

人の動線推定に関する研究開発（第2報）

— パーティクルフィルタを用いたマップマッチング —

山田 俊郎, 渡辺 博己, 棚橋 英樹

A study on a human tracking (2nd report)

- A map matching technology by using particle filter -

Toshio Yamada, Hiroki Watanabe, Hideki Tanahashi

あらまし スーパーマーケット等の大型量販店を利用する買い物客の行動履歴を得るため、ショッピングカートを利用した位置計測システムを構築している。これまでに、光学マウスと方位センサをカートに取り付け、デッドレコニングによる測位を試みたが、蓄積するセンサの誤差によって十分な測位結果を得ることができなかった。特に、方位センサの誤差は小さな誤差であっても位置精度に大きく影響するため、センサデータ以外の情報を用いて誤差を補正する必要がある。本報では、店内配置マップによって移動可能エリアに制限を設け、パーティクルフィルタを用いた推定アルゴリズムで位置を補正する手法について報告する。

キーワード 動線推定, 測位技術, デッドレコニング, パーティクルフィルタ

1. はじめに

大型量販店における買い物客の回遊行動データは、商品の配置や売り場への集客など、店舗設計を評価する指標として有用であるが、現状のデータ取得は尾行調査に依存しており、データ取得の自動化が求められている。また、回遊行動データは、買い物客のナビゲーションサービスなど、買い物客に対して新たな情報サービスを提供するための基礎データとしての活用も期待されている。

このように、買い物客の位置情報に対するニーズは高いものの、屋内測位においては屋外でのGPS測位のような標準化された測位手段は確立されていない。測位対象とする範囲、必要とする位置精度、インフラの有無、システムコストなどの条件に応じてさまざまな技術が提案されている。我々は、大型量販店において多くの買い物客が利用するショッピングカートの位置を買い物客の位置とみなして、カートに取り付ける測位システムの開発を行っている。

前年度の研究開発では、スーパーマーケットにおける買い物客測位に求められる諸条件（測位精度、システム要件など）を明らかにして、カートを用いた測位システムを提案した。提案システムは移動量検出に光学マウスを、方位検出に地磁気センサを用いたデッドレコニング（移動体が持つセンサのみで位置・姿勢を推定する手法）による測位システムであり、インフラを必要とせずに安価に実現できる特徴がある（図1）。光学マウスを用いた移動量検出は、20mの移動に対して測定誤差の標準偏差が

50cm(2.5%)以下であり、スーパーマーケットにおいて商品棚の1本1本が識別できる程度の測位が実現できることが確認できた。しかしながら、地磁気センサによる方位角情報は誤差が大きく、センサデータのみで得られる動線情報は実用に堪えるものではなかった。

本報では、マップマッチングとパーティクルフィルタを用いて、センサデータによって得られる移動ベクトルを補正し、より精度の高い動線推定ができる技術について報告する。

2. デッドレコニングによる動線推定

地磁気センサは空間中の磁力の方向から地球の磁極方向を推定するものであり、空間中に磁極方向の磁場のみ



図1 センサつきショッピングカート

が存在する場合に正しい方位を示す。しかし、屋内環境においては、電力線からの電磁誘導や鉄製構造物の残留磁気が磁場を形成し、方位推定を乱す原因となっている。

研究室内でカートを移動し、センサデータ（マウスカウントと地磁気センサによる方位）から得られる移動ベクトルの軌跡を図2に示す。移動軌跡は平面図右上の丸から左方向に向かって移動しており、細い黒色の線がセンサデータによる推定経路を、太めのグレーの線が実際の移動経路を示している。方位センサはスタート地点でキャリブレーションされており、この場所では10度程度の誤差であることを確認している。しかし、平面図左向きの移動から下向きの移動に変わったところで実際の方位からずれた方位を出力したため経路が大きくそれ、それ以降に正しい方位を出力しても経路はずれたままであることが分かる。

地磁気センサによる方位の誤差は、センサの性能によるものではなく、環境によるものであるため、性能の良いセンサを用いても大きな改善は見込まれない。また、鉄製品を撤去するなどの環境の改変も不可能であり、センサの出力値にこのような誤差があっても大きなずれが発生しない移動経路を推定アルゴリズムが必要となる。

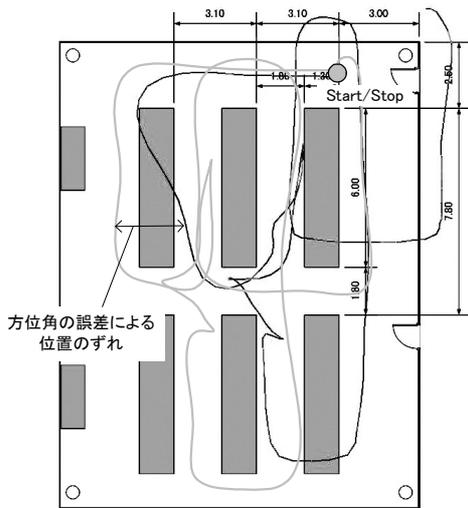


図2 センサデータのみによる位置推定の誤差

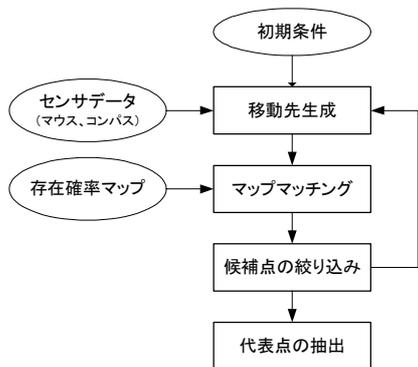


図3 提案手法のフロー

なお、本研究では用いていないが、ジャイロによる方位推定においても、センサ出力のドリフトや回転に追従する感度など、地磁気センサとは別の誤差発生要因がある。

3. パーティクルフィルタを用いたマップマッチング

パーティクルフィルタは、測定値を基に複数の結果候補を生成して、これら候補からそれらしい結果を推定する。このとき、結果から外れた候補も次の候補を生成するための種に用いられ、ロバスト性の高い推定手法である。人物の移動追跡への適用事例もあり^[2,3]、本研究ではカートの移動軌跡の推定に適用した。処理の流れは図3に示すとおりであり、以下に各段階の処理内容について述べる。

3. 1 移動先の生成

図4に示すように、マウスによって得られるカートの移動量 (x_c, y_c) および、カートの方位 θ から、マップのワールド座標系の移動ベクトル $V_w(x_w, y_w)$ を求める。このとき、移動量と方位角に対して、図5に示す正規分布の確率密度で生成される乱数によって決まる誤差係数 $(\delta_x, \delta_y, \delta_\theta)$ を付与する。移動量については、標準偏差が σ_{xy} の正規分布乱数に1を足して (x_c, y_c) に掛ける、倍率の誤差とした。方位角については、標準偏差が σ_θ の正規分布乱数を θ に足す、量の誤差とした。よって、移動ベクトルは測定値のベクトルを最大確率とする図4の楕円を曲げたような形状の領域に正規分布に従ってランダムに生成される。

ワールド座標系における現在の位置を $(x_{w,k}, y_{w,k})$ とすると、移動先の座標 $(x_{w,k+1}, y_{w,k+1})$ は、現在の位置に移動ベク

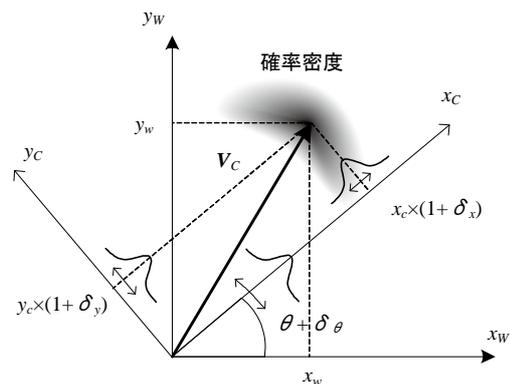


図4 移動ベクトル

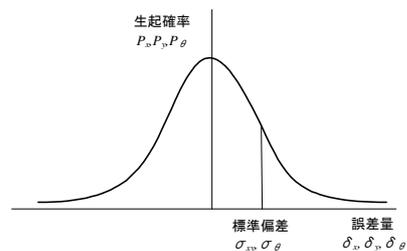


図5 候補生成に使用する誤差の分布

トルを足したものとなり、下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} x_{w,k+1} \\ y_{w,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{w,k} \\ y_{w,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_k + \delta\theta_k) & -\sin(\theta_k + \delta\theta_k) \\ \sin(\theta_k + \delta\theta_k) & \cos(\theta_k + \delta\theta_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{G,k} \times (1 + \delta_x) \\ y_{G,k} \times (1 + \delta_y) \end{bmatrix}$$

図6のように、この移動ベクトルを m 回生成して、現在の位置から m 本の次候補移動ベクトルを生成する。それぞれの移動先候補には現時点の存在確率 $P_{p,k}$ および移動ベクトルの生成に用いた誤差の確率密度 P_x, P_y, P_θ をかけた存在確率 $P_{p,k+1}$ が付与されている。

$$P_{p,k+1} = P_{p,k} \times P_x \times P_y \times P_\theta$$

図6において、移動先候補の存在する場所の色の濃さおよびベクトルの太さが存在確率の大小を示す。

現時点の候補点は n 点存在するため、これらすべての点に対して次候補の生成を行い、図7-1の左側に示すように合計で $n \times m$ 本の移動先候補群を生成する。

なお、初期条件としてスタート位置の座標を与えており、候補点の生成は1点からスタートする。また、マップの座標系と磁北との角度も事前に与えており、センサの方位角とマップ上の方位を対応付けている。

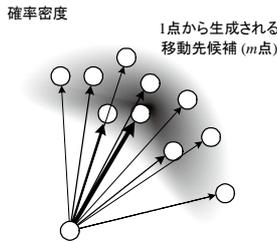


図6 移動先候補の生成

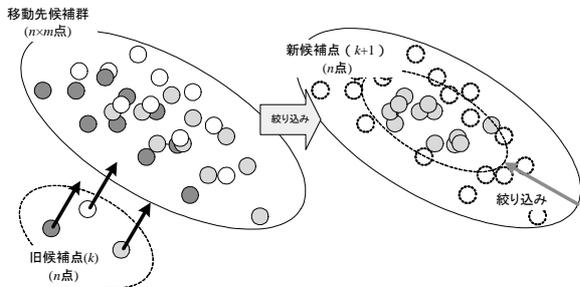


図7-1 移動先候補群の生成と絞り込み(通常時)

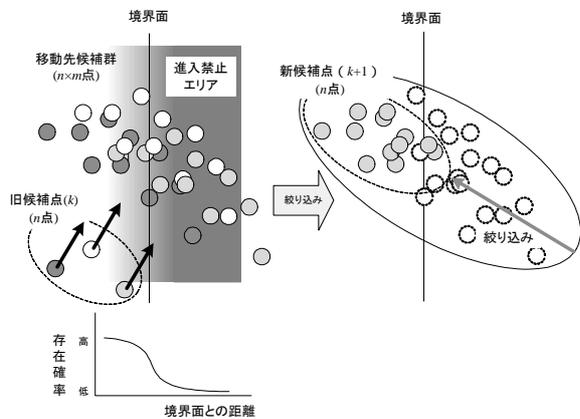


図7-2 移動先候補群の生成と絞り込み(障害物接触時)

3. 2 マップマッチング

生成した移動先候補群を事前に作成した存在確率マップ上に投影し、各移動先候補が持つ存在確率とマップが持つ存在確率を掛け合わせ、マップによって補正した候補の存在確率 $P_{m,k+1}$ を求める。存在確率マップは座標点ごとに候補点の存在許される確率 $P_M(x,y)$ が定義されており、図7-2の左側に示すように障害物の境界面から奥に入るに従ってその場に候補点が存在できる確率が下がっている。実際にはカートが、障害物の中に入り込むことはできないが、候補点の生成ではロバスト性を高めるためにあえて多少の進入を認めている。各候補における存在確率のマップ補正は下記の式で計算され、進入禁止エリアに入り込むような候補点に対しては、その存在確率が低くなるように調整される。

$$P_{m,k+1} = P_{p,k+1} \times P_M(x_{w,k+1}, y_{w,k+1})$$

3. 3 候補の絞り込み

ここまでの処理で、存在確率を持つ $n \times m$ 本の候補群が生成されたが、これを繰り返すとネズミ算的に候補点が増加することになる。そのため、存在確率の高いものから n 点のみを次の候補点として抽出する。障害物が無い場合は図7-1に示すように候補群の中心付近の候補が残る可能性が高く、障害物にぶつかった場合は図7-2のように障害物の壁面に沿って候補が残る可能性が高い。ここで残った n 個の候補は次の候補点となり、存在確率を1で正規化する。

3. 4 代表点の抽出

n 個の候補点から移動軌跡の座標点を算出するには、平均値または存在確率を加味した加重平均が考えられるが、パーティクルフィルタでは候補点群が分裂することがあり、この場合には障害物上の座標を代表点として出力することになる。そのため、本システムでは存在確率が最も高い点の座標を代表値として出力することとした。

4. 店舗における測位実験

開発したシステムを用いて、パローホームセンター各務原中央店の店内において測位実験を実施した。店舗は売場面積7,900m²の大型店舗であり、売り場の配置は図8-1に示すとおりである。

測位実験に用いたカートは図1に示したものであり、床面から15cmの位置に光学マウスを取り付け、マウスの受光素子に1/4インチCCD用・焦点距離8mmのレンズを取り付けた。床面を照らす光源は、3Wの青色LEDに集光レンズを取り付けたものを使用した。方位センサはカートの鉄製フレームおよび床下の鉄筋等の影響を避けるため、床面から55cmの位置にアルミのアンクル材を用いて取り付けた。

カートによる測定では、床面の状態によって同じ移動量でもマウスのカウント数が倍近く異なることが分かった。店舗内は家庭用品の部分が木目調の床、建築資材お

よび屋外売場はコンクリート床であり、これら両方を同じカウントスケールで扱うことは困難であった。そのため、本実験は木目調床の部分でのみ行ったが、推定される位置によってカウントスケールを変えることで、異なる床面にも対応できると考えている。また、木目調床の部分は柄の方向(木目に沿う方向と交差する方向)でカウントスケールの差が見られたが、その差は5%程度であり、提案手法で補正が可能であった。方位センサの誤差は場所によって大きく異なり、ひどいところでは45度程度の誤差が発生していた。測定データによる動線をそのままプロットしたものを図9-1に示す。右側の縦方向の移動は本来直進であるが左右に大きく波打っており、方位センサの誤差が大きく出ていることが分かる。

売場の配置を基に、図8-2に示す移動可能エリアマスクを作成し、パーティクルフィルタを適用して推定した動線を図9-2に示す。移動可能エリアマスクは白色の部分が通路、色の濃い部分が進入できないエリアである。エリアの境界にはグラデーションがかけてあり、なだらかに存在確率変化するようになっている。図9-2の動線推定は、候補点の数 $n=100$ 、次候補の生成数 $m=20$ 、移動量の標準偏差 $\sigma_{xy}=0.02$ 、方位角の標準偏差 $\sigma_{\theta}=15$ とした場合の推定である。移動量の標準偏差は前年度の精度実験の結果から、方位角の標準偏差は最大誤差が45度程度であったことから($3\sigma=45$ 度として)これらの値を用いた。この動線推定結果は実際の移動経路と一致している。

5. まとめ

スーパーマーケットの顧客動線の取得を目的とした屋内測位システムの構築手法として、カートを利用した測

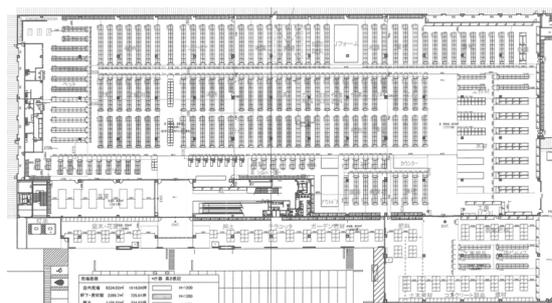


図8-1 量販店の店内配置



図8-2 移動可能エリアマスク

位システムを提案した。提案システムでは、カート移動量の測定に光学式マウスを用いており、安価にシステムが構築できる。また、センサデータの誤差を補正するためパーティクルフィルタとマップマッチングを用いた動線推定システムを構築し、実店舗での測位実験によってその有効性を確認した。

今後は、複数のカートを用いて長期的な実用実験を行うとともに、工場内など量販店以外の場所にも適用の範囲を広げる。

文献

- [1] 山田俊郎, “人の動線推定に関する研究開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.13, pp43-46, 2012.
- [2] 石川智也, 興梠正克, 蔵田武志, “サービス現場での従業員トラッキングシステムの評価と応用”, 日本VR学会論文誌, Vol.16, No.1, pp23-33, 2011.
- [3] “携帯型装置による人間の移動行動の推定”, 計測自動制御学会東北支部第222回研究集会, 2005.

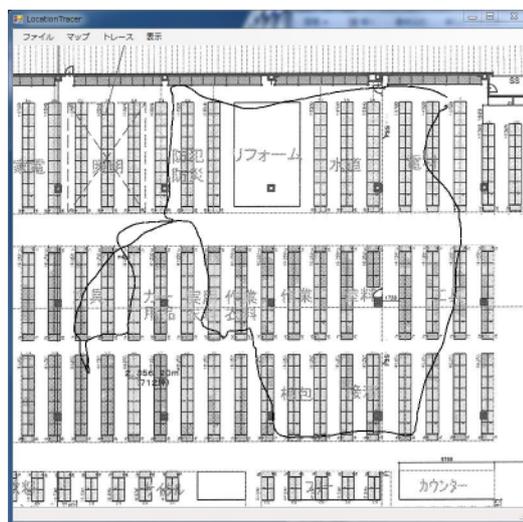


図9-1 動線の例 (生データのプロット)

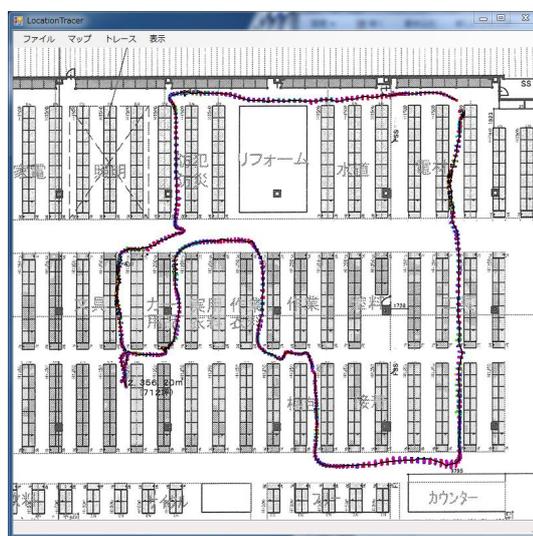


図9-2 動線の例 (マップマッチング適用)