

# ユーザ主導で実現する屋内ナビゲーション

菅谷 至寛  
Yoshihiro SUGAYA

先端理工学部知能情報メディア課程 教授  
Professor, Intelligent Media Informatics Course



## 1. はじめに

2022年4月1日に知能情報メディア課程に着任いたしました菅谷至寛です。画像処理、主に画像に関する認識・AI、センサ情報などを利用して、人を助けるための知的な情報システムに関する研究をしています。本解説では、ここ数年私たちが取り組んでいる「人を助ける知能システム」の一つである歩行者ナビゲーションとその関連技術について紹介したいと思います。

## 2. 歩行者ナビゲーション

皆さんは道に迷って困ったことはありませんか。ここ10年でスマートフォンが爆発的に普及し、いつでもどこでも比較的高機能な携帯情報デバイスが使える世の中になりました。それに伴って歩行者ナビゲーションアプリの利用も一般的になってきています。初めて行く場所や不慣れな場所では非常に有用で、手放せない人も少なくないと思います。

Google Map や Apple Map, Yahoo Map などマップアプリの機能の一つとして歩行者ナビゲーションが提供されており広く利用されています。しかし、屋外ではどこでもと言っていいくらい多くの場所で利用可能であるのに対し、屋内では利用できる場所

が非常の限られていることにお気づきでしょうか。屋内ナビゲーションには屋外にはない困難がいくつかあり、現在も盛んに研究開発が行われています。歩行者ナビゲーションに必要な要素が主に二つあり、それは位置推定（測位）技術と電子地図（電子マップ）ですが、屋内ではどちらも問題があります。

屋外における測位手法としては、衛星を利用した測位システム（GNSS: Global Navigation Satellite System）が広く利用されています。一般の方にも名前が良く知られているGPS（Global Positioning System）は実はアメリカが運用するGNSSの固有名で、他にEUのGalileo、ロシアのGLONASS、中国の北斗などがあります。日本でも、日本付近でGPS等を補完する目的で準天頂衛星システム（みちびき）を運用しています。精度は1台の受信機を用いた従来の単独測位でおおよそ十数メートルですが、複数の受信機を用いた相対測位等では数センチメートルまで改善できる場合があります。基本的な機能を持つ受信機は広く普及し、スマートフォンにも内蔵されています。

しかし、一般に屋内では窓際などの限られた場所を除くとGNSSによる測位を実用的な精度で行うことができません。測位のためには4機以上の衛星

からデータを受信する必要がありますが、屋内では天井や壁に遮られて信号の受信が困難なためです。様々な屋内測位手法が提案されていますが、現在のところ屋外での GNSS に相当するような、デファクトスタンダードと言える手法はありません。用途やコスト、適用場所での制約などを考慮して、いろいろな手法の中から慎重に選択する必要があるのが実情です。

電子マップの入手に関しても、屋内マップは屋外マップに比べて容易ではありません。屋外に関しては、Google Map や OpenStreetMap (OSM) 等、有償または無償で電子マップを提供する様々なサービス、企業、団体があります。少なくとも経済や行動の自由のある国と地域では、屋外の電子マップの取得・利用は容易です。しかし、屋内に関してはそのような電子マップの集約・整備があまりなされていません。公共物である屋外の道路と違って、建物には所有者や施設管理者がおり、許可なくマップを作製したり商用利用したりすることはできません。既存の屋内ナビゲーションシステムでは施設管理者からマップの提供を受けたり、施設管理者の協力の下で電子マップを作成したりすることが前提となっています。したがって、歩行者ナビゲーションが提供されるのは、施設管理者側に動機があり、場合によっては施設管理者側がコストを負担する意思があるケースに限られています。Google Map では施設管理者が屋内マップを提供できる仕組みを少なくとも 2012 年には設けています。屋内マップが提供されている施設は増加してきてはいますが、まだまだ限られた場所にとどまっております。一般の人が歩行者ナビゲーションの利用を望むあらゆる施設で電子マップが入手できるには程遠い状況です。

これはきちんと調べたわけではないので一事例に過ぎず一般化はできないのですが、「ショッピングモールの管理者は、利用者に少しは迷ってほしいと思っている」という話を広告関係の企業の方から聞いたことがあります。つまり、利用者がまっすぐ最短経路で目的の店にだけ行くのではなく、多少回り

道をして他の店に立ち寄るチャンスを作ればと良いということです。それに対し、利用者は迷ったときにはどこでもナビゲーションを使いたいと考えるので、利用者と施設管理者の思惑にはギャップがある可能性があります。

### 3. 屋内測位手法

屋内で利用可能な測位手法として、Wi-Fi や Bluetooth などの電波、超音波、光、地磁気、コンピュータビジョン、慣性センサなど様々な手法が提案されています<sup>[1],[2]</sup>。本稿ですべてを網羅することはできませんが、そのごく一部を紹介します。

#### 三辺測量 (Trilateration/Multilateration)

位置がわかっている 3 つの基準点と測位したい点 (デバイス) との距離を何らかの方法でそれぞれ求めると、各基準点を中心とする円が交わる点 (実際には誤差があるので領域) を、測定したいデバイスの位置として推定できます。図 1 で、S1, S2, S3 は位置がわかっている基準点を表し、その中央の点が位置を推定したいデバイスの推定位置です。基準点を増やすと精度を上げることができます。

基準点と測位したいデバイスの距離を測る手法としては、電波などの媒体の受信信号強度 (RSSI):

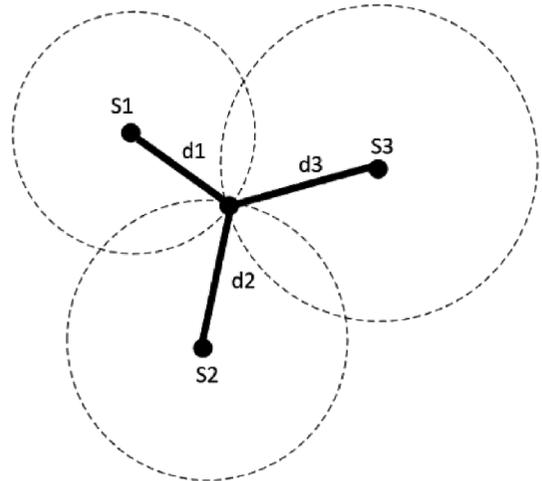


図 1 三篇測量による手法 ([2] より引用)

Received Signal Strength Indicator), 到達時間/飛行時間 (ToA: Time of Arrival, ToF: Time of Flight), 到達時間差 (TDoA: Time Difference of Arrival) などがあり, コストと精度, および必要な前提条件が異なります。

信号媒体として電波を用いる場合, 信号強度は遠くなるにつれて弱くなるため, 電波の伝搬モデルを利用して距離を推定することができます。電波の受信機には信号強度を測る機能が通常備わっているため, RSSI は追加のデバイスなしで常に利用可能で, Wi-Fi や Bluetooth などによく用いられてきました。しかし, 障害物などの影響を大きく受けるので, 非常に誤差が大きく大まかな距離しかわかりません。

信号の伝搬時間を利用すると, より正確な距離を測ることができます。なお, 屋外で用いられる GPS なども伝搬時間の測定を用いた手法の一つです。電磁波を用いる場合, 伝搬時間に光速を掛けると距離になります。ただし, 電磁波は 1 マイクロ秒でおおよそ 300 メートル, 1 ナノ秒でおおよそ 30 センチメートル進むので, ナノ秒精度での時間測定が必要です。追加のハードウェアが必要になるため一般的なスマートフォンでは (GPS 以外では) 利用できませんでしたが, Wi-Fi 電波の伝搬時間に基づく手法が IEEE 802.11 mc (Wi-Fi RTT) として規定され, Android 9 に搭載されました。スマートフォン側のハードウェアに加えてアクセスポイント側の対応も必要で, まだほとんど普及していませんが, 今後の動向が期待されます。

### 信号到来角度の利用

複数のアンテナでの位相差などで信号の到達角度を測定することができます (AoA: Angle of Arrival, AoD: Angle of Departure)。位置のわかっている 2 か所の基準点との角度がわかると, 三角測量によって位置を推定することができます。

Bluetooth 5.1 では方向検知機能がオプションとして追加されました。また, Apple 社の紛失防止タグである AirTag では, UWB (Ultra-Wide Band) 電波

を用いて, 伝搬時間測定による距離推定と到達角度測定を併用して iPhone からの距離と方向を高精度に推定できます。

### Fingerprinting

電波の信号強度などの特性を様々な場所で網羅的にあらかじめ調べておき, 位置に関連付けて記録しておきます。これを fingerprint マップと呼びます。推定時にはその時に観測された信号特性に最も近いものを fingerprint マップから選び出し, その関連付けられた位置を推定位置とします。電波の発信源が一つだけだと同じ信号強度となる地点はたくさんありますが, 複数の発信源からの信号強度を組み合わせたものを特性とすると, 位置を絞り込むことができます。

この手法は Wi-Fi<sup>[3]</sup> や Bluetooth などの電波で良く用いられますが, 地磁気による位置推定手法でも使われます。建物内は鉄鋼などの残留磁場などによって不規則性があるため, これを特性として利用します。

### 慣性センサによる自律航法

スマートフォンには慣性計測ユニット (IMU: Inertial Measurement Unit) が内蔵されています。IMU は加速度を計測する加速度センサと, 角速度を計測するジャイロセンサなどから構成されます。慣性センサではありませんが, 方位センサ (磁気センサ) も含むことがあります。加速度を 2 回積分すると長さ (距離) になり, 角速度を積分すると角度 (方向) の変化を知ることができるはずです。歩行者の場合は Pedestrian Dead Reckoning (PDR) と呼ばれますが, スマートフォンの IMU は精度が低いので垂直方向の動きから 1 歩を検出し, 1 歩ごとに移動方向と距離を推定する手法が多いです。

この手法によって得られるのは相対的な位置の変化なので, 開始点の絶対座標が必要なことに注意してください。また, 長い時間 (経路) を追跡すると誤差が蓄積してズレが大きくなっていくので, 何ら

かの手法によって定期的に絶対位置の補正が必要です。しかし、先に紹介したほとんどの手法が信号を発信する機器の設置や、基準点の位置の取得、fingerprint マップの作製などのインフラや事前データ収集が必要になるのに対し、PDR ではそのような準備が不要で、スマートフォンだけで実現することができます<sup>[4, 5]</sup>。

IMU から得られるセンサ情報はノイズをたくさん含んでおり、時間が経つと誤差が蓄積していくので、カルマンフィルタや粒子フィルタなどの補正手法を併せて用いることが一般的です。粒子フィルタでは、歩行者が通行する可能性をあらかじめ取得したマップから仮定しておくことで精度を改善できます。例えば、人間が壁を通り抜けるような移動することはあり得ないので、そのような推定に対しては尤度を下げます（マップマッチング）。

また、近年は深層学習を利用した手法も提案されています<sup>[6, 7]</sup>。従来手法ではスマートフォンの保持姿勢や歩行姿勢に制約や仮定がありましたが、深層学習によって任意の姿勢での精度が改善されています。

## コンピュータビジョン

近年のコンピュータの高速化、深層学習の発展に伴い多くの手法が提案されています。

カメラ画像を利用した基本的な位置推定手法の一つは、位置に関連付けた画像または画像特徴量を様々な場所で網羅的に取得してデータベースとして蓄えておき、測位時に得られた画像（画像特徴量）とデータベースを照合することで位置を推定する方法です<sup>[8]</sup>。

別の手法として、Visual Odometry (VO) があり、カメラ映像を用いてカメラ（撮影者）の移動軌跡を推定します。単眼カメラではスケール情報が得られないので、IMU など他の手法と組み合わせて用いることがあります。

## 4. 電子マップ

先に述べたように、ナビゲーションを構成するには電子化された地図があらかじめ必要です。推定した現在位置や経路を利用者に提示するために必要なのに加えて、位置推定手法がマップを必要とする場合があります。例えば、PDR で粒子フィルタを用いる場合は、通路の領域が示された電子マップが必要です。また、fingerprinting では fingerprint マップをあらかじめ作成しますが、利用者に提示するマップと位置が対応付けられている必要があります。

既存の屋内ナビゲーションシステムでは、施設管理者から提供された建物の設計図面などから作成するのが一般的ですが、スマートフォンのカメラで撮影しながら歩き回ったり、スマートフォンを持った人々の動きから半自動的に作成する手法も研究されています<sup>[9, 10]</sup>。SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) はそのために利用される技術の一つで、お掃除ロボットなどでも利用されています。

## 5. 案内板を利用したナビゲーション

本稿では屋内での歩行者ナビゲーションと関連する技術について解説してきました。本節では私たちの手法の基本的なアイデアについて簡単に紹介したいと思います。

屋内での位置推定は様々な応用や需要があるため、多くの手法が提案され、精度や利便性も向上してきています。しかし、先に述べたように、屋内ナビゲーションの提供は施設管理者側に提供の意思がある場合に限られ、ごく一部の施設にとどまっています。屋内でも屋外と同じように、利用者が望む時にどこでもナビゲーションが利用できる状況に少しでも近づけるにはどうすればいいでしょうか。私たちは、利用者側の機器だけで屋内の歩行者ナビゲーションを実現できるフレームワーク（図2）を考案し、実際に動作することを実証しました<sup>[11, 12]</sup>。

まず電子マップをどのように入手するかが問題となりますが、掲示されているアナログのマップをス



案内板の写真を撮影・解析 PDRを用いた相対的位置推定  
 図2 案内板を利用した歩行者ナビゲーション

スマートフォンのカメラで撮影して用いることを考えました。駅やショッピングモールの出入り口やエレベータ、エスカレータの近くには、その建物やフロアにどのような店や施設があるのかを示す案内板が掲示されていて、フロアマップが含まれていることがあります。測位もインフラや事前準備なしで行う必要がありますが、先に紹介した PDR がスマートフォンだけで実行できる手法です。Fingerprinting などの他の多くの手法と違って、信号を発信する機器の設置・管理や、測位したい場所での事前データ収集が必要ありません。

アナログマップを利用する試みは従来からありましたが、設計図を基にした線描画されたマップなど、特定の形式のマップなどに限られていました。実際の商業施設などに掲示されている多様な形式のフロアマップを考慮し、実際にナビゲーションが可能なフレームワークを構築したのは、おそらく私たちが初めてです。

### 5.1 フロアマップの解析と理解

撮影したフロアマップはただの画像なので、マップマッチングを含む PDR で用いるには、通路や店などの領域を抽出する必要があります。これは、画像領域分割やセマンティックセグメンテーションと呼ばれる一般的なタスクで、様々な応用があるため古くから多くの研究があります。

フロアマップはイラストなので単調に色分けされており、自然画像と比べて一見簡単そうに思えます。実際、色やエッジを用いた簡単な手法で抽出で

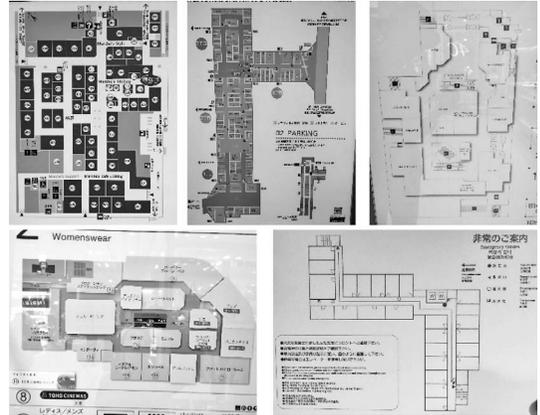


図3 様々なフロアマップ

きるマップもあるのですが、それではうまく行かないケースも数多くあります。問題の一つはノイズが非常に多いことです。フロアマップの表面がアクリル板などで保護されている場合があり、非常に多くの照明などが撮影時に反射して写り込みます。また、説明などがフロアマップ上に書込まれてことがあり、それによる領域の欠損が起こるため、通路領域抽出の観点からはそれも障害になります。さらに大きな問題は、フロアマップの形式が多様なことです(図3)。特に商業施設のフロアマップは、店のコンセプトに合うようにデザイナーによってデザインされた作品でもあります。デザイン性が最優先された結果、人が見てもわかりづらいものも存在します。

私たちの手法では、最初は簡単な領域分割手法と統計的パターン認識を用いていましたが、やはり、対応できるマップの形式に限界がありました。最近では深層学習を導入したことによって、多くのフロアマップで実用的な精度が得られるようになりました<sup>[13]</sup>。

### 5.2 位置推定

すでに述べたように、位置推定には PDR を用いており、フロアマップから抽出した通路領域などの情報を使ってマップマッチングを行っています。しかし、あらかじめ電子マップが用意される場合とは

異なり、撮影したフロアマップは縮尺と方位が不明です。何らかの手法を用いて2点以上で現実空間とマップの対応を取ることで推定できますが、正確ではありません。そのため、粒子フィルタを用いたマップマッチングによる位置の推定・補正と同時に、マップの縮尺と方位も補正するようにしています。また、掲示されたフロアマップは、デフォルメされていて正確ではない場合があることが分かっています。そのような場合にも対応できる手法を検討しています。

マップと現実空間を対応付ける手法としては、最初は利用者自らが画面を2回タップすることを想定していました。しかし、そもそもナビゲーションを必要とする人は自分の位置を正しく把握していない可能性が高く、利用者の負担がとて大きいと言えます。そこで、交差点での利用者の動きによって自動的に対応点を推定する手法や、カメラ画像を用いて大まかな絶対位置を推定する手法<sup>[14]</sup>も研究しています。

図4の左の画像は、駅などでよく見られる天井から吊られた出口などを示す案内板（天吊り案内板）で、右はその付近のマップです。人間は、この二つを見せられると、左の写真が撮影されたマップ上の場所をかなりの割合で当てることができますが、これをコンピュータ（プログラム）で模倣することを考えます。カメラで天吊り案内版を撮影し、書かれている出口番号や方向などの情報を抽出します。それをマップから得られる情報と照合して、可能性が高いマップ上の場所を論理的に推定します。



図4 天吊り案内板画像を利用した大まかな絶対位置推定

## 6. おわりに

本稿では、屋内ナビゲーションの現状と屋内で利用できる位置推定手法を紹介し、施設管理者主導ではなく、ユーザ主導でナビゲーションを実現できる私たちの提案を説明しました。

屋内でのナビゲーションは「人の行動を助ける」という意味で重要で、また、位置推定はビジネス面の需要も数多くあります。これに限らず、物体認識や行動認識、視線推定などの技術を活用して、人の生活を助けるための様々な情報システムを研究開発していきたいと考えています。

### 参考文献

- [1] R. Berna et al., "Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey," *Journal of Sensors*, Vol.2017, 2017
- [2] W. Simões et al., "A Review of Technologies and Techniques for Indoor Navigation Systems for the Visually Impaired," *Sensors*, Vol.20, No.14, 2020
- [3] V. Honkavirta et al., "A comparative survey of wlan location fingerprinting methods," *6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp.243-251, 2009
- [4] P. Dabove, G. Ghinamo, and A. M. Lingua, "Inertial sensors for smartphones navigation," *SpringerPlus*, Vol.4, No.1, p.834, 2015
- [5] W. Kang and Y. Han, "Smartpdr: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 5, pp. 2906-2916, 2015
- [6] S. Herath, H. Yan and Y. Furukawa, "RoNIN: Robust Neural Inertial Navigation in the Wild: Benchmark, Evaluations, & New Methods," *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3146-3152, 2020
- [7] S. Sun, D. Melamed and K. Kitani, "IDOL: Inertial Deep Orientation-estimation & Localization," *AAAI 2021*, 2021
- [8] M. Werner, M. Kessel, and C. Marouane, "Indoor positioning using smartphone camera," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '11)*, 2011

- [9] H. Shin, Y. Chon, and H. 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
- [10] M. M. Elhamshary, M. F. Alzantot and M. Youssef, "Justwalk: A crowdsourcing approach for the automatic construction of indoor floorplans," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018
- [11] K. Tonosaki, Y. Sugaya, T. Miyazaki, S. Omachi, "Indoor Localization by Map Matching Using One Image of Guide Plate," *The Eighth International Conferences on Pervasive Patterns and Applications (PATTERNS 2016)*, pp.22-26, 2016
- [12] K. Tonosaki, Y. Sugaya, T. Miyazaki, S. Omachi, "Improvement of Map Matching for Indoor Navigation Exploiting Photo of Information Board," *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2016)*, 2016
- [13] 大谷, 菅谷, 宮崎, 大町, "マルチタスク学習によるフロアマップ中の通路領域推定と特徴点検出", 第23回 画像の認識・理解シンポジウム, IS 3-3-20, 2020
- [14] Y. Sugaya, K. Takeda, T. Miyazaki and S. Omachi, "A Preliminary Study on Location Estimation without Preparation using Ceiling Signboard," *Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2017)*, 2017

