

光学マウスセンサによる屋内動線計測

山田俊郎^{†1} 渡辺博己^{†1} 棚橋英樹^{†1}

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動線推定システムを構築している。開発システムは移動量測定センサとして光学マウスを利用しており、測定データに売り場マップとのマッチングによる確率フィルタを適用して動線を推定している。開発したシステムの概要と量販店において実施した基礎実験について報告する。

Indoor Tracking Technology by using Optical Mouse Sensor

TOSHIO YAMADA^{†1} HIROKI WATANABE^{†1}
HIDEKI TANAHASHI^{†1}

We developed a tracking system to get a trace line of customers shopping at general merchandising store. The characteristic of developed system is using optical mouse to measure movement distance. We also developed a particle filter to adjust measurement raw data to match shop map. In this report, we describe an outline of developed system and report a result of basic experiment.

1. はじめに

生活空間中の測位技術は、取得される位置情報がさまざまな情報サービスで活用できるため、社会的関心の高い基盤技術である。現在ではスマートフォン等の高機能な移動体通信端末の普及に伴い、移動中や外出先などデスクトップ環境以外での情報端末の利用が盛んになっており、現在地の近隣の飲食店検索など、位置情報に応じた情報提供サービスが一般化している。

これら移動体通信端末やカーナビゲーションシステムでは、主に GPS 情報とマップマッチング技術の併用（移動体通信では基地局や Wi-Fi 情報等も併用）によって、測位を行っており、屋外のナビゲーションにおいては実用上の支障が無いレベルの測位技術が確立したと考えられる。

しかしながら、屋内における測位では、

- ・GPS の電波が届かない
- ・施設の形態によって情報サービスの内容が異なり、要求される位置精度も異なる
- ・一般的に屋外ナビゲーションよりも高い精度が求められる

といった特徴があり、屋外ナビゲーションのようなスタンダード技術が確立していない。Wi-Fi などの無線電波を用いる方法（インドア Google マップ[1]など）、赤外線などの光通信を用いる方法、ジャイロや加速度計などのセンサを用いる方法[2]、GPS 互換の発信器を用いる方法（IMES）など、さまざまな方法が提案されているが、どの方法にも一長一短があり、利用シーンに合わせて複数の測位技術を組み合わせる方向になると考えられている[3]。

筆者らは、スーパーマーケット等の大型量販店内を対象として測位手法やシステムについて研究開発を進めている。本報告では、移動量計測に光学式マウスを用いた測位カートの構成を述べるとともに、測位データにマップマッチングを適用して推定した動線推定結果について報告する。

2. 測位ショッピングカートのシステム構成

2.1 測位システムの概要

大型量販店の顧客の多くはショッピングカート（以下カート）を利用することから、顧客の動線＝カートの動線と捕え、カートの動きを追跡するシステムを開発した。測位に必要な仕組みをカート上に用意することで、顧客が特別なアクションを起こす必要の無いシステムが実現できた。

カートの測位方法は、カートにセンサ類を取り付けて位置を推定する内界センサ方式と、周囲の環境に測位システムを構築する外界センサ方式に大別されるが、本研究では設備工事や初期コストが比較的少なく、段階的に測位対象台数を拡大することができる内界センサ方式を中心としたシステムを構築することとした。カートには移動量や向きを測定するセンサ類を装備してこれらの情報から位置を推定した。ただし、一般に内界センサ方式による測定は時間とともに誤差が蓄積するため、どこかで誤差を解消する手段が必要となる。そのため、ランドマークとして赤外線ビーコンも併用している。

2.2 光学式マウスによる移動量測定

光学マウスは、オプティカルフローを測定する光学センサで操作面上の模様の動きを読み取ってマウス本体の2次元移動量を算出する、非接触の移動量測定センサである。マウス内部のセンサ素子は操作面から数 mm 離れた位置に配置されており、LED 光源を含めた光学系はこの位置でフ

^{†1} 岐阜県情報技術研究所
Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

フォーカスを結ぶように設計されている。図1に示すように光学系を変更することで操作面までの距離を延ばすことが可能であり、床面との距離が一定であるカートの移動量測定に適用した。

マウスの光学センサと LED 光源は電子基板上に取り付けられており、レンズと導光プリズムが一体となったプラスチック部品で光学系が構成されている。この光学部品を取り外して電子基板のみとし、光学センサの受光部にボードカメラ用のレンズを取り付け、センサモジュールをカート下向きに取り付けた。レンズの焦点距離は採用するマウスのセンサ IC、床面までの距離、移動速度、距離分解能を考慮して決定する必要がある、このシステムでは焦点距離 8mm のものを使用した。

レンズの光軸と LED 照明の照射軸の角度が近いと床面からの鏡面反射の影響が危惧されるため、LED 光源はレンズから水平方向に 5cm 離れた位置に設置し、床面に対して

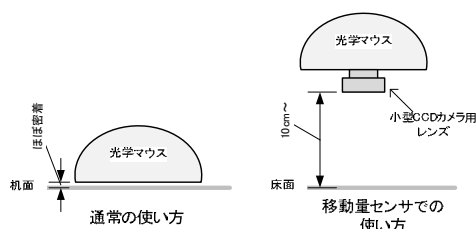


図 1 光学マウスの検出距離延長

Figure 1 Measurement length extension of optical mouse.



図 2 測位ショッピングカートの構成

Figure 2 The configuration of tracking shopping cart.

約 70 度の角度でレンズ光軸と床面の交点を照射した。通常のマウスに比べて移動測定面までの距離が離れているため、高照度 LED で床面を照光したが、十分な明るさのもとでは周囲の環境光のみで移動量の測定が可能であった。

2.3 方位センサ

光学マウスから得られる移動量はマウス座標系の x-y 方向のカウントであり、カートの前後左右への移動量である。この移動量から店舗内の位置を得るには、カートの向きを得る必要があり、これには地磁気センサを利用した。地磁気センサは周囲の金属の残留磁気など地磁気以外の磁気の影響を大きく受けることが知られており、建物内においては壁や床に近いとこれらの影響を強く受ける。そのため、地磁気センサは床面から 60cm の位置に設置した。なお、店舗での実験ではこの条件でも誤差が大きく見られたため、ジャイロの利用も進めている。(詳細は 4 章で述べる。) 製作した測位ショッピングカートは図2に示す外観となっており、SD カードにデータを蓄積するため図中のノート PC を取り外して測定が可能である。

2.4 移動量測定の検証

床面がビニール床(模様あり)とカーペット(無地)の直線廊下に距離 20m 測定区間を設け、この間を往復して光学マウスのカウント数を測定し、移動量測定の評価を行った結果を表1に示す。移動条件は通常歩行(時速 3km 程度)と速足歩行(時速 5km 程度)の 2 通りで、移動方向はカートの前後方向(Y)および横方向(X)の 2 通りである。

測定距離 20m を平均カウント数で割ったものを距離分解能であるとみなし、カウントの標準偏差を距離換算すると、同一の測定条件下ではほとんどの条件において 10cm 程度の範囲に入っている。これは 20m に対して 0.5% であり、同一条件下の繰り返し精度は高いといえる。

次に、センサの方向依存特性を検証するため、XY 両方向のカウント数を用いて誤差評価を行ったところ、ほとんどの条件下で一方向のみの移動の場合より標準偏差が大きくなり、方向依存性があることが示された。照明の当たり方や光学センサの特性が原因であると考えられるが、カウントから移動量へ変換するパラメータを個別に定義することで誤差は少なくなると考えられる。

表1 光学マウスセンサによる移動量測定結果 (20m直線移動)

Table 1 Results of measurement experiment by using optical mouse tracker (20m linear moving)

床面	ビニール床									カーペット床			全条件
移動条件	通常歩行			速足歩行			通常歩行			通常歩行			
移動方向	+Y'	-Y'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	+X'	-X'	両方向	+Y'	-Y'	両方向	
試行回数	10	10	20	4	4	8	5	5	10	15	15	30	68
平均カウント数 (count)	20949	21765	21380	21572	21058	21295	21280	21985	21672	21711	22349	22030	21689
平均分解能 (cm/count)	0.095	0.092	0.094	0.093	0.095	0.094	0.094	0.091	0.092	0.092	0.089	0.091	0.092
標準偏差 (count)	88.90	195.88	443.70	112.61	74.59	306.00	86.73	56.91	379.20	105.44	109.25	341.27	486.25
標準偏差 (cm換算)	8.49	18.00	41.51	10.44	7.08	28.74	8.15	5.18	35.00	9.71	9.78	30.98	44.84

また、すべての条件下の全試行結果を対象とした誤差評価を行うと、距離換算の標準偏差は 44.84cm であった。20m の測定距離に対する割合は 2.2% であり、スーパーマーケット店内の測位に要求される測位精度（売場の棚 1 本の識別：50cm 分解能）を満足するものといえる。

3. 確率フィルタを用いたマップマッチング

確率フィルタは、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^[2,4]、本研究ではカートの動線推定に適用

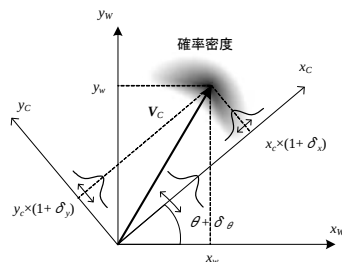


図 3 移動先候補の生成

Figure 3 Creating candidates.

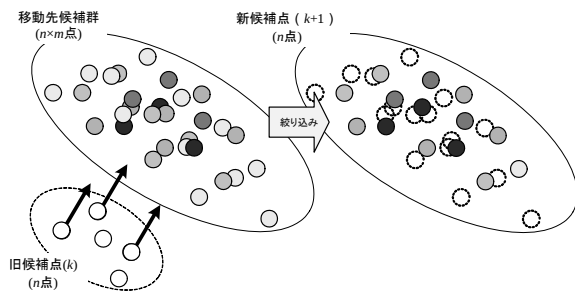


図 4 移動先候補群の生成と絞り込み（通常時）

Figure 4 Creating and addressing target points.
(Normal condition)

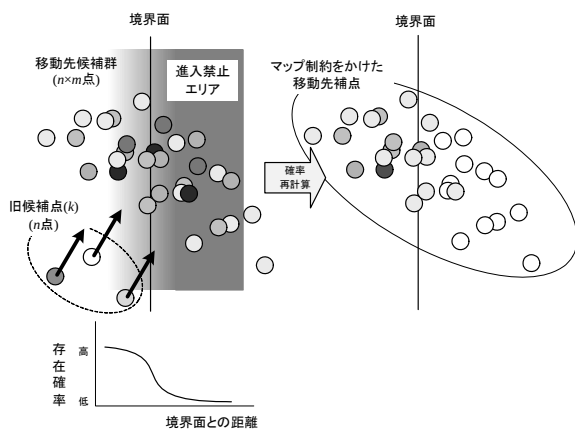


図 5 移動先候補群の生成と絞り込み（障害物接触時）

Figure 5 Creating and addressing target points.
(Barricaded condition)

した。動線推定の処理は、「移動先候補の生成」→「マップマッチング」→「候補の絞り込み」を繰り返して、各段階の候補の代表値を結んだものを動線とした。

3.1 移動先候補の生成

マウスによって得られるカートの移動量を x_c, y_c 、カートの方位を θ として、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 3 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。

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

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 $P_{x,y,\theta}$ をかけ合わせた存在確率 $P_{p,k+1}$ が付与されている。

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 4 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。この図において、候補点の色が濃いものほど存在確率 $P_{p,k+1}$ が高いことを示している。

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。

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が許される確率 $P_M(x, y)$ が定義されており、図 5 の左側に示すように障害物の境界面から奥に入ることによ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 $P_{m,k+1} = P_{p,k+1} \times P_M(x_{w,k+1}, y_{w,k+1})$ 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。

3.3 候補の絞り込み

ここまでの処理で、存在確率を持つ $n \times m$ 点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。また、候補点の分布にも偏りができるため、一定の個数で分布が一樣になるため絞り込みを行う。各候補点には一定の半径の排他エリアを設定し、存在確率の高いものから順に排他エリア内にある他の候補点を削除する。この処理によって n 点のみを次の候補点として抽出するが、候補点に割り振る誤差の大きさや排他エリアの半径設定によっては候補点が n 点以下になる場合もある。

障害物が無い場合は図 4 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 5 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。ここで残った候補点は存在確率を 1 で正規化し、次の候補点生成の移動元位置とする。

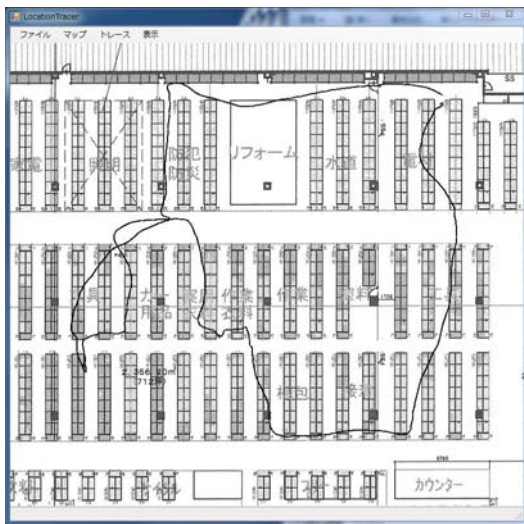


図 6 動線の例 (内部センサデータ)

Figure 6 Tracking example. (IMU raw data plot)

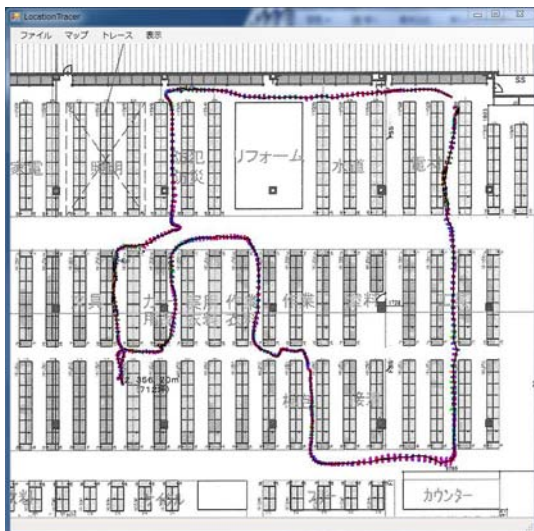


図 7 動線の例 (マップマッチング適用)

Figure 7 Tracking example. (With map matching)

4. 店舗における動線推定実験

開発したシステムを用いて、ホームセンターの一部エリアで動線推定実験を実施した。実験において測定された導線の一例を図 6, 7 に示す。図 6 はセンサから得られたデータをそのままプロットしたものであり、動線が通路から大きくずれていることが分かる。移動量はおおむね正しく測定されているものの、場所によって方位センサの誤差が大きく現れており、最大で 45 度程度の誤差が発生していた。

図 7 は売り場の配置図を基に確率フィルタを適用して推定した動線であり、実際の動線と一致している。この動線推定では、候補点の数 $n=100$ 、次候補の生成数 $m=20$ 、排他エリア半径 0.1m、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。移動量の標準偏差は 2 章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。

今回の実験は、40m 四方程度のエリアで行ったため、ランドマークを使用していない。2 章の実験より 1σ 誤差が 5% であることから、この程度の範囲ではランドマークを用いなくとも確率フィルタによって動線が正しい通路位置に拘束されていた。対象エリアを広げる場合には、今回の実験のエリア程度の間隔でランドマーク配置すればよいことが確認できた。

また、地磁気センサの誤差によって、動線が正しく推定できない動線パターンがあった。店舗内の商品棚や金属製の商品による影響が考えられるため、ジャイロを利用した方位測定システムへの変更を進めている。

5. まとめ

大型量販店の顧客動線の取得を目的として、カートを利用した測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確率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。

参考文献

- 1) “モバイル Google マップの新境地、構内地図が見られるようになりました”, Google 公式 Blog 2011 年 11 月 30 日, <http://googlejapan.blogspot.com/>, 2011.
- 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) “活用始まる屋内測位 高精度化で広がる用途”, 日経エレクトロニクス 2-20 No.1076, pp.65-71, 2012.
- 4) “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.