

## 仮説の生成・検証パラダイムに基づいた 市街地地図からの道路情報抽出

早川 卓哉<sup>†</sup> 渡辺 豊英<sup>†</sup> 杉江 昇<sup>†</sup>

本稿では、仮説の生成・検証プロセスの繰返し処理により、市街地地図から道路情報を段階的に抽出・精練する方法について報告する。従来、道路情報の抽出にはボトムアップ処理に基づいた方法が数多く報告されてきたが、処理方法が局所的で、かつその適用域が個々の地図に依存しているという欠点があった。本方法は、初期処理としてボトムアップ的に市街地地図から道路情報を抽出するもの、以降初期抽出された道路情報に対して、市街地地図に関する経験的知識を繰返し適用・解釈し、道路情報を検証して精練する。この方法の視点は、(1)初期抽出過程では高い認識率を達成することが直接の目的ではなく、誤った道路情報の抽出を極力避けること、(2)精練過程では経験的知識の適用により、既存の道路情報を解釈し、推定可能な事実に基づいて道路情報の抽出率を向上させること、である。このような視点の下で、道路情報を大局的に解釈して仮説を生成し、市街地地図データでそれを局所的に検証して段階的に道路情報を精練するパラダイムを議論する。さらに、このパラダイムに基づいて実現したプロトタイプ・システムにおいて、実際に実験を行い、良好な結果を得たことを報告する。

### Extraction of Road Information from an Urban Map on the Basis of the Generation-Verification Paradigm of Hypotheses

TAKUYA HAYAKAWA,<sup>†</sup> TOYOHIDE WATANABE<sup>†</sup> and NOBORU SUGIE<sup>†</sup>

We address an extraction method of road information from an urban map on the basis of the generation-verification paradigm of hypotheses. Until today, many methods about this road extraction issue have been already reported. However, these methods are in short of the applicability because they are composed of localized bottom-up-oriented procedures and also the algorithms are dependent on individual maps. Though our method extracts the road information from urban maps by the bottom-up approach as an initial processing stage, the basic framework is to refine the road information stepwisely under the interpretation of heuristic knowledge about the composition rules of urban maps. The main features in our method are as follows: (1) in the initial processing stage, the most correct road information is only extracted under the severe threshold values for constraints; and (2) in the refinement stage, inferable hypotheses are derived from the interpretation between existing correct road information and heuristic knowledge, and then are verified on the urban map.

#### 1. はじめに

市街地地図から道路、文字列などの有意な情報を自動的に抽出する研究は、地図情報システムに対するデータ・リソース作成の効率化のために試みられ、今日までにさまざまな方法が報告されてきた<sup>1),2)</sup>。市街地地図において有意な情報が相互に重なり合っていることが、自動抽出を難しくしている<sup>3)</sup>。今日まで報告された研究は、抽出対象の統計的な特徴量、形状的な特性を利用した方法であった<sup>4)~9)</sup>。これらの方法は

あらかじめ設定されたしきい値の下に画素相互の隣接関係を解析するというアプローチに基づいており、局所的な特徴に注視した方法であった。したがって、抽出対象の特性や、抽出対象と非抽出対象間の関係を大局的に解釈する方法ではなかった。また、しきい値が個々の市街地地図の原画像データに依存して定められ、処理の柔軟性、適用性に欠けていた。

このような問題点に対処するには、画素成分に依存した局所的なボトムアップ処理と、市街地地図に関するモデルや知識を用いた大局的なトップダウン処理を融合させることが一つの方法である。早川らはボトムアップ処理とトップダウン処理を逐次的に結合する方法を報告した<sup>10),11)</sup>が、このような認識制御でも十分

<sup>†</sup> 名古屋大学工学部情報工学科  
Department of Information Engineering, School  
of Engineering, Nagoya University

に対処できないことを指摘している。すなわち、ボトムアップ処理とトップダウン処理が相互に補完し合って認識することを課題とした。本稿では、ボトムアップ処理とトップダウン処理が相互に、かつ有機的に連携して道路情報を抽出する方法について報告する。

本稿で提案する抽出法は、仮説の生成・検証パラダイムに基づいて構成される。すなわち、抽出済みの道路情報に対して、市街地地図に関する経験的知識を適用・解釈し、新しい事実や矛盾を発見できればそれを一種の仮説として生成し、その仮説に基づいて市街地地図データ<sup>\*</sup>を探索して仮説を検証する。その結果、仮説が検証されれば既存の道路情報を修正する。そして、道路情報に新しい事実や矛盾を発見できなくなるまで、仮説の生成・検証プロセスを繰り返し適用するというアプローチである<sup>12),13)</sup>。ここで、この仮説の生成・検証パラダイムを実現するために、最初に従来のボトムアップ的処理によって道路情報を抽出するが、以降の処理はすべて既抽出の道路情報の解釈と、市街地地図データの解析<sup>\*\*</sup>で認識制御される。このとき解釈を容易にするために、抽出された道路情報を道路片に対応するエッジと、エッジ間の接続関係を表すノードより成る道路ネットワークで表現する。

## 2. 道路情報抽出処理の概要

市街地地図から道路情報を抽出する目的に対して、われわれのアプローチは原画像データ、およびそれを処理したデータを解析する局所的なボトムアップ処理と、道路ネットワークおよび市街地地図の道路形状に関する知識を解釈する大局的なトップダウン処理を相互に連携させて道路情報を認識する。したがって、ボトムアップ処理とトップダウン処理の逐次結合で原画像データから道路ネットワークを構成し、修正する<sup>10),11)</sup>のではなく、道路ネットワークの解釈処理と市街地地図データの解析処理を相互の連携制御により繰り返し実行して、道路ネットワークを精練する<sup>12),13)</sup>。すなわち、解釈処理によって生成された事実や矛盾に対して、解析処理が検証する構成となり、生成される事実・矛盾を一種の仮説として捉えた場合、仮説の生成・検証パラダイムを実現する。この繰り返し実行さ

<sup>\*</sup> 原画像データを処理したデータとは細線化、折れ線近似などの処理を施した画像データやベクトル・データを表し、原画像データも含めてこれらを市街地地図データと総称する。

<sup>\*\*</sup> 仮説に基づいて市街地地図データを調べるとき、仮説から捉えた処理を検証、市街地地図データから捉えた処理を解釈と、同じ処理手続きを表現する。

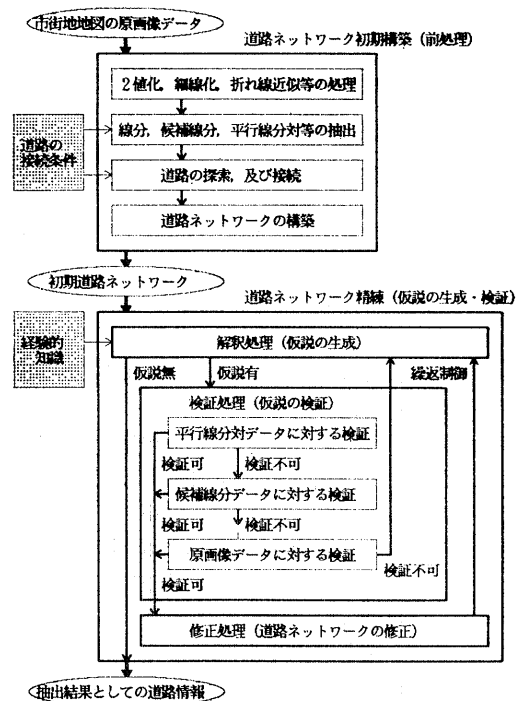


図 1 処理の枠組み

Fig. 1 A framework of extraction of road information.

れる仮説の生成・検証プロセスは道路ネットワークに推定可能な仮説がなくなるまで続けられる。

図 1 に処理の枠組みを示した。道路ネットワーク初期構築過程はボトムアップ的に道路ネットワーク（これを初期道路ネットワークと呼ぶ）を作成し、道路ネットワーク精練過程における仮説の生成・検証プロセスの前処理となっている。また、道路ネットワーク初期構築過程では、ボトムアップ的に種々の処理レベル<sup>\*</sup>に応じた市街地地図データを作成し、解析処理ではこれらの市街地地図データを段階的に用いて検証する。初期道路ネットワークは、仮説を生成するための基礎データであり、仮説の生成・検証プロセスの精練効果を決定する。すなわち、初期道路ネットワークでは、道路情報の抽出率が低くても、誤った情報を含んでいないことが重要である。なぜならば、誤った道路情報の下に生成される仮説は検証処理を混乱させたり、さらには次々に誤った道路情報を生成することにもなるからである。したがって、道路ネットワーク初期構築過程では、道路情報をボトムアップに抽出する

<sup>\*</sup> 種々の市街地地図データを作成するときの段階的な処理手続きを表す。

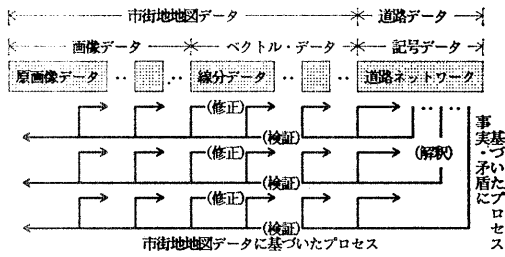


図 2 解釈・検証プロセス  
Fig. 2 Interpretation-verification process.

際に、そのしきい値を厳しく設定し、誤抽出を極力減らす戦略を採用している。

道路ネットワーク精練過程は、仮説の生成・検証プロセスで構成され、解釈処理で生成される仮説を、検証処理でその検証内容・処理レベルに応じて段階的に実行していく。このとき、生成された仮説に従って市街地地図データを柔軟に照合できるようにしきい値をゆるめ、かつ積極的に市街地地図データに対して個々の成分を推定し、抽出率の向上を図る。図 2 に、われわれのアプローチにおける解釈・検証プロセスを概念的に表した。図 2 では、発見された事実や矛盾に基づいた解釈・検証プロセスと、市街地地図データに基づいた解釈・検証プロセスが明示されている。市街地地図データに基づいた解釈・検証プロセスは、一つの事実・矛盾に基づいた解釈・検証プロセスの中で、段階的な市街地地図データに従って順次実行される。したがって、市街地地図データに基づいた解釈・検証プロセスが終了すると、新たな仮説の下に事実・矛盾に基づいた解釈・検証プロセスが開始される。

### 3. 道路探索

市街地地図から道路を抽出し、道路ネットワークを構築するには、どのような成分を道路とし、どのように道路相互の連結性を把握して道路ネットワークとするかが課題となる。

#### 3.1 道路ネットワーク

道路情報をどのように表現するかは処理

全体にわたって重要である。また、市街地地図データの成分に対して道路をどのように制約するかも重要な処理の指針となる。道路を、以下の制約を満たす地図要素とする。

#### 【道路の制約条件】

- 条件 1: 道路は互いに平行な 2 本の線分の組の系列によって表現され、その系列に属す組は方向があまり変化せず、かつ幅の変化も少ない。
- 条件 2: 任意の 1 本の道路を表す系列に属す組を 2 辺に持つ閉領域は形成されない。
- 条件 3: 道路を表す系列に属す組は他の系列に属す組と、交差点を形成する場合がある。

これらの条件を具体化すれば、図 3 のようになる。すなわち、条件 1, 3 を満たす 2 本の線分の組を道路とし、条件 2 は条件 1 の例外規則となっている。

道路ネットワークはこのような道路をその接続関係などの情報とともに表現し、ノードとエッジから構成

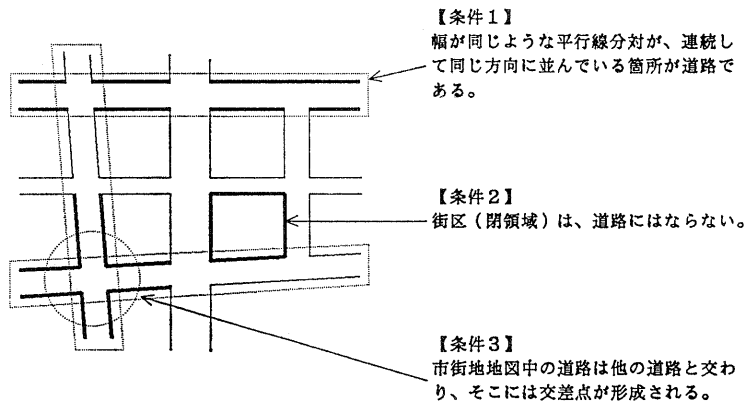


図 3 道路の制約条件  
Fig. 3 Properties of road.

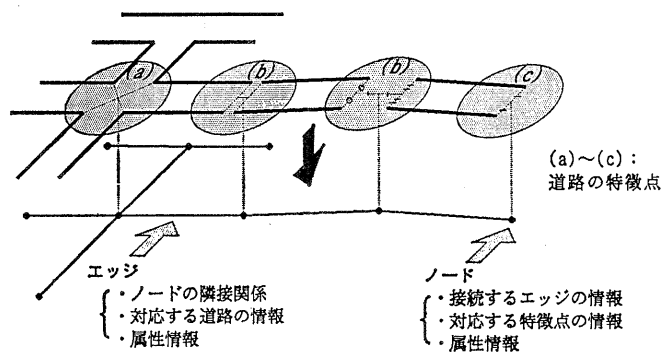


図 4 道路ネットワークの例  
Fig. 4 An example of road network.

される。ノードは道路の不連続点に対応し、道路を表す平行な2本の線分の組の系列における継ぎ目や、道路の途切れ点を表す。実際の市街地地図では、交差点や地図の縁で道路が途切れた箇所が不連続点である。

また、細線化や折れ線近似などの処理を施した画像データでは、これらの処理によって発生した道路の途切れ点も不連続点となる。一方、エッジはノードの隣接関係を表し、エッジで結ばれたノードは互いに隣接している。図4に、道路ネットワークの例を示した。

### 3.2 市街地地図データにおける道路

道路は市街地地図で互いに平行な2本の線分の組の系列として定義されるが、これを具体的にどのように処理するかによって道路を識別する方法も異なる。道路ネットワーク初期構築過程で原画像データから道路ネットワークを構成するとき、それぞれの処理手続きで段階的に種々の市街地地図データが生成されるが、これらは順次意味付け・解釈される。図5には、下位層から上位層に段階的に意味付け・解釈された市街地地図データが処理手続きとともに示されている。市街地地図データで最上位層の平行線分対データとは、平行な2本の線分の組を抽出して構成されたベクトル・データである。最下位層の市街地地図データ、すなわち原画像データから道路を同定する場合、個々の画素がまだ識別されていないために、処理方法によって多くの道路情報を抽出可能であるが、抽出処理に要する時間が膨大であり、また抽出した道路情報に誤りが含まれる可能性が高い。一方、平行線分対データでは、抽出した道路情報に誤りが含まれる可能性は少なく、

抽出処理に要する時間も少ない。しかし、抽出可能な道路情報も少ない。道路情報を抽出する場合、どの市街地地図データを処理するかは、処理目的に従って決めなければならない。

### 3.3 道路探索の方向

市街地地図データから道路を抽出する場合、平行な2本の線分の組\*をどの方向に探索して一つの接続した系列とするかは重要である。道路の制約条件における条件1, 3から、道路を表す平行な2本の線分の組に着目した場合、その延長方向に、またその交差方向にも接続可能な他の平行な2本の線分の組が存在する可能性がある。したがって、個々の道路を連結して道路情報を収集するには、市街地地図データから平行な2本の線分の組に注目して、

- 1) 延長方向への探索
- 2) 交差方向への探索

が必要となる。これらの接続方向は、その適用条件によって判定値が異なってくる。延長方向であれば、どのような角度までの道路を探索するか、また交差方向であれば、どのような角度以上の道路を探索するかであり、これは探索状況に応じて決定する必要がある\*\*。

### 3.4 道路探索の適用戦略

ボトムアップ処理に基づいた道路ネットワーク初期構築過程と、トップダウン処理とボトムアップ処理に基づいた道路ネットワーク精練過程では、必然的に道路探索の戦略も異なってくる。道路ネットワーク初期構築過程では、道路情報を新規に獲得することが目的であり、また以後の道路ネットワーク精練過程の解釈・検証プロセスにおける基礎データとなる道路ネットワークを生成するために、抽出された道路情報に正確さが必要とされる。不確かな情報が多ければ多いほど、道路ネットワーク精練過程において処理量が増大し、解釈相互の矛盾が発生しやすい。反対に、獲得した道路情報が正確であれば、それに基づいて推定した解釈も正当であり、認識率の向上、誤認率の低下を図ることができる。したがって、道路ネットワーク初期構築過程では探索レベルとして平行線分対データを、また探索方向として延長方向を適用する。少なくとも、平行線分対データは他の市街地地図データと比べ

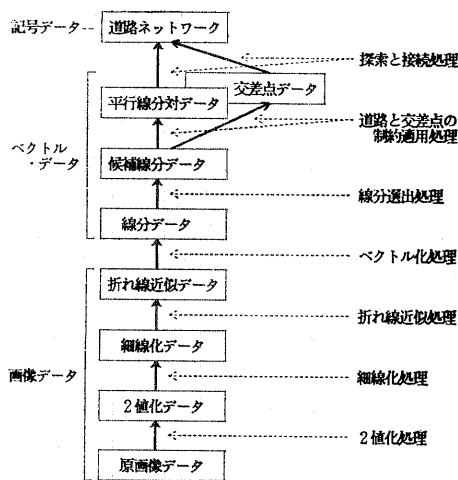


図5 市街地地図データ  
Fig. 5 Urban map data.

\* この定義に合うのは道路条件の下に識別された平行線分対データであるが、これより下位層の市街地地図データでも経験的知識の下に道路を仮想的に解釈できる。

\*\* 道路ネットワーク初期構築過程か、道路ネットワーク精練過程の相違により、探索条件の適用も異なる。

て最も正確に選別された道路情報だけを含み、延長方向の探索は道路がある方向に連続しているという事実を踏まえている。

一方、道路ネットワーク精練過程では既存の道路ネットワークを解釈し、新しい事実・矛盾を発見し、それを一種の仮説とみなして市街地地図データを解析して検証し、検証できれば既存の道路ネットワークを修正するというプロセスで実現されるために、推定可能なすべての仮説をできるだけ数多

く生成することが必要である。誤った仮説であれば、市街地地図データすべてにおいて正当化できない。したがって、道路ネットワーク精練過程では、より多くの道路情報を収集するという視点から、必要に応じて種々の探索レベル、探索方向を組み合わせる道路探索を実施する必要がある。生成仮説の検証処理は、探索レベルに対して市街地地図データの上位層から下位層に、また探索方向に対して延長方向から交差方向へと実行する。すなわち、まず延長方向の探索を優先させ、探索レベルを市街地地図データの上位層から下位層へと調べ、次に交差方向に市街地地図データを上位層から下位層へと調べる探索戦略を採用する。

#### 4. 道路ネットワークの初期構築

道路ネットワークの初期構築は、原画像データを入力とし、道路情報を位相的に表現した道路ネットワークを出力とする。原画像データに2値化、細線化、折れ線近似などの画像処理を、また種々のしきい値による道路構成要素の判別処理を施して実現される。本処理は文献 10)、11) に報告された方法にはほぼ準じて実現され、ここでは簡単に概略を述べる。

道路ネットワーク初期構築過程は2値化、細線化、折れ線近似などの画像データに対する逐次的な処理の後に、ベクトル・データとして線分を抽出し、道路を識別する。ベクトル・データとして線分化されたデータは、

- 1) 候補線分の抽出
- 2) 平行線分対の同定
- 3) 交差点の同定

という処理の後、平行線分対の系列として交差点情報の下に道路ネットワークを構成する。したがって、2値

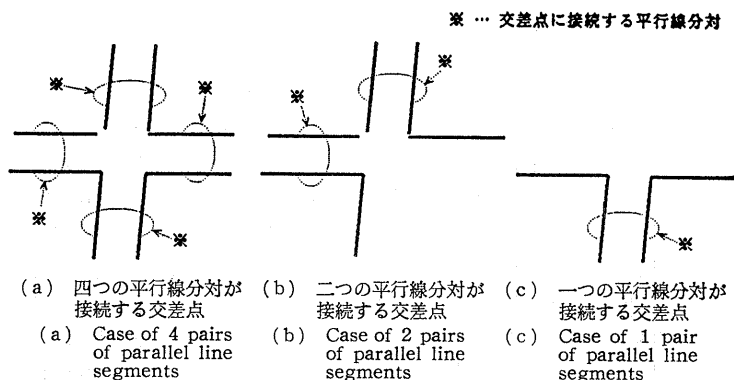


図 6 交差点の例

Fig. 6 Examples of intersections.

化画像データ、細線化画像データ、折れ線近似画像データ、および線分ベクトル・データ、候補線分ベクトル・データ、平行線分対ベクトル・データ、交差点ベクトル・データという市街地地図データが、各種処理手続きに応じて段階的に生成される。これら中間的な市街地地図データは本来保存される必要はないが、道路ネットワーク精練過程で利用されるために保持される。

道路ネットワーク初期構築過程では、正確な情報によって道路ネットワークを構築する必要があり、交差点、平行線分対という市街地地図データの最上位の識別データに基づいて処理する。交差点は少なくとも二つ以上の交差点角\* によって構成され、この交差点角は平行線分対を共有しているのもので、どの交差点にも少なくとも一組以上の平行線分対が接続する。図 6 は、本研究で想定した交差点の例である。これらの平行線分対に対して交差点から遠ざかる方向に探索し、平行線分対を延長方向に接続して道路ネットワークを構成する。

具体的な手順は以下のようである。ただし、以下の処理は同定されたすべての交差点に対して実行される。

- (1) 実行点  $C$  に対するノード  $N_0$  を作成する (図 7(a) 参照)。ただし、 $C$  が他の交差点からの道路情報によって、すでに隣接平行線分対間の継ぎ目として同定されている場合 (図 7(b) 参照) は、その特徴点に対応するノードを  $C$  の  $N_0$  とする。
- (2)  $C$  に接続する平行線分対のうち、まだ探索されていないものを出発点として  $C$  から遠ざかる方向に探索する。探索の結果、新たな平行線分対が見つかった場合ステップ (3) を、そうでなければステッ

\* 交差点角とは2組の平行線分対のそれぞれ一方の線分がある一定以上の角度を成して接続する場合に、これらの線分で構成された角である。文献 11) を参照。

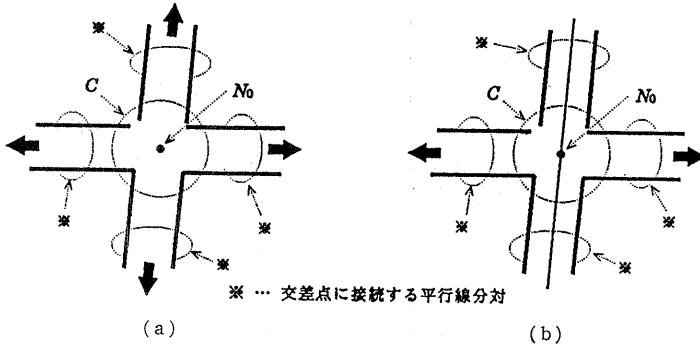


図7 道路の接続  
Fig. 7 Connection of roads.

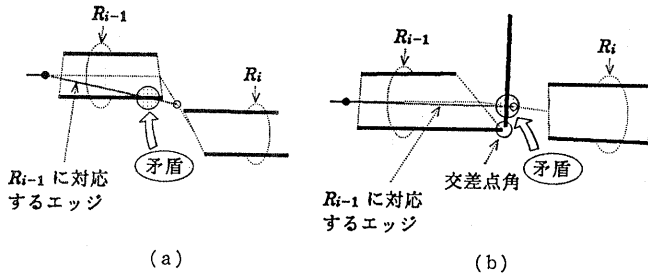


図8 道路接続時の矛盾  
Fig. 8 Contradiction in connecting roads.

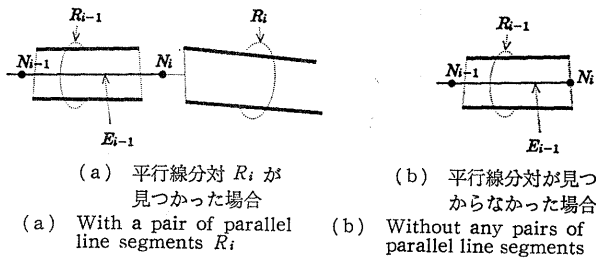


図9 道路ネットワークの作成  
Fig. 9 Construction of road-network.

プ(4)を実行する。

(3) 探索の結果、平行線分対  $R_{i-1}$  に接続する平行線分対として  $R_i$  が見つかったとすると、 $R_{i-1}$  と  $R_i$  を互いに接続する平行線分対としたとき、矛盾が存在するか否かを調べる。ここで、矛盾とは次の場合である。

- 平行線分対に対応するエッジを作成した場合、このエッジがその平行線分対を構成する候補線分と交わる (図8(a)参照)。
- 平行線分対に対応するエッジを作成した場合、このエッジがその平行線分対を構成する候補線分を一方の構成要素とする交差点角の、他方の構成線分と交わる (図8(b)参照)。

検証の結果、矛盾がなければ図9(a)のように  $R_{i-1}$  と  $R_i$  の間にノード  $N_i$  が作成され、 $N_{i-1}$  と  $N_i$  が隣接ノードであることを表すエッジ  $E_{i-1}$  が作成される。作成されたノードとエッジが道路ネットワークに追加された後に、 $R_i$  を基準として引き続き道路を探索する。

(4)  $R_{i-1}$  に接続する平行線分対が見つからない場合は図9(b)のように  $N_i$  に  $E_{i-1}$  が作成され、道路ネットワークに追加される。C に接続する平行線分対のうち、まだ探索されていないものが存在すれば、それを出発点としてステップ(2)を再び実行する。存在しなければ C から道路探索を終了する。

## 5. 道路ネットワークの精練

道路ネットワーク初期構築過程で作成された道路ネットワークは、必ずしも十分に市街地地図の道路情報を表現している

わけではない。特に、本アプローチでは、この道路ネットワークが極力誤った情報を含まないように、道路の制約条件を厳しく課して最も確かな道路成分を抽出する方法を採用している。道路ネットワーク精練過程はこの不完全な道路ネットワークを修正・補完してより精度の高い道路情報を獲得する。

### 5.1 経験的知識

道路ネットワーク精練過程では、道路ネットワーク初期構築過程で作成された道路ネットワークを、市街地地図に関する経験的知識を用いて解釈し、精練する。経験的知識は道路ネットワークに存在可能な誤り、または推定可能な解釈に基づいて設定された発見的な知識である\*。例えば、図10(a)~(c)の矢印左側に対する経験的知識は次のようであり、これらの適用により図10(a)~(c)の矢印右側に修正可能となる。

#### 【経験的知識の例】

- 1) 交差点に接続する道路が部分的にしか抽出されていないと解釈される場合、その交差点に接続する未

\* ネットワーク構造として位相的に矛盾する構成部分や、部分グラフとして構成可能な構造などを表す。

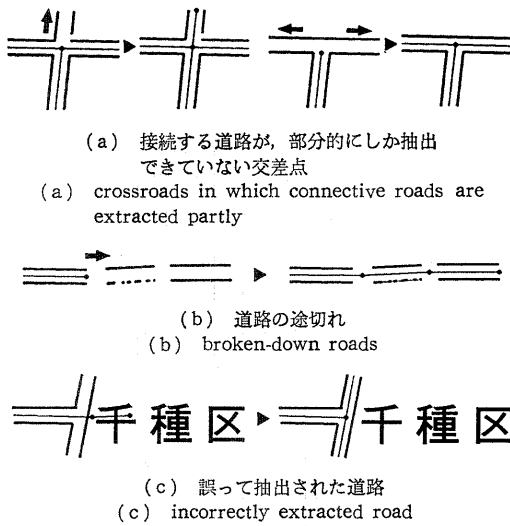


図 10 経験的知識の例

Fig. 10 Examples of heuristic knowledge.

抽出なものを抽出可能である (図 10(a) 参照)。

- 2) 道路が途中で途切れていると解釈される場合、より詳細なレベルの探索法を用いて再度探索可能である (図 10(b) 参照)。
- 3) 誤った道路が抽出されていると解釈される場合、それを除去可能である (図 10(c) 参照)。

### 5.2 道路ネットワークの精練過程

道路ネットワークを経験的知識に基づいて解釈し、推定可能な事実・矛盾を発見できればそれを一種の仮説として市街地地図データで比較・検証し、検証できれば仮説を真実として既存の道路ネットワークを修正する。このような処理を経験的知識に該当する部分が道路ネットワークに存在しなくなるか、道路ネットワークが変化しなくなるまで繰り返す。このように、道路ネットワークに対する解釈処理と市街地地図データに対する検証処理が相互に連携して、解釈・検証プロセスを繰り返すことにより、道路ネットワークを精練する。

一方、このような解釈処理と検証処理の相互連携機構に加えて、市街地地図データの検証処理では道路探索の適用戦略に基づいて検証手続きが繰り返される。すなわち、平行線分対ベクトル・データで仮説を検証できなければ、その検証手続きを終了するのではなく、それより下位層に位置する候補線分ベクトル・データに対して検証する。ここで、検証されなければ、さらに下位層の市街地地図データに対して実施され、最下位層の原画像データまで検証手続きは繰り返

し実行される。原画像データまでで仮説が検証されれば道路ネットワークは修正されるが、原画像データでも検証できなければその仮説は根拠がないとして捨てられ、検証手続きは終了する。そして、次の経験的知識、または他の事実・矛盾について仮説が生成され、検証手続きが繰り返される。

## 6. 実験システムの道路探索法

今までに述べた方法に基づいて実験システムを構成した。実験システムは文献 10), 11) で報告されている処理手続きを基本として、道路探索レベル、道路探索方向による道路ネットワーク精練過程の検証手続き、解釈・検証プロセスの追加・拡張として構成されている。この実験システムは画像データの処理を FORTRAN, ベクトル・データ, 記号データの処理を LISP で実装している。

実験システムでは種々の市街地地図データのうち、候補線分ベクトル・データと、平行線分対および交差点のベクトル・データを道路ネットワーク精練過程の検証手続きで用いた。したがって、道路探索法は以下のようなになる。

- 1) 延長方向, 平行線分対データ
- 2) 延長方向, 候補線分データ
- 3) 交差方向, 平行線分対データ
- 4) 交差方向, 候補線分データ

道路ネットワーク初期構築過程では 1) だけを、道路ネットワーク精練過程では 1) から 4) をその番号順に用いた。すなわち、1) で検証できなければ 2), 2) で検証できなければ 3), 3) で検証できなければ 4), 4) で検証できなければその仮説を偽とするパラダイムとなっている。

### 6.1 延長方向へ平行線分対データの道路探索

ある平行線分対が道路を構成していると識別できる時、平行線分対のうちその道路に接続する平行線分対を探索する。すなわち、平行線分対  $R_i$  に、他の平行線分対  $R_j$  を接続する条件は以下のようなのである。

【延長方向へ平行線分対接続の条件】

条件 1:  $R_i$  の重心  $G_i$  と  $R_j$  の重心  $G_j$  の距離

$$|G_i G_j| \leq d_0$$

条件 2:  $R_i$  の出口点  $Q_i$  と  $R_j$  の入口点  $P_j$  の距離

$$|Q_i P_j| \leq d_1$$

条件 3:  $R_i$  の中心線  $m_i$  と  $R_j$  の中心線  $m_j$  のなす角度

$$\theta \leq \theta_0$$

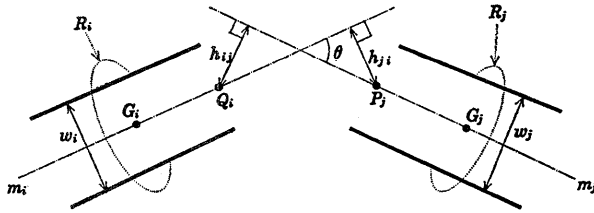


図 11 延長方向へ平行線分対接続  
Fig. 11 Connection of parallel line segments in successive direction.

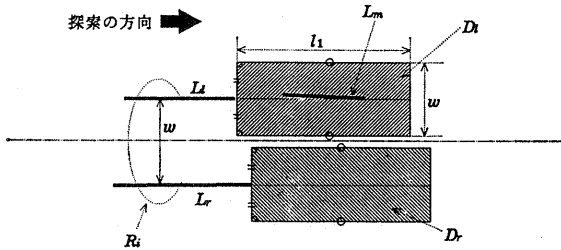


図 12 延長方向へ候補線分接続  
Fig. 12 Connection of candidate line segments in successive direction.

条件 4:  $R_i$  の  $Q_i$  から  $R_j$  の  $m_j$  に下した垂線の長さを  $h_{ij}$ ,  $R_j$  の  $P_j$  から  $R_i$  の  $m_i$  に下した垂線の長さを  $h_{ji}$  としたとき,

$$h_{ij} \leq h_0 \text{ または } h_{ji} \leq h_0$$

条件 5:  $R_i$  の幅  $w_i$  と  $R_j$  の幅  $w_j$  の変化

$$|w_i - w_j| \leq d_w w_0$$

ここで,  $d_0, d_1, \theta_0, h_0, d_w w_0$  は定数である。これらの条件を満たす平行線分対のうちで, その  $P_j$  と  $R_i$  の  $Q_i$  の距離が最小のものを  $R_j$  とする。この関係を図 11 に示す。

### 6.2 延長方向へ候補線分データの道路探索

ある平行線分対が道路を構成していると識別できるとき, 候補線分のうちでそれに接続する道路を構成するとみなせる候補線分を探索する。すなわち, 平行線分対  $R_i$  に候補線分  $L_m$  を接続する条件は以下のようなものである。

【延長方向へ候補線分接続の条件】

条件 1: 判定関数  $\text{in-domain}(L_m, L_r, D_r, \theta_1) \cup$

$\text{in-domain}(L_m, L_l, D_l, \theta_1)$  が真

条件 2:  $m = \min_k \{l_k \mid l_k = \text{distance}(L_k, R_i)\}$

$\theta_1$  は定数であり,  $k$  は条件 2 を満たす候補線分  $L$  の添字である。ここで,  $L_r$  と  $L_l$  はそれぞれ図 12 の  $R_i$  を矢印方向にみたとき,  $R_i$  の右側および左側の線分, また  $D_r$  と  $D_l$  はそれぞれ  $L_r$  と  $L_l$  から図 12

のように設定した領域である (図 12 の  $l_1$  は探索領域の長さを決める定数)。in-domain ( $L_m, L_l, D_l, \theta_1$ ) は  $L_m$  の中点が探索領域  $D_l$  内にあり, かつ  $L_l$  となす角が  $\theta_1$  以下の場合に真となり, distance ( $L_k, R_i$ ) は  $L_k$  の中点が  $D_x$  ( $x=r, l$ ) 内に存在する場合, その両端点と  $L_x$  の両端点のうちで, 最も近い端点間の距離を返す関数である。

候補線分が見つかった場合, 図 13 のようにそれを構成要素の一方とする架空の平行線分対を作成し, 接続する。平行線分対の作成手順は以下のようである。

- 1)  $L_m$  の両端点  $P, Q$  から, それぞれ図 13 のように  $R_i$  の幅  $w$  の長さを持った線分を  $L_m$  に垂直となるように引き, それぞれの先端を  $P', Q'$  とする。
- 2)  $P', Q'$  を両端点に持つ線分  $NL$  を作成する。
- 3)  $L_m$  と  $NL$  を構成線分とする平行線分対  $R'$  を作成する。

### 6.3 交差方向へ平行線分対データの道路探索

ある平行線分対が道路を構成していると識別できるとき, 平行線分対のうちでその道路と交差する道路を表す平行線分対を探索する。すなわち, 平行線分対  $R_i$  に他の平行線分対  $R_j$  を接続する条件は以下のようなものである。

【交差方向へ平行線分対接続の条件】

条件 1: 交差点角判定関数  $\text{have-one-corner}(R_i, R_j)$  が真

条件 2: 位置判定関数  $\text{consistent-side}(R_i, R_j)$  が真

条件 3:  $j = \min_k \{w_k \mid w_k \text{ は平行線分対 } R_k \text{ の幅}\}$

$k$  は条件 1, 2 を満たす平行線分対  $R$  の添字である。ここで,  $\text{have-one-corner}(R_i, R_j)$  は  $R_i$  を構成する 2 本の候補線分のうちの 1 本と,  $R_j$  を構成する 2 本の候補線分のうちの 1 本を用いて, 交差点角が構成さ

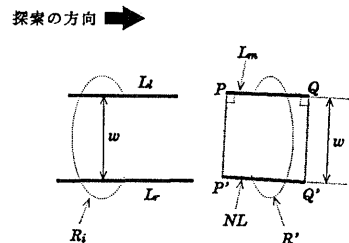
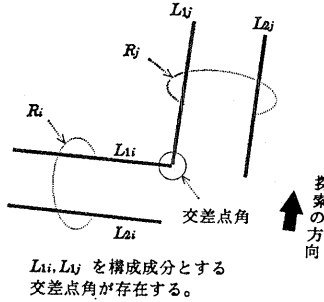


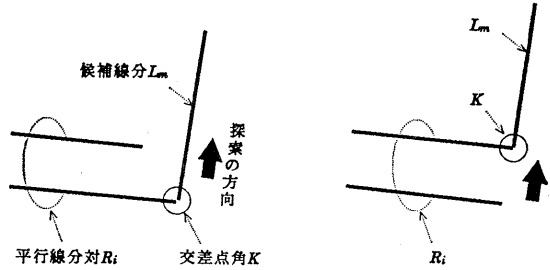
図 13 延長方向へ平行線分対の作成  
Fig. 13 Composition of parallel line segments in successive direction.





$L_{Li}, L_{Lj}$  を構成成分とする  
交差点角が存在する。

図 14 関数 have-one-corner  
Fig. 14 have-one-corner.



(a) 真となる場合 (a) "true" case  
(b) 偽となる場合 (b) "false" case

図 17 関数 consistent-side-corner  
Fig. 17 consistent-side-corner.

れる場合に真となる関数である (図 14 参照). また,  $\text{consistent-side}(R_i, R_j)$  は  $R_j$  の  $G_j$  が  $R_i$ , および  $R_i$  と  $R_j$  の構成線分から構成される交差点角に関して, 図 15(a) のような位置関係にある場合に真となり, 図 15(b) のような場合に偽となる関数である.

6.4 交差方向へ候補線分データの道路探索

ある平行線分対が道路を構成していると識別できる  
とき, 候補線分のうちでそれを交差する道路を構成す

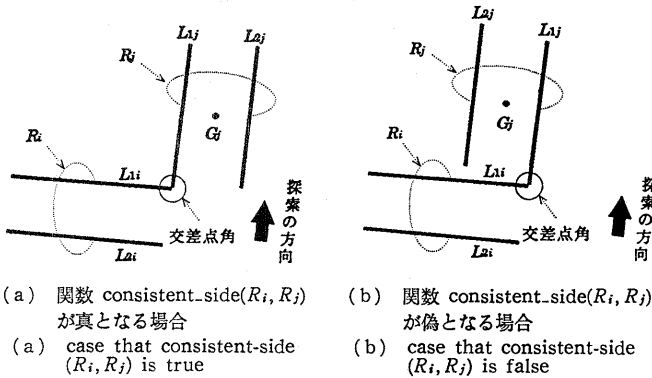
るとみなせる候補線分を探索する. ある平行線分対  
と交差する道路を構成する候補線分の存在可能性は  
図 16(a)から(c)を想定できるが, 現実システム  
では(c)のみを処理する (以下の条件2はこの制約に  
該当する). 図 16(a)の場合, 新たに作成する平行  
線分対の幅の情報を決定する要素が存在せず, また  
図 16(b)の場合, 候補線分と平行線分対を結び付け  
る交差点角などの特徴成分が存在しないために, いず

れも図 16(c)に比べて探索が困難であ  
る. 平行線分対  $R_i$  に, 候補線分  $L_m$   
を探索する条件は以下のようなのである.

【交差方向へ候補線分接続の条件】

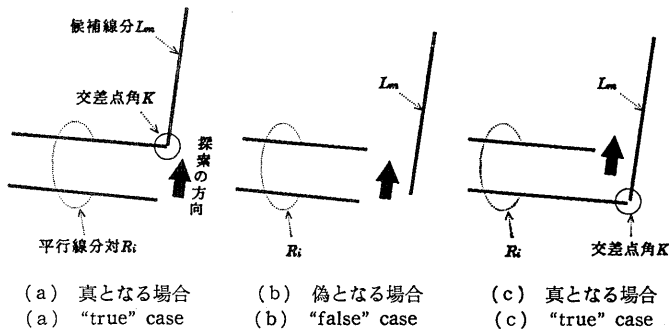
- 条件 1: 交差点角判定関数  $\text{consistent-one-corner}(L_m, R_i)$  が真
- 条件 2: 位置判定関数  $\text{consistent-side-corner}(L_m, R_i)$  が真
- 条件 3: 幅判定関数  $\text{respect-width}(L_m, R_i, \alpha_1)$  が真

$\alpha_1$  は定数である. ここで,  $\text{consistent-one-corner}(L_m, R_i)$  は  $R_i$  を構成する  
候補線分のうちのどちらか一方と,  $L_m$   
が交差点角を構成する場合に真となる関  
数である. また,  $\text{consistent-side-corner}(L_m, R_i)$  は  $R_i$  を構成する候補線分のう  
ちのどちらか一方と,  $L_m$  から構成され  
る交差点角  $K$  が,  $R_i$  に対して図 17(a)  
の位置関係にある場合に真となり, 図  
17(b) の場合に偽となる関数である.  
さらに,  $\text{respect-width}(L_m, R_i, \alpha_1)$  は図  
18 において  $R_i$  の幅  $w$  としたとき, 幅  
 $d$  が  $d \geq \alpha_1 \cdot w$  のとき真となる関数で  
ある.



(a) 関数  $\text{consistent\_side}(R_i, R_j)$   
が真となる場合 (a) case that  $\text{consistent\_side}(R_i, R_j)$  is true  
(b) 関数  $\text{consistent\_side}(R_i, R_j)$   
が偽となる場合 (b) case that  $\text{consistent\_side}(R_i, R_j)$  is false

図 15 関数 consistent-side  
Fig. 15 consistent-side.



(a) 真となる場合 (a) "true" case  
(b) 偽となる場合 (b) "false" case  
(c) 真となる場合 (c) "true" case

図 16 関数 consistent-one-corner  
Fig. 16 consistent-one-corner

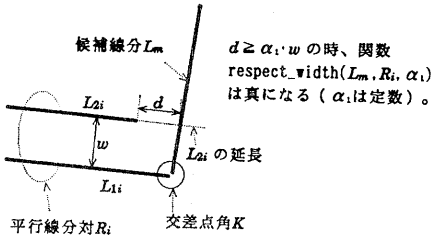


図 18 関数 respect-width  
 Fig. 18 respect-width.

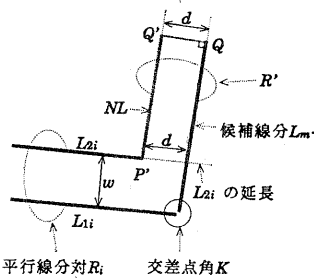


図 19 交差方向へ平行線分対の作成  
 Fig. 19 Composition of parallel line segments in crossroad direction.

候補線分が見つかった場合、図 19 のようにそれを構成要素の一方とする架空の平行線分対を作成し、接続する。平行線分対の作成手順は次のようである。

- 1)  $L_m$  の先端  $Q$  から、 $d$  の長さを持った線分を  $L_m$  に垂直になるように引き、その先端を  $Q'$  とする。
- 2)  $L_{2i}$  の先端  $P'$  と、1) で求めた  $Q'$  を両端点に持つ線分  $NL$  を作成する。
- 3)  $L_m$  と  $NL$  を構成線分とする平行線分対  $R'$  を作成する。

## 7. 実験および考察

実験システムを用いて市街地地図から道路情報を抽出した。市販の 1/10,000 市街地地図をドラム・スキャナで 10 dots/mm, 256 レベルで標本化した後、2 値化処理した 500×500 画素の画像である。以後、これを原画像データと呼ぶ。ここで、道路情報の抽出に用いたしきい値はそれぞれ実験的に  $d_0=100$ ,  $d_1=100$ ,  $\theta_0=45$ ,  $h_0=8$ ,  $dw_0=7$ ,  $\theta_1=15$ ,  $l_1=100$ ,  $\alpha_1=0.6$  と定めた。

### 7.1 実験 1

図 20 の原画像データに対する処理結果を示す。図 21

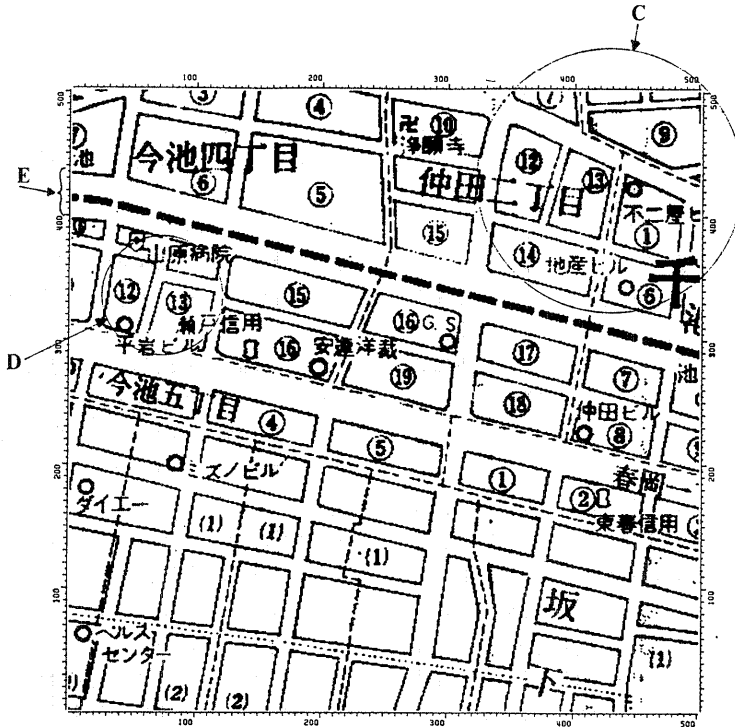


図 20 原画像データ 1  
 Fig. 20 Example No. 1.



図 21 道路ネットワークの初期構築過程の結果  
Fig. 21 Result in initial composition of road network.

が道路ネットワーク初期構築過程で道路ネットワークを構成した結果である。一部抽出されていない道路 (Aに対応) や、同定されていない交差点 (Bに対応) がある。一方、図 22 は道路ネットワーク精練過程で修正された道路ネットワークである。A, Bに対応する道路、交差点が認識されている。しかし、図 20 における C, D, E などが認識されていない。C, D では文字などの影響により、道路ネットワークの構築基準となる候補線分、平行線分対、交差点が十分に抽出できなかったためである。一方、Eでは地下鉄を表す線分が道路の一方の構成線分として誤抽出されている。

## 7.2 実験 2

図 23 の原画像データに対する処理結果を示す。図 20 に比べると、曲線形状の道路がかなり観察される。道路ネットワーク初期構築過程で抽出された道路ネットワークを図 24 に示す。一部抽出されていない道路 (Aに対応)、同定されていない交差点 (Bに対応) が存在する。次に、道路ネットワーク精練過程で再構成した道路ネットワークを図 25 に示す。この実験においても、道路情報が完全には抽出されていない。しかし、曲線形状があっても、有効であることが明らかで

ある。

図 23 の C, D, E では文字などによるノイズや、細線化、折れ線近似による歪みのために候補線分が抽出されず、その結果交差点や平行線分対が得られていない。また、図 25 の F では原画像データに道路が存在しないにもかかわらず、誤って道路が抽出されている。これは、町境の線分が候補線分として抽出され、道路探索時にそれが道路の構成線分とみなされたためである。

## 7.3 解釈・検証プロセスの繰返し処理とその効果

実験 2 に対して、道路ネットワーク精練過程の中間結果を検討する。図 24 から第 1 回目の解釈・検証サイクルが終了した時点の結果を図 26 に示す。図 24 と比較すると、A, Bなどが正しく認識されている。図 26 の C, D, E に対して、解釈・検証サイクルが働いた結果が図 27 である。C, D, E などが正しく認識されている。しかし、まだ不十分な箇所があり、解釈・検証サイクルが実行される (図 28 参照)。本処理例では最終的に 4 回の解釈・検証サイクルが実行された。すなわち、第 5 回目の解釈・検証サイクルで終了条件「経験的知識に該当する要素が道路ネットワークに存在しないか、または道路ネットワークが変化しな



図 22 道路ネットワーク精練過程の結果  
Fig. 22 Result in refinement of road network.

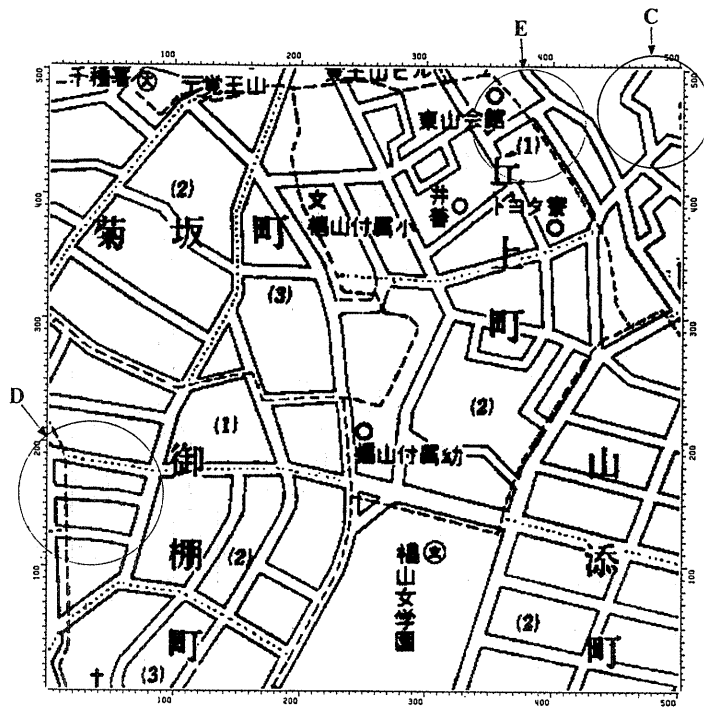


図 23 原画像データ 2  
Fig. 23 Example No. 2.

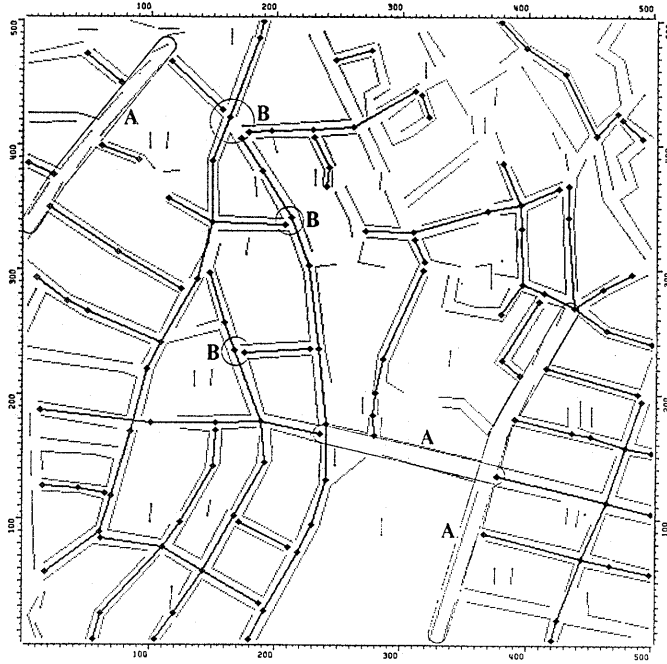


図 24 道路ネットワークの初期構築過程の結果  
Fig. 24 Result in initial composition of road network.

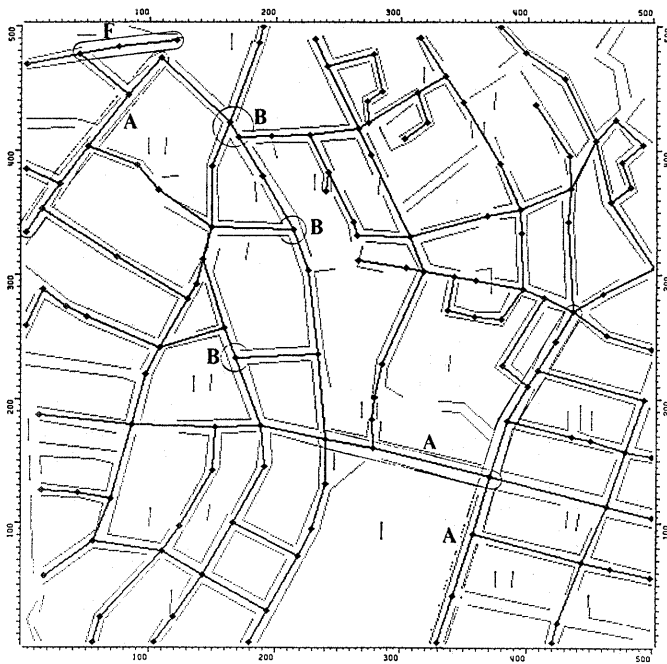


図 25 道路ネットワーク精練過程の結果  
Fig. 25 Result in refinement of road network.

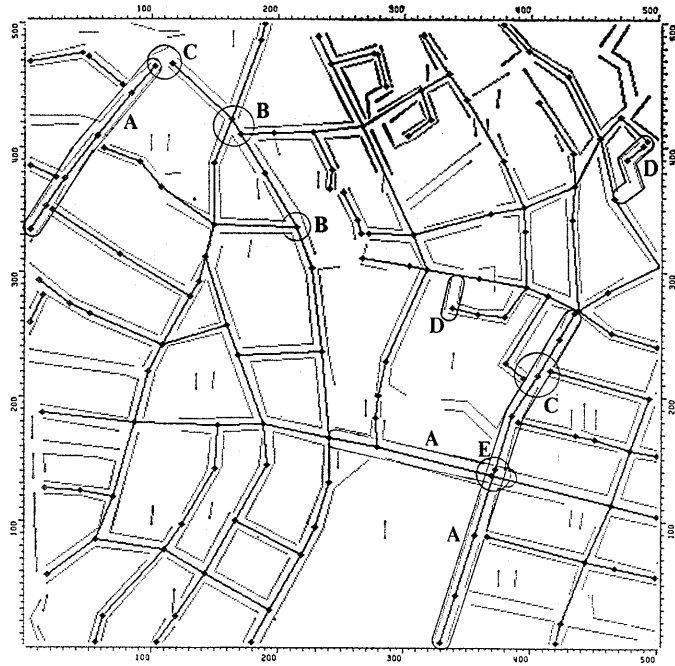


図 26 第1回目の解釈・検証サイクルの結果  
Fig. 26 Extracted result in the first cycle.

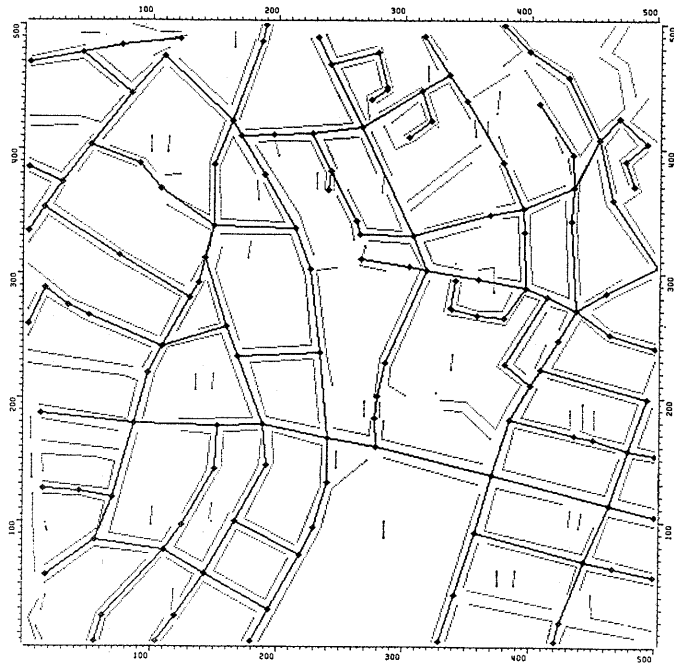


図 27 第2回目の解釈・検証サイクルの結果  
Fig. 27 Extracted result in the second cycle.

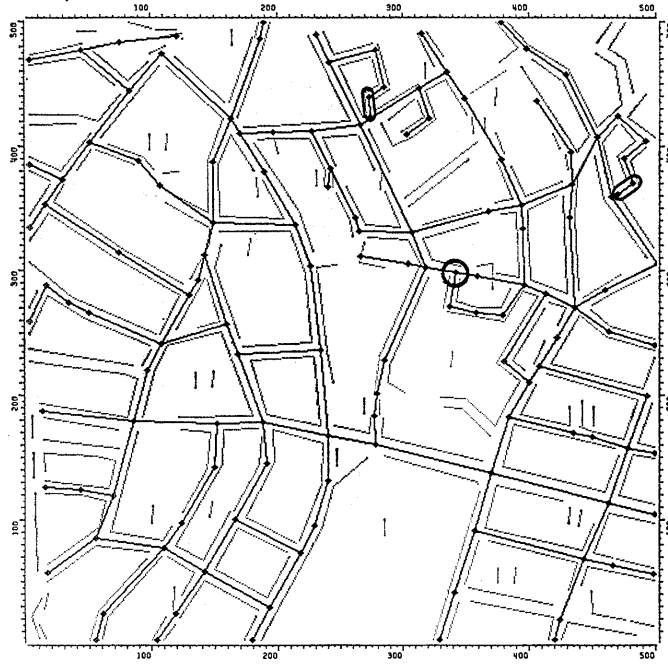


図 28 第 3 回目の解釈・検証サイクルの結果  
 Fig. 28 Extracted result in the third cycle.



図 29 文献 11) における原画像データ 1 の最終結果  
 Fig. 29 Final result for example No. 1 in Ref. 11).

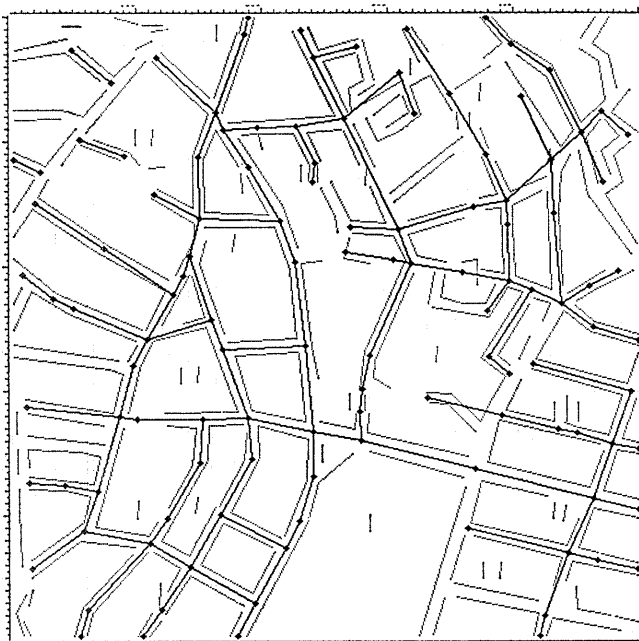


図 30 文献 11) における原画像データ 2 の最終結果  
Fig. 30 Final result for example No. 2 in Ref. 11).

い」が満たされ、終了した。したがって、第 4 回目の結果が図 25 である。

このように、解釈・検証サイクルを繰り返すことにより順次道路ネットワークを精練でき、本アプローチの有効性を十分に確認できた。例えば、文献 11) で報告された処理結果を図 29、図 30 に引用した。図 29、図 30 は実験 1、実験 2 の原画像データから道路ネットワークを構築し、続いてそれを経験的知識の下に修正・補完するという逐次アプローチで生成されている。本アプローチのように解釈・検証サイクルを繰り返し実行するのではなく、また道路探索も延長方向、平行線分対データのみであり、相互連携制御は実装されていない\*。

図 29 と図 22、図 30 と図 25 を比較すると、図 22 と図 25 がかなり正確に道路情報を抽出している。特に、図 25 の場合、本アプローチの効果が明確になっている。曲線形状を含む道路では、平行線分対を道路ネットワーク初期構築過程で正確に抽出することが困難であり、候補線分まで検証することにより、また他の解釈・検証サイクルで得られた結果を用いてさらに検証することにより、より精度の高い結果を得ること

\* 厳密には、本実験システムでは処理アルゴリズム、経験的知識なども多少変更した。

ができる。

## 8. おわりに

処理結果と処理対象を比較・検証することにより、処理結果を精練する場合、ある知識に基づいて精練した結果がさらに別の知識の該当要素を生み出すことがあるという性質を利用し、知識に該当する要素が処理結果に存在しなくなるまで繰り返し解釈・検証プロセスを実行することは、正確な処理結果を得るために有効な方法である。文献 14) では、これをさらに発展させた制約依存による処理法を提案している。本アプローチも経験的知識に基づいて道路ネットワークを解釈・検証し、道路が存在する可能性がある場合検証処理を呼び出して道路ネットワークを再構築する。そして、ある経験的知識を適用した結果道路ネットワークを再構築できる場合に、その再構築された処理結果を処理対象として再び解釈・検証プロセスに反映させている。実験システムでも、この方法の有効性を確認できた。

今後の課題として、道路ネットワーク初期構築過程および道路ネットワーク精練過程の十分性に関する検討が必要である。すなわち、今回報告した方法の場合、道路ネットワーク初期構築過程は道路の制約条件



に基づいて交差点と平行線分対から道路ネットワークを構築し、道路ネットワーク精練過程では経過的知識の下に数種類の道路探索法を選択的に用いて道路ネットワークを検証したが、その際の道路の制約条件、道路探索法、経験的知識、さらに道路ネットワーク初期構築および道路ネットワーク精練の手順が十分であるか否かを検討する必要がある。

**謝辞** 日頃よりご指導いただいている名古屋大学工学部・稲垣康善教授、鳥脇純一郎教授、ならびに中京大学情報科学部長・福村晃夫教授に深謝します。また、熱心に討論していただいた野岸新生君をはじめ、研究室の皆様、およびいろいろと配慮いただく杉野花津江氏に感謝します。さらに、有益なご指摘をいただいた査読者に感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) 山川修三: コンピュータマッピング, 情報処理, Vol. 29, No. 10, pp. 1155-1159 (1988).
- 2) Tombre, K.: Technical Drawing Recognition and Understanding: From Pixels to Semantics, *Proc. of MVA '92*, pp. 393-402 (1992).
- 3) 志久 修, 姉川正紀, 中村千秋, 中村 彰: 地図からの文字の切り出し, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 2, pp. 273-280 (1993).
- 4) 宮武考文, 松島 整, 江尻正員: 平行線抽出手法を用いた地図からの道路情報自動抽出, 信学論(D), Vol. J68-D, No. 2, pp. 153-160 (1985).
- 5) 中嶋正之, 安居院猛, 飯塚久登: 市街地地図に対するパラレル・ベクトル・トレーサを用いたグラフ構造解析, 信学論(D), Vol. J67-D, No. 12, pp. 1419-1426 (1984).
- 6) 長尾智晴, 安居院猛, 中嶋正之: 地図画像からの道路網ベクトル抽出手法, 信学技報, PRU 87-35 (1987).
- 7) 後藤治隆, 吉田雄二, 福村晃夫: 略図にもとづく市街地地図からの道路網の抽出, 信学技報, PRU 87-6 (1987).
- 8) Ilg, H. and Dgniewicz, R.: Knowledge-based Interpretation of Road Maps, Based on Symmetrical Skeltons, *Proc. of MVA '90*, pp. 161-164 (1990).
- 9) 金 旭炫, 平井有三, 古川 卓, 有田秀昶: 空間フィルタによる地図画像からの道路セグメントの抽出, 信学論(D-II), Vol. J76-D-II, No. 3, pp. 566-574 (1993).
- 10) Hayakawa, T., Watanabe, T., Yoshida, Y. and Kawaguchi, K.: Recognition of Roads in an Urban Map by Using the Topological Road-network, *Proc. of MVA '90*, pp. 215-218

(1990).

- 11) 早川卓哉, 渡辺豊英, 吉田雄二, 川口邦雄: 市街地地図からの道路ネットワーク情報の抽出, 信学論(D-II), Vol. J74-D-II, No. 6, pp. 757-765 (1991).
- 12) Hayakawa, T., Watanabe, T. and Sugie, N.: A Cooperatively Integrated Approach for Road Extraction of Urban Maps Based on Bottom-up and Top-down Methods, 第43回情報処理学会全国大会論文集, 2, pp. 325-326 (1991).
- 13) Watanabe, T., Hayakawa, T. and Sugie, N.: A Cooperative Integration Approach of Bottom-up and Top-down Methods for Road Extraction of Urban Maps, *Proc. of ICARCV '92 CV-21-6/1-5* (1992).
- 14) 美濃導彦, 池田克夫: 制約充足型画像処理, 信学技報, PRU 93-28 (1993).

(平成5年1月25日受付)

(平成5年10月14日採録)



早川 卓哉 (正会員)

昭和42年生。平成2年名古屋大学工学部情報工学科卒業。平成4年同大学院博士前期課程修了。同年、特許庁入庁。在学時代、地図認識の研究に従事。



渡辺 豊英 (正会員)

1948年生。1972年京都大学理学部修了。1974年同大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。1975年同博士課程中途退学。同年京都大学大型計算機センター助手。1987年名古屋大学工学部情報工学教室助教授。京都大学工学博士。統合化環境, 分散協調環境, データベース環境, データベースの高度インタフェース, 知的CAI, 文書理解, 地図理解に興味を持つ。電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, 人工知能学会, ACM, IEEE Computer Society, AAAI 各会員。



杉江 昇 (正会員)

昭和7年生。昭和32年名古屋大学工学部電気工学科卒業。電子技術総合研究所バイオニクス研究室長, 視覚情報研究室長を経て, 現在名古屋大学工学部情報工学科教授。視覚情報処理, 神経科学, 自然言語などの教育・研究に従事。工学博士。