

2012年度 卒業論文

碁盤構造のネスティングナビゲーション

2013年2月8日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
中藤 寛己

主査: _____ 日付: _____

基盤構造のネスティングナビゲーション

中藤 寛己

概要

GPS (Global Positioning System) は位置計測技術として広く知られており、カーナビなど様々な機器に利用されている。しかし、人工衛星が発する電波を利用するGPSは、屋内などの電波が十分に届かない場所では利用できないため、屋内などでも利用できる位置推定技術に関する研究が行われている。屋内位置推定の手法としてはセンサやマーカなどが用いられる。

本論文では、棚や通路が基盤状に並び、物品が階層的に分類されて並ぶネスティング構造を持つ屋内環境における、ナビゲーションシステムの構築について述べる。システムは、加速度センサと地磁気センサが内蔵され、カメラとディスプレイを有する携帯端末(以下、スマートフォン)と、基盤目の交点の床面に設置された二次元マーカで構成される。ユーザの向きは、スマートフォンに内蔵される加速度センサと地磁気センサの値を用いて推定する。また、ユーザの位置は加速度センサの値を積分し、ナビゲーション開始位置からの移動量を求めることで行う。しかし、加速度積分によって得られる移動量は蓄積誤差が大きいため、スマートフォンに搭載されるカメラと、位置情報が既知の二次元マーカを用いて位置を修正する。また、カメラとマーカを用いた位置推定によって、通路の外側から目的の通路に入るまでの誘導を行う。さらに、加速度積分によって通路の入口からの移動量を推定することで、通路に入ってから目的地周辺まで誘導する。推定した位置と向きに応じて、スマートフォンの画面に表示されたカメラ映像に矢印を重畳表示させることで、ユーザに対して進行方向を提示する。本論文では、実験によって、カメラと二次元マーカを用いて位置の修正を行うことで、4m歩行した際の推定誤差を、約1m小さくできることを確認した。さらに、被験者実験を行い、本システムを用いることで、目標を発見するまでの平均時間を約43.6sec短くできることが分かった。

Nesting Navigation for Grid Structure

Hiroki Nakafuji

Abstract

GPS (Global Positioning System) is a well-known system for providing location, and it is frequently used in various systems, such as car navigation systems and crime prevention systems. However, the location provided by the GPS is not accurate indoors due to the signal attenuation caused by roofs, walls and other constructing materials. Several techniques for indoor positioning have been proposed using sensors or markers.

In this study, the purpose is to construct a nesting navigation system for grid-structured indoor environment using a cellular phone, called smartphone, which has an acceleration sensor, a geomagnetic sensor, a camera and a display. Two-dimensional markers which are put on the intersection points of grid are also used. To estimate direction of a user, an acceleration sensor, and a geomagnetic sensor embedded in the smartphone are used in the proposed system. The position of the user is estimated by integrating the value of the acceleration sensor. To avoid an accumulative error of the estimated movement, the camera which is mounted on the back of the smartphone and two-dimensional markers are used to adjust the position. The camera and two-dimensional markers are also used to navigate the user to a correct passage. In addition, the user is navigated around the destination by estimating the movement from the entrance of the passage. The user learns the direction of movement by superimposed arrows upon the camera image displayed on the smartphone. When the position was adjusted by the camera and markers, the error of the estimated position was smaller by about a meter. In addition, when the user was navigated, the time to detect a target was shorter by 43.6 sec.

目次

第1章	はじめに	1
第2章	屋内位置推定	3
2.1	絶対位置計測	3
2.2	相対位置計測	8
2.3	まとめ	10
第3章	情報支援	11
3.1	音声を用いた情報支援	11
3.2	振動を用いた情報支援	12
3.3	視覚を用いた情報支援	13
3.4	まとめ	14
第4章	ネスティングナビゲーション	15
4.1	システム概要	15
4.2	加速度センサを用いた移動量推定	16
4.3	二次元マーカを用いた位置の修正	21
4.4	ユーザの方向推定	22
4.5	ナビゲーション提示	24
4.6	まとめ	24
第5章	システムの実装と評価	25
5.1	システムの実装	25
5.2	センサによる位置推定精度の評価	27
5.3	ナビゲーションシステムの被験者実験	31
5.4	まとめ	34
第6章	おわりに	35
	謝辞	36

目 次

1.1	屋内位置推定の組み合わせ	2
2.1	RF タグ	4
2.2	相対距離の推定	4
2.3	位置の推定	5
2.4	Scene Analysis 方式	6
2.5	二次元マーカの例	7
2.6	マーカ検出	7
2.7	変換行列の推定	8
2.8	加速度積分	9
2.9	歩数認識	10
3.1	音声を用いた情報支援	11
3.2	振動を用いた情報支援	12
3.3	実空間と仮想物体の重畳	13
3.4	ARToolKit の処理手順	14
4.1	システムの概要	15
4.2	フローチャート	16
4.3	スマートフォン座標系	17
4.4	世界座標系	19
4.5	ベクトルの外積	20
4.6	カメラとマーカの座標軸	22
4.7	世界座標系の三軸に対する端末の回転角	23
4.8	ナビゲーション提示	24
5.1	使用したスマートフォン	26
5.2	使用したマーカの例	26
5.3	ナビゲーションの例	27

5.4	加速度積分による位置推定精度の評価実験	28
5.5	同一方向に歩行した場合の誤差の時間変化	29
5.6	方向を変えて歩行した場合の誤差の時間変化	29
5.7	位置推定精度の比較実験	30
5.8	被験者実験の環境	31
5.9	被験者実験の環境の様子	31
5.10	図書館を模した環境	32
5.11	目標の図書の位置	33
5.12	実験の映像	33

表 目 次

5.1	スマートフォンの仕様	25
5.2	同一方向に歩行した場合の誤差の平均と分散	28
5.3	方向を変えて歩行した場合の平均と分散	28
5.4	同一方向に歩行した場合の実験結果	30
5.5	方向を変えて歩行した場合の実験結果	30
5.6	ナビゲーションを行った場合	32
5.7	ナビゲーションを行わなかった場合	32

第1章 はじめに

古来より、われわれは太陽や星座といった天体の方向や角度を観測することによって、自分の位置や進行方向を得ることが可能であった。19世紀から20世紀において電磁波の存在が証明され、電磁波を用いた無線技術が発達した。さらに、無線技術の発達によって、海軍航法衛星網 (Navy Navigation Satellite System : NNSS) などといった無線信号を用いた測位技術が開発され、用いられるようになった [1]。現在、無線信号を利用した測位技術の広く知られる例として、汎地球測位システム (Global Positioning System:GPS) が挙げられる。GPSは米国によって軍事目的で開発され、1993年に公式に運用が開始された [2]。当初は一般に向けた利用には精度を劣化させる操作 (Selective Availability:SA) が行われていたが、2000年になってSAが解除され、一般の利用でも測位精度が約10mにまで改善された [3]。現在では、カーナビゲーションシステムや、デジタルカメラで撮影した画像への位置情報付与といったものに利用されている [4]。

しかし、GPSは複数の人工衛星が発する無線信号の到達遅延などを利用して測位を行っているため、人工衛星からの無線信号が届かない屋内などでは利用できないという問題がある。したがって、屋内におけるナビゲーションや注釈情報の提示を行うために、GPSに代わる屋内位置推定技術が必要とされており、研究が行われている [5][6]。屋内位置推定技術に関する研究としては、環境に設置した設備を利用して推定を行う絶対位置計測と、環境中の設備を利用せずに推定を行う相対位置計測がある。絶対位置計測には無線信号を用いた手法 [7][8] や、マーカ [9] を用いた手法が挙げられる。相対位置計測にはセンサ [10] を用いた手法が挙げられる。センサを用いた手法では、加速度センサと地磁気センサが内蔵され、カメラとディスプレイを有する携帯端末 (以下、スマートフォン) のセンサを用いた屋内位置推定も試みられている [11]。

また、屋内位置推定技術を利用した、屋内ナビゲーションシステムに関する研究も行われている [12]。ユーザへのナビゲーション提示においては、コンピュータ内において生成した情報を実空間に重畳提示する拡張現実感 (Augmented Reality : AR) と呼ばれる技術 [13] を用いて、ユーザに対して視覚的な提示を行うことが試みられ

ている [14]. しかし, 位置推定を行うためのコストや手間が必要である, 位置推定精度が低いなどといった問題点があるため, 実用的なナビゲーションシステムには至っていないのが現状である. したがって, 図 1.1 に示すように複数の屋内位置推定手法を組み合わせた, 実用的なナビゲーションシステムが必要とされる.

本研究では, ユーザの持つ加速度センサと地磁気センサと, 環境にあらかじめ設置された二次元マーカを組み合わせて, 棚や通路が基盤状に並ぶ屋内環境における, 誰でも利用できる実用的なネスティングナビゲーションシステムの構築を目指す. ユーザの位置推定は, スマートフォンに内蔵される加速度センサと地磁気センサを用いた移動量推定と, スマートフォンに搭載されたカメラと二次元マーカを用いた位置推定によって行い, ユーザへの進行方向の提示は, AR 技術を用いて行う. 通路の外側に設置されるマーカまでの誘導は加速度積分による位置推定によって行い, 目的の通路に入るまではカメラとマーカを用いた位置推定によって誘導する. 通路に入ってから目的地周辺までの誘導を再び加速度積分による位置推定によって行うことで, 階層的にユーザを誘導するネスティングナビゲーションシステムを実現する. また, 実験によってカメラと二次元マーカによる位置推定の必要性を確認し, さらに, システムの評価を行う.

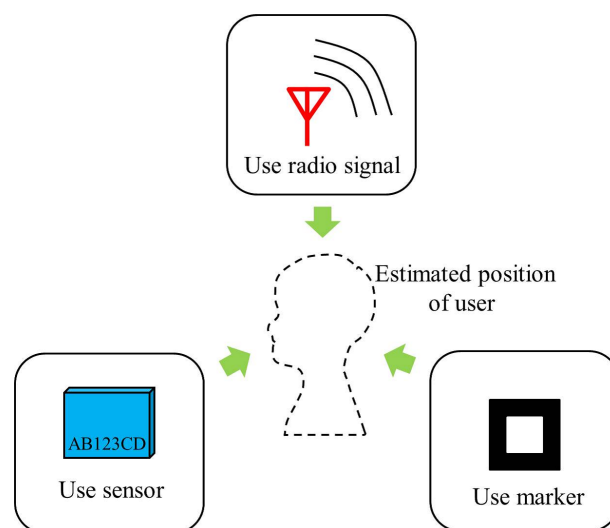


図 1.1: 屋内位置推定の組み合わせ

第2章 屋内位置推定

2章では、これまでに提案されている屋内位置推定手法について説明し、それぞれの手法の長所と問題点を述べる。

2.1 絶対位置計測

2.1節では、環境に設置した設備を利用して位置推定を行う絶対位置計測手法について述べる。

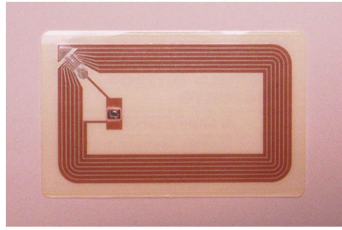
2.1.1 RFID を用いた屋内位置推定

2.1.1項では、無線を使用した認識システム (Radio Frequency IDentification:RFID) を用いた屋内位置推定手法について述べる。

RFID

RFID とは、近距離の無線通信を用いて情報を授受する技術である。RF タグに情報を書き込むことが可能であり、RF タグをリーダライタ (データ取得装置) で読み取ることで書き込まれた情報を受け取る。現在、広く使われているバーコードと比較すると、タグにより多くの情報を保持させることができる、タグの情報を書き換えることができる、複数のタグを同時に認識できる、不可視でも RF タグを認識できるといった利点がある [15]。RFID が身近に使用されている例として JR 東日本による Suica などの IC カードを用いた自動改札システムが挙げられる。

RF タグはパッシブ型とアクティブ型に分類される。パッシブ型とアクティブ型の RF タグの例を図 2.1 に示す [16][17]。パッシブ型 RF タグ自体は電源を持たず、回路規模が小さく、安価に製造することが可能である。しかし、リーダライタから受けた電波を電力に変換し、変換した電力を用いてタグが電波を発するため、通信可能な距離が短い。アクティブ型 RF タグは電源を有するため、パッシブ型 RF タグよりも大型で高価であるが、通信が可能な距離は数 m ～ 数十 m と長い。



(a) パッシブ型 RF タグ [16]



(b) アクティブ型 RF タグ [17]

図 2.1: RF タグ

屋内位置推定

RF タグが発する電波は、伝播する距離に応じて強度が減衰する。電波の減衰を表す、距離 d に反比例する伝播モデルを L とすると、リーダライタで受信した RF タグからの電波強度の大きさ E と RF タグの発する電波強度 E' を用いて、式 (2.1) のように表すことができる [18].

$$E' = LE \quad (2.1)$$

式 (2.1) を d について解くことで図 2.2 に示すように RF タグとリーダライタとの相対距離を求めることができる。

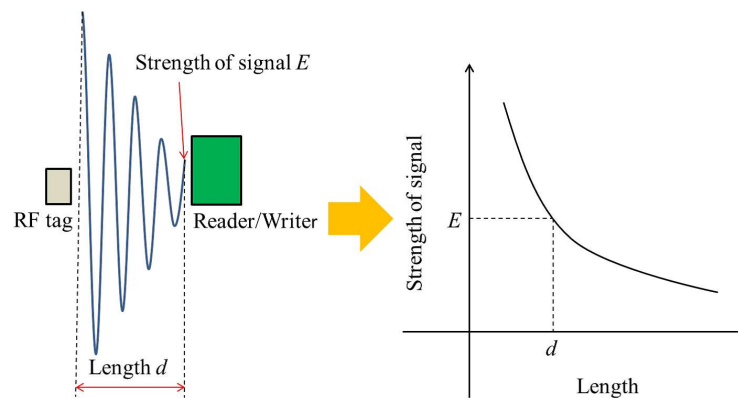


図 2.2: 相対距離の推定

位置情報が既知である複数の RF タグから信号を受信し、それぞれのタグとリーダライタとの相対距離を求める。少なくとも三個のタグとの相対距離 r_1 , r_2 , r_3 を推定することで、図 2.3 に示すようにある一点をリーダライタの位置として推定できる。

RFID を用いた屋内位置推定では、RF タグとリーダライタの通信距離が短いほど高い精度で位置を推定できる。しかし、ユーザがリーダライタを所持しなければ位置推定を行うことができない。利用する全てのユーザがリーダライタを所持するのは現実的ではないため、本研究には適さない。

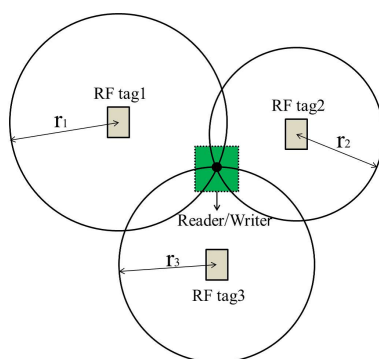


図 2.3: 位置の推定

2.1.2 無線 LAN を用いた屋内位置推定

2.1.2 項では無線 LAN の受信電波強度 (Received Signal Strength:RSS) を用いた屋内位置推定について述べる。

無線 LAN

限られた範囲内でのデータ通信網 (local area network: LAN) において、コンピュータとの接続を、無線技術を用いて行う LAN のことを無線 LAN と呼ぶ。無線 LAN を用いることで、オフィスなどの屋内エリアでのケーブルの敷設などを行う必要がない、携帯型コンピュータなどの移動体でも利用できるといった利点があり広く普及している。無線 LAN を用いたインターネット接続サービスでは、インターネット側に接続する無線 LAN 端末をアクセスポイント (Access point : AP) と呼び、AP が無線 LAN 接続可能な範囲を基本サービスエリアという [19]。

屋内位置推定

無線 LAN を用いた屋内位置推定について図 2.4 に示す [20]. 位置推定を行いたい環境には複数の AP が設置され, 基本サービスエリアの範囲内にあるとする. 環境中の複数の場所で事前に各 AP から RSS を取得する. さらに, 取得した RSS と位置情報を学習データとしてデータベースに蓄積させておく. 実際に位置推定を行う際には, データベースの情報と取得した RSS の値を用いて位置を推定する.

無線 LAN を用いた屋内位置推定の例として, クウジット株式会社が提供する Place Engine などが挙げられる [21]. 既存の無線 LAN 設備を用いて位置を推定することが可能なため, 新たな設備の設置が必要ない. しかし, 事前の RSS の取得を行うために手間が必要となり, さらに, 棚などの移動によって環境が変わるたびに, 再度 RSS と位置情報の取得を行わなければならないため, 本研究のナビゲーションシステムには適さない.

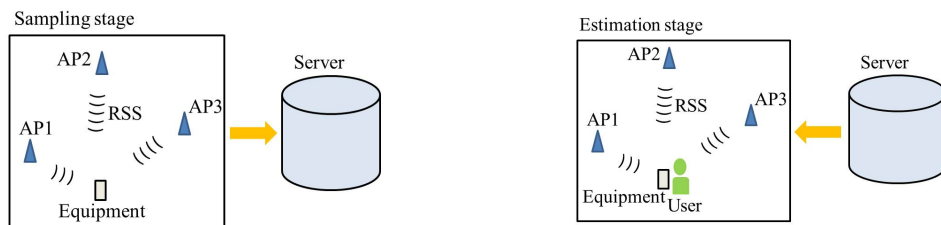


図 2.4: Scene Analysis 方式

2.1.3 二次元マーカを用いた屋内位置推定

2.1.3 節では, 二次元マーカを用いた屋内位置推定について述べる.

二次元マーカ

二次元マーカの例を図 2.5 に示す. 外側の黒い枠の中に異なる模様を描き, それぞれの模様に対して ID を割り振ることでそれぞれのマーカの識別が可能になる. ID と共に位置情報などをサーバに登録しておくことで, マーカが識別された時にユーザの位置を取り出すことも可能となる.

マーカとして, 正方形のマーカの他に, 円形のマーカや半透明の再帰性反射材からなる不可視のマーカなども開発されている [22].



図 2.5: 二次元マーカの例

屋内位置推定

マーカを用いた位置推定では，画像を入力するためのカメラと，処理を行うための計算機を用い，ユーザの位置を推定する．用いるマーカが配置されている位置は既知とする．位置推定を行う手順は主に以下の三段階で行われる [23]．

1. マーカ検出
2. マーカ識別
3. 三次元位置姿勢計算

マーカ検出について図に示す．まず，入力された画像に対してある閾値を用いて画像の二値化を行う．二値化された画像において連結領域ごとの面積・外接長方形計算を行い，面積値によって巨大領域と微小領域，外接長方形情報から画像境界に接する連結領域を除外する．残りの領域に対して輪郭線追跡を行い，得られた輪郭線に対して四本の直線を当てはめる．四本の線分によって閾値より高い精度で四角形に近似できた領域をマーカ候補領域とする．この際に，四つの頂点のカメラ画像での座標値を記憶しておく．

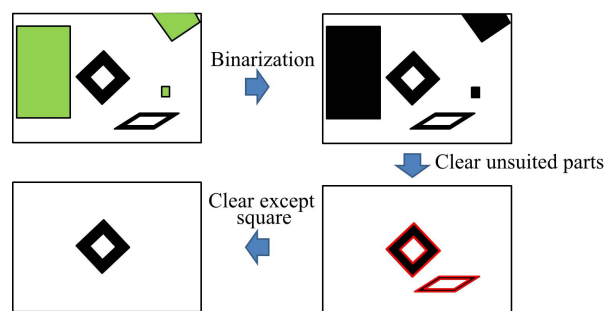


図 2.6: マーカ検出

次に，マーカ候補領域の中央部に描かれたパターンからマーカ識別を行う．使用するマーカの模様をあらかじめ $\frac{\pi}{2}$ 毎の回転も含め，一つの ID につき四パターン登録しておき，テンプレートマッチングによってマーカを識別する．正方形のマーカは，画像内では射影歪みにより変形しているため，見かけ上正方形になるように，先に記憶した四頂点を基準としてホモグラフィ変換を行う．

図 2.7 に示すように，認識した全マーカの頂点の投影誤差を最小化するような，マーカ座標系のある点 P_m をカメラ座標系の点 P_c に投影する変換行列を推定し，マーカに対するカメラの相対的な位置・姿勢を求める．既知であるマーカの位置情報とマーカとカメラの相対的な位置を用いて，ユーザの位置を推定できる．

連続的に位置を推定するためには，マーカを常に視界内にとらえておかなければならない．しかし，死角の多い屋内環境ではマーカを常に見えるように配置するのは現実的ではない．ただし，コストが低く，高い精度で位置を推定できるため，位置の修正に用いるという点では本研究において有効である．

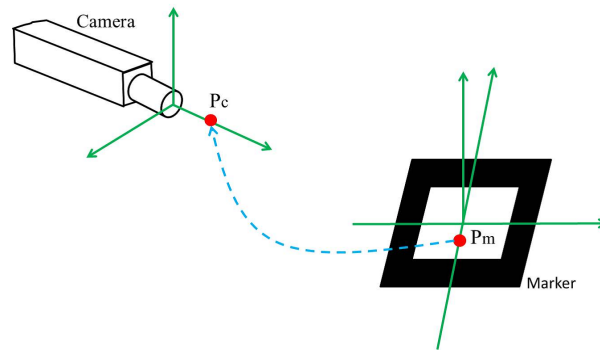


図 2.7: 変換行列の推定

2.2 相対位置計測

2.2 節では，環境中の設備を利用せずに位置推定を行う相対位置計測手法について述べる．

2.2.1 加速度積分による屋内位置推定

加速度積分による位置推定の概要を図 2.8 に示す．加速度センサから取得した値を積分することで速度が求め，さらに，速度を積分することでユーザの初期位置からの移動量を算出することで，ユーザの位置を推定する [24]．加速度センサから得られるのは離散的数値データであるため，数値積分を用いる．時刻 t_l ($l = 0, 1, 2, \dots$)

の加速度センサの値を A_l ，速度を V_l ，移動量を b_l とする，また， t_l と t_{l-1} の差を Δt とすると，式 (2.2) と式 (2.3) のように速度と移動量を近似的に算出できる．

$$V_l \simeq V_{l-1} + A_l \Delta t \quad (2.2)$$

$$b_l \simeq b_{l-1} + V_l \Delta t \quad (2.3)$$

加速度積分によって得られるのは移動量であり，ある地点からの相対位置を得るため，初期位置が既知である必要がある．また，センサによる誤差が，積分により速度と移動量に蓄積していくため，位置推定精度が低いという問題がある．しかし，加速度センサが搭載されるスマートフォンによって位置推定を行うことができるため，他手法を用いて位置の修正を行えば有効な手法であると考えられる．

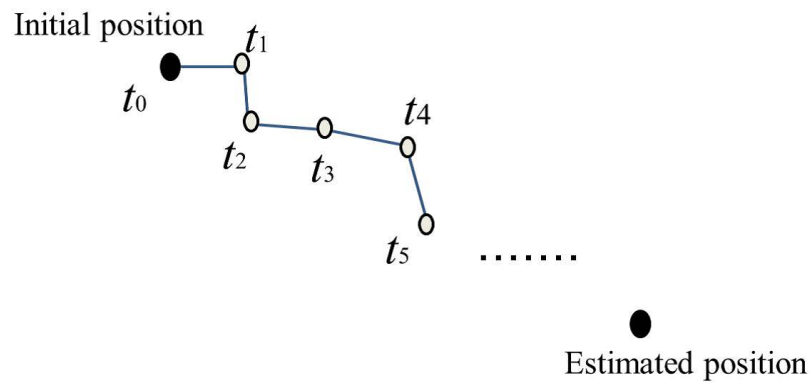


図 2.8: 加速度積分

2.2.2 歩数認識による屋内位置推定

歩数認識による位置推定の概要を図 2.9 に示す．加速度センサの値からユーザの歩行を検出し，位置推定を開始してからの歩数を推定する．さらに，歩行が検出された時のユーザの方向に，あらかじめ設定した歩幅を加算していくことで，初期位置からの相対位置を求め，位置推定を行う [25]．歩行が認識された時にどの方向に進んだかを知るために，ジャイロセンサや地磁気センサを用いる．2.2.1 項の場合と同様に，初期位置が既知である必要がある．

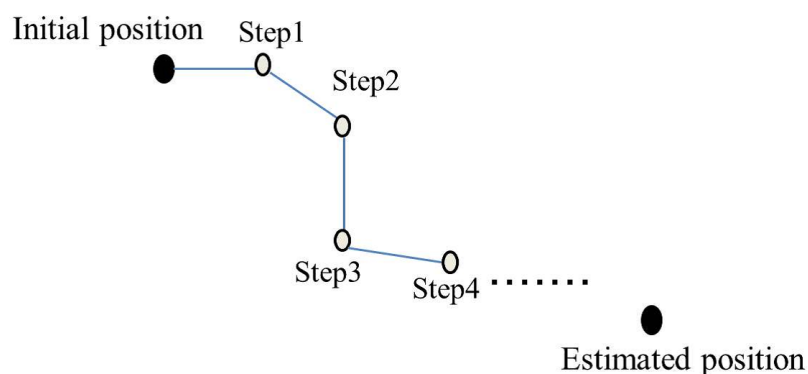


図 2.9: 歩数認識

歩幅には個人差があり，さらに個人の中でも一定ではない．歩幅の誤差が蓄積してしまうため，推定精度が低いという問題がある．さらに，車椅子利用者など，歩幅を持たないユーザの場合，位置推定を行えないため，本研究には適さない．

2.3 まとめ

2章では，これまでに提案されている屋内位置推定手法について述べた．実用性のある屋内ナビゲーションを行うためには，ユーザにとって新たなデバイスが必要がなく，提供者の負担が小さい必要がある．さらに，正確にユーザの屋内位置を知る必要もある．RFIDを用いた位置推定は，すべてユーザがリーダーライタを所持するのは現実的ではないため，本研究には適さない．無線LANを用いた位置推定は棚などの移動によって環境が変わるたびに，再度RSSと位置情報の取得を行わなければならないため，本研究には適さない．歩数認識による位置推定は，車椅子利用者など，歩幅を持たないユーザの場合，位置推定を行えないため，本研究には適さない．本研究においては，ユーザの位置の推定を加速度積分による移動量推定と，二次元マーカを用いた位置推定によって行い，ユーザの方向を知るために，地磁気センサーを用いることで，ナビゲーションシステムの構築を目指す．

第3章 情報支援

3章では，ユーザに対して，情報支援を行うための研究や製品について述べる．

3.1 音声を用いた情報支援

音声を用いた情報支援について図 3.1 に示す．カーナビゲーションシステムを例として，ユーザに対して情報を提示するために，音声が多く用いられている．また，視覚障害者に対してナビゲーションを行う，環境内にある文字列を抽出し音声によって伝えることで，周囲環境を理解する支援をするような研究も行われている [26]．しかし，図書館のような周囲に音声を発するのが憚られるような環境では，音声を用いた情報支援を行うことは難しい．

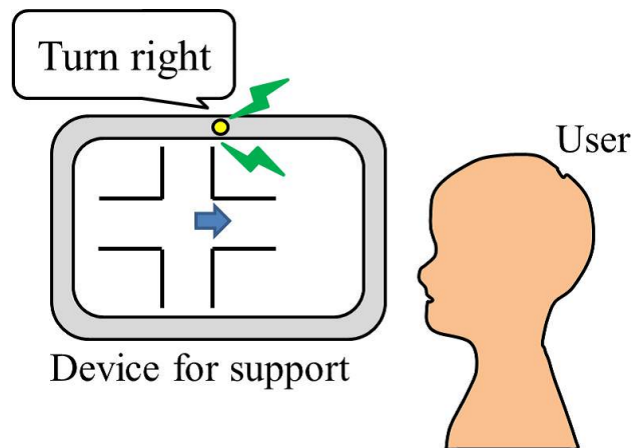


図 3.1: 音声を用いた情報支援

3.2 振動を用いた情報支援

振動を用いた情報支援について図 3.2 に示す。振動を用いた情報支援は、注意量をあまり必要としないため、常時利用に適すると考えられる。携帯端末のバイブレータなどの振動を用いてユーザに情報を提示することが行われているが、単純な振動であるため、注意喚起程度の用途にしか用いることができない。そこで、装着したウェアラブルデバイスを振動させることで、進行方向など複数の情報をユーザに提示する研究が試みられている。適切なタイミングで振動させ、最小限の情報のみを利用者に伝えるため、利用者の負担を軽減することもできる [27]。

しかし、振動を用いて複数の種類の情報を提示するために、専用のウェアラブルデバイスをユーザが用意しなければならないという問題がある。

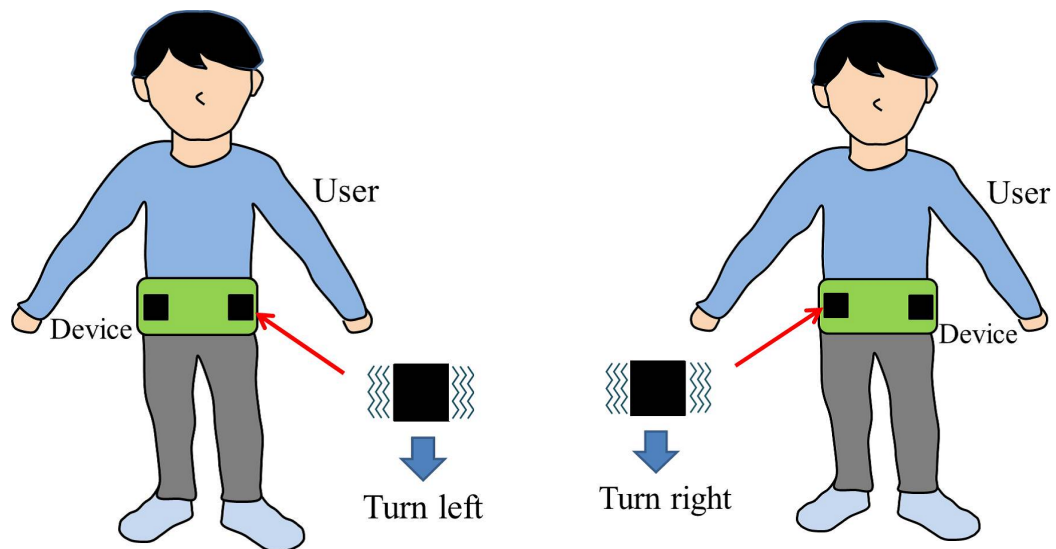


図 3.2: 振動を用いた情報支援

3.3 視覚を用いた情報支援

3.3節では、視覚を用いた情報支援を行うことができる、拡張現実感について説明し、マーカを基準に三次元仮想物体を画像上に重畳表示する、ビデオシースルー拡張現実感システムの開発を容易にした ARToolKit について述べる。

3.3.1 拡張現実感

拡張現実感 (Augmented reality : AR) とは、ユーザが装着したウェアラブルコンピュータやモバイル端末などを用いて、現実環境に仮想環境を重畳して提示する技術である [28]。AR の例を図 3.3 に示す。図 3.3(a) はカメラで撮影した実空間の情報であり、ユーザが見ている映像でもある。実空間上のマーカ位置にコンピュータ内で生成した仮想物体を描画することで、図 3.3(b) のように仮想物体を重畳した情報を画面上に提示することができる。AR を用いることでユーザの位置に応じた情報を視覚的に提示することが可能であり、歩行者のナビゲーションなどでの実用化が期待されている。

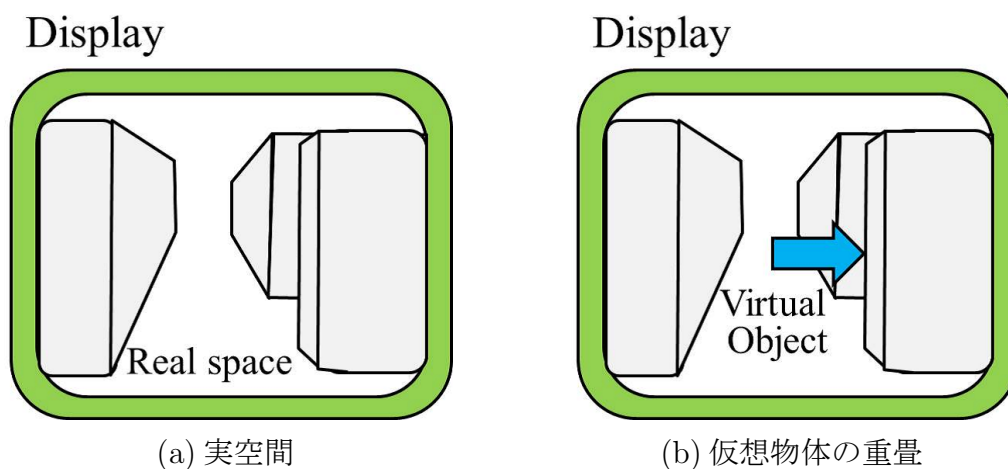


図 3.3: 実空間と仮想物体の重畳

3.3.2 ARToolKit

加藤らにより提案されている ARToolKit は C 言語で記述されており，C 言語によって拡張現実感を用いたアプリケーションを構築することができる．カメラによって画像入力を行い，その画像に二値化などの処理を施すことで，黒色の正方形マーカのカメラ座標系における位置姿勢を実時間で計測する [29]．

ARToolKit の処理の流れを図 3.4 に示す [30]．ARToolKit ではカメラからの画像入力に対して 2.1.3 節で説明した手順と同様に，四角形領域の抽出と頂点の位置座標検出，マーカの識別，三次元位置姿勢計算を行う．求めたマーカ座標系とカメラ座標系の変換行列を用いて，OpenGL による三次元グラフィックス描画によってマーカ上への仮想物体の重畳表示を行っている．

また，現在では ARToolKit のライブラリを基に，ARToolKit を簡便で高速な実装にした ARToolKitPlus[31] や，Java に移植した NyARToolKit[32] など開発されており，幅広く AR が用いられるようになっている．

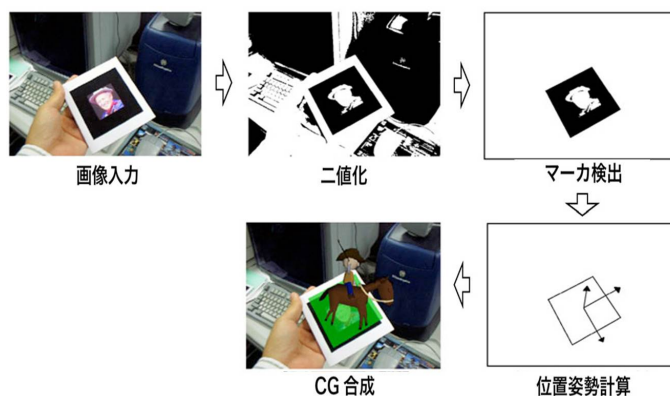


図 3.4: ARToolKit の処理手順 [30]

3.4 まとめ

3.3 章では，情報支援について述べた．音声を用いた情報支援は静かな屋内環境では用いるのは難しいため，本研究には適さない．触覚を用いた情報支援は，新たなデバイスが必要となるため，ユーザが用いるにあたって現実的と言えず，本研究には適さない．AR を用いた情報支援は，ユーザの持つスマートフォンを用いて付加情報を視覚的に提示することが可能であり，ナビゲーションの提示に有用であると考えられる．したがって，本研究ではスマートフォンの画面に進行方向を示す矢印を AR 表示することでユーザに移動のための情報を提示する．

第4章 ネスティングナビゲーション

4章では、本研究でのナビゲーションシステムについて述べる。4.1節においてシステムの全体像を示し、4.2～4.4節でユーザの位置と向きの推定手法について述べ、4.5節でARナビゲーション提示について説明する。

4.1 システム概要

ナビゲーションシステムの概念図を図4.1に示す。ナビゲーションシステムは、スマートフォンに内蔵される加速度センサと地磁気センサ、スマートフォンに搭載されるカメラ、基盤目の交点の床面に設置された、位置情報があらかじめ既知である二次元マーカで構成される。

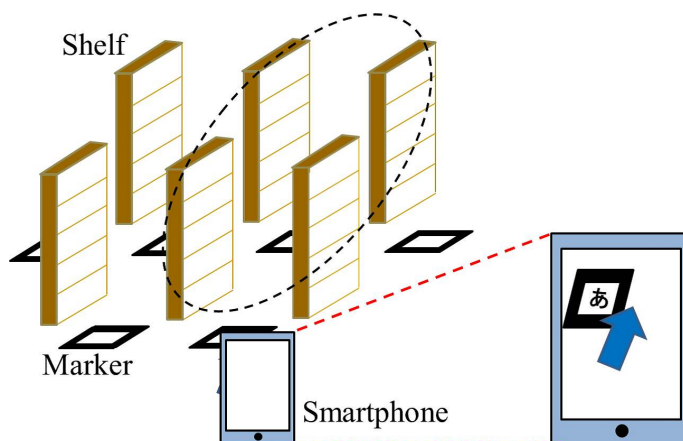


図 4.1: システムの概要

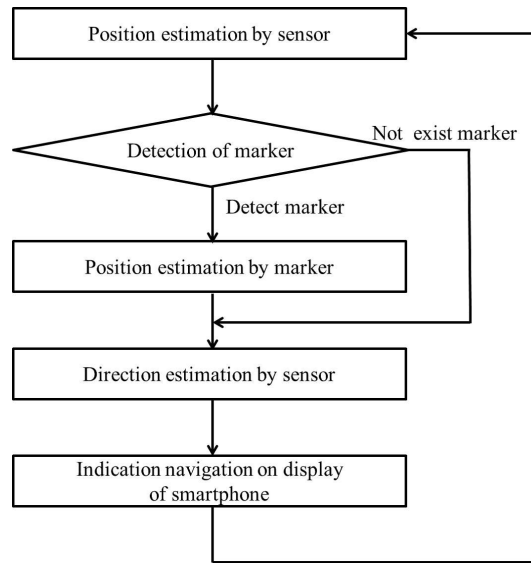


図 4.2: フローチャート

次に，本システムのフローチャートを図 4.2 に示す．

- 加速度センサと地磁気センサの値を用いてユーザの位置を推定する．
- カメラによって二次元マーカが検出された場合，二次元マーカに登録された位置情報からユーザの位置の推定を行い，その位置を推定位置として用いる．
- 加速度センサと地磁気センサの値を用いてスマートフォンの回転を表す回転行列を算出し，ユーザの向きを推定する．
- ユーザの向きと位置に応じてスマートフォンの画面にナビゲーションの提示を行う．

4.2 加速度センサを用いた移動量推定

スマートフォンの端末の座標系は図 4.3 に示すように，端末の左から右へ向かう方向が x_s 軸正方向，端末の下から上へ向かう方向が y_s 軸正方向，端末の裏から表に向かう方向が z_s 軸正方向を示す．スマートフォンに搭載される加速度センサと地磁気センサは三軸であり， x_s ， y_s ， z_s 方向の加速度成分と地磁気成分がそれぞれ得られる．

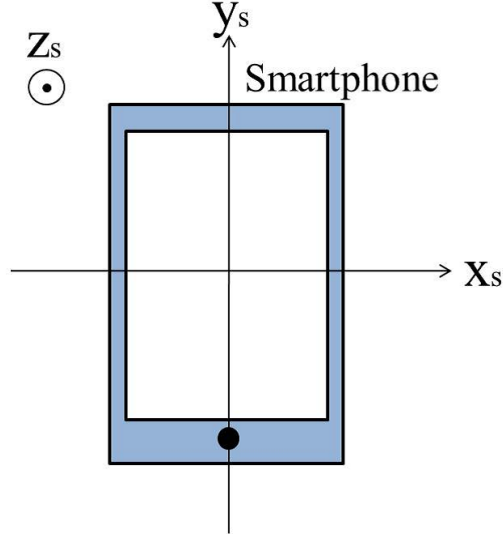


図 4.3: スマートフォン座標系

スマートフォンの加速度センサと地磁気センサは数 msec～数十 msec 毎に値を更新する．加速度の値が更新される時刻を t_n として，時刻 t_n に加速度センサから得られるスマートフォン座標系での加速度の値を $\vec{a}_{s, n} = (a_{x_s, n}, a_{y_s, n}, a_{z_s, n})$ とする．得られる加速度の値には重力加速度成分も含まれているため，端末自身の加速度を得るためには重力加速度成分を取り除く必要がある．時刻 t_n におけるスマートフォン座標系での重力加速度成分を $\vec{g}_{s, n} = (g_{x_s, n}, g_{y_s, n}, g_{z_s, n})$ とする．

重力加速度成分は直流成分しか持たないため，式 (4.1) に示すようなローパスフィルタを施すことで，重力加速度成分のみを抽出する．ただし， ρ は $0 < \rho < 1$ を満たす定数とする．

$$\begin{bmatrix} g_{x_s, n} \\ g_{y_s, n} \\ g_{z_s, n} \end{bmatrix} = (1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n} \\ a_{y_s, n} \\ a_{z_s, n} \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} g_{x_s, n-1} \\ g_{y_s, n-1} \\ g_{z_s, n-1} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

式 (4.1) は右辺の $\vec{g}_{s, n-1}$ に値を代入していくことで，式 (4.2) のように変形することができる．

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} g_{x_s, n} \\ g_{y_s, n} \\ g_{z_s, n} \end{bmatrix} &= (1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n} \\ a_{y_s, n} \\ a_{z_s, n} \end{bmatrix} + \rho(1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n-1} \\ a_{y_s, n-1} \\ a_{z_s, n-1} \end{bmatrix} + \\
&\quad \rho^2 \begin{bmatrix} g_{x_s, n-2} \\ g_{y_s, n-2} \\ g_{z_s, n-2} \end{bmatrix} \\
&= (1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n} \\ a_{y_s, n} \\ a_{z_s, n} \end{bmatrix} + \rho(1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n-1} \\ a_{y_s, n-1} \\ a_{z_s, n-1} \end{bmatrix} + \\
&\quad \rho^2(1 - \rho) \begin{bmatrix} a_{x_s, n-2} \\ a_{y_s, n-2} \\ a_{z_s, n-2} \end{bmatrix} + \dots \dots \dots
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$f(t) = \rho^t(1 - \rho)$ として、 $f(t)$ を式 (4.3) に示すようにフーリエ変換すると式 (4.4) のように表せる。ただし、 $f(t)$ のフーリエ変換を $F(\omega)$ 、 $t > 0$ とし、 ω は $\overrightarrow{a_{s, t_n}}$ の角周波数、 e は自然対数の底、 j は虚数単位を表す。

$$F(\omega) = \int_0^\infty \rho^t(1 - \rho)e^{-j\omega t} dt \tag{4.3}$$

$$= \frac{\rho - 1}{\ln(\rho) - j\omega} \tag{4.4}$$

また、 $F(\omega)$ の絶対値は式 (4.5) のように表すことができる。

$$|F(\omega)| = \frac{1 - \rho}{\sqrt{(\ln \rho)^2 + \omega^2}} \tag{4.5}$$

$|F(\omega)| = \frac{|F(0)|}{\sqrt{2}}$ となるような角周波数 ω を ω' とすると、式 (4.6) のように表される。

$$\begin{aligned}
\omega' &= |\ln \rho| \\
&= \ln \frac{1}{\rho}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

したがって、式 (4.1) は、角周波数 $\ln \frac{1}{\rho}$ より低い周波数のみを通すフィルタリングであると言える。

次に、時刻 t_n における端末自身の加速度を $\overrightarrow{a'_{s, t_n}} = (a'_{x_s, t_n}, a'_{y_s, t_n}, a'_{z_s, t_n})$ とすると、式 (4.1) を用いて式 (4.7) のように表せる。

$$\begin{bmatrix} a'_{x_s, n} \\ a'_{y_s, n} \\ a'_{z_s, n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x_s, n} \\ a_{y_s, n} \\ a_{z_s, n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_{x_s, n} \\ g_{y_s, n} \\ g_{z_s, n} \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

端末座標系の値の状態では移動量を推定できないので、得られた加速度の値を図4.4に示すような世界座標系での値に変換する必要がある [33].

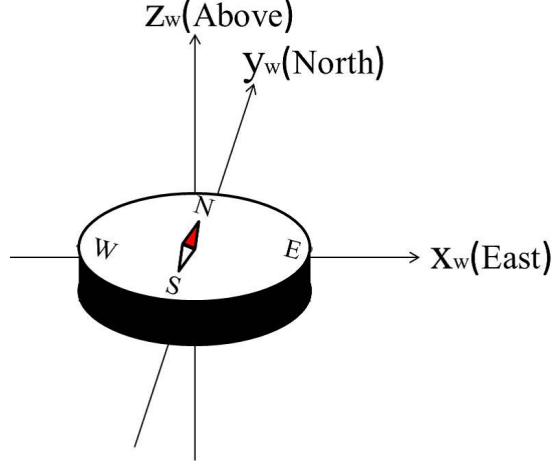


図 4.4: 世界座標系

時刻 t_n における地磁気センサの値を $\vec{B}_{s, n} = (B_{x_{s, n}}, B_{y_{s, n}}, B_{z_{s, n}})$ とする. また, 端末座標系の三方向を表す三つの単位ベクトルを $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$, $\vec{e}_z$, 世界座標系の三方向を表す三つの単位ベクトルを $\vec{w}_x$, $\vec{w}_y$, $\vec{w}_z$ とすると, $\vec{g}_{s, t_n}$ と $\vec{B}_{s, t_n}$ は式 (4.8) と式 (4.9) のように表される.

$$\vec{g}_{s, n} = g_{x_{s, n}} \vec{e}_x + g_{y_{s, n}} \vec{e}_y + g_{z_{s, n}} \vec{e}_z \quad (4.8)$$

$$\vec{B}_{s, n} = B_{x_{s, n}} \vec{e}_x + B_{y_{s, n}} \vec{e}_y + B_{z_{s, n}} \vec{e}_z \quad (4.9)$$

$\vec{g}_{s, n}$ は鉛直下向きであるため, 鉛直上向きが正である $\vec{w}_z$ は式 (4.10) のように表される.

$$\vec{w}_z = -\frac{\vec{g}_{s, n}}{|\vec{g}_{s, n}|} \quad (4.10)$$

$$= u_7 \vec{e}_x + u_8 \vec{e}_y + u_9 \vec{e}_z \quad (4.11)$$

$\vec{w}_z$ と $\vec{B}_{s, n}$ が作る平面は図4.5(a)のように $y_w z_w$ 平面に一致するため, $\vec{w}_x$ は式 (4.12) に示すように $\vec{w}_z$ と $\vec{B}_{s, n}$ の単位ベクトルの外積で表すことができる.

$$\vec{w}_x = \frac{\vec{B}_{s, n} \times \vec{w}_z}{|\vec{B}_{s, n}|} \quad (4.12)$$

$$= u_1 \vec{e}_x + u_2 \vec{e}_y + u_3 \vec{e}_z \quad (4.13)$$

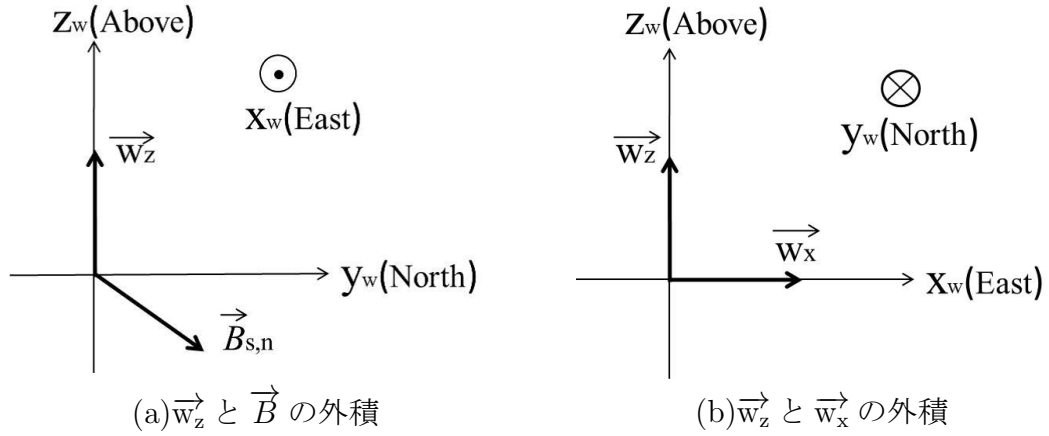


図 4.5: ベクトルの外積

式 (4.10) と式 (4.12) より, $\vec{w}_x$ と $\vec{w}_z$ が得られたため, $\vec{w}_y$ は式 (4.14) に示すように $\vec{w}_z$ と $\vec{w}_x$ の外積で表すことができる.

$$\vec{w}_y = \vec{w}_z \times \vec{w}_x \quad (4.14)$$

$$= u_4 \vec{e}_x + u_5 \vec{e}_y + u_6 \vec{e}_z \quad (4.15)$$

式 (4.11), 式 (4.13), 式 (4.15) より, 端末座標系を世界座標系に変換する回転行列を $\mathbf{M}$ とすると式 (4.16) のように同次座標系で表すことができる.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & 0 \\ u_4 & u_5 & u_6 & 0 \\ u_7 & u_8 & u_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

時刻 t_n における世界座標系での端末の加速度を $\vec{a}_{w,n} = (a_{x_w,n}, a_{y_w,n}, a_{z_w,n})$ とすると, 式 (4.17) に示すように求めることができる.

$$\begin{bmatrix} a_{x_w,n} \\ a_{y_w,n} \\ a_{z_w,n} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & 0 \\ u_4 & u_5 & u_6 & 0 \\ u_7 & u_8 & u_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_{x_s,n} \\ a'_{y_s,n} \\ a'_{z_s,n} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

また, 式 (4.18) に示すように時刻 t_n と時刻 t_{n-1} との差を Δt とする.

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (4.18)$$

時刻 t_n における端末の世界座標系における速度を $\vec{v}_{w,n} = (v_{x_w,n}, v_{y_w,n}, v_{z_w,n})$, 初期位置からの変位を $\vec{X}_{w,n} = (x_{w,n}, y_{w,n}, z_{w,n})$ とすると, 速度 $\vec{v}_{w,n}$ は式 (4.19) に示

すように端末の加速度を離散積分することで、初期位置からの変位 $\overrightarrow{X_{w, n}}$ は式 (4.20) に示すように速度を離散積分することで近似的に計算する.

$$\begin{bmatrix} v_{x_w, n} \\ v_{y_w, n} \\ v_{z_w, n} \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} v_{x_w, n-1} \\ v_{y_w, n-1} \\ v_{z_w, n-1} \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} a'_{x_w, n} \\ a'_{y_w, n} \\ a'_{z_w, n} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} X_{w, n} \\ X_{w, n} \\ X_{w, n} \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} X_{w, n-1} \\ X_{w, n-1} \\ X_{w, n-1} \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} v_{x_w, n} \\ v_{y_w, n} \\ v_{z_w, n} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

4.3 二次元マーカを用いた位置の修正

2.2.1 節で述べたように、センサを用いた位置推定は移動量の誤差が蓄積するという問題がある. したがって、2.1.3 節で述べた二次元マーカを用いた位置推定によって、位置の修正を行う. あらかじめ位置情報を登録した二次元マーカを床面に設置しておく. スマートフォンの背面に搭載されるカメラを用いて二次元マーカの認識を行う. スマートフォンのカメラ座標系とマーカ座標系は図 4.6 で表される.

カメラでマーカが検出されるとカメラ-マーカ間の位置姿勢変換行列 $\mathbf{D}$ が得られる. 位置姿勢変換行列 $\mathbf{D}$ は回転を表す 3 行 3 列の回転行列 $\mathbf{R}$ と 3 行 1 列の並進行列 $\mathbf{k}$ を用いて式 (4.21) で表される. ただし、 $\mathbf{0}_3 = [0, 0, 0]$ を表している.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{k} \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

マーカ座標系において既知の点 (x'_m, y'_m, z'_m) をカメラ座標系に投影した点を (x'_c, y'_c, z'_c) とすると、式 (4.22) が成り立つ.

$$\begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{k} \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_m \\ y'_m \\ z'_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

位置姿勢変換行列 $\mathbf{D}$ の逆行列を $\mathbf{D}^{-1}$ とする. マーカ座標系を世界座標系と一致するように配置し、登録されたマーカの位置を (x_p, y_p, z_p) , カメラの世界座標系での位置を (x'_p, y'_p, z'_p) とすると、式 (4.23) が成り立つ.

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

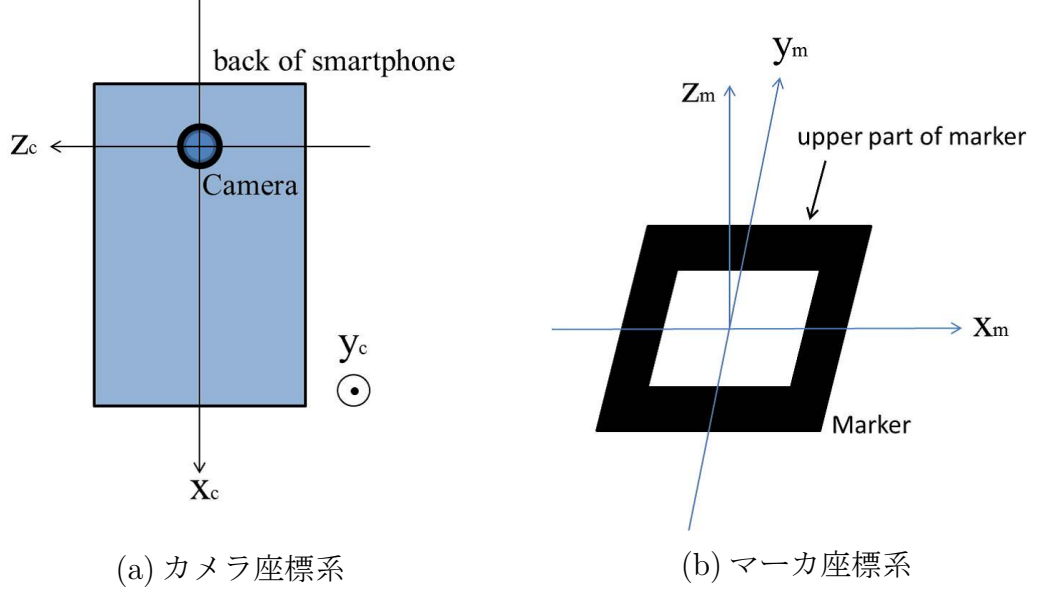


図 4.6: カメラとマーカの座標軸

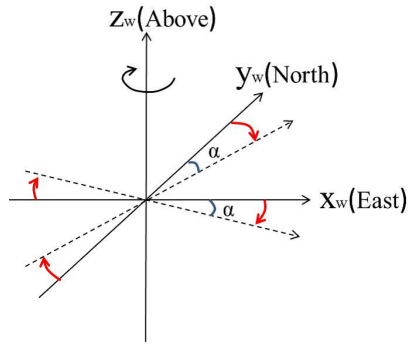
本システムでは，カメラの位置をユーザの位置と考え，マーカから推定された位置を現在の位置として，センサによって推定された位置の修正を行う．

4.4 ユーザの方向推定

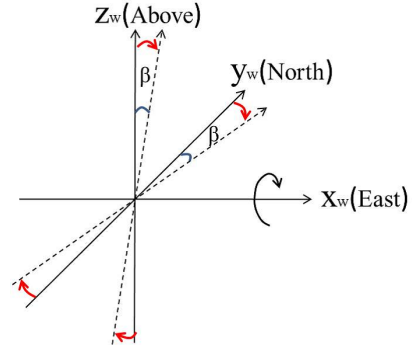
ユーザにナビゲーションを提示するためにはユーザの向きも知る必要がある．まず，端末の向きを求める．図 4.7 に示すように，世界座標系の z_w 軸に対する端末の回転角を α ， x_w 軸に対する端末の回転角を β ， y_w 軸に対する端末の回転角を γ とする．ただし， α は時計回りを正， β と γ は反時計回りを正とし， $0 \leq \alpha < 2\pi$ ， $-\frac{\pi}{2} \leq \beta < \frac{\pi}{2}$ ， $-\pi < \gamma \leq \pi$ を満たすとする．

さらに，回転行列 $\mathbf{M}$ の逆行列を $\mathbf{M}^{-1}$ とすると，式 (4.24) が成り立つ．

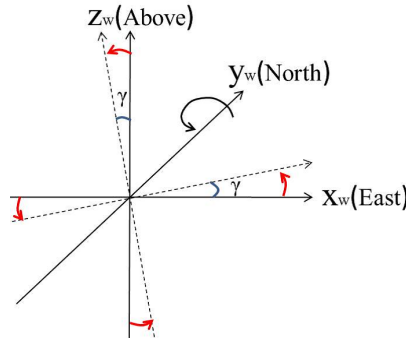
$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}^{-1} = & \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 & \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)
 \end{aligned}$$



(a) Z_w 軸に対する端末の回転角



(b) X_w 軸に対する端末の回転角



(c) Y_w 軸に対する端末の回転角

図 4.7: 世界座標系の三軸に対する端末の回転角

また、 $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$, $\vec{e}_z$ と $\vec{w}_x$, $\vec{w}_y$, $\vec{w}_z$ は三つのベクトルが直交しており、さらに、三つのベクトルの大きさが1であるため、正規直交規定であると言える。正規直交規定の間の変換行列 $\mathbf{M}$ は直交行列となる。直交行列の逆行列は転置行列と等しくなるため、 $\mathbf{M}^{-1}$ は式 (4.16) を用いて式 (4.25) のように表すことができる。

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} u_1 & u_4 & u_7 & 0 \\ u_2 & u_5 & u_8 & 0 \\ u_3 & u_6 & u_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

式 (4.24) と式 (4.25) を解くことで式 (4.26)~(4.28) に示すように、回転角 α , β , γ を求めることができる。

$$\alpha = \arcsin \frac{u_4}{u_5} \quad (4.26)$$

$$\beta = \arcsin u_6 \quad (4.27)$$

$$\gamma = \arctan \frac{u_3}{u_9} \quad (4.28)$$

本システムでは、端末の回転角 α をユーザの向きと考える。

4.5 ナビゲーション提示

4.2 節～4.4 節の理論を用いて推定されたユーザの位置と向きに応じて、図 4.8 に示すように、スマートフォンの画面に表示されたカメラ映像に、矢印の画像を重畳表示させることで、ナビゲーションを実現する。

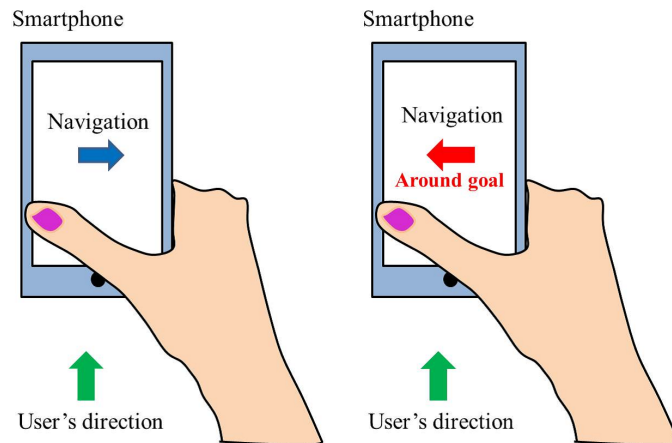


図 4.8: ナビゲーション提示

4.6 まとめ

4 章では、4.1 節においてシステムの全体像を示し、4.2～4.4 節でユーザの位置と向きの推定手法について述べ、4.5 節で AR ナビゲーション提示について説明した。ユーザの位置と向きはスマートフォンと二次元マーカを用いて行う。したがって、本システムは、ユーザの持つスマートフォンと提供者の二次元マーカのみによって実現が可能である。

第5章 システムの実装と評価

5章では，4章で提案したネスティングナビゲーションの実装について述べる．以下では，システムの構成，および，有用性を検証するための実験とその結果について示す．

5.1 システムの実装

4章で提案した手法に基づいて，ナビゲーションシステムを実装した．システムはスマートフォンと位置情報が既知の二次元マーカから成る．ナビゲーションを行うためのAndroidアプリケーションをJavaを用いて開発し，スマートフォンに導入した．使用したスマートフォンに関して表5.1と図5.1に示す．

表 5.1: スマートフォンの仕様

項目	性能
製造	SONY 社製
機種	Xperia T
OS	Android 4.0.4
画面	4.55 インチ
カメラ	1300 万画素 10 MP 縦横比 16:9



図 5.1: 使用したスマートフォン

次に，床面に設置するマーカの一例を図 5.2 に示す．マーカの検出，マーカと端末との位置姿勢変換行列の算出は Android 上で動作が可能な NyARToolKit を用いて行う．NyARToolKit でマーカを認識するために，図 5.2 のように作成した．マーカの大きさは，ユーザが手に持つスマートフォンの高さからマーカを認識するために十分な大きさとして，0.16 m 四方と定めた．また，マーカ座標系における原点がスマートフォンの世界座標系の原点に一致するようにマーカを配置した．

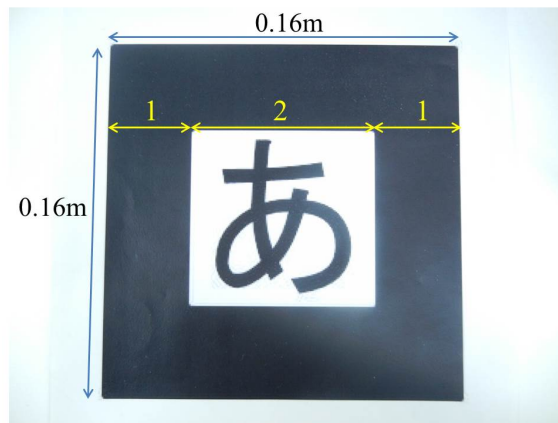
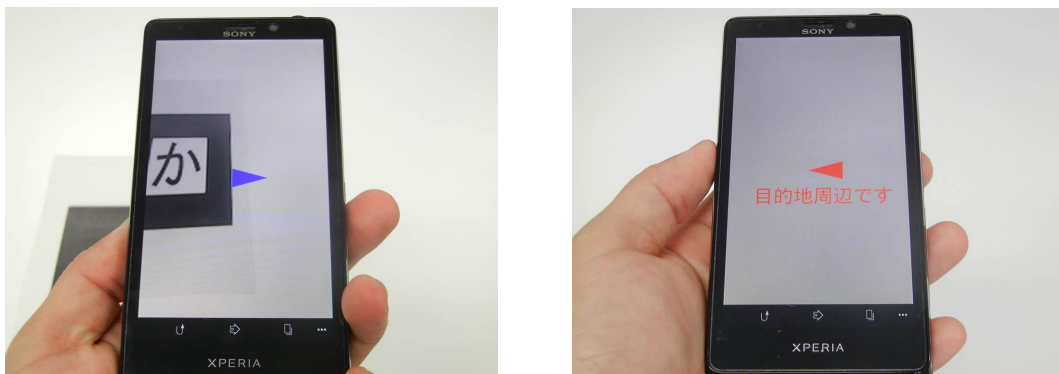


図 5.2: 使用したマーカの例

また，人の歩行時の加速度を周波数スペクトルに変換すると，周波数の低い成分も有するため [34]，重力加速度成分と端末自体の加速度を分離するためには，カットオフ周波数を低くする必要がある．したがって，定数 ρ の大きさを変え，端末を水平に持ち，歩行する予備実験を行った．水平に端末を持った場合，ローパスフィルタによって抽出される加速度成分は端末座標系で $(0, 0, 9.8)$ となるが， $\rho = 0.98$ の時， $(-0.8, -0.8, 9.8)$ 程度であり， $\rho = 0.99$ より大きくした場合， $(-0.5, -0.5, 9.8)$ 程

度であった．ここで単位は m/sec^2 である．予備実験より，加速度センサから得られた値から重力加速度成分を抽出するためのローパスフィルタは，定数 $\rho = 0.99$ とした．カットオフ周波数は 0.13 Hz である．

さらに，スマートフォンの画面に表示するナビゲーションの例を図 5.3 に示す．目的地周辺までは青色の矢印を用いてナビゲーションを行った．目的地周辺に到達した場合，赤色の文字で“目的地周辺です”と示し，さらに，赤色の矢印で通路のどちら側に目標があるかを提示した．



(a) 通常のナビゲーション

(b) 目的地周辺でのナビゲーション

図 5.3: ナビゲーションの例

5.2 センサによる位置推定精度の評価

歩行の際に，加速度積分による位置推定を行った場合の，位置推定精度の評価を行った．位置推定精度が高い，マーカを用いた位置推定を同時に行い，マーカによって推定された位置をユーザの真の位置とし，センサによる推定値との誤差を求めた．実験は以下に示す二つの実験を行った．実験の概要を図 5.4 に示す．また，常にカメラにマーカが映るように 0.5 m 間隔でマーカを設置し，実験はそれぞれ十回ずつ行った．

1. 同一方向に 4 m 歩行する．
2. 同一方向に 2 m 歩行した後， $\frac{\pi}{2}$ 回転し，さらに 2 m 歩行する．

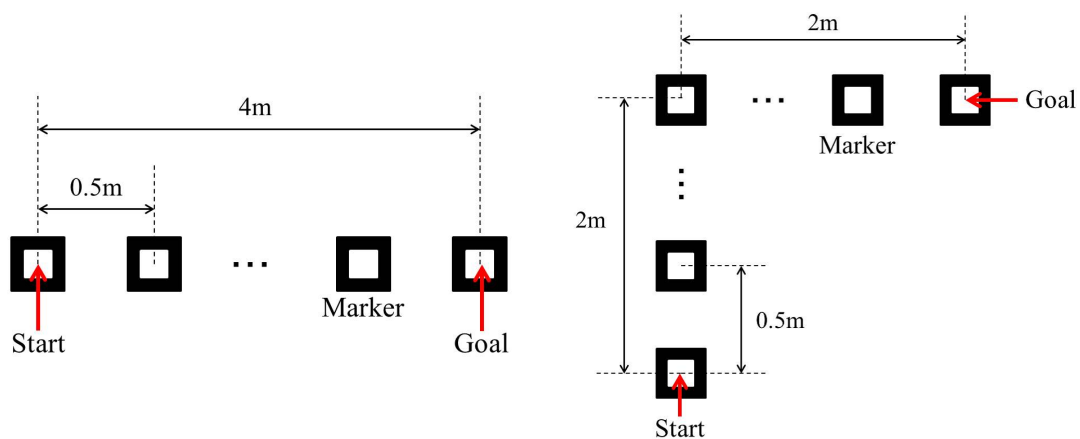


図 5.4: 加速度積分による位置推定精度の評価実験

実験 1 と実験 2 のそれぞれの試行の誤差の平均と分散，十回の試行を全て合わせた時の誤差の平均と分散を表 5.2 と表 5.3 に示す．

表 5.2: 同一方向に歩行した場合の誤差の平均と分散

試行	1	2	3	4	5	6
平均誤差 [m]	0.899	0.995	1.059	0.682	1.318	1.179
標準偏差 [m]	0.582	0.587	0.623	0.325	0.819	0.759

試行	7	8	9	10	全試行
平均誤差 [m]	1.191	0.870	1.062	1.306	1.066
標準偏差 [m]	0.772	0.546	0.649	0.772	0.689

表 5.3: 方向を変えて歩行した場合の平均と分散

試行	1	2	3	4	5	6
平均誤差 [m]	1.121	1.017	1.163	1.150	1.126	1.234
標準偏差 [m]	0.604	0.583	0.668	0.698	0.631	0.671

試行	7	8	9	10	全試行
平均誤差 [m]	1.083	1.025	1.338	0.960	1.124
標準偏差 [m]	0.600	0.548	0.804	0.539	0.647

また、同一方向に歩行した場合と方向を変えて歩行した場合のそれぞれの誤差の時間変化を図 5.5 と図 5.6 に示す。

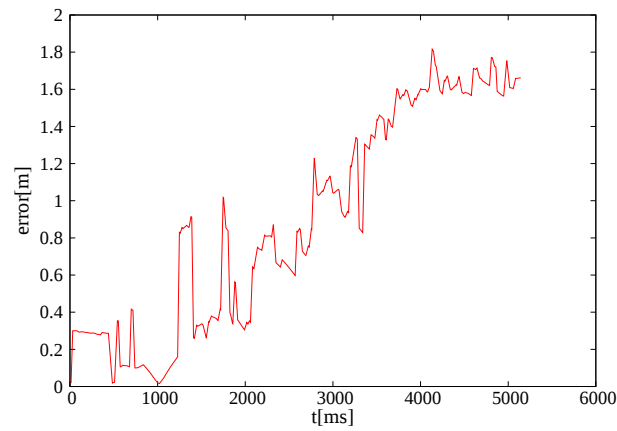


図 5.5: 同一方向に歩行した場合の誤差の時間変化

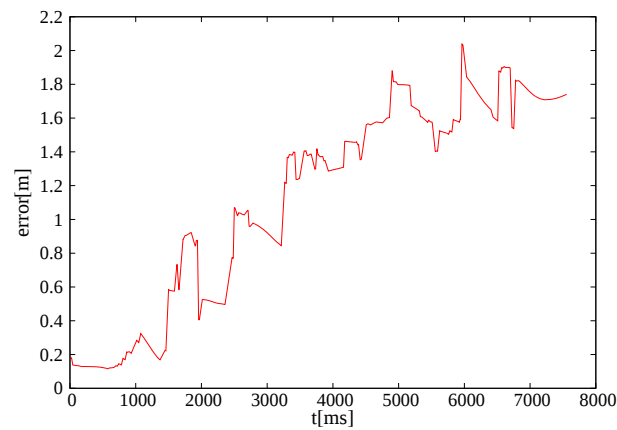
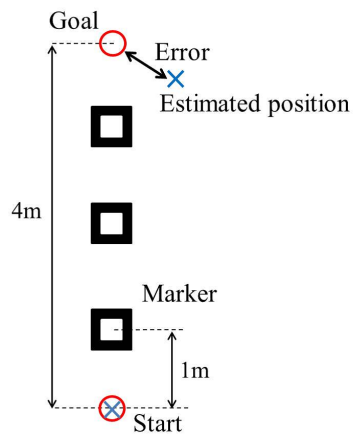


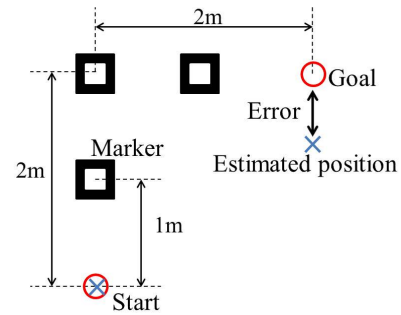
図 5.6: 方向を変えて歩行した場合の誤差の時間変化

4 m の歩行に対して、同一方向に歩行した場合でも、方向を変えて歩行した場合でも、約 1 m の誤差が得られた。さらに、時間の経過と共に誤差が大きくなっていくことが確認できた。センサの精度による誤差が離散積分することで蓄積したことが原因であると考えられる。

次に、加速度積分によって位置を推定した場合と、本システムを用いて位置を推定した場合の位置推定精度を比較した。同一方向に 4 m 歩行した場合と、同一方向に 2 m 歩行した後、 $\frac{\pi}{2}$ 方向転換してさらに 2 m 歩行した場合で、それぞれ位置を推定し、目的地とのずれを求めた。実験の概要を図 5.7 に示す。マーカは初期位置から目的地の間に、1 m 毎に設置した。



(a) 同一方向に歩行した場合



(b) 方向を変えて歩行した場合

図 5.7: 位置推定精度の比較実験

実験はそれぞれ十回ずつ行った．実験の結果を表 5.4 と表 5.5 に示す．

表 5.4: 同一方向に歩行した場合の実験結果

実験項目	加速度積分のみ	本システム
誤差の平均 [m]	1.825	0.683
標準偏差 [m]	0.383	0.159

表 5.5: 方向を変えて歩行した場合の実験結果

実験項目	加速度積分のみ	本システム
誤差の平均 [m]	1.674	0.684
標準偏差 [m]	0.279	0.153

加速度積分のみによって位置を推定した場合と、本システムを用いて位置を推定した場合の推定誤差の平均値の差が統計的に有意な差であるかを検定するために、t 検定を行った．結果、同一方向に歩行した場合と、方向を変えて歩行した場合のいずれでも、推定誤差を小さくすることができるという仮説が有意水準 1% で有意であることが分かった．したがって、マーカを用いることで、位置が修正され、誤差を小さくすることができると思われる．

5.3 ナビゲーションシステムの被験者実験

ナビゲーションシステムの評価を行うために、八名の被験者に対して実験を行った。被験者は男性七名、および女性一名である。まず、あらかじめホワイトボードと二次元マーカを用いて図 5.8 に示すような環境を構築した。また、実際の様子を図 5.9 に示す。

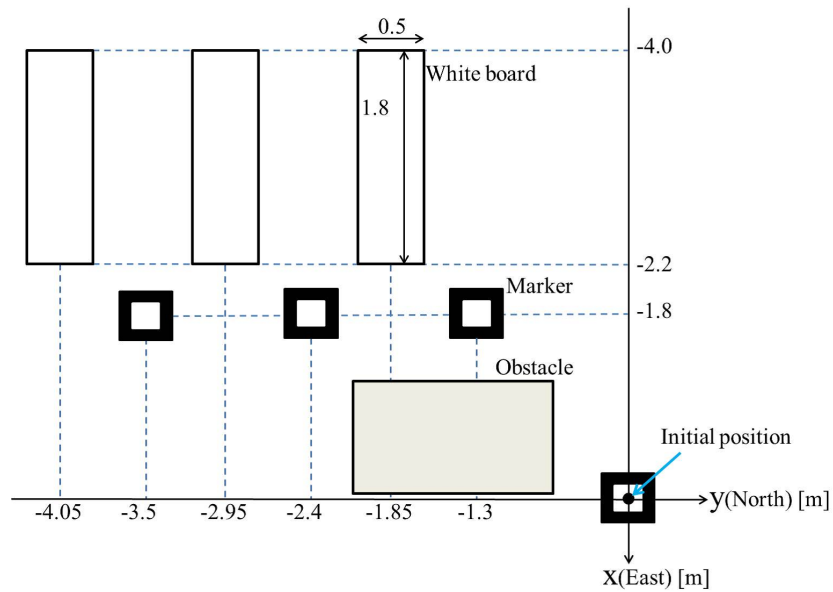


図 5.8: 被験者実験の環境

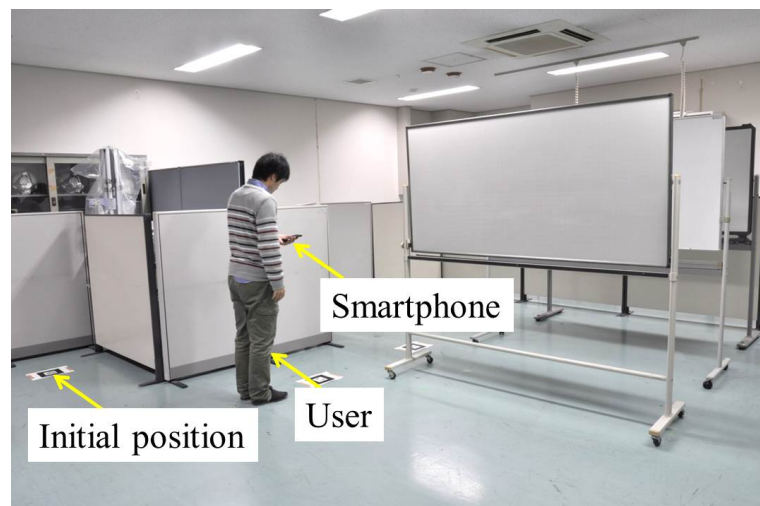


図 5.9: 被験者実験の環境の様子

さらに、三つのホワイトボードで作られた二つの通路の両側、計四つのボード面に対して、図 5.10(a) に示すような図書名が複数印刷された用紙を、図 5.10(b) に示すようにそれぞれ 15 枚貼付することで図書館を模した環境とした。

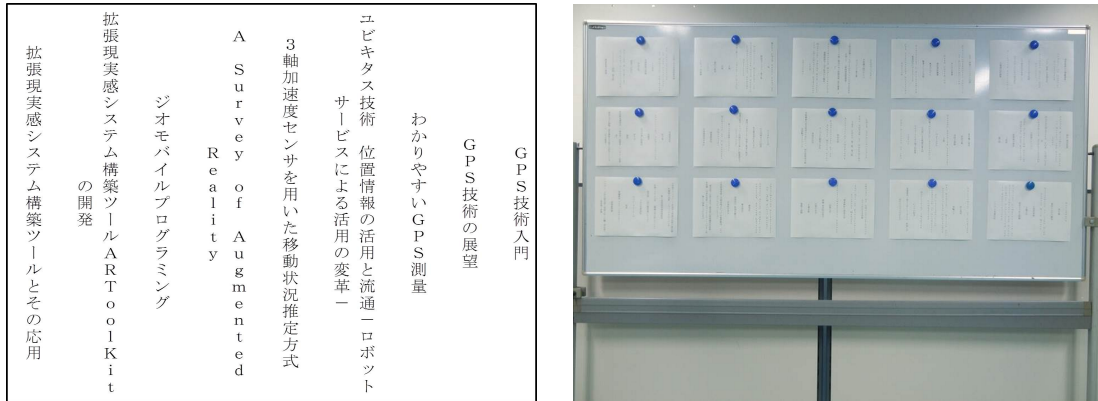


図 5.10: 図書館を模した環境

被験者には、二つの通路の中から指示された図書名を、ナビゲーションを行った場合と、行わなかった場合で二回検索してもらい、目標の図書を発見するまでの時間を計測した。ナビゲーションに失敗した場合は再度実験を行い、失敗した回数を記録した。実験の結果を表 5.6 と表 5.7 に示す。ただし、図 5.11 に示すように、実験を行う際は、ナビゲーションを行う場合に初期位置からより遠い場所に目標の図書を設定し、図書名の並びを記憶することを防ぐため、順番を無作為に入れ替えた用紙をそれぞれ使用して実験を行った。さらに、図 5.12 に実験の映像を示す。

表 5.6: ナビゲーションを行った場合

被験者	1	2	3	4	5	6	7	8
発見に要した時間 [sec]	31.5	30.4	34.4	29.1	21.1	16.9	49.2	43.5
失敗回数 [回]	0	1	1	0	1	0	0	0

表 5.7: ナビゲーションを行わなかった場合

被験者	1	2	3	4	5	6	7	8
発見に要した時間 [sec]	37.9	131.0	59.8	79.6	60.4	55.3	72.4	97.5

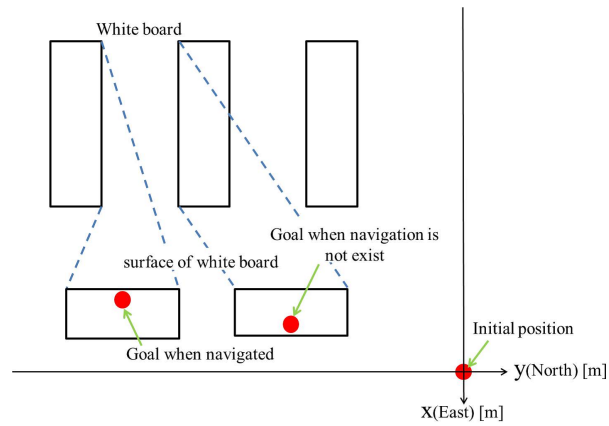


図 5.11: 目標の図書の位置

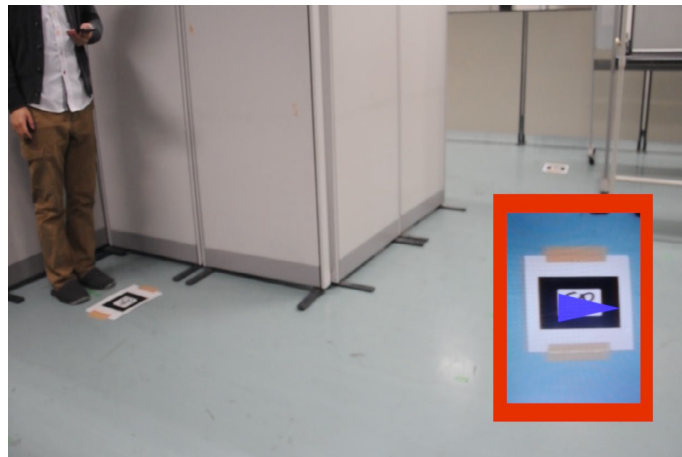


図 5.12: 実験の映像

ナビゲーションを行った場合に要した時間の平均値は 30.76 sec, ナビゲーションを行わなかった場合は 74.23 sec となった. この二つの平均値の差が統計的に有意な差であるかどうかを検定するために, t 検定を行った. 結果, ナビゲーションシステムを用いたほうが発見に要する時間を短くすることができるという仮説が, 有意水準 1% で有意であることが分かった.

5.4 まとめ

まず，使用した加速度センサの精度を確かめるための実験を行った．加速度積分のみを用いた位置推定は蓄積誤差が大きく，さらに，マーカによって位置を修正することで，蓄積誤差を小さくできることが確認できた．したがって，加速度積分によって位置推定を行う場合，ナビゲーションを行うためには位置の修正が必要であることが確認できた．

次に，ナビゲーションの評価を行うための被験者実験を行った．図書館を模した環境において，ナビゲーションを行った場合と行わなかった場合の目標の図書を発見するまでの時間を比較した．三名の被験者ではナビゲーションの失敗が起こった．いずれも，目標の通路に入るまではナビゲーションを行えたが，目的地周辺であることを示すことができなかった．通路に入る際の方向転換において，加速度センサによる誤差が速度と位置に蓄積されたことが原因であると考えられる．また，ナビゲーションを用いたほうが発見に要する時間を短くすることができ，時間の短縮につながったと考えられる．

第6章 おわりに

本研究では、碁盤構造を持った屋内環境における、スマートフォンと二次元マークを用いたナビゲーションシステムを構築した。スマートフォンに搭載された加速度センサと地磁気センサを用いてユーザの屋内位置を推定した。カメラと二次元マークを用いた位置推定を同時に行い、センサによって推定された位置を修正することで精度の低さを補った。さらに、スマートフォンの画面に位置と向きに応じて進行方向を提示することでナビゲーションシステムを実現した。

システムを構築し、センサ用いた位置推定と二次元マークを用いた位置推定を比較することで、位置の修正の必要性を確認した。さらに、被験者実験を行い、検定により本システムは有用性があることが示された。本システムを用いることで、実用的なナビゲーションシステムとして、様々な屋内環境でのナビゲーションが可能になることが期待される。

謝 辞

本研究は、大阪大学基礎工学部で行ったものである。

研究を行う際に、研究環境を提供して頂き、本論文の添削指導や研究テーマの相談、輪講や論文紹介の際に多大なるご指導をいただきました大阪大学 基礎工学部研究科 大城理教授に篤くお礼を申し上げます。また、研究内容や進捗具合に関心を寄せて下さるとともに、研究を進めるにあたって多くのアドバイスをくださいました大阪大学 基礎工学部研究科 井村誠孝准教授に心より感謝致します。さらに、研究室に配属されて間もなく、研究テーマに悩んでいた際に、親身に相談に乗っていただいた大阪大学 基礎工学部研究科 黒田嘉宏助教にお礼申し上げます。担当教員として、研究に関して非常に未熟である私に対して、幾度となく研究の相談に乗っていただき、適切なアドバイスをくださり、論文の書き方などに関しても丁寧にご指導していただきました大阪大学 基礎工学部研究科 浦西友樹助教に深くお礼申し上げます。研究や実験に関して悩んでいる際に、多くのアドバイスをくださいました大阪大学 基礎工学部研究科 吉元俊輔氏に感謝致します。

また、日頃の研究室生活において大変お世話になった大城研究室の先輩方である高畑裕美氏、八木明日華氏、田中岳氏、井手口裕太氏、松崎成敏氏、横畑亮輔氏、籾岡亮氏に感謝致します。研究の進め方から研究室生活の過ごし方に至るまで、多くのことを教えて頂きました。また、研究が行き詰まり、悩んでいる時も励ましあい、お互いに議論を交わし切磋琢磨してきた同期である團原佑壮氏、長坂信吾氏、豆野裕信氏、和田章宏氏に感謝します。

本研究における被験者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (24-8) を得て行ったものである。

参考文献

- [1] 坂井 丈泰, “GPS 技術入門”, オーム社, 東京, pp. 1-10, 2010.
- [2] 安田 明生, “GPS 技術の展望”, 情報処理学会誌電子情報通信学会論文誌. B, Vol. 84, No. 12, pp. 2082-2091, 2001.
- [3] 小白井 亮一, “わかりやすい GPS 測量”, オーム社, 東京, pp. 1-5, 2010.
- [4] 土井 美和子, 柴崎 亮介, 西尾 修一, “ユビキタス技術 位置情報の活用と流通-ロボットサービスによる活用の変革-”, オーム社, 東京, pp. 25-32, 2010.
- [5] 羽原 寿和, 町田 貴史, 清川 清, 竹村 治雄, “不可視マーカを用いた位置・姿勢推定のための環境構築とユーザー位置・姿勢推定システム”, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS 103(640), pp. 77-82, 2004.
- [6] 牧田 考嗣, 神原 誠之, 横矢 直和, “ネットワーク型ウェアラブル AR のための動的環境における注視のビューマネジメント”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 603-613, 2011.
- [7] Guenther Retscher, “Continuous indoor navigation with RFID and INS”, IEEE Conference on Position Location and Navigation Symposium, pp. 102-112, 2010.
- [8] Santiago Mazuelas , Alfonso Bahillo, Ruben M.Lorenzo, Patricia Fernandez, Francisco A.Lago, Eduardo Garcia, Juan Blas, Evaristo J.Abril, “Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks ”, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING, Vol. 3, No. 5, pp. 821-831, 2009.
- [9] 羽原 寿和, 町田 貴史, 清川 清, 竹村 治雄, “不可視マーカを用いた位置・姿勢推定のための環境構築とユーザー位置・姿勢推定システム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 257-266, 2008.

- [10] 池谷 直紀, 菊池 匡晃, 長 健太, 服部 正典, “3 軸加速度センサを用いた移動状況推定方式”, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタス・センサネットワーク 108(138), pp. 75-80, 2008.
- [11] Hyojeong Shin, Yohan Chon, Hojung Cha, “Unsupervised Construction of an Indoor Floor Plan Using a Smartphone”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol. 42, No. 6, pp. 889-898, 2012.
- [12] 服部 聖彦, 中村 恭平, 中嶋 信生, 藤井 哲也, 門 洋一, 張 兵, 高玉 圭樹, “ユビキタスネットワークにおける位置依存サービスのための高精度位置推定システムの提案と検証”, 電子情報通信学会論文誌. B, Vol. 94, No. 10, pp. 1341-1350, 2011.
- [13] Ronald T. Azuma, “A Survey of Augmented Reality”, Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [14] 小林 清孝, 伴 好弘, 上原 邦昭, “ウェアラブル AR システムのための自立型位置追跡装置と二次元マーカとを併用した三次元位置軌跡取得手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解 104(572), pp. 25-30, 2005.
- [15] 荒川 弘照, “ユビキタス社会を実現する RFID 技術 IC タグって何だ?”, NTT データ・ユビキタス研究会, 東京, pp. 14-29, 2003.
- [16] RFID の基礎と最新動向, “[http://wbb.forum.impressrd.jp/feature/20060811/19 4?page=0% 2C1](http://wbb.forum.impressrd.jp/feature/20060811/194?page=0%2C1)”. (参照 2012-12-30)
- [17] 北興産業, “<http://www.hokkosangyo.com/rfid-i.htm>”. (参照 2013-1-25)
- [18] 鶴 浩二, 兼田 健佑, 湯浅 翔太, “電磁界強度を用いた RF タグ位置推定技術の開発”, 大分工業高等専門学校紀要, Vol. 47, pp. 257-266, 2010.
- [19] 杉浦 彰彦, “ワイヤレスネットワークの基礎と応用 スペクトル拡散通信/CDMA の原理と無線 LAN/Bluetooth の詳細”, CQ 出版社, 東京, pp. 125-132, 2003.
- [20] 伊藤 誠悟, 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, 資料番号 202-10, Vol. 47, No. 12, pp. 3124-3136, 2006.

- [21] 暦本 純一, “PlaceEngine:実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤”, インターネットコンファレンス論文集, pp. 95-104, 2006.
- [22] 中里 祐介, 神原 誠之, 横矢 直和, “再帰性反射マーカと赤外線カメラを用いたユーザーの位置姿勢同定”, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解 104(193), pp. 25-28, 2004.
- [23] 加藤 博一, “マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607-616, 1999.
- [24] 佐川 貢一, 煤孫 光俊, 猪岡 光, “加速度積分による 3 次元歩行移動量の無拘束計測”, 計測自動制御学会東北支部第 202 回研究会集会, 資料番号 202-10, pp. 1-8, 2002.
- [25] 大竹 久美子, 蒔苗 耕司, “自律型測位を用いた歩行者経路案内システムの構築”, 地理情報システム学会講演論文集, Vol. 13, pp. 419-422, 2004.
- [26] 鈴木 悠司, 平岩 裕康, 竹内 義則, 松本 哲也, 工藤 博章, 大西 昇, “視覚障害者のための環境内の文字情報抽出システム”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 738, pp. 13-18, 2003.
- [27] 塚田 浩二, 安村 通晃, “Active Belt:触覚情報を用いたベルト型ナビゲーション機構”, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 11, pp. 2649-2658, 2003.
- [28] 神原 誠之, “拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論”, 情報処理学会誌, Vol. 51, No. 4, pp. 367-372, 2010.
- [29] 加藤 博一, “拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, パターン認識・メディア理解 101(652), pp. 79-86, 2002.
- [30] 加藤 博一, “拡張現実感システム構築ツールとその応用”, 情報処理, Vol. 47, No. 4, 362-367, 2006
- [31] ARToolKitPlus, “http://studierstube.icg.tugraz.at/handheld_ar/artoolkitplus.php”. (参照 2012-12-29)
- [32] NyARToolKit, “<http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/>”. (参照 2012-12-29)

- [33] 郷田 まり子, 宅間 俊志, 近藤 昭雄, “ジオモバイルプログラミング”, ワークスコーポレーション, 東京, pp. 180-200, 2011.
- [34] 興梠 正克, 石川 智也, 蔵田 武志, “歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術”, 電子情報通信学会技術研究報告, マルチメディア・仮想環境基礎 110(382), pp. 171-176, 2011.