

道案内用略地図の精確な地図への同定アルゴリズム

倉田陽平・岡部篤行

An Algorithm for Identifying Features in a Simplified Route Map

Yohei KURATA, Atsuyuki OKABE

Abstract: This paper proposes an algorithm for identifying the correspondence between features in a simplified route map and those in its corresponding precise map. The implementation of this algorithm enables us to manage simplified route maps in GIS. The identification is proceeded by the following three steps. First, each landmark drawn on a simplified route map is identified with one of the features in a precise map. Second, appropriate counterparts of the nodes and links adjacent to the identified landmarks are detected around the correspond features. Finally, other elements are sequentially identified through the spatial reasoning process that accounts for geometrical similarity, topological consistency and so forth. In our experiment, about 70% of the sample maps are practically identified by the proposed algorithm.

Keywords: 道案内用略地図(simplified route map), 同定(identification), 目印(landmark)

1. はじめに

広告や地域情報誌などで略地図を見る機会は多い。また、我々自身も略地図を描いて場所を説明することがある。略地図は、言わば日常生活における空間コミュニケーションツールの一つである。それゆえ、略地図を GIS 上で利用可能にすることは、GIS を市民生活へ浸透させるうえで有意義なこととなる。

既に従来から GIS 上で略地図を「つくる」研究は盛んになされてきた(たとえば馬場口ほか(1997))。一方で、Semantic GXML(有川・久保田,2000)などの略地図記述規格の整備により略地図データの発信・流通量が増大してくると、これらを情報資源として有効活用するため、人が発信した略地図を GIS 上で「読みとる」、つまり正確な地図に照合するという要請が生じてくることが予想される。

なお、比較的、精度の高い地図については、Walter & Fritsch(1999)や増山ほか(2000)のように、位相の整合性や形状の類似性を用いた照合手法が考案されている。しかし、略地図の場合は道路のつながり方

や形状に大幅な省略、改変が施されているため、これらの手法を適用できない。また、Egenhofer(1997)は、地図イメージのスケッチから対応する地図を検索する手法を提案しているが、略地図の場合は道路ネットワークの情報が中心である、ランドマークが描かれる等、スケッチと異なる要素がいくつもある。

そこで本論文では略地図の特性に注目して、目印や道路網の構成・形状といった多様な手がかりを総合的に利用し、略地図の各要素をより正確な地図(実地図)上に同定する手法を提案する。

2. 略地図表現モデル

筆者らは本研究に先立ち、大学生 46 名に出身高校への道案内図を描かせ、それをもとに手書きレベルの略地図を十分に表現できる略地図表現モデルを構築した(倉田・岡部,2001)。本研究はこのモデルを利用しているので、その内容を要約しておこう。

まず、構成を図 1 に示す。このモデルでは、略地図はノードとリンクから構成されるネットワークと、ネットワーク上にはのらない要素であるランドマークによって構成される。

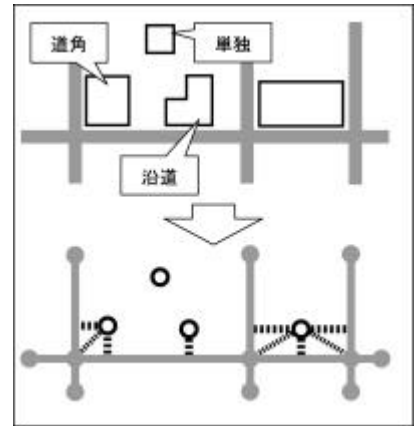
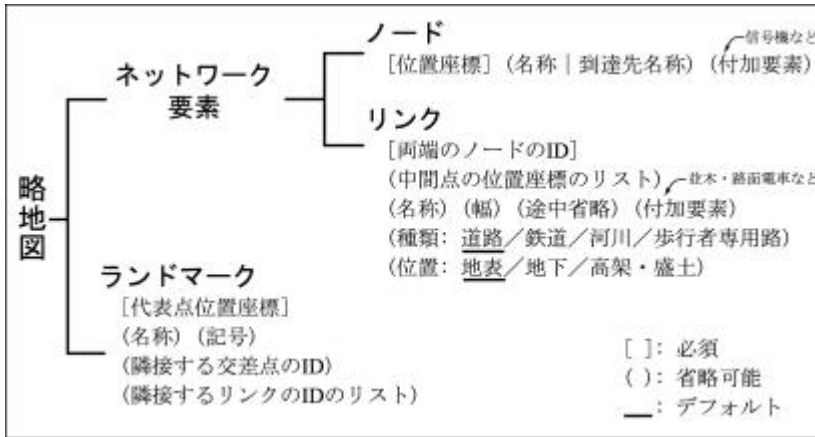


図1 道案内用略地図を構成する図形要素と属性情報

図2 モデル化にともなうランドマークの接続関係の明示

ノードは交差点、橋、踏切、駅などを示す。付随する文字情報は、接続するリンクが複数ならその地点の名称、単数なら到達先の名称と判断される。

リンクは、道路や線路、河川等を示す。なお、デフォルトではリンクは幅員の情報を持たない。

ランドマークは図2のように、代表点位置と、ノードやリンクとの隣接関係により記述される。たとえば、沿道のランドマークは1リンク、道角のランドマークはノードとそれを挟む2リンクとの隣接関係が記述される。規模の大きなものは複数のノード、リンクに隣接するものもある。また、塔などの遠望目標物には、隣接関係を持たないものもある。

3 略地図同定の手順

鈴木ほか(1998)は、日本語の文章で記述された経路を地図上に同定する手法を提案している。これは、まず出発点を同定し、そこから経路案内にしたがって地図上の道をたどっていくというものである。

このような同定手法は略地図同定にも応用できる。すなわち、出発点の対応点を見つけ、そこから略地図の案内にしたがって実地図上の道をたどっていけば、略地図上の経路は同定可能なはずである。

しかしながら、この手法は必ずしも効率的ではない。なぜなら、この手法では、経路途中にあるランドマークの情報はすべて現在位置の確認のためにしか利用されないからである。ところが、略地図と実地図とを見比べれば、多くのランドマークは一見した段階から容易に同定が可能である。最初からこれらの対応が判明しているのであれば、もし途中で経路推定の判断に困っても、判明済みランドマークをめざして途中の経路を類推することができよう。また、必ずしも出発地・目的地の向きにこだわらず、わかりやすいところから対応付けを行った方が、経路が判明しやすい場合もある。

そこで、本研究では以下の手順で同定を行う。

- Step 1: 略地図の目印(ランドマークやノードのうち名称を有するもの)を実地図の地物に対応づける。
- Step 2: 上で同定したランドマークに隣接するノードやリンクを実地図上に対応づける。(その際、比較しやすいように略地図と実地図の向きとスケールを揃えておく。)
- Step 3: 残りのノードやリンクについて、既に対応が判明している部分の周囲のわかりやすい箇所から順次、同定を行っていく

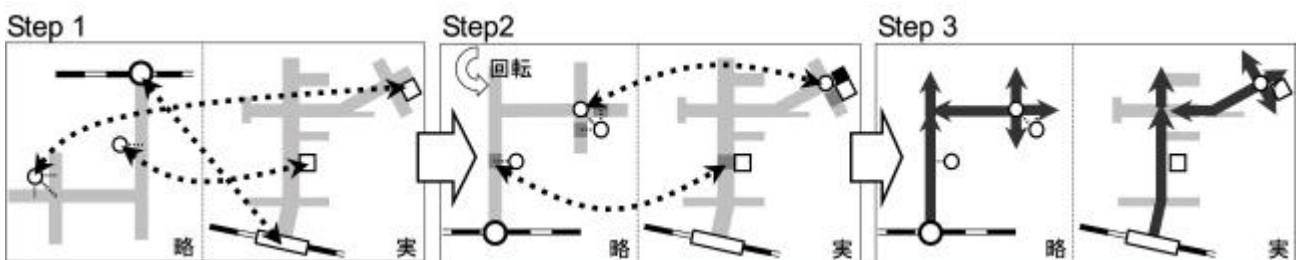


図3 略地図同定の手順(左:略地図 右:実地図)

以上の手順は、人間が略地図を与られたとき、ランドマークや交差点の名称、道路線形や街区形状などの中に、知っているものはないかを概観し、わかったものを手がかりとして描画範囲・方位・スケールなどの大まかな空間イメージをつかんだのち、ミクロな視点でネットワークの個々の要素を対応づけていく、という戦略に相当するものである。

以下、順を追って各手順の詳細を述べる。

Step 1: 目印の同定

はじめに、略地図の目印を実地図の地物に対応づける。ここでは基本的に、各目印について、実地図の地物の中から名称が対応するものを検索し、選出された候補の中からもっともらしいものを選び出す。ただし、検索時間を削減するために、前もって検索範囲を限定する工夫を行う。

Step 1.1: 検索範囲の限定

検索範囲の限定には、略地図に描かれた鉄道駅などの交通結節点の情報を用いる。具体的には、まず実地図の交通結節点に関する地物カタログを用意しておき、そこから略地図上の交通結節点と名称が対応するものを検索する。そして、図4のように、検索の結果得られた各地物から半径 r km のバッファを検索範囲に設定する。(なお、略地図は駅周辺の徒歩圏内を描いたものが多いので、 r の初期値は 2km とするのが効率的である。) もし対応する交通結節点の一つも見つからないならば、利用者に検索領域の設定を求める。

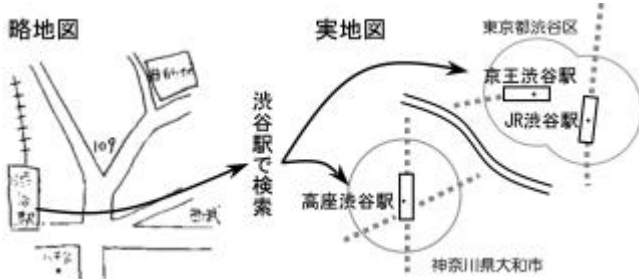


図4 検索範囲の設定

Step 1.2: 対応候補の検索

次に、実地図の検索範囲内から、略地図の残りの目印に対応する地物を検索する。ただし、略地図上

では目印の名称が省略されることがあるので、名称の類似性から対応を判断する。ここでは、目印の名称で使われている文字をそのままの順で全て含む地物を選ぶことにした。たとえば略地図に「東大」が目印として描かれていれば、「東京大学」や「東大前駅」が対応候補となる。

この作業の結果、表1のように各目印に対応する地物の候補がリストアップされる。

表1 目印とそれに対応する地物の候補

目印	渋谷駅	八チ公	109	西武
地物の候補	JR 渋谷駅 京王渋谷駅 高座渋谷駅	八チ公	渋谷 109 109-	西武百貨店 A館 西武百貨店 B館

Step 1.3: 位相的矛盾を利用した候補の絞り込み

以上の結果、一つの目印に対し、地物の対応候補がいくつも列挙される場合がある。また、候補が一つであっても、それが常に正しいものとは限らない。

そこで、目印相互の位相的關係から候補のチェックを行う。たとえば図5の場合、略地図上の109は、明らかに109- に対応し得ないことが分かる。なぜなら、もし略地図の109が実地図の109- だとすると、略地図上の西武が実地図上の西武A館・B館いずれであったとしても、109から西武まで道なりにいけることになり、略地図の情報と矛盾するからである。言い換えれば、西武A館と109-、西武B館と109- はあり得ないペアである。

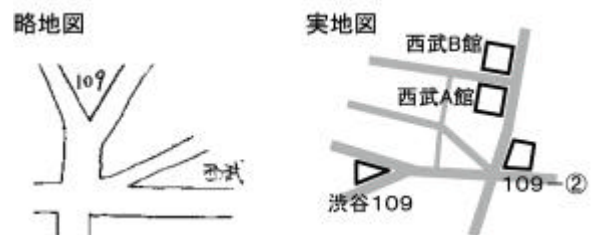


図5 目印相互の位相的關係

このような位相的矛盾を有するペアを導き出すために、次の条件に矛盾する候補のペアを求め、地物の対応候補の取りうる組合せを絞り込む。

いま、略地図上に目印 m_1, m_2 があり、これらの実地図上での対応候補の地物を M_1, M_2 としたとき、 m_1 から m_2 までが道なりにないならば、 M_1 から M_2 までも道なりにない。

ここで「道なり」とは、地物に隣接する道路から、交差点での屈折角が常に最小となる方向に道路を順にたどっていったとき、もう一方の地物に隣接する道路に至ることを言う。このもとで上の条件は、略地図上で地物間の経路がわざわざ複雑に描かれているにも関わらず、実際にはごく単純な経路で行ける、という状況はありえないことを意味する。

Step 1.4: 幾何学的位置関係からの候補の絞り込み

Step 1.3の結果、矛盾のない対応候補の組合せは複数残ることもあれば、残らないこともある。

もし一つも残らなかった場合には、検索範囲の半径 r を増加させ、Step 1.2に戻ってやり直す。

もし組合せが複数残った場合には、幾何学的位置関係が最も適当な組合せを採用する。これは、略地図上の目印の位置は、多少歪んでいるとは言え、それなりに現実を反映しているとの観点からである。

この判定にはユークリッド回帰 (Tobler, 1997) の決定係数を用いる。ユークリッド回帰とは、

$$y_i = kR_j x_i + b + e_i$$

で与えられる二次元平面のヘルマート変換 (回転 + 拡大縮小 + 平行移動) をモデルとする回帰分析法である。説明変数ベクトルには略地図の目印の位置座標、被説明変数ベクトルには対応候補の地物の代表点位置座標を与える。このとき、実地図上の各対応候補の配置と略地図上の目印の配置とが類似しているほど、決定係数は高くなる。そこで、最も決定係数が高い対応候補の組合せを採用する。

以上の手続きによって、略地図上の各目印は実地図上の地物に同定される。

Step 2: 目印に隣接する要素の対応づけ

現段階では、各ランドマークは個々の地物に同定されているのみである。そこで、各ランドマークに隣接するネットワーク要素、すなわち道角ランドマークに対する交差点や沿道ランドマークに対する隣接道路を、実地図のネットワーク上へ対応付けする。

Step 2.1: 略地図の回転・拡大

まず前処理として、略地図の各要素に対し Step

1.4 で求めた回帰式 (ヘルマート変換) を適用し、略地図の向き・スケールをあらかじめ実地図に揃えておく。これは、Step 2.2 や Step 2.3 で、向きに関する情報を手がかりとして利用するためである。

Step 2.2: 隣接ノードの同定

次に、ランドマーク m_i の隣接ノード n_i の対応先を推定する。この対応先は、図 6 のように、ランドマーク m_i の同定先の地物 M_i を含む街区沿いのいずれかのノードに対応するはずである。

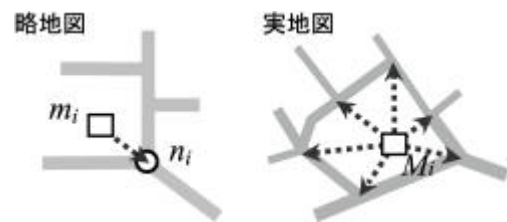


図 6 ランドマークの隣接ノードの対応先の範囲

そこで街区沿いの各ノードを 方位の類似性と交差点形状の類似性から評価し、最も評価の高いノードにランドマーク m_i の隣接ノード n_i を同定する。

方位の類似性とは、略地図上でランドマーク m_i から隣接ノード n_i を見たときの方位と、実地図上で地物 M_i から街区沿いノード N_j を見たときの方位がどれだけ似ているかを意味する。これは、下式のようにそれぞれの単位方向ベクトルの内積をとることにより [-1,1] の範囲で評価できる。

$$S_{\text{angle}} = \frac{m_i n_i \cdot M_i N_j}{\|m_i n_i\| \|M_i N_j\|}$$

交差点形状の類似性とは、略地図ノード n_i と実地図ノード N_j の交差点としての形がどれだけ似ているかを意味する。これは、 n_i に接続する各リンクを N_j に接続する各リンクに対し最もずれが生じないように対応付けたとき、そのずれの量が小さいものほど似ていると評価できる。ただし、この対応付けは、リンクの種別 (道路、鉄道等) を考慮しなければならない。もしそのような対応付けがあり得ないならば、評価値 S_{node} は 0 とする。そうでなければ、以下の評価式を用いて、[0,1] の範囲で評価する。

$$S_{\text{node}}(n_i, N_j) = 1 - \frac{1}{p \cdot D(n_i)} \min_f \sum_{k=1}^{D(n_i)} |q_k(n_i) - q_{f(k)}(N_j)|$$

$D(n_i)$: n_i に接続するリンクの数

$q_k(n_i)$: n_i に接続する k 番目のリンクの接続角

$q_{f(k)}(n_i)$: n_i に接続する k 番目のリンクに対応する, N_j に接続する実地図リンク

そして, 略地図上の隣接ノード n_i を実地図上の街区沿いのノード N_j に対応づけたときの信頼性を, 上で述べた方位の類似性と交差点形状の類似性の各評価値の積により評価する. すなわち,

$$E_j = S_{\text{angle}} \times S_{\text{node}}(n_i, N_j)$$

この評価値が最も高い実地図ノード N_j に対し, 略地図ノード n_i を同定する.

Step 2.3: 隣接リンクの制約条件化

同様にランドマーク m_i の隣接リンク l_i を実地図上に対応づけることを考える. ここで注意すべき点は, リンクはノードと違い, 必ずしも一対一対応しないということである. つまり, 図 7 のように略地図リンクは実地図上で複数の連続したリンクに対応することがある. そこで, この対応先のリンクないしリンク群のことをパスと呼ぶ.



図 7 略地図のリンクは実地図のパスに対応する

隣接リンク l_i はランドマーク m_i に対し直接的に接しているのだから, その対応先のパスはランドマーク m_i の同定先地物 M_i を含む街区に接するはずである. 言い換えれば, l_i の対応先パスは M_i を含む街区の外周リンクのいずれかを含む. そこで, そのような実地図リンクをパスの通過リンクと呼ぶ.

略地図リンク l_i に対するパスの通過リンクは, 図 8 のように, M_i から見て, ランドマーク m_i から隣接リンク l_i に下ろした垂線と同じ方向にある街区沿いのリンクとして推定できよう.

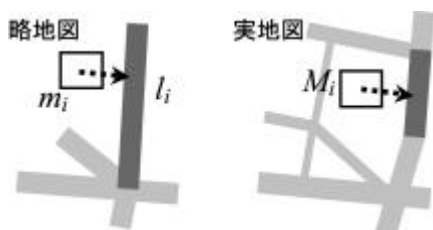


図 8 隣接リンクに対するパスの通過リンク

このようにパスの通過リンクを推定しておくことで, 後に略地図リンク l_i の対応先パスを求める際に制約条件として利用できる (Step 3.2 参照).

以上により, ネットワークに隣接するすべてのランドマークは, ネットワークの同定のための手がかりとして利用されたことになる.

Step 3: ネットワークの同定

最後に, 略地図ネットワーク上の残りのノード・リンクを同定する. ここでは既に述べたように, 出発点 目的地という方向にはこだわらず, 対応関係がわかりやすい箇所から順次, 同定を進めていく.

このような推論を実現するため, 確信度という指標を導入する. 確信度とは, 略地図リンクとそれに対応する実地図パスの候補 (候補パス) の組に与えられる指標で, 両者の対応の信頼性を示す. 確信度は候補パスが生成された段階で求められ, さらに推定過程に対応の正しさを示す証拠が現れてきたら, 値が更新される. そして各段階でこの確信度が高いものから優先的に略地図リンクと実地パスを対応確定することによって, 対応が推定しやすい部分からの逐次的な同定が実現される.

具体的な手順は以下の通りである. また, 図 9 にこの手順の概略を示す.

Step 3.1: 初期候補の作成

略地図上で既同定ノードに接続する全リンクに対し, 実地図上で候補パスをつくり, それぞれ確信度の初期値を求める. このとき, 互いに整合する候補パスがあれば, 両者の確信度を更新する.

Step 3.2: リンクの同定 (あるいは終了)

略地図上の全リンクが同定されていたら正常終了する. そうでなければ, 最も確信度の高い略地図リンク l_i とその候補パス P_j の組を同定する.

Step 3.3: あり得ないパス候補の削除 - 1

同定した略地図リンク l_i に関する他のパス候補を削除する. また, 実地図上で確定したパス P_j に対し端点以外で交点を持つパス候補を全て削除する.

Step 3.4: ノードの同定

同定した略地図リンク l_i の両端点ノードとも既に同定済みだった場合には, Step 3.2 に戻る.

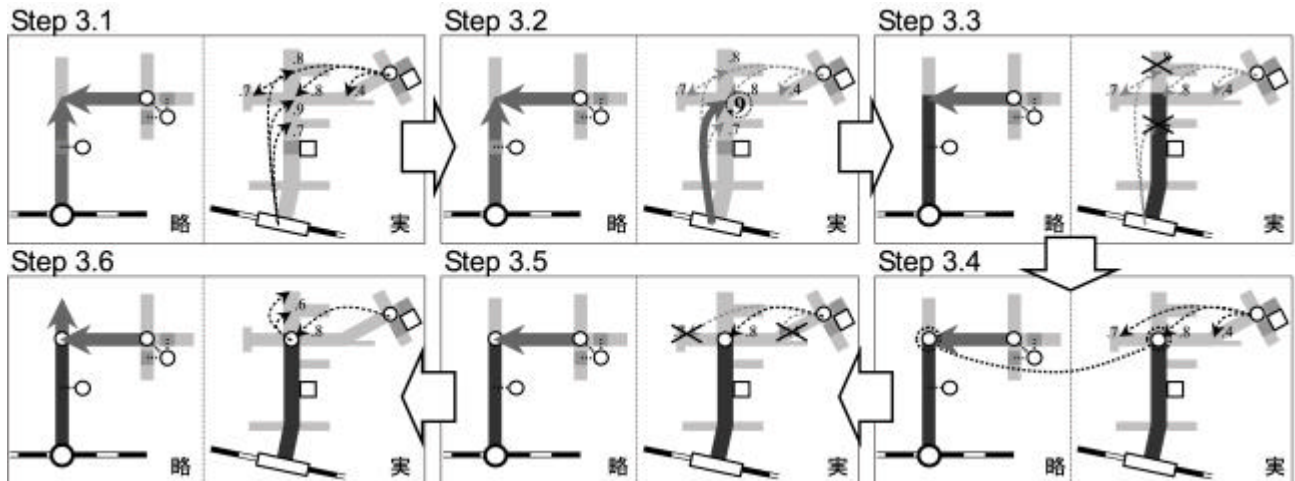


図9 ネットワークの同定過程の流れ (左:略地図 右:実地図)

そうでなければ,未同定の方の端点ノード n_k をパス P_j の未同定の方の端点 N_k に同定する.

Step 3.5: あり得ないパス候補の削除-2

同定した略地図ノード n_k に接続する略地図リンクに関する候補パスのうち,その端点が n_k の同定先ノード N_k になっていないものを削除する.

Step 3.6: 新しいパス候補の作成

同定した略地図ノード n_k に接続する略地図リンクの中で未同定のものがあれば,その候補パスと確信度の初期値を求める.そして,既存の候補パスの中でこれと整合するものがあるならば,互いの確信度を更新する.

Step 3.2に戻る

この一連の手続きによって,確信度を Priority Key とする逐次的な対応づけが実行される.

以下では, Step 3.1 と Step 3.6 で行われている,候補パスの作成,確信度の初期値算出や更新の各処理について詳しく述べる.

候補パスの作成方法

候補パスは,ある同定済みの始点ノード n_k に対し, n_k から発する各未同定リンク l_i について,それぞれ複数個ずつ求められる.

候補パスは,一つないし複数の連続的なリンクの集合であり,その端点の片方は n_k の同定先 N_k である.また,その形状や向きは l_i と類似しているはずである.そこで,まず N_k を起点とするパスを列挙したのち, l_i と比較して不自然なものを削除すること

で,候補パスを得ることにする.具体的には,

- 1) 実地図上で,ノード N_k に接続する全ての未同定リンクに対し探索を開始する.
- 2) 経由したリンクの総延長が略地図リンクの長さの a 倍(経験的には2.5倍で十分)に達するか,別の同定済みノードに達したら,それ以上は探索しない.そうでなければ,到達したノードに接続する全未同定リンク(経由してきたリンクを除く)に対し探索を続ける.
- 3) 2)の探索の各段階で経由したリンクの集合を候補パスとする.
- 4) 略地図リンク沿いのランドマークによってパスの通過リンクがわかっているときは,その通過リンクを含まない候補パスをすべて削除する.(通過リンクについては Step 2.3 参照)
- 5) 各候補パスに対し確信度を求める.そして,その値がはじめから閾値を下回る候補パスは,実現の可能性が低いので,これを削除する.

確信度の初期値の算出方法

候補パスの作成にともなって,確信度が算出される.確信度は,略地図リンクと実地図上の候補パスの対応の信頼性を示す指標である.

確信度の初期値は,幾何的類似性から求める.評価に利用できる要素としては,略地図リンクと候補パスの形状の類似性(長さ,向き,両端点の交差点形状の類似性)と,候補パス自体の直進性がある.ここではまず,それらの評価値を個別に算出する.

S_{length} : 長さの類似度

$$S_{length} = \min\left(\frac{d_l}{d_p}, \frac{d_p}{d_l}\right)$$

略地図リンクの長さ d_l と候補パスの構成リンクの総延長 d_p について、両者が同じ長さならば 1、いずれかがもう一方の a 倍 ($a > 1$) であれば、値は $1/a$ となる。

$S_{direction}$: 進行方向の類似度 (図 10)

$$S_{direction} = 1 - \frac{1}{p} |q_l - q_p|$$

略地図リンクの進行方向の方位 q_l と候補パスの進行方向の方位 q_p との角度のずれを評価値とする。[0,1]の値をとり、ずれが全くない場合は 1 となる。

$S_{node}(n_k, N_k), S_{node}(n_{l-end}, N_{P-end})$:

始点、終点の交差点形状の類似度 (図 10)

始点側は略地図ノード n_k とその対応先の実地図ノード N_k の組、終点側は略地図リンクの終端のノード n_{l-end} と候補パスの終端のノード N_{P-end} の組の、交差点としての形の類似性を評価値とする。算出方法は Step 2.2 と同じで、[0,1]の値をとる。両交差点が全く同じ形であれば値は 1 をとる。

$V_{directness}$: パスの直進度 (図 10)

$$V_{directness} = 1 - \frac{1}{p} \max(|q_i|)$$

パスが複数のリンクで構成される場合において、途中のノードで接続するパス構成リンク間の方向のずれ q_i の最大値をもとに、パスの直進性を評価値とする。[0,1]の値をとり、パスが完全な直線を形成すれば 1 をとる。

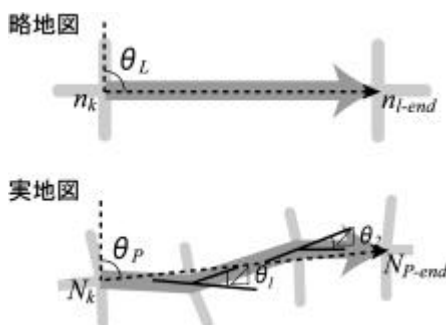


図 10 確信度の算出に用いる要素

そして最後にこれらの個別の評価値の積を求め、確信度の初期値として与える。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{確信度} &= S_{length} \times S_{direction} \times S_{node}(n_k, N_k) \\ &\quad \times S_{node}(n_{l-terminal}, N_{P-terminal}) \times V_{directness} \end{aligned}$$

確信度の更新方法

図 11 のように、本来つながるべき候補パス同士が実地図上で矛盾無く接合した場合、このような候補パスの組は信頼が高いと判断できる。そこで、候補パスを作成した際に、既存の候補パスの中からこのような位相的整合性を持つものが発見された場合は、両者の確信度を向上させ、信頼性を評価する。

この更新方法を組み入れることによって、幾何的観点および位相的観点の両面を考慮した逐次的な対応推定が実現される。

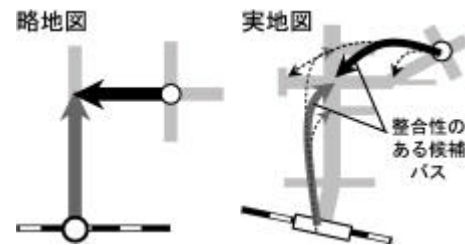


図 11 候補パスの整合性の判断

4. 評価

さて、以上のアルゴリズムの有効性および問題点を検討するため、Microsoft Visual BASIC 6.0 で実装を行い、銀座・渋谷の略地図サンプル各 49 例に対し、本手法による同定を試みた。このサンプルは、東京大学都市工学科の都市解析の講義を受講した大学生 49 名に手書きにより描かせた道案内図をデジタル化したものである。被験者はいずれも東京近郊に 3 年以上居住しており、対象地区の地理について十分な知識を有していると思われる。さらに、参照用として当該地区の道路地図も与えた。描画領域は $65 \times 65 \text{mm}$ 、描画時間は 5 分で、目的地は 5 箇所の中からランダムに指定した。一方、実地図は 1 万分の 1 地形図をデジタル化したものに、百貨店・交差点等の地物名称を加えたものである。実行画面を図 12 に示す。

各段階での成果は以下の通りである。

Step 1 では、対応づけがなされた目印のうち、銀座は 99%、渋谷は 85% が正しく同定されていた。

渋谷で失敗が多いのは、同系列の百貨店が近接して立地しているため、この判別に失敗したことによる。

Step 2 では、隣接ノードのうち、銀座は 93%、渋谷は 85%が正しく同定された。また、隣接リンクでは、銀座は 90%、渋谷は 85%に対し正しいパスの通過リンクが求められた。Step 1 に比べると銀座での失敗が増えているが、そのほとんどは略地図自体の誤りに起因したもの（有楽町マリオンを数寄屋橋交差点に接しているとする誤り）であった。

最終的な同定結果は、図 13 の通りである。いずれの場合も、出発地から目的地までの正しい経路が確保できたものは、7 割前後であった。銀座・渋谷とも、略地図上で目的地付近が拡大されて描かれたことにより生じる距離感の狂いや、もとの略地図自体の誤りが、同定失敗原因として観察された。また、銀座の場合は街路名の情報を利用していないことに起因するリンクの誤対応、渋谷の場合はランドマークの誤対応が、それぞれ失敗原因として観察された。

このことから、今後検討していくべき課題として、以下が得られた。

- 1) 局所的なスケールの歪みに対処すること。
- 2) 街路名称の情報を考慮すること。
- 3) 目印の同定の際に、本手法で用いた道なり関係・幾何的位置関係以外のチェックを行うこと。



図 12 実行画面の例

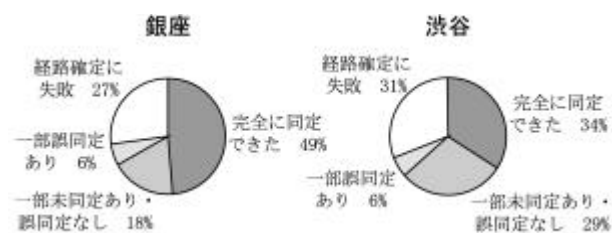


図 13 最終的な同定実験の結果

5. まとめ

本研究では、道案内用の曖昧な略地図を対象に、名称の類似性、幾何的類似性、位相的整合性など多様な手がかりを総合的に利用して、略地図上の各要素を正確な地図上に同定する手法を提案した。これは、まず略地図の目印を同定し(Step 1)、つづいてランドマークに隣接するネットワーク要素を対応づけ(Step 2)、最後に残りの要素を確定しやすいところから順次、同定していく(Step 3)という段階的な手法であった。このような略地図を「読みとる」技術は、略地図データを GIS 上に取り込み、活用していくうえで有効な技術となるであろう。

参考文献

- 有川正俊 久保田光一 (2000) G-XML の概要 GIS コンテンツの相互流通の実現に向けて。『電子情報通信学会技術報告書』, AI2000-36, 33-40
- 倉田陽平 岡部篤行 (2001) 手書き道案内図の分析とモデル化 略地図自動同定に向けて。『地理情報システム学会講演論文集』, 10, 投稿中
- 鈴木祥宏 馬場口登 北橋忠宏 (1998) 道順伝達のための地図と案内文との表現メディア変換。『電子情報通信学会技術報告書』, PRMU97-272, 49-56
- 馬場口登・堀江政彦・上田俊弘・淡誠一郎・北橋忠宏 (1997) 経路理解支援のための略地図とその案内文の生成システム。『電子情報通信学会論文誌』, **J80-D-II**(3), 791-800
- 増山篤 岡部篤行・貞広幸雄・島村秀樹・三好輝生 (2000) 二つの領域分割図の適合度評価と統合化の手続き。『GIS 理論と応用』, **8**(1), 19-27
- Tobler, W. R. (1994) Bidimensional Regression, *Geographical Analysis*, **26**(3), 187-212
- Walter, V. and Fritsch, D. (1999) Matching spatial data sets: a statistical approach. *International Journal of Geographical Information Science*, **13**(5), 445-473
- Engenhofer, M. J. (1997) Query Processing in Spatial-Query-by-Sketch. *Journal of Visual Languages and Computing*, **8**(4), 403-424