

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

柏本 幸俊¹ 荒川 豊¹ 安本 慶一¹

概要：近年，屋内向けナビゲーションの実現が望まれている．本研究では，超音波センサガジェット付きスマートフォンを用いた屋内フロアマップ作成支援システム YAMATO を提案する．YAMATO では，ユーザが超音波センサガジェット付スマートフォンを手で所持し，壁に沿って歩行することで，低コストかつ少ない労力で屋内フロアマップを作成する．また，屋内ナビゲーションに必要なとされる部屋一辺の長さ誤差 10% 以下で屋内フロアマップを作成する．本システムを実現するにあたり，少ない測定回数での正確な部屋のサイズ・形状の推定方法が課題となる．正確な部屋サイズ・形状推定を行う場合，1 つの部屋に対し複数回測定を行い，測定データを単純平均することが考えられる．しかし部屋の一辺の長さ誤差 10% 以下で推定を行うには，1 つの部屋に対し相当回数の計測を行う必要があるため，測定の労力が大きい．そこで，ガウシアンフィルタと補正関数を用いてこの課題を解決する．また，部屋一辺の長さが短い部屋は，歩幅推定誤差の影響によって部屋の長さ誤差 10% 以下を達成できないという課題が存在する．そこで，部屋一辺の長さが短い部屋に対しては，互いに反対向きに実装した超音波センサの測定距離を加算することで，壁から壁までの距離を直接測定することで，この課題を解決した．YAMATO の評価のため，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 A 棟 4 階半分の屋内フロアマップを作成し，評価した．各部屋で 10 回の計測を行い，提案手法を適用した結果，1 部屋を除き平均誤差 10% 以下でフロアマップを作成できた．

Design and Implementation of Floor Plan Generation System using Smart Phone and Ultra Sensor Gadget

KASHIMOTO YUKITOSHI¹ YUTAKA ARAKAWA¹ KEIICHI YASUMOTO¹

1. はじめに

近年，屋内向けナビゲーションの実現が望まれている．大学校舎やオフィスビル等の建物内では目印となるものが少なく，初めてその場所を訪れたユーザは迷いやすく，これらの施設では屋内向けナビゲーションは特に必要である．屋内向けナビゲーションを実現するには，建物内でのユーザの位置を推定する技術（屋内位置推定技術）及び建物内の正確な部屋のサイズ・配置を表す地図（屋内フロアマップ）を作成する技術が必須となる．本研究ではこのうち屋内フロアマップ作成技術に注目する．

屋外マップは Google Maps[1] 等，広く普及しているが，屋内フロアマップが提供されている建物は都市部の大型駅

や商業施設の一部に限られる．これは，屋外マップに比べ屋内フロアマップはマップを作成するためのデータを収集しにくいといった点が原因として挙げられる．屋外マップは航空写真のトレース等によって比較的容易に正確なマップを作成できるのに対し，屋内フロアマップは作成する上で必要なフロアの正確な寸法・配置図を入手しにくい．屋内フロアマップはその建物の施設管理者が建物の測量データを好意で公開している場合は容易に屋内フロアマップを作成できるが，保安上の理由などから公開されない場合がほとんどである．施設管理者が提供しない場合，Open Street Map[2] の様に，意志を持ったユーザが自ら作成する必要がある．できるだけ多くのユーザに屋内フロアマップ作成に参加してもらうには，スマートフォンのような手軽な普及デバイスのみを用いて，できるだけ容易に屋内フ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

ロアマップ作成することが必須である。

そのため、近年ではスマートフォンに内蔵したセンサ（加速度センサ、ジャイロセンサ）を活用し、デッドレコニングを行うことで屋内フロアマップを作成できるスマートフォンアプリが登場している [3]。デッドレコニングとは加速度センサを用いてユーザの移動距離を推定し、ジャイロセンサを用いてユーザの移動方向を推定することで、ユーザの相対的な位置を推定する技術である。このアプリでは、スマートフォンを持って部屋の各壁に1回ずつタッチし、その移動軌跡をデッドレコニングによって推定することで部屋のサイズ・形状を正確に推定する。しかし、歩行軌跡が菱型であることを前提としているため、障害物の影響などによって菱型の歩行軌跡をとれない部屋では部屋のサイズ・形状を推定できないという限界が存在する。また、スマートフォンを用いた屋内フロアマップ作成に関する研究も多数行われている。しかし、正確な屋内フロアマップを作成するのに繰り返し計測が必要なため、多大な労力が必要であるという課題が存在する。スマートフォンのみを用いた屋内フロアマップ作成が難しい原因として、スマートフォン内蔵センサは測量に向いていないことが挙げられる。従って、スマートフォンのみでの屋内フロアマップ作成には限界があることが分かる。

本研究では、超音波センサガジェット付きスマートフォンを用いた屋内フロアマップ作成支援システム YAMATO^{*1} を提案する。ユーザは屋内フロアマップを作成する建物の各部屋で、超音波センサガジェット付スマートフォンを手で所持し、壁に沿って歩行することで各部屋のサイズ・形状を推定する。YAMATO では、ユーザは事前に安価な超音波センサガジェットを購入し、スマートフォンに装着する。YAMATO ではステップ1：各部屋のサイズ・形状推定、ステップ2：各部屋を互いに連結し屋内フロアマップを作成の2ステップで屋内フロアマップを作成する。

部屋のサイズ・形状推定を実現するにあたり、1つの部屋に対して少ない測定回数で正確な部屋のサイズ・形状を推定する方法の開発が課題となる。作成した屋内フロアマップはWiFiを用いた屋内位置推定技術と組み合わせて屋内向けナビゲーションを提供するため、作成する屋内フロアマップの精度は部屋1辺あたりの長さ誤差が10%以下であることが望ましい。部屋1辺の長さ誤差10%以下で部屋サイズ・形状推定を行うには、経験的に1つの部屋に対して相当回数の計測を行う必要があるが、測定の労力が大きい。そこで、ガウシアンフィルタと補正関数を用いてこの課題を解決する。まずガウシアンフィルタを適用し、壁に設置された障害物の影響を除去する。次に、複数の

部屋サイズ・形状データを統合する際に、補正関数を用いた加重平均を行い、少ない測定回数での正確な部屋のサイズ・形状推定を実現する。

また、通路、小部屋などの幅が狭い部屋の場合、歩数が少ないため、歩幅推定誤差の影響により、部屋1辺あたりの長さ誤差10%以下でのサイズ・形状推定が難しいという課題が存在する。そこで、YAMATO では部屋の1辺あたりの長さが超音波センサの測定限界である4.5m以下の時は、両方向に実装した超音波センサによって部屋サイズを推定する手法に切り替えることで、長さ誤差10%以下の部屋サイズ推定を実現する。

YAMATO の評価のため、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 A 棟4階を用いて実験を行った。まず、測定労力を軽減する手法の評価を行うために、通路部分の測定データを用いてモンテカルロ・シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、提案手法を用いなかった場合、部屋の長さ誤差最大10%以下で推定するには、33回の計測が必要であったのに対し、提案手法を用いた場合、9回で推定可能なことを確認した。また、幅が狭い部屋に対して、超音波センサの切り替えを行わなかった場合、部屋の長さ誤差27%であるのに対し、超音波センサの切り替えを行った場合、誤差7.8%で部屋のサイズ推定ができた。また、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 A 棟4階半分の屋内フロアマップを作成し、評価した。各部屋で10回の計測を行い、提案手法を適用した結果、1部屋を除き平均誤差10%以下でフロアマップを作成できた。

2. 関連研究

スマートフォンのみを用いた屋内フロアマップの研究は多数行われている。

2.1 屋内フロアマップ画像による屋内フロアマップの作成

鈴木らは、スマートフォン内蔵カメラを用いた建物構造作成方法を提案している [4]。ここでは、Web 上や施設内の案内板上のフロアマップ画像をユーザが撮影し、フロアの壁の位置を認識し、画像処理を行うことで自動的に屋内フロアマップを作成する。しかし、提供されたフロアマップ画像が簡略化されていた場合、縮尺などが実際と大きく異なるフロアマップが作成される可能性がある。また、画像処理での屋内フロアマップの作成には限界があり、認識できない壁も多い。画像処理によって認識できなかった壁は、ユーザが自ら測定し、修正する必要があるが、煩雑である。

^{*1} Yielding A floor MAP system by a smarT phOne

2.2 複数ユーザの歩行軌跡の共通部分抽出によるフロアマップ作成

スマートフォン内蔵センサを用いたフロアマップ生成手法が幾つか提案されている [5][6][7]。これらの手法は、スマートフォンに内蔵された加速度、地磁気、ジャイロセンサ、及び WiFi 電波強度を用いて、ユーザの軌跡を推定する。推定した複数の軌跡の共通部分を抽出することで、フロアマップを生成する。しかし、フロアマップを作成するのに繰り返し計測を行う必要があり、屋内フロアマップの作成労力が大きいという欠点が存在する。文献 [5] によると、部屋 1 辺あたりの長さ誤差 10% 以下を達成するのに 40 回以上の測定が必要とされている。また、部屋の端に物体が存在する場合など、ユーザが壁に沿って歩くことができなかった場合、正確なフロアマップを生成できないが、そのような問題への対処は考慮されていない。

2.3 スマートフォンのみによるアプローチの限界

スマートフォンのみによる屋内フロアマップ作成が困難である最大の原因は、スマートフォンには部屋のサイズ推定に適した測量センサが内蔵されていないことであると考えられる。以上より、スマートフォンのみでの作成労力の少ない屋内フロアマップ作成には限界があることが分かる。近年、Google Tango プロジェクト [8] のように、スマートフォンに深度センサを搭載しようとする試みもあるが、実験段階であり、まだ利用できない。

3. YAMATO 開発の基本方針

本章では、提案する YAMATO の目的、YAMATO が想定する屋内フロア・部屋の定義について述べる。

3.1 目的

本節では提案システムの目的を述べる。屋内フロアマップはその建物の施設管理者が建物の測量データを好意で公開している場合は容易に屋内フロアマップを作成できるが、保安上の理由などから公開されない場合がほとんどである。施設管理者が提供しない場合、Open Street Map の様に、意志を持ったユーザが自ら作成する必要がある。

意志を持ったユーザにより屋内フロアマップを作成する場合、メジャー等の測量機材を用いて、手作業で屋内フロアマップを作成することが考えられる。しかし、この作業は莫大な時間と手間を必要とするため、ユーザへの負担が大きい。また、屋外と異なり、GPS 等の絶対位置情報が使えない屋内フロアマップの作成作業は熟練した経験が必要であり、屋内フロアマップ作成の経験の乏しいユーザにとっては敷居が高いと考えられる。また、できるだけ多くのユーザに屋内フロアマップ作成に参加してもらうには、

スマートフォンのような手軽な普及デバイスのみを用いて、屋内フロアマップを作成することが必須である。

3.2 YAMATO が想定する屋内フロア・部屋の定義

本節では、YAMATO が想定する屋内フロア・部屋に関して定義する。YAMATO は以下の屋内フロアを想定する。

- フロアの一辺の長さが 50 m 以下であるオフィスビル
- 壁の長さ誤差は 10% 以下
- 壁が直線
- 障害物が部屋の一辺の大部分を被覆しない

まず、YAMATO が想定するフロアのサイズに関して述べる。統計データ [9] より、日本全国での平均的なフロアのサイズは 50m×50m である。このことより、50m×50m を YAMATO によって屋内フロアマップを作成可能な最大フロアサイズとする。

次に、YAMATO が作成する屋内フロアマップの目標精度に関して述べる。YAMATO が作成する屋内フロアマップは、部屋の 1 辺あたりの長さ誤差を 10% 以下とする。YAMATO によって作成する屋内フロアマップは屋内ナビゲーションに使用する。屋内ナビゲーションでの位置推定では一般的に WiFi を用いた屋内位置推定技術を採用している。従って、作成する屋内フロアマップの精度は WiFi を用いた屋内位置推定での誤差 5m 以下となる必要がある。YAMATO が想定するフロアの最大サイズが 50m×50m である為、部屋 1 つあたりの壁の長さ誤差を 10% 以下で作成する必要がある。

また、作成対象となる屋内フロアは、ショッピングモールなどの壁が少ないフロアと、オフィスビル等の壁が多いフロアの 2 種類が考えられる。後者のオフィスビルは各部屋の配置を視認しにくい為、本システムの有用性がより高いと考えられる。したがって、YAMATO はオフィスビルの屋内フロアマップ作成を想定する。

次に、YAMATO が想定する壁の形状に関して述べる。日本の大部分のオフィスの部屋の壁の形状は直線であるため、YAMATO は壁を直線として推定する。

YAMATO は物体とユーザとの距離を測定する超音波センサを利用するため、本棚などの障害物によって超音波がほとんど届かないように壁が覆われている場合は、ユーザと壁の間の正確な距離を測定できない。今回は簡単のため、障害物が壁の大部分を覆っていないことを想定する。

3.3 要件と解決方針

本節では YAMATO を開発する上での要件とその解決方針に関して述べる。3.1 節で述べた目的を達成するためには以下の要件を満たす必要がある。

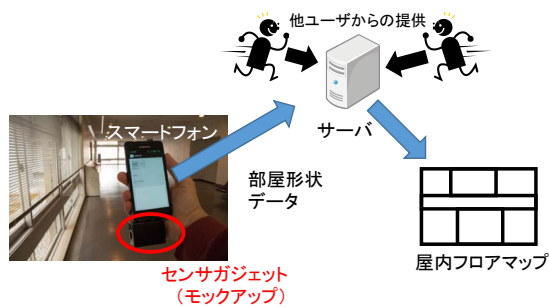


図 1 システム構成

- 《要件 1》 安価なデバイスによる屋内フロアマップ作成
- 《要件 2》 簡単な方法での屋内フロアマップ作成
- 《要件 3》 少ない測定回数で、かつ部屋の一边の長さ誤差 10%以下での屋内フロアマップ作成

まず、《要件 1》を満たすため、YAMATO では普及型デバイスであるスマートフォンを活用する。2.3 節で述べたようにスマートフォン内蔵センサのみでの屋内フロアマップ作成は困難であるため、YAMATO では超音波センサをスマートフォンに外付し（超音波センサガジェット）、超音波センサでユーザの歩行軌跡と壁までの距離を推定することで、この課題を解決する。次に《要件 2》を満たすため、YAMATO ではユーザが部屋の壁にそって歩くことで部屋のサイズ・形状推定を行う。次に、《要件 3》を満たすため、YAMATO では、ガウシアンフィルタと補正関数を用いた加重平均を行う。

4. 提案システム YAMATO の設計

4.1 屋内フロアマップ作成 2 ステップ

3 章で述べた基本方針をふまえ、YAMATO を設計する。提案システムは、屋内フロアマップ作成の意志を持ったユーザを対象とし、ユーザは事前に超音波センサガジェットを購入し、屋内フロアマップ作成用のアプリケーションをスマートフォンにインストールする。ユーザは図 1 の様に超音波センサガジェットを接続したスマートフォンを手で所持する。超音波センサは、図 1 の様にユーザの進行方向に対し、直角に実装する。また超音波センサは 2 つ実装されており、互いに反対を向くように実装する。本システムはクラウド上に置かれる超音波センサガジェット、スマートフォン、サーバ（データベース）から構成する。超音波センサガジェットとスマートフォンを組み合わせることで屋内フロアマップの作成を行う。推定した各部屋の形状や作成した屋内フロアマップをサーバに送信する。また、サーバより他のユーザが推定した各部屋の形状や屋内フロアマップをダウンロードし、他のユーザと協力してより短時間で屋内フロアマップを作成できる。

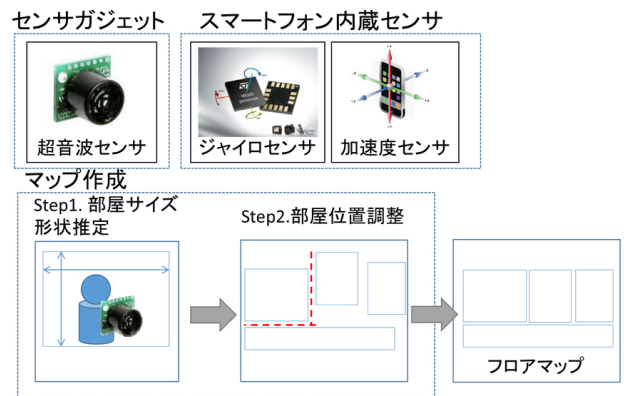


図 2 屋内フロアマップ作成 2 ステップ

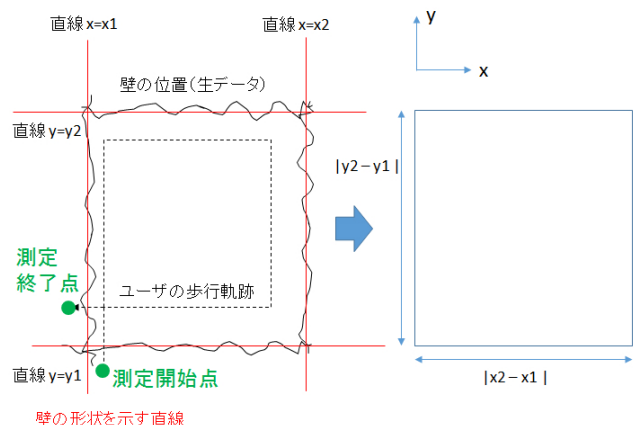


図 3 部屋サイズ・形状推定

次に、フロアマップを作成するまでの大まかな手順について述べる。図 2 に屋内フロアマップ作成を作成する手順を示す。YAMATO は屋内フロアマップを次の 2 ステップで作成する。

- ステップ 1: 部屋サイズ・形状の推定
- ステップ 2: 部屋位置調整

ステップ 1: 部屋サイズ・形状の推定

まずステップ 1 では屋内フロアマップを作成するフロアの各部屋のサイズ・形状の推定を行う。ユーザは超音波センサガジェットを接続したスマートフォンを手で持ち、壁に沿って歩くことで部屋の形状を推定する。ユーザは測定開始点から、部屋の壁に沿って歩行し、再び測定開始点まで戻る。図 3 の様に壁に沿って歩行している時に、片側の超音波センサまたは両側の超音波センサを使用して、ユーザと壁の間の距離を、スマートフォンに内蔵されたセンサによるデッドレコニングによってユーザの移動軌跡を推定する。これらのデータを統合することで壁の位置を推定する。次に、推定した壁位置データを壁ごとに分割する。最後に壁ごとの位置データに対し直線フッティングを適用する ($x = x_1, x = x_2, y = y_1, y = y_2$) ことで部屋のサイズ・形状を推定する ($|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|$)。片側の超音波センサを

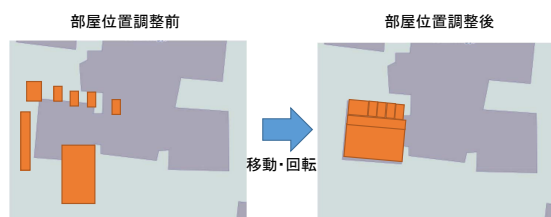


図 4 部屋の位置調整

使用する場合と両側の超音波センサを使用する場合の切替の詳細は 6 章で述べる。これらのセンサデータを統合することで、部屋のサイズ・形状を推定する。また、1つの部屋に対し繰り返し計測し、複数回の測定データを統合することで、より正確な部屋のサイズ・形状推定が可能となる。
ステップ 2: 部屋位置調整

次にステップ 2 では、ステップ 1 で推定した各部屋の位置を調整し、屋内フロアマップを完成させる。処理のイメージを図 4 に示す。ステップ 1 で部屋の位置推定を行っている時に、WiFi 屋内位置測位を用いて、地図上での部屋の大きな位置を取得する。ユーザが各部屋での部屋サイズ・形状推定を完了後、部屋位置調整モードに入る。部屋位置調整モードに入ると、Open Street Map によって建物の外形が表示される。その上に、先ほど推定した各部屋の形状が、大きな位置に配置される。ユーザは、Open Street Map で表示されている建物の外形を参考に、各部屋を適切な位置に移動し、部屋同士を互いにピッタリ密接するように配置する。以上の作業で屋内フロアマップを完成する。

4.2 本論文の範囲

本論文では直近の課題となる“ステップ 1: 部屋サイズ・形状の推定”の実現を目的として、システムの実装、課題の解決を行った。また、今回は簡単のため、サイズ・形状推定を行う部屋を矩形の部屋に限定する。

4.3 ユーザの移動距離及び移動方向の累積誤差の取り扱い

まず、デッドレコニングで移動距離を推定する場合の累積誤差の扱いに関して述べる。ユーザが測定開始点から部屋の壁に沿って 1 周し、再び開始点にもどった時に、デッドレコニングの累積誤差によって、測定開始点と測定終了点との座標が異なる事が想定される。しかし、予備実験を行った結果、部屋のサイズ・形状推定に対する座標の誤差の影響は少ないと分かった。これは、デッドレコニングはある程度短い計測時間であれば正確に位置推定できるという性質によるものである。例えば、20m の通路で実験を行った時の測定開始点と測定終了点との平均距離誤差は 0.3m であったため、十分無視できる。

また、ジャイロセンサによって移動方向（移動角度）を

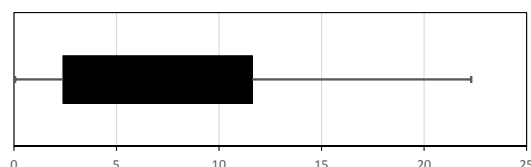


図 5 50 回計測時のデータばらつき

推定する場合、累積誤差によってデッドレコニングと同様に誤差が生じると考えられる。そこで、次の方針で移動方向を推定する。事前に閾値を設定し、角速度値が閾値を超えた時に、曲がったとする。計測終了時まで曲がった回数で、部屋の形を等角多角形として推定する。

5. 少ない測定回数での正確な部屋サイズ推定手法

本章では、部屋サイズ推定精度を向上させる上で重要な誤差補正手法に関して述べる。

5.1 概要

部屋サイズを 10% 以下の距離誤差で推定する場合、1 部屋に対して相当な回数の計測を行い、測定値の平均をとることが必要である。予備実験としてプロトタイプデバイスを実装し、奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 A405 を 50 回計測した。推定した部屋一辺の長さ誤差の分布を図 5 に表す。グラフより誤差は 0.2%~23% の間で分布している。50 回測定したデータに対して単純平均を行うと、9.8% 誤差で目標誤差 10% を達成できる。しかし、本ツールの実用を考えた時、1 つの部屋に対し 50 回測定を行うのは、労力が大きくユーザにとって負担が大きいと考えられる。そこで、今回は簡単のため 10 回の測定で距離誤差 10% 以下を達成することを目的として、アルゴリズムを考案した。10 回程度の測定であればユーザにとっての屋内フロアマップ作成労力は十分小さいと考えられる。

少ない回数での正確な部屋サイズ推定を行う為には、測定時に障害物の影響を除去すること、複数回の測定データを統合するときにより誤差が少ないと考えられるデータを選択することが重要であるという点に着目し、アルゴリズムを構築した。フローチャートを図 6 に示す。まず、各測定で得られるデータに対してガウシアンフィルタを適用することにより、障害物の影響の除去を行う。この方法で 1 部屋に対して 10 回計測を行い、得られたデータに基いて部屋のサイズ・形状データを推定する。次に、10 回分の部屋のデータを統合するとき、補正関数を用いた加重平均を適用する。以下の各節ではガウシアンフィルタによる障害物の影響の除去、補正関数による加重平均の詳細について述べる。

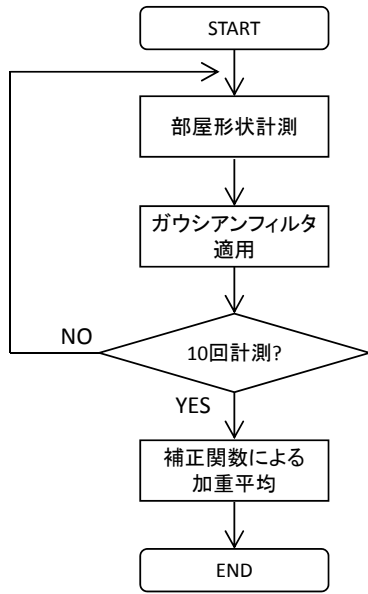


図 6 処理フロー

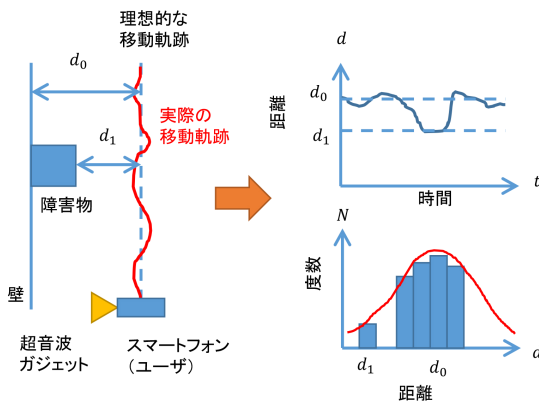


図 7 ガウシアンフィルタによる外れ値の除去原理

5.2 ガウシアンフィルタによる障害物の影響の除去

まず、部屋の計測でガウシアンフィルタを適用し、障害物の影響を除去した後に、壁の長さの推定を行う。原理を図 7 に示す。ユーザがある部屋の壁に沿って一定の距離（例えば d_0 ）を保ちながら歩くとき、理想的には一定の距離 d_0 で計測できると考えられる。しかし現実的には、本棚などの障害物やユーザの姿勢による影響で、様々な計測値が観測されるが、予備実験を行った結果、これらの計測値を度数分布で表すと正規分布に従うことが分かった。そこで、式 1 のガウシアンフィルタを適用し d_0 を推定する。

$$d = \sum_{i=0}^n w_i d_i \quad (1)$$

ただし、 d をユーザと壁の間の推定距離、 w_i をガウシアンフィルタの重み係数、 d_i を超音波センサのサンプリングごとの距離データ、 n をデータ数とする。

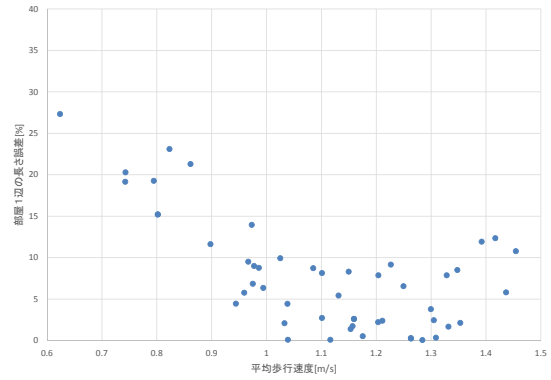


図 8 予備実験の結果

重み w_i は式 2 によって決定する。重みは測定値 d_i と測定値の単純平均 d_m とのユークリッド距離によって決定する。測定値の単純平均とのユークリッド距離が大きい測定値程、外れ値として重みを小さくする。

$$w_i = \frac{p_i}{\sum_{i=0}^n p_i} \quad (2)$$

ただし、重み係数 p_i を式 3 で定義する。

$$p_i = \frac{1}{|d_i - d_m|} \quad (3)$$

また、平均値 d_m を式 4 で定義する。

$$d_m = \frac{\sum_{i=0}^n d_i}{n} \quad (4)$$

以上の方法で、ガウシアンフィルタを適用し、障害物の影響の除去を行う。

5.3 補正関数による加重平均

ある部屋の壁の長さの推定状況を想定する。測定 i で推定した壁の長さを rw_i, rh_i とする。各測定値に付与される重みを q_i とする。つまり、各測定値に対して、誤差が大きいデータに対しては大きな重みを、誤差が小さいデータには小さい重みを付与し、加重平均を行う。

加重平均を式 5 に示す。

$$rw = \sum_{i=0}^n q_i rw_i, rh = \sum_{i=0}^n q_i rh_i, \quad (5)$$

ただし、 rw, rh をそれぞれ部屋の横幅、部屋の縦幅とする。

次に、重みの決定方法に関して述べる。これらの重みはユーザの平均歩行速度 v から決定する。筆者が複数の部屋で 50 回行った予備実験の結果を図 8 に示す。縦軸が実際の壁の長さに対する推定された壁の長さの誤差 $f(v)$ を表し、横軸がユーザの平均歩行速度を表す。この結果を 3 次関数でフッティングしたものを式 6 に示す。

$$f(v) = 123.69v^3 - 279.72v^2 + 128.75v + 36.68 \quad (6)$$

推定された部屋の精度とユーザの平均歩行速度との間に

3 次関数で近似できる関係が存在すると分かった．この理由について考察する．誤差関数 $f(v)$ は本来，式 7 で表されると考えられる．

$$f(v) = \exp(av) + \exp(bv) + c \quad (7)$$

但し， $a > 0$, $b < 0$, c を定数項とする．つまり，この誤差関数は単調増加関数 $\exp(av)$ と単調減少関数 $\exp(bv)$ の重ね合わせであると考えられる．単調増加関数 $\exp(av)$ はユーザの平均歩行速度が上昇することによって，超音波が回折の影響を受けて正確な距離を測定できないことにより，サンプリング数が少なくなるために上昇する誤差と考えられる．一方，単調減少関数 $\exp(bv)$ はユーザの歩行速度が低下することによって，ユーザの歩行軌跡が安定しないこと，また測定に時間を要するため，デッドレコニングの累積誤差が影響していることによる誤差として考えられる．今回は，簡単のため，3 次関数を用いて近似した．また，平均歩行速度は 1 回の計測当たりのユーザの歩行距離および計測に要した時間より求めた．

式 8 の誤差関数より重みを決定する．

$$q_n = \frac{1/f(v_n)}{\sum_{i=0}^n 1/f(v_i)} \quad (8)$$

6. 超音波センサ切替機構

本章では，片側の超音波センサのみを使用して部屋サイズ推定を行う場合と両側のセンサを使用して部屋サイズ推定を行う場合との切替に関して述べる．

予備実験の結果，壁の長さが十分長い部屋の場合は 5 章で述べる手法と組み合わせることで部屋の長さ誤差 10% 以下を達成できるが，壁の長さが短い部屋は達成が難しい事が分かった．これは，壁の長さが短い部屋はユーザの歩数が少なく，歩幅推定の誤差が大きく影響するためである．

そこで，YAMATO では部屋の壁の長さが短い部屋に対しては，部屋の中央付近を歩行し，互いに反対を向くように実装された超音波センサで測定した距離を加算することで，この課題に対処する．採用した超音波センサは最大 4.5m まで測定できる超音波センサである．したがって，壁の長さが 4.5m 以下の部屋に対して本手法を適用する．

7. 評価実験

本章では，YAMATO のプロトタイプデバイスを用いて，実際に屋内フロアマップを作成し性能の評価を行った．

7.1 プロトタイプデバイス

実装したプロトタイプを図 9 に示す．センサボードのデータは USB ケーブルを経由して Android アプリケーションに転送し，Android アプリケーション上で屋内フロ

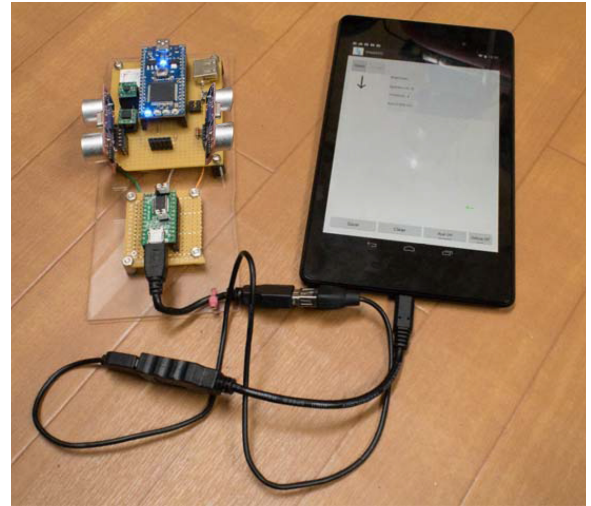


図 9 プロトタイプデバイス

アマップを作成する．

センサボードには，超音波センサが実装されており，NXP 社製 mbed で処理する．センサボードは USB ホストケーブルを経由して Android に接続し，定期的に Android アプリケーションにデータを送信する．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・ジャイロセンサから取得したデータとユーザが事前に入力した歩幅を用いて部屋のサイズ・形状を推定する．また，推定した部屋の形状推定状況は Android アプリ上でリアルタイムにユーザへフィードバックする．ユーザはリアルタイムに表示される推定結果を確認することで，適宜計測をやり直したり，修正することが可能となる．

7.2 少ない測定回数での屋内フロアマップ作成

本実験の目的は，提案手法を用いた場合と用いない場合の部屋の一边あたりの長さの最大誤差を比較し，提案手法の有効性を確認することである．

7.2.1 実験目的と方法

部屋サイズを推定する時は，少ない回数で正確に測定できることが重要である．そこで，本実験では，モンテカルロ・シミュレーションを用いて，提案手法を用いた場合と用いない場合を比較し，評価する．距離誤差を以下の式で定義する．

$$p = 100 \times \frac{|d_e - d_t|}{d_t} \quad (9)$$

但し， p を部屋一边の長さ誤差 (%)， d_e を推定した部屋一边の長さ， d_t を実際の部屋一边の長さとする．

本実験の手順は次の通りである．実験に先立ち，実験に使用する基礎データを収集する．A 棟 4 階の通路を利用して，筆者が 0.5m/s～2.0m/s で歩行速度を変化させ，50 回計測を行った．50 回計測したデータより，通路の長さの

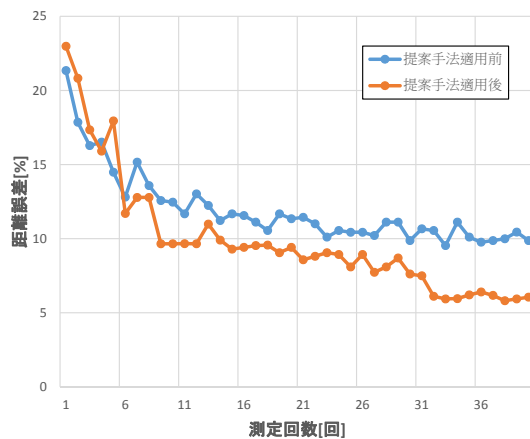


図 10 シミュレーション結果

	5 回測定	10 回測定
提案手法非適用	7.5%	7.4%
提案手法適用	5.2%	4.6%

表 1 平均誤差の比較

推定長と歩行速度をペアにして保存し、データセットを作成した。このデータセットを使ってシミュレーション評価を行った。1 回のみの計測で終了する場合から、2 回、3 回・・・と順番に計測回数を増やし、最大 40 回計測を行う場合までをシミュレーションする。2 回以上の測定で提案手法を用いた場合と用いない場合の長さ誤差を比較する。シミュレーションごとのバラツキを考慮するため、最大長さ誤差と平均長さ誤差の両方で比較する。また、それぞれの測定回数において 50 回ずつモンテカルロ・シミュレーションを行った。

7.2.2 実験結果および考察

実験結果を図 10 に示す。提案手法を用いない場合、測定回数を増加させると、目標誤差 10%以下を達成するために 33 回の計測を必要としている。一方で、提案手法を用いた場合、9 回の測定で、最大誤差 10%以下を達成している。また、5 回測定時と 10 回測定時の平均誤差での比較を表 1 に示す。提案手法を用いない場合、平均誤差 7.1%、7.4%で推定できたが、提案手法を用いた場合、平均誤差 5.2%、4.6%となり、より少ない誤差で推定できることが分かった。

7.3 YAMATO による屋内フロアマップ作成精度の評価

7.3.1 実験目的と方法

提案手法の有効性を確認するため、奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 A 棟 4 階の屋内フロアマップを作成し、検証した。実験では、プロトタイプデバイスを左手に所持し、右手に Android Nexus7 を所持し、壁に沿って歩行した。実際の各部屋のサイズを事前にレーザ測距計



図 11 部屋 B

で測定した。また、壁に沿って歩行する時は、可能な限り壁から 50cm を維持して計測した。ただし、部屋 G の西側等、障害物や歩行経路が確保されていない場所では、壁からの距離 50cm を維持できなかった。部屋形状計測は各部屋につき 10 回ずつ行い、式 9 を用いて推定した部屋のサイズと実際の部屋のサイズを比較した。

7.3.2 実験結果および考察

作成した屋内フロアマップを図 12 に示す。実線が推定した形状、破線が実際の形状である。部屋ごとの部屋一辺の長さ誤差を表 2 に示す。部屋 A、C～F は両方向ともに誤差目標 10%以下で部屋のサイズ推定ができた。目標誤差 10%を超過している部屋 B、G の南北方向の長さ誤差に関して考察する。部屋 B が 10%を超過する原因は、マイコンの処理上の問題による (4.5m まで測定可能な超音波センサであるにもかかわらず、2.0m 以上の距離の正確な測定が不可能)。部屋 B は図 11 に示すような構造のため、計測を行うための部屋を周回する経路では、ついたてによって壁から 2.5m までしか近づくことができなかった。このマイコンのファームウェアの改良は今後の課題である。次に部屋 G の北側の壁には、壁の大部分を被覆する本棚が設置されている。3.1 節でも述べたように、本棚等の障害物が壁の大部分を被覆する場合、超音波が壁まで到達できないため、正確に部屋のサイズを推定できない。以上より、部屋 G の南北方向の長さ誤差は目標 10%を超過したと考えられる。次に、超音波センサの切り替え機構の結果を表 3 に示す。部屋 D、F は両方ともに 4.5m 以下の壁が存在するため、超音波センサの切替を行わない場合、目標誤差 10%を超過するが、切替を行った場合は大きく誤差が改善する。また、歩幅推定の誤差は狭い部屋ほど大きく影響するため、部屋 D よりも狭い部屋 F の方がより改善している。

部屋名	東西方向			南北方向		
	真値	推定値	誤差	真値	推定値	誤差
A	6.3m	5.8m	7.5%	5.9m	5.3m	9.4%
B	3.0m	2.7m	10%	6.4m	3.6m	44%
C	2.7m	2.4m	10%	5.9m	5.5m	6.7%
D	3.0m	2.9m	4.7%	6.4m	6.0m	5.6%
E	3.0m	2.7m	10%	6.4m	6.0m	6.8%
F	22m	20m	7.8%	2.0m	1.9m	5.0%
G	19m	17m	9.4%	9.1m	7.9m	13%

表 2 部屋の一辺の長さ誤差の比較

部屋名	方向	長さ	切替無	切替有
D	東西	3.0m	16%	4.7%
F	南北	2.6m	21%	5.0%

表 3 超音波センサ切替機構の比較

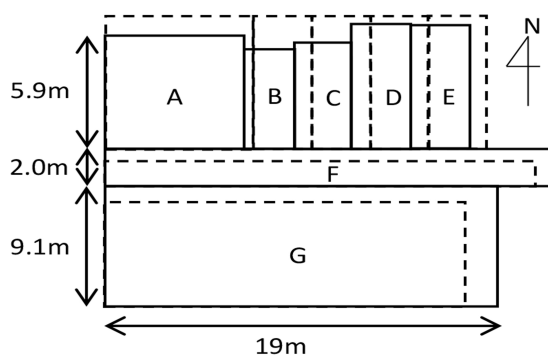


図 12 作成できた屋内フロアマップ

8. まとめ

本研究では、超音波センサガジェット付きスマートフォンを用いた屋内フロアマップ作成支援ツール YAMATO を提案した。YAMATO では、屋内フロアマップを作成する意志をもったユーザが簡単かつ低コストで、屋内ナビゲーションで必要とされる最大距離誤差 10%以下で、屋内フロアマップを作成することを目的とした。そのため、安価で小型の超音波センサガジェットをスマートフォンに付帯し、スマートフォンを手で所持し、壁に沿って歩行することで、容易に屋内フロアマップを作成できるように設計した。

提案システムを実現するにあたり、十分に正確な部屋のサイズ・形状を取得するまでの測定労力を軽減することが課題であった。そこで、ガウシアンフィルタと補正関数を用いてこの課題を解決した。また、壁の長さが短い部屋では、歩幅推定誤差によって壁の長さ誤差 10%以下の達成が

難しいという課題が存在した。そこで、壁の長さが 4.5m 以下の部屋に対しては互いに反対向きに実装した超音波センサを用いて、直接壁から壁までの距離を測定することで、この課題を解決した。

提案システムの評価を行うため、奈良先端科学技術大学院大学 A 棟 4 階を用いて実験を行った。まず、通路を利用して、十分に正確な部屋のサイズ・形状を推定するまでの労力を軽減する手法をモンテカルロ・シミュレーションで評価した。提案手法を用いなかった場合、33 回で目標誤差 10%以下を達成したが、提案手法を用いた場合、9 回の測定で、目標距離誤差 10%を達成した。また、A 棟 4 階半分の屋内フロアマップを作成し、実用上の精度の確認を行った。実験の結果、距離誤差 10%以下での屋内フロアマップ作成を達成でき、YAMATO が想定するフロアのフロアマップを屋内ナビゲーションに必要とされる十分な精度で作成可能であること確認した。

今後は、矩形以外の形状の部屋のサイズ・形状推定技術を開発するとともに、ステップ 2 の実装も行い、屋内フロアマップ作成支援システム全体としての評価を行う予定である。

参考文献

- [1] Google maps. <https://www.google.co.jp/maps/preview>.
- [2] Tech crunch report, cloudmade's openstreetmap surges on wikipedia-like user passion. <http://techcrunch.com/2010/04/17/>.
- [3] Roomscan. <http://locometric.com/>.
- [4] 鈴木友基, 梶克彦, 河口信夫. クラウドソーシングによる屋内構造地図情報の構築と収集. 電子情報通信学会技術研究報告. MoMuC, モバイルマルチメディア通信, Vol. 111, No. 296, pp. 1-6, 2011.
- [5] M.Alzantot and M.Youssef. Crowdinside: automatic construction of indoor floorplans. *Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems(SIGSPATIAL)*, pp. pages 99-108, 2012.
- [6] Yifei Jiang, Yun Xiang, Xin Pan, Kun Li, Qin Lv, Robert P. Dick, Li Shang, and Michael Hannigan. Hallway based automatic indoor floorplan construction using room fingerprints. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13*, pp. 315-324, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [7] Hyojeong Shin, Yohan Chon, and Hojung Cha. Unsupervised construction of an indoor floor plan using a smartphone. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, Vol. 42, No. 6, pp. 889-898, 2012.
- [8] Google tango project. <https://www.google.com/atap/projecttango/>.
- [9] Tokyo statistical yearbook. <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/tn-index.htm>.