

## スマートフォンのセンサ及び Bluetooth 探索を用いた個人間の相対位置表示システム

木下剛志<sup>†</sup> 宮田一乗<sup>†</sup>

本論文では屋内に Wi-Fi などの追加の設備なしに利用可能な位置情報サービスとして、スマートフォン内蔵の加速度センサ、デジタルコンパスと Bluetooth の探索機能を用いて、屋内で一旦離れた他者との再開を支援するために、互いの相対位置を表示するシステムを提案する。

## Relative positioning system for pedestrian using smart-phone sensor and Bluetooth

Tsuyoshi Kinoshita<sup>†</sup> and Kazunori Miyata<sup>†</sup>

This paper presents a relative positioning system using smart-phone's devices; accelerometer, digital compass and Bluetooth. Proposed system allows users to obtain a position of another smart-phone in the indoor environment without some additional equipments.

### 1. はじめに

現在市販されているスマートフォンの多くには GPS が搭載されており、位置情報を用いたサービスが数多く提供されている。GPS が利用できない屋内では、主として無線 LAN での位置推定が行なわれている。スマートフォンには、それ以外にも加速度センサや、磁気方位センサ、ジャイロセンサ、Bluetooth が搭載されており、これらのセンサを活用し端末だけで完結する自律型の位置情報サービスを提供することも可能になってきている。

本論文では屋内に Wi-Fi などの追加の設備なしに利用可能な位置情報サービスとして、スマートフォン内蔵の加速度センサ、デジタルコンパスと Bluetooth の探索機能を用いて、屋内で一旦離れた他者との再開を支援するために、互いの相対位置を表示するシステムを提案する。

### 2. 方法

#### 2.1 システムの概要

本システムの構成を、図 1 に示す。本システムでは、二つの端末で互いに Bluetooth 探索を行ない、その発見履歴と加速度センサ磁気方位センサから得られたセンサ値をサーバに送信して処理し相対位置を求め、互いに相手の位置を確認することができる。

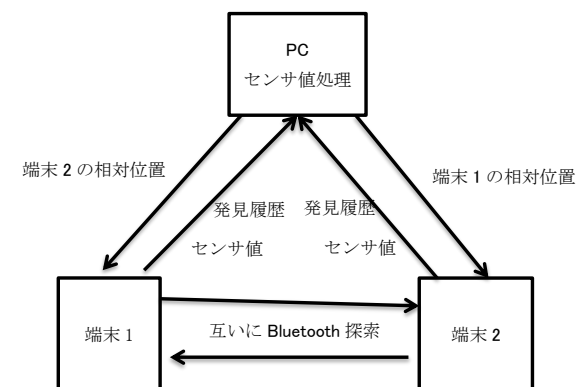


図 1 システム構成図

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology

相対位置を求めるための処理の概要を図2に示す。端末内のアプリケーションで、加速度センサ、磁気方位センサから得られたセンサ値を記録し、PCに送信し、センサ値解析プログラムでデッドレコニング処理を行い、自分の移動量を記録する。同時に、Bluetooth探索を行うことで相手が近くに居た時刻も記録する。文献1)では屋外において多数の人々が持っている携帯電話が互いにBluetooth探索を行なうことで、デッドレコニングの誤差を修正する方法を提案している。これを参考にして、Bluetooth探索で相手の端末が見つければ、相対距離をゼロとみなし、相対位置を出す際の初期位置を二つの端末で同じ座標(0,0)にするものとした。相手から離れた場合は、最後に相手を探索して見つけた時点からの移動量をサーバに送り、相手の移動量との差を求めるとで、相対位置を得られる。

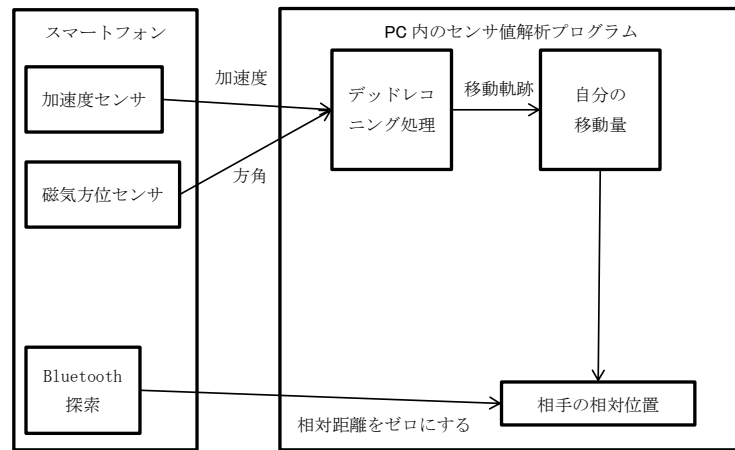


図2 システムの処理概要

## 2.2 デッドレコニング

スマートフォンには加速度センサならびに磁気方位センサが内蔵されており、任意の開始地点からの相対的な位置を得ることができる。デッドレコニングの方法は文献2)で用いられている手法を参考にした。端末の位置は手に携帯して歩いた場合に用いる事とした。

デッドレコニングには、ステップの認識と、ステップの方向、およびステップの長さが使われる。

### 2.2.1 ステップの認識

ステップの認識に用いるセンサ値は、加速度センサの値から重力成分を取り除いたものをスマートフォン (Android) から得る。図3に重力成分を除去後の加速度値を示す。

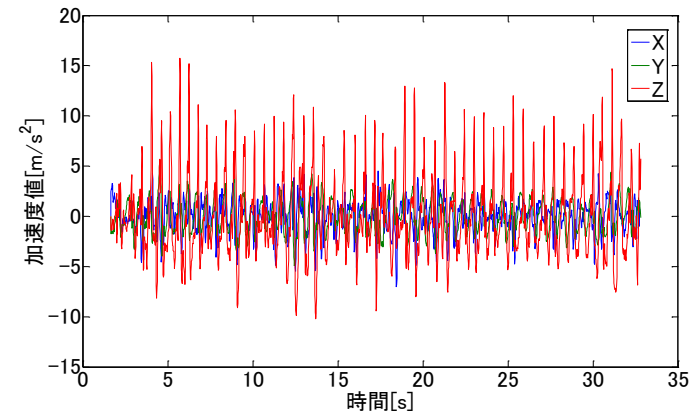


図3 重力成分を取り除いた加速度値

ステップの検出には加速度の大きさのピークを使う。加速度の大きさを図5に示す。

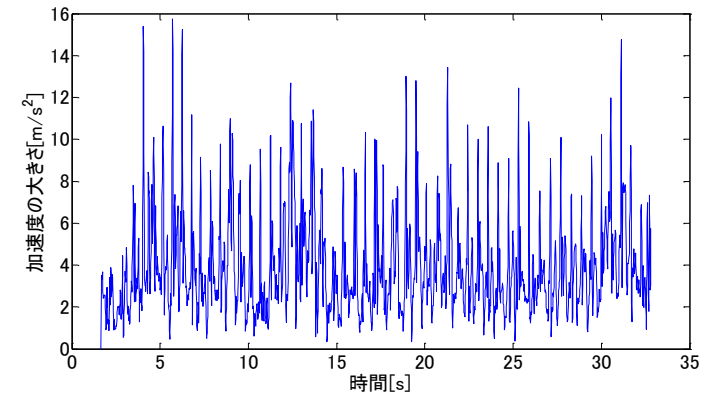


図4 加速度の大きさ

ステップの検出は、加速度の大きさを時間間隔 0.33 秒で区切り、以下に述べる条件を全て満たす区間をステップとして認識する。本論文では、歩行者が歩いている事を想定して、一步の動きに必要な最小時間を 0.33 秒に設定し、これを最小ステップ時間間隔と呼ぶこととする。

最小ステップ時間間隔で区切られた加速度の大きさに対し、以下の条件を指定してステップ認識を行なう。

- 加速度値のピークを検出するために、区間内の中央の時間の値が区切った区間の他の全ての値よりも大きい。
- 小さな振動を無視するために、区間内の値の標準偏差が閾値よりも大きい。
- 歩行している想定のため、前回ステップが認識された時間から最小ステップ時間間隔（0.33 秒）以上経過している。

以上の条件を満たした場合に認識されたステップを図 5 に示す。縦線がある場所の時間にステップが認識されている。図 5 ではステップが認識された場合に 1、認識されなかった場合に 0 を示している。

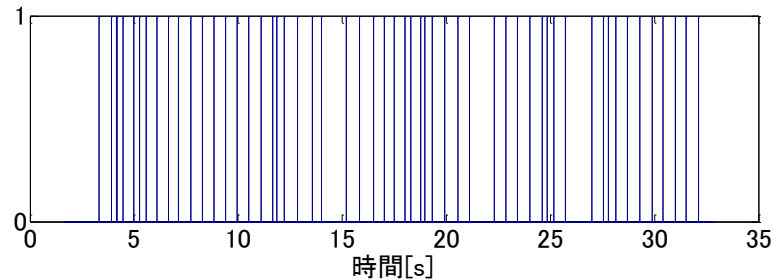


図 5 認識されたステップ

### 2.2.2 ステップの長さ

ステップの長さは歩行速度に比例して大きくなったり、若干の変動をとまなうが、本システムではステップの長さは固定値とし、事前に計測した値を使うことにした。

### 2.2.3 移動方向の推定

端末の傾きは、加速度センサと磁気方位センサから得る。図 6 は、端末を手を持って歩きながら 0° が北向きを指し、90° が東向きを指すとき -100° から 100° へ方向転換した際の磁気方位センサの値を示した結果である。

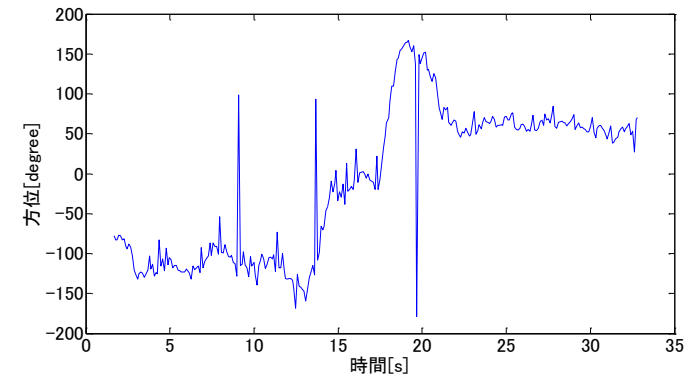


図 6 磁気方位センサの値

端末の方向を示すデータには細かい振動が加わっているため、低域通過のフィルタリング処理を行なう。フィルタリングは、 $\alpha$  をパラメータとして、式(1)のように算出する。

$$o(t) = (1 - \alpha) \cdot o(t) + \alpha \cdot o(t - 1) \quad (1)$$

$o$ : 方向  $\alpha$ : 係数

図 7 に  $\alpha=0.7$  としてフィルタリングを行なった結果を示す。

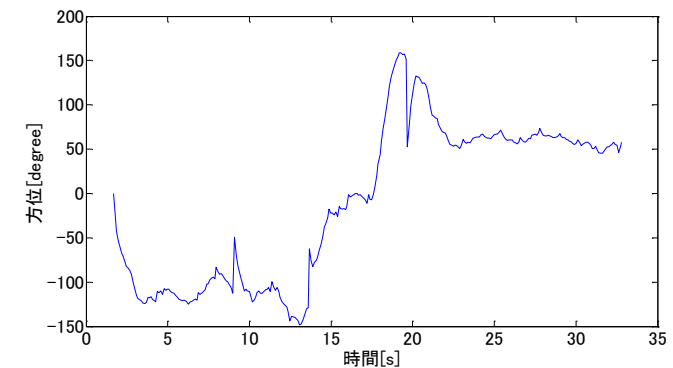


図 7 フィルタリング後の磁気方位センサの値

### 2.2.1 移動軌跡の作成

移動軌跡は、ステップが認識された時の方向にステップ幅を積算したものを現在位置に加算することで、式(2)のように算出する。

$$\begin{aligned}x(t) &= \sin(\theta) \cdot ls + x(t-1) \\y(t) &= \cos(\theta) \cdot ls + y(t-1)\end{aligned}\quad (2)$$

x: X座標 y: Y座標 t: 時間 ls: ステップ幅  $\theta$ : ステップの方向

### 2.3 Bluetooth 探索

両方の端末を検出可能状態にし、互いに Bluetooth 探索を常に行なう。どちらかの端末が相手の端末を発見できた時には、その時間に相手の端末が近くにいるとみなし、相対位置を求める際の双方の位置を座標(0,0)に設定する。その初期位置にデッドレコーディングによって求めた移動方向に移動距離を加えていくことで、相対位置を算出する。

## 3. 実験

### 3.1 使用端末とアプリケーション

端末は、Sony Ericsson 社の Xperia neo(MT15i)を用いた。この端末の OS は Android 2.3.3 で、内蔵されているセンサは、GPS/A-GPS、3軸加速度センサ、磁気方位センサ、照度センサ、近接センサである。

端末内のアプリケーションで、加速度センサの値、方位センサの値、および Bluetooth の探索結果を記録し、サーバ上にデータを送ると共に、SD カードにセンサ値を保存する。方位センサのサンプリング間隔は約 10Hz、加速度センサのサンプリング間隔は約 40Hz である。

互いの端末の時刻が正確に同じである必要があるため、実験前には、Android 用アプリケーション Clock Sync (<https://market.android.com/details?id=ru.org.amip.ClockSync>) を使って時刻合わせを行なった。

### 3.2 実験環境

実験は、北陸先端科学技術大学院大学知識棟 4 階の廊下で行なった。この実験環境を選んだ理由は、寸法を実測するのが容易だった事と、夜間では人通りが少なく、同じ経路を歩きやすいため、条件が同じ実験が行ないやすかったためである。

図 8 に廊下に設置してある案内図を、実際に計測した廊下の寸法を図 9 に示す。

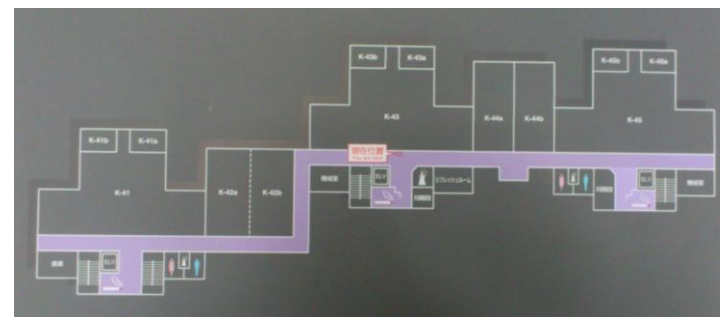


図 8 廊下の案内図

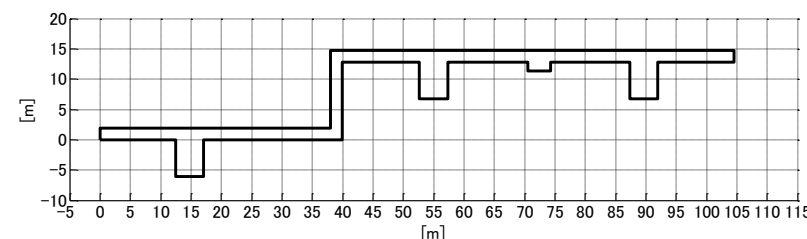


図 9 廊下の実際の測定結果

### 3.3 パラメータの設定のための実験

#### 3.3.1 ステップの長さの設定

本システムではステップの長さは固定値とする。ステップの長さは実際に歩いて求めた値を用いた。10 歩歩いた際の移動距離を測定した結果、7m だったため、ステップの長さを 70cm に設定した。

#### 3.3.2 ステップ認識のパラメータの設定

ステップ認識に必要なパラメータとして、波形内の小さな振動によるステップの誤認識を減少させるために、区間内の加速度の大きさの集合から求めた標準偏差の値に対して閾値を設定する。10 歩の歩行を 3 回繰り返して、閾値を手動で 1.32 に設定した。閾値を減らすと認識されるステップ数が増え、増やすとステップ数が増える。図 10 に 10 歩歩いたデータに対する閾値を変えた場合の認識されたステップ数を示す。

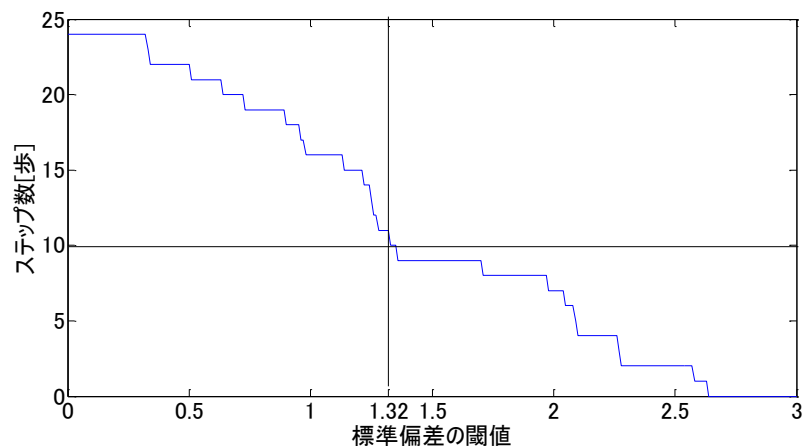


図 10 標準偏差の閾値と認識されるステップ数の関係

### 3.4 Bluetooth に関する実験

Bluetooth の特性を調べるために、Xperia neo を使って、実験を行なった。

始めに、Bluetooth を用いた別れ認識の際、どの程度相手から離れると相手の端末が見つからなくなるかを調べるために、Bluetooth の電波強度と距離との関係を調べた。その結果を表 1 に示す。

表 1 Bluetooth の電波強度の距離に対する変化

距離 [m]	電波強度 [dB]
0	-37
2	-52
4	-61
6	-∞

次に、Bluetooth の探索間隔を調べるために、2 台の端末を並べて置き、120 秒間探索した際に相手の端末が発見された時間を調べた。その結果を表 2 に示す。この表によると、探索対象の端末を発見するまでの時間は不定であり、120 秒間に端末を発見できる総回数も実験毎に異なることがわかる。

表 2 Bluetooth の探索完了時間

	1 回目		2 回目		3 回目	
	端末 1	端末 2	端末 1	端末 2	端末 1	端末 2
発見 時間[s]	10.35	32.23	10.74	20.67	10.34	30.93
	32.17	64.30	31.40	41.32	41.31	61.88
	64.38	84.96	63.61	63.13	82.50	113.34
	95.33	105.62	84.27	73.53		
				113.25		

### 3.5 移動軌跡の評価

デッドレコニングの精度の評価を行なうために、移動軌跡を得る実験を 4 回実施した。その結果を図 11 に示す。開始地点の座標(70.5,12.8)から、端末を右手に持って歩き、地点 A を通り、角 A と角 B を通った後に、終了地点の座標(0,0)に到達する経路を歩いた。黒点線が実際に歩いた経路で総距離は 83.3m である。青色が歩行軌跡である。黒線は廊下の形を示す。縦軸横軸は、廊下の右端を位置(0,0)とした時の位置である。

その軌跡から、歩行時間、ステップ数、移動距離、到達地点の座標、移動距離の誤差、到達地点の誤差を求めた結果を表 3 に示す。

表 3 デッドレコニングの精度

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	平均
歩行時間[s]	64.36	64.98	63.15	59.04	62.88
ステップ数	108	116	115	129	117
移動距離[m]	75.6	81.2	80.5	90.3	81.9
移動距離の誤差[m]	-7.7	-2.1	-2.8	7.0	-1.4
到達地点の座標	(9.69, 5.33)	(13.79, 5.03)	(9.19, 2.84)	(4.85, -3.88)	(9.38, 2.33)
到達地点の誤差[m]	11.59	14.67	9.61	6.21	10.52

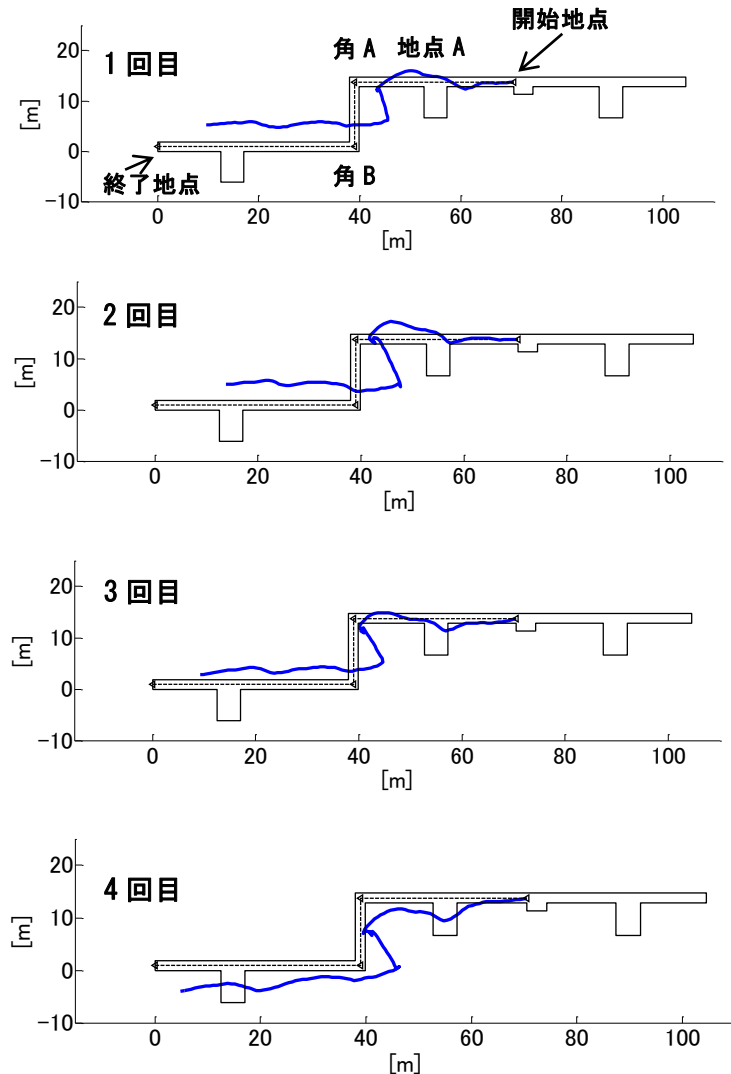


図 11 移動軌跡

表 3 の結果から移動距離の平均の誤差は-1.4m であったのに対し、到達地点の誤差は、10.52m となり誤差が大きくなった。図 11 の移動軌跡の図のどの実験の場合でも、地点 A の周辺で方位に誤差が生じている。地点 A は歩行者の左側に大きな空間があり、周囲にはエレベータと給湯室がある。次に角 A から角 B の間の経路では全ての実験結果で、方位に対して半時計回りに誤差が生じている。これらの結果は、周囲の環境による影響を受けて方位の誤差が発生したため、到着地点の誤差が大きくなったと考える。

### 3.6 二人での実験

実際の利用例に近い実験として、二人でそれぞれの端末を持って歩く実験を行なった。実験の内容を図 12 に示す。青線は端末 1 を持った人の軌跡で、赤線は端末 2 を持った人の軌跡である。緑丸が開始地点、橙色丸が終了地点である。地点①(38.95,0.95)から、図の左側に向かって、青だけが歩き、廊下の端の地点②で転回し、赤の居る地点①に戻る。その後、一緒に地点③まで歩き、赤だけが地点④まで歩いて転回し、地点③に戻る順序で歩行する実験を行なった。

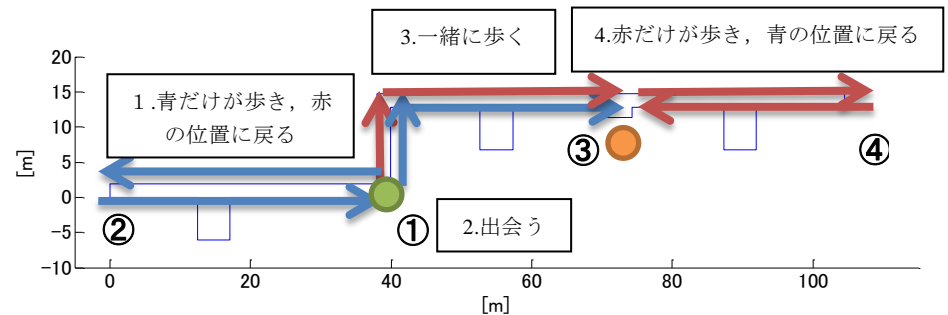


図 12 二人での実験の動き

図 13 に本実験での絶対位置の軌跡を示す。この軌跡は両方の開始地点を地点 (38.95,0.95) に固定したものである。赤丸青丸は、それぞれの端末が Bluetooth によって、相手を発見した時を示す。

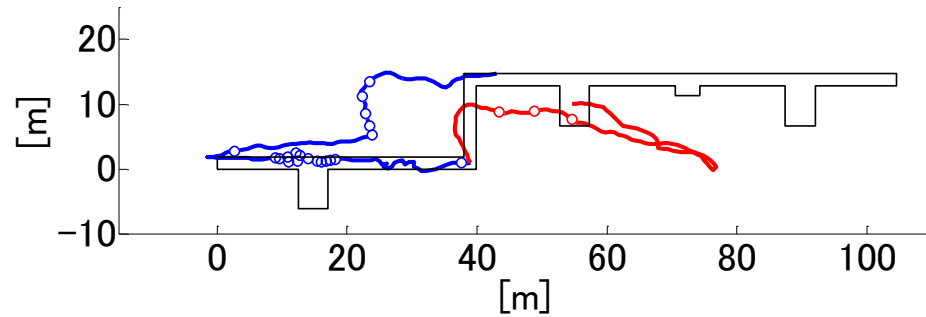


図 13 二人での動きの絶対位置

図 14 に端末 1 から見た端末 2 の相対位置の変化を、図 15 に端末 2 から見た端末 1 の相対位置の変化を示す。

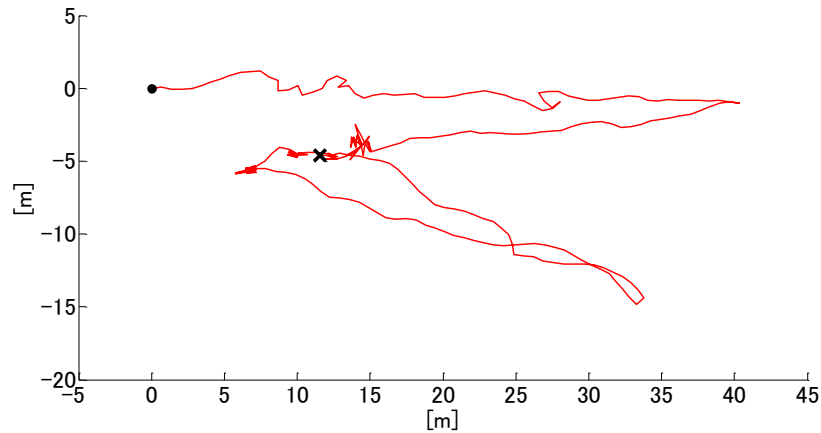


図 14 端末 1 から見た端末 2 の相対位置の変化

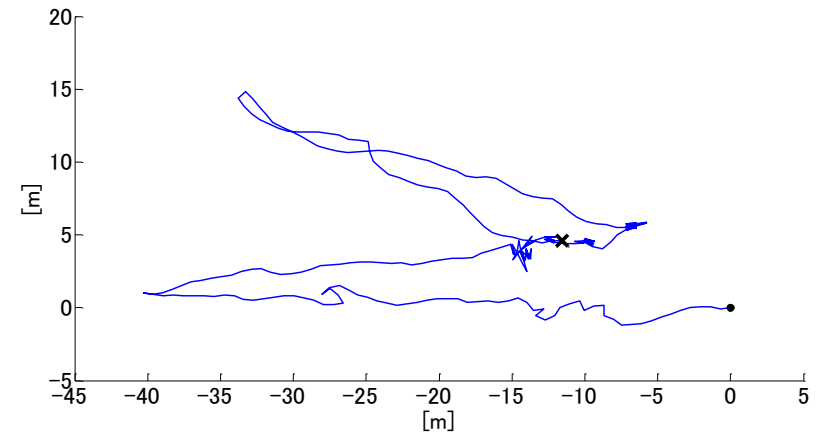


図 15 端末 2 から見た端末 1 の相対位置の変化

図 13 で示した絶対位置と、図 14 で示した相対位置を用いて実験結果の考察を述べる。始めに、端末 1 が地点①から地点②に向かって 40m 歩くが、これは実験で得られた距離もほぼ 40m になっており方向も正しい。次に、地点②から地点①に戻ったときは、図 13 に示す絶対位置に示すように距離が想定よりも短く計測されてしまったため、相手の相対位置が想定に比べて、図 14 では水平方向の軸に対して正の方向に約 6m 誤差が生じている。加えて、移動方向の誤差によって、図 14 では垂直方向の軸に対して負の方向に約 6m 誤差が生じている。地点①から地点③に向かうときは、図 13 では垂直方向の軸に対して正の方向に移動しているが、両方の端末で同じだけの方向の誤差のオフセットが生じている。しかし、移動量、時間、移動方向が二つの端末で同じ場合、周囲の環境によって発生する両端末の方位センサの誤差は同じため、相対的な位置関係は変化しない。次に、端末 2 が地点③から地点④に向かう場合を見ると、実験での水平方向の移動距離は約 25m であり、実際の距離 34m に比べると短い。

これらの問題はステップの認識の失敗や、磁気センサに対する周囲の環境からのかく乱が原因と考えられる。それを解決するためには、Bluetooth の探索によって相手の端末が見つかった場合に、相対位置を両方の端末で(0,0)に設定すれば良いと考えられる。図 13 に示した赤丸青丸の点が相手の端末が見つかった地点である。しかし、図 13 で端末 1 が地点①から地点②に向かっている時をしてみると、離れている時にもかかわらず相手の端末を発見してしまっている。表 1 の実験結果では 6m 以上離れると、相手の端末を見つけられなくなる結果が得られたが、実際の実験では相手の端末が発

見された。この問題は端末の探索処理の実装方法の問題か、廊下は電波が届きやすい環境であったかは不明である。見つかった場合に相対位置をゼロにする今回の方法では相対位置が常に修正されて、常に同じ場所にいることになってしまう。

この様な結果に至った原因としては、実験環境の問題がある。廊下は移動方向が限られ、長さも約 120m と短いことが挙げられる。この環境は、道幅が 1.9m の直線でカーブは 2 カ所しかなく、分岐がないため、相手の場所を知るという必要がある場所とはいえない。そのため実験環境を分岐が多く、相手の位置が見えない広い場所で行なう必要がある。技術的に考えられる解決手段としては、Bluetooth の電波強度に対して閾値を設定するために歩行しながら電波強度を計測する実験を行なって、一定の電波強度以下だと相手を発見しなかったことにすることが考えられる。端末に実装した Bluetooth 探索を利用するためのプログラムの問題である可能性もあるため、さらにスマートフォンの Bluetooth の探索の処理の流れを OS に近い低レベルで詳細に調査する必要がある。

絶対位置として軌跡を見た時は誤差が大きく見えるが、相対位置の変化としてみれば、一緒に歩いている間は周囲の環境によって同じだけ方位の誤差が生じるため、相対的な位置関係はあまり変化しない。しかし、遠く離れる場合には、Bluetooth による位置の初期化を継続的に行なわないと相対距離の誤差が蓄積して大きくなっていくことになる。

#### 4. おわりに

本研究では、屋内に事前に Wi-Fi などの設備を必要としないで利用できる位置情報サービスの応用例として、スマートフォンを使った個人間の相対位置を求めるためのシステムを提案、実装し、その検証を行なった。

はじめに、デッドレコニングのために必要なステップ認識のパラメータを実験によって求めた。次に、実際に屋内の廊下で、移動軌跡の可視化を行ない、デッドレコニングの精度の評価を行なった。その結果、移動距離の誤差に対して到達地点の誤差が大きく、磁気方位センサの誤差によるものと分かった。次に Bluetooth の電波強度に対する変化を調べた。Bluetooth によって発見された最後の地点を初期座標として、相手端末との相対位置を求める手法を提案した。

今回の学内の廊下という環境では相対位置の図を使って、ある程度相手の相対位置を説明できるような結果が得られたが課題も多く残った。まず、実験環境が測量可能な屋内として学内の廊下を選んだが、検証するための場所としては狭く、移動方向も限られるため、十分に検証したとはいえない。さらに、今回の実験環境では相手が常に発見される環境であったため、Bluetooth 探索によって単純に相手の端末が見つかった

場合に相対位置をゼロにする方法での有効性は得られなかった。

本研究に関連する研究として、常に手に持って移動する状況に限定したが、ポケット内でデッドレコニングを行なう方法も文献 3) 4) 5) で提案されており、それを取り入れた場合の精度についても評価したい。関連研究として、スマートフォンに搭載されたセンサと Wi-Fi による位置推定を組み合わせる環境地図作成を行なう手法が文献 6) で提案されており、地図を使って相手の位置を分かりやすく表示することも考えている。

#### 参考文献

- 1) K. Kloch, P. Lukowicz, Collaborative PDR Localisation with Mobile Phones, 2011 15th Annual International Symposium on Wearable Computers (ISWC), pp.37-40, 2011.
- 2) D. Gusenbauer, C. Isert, J. Kro sche, Self-contained indoor positioning on off-the-shelf mobile devices, Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, pp. 1-9, 2010.
- 3) U. Steinhoff, B. Schiele, Dead reckoning from the pocket - An experimental study, Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2010 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, pp.162-170, 2010.
- 4) U. Blanke, B. Schiele, Sensing Location in the Pocket, Ubicomp 2008 Poster Session, 2008.
- 5) K. Kunze, P. Lukowicz, K. Partridge, B. Begole, Which Way Am I Facing: Inferring Horizontal Device Orientation from an Accelerometer Signal, Wearable Computers, 2009. ISWC '09. International Symposium on Wearable Computers, pp.149-150, 2009.
- 6) H. Shin, Y. Chon, H. Cha, SmartSLAM: Constructing an Indoor Floor Plan using Smartphone, Yonsei University, 2011.