

空撮画像と車載カメラ画像からの特徴点の時系列対応付けによる 自車位置推定の高精度化

野田 雅文[†] 高橋 友和^{††,†} 出口 大輔[†] 井手 一郎[†]
村瀬 洋[†] 小島 祥子^{†††} 内藤 貴志^{†††}

Improvement of Vehicle Ego-Localization by Sequential Matching of Feature-Points from an Aerial Image and an In-Vehicle Camera Image

Masafumi NODA[†], Tomokazu TAKAHASHI^{††,†}, Daisuke DEGUCHI[†], Ichiro IDE[†], Hiroshi MURASE[†], Yoshiko KOJIMA^{†††}, and Takashi NAITO^{†††}

あらまし 近年、高性能カーナビゲーションなどへの応用を目的とし、空撮画像と車載カメラ画像に共通して撮影されている道路面を対応づけることで高精度に自車位置を推定する手法が提案されている。従来は、道路面に印字されている路面標示の重心を特徴点として対応付けに用いていたが、このような特徴点は路面標示の欠損や遮へいに影響を受けやすいため、自車位置推定精度が十分ではなかった。そこで、本論文では、特徴点が十分に得られない場合においても、高精度、かつ頑健な自車位置推定手法を提案する。提案手法のアプローチは、(1) 路面標示のコーナを特徴点とした空撮画像と車載カメラ画像の対応付け、(2) 複数時刻の車載カメラ画像から得られる時系列の特徴点の対応付け、の二つである。実験の結果、前方車両が存在することにより路面標示が遮へいされるような実際の走行環境下において、提案手法による自車位置推定精度が従来手法に対して改善したことを確認した。

キーワード 自車位置推定, 空撮画像, 車載カメラ画像, 画像対応付け, 特徴点抽出

1. ま え が き

近年、自動車運転支援の一つとして、正確に自車位置を求める技術が求められている。数十 cm 単位の自車位置推定精度が達成できれば、従来では行えなかった車線変更時や交差点進入時の正確なナビゲーションが可能となる。現在、このような用途に対して普及型 GPS [1] やマップマッチング [2] が用いられている。しかしながら、普及型 GPS は市街地においては周辺環境により 10~30 m 程度の誤差を含み、マップマッチングにより近傍の道路に自車位置を補正しても、道路内での位置を特定できない。このため、高度ナビゲ-

ーションに対する自車位置推定精度は依然として十分ではない。

より高精度に自車位置推定を行うため、近年では車載カメラから撮影された画像を用いた自車位置推定手法が注目されている。これらの研究は、車載カメラ画像のみを用いる手法と車載カメラ画像を位置情報が付随した地図と対応づける手法に大きく分けられる。車載カメラ画像のみを用いた手法は、各時刻における車両の動きを車載カメラ画像から推定し、それを時系列に累積することにより自車位置を推定するものである。移動体から撮影した画像を用いた位置推定手法は数多く提案されており、これらは文献 [3] で詳細に調査されている。しかしながら、これらの手法は時間に伴う累積誤差の影響が大きいことが問題点として挙げられる。一方、車載カメラ画像と地図を対応づける手法 [4]~[7] では、事前に構築した地図に対して車載カメラ画像を対応づけることによって、自車の位置や姿勢を推定している。対応付けに用いる地図として、画像データベース [4], [5] や自然特徴点 [6], [7] を用いた

[†] 名古屋大学, 名古屋市
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 岐阜聖徳学園大学, 岐阜市
Gifu Shotoku Gakuen University, 1-38 Nakauzura, Gifu-shi, 500-8288 Japan

^{†††} (株) 豊田中央研究所, 愛知県
Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc., Nagakute, Aichi-ken, 480-1192 Japan

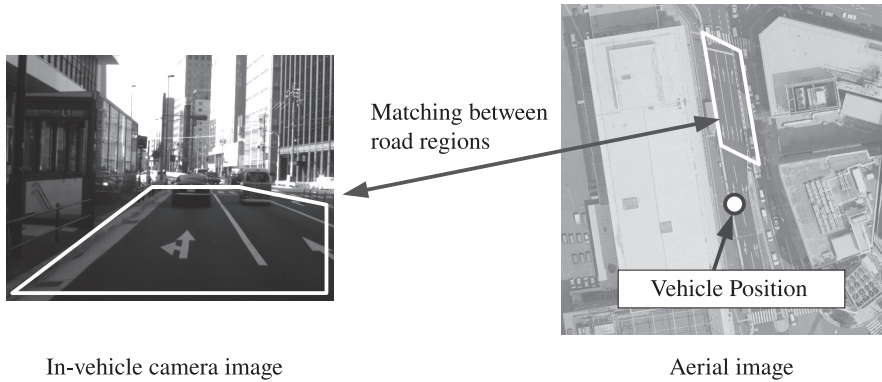


図 1 車載カメラ画像と空撮画像の対応付けによる自車位置推定
Fig. 1 Ego-localization by matching between an in-vehicle camera image and an aerial image.

手法が提案されている。また、車載カメラ以外にも、一般のカメラの位置・姿勢を推定するためにマーカー [8] や三次元モデル [9] の地図を用いた手法も多数提案されている。これらの手法は、地図と正確な対応付けができれば、累積誤差が生じることなく自車の位置を推定することができる。しかしながら、正確な位置情報をもった広範囲の地図を構築する必要があるため、その構築コストが問題となる。

車載カメラ画像と地図を対応づける手法として、Pink らは空撮画像と車載カメラ画像に共通して撮影されている道路面を対応づけることにより自車位置を推定する手法を提案している [10]。空撮画像は、一度に広範囲を撮影し、かつ正確な位置情報をもつため、自車位置推定用の地図として適している。また、近年ではこのような空撮画像が比較的入手しやすくなったことも利点として挙げられる。Pink らの手法は、各画像中の道路面上に存在する路面標示から抽出した特徴点同士を対応づけるもので、路面標示の重心 (図 2 (a)) を特徴点として用いている。そして、これらの特徴点を ICP (Iterative Closest Point) 法により対応づけている。しかしながら、道路面の遮へいなどにより路面標示の重心位置は変化するため、対応付けに適した特徴点ではない。また、1 枚の車載カメラ画像に含まれる路面標示の数が限られるため、対応付けに十分な特徴点が得られない。特に、前方車両が存在する場合、道路面が遮へいされるため、対応付けが更に困難となる。

そこで、本研究ではこのような従来研究の問題点を解決し、より高精度な自車位置を推定することを目的とする。

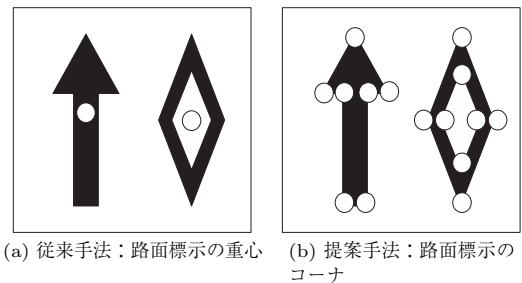


図 2 対応付けに用いる特徴点の違い: 特徴点を白点で示す。

Fig. 2 Difference of featurepoints used for the matching: The white dots represent the featurepoints.

1.1 提案手法のアイデア

本論文では、図 1 のように空撮画像と車載カメラ画像中の道路面から抽出した特徴点間の対応付けにより、自車位置を推定する。提案手法は、以下に述べる 2 点のアイデアを取り入れることにより、従来では問題となった路面標示に遮へいが含まれる際にも頑健な自車位置推定を行う。

(1) 空撮画像と車載カメラ画像の対応付けに適した特徴点: 異なる画像間の対応付けを行う際には、対象に適した特徴点を用いる必要がある。本論文で対象とする道路面では、図 2 に示す道路面上に印字された路面標示が対応付けに用いることができると考えられる。従来手法においても、この路面標示の重心を対応付けに用いていたが、遮へいの影響を受けやすいため、対応付けの精度が不十分であると考えられる。ここで、路面標示の多くは矢印などのコーナを多くもつシンボルであることを考慮すると、路面標示のコーナ

(図 2(b)) を特徴点として用いることで、より高精度な対応付けが期待される。そこで、提案手法ではこのような路面標示のコーナを特徴点として用いる。また、路面標示の一部が遮へいされた場合でも、重心を用いる場合に比べ頑健に対応付けができることが期待できる。更に、路面標示は幾何学的なシンボルであるため、その形状情報を対応付けに用いることにより、従来手法よりも撮影条件などの違いに対して頑健に対応づけられることも期待できる。提案手法では、このような形状情報を記述する特徴量として SURF 特徴量 [11] を用いる。そして、空撮画像と車載カメラ画像を特徴点の位置と SURF 特徴量に基づき、高精度に対応づける。

(2) 複数の車載カメラ画像から抽出した時系列の特徴点対応付け：車載カメラ画像に含まれる路面標示は限られるため、空撮画像と車載カメラ画像の対応付けに十分な数の特徴点を抽出できるとは限らない。特に自車の前方に車両が存在する場合、道路面の広い範囲が遮へいされるため、この問題は顕著となる。提案手法では複数の車載カメラ画像から得られる時系列の特徴点を対応づけることで、この問題を解決する。実際の走行環境では、ある時刻において道路面が遮へいされていたとしても、別の時刻では車両の走行に従って遮へいされなくなることが多い。そのため、従来手法で問題となった前方車両による道路面の遮へいにも頑健になると考えられる。

以上のアイデアに基づき、空撮画像及び車載カメラ画像から抽出した特徴点を対応づけることにより、自車位置の推定を行う。提案手法は、事前に空撮画像から特徴点を抽出し、自車位置推定用の地図を構築する処理と、構築した地図と車載カメラ画像を対応づけることにより自車位置推定を行う処理からなる。本論文では、これらの手法について述べる。

以下、2. では提案手法による空撮画像からの地図構築について、3. では車載カメラ画像を用いた自車位置推定について述べる。そして、4. で実験により従来手法と比較し、その結果に対して考察する。最後に 5. で本論文をまとめる。

2. 空撮画像からの地図構築

本章では、自車位置推定に用いる空撮画像及び空撮画像からの地図構築手法について述べる。

2.1 空撮画像

本研究で用いる空撮画像には経緯度情報が付随して

おり、画像中の全ての位置と経緯度は 1 対 1 に対応するものとみなす。そのため、空撮画像中の自車位置を推定することにより、実世界における自車位置を求めることができる。車載カメラ画像と空撮画像の対応付けには道路領域のみを用い、これらは事前に抽出しておく。また、本論文において空撮画像中の道路領域には、車両などによる遮へいは含まれないものとする。

2.2 特徴点抽出による地図構築

空撮画像から特徴点を抽出することで、自車位置推定に用いる地図を構築する。提案手法では、空撮画像と車載カメラ画像を高精度に対応づけるため、路面標示のコーナを特徴点として抽出する。特徴点の抽出には、入力画像に対して Harris オペレータ [12] を適用する。また、特徴点間の対応付けを頑健にするため、各特徴点をその周辺の画素から計算する SURF 特徴量を用いて記述する。

この特徴点抽出処理を用いて、空撮画像から得られる N 個の特徴点を $\mathcal{X} = \{(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{f}^{(n)})\}$ ($n = 1, \dots, N$) と表し、これを地図として扱う。ここで、 $\mathbf{x}^{(n)}$ は特徴点の位置、 $\mathbf{f}^{(n)}$ はその位置で求めた SURF 特徴量を表す。空撮画像から構築した地図の例を図 3 に示す。この図中では、各特徴点を白点で示す。

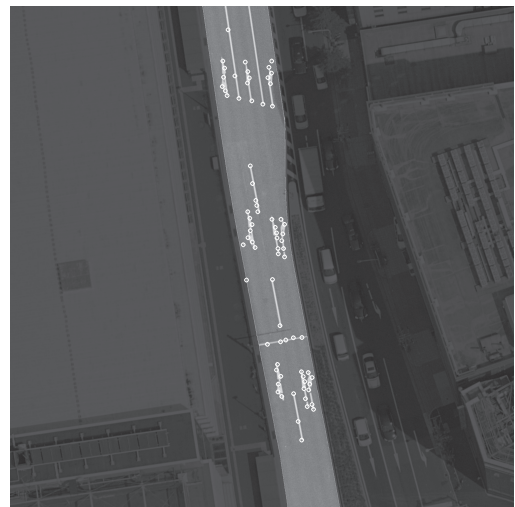


図 3 空撮画像から抽出した特徴点：明るく表示した道路面のみを自車位置推定に用いる。丸印は抽出された特徴点を示す。

Fig. 3 Feature-points extracted from the aerial image: Only the highlighted road region is used for the ego-localization. The white dots represent the extracted feature-points.

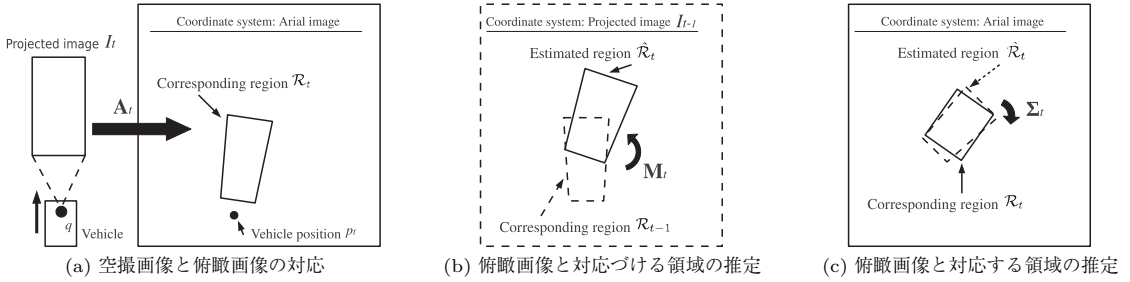


図 5 提案手法による自転車位置推定
Fig. 5 Ego-localization by the proposed method.

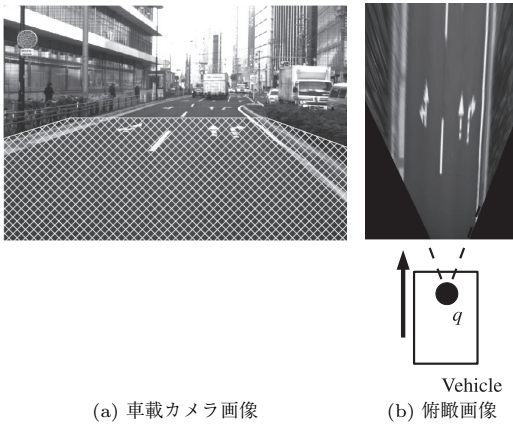


図 4 俯瞰画像への変換
Fig. 4 Transformation to a projected image.

3. 空撮画像と車載カメラ画像の照合による自転車位置推定

本章では、自転車位置推定に用いる車載カメラ画像及び自転車位置推定手法について述べる。

3.1 車載カメラ画像

本研究では、単眼カメラから時系列に撮影された車載カメラ画像を用いる。ただし、車載カメラ画像と空撮画像は、道路面を撮影する角度が大きく異なるため、そのままでは対応付けが困難である。そのため、図 4 に示すように、車載カメラ画像 (図 4(a)) 中の道路面領域を俯瞰画像 (図 4(b)) に変換した上で処理を行う。時刻 t における俯瞰画像を I_t と表す。本研究では道路面は平面であると仮定することで、車載カメラ画像中の位置 (x, y) と俯瞰画像中の位置 (x', y') の関係を次式で表す。

$$[x' \ y' \ 1]^T \sim \mathbf{P}[x \ y \ 1]^T \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{P} は 3×3 の平面射影行列である。本研究で

は、 \mathbf{P} を時刻に依存しない常に一定値の行列とし、車載カメラの設置位置や画角のパラメータを用いて事前に求めておく。また、これらのパラメータを用いて、図 4(b) 中に示す俯瞰画像中の自転車位置 \mathbf{q} も事前に求めておく。この \mathbf{q} は、空撮画像中の自転車位置を求める際に用いる。

3.2 自転車位置推定の概要

提案手法では、図 5(a) に示すように、時刻 t の車載カメラ画像から求めた俯瞰画像 I_t に対応する空撮画像中の領域 \mathcal{R}_t を求めることにより、空撮画像中の自転車の絶対位置 \mathbf{p}_t を推定する。 \mathbf{p}_t は、俯瞰画像を領域 \mathcal{R}_t に変換する平面射影変換行列を \mathbf{A}_t を用いて、次式により求める。

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{q} \quad (2)$$

提案手法では、範囲を絞りながら対応付けを行うため、 \mathbf{A}_t を 2 段階の対応付け処理により求める。この処理を行うため、前時刻の \mathbf{A}_{t-1} を用いて、 \mathbf{A}_t を次式で表す。

$$\mathbf{A}_t = \Sigma_t \mathbf{A}_{t-1} \mathbf{M}_t \quad (3)$$

\mathbf{M}_t は時刻 $t-1$ の俯瞰画像 \mathbf{I}_{t-1} の座標系において、 \mathcal{R}_{t-1} から、 \mathcal{R}_t を近似する領域 $\hat{\mathcal{R}}_t$ に変換する平面射影変換行列である (図 5(b))。言い換えると、 \mathbf{M}_t は車両の動きによる俯瞰画像の変化を表している。提案手法では、 \mathbf{M}_t を連続する時刻の俯瞰画像間の対応付けにより求めるが、車両の動きの完全な推定は困難であるため、 \mathbf{M}_t には誤差が含まれる。そのため、 Σ_t により、この誤差を補正する。 Σ_t は空撮画像 \mathbf{A}_t の座標系において、近似領域 $\hat{\mathcal{R}}_t$ から正確な \mathcal{R}_t に変換する平面射影変換行列である (図 5(c))。提案手法では、これら \mathbf{M}_t と Σ_t を 2 段階の対応付け処理により求める。

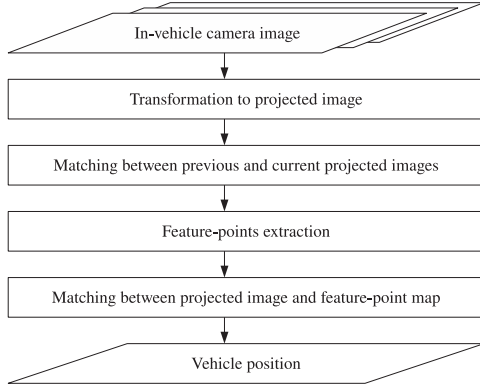


図 6 提案手法による自車位置推定の流れ
Fig. 6 Process flow of ego-localization by the proposed method.

3.3 処理の流れ

自車位置推定の流れを図 6 に示す。まず入力 of 車載カメラ画像を俯瞰画像に変換する。次に、連続する時刻の俯瞰画像間の対応付けにより \mathbf{M}_t を求める。そして、俯瞰画像と空撮画像中の対応付けにより Σ_t を求める。最後に、前時刻の \mathbf{A}_{t-1} を用いて \mathbf{A}_t を求めることで、現時刻の自車位置 \mathbf{p}_t を得る。

以降の節で、各処理の詳細について述べる。

3.4 連続する時刻の俯瞰画像の対応付け

平面射影変換行列 \mathbf{M}_t を求めることにより、図 5(b) 中の \mathcal{R}_t を得る。 \mathbf{M}_t を連続する時刻の俯瞰画像 I_t と I_{t-1} の対応付けにより求める。ここで、時間変化は微小であるため、これらの画像は大きく変化しないと仮定する。はじめに、 I_t と I_{t-1} それぞれから Harris オペレータによりコーナを抽出する。そして、Lucas-Kanade 法 [13] により初期対応付けを行う。最後に、LMedS 基準 [14] の最小化により外れ値を除いた対応点を選択し、 \mathbf{M}_t を求める。

3.5 特徴点抽出

空撮画像と対応づけるため、俯瞰画像から特徴点を抽出する。特徴点抽出は、2.2 と同様の手法で行う。これによって、時刻 t の俯瞰画像中から得られる L_t 個の特徴点を $\mathcal{Y}_t = \{(\mathbf{y}_t^{(l_t)}, \mathbf{g}_t^{(l_t)})\} (l_t = 1, \dots, L_t)$ と表す。 $\mathbf{y}^{(n)}$ は特徴点の位置、 $\mathbf{g}^{(n)}$ は SURF 特徴量を表す。

3.6 俯瞰画像と空撮画像の対応付け

俯瞰画像と \mathcal{R}_t で表す空撮画像の対応付けにより図 5(c) 中の Σ_t を求める。このとき、現在時刻 t を含む過去 F 枚の俯瞰画像中の特徴点 $(\mathbf{y}_{t'}^{(l_{t'})}, \mathbf{g}_{t'}^{(l_{t'})}) \in$

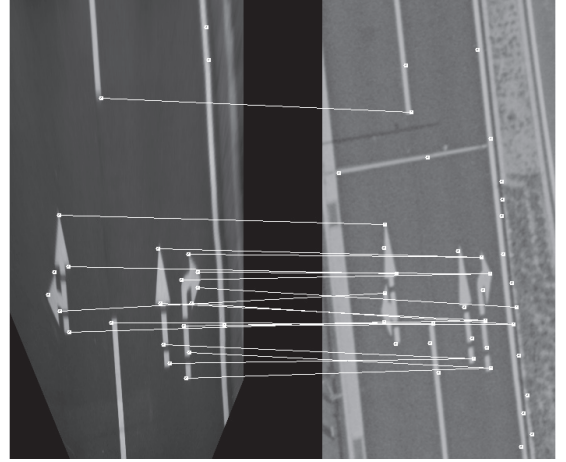


図 7 俯瞰画像と空撮画像の対応付け
Fig. 7 Matching between the projected image and the aerial image.

$\{\mathcal{Y}_{t'}\} (t' = t - (F - 1), \dots, t)$ を用いる。これらの特徴点の位置を空撮画像の座標空間に変換し、近傍の特徴点を統合した上で、空撮画像中の特徴点と対応づける。

まず、次式により、既に求めた $\mathbf{A}_{t'}$ を用いて、 F 枚の俯瞰画像中の特徴点の位置を空撮画像の座標空間に変換する。

$$\hat{\mathbf{y}}_{t'}^{(l_{t'})} = \mathbf{A}_{t'} \mathbf{y}_{t'}^{(l_{t'})} \quad (4)$$

ここで、 $l_{t'} = 1, \dots, L_{t'}$ である。また、現在の時刻 $t' = t$ では \mathbf{A}_t が得られていないため、 $\mathbf{A}_{t-1} \mathbf{M}_t$ を代わりに用いる。

次に、複数の俯瞰画像から抽出した時系列の特徴点には同じ路面標示から抽出したものが存在すると考えられるため、 $\hat{\mathbf{y}}_{t'}^{(l_{t'})}$ 間の Euclid 距離がしきい値未満のものは同一の特徴点として統合する。この結果、得られた K 個の特徴点を $\hat{\mathcal{Y}} = \{(\hat{\mathbf{y}}^{(k)}, \mathbf{g}^{(k)})\} (k = 1, \dots, K)$ と表す。

そして、空撮画像の座標空間における特徴点の位置と SURF 特徴量の Euclid 距離により、俯瞰画像中の特徴点 $(\hat{\mathbf{y}}^{(k)}, \mathbf{g}^{(k)})$ と空撮画像中の特徴点 $(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{f}^{(n)})$ を対応づける。ここで、 $(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{f}^{(n)})$ は、 $\|\hat{\mathbf{y}}^{(k)} - \mathbf{x}^{(n)}\| < r$ (r は探索半径) を満たすうち、 $\|\mathbf{g}^{(k)} - \mathbf{f}^{(n)}\|$ を最小とする特徴点を表す。ただし、条件を満たす特徴点 $(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{f}^{(n)})$ が一つもない場合は対応づけられない。図 7 に特徴点の対応関係を示す。俯瞰画像中の特徴点が、

空撮画像中において近傍、かつ周辺の形状が似ている特徴点に対応づけられていることが分かる。そして、LMedS 基準の最小化により外れ値を除いた対応点を選択し、 Σ_t を得る。

3.7 自転車位置の推定

最後に、式 (3) を用いて \mathbf{A}_t を求めることにより、 \mathcal{R}_t を得る。そして、最終的に式 (2) により自転車位置 \mathbf{p}_t を推定する。

4. 実験

提案手法の評価を行うため、実際の車載カメラ画像を用いて自転車位置推定実験を行った。

4.1 実験条件

本実験では、市街地の道路を走行時に撮影した車載カメラ画像系列を用いた。車載カメラ画像は、単眼カメラ (Point Grey Research 社製 Flea) により撮影し、解像度は 640×480 pixels であった。空撮画像は、車載カメラ画像を撮影した付近で道路面を遮へいする車両などの物体を含まないものを用いた。空撮画像の解像度は約 0.15 m/pixel であり、正確な経緯度情報が付随する。また、2.1 で述べた道路面領域は人手で与えた。

本実験では、前方車両による遮へいの有無により、表 1 に示す 2 系列の区間における自転車位置推定性能を評価した。系列 1 は道路面の遮へいを含まず、1,200 フレームからなる約 250m の区間であった。また、系列 2 は道路面の遮へいを含み、1,100 フレームからなる約 260m の区間であった。各系列は、周辺をビル群

に囲まれた市街地であり、遮へいの有無以外の条件はほぼ同等であった。これらの車載カメラ画像系列には、車両の車線変更や信号停止などの運転行動が含まれていた。図 8(a) に系列 1、図 8(b) に系列 2 の車載カメラ画像系列の例を示す。また、表 2 に、各系列に含まれる路面標示の個数を種類別に示す。本実験では、路面標示の種類を図 9 に示すような区画線及び停止線など (Line)、破線による区画線 (Dot line)、矢印など (Arrow)、横断歩道 (Crossroad) の 4 種類とした。そして、目視によりその種類を判別し、計数した。実験結果は、系列全体の平均推定誤差 (参照値と推定値の平均誤差) により評価した。参照値として高精度自転車位置推定システム (Applanix 社, POSLV) [15] の計測値を用いた。このシステムは、推定誤差 0.1 m 以下と非常に高精度な計測が可能であり、周辺の建物などによる計測への影響が極めて小さい。しかしながら、初期設定が煩雑であり、かつ非常に高価であるため、現状での一般車両への搭載は困難である。

表 1 実験条件
Table 1 Experimental condition.

Dataset	Occlusion	Length	Num. of frames
1	w/o	about 250 m	1,200 frames
2	w/	about 260 m	1,100 frames

表 2 種類ごとの路面標示の数
Table 2 Number of road markings per type.

Dataset	Line	Dot line	Arrow	Crossroad
1	7	10	20	4
2	8	16	23	1

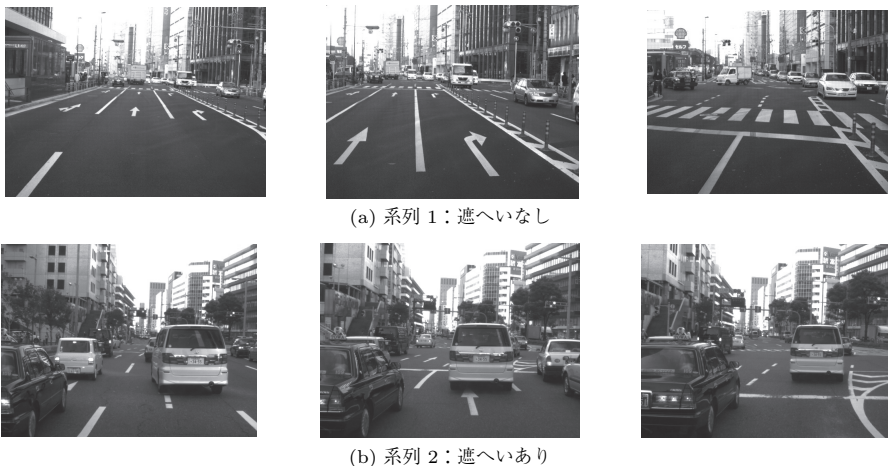


図 8 実験に用いた車載カメラ画像系列

Fig. 8 In-vehicle camera image sequence used in the experiment.

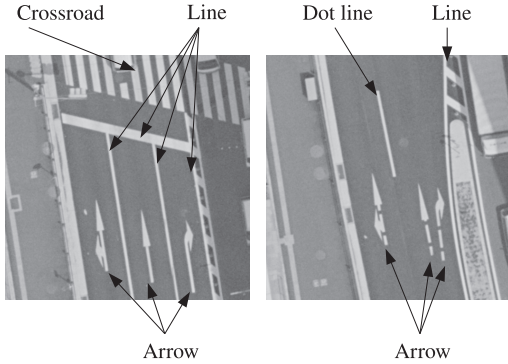


図 9 路面標示の種類

Fig. 9 Types of road markings.

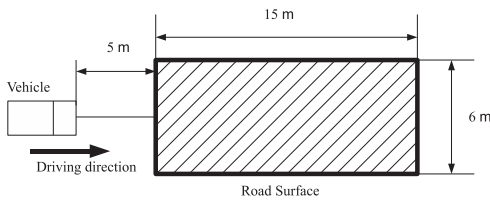


図 10 対応付けに用いた道路路面領域

Fig. 10 Road surface region used for the matching.

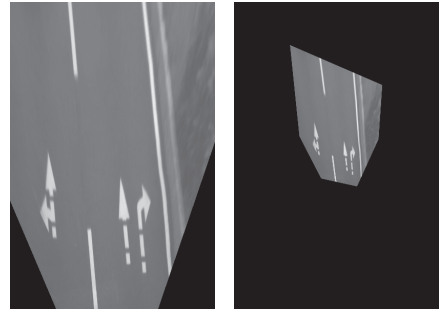
比較のため、以下の三つの手法を用いた

- **従来手法**：Pink ら [10] が用いた画像中の路面標示の重心を特徴点とし、ICP 法でその位置を対応づけた。ただし、空撮画像と対応づける車載カメラ画像は、現時刻のみの単一フレームを用いた。
- **比較手法**：提案手法と同様に路面標示のコナを特徴点とし、その位置と SURF 特徴量を用いて対応づけた。ただし、空撮画像と対応づける車載カメラ画像は、現時刻のみの単一フレームを用いた。
- **提案手法**：路面標示のコナを特徴点とし、その位置と SURF 特徴量を用いて対応づけた。ただし、空撮画像と対応づける車載カメラ画像は、現時刻を含む過去 100 フレーム（約 3 秒）を用いた。このフレーム数は予備実験 (4.4.2) により決定した。

なお、いずれの手法においても初期時刻における自車位置 \mathbf{p}_0 、及び車載カメラ画像と対応する空撮画像中の領域 \mathcal{R}_0 は人手で与えた。また、車載カメラ画像中の対応付けには、図 10 に示す道路路面の領域は自車前方 5 m 先の $6 \times 15 \text{ m}^2$ の道路領域を用いた。

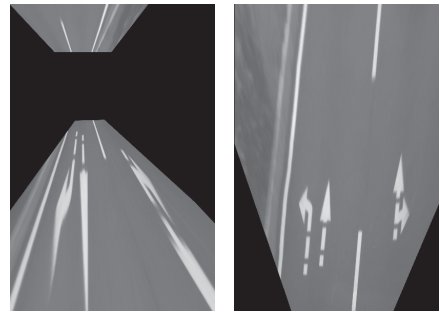
4.2 対応付けに失敗する場合

2 段階の対応付け (3.4, 3.6) において、特徴点の対応付けに失敗した場合、正しく \mathbf{M}_t 及び Σ_t を求めることができない。このとき、自車位置の推定精度が



(a) 車載カメラ画像 (俯瞰画像)

(b) 大きさの判定



(c) ねじれの判定

(d) 反転の判定

図 11 対応付け失敗例

Fig. 11 Examples of matching failures.

著しく低下し、以降のフレームにおける自車位置推定が困難となる。そのため、このような対応付けの失敗を検出し、対応付けに失敗した場合は前時刻の \mathbf{M}_{t-1} 及び Σ_{t-1} を代わりに用いた。

車載カメラ画像中に遮へいがあった場合、遮へい物体の領域から抽出された特徴点が空撮画像中の特徴点と対応づくことで、誤対応が生じる場合があった。このような誤対応は、車載カメラ画像中に遮へいが存在する系列 2 に対して従来手法では 68%、提案手法では 18% 生じた。

対応付け失敗の検出は、文献 [16] で用いられている判定方法に大きさの判定を加えることで行った。まず平面射影行列を求めるためには 4 組以上の対応点が必要であるため、 \mathbf{M}_t 及び Σ_t を求める際に初期対応付けの結果、対応点が 4 組以下ならば対応付け失敗として検出した。次に、対応付けの結果得られた \mathbf{A}_t を用いて空撮画像上に座標変換した車載カメラ画像中の道路路面領域 \mathcal{R}_t に対する以下の三つの判定基準により対応付け失敗を検出した。図 11 (a) に元の車載カメラ画像 (俯瞰画像) を示す。

- (1) 大きさの判定 (図 11 (b))： \mathcal{R}_t の面積が、初

表 3 実験結果：自車位置の平均推定誤差
Table 3 Experimental result: Average location estimation error.

Dataset	Occ.	Previous method [10]	Comparative method (Corner)	Proposed method (Corner+Sequential)
1	w/o	1.76 m	1.09 m	0.74 m
2	w/	2.93 m	2.34 m	1.47 m

期フレームにおける \mathcal{R}_0 の面積の 2 倍以上, 若しくは 0.5 倍以下である場合.

(2) ねじれの判定 (図 11 (c)) : \mathcal{R}_t の向かい合う 2 組の辺が交差している場合.

(3) 反転の判定 (図 11 (d)) : \mathcal{R}_t の符号付き面積 [17] が負である場合.

4.3 実験結果

実験結果を表 3 に示す. 道路面の遮へいを含まない系列 1 において, 自車位置の平均推定誤差が従来手法の 1.76 m から提案手法では 0.74 m に改善した. このとき, 提案手法では道路方向と直交する方向への平均推定誤差が 0.35 m となった. 市街地における車線の幅を 3.0 m としたとき, 提案手法の推定結果は系列 1 の全てのフレームにおいて車線内 (推定誤差が 1.5 m 以下) に収まった. このことから, 車線変更案内などの応用に対して有効であると考えられる.

一方, 道路面の遮へいを含む系列 2 では, 従来手法の 2.93 m から提案手法では 1.47 m に大きく改善した. このことから, 提案手法は道路面の遮へいが含まれる場合において, 特に有効であったといえる. このとき, 提案手法では道路方向と直交する方向への平均推定誤差は 0.96 m となり, 推定結果は系列 2 の 89% で車線内に収まった. この結果から, 道路面の遮へいを含む場合には走行車線の判別を誤ることが考えられるため, 更なる改善が必要である.

4.4 考 察

4.4.1 平均推定誤差の改善の要因

実験結果から, 系列 1 では平均推定誤差が従来手法 1.76 m, 比較手法 1.09 m, 提案手法 0.74 m と改善した. 平均推定誤差の改善率は従来手法から比較手法へは 38%, 比較手法から提案手法へは 32% であった. これから対応付けに用いる特徴点の違いが, 時系列の対応付け手法に比べ, 平均推定誤差の改善に貢献したことが分かる. これは, 道路面の遮へいが含まれない場合, 単一の車載カメラ画像から得られる特徴点の数が多いため, 複数の車載カメラ画像を用いる効果が比較的小さくなったためと考えられる. 一方, 系列 2 では平均推定誤差が従来手法 2.93 m, 比較手法 2.34 m, 提案手法 1.47 m と改善した. 平均推定誤差の改善率

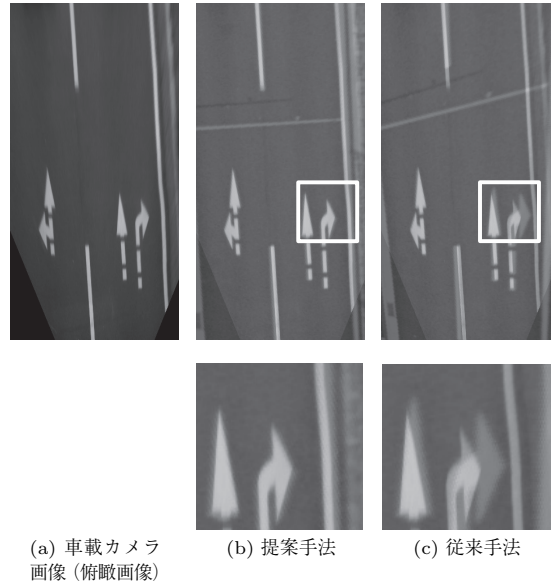


図 12 特徴点の違いによる対応付け結果
Fig. 12 Matching results.

は従来手法から比較手法へは 20%, 比較手法から提案手法へは 37% であった. これから系列 1 とは反対に時系列の対応付け手法が, 対応付けに用いる特徴点の違いに比べ, 平均推定誤差の改善に貢献したことが分かる. これは, 道路面の遮へいにより対応付けに用いる特徴点の数が減少したことに対して, 複数の車載カメラ画像を用いることの効果が大きくなったためと考えられる. 以上のことから, 道路面の遮へいの有無により, 提案手法の各アプローチがもたらす効果が異なることを確認した.

4.4.2 対応付けに用いた特徴点

提案手法及び比較手法の平均推定誤差が従来手法と比べ改善した要因として, 空撮画像と車載カメラ画像をより高精度に対応づけられたことが挙げられる. 図 12 に俯瞰画像 (図 12 (a)) と対応づいた空撮画像中の領域を示す. 図 12 (b) に提案手法による対応付け結果を, 図 12 (c) に従来手法による対応付け結果を示す. 各画像は, 対応付いた空撮画像中の領域を俯瞰画像に重畳したものである. 図 12 (b), 図 12 (c) 中の方

形で示す箇所に注目すると、提案手法では重畳した路面標示のコーナが一致しているのに対し、従来手法では大きくずれていることが分かる。これは、提案手法が路面標示のコーナそのものを用いて対応付けを行うことに対し、従来手法が路面標示の重心を用いていることが原因である。車載カメラ画像中の道路面領域は限られるため、路面標示のコーナを高精度に対応づけることにより、自車位置推定の精度も向上する。以上の結果から、提案手法で対応付けに用いた特徴点の有効性を確認した。

4.4.3 対応付けに用いる車載カメラ画像の数

時系列の車載カメラ画像を用いた対応付けの効果を示すため、空撮画像との対応付けに用いる車載カメラ画像のフレーム数を変化させて自車位置を推定した。図 13 に、系列 1 に対して推定した結果を示す。この結果は、対応付けに用いたフレーム数とそこに含まれる特徴点数の平均、及び平均推定誤差の関係を表している。この結果から、対応付けに用いるフレーム数が多くなるほど特徴点の数が増加することが分かる。また、100 フレーム程度を用いた場合に平均推定誤差が最小となった。このとき、対応付けに用いた道路面は、およそ 30 m であった。これは、一定のフレーム数以下を用いる場合は対応付けに用いる特徴点の増加に伴い、より精度良い対応点を見つけることができたと考えられる。しかし、100 フレーム以上を対応付けに用いた場合、特徴点の数は増加するものの、平均推定誤差が増加した。提案手法では、複数フレームからなる車載カメラ画像系列の対応付けを行う際に過去の対応

付け結果を用いているため、過去の対応付けの誤差が累積する。この累積誤差が原因となり、ある一定数以上のフレームを用いたとき、複数の車載カメラ画像中の特徴点と空撮画像の対応付けを平面射影変換で行うことが困難になると考えられる。

4.4.4 対応付けが困難になる場合

提案手法は、道路面の情報のみを用いて自車位置を推定しているため、一定の区間以上にわたって路面標示が存在しない場合や、前方車両との車間距離が極めて近くなり、道路面の広い範囲が遮へいされるような状況が発生した場合、複数フレームの車載カメラ画像を利用したとしても対応付けは困難となることが考えられる。また、急激な日照条件の変化が頻繁に起こる際にも、道路面からの特徴点抽出が難しくなり、対応付けが困難になることが考えられる。そのため、実用上は普及型 GPS とマップマッチングなどを用いた既存の自車位置推定手法と併用し、対応付けが可能な地点では提案手法を利用することが有効であると考えられる。本実験において既知とした初期時刻における自車位置についても同様であると考えられる。

更に、本論文では空撮画像中の道路領域には車両などによる遮へいが含まれないものとして扱ったが、実際に得られる空撮画像においては、このような遮へいが多く存在することが考えられる。このとき、車載カメラ画像と対応づけることが困難となるため、空撮画像から車両などを除去し、遮へいのない地図を事前に構築する必要がある。我々は現在、このような遮へいのない高品質な地図を構築する研究 [18] を進めている。

4.4.5 処理時間

提案手法の処理時間は、CPU : Intel Core 2 Quad Q9550 2.83 GHz、メモリ : 8 GByte の計算機で 1 フレームあたり平均 60 ミリ秒であった。提案手法では、空撮画像中の領域を絞り込みながら車載カメラ画像と対応づけるため、特徴点間の対応付け処理を高速に行うことができた。

5. むすび

本論文では、空撮画像と車載カメラ画像に共通する道路面上の路面標示を対応づけることにより高精度に自車位置を推定する手法を提案した。提案手法では、空撮画像と車載カメラ画像の対応付けに適した特徴点の抽出手法と、それらの時系列対応付け手法の改良を行った。これによって、路面標示の遮へいによって車載カメラ画像中の道路面から照合に十分な特徴が得ら

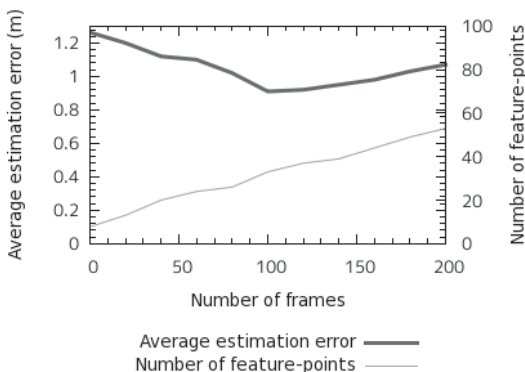


図 13 対応付けに用いるフレーム数と特徴点数及び平均推定誤差の関係

Fig. 13 Relations between the number of frames and the number of feature-points, and the average estimation error.

れない場合に推定精度が低下する問題を解決した。実験を行った結果、提案手法による自車位置推定精度が従来手法に対して大幅に改善し、提案手法の有効性を確認した。

今後は、自車位置推定に適した地図構築手法の検討、夜間や雨天などの様々な環境下における実証実験などを行う予定である。また、本論文では空撮画像からの特徴点抽出の前処理として、道路面領域を事前に切り出していたが、この処理を自動化することも今後の課題として挙げられる。

謝辞 日ごろより熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に深く感謝する。本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST 及び科学研究費補助金による。また、本研究では画像処理に MIST ライブラリ (<http://mist.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/>) を使用した。

文 献

- [1] 安田明生, “GPS 技術の展望,” 信学論 (B), vol.J84-B, no.12, pp.2082-2091, Dec. 2001.
- [2] S. Brakatsoulas, D. Pfoser, R. Salas, and C. Wenk, “On map-matching vehicle tracking data,” Proc. 32nd Conf. on Very Large Data Bases, pp.853-864, Sept. 2005.
- [3] B.-F. Francisco, O. Alberto, and O. Gabriel, “Visual navigation for mobile robots: A survey,” J. Intelligent & Robotic Systems, vol.53, pp.263-296, 2008.
- [4] 王 金戈, 小野晋太郎, 池内克史, “時系列高さ画像の提案とそれを用いた車載カメラ画像と建物モデル間の対応付け,” 信学論 (D), vol.J92-D, no.8, pp.1197-1207, Aug. 2009.
- [5] H. Uchiyama, D. Deguchi, T. Takahashi, I. Ide, and H. Murase, “Ego-localization using streetscape image sequences from in-vehicle cameras,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2009, pp.185-190, June 2009.
- [6] S. Ikeda, T. Sato, K. Yamaguchi, and N. Yokoya, “Construction of feature landmark database using omnidirectional videos and gps positions,” Proc. Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.249-256, Aug. 2007.
- [7] 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和, “拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定,” 信学論 (D), vol.J92-D, no.8, pp.1440-1451, Aug. 2009.
- [8] S. Saito, A. Hiyama, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Indoor markerbased localization using coded seamless pattern for interior decoration,” Proc. IEEE Virtual Reality, pp.67-74, March 2007.
- [9] G. Bleser, H. Wuest, and D. Stricker, “Online camera pose estimation in partially known and dynamic scenes,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.56-65, Oct. 2006.
- [10] O. Pink, F. Moosmann, and A. Bachmann, “Visual features for vehicle localization and ego-motion estimation,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2009, pp.254-260, June 2009.
- [11] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L.V. Gool, “SURF: Speeded up robust features,” Computer Vision and Image Understanding, vol.110, no.3, pp.346-359, 2008.
- [12] C. Harris and M. Stephens, “A combined corner and edge detector,” Proc. 4th Alvey Vision Conf., pp.147-151, June 1988.
- [13] B. Lucas and T. Kanade, “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” Proc. 7th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp.674-679, Aug. 1981.
- [14] R.J. Rousseeuw and A.M. Leroy, Robust regression and outlier detection, pp.216-247, John Wiley & Sons, 1986.
- [15] Applanix Corp., “POSLV (<http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html>),” 2005.
- [16] 市村直幸, “局所不変特徴量に基づく複数広告看板の認識,” 情処学研報. 2005-CVIM-151, pp.123-130, Nov. 2005.
- [17] T. Moller and E. Haines, Real-time rendering, 2nd ed., A.K. Peters, 2002.
- [18] M. Noda, T. Takahashi, D. Deguchi, I. Ide, H. Murase, Y. Kojima, and T. Naito, “Road image update using in-vehicle camera images and aerial image,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2011, pp.460-465, June 2011.

(平成 23 年 3 月 8 日受付, 8 月 6 日再受付)



野田 雅文 (学生会員)

平 19 名大・工・情報卒。平 21 同大学院情報科学研究科博士前期課程了。修士(情報科学)。現在、同大学院情報科学研究科メディア科学専攻博士後期課程在学中。



高橋 友和 (正員)

平 9 茨城大・工・情報卒。平 12 同大学院理工学研究科博士前期課程了。平 15 同研究科博士後期課程了。博士(工学)。同年より 2 年間名古屋大学大学院情報科学研究科 COE 研究員。平 17 より 3 年間日本学術振興会特別研究員。平 20 より岐阜聖徳学園大学経済情報学部准教授, 現在に至る。画像認識の基礎研究並びにその応用に興味をもつ。画像電子学会会員。



出口 大輔 (正員)

平 13 名大・工・情報卒. 平 18 同大学院博士後期課程了. 博士 (情報科学). 平 16~18 まで日本学術振興会特別研究員. 平 18 名大大学院情報科学研究科研究員, 平 18 名大大学院工学研究科研究員, 平 20 より同大助教, 現在に至る. 主に画像処理・パターン認識技術の開発とその ITS 及び医用応用に関する研究に従事. CARS 2004 Poster Award, CADM 2004 大会賞, 平 18 日本医用画像工学会奨励賞, 平 18 日本コンピュータ外科学会講演論文賞, 日本医用画像工学会, 日本コンピュータ外科学会, 日本生体医工学会各会員.



内藤 貴志 (正員)

昭 62 名大・工・電子機械卒, 平元同大学院修士課程了. 同年 (株) 豊田中央研究所入社. 以来, ロボット及び自動車への画像処理技術応用の研究と開発に従事. 現在, 同所安全・情報システム研究部走行環境認識研究室所属. ロボット学会会員.



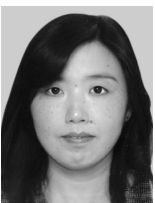
井手 一郎 (正員: シニア会員)

平 6 東大・工・電子卒. 平 8 同大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程了. 平 12 同研究科電気工学専攻博士課程了. 博士 (工学). 同年国立情報学研究所助手. 平 16 名古屋大学大学院情報科学研究科助教授, 平 19 より准教授. この間, 平 14~16 総合研究大学院大学数物科学研究科助手併任, 平 16~22 情報・システム研究機構国立情報学研究所客員助教授・准教授兼任, 平 17, 18, 19 フランス情報学・統計システム研究所 (IRISA) 招聘教授. 平 22~23 オランダアムステルダム大学情報学研究科上級訪問研究員. パターン認識技術の実応用や映像メディア処理全般に興味をもっている. 情報処理学会, 映像情報メディア学会, 人工知能学会, 言語処理学会, IEEE Computer Society, ACM 各会員.



村瀬 洋 (正員: フェロー)

昭 53 名大・工・電気卒. 昭 55 同大学院修士課程了. 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社. 平 4 から 1 年間米国コロロンビア大客員研究員. 平 15 から名古屋大学大学院情報科学研究科教授, 現在に至る. 文字・図形認識, コンピュータビジョン, マルチメディア認識の研究に従事. 工博. 昭 60 本会学術奨励賞, 平 6 IEEE-CVPR 最優秀論文賞, 平 7 情報処理学会山下記念研究賞, 平 8 IEEE-ICRA 最優秀ビデオ賞, 平 13 高柳記念奨励賞, 平 13 本会ソサイエティ論文賞, 平 14 本会業績賞, 平 15 文部科学大臣賞, 平 16 IEEE Trans. MM 論文賞, 他受賞. IEEE フェロー, 情報処理学会会員.



小島 祥子 (正員)

平 5 名大・工・電気卒. 平 7 同大学院工学研究科修士課程了. 同年 (株) 豊田中央研究所入社. 自動車への画像処理技術応用の研究に従事. 平 14 情報処理学会山下記念研究賞, 同年情報処理学会論文賞受賞. 情報処理学会会員.