

【原著論文】

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

田野英一・前田義信・牧野秀夫・小西孝史・石井郁夫

Evaluation of Information Layers in a GPS-based Guidance System for the Visually Impaired

Eiichi TANO, Yoshinobu MAEDA, Hideo MAKINO, Takashi KONISHI and Ikuo ISHII

Abstract: In order to assist the orientation and mobility of the visually impaired, when walking, using devices such as GPS (Global Positioning System), there should be a capability to automatically provide place name and compass information, in spoken format. Our system obtains the place coordinate such as latitude and longitude by means of the GPS and the direction for forward movement by means of a fluxgate compass. The numerical data are transformed to the place name using the place name layer of the geographic information database. In this paper we experimentally considered availability of both place name and crossroad layers. To this end, sighted participants were blind-folded and walked along a given route (about 1 kilometer) using the system. We clarified particularly a reduction in time using the principal components analysis and the discriminant function. This indicated that one layer alone, the place name layer, was in itself sufficient to walk the route, but using multiple layers, which were classified into different categories, one could walk more efficiently. In our system we developed a multi-layer structure in the geographic information database.

Keywords: 視覚障害者 (Visually impaired people), 判別関数 (Discriminant function), マハラノビス距離 (Mahalanobis distance), レイヤ (layer)

1. はじめに

人の現在位置を案内するシステムでは、位置の特定に汎地球測位システム (Global Positioning System, 以下, GPS) を利用するもの (牧野ほか, 1992; Loomis et al., 1994; 篠田ほか, 1997; 安田, 1997; Golledge et al., 1998; 五十嵐, 2000; 田村, 2000) や, Personal Handy-phone System と距離計を有する白杖を使用するもの (青海・田所, 2000) が報告されている。また, GPS を利用した移動ロボットに関する報告 (児島ほか, 2000; 東明ほか, 2000) もある。

我々は GPS と方位センサ, 音声情報データベース

(以下, データベース), 音声合成ソフトウェアを組み合わせて, 音声による屋外用の位置案内システム (以下, 案内システム) を提案してきた (牧野ほか, 1992, 1997; 田野ほか, 2000)。この案内システムは, 商業用として観光地案内に利用できるのみならず, 視覚障害者の歩行を補助する福祉機器としても有用であると考えられる。

案内システムは, i) GPS から得られた測位値 (緯度・経度) をパーソナルコンピュータ (以下, PC) に入力し, ii) 同時に方位センサからの方位データを PC に入力し, iii) PC にインストールされたデータベースと照合した後, iv) 現在位置の名称—しばしば建物の名称等のランドマークで代用されるので, 以下, 建物情報と呼ぶ—と前方の建物情報を音声案内する。白杖や盲導犬のような, 足元や身体の

田野: 〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050
新潟大学大学院自然科学研究科
Phone: 025-262-7776
E-mail: tano@gis.ie.niigata-u.ac.jp

近傍における障害物や危険を回避するものに追加して、ランドマークとなる建物名を知らせる案内システムを併用することで、視覚障害者は歩行が容易かつ楽しくなると思われる。また、晴眼者の場合、認知地図（あるいは体験された外部環境の内的表象）形成の過程でランドマークが重要であることを示唆する調査分析結果（藤井ほか，2000）もあるが、視覚障害者にとってランドマークのみ、すなわち建物情報のみで歩行が十分かどうかは明らかではない。

どこか目的の場所ないしは建物へ移動する視覚障害者は、案内システムを用いることで行動能力が向上すると推察される。しかし、たとえ目的の建物に到達できたとしても、入口と反対側に到達したのであれば、建物情報のみでは不十分である。また一時的な道路工事や建築工事等で、通いなれた経路とは異なる経路を選択せざるを得ないときは、やはり建物情報だけでは十分ではない。実際、視覚障害者は道路上を歩行しており、曲がるべき交差点を曲がらなかつたり、直進すべき交差点で方向を誤つたりすれば目的地への歩行時間が増加するだけでなく、歩行距離も増大し余分な体力を消耗することになる。限られた時間内での目的を持った歩行となると、交差点、すなわち歩行経路上のノードに対応する情報（以下、交差点情報）は重要と思われる。しかし、これまではGPSの測位精度の限界から、地図上で小さな領域となる建物の入口情報や道路の交差点情報を案内システムのデータベースに導入することは困難であった。

我々の先行研究では、安価かつ軽量のGPS受信機を用いて案内システムを構築し、ディファレンシャルGPS（以下、DGPS）測位で精度を向上させた。全測位値の約95%が得られる2drms評価（Kaplan, 1996）で、我々の案内システムは半径3.6m～6.3mの測位精度を得た（田野ほか，印刷中）。この結果は、約10m四方の領域をデータベースに取り込むことが可能になったことを示唆している。

そこで本研究では、建物情報の他に交差点情報も考慮し、交差点情報が視覚障害者の歩行時間と歩行距離に与える影響を10人の被験者により、実験的に評価した。アイマスクを着用した被験者による歩

行実験を行い、交差点情報を考慮することで歩行時間・距離が大きく短縮されること、また個々の被験者間のばらつき（以下、個人差）も小さくなる知見を得た。つまり、交差点情報をデータベースに付加すると、案内システムはよりユーザ・フレンドリな視覚障害者用福祉機器となる。また我々は、データベースの更新を容易に行うことや、案内の優先度に誤りが生じることを防ぐ目的で、建物情報、交差点情報等の異なるカテゴリーに分類されたデータベースを案内システムに導入し、実験を通して評価した。ここで優先度とは、データベースにおいて地図上のある位置が複数の建物・交差点情報に含まれる場合に、どの建物・交差点情報を優先的に音声案内するかを意味している。

2章ではこれまでに製作した案内システムの概要について簡単に述べる。3章では案内システムの評価実験の方法と結果を述べ、主成分分析、判別分析により交差点情報の有無が歩行時間、歩行距離に与える影響を評価する。4章では地理情報システムの特徴であるレイヤの多層化を案内システムに応用した方法について述べ、5章では今回提案する案内システムについて考察する。

2. 案内システムの構成

我々の案内システムは、電話交信方式、PC携帯方式の二種類の運用形態で使用可能である（田野ほか，2000）が、本研究では便宜上PC携帯方式を用いて実験を行う。電話交信方式を用いても同様の実験を行うことができる。図1(a)にPC携帯方式で案内システムを使用している様子を示す。図1(a)の人物の両肩にはGPS受信機GN77N（古野電気）、方位センサVector2X（Precision Navigation Inc.）が設置されている。リュックサックの外部には、DGPS用補正信号が重畳されている中波ビーコンの受信アンテナMBL-3（Communication Systems International Inc.）が設置され、内部には案内システム（図1(b)）が納められている。PCには案内システム用に作成されたデジタル電子地図（丸山，2000）と音声合成ソフトウェアSmart Talk（沖電気）がインストールされている。GPSによる測位値と方位

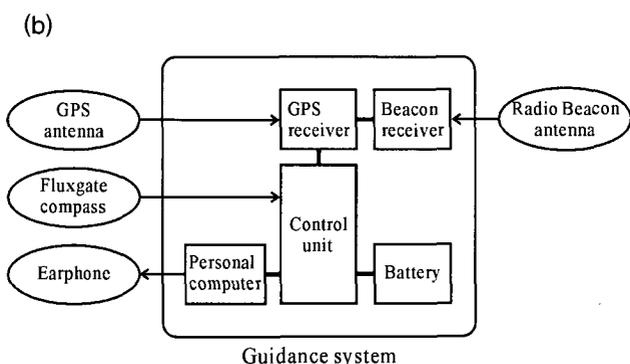
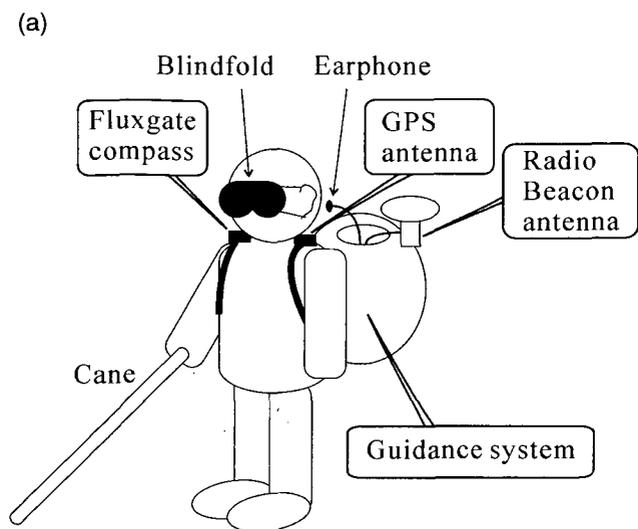


図1 (a) PC 携帯方式による運用 (b) 案内システム

センサによって得られた方位データは PC に入力され、データベースと照合される。そして、PC は現在位置名及び前方の地名等（ともに建物情報）とそこまでの距離を音声で出力する。こうして、視覚障害者は音声を通して位置案内情報を聞くことができる。

3. 案内システムの評価実験

3.1. 目的と概要

視覚障害には先天性と後天性（中途失明）とがある。我々は、案内システムの評価実験に際して、次の二つを仮定した。

[仮定 1] 本案内システムを使用する視覚障害者は中途失明者であり、失明以前の視覚情報がある程度記憶している。

[仮定 2] 視覚障害者は足もとの危険を回避するために白杖を用いて歩行する。

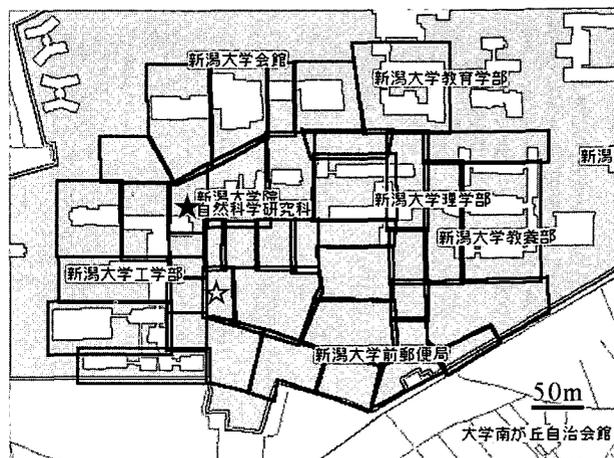


図2 データベース1（建物情報のみ）

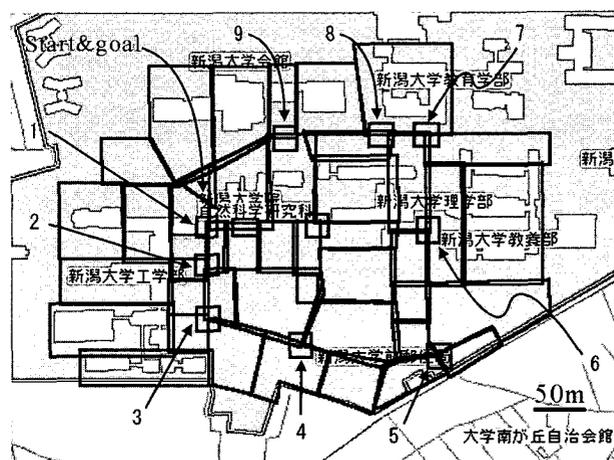


図3 データベース2（建物情報と交差点情報）

上記仮定の下で、建物情報と交差点情報の両者を案内することにより、建物情報のみを案内する場合に比して、歩行距離、歩行時間がどの程度短縮されるかを評価することが本実験の目的である。実験では、晴眼の被験者にアイマスクを着用させることで擬似的な中途失明の視覚障害者を作り出した。実験場所は新潟大学構内とした。

3.2. 方法

3.2.1. 実験用データベース

2章で述べたデジタル電子地図を使用し、大学構内のデータベースを作成した。このデジタル電子地図は、マウス操作によって地図上に多角形を描き、それぞれに適当な名称を付することができる（丸山, 2000）。以下、こうして作成された多角形を案内ブロックと呼ぶことにする。実験に先行して二

種類のデータベースを作成した(図2, 図3)。一つは想定した歩行経路の周囲に存在する建物名(例えば「工学部電気電子工学科」, 図2の★印)や施設名(例えば「テニスコートの西側」, 図2の☆印)のみを案内ブロックとして作成したデータベース(図2)である。このデータベースは、これまでに我々が提案してきたシステムに搭載していたものである。他の一つは、建物名や施設名に加えて、歩行経路上にある交差点の情報(例えば「教育人間科学部前交差点」, 図3のラベル7)を案内ブロックとして含むデータベース(図3)である。

目的を持って視覚障害者が歩行するとき、交差点情報は建物情報より大きな比重を占めると考えられる。そのため、交差点情報は建物情報よりも案内において高い優先度を持つ必要がある。案内システムは、GPSからの測位値をもとに、作成された順に案内ブロックを検索する。それゆえ、交差点情報に案内の高い優先度を設定するには、交差点情報の案内ブロックを先に作成し、その後、建物情報の案内ブロックを作成する。

3.2.2. 歩行実験

歩行実験の経路を、大学構内の全長が約1km(DGPSの測位値から評価した距離で、 $\psi_0 = 978(\text{m})$)の周回コースとした。各交差点は図3に示した“Start & goal”(図中の三角形の案内ブロック)から、歩行経路上に番号で示している。この経路には途中、9箇所の交差点(ラベル1~9)がある。実験に先行して、被験者に対して歩行すべき経路と、PCにインストールしたデータベースの内容を説明した。これにより、各被験者が個人的に思い込んでいる歩行経路に沿って存在する建物等の呼称を統一した。被験者はアイマスクを着用しての歩行が未経験の晴眼者(20代成人男子10名)とした。

各被験者にはアイマスクを着用させるとともに、足元の危険を回避するために杖を保持してもらった。更に、歩行経路を通過する自動車等との接触事故を防止するために、介添者が被験者の傍にいないようにした。体調不良等の特別な事情が生じない限り、被験者は実験中に介添者と会話することは一切しな

いようにした。なお、被験者には予め、実験を継続できないような事態に陥った場合は歩行実験を中止しても良いことを伝えておいた。そして、案内ブロックとして建物情報のみから構成されるデータベースと、建物情報・交差点情報両者から構成されるデータベースの二種類を用いて、各被験者は2回実験を行った。1回目の実験体験が2回目に影響を与えることを防ぐため、2回目の実験は1回目の3ヶ月後に行った。被験者には3ヶ月後に2回目の実験が行われることを予告していない。

実験は便宜上、PC携帯方式で行い、PCから発せられる位置案内の音声をイヤフォンで聞くこととした。位置案内は約10秒ごとに行われるように設定されている。測位方式は、2drms評価で半径約3.6mを示した中波ビーコンによるDGPSとし(田野ほか, 印刷中)、歩行時間 ϕ_i (分)を計測した。ここで、 $i = 1, 2, \dots, 10$ である。後処理としてGPSの測位値から歩行距離 ψ_i (m)を算出した。また2回目の実験終了後に、晴眼の状態で同じ歩行経路を通常で歩行してもらい、要した時間 $\phi_{0,i}$ (分)を計測した。

3.2.3. 実験データの解析

案内システムのデータベースに交差点情報を付加することによって、視覚障害者の歩行時間と歩行距離の短縮が期待できる。そこで、交差点情報あり、なしのときの歩行実験から得られたデータ(ϕ_i と ψ_i)をもとに、統計的にモデル化・解析を行い、データベースに交差点情報を付加することによって歩行時間と歩行距離がどの程度短縮されたかを定量的に推定した。

先ず、解析を行うために $\phi_{0,i}$ 、 ψ_0 を用いて、交差点情報あり、なしのときの ϕ_i 、 ψ_i をそれぞれ正規化(無次元化)した:

$$x_i = \frac{\phi_i}{\phi_{0,i}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (1)$$

$$y_i = \frac{\psi_i}{\psi_0}, \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (2)$$

ここで、 x_i 、 y_i はそれぞれ正規化歩行時間、正規化歩行距離である。式(1)、式(2)の x_i 、 y_i を

$$r_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

としてベクトル表記する。また、確率変数 X, Y から構成される確率ベクトル：

$$R = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}, \quad (4)$$

の同時密度関数が

$$g(r) = \frac{1}{2\pi|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{D^2(r)}{2}\right\}, \quad (5)$$

となる2変量正規分布 $N_2(\mu, \Sigma)$ を用いて、被験者が案内システムを用いたときの歩行時間と歩行距離をモデル化した。式(5)において、

$$D^2(r) = (r - \mu)^T \Sigma^{-1} (r - \mu), \quad (6)$$

はマハラノビス平方距離を表し、“ T ”、“ -1 ”はそれぞれ転置、インバースを意味する。また、

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

は、それぞれ平均ベクトル、分散共分散行列を表す。添字“ x ”、“ y ”はそれぞれ正規化歩行時間、正規化歩行距離に対応し、 $r = (x \ y)^T$ である。また、式(8)を用いて主成分分析を行い、最大固有値 λ_{\max} と最小固有値 λ_{\min} を求めた。 λ_{\max} 、 λ_{\min} を用いてそれぞれの固有ベクトル k_{\max} 、 k_{\min} を求め、式(7)で与えられる平均ベクトルからのばらつきも調べた。平均ベクトルからのマハラノビス距離は、

$$D(r) = \sqrt{D^2(r)}, \quad (9)$$

で求めた。

以下、式(5)～式(9)において交差点情報のあり、なしを明確にするため、添字“1”、“0”を用いて、それぞれ交差点情報ありと交差点情報なしを区別する。例えば、 $g_1(r)$ は交差点情報ありのときの同時

密度関数であり、 $D_0(r)$ は交差点情報なしの平均ベクトル μ_0 からのマハラノビス距離である。

また、判別関数：

$$f(r) = D_1^2(r) - D_0^2(r), \quad (10)$$

を用いて、交差点情報ありと交差点情報なしの判別境界を推定した。式(10)を用いて、

$$f(r) < 0 \Leftrightarrow D_1^2(r) < D_0^2(r), \quad (11)$$

を満たすベクトル r は統計的に交差点情報ありの群に属すると解釈できる。逆に、

$$f(r) > 0 \Leftrightarrow D_1^2(r) > D_0^2(r), \quad (12)$$

を満たすベクトル r は統計的に交差点情報なしの群に属すると解釈される。一方、

$$f(r) = 0 \Leftrightarrow D_1^2(r) = D_0^2(r), \quad (13)$$

を満たすベクトル r の集合は、交差点情報ありと交差点情報なしの二つの群の判別境界を表す。各群の分散共分散行列 Σ が等しくない場合、式(13)は二次曲線となる。

3.3. 結果

3.3.1. DGPSの測位データ

案内システムとアイマスクを着用しての歩行中、実験を中断しなければならない状況に陥った被験者はいなかった。

歩行実験の間に被験者が装着したGPS受信機による測位値をプロットした一例を図4に示す。図4

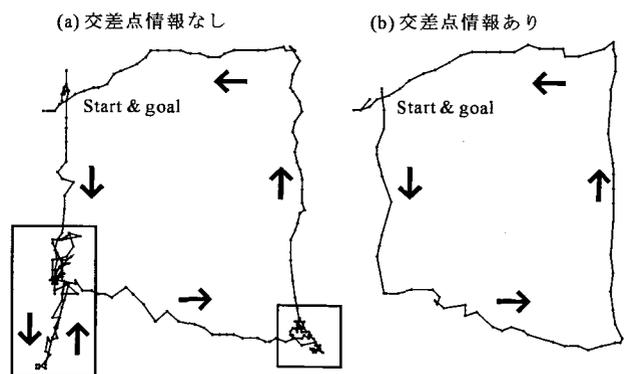


図4 測位結果 (DGPS測位による)
(a) 交差点情報なし (b) 交差点情報あり

(a), (b) は同一人物のデータであり, (a) はデータベースに交差点情報がない場合 (図 2 のデータベースを使用), (b) は交差点情報がある場合 (図 3 のデータベースを使用) である. 図 4 (a) において口で囲んだ 2 箇所の部分では, 被験者が進行すべき方向の判断に迷っている. 左側の口は図 3 の“3”と付された交差点に対応し, この迷いは左折しなければならない交差点を直進したために生じた. 右側の口は図 3 の“5”と付された交差点 (T 字路) に対応し, ここでは「そろそろ左折しなければならない」という被験者の思い込みが, 結果的に来た道を引き返すという動作につながっている.

3.3.2. 主成分分析

表 1 に, 10 人の被験者の $\varphi_{0,i}$, ψ_0 と, 交差点情報なし, 交差点情報ありでの x_i , y_i を示す. また, それらの平均, 分散, 共分散, 標準偏差も示す. 表 2 に固有値を示す. 図 5 は表 1 に示した平均と標準偏差をグラフ化したものである. 図 6 (a), (b) に, それぞれ交差点情報なし, 交差点情報ありのときの正規化歩行時間 (横軸) と正規化歩行距離 (縦軸) の分布を示す. 図 6 (a) における 10 個の白丸, 図 6 (b) における 10 個の黒丸は, それぞれ 10 名の各被験者のデータである.

矢印 k_{\max} , k_{\min} は, それぞれデータの第一主成分, 第二主成分の固有ベクトルであり, その交点は平均ベクトル (図 6 (a) では μ_0 , 図 6 (b) では μ_1) に対応する. 平均ベクトルを中心とした二つの楕円はマハラノビス等距離線であり, 内側から, $D(r) = 1.0$, $D(r) = 2.0$ を満たす点 $r = (x \ y)^T$ の集合である. 正規分布モデルでは, 内側の楕円内部で約 68%, 外側の楕円内部で約 95% のデータが得られると推測される (稲垣, 1990).

3.3.3. マハラノビス距離を用いた判別分析

式 (10) を用いて各被験者の交差点情報あり, 交差点情報なしの判別を行った (表 3). 式 (11), 式 (12) を参考に, 正しく判別された場合は○印を, 誤って判別された場合には×印を付した. また, ○印の合計数を被験者の合計数で割り, 適中率も示した.

交差点情報ありと交差点情報なしの判別境界 (式 (13)) を求め, 図 7 (a) に示した (図中の楕円). 横

表 1 正規化歩行時間と正規化歩行距離

被験者	晴眼歩行時間 $\varphi_{0,i}$ (分)	最短距離 ψ_0 (m)	交差点情報なし		交差点情報あり	
			正規化歩行時間 x_i	正規化歩行距離 y_i	正規化歩行時間 x_i	正規化歩行距離 y_i
1	11	978	4.18	1.95	3.64	1.28
2	9	978	3.44	1.43	3.56	1.43
3	10	978	5.50	1.61	3.50	1.24
4	10	978	3.80	1.65	2.20	1.02
5	10	978	7.50	2.03	2.20	1.06
6	10	978	2.20	1.08	2.50	1.20
7	11	978	4.27	1.30	2.55	1.03
8	10	978	6.50	2.72	3.70	1.14
9	14	978	3.93	1.29	2.21	1.16
10	13	978	2.92	1.22	2.62	1.16
平均	10.8	978	4.43	1.63	2.87	1.17
分散	2.16	—	2.3804	0.2185	0.3778	0.0142
共分散	—	—	0.5629		0.0495	
標準偏差	1.47	—	1.54	0.47	0.61	0.12

表 2 固有値

	交差点情報なし	交差点情報あり
最大固有値 λ_{\max}	2.5182	0.3844
最小固有値 λ_{\min}	0.0807	0.0076

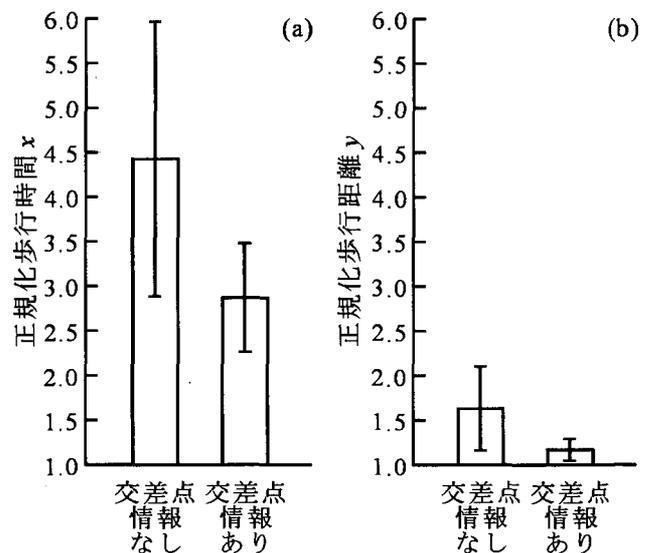


図 5 被験者 10 名の (a) 正規化歩行時間, (b) 正規化歩行距離の平均 (棒グラフ) と標準偏差 (縦線)

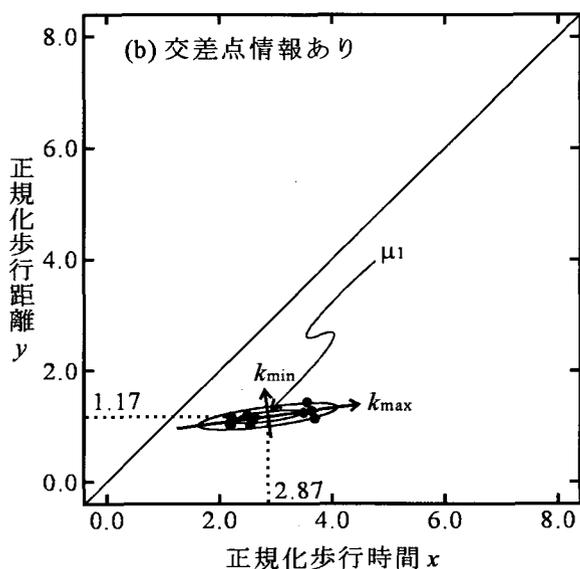
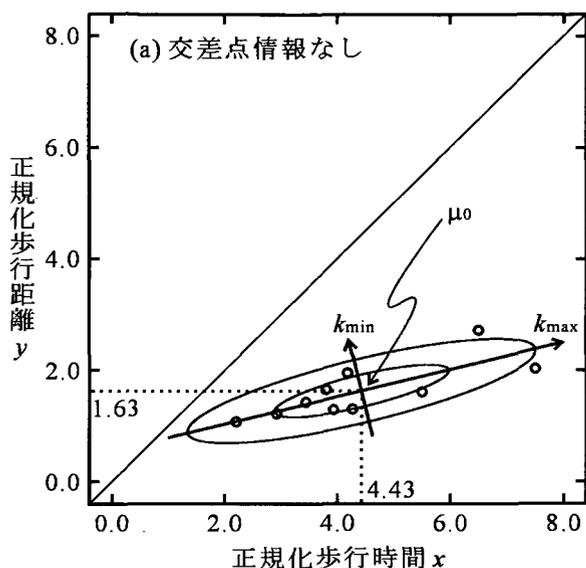


図6 主成分分析
(a) 交差点情報なし (b) 交差点情報あり

軸は正規化歩行時間 x ，縦軸は正規化歩行距離 y を表し，黒丸，白丸はそれぞれ10人の被験者の交差点情報あり，交差点情報なしのデータである．図7(b)に，図7(a)の楕円近傍の拡大図を示す．

4. データベースの多層化

3章で述べた案内システムの実験用データベースは，全ての案内情報を一つのレイヤに構築したものである（小西ほか，2000）．使用目的や内容により案内ブロックに優先度をつけるため，図3のデータ

表3 判別関数を用いた各被験者の交差点情報なし・ありの判別

被験者	交差点情報なし		交差点情報あり	
	$f(r_i)$	判定	$f(r_i)$	判定
1	50.81	○	1.01	×
2	4.89	○	4.67	×
3	18.13	○	0.37	×
4	18.42	○	-0.48	○
5	59.86	○	-0.86	○
6	-0.91	×	-0.41	○
7	4.55	○	-0.25	○
8	178.49	○	2.92	×
9	2.34	○	-0.09	○
10	-0.74	×	-1.16	○
適中率	—	0.8	—	0.6

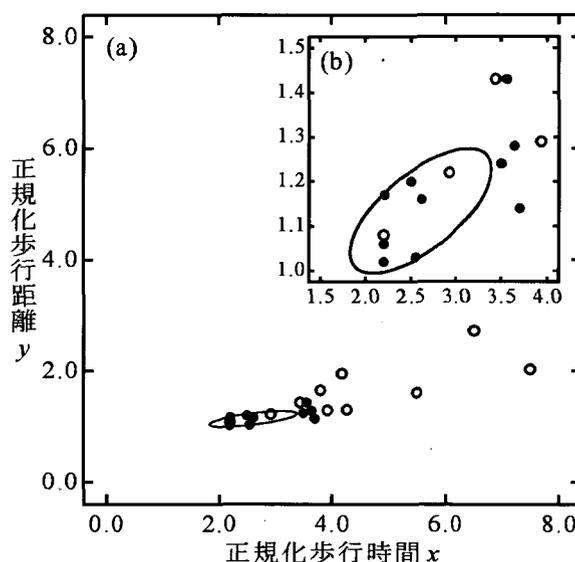


図7 マハラノビス距離を用いた判別分析
(b)は(a)の判別境界(楕円)近傍の拡大図

ベース（交差点情報あり）では先に交差点情報を作成し，続いて建物情報を作成した．これはGPSから得た測位値がデータベース上で複数の案内ブロックに対応するとき，先に作成された案内ブロックに高い優先度があるからである．しかし，この方式ではレイヤの更新の際に新たにデータベースを作成しなければならないため実用的ではない．この問題を解決するために，交差点情報，建物情報などカテゴリごとにレイヤを分離し，各レイヤに優先度を割り当てる方式を採用する．こうすることで，同一レ

イヤ内で案内ブロックが互いに重複しない限り、安定した優先度が保たれる。

4. 1. 動作実験

交差点情報のみから構成されるレイヤ（以下、交差点レイヤ）と、建物情報のみから構成されるレイヤ（以下、建物レイヤ）を作成した（図8）。それぞれのレイヤ上の案内ブロックは、地図上で互いに重複している。これら複数のレイヤ間の優先度を任意に変更できる機能を案内システムに導入した。また、擬似的測位値を入力したときに、優先度に応じたレイヤの案内ブロックを音声案内するシミュレーションプログラムも作成した。

4. 2. 結果

まず、シミュレーションプログラムに擬似的測位値を入力し、レイヤの優先度に応じた音声案内が行われることを確認した。次に、案内システムを用いて実際に屋外を歩行した。交差点レイヤを最優先に設定した場合、交差点付近では交差点レイヤの案内ブロックが優先して案内された。逆に、建物レイヤを最優先に設定すると、建物レイヤの案内ブロックのみが案内された。

5. 考察

図5は、式(5)の周辺密度関数を決定する平均と標準偏差をグラフで示したものである。交差点情報を付加することによって、正規化歩行時間、正規化歩行距離ともに平均、標準偏差が小さくなるので、単に時間と距離が短縮されて視覚障害者の体力的な負担が低減するのみならず、視覚を遮断された上での歩行能力の個人差も小さくなったと思われる。すなわち、元来歩行能力の高い人は交差点情報にあまり依存しないが、歩行能力の低い人は交差点情報を用いることによって、歩行能力の高い人並みに歩行することが可能となる。このことは図6(a), (b)からも伺える。

表2では、交差点情報あり・なしに関わらず、最大固有値 λ_{\max} に比して最小固有値 λ_{\min} が極端に小さいことから、10人の被験者のデータは近似的に

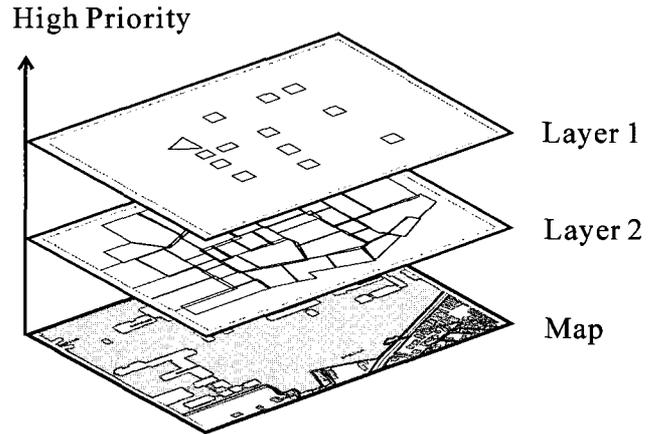


図8 レイヤの多層化

第一主成分の固有ベクトル k_{\max} 上に分布しているといえる。また図6(a)と図6(b)を比較すると k_{\max} の方向はほぼ一致しており、それらはともに正規化歩行時間軸側に偏っている。これは、アイマスクを着用した被験者が視界を遮断されたことによって、心理的に歩行速度が小さくなったためと思われる。また、案内システムからの案内を聞き、進むべき方向を判断するときに立ち止まることもあり、これが積み重なることによって歩行距離よりも歩行時間が引き伸ばされたとも解釈できる。交差点情報がある場合に、第一主成分方向に分布の縮小化が大きく見られたことから、交差点情報をデータベースに付加することによって、主に歩行時間の短縮が期待できる。

図7において、式(13)、すなわち、交差点情報ありと交差点情報なしの平均ベクトルからのマハラノビス距離が等しい点の集合を、楕円（二次曲線）として評価した。なぜなら交差点情報ありと交差点情報なしの分散、共分散が互いに大きく異なり、線形判別分析を行うことが不可能だと思われるからである。実際、標本分散共分散行列を用いた検定を通して、帰無仮説 $\Sigma_1 = \Sigma_0$ を棄却できる（稲垣, 1990; 浅野, 1999）。全データ（標本数 $n = n_1 + n_0$ 、ここで、 n_1, n_0 はそれぞれ交差点情報あり、なしの標本数）の標本分散共分散行列を、

$$S = \begin{pmatrix} s_x^2 & s_{xy} \\ s_{xy} & s_y^2 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

とし、交差点情報あり、交差点情報なしの標本分散

共分散行列をそれぞれ、 S_1, S_0 とする。変数の数を q とすると、

$$L = \rho \cdot \ln \frac{|S|^{n-2}}{|S_1|^{n_1-1} \cdot |S_0|^{n_0-1}}, \quad (15)$$

$$\rho = \left(1 - \left(\frac{1}{n_1-1} + \frac{1}{n_0-1} + \frac{1}{n-2} \right) \right) \left(\frac{q}{3} + \frac{q-1}{6(q+1)} \right), \quad (16)$$

で表される L は、自由度 $q(q+1)/2$ の χ^2 分布に従う (稲垣, 1990; 浅野, 1999)。有意水準を α とすると、

$$L > \chi^2(q(q+1)/2, \alpha), \quad (17)$$

のときに帰無仮説 $\Sigma_1 = \Sigma_0$ は棄却され、対立仮説 $\Sigma_1 \neq \Sigma_0$ が採択される。 $n=20, n_1=10, n_0=10, q=2, \alpha=0.05$ のとき、式 (15)、式 (16) から $L=20.31$ となる。一方、 χ^2 分布表から、 $\chi^2(3, 0.05) \approx 7.82$ が得られるので、式 (17) が成り立ち、 $\Sigma_1 \neq \Sigma_0$ であると判定される。この検定の結果は、単に線形判別分析が行えないことを示すだけでなく、歩行能力に関する個人差が交差点情報を用いることによって小さくなること、言い換えれば、交差点情報ありと交差点情報なしのグループで分散が異なることを定量的に示したことになる。

図 7 に示した判別境界 (楕円) の内部は交差点情報がある場合の歩行時間と歩行距離の領域であるが、交差点情報を使用した 10 人の被験者のうち 6 人がこの楕円内部にデータを持った。誤判別されたのは 4 人であり、適中率が 0.5 以上であることから、楕円が適切な判別境界であることが確認できる。同様に、交差点情報を使用しなかった 10 人の被験者のうち 2 人が誤判別として楕円内部にデータを持ったが、8 人のデータが楕円外部にあり (適中率が 0.5 以上)、推定された判別境界が適切であるといえる。判別境界となる楕円の大きさは、正規化歩行時間で約 1.8~3.3、正規化歩行距離で約 1.0~1.3 である。これらの数値は交差点情報を付加後の推定量である。交差点情報を付加する前では、正規化歩行時間 7.5、正規化歩行距離 2.7 の被験者 (表 1 の被験者番号 5 と 8) がいたことを考慮すると、歩行時間

は約 1/4~1/2、歩行距離は約 1/2 に短縮されたといえる。

実験終了後、多くの被験者から「この装置を使用しなかったら指定された経路を周回できないのは当然。よく知っている大学構内においてさえ、自身の位置を特定することができなかった」という声が聞かれた。また実験中、数人の被験者から「確かに交差点情報がないと、どこで曲がっているのか分からない」という声も聞かれた。そこで、建物情報、交差点情報など複数のレイヤを処理する機能を案内システムに実装した。

6. おわりに

本研究では、視覚障害者の歩行を補助する福祉機器の実用性に関して多変量解析手法を用いた評価方法を提案し、地理情報としてランドマークだけでなくノードもまた有効であることを明らかにした。

大学構内に設定した約 1 km の周回コースをアイマスク着用の晴眼者に、*i)* 建物情報 (ランドマーク) のみのデータベース、*ii)* 建物情報と交差点情報 (ノード) から成るデータベースの二種類を用いて歩行させた。そのときの歩行時間・距離を主成分分析とマハラノビス距離を用いた判別分析によって定量的に評価した。その結果、*ii)* のデータベースを用いると *i)* の場合に比して、歩行時間は約 1/4~1/2、歩行距離は約 1/2 に短縮され、さらに個人差も小さくなった。このことから、視覚障害者用 GPS 位置案内システムにおいて、建物情報だけでなく道路の交差点情報も歩行にとって重要であることが示された。

つまり、視覚情報を使わない歩行者にとって、歩行経路外に存在するランドマークのみでは、自身の位置を常にアップデートするための外部情報として不十分であることを意味している。本実験では、9 箇所の交差点のうち 3 箇所で大きく進行方向を変えねばならないタスクが課せられていることになるが、現在位置が曲がるべき交差点であるかどうかの判断は、出発地点情報と前庭器官等からの内的信号に基づいたパス・インテグレーション (Loomis et al., 1999) に大きく依存することになる。しかし、出発

地点からの距離が大きくなるほど、自身の位置を誤認識したり、経路から外れて歩行したりするので、自身の位置をリセットする参照点として、交差点情報のような経路上のノード情報が必要になると考えられる。

歩行実験を通して、我々は多層化されたデータベース（建物情報レイヤ、交差点情報レイヤ）が案内システムに必要であるという結論に達し、それを実装して動作を確認した。上記二つのレイヤ以外にもレイヤの数を増やし、各レイヤの優先度を適宜設定できる。したがって、同一レイヤ内で重複が生じないように案内ブロックを作成すれば、音声案内の充実と安定性が保証される。

我々は、1) 音声情報として交差点情報を持つ案内システムを用いると、視覚障害者の歩行時間・距離が統計的意味において短縮される、2) 建物情報・交差点情報など多層化された音声情報を有機的に処理する機能を案内システムに実装することで、案内システムが視覚障害者用福祉機器として、よりユーザ・フレンドリになったことの2点を示した。

今後はより多くの視覚障害者に案内システムを使用して戴き、視覚障害者からの意見をを通して案内システムを改良する。また、今回は建物情報と交差点情報、すなわちランドマークとノードに関する情報をデータベースとして用いたが、道路名、地区名等のパス、ディストリクトに関する情報（藤井ほか、2000）を追加した場合の歩行への影響も調べる。同時にデータベース作成方法についても検討する予定である。具体的には、国際化のための多言語への対応（牧野ほか、2000）やネットワークを経由した複数の人によるデータベースの作成（丸山ほか、2000）等の応用分野を確立する。

なお、本研究の一部については、電子情報通信学会技術研究報告 MBE2000-15 (2000)、第 10 回電気学会東京支部新潟支所研究会 (2000)、日本航海学会論文集第 105 号（印刷中）で報告した。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費（萌芽的研究）の補助を受けた。Australia・Newcastle 大学の D. N. Parkes 教授には本研究に関して貴重なご助言を戴いた。案内システムの評価実験に際しては、新潟大学・大学院の学生諸氏から協力を戴いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 青海豪則・田所嘉昭 (2000) 携帯型歩行者用ナビゲーションシステムにおける誘導法の検討。「電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会」, 219.
- 浅野 晃 (1999) 情報統計学Ⅱ 判別分析 (3). <<http://kuva.mis.hiroshima-u.ac.jp/~asano/Kougi/99s/JouhouToukei2/6-30.html>>.
- 五十嵐 晃 (2000) RTK-GPS 測位技術を用いた『まいご老人保護システム』の高精度・高機能化。「日本航海学会 GPS シンポジウム 2000 論文集」, 165-175.
- 稲垣宣生 (1990) 『数学シリーズ・数理統計学』, 裳華房.
- 児島隆生・畑山満則・松野文俊 (2000) 4次元地理情報システムに基づくレスキューロボットの開発。「地理情報システム学会講演論文集」, 9, 269-274.
- 小西孝史・田野英一・前田義信・牧野秀夫 (2000) 視覚障害者の単独歩行を支援する地理情報データベースの検討。「電気学会東京支部新潟支所研究会」, 第 10 回, 59.
- 東明佐久良・下垣 豊・星野 肇・渡邊 修・上田貴晴・小坪宏則・城 信雄・門馬 清・橋立 寛・秋田義一 (2000) GIS ロボットの試作と実証実験について。「地理情報システム学会講演論文集」, 9, 275-280.
- 篠田陽理子・判澤正人・曲谷一成・築島謙次・増本優 (1997) DGPS を利用した視覚障害者用ナビゲーションシステムの開発。「電子情報通信学会技術研究報告」, MBE96-109, 69-74.
- 田野英一・牧野秀夫・前田義信・北村泰宏・丸山敦史・五十嵐 晃 (2000) GPS を用いた視覚障害者用屋外位置案内装置 [II]. 「電子情報通信学会技術研究報告」, MBE2000-15, 101-108.
- 田野英一・牧野秀夫・前田義信・石井郁夫 (印刷中) 視覚障害者用 GPS 位置案内装置の測位方式 - SA 解除後の DGPS の有効性評価 - . 「日本航海学会論文集 第 105 号」.
- 田村和弘 (2000) GPS とインターネットを用いたモバイルコンピューティング向け詳細位置情報システム。「電子情報通信学会総合大会論文集」, B-2 (24), 237.
- 藤井憲作・東 正造・杉山和弘 (2000) 道案内情報が移動プロセスに及ぼす影響。「NTT R&D」, 49 (5), 272-279.
- 牧野秀夫・尾形真樹子・石井郁夫 (1992) GPS による

- 携帯型盲人用位置案内装置の基礎研究. 「電子情報通信学会技術研究報告」, MBE92-7, 41-46.
- 牧野秀夫・渡辺浩亘・石井郁夫 (1997) 視覚障害者のための電話交信型 GPS 位置案内装置. 「電子情報通信学会技術研究報告」, HCS97-9, 15-19.
- 牧野秀夫・田野英一・五十嵐 晃・前田義信 (2000) 視覚障害者用 GPS 音声位置案内装置－携帯方式の改良と多言語への対応－. 「医用電子と生体工学」, 第 38 巻特別号, 36.
- 丸山敦史 (2000) GPS を用いた音声位置案内システム－ネットワーク型音声情報共有方式－. 「新潟大学工学部情報工学科平成 11 年度卒業論文」.
- 丸山敦史・牧野秀夫・北村泰宏・前田義信・田野英一 (2000) GPS を用いた音声位置案内システム－マルチユーザによる音声情報作成方式の検討－. 「電子情報通信学会信越支部大会講演論文集」, 平成 12 年度, 293-294.
- 安田明生 (1997) GNSS '97 と欧州における利用の現状. 「日本航海学会 GPS シンポジウム '97 論文集」, 45-47.
- 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.
- Kaplan, E. D. ed. (1996) *Understanding GPS principles and applications*. Boston, London: Artech House Publishers.
- Loomis, J. M., Golledge, R. G., Klatzky, R. L., Speigle, J. M. and Tietz, J. (1994) Personal guidance system for the visually impaired. *Proc. First Annual International ACM/SIGCAPH Conf. on Assistive Technology*, 85-91.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G. and Philbeck, J. W. (1999) Human navigation by path integration. *Wayfinding: Cognitive Mapping and Other Spatial Processes*, Johns Hopkins University Press (ed.) R. G. Golledge, Sec.5, 125-151.