Vol.2015-MBL-74 No.56
Vol.2015-UBI-45 No.56
2015/3/3

デッドレコニングの高精度化に向けた超音波による歩幅推定法

柏本　幸俊[1]　荒川　豊[1]　安本　慶一[1]

概要：近年，屋内でのナビゲーションアプリなど，歩行中のユーザを対象としたスマートフォンアプリが多数提案されている．これらのアプリでは，GPS 電波が届かない屋内での位置推定手法として，スマートフォンに内蔵した加速度センサやジャイロセンサを用いたデットレコニングが用いられている．高精度な屋内ナビゲーションを実現するためには，このデッドレコニングの高精度化が重要となる．デッドレコニングを高精度化するには，正確なユーザの歩幅推定が必須である．本稿では超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを用いたユーザの歩幅推定法を提案する．提案手法では，ユーザが壁に向かって歩行している時に超音波でユーザの歩行距離を，スマートフォンに内蔵した加速度センサでユーザの歩数を算出し，ユーザの歩幅を推定する．提案手法の有効性を確認するため，提案手法を適用したデッドレコニングを用いて奈良先端大の建物内の通路 (20m) の長さを推定した．実験の結果，既存手法である身長と歩幅の相関を用いた場合，通路長が平均 28.4m（誤差 8.4m）と推定されたのに対し，提案手法を用いた場合は平均 19.8m（誤差 0.2m）と小さい誤差で移動距離を推定できた．

キーワード：屋内位置推定，デッドレコニング，歩幅推定，超音波センサ，スマートフォン

1. はじめに

近年，健康支援や屋内でのナビゲーションアプリケーションなど，歩行中のユーザを対象としたスマートフォンアプリ（以降，アプリ）が多数提案されている．これらのアプリでは，ユーザの位置が重要な情報の一つとなり，GPS 電波が届かない屋内での位置推定手法として，スマートフォンに内蔵された加速度センサやジャイロセンサを用いた慣性航法であるデットレコニング (Dead-Reckoning: DR) が用いられている．高精度な屋内ナビゲーションや的確な位置ベースの情報提供を実現するためには，デッドレコニングの高精度化が重要となる．デッドレコニングでは，ユーザの移動した距離をユーザの歩幅と歩数の積で推定する方法が広く利用されている．ユーザの歩数はスマートフォンの加速度センサの重力方向成分から正確に推定することができるため，正確な歩数推定方法が確立されている [1]．一方で，歩幅に関しては，身長に基づき統計的に歩幅を推定しているものが多い [2][3]．例えば，式 1 を用いて身長より歩幅を簡単に計算できる．

$$d = 0.45 \times h \tag{1}$$

また，文献 [4] では，沖縄の大学生を対象として身長と歩幅の関係を調査し，身長と歩幅の関係を線形回帰を用いて求めている．しかし，いずれの方法でも，身長と歩幅との間には弱い相関しか存在しないため，身長から正確に歩幅を推定するのは困難である．他に，GPS を用いた歩幅推定手法が提案されている [5][6][7]．これらの手法では，ユーザが屋外を歩いている時に GPS を用いてユーザの移動距離を推定し，加速度センサで推定した歩数よりユーザの歩幅を推定する．しかし，GPS 電波のマルチパス等の誤差によって，正確な距離測定が難しい．その上，屋内では GPS を受信できないため，歩幅の推定ができない．また屋外で GPS を用いて歩幅を推定し，屋内でのデッドレコニングに適用することも考えられるが，屋内での歩幅と屋外での歩幅は異なるため (歩行環境が変化するとユーザの歩幅も変化する)[8][9]，屋外で推定した歩幅をそのまま利用することは難しい．そこで，本研究では距離を測定するデバイス（センサガジェット）をスマートフォンに外付し，ユーザの歩幅を正確に推定するアプローチを考える．距離を測定できるセンサには，Kinect[10]，レーザ測距センサ [11]，超音波距離センサ [12] などがある．Kinect はステレオカメラと深度センサを用いて画像処理によって距離を推定できるが，DR のために Kinect を常に持ち歩くのは煩雑であ

[1] 奈良先端科学技術大学院大学

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

る．近年，ProjectTango[13] や iSense[14] のように Kinect 相当のデバイスを内蔵したスマートフォンやポータブルセンサガジェットも開発されているが，現状では，デバイスコストが高い，バッテリの消費が大きいなどの課題が存在する．また，レーザ測距センサもデバイスコストが高いという課題がある．一方，超音波センサは，デバイスコストが低く，かつ正確に距離を推定できる．著者らは文献 [15] においてスマートフォンに MicroUSB で装着可能な小型超音波センサ距離計を開発している．また将来的には，スマートフォンの内蔵スピーカ，マイクを使って指向性の高い超音波の送受信が可能となることも期待できる．以上の理由より，今回は超音波センサを採用する．

本稿では超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを用いてユーザの歩幅を推定する方法を提案する．具体的には，まず，キャリブレーションのための歩行として，ユーザに壁に向かって歩行してもらい，その間に超音波を壁に照射し，ユーザと壁との距離を計測する．次に，ユーザと壁との距離の変化よりユーザの移動距離を算出する．最後に，ユーザの移動距離とスマートフォンに内蔵した加速度センサで推定したユーザの歩数よりユーザの歩幅を推定する．利用シナリオとしては，ユーザがスマートフォンを手に持ちながらインドア向けアプリケーションを利用している状況等を想定する．

予備実験を行い，屋内と屋外で歩幅に大きな差があること，3 歩以上のキャリブレーション歩行により歩幅の正確な推定が可能なことを確認した．さらに，超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを手で持ち，長さ 20m の通路端から反対側の通路端まで歩行する実験を行い，身長と歩幅の相関を用いた方法と提案手法との 2 通りで通路長を推定し比較した．また，ユーザを変えた場合についても調査するため，身長の異なる 3 人のユーザで実験を行った結果，平均で，既存手法では平均 28.4m (誤差 8.4m) となったのに対し，提案手法では平均 19.8m (誤差 0.2m) で正確に推定できた．

以降本稿の構成について述べる．まず，従来の歩幅推定手法についげ説明し，これらの手法の課題を述べる（2 章）．そして本研究で考案した歩幅推定手法と提案手法を考案するために行った予備実験について説明を行い（3 章），提案手法の有効性を検証するために行った実験について述べ，実験結果についての考察を行う (4 章)．最後に本研究をまとめる (5 章)．

2. 関連研究

2.1 身長と歩幅の統計的相関を用いた歩幅の推定

身長と歩幅の統計的相関を用いたユーザの歩幅推定法が提案されている [4]．沖縄の大学生 236 名（男子 190 名，女子 46 名）が大学の運動場で 50m の直線を 10 回，実際に歩行し，歩数を記録した．実験で計測した歩幅と被験者が事前に申告した身長よりユーザの身長と歩幅の相関を統計的に求めている．実験の結果，式 2 で表される相関が存在すると報告されている．

$$Y = 0.26X + 0.31 \tag{2}$$

但し，X をユーザの身長 [m]，Y をユーザの歩幅 [m] とする．しかし，論文中に記載されている，実験で得られた身長と歩幅の分布の相関を表すグラフでは，同じ身長における歩幅の分散が大きく (例：身長 1.7m の被験者の歩幅分布：0.65m∼0.8m)，身長と歩幅の相関が弱い点が課題として挙げられる．

2.2 GPS を用いた歩幅の推定

屋内向けデッドレコニングに向けた GPS による歩幅推定手法が提案されている [6][7]．これら研究では，ユーザが屋外を歩いている時に，スマートフォンに内蔵した GPS でユーザの移動距離を推定し，また加速度センサでユーザの歩数を推定することで，ユーザの歩幅を推定する．そして，推定した歩幅を用いて屋内でのデッドレコニングを行うことを提案している．屋外から屋内に移動した時にユーザの歩幅は変化しないという強い仮定をおいているが，文献 [8][9] より，この仮定は必ずしも成立しない．また，実験では GPS を用いて数 cm 以下の誤差で歩幅を推定できたと記載されているが，この精度を達成できた要因として実験環境がマルチパス等の誤差が少ない正確に距離を推定できる理想的な地域であったことが考えられる．

3. 超音波を用いたユーザの歩幅推定手法

本稿では超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを用いてユーザの歩幅を推定する手法を提案する．提案手法では，まずユーザが屋内で壁に向かって歩いている時に，超音波センサを用いてユーザの歩行距離を推定し，スマートフォンに内蔵した加速度センサでユーザの歩数を推定する．次に推定した歩行距離と歩数からユーザの歩幅を推定する．本手法の適用シナリオとしては，インドアナビゲーションアプリなどを使用している時を想定する．具体的には，ユーザが壁に向かって歩いている時に，本手法を用いてユーザの歩幅を推定し，正確な位置推定・ナビゲーションを実現する．ただし本手法では，文献 [8] の報告に基づき，ユーザは 1 度歩き出すと，ユーザの歩行環境が変化しない限りユーザの歩幅は変化しないという仮定を置く．次節より，提案手法の詳細，および提案手法を考案する上で行った予備実験について詳しく述べる．

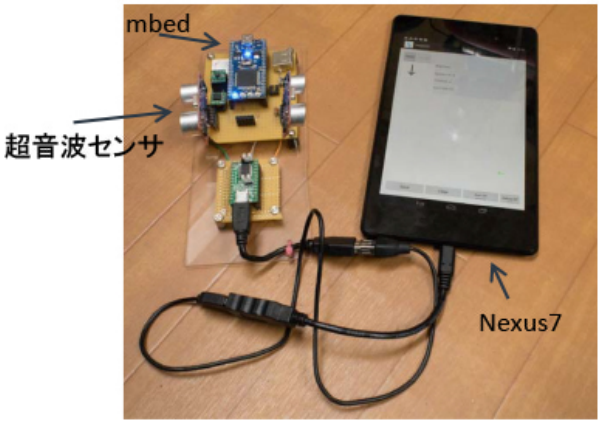

図 1 プロトタイプ

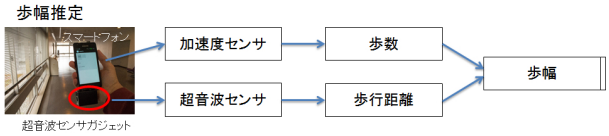

図 2 処理フロー

3.1 超音波センサガジェット

スマートフォンに外付けが可能な超音波センサは市販されていないので，文献 [15] の研究を行った時に開発したプロトタイプ (図 1) を用いることとする．超音波センサガジェットには超音波センサ，超音波センサの制御・距離算出処理を行うマイコン，スマートフォンと通信するための USB インタフェースからなる．ユーザはこの超音波センサガジェットをスマートフォンの USB 端子に接続する．ユーザがアプリを利用するときは，超音波センサを進行方向に向け，ユーザと壁との距離を計測できるようにする．プロトタイプデバイスの制御には mbed（NXP 社製　マイクロコンピュータ）を使用し，超音波距離センサは大阪日本橋共立で販売されている DYPME007v2[16] を用いた．デバイス本体のサイズは 80mm(横)×180mm(縦)×40mm(高さ) であり，重さは 120g で小型軽量である．ユーザの超音波センサのデータを mbed で処理し距離データに変換する．測定した距離データは USB ホストケーブルを経由して Android アプリと通信し，定期的に Android アプリケーションに距離データを送信する．Android アプリ上では超音波センサから取得した距離データとスマートフォンに内蔵した加速度センサから取得したセンサデータより３．２，３．３節で述べた手法を用いて，ユーザの歩幅及びユーザの移動距離を推定する．開発したプロトタイプデバイスには２つの超音波センサを実装しているが，片側のみを使用することとする．

3.2 提案歩幅推定アルゴリズム

歩幅推定の処理フローを図 2 に示す．提案手法では，超音波とスマートフォンに内蔵した加速度センサを用いてユーザの歩幅を推定する．まず，ユーザが壁に向かって歩いている時に，超音波を壁に向かって照射し，ユーザと壁との距離を測定する．測定した距離の変化よりユーザの歩行距離を算出する．同時に，スマートフォンに内蔵した加速度センサでユーザの歩数を推定する．それぞれ推定したユーザの歩行距離と歩数よりユーザの歩幅を推定する．ユーザが壁に向かって歩いている時の超音波センサと加速度センサの出力を図 3 に示す．

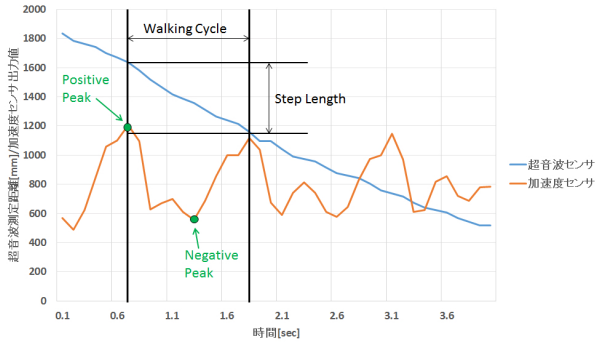

図 3 超音波センサ・加速度センサの出力

超音波センサによる距離は，RTT[sec] と摂氏温度 t[°C] を用いた式 3 によって算出可能である．なお，計算した距離データにローパスフィルタを適用し，雑音成分の除去を行った．

$$d = (331.5 + 0.6t) \times RTT \div 2 \tag{3}$$

サンプリング周波数は 10Hz であった．ユーザが壁に向かって歩いているかの判断は超音波センサが出力するエラーコードをもとに行う．今回用いた超音波センサは距離計測が可能な場合は，超音波で計測した距離を出力するが，超音波を反射する物体が存在しない場合など正常に距離を測定できない場合は，エラーコードを出力する．本手法ではこのエラーコードに基づいてユーザが壁に向かって歩いていると判断できた場合にユーザの歩幅を推定する．

次に，スマートフォンに内蔵した加速度センサを用いてユーザの歩数を推定する．加速度センサを用いたユーザの歩数推定は文献 [1][17][18][19] を参考に実装した．まず，加速度センサの地面に対して鉛直な成分のみを取得し，ローパスフィルタによって雑音成分を除去した．歩行時における加速度の変化は，はじめに上昇し，ピーク（極大値）に達して，次に下降し極小値に達して，初期化速度に戻る．この変化を１歩（１周期）として歩行中は繰り返される．従って，以下の手順に基いてユーザの歩数を推定する．ただし，各閾値は実験的に求めたものである．

(1) 加速度センサの測定値をバッファに順次ストアする

表 1 屋外と屋内における歩幅の差

	最小値	平均値	最大値
屋外	0.65m	0.70m	0.85m
屋内	0.45m	0.50m	0.60m

(2) ストアした加速度センサの時系列データより加速度の極値を推定する．
(3) 極大値が 1.1G 以上，極小値が 0.9G 以下でかつ極値の間隔が 0.5 秒以上のペアを検出する．
(4) (3) で検出したペアの間隔を歩数として出力

そして，最後に推定した移動距離と歩数よりユーザの歩幅を計算する．計算には式 4 を用いた．

$$l_{sl} = d_w / cnt_{step} \tag{4}$$

但し，l_{sl} をユーザの歩幅，d_w をユーザの歩行距離，cnt_{step} をユーザの歩数とする．

3.3 予備実験

3.3.1 屋内と屋外における歩幅の違いに関する調査

目的と方法

本予備実験の目的は，文献 [8][9] に記載されている，屋外と屋内という環境の違いによって，ユーザの歩幅に差が存在するかを確認することである．本予備実験は次の手順で行う．まず，ユーザは 3.1 節で述べた超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを持ち，屋外および屋内環境で壁から約 4m 離れた所に立つ．次に，壁の手前まで 4 ～ 5 歩程度歩行する．超音波センサで推定した距離とスマートフォンに内蔵した加速度センサで推定した歩数より，ユーザの平均歩幅を算出する．最後に屋外と屋内それぞれの環境での平均歩幅の最小値・平均値・最大値を求め，比較する．測定回数はそれぞれの環境で 5 回ずつ測定した．

実験結果と考察

実験結果を表 1 に示す．表は屋外，屋内それぞれの環境でのユーザの平均歩幅の最小値，平均値，最大値を示す．実験結果より，屋内では屋外に比べて歩幅が小さくなることが分かる．原因としては，文献 [8] によると，屋外に比べて屋内は壁などの構造物が存在するため，ユーザの歩行速度が遅くなると考えられる．文献 [9] によると歩行速度が遅くなると歩幅も小さくなる．従って，屋内では屋外に比べて歩幅が小さくなったと考えられる．以上より屋外での歩幅と屋内での歩幅が異なることが分かった．

3.3.2 歩幅推定に用いる歩数と歩幅推定精度との相関に関する調査

実験の目的と方法

本予備実験の目的は，ユーザの歩幅を正確に推定する為に必要な歩数の調査である．本予備実験は次の方法で行う．後述する 4 章の評価実験と同じ方法で，奈良先端大の通路の長さ (20m) を推定する．ただし，ユーザの歩幅推定に用いる歩数を 1 歩～5 歩で変化させ，それぞれの歩数での通路の長さを推定する．歩幅推定に用いたそれぞれの歩数と推定した通路長との関係を調査する．

表 2 歩幅推定に用いた歩数と推定した通路長との関係

歩数	1 歩	2 歩	3 歩	4 歩	5 歩
推定通路長	11.1m	15.4m	21.4m	20.5m	20.3m

図 4 実験環境

実験結果と考察

実験結果を表 2 に示す．表は歩幅推定に用いた歩数とそれぞれの歩数の時に推定した通路の長さを表す．実験結果より，歩幅推定に用いた歩数が 3 歩以上の時に通路長 20m を正確に推定できたことが分かる．本実験結果より 4 章の評価実験で歩幅推定に用いる歩数を 3 歩以上とした．

4. 評価実験

4.1 実験の目的と方法

本評価実験の目的は，3.2 節で述べた歩幅推定方法を用いて，被験者の移動距離を正確に推定できることを確認することである．また，被験者を変えた場合であっても被験者の移動距離を正確に推定できることを確認することである．

本評価実験は，奈良先端大の建物内の通路 (図 4) を用いて行った．被験者は 3.1 節で述べた超音波センサガジェットを装着したスマートフォンを手で持ち，実際に通路の端から反対側の端まで J 字型の軌跡で歩き，3.2 節の方法で推定した歩幅を用いて，通路の長さ (20m) を推定した．具体的には次の手順で行った．

(1) 通路の端から約 4m 離れた場所より，壁に向かって最低 3 歩以上歩く
(2) 壁の前で立ち止まり反転する．

(3) 通路の反対側の端まで，可能な限り直線を維持しながら歩行する．
(4) 通路の手前（約 4m 以内) に到達したら，立ち止まる．

被験者の歩幅推定は，(2) で行うものとする．また，被験者の移動距離は式 5 で推定する．

$$d_c = d_{u1} + d_{u2} + d_w \tag{5}$$

ただし，d_c を推定した通路の距離，d_{u1} を (2) で被験者が立ち止まった時に超音波センサで測定した被験者と壁との距離，d_{u2} を (4) で被験者が立ち止まった時に超音波センサで測定した被験者と壁との距離，d_w を (3) で提案手法を用いて推定した被験者の移動距離とする．d_w は 3.2 節で推定した歩幅とスマートフォンに内蔵した加速度センサを用いたデッドレコニングによって推定する．デッドレコニングによる被験者の移動距離推定には，様々な手法が提案されているが，本手法では式 6 を用いて被験者の移動距離を推定する．

$$d_w = l_{sl} \times cnt_{move} \tag{6}$$

ただし，l_{sl} を被験者の歩幅，cnt_{move} を被験者の歩数とする．被験者の歩数推定アルゴリズムについても，3.2 節で述べた方法を使うものとする．また，既存手法との比較を行うために文献 [4] の手法を用いて被験者の歩幅を算出し，通路の長さを推定する．被験者を変えた時の通路の長さの推定精度について評価するため，身長の異なる 3 人の被験者（1.7m, 1.8m, 2.0m）で実験を行った．計測は各被験者につき 5 回実施した．

4.2 実験結果と考察

実験結果を表 3 に示す．表は既存手法 [2][4]，提案手法を用いて，被験者ごとに推定した距離を示す．ただし，それぞれの距離は 5 回計測時の平均距離とする．また表 4 に被験者ごとの身長，平均歩数，既存手法 [2][4] を用いて推定した歩幅，提案手法を用いて推定した平均歩幅及び推定誤差を示す．実験結果より，提案手法は通路の距離 20m を正確に推定できたことが分かる．

一方で，既存手法 [2][4] を用いた方法では，通路の距離 20m を大幅に超過する距離となった．原因として，2.1 節で述べたように身長と歩幅との間には弱い相関しか存在しないためであると考えられる．また，3.3.1 節の予備実験でも述べたとおり，この推定モデルは屋外で作成したものであるため，今回のように屋内での歩幅推定に適用した場合，誤差が大きくなると考えられる．また，既存手法 [2][4] を用いた場合，身長と歩幅に正の相関がある推定モデルを用いているにもかかわらず，身長と推定誤差の間に正の相関が存在しない．これは，身長が高い被験者は身長が低い被験者に比べて同じ距離を歩いた時の歩数が少ない．そのため，身長と推定誤差の間に正の相関は存在しないと考えられる．

表 3 身長と歩幅の相関を用いた手法と提案手法の比較

	User1	User2	User3
既存手法 [2]	30.4m(10.4m)	29.1m(9.1m)	26.6m(6.6m)
既存手法 [4]	29.8m(9.8m)	26.6m(6.6m)	27.8m(7.8m)
提案手法	19.7m	20.0m	19.8m

表 4 既存手法と提案手法で推定した歩幅

	User1	User2	User3
身長	1.7m	1.8m	2.0m
歩数 (平均)	38	35	27
歩幅 (既存手法 [2])	0.77m	0.81m	0.89m
歩幅 (既存手法 [4])	0.75m	0.78m	0.82m
歩幅 (提案手法 (平均))	0.49m	0.55m	0.69m

5. まとめ

本稿では，超音波ガジェットを装着したスマートフォンを用いた歩幅推定法を提案した．提案手法では，ユーザが壁に向かって歩いている時に，超音波センサガジェットを用いてユーザの歩行距離を，スマートフォンに内蔵した加速度センサを用いてユーザの歩数を算出し，ユーザの歩幅を推定した．提案手法の評価のため，奈良先端大の建物内の通路（長さ 20m）を推定する実験を行った．実験の結果，身長と歩幅の相関を用いた手法を適用した場合通路超を平均 29.8m で推定できたのに対し，提案手法を適用した場合は，通路長を平均 19.7m で正確に推定できた．また，身長の異なる被験者の場合でも，平均 19.8m で正確に推定できた．

今後の予定として，今回提案した手法を屋内ナビゲーションへ応用することを考えている．現在，様々な屋内ナビゲーションアプリが提案されているが，デッドレコニングによる距離推定誤差が大きく，正確にユーザの位置を推定できない．そこで，今回提案した歩幅推定方法を適用することで，正確な位置推定が可能なナビゲーションを開発する予定である．

また，提案手法では超音波センサガジェットを用いてユーザの歩幅推定を行った．しかし理想的には，超音波センサガジェットをスマートフォンに装着しなくても，同様に歩幅推定できる方が望ましい．そこで，スマートフォンに内蔵したマイク・スピーカを用いて距離を推定する手法を考案予定である．

謝辞 本研究は, 戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE:Strategic Information and Communications R&D Promotion Programme) の支援のもと行なった．ここに記して謝意を示す．

参考文献

[1] ３軸加速度センサーアプリケーションノート. https://www.hdk.co.jp/pdf/AP_Note/anhaam04_v1.01.pdf.
[2] 適切な歩幅の計算方法. https://happylifestyle.com/8256.
[3] Wwjj : ウォーキング & ジョギング. http://www.training.co.jp/nf/mWWJJ.html.
[4] 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, dec 1998.
[5] 垣内紀明, 上條俊介. 歩行/走行モードを考慮した携帯端末向け歩行者デッドレコニング (its ポジショニング, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol. 113, No. 163, pp. 31–36, jul 2013.
[6] 三宅孝幸, 新井イスマイル. デッドレコニング開始前のセンサデータを自動学習に用いた屋内歩幅推定手法の検討. 全国大会講演論文集, Vol. 2012, No. 1, pp. 443–445, mar 2012.
[7] 三宅孝幸, 新井イスマイル. 時間帯と同行者の状況変化に追従した歩幅推定手法の提案と評価. 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], Vol. 2013, No. 32, pp. 1–7, mar 2013.
[8] 清田真矢, 松本直司, 渡辺悠司. 5475 街路空間特性と歩行速度の関係：街路空間特性と歩行速度に関する研究 (その 2)(歩行・群集, 建築計画 i). 学術講演梗概集. E-1, 建築計画 I, 各種建物・地域施設, 設計方法, 構法計画, 人間工学, 計画基礎, Vol. 2007, pp. 949–950, jul 2007.
[9] 関屋, 長崎浩, 伊東元, 古名丈人. 416. 正常歩行における歩行速度、歩行率、歩幅の相互関係. 理学療法学, Vol. 21, No. 2, p. 416, apr 1994.
[10] Kinect. http://www.xbox.com/ja-JP/kinect.
[11] レーザ測距センサ leica. http://jp.leica-camera.com/.
[12] 超音波距離センサ. http://www.fa.omron.co.jp/guide/technicalguide/50/26/.
[13] Project tango. https://www.google.com/atap/projecttango/#project.
[14] Cubify isense. http://cubify.com/en/Products/iSense.
[15] 柏本幸俊, 荒川豊, 安本慶一. Yamato:超音波センサガジェット付スマートフォンを活用した屋内フロアマップ作成支援システムの実装と評価. マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム論文集, pp. 1359–1367, July 2014.
[16] 大阪共立デジット blog 超音波センサモジュール. http://blog.digit-parts.com/archives/51763698.html.
[17] Ross Stirling, Jussi Collin, Ken Fyfe, and Gérard Lachapelle. An innovative shoe-mounted pedestrian navigation system. In *proceedings of European navigation conference GNSS*, pp. 110–5, 2003.
[18] B. Krach and P. Roberston. Cascaded estimation architecture for integration of foot-mounted inertial sensors. In *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, pp. 112–119, May 2008.
[19] N. Castaneda and S. Lamy-Perbal. An improved shoe-mounted inertial navigation system. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on*, pp. 1–6, Sept 2010.

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan