

都市商業施設内における PHS システムによるヒト回遊位置特定手法

大阪市立大学大学院工学研究科 岡本 篤樹
(株)都市交通計画研究所 田名部 淳
大阪市立大学大学院工学研究科 内田 敬

1. はじめに

都市におけるヒトの回遊行動を活発にし、商業施設内での購買力を高めることが活力ある経済・産業を進展させ、都市の活性化を促進させる。都市の活性化はヒトの回遊行動、購買行動、の2つの側面から捉えることができる。特に都市の活性化に大きな影響を与えるはと密接に関係している。商業施設内での滞在時間の分析だけでなく、来街者の店舗回遊順序や商品購入店舗も同時に観測することでより詳細な分析を行うことができる。

一方、情報通信技術の発達に伴い、GPS・PHSなどの位置特定機能を利用した調査が行われ、都市圏レベルのヒトの流動に関しては、その有用性も確認されている¹⁾。しかし、GPSではアーバンキャニオンや地下街施設での利用は困難である。また、PHSについても都市内での位置特定誤差が約50mと大きいことから、既存の位置特定手法ではヒトの詳細な動きを観測することは不可能である。都市内の施設や店舗間レベルの詳細なヒトの動きを捉えるには位置特定誤差を10m以下に抑える必要がある。

本研究では、PHSシステム端末を利用し地下商業施設内においてヒトの回遊位置特定実験を行った。あらかじめ回遊ルートを指定した移動体の真の位置と位置特定結果を比較し、位置特定精度向上のための検討を行う。

2. 位置特定手法

本研究では、移動体(被験者)にPHSシステム端末の受信機を携帯させ、移動体が受信する基地局の電界強度と地下商業施設内に設置した基準観測点の電界強度との類似度から移動体の位置を特定する。位置特定手法は朝倉他²⁾によって提案されており、本研究ではその位置特定手法を改良する。

まず、位置特定手法の基本概念を示す。基地局は公衆基地局と自営基地局の2つの基地局からなる。公衆基地局はPHSキャリアが設置したアンテナであるが、地下街などでは設置密度が低いことから本研究では利用しない。一方、自営基地局は簡易設置可能な発信機であり、公衆基地局からの電波を中継・拡幅する機能をもち、電波発信時に固有のIDを発信する。次に、固定基準点はPHSシステム端末を固定設置し、その場所で受信される基地局からの電界強度を観測する。実験に使用したPHSシステム端末(PEAMON)は周囲に存在する自営基地局の電波のうち、電界強度が強い順番に最大7局までの電界強度とその基地局のIDを記録することが可能であり、それ以外の基地局からの電界強度は0となる。このようにして観測された各基地局からの電波の受信電界強度を要素として、基準点電界強度ベクトルを定義する(式(1))。移動体についても同様な観測値を用いて受信電界強度ベクトルを定義する(式(2))。

$$\vec{\alpha}_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ik}, \dots, \alpha_{iK}) \quad (1)$$

$$\vec{\beta}_t = (\beta_{t1}, \beta_{t2}, \dots, \beta_{tk}, \dots, \beta_{tK}) \quad (2)$$

$\vec{\alpha}_i$: i 番目の固定基準点電界強度ベクトル i : 固定基準点番号 ($i=1, 2, \dots, i, \dots, I$)

$\vec{\beta}_t$: t 番目の移動体の受信電界強度ベクトル t : 移動体受信番号 ($t=1, 2, \dots, t, \dots, T$)

k : 基地局番号 ($k=1, 2, \dots, k, \dots, K$)

電界強度で表される空間から実空間上の距離(位置)を求めるには、基地局からの距離に対して電界強度が単調減衰すれば、複数の基地局の電界強度から三辺測量の原理を用いて正確な位置を特定することが可能である。しかしながら、図1に示すように電界強度と距離との関係は基地局からある一定距離まで電界強度は

単調減衰するが、その一定距離を超えると距離減衰感度は悪くなり、電界強度はほとんど減衰しない。このことは電界強度が弱い場合には、電界強度空間から実空間上の距離を求めるときにかなりの誤差が生じることを意味する。

そこでまず、電界強度の空間において、 $\vec{\alpha}$ と $\vec{\beta}$ の近接性を示す指標を式(3)から算出する。式(3)の分子部分 $|\vec{\alpha} - \vec{\beta}|^2$ は $\vec{\alpha}$ と $\vec{\beta}$ の近接性が高いほどその値が小さくなる。ここで、電界強度と距離の相関性を考慮すれば、指標 F_{ii} の値が小さければ実空間においても $\vec{\alpha}$ 、 $\vec{\beta}$ が対応する点は互いに近接していることが期待される。そこで、移動体の推定座標 ($\bar{X}_t(m), \bar{Y}_t(m)$) は固定基準点の座標を指標 F_{ii} の逆数で重みを付けて平均した値とし、式(4),(5)で与える。

$$F_{ii} = \frac{|\vec{\alpha}_i - \vec{\beta}_i|^2}{|\vec{\alpha}_i|^2 + |\vec{\beta}_i|^2} \quad (3)$$

$$\bar{X}_t(m) = \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{F_{ii}}\right)^m x_i / \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{F_{ii}}\right)^m \quad (4)$$

$$\bar{Y}_t(m) = \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{F_{ii}}\right)^m y_i / \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{F_{ii}}\right)^m \quad (5)$$

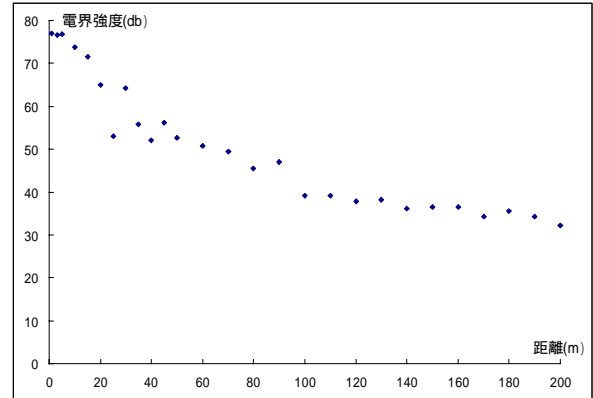


図1 電界強度と距離減衰

x_i : i 番目の固定基準点 x 座標 y_i : i 番目の固定基準点 y 座標 m : パラメータ

本研究の位置特定手法では、移動体の受信ベクトルと固定基準点ベクトルの近接性を示す指標から位置特定を行うため、距離減衰感度の高い(距離の近い)基地局からの電界強度を常に複数受信できる状態にすることで位置特定精度が上がると思われる。そこで、実験エリア内に自営基地局を高密度配置し、固定基準点ができるだけ多くの基地局から強い電波を受信できるようにした。

3. フィールド実験

本研究では、都市施設が集積した大阪市内のクリスタ長堀地下商業施設内で実験を行った。実験エリアは東西方向に約750m、通路幅は約13m、通路の両端に複数の店舗が立ち並び、1店舗の間口は約10~20mである。この実験エリアに自営基地局を40基、固定基準点を26個設置した。

図2に示すように実験エリアを固定基準点の設置密度の観点からクリスタ西部・東部(疎エリア1,2)とクリスタ中央部(密エリア)に分けた。移動体(被験者1名)は、実験エリア内にあらかじめ設定された移動ルートを約45分間歩行した。商業施設内の店舗間の移動、店舗内での購買や広場での滞在を観測するため滞在地点は10箇所とし、それぞれの地点で約3分間滞在した。固定基準点と移動体が携帯しているPHS端末のデータ収集周期はともに15秒であり、固定基準点は9:00~21:00までの12時間、データを収集している。固定基準点のベクトル要素は収集した12時間全てのデータから、基地局ごとに電界強度を平均した値である。

4. 位置特定精度向上の検討と結果

(1) エリア別の平均誤差 $G(m)$ とパラメータ m

1) 検討内容

エリア別の平均誤差 $G(m)$ を求める。移動体の真の位置座標 (X_t, Y_t) と推定位置座標 ($\bar{X}_t(m), \bar{Y}_t(m)$) の平均誤差を用いて評価し、その誤差が最小となるようなパラメータ m を決定する。平均誤差 $G(m)$ は式(6)から算出する。

$$G(m) = \sum_{t=1}^T \sqrt{(\bar{X}_t(m) - X_t)^2 + (\bar{Y}_t(m) - Y_t)^2} / T \quad (6)$$

パラメータ m の値は電界強度の空間から実空間上の位置座標にマッピングする際に近接した固定基準点座標を反映した程度を示す(式(4), (5) 参照)。つまり、固定基準点が疎に設置されている場合には、移動体の受信ベクトルと近接性を示すべき固定基準点ベクトルは少なく、その固定基準点ベクトルの位置座標をより反映するために、 m の値は大きくなるであろう。一方、固定基準点が密に設置してある場合には、移動体と近接性を示す固定基準点ベクトルが多数存在し、それら近接性を示す固定基準点座標を少しずつ反映すべきことから、 m の値は小さくなる。

2) 検討結果

エリア別に平均誤差が最小となるパラメータ m を決定した。ここでは、偶然に受信した基地局からのベクトル要素を除去するために、受信率 10%未満のベクトル要素を除去した固定基準点ベクトルを用いた。エリア別の平均誤差とパラメータ m の値を図 2 に示す。エリア別の平均誤差が最小になったのは密エリア(19.58m)であった。パラメータ m の値について、疎エリア 1 と密エリアの m の値はほとんど変わらないが、疎エリア 2 の m の値はかなり大きくなっている。これは通路形状が他のエリアと異なり、疎エリア 2 の西側で通路が二股に分かれていることから、固定基準点の設置密度がより疎であるためである。

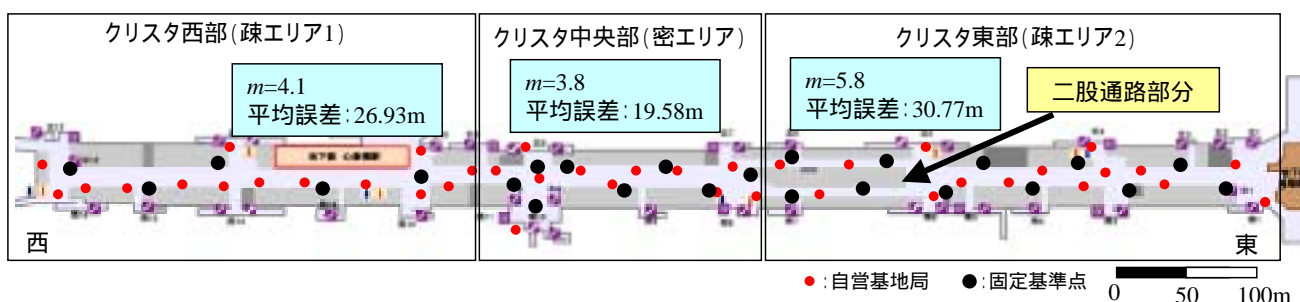


図 2 エリア別平均誤差・パラメータ m の検討結果

(2) 固定基準点ベクトルと移動体の位置推定

1) 検討内容

固定基準点ベクトルは基地局から受信した全ての電界強度をベクトル要素としているため、基地局との距離が遠く離れ、電波状況が不安定なベクトル要素も多く含んでいる。また、受信状況が不安定なベクトル要素は、移動体を受信する可能性も低く、近接性を参照する固定基準点ベクトルに含まれると位置特定誤差が大きくなることが懸念され、不適当なベクトル要素といえよう。このことから、固定基準点ベクトルの不適当なベクトル要素を除去するために、a)電界強度閾値(強さ)、b)受信率閾値(回数)、c)ベクトル要素数(要素)の3つの規準を用いて新たに固定基準点ベクトルを作成する。

a)は電界強度の弱い基地局の電波は距離が遠く離れ、距離の減衰感度が悪いことから正確な距離を推定できないため、電界強度の弱いベクトル要素を除去する。b)は固定基準点が基地局の電波を受信する確実性を考慮する。つまり、基地局からの電界強度が弱くとも、固定基準点の設置場所で確実に電波を受信できるのであれば位置特定に有用なベクトル要素になると考え、受信率閾値を設ける。c)については、その背景として、各固定基準点のベクトル要素数にはかなり格差がある(ベクトル要素数の最小: 8 個, 最大: 18 個)という事実がある。一方で、移動体が同時受信できるのは最大7局であり、受信していない基地局からのベクトル要素は0となる。このことより、式(3)から近接性の指標を算出するとき、移動体と固定基準点の実空間で近接していても指標 F_{ii} が大きな値になり、近接性が示されないことがある。つまり、ベクトル要素数が最大7個しかない移動体の受信ベクトルとベクトル要素数に格差のある固定基準点ベクトルを参照する式(3)からは正確なベクトルの近接性を求めるのは困難である。そこで、固定基準点のベクトル要素数の格差をなくすために各固定基準点のベクトル要素数を同数とする。

2) 検討結果

4.(1)に示したとおり、密エリアでは固定基準点ベクトルをほとんど改良せずに移動体の位置特定を行い約 20m の位置特定精度となった。ここでは、密エリアにおいて位置特定精度を可能な限り良くするこ

とを目的とし、移動体の位置特定を行う。位置特定手法はベクトルの近接性指標が最も安定する c)の方法を用いて新たな固定基準点ベクトルを作成し、平均誤差が最小となるパラメータ m を推定する。この推定したパラメータ m を用いて、密エリアでの移動体の推定座標を求める。

固定基準点ベクトル作成について、c)の方法では各電界強度ベクトルの要素数を同数にするために、1) 受信率の高い順、2) 電界強度の強い順、の 2 つを試す。前節で求めた密エリアでのパラメータ $m=3.8$ を用いて、それぞれの平均誤差を求めた結果を図 3 に示す。受信率の高い順に要素数を同数にした場合、要素数が 7 個のとき最小平均誤差 (11.41m) となった。また、電界強度の強い順では要素数が 5 個のとき、最小平均誤差 (13.88m) であった。この結果は、基地局からの電波受信の確実性を考慮した方が高精度となっていることを示している。さらに、最も精度の良かった固定基準点ベクトル(受信率の高い順に要素数を 7 個)を用いて、平均誤差が最小となるパラメータ m を決定したところ $m=2.8$ のとき最小平均誤差(10.76m)となった。このときの推定座標と真の移動軌跡を図 4 に示す。これは固定基準点ベクトル作成に電界強度と距離の関連性だけでなく電波受信の確実性も考慮し、移動体の推定座標をプロットした結果である。この推定座標結果は、移動体の滞在店舗を特定し、概ね移動体の移動軌跡を捉えることも可能であることを示している。

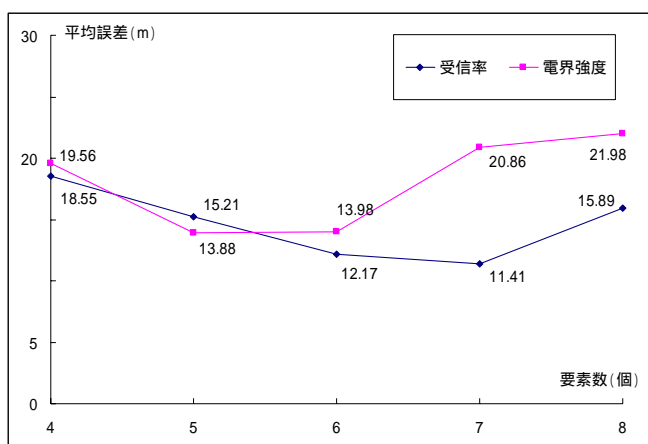


図 3 ベクトル要素数と平均誤差

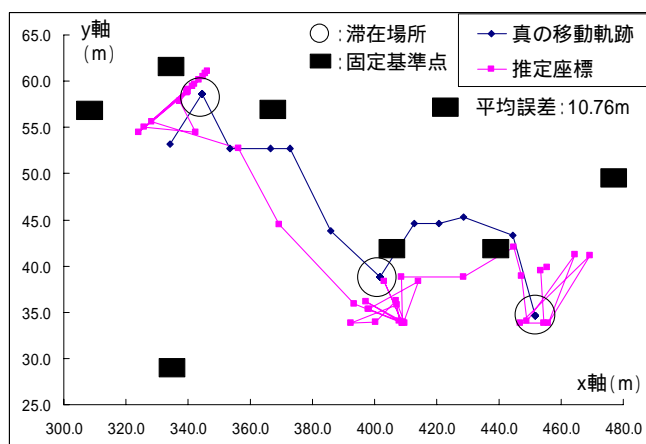


図 4 移動体の推定座標 ($m=2.8$ のとき)

5. まとめ

商業施設内において、ヒトの店舗間の移動や滞在時間などの詳細な分析を行うことを目的として位置特定誤差を 10m 以内に抑えるべく、手法を検討した。固定基準点の設置密度が密の場合に位置特定誤差が 10.76 mであったことは、目標とする位置精度をほぼ達成しているといえる。一方、設置台数に伴う設備投資等のコスト面を考えると、高密度配置することで高い位置精度を得ることのみならず、調査目的に応じた位置精度が得られる最低限度の設置台数(コスト)を明らかにすることが求められる。

今後、位置特定手法の改良については、まず固定基準点ベクトルの作成方法を検討する。次にベクトルの近接性指標についても、指標の算出方法を改良することで位置特定精度を向上する。固定基準点の最適な設置台数については、固定基準点設置の密エリアにおいて、固定基準点の個数を減らしながら(減らす固定基準点のデータは使用しない)移動体の推定座標を求め、位置特定精度と設置台数の関係を検討する。

謝辞 本研究では、フィールド実験にあたって(株)クリスタ長堀にご支援、ご協力をいただきました。また、大阪市立大学・都市問題研究「都市大阪の集客性・活動魅力度向上に向けた方策に関する研究」において様々な方から貴重なコメントをいただきました。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝倉, 羽藤, 大藤, 田名部: 「PHSによる位置情報を用いた交通行動調査手法」, 土木学会論文集, No.653/-48, pp95-104, 2000
- 2) 島田, 井料, 朝倉: 「基準観測点を用いた PHS による移動体の位置特定手法の開発と評価」, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2003