

人の動線推定に関する研究開発

— 移動量測定技術の基礎検討 —

山田 俊郎

A Study on a Human Tracking

- A Measurement Technology of Movement Distance -

Toshio YAMADA

あらまし スマートフォンなどの小型情報端末の普及に伴い、利用者の位置に応じた情報提供サービスが盛んになっている。屋外の測位ではGPSが標準技術となっているが、屋内においては利用シーンによって要求仕様が様々で標準的な技術が確立していない。本研究ではスーパーマーケットの店内を測位空間とし、ショッピングカートの位置を顧客の位置とみなして、その動きから顧客の動線を推定する手法の開発を行っている。本報ではカートを利用した測位システムの概要と試験実装した移動量測定装置について述べるとともに、移動量測定の測定精度について報告する。

キーワード 動線推定、測位技術、内界センサ、サービス工学

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様々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

の方法を組み合わせる方向になるものと考えられている^[3]。

筆者は、スーパーマーケットの店内を測位空間として、想定される利用シーンに応じた適切な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、スーパーマーケットの経営サイドのニーズや将来予想される情報サービスなどを検討して設計したシステム構成を述べるとともに、位置推定の基礎技術である移動量の測定装置の試作、およびその精度検証について報告する。

2. 店舗内の測位手法

2. 1 測位システムの要求仕様

スーパーマーケットで用いる測位システムの設計には、経営者と顧客の両方の視点でシステムの仕様を検討する必要がある。顧客視点でシステムへの要求は、

- ①特別な装置・動作を極力必要としない
- ②動線情報を提供することに対するインセンティブが必要

が主なものである。特に①の条件が煩雑であると顧客にシステムを受け入れてもらえない。しかしながら、顧客が何のアクションも起こさずに動線追跡を行うことは不可能であり、発信器を持つとか、スマートフォンアプリを起動するなどの最小限の動作が必要である。②の条件のインセンティブは、これらのアクションを促すために必要であり、ポイントの付加をインセンティブとして顧客にスマートフォンアプリを起動させ、来店情報を収集

するサービスが行われている^[4]。

一方、経営側へのヒアリングから得られたシステムへの要求は、

- ③売場の棚1本が区別できる位置分解能（50cm程度の位置分解能）
- ④店舗の改変やシステム導入にかかる費用（初期コスト）が少ないこと
- ⑤壊れにくくメンテナンスフリー（ランニングコスト）が少ないこと

が主なものである。③で技術的な要求として、50cmの位置分解能が求められているが、従来の屋内測位技術では実現が困難な分解能である。また、コスト面では、なるべく低コストとなることはもちろんであるが、小規模に導入して効果を確かめながら規模が拡大できる柔軟性も求められる。

2. 2 提案システムの概要

スーパーマーケットの顧客のほとんど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とした。測位に必要な仕組みをカート上に用意することで、顧客には何ら特別なアクションを要求しないシステムが実現できる。

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する（次章で詳細を説明する）。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。このため、施設側にランドマークとなる指標を設置する必要があるが、売場通路の両端にRFIDや赤外線ビーコンなど、最小限のマーカ設備の設置を検討している。

また、本研究内では情報提供などの利用者に対するインセンティブについての研究は対象としていないが、将来的にカートの位置情報を利用して、顧客のスマートフォンに情報提供を行うサービスが考えられる。従来の情報提供型の実証実験では、カートに情報端末が設置され

ており、長期の利用ではこれの破損が危惧されていた。破損しやすい情報端末をカートに装着しないため、メンテナンスコストを抑えることができる。

3. 移動量の測定手法

店舗内のカートの位置は、店舗に設定した店舗座標系(X,Y,Z)上の座標として示すことができ、これを時系列でつないだものが動線となる。しかしながら、カートの内界センサから得られる値は図1に示すようなカート固有のカート座標系(X',Y',Z')で定義されている。

カートの動きは、(X',Y')上の並進およびZ'軸周りの回転の3自由度であり、ZとZ'を一致させると、Y'の向きが店舗座標系上のカートの向きとなる。単位時間当たりの(X',Y')上の移動ベクトルをY'の向きに合わせて回転変換させたものを時間積分して位置が計算される。

以下では内界センサを組み込んだ試作カート（図2）で開発した、移動ベクトル測定用のセンサについて述べる。

3. 1 磁気式エンコーダ

一般に車輪の回転量（移動量）の測定にはエンコーダが用いられており、固定された車軸の周辺にセンサを設置する。しかしながら、スーパーマーケットで多く用いられているカートの車輪は4輪とも図3に示すような自由キャスターになっており、車軸がついた部品はフレームパイプを中心に自由に回転するため、車軸にケーブル付きのエンコーダを取り付けることができない。そこで、回転量の測定には非接触式のエンコーダである磁気式エンコーダを用いることとし、磁気センサをキャスターの回転の影響を受けないフレームパイプに取り付ける構造とした。この取り付け方法では、キャスターをフレームパイプに接合するボルトが車輪の近くに位置するため、ボルトの中心にケーブル通す穴をあけ、ボルトの頭に座繰りを入れて磁気を感じ取るホール素子(Allegro A1120)を収納した。一方の車輪側には2個のネオジウム磁石を半周の間隔をあけて埋め込んだ。

ここで設置したホール素子は、図3右のように直径12mmの基板の上に90度回転した方向を向けて4個取り



図1 店舗とカートの座標系



図2 試作カートの外観

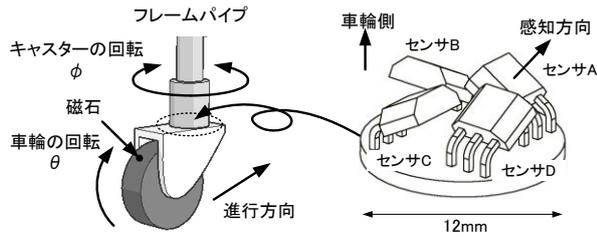


図3 磁気式エンコーダの構造

付けられている。また、センサの感知面は60度程度の角度を取って車輪面に向けてあり、センサ面を下にして接合ボルトの中(図3点線丸印のキャスト内部)に収めた。ホール素子をこのような配置で設置することによって、カート座標系における移動方向(キャストの向き)を得ることが可能となった。

ここで、図3の進行方向を順方向として、センサAの感知方向が進行方向とは逆向きになるようにセンサ基盤を配置する。車輪の回転によって磁石は後方から4つのホール素子に近づき、感知方向が後方を向いているセンサAが最初に反応する。その後、センサD,B,Cと順に反応して、磁石の通過とともにセンサAから順に反応が無くなる(図4-1)(磁力の強度、距離によってはD,B,Cが反応しないこともある)。

次に、進行方向が逆になった場合を考える。自由キャストは車輪がキャストの回転軸からずらしてあるため、進行方向が反転するとキャストがフレームパイプを中心に180度回転する。キャストが回転しても4つのホール素子は回転しないので、進行方向に対して感知方向が逆向きのセンサはセンサCとなり、磁石の接近に伴ってセンサCが最初に反応する。その後、センサB,D,Aと反応して、磁石の通過とともにCから順に反応が無くなる(図4-2)。

横方向移動(キャストが90度回転した場合)も同様に最初に反応するセンサが変わるため、90度単位の4方向の移動方向が測定できる。カートの移動方向のほとんど

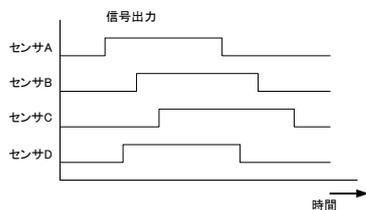


図4-1 順方向移動時のホール素子の反応

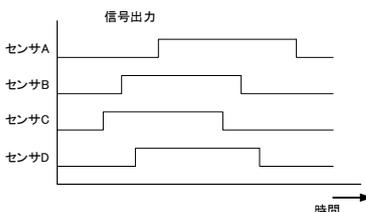


図4-2 逆方向移動時のホール素子の反応

は前方であると考えられるため、移動方向の細かい分解能は必要ではないと考えているが、各センサの反応の時間差から90度単位より細かい分解能で移動方向を求める可能性も考えられる。

3. 2 光学式マウス

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ォーカスを結ぶように設計されている。光学系を作り直すことで操作面までの距離を延ばすことが可能であると考え、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。磁気式エンコーダの検出方向は4方向に限られるが、マウスでは全方向の計測が可能である。

マウスの光学センサとLED光源は電子基板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(H.P.B OPTOELECTRONICS, MCAN2M_A02, f=6.0mm)を取り付け、カート座標系のZ'軸方向下向きに取り付けた(図5)。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、床面に対して約70度の角度でレンズ光軸と床面の交点を照射した(光学マウスにおいても角度をつけた照光となっている)。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、8個の赤色LEDにより床面を照光したが、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。

4. 測定実験および考察

開発した2通りの移動量測定装置の測位性能を試験するため、直線移動時の測定誤差について検証を行った。

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、この間を往復して磁気エンコーダおよび光学マウスのカウント数を測定

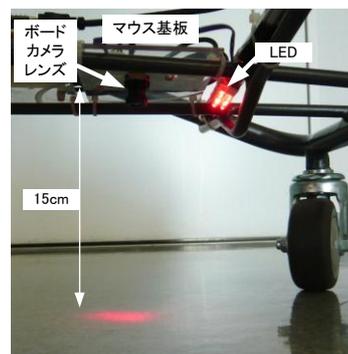


図5 光学マウスを利用した移動量センサ

した。その結果を表1, 2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'軸方向）および横方向（X'軸方向）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。特に、磁気式エンコーダではほとんどの場合において標準偏差が1カウント以下となっている。

次に、センサの方向依存特性を検証するため、両方向のカウント数を用いて統計処理を行ったところ、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。光学式マウスの場合、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、磁気式エンコーダは装置の原理上方向依存性が発生することが考えにくい。原因についてはさらなる検証が必要である。

また、すべての条件下の全試行結果を対象とした統計処理を行うと、距離換算の標準偏差は磁気式エンコーダの場合で33.71cm、光学マウスの場合で44.84cmであった。20mの測定距離に対する割合はそれぞれ1.7%、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。

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位システムを提案した。提案システムの要素技術のうち、カートの移動量測定について磁気式エンコーダによる方法と光学マウスを利用した方法を実装して測定精度の評価を行い、内界センサ方式による測位で実用レベルの精度が得られることを確認した。

今後は、カートの向きを用いて2次元上の測位システムに発展させるとともに、累積誤差をリセットするための基準位置マーカーについても開発を行う。また、実際のスーパーマーケットでの実フィールド実験も視野に入れたシステム開発を行う。

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] “smapo”, <http://smapo.jp/>

表1 磁気式エンコーダによる移動量測定結果 (20m直線移動)

床面	ビニール床									カーペット床			全条件
	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)	169.1	169.9	169.5	168.8	170.3	169.5	170.2	166.6	168.4	173.3	165.4	169.3	169.3
平均分解能 (cm/count)	11.827	11.772	11.799	11.852	11.747	11.799	11.751	12.005	11.876	11.543	12.092	11.811	11.816
標準偏差 (count)	0.57	0.88	0.83	0.50	0.50	0.93	0.45	1.52	2.17	0.59	0.63	4.05	2.85
標準偏差 (cm換算)	6.71	10.31	9.76	5.93	5.87	10.92	5.26	18.21	25.78	6.85	7.65	47.78	33.71

表2 光学マウスによる移動量測定結果 (20m直線移動)

床面	ビニール床									カーペット床			全条件
	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