私と高度交通システム

Intelligent Transport System and I

内村 圭一 Keiichi UCHIMURA

1. まえがき

交通事故や渋滞、環境などの様々な課題を解決するための手段として、人と道路、自動車の間で情報のやり取りを行う高度交通システム(ITS: Intelligent Transport System)が考えられている。ITS研究の成果として、人間の代わりに機械が自動車の運転操作を行う自動運転の実用化が間近に迫っている。また、一般人が自家用車で有償送迎を行う配車サービスも世界的規模で拡大しつつある。本稿では、筆者が30年来携わってきたこれらのITSに関する研究について振り返る。

2. デジタル道路地図の利用

2.1 地形図を用いたデジタル道路地図の作成

1990年にマツダ株式会社から2ドアクーペのユーノスコスモが発売され、それには世界初のGPSカーナビゲーションが搭載されていた。このGPSカーナビゲーションに触発され、デジタル道路地図関係の研究を本格的に開始した。その当時、研究のために自由に使えるデジタル道路地図は筑波地区以外ではほとんど存在せず、先々のデジタル道路地図の利用を考えて熊本地区のデジタル道路地図を作ることとした。国土地理院発行の縮尺1/25,000地形図を購入して、ディジタイザを用いてノードとしての交差点、通過点、終了点、並びに境界点の位置座標を手入力した。ノードには、接続しているノード番号、接続しているノードとの間の道路の種類・幅、接続しているノードとの間の道路の名称、及び接続しているノードとの間の道路が一方通行か否かの区別の情報を与えた。こうして道路ネットワークをデータベース化した道路地図を作成した⁽¹⁾。

表1 巡回経路の探索時間(分)

巡回点数	凸法を用いた 提案手法	悉皆法	グリーディ法
10	0.5	300.0	30.0
20	2.0	N/A	120.0

ノード数: 229

2.2 経路探索

次にデジタル道路地図の利用法を検討した。郵便配達や宅配の配達経路は日々変化するものであり、経路の準最適解を地図上で実時間に探索することは実用上有用であると考え、人間の直感に基づいた凸包の利用による巡回経路探索に取り組んだ⁽²⁾。当時のパーソナルコンピュータのベストセラーであったPC-9801 VMを用いた計算時間は表1のとおりである。ノード229個中の20地点を巡回した計算時間は2分ほどであった。1995年横浜市で秋篠宮文仁親王殿下御臨席の下に第2回ITS世界会議が開催され、ITSに関する研究が盛り上がる中、作成したデジタル道路地図を用いた巡回経路探索について発表した⁽³⁾。

2.3 Dial-a-Ride

その後、シアトル市で開催されたIEEE's 6th International Conference on Vehicular Navigation and Information Systemsにおいて巡回経路探索についての新しいアルゴリズムを発表した⁽⁴⁾。この国際会議に参加されていたシアトル市役所の研究者と意気投合し階層的公共交通管理システムへのDial-a-Ride^(注1)の応用についての共同研究を開始した。図1に示す3層から成る階層的なバスサービスシステムの最下層において、電話でバスステーションへサービス依頼し、コミュニティ内ならどこでも乗降可能とする相乗り式のバスシステムを構築するものである。いわゆるバスサービスへDial-a-Rideを採用したシステムである。これは巡回点に順序関係の制約があるルーチング・スケジューリング問題となり、NP困難問題であるために厳密解よりも実時間処理による解が求められる。この解決策として、1990年代に確率的探索の

(注1): 乗客が希望の乗車時刻及び乗降地を電話にて予約することで送迎してくれるシステム。

内村圭一 正員: シニア会員 熊本大学 名誉教授
E-mail uchimura@cs.kumamoto-u.ac.jp
Keiichi UCHIMURA, Senior Member (Professor Emeritus, Kumamoto University, Kumamoto-shi, 860-8555 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.11 No.4 pp.225-234 2018年4月
©電子情報通信学会 2018

図1 階層的バスサービスシステム

表2 Dial-a-Ride研究の年表

探索手法	バスの配備台数／バスの発車形態	デジタル地図／渋滞情報の利用	論文
GA	1／定期	熊本市内／なし	(6)
GA	複数台／定期	ユークリッド平面／なし	(7)
GA + 2-opt 法	複数台／定期	シアトル市バラード地区／なし	(8)
GA	複数台／不定期	シアトル市バラード地区／なし	(9)
GA	複数台／不定期	シアトル市バラード地区／なし 途中乗車の許容	(10)
GA + ノード挿入法	複数台／不定期	さいたま市浦和駅西部地域／あり	(11)

制約条件：バス定員15名
乗車依頼から30分以内に目的地へ到着

一手法として一世を風靡していた遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithms) ⁽⁵⁾ を主に採用した。この研究は表2に示すように10年ほど続いた。サービスエリアとバス運行コスト(バスの総走行距離、バスの発車回数、バスの配備台数)との最適化法についても検討した⁽¹²⁾。

2.4 宅配問題

2011年から宅配問題に対処するために最適な配送経路を立案する配車計画支援システムの研究を開始した。ネット通販などの利用拡大による宅配の需要増加に伴い、トラック輸送業界では労働力不足が著しく、これに対応する方法の一つとして物流の効率化、つまり配送経路計画の最適化が求められるようになった。最適な配送経路を導出するための基礎研究として、時間枠制約付き配送経路問題 (VRPTW : Vehicle Routing Problem with Time Window) を取り扱い、VRPTWに対してセービング法と分枝限定法を組み合わせた発見的解法を提案し、Solomonベンチマーク^(注2)を用いた実験により得られた結果と比較して提案手法の有効性を検討した。結果を表3に示す。また、提案手法によって導出されたルートの一例を図2に示す。表3から、総走行距離並びに使用車両台数ともベンチマークと同一性能が得られたが、劣る場合もあった⁽¹³⁾。

(注2)：顧客数25, 50, 100に対する配送経路問題の標準ベンチマーク。

表3 ベンチマークと提案手法との総走行距離及び車両台数の比較

顧客分布	ベンチマーク		提案手法	
	総走行距離	車両台数(台)	総走行距離	車両台数(台)
C101	828.94	10	828.94	10
C201	591.56	3	591.56	3
R101	1645.8	19	1672.31	21
R208	726.75	2	747.98	5

図2 提案手法によって導出されたルートの一例

3. 画像処理によるデジタル道路地図の作成

3.1 円形道路標識の抽出と認識

一方、1996年にはデジタル道路地図には道路標識の表示も必要であると考え、デジタル道路地図を用いた経路探索問題と平行して、それまで研究していた画像処理・パターン認識を用いて、道路標識の抽出・認識に関する研究を開始した。屋間の画像において、困難なしきい値設定を行うことなしに色変換する限定色表示によって、円形道路標識の候補領域を抽出した上で、GAをクラスタリングに組み込み、異なる種類の円形道路標識を一度に抽出する同時抽出法を提案した^{(14), (15)}。図3に限定色表示を用いた円形道路標識の同時抽出結果を示す。

図3 限定色表示を用いた円形道路標識の同時抽出結果

(a) 道路中心点の緯度・経度推定結果

(b) 道路中心点の高度推定結果

図4 道路中心点の緯度、経度及び高度の推定結果

3.2 三次元デジタル道路地図

1990年代のカーナビゲーション用デジタル道路地図は緯度・経度のみの二次元道路地図であった。今後、デジタル道路地図はカーナビゲーションだけではなく、自動運転にも使用されると考え、緯度や経度に高度情報を追加したより高度な三次元デジタル道路地図の作成を開始したのは1999年頃からであった。走行車両にカメラ、D-GPS^(注3)及び三軸ジャイロを搭載して得た画像情報と位置情報を統合することで、三次元デジタル道路地図を作成した。その結果を図4に示す。数回の走行実験の結果は類似傾向を示しているが、D-GPSの精度が誤差数mであるため、特に高度情報にはばらつきがでている⁽¹⁶⁾。この頃から北九州の地図作りの会社と共同研究を開始した。

3.3 道路方面看板の位置推定と認識

2000年にはカーナビゲーションシステムの高度化のため

(注3)：既知点と未知点とで同時に単独測位を行い、既知点での既知座標と測定座標との差(Differential)によって、未知点での測定座標を補正して位置決定を行うGPS。

図5 道路方面看板の位置推定結果

に、道路方面看板の設置位置を推定し、かつ表示内容を認識して、これらをデジタル道路地図上に表示する研究を開始した。当時は道路方面看板の設置位置は公開されておらず、実際に現場を訪れて調査する必要があった。

車載カメラにより撮影した道路情景画像から道路方面看板の抽出、及び車載D-GPSにより得られるカメラの方向と位置情報を用いた看板設置位置の推定を行って、カーナビゲーション用デジタル道路地図に看板情報を取り込むというものである。道路方面看板の抽出に関しては、カメラで撮影されたRGB画像は、カメラと太陽の相対的な位置関係や天候などに影響されて、本来同色のものが異なる色として認識されてしまう。本研究では、撮影条件の変化に影響されにくいHSV変換を用いて特定色領域を作成し、それに対して看板の形状情報を用いた抽出を行った。次に、道路方面看板の位置推定に関しては、単一画像から位置を求める方法として、看板のサイズや道路面からの高さなどのパラメータを既知とするものがある。しかしながら、看板は表記内容によりサイズが異なり、道路面からの高さも規定とずれている可能性がある。本研究では、そのようなパラメータを既知とせず、複数画像における看板領域の挙動により位置を求めることで、多様な看板に対応できるようにした。すなわち、カメラと看板との相対的位置関係から看板の地図上の設置位置を求めるために、D-GPSにより得られるカメラの方向及び位置情報を用いた。推定した看板位置をデジタル道路地図上にプロットした結果を図5に四角形グレーで示す。図中の円は看板位置の真値(四角形黒)から半径5mの円を示している⁽¹⁷⁾。真値よりも数m離れた位置を推定してしまった原因は、みなし真値自体の誤差やD-GPSの精度などが考えられる。

3.4 高解像度処理による交差点名標識の認識

低解像度の車載カメラで撮影した画像を用いる交差点名標識認識では認識率が低くなる場合がある。この課題に対して、1枚の撮影画像を用いて高解像度画像の生成が可能である学習型1フレーム超解像によって文字の認識精度の向上を図った⁽¹⁸⁾。一例として、交差点名標識上の「詩」における超解像処理結果を図6に示す。復元精度の向上が見られ、認識結果は正しいものとなった。

(a) 入力画像

(b) 処理結果

図6 超解像処理による交差点名標識の認識

3.5 航空画像を用いたデジタル道路地図

2003年頃には航空画像から道路部分を抽出して道路のネットワークを構築する研究を始めた。従来の手入力での地図作成では、縮尺1/25,000の地図をトレースする際には標準偏差で約17.5 mの誤差を含み、また、多くの作業量により、計測誤差や人的誤差の蓄積を伴う。これでは高精度の道路形状データ、多量の情報量、及び新鮮なデータ取得が見込めないため、航空画像を画像解析することでデジタル道路地図の作成を試みた。

(1) 航空画像のみからの道路抽出⁽¹⁹⁾：

まず、航空画像を道路、建物、畑や水域などに領域分割する。これには、あらかじめサンプリングしていた対象物の画素値の分布から、各画素を分類する教師あり分類を用いた。次に、エッジを用いない領域ベースの道路抽出法及びトップダウン型に近いモデルベースでの道路抽出法を提案した。すなわち、(a)道路網は交差点を結ぶことにより構築可能であることに着目し、交差点形状モデルを考えて、これを画像にマッチングさせて交差点を検出する。(b)検出した交差点同士を道路トラッキング法で連結する。(c)道路形状はリボン状のSnakes^(注4)を用いて抽出する。従来のSnakesはエッジ勾配によって駆動する手法であったが、本研究ではSnakes内に道路領域の画素を多く含むように駆動する領域ベースのSnakesを用いた。図7(a)及び図8(a)に示す入力画像に対して本手法により道路網(幅情報を含む)を構築した結果をそれぞれ図7(b)及び図8(b)に示す。それぞれ農地及び住宅街のエリアであり、空間分解能が50 cm/pixelのサイズ1,000 × 1,000のRGB画像である。このとき住宅街で8割程度の道路を正しく抽出できた。また、そのときの位置精度はRMSで0.8 m程度であった。

(2) 既存の地図を利用した道路更新⁽²⁰⁾：

既に数値道路地図が存在する場合には、これと実際の画像中の道路は同じような形状を持つという知見の下に、数値地図の形状を極力保ったままに道路輪郭モデルの変形を行い、精度の良い道路地図の作成を図った。まず、与えられた形状を保ったまま変形可能なActive Shape Models (ASM)を用いて、既存の道路地図データを航空地図にマッチングする方法を提案した。次に、ASMをネットワーク状に拡張することで、各道路が隣接する道路に影響されながら、徐々に変形できるネットワーク形ASMを提案した。ネットワーク形ASMによる更新システムの概要を図9に示す。図10(a)及び同図(b)はそれぞれ航空画像と既存の数値道路地図及び航

(注4)：M. Kassらによって提案された、画像の輪郭を抽出する画像処理手法。

空画像と提案手法による更新結果の一例である。結果として、提案手法は数値道路地図を航空画像上の道路に非常によく一致させることができた。また、定量的な評価を縮尺1/2,500の数値道路地図との比較により行った結果、約5～10 mのRMS誤差を持つ既存の縮尺1/25,000の数値道路地図を約2～3 mのRMS誤差まで低減させることができた。

(a) 入力画像

(b) 抽出結果

図7 航空画像のみからの道路抽出(農地)

(a) 入力画像

(b) 抽出結果

図8 航空画像のみからの道路抽出(住宅街)

図9 ネットワーク形ASMによる道路更新システム

(a) 更新前

(b) 更新後

図10 ネットワーク形ASMによる道路更新結果

図 11 三次元デジタル道路地図の作成手順

(a) RGB 航空画像

(b) DSM 画像

(c) 道路候補領域の抽出結果

図 12 標高データを用いた道路候補領域の抽出

(3) 数値表層モデル (DSM: Digital Surface Model) に基づく三次元デジタル道路地図^{(21), (22)} :

三次元デジタル道路地図は自動運転のみならずカーナビゲーションによる道路勾配を考慮した最適ルート検索、道路勾配に即した車両制御やエネルギー損の減少によるCO₂の削減に有用性がある。作成手順を図11に示す。標高データであるDSMデータを用いて道路候補領域を抽出する。ただし、単純に標高データのみだけでは、道路と同じく平坦なグラウンドや線路、あるいは建物の屋上を検出する恐れがある。そこで、標高データとRGB画像を併用することで、これらの領域を除外する。図12に本手法により抽出した道路候補領域を示す。同図(a)がRGB航空画像で、同図(b)がDSM画像である。同図(b)において、白い階調ほど高度が高いこ

図 13 標高データを付与した三次元デジタル道路地図

とを示している。RGB航空画像のみでは道路領域の特定は困難であることが分かる。一方、同図(c)では標高データを用いることで、正しく道路候補領域を抽出できている。道路候補領域を抽出することができれば、前述の交差点モデルによる方法で道路網の構築が可能である。こうして構築した道路網データにDSMの標高データを付与してできた三次元デジタル道路地図を図13に示す。道路には高架線や建物の下を通るものなど、DSMデータ上では道路の高さが取得できない箇所が存在する。これに対して、道路ノードの前後関係を参照することによって補間した。同図に、補間箇所を朱線で描いている。

3.6 簡易デジタル地図の作成

デジタル地図はカーナビゲーションシステムやインターネット上での地図情報サービスなど様々な状況で用いられるようになった。これらのデジタル地図では用途によって異なる尺度や異なる表示方法の地図が必要となる。これに対して様々な地図データを自動作成する技術が研究されている。例えば、現在地と目的地の位置関係を把握しやすいような地図の自動作成を行うシステム、表示画面が小さいモバイル装置などで表示できるようなデフォルメマップ作成技術、道路ネットワークを標本化・量子化することにより地図を見やすくする技術、また広告などに用いられる道路案内地図の自動作成技術など様々な技術が挙げられる。これらの研究のほとんどは同一の縮尺で用いることを前提として地図データの簡略化が行われている。2006年から行った研究は、これらの研究とは異なり、縮尺が異なる地図について、特にカーナビゲーションなどで用いられる簡略地図の作成を行う手法を提案している⁽²³⁾。縮尺が異なる地図は、元となる詳細な地図データを測量等で作成し、その詳細なデータからデータの間引き等の処理を施して作成されるのが一般的であり、これらの縮尺が異なる地図データの作成は処理時間や精度の問題から手作業で行われている。研究では人的コストや時間的コストの低減のため、詳細地図から一般的な広域簡略化地図の自動作成を行った。具体的には、以下の3段階の処理を行った。

(a) ポリゴンデータのラインデータ化 :

制約付きドローネー三角形分割⁽²⁴⁾を用いてポリゴンデー

(a) 商用の1/25,000地図データ

(b) 作成した1/200,000地図データ

(c) 商用の1/200,000地図データ

図14 作成データと商用地図データとの比較

タを三角形に分割する。次に、三角形の各辺の中点をラインデータの候補点とし、それらを結ぶことによってラインデータを求める。

(b) 構成点間引き：

ポリゴンデータやラインデータは全て点情報の集合で構成されている。詳細地図では多くの点情報の集合で構成されるために、広域地図では点情報を削減し簡略化された形状で表現する。このために、再帰形折線化による間引き、及び点情

報の量子化を行う。

(c) ポリゴンデータの削除：

デジタル地図では広域地図になるにつれ、あるしきい値以下の建物や池などのポリゴンデータは不要となる。そのしきい値基準として各ポリゴンの面積を用い、しきい値以下の面積を持つ対象物を削除することで広域簡略化地図の作成を行う。

処理結果の一部を図14に示す。図同(a)は縮尺1/25,000の商用地図データ、同図(b)は同図(a)に対して提案する簡略化地図作成手法を適用し、縮尺1/200,000の地図データに相当するデータを作成したもの、同図(c)は同図(a)を基に人手を加えて作成された縮尺1/200,000の商用地図データである。図14の、提案手法により作成した同図(b)と人手により作成された商用地図同図(c)から、各処理のしきい値によるラインデータ化処理や削除処理の対象のデータに違いはあるものの、形状的に大きく差異のない地図データの作成を行えたことが分かる。なお、処理水域全域41,864 km²に対して、4,936,079 ms (約80分)の処理時間でデータ量を元データの約52%に削減できた。使用した計算機の性能はCPU Celeron 2.4 GHz、メモリ512 MByteである。

4. 道路環境の認識

1996年には、道路標識抽出・認識に関する研究と時を同じに、ドライバーの安全性を確保するために重要な研究分野の一つである道路環境の認識に関する研究を開始した。

4.1 自律走行についての基礎技術

車載カメラを使った車両前方道路領域の認識や走行レーンの認識は、自律走行制御、障害物認識、並びに自車の危険度判断などに必要な基盤技術となる。これに関して、人間の運転感覚、視認距離及び減速区間を考慮した、前方道路の平面線形を直線、カーブ、カーブインとカーブアウトの四つのモデルに分類する道路平面線形モデルの構築法を提案した⁽²⁵⁾。

車載カメラから撮られた時系列道路情景画像の処理によるカメラの姿勢や運動パラメータの推定は、安定的な車線追跡や走行環境の総理解などにおいて重要である。これに対して、車載カメラは車体に固定されるという運動特徴に着目し、拡張焦点 (Focus of Expansion) の概念を導入した新しい車載カメラの三次元運動の線形解析法を提案した。この解析法では、車載カメラの回転+並進運動における合わせて6個の運動パラメータを理論的に3個だけの対応点对で解ける。また、白線認識結果などの前知識に依存せず、背景上のいかなる特徴点をも対応付け可能の対象とするために、従来の手法と比べて、計算量を大幅に減少することができた⁽²⁶⁾。

自動車などの移動観測者からの移動物体の検出及び追跡も運転者支援や自律走行に対して重要な課題である。文献(27)において、車載カメラの運動解析結果から背景の見掛け上の

図 15 移動物体候補領域の検出結果

(a) 原画像

(b) 道路環境認識結果

図 16 3眼立体視による道路環境認識

動きをキャンセルし、移動物体を検出する方法を提案した。また、追跡周期という新しい概念の提案により、移動物体の隠蔽などを含む複雑な道路交通環境において、複数の移動物体をリアルタイムで同時に追跡可能となった。都市幹線道路（往復4車線）での実験結果の一例を図15に示す。赤い枠はクラスタリングした移動物体候補領域を示す。自車と同方向に走っている先行車両及び対向車線での車両をほぼ正しく検出している。ただし、左車線を追い抜いているワゴン車においては、クラスタ面積の制限によって起こったと思われる幾つかの小領域に分割される誤検出が発生している。

走行支援システムにおいて移動車両から前方車両を検出する方法には、ミリ波レーダによる方法やレーザレーダによる方法などが提案されている。しかし、レーダ単体による方法は、高速道などで車両が高速に走行し、ある程度の車間を保つ遠距離の場合には有効であるが、市街地環境などで車両が低速に走行する近距離の場合には不向きである。また、レーダと画像処理の融合による方法なども提案されているが、ほとんどが距離計測にはレーダの計測値を利用し、画像処理を主とした距離計測は行われていない。しかし、画像情報は空間分解能が高く視野角も広いので、自車線だけでなく隣接車線なども含めた道路環境全体を把握しやすいという利点が存在する。したがって、近距離も含めた道路環境を精度良く認識するためには、画像処理による方法が有効である。文献(28)では、3眼立体視を利用した道路環境解析手法を提案した。カメラを移動車両の前方にL字型に3台設置する。撮影された画像に対して、ステレオマッチングを水平・垂直のそれぞれ方向に実施することで、合成視差画像を算出する。その後、車両や道路、ガードレールといった様々な三次元道路環境を解析するために、水平・垂直方向の視差変化を考慮したU-V-disparity⁽²⁹⁾を適用した。認識結果を図16に示す。この結果により、前方のトラック、ガードレール等から成る道路環境が認識されている様子が分かる。

4.2 交通流解析

2002年には、歩道橋に設置したカメラから撮影された画像を用い、背景差分処理と水平エッジ処理による車両検出、及びテンプレートマッチングと追跡周期による車両追跡を利用した交通流計測法を提案した⁽³⁰⁾。交通流の計測パラメータとして、道路の一断面を単位時間に通過する車両の台数、画像中の車両速度、並びに、ある瞬間に一定長の道路区間上に存在する車両の長さの総和がその区間長に占める割合の百分率である空間占有率を計測した。昨年で15回目を迎えたITS Japan主催のITSシンポジウムはこの年の2002年12月14日から16日にかけて一橋記念講堂で第1回が開催されている。このシンポジウムには第1回から第14回まで連続で発表させて頂き、思い出深いものがある。

4.3 次世代カーナビゲーション

2004年頃には、ドライバーを誘導するための情報をライブ映像に重畳してドライバーを直接誘導する次世代カーナビゲーションについての研究を行った⁽³¹⁾。すなわち、ドライバーに直観的に分かりやすいナビゲート情報を提供するために、移動する車載カメラ座標系とデジタル地図座標系の位置合わせを行うことで、車載カメラの三次元姿勢を推定することによって、ナビゲート情報をライブ映像の適切な位置に投影する表示システムの研究開発である。このシステムは、図17に示すように測位部、操作部及び出力部の三つの部分から構成されている。カメラから入力した道路映像と地図管理部から推定した多車線道路形状モデルを照合して、カメラの姿勢データを求め、映像表示部で道路交通情報をライブ映像に投影する。図18に次世代カーナビゲーション実施の一例を示す。ライブ映像の上に、簡略化した地図、道路制限、

図 17 次世代カーナビゲーションシステムの構成図

図 18 次世代カーナビゲーションシステムの実施例

図19 バス停留所要時間の予測結果(予測日:2004年11月15日月曜日)

走行車線案内及び重要なランドマークなどのナビゲート情報を仮想実体化することにより、現実情景に融合するように提示されている。

5. バスロケーション情報の利活用

2000年頃になるとバスロケーションシステムが全国のバス会社へ導入されるようになった。バスロケーションシステムから得られる情報の利活用として、リアルタイムに取得した路線バスの運行所要時間データを基にしたバス停留の運行所要時間の予測手法を提案し、実データにおいて検証を行った⁽³²⁾。具体的には、バスロケーションシステム運用の際に作成されるバスのプローブ交通情報(現在位置やその時刻)をリアルタイムに取得し、バス停留の所要時間を算出する。このバス停留の所要時間を基に類似パターン検索と回帰分析を組み合わせた予測手法などにより近い将来のバス停留の所要時間を予測した。2002年3月から約150台の路線バスを用いて運用が開始されているバスロケーションシステムにより得られる走行中のバス運行情報をプローブ交通情報として用いた。図19に10分後及び60分後の予測結果の一例を示す。あるバス停留において、1日のデータ量を多く採取可能な2004年11月15日月曜日午前7時から午後10時までを予測対象としている。バス停留の所要時間の大きな傾向は予測できていることが分かる。

6. 信号機制御

2010年からは信号機を有機的に制御する交通信号制御システムを構築するための研究を開始した。車両の円滑な運行による渋滞の回避は低炭素社会の実現に向けたCO₂総排出量の削減の効果も併せ持つものである。組合せ最適化問題の最

図20 交通シミュレータを用いた交通信号制御システムの概要

図21 モデリング対象地域

表4 シミュレーション結果の比較

評価関数	流出台数(台)	残留台数(台)	待機台数(台)
F1	4,575	758	120
F2	4,688	624	145
現実の交通信号パラメータ使用	3,651	1,095	882

F1: 滞留台数, 待機台数, 及び遅延時間を基に評価

F2: 流出台数及び遅延時間を基に評価

適解を求める一手法である遺伝的アルゴリズム(GA)を独自に発展させたマルチエレメントGAを、複雑に絡んだ道路交通網の信号機の制御に活用した場合の効果と問題点について確認することにした。実際の運用に即するために、交通シミュレータには実在する道路網や実際の交通データ等を用いた。交通信号制御システムの概要を図20に示す。熊本市内で平日の朝夕に渋滞が発生し、熊本大学からも遠くない大江・渡鹿地域を道路交通網のモデリング対象地域として選定した。図21に対象地域を示す。図中のノード1及びノード3で激しい渋滞が発生する。表4に示すように、交通信号パラメータ(オフセット, スプリット, サイクル)の最適化を行った結果は、現実の交通信号パラメータを使用したシミュレーション時と比べて、対象道路網内を通過した流出台数を25~28%改善できた。また、対象道路網内に残っている残留台

図22 深層学習を用いた交通信号制御システムの概要

数も30～43%改善された。対象道路網内に入れずに外であふれて待っている待機台数は84～86%改善された。このように、マルチエレメントGAを用いた交通信号制御システムは交通流を大幅に改善し、渋滞緩和への寄与を示すものであった^{(33), (34)}。

しかしながら、上記の手法はシミュレーション時間がボトルネックで非常に長い最適化時間を要し、実運用に至るには現実的ではなかった。そこで、図22に示すように、図20右側に記載されている交通シミュレータに代わり、交通シミュレータの挙動を深層学習させた学習機械に置き換える手法を提案し、最適化処理の高速化を目指した。処理時間が大幅に改善され、また、渋滞緩和の向上が確認された⁽³⁵⁾。

7. むすび

本稿では30年来携わってきたITS研究について述べた。現在は、これらの研究成果の中で直接的ではないにしろ一部実用化されている技術もあり、近年では、2020年にも高速道路でレベル3（条件付自動運転）での自動運転開始を目指した研究開発が世界の有力自動車メーカーによって積極的に行われている。当然のことではあるが、人命を第1にした安全な自動運転車が完成するのを願ってやまない。

研究に携わられた卒研生、修士課程学生、博士課程学生、短期留学生、研究員並びに共同研究者の皆さんへ心より感謝する。

文 献

- (1) 内村圭一, 神吉健一郎, 木田 健, 岩尾健一, “デジタル道路地図を用いた巡回経路探索,” システム制御情報学会論文誌, vol.6, no.12, pp.552-559, 1993.
- (2) 内村圭一, 神吉健一郎, “道路ネットワークにおける巡回配送経路探索,” 電学論, vol.114-C, no.4, pp.456-462, 1994.
- (3) K. Uchimura and H. Sakaguchi, “Vehicle routing problem in physical distribution using genetic search,” Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport System, pp.2051-2055, Yokohama, Nov. 1995.
- (4) K. Uchimura and H. Sakaguchi, “Vehicle routing problem using genetic algorithms based on adjacency relations,” Proc. IEEE’s 6th International Conference on Vehicular Navigation and Information Systems, pp.214-217, Seattle, Aug. 1995.
- (5) 北野宏明, “遺伝的アルゴリズム,” 人工知能誌, vol.7, no.1,

- pp.26-37, Jan. 1992.
- (6) 内村圭一, 齊藤隆司, H. Takahashi, “遺伝的アルゴリズムによる乗客輸送の最適化,” 電学論, vol.117-D, no.7, pp.891-897, 1997.
- (7) 内村圭一, 齊藤隆司, H. Takahashi, “公共交通サービスにおけるDial-a-Ride問題,” 信学論(A), vol. J81-A, no.4, pp.599-606, April 1998.
- (8) K. Uchimura, H. Takahashi, and T. Saitoh, “Demand responsive services in hierarchical public transportation system,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.51, no.4, pp.760-766, July 2002.
- (9) 内村圭一, 若林竜太, 境 周平, “Dial-a-Ride問題におけるリアルタイム乗客輸送,” システム制御情報学会論文誌, vol.15, no.8, pp.413-421, 2002.
- (10) 内村圭一, 濱本康光, 西田憲一郎, “乗客の途中乗車を考慮したDial-a-Rideシステム,” 交通工学, vol.37, no.4, pp.61-71, 2002.
- (11) 内村圭一, 前田竜士, “動的な交通情報を用いたリアルタイムDial-a-Rideシステムの構築,” 信学論(A), vol. J88-A, no.2, pp.277-285, Feb. 2005.
- (12) 境 周平, 若林竜太, 内村圭一, “デマンドバスの運用面積に関する考察,” 情報高度交通システム研報, no.2-4, pp.19-24, 2000.
- (13) 茅島 翔, 内村圭一, 上瀧 剛, 大村悦彰, “時間枠制約付き配送経路問題におけるセービング法と分枝限定法に基づいた発見的解法,” 第60回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, no.342-4, pp.25-27, 京都, May 2016.
- (14) 内村圭一, 木村英雄, 脇山慎也, “道路情景カラー画像における円形道路標識の抽出および認識,” 信学論(A), vol. J81-A, no.4, pp.546-553, April 1998.
- (15) 内村圭一, 脇山慎也, 藤野麻衣子, “限定色表示を用いた円形道路標識の抽出,” 信学論(D-II), vol. J83-D-II, no.2, pp.855-858, Feb. 2000.
- (16) 内村圭一, 柏木誠哉, 脇阪信治, 有田秀稔, “画像情報と位置情報とを統合した3次元道路データ作成,” 信学論(B), vol. J84-B, no.12, pp.2244-2253, Dec. 2001.
- (17) 内村圭一, 中村国章, 富永裕之, 胡 振程, 脇阪信治, 有田秀稔, “道路情報整備のための案内標識の位置特定,” 信学論(A), vol. J88-A, no.2, pp.122-130, Feb. 2005.
- (18) 平野和弘, 内村圭一, 上瀧 剛, “交差点名標識における文字認識のための超解像度学習低周波画像の生成,” 精密工学会誌, vol.80, no.12, pp.1132-1137, 2014.
- (19) G. Koutaki, Z. Hu, and K. Uchimura, “Automatic road extraction based on intersection detection in suburban areas,” J. Imaging Sci. Technol., vol.49, no.2, pp.163-169, 2005.
- (20) 上瀧 剛, 内村圭一, 胡 振程, “ネットワーク型Active Shape Modelsによる道路地図の位置精度の向上,” 情報学論, vol.47, no.12, pp.3079-3089, 2006.
- (21) T. Uemura, G. Koutaki, and K. Uchimura, “Road extraction in urban areas using boundary code segmentation for DSM and aerial RGB images,” 画像学誌, vol.40, no.1, pp.74-85, 2011.
- (22) D. Herumurti, K. Uchimura, G. Koutaki, and T. Uemura, “Automatic road extraction using seeded region growing with mixed ART method for DSM data,” IEEEJ, vol.133, no.1, pp.159-168, 2013.
- (23) K. Uchimura, M. Kawano, H. Tokitsu, and Z. Hu, “Development of generation system of simplified digital maps,” IEICE Trans. Fundamentals, vol. E93-A, no.4, pp.700-710, April 2010.
- (24) 谷口健男, “複合領域の六面体要素分割法,” 計算工学講演会論文集, vol.1, no.2, pp.689-692, 1996.
- (25) 胡 振程, 内村圭一, “一般道路状況を考慮した道路平面線形モデルの構築,” 信学論(A), vol. J81-A, no.4, pp.590-598, April 1998.
- (26) 胡 振程, 内村圭一, 川路茂保, “FOEを用いた車載カメラ運動パラメータの推定,” 電学論(D), vol.119, no.1, pp.50-57, 1999.
- (27) 胡 振程, 内村圭一, “変動背景における複数移動物体の検出及び同時追跡,” 電学論(D), vol.120-D, no.10, pp.1134-1142, 2000.
- (28) 松島宏典, 松浦博人, 木嶋啓貴, 胡 振程, 内村圭一, “三眼立体視による道路環境解析,” 電学論(C), vol.126-C, no.12, pp.1551-1558, 2006.
- (29) Z. Hu and K. Uchimura, “U-V-disparity: An efficient algorithm for

- stereo vision based scene analysis," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 48-54, Las Vegas, June 2005.
- (30) 内村圭一, 松島宏典, "オクルージョンを考慮した交通流計測," 電学論(C), vol.122-C, no.12, pp.2120-2127, 2002.
 - (31) Z. Hu and K. Uchimura, "Fusion of vision, GPS and 3D gyro data in solving camera registration problem for direct visual navigation," International Journal of ITS, vol. 4, no. 1, pp.3-12, Dec. 2006.
 - (32) 内村圭一, 成松裕介, 衛藤旭秀, 胡 振程, "バスロケーション情報を用いたバス停間所要時間予測," 国際交通安全学会誌, vol.32, no.3, pp.224-231, 2007.
 - (33) T. Nishihara, I. G. P. S. Wijaya, S. Matsumoto, G. Koutaki, K. Uchimura, H. Sugitani, and S. Ishigaki, "The verification with real-world road network on optimization of traffic signal parameters using multi-element genetic algorithms," 19th World Congress on Intelligent Transport Systems, Vienna, Austria, Oct. 2012.
 - (34) I. G. P. S. Wijaya, K. Uchimura, G. Koutaki, T. Nishihara, S. Matsumoto, S. Ishigaki, and H. Sugitani, "The improvement ME-GA based traffic signal control optimization using new fitness model," GSTF Journal on Computing, vol.2, no.2, pp.64-69, June 2012.
 - (35) S. Nakamura, T. Uemura, G. Koutaki, and K. Uchimura, "Speeding up of the traffic congestion mitigation by stochastic optimization in deep learning," NOLTA, vol. E9-N, no.1, pp.49-59, Jan. 2018.

内村圭一 (正員：シニア会員)

昭50熊本大・工・電子卒, 昭52同大学院修士課程了. 同年熊本電波工業高専・助手, 昭55熊本大・工・助手, 平10同大学・工・教授. 平22マクマスタ大(カナダ)客員教授. 平29同大学を定年退職. 現在, 熊本大名誉教授. 工博. 画像処理・認識, 高度交通システム, 最適化などの研究に従事. 平24年度MIRU長尾賞, 平25年度本会論文賞, 平27年度ISCIE産業技術賞を各受賞. 著書「実践画像処理入門」(共著)など.