

音波による歩行者自律航法の補正手法の検討

菊地 勇然¹ 稲村 浩² 中村 嘉隆²

概要：スマートフォン等のデバイスの普及により、位置情報サービスが広く利用されている。屋外環境では、GPS 等を用いた位置推定ができるのに対し、屋内では建物の遮蔽などで GPS がうまく機能しない。そのため、屋内に関しては様々な位置推定手法が検討されている。我々は、商業施設等でも導入が進んでいるスマートスピーカの部品の一つであるオムニマイクロフォンアレイを用いた測位デバイスを実現し、スマートフォンに内蔵されたセンサを用いて実装することができる歩行者自律航法を超音波による信号源距離推定により補正する手法を提案してきた。本研究では、信号源距離推定に加えて、信号音の到来方向推定を用いて、歩行者自律航法を用いた際の累積誤差の補正に適用した場合の効果を検証する。

A Compensation Mechanism for Pedestrian Dead Reckoning using Acoustic Signals

TAKENORI KIKUCHI¹ HIROSHI INAMURA² YOSHITAKA NAKAMURA²

1. はじめに

近年、スマートフォン等のデバイスの普及に伴い、位置情報サービスが広く利用されている。屋外環境においては、GPS により位置推定を行うことができるのに対し、屋内環境に関しては、様々な位置推定手法が研究されている。

例えば、Wi-Fi や BLE ビーコンの電波強度を元に三点測位を行う手法やフィンガープリント [1][2] を用いる手法、スマートフォンのセンサを用いた歩行者自律航法 (PDR: Pedestrian Dead Reckoning) [3][4][5][6] といった手法が知られている。しかし、Wi-Fi や BLE ビーコンを用いた単純な手法では、現実の多様な電波伝搬環境に対して、測位精度の低下の恐れがある。また、フィンガープリントを用いる手法では、事前調査の負担が大きい。歩行者自律航法に関しては、歩幅や回転角の誤差が累積してしまうという問題があり、単体の位置推定手法として高い精度を得るのは難しい。一方、超音波を利用した位置推定に関する研究も多く行われている。音速が電波の伝搬速度より遅いことにより、マルチパスの除去が比較的行きやすいということなどがこの手法のメリットとして挙げられる。超音波

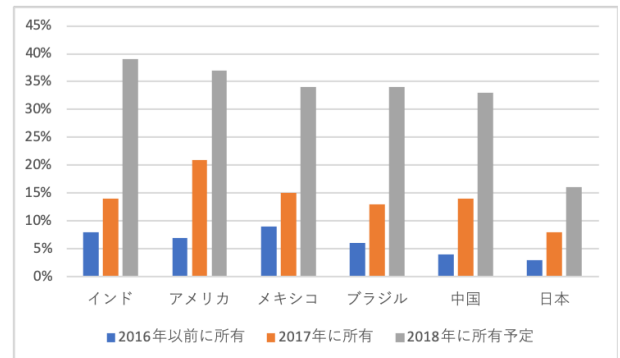


図 1 各国におけるスマートスピーカの所有率の推移

を利用した位置推定手法としては一般に逆 GPS 法 [7][8] が用いられている。しかし、測位の際に常に 4 か所の受信機を必要とするために受信機の設置位置の複雑化や、設置数の増大、超音波送受信のための専用機材の必要性など、コスト面で問題がある。

一方、スマートスピーカーと呼ばれるデバイスの普及が進んでいる。アクセントゥアが各国のスマートスピーカーの所有率の推移についての調査 [9] を行ったものが図 1 である。図 1 を見ると、各国ともに所有率の上昇が見られる。

スマートスピーカーは安価なこともあり宅内のみならず、商業施設での利用例がある。例えば、池袋パルコではエスカレーター付近などにスマートスピーカーを 10 台ほ

¹ 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

² 公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科

ど設置し、目的地の案内に活用している [10]. しかし、このシステムでは、目的地を教示するのみで、利用者への途中経路の道案内は実現されていない。

スマートスピーカーにはオムニマイクロフォンアレイと呼ばれる、全方向に複数のマイクを配置した部品が使われており、音声処理を行うことで指向性を持たせ、フィールドでの音声認識の精度向上に利用されている。

そこで我々はオムニマイクロフォンアレイが安価で一般化しつつあることから有用なセンサデバイスとして着目し、位置推定の高精度化に活用する。

本研究では、スマートフォンに内蔵されたセンサを用いて実装することができる歩行者自律航法を、オムニマイクロフォンアレイを用いた測位デバイスにて音波による補正を行う手法を提案する。

具体的には、信号源距離推定と信号音の到来方向推定を組み合わせ、歩行者自律航法の累積誤差の補正に適用した場合の効果を検討する。

2. 関連研究

2.1 逆 GPS 法による位置推定手法

逆 GPS 法 (図 2) とは、事前に時刻同期されている 4 つの受信機の 3 次元座標と到来時間差から、端末の 3 次元座標を求める手法である。

秋山ら [7] は、超音波を用いた逆 GPS 法を用い、測位エリアの広域化や複数の測位対象を認識するシステムを構築した。

屋良ら [8] は、逆 GPS 法を構成する上での、超音波センサの取り付け誤差による影響、受信機と送信機の後継の寸法による影響、マイコンの水晶発振器の発振誤差による影響に関してシミュレーションを行い、何が原因で測位誤差が発生しているかを検証した。

しかし、3 次元の位置推定における計算において、4 つの受信機からの音声が必要であるため、受信機の設置位置が複雑になることや、超音波を送受信するのに専用の機材を用いていることから、コスト面で問題がある。

2.2 フィンガープリントによる位置推定手法

フィンガープリント (図 3) とは、電波強度や地磁気等のデータを地点ごとに収集し、データベース化したものを参照して位置を推定する手法である。

東ら [1] は、Wi-Fi と地磁気のフィンガープリントを用いた位置推定手法を提案した。この手法では、観測した Wi-Fi アクセスポイントの BSSID 観測状況に応じて、制限したエリア内で地磁気 FP を行った結果と、Wi-Fi FP の信頼度で加重平均することで、安定した精度を得ることができる。

Wu ら [2] は、指紋空間勾配を新たに定義し、隣接する Wi-Fi フィンガープリント間の勾配を用いることにより、

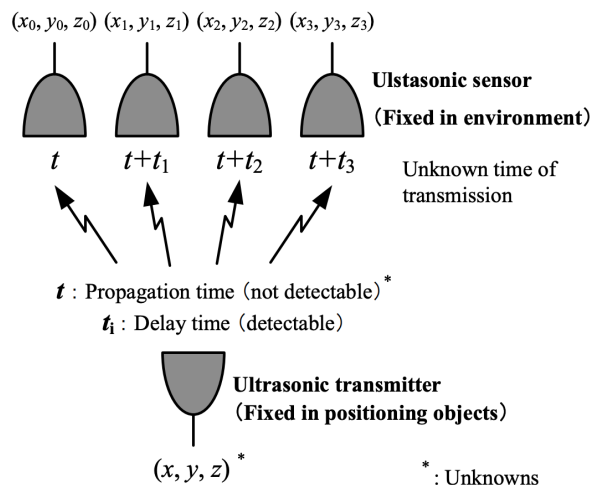


図 2 逆 GPS 法の測位原理 (引用:文献 [7])

外的要因による電波強度の変化から起きる精度誤差を軽減する手法を提案した。この手法は、既存の Wi-Fi フィンガープリントに指紋空間勾配に基づいた加工を行うのみで実現できるというメリットがある。

これらの手法には、比較的高い精度と既存の設備をそのまま利用できるというメリットがあるが、事前に様々な場所での RSSI の計測が必要となり、調査の負担が高い。

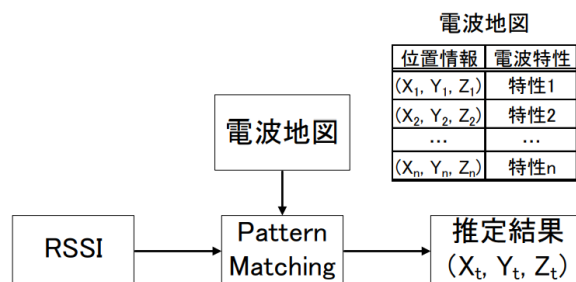


図 3 フィンガープリントの測位原理 (引用:文献 [14])

2.3 歩行者自律航法による位置推定手法

加速度センサやジャイロセンサ等のセンサを用いて、加速度や角速度等から歩行者の歩幅等を推定し、歩行軌跡を算出する手法として歩行者自律航法 (図 4) が知られている。

環境に関係なく、センサを身につけていれば、位置推定ができるため、導入コストは低いが、ジャイロセンサ等のオフセット値により、誤差が累積してしまうというデメリットがある。

Pratama ら [4] は、スマートフォンのセンサを用いてステップを検出し、先行研究で定義されたステップ長を複数パターン比較することで、より実際の歩数・距離に近い形を提案した。

梶ら [5] は、センサのオフセット値による誤差の累積に対し、安定歩行区間という右左折や蛇行をともなわない歩行が一定時間続いている区間を定義し、この範囲内である

ときに、直進していると判定することにより、蛇行を補正した。

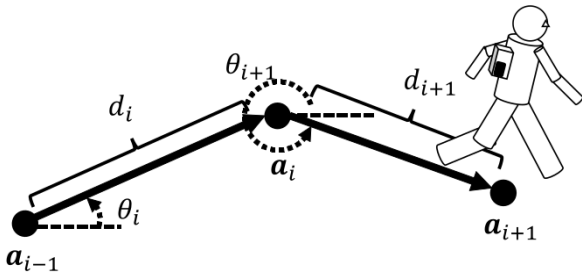


図4 歩行者自律航法の相対位置の検出 (引用:文献 [6])

3. 提案手法

まず、システムの構成について説明する。

3.1 システムの構成

システムの構成は以下になる。

- スマートフォン：歩行者自律航法を用いて得られた座標 $p(x, y)$ を、計算用サーバに送信する。到来方向推定と信号源距離推定のために継続的に音波を送信する。このときの音波は超音波の正弦波と可聴音の自然音を重ね合わせたものを再生する。
- 測位デバイス：オムニマイクロフォンアレイにて音波を受信し、到来方向推定と信号源距離推定の結果からスマートフォンの位置座標 $m(x, y)$ を推定し、計算用サーバへ送信する。位置座標を $a(x, y)$ とする。
- 計算用サーバ：スマートフォンとオムニマイクロフォンアレイから送信された情報により補正した座標をスマートフォンに送信する。

データの受け渡しは図5のようになる。

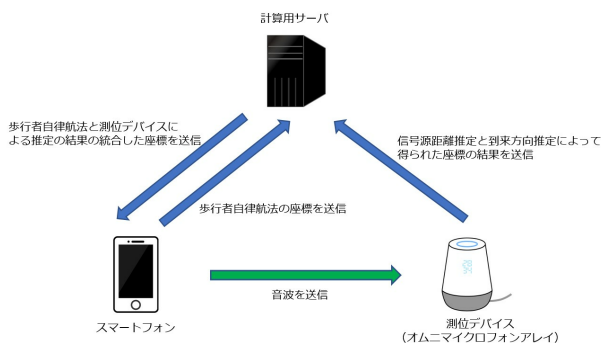


図5 本システム内におけるデータの受け渡し

次に、測位デバイスによる単独の位置推定手法と到来方向推定を用いた歩行者自律航法の補正手法に関して説明する。

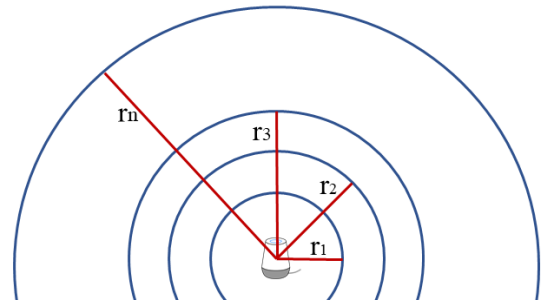


図6 補正位置指定ベクトルに含まれる距離の例

3.2 歩行者自律航法の補正手法

まず、今後の説明を簡便化するために補正位置指定ベクトルを定義する。補正位置指定ベクトル R は、その名の通り歩行者自律航法を補正する位置を指定するものであり、複数回補正を行うために用いる。 r_n は図6のように測位デバイスを中心とする半径を指し、補正位置指定ベクトルは以下ようになる。

$$\text{補正位置指定ベクトル } R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_n] \quad (1)$$

オムニマイクロフォンアレイを用いて、到来方向推定と信号源距離推定を行い、3.1節で述べた要素を用いて、以下のような流れで歩行者が保持するスマートフォンの位置を推定する。

- (1) スマートフォンの位置座標を初期化する。
 - (2) 歩行者は歩行を開始し、歩行者自律航法を用いて自身の位置座標計算を逐次行う。
 - (3) 上で定義したように、複数の距離を含む補正位置指定ベクトル R のうち、いずれかの距離 r [m] を半径とみなした外周円上に端末が到達したことを測位デバイスで確認したときに、到来方向のデータと組み合わせ、円周上のどの位置にいるかを推定する。
 - (4) 到来方向情報の利用可能性は事前に指定されているものとし、以下の2つを選択して用いる。
 - (a) 測位デバイスで信号源距離推定と到来方向推定が利用可能な場合、得た円周上の座標と歩行者自律航法による座標を、測位デバイスの位置座標と結んだ二本の直線のなす角の二等分線と円周の交点を新たな座標として、歩行者自律航法の座標に上書きする。(図7)
 - (b) 測位デバイスで信号源距離推定のみが利用可能な場合、信号源距離推定で得た距離を半径とする円周と、歩行者自律航法による座標を測位デバイスの位置座標と結んだ直線の交点を新たな座標として、歩行者自律航法の座標に上書きする。(図8)
 - (5) 歩行者の移動に従って、補正位置指定ベクトルに含まれるいずれかの指定距離による円に接触するごとに3-4を繰り返す。
- 次に、測位デバイスで用いる到来方向推定や信号源距離

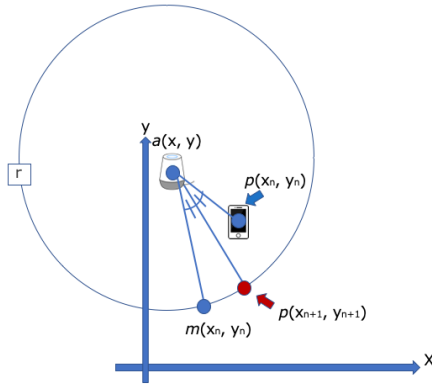


図 7 信号源距離推定と到来方向推定を用いた位置補正手法

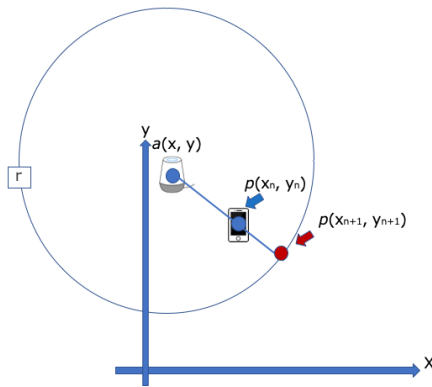


図 8 信号源距離推定のみを用いた位置補正手法

推定，歩行者自律航法の設計に関して述べる。

3.3 到来方向推定

到来方向推定について説明する。今回は，GCC-PHAT 法 [11] を用いる。この手法では，クロススペクトルを振幅で正規化（白色化）し，逆フーリエ変換を行った後に相互相関を取ることによって，単純な相互相関関数と比べ，時間差を強調することができる。式で表すと，以下ようになる。 $Q_{1,2}$ は信号 1・2 のクロススペクトル， W は白色化係数， τ は信号同士の時間差， θ は到来角， s は音速， mi はマイクの間隔を示す。

$$f_{GCC-PHAT} = IDFT[Q_{1,2} \cdot W] \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{|Q_{1,2}|} \quad (3)$$

$$\tau = \operatorname{argmax} f_{GCC-PHAT} \quad (4)$$

$$\theta = \arccos \frac{\tau \cdot s}{mi} \quad (5)$$

この到来方向推定が距離ごとにどの程度の誤差が出るかを確認し，到来方向推定を行うことができるかどうかの基準とするために実験を行った。実験の内容としては，測位

デバイスから 1~10m の距離で 1m ごとに各 3 試行 300 サンプルの到来方向のデータを利用し，一定以上の精度が出ている距離を利用可能な範囲とする。音声には事前に調査した中で最も精度の高かった自然音を使用した。実験を行った場所は，公立はこだて未来大学 3F 教員室裏の通路である。

その結果が表 1 である。1, 2m の距離の際には， 30° 以内の誤差であるが，3~10m の際には $30 \sim 50^\circ$ の誤差が生じている。加えて，角度誤差による距離誤差を示したものが表 2 である。横軸が測位デバイスからの距離で，縦軸が各距離誤差 (1, 2, 3m) が発生する角度誤差を示したものである。表 2 を基準に今回の到来方向推定データを当てはめたものが表 3 である。建築基準法施行令第 119 条で定められている廊下の道幅は最低限 1~3m 必要である。そのため，3m の距離誤差を許容した場合，測位デバイスからの距離が 4m の部分まで 50% を超えている。今回は，後述の信号源距離推定で用いた範囲と照らし合わせ，1, 3m の距離の際に方向による補正を加えることとする。

表 1 到来方向推定による各距離ごとの平均誤差

測位デバイスからの距離 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均誤差 ($^\circ$)	6.79	27.05	40.58	49.46	56.91	33.47	47.14	48.54	48.09	47.00

表 2 角度誤差による各距離の誤差距離の参考データ

	測位デバイスからの距離 (m)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
各距離の誤差が発生する角度 ($^\circ$)	1m	45.00	26.57	18.43	14.04	11.31	9.46	8.13	7.13	6.34	5.71
	2m	63.43	45.00	33.69	26.57	21.80	18.43	15.95	14.04	12.53	11.31
	3m	71.57	56.31	45.00	36.87	30.96	26.57	23.20	20.56	18.43	16.70

表 3 角度誤差による各距離の誤差距離

各距離ごとの誤差が生じる角度に取った割合 (%)	測位デバイスからの距離 (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1m	93.33	58.00	34.67	5.33	5.00	32.33	7.00	9.33	5.00	15.00
2m	93.33	66.00	49.00	14.00	21.33	36.33	12.00	12.00	5.00	15.00
3m	93.67	76.67	70.00	62.33	31.33	36.33	14.00	15.33	12.33	17.67

3.4 信号源距離推定

距離を推定するために音圧を用いる。まず実際に音圧と距離の関係を知るために，ここでは，オムニマイクロフォンアレイから 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20m の距離において，スマートフォンから 20kHz の正弦波を記録した音声を再生し，オムニマイクロフォンアレイを構成する各マイクで受信した音声データをフーリエ変換し，周波数スペクトルを得ることで 20kHz 周辺の音圧を抽出した。実験を行った場所は，公立はこだて未来大学 3F 教員室裏の通路である。

今回，使用したスマートフォンは Apple 社の iPhone 6 である。スピーカーをオムニマイクロフォンアレイに向けるために，スマートフォンの上下を反転した状態で使用した。

オムニマイクロフォンアレイは seed studio 社の「ReSpeaker 4-Mic Array for Raspberry Pi」を「Raspberry Pi

3 Model B+)に接続することで利用した。

各マイクの計測値の平均を音圧の代表値とした。信号源からの距離による音圧の理論値は下の式で求められる。

$$\text{理論値} = (\text{マイクからの距離が 1m の時の音圧}) - \log_{10}(\text{マイクからの距離}) \quad (6)$$

図9に理論値と実際に計測した音圧を示す。過去の我々の研究と条件を揃えるため、7m という距離を補正可能最大距離とし、補正位置指定ベクトルに含まれる最大の値とする。

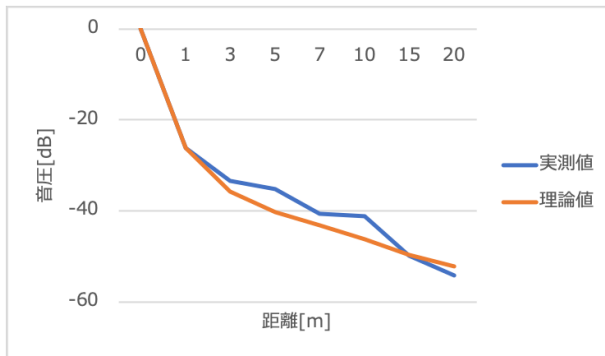


図9 音圧と距離の関係

3.5 歩行者自律航法

歩行者自律航法は、加速度センサ、ジャイロセンサの2つのセンサを用いて歩数、歩幅、進行方向を推定する。歩数と歩幅を求めることで歩行距離を得ることができ、進行方向 θ と合わせることで、歩行開始時を原点としたときの一步毎の位置座標を得ることができる。今回は、スマートフォンの画面が上を向いた状態で保持することとする。

$$\text{歩行距離 (d)} = \text{歩数} \times \text{歩幅} \quad (7)$$

$$\text{歩行開始時からの距離の推定値 (x, y)} = (d \cos \theta, d \sin \theta) \quad (8)$$

3.5.1 歩幅

歩幅に関しては、文献[12]を参考にした。この論文では、琉球大学の学生を対象に身長と歩幅のデータを取り、この二つのデータから重回帰分析を行うことにより、以下の回帰式を求めた。歩幅を $S[m]$ 、身長を $H[m]$ とする。

$$S = 0.26H + 0.31 \quad (9)$$

3.5.2 歩数

歩数に関しては、文献[3][13]を参考にした。まず、3軸加速度センサの計測値を二乗和平方根で合成する。その合成値に閾値を設定し、加速度の合成値が上限の閾値を下から上、下限の閾値を上から下へと2度超えた場合に1歩とカウントする。文献[3]に倣い、上限の閾値を1.1G、下限の閾値を0.95Gとした。

3.5.3 進行方向

進行方向に関しては、文献[6]を参考にした。時間ごとに得られた角速度を加算していくことで計算を行った。単位時間当たりの時間差を $\Delta T[s]$ 、その際の角速度を $\omega [\text{rad/s}]$ とする。

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta T \times \omega \quad (10)$$

4. 評価

提案手法の有効性を示すために、提案手法と信号源距離推定による補正のみの手法とを比較する。実験を行った場所は、公立はこだて未来大学3F 教員室裏であり、50mを歩行した際の累積誤差を比較するものとする。真値として、レーザー距離計であるLeicaの「DISTO D2」を使用した。試行は20回行い、各試行に関して、提案手法による補正と信号源距離推定による補正のみを行ったデータを算出する。

その結果が、表4である。信号源距離推定による補正のみを行った手法に比べ、提案手法では、進行方向において、2cm程度、進行方向と垂直な方向には、26cm程度の誤差低減を得ることができた。

表4 各手法の平均誤差

平均誤差 (m)	補正なし		信号源距離推定による補正		提案手法	
	進行方向	進行方向と垂直	進行方向	進行方向と垂直	進行方向	進行方向と垂直
	9.29	12.52	0.57	1.00	0.55	0.74

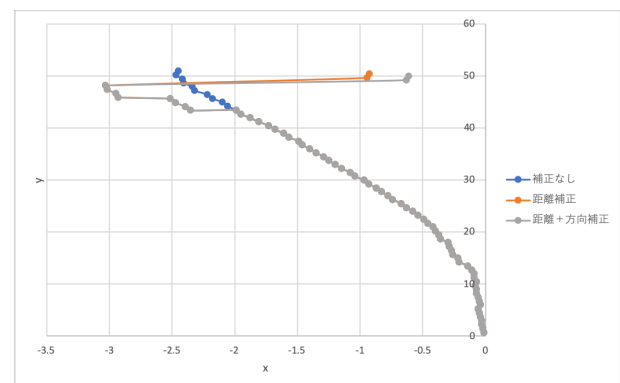


図10 実際に補正を行った例

実際の座標変化の一例を示したものが、図10である。この例では、保持したスマートフォンが若干左に傾いていたことにより、単体の歩行者自律航法では、座標が負の方向にずれていってしまっている。

しかし、1, 5, 7mの距離での補正が行われ、進行方向と垂直な方向への誤差が、信号源距離推定による補正のみの手法、提案手法ともに1m以内の誤差まで引き戻されている。加えて、提案手法においては、信号源距離推定による補正のみの手法に比べ、到来方向の情報が増えたことで、より誤差が低減されていることが確認できる。

以上のことから、本手法は信号源距離推定による補正のみを行う手法より、到来方向の情報を加えた提案手法の方がより精度が高まることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、オムニマイクロフォンアレイを用いた測位デバイスによる信号源距離推定と到来方向推定の値から、歩行者自律航法を補正する手法を提案した。提案手法では、信号源距離推定による補正だけでなく、到来方向推定を組み合わせた補正を行うことで、歩行者自律航法の累積誤差を、進行方向において2cm程度、進行方向と垂直な方向には26cm程度、低減することができた。

6. 今後の展望

今後は、到来方向推定に用いる音声も非可聴域の音声にすることや、個人識別に向けてスマートフォンから再生する音声にデータを乗せること、周囲の雑音を判別し、信号音を持ち上げる機能の追加等が挙げられる。また、今回は一台のオムニマイクロフォンアレイを用いたが、複数台用いることを考えて、効率的な配置に関しても、さらなる考察が必要である。

参考文献

- [1] 東和樹, 新井イスマイル: 相互補完型 wi-fi・地磁気フィンガープリンティング手法の評価, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.2, pp.384-395, 2017.
- [2] Chenshu, Wu., Jingao, Xu., Zheng, Yang., Nicholas, D.Lane. and Zuwei, Yin.: Gain without pain: Accurate wi-based localization using fingerprint spatial gradient, Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol. 1, No. 2, pp. 29:1-29:19, 2017.
- [3] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫: 歩行者自律測位における行動センシング知識の利用, マルチメディア, 分散協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム 2014 論文集, Vol.2014, pp.1614-1619, 2014.
- [4] A, R, Pratama., Widyawan. and R, Hidayat: Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system, 2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), pp.1-6, 2012.
- [5] 梶克彦, 河口信夫: 安定センシング区間検出に基づく3次元歩行軌跡推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 12-24, 2016.
- [6] 星尚志, 藤井雅弘, 羽多野裕之, 伊藤篤, 渡辺裕: スマートフォンを用いた歩行者デッドレコニングのための進行方向推定に関する研究, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp.25-33, 2016.
- [7] 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博: 超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験, 測位航法学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.1-8, 2012.
- [8] 屋良朝克, 五百蔵重典, 田中博: シミュレーションによる超音波測位システムの測位誤差要因の検証, マルチメディア, 分散協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム 2014 論文集, Vol.2014, pp. 30-35, 2014.
- [9] 2018年 アクセンチュア デジタル消費者調査: 入手先 (https://www.accenture.com/jp-ja/_/www.accenture.com/t00010101T000000Z_w_/jp-ja/_acnmedia/PDF-75/Accenture-ACNJPJN-FIX.pdf) (参照 2018-7-29)
- [10] 池袋パルコ、アマゾンエコーで店舗案内 18年4月から: 入手先 (<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO28875450S8A400C1000000/>) (参照 2018-7-29)
- [11] タク暁東, 杉本侑哉, 宮部滋樹, 山田武志, 牧野昭二: 高次モーメント分析に基づく非線形GCCによる高精度到来時間差推定, 日本音響学会秋季研究発表会, pp. 747-750, 2013.
- [12] 翁長謙良, 吉永安俊, 趙廷寧: 身長と歩幅の相関に関する一考察: 学生の歩測の事例から, 琉球大学農学部学術報告, Vol.45, pp.149-155, 1998.
- [13] 津川昌隆, 田中成典, 井上晴可, 嶋吉瞳: 歩数計アプリケーションの開発, 第77回全国大会講演論文集, Vol.2015, pp.775-776, 2015.
- [14] 金丸幸弘, 鈴木秀和, 旭健作, 渡邊晃: 位置推定技術を用いた無線センサネットワーク可視化システムの提案, 研究報告 ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol.2012, No.12, pp. 1-7, 2012.