

携帯型装置による人間の移動行動の推定

Estimation of Ambulatory Activity Utilizing Portable Instruments

大瀧 保明*, 胡 丹**, 猪岡 光*, 鈴木 明宏***

Yasuaki Ohtaki*, Dan Hu**, Hikaru Inooka*, Akihiro Suzuki***

*東北大学大学院工学研究科, **東北大学大学院情報科学研究科, ***株式会社アイ・ティ・リサーチ

*Graduate School of Engineering, Tohoku University, **Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, ***IT Research Co.Ltd.

キーワード： 歩行分析 (Gait analysis), 携帯型装置 (Portable instrumentation), 位置推定 (Location estimation), 慣性航法 (Dead-reckoning), マップマッチング (Map matching)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-04 東北大学ハッチェリースクエア研究開発室6
大瀧保明, Tel.: (022)795-3157, Fax.: (022)795-3157, E-mail: ohtaki@niche.tohoku.ac.jp

1. はじめに

小売店舗における顧客動線(導線)データは、売場の集客力や商品への誘導の適正を評価するうえで重要なものとなっている。顧客が商品を手にとったり比較したりしながら売り場を移動する様子や、その移動のパターンを捉えることによって、効率的な商品配置、判りやすい店舗デザイン、販売戦略など、動線計画の立案に役立てることができる。一方、現在に行われている動線調査の多くは尾行調査によるものであり、より簡便かつ正確に計測と分析が行えるシステムが求められている。

しかしながら、現在広く使用されている位置検出システムを、そのまま店舗内の顧客動線分析の用途に利用することは難しい。たとえば、屋内の店舗ではGPS (Global Positioning System) などの測位システムは使用できない。カメラ等の光学シ

ステムでは、背の高い商品棚が配置されている売り場などでは、視野を確保することが難しく、また、設置が困難である場合が多い。電波タグ、ビーコン等では、行動の連続的な追跡にはアンテナの配置や設置方法に相当の工夫が必要となる。対象範囲が広域となる場合、カメラシステム同様、設置の手間とコストについても考慮する必要がある。運用上の視点から見ると、そもそも顧客動線の調査は日常的に行われるものではないため、環境側にインフラとしてシステムを整備する小売店舗は稀であると考えられる。一方、インフラや環境に依存しない方法として慣性航法(デッドレコニング, Dead-reckoning) を用いた方法がある。この方法では、歩行者の歩行形態の不規則さや計測ノイズ等による誤差が著しく蓄積してゆく問題を考慮しなければならない。そのため、様々なセンサシステムとの融合により環境認識を行う方法が提案され

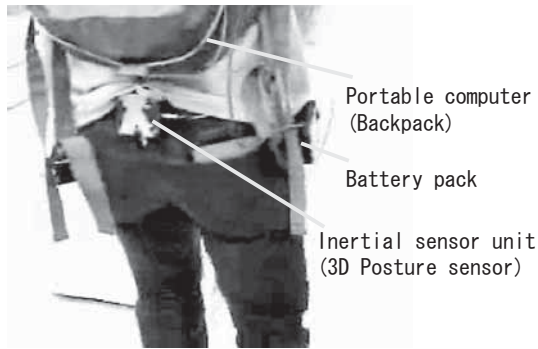


Fig. 1 計測システムの概観

てきている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

本研究では、身体に装着する自律携帯型の計測装置を利用し、店舗内の購買行動を追跡するシステムの開発を試みる。本稿では、特に、慣性センサを用いた計測システムと店舗地図情報のみを用いて、店舗内の移動経路を頑健に推定する方法について述べる。また、提案手法の有用性を検討するために小規模の小売店舗での実験の結果について報告する。

2. 計測システム

計測システムは3次元姿勢センサ(MicroStrain Inc. 3DM-GX1)、バッテリーパック、集録用のノートパソコンからなる。図1に計測システムの概観を示す。装着の容易さを重視し、装置は全て体幹に装着することとした。3次元姿勢センサはベルトに固定し腰背部中央に取り付ける。この設置部位では、移動中に生ずる加速度や進行方向の変化が比較的安定に計測できる。3次元姿勢センサはそれぞれ3軸直行の加速度センサ、ジャイロ(角速度センサ)、地磁気センサを内蔵し、マイクロプロセッサでの演算により3次元姿勢角を出力することができる。3次元姿勢角と合わせて、それぞれのセンサ出力も同時に計測する。データはRS-232経由で、携帯するノートパソコンで集録する。計測周波数は100Hzである。

3. 歩行パラメータの推定

はじめに、計測された加速度信号に0.5-5Hzのバンドパスフィルタを適用し、直流成分と高周波の計測ノイズを除去する。歩行ステップの接地時点は、前後加速度 a_{ap} のピークにより検出することができる。ピークの時間間隔はステップ時間であり、その逆数は歩調となる。ここでは、安定したピーク検出を行うために、前後加速度の差分波形 Δa_{ap} に対して閾値によるピークの検出を行う。

移動軌跡はデッドレコニングにより計算する。すなわち、移動距離と進行方向を逐次推定したうえで、それらを積算して移動軌跡を計算する。購買行動をとっているときの歩行では、歩幅の変化が頻繁に生じることから、1ステップごとに歩幅を推定する必要がある。単純な松葉様の歩行モデルを仮定し、次式により、1ステップ内の上下加速度の最大値 $a_{v,max}$ 、最小値 $a_{v,min}$ から腰部の上下動幅を評価して歩幅 l を推定する⁶⁾。

$$l = \sqrt[4]{a_{v,max} - a_{v,min}} \cdot \alpha \quad (1)$$

係数 α は、実際には、個人により若干値が異なるが、本研究の場合では、個人によらず $\alpha = 1$ とした。進行方向は、鉛直軸周りの回転角度とし、姿勢センサの出力から得た。図2に、一例として、店内移動中に計測される前後加速度波形、その差分波形、歩幅推定値、進行方向の計測波形を示す。歩幅推定値はステップが検知された時点に表示している。ステップ時間、歩幅などの情報から、移動速度や、同地点での滞留時間などを評価することもできる。

4. 移動経路推定

デッドレコニングでは、何らかの基準点での補正が行われないう限り、誤差が累積していく。そのため地図情報とのマッチングを行い、誤差の修正を行うことが必要となる。我々は、誤差を含むデッ

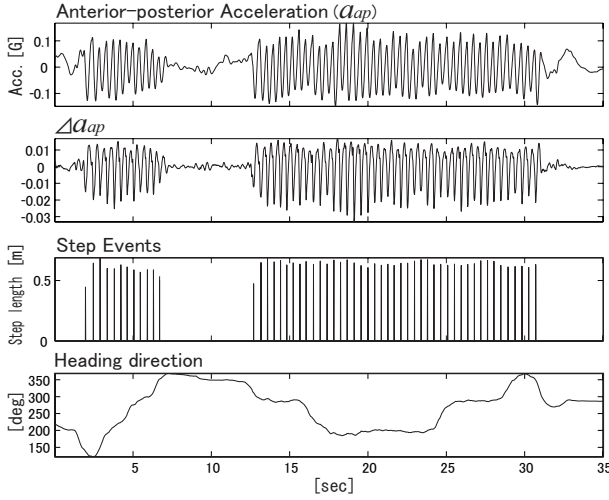


Fig. 2 上から, 歩行中の前後加速度波形, その差分波形, 歩幅推定値, 進行方向(北に対する方位)

ドレコニングにより得られる推定結果に対して, パーティクルフィルタ (Particle filter) により状態の推定を行い, 店舗地図上での存在確率を最尤推定の枠組みで評価することにより移動経路を推定する. パーティクルフィルタは対象の状態を直接知ることができない場合に, 対象の状態を統計的に効率よく推定する方法である. デッドレコニング, およびマップマッチングを, 次のような運動モデルと観測モデルにより定式化する.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \\ &= \begin{pmatrix} x_k + (l_k + w_{l,k}) \cos(\phi_k + w_{\phi,k}) \\ y_k + (l_k + w_{l,k}) \sin(\phi_k + w_{\phi,k}) \\ \theta_k + \phi_k + w_{\phi,k} \end{pmatrix} \quad (2) \\ \mathbf{y}_k &= h(\mathbf{x}_k, v_k) \quad (3) \end{aligned}$$

ステップ k における位置, 姿勢は状態ベクトル $\mathbf{x}_k = (x_k, y_k, \theta_k)^T$ により表される. 入力ベクトル $\mathbf{u}_k = (l_k, \phi_k)^T$ は, 歩幅推定値 l_k , 進行方向角度 ϕ_k からなる. $\mathbf{w}_k = (w_{l,k}, w_{\phi,k})^T$ は, 期待値0, 標準偏差 $\sigma_{l,k}$, $\sigma_{\phi,k}$ に従うガウシアンシステムノイズである. ステップ k における誤差分布の標準偏差 $\sigma_{l,k}$, $\sigma_{\phi,k}$ は, 単位距離あたりの標準偏差 σ_l , σ_{ϕ} を実験により明らかにした後, 次式により近似的に求めた.

$$\sigma_{l,k} = \sqrt{k} \sigma_l l_k \quad (4)$$

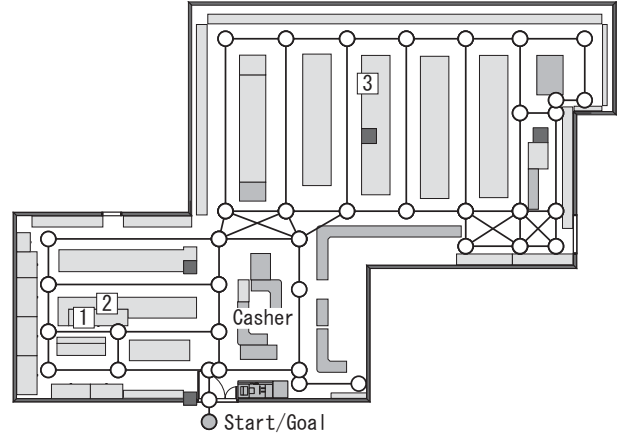


Fig. 3 店舗地図(東北大学生協工学部店購買部)と通行可能なパスの設定

$$\sigma_{\phi,k} = \sqrt{k} \sigma_{\phi} \phi_k \quad (5)$$

観測ベクトル \mathbf{y}_k は, 地図上の最近傍の通路(パス)までの距離であり, 期待値は0となる. v_k は期待値0, 標準偏差 σ_d に従うガウシアン観測ノイズである⁷⁾.

状態の推定は, ステップ k までの観測ベクトルの履歴 $D_k = \{\mathbf{y}_i : i = 1 \dots k\}$ が与えられるとき, \mathbf{x}_k の確率密度関数 $P(\mathbf{x}_k | D_k)$ を推定する問題として定式化される. 確率密度関数 $P(\mathbf{x}_{k-1} | D_{k-1})$ が得られているとき, 次ステップ k での事前確率 $P(\mathbf{x}_k | D_{k-1})$ は前述の運動モデルにしたがって予測することができる. そして, ステップ k で観測ベクトル \mathbf{y}_k が与えられたとき, 次式のように, ベイズの定理に従い, 確率密度関数を更新する.

$$P(\mathbf{x}_k | D_k) = \frac{P(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) P(\mathbf{x}_k | D_{k-1})}{P(\mathbf{y}_k | D_{k-1})} \quad (6)$$

パーティクルフィルタでは, 確率密度関数 $P(\mathbf{x}_k | D_k)$ はモンテカルロ法により生成した M 個の離散的なサンプルのセット $\{\mathbf{x}_k(i) : i = 1 \dots M\}$ により表現される. サンプルのステップ k での位置を運動モデルに従ってそれぞれ予測し, そして, 観測によりサンプルの重み $\{q_k(i) : i = 1 \dots M\}$ を求める. サンプルは重み $q_k(i)$ に比例する確率を持っており, それゆえ, 確率密度関数 $P(\mathbf{x}_k | D_k)$ を近似することが可能となっている. ステップ k における位置はサ

ンプルの重み付き平均として求められる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

5. 実験結果

被験者は7名の健康な若年男女(Age :22.9 ± 0.7 yr, Height: 170.2 ± 7.8)である。被験者は前述の計測システムを装着し、靴は被験者が普段着用のものであるを使用した。

はじめに、システムノイズの分布を決定するため、歩幅推定誤差、進行方向の計測誤差を調べた。10mの直線歩行でテストした結果、推定誤差は6.2%であった。また、進行方向の角度計測誤差は360度の回転に対して誤差0.5%であった。

次に、提案手法の有用性を検討するために小規模の小売店舗(東北大学生協工学部店購買部)での実験を行った。図3に、店舗の見取り図を示した。店舗は、飲み物、菓子、雑貨、文房具、雑誌、書籍、コンピュータパーツなどの売り場に分かれており、通路は、棚やラック、冷蔵庫、テーブルなどにより形成されている。また、同図には、通行可能なパスをリンクとノードにより表している。ノードは通路の交差点に配置し、ノード間を1リンクで連結した。被験者には、図中の1/アイスクリーム、2/菓子、3/旅行雑誌の箇所を、それぞれ商品を取得し、レジで支払いをするように指示した。スタート位置、ゴール位置は店舗の入り口である。移動の仕方に関して、それ以外の指示は与えなかった。

図4に推定結果を示す。パーティクルフィルタのサンプル数Mは1000点とした。時間経過は(a), (b), (c), (d)の順である。実線はパーティクルフィルタによる推定結果であり、点線はデッドレコニングのみによる推定結果を示している。デッドレコニングの推定誤差を加味し、地図上での推定位置の尤度を評価することにより、本来の移動経路を良好に推定できていることがわかる。

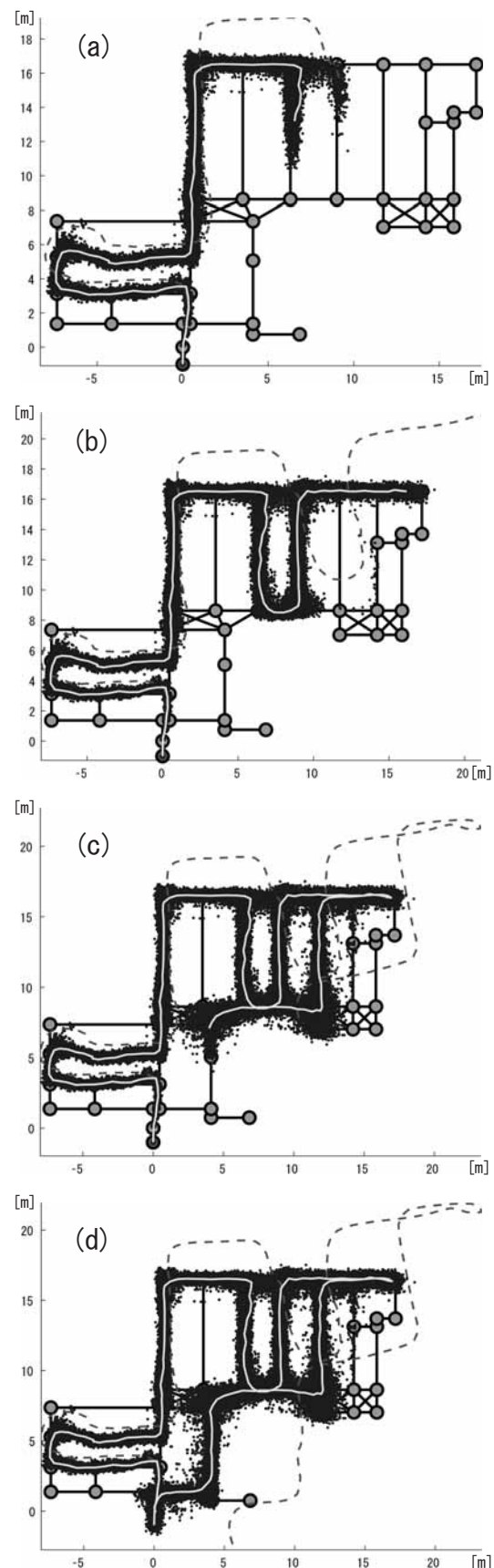


Fig. 4 移動経路の推定結果。実線はパーティクルフィルタによる推定結果、破線はデッドレコニングのみによる推定結果。

6. おわりに

本研究では、身体に装着する携帯型計測システムを用いて、店舗内の購買行動を追跡する移動経路推定法について述べた。デッドレコニングによる移動軌跡の計算を行うとともに、パーティクルフィルタにより、店舗地図上での存在確率を最尤推定の枠組みで評価することにより、安定した移動経路の推定を行えることを示した。今後、より広域、複層階の店舗への応用を行う予定である。その場合、地図情報だけでなく、階段昇降やエレベータの利用といった行動内容も積極的に利用したいと考えている。また、小型携帯型装置の開発も継続的に進めていく予定である。

参考文献

- 1) S. Lee, K. Mase, Activity and Location Recognition using wearable sensors, IEEE Pervasive Computing, 1, 3, 24-32 (2002)
- 2) Q. Ladetto, V. Gabaglio, B. Merminod, Combining Gyroscopes, Magnetic Compass and GPS for Pedestrian Navigation, Proc. Int.Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, 205-213 (2001)
- 3) A. R. Golding, N. Lesh, Indoor Navigation Using a Diverse Set of Cheap Wearable Sensors, International Symposium on Wearable Computers, 29-36 (1999)
- 4) E. Vildjiounaite, E. Malm, J. Kaartinen, P. Alahuhta, Location Estimation Indoors by Means of Small Computing Power Devices, Accelerometers, Magnetic Sensors, and Map Knowledge, Pervasive 2002, 211-224 (2002)
- 5) M. Kourogi T. Kurata, A method of Personal Positioning Based on Sensor Data Fusion of Wearable Camera and Self-contained Sensors, IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 103-112, (2003)
- 6) H. Weinberg, Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications, APPLICATION NOTE AN-602, Analog Devices, Inc. (2002)
- 7) U. Forssell, P. Hall, S. Ahlqvist, F. Gustafsson, Novel Map-Aided Positioning System. Proc. of FISITA, Helsinki, Finland (2002)
- 8) F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson, P.J. Nordlund. Particle filters for positioning, navigation and tracking. IEEE Transactions on Signal Processing, (2002)
- 9) I. M. Rekleitis, A particle filter tutorial for mobile robot localization, Technical Report TR-CIM-04-02, Centre for Intelligent Machines, McGill University, (2004)
- 10) N.J.Gordon, D.J.Salmond, A.F.M. Smith, Novel Approach to Nonlinear/Non-gaussian Bayesian State Estimation, In IEE Proceedings on Radar and Signal Processing, 140,107-113 (1993).
- 11) S. Thrun. Probabilistic Algorithms in Robotics. AI Magazine, 21, 4, 93-109 (2000)