

## 歩行移動者の搜索に影響を与える因子の実験的調査

前田義信・五十嵐晃・田野英一・牧野秀夫

### An Experimental Approach to Identify the Key factors Influencing Pedestrian Search Behavior

Yoshinobu MAEDA, Akira IKARASHI, Eiichi TANO and Hideo MAKINO

**Abstract:** In order to identify the key factors involved in pedestrian search behavior, we analyzed experimental data using statistical designs. Firstly a GPS-GIS-based search mechanism was used and search time, together with geographical characteristics of the town, luminosity and GPS accuracy with between 25.0m and 61.5m in SPS (Standard Positioning Service) were measured. Then the sense of direction of the subjects was derived from SDQ-S (Sense of Direction Questionnaire-Short Form). Statistical methods of regression and path analysis were applied to the data. Results from the analyses identified geographical properties such as the complexity of the road network and the geographical density of landmarks as being most influential in the pedestrian's search process. The accuracy of the GPS system itself was much less important.

**Keywords:** 地理情報システム (GIS), GPS (Global Positioning System), ランドマーク (Landmark), 方向感覚 (Sense of Direction), 統計解析 (Statistical Analysis)

#### 1. はじめに

西暦2014年には4人に1人が65歳以上になると推計される高齢社会(国立社会保障・人口問題研究所, 2003)を目前に控え, 高齢者の介護問題は重要な課題のひとつになっている。アルツハイマー型老年痴呆等の老人は身体的には問題ないが, 介護者の監視外で地域を徘徊することがある。徘徊は老人を交通事故や犯罪に巻き込む可能性があるため, 徘徊があって所在が不明になったときには, 介護者は老人を早急に保護しなければならない。また, 老年人口の増加とは逆に子供の数は年々減少しているが, 子供の事故や誘拐の件数は増加し, 子供の安全を守る(GIS NEXT EXPRESS NEWS, 2003)ためにも位置確認や早期保護が必要となってきた。GISやGPS

(全地球測位システム)は, こうした社会ニーズにも有効であるとみなされている(河村ほか, 1995)。現在では, 携帯電話にGPS-GIS機能が組み込まれるようになり, 老人や子供(歩行移動者, 以後, 移動者)の位置を介護者あるいは保護者が容易に確認できるようになった。

本論文の著者の一人である五十嵐ほか(1998, 2002)はGPSの単独測位を徘徊老人の位置特定に利用した搜索装置を開発した。実験(五十嵐ほか 2002)では, GPSアンテナ・受信機を着用した成人の健常者を移動者とし, 搜索装置を用いて移動者を発見・保護するまでに要する時間が調べられた。介護者や保護者を想定した搜索者は自動車で移動した。その結果, 次の知見『SA<sup>1)</sup>』の解除前後における2回の搜索実験において, GPSの測位誤差(以後, GPS誤差)が大きく異なっている(解除前: 誤差約100m, 解除後: 誤差約10m)(安田, 2001)にもかかわらず, 搜

前田: 〒950-2181 新潟市五十嵐2の町 8050  
新潟大学工学部福祉人間工学科  
Tel 025-262-7431  
E-mail maeda@bc.niigata-u.ac.jp

索者が移動者を保護するまでの時間は殆ど変わらない』を得た。

人の移動行動を支援する一般のナビゲーション・システムでは、GPS誤差の低減(数m以下)が最も望まれる成果のひとつと考えられている(例えば Golledge et al., 1998 ; Loomis et al., 2001 ; 田野ほか, 2001 ; Maeda et al., 2002 ; Makino et al., 2003)。しかし、移動者の搜索においてはGPSの測位精度は重要ではないのであろうか。そうであるならば、GPSの測位精度の他にどのような要因が移動者を搜索する作業に影響を与えるのであろうか。

本研究の主な目的は、五十嵐ほか(2002)の実験から得られた知見に対する実験的な検証を試みると同時に、データ分析を行って移動者の搜索に大きく影響を与える要因を明らかにすることである。以下、2章では搜索実験の概要と結果について説明する。3章では地理空間の特性(本論文では道路網次元(フラクタル次元)とランドマーク密度の2つ)や明るさ、GPS誤差が移動者を搜索する時間に影響する重回帰モデルを提案する。続く4章では搜索者の方向感覚を調査し、それを反映させた逐次パスモデル(拡張された重回帰モデル)を5章で提案する(図1)。6章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

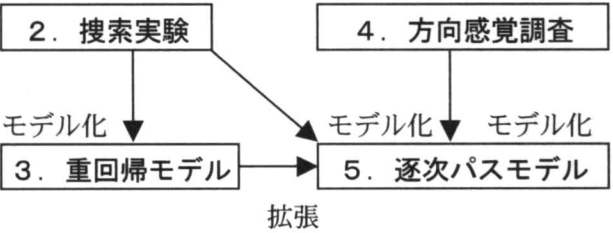


図1 本論文の構成

## 2. 搜索実験

五十嵐ほか(2002)の実験と同様、搜索実験を新潟市<sup>2)</sup>とその近郊(新潟市)の市街地および郊外で行った。実験結果が搜索装置に依存したものである可能性を除くため、今回の実験では五十嵐ほか(2002)の実験とは異なる搜索装置(GPSMAP<sup>3)</sup>)を用いた。

## 2. 1 搜索者

15回の搜索実験を行った(表1参照、表中の $m$ は男性、 $f$ は女性を表す。視力は裸眼時の左右の平均値)。実験では著者の1人が移動者となって街を自由に動き回った(図2)。移動者は建物の内部には入らず、常に道路上を歩行(ないしは停止)するよう義務付けた。搜索者は20~60代までの成人とし、搜

表1 搜索者と場所

#	搜索者			場所
	性別	年齢	視力	
1	$m$	24	2.0	郊外
2	$m$	24	1.0	郊外
3	$m$	21	1.0	郊外
4	$m$	25	1.0	郊外
5	$f$	29	1.5	郊外
6	$m$	66	0.6	郊外
7	$f$	29	1.1	郊外
8	$m$	23	0.7	郊外
9	$m$	64	1.0	市街地
10	$m$	23	2.0	市街地
11	$f$	30	1.5	市街地
12	$m$	24	1.2	市街地
13	$f$	34	1.2	市街地
14	$m$	27	1.0	市街地
15	$m$	38	1.5	市街地



図2 移動者の移動例(実験#10)

“S”は出発地点, “G”は保護地点。

索の際の移動は自家用車を使用した。なお、搜索者は日常的に自動車を運転している。観測データ（2.3節参照）の計測要員として、あるいは搜索者の安全運転を補佐する目的で、著者の別の1人が搜索者の運転する乗用車に同乗した（以後、同乗者）。実験中に搜索者が体調不良を訴えたり、運転上の危険な状況に遭遇しない限り、搜索者と同乗者の実験中の会話は禁止した。

## 2.2 手順

搜索実験の手順を示す。

- (1) 搜索者は搜索装置の使い方に関する説明を受けた後、30分間、搜索装置を自由に使うことで操作に慣れる。
- (2) 搜索者が運転する自動車に移動者と同乗者も乗り、出発地点（実験開始地点）へ移動する。
- (3) 移動者はGPS携帯<sup>3)</sup>を持ち、出発地点から徒歩で移動を開始する。
- (4) 移動者が出発してから10分後、搜索者がノート型パーソナルコンピュータ（以後、ノートPC）で、移動者および搜索者自身のGPS携帯を呼び出す。
- (5) 移動者および搜索者自身の位置をノートPCの画面地図上で確認した搜索者は、移動者の位置に向かって自動車で移動する（1回目の搜索）。
- (6) ノートPCの表示位置に搜索者が到着したが移動者を保護できない場合、搜索者は再びノートPCで移動者と搜索者自身のGPS携帯を呼び出し、 $k$ 回目（ $k=2,3,\dots$ ）の搜索を行う。
- (7) 移動者を保護するまで搜索作業を続行する。搜索者が移動者を保護した時点で実験を終了する。

搜索実験においては、天候や交通量等の実験環境を統一することが難しい。そこで無作為割り付けに従って、任意の時刻、出発地点から搜索実験を開始し、実験日は一般に渋滞が多いとされる五、十日も含めて選定した。実験は平成14年11月～平成15年2月に行った。

## 2.3 観測変数

2.3.1から2.3.5に、搜索実験で観測したデー

タ（観測変数）とその定量化の手法について述べる。

### 2.3.1 搜索時間（ $X_5$ ）

搜索を開始してから搜索者が移動者を発見・保護するまでに要した時間を搜索時間  $X_5$  (分) とした。

### 2.3.2 GPS誤差（ $X_4$ ）

GPS携帯の測位精度はGPSMAPを通して定性的に得ることができる。それらの定性的データを定量的データに変換するために、予備実験として定点測位実験を行った。GPS携帯を屋外に設置したとき（精度A）と屋内に設置したとき（精度B）において、それぞれ1分間隔で20回計測し、2 drms（Twice the distance root mean square）値  $\delta$  [m]：

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)}, \quad (1)$$

を算出した。ここで、 $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  はそれぞれ測位した経度・緯度の平均偏差を距離（単位はメートル）に換算した値<sup>4)</sup>である。全測位値の95%が2 drms値を半径に持つ円内に収まるといわれている（Kaplan, 1996）。新潟大学での定点測位実験の結果、 $\delta_A = 25[\text{m}]$ 、 $\delta_B = 120[\text{m}]$ を得た（ $\delta_j$ （ $j=A,B$ ）は精度  $j$  の2 drms値）。搜索実験では、搜索者が移動者を呼び出した回数だけ精度  $A$  または  $B$  が得られるので、 $\delta_A$  と  $\delta_B$  の値を用いて、GPS誤差  $X_4$  [m] を

$$X_4 = \delta_A \frac{N_A}{N} + \delta_B \frac{N_B}{N}, \quad (N = N_A + N_B) \quad (2)$$

で評価した。ここで、 $N$  は搜索者が搜索実験で移動者を呼び出した全回数、 $N_j$ （ $j=A,B$ ）は精度  $j$  が出現した回数を表す。式(2)より、GPS誤差  $X_4$  は搜索実験時の平均的な2 drms値であると解釈できる。

### 2.3.3 照度（ $X_3$ ）

明るさが搜索時間に与える影響を確認するため、搜索実験時の照度を計測した。具体的には、搜索開始時と終了時の2地点における日向での照度の平均値  $\beta_{start}$ 、 $\beta_{goal}$  を計測し、

$$X_3 = \frac{\beta_{start} + \beta_{goal}}{2}, \quad (3)$$

を照度 (lx) と定めた。

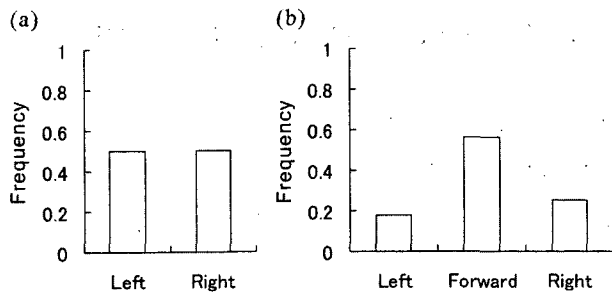


図3 交差点における移動者の方向選択の頻度。  
(a)三叉路, (b)十字路

表2 搜索実験の結果

観測変数	平均	標準偏差	最大	最小
搜索時間 (分)	32	28	98	6
道路網次元	1.29	0.07	1.41	1.21
ランドマーク密度 (個/地図数)	15.4	7.0	33.5	6.7
照度 (lx)	23069	21686	61550	486
GPS誤差 (m)	30.1	10.9	61.5	25.0
初期距離 (m)	548	93	708	350

#### 2. 3. 4 ランドマーク密度 ( $X_2$ )

ランドマーク (公共施設やビルの名称等) は搜索者の空間認知やナビゲーションに影響を与える中心的な役割を担っている (Loomis et al., 1999). そこで, 搜索者が搜索時に参考にすると思われる GPSMAP 上のランドマーク数に注目する. 具体的には, GPSMAP に提示された地図上のランドマークを数え, 提示された地図数で除す. こうして得た単位面積当たりのランドマーク数をランドマーク密度  $X_2$  とした.

#### 2. 3. 5 道路網次元 ( $X_1$ )

道路網が複雑化するほど交差点の数が増加するため, 道路網はランドマークと同様に搜索者のナビゲーション, 特に移動行動プラン (若林, 1999) に影響する要因である. 搜索者は GPSMAP を通して移動行動プランを形成する. しかし道路網が複雑であれば, 形成した移動行動プランを搜索段階において遂行することが難しい. 道路網の複雑さを表す尺度として幾つか考えられるが, 本論文では道路網の自己相似性に着目しフラクタル次元を採用する. フラクタル次元は個々の道路の局所的な特性ではなく,

全体的な特性を表す尺度である. 搜索範囲の地図に描かれる道路網のフラクタル次元を, ボックス・カウント法により計算し (本田, 2002), 道路網次元  $X_1$  とした. 道路網次元は 1 ~ 2 の範囲に実数値を持つ. 搜索範囲の地図に道路が 1 本だけ存在する場合,  $X_1 = 1$  となる. 都会のように複数の道路が網状に複雑化すると, 道路網次元の値は大きくなるが,  $X_1 > 2$  になることはない.

#### 2. 4 移動者の行動

移動者は, 図 2 に示すように搜索者が容易に予測できないような移動の仕方をしたが, ここでは移動者が分岐点に到達するたびに選択した進行方向についても調査した (図 3). 図 3 (a) は三叉路における左折, 右折の選択 (全搜索実験で 359 回. うち左折は 180 回, 右折は 179 回), 図 3 (b) は十字路における左折, 前進, 右折の選択 (全搜索実験で 228 回. うち左折は 41 回, 前進は 129 回, 右折は 58 回) の頻度を表す. 三叉路では左右均等に進路を選択したといえるが, 十字路では比較的前進を選択する傾向にあった.

#### 2. 5 結果

表 2 に搜索実験の結果を示す. 搜索時間は搜索者全員の平均で 32 分であった. 割り付けた場所の道路網次元は平均 1.29 であり, 市街地では最大で 1.41, 郊外では最小で 1.21 であった. 一方, 割り付けた場所のランドマーク密度は平均 15.4 個, 市街地では最大で 33.5 個, 郊外では最小で 6.7 個であった. 照度は平均約 2 万ルクス, GPS 誤差は平均 30.1m であった.

移動者は一定速度で歩行するように心掛けたが, 道路網の形状に依存して, 搜索開始直後の搜索者-移動者間の直線距離 (初期距離) は各回で異なる. 搜索時間と初期距離の相関を調べたが, 相関は有意ではなかった (相関係数は 0.01 以下). すなわち, 初期距離は搜索時間に影響しないと考えられる. 参考のため表 2 では初期距離も表記する.

#### 3. 重回帰モデル

道路網次元  $X_1$ , ランドマーク密度  $X_2$ , 照度  $X_3$ ,

GPS誤差  $X_4$  の4つの観測変数が検索時間  $X_5$  に影響を与える重回帰モデル：

$$X_5 = \alpha_{51}X_1 + \alpha_{52}X_2 + \alpha_{53}X_3 + \alpha_{54}X_4 + e_5, \quad (4)$$

を提案する。  $X_1 \sim X_5$  のデータは標準化されており、  $\alpha_{5i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) は、  $X_i$  が  $X_5$  に影響（効果）を与える標準化偏回帰係数を表す。  $e_5$  は誤差変数を表す。

重回帰モデルの共分散構造（対称行列）は、

$$\Sigma_1 = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & & & & \\ \vdots & \ddots & & & \\ \text{Cov}(X_1, X_5) & \cdots & \text{Var}(X_5) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \text{Var}(X_5) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ \sigma_{12} & 1 & & & \\ 0 & 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \\ \alpha_{51} & \alpha_{52} & \alpha_{53} & \alpha_{54} & \sum_{i=1}^4 \alpha_{5i}^2 + \theta_5 \\ +\sigma_{12}\alpha_{52} & +\sigma_{12}\alpha_{51} & & & +2\alpha_{51}\sigma_{12}\alpha_{52} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

で与えられる。  $X_1 \sim X_4$  の分散は、データが標準化されているので1（相関係数）になる。ここで、  $\theta_5$  は誤差変数  $e_5$  の分散（相関係数）を表す。また、ランドマーク密度と道路網次元は互いに地理空間の特性を表す変数なので、共分散（データは標準化されているので相関係数）  $\sigma_{12}$  を設定した。

例えば、  $X_1$  が  $X_5$  へ与える影響は式(5)における5行1列目の要素：  $\alpha_{51} + \sigma_{12}\alpha_{52}$  で表される。これは直接効果となる  $\alpha_{51}$  と、  $X_1$ - $X_2$  間の相関を経由する  $\sigma_{12}\alpha_{52}$  の和で表現される。式(5)の行列の各要素を考慮してパス図を示すと図4のようになる。

解析ソフトウェアにはAMOS4.02 (Smallwaters) を使用した。最尤法を用いて各パラメータの値を推定した結果、標準化偏回帰係数はそれぞれ  $\alpha_{51} = 0.52$ ,  $\alpha_{52} = 0.37$ ,  $\alpha_{53} = 0.17$ ,  $\alpha_{54} = 0.26$  となり、相関係数  $\sigma_{12}$  は 0.46 となった<sup>5)</sup> (図4)。分散分析を用いて回帰による変動を調べると、道路網次元のみ5%有意であった。外生変数（道路網次元  $X_1$  ~ GPS誤差  $X_4$ ）が内生変数（検索時間  $X_5$ ）を説明する割合を表す決定係数  $R^2$  は 0.68 であり、図4の“検索時間”の右上に表記した。また、誤差変数  $e_5$  を円で示した。

道路網次元、ランドマーク密度、GPS誤差、照度

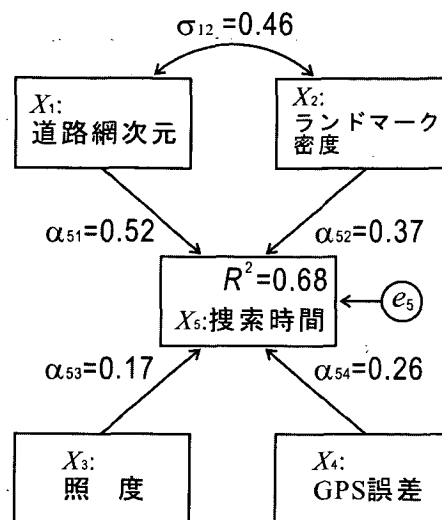


図4 重回帰モデルのパス図。  
数値は、決定係数  $R^2$  (長方形内部)、相関係数  $\sigma_{12}$  (両矢印上)、標準化偏回帰係数  $\alpha_{51} \sim \alpha_{54}$  (片矢印横) を表す。

の順で検索時間に影響を与えており、道路網次元のみ有意である。その意味では、道路網が複雑であるほど（2次元的であるほど）移動者の検索に時間を要することが分かる。逆にランドマーク密度、GPS誤差、明るさは、検索時間に有意な影響を与えなかったが、ランドマーク密度の標準化偏回帰係数はその中でも大きな値を示した。

提案する重回帰モデルは、道路網やランドマークという物理的な環境要因だけでなく、搜索者の空間認知や認知地図（若林, 1999；Golledge et al., 2000）を含む形で検索時間に影響するモデルである。そこで、搜索者の空間認知としての方向感覚を分離することで重回帰モデルを拡張する。4章では方向感覚を定量化し、5章で拡張された重回帰モデル、すなわち逐次パスモデルを提案する。

#### 4. 搜索者の方向感覚

##### 4. 1 方向感覚に関するアンケート調査

搜索者全員の方向感覚を抽出するために、各回の搜索実験の1ヶ月後に、竹内（1992, 2002）の方向感覚質問紙簡易版（以後、SDQ-S）を用いて搜索者にアンケート調査を行った。因子分析の結果を含めて質問項目を表3に示す。各質問項目のうち、 $q_1$ ,  $q_{15}$ ,  $q_{16}$ ,  $q_{18}$  は肯定的質問項目であるため、よくあてはまる（5点）、ややあてはまる（4点）、どちら

表3 竹内の方向感覚質問用紙簡易版 (SDQ-S) (竹内 1992, 2002) と因子負荷量

#	質問項目	因子1	因子2	共通性
$q_1$	地図上で、自分の位置をすぐに見つけることができる	0.82*	0.39	0.82
$q_2$	住宅街で同じ様な家がならんでいて、目的の家が分からなくなる	0.35	0.76*	0.69
$q_3$	何度も行った事のある所でも目印になるものをよく憶えていない	-0.22	0.45*	0.25
$q_4$	知らない土地へ行くと、途端に東西南北が分からなくなる	0.61*	0.47*	0.59
$q_5$	所々の目印を記憶する力がない	0.03	0.81*	0.66
$q_6$	ホテルや旅館に入ると、その部屋がどちら向きか分からない	0.43*	0.77*	0.77
$q_7$	知らないところでは、自分の歩く方向に自信が持てず不安になる	0.09	0.78*	0.62
$q_8$	道を曲がるところでも目印を確認したりしない	-0.31	0.55*	0.40
$q_9$	電車(列車)の進行方向を東西南北で理解することが困難	0.84*	0.11	0.71
$q_{10}$	自分がどちらに曲がったかを忘れる	0.34	0.63*	0.51
$q_{11}$	景色の違いを区別して憶えることが出来ない	0.06	0.84*	0.70
$q_{12}$	道順を教えてもらう時、「左・右」で指示してもらうと分かるが、 「東西南北」で指示されると分からない	0.91*	0.13	0.84
$q_{13}$	事前に地図を調べていても初めての場所へ行くことはかなり難しい	0.20	0.31	0.14
$q_{14}$	目印となるものを見つけれない	0.84*	0.17	0.74
$q_{15}$	知らないところでも東西南北をあまり間違えない	0.52*	-0.01	0.27
$q_{16}$	見かけの良く似た道路でも、その違いをすぐ区別することができる	0.36	0.62*	0.52
$q_{17}$	人に言葉で詳しく教えてもらった道を正しくたどれないことが多い	0.90*	-0.05	0.81
$q_{18}$	頭の中に地図のイメージをいきいきと思い浮かべることができる	0.67*	0.57*	0.77
$q_{19}$	特に車で右・左折を繰り返して目的地に着いたとき、 帰りはどこでどう曲がったら良いかわからない	0.79*	0.24	0.69
$q_{20}$	二人以上で歩くと人についていって疑わない	0.56*	0.00	0.32
寄与率		54.9%	45.1%	100%
因子説明割合		32.5%	26.7%	59.1%

ともいえない(3点)、あまりあてはまらない(2点)、ほとんどあてはまらない(1点)の5段階で評価する。それら以外はすべて否定的質問項目であるため、点数を逆順で評価する。よって、方向感覚が良いほどSDQ-Sの得点は高くなる。竹内(1992)によれば、これら項目の半分は方位に関する意識(以後、方位意識)、残り半分は行動における記憶(以後、行動記憶)を表している。そこで、因子数を2つとした因子分析により、因子負荷量と標準化された因子得点を算出した。共通性の推定にはSMC法を、因子負荷量を求める際には主因子法と基準バリマックス回転を用いた。

#### 4. 2 結果と解釈

因子負荷量が0.4以上となったのは、因子1において $q_1$ ,  $q_4$ ,  $q_6$ ,  $q_9$ ,  $q_{12}$ ,  $q_{14}$ ,  $q_{15}$ ,  $q_{17} \sim q_{20}$

の11項目であり、因子2において $q_2 \sim q_8$ ,  $q_{10}$ ,  $q_{11}$ ,  $q_{16}$ ,  $q_{18}$ の11項目であった(表3の\*印)。この結果は竹内の結果(竹内1992)とよく似ており、竹内に合わせて因子1と因子2をそれぞれ、方位意識( $X_6$ )、行動記憶( $X_7$ )と解釈した。 $X_6$ と $X_7$ のデータとして、搜索者の標準化された因子得点を用いた。

#### 5. 逐次パスモデル

個人が感じる自分の方向感覚は、その人が過去に体験した移動行動に基づいている。その際、地理空間の何らかの特性が個人の方向感覚の形成に影響を与えている。そこで、地理空間の特性(道路網次元とランドマーク密度)が方向感覚に影響を与え、方向感覚が搜索時間に影響を与えるように因果関係を設定する。この因果関係は、搜索実験においてGPSMAPから道路網の複雑さと幾つかのランドマー

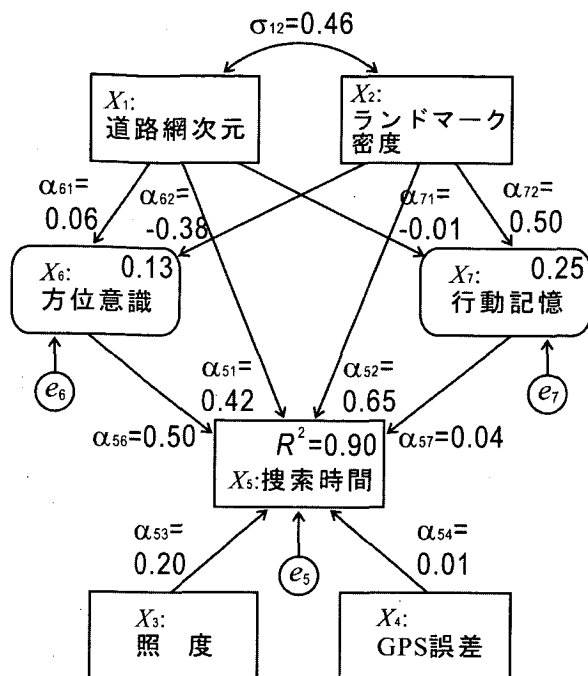


図5 逐次パスモデルのパス図。  
各数値の意味は図4のそれと同様。

クを与えられた探索者が、自分の方向感覚（過去の体験）と照合して移動者を検索するものと解釈される。こうして得た逐次パスモデル：

$$X_5 = \sum_{i=1}^4 \alpha_{5i} X_i + \alpha_{56} X_6 + \alpha_{57} X_7 + e_5, \quad (6)$$

$$X_6 = \alpha_{61} X_1 + \alpha_{62} X_2 + e_6, \quad (7)$$

$$X_7 = \alpha_{71} X_1 + \alpha_{72} X_2 + e_7, \quad (8)$$

は、先に提案した重回帰モデル（式(4)）において、地理空間の特性が検索時間に影響を与える部分から探索者の方向感覚を分離したものである。ここで、 $X_1 \sim X_7$ のデータは標準化されている。 $\alpha_{56}$ 、 $\alpha_{57}$ 、 $\alpha_{61}$ 、 $\alpha_{62}$ 、 $\alpha_{71}$ 、 $\alpha_{72}$ は標準化偏回帰係数であり、 $e_6$ 、 $e_7$ は誤差変数を表す。逐次パスモデルの共分散構造に関しては注6に示す。

AMOSを用いて最尤法から標準化偏回帰係数と決定係数を算出した結果、それらの値は図5のように得られた<sup>5)</sup>。図5では、方位意識と行動記憶はアンケート調査から得たデータであることを示すために角の丸い長方形で示した。内生変数である検索時間 $X_5$ をその他の変数群が説明する割合（決定係数 $R^2$ ）は0.90となり、重回帰モデルのそれ（0.68）よりも大きくなった。

式(6)において、分散分析を用いた回帰による変動を調べた。道路網次元は重回帰モデルと同様に5%有意であったが、ランドマーク密度と方位意識が1%有意となった。重回帰モデルの結果（図4）と比べると、新たに方向感覚を分離した逐次パスモデル（図5）では、ランドマーク密度が検索時間によって大きな影響を与える要因になったことが分かる。照度とGPS誤差の直接効果（それぞれ0.20、0.01）に比べて、道路網次元とランドマーク密度の直接効果（それぞれ0.42、0.65）は比較的大きく、物理的な環境要因としての地理空間の特性が検索時間に大きく影響している。一方で、方向感覚を経由する間接効果は異なり、道路網次元では、

$$\begin{aligned} & \alpha_{61}\alpha_{56} + \alpha_{71}\alpha_{57} \\ & = 0.06 \times 0.50 - 0.01 \times 0.04 = 0.03, \end{aligned} \quad (9)$$

となって検索時間に殆ど影響を与えないが、ランドマーク密度では、

$$\begin{aligned} & \alpha_{62}\alpha_{56} + \alpha_{72}\alpha_{57} \\ & = -0.38 \times 0.50 + 0.50 \times 0.04 = -0.17, \end{aligned} \quad (10)$$

となって検索時間に負の影響を与えている。つまり、道路網の複雑さは、物理的な環境要因（直接効果）として検索時間に影響しており、探索者の空間認知（間接効果）は殆ど関与していないが、ランドマークの存在は、探索者の空間認知（間接効果）を通して検索時間を短縮させることができると解釈される。

GPS誤差が検索時間に与える影響は0.01であり、道路網次元やランドマーク密度が検索時間に与える影響に比べると殆ど無視してよい。

## 6. おわりに

移動者の検索作業では、GPSの測位誤差、街の空間的複雑さだけでなく、探索者の方向感覚も影響すると考えられる。主な影響要因を明らかにするため、本研究では、搜索実験と方向感覚のアンケート調査（竹内、1992、2002）から得たデータを用いて、検索時間に影響を与える変数の因果モデルを提案した。その結果、検索時間に大きく影響を与える要因としては、明るさやGPS誤差よりも、道路網次元とランドマーク密度（これらは地理空間の特性）の比重が高いという結果を得た。特に、1) 道路網次元、すな



図A-1 GPSMAPの画面例

わち道路網の複雑さは、物理的な環境要因として搜索時間を引き延ばす働きをし、搜索者の空間認知は関係しない、2) ランドマーク密度は物理的な環境要因として搜索時間を引き延ばす働きをするが、搜索者の空間認知を通して搜索時間を短縮する働きを持つことの2点が分かった。よって、搜索時間の短縮のためには、搜索者がランドマークを認識するメカニズムを調査する必要がある（鈴木ほか, 2003；小西ほか, 2003）。

本搜索実験でのGPS誤差は、平均的な2 drms（2.3.2.節の式(2)で評価）で約30m、最小値25.0m、最大値61.5mであった。25.0m～61.5mの範囲のGPS誤差は搜索時間に殆ど影響しないことを示した。すなわち、五十嵐ほか（2002）の知見を確かめることができたといえる。ただし、GPS測位にはDGPS測位やRTK-GPSもあり、GPS誤差はそれぞれ数m、数cmである（安田, 2001）。これらの測位技術を導入すれば、搜索時間は短縮されるであろう。搜索時間に影響するGPS誤差の臨界値は数m～約30mの間に存在するが、それを明らかにすることは今後の課題である。GPS誤差を制御することは困難なので、RTK-GPSのような測位精度の高い技術を用いて人為的に擬似誤差を導入し、実験的に臨界値を明らかにすることを考えている。

他方、提案モデルの適合度<sup>5)</sup>をさらに良くするべく、モデルの見直しを行い、実験を重ねることも今後の課題である。今回は、地理空間の特性が搜索時間に影響を与える部分から方向感覚を抽出・分離し

た形でモデルを構成した。照度が搜索時間に影響を与える部分においても、そこには搜索者の認知が含まれると考えられる。明るさと方向感覚の相関を取り出すようにSDQ-Sの質問項目を追加・検討する必要がある。さらに、パイロティングや慣性航法等、搜索時間だけではなく搜索方法（Loomis et. al., 1999）も取り入れて、歩行移動者の搜索に関する構造方程式モデルを総合的に構築する予定である。

## 謝辞

搜索実験とアンケート調査にご協力頂いた新潟大学大学院自然科学研究科の八木英治氏と被験者（搜索者）の方々に謝意を表する。本研究の一部は新潟工学振興会試験研究助成と文部科学省科学研究費（若手研究(B)）の補助によった。また、本論文を丁寧に読んで下さいました査読者の方々にも感謝の意を表します。

## 注

- 1) 軍事的・戦略的意味から、GPSには米国国防総省によって、SA(Selective Availability：選択利用性)と呼ばれる精度の劣化操作が行われていた。西暦2000年5月にSAは解除され、単独測位での測位誤差は、2drms（2.3.2.節の式(1)）で約100mから約10mに短縮された（安田, 2001）。
- 2) 新潟市は平成12年度の国勢調査で人口50万1千人の都市として位置付けられ、全国で約700ある都市の中では23番目に人口の多い都市である。一方、新津市は人口6万6千人であり、344番目に人口の多い都市である。
- 3) 今回の搜索実験では、法人向け販売のGPSMAP（KDDI）を搜索装置として用いた。GPSMAPはGPS機能を搭載した携帯電話（GPS携帯）とノート型パーソナルコンピュータ（ノートPC）で構成され、外勤の営業社員や警備員の位置特定等に使用される。本研究ではこのGPSMAPが、i) 移動者はGPS携帯を所持するだけでよい、ii) 搜索者側の操作のみで移動者の位置を確認できるという2点に注目した。搜索者側で移動者と搜索者自身の両者の位置を同時に知る必要があ



るため、2つのGPS携帯を使用した。これらGPS携帯は自動着信・応答により、その位置情報が搜索者の有するノートPC画面の電子地図上に表示される（図A-1）。図A-1の画面上では、位置情報受信時のGPSの測位精度は定性的に2段階で表示される。概してGPS携帯が屋外にあるときには精度A（GPS誤差が小さい）、屋内にあるときに精度B（GPS誤差が大きい）が表示される。今回の搜索実験では、移動者に対して屋内に入らないよう指示したが、アーケードや高層ビルの影響で、精度Bになることがあった。

- 4) 地球を半径6400kmの球体とみなすと、南北方向では約31.0mが緯度の1秒に相当する。一方、東西方向では、新潟市（北緯38度）においては、約24.4mが経度の1秒に相当する。

表A-1 適合度指標

重回帰モデル	逐次パスモデル
$d = 5 (x = 5, y = 10)$ $\chi^2$ 値 = 5.854 p値 = 0.321 (> 0.05) GFI = 0.856 CFI = 0.943 RMSEA = 0.110 AIC = 25.854	$d = 10 (x = 7, y = 18)$ $\chi^2$ 値 = 9.732 p値 = 0.464 (> 0.05) GFI = 0.846 CFI = 1.000 RMSEA = 0.000 AIC = 45.732

- 5) モデルの適合度検定を、狩野(1997)、豊田(1998)に基づいて行った。モデルの自由度  $d$  は、次式で与えられる：

$$d = \frac{1}{2}x(x+1) - y, \quad (A1)$$

ここで、 $x$  は変数の数、 $y$  は推定パラメータの数（標準化偏回帰係数、外生変数間の相関係数と、誤差変数を含めた外生変数の分散の合計）である。カイ2乗値は、自由度  $d$  を用いて求めることができる統計量であり、データとモデルの間の距離をカイ2乗分布と比較できるようにしたものである。表A-1に示すように、有意水準5%で、重回帰モデル、逐次パスモデルともに棄却されることはなかった。

さらに4種類の適合度指標を調べた（表A-1）。

GFI（適合度指標）とCFI（比較適合度指標）は1に近いほど良く、RMSEA（平均二乗誤差平方根）は0.05以下が望ましく、AIC（赤池情報量基準）は小さいほど良いといわれている。

- 6) 逐次パスモデルの共分散構造は、

$$\Sigma_2 = \begin{pmatrix} S_{11} & \\ & S_{22} \end{pmatrix}, \quad (A2)$$

となる（ $S_{11}$  は  $4 \times 4$  対称行列、 $S_{21}$  は  $3 \times 4$  行列、 $S_{22}$  は  $3 \times 3$  対称行列）。 $S_{11}$ 、 $S_{21}$  の各要素は、

$$S_{11} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ \sigma_{12} & 1 & & \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (A3)$$

$$S_{21} = \begin{pmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \alpha_{53} & \alpha_{54} \\ \alpha_{61} + \sigma_{12}\alpha_{62} & \alpha_{62} + \sigma_{12}\alpha_{61} & 0 & 0 \\ \alpha_{71} + \sigma_{12}\alpha_{72} & \alpha_{72} + \sigma_{12}\alpha_{71} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (A4)$$

$$\gamma_1 = \alpha_{51} + \sigma_{12}\alpha_{52} + \alpha_{56}(\alpha_{61} + \sigma_{12}\alpha_{62}) + \alpha_{57}(\alpha_{71} + \sigma_{12}\alpha_{72}), \quad (A5)$$

$$\gamma_2 = \alpha_{52} + \sigma_{12}\alpha_{51} + \alpha_{56}(\alpha_{62} + \sigma_{12}\alpha_{61}) + \alpha_{57}(\alpha_{72} + \sigma_{12}\alpha_{71}), \quad (A6)$$

となる。 $S_{22}$  は、

$$S_{22} = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_5) & & \\ \text{Cov}(X_5, X_6) & \text{Var}(X_6) & \\ \text{Cov}(X_5, X_7) & \text{Cov}(X_6, X_7) & \text{Var}(X_7) \end{pmatrix}, \quad (A7)$$

である。各要素は、

$$\text{Var}(X_6) = \alpha_{61}^2 + \alpha_{62}^2 + 2\alpha_{61}\sigma_{12}\alpha_{62} + \theta_6, \quad (A8)$$

$$\text{Var}(X_7) = \alpha_{71}^2 + \alpha_{72}^2 + 2\alpha_{71}\sigma_{12}\alpha_{72} + \theta_7, \quad (A9)$$

$$\text{Cov}(X_6, X_7) = \alpha_{61}(\alpha_{71} + \sigma_{12}\alpha_{72}) + \alpha_{62}(\alpha_{72} + \sigma_{12}\alpha_{71}), \quad (A10)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(X_5) = & \sum_{i=1}^4 \alpha_{5i}^2 + 2\alpha_{51}\alpha_{52}\sigma_{12} + \theta_5 \\ & + \alpha_{56}^2 \text{Var}(X_6) + \alpha_{57}^2 \text{Var}(X_7) \\ & + 2\alpha_{56}\alpha_{57} \text{Cov}(X_6, X_7) \\ & + 2\alpha_{51}\alpha_{56}(\alpha_{61} + \sigma_{12}\alpha_{62}) \\ & + 2\alpha_{51}\alpha_{57}(\alpha_{71} + \sigma_{12}\alpha_{72}) \\ & + 2\alpha_{52}\alpha_{56}(\alpha_{62} + \sigma_{12}\alpha_{61}) \\ & + 2\alpha_{52}\alpha_{57}(\alpha_{72} + \sigma_{12}\alpha_{71}), \end{aligned} \quad (A11)$$

$$\begin{aligned}\text{Cov}(X_5, X_6) &= \alpha_{56} \text{Var}(X_6) + \alpha_{57} \text{Cov}(X_6, X_7) \\ &\quad + \alpha_{51}(\alpha_{61} + \sigma_{12}\alpha_{62}) \\ &\quad + \alpha_{52}(\alpha_{62} + \sigma_{12}\alpha_{61}),\end{aligned}\quad (\text{A12})$$

$$\begin{aligned}\text{Cov}(X_5, X_7) &= \alpha_{56} \text{Cov}(X_6, X_7) + \alpha_{57} \text{Var}(X_7) \\ &\quad + \alpha_{51}(\alpha_{71} + \sigma_{12}\alpha_{72}) \\ &\quad + \alpha_{52}(\alpha_{72} + \sigma_{12}\alpha_{71}),\end{aligned}\quad (\text{A13})$$

となる。

## 参考文献

- 五十嵐晃(1998) まいご老人保護システムの開発. 「GPSシンポジウム'98」, 日本航海学会GPS研究会, 27-36.
- 五十嵐晃・真柄賢太郎・野中敏・大野宏(2002) GPS測位技術を用いた徘徊老人の位置探索システム. 「電気学会論文誌」 **122-D**(6), 609-616.
- 狩野裕・三浦麻子(1997) 『グラフィカル多変量解析』, 現代数学社.
- 河村邦明・清水孝一・山本克之(1995) 痴呆性徘徊対処システムの開発—移動体通信とGPSによる徘徊者定位の試み—. 「電子情報通信学会技術研究報告」, MBE95-124, 93-98.
- 国立社会保障・人口問題研究所(2003) 日本の全国将来人口推計の概要. [http://www.ipss.go.jp/Japanese/newest02/1/suikei\\_g.html](http://www.ipss.go.jp/Japanese/newest02/1/suikei_g.html).
- 小西孝史・前田義信・鈴木文久・田野英一・牧野秀夫(2003) 視覚障害者用案内システムの新しい案内方式に関するシミュレーション—ランドマーク知名度の案内への影響—, 「第12回地理情報システム学会研究発表大会」, 59-62.
- 鈴木文久・小西孝史・前田義信・牧野秀夫(2003) 歩行者用案内地図生成に向けたランドマークの分類調査. 「平成15年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集」, 221-222.
- 竹内謙彰(1992) 方向感覚と方位評定, 人格特性及び知的能力との関連. 「教育心理学研究」, **40**(1), 47-53.
- 竹内謙彰(2002) ナヴィゲーション・スキル自己評定の探索的研究(1). 『文部省科研費補助金基盤研究(B)(1)研究成果報告書, 地図を用いた空間的情報のコミュニケーションと空間移動に関する研究』, 39-47.
- 田野英一・前田義信・牧野秀夫・小西孝史・石井郁夫(2001) 視覚障害者用GPS位置案内システムにおける情報多層化の評価. 「GIS—理論と応用」, **9**(2), 41-51.
- 豊田秀樹(1998) 『共分散構造分析[入門編]』, 朝倉書店.
- 本田勝也(2002) 『フラクタル』, 朝倉書店.
- 安田明生(2001) GPS技術の展望. 「電子情報通信学会論文誌」, **J84-B**(12), 2082-2091.
- 若林芳樹(1999) 『認知地図の空間分析』, 地人書房.
- GIS NEXT EXPRESS NEWS (2003) “子供を守るビジネス” GPSで居場所確認. [http://www.c-crews.co.jp/gnext\\_express/news/back/0309/030916\\_06.html](http://www.c-crews.co.jp/gnext_express/news/back/0309/030916_06.html).
- Golledge, R. G., Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Speigle J. and Tietz, J. (1998) A geographical information system for a GPS based personal guidance system, *Int. J. Geographical Information Science*, **12**(7), 727-749.
- Golledge, R. G., Kitchin, R., Blades, M. and Jacobson, R. D. (2000) Cognitive maps, spatial abilities, and human wayfinding. *Geographical Review of Japan*, **73B**, 93-194.
- Kaplan, E. D. (1996) Understanding GPS principles and applications, *Artech House Publishers*.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G. and Philbeck, J. W. (1999) Human navigation by path integration. In *Wayfinding Behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*, ed. R. G. Golledge, John Hopkins University Press, 125-151.
- Loomis, J. M., Golledge, R. G. and Klatzky, R. L. (2001) GPS-based navigation systems for the visually impaired. In *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*, eds. W. Barfield and T. Caudell, Mahwah NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 429-446.
- Maeda, Y., Tano, E., Makino, H., Konishi, T. and Ishii, I. (2002) Evaluation of a GPS-based guidance system for visually impaired pedestrians. CSUN 17th Ann. Int. Conf., “Technology and Persons with Disabilities”.
- Makino, H., Ikarashi, A., Higaki, H., Watanabe, R., Maeda, Y. and Ishii, I. (2003) A GPS mobile phone and infrared-based location guidance system for the visually impaired. *2003 Int. Symposium on GPS/GNSS*, 111-116.

〔原稿受付：2003年10月30日〕  
〔採用決定：2004年5月25日〕