

II-9 都市の商業空間における PHS 電界強度を利用したヒトの回遊行動分析手法

The round trip of analysis of the humans using PHS system in an urban commercial institution.

岡本篤樹¹・内田敬²

Atsuki OKAMOTO・Takashi UCHIDA

抄録：市街地の活性化には、購買行動・施設間回遊など相互間の関連性を把握した上での施策が必要である。その基礎となるヒトの回遊行動観測には移動体通信技術の活用が可能である。

本研究では簡易基地局の増設が容易な PHS に着目し、大規模施設内における回遊行動観測の手法、1) 各時点のヒト所在位置特定、2) 通時での移動・滞在判別、を検討する。1) は D-GPS の様に基準局情報を参照することで精度向上を図り、複数基地局の参照重みに関して、実証的な検討をする。2) は 1) の結果をヒト移動速度情報に変換し、速度値から移動・滞在判別アルゴリズムを構築する。本稿は手法を詳述し、地下街実験データに基づく検討プロセス及び結果を具体的に示す。

キーワード：移動体通信技術、位置特定手法、歩行者交通行動、市街地活性化、回遊行動分析

1. はじめに

中心市街地は商業施設やビジネスなど様々な機能が集積し、人々の生活、娯楽、交流の場であり、その街の個性、魅力を代表すべき場所である。しかしながら、近年、モータリゼーションの進展への対応の遅れや商業施設を取り巻く環境の変化などを背景に、中心市街地の衰退・空洞化という問題が深刻化している。そのため、中心市街地活性化のための施策が各自治体で行われてきた¹⁾。市街地活性化と商業施設の“にぎわい”や“商業活力”は密接に関係している。つまり、商業施設への来客数や滞在時間の増加は直接的に中心市街地の活性化に繋がるといえる。一方で、情報通信技術の高度化に伴い、GPSやPHSなどに代表される移動体通信システムは飛躍的に利用者数を増加させており、商業施設における回遊調査の手段として有用性が確認されている²⁾。また、移動体通信技術を用いたヒトの回遊行動観測から、商業施設内のヒトの回遊行動（うろつき・にぎわい）や購買行動などの関連性を捉え、分析することが重要と考える。

本研究では、簡易基地局の増設が容易な PHS に着目し、地下商業施設内実験での適用観点から、ヒトの位置特定と分析手法の検討を行う。位置特定実験では、1) 時々刻々と変化するヒトの所在位置の特定、2) 通時的に見たときの移動・滞在判別、の 2 点が必要とされる。1) は、D-GPS のように簡易設置された複数基地局の情報を参照し、重みとすることで精度向上を図る。2) は 1) の位置特定結果をヒト移動速度情報に変換し、移動速度を推定する。移動と滞滞在の判別を速度変化から捉え、移動・滞在判別のアルゴリズムを構築する。

2. 中心市街地活性化とヒト回遊行動

2.1 中心市街地活性化とヒト位置情報

中心市街地の活性化のキーワードとして、“にぎわい”が挙げられる。来街者は商業施設などでの人通りの多さや人の交わりから“にぎわい”の印象を受ける。そこで、“にぎわい”を高めるような市街地デザインや商業情報を提供することで、中心市街地の活性化の一端を担うことができる。一方で、市街地の活性化には回遊行動の刺激、すなわち、回遊性の向上も重要である。本研究における回遊とは、ヒトの位置情報の繋がりと定義する。回遊行動が活性化することで、商業施設での購買活動に刺激を与え、経済的効果は高くなる。つまり、回遊行動（ヒト位置情報の繋がり）を活用することで、商業施設及び市街地の活性化を図ることとなる。

上述したように、街の“にぎわい”の程度やヒトの回遊行動を推測することは、市街地の活性化の観点からも重要である。具体的には、大都市地下街等の屋内空間で位置情報を正確に把握することで、歩行者のナビゲーションによる“快適さ”や購買行動への刺激を与えることができる。また、ヒトの回遊行動分析から、店舗間の移動・滞滞在を捉え、商業マーケティングの観点から店舗の配置等を決定することができる。

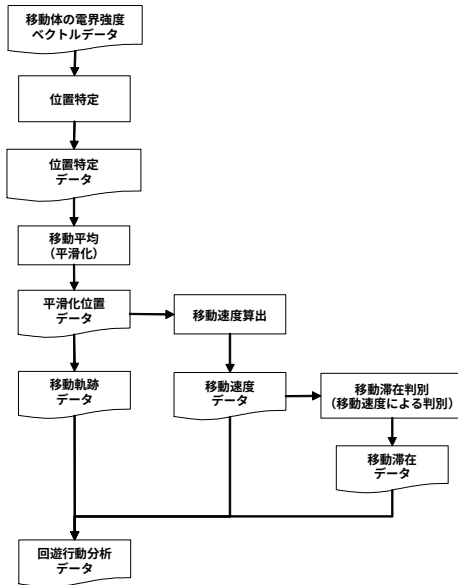
2.2 中心市街地活性化への本研究提案

本研究では移動体に受信機を携帯させ、移動体が受信する基地局の電界強度と簡易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。

本研究での回遊行動を推測するための分析手法を図-1 に示す。移動体の電界強度ベクトルデータから、

1： 学生員，工修 大阪市立大学大学院工学研究科
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3 丁目 3 番 138 号 TEL 06-6605-2731, FAX 06-6605-3077)
2： 正員，工博，大阪市立大学大学院工学研究科

位置特定を行う．移動体位置データの平滑化を行い，移動軌跡を推定し，移動速度を算出する．また，移動速度閾値を用いた移動滞在判別を行う．



図－1 回遊行動推測フロー

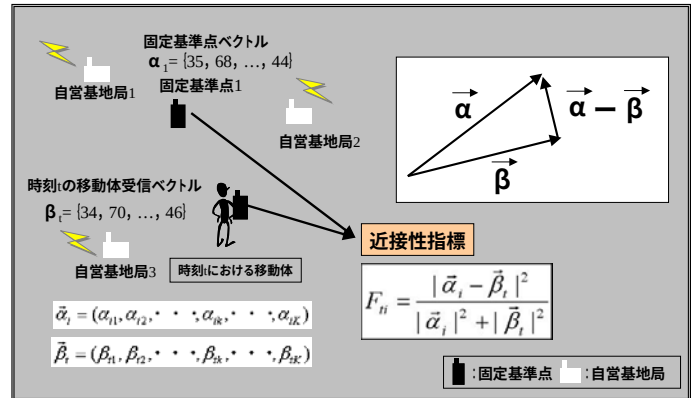
3. 中心市街地における回遊行動分析手法

3.1 本研究での位置特定手法³⁾

中心市街地における回遊行動調査のデバイスとして，主に 1) GPS，2) PHS，の 2 つが挙げられ，ヒトの位置を特定している．1) は衛星から受信した情報から位置を特定する技術である．GPS による位置特定の精度は比較的高く，誤差は 30m 程度である．しかし，GPS の電波は直進性が高いため，建物の中やビルの谷間などでは精度が不十分になる．特に地下街では利用することができない．2) は PHS 携帯電話の基地局からの受信電波の強さから現在位置を特定する技術である．位置特定の精度は比較的低いが，建物内や地下街でも位置特定が可能である．

本研究では，移動体に PHS ベースの受信機を携帯させ，受信する基地局の電界強度ベクトルと地下商業施設内に設置した基準点の電界強度ベクトルとの近接性から位置を特定する．これまでに提案された島田ら⁴⁾の位置特定手法を改良することで，高精度な位置特定を行う．位置特定手法の概念図を図-2 に示す．ここで，自営基地局は簡易設置可能な発信機であり，電波を中継・拡幅する機能を持ち，電波発信時に固有の ID を発信する．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．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．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．基準点電界強度ベクトルは，移動体受信電界強度ベクトルとの近接性を比較するための参照ベクトルともいえる．

$\vec{\alpha}_i$: i 番目の固定基準点電界強度ベクトル
 $\vec{\beta}_t$: 時刻 t の移動体の受信電界強度ベクトル



図－2 位置特定概念図

固定基準点と移動体が発信した電界強度の観測結果から移動体の位置を推定する．固定基準点は各自営基地局からの電界強度を観測し，そのベクトル要素は観測された電界強度を平均することにより決定する．移動体が発信した電界強度ベクトルと固定基準点で観測された電界強度ベクトルの類似度を示す近接性指標を式(1)から算出する．

$$F_{ti} = \frac{|\vec{\alpha}_i - \vec{\beta}_t|^2}{|\vec{\alpha}_i|^2 + |\vec{\beta}_t|^2} \quad (1)$$

一般に指標 F_{ti} は移動体と固定基準点が空間的に近ければ近いほど小さい値になると期待される．移動体の推定座標 $((\bar{X}_t(m), \bar{Y}_t(m)))$ は各固定基準点の座標を指標 F_{ti} の逆数で重みを付けて平均した値となり，式(2)，(3)で表される．

$$\bar{X}_t(m) = \sum_{i=1}^I \left(\frac{1}{F_{ti}} \right)^m x_i / \sum_{i=1}^I \left(\frac{1}{F_{ti}} \right)^m \quad (2)$$

$$\bar{Y}_t(m) = \sum_{i=1}^I \left(\frac{1}{F_{ti}} \right)^m y_i / \sum_{i=1}^I \left(\frac{1}{F_{ti}} \right)^m \quad (3)$$

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

パラメータ m は，移動体の位置を電界強度空間における近接性に基づいて実空間上にマッピングする際に固定基準点座標を反映する度合いを示す．移動体の受信する電界強度は実空間ごとに受信状況がかなり変化するため，パラメータ値も実空間や時間変動ごとにそれぞれ異なった値になることが予測される．

本稿では，時々刻々と変動する人通りや店舗間隔な

どの空間的特徴から空間を細分化し、その空間に適したパラメータを推定する。

3.2 移動軌跡と移動速度の算出

推定された位置データは、電界強度の空間的変動や時間変動などからなるノイズを含んでいるため、位置データを平滑化する。移動平均期数が少なければ、誤差を平滑できないことがある。一方、期数を多くすると移動時の動きの感度が悪くなることもある。本研究では、いくつかの移動平均期数で平滑化した結果、移動平均期数＝5 個とした。移動速度については、平滑化された位置座標の差分から移動距離を求め、データ収集周期（15 秒）から移動速度を算出する。

3.3 移動・滞在判別分析手法

ヒトの移動と滞在を識別する方法として、推定される位置座標の変動や速度変動から移動と滞在の閾値を設け判別することが考えられてきた。しかし、本研究のように PHS の電界強度から位置を特定する場合、電波の構造物による乱反射や人体の反射・吸収効果により一様な電界強度状態を保つことが難しく、電界強度の変動が位置データにノイズを与える。その位置データから算出された位置座標や速度を用いて、移動と滞在を判別すると、誤判別を起こす可能性が高くなることは避け難い。本研究では、移動体の移動速度からも最も誤判別の小さくなる移動速度を求め、移動と滞在を判別するための移動速度閾値を設定したときの誤判別率を求める。

4. フィールド実験

4.1 フィールド実験の枠組み⁴⁾

本研究では、中心市街地のヒトの動きを観測するために、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 の地下通路の両端に複数の店舗が並び、公共交通機関・地上商業施設へのアクセス通路としても利用されている。移動体（テスター 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（10:00～10:45）歩行した。商業施設内店舗の移動、店舗内での購買や広場での滞在を観測するといった観点から滞在地点は 10 箇所とし、それぞれの地点で約 3 分間滞在した。固定基準点は、自営基地局からの電波を 9:00～21:00 の 12 時間観測した。

4.2 実験結果の検討内容

(1) 位置特定結果

基準点電界強度ベクトルについては、受信電界強度の時間変動を考慮し、以下に示す 3 つの固定基準点ベクトルを作成する。

a) 朝（10:00～11:00）の電界強度ベクトル
b) 昼（13:00～14:00）の電界強度ベクトル
c) 夜（19:00～20:00）の電界強度ベクトル

である。作成した基準点ベクトルは大きく 2 つに分類される。a) は、テスターの移動時間と同一時間帯の基準点ベクトルであり、テスターの受信状態と最も近い。つまり、時々刻々と変化する電界強度を考慮した参照ベクトルといえることから、高精度な位置特定が予測される。b) 、 c) は、テスターと同一時間帯の参照ベクトルではない。b) は、昼時間の人通りの多い時間であり、人体効果の影響から電界強度にばらつきが生じ、位置特定誤差が大きくなることが予測できる。c) は、比較的ヒトの交通量が少ないことから、電界強度は安定し、位置特定誤差は b) と比較すると小さくなると考えられる。

(2) 移動・滞在判別分析

前項の a) 、 b) 、 c) の 3 つの参照ベクトルから位置特定を行い、平滑化された移動速度を推定する。推定された移動速度を用いて、移動滞在判別を行うときの閾値を決定する。この速度閾値から移動・滞在判別を行い、誤判別率を求め移動・滞在判別の精度とする。ここでは、移動速度閾値の設定方法を検討する。

5. 実験結果のまとめ

5.1 位置特定結果

位置特定結果と誤差許容範囲（最小誤差+5 m）としたときのパラメータ値を表-1 にまとめた。基準点を密に設置しているエリアでは、基準点と基地局の設置距離が近接しているため、電波を安定して受信できる。そのため、疎のエリアと比較すると全ての時間帯において、位置精度が高くなっている。また、前章で予測したように、テスターの移動時間と同一時間帯（朝 {10:00～11:00} ）の電界強度ベクトルによる位置特定精度は、最小誤差が 10m 前後とかなり高精度な位置特定であった。これは、空間的限界（基準点設置密度最大）と時間変動最大考慮した場合の最小誤差であり、設備コスト最大、データ処理コスト最大時の最小誤差といえる。

表-1 位置特定結果のまとめ

設置密度	基準点ベクトル (参照ベクトル)	位置特定結果		誤差許容範囲 (最小誤差+5m)	
		パラメータ	最小誤差 (m)	パラメータ	最小誤差 (m)
疎 設置間隔:50.0m/台	a) 朝	8.8	29.95	6.1	34.87
				17.5	34.85
	b) 昼	10.5	31.04	7.2	35.42
				18.1	35.86
	c) 夜	7.0	29.17	4.1	33.64
				24.5	33.58
密 設置間隔:21.4m/台	a) 朝	8.1	10.85	5.9	15.17
				18.4	15.69
	b) 昼	8.8	13.05	7.1	17.93
				27.6	17.32
	c) 夜	6.5	11.67	4.2	15.74
				29.3	15.73

パラメータと最小誤差の関係を図-3 に示す。図-3 中(I)では、パラメータが大きくなるに連れて、最小誤差は小さくなっている。しかしながら、図-3 中(II)では、最小誤差の変動はパラメータ値に関係なくほとんど変化していない。これは、最小誤差の許容度によっては、必ずしも誤差が最小となるパラメータ値を設定せずとも、許容範囲内の移動体座標を特定でき、データ処理コストを削減することができる。

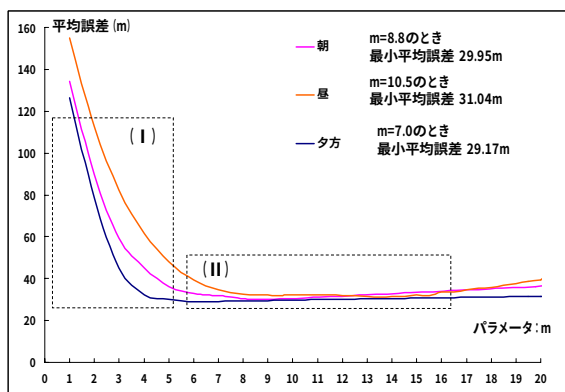


図-3 パラメータと最小誤差の関係

5.2 移動軌跡と移動速度

テストターの移動軌跡（朝 {10:00~11:00}）を図-4 に示す。位置特定結果を平滑化することで、テストターの移動ルートをはほぼ再現できている。また、平滑化された位置特定結果から推定された移動速度は、図-5 に示すようにテストターの移動速度とほぼ同じ結果が得られている。

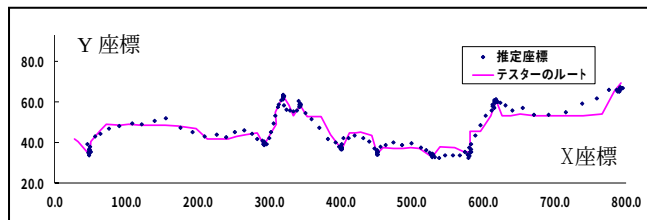


図-4 テスターの移動軌跡と推定座標

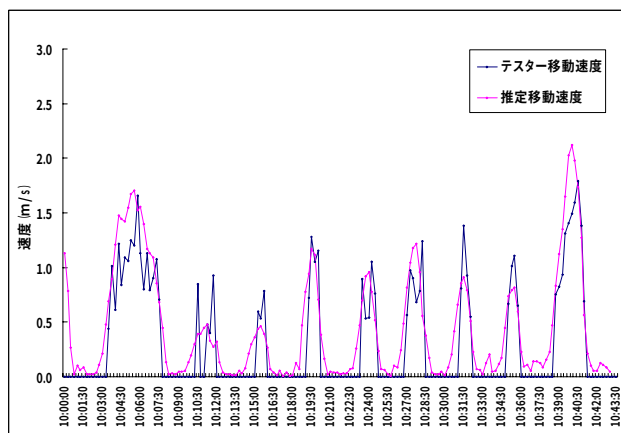


図-5 テスターの移動速度と推定速度

5.3 移動・滞在判別結果

これまでの研究から、ヒトの移動と滞在を判別する

ことは容易ではない。実際の回遊行動における滞在店舗でも、店舗内を移動することが考えられるほか、位置精度の問題から、滞在しているにも関わらず、位置特定座標がばらつくためである。

本研究では、高精度な移動速度を用いて、移動と滞在の移動速度閾値を設定することで、移動・滞在判別を行う。テストターの移動データから移動と滞在を分類し、推定された移動速度でランク分けした結果を表-2 に示す。このとき、最小誤判別率となる移動速度閾値は0.5(m/s)であり、誤判別率は約5%と正確な移動・滞在判別が行える。

表-2 移動・滞在判別分析の移動速度閾値

移動速度 閾値 (m/s)	誤判別数				誤判別率
	滞在	滞在数/全数	移動	移動数/全数	
0.0	117	68%	0	0%	67.6%
0.1	53	31%	0	0%	30.6%
0.2	32	18%	0	0%	18.5%
0.3	18	10%	1	1%	11.0%
0.4	11	6%	3	2%	8.1%
0.5	2	1%	6	3%	4.6%
0.6	2	1%	11	6%	7.5%
0.7	1	1%	14	8%	8.7%
0.8	0	0%	19	11%	11.0%
0.9	0	0%	25	14%	14.5%
1.0	0	0%	30	17%	17.3%
次の級	0	0%	56	32%	32.4%

最小誤判別率

6. おわりに

本研究では、高精度な位置特定結果からヒトの移動速度を推定し、移動・滞在判別における移動速度閾値の設定方法を提案した。その結果、誤判別率を抑えた精度の高い移動・滞在判別分析を行った。今後、移動・滞在判別結果、GIS（店舗データ）、アンケートデータ等を組み合わせることで、商品購入店舗やヒトの興味を刺激した店舗などの判別を行う。また、移動軌跡による回遊動線を捉えることで、市街地の“にぎわい”を評価することが可能になり、市街地の魅力向上や活性化を促すことに繋げることが可能になる。

参考文献

- 1) 大阪市都市整備局 総合計画
21http://www.city.osaka.jp/keikakuchousei/sougou/index.html
- 2) 岡本, 朝倉, 内田, 近藤, 田名部, :「PHS システムを用いた狭域での消費者回遊行動追跡のための位置特定手法」, 土木計画学研究講演集, CD-ROM, 2002
- 3) 岡本, 内田:電界強度ベクトルを参照する PHS ベース位置特定手法の検討, 土木計画学研究・論文集 Vol.22, pp, 2005
- 4) 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」, 土木計画学会, CD-ROM, 2003