

測位技術の変遷 ～天文航法から屋内測位まで測位 メディアの観点から～

河口 信夫

NPO 法人 位置情報サービス研究機構 (Lisra)
名古屋大学



航海術, 屋内測位, 自律航法

1. はじめに

「自分が今、どこにいるかを知りたい」「安全に目的地に到達したい」というシンプルな要求を満たすために、さまざまな測位技術の考案・開発が進められてきた。測位技術には、古くは大海を航海する船の位置を得るための天文航法から、衛星を用いた GNSS 測位、そして、最新のセンサフュージョンによる屋内測位まで、さまざまな手法が存在する。GPS の普及と低価格化により、カーナビゲーションシステムに代表される屋外向けの測位技術の利活用はある程度成熟してきた。一方、いつでもどこでもさまざまな情報にアクセス可能なスマートホンの登場と普及により、近年では特に屋内での測位とその利用可能性に注目が集まっている。

本稿では、屋外、屋内の両方の測位技術の変遷を解説するとともに、測位に利用している媒体（音、光、電波、磁界）を測位メディアと呼び、測位手法との組み合わせも含めて紹介する。また、屋内測位の応用サービスについて紹介する。

2. 屋外測位技術

2.1 航海術から発達した測位技術

屋外の測位技術は、主に航海術を中心に発達してきた。最もシンプルな測位技術は、天体計測であろう。太陽などの天体の位置や運行を調べることにより、緯度や経度を測定する技術である。単純化して説明すれば、春分・秋分の日の南中時の太陽高度を計測し、90度から引けば緯度が計算でき、経度が既知な基準点との南中時刻の差を4分ごとに1度の差とすれば経度（基準点からの差）が計算できる。実用的な測位技術としては、六分儀を用いた天測技術が確立しており、航海年鑑 (The Nautical Almanac) などに掲載された赤緯、時角（天体の天球上の位置）の数値情報から現在位置の緯度・経度が計算できる。航海士が習得すべき必須の技術でもある。安全な航海を実現するためのさまざまな航法 (Navigation) を表1にまとめた。天測による天文航法 (Celestial Navigation) は、天候さえ良ければ世界中どこでも利用が可能であり、六分儀による計測精度に依存するが2～3 km程度の測位精度を得ることが

表1 さまざまな航法

| 航法 | 利用情報 | エリア | 精度 | 課題 |
|--------------|--|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| 天文航法 | 天体位置(目視) | 全地球 | 2～3 km | 天候 |
| 地文航法 | 環境情報(目視) (灯台, 地形) | 海図の 範囲 | 場所 依存 | 海図の 必要性 |
| 自律航法 (推測) | 自船の位置 方位, 速度, 時間 | どこ でも | 状況 依存 | 海流 |
| 電波航法 | LORAN-A/C, Decca, Omega/ GPS/GNSS (電波) | 沿岸 1 000～ 2 000 km | 30 m～ 2 km, / 2 cm～10 m | 精度, 運 用コスト |

できる。一方、周囲の灯台や地形の特徴などの環境情報を用いて航海を行う手法を地文航法 (Pilotage) と呼ぶ。これは、環境情報 (海図) を事前に用意する必要があり、周囲に陸地や島のない大海原では利用できない。また、測位精度については、地物を計測する角度によって異なる。

天文航法の補助として利用されているのが、自律航法 (Dead Reckoning) (推測航法とも呼ばれる) である。最後に正しく測位された場所から、どの方位にどの速度で、どれだけの時間移動したか、という情報を用いて、自分の位置を推測する。海流の流れなどの影響を考慮する必要があるため、精度が十分ではない場合もあるが、外部からの情報を全く必要なしに自分の位置を推測することができる。Dead Reckoning という英語の語源は、“deduced (推測)” を省略して “ded reckoning” が、発音がなまって “dead” になった、という説と、自律航法は、何も外部の情報を使わないから “dead” なのだ、というような複数の説がある⁽⁶⁾。電波の利用技術が進展するにつれ、電波を利用した電波航法 (Radio Navigation) が登場している。その一つとして、1940年代から用いられていた無線測位システム LORAN (LOng RAnge Navigation) がある。同様に Decca, Omega と呼ばれる測位システムも存在しており、船舶の位置を求めるために1990年代まで利用されてきた。これらの電波航法は、複数の基地局から発信される電波の時間差や位相差から受信局 (船舶) の位置を双曲線上に定位できるという性質を用いて測位を実現している。電波の伝搬速度は、大気温度や湿度によって変動するため、どうしても精度には限界がある。1990年代には、測位技術の真打として GPS (Global Positioning System)

が登場した。これにより、従来の電波航法のためのシステム LORAN, Decca, Omega は、精度の関係からもほぼその役割を終えている。GPS は約 2 万 km 上空を 12 時間で周回する衛星を 24 機以上用いて運用されており、四つ以上の衛星からの電波を端末で受信して位置を測位することが可能なシステムである。GPS は、船舶、航空機だけでなく、車や携帯電話などにも利用範囲が広がり、現代社会の基盤となりつつある。また、アメリカが運用する GPS だけでなく、ロシアは GLONASS, 中国は北斗 / COMPASS, ヨーロッパは Galileo, インドの IRNSS など、さまざまな国や地域が独自の衛星測位システムを運用しようとしており、これらは GNSS (Global Navigation Satellite System) と総称されている。日本でも、都市部などにおける GPS のカバレッジや精度の向上を目的に準天頂衛星 (QZSS) を 2018 年から本格運用する予定である。近年では、複数の衛星システムを同時に利用して、より高度な測位精度を実現する Multi-GNSS と呼ばれる技術の開発が進められている。

2.2 屋外測位に利用する測位メディア

屋外測位で用いられる測位メディアは、まず、目視のための可視光が挙げられる。天文航法でも、地文航法でも、可視光を用いて基準となる天体や地物を目視して、その位置から現在位置を算出する。一方、自律航法では、外部の情報を利用しないため、メディアは必要としない。航空機等で用いられている自律航法では、慣性航法装置 (Inertial Navigation System : INS) を用いている。INS は、ジャイロセンサや加速度センサなどから得られた値を積分して、自身の姿勢と位置を常に把握可能にしている。電波航法では、当然ながら電波を測位メディアとして利用している。

3. 屋内外のさまざまな測位技術と測位方式

3.1 屋内外における測位技術と利用環境・精度

屋内測位の詳細な紹介を行う前に、屋内外の測位技術に関して解説する。特に既存の測位技術について利用環境と推定精度について説明する (図 1)。2 章の航法の解説でも示したように、測位技術はそれぞれ、有効距離や測位精度といった固有の特徴を有している。また、屋内・屋外のどちらで利用できるか、といった利用環境や、環境側に設備をどの程度設置すべきか、といった設置コスト、運用コストといった違いもある。実際に測位技術を利用するには、このようなことを考慮する必要がある。図 1 では、主に屋内で利用される技術として、超音波、UWB、RFID、磁界、赤外線、IMES、iBeacon などを挙げている。また、屋外で利用される技術として、前章で挙げた LORAN-A/C,

Decca, Omega, GPS などに加え、携帯電話の基地局 ID を利用して測位を行う 3G/GSM を挙げている。屋内外で利用できる技術としては無線 LAN のみを挙げている^{(1)~(2)}。主に屋内で使う技術もちろん屋外でも利用可能であるが、環境への機器設置コストが大きくなることが多く、現実的とは言えない。

3.2 基本的な測位手法

ここで、各技術で用いられる基本的な測位手法を解説しておく。測位を行うためには、位置が既知の基準点からの距離や角度を計測するのが基本となり、これは屋内でも屋外でも変わらない。また、距離や角度を計測するために測位メディアを用いる。しかし、屋内測位では距離を計測せず、特定の ID を受信するだけで、一定のエリアにいることを検知する近接性という手法も存在する。以下個別に解説する (図 2)。

(1) 三点測量 (Lateration) : 測距型

現在地 (E) から 3 か所以上の基準点 A, B, C までの距離 a, b, c を計測し、円の重なりから E の位置を算出する。

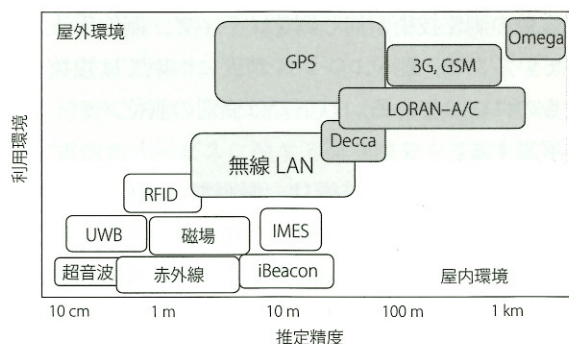


図 1 測位技術の利用環境と推定精度

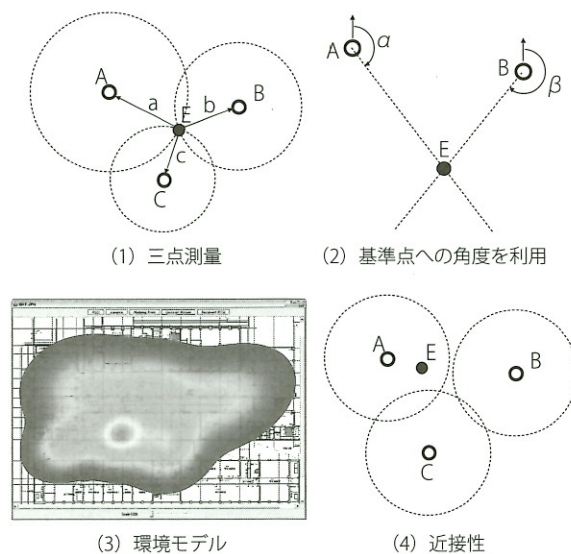


図 2 基本的な測位方式

(2) 基準点への角度を利用 (Angulation) : 角度型
 現在地 (E) から 2 か所以上の基準点 A, B への角度 α , β を計測し, E の位置を算出する。

(3) 環境モデル (Scene Analysis) : 環境モデル型
 対象とする測位メディアの分布を何らかの手法でモデル化し, 確率的に位置を算出する。

(4) 近接性 (Proximity) : ID 型
 基準点からの ID を受信し, 最も信号が強い基準点の近傍にいと推定する。

ここで挙げた測位手法は, あくまで基本的なものであり, 個々の測位技術はこれらの組み合わせや, 他の手法を付与して実現されている。また, 測距型では, 基準点までの距離を推定するために, 測位メディアの伝搬モデルが利用される。音や光では, 主に TOF (Time of Flight) が用いられることが多い。無線 LAN 測位では, 距離減衰モデルを用いて距離を推定していることが多い。

4. 屋内測位技術

4.1 測位メディアに基づく分類

表 2 に, 測位メディアに基づく測位技術の分類を示した。複数の測位技術が同じ測位メディア, 測位手法に分類されているため, 測位レンジや精度については複数を包含したものになっている。以下では個別の測位メディアについて解説する。

超音波を用いる測位技術は, 測距型と ID 型に分類できる。測距型は, 環境側に設置した送信機, もしくは受信機を用いて端末間との距離を計測する。超音波の到達距離は送信パワーによって変化するが 20 ~ 30 m が限界であり, 通常は 5 ~ 10 m で利用する。また, 精度は数 cm を実現することが可能である。ID 型は, 個々の発信機が ID を超音波でエンコードして発信しており, 受信機側でデコード

して利用する。Active Bat⁽⁷⁾ などの活用事例がある。また, 最近では, スマートホンのマイクでも受信が可能であるため, 特別なセンサを必要としない位置推定手法として, O2O (Online to Offline) のマーケティングなどで利用され始めている。

超音波とほぼ同じ構成で利用される測位メディアが, 赤外線である。赤外線も測距型と ID 型が主に使われる。測距型では, TOF を利用した測位がなされ数 cm の精度を得ることができる。ID 型は, 超音波と同じように ID コーディングされた赤外光を発信する。受信機が環境側に設置され, 端末側から赤外光を発信する機会が多い。事例としては, Active Badge⁽⁸⁾ がある。

また, 可視光を利用した測位も, 目視で利用する角度型を特例として, 基本的には ID 型が利用される。照明に埋め込んで利用できる ID 発信装置が登場しているが, 受信側が専用の光センサが必要な点で普及が難しい。

超音波も赤外線, 可視光線も, 壁を通過しないため, 部屋ごとの測位のミスがないのが特徴であり, エリア管理が容易である。逆に測位レンジが狭いため, 広い場所で運用するためには設置・運用コストが高くなるという問題がある。

電波を用いた測位技術は, 短距離から遠距離までさまざま提案されているが, ここでは屋内測位技術に特化して説明する。UWB (UltraWideBand) は, 数 GHz の超広帯域を利用した測位技術である。UWB は, パルス性が高く, 直線性が高いため, 測距型の測位に適している。一般には, 複数の受信局を配置し, 移動端末が発する UWB のパルス波を受信して TOF により, 測位を行う。日本では 2014 年までこの周波数帯の利用の許可が下りておらず実用できなかったが, 海外ではすでに商品化がなされている (UbiSense など)。

環境モデル型の計測は, 無線 LAN 測位で用いられる⁽³⁾。屋内測位を行いたい環境において事前に電波環境を計測し, 電波の環境モデルの構築を行う。図 2 (3) に示されるように, 各基地局ごとに GMM (Gaussian Mixture Model) を構築する。生の計測データに比べて GMM のデータは 1/2000 のサイズになるため, 計算効率の向上や保存領域の削減が実現でき

表 2 測位メディアに基づいて整理した屋内外の測位技術

| 測位メディア | 周波数帯 | 波長 | 伝播速度 | 測位手法 | 測位レンジ | 精度 | 測位メディア利用のされ方と特徴 |
|--------|-------------------|--------------------|----------|--------|---------|--------------|--|
| 超音波 | 20 kHz ~ 40 kHz | 0.8 ~ 1.7 cm | 340 m/s | 測距型 | ~ 30 m | 3 ~ 30 cm | 音波の到達時間差等により距離を計測し, 測位 |
| | | | | ID 型 | ~ 30 m | 5 m ~ 30 m | 送信機の ID から位置 (エリア) を推定 (Active Bat) |
| | | | | 測距型 | ~ 数 km | 30 cm ~ 数 km | 電波の到達時間差を利用し測位 LORAN, Decca, Omega, GPS, UWB |
| 電波 | 10 kHz ~ 5 GHz | 30 m ~ 6 cm | 300 km/s | 環境モデル型 | ~ 200 m | 3 m ~ 20 m | 無線 LAN 測位では, 事前に環境計測を行い, 事前のモデルに最も近い場所を測位結果とする |
| | | | | ID 型 | ~ 200 m | 10 ~ 200 m | 送信機の ID から位置 (エリア) を推定。iBeacon, IMES, RFID, WiFi Proximity |
| | | | | 測距型 | ~ 30 m | 2 ~ 10 cm | 赤外線を投射し, その反射時間から距離を測定 |
| 赤外線 | 3 THz ~ 385 THz | 0.7 μ m ~ 1 mm | 300 km/s | ID 型 | ~ 30 m | ~ 30 m | ID をエンコードした赤外線を投射 (Active Batch) |
| 可視光 | 385 THz ~ 790 THz | 380 nm ~ 780 nm | 300 km/s | ID 型 | ~ 20 m | ~ 20 m | 電灯等の光に ID を重畳して送信。 |
| | | | | 角度型 | ~ 数十 km | ~ 数 100 m | 複数の基準点への角度を計測 |
| 磁場 | — | — | 300 km/s | 環境モデル型 | — | ~ 10 m | 磁場をモデル化, 単独では利用できない |

ている。無線 LAN 測位では、基地局の設置方法によっては、最高で 3 m 程度の精度が得られる場合もあるが、基本的には 10 m 程度と考えるのが良い。また、電波環境は不安定であるため、無線 LAN 測位だけで十分とは言えない。

電波における ID 型は、無線 LAN, RFID, IMES, iBeacon などが存在する。無線 LAN は、MAC アドレスを ID として、最も強い電波の基地局の近接性で判断する場合や、複数の基地局からの電波で測距型の位置推定を行う場合もある。RFID は、数 mm から数 m 程度まで離れた専用の無線 ID を検知する仕組みである。マラソンランナーのトラッキングなどで利用されている。IMES (Indoor Messaging System) は、屋内での GPS 受信機の利用の検討から生まれた仕組みであり、GPS 受信機によって、通常とは違う PRN 番号を受信し、その PRN 番号に対応する位置を推定する、という仕組みである。また、最近では、Bluetooth 4.0 から導入された BLE (Bluetooth Low Energy) が注目されている。Apple が iOS7 から導入した iBeacon は、スマートホンの OS が採用する ID 型の測位であり、バックグラウンドでのビーコン取得が可能であるため、広く利用が進んでいる。

4.2 複数の測位メディアを用いた屋内測位技術

ここまで紹介した屋内測位技術は単一の測位メディアしか利用していないが、ここからは、複数の測位メディアを利用する手法を紹介する。

屋内向けの測位メディアとして磁界の利用が注目されて

いる。磁界は、地球上には地磁気が一定に存在していると思われているが、実は、建築用の鉄骨などに残る磁界 (残留磁界) が建物ごとに特徴的なパターンを構築していることが分かってきた。筆者らは、これを無線 LAN と同様にモデル化し、他の無線 LAN 測位や、PDR (Pedestrian Dead Recogning) などと組み合わせて測位に利用する手法を提案している⁽⁵⁾。

4.3 屋内位置情報サービスの実現にむけて

公共施設や大規模ショッピングモールなどの屋内で自分の位置が把握できるようになる時代がすぐそこまできている。しかし、このような技術が完成しても、その上に適切なサービスが構築されなければ、意味がない。筆者らは、NPO Lisra と連携してさまざまなサービス構築の試作を進めている。特に「スマートステーションなごや」プロジェクトでは、名古屋駅の情報化・スマート化を目指し、位置把握、3次元地区構築、空間音声ナビゲーション、クラウドソーシングなど技術開発を進めている⁽⁹⁾。

5. おわりに

本稿では、測位技術を、屋外測位に関しては航法の観点から、屋内測位に関しては測位メディアの観点から概説した。屋内位置情報サービスは今後広く普及することが期待される分野であり、ぜひ注目されたい。筆者らも NPO として位置情報サービスに関する研究開発を支援していく予定であり、興味ある諸氏はぜひ入会されたい⁽¹⁰⁾。

文 献

- (1) 伊藤誠悟・吉田廣志・河口信夫:「無線 LAN を用いた広域な位置情報システムに関する検討」, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.3124-3136 (2006)
- (2) 河口信夫:「Locky.jp: 無線 LAN を用いた位置情報ポータルとその応用」, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.10, No.1, pp.15-20 (2008)
- (3) 藤田迪・梶克彦・河口信夫:「Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法」, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.1069-1081 (2011)
- (4) 梶克彦・河口信夫:「indoor.Locky: UGC を利用した無線 LAN 屋内位置情報基盤」, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.12, pp.3263-3273 (2011)
- (5) 坂涼司・梶克彦・河口信夫:「磁気と WiFi 電波強度を含んだマップ情報に歩行者デッドレコニングを併用した屋内位置推定手法」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.113, No.399, pp.23-28 (2014)
- (6) 自律測位の由来, <http://www.straghtdope.com/mailbag/mdeadrecoing.html> (2014/9 訪問)
- (7) M. Addlessee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward, and A. Hopper: "Implementing a sentient computing system", Computer, Vol.34, No.8, pp.50-56 (2001)
- (8) R. Want et al.: "The Active Badge Location System", ACM Trans. Information Systems, pp.91-102 (1992)
- (9) 河口信夫:「スマートステーションを実現する次世代屋内位置情報サービス」, 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿集, JS-3, pp.1-2 (2013).
- (10) NPO 法人位置情報サービス研究機構 Lisra ホームページ, <http://lisra.jp>



河口 信夫

かわくち・のぶお (正員)

名古屋大学大学院工学研究科卒業。名古屋大学助手・准教授等を經て 2009 年より名古屋大学教授。専門は位置情報サービス、ユビキタス・コンピューティング、行動センシングなど。大学発ベンチャーに加え、行動センシングのためのデータ収集コンソーシアム HASC や位置情報サービスのための NPO 法人 Lisra を設立し、先端的な情報技術の実社会への適用を目指し、オープンデータの活用なども含めたさまざまな活動を推進している。情報処理学会、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、IEEE、ACM 各会員。博士(工学)。