるサンプリング時間に差がある．SuperStar2 のデータは 1 秒ごとにこの受信機が持つ 12 チャネルにおいてデータが受信できているか，またその時の受信状態や信号強度に関して記録する，TSND121 は最小で 0.02 秒ごとに記録をすることが可能であり，本プロトタイプでは加速度と角速度を利用した 6 軸においてデータを抽出することが可能である．TSND121 のデータは非常に細かくとることができるが，処理の難しさや量などから 0.1 秒ごとにデータを抽出することにした．

6.3　設計のためのプロトタイプによる実証実験

本稿で提案するシステムを設計するため，プロトタイプによる実証実験を行い，評価と考察を行った．評価予備実験は 3 種類で構成されている．

6.3.1　DR アルゴリズム構築のための実証実験

本実験の目的は，様々な行動をとったときに，人間行動を角速度センサでどこまで理解することができるのかを知ることと，その知見に基づいて屋内環境で実施する DR のアルゴリズム形成を目的としている．つまり．本実験ではプロトタイプにて実装したシステムを用いて，人間の行動で起こりやすい歩行の仕方をパターン化し，それぞれの動きに関して角速度センサで表示することを行った．また実験被験者は二人によって行われ，両手にセンサを保持することで差異を見た．

また歩行パターンは地下街の形から分析して，目的地に到達するまでに人間が歩行するうえで起こりやすいであろうパターンとして，全部で 12 パターンに分けてセンサによって行動解析を行った．12 パターンは以下の通りであり，詳しくは結果と合わせて後述する．

① 直角な曲がり角右折
② 直角な曲がり角左折
③ 緩やかな曲がり角右折
④ 緩やかな曲がり角左折
⑤ 急激な曲がり角右折
⑥ 急激な曲がり角左折
⑦ 半円周り(時計回り)
⑧ 半円周り(反時計回り)
⑨ 直進+後退
⑩ 全円時計回り(2 周)
⑪ 全円反時計回り(2 周)
⑫ ジグザグ歩行

また歩行する場所は赤いテープを地面に貼り，その上を被験者が歩くこととした．実験のコース概要を図 42 に，図 43 および図 44 として実験場所の様子を示す．

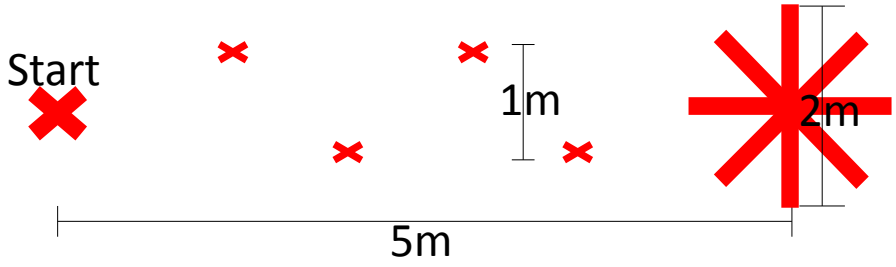

図 42　実験コース概要

歩行するコースは図 42 のように赤いマーカーでしるしをつけ，それを目印に被験者は歩くことで実験を行った．また，⑦，⑧，⑩，⑪は上記のスタートポイントから歩行によるデータの記録を開始しておらず，詳しい歩行の仕方は図 45，47，49，51，53，55，57，59，61，63，65，67 をそれぞれ参照されたい．

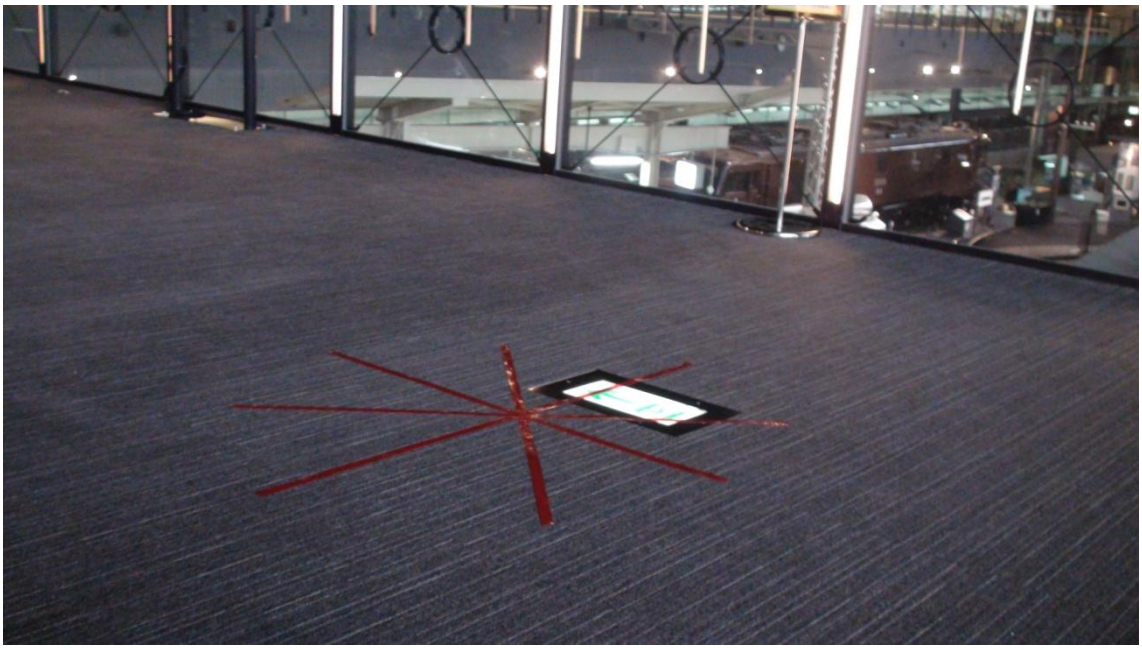

図 43　実験場所の様子(歩行経路のためのマーク)

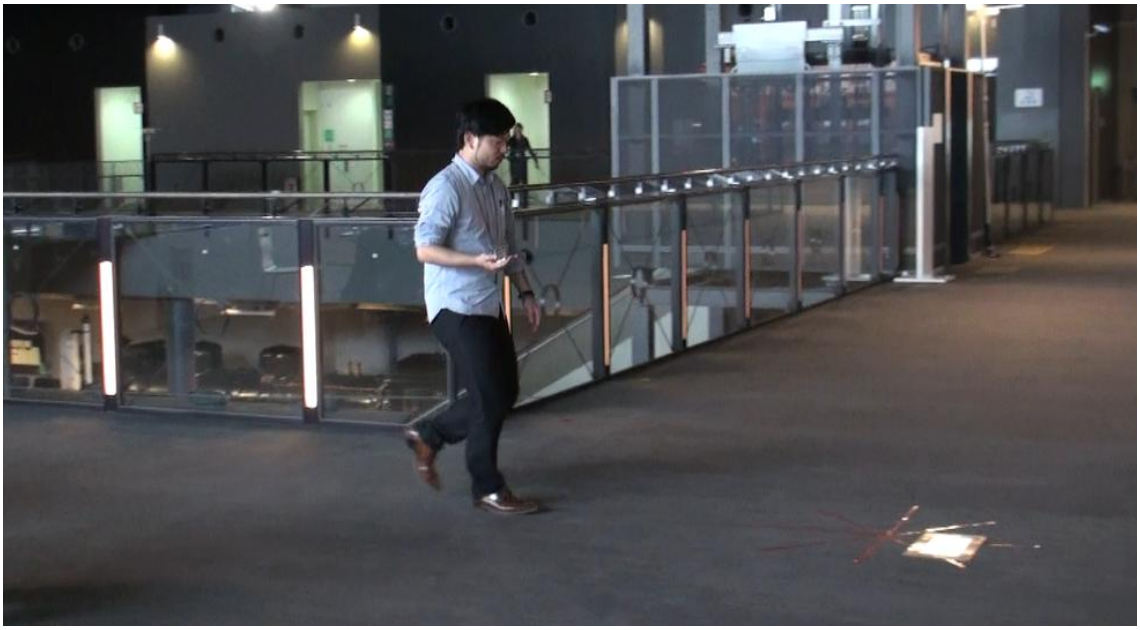

図 44　実験の様子

図 44 のように, 被験者はセンサを保持しながら実験のために貼り付けたマークに従い 12 パターンの歩行を行った．被験者は 2 人であり，図のようにセンサを手の上に保持し，腰の上辺りに位置付けて歩行を行う．①から⑥の実験においては，マーカーの中心において一度立ち止まり，方向転換をしてから直進することで歩行パターン通りの歩行パターンを行うこととする.

以下に，行った歩行パターンの動き方とその時の角速度センサが示す値を，それぞれ図とグラフにて示す.

直角な曲がり角右折

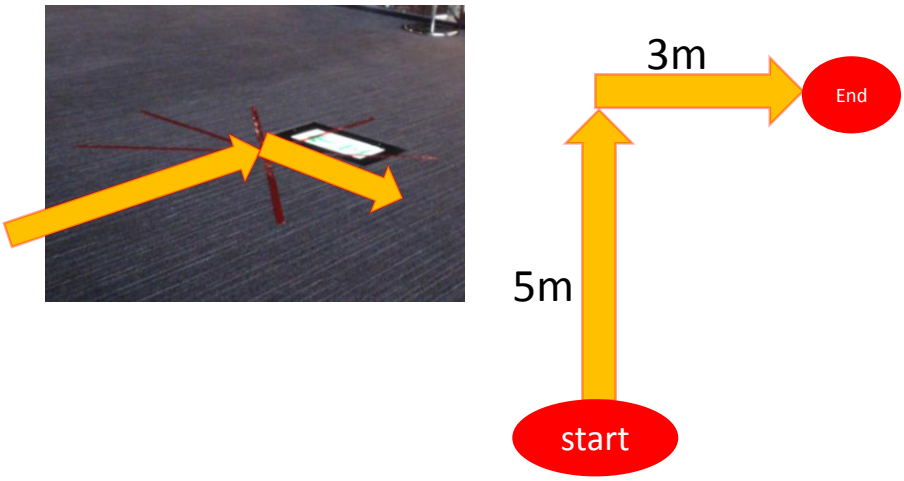

図 45　直角な曲がり角右折歩行コース

図 45 のような実験コースのもとで実験を行った．直角な曲がり角右折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，直角な曲がり角針路を右に回転させてから 3m 直進した．

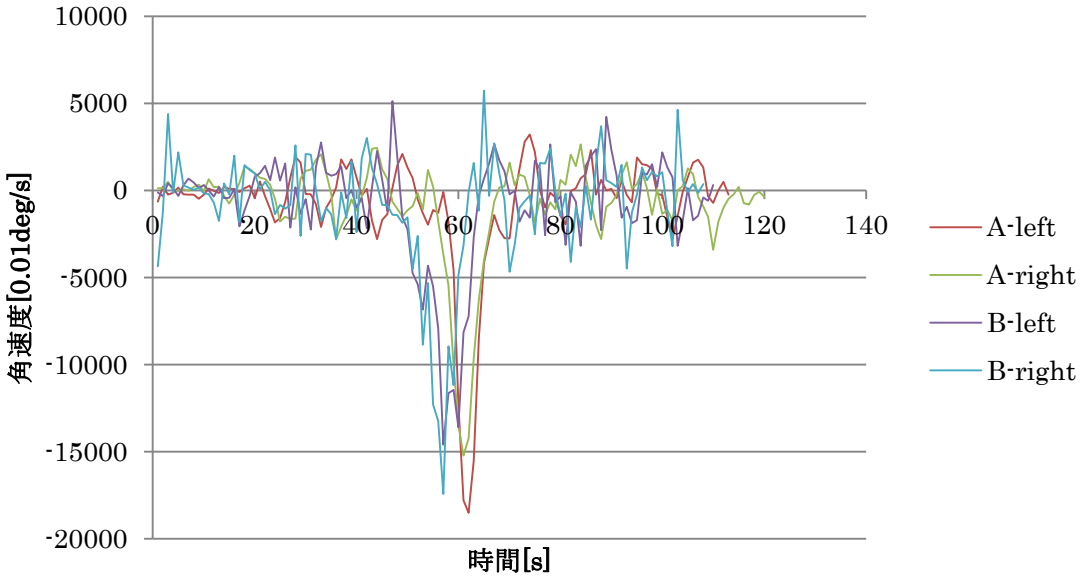

図 46　直角な曲がり角右折実験の結果

図 46 から直角な曲がり角右折した場合のピーク値は-10000 を下回っていることが分かった．しかし四回の試行で-14000~-18000 と変動の幅が大きい．

直角な曲がり角左折

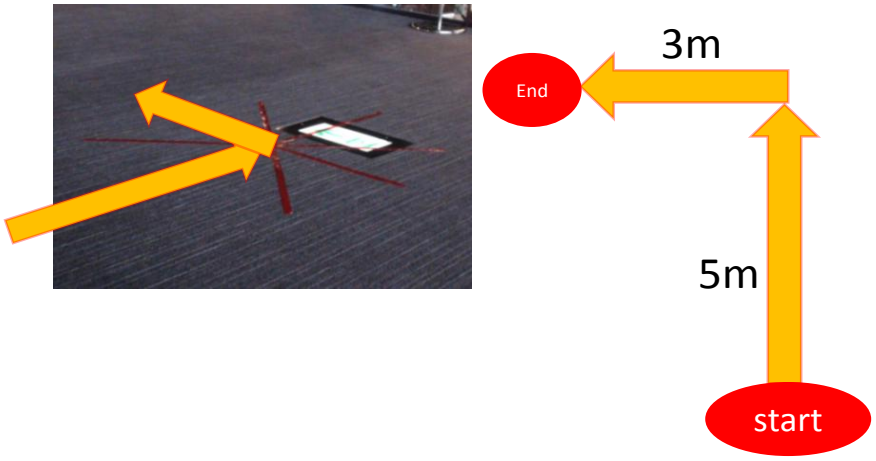

図 47　直角な曲がり角右折歩行コース

図 47 のような実験コースのもとで実験を行った．直角な曲がり角左折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，直角な曲がり角針路を左に回転させてから 3m 直進した．

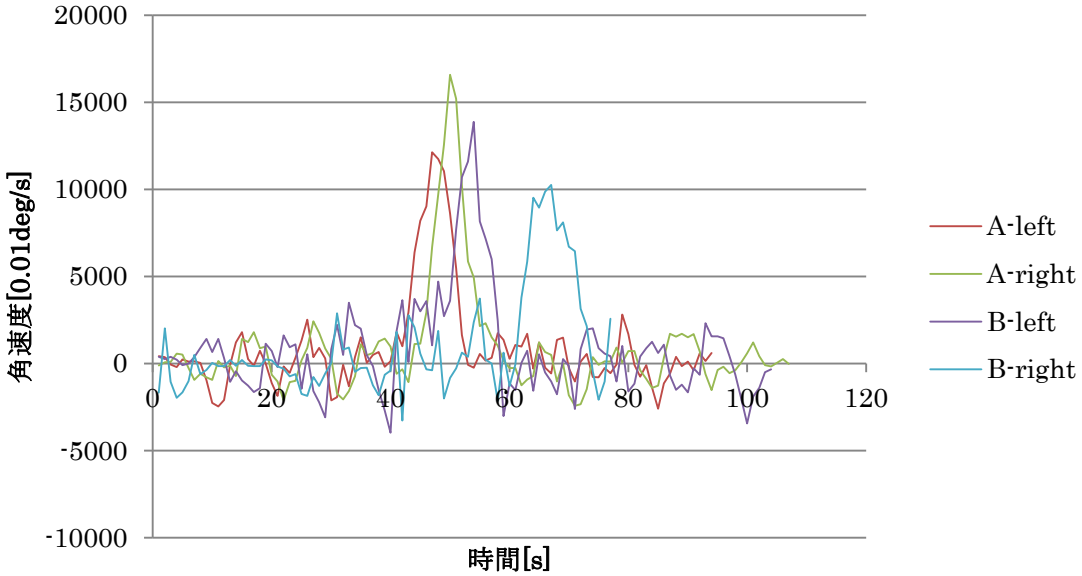

図 48　直角な曲がり角左折実験結果

図 48 から直角な曲がり角左折した場合のピーク値は 10000 を上回っていることが分かった．しかし四回の試行で 9000~16000 と変動の幅が大きい．右折に比べて全体的に絶対値が小さくなっている．

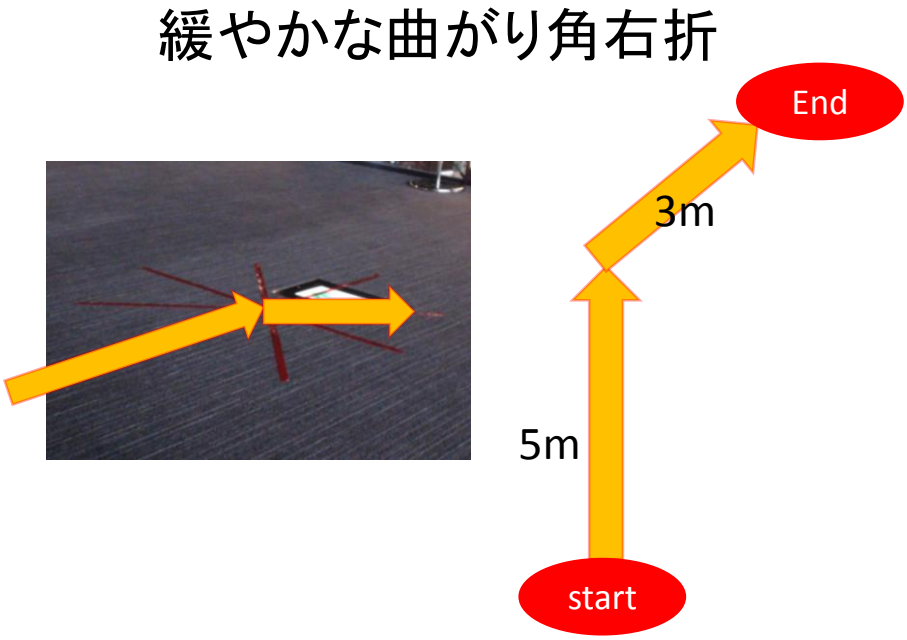

図 49　緩やかな曲がり角右折歩行コース

図 49 のような実験を行った．緩やかな曲がり角右折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，緩やかな曲がり角針路を右に回転させてから 3m 直進した．

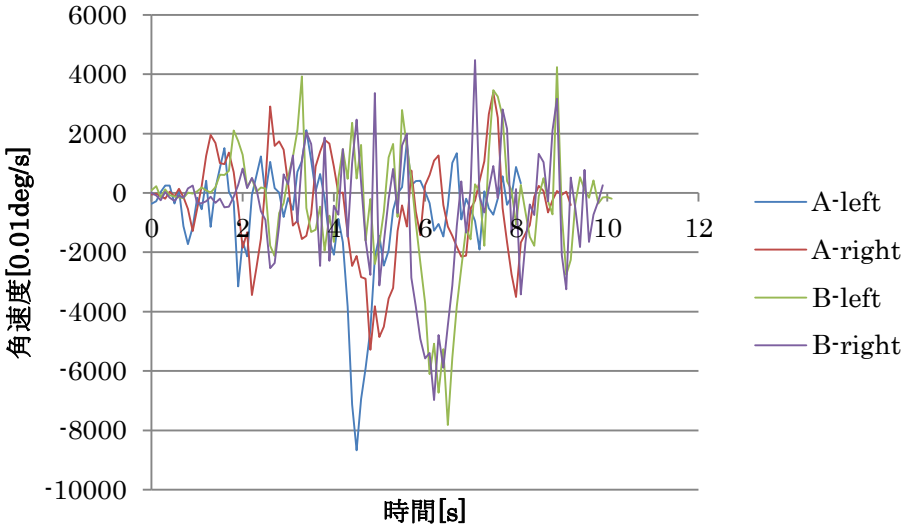

図 50　緩やかな曲がり角右折実験結果

図 50 から緩やかな曲がり角右折の実験においては右折したときに，-8000~5000 程の値が出ていることが分かる．

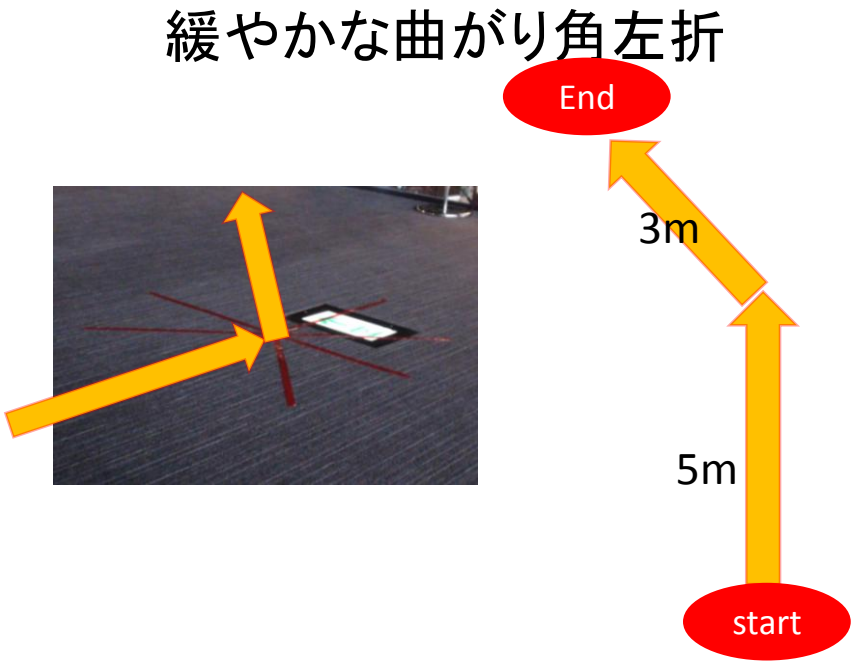

図 51　緩やかな曲がり角左折歩行コース

図 51 のような実験コースのもとで実験を行った．緩やかな曲がり角左折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，緩やかな曲がり角針路を左に回転させてから 3m 直進した．

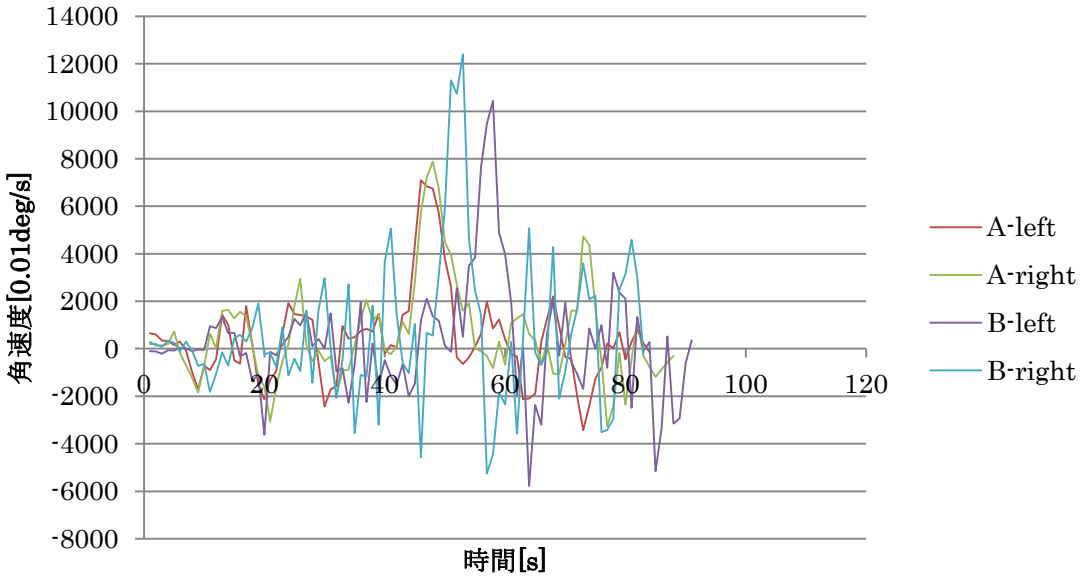

図 52　緩やかな曲がり角左折実験結果

図 52 から緩やかな曲がり角右折の実験においては右折したときに，7000~12000 程の値が出ていることが分かる．

急激な曲がり角右折

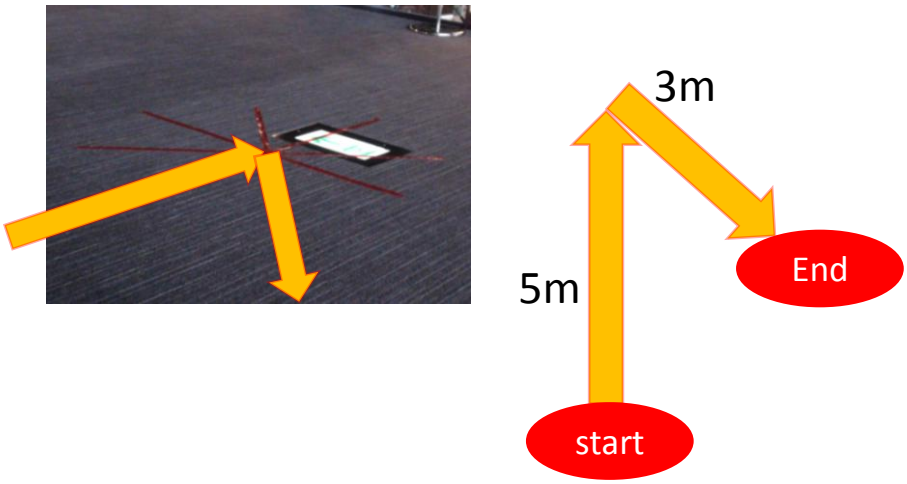

図 53　急激な曲がり角右折歩行コース

図 53 のような実験コースのもとで実験を行った．急激な曲がり角右折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，急激な曲がり角針路を右に回転させてから 3m 直進した．

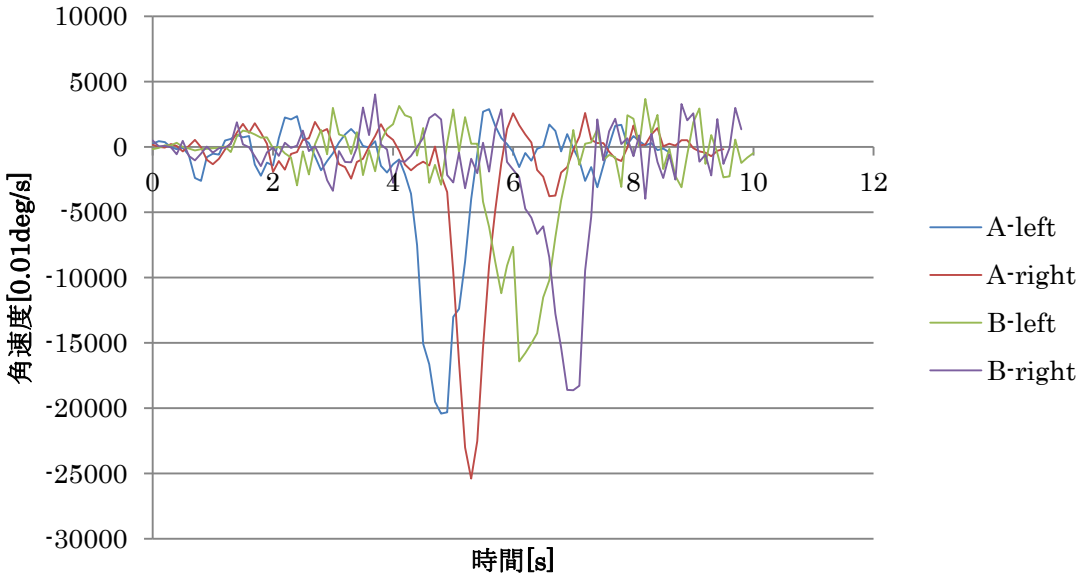

図 54　急激な曲がり角右折実験結果

図 54 から緩やかな曲がり角右折の実験においては右折したときに，-15000~-25000 程の値が出ていることが分かる．

急激な曲がり角左折

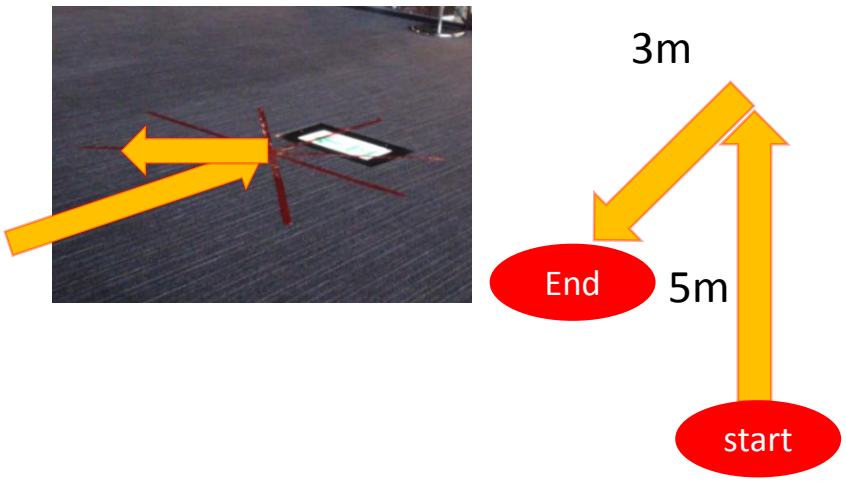

図 55　急激な曲がり角左折歩行コース

図 55 のような実験コースのもとで実験を行った．急激な曲がり角左折の実験では 5m の直進の後，一度とまり，急激な曲がり角針路を左に回転させてから 3m 直進した．

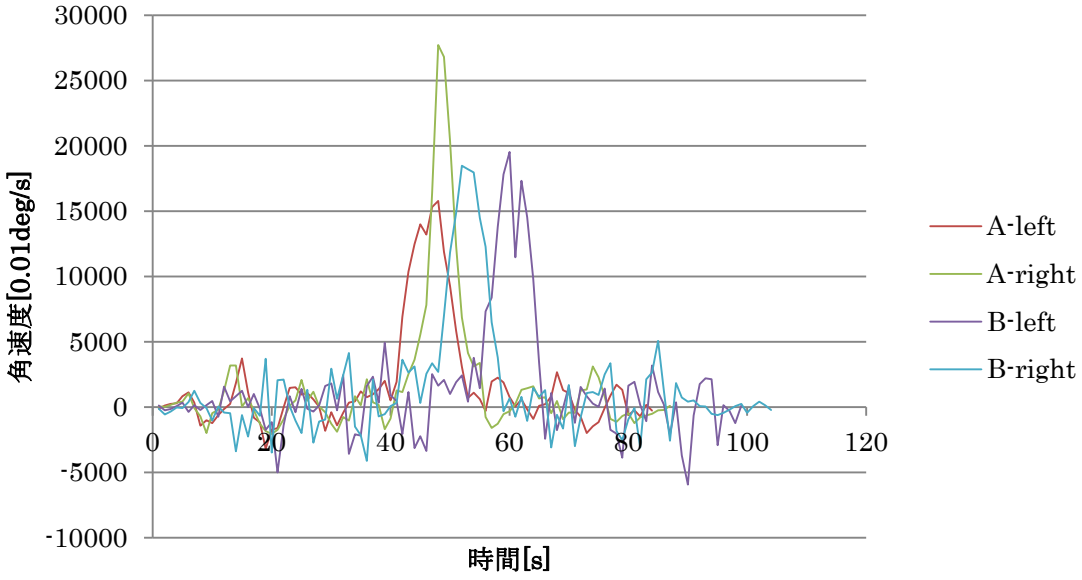

図 56　急激な曲がり角左折歩行コース

図 56 から緩やかな曲がり角右折の実験においては右折したときに，15000~27000 程の値が出ていることが分かる．

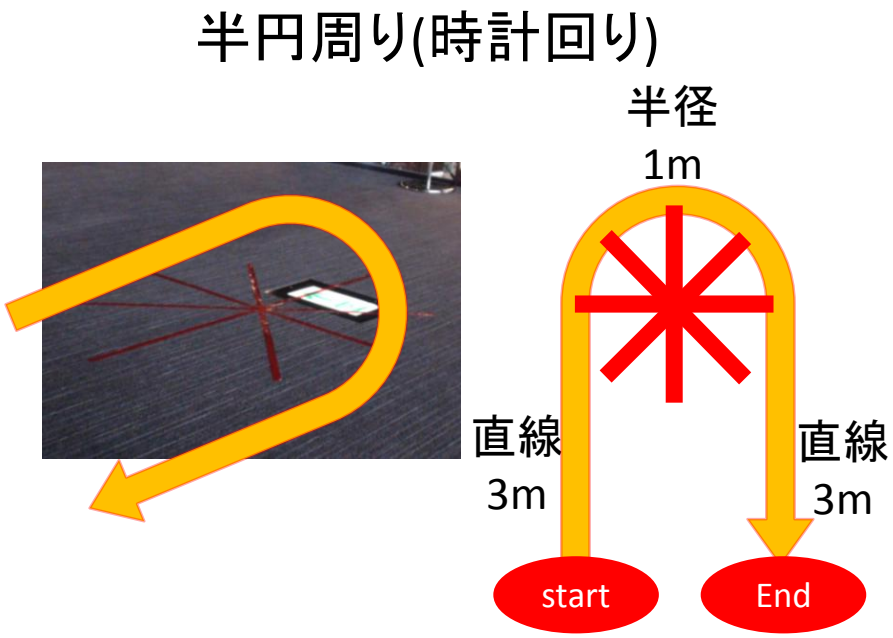

図 57　半円周り(時計回り)歩行コース

半円周り(時計回り)歩行では，図 57 のようにスタートポイントを定め，赤いマークに沿って半周し，直進してエンドポイントで止まるという試行を行う．

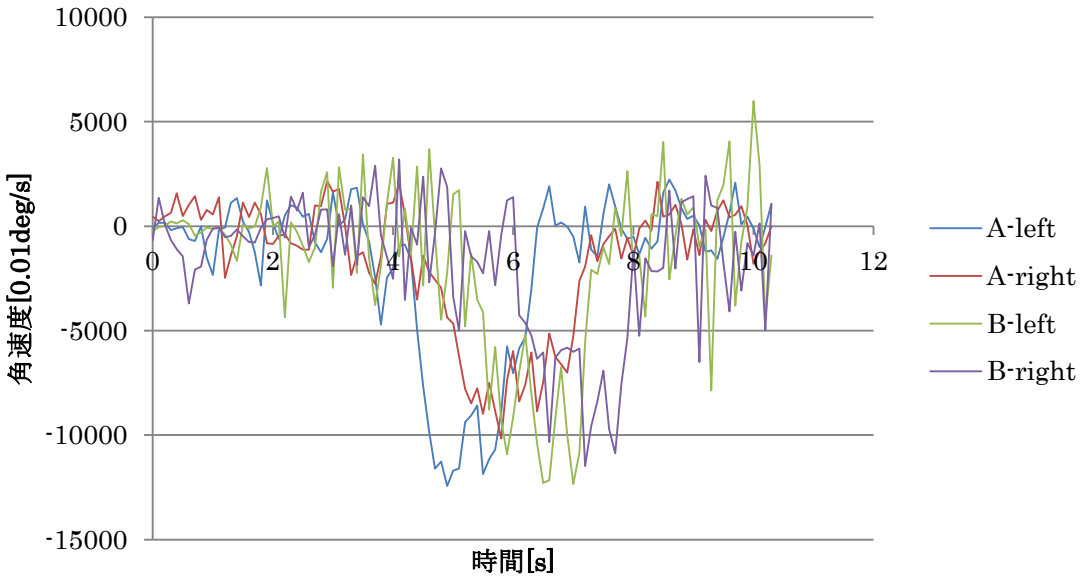

図 58　半円周り(時計回り)実験結果

半円周りの時においては，時計回りでは右折方向に曲がったときと同様に負の値でピーク値を得た．さらに右折方向のこれまでの実験に比べてピークの幅が長いことが分かった．

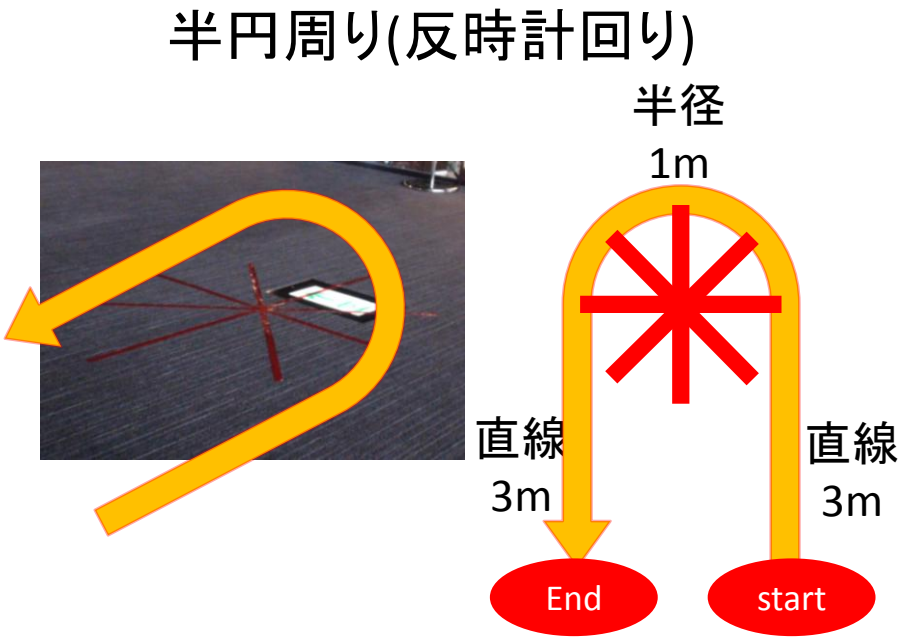

図 59　半円周り(反時計回り)歩行コース

半円周り(時計回り)歩行では，図 59 のようにスタートポイントを定め，赤いマークに沿って半周し，直進してエンドポイントで止まるという試行を行う．

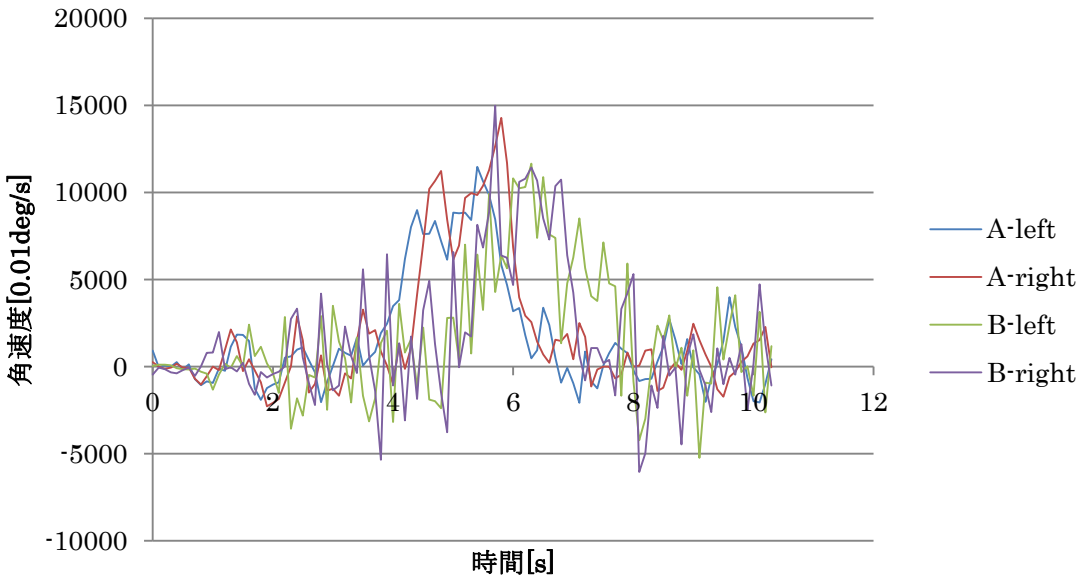

図 60　半円周り(反時計回り)実験結果

半円周りの時においては，反時計回りでは左折方向に曲がったときと同様に正の値でピーク値を得た．さらに左折方向のこれまでの実験に比べてピークの幅が長いことが分かった．

直進+後退

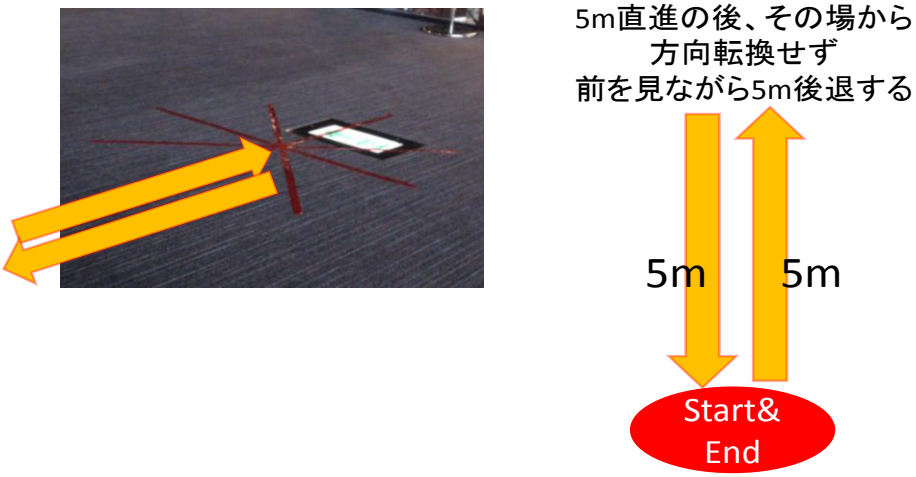

図 61　直進+後退歩行コース

直進+後退の実験では 5m 直進したのち，進行方向の向きは後ろにするが，体は前に向けたまま 5m 後退(バック歩行)する．

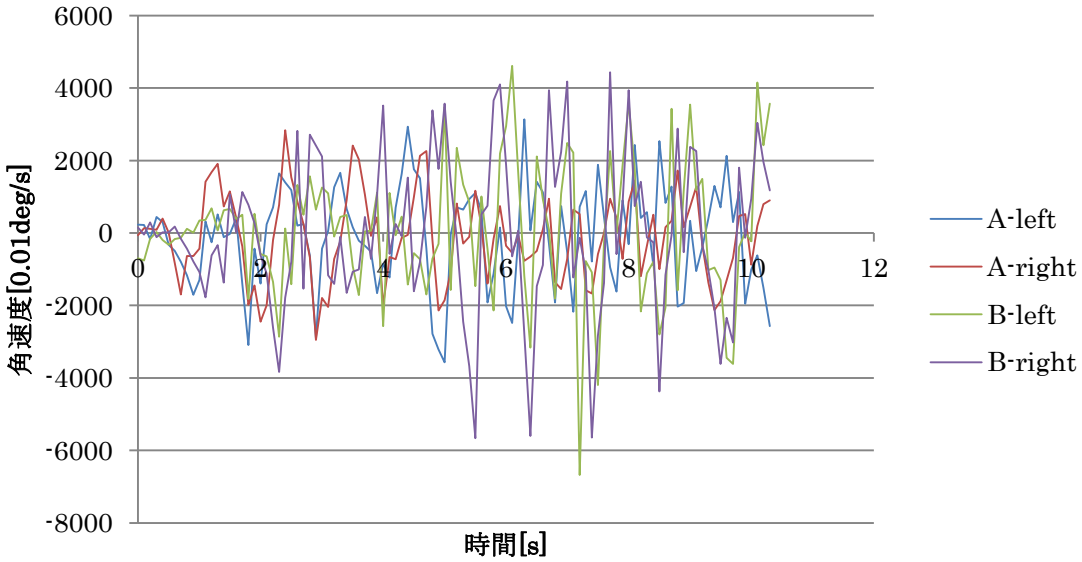

図 62　直進+後退歩行コース

直進+後退の実験においては-5000~5000 程の幅において振幅がされていることが分かった．しかしながら，どのタイミングにおいて前進と後退が切り替わったかという判別がつかないこともわかった．また-3500 程度のデータもあれば，-6000 を下回るデータも出たことから，直進や後退の方法においてはある程度個人差によることが分かった．

図 63　全円時計回り(2 周)歩行コース

全円時計回りの実験では，スタートポイントから時計回りの方向に 2 周を歩行し続ける実験を行う．2 周したのちはスタートポイントでストップして試行を終える．

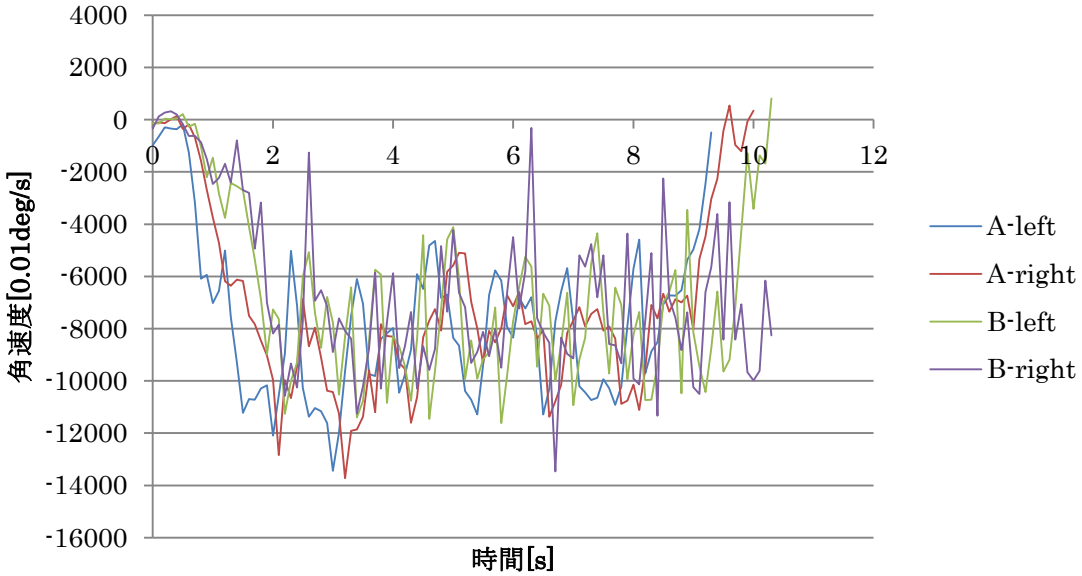

図 64　全円反時計回り(2 周)実験結果

全円周り(時計回り)においては，半円の時より比較してさらに長い時間において負の値で角速度が得られ続けることが分かった．しかしながらこのデータから周り続けていることは判別が可能であるが，その半径などが既知でない限り位置の推定は難しいことが分かった．

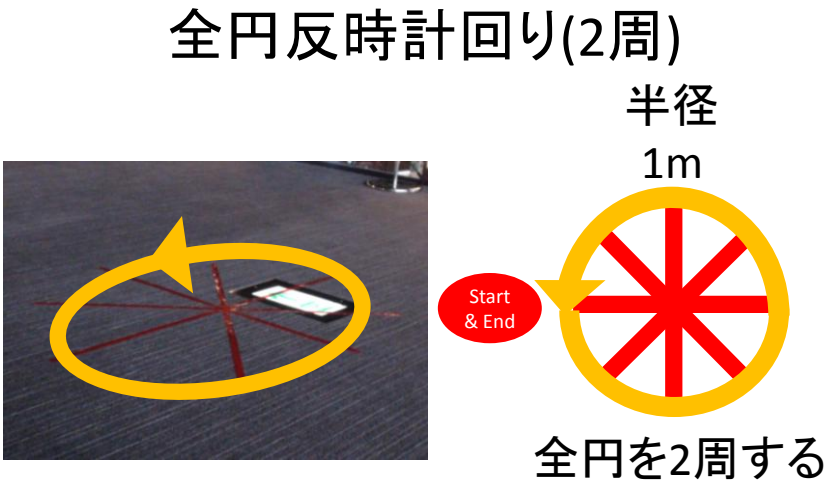

図 65　全円反時計回り(2 周)歩行コース

全円反時計回りの実験では，スタートポイントから反時計回りの方向に 2 周を歩行し続ける実験を行う．2 周したのちはスタートポイントでストップして試行を終える．

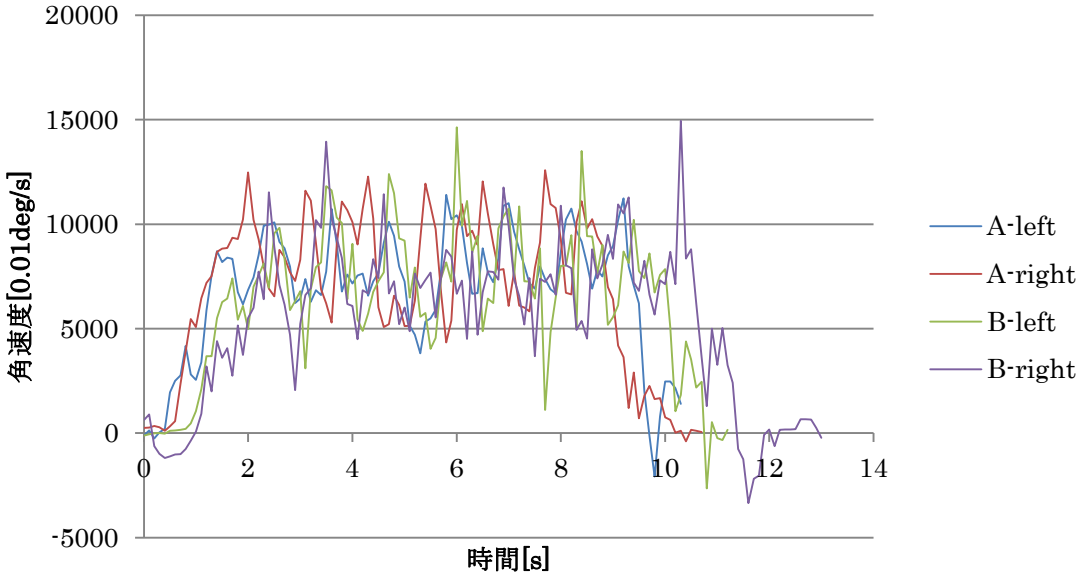

図 66　全円反時計回り(2 周)実験結果

全円周り(反時計回り)においては，半円の時より比較してさらに長い時間において正の値で角速度が得られ続けることが分かった．しかしながらこのデータから周り続けていることは判別が可能であるが，その半径などが既知でない限り位置の推定は難しいことが分かった．

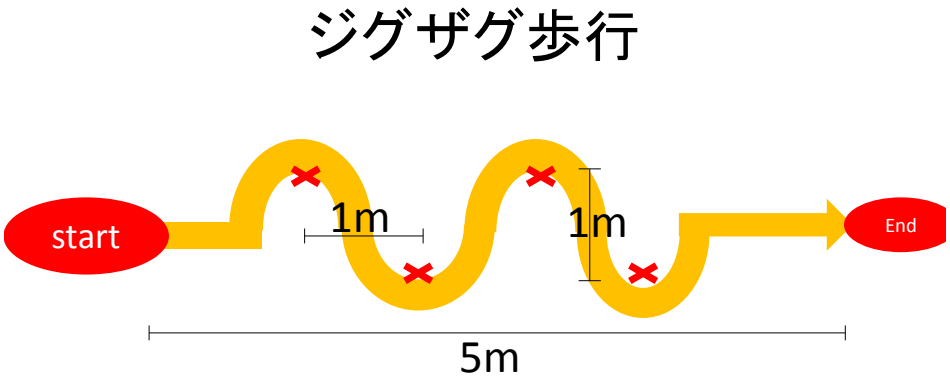

図 67　ジグザグ歩行歩行コース

ジグザグ歩行では図 67 のように歩行コースに付けられたマーカーを目印にして，右左折を繰り返しながら歩行を行う．

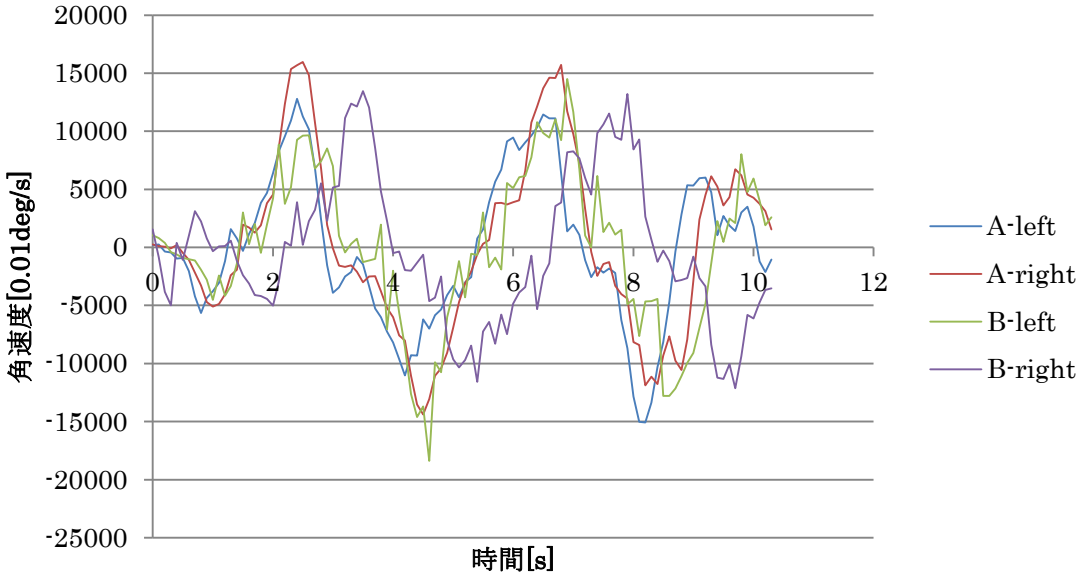

図 68　ジグザグ歩行実験結果

ジグザグ歩行においては，右折と左折が非常にはっきりとピーク値が表されることで見て取れる．しかしながら，半円や全円の時と同様にその曲がり方の大きさが既知でないこ

とからその位置の推定までは難しいことが分かった．

以上の実験結果から，左折や右折およびどちらの方向に向けて動いているかという傾向が分かる．たとえば，緩やかな曲がり角と直角な曲がり角，急激な曲がり角と 3 つのパターンにおいて左右の方向が判別できることが分かった．また半円および全円に関する移動は，その回っている方向がどちらであるのかということが分かる．

しかしながら前進+後退は，前進と後退の動きの区切りをつけて明確に判別することが不可能であることが分かった．また半円および全円の歩行では，その半径を角速度から明確に値を判別することができないため，曲がり続けているということはわかるものの，ユーザーの位置を特定することまではできていない．ジグザグ歩行も同様に，どれくらいの距離をジグザグで歩いているのかということの判別はできず，右左折を繰り返しているように見えてしまう．これらの結果を受けて半円，全円，前進+後退，ジグザグ歩行といったパターンは角速度の値のみで位置の特定までつなげることはできないと判断した．

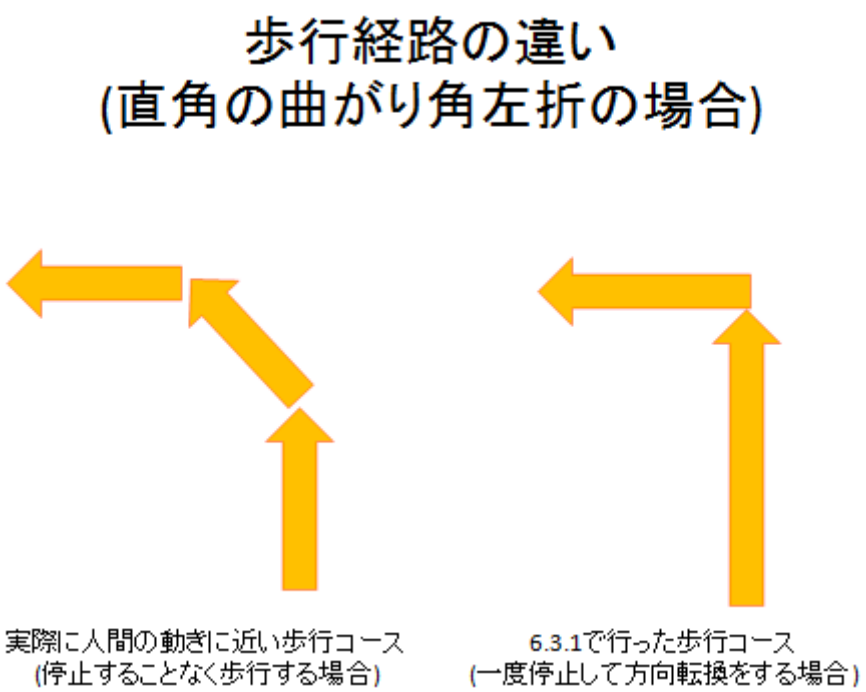

図 69　実際に人間の動きに近い歩行コース

また緩やかな曲がり角，直角な曲がり角，急激な曲がり角の右左折の実験においては，本実験での歩行がすでに上述した通り曲がる直前に一時停止して方向転換を行い，方向転換の後直進することで実施している．しかしながら実際の人の動きにおいてこのような動きはあまり見られないと考えず，実際によくみられる直角な曲がり角の曲がりにおいても下記の図 69 の左に書かれたモデルのような歩き方をすると考えた．

そこで緩やかな曲がり角，直角な曲がり角の歩行パターンの実験を，改めて同じ場所に

おいて，今度は止まらずに実験を行った．実験の条件は上記と同様であるが，今度は被験者に止まることなく歩行をしてもらった．また被験者は 5 名とし，①から⑤まで番号を振った．その結果として，以下の結果を得た．図 70，71 が緩やかな曲がり角における角速度のデータ，また図 72，73 が直角の曲がり角における加速度のデータである．

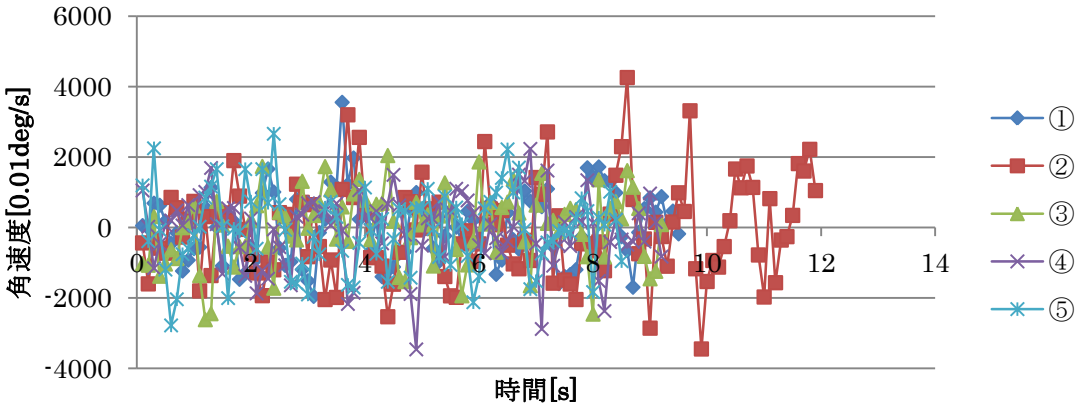

図 70　緩やかな曲がり角右折における角速度

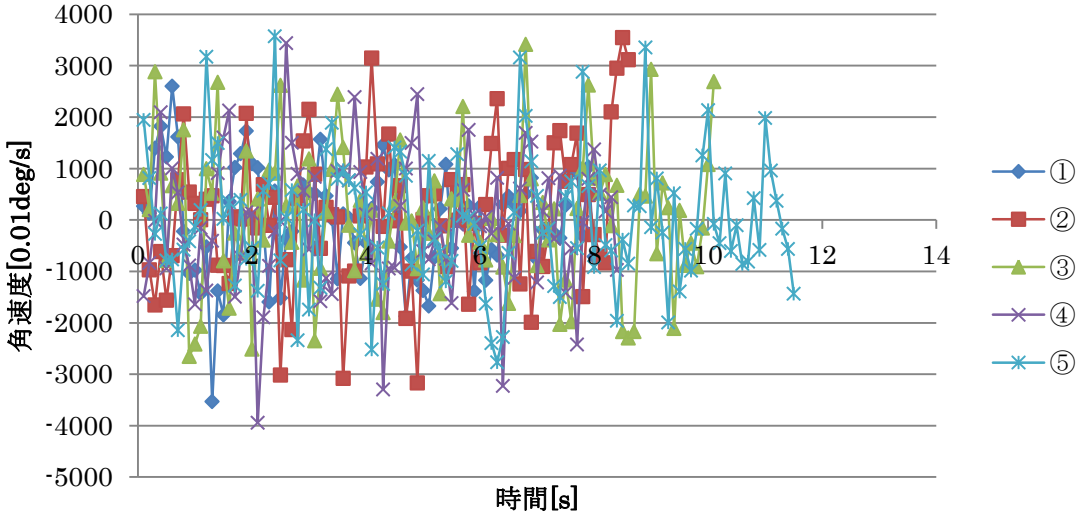

図 71　緩やかな曲がり角左折における角速度

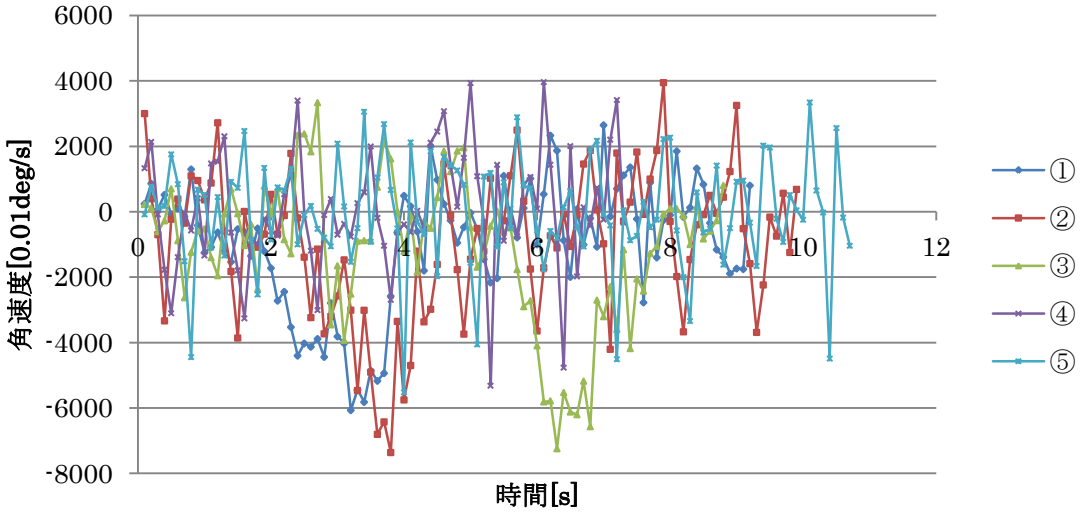

図 72　直角な曲がり角右折における加速度

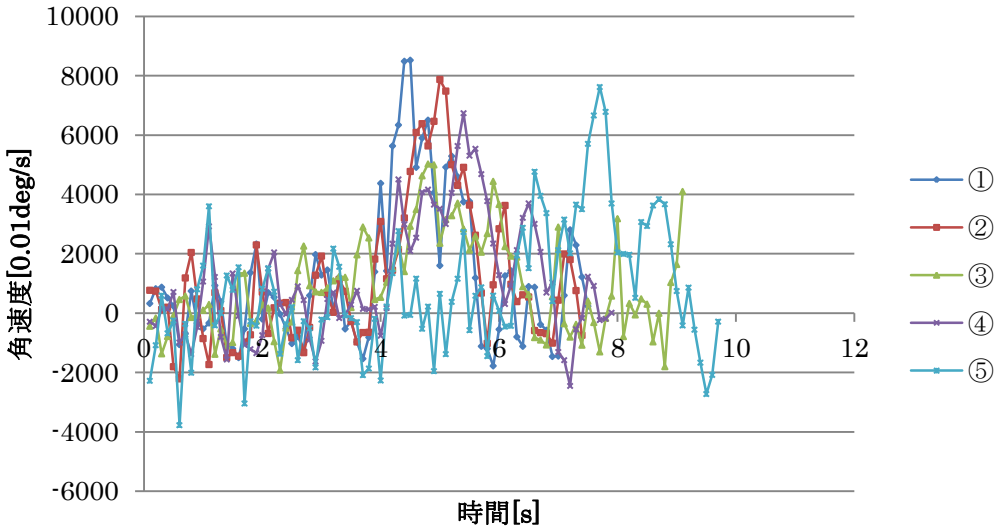

図 73　直角な曲がり角左折における加速度

上記の図 70~73 から一度止まった場合と比較して，続けて歩行を行った場合では緩やかな曲がり角で回るときにおいて直進と判別することが難しいことが分かった．また，直角な曲がり角，急激な曲がり角の場合においても，一度止まって方向転換する場合に比べて値が下がっており，直角な曲がり角に曲がるときにおいては，一度止まった場合の緩やかな曲がり角のデータと判別することが難しい．

これらの実験結果を受けて，本システムでは続けて歩行するデータをもとにしてアルゴリズムを組むこととした．その理由として，地下街や屋内環境では緩やかな曲がり角で曲がる環境などは少々あるものの直角な曲がり角で曲がる場合が多く，目的地までのナビゲ

ーションを実現することを考慮した場合，より人間の行動に近いデータから判断したほうがよいと考えたからである．また上記に示した実験を行った時には，直角な曲がり角においては図 69 に示した通りの動きに近い動きが行われていることが分かった．よってこれらから図 32 に示したアルゴリズムで判断を行い，誤差に関しては IMES で補正することを目指すこととした．

6.3.2　IMES キャリブレーションシステム構築のための実証実験

本実験では，IMES によって DR の誤差をキャリブレーションすることが可能であるかということを知ることが目的である．

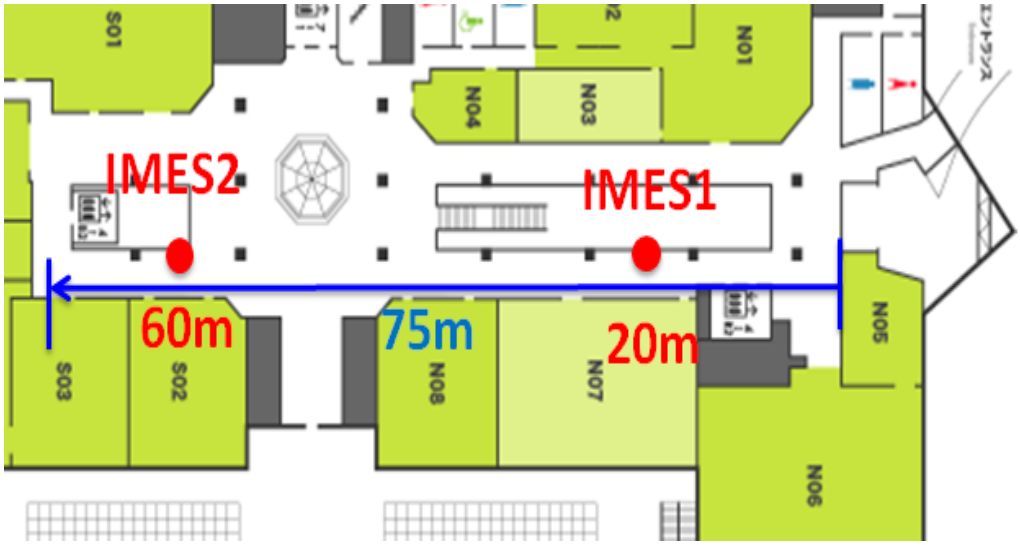

図 74　慶應義塾大学協生館における実験コース[59]

図 74 のような直線の 75m のコースを，プロトタイプを保持しながら歩いた．プロトタイプは PC とセンサ群によって構成されるため PC を一人の被験者が持ち，またもう一人の被験者がセンサ群を保持して歩いた．IMES 送信機の設置位置はそれぞれ，スタート地点から IMES1 を 20m と IMES2 を 60m 地点に設置した．本実験では，あらかじめコース上に 50cm ごとにテープでしるしをつけ，その上を歩くこととし，DR によって得られた値と実位置の値を誤差として扱う．IMES の送信強度は Attenuator を操作することで変化でき，操作可能な範囲の中で最大の ATT=0 のときと最弱の時である ATT=30，および中間に位置する ATT=15 の時で IMES の送信強度を変化させて実験を行った．ATT=0 のときが送信強度-64dBm，ATT=15-のとき送信強度は 79dBm，また ATT=30 のとき送信強度は-94dBm となる．

図 75 に実験コースの外観を，また図 76 に実験の様子を示す.

図 75　実験コース概観

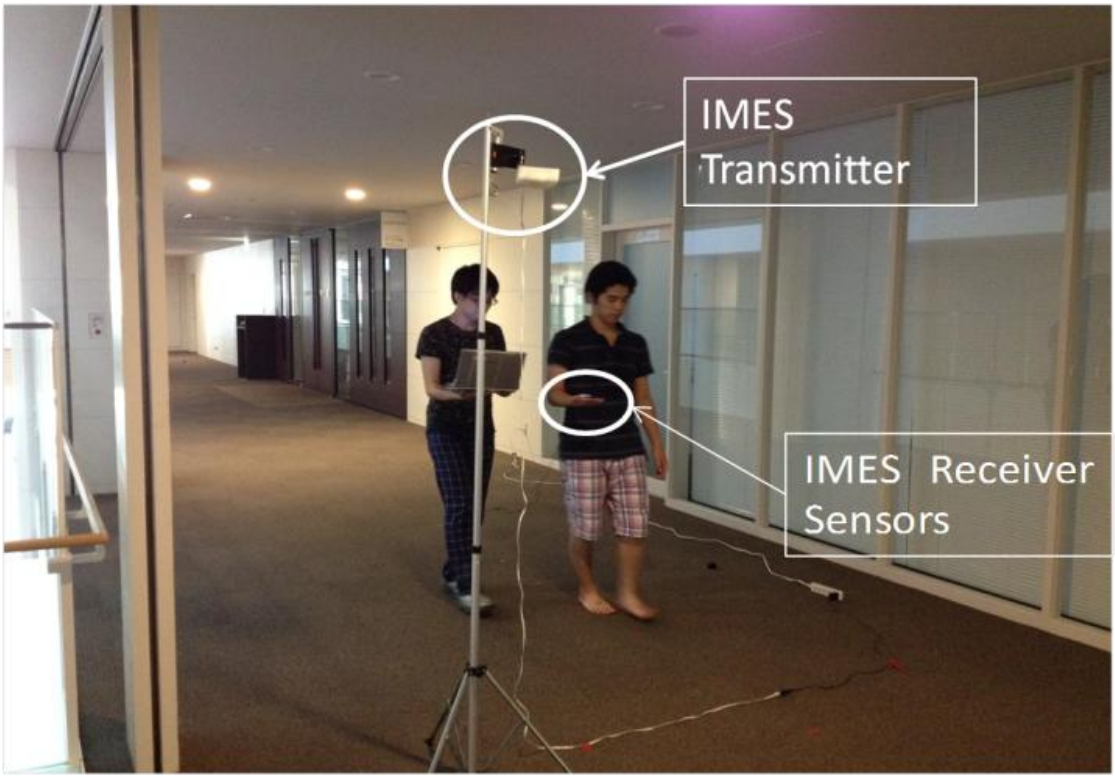

図 76　実験の様子

本実験では上記のとおり，信号強度を 3 つのパターンにおいて変化させて信号強度を調べた．受信した IMES の信号強度のデータを図 77 から図 79 として示す．

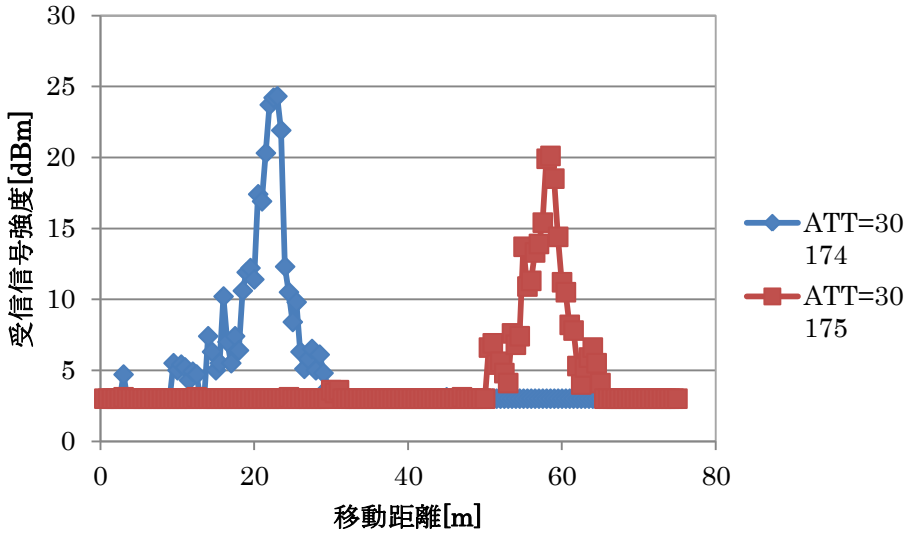

図 77　ATT=30 の時の IMES 受信信号強度

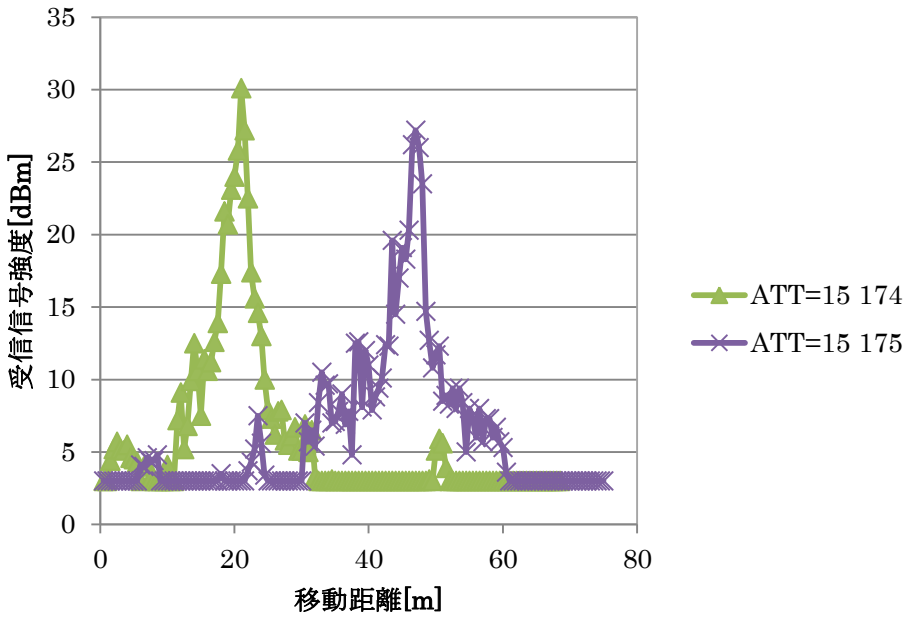

図 78　ATT=15 の時の IMES 受信信号強度

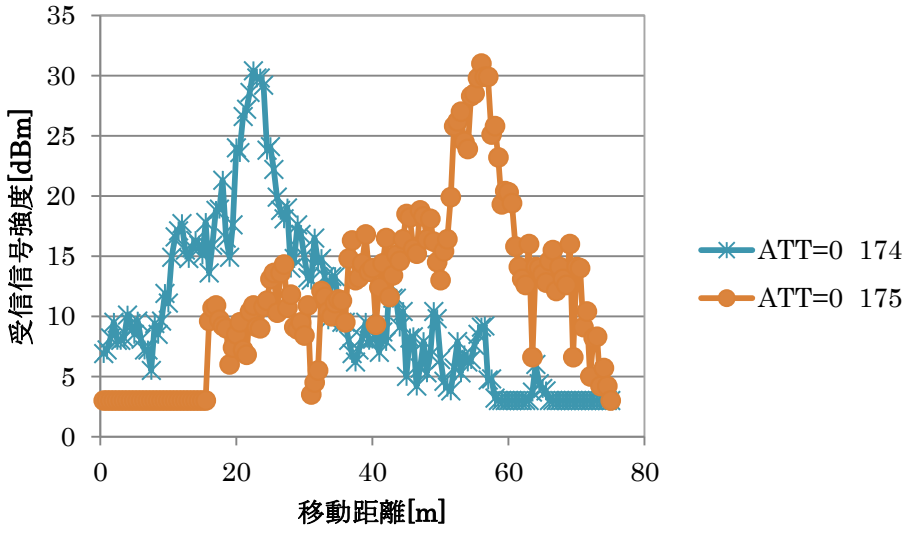

図 79　ATT=0 の時の IMES 受信信号強度

以上のように，どの ATT レベルの時にも，IMES が設置されている 20m と 60m 地点に置いて強い信号強度を得ることができた．最も強い ATT=0 は特に顕著であり，20m 以上離れていても IMES の信号を受信することができた．しかしながら，信号強度が強くなればなるほど，つまり ATT の値が小さくなればなるほど，信号強度が不安定になり，ATT=30 のときは IMES に近づけば近づくほど増加する傾向が分かりやすく見て取れる．これらの信号強度の結果から，それぞれの場合において DR，IPSUIC Type 1，　IPSUIC Type2 の 3

つのパターンにてそれぞれ誤差がどれほど出たかを比較した．なお，今回は Type2 で用いる信号強度の閾値をすべての結果で安定的にピーク値を得られるよう 18 とした．結果を図 80 から図 82 として示す．

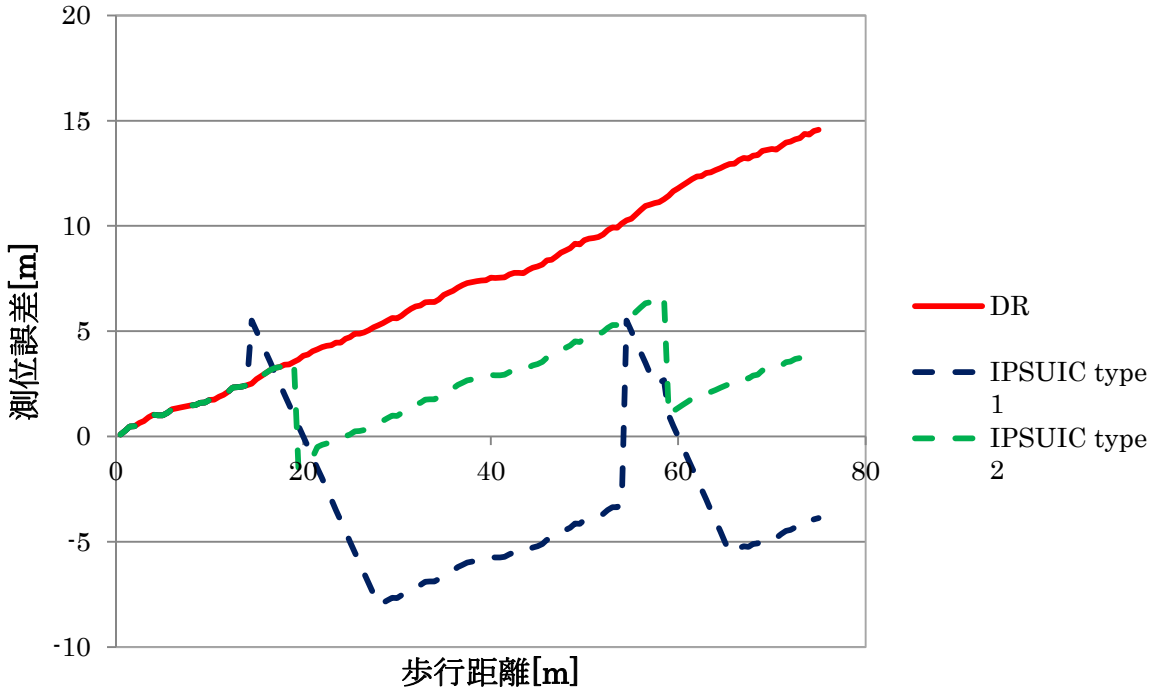

図 80　ATT=30 の時の測位誤差

図 80 からわかるとおり，Type2 を適用した場合，ほとんどの場合で 5m 以下の精度を実現できることが分かった．また 75m 歩いた時点で最終的には 10m 近くの補正を行うことができた．キャリブレーションを実施したときの最大誤差は 1.8m であった．また Type1 を利用した場合は DR と比較しても誤差が大きくなってしまう場合がいくつか見られており，最大で 8m 程度の誤差になっている．

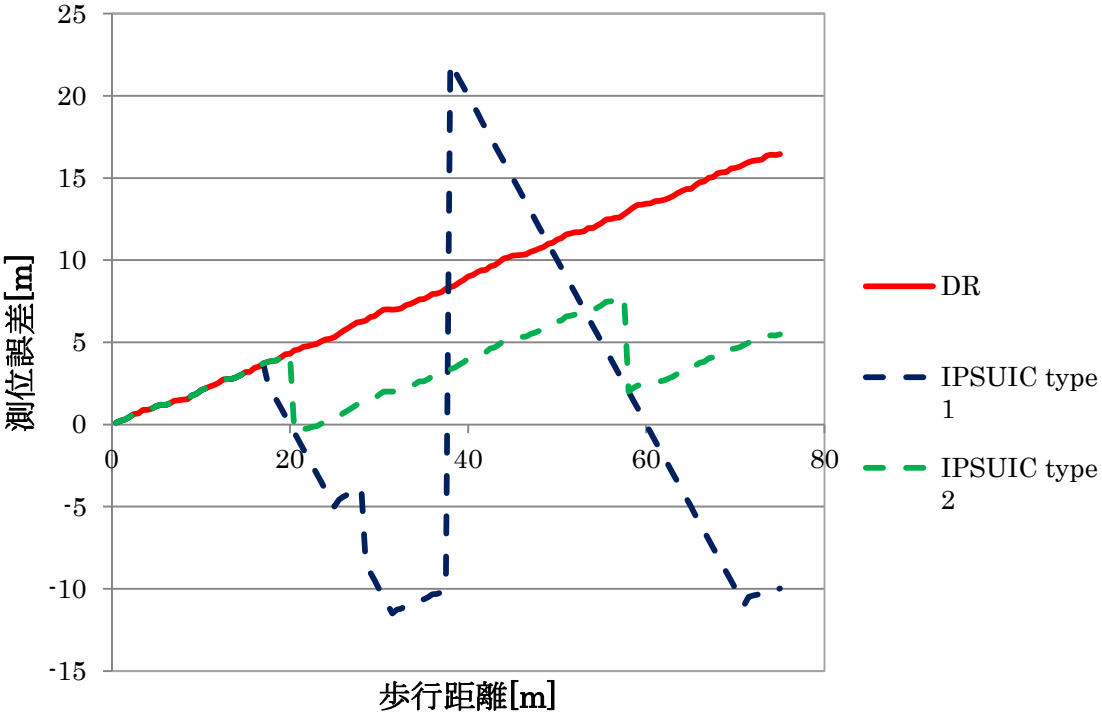

図 81　ATT=15 の時の測位誤差

図 81 からわかるとおり，ATT=0 の時と同じく Type2 を利用ことでほとんどの場合に 5m 以下の精度を実現することができた．また 75m 歩いた時点での補正距離は 10m 以上であった．キャリブレーションを実施したときの最大誤差は 2.3m であった．　また Type1 を利用した場合は DR と比較しても誤差が大きくなってしまう場合が多く，最大で 21m 程度の誤差になっている．

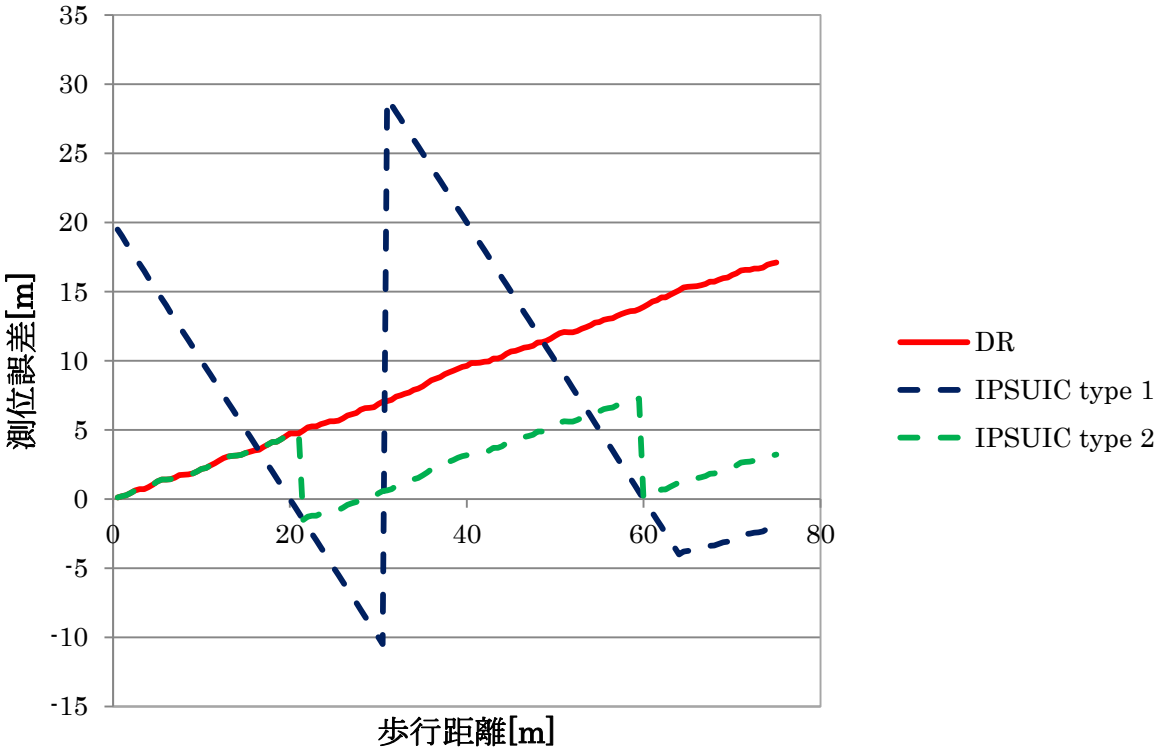

図 82　ATT=0 の時の測位誤差

ATT=0 の時は DR の誤差が 17m ほどであった．しかし図 82 からわかるとおり，INSUIC Type2 を適用することでほぼ 5m 以下の精度を保持していることが分かる．75m 歩いた時点では 15m ほどの誤差を補正することに成功した．　また Type1 を利用した場合は DR と比較しても誤差が大きくなってしまう場合が多く，最大で 29m 程度の誤差になっている．Type1 は信号強度が強くなればなるほど最大誤差が大きくなってしまうことが分かる．

今回取得したデータから，どの ATT レベルに置いても IMES と信号強度による位置を考慮した補正を行うことが有用であることが分かる．また IMES によって補正をかけることによって，DR を継続的に使うことを支援ができることが分かった．さらに図 79~81 から IMES を 40m 離しても直線においては 5m 程度の精度を保証することが分かった．また信号強度の強さは閾値によって依存することがなく，環境によって信号強度が大きく影響を受けたとしても閾値を適切に設置することで克服が可能である．そのためには設置・導入時に試験を行い，適切な値を発見する必要があると考えられる．

一方で，最大で 8m 程の誤差を生んでしまっているので，5m 以下を保つ配置を考えると 30m～35m ほどに配置することが望ましいことが結果から考察できる．以前から考えられていた IMES の半径 10m 程度の精度からみれば IMES を 20m ごとに置く必要性があり，

この点においても精度を向上させさらに設置個数を減らすことができた．DR と比較すれば，Type2 を用いることで累積的にたまる誤差を補正できることが分かった．Type2 では閾値を設置することで IMES による補正を行う IMES の送信範囲を限定した．本アルゴリズムを使用することで IMES を受信し，キャリブレーションを行っているときの最大誤差は 2m であった．本システムでは駅や地下街などのナビゲーションを対象にしているため，直線のみの結果ではあるが 2m ならば十分な成果と考えている．しかし，信号強度の閾値を考慮することにより精度は向上し以上のような結果を得たものの，DR を補正するチャンスは減ったといえる．

また Type1 を利用することによって逆に誤差が増えている場合が多くみられる．これは遠くにおいても IMES の信号を受信できてしまうことが反映され，大きな誤差を生んでしまうことに起因する．

Type1 を利用したときには信号強度が強くなればなるほど，誤差は大きくなりがちであったが，Type2 を利用した場合は，信号強度によって大きな変化は見られなかった．この結果から信号強度を強く設定し Type2 を適用することで，閾値以上の値を得られるチャンスも増え，精度も確保できると考えられる．

よってこれらから IMES によって誤差をキャリブレーションする場合は Type2 を利用することが望ましい．以後の実験においては Type2 によって補正を実施する．

7　IPSUIC による評価のための実験

7.1　横方向の移動も含めた移動ルート Mapping による屋内測位性能の評価のための実験

6 章で扱った二つの予備実験を経て得られたアルゴリズムとプロトタイプをもとに大宮鉄道博物館ヒストリーゾーンにおいて実証実験を行った．本実験はこれまで行ってきた実験で示した IMES によるキャリブレーションを様々な状況に対応して実施できるかどうかを調べるために行われる一つのステップとして位置付けられている．よって 6.3.2 節に比べて実験のコースが複雑になっており，4 つの直角に曲がるコーナーを用意し，さらに 6.3.2 節の実験よりも長い距離を実験のコースとして設定した．なおコーナーは直角であるが，実際に人が曲がることを想定し，自然な曲がり方で曲がるものとする．

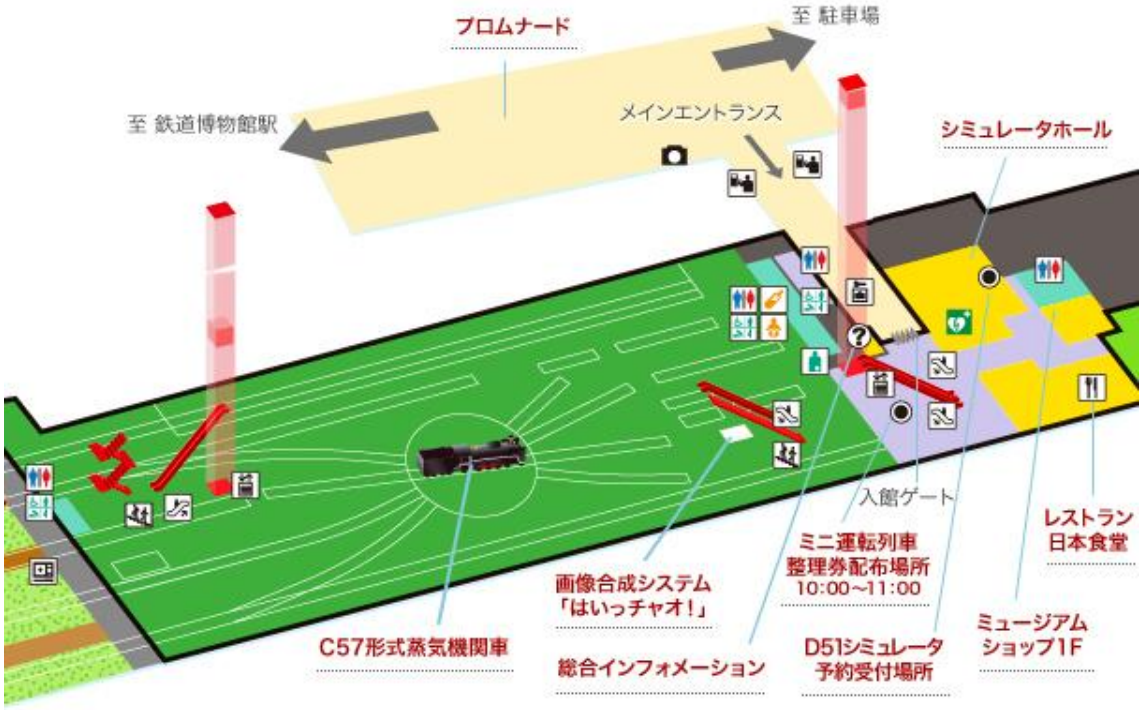

図 83　鉄道博物館ヒストリーゾーン[60]

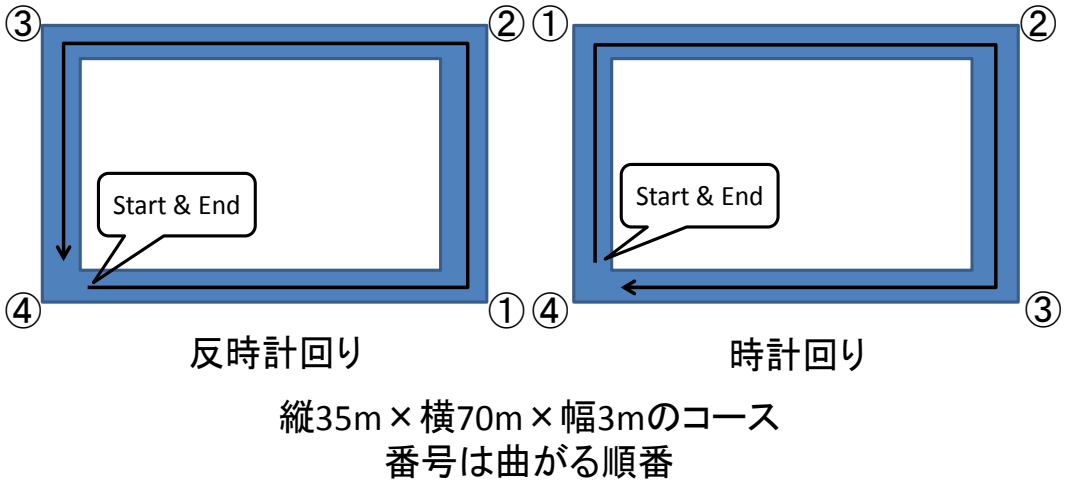

図 84　実験コース概要

実験を行った鉄道博物館ヒストリーゾーンの様子を図 83, 実験コースの概要を図 84 として示す．鉄道博物館のコースは天井が高く，1 階と 2 階が吹き抜けとなっているため非常に開放的な空間となっている．このコースを図のように反時計回り，および時計回りに回ることを想定して一周し，スタートポイントに戻った時点で実験終了とする．本実験では被験者を 2 名(A，B とした)に実験を行ってもらい，計 4 周のデータを比較する．プロトタイプは 6.3.2 節の実験と同様に 1 人の被験者では持てないため，補助として PC を持ちながらもう一人付き添いながら歩く．被験者はアンテナとセンサを右手上に保持して歩くこととする．実験のコースは縦が 35m，横が 70m であり，図に表示されている番号は曲がるコーナーの順番である．IMES の設置位置は図 84 で示された①と③に設置がされており，今回はコーナーの内側に設置することとした. IMES 送信機の向きは地面に向けて直下方向に設置がされており高さは 2.3m である．また送信強度はもっとも強い-64dBm(ATT=0 のとき)とした．図 85 に実験の様子を示す.

図 85　鉄道博物館においての実験の様子

データを採取した後，6.3.2 節の実験と同様に，6.3.1 節の実験をもとに構築したアルゴリズムを基に後処理で移動距離を求める．ただし今回は誤差をグラフとして表すのではなく，実際にどのようなルートを通り，DR で算出したルートとどれくらいの差があるのか，また IMES でどれほど補正が可能なのかということを検討する．実験の結果を図 86~89 として示す. なお, IMES によって補正したデータはわかりやすさのためドットと線を用いて表し，それ以外のデータはドットのみで表した． 実際に歩いた動きは実験のコース(灰色のライン間)の間を通り抜けている黒いラインであり，オレンジ色で示されたドットが DR で算出されたルート，赤色で示されたドットおよび線が DR に対して IMES でキャリブレーションを行った結果である.

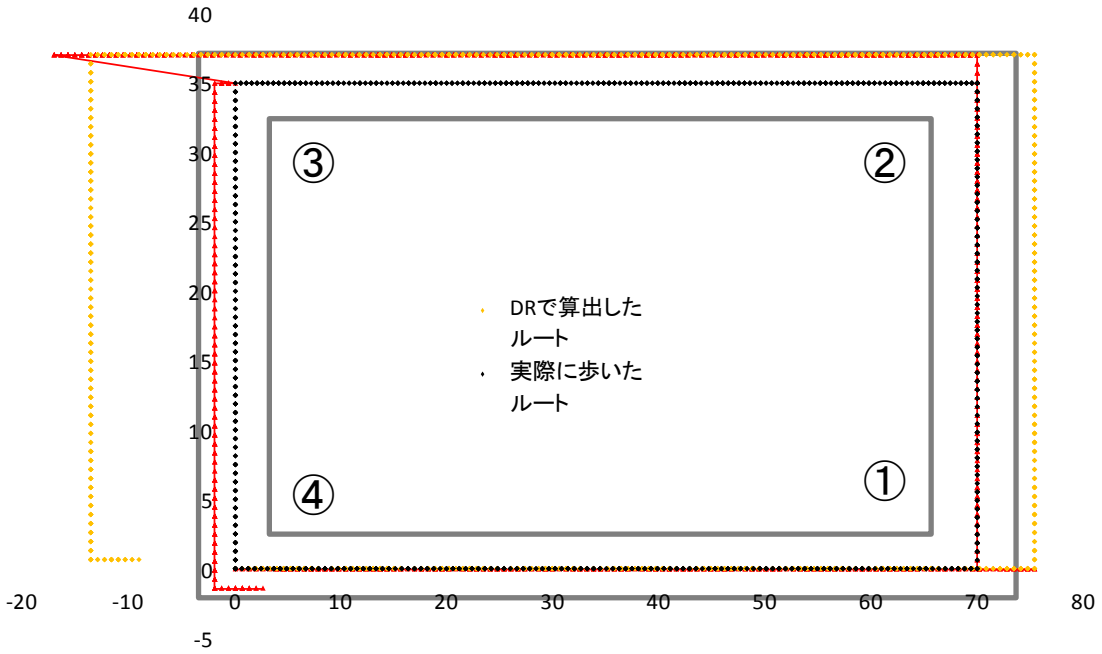

図 86　鉄道博物館における実験(被験者 A；反時計回り)

図 86 には反時計回りに被験者 A が図のように黒い点で表されるルートを歩行したときの DR の結果と，それに対する IMES によるキャリブレーションを行った結果を示す．図でわかるとおり，DR によって得られた誤差はかなり大きく，②から③の直線では 70m の直線歩行に対して，85m 以上歩いたという算出結果になり，大きな誤差をもたらしている．これに対して IMES を用いることで，曲がり角③のところで大きな誤差を補正できている．しかしキャリブレーションのタイミングが早く，ずれが生まれたため道の真ん中を歩いていたにもかかわらず，右側を歩いているという風にキャリブレーションされた．これはジャイロセンサが曲がるよりもキャリブレーションするタイミングが早く認識されてしまい，補正位置を得た後も直進を続けている事に起因する．

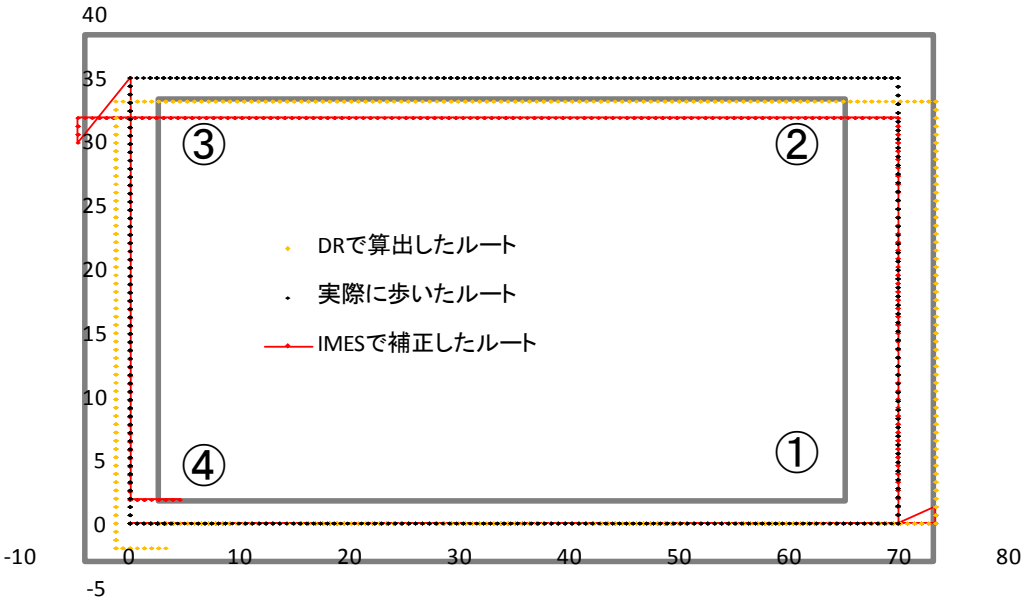

図 87　鉄道博物館における実験(被験者 B；反時計回り)

図 87 には反時計回りに被験者 B が図のように黒い点で表されるルートを歩行したときの DR の結果と，それに対する IMES によるキャリブレーションを行った結果を示す．図でわかるとおり，DR によって得られた誤差は少なくないものの，DR によって算出された結果ではすべてコースの上を歩いているため，実際に自分の位置はどこにいるのかを認識できるのではないかと思われる．これに対して IMES を用いることで，曲がり角①のところで④から①で得た直線の誤差を補正できているが補正のタイミングが曲がった後に得られた．その結果①から②の直線において，もともと DR でも短く算出されていたところをさらに IMES の補正によって短くするという結果になった．つまり IMES による補正によって 35m 歩いたところを，32m と算出する結果となった．これは被験者が A のときとは反対に，ジャイロセンサが曲がるよりもキャリブレーションするタイミングが遅く認識されてしまい，曲がって直線移動を続けたところに補正位置を得たことに起因する．

図 86，図 87 から，キャリブレーションのタイミングがずれた場合には，算出する DR が生んだ誤差を助長する可能性があることが分かった．この点，曲がった部分において全く遅延なくキャリブレーションができれば，それまでの直進移動で得られた誤差の身をキャリブレーションすることができることが分かった．

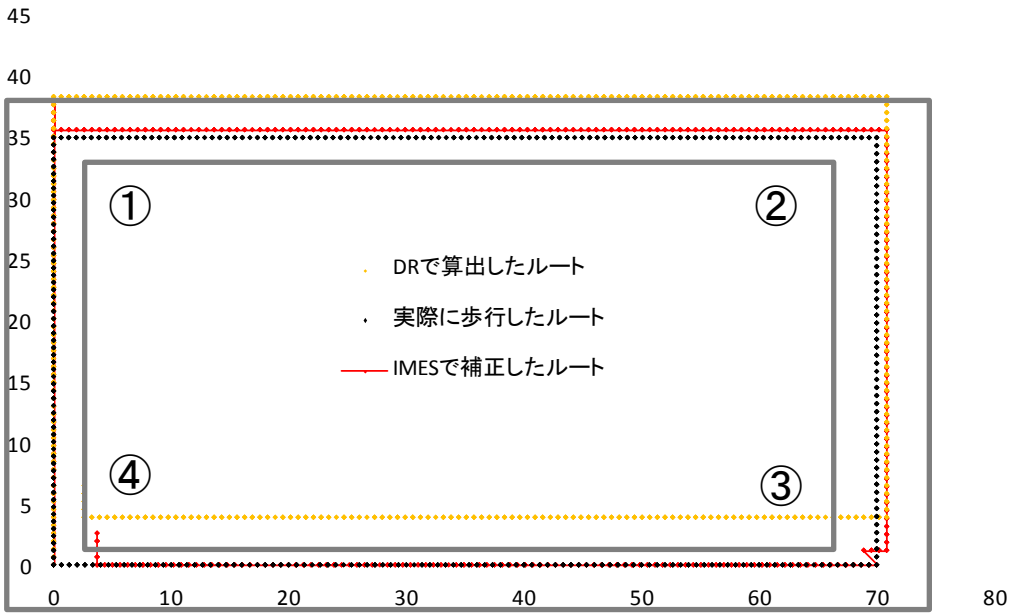

図 88　鉄道博物館における実験(被験者 A；時計回り)

図 88 には時計回りに被験者 A が図のように黒い点で表されるルートを歩行したときの DR の結果と，それに対する IMES によるキャリブレーションを行った結果を示す．①におけるキャリブレーションは①の角を曲がったときに行うことができ，①から②の直線では実位置に近い位置でキャリブレーションすることができた．しかし，③の曲がり角においては曲がってから直進をつづけたところでキャリブレーションが実施されているため，図 87 の③の曲がり角と同様に実距離との横方向におけるずれはないものの，距離方向においてのずれが出てしまっている．

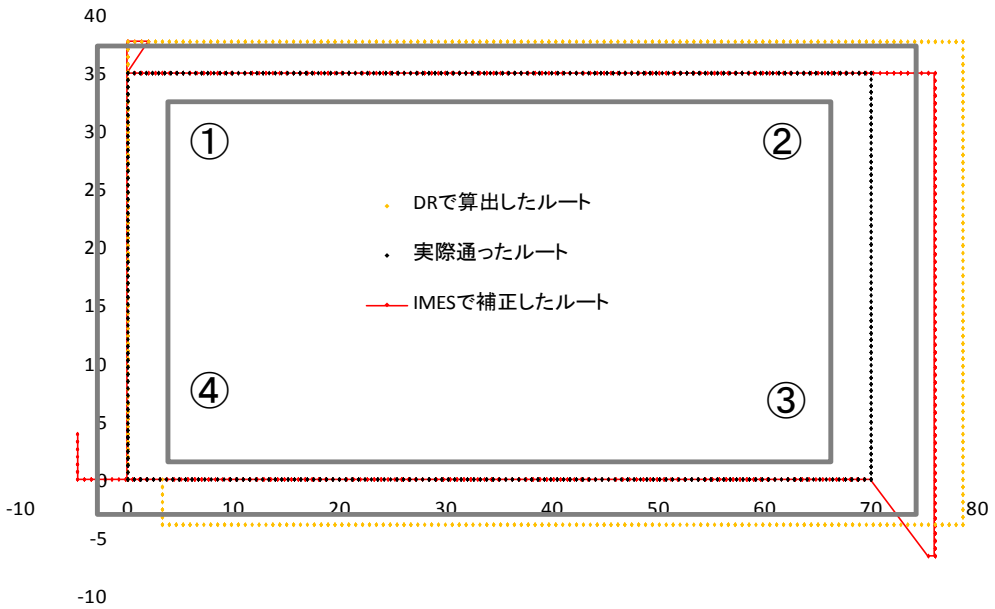

図 89　鉄道博物館における実験(被験者 B；時計回り)

図 89 の実験では時計回りに被験者 B が図のように黒い点で表されるルートを歩行したときの DR の結果と，それに対する IMES によるキャリブレーションを行った結果である．①③の曲がり角においては曲がってから直進をつづけたところでキャリブレーションが実施されているため，図 87，図 88 の③の曲がり角と同様に実距離との横方向におけるずれはないものの，距離方向においてのずれが出てしまっている．しかし，今回においては①から②の直線において DR で算出した値が実距離よりも長く計算しているためこのずれが誤差を小さく補正する結果となった．このようにキャリブレーションのタイミングがずれた場合には誤差を助長するか，軽減するということが見られるため，曲がり角には IMES を設置する必要があると考えられる．

7.2　移動ルート Mapping による適用性評価のための実験

7.1 の実験結果と比較して，別のコースにおいても評価実験を行った．実験のコースは鉄道博物館における実験と違いコースの幅が 3.5m，天井の高さが 3m 程度のコースであり，電波伝搬が複雑になることが予想される．実験方法は 7.1 節の実験と同様の方法で実施するが，本節で扱う実験では被験者は 5 人とした．目的は IPSUIC の環境と人に対する適用性を評価することである．

実験のコースは以下の図 90 の通り，短いコースにおいて実験を実施し、以下のコースに記された方向で進むのが“往路”，スタートとゴール地点を逆にして，逆方向に進むのを“復路”としてコースを定めた．往路と復路は互いに独立した試行として行い，被験者 5 名に一回ずつ，計 10 回の試行を行った．

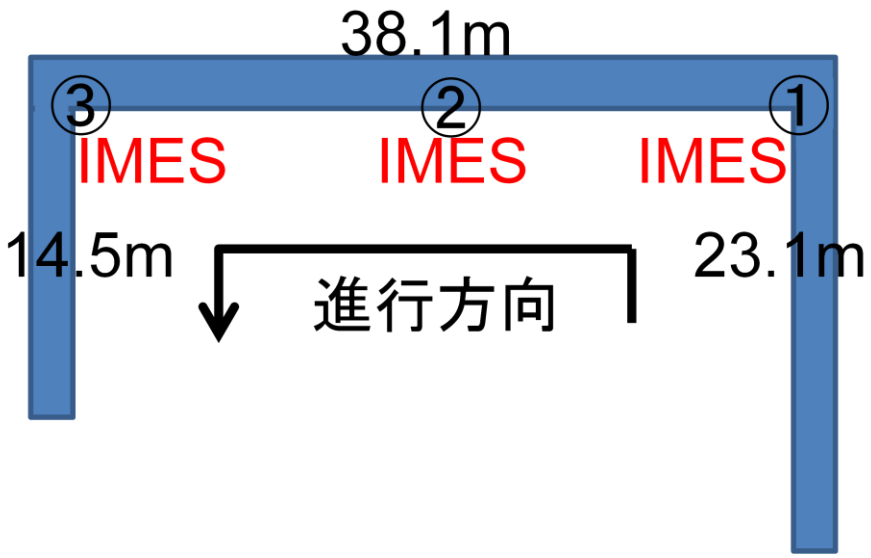

図 90　慶應義塾協生館 3 階における実験コース

上記のコースにおいての番号は IMES の設置位置であり，それぞれ PRN 番号を，①が 176，②が 182，③が 175 と設定した．信号強度は伝搬の影響を考え，設定が可能である中で最弱となる-94dBm において実験を実施した．5 人の被験者に対する実験結果を代表して被験者①の結果を以下に図 91 および 92 として示す．そのほかの被験者の結果は付録Ⅱに記す．

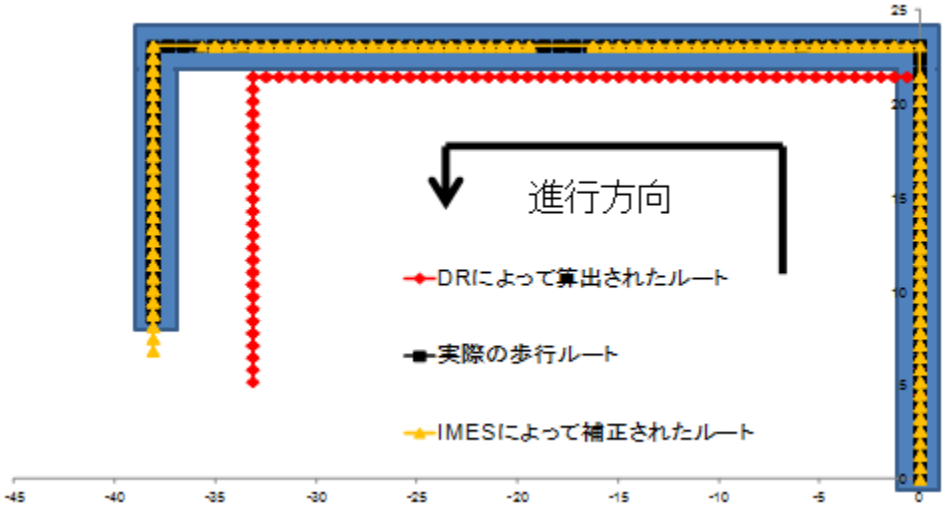

図 91　実験結果(被験者①往路)

図 91 に示す通り DR によって算出されたルートでは実際の歩行ルートと比較して，大きな誤差が見られている．それに対して，IMES で補正することによってその誤差は低下していることが分かる．DR の最大誤差は 5.96m であり，平均誤差は 4.38m となっているのに対して，IMES による補正を行うことで最大誤差を 4.76m，平均誤差を 1.03m まで低下させることができた. IMES を補正することで常に 5m 以下において補正ができていることが分かる．

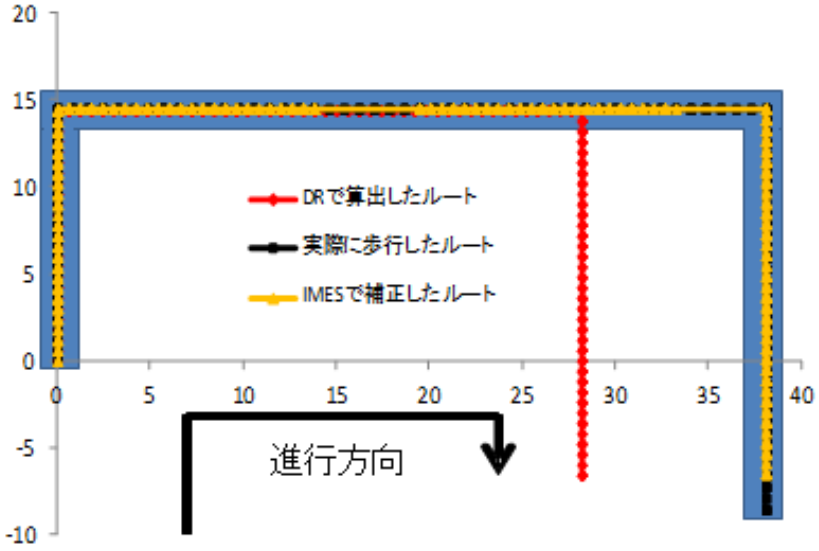

図 92　実験結果(被験者①復路)

図 92 と同様に DR によって算出されたルートでは実際の歩行ルートと比較して，大きな誤差が見られている．それに対して，IMES で補正することによってその誤差は低下していることが分かる．DR の最大誤差は 8.29m であり，平均誤差は 4.84m となっているのに対して，IMES による補正を行うことで最大誤差を 3.30m，平均誤差を 1.05m まで低下させることができた. IMES を補正することで常に 5m 以下において補正ができていることが分かる．

7.3　実験結果のまとめと考察

まず 7.1 節における実験結果に関して考察を行う．

実験図 86~89 に示されている結果の誤差を，表 5 として下記にまとめた．大きいもので 10m 以上の誤差を生じているデータもあることが分かる．

表 5　7.1 節における実験データまとめ

	A:反時計	B:反時計	A:時計	B:時計
DR平均誤差	3.69	1.78	2.30	5.47
DR最大誤差	13.70	3.45	5.24	8.96
IMES平均誤差	1.93	2.12	1.10	2.51
IMES最大誤差	5.77	4.39	3.75	6.28

表 5 から B による反時計回りを除いて，IMES によってキャリブレーションを行った方が高精度を実現していることが分かる．数値としては最大誤差を 7m 以下に抑えており，210m の歩行に対して 4%未満の誤差を実現していると言える．しかしながら，DR の誤差が一時的に 13m 以上になることや B により反時計回りの試行では IMES を使うことでより

精度が悪くなってしまっていることから常に安定して高精度を実現できているわけではない事が分かる.

A による反時計回りの試行では，スタートから①までの直線，①から②までの直線，②から③までの直線においてすべて実際の距離よりも多く DR で算出されており，特に②から③までの直線において大きな誤差を生んでしまったため誤差のもっとも大きな誤差が 13m 以上となってしまった.

また, B による反時計回りの試行では DR によって算出されたルートの結果が実際に歩いたルートに非常に近くよい結果を得られたという半面, IMES によるキャリブレーションが逆に精度を悪くしたという結果になった．これは DR によって算出されたルート，IMES によって補正されたルートともに大きな誤差を生んでいるわけではないが，キャリブレーションのタイミングが曲がった直後に行われなかったことに起因すると思われる．つまり IMES で補正した結果の方が，直線で DR によって計算された距離が短くなってしまい，補正が逆に結果を悪化させることとなったと思われる．しかしながら，本試行によって得られる結果は常に 5m 以下での精度を実現していることから実運用に十分耐えられるものであり，キャリブレーションを任意にするなどして，DR の結果が非常に良い場合においても対応が可能であると思われる.

7.1 節における実験から，IMES 送信機の設置位置は曲がり角すべてにも置くことが望ましく, キャリブレーションの性能としては 5m 以下にキャリブレーションを行うことができるという結果になった．しかし本実験の結果から，直線の誤差などによってより大きな誤差を得てしまう結果も見られたため，最適な配置には直線の誤差をキャリブレーションすることも重要であると考えられる．以下に A の反時計回りの時と B の時計回りの時において, すべての角に IMES を設置した場合を仮想的に設置した場合の結果を示す. なお IMES のキャリブレーションのタイミングは今回の実験でもっともキャリブレーションによる精度が悪かった.

次に 7.2 節における実験結果に関して考察を行う. 以下に表 6 として 7.2 節における実験結果のまとめを記す.

表 6　7.2 節における実験結果まとめ

	被験者①				被験者②				被験者③			
	往路		復路		往路		復路		往路		復路	
	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES
最大誤差	5.96	4.70	8.29	3.30	10.10	4.49	5.84	1.90	8.70	3.95	8.29	3.30
平均誤差	4.38	1.03	4.84	1.05	4.95	0.80	4.23	0.70	5.01	0.86	4.84	1.06
	被験者④				被験者⑤							
	往路		復路		往路		復路					
	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES	DR	IMES				
最大誤差	5.28	2.33	15.33	13.50	4.50	2.09	4.91	2.41				
平均誤差	2.51	0.59	11.33	3.21	2.20	0.53	1.92	0.74				

今回は 5 人の被験者に対して往路・復路の実験を行ったため 10 回の試行を実施した．その中で IMES を利用することで目標である 5m 以下に抑えることができなかったのは 1 回(被験者④の復路)のみである．被験者④の復路の実験においては，DR の最大誤差は 15.33m であり，平均誤差は 11.33m となっているのに対して，IMES による補正を行うことで最大誤差を 13.50m，平均誤差を 3.21m まで低下させることができた．IMES によって補正した場合の最大誤差 13.50m は IMES によって補正される直前の誤差の大きさであり，最初の IMES(復路なので最初に取得が可能な IMES は③である)を取得する以前の誤差であった．これ以後の最大誤差は 4.83m となり常に 5m 以下に抑えられていることが分かった．つまり IMES を用いることで，適切なキャリブレーションはできているが，被験者④の復路の実験での DR では誤差の増大がしやすく, IMES のキャリブレーションを実施する前に大きな誤差を出してしまったことが分かる．増大の原因は被験者④の保持の仕方が，従来の持ち方に比べやや不規則な動き(試行開始時と思考終了時で比較するとセンサ位置が手の中でずれていた)が挙げられ，結果として実際よりも多くの歩数を検出したことによるものと考えられる．この問題に対する対策としては IMES の設置間隔を狭めるよりも，DR のアルゴリズムの中でノイズを切る方法を構築するなどして，より精度の高い DR を構築することが有効な対策であると考えられる．また今回被験者に保持してもらったセンサは小さく，非常に軽いことから(約 22g)，センサの位置が変わってしまったことが挙げられる．しかしながら本システムの適用としてはスマートフォンなどのデバイスを想定しているためより重く，このようなノイズは実装かを経ることで発生しにくくなると考えられる．

また，7.1 の実験結果と比較しても環境においてその差が出ることなく，IMES の信号強度においてキャリブレーションタイミングを工夫する IPSUIC も，より厳しいと考えられる協生館 3 階の環境において動作することが確認できた．

8　考察と評価

5.3.3.2 節で説明したように，理論的には「DR の累積誤差」 ＞ 「IMES の固定誤差」の位置に置くことが重要であると考えられる．しかしながら DR の累積誤差と IMES の固定誤差にはそれぞれ不確定要素があり，今回は DR のアルゴリズムを直線と直角の右左折の判別のみに固定することでその配置位置，およびシステム全体の有効性を検証した．8.1 節ではその配置位置に関する考察を行い，課題を明らかにする．8.2 節では限定条件以外の DR への対応への考察を行う．最後に 8.3 節ではシステム全体の目標に対する達成度を評価する．

8.1　IMES 配置位置に関する考察

5.3.3.2 節に示した予備実験の結果から本システムにおける IMES 送信機の適切な配置方法は以下のように考えられることはすでに述べた．

① 屋内空間に入る部分(出入り口など)に初期位置として設置

② IMES 送信機を 35m 間隔に設置

③ 曲がり角がある場合に設置

7 章で実施してきたこれまでの実験結果から，上記の配置方法による配置方法の最適性が実証された．しかしながら IPSUIC では対象を直進と直角の右左折のみに絞っている．

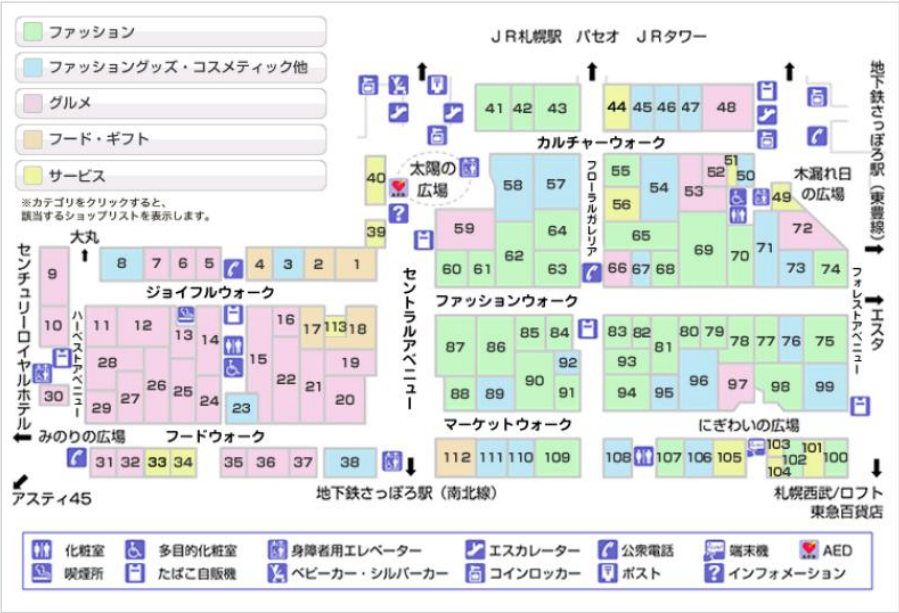

図 93　APIA の地下街マップ[61]

そのため，上記のように設定された IMES の設置方法ならば，IPSUIC を用いることで図 93 のように直線と直角の曲がり角で構成された場所での測位は実現できると考えられる．

図 94　新橋 WING　地下街マップ[62]

しかしながら，たとえば図 94 のように直角でない曲がり角を持っている地下街においては対応ができず，実際位置より剥離してしまい，十分な精度を実現できないと考えられる．その原因は現在 IPSUIC で用いている DR アルゴリズムが直線と直角の曲がり角の判断のみを実装していることである．

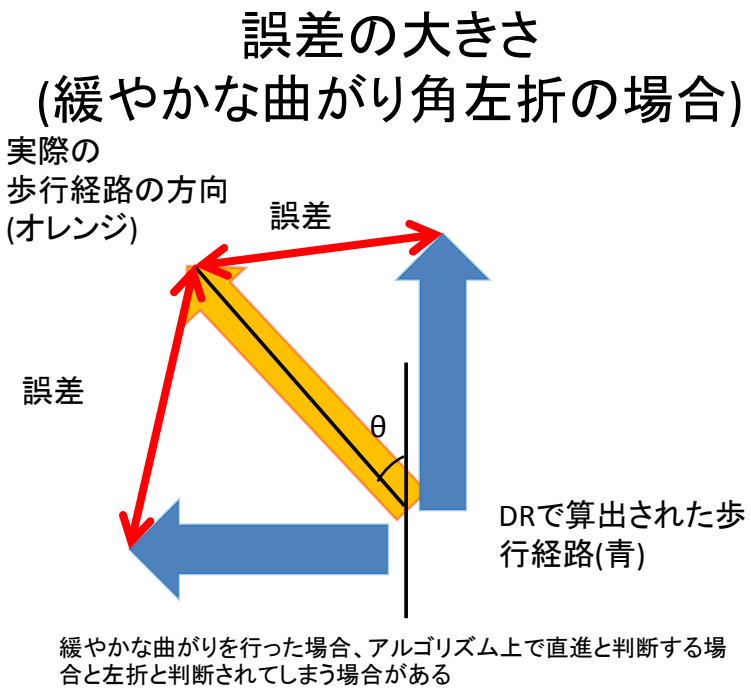

図 95　誤差の大きさ(緩やかな曲がり角左折の場合)

図 95 のように，現在のアルゴリズムではある一定の閾値を超えた場合であれば左折と判断されるが，緩やかに曲がった場合は直進と左折どちらを判断するかは θ に依存するところであり，また個々人によって値が違うため誤差の傾向が違ってくる．ここで曲がる角度が 90 度を下回った場合は常に直進であると判断されるとすると，DR で算出された距離と実際の歩行距離の長さが同じ値(d で与える)としたばあい，実際の距離から考えられる誤差は $d\sqrt{2-2\cos\theta}$ で与えられ，直進の場合に比べて $\sqrt{2-2\cos\theta}$ 倍で誤差が増加していく傾向にあることが分かる．($-\pi \leqq \theta \leqq \pi$,ただし$\theta = 0$の場合は除く)

よって以下の通りのルールを付け加えて考える必要がある．以下のルールは 5m の精度を実現することを考慮している．

④　直角でない曲がり角においては，$35/\sqrt{2-2\cos\theta}$ [m]間隔で IMES を設置する．θの範囲は$-\pi \leqq \theta \leqq \pi$,ただし$\theta = 0$の場合は除く．(ただし，直線における DR の誤差を 0m とした場合)

また，現在では IMES をこのような角地に置くことを基本的な設置方針としているが，IMES を直角でない曲がり角に設置することで 2 点間の緯度経度を用いることから DR の方向成分を見分けることも可能であると思われる．その場合，上記の④のルールで設置することで 2 点間の精度も一定値以下に抑えられることが可能であると考えられる．

またシミュレーション上にて，歩行経路の角に IMES を配置するルールに関する評価を行った．

また配置方法の課題として，角に置くことへの最適性を考える必要がある．7.1 節の実験で得られた DR の実験結果を用いて，上記の最適な配置方法とそのほかに考えられる配置方法の検討を比較した．これらを図 96 として示す．

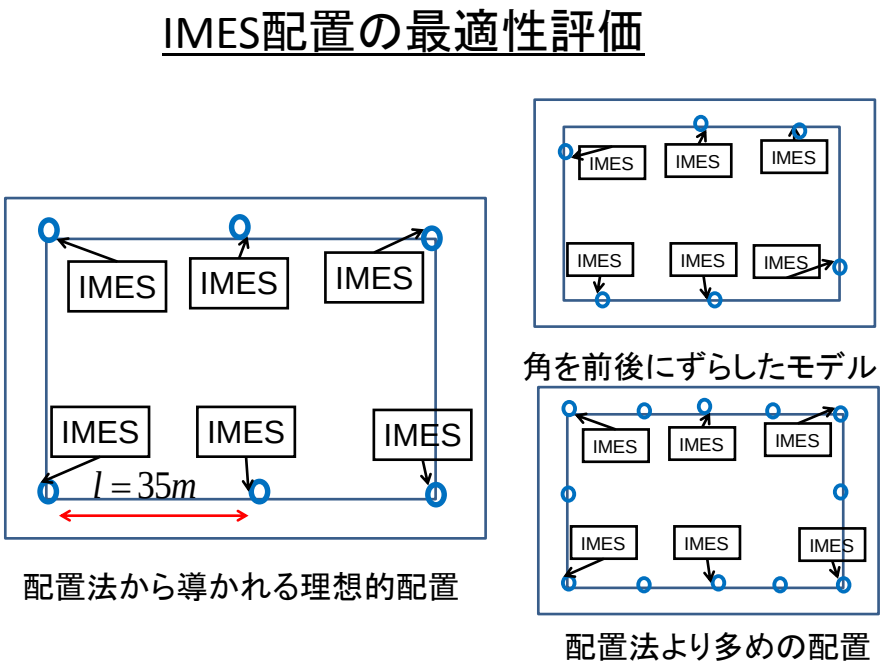

図 96　IMES 配置の最適性評価

図 96 に示された理想的配置と角を前後に 5m ずらしたモデル，および従来のものより多い配置のモデルを比較評価した．理想的な配置と角を前後にずらしたモデルの評価として以下の図 97 に示す．

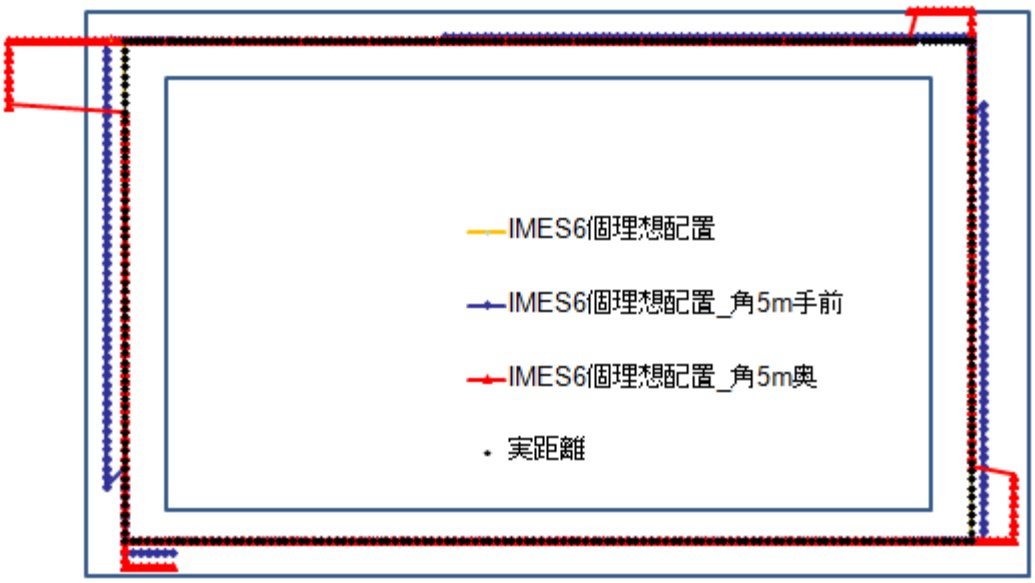

図 97　理想配置モデルと角に対して前後 5m ずらしたモデルの精度比較

実距離と比較してもっとも 6 個の理想配置を行った場合がもっとも誤差が小さいことが分かった．さらに図 97 に示す通り，奥にずらした場合や前にずらした場合では曲がる前の誤差が蓄積してしまい実距離に対して大きく誤差が出てしまうことが分かった．このことから角に置いた場合が，もっとも精度が高くなる最適な配置であることが分かった．

次に 6 個の理想配置と、配置個数の多いモデルを比較した. その結果を図 98 として示す.

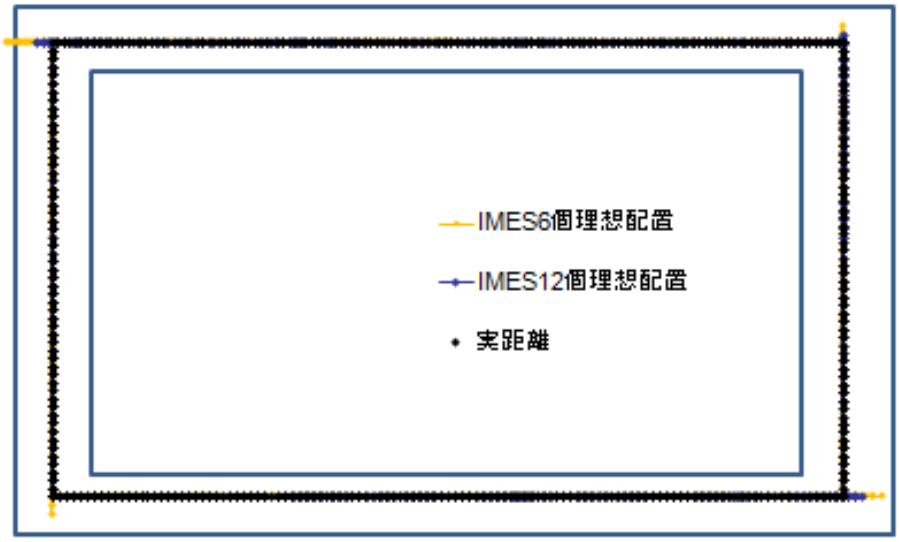

図 98　理想配置モデルと配置個数の多いモデルの精度比較

図 98 に示す通り，精度に関しては 12 個置いた場合の方がより良い精度となった．しかしながら理想配置でおくことで目標とする 5m 以下の精度を実現していることや, IMES の導入コストは倍になってしまうことから理想配置の設置方法がより望ましいと考えられる.

また目標精度がより向上させなければならない場合は設置個数を増やすことで対応が可能であることが分かった.

8.2　人間の様々な動きに対する対応への考察

8.1 節で説明したように，理論的には「DR の累積誤差」 ＞ 「IMES の固定誤差」の位置に置くことが重要であると考えられる．しかしながら DR の累積誤差は，人の様々な行動によって誤差の傾向が違うことが予想され, IMES の固定誤差は環境によって電波強度に影響が出る事が予想される．筆者らはこの誤差のうち，人の様々な行動によって出る誤差の影響を見るために同じ鉄道博物館において実験を行っている.

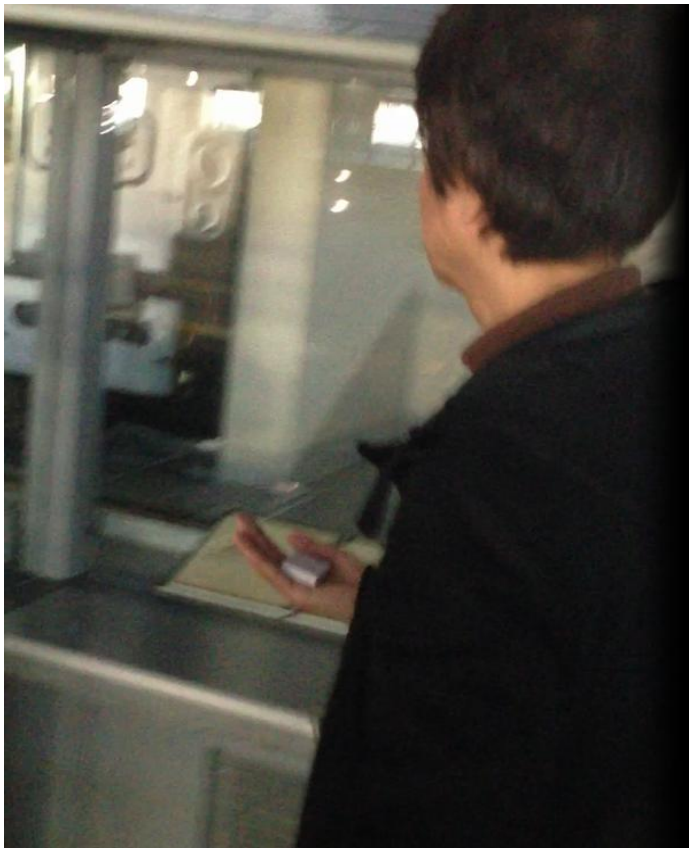

図 99　実験の様子(展示物が右にある場合)

被験者 1 名がセンサを保持しながら，鉄道博物館におけるヒストリーゾーンのコースを歩行することで実験のデータを採取する．歩行するコースは 70m の直線である．被験者は展示物を見ながら歩行することとし，歩き方や歩行スピードは被験者が任意に歩くこととする．被験者は図 99 のようにセンサを右手の上に保持しながら歩行をした.(歩行を停止して展示物を見ることも含める)

展示物は進行方向に対して左にある場合と右にある場合，二つのケースにおいて実験を行った．また，IMES はもっとも理想的な条件(キャリブレーションによって誤差が必ず 0m

になる)に置いた場合を想定した．析出したデータは CSV のセンサーデータであるが，これを地図上に歩行ルートとしてマッピングを行った．歩行の様子はビデオカメラで撮影することとする．この実験の結果を図 100，および 101 として示す．グラフの xy 軸はともに単位が m であり，実際に歩いたコースは 70m(y 軸方向に 70m)である．

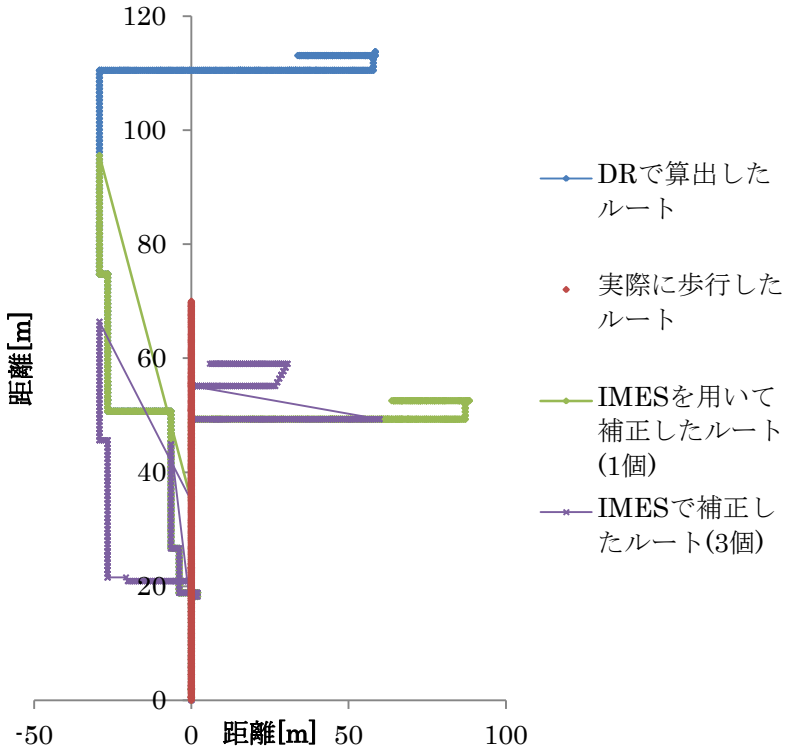

図 100　実験結果(進行方向に対して左に展示物がある場合)

図 100 に示すように，実際の歩行ルートに対して大幅なずれが生じていることが分かる．特に方向成分の検出が大きな影響を及ぼしており，直線の移動に対して 80m 程の横ずれが生じていることが分かる．

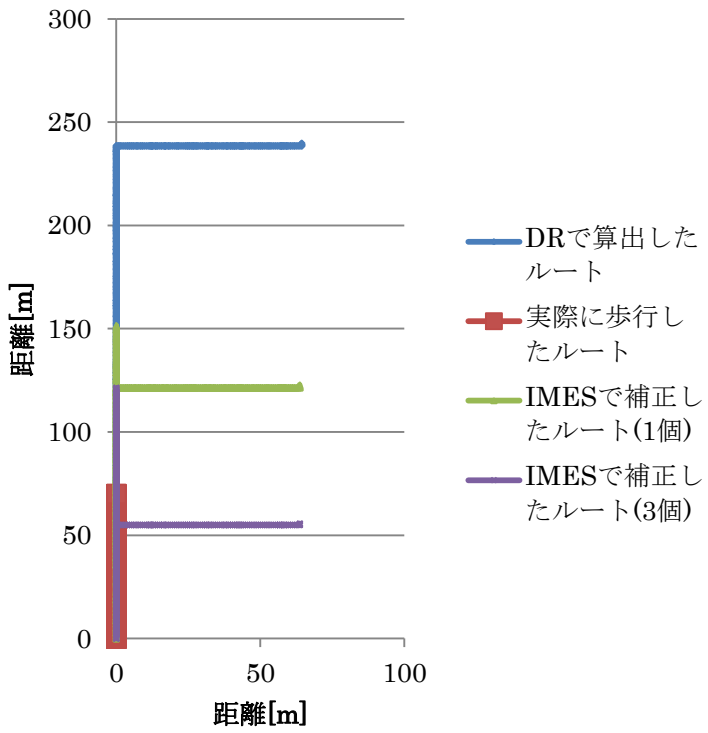

図 101　実験結果(進行方向に対して右に展示物がある場合)

図 101 に示す結果から, 図 100 と同様に大きな誤差を生んでしまっていることが分かる.

上記の図 100，101 ともに，DR で算出したコースは実際の歩行コースよりも長く歩行していることが分かる．これは横にある展示物を見た際に歩数が多めにカウントされてしまっただけではなく，方向もずれたためであると考えられる．この方向のずれは非常に大きな誤差の要因となり，最大で 70m 以上の誤差となっていることが分かる．IMES で補正した場合などでも直線距離の補正は可能であるが，方向成分の検出は DR に依存しているため補正が不可能である．よって今後は DR のアルゴリズムを進化させることや，複数の IMES を順番に受信することで方向成分を決定するなどで方向成分の検出の精度を高めることが求められる.

8.3　システムに対する統合評価

本稿で提案する IPSUIC はユーザーのニーズに基づいて提案を進めてきた．本節では IPSUIC が持つ性能がニーズを満たすものとなっているかの確認を行う. すでにユーザーのニーズに基づいたシステムの要件は表 1 で述べられている通りである．実験によって得られたシステムの性能を表 1 と比較する.

1.　実現性

・スマートフォンに内蔵されうるセンサを利用すること

IPSUIC プロトタイプではセンサの仕様などを知るためにシステムをスマートフォンなどの単一デバイスで実装することは行わなかった．しかしながら本稿でこれまで述べてきたとおり，加速度センサやジャイロセンサ，GPS センサはすでにスマートフォンに内蔵されている．よって本要件は満たしていると考えられる．

・利用者が意識することなく測位が可能であること

IPSUIC プロトタイプでは上記の通り，スマートフォンなどの単一デバイスで実装することが可能であり，さらに GPS とシームレスに測位が行いやすい IMES を利用している．よって利用者が体の一部に測位用のデバイスを装着する必要もなく，また屋内環境に入ったときに意識的に測位の方法を切り替える必要がない．よって本要件は満たしていると考えられる．

・充電することなしに終日利用可能な消費電力であること

IPSUIC プロトタイプでは上記に述べてきたとおり，単一デバイスによる実装は行えていない．よって本要件は未検証の項目となっている．

2. コスト

・持続可能な初期投資および運用費用であること

本システムは，スマートフォンなどの単一のデバイスを用いて，屋内外がシームレスに測位ができるシステムであり，さらに DR を用いることでいつでもどこでも連続的に測位ができるという強みを持つ．このような性質を持つシステムは他にないため，従来の IMES 単独による測位と比較してコストの評価を表 6 として記す．比較のために鉄道博物館ヒストリーゾーンにおけるモデルを考え，IPSUIC の理想的な配置と IMES の送信範囲である 20m で敷き詰めた場合を比較した．

表 7　IMES と IPSUIC のコスト評価[万円]

	IPSUIC	IMES 単体
設置個数	6	11
単価	10000	10000
コスト	60000	110000

IMES 単体では 20m に敷き詰めるために 11 個の IMES が必要になるのに対し，IPSUIC を用いれば角に 4 つおよび 70m の直線(中心の 35m 地点)において 2 つで，計 6 つの IMES で 5m 以下の位置精度を保つことができる．さらに IMES では固定誤差が生まれてしまうため，従来の IMES を敷き詰める方法よりもより高精度であると思われる．

3. 測位精度

・5m 以下（店舗を識別できる程度）であること

IPSUIC のプロトタイプを用いて本稿では，評価実験を行った．その結果最大の誤差は 5m を超える場合がいくつか見られたものの，４回の試行のうち 2 回は最大の誤差が 5m 以下であり, 平均の誤差では 4 回の試行すべてで 3m 以下に抑えられている．また，本実験によって得られた IMES の適切な配置方法から上記の実験においては 5m 以下に抑えられるであろうことが見込まれているため, 限定的な条件はあるものの本要件はほぼ満たしていると考えられる．

4. 初期測位速度

・利用者の歩行速度に遅れることなく初期測位ができること

実装が済んでいないため，システム全体を通して検証を行うことはできなかった．しかしながら実験結果の通り, ほぼすべての結果において 1m の範囲内で誤差をキャリブレーションすることができていることから，歩行スピードに対して測位は可能であることが実験を通して分かっている．よって限定的な条件はあるものの本要件は満たしていると言える．しかしながら現状は後処理であるため，今後はアプリケーションとして実装し，処理速度等の依存を調べ，ユーザビリティの検証が求められる．

5. 高さ（階数）の定義

・同じ緯度経度での高さ（階数）の識別ができること

IMES は高さ情報を緯度経度と同時に送信することができるため, 本システムが高さの定義を満たすことができることは自明である．よって本要件は満たしていると言える．

上記のように，本システムは上記の評価軸に対してほとんど満たすことができている．また，今回満たせなかった高さの定義や初期測位速度等の部分は上記に述べた通り，今後満たせるであろうことが予想される．しかしながら,「充電することなしに終日利用可能な消費電力であること」といった要求などは，採用する測位技術の多さとトレードオフの関係にあり(つまり様々な技術を使うことでより良い精度等を求められるが，その分消費電力は上がると考えられる)，今後はシステムの実装を行ったうえで上記の完全に満たせていない技術の Validation を行う必要がある．

9 まとめ

本稿では地下街などの屋内環境を想定し，実用的な屋内測位技術の提案を行うことを目的として研究を進めてきた．提案するシステムを評価するために，実用性の評価軸として実現性，コスト，精度，初期測位精度，高さの定義という 5 つの項目に大別し，これらを最も満たしうる形として Dead Reckoning と IMES を用いたシステムが最も望ましいと考えて提案を行い，IPSUIC と名付けた．また IPSUIC のプロトタイプを構築して実証実験を行うことで精度と初期測位速度に関しての Verification を行った．

7.1 節における実験の結果から常に 5m 以下を実装することはできず，もっとも悪い結果で最大誤差が 6.28m，もっとも良い結果で 3.75m となった．しかしながら実験の結果を受けて適切な IMES の配置方法を導き出し，仮想上ではあるが提案する IMES の配置方法に従うことで 5m 以下に抑えられることを示し, システムの適用性に関する検証の実験を行うことで，10 回の試行において IMES によってキャリブレーションを行うことで 9 回の試行に対して目標精度であった 5m を満たすことに成功し, 屋内環境や人に対して依存しないことを示した. また提案する IMES の配置方法に基づいてコストの計算を行った. その結果, 従来の IMES の設置方針に比べてコストを低減できることを示した．さらに，実現性，初期測位精度，高さの定義という評価軸においては評価のための実験を実施することはできなかったが，今後十分満たすであろうことが分かった．

今後の課題として，システムをアプリケーションなどとしてスマートフォンなどのデバイスに実装を行うことが求められる．その上で消費電力や測位速度などの実験を行うことが重要である．また，IPSUIC では精度を上げることで IMES の設置個数を減らすことができることが分かっており，今後 DR と IMES キャリブレーションの精度を向上させることで，コストなど未解決の問題に対して改善を試みることが重要であると思われる．その一つとして，屋内地図を整備した上でのマップマッチングなどの方法を持ってキャリブレーションの精度を高めることで，より高精度なシステムを提案することができるであろうと思われる．

10　参考文献

[1] 若山 滋, 杉藤 康直 ‘地下街の空間イメージとランドマーク ： 各駅地下街と栄地下街の調査より’ 日本建築学会 p 221-222, 1988 年
[2] 宮田 昭‘オメガシステムについて ： オメガ電波の位相変動について(<特集>電波航法)’ 日本航海学会, p35-41,1986 年
[3]プラタップ・ミスラ他著,安田明生他訳,’精説 GPS 改訂第二版’ ,2004 年
出版コード ISBN978-4-87974-631-3 C3055
[4]総務省(2010 年) ’平成 21 年度通信利用動向調査’
[5] 寺田弘慈,’準天頂衛星初号機の準備状況と技術実証’,2009 年
http://www.eiseisokui.or.jp/ja/pdf/forum_06/forum_06-03.pdf
[6] 財団法人日本情報処理開発協会（JIPDEC）,’G 空間とは何か’,2010 年
http://www.g-contents.jp/g-expo/int/intvw.pdf
[7] シードプランニング,’GPS 新時代のモバイル位置情報活用ビジネス展望 —スマートフォンと準天頂衛星によりサービス拡大へ—’2011 年
[8] 坂井 丈康,’GPS 技術入門’, 東京電機大学出版会, 2003 年出版コード ISBN:4-501-32260-8
[9] 防災分野におけるシームレス測位技術の利活用に関する研究会, 防災分野におけるシームレス測位技術の利活用に関する研究会報告書, 2010 年
[10]R. Mautz, ‘Overview of current indoor positioning systems’, in GEODESY AND CARTOGRAPHY, vol. 35, no. 1, pp. 18–22, 2009 年
[11]肥後尚之’屋内位置情報システムの設計’, 2010 年度慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修士論文, 2011 年
[12]D.Daly, T.Melia, G.Baldwin, ‘Concrete Embedded RFID for Way-Point Positioning’, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),2010 年
[13] Thorsten Vaupel, Jochen Seitz, Frédéric Kiefer, Stephan Haimerl and Jörn Thielecke, ‘Wi-Fi Positioning System Considerations and Device Calibration’, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),2010 年
[14] 伊藤誠吾, 吉田廣志, 河口信夫, ’無線LANを用いた広域位置情報システム構築に関する検討’情報処理学会論文誌Vol.47No.42, 2005年

[15] Cliff Randell, Chris Djiallis, Henk Muller: Personal Position Measurement Using Dead Reckoning, Proc.ISWC’03, IEEE Computer Society, pp166-173(2003)
[16] Naohiko Kohtake, Shusuke Morimoto, Satoshi Kogure, and Dinesh Manandhar：Indoor and Outdoor Seamless Positioning using Indoor Messaging System and GPS”, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), 2011

[17]東京駅構内図，JR 東日本 ‘http://www.jreast.co.jp/estation/stations/1039.html’
[18]羽田空港構内図羽田空港国内線旅客ターミナル BIGBIRD Tokyo International Airport
http://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/map/
[19]Foursquare
https://ja.foursquare.com/
[20]石原 孝通，西尾 信彦，‘ GPS と無線基地局検出ツールを排他利用する位置情報システム’，情報処理学会研究報告, 2004
[21]東京大学空間情報科学研究センター柴崎研究室人の流れプロジェクト
http://pflow.csis.u-tokyo.ac.jp/index-j.html
[22]国際航業株式会社　経済産業省 G 空間プロジェクト，2011 年
[23]株式会社 NTT データビジネスブレインズ ’Simple RFID Lite’
http://www.nttd-bb.com/solution/simple-rfid.html
[24]屋内測位普及発展に関する調査研究報告書　財団法人ニューメディア開発協会出版
http://www.nmda.or.jp/keirin/h20houkoku/houkoku/h20okunai.pdf
[25]興梠正克,蔵田武志,’慣性センサ群とウェアラブルカメラを用いた
歩行動作解析に基づくパーソナルポジショニング手法’,電子情報通信学会,信学技法 PRMU2003-260.p25-30, 2003 年
[26]Beauregard，S: A Helmet-Mounted Pedestrian Dead Reckoning System， Proc. IFAWC 2006， pp.15-16, 2006 年
[27]Blanke, U. and Schiele, B. ‘Sensing Location in the Pocket, Ubicomp2008, 2008
[28]Steinfolf, U. and Schiele, B. ‘Dead reckoning from the Pocket-An Experimental Study’, Proc. PerCom 2010, 2010 年
[29]手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会論文誌 Vol .52 No.2 p558-570 2011 年
[30]Feng Hong, Hongwei Chu, Lijian Wang, Yuan Feng, Zhongwen Guo，’Pocket Mattering: Indoor Pedestrian Tracking with Commercial Smartphone’
International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN)，2012
[31]株式会社 NTT Docomo (2009 年 1 月 26 日付方法発表資料)’イオンレイクタウン「迷子探しサービス」を提供開始’
http://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/page/090126_00.html
[32]河口信夫’ Locky.jp: 無線 LAN を用いた位置推定とその応用’ 電子情報通信学会, 信学技報, ITS2007-16, July, 2007
[33]Place Engine,株式会社クウジット http://www.placeengine.com/
[34]Ekahau, ‘Ekahau Site Survey’, Network Analysis, Optimization and Simulation, http://www.ekahau.com/products/ekahau-site-survey/features/network-analysis.html
[35]F. Seco, C. Plagemann, A. Jimenez, W. Burgard,’Improving RFID-Based Indoor

Positioning Accuracy Using Gaussian Processes’, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),2010 年
[36]堀田徹哉,’RFID アプリケーションの高度化と投資対効果’オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 2004 年
[37]国土交通省,平成18年度国土交通白書第Ⅱ部 国土交通行政の動向 1 ユビキタス技術を活用した場所情報システムの展開’ ,2007 年
http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h18/hakusho/h19/menu.html
[38]東京ユビキタス計画 http://www.tokyo-ubinavi.jp/
[39]日本電気株式会社’屋内位置情報管理システム Smart Locator’
http://www.nec.co.jp/solution/engsl/pro/smartlocator/system.html
[40]春山真一郎,’可視光通信‘電子情報通信学会誌, 2011 年
[41]可視光通信コンソーシアム http://www.vlcc.net/modules/xpage0/
[42]株式会社デンソーウェーブ ’QR コードとは’
http://www.qrcode.com/aboutqr.html
[43]Ubisense, ‘Research and Development Packages’
http://www.ubisense.net/en/rtls-solutions/research-packages.html
[44]堀内直樹,中嶋信生’Bluetooth を用いた屋内位置検出の検討’,電子情報通信学会総合大会 B-15-34, 2004 年
[45]CNET, ‘Cobra Tag finds your lost keys, phone, other junk’, Reviews,
http://reviews.cnet.com/8301-13746_7-20057309-48.html
[46]ディン・チュンキエン, 南 正輝, 森川 博之, 青山 友紀, ’超音波を用いた自動設定型屋内位置情報システム’,電子情報通信学会論文誌, vol. J88-A, no. 12, pp. 1432-1441, December 2005
www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/publications/2001/Kien_ieice01s.pdf
[47]創価大学工学部情報システム学科,光・計測・制御システム研究室
http://www.t.soka.ac.jp/~watanabe/japanese/group/lps&dogoo.html
[48]宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency:JAXA)
http://www.jaxa.jp/
[49]ロケーション・クルーズ・プロジェクト http://creative-city.jp/locationcruise/
[50]測位衛星株式会社 http://www.gnss.co.jp/
[51]Antonio R. Jimenez Ruiz, Fernando Seco Granja, J. Carlos Prieto Honorato and Jorge I. Guevara Rosas ‘Pedestrian Indoor Navigation by aiding a Foot-mounted IMU with RFID Signal Strength Measurements’, International Conference of Indoor Positioning and Indoor Navigation 2010(IPIN), 2010
[52]C. Ascher, C. Kessler, M. Wankerl and G.F. Trommer: Dual IMU Indoor Navigation with Particle Filter based Map-Matching on a Smartphone, 2010

International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010
[53] Guillaume Trehard, Mehdi Boukallel and Sylvie Lamy-Perbal, ‘Indoor Pedestrian Localisation Solution based on Anemometry Sensor Integration with a Smartphone’, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2012
[54] 蔵田武志,興梠正克,石川智也,亀田能成,青木恭太,石川准
視覚障害者支援システム～測位と障害物検知に関する予備評価～信学技法 MVE2010-64,pp67-72　電子情報通信学会
[55] Francisco Zampella, Alessio De Angelis, Isaac Skog, Dave Zachariah and Antonio Jim´enez ‘A Constraint Approach for UWB and PDR Fusion’ International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012
[56]Shusuke Morimoto’, System design of GNSS/IMES based indoor and outdoor seamless positioning platform for cyber physical systems‘
2011 年度慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修士論文, 2012 年
[57]Super Star Ⅱ,NovAtel 社, http://www.novatel.com/products/
[58]ATR-Promotions, 小型多機能無線センサ(TSND121) ,
http://www.atr-p.com/TSND121.html
[59]慶應義塾協生館　www.kcc.keio.ac.jp
[60]鉄道博物館(THE RAILWAY MUSEUM)　www.railway-museum.jp/top.html
[61] 札幌 JR アピアタワー http://www.apiadome.com/
[62]京急ショッピングプラザ Wing 新橋　http://www.wing-shinbashi.com/index.html

11　謝辞

指導教員である神武直彦准教授には丁寧かつ親切なご指導を頂いただけでなく，様々なプロジェクトを通して非常に多くのチャンスに触れる機会を頂きました．またご自身の経験からくるアドバイスなど，研究以外にも多くの事を学ばせていただきました．二年間のご指導に心より深謝いたします．

また，副査を担当してくださりご助言をくださった手嶋龍一教授，小木哲朗教授にも厚く御礼申し上げます．石田剛明助教授，中島円氏，岩泉大介氏，櫻橋淳氏，猪股俊喜氏，原田貴史氏，田中康平氏，平田大輔氏，高橋裕希氏，小荷田成尭氏，相川真里奈氏，茅野小百合氏ら神武研究室のメンバーとはミーティングや合宿等において非常に有意義かつ楽しい時間を共有させていただき，また実験や意見交換などに暖かな気持ちで多くの時間を割いて手伝ってくださいました．心より感謝いたします．また研究の基礎を教えていただき，先輩として様々なアドバイスをいただきました森本修介氏ら神武研究室の諸先輩方に心から感謝いたします．

またシステムデザイン・マネジメント研究科の先輩である兄を始め，気軽に相談に乗り日々の生活を支えてくださった家族に深く感謝します．

最後になりましたが日々進化を続けるシステムデザイン・マネジメント研究科において刺激をくださった先生方，学生の皆様，事務の皆様，プロジェクトなどにおいて関わりのあった企業の方や海外大学院の留学生・先生方など，たくさんの方々と非常に有意義な二年間を過ごさせていただきました．このような恵まれた環境で，一緒に学ぶ時間を共有できた皆様に深く感謝したいと思います．

付録Ⅰ　アンケート

アンケート対象者

全 33 名
20 代男性 6 名，50 代男性 1 名，60 代男性 2 名
10 代女性 4 名，20 代女性 5 名，30 代女性 7 名，40 代女性 5 名，50 代女性 2 名，60 代女性 1 名
合計男性 9 名，女性 24 名
うち二子玉川でのアンケートは 25 名(男性 3 名，女性 22 名)

・駅やショッピングモールなどで迷った経験はあるか

ある=29 名，ない＝4 名

ある

新宿や渋谷など駅ナカなどでは非常に迷う
はじめていく場所ならば迷う
目的地に到達するまで時間がかかってしまう
電車の乗り換えなどで非常に迷う
行きたいお店を調べていく時はかなり迷ってしまう
西口・東口等を持つ大きな駅だと非常に迷う
就職活動の時に非常に迷った

そのようなときどうしているのか

案内掲示や地図を見たりしている
ネットで場所を調べる
人に聞く
迷いながら何とかたどり着く

ない

案内の掲示を見ながら歩いていくので十分たどりつける
人に聞いたり，店員さんに聞くことでなんとかなっている
知っている場所にしかほぼ行かない

近くのお店の広告やその店のお得な情報など，通りがかりにもらえると嬉しいか，煩わしいか

煩わしい＝19 名，嬉しい=12 名

煩わしい

・あまり興味がないものなど広告など，意味のないものが来ると煩わしい

・迷惑メールみたいでいやだ

・お得な情報などをもらっても買い物に行くわけではない

・目の前の広告を見ればいい(セールとかは店員が叫んでいる)

嬉しい

・自分の興味ある店の広告ならうれしい

・別にあまり気にしないが，情報が入ってくるのはおもしろい

・買い物の下見に行くときにお得な情報が来たらつい買ってしまいそう

付録Ⅱ　実験結果

以下に，7.2 節で行った実験の移動ルートの Mapping 図を追記する．被験者は全部で 5 名であり，本文には載せなかった 4 人分のデータを記載することとする．なお，すでに結果に関する考察等はすでに述べているため，ここでは結果に関する議論は省略する．

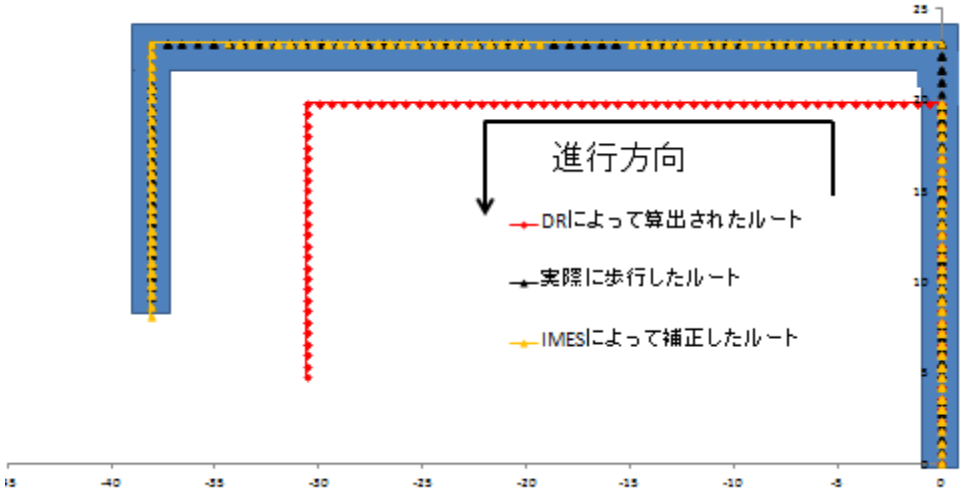

図 102　被験者②の実験結果(往路)

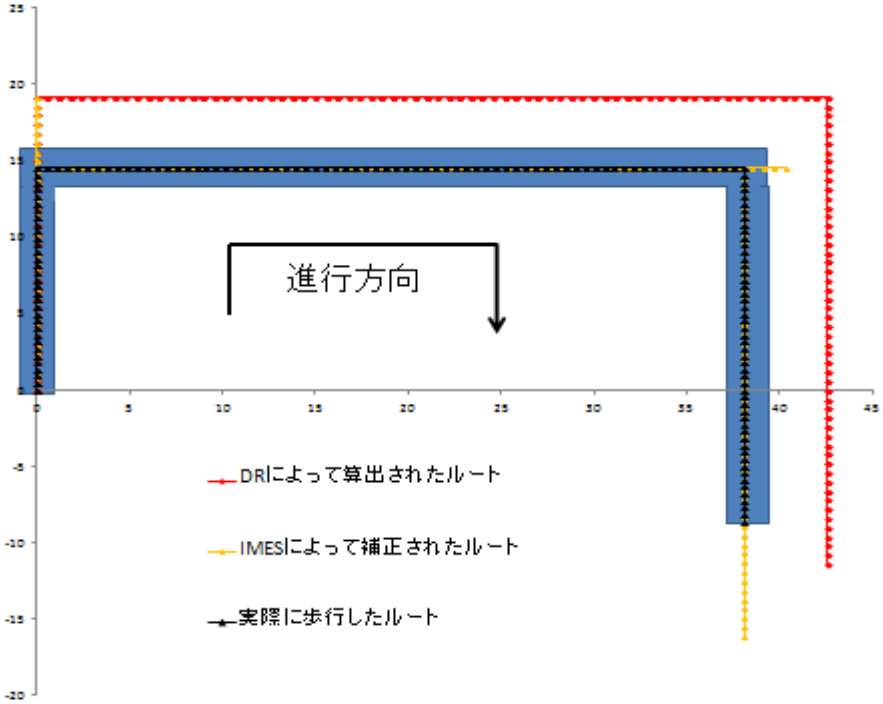

図 103　被験者②の実験結果(復路)

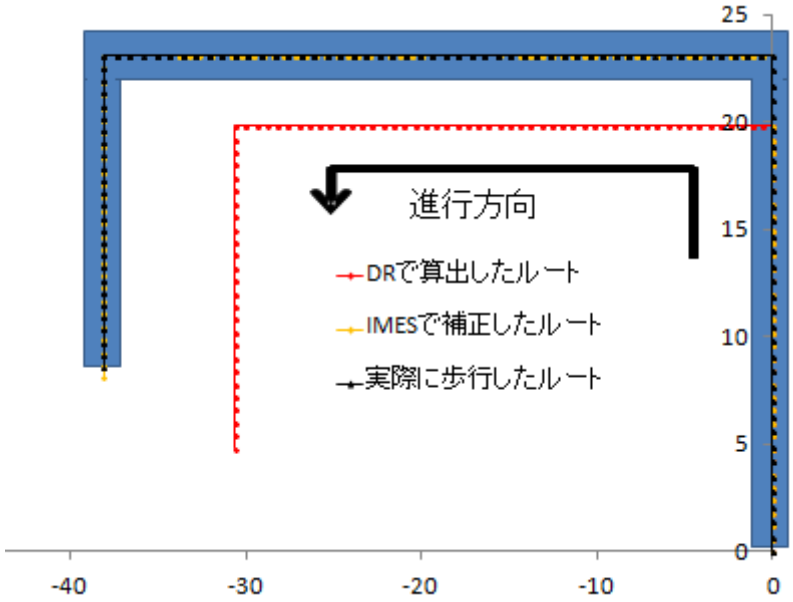

図 104　被験者③の実験結果(往路)

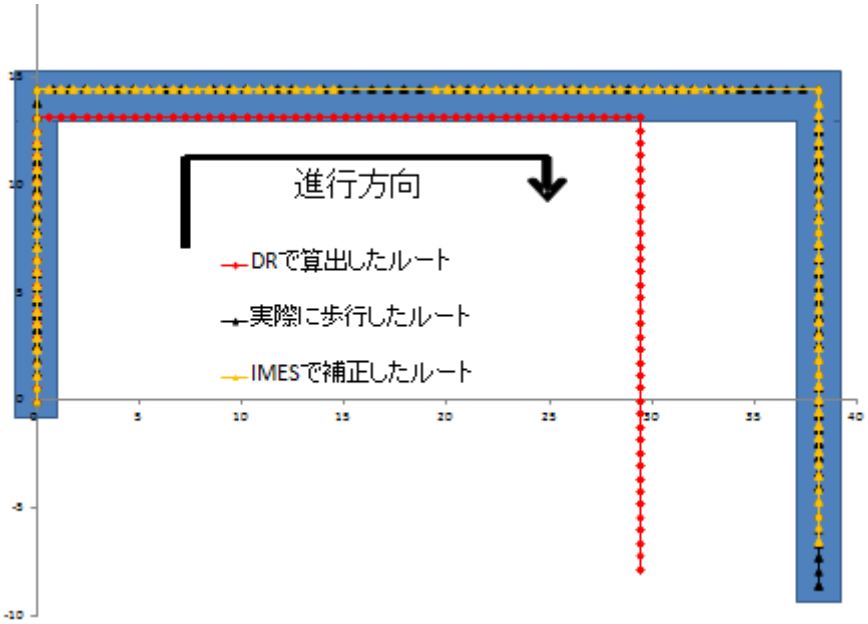

図 105　被験者③の実験結果(復路)

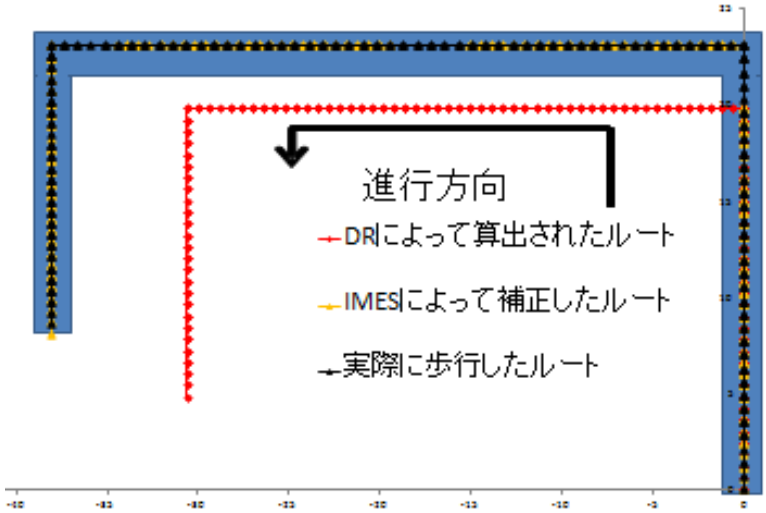

図 106　被験者④の実験結果(往路)

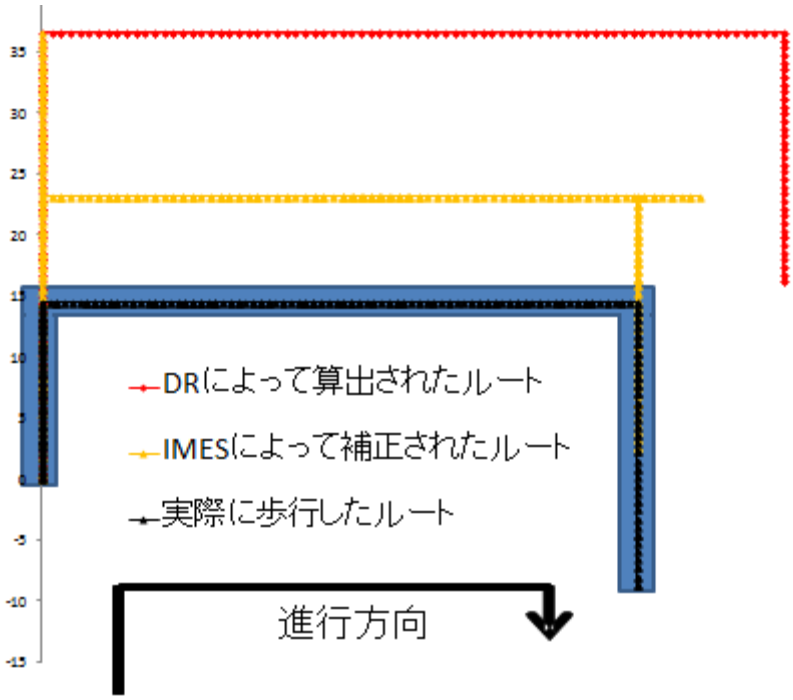

図 107　被験者④の実験結果(復路)

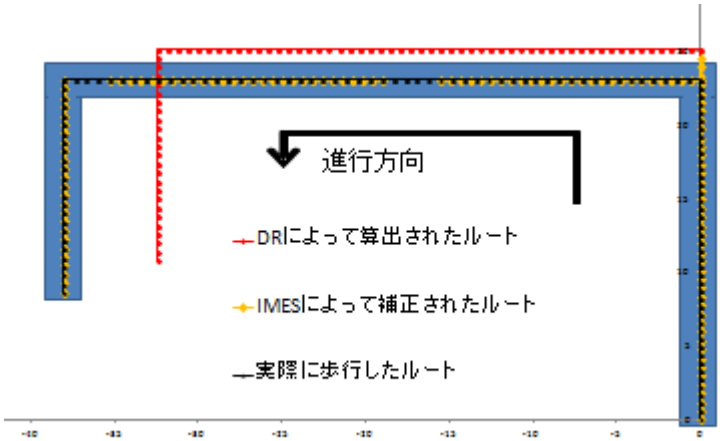

図 108　被験者⑤の実験結果(往路)

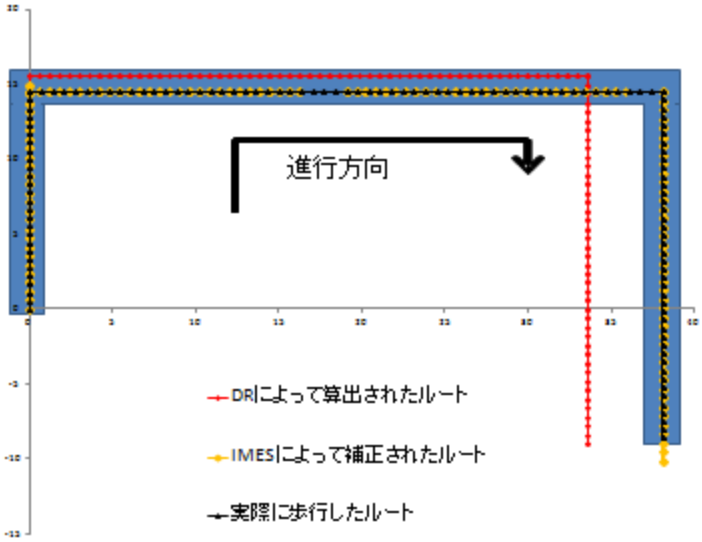

図 109　被験者⑤の実験結果(復路)