

E-4H (I 2-2)

低解像度空撮画像と車載カメラ画像を用いた道路画像地図の構築

Road-image Map Construction Using Low-resolution Aerial Image and In-vehicle Camera Images

野田 雅文¹ 高橋 友和^{1,2} 出口 大輔¹ 井手 一郎¹

村瀬 洋¹ 小島 祥子^{1,3} 内藤 貴志³

Masafumi NODA¹, Tomokazu TAKAHASHI^{1,2}, Daisuke DEGUCHI¹, Ichiro IDE¹

Hiroshi MURASE¹, Yoshiko KOJIMA^{1,3} and Takashi NAITO³

¹ 名古屋大学 ² 岐阜聖徳学園大学 ³ 株式会社 豊田中央研究所

mnodea@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

概要: 自動車の運転支援に対して自動車の走行領域である道路情報は重要である。この道路領域の画像地図(道路画像地図)はデジタル地図の構築や画像ベースの自車位置推定などに利用できる。しかしながら、これらの目的を十分な精度で達成するためには、高解像度な道路画像地図を構築する必要がある。そこで本発表では、低解像度な空撮画像と車載カメラ画像を用いて高解像度な道路画像地図を構築する手法を提案する。提案手法では、低解像度な空撮画像と高解像度な車載カメラ画像のイメージレジストレーションを行い、車載カメラ画像をモザイクキングすることにより道路画像地図を構築する。実験の結果、約3cm/pixel-約60cm/pixelの空撮画像から約1cm/pixelの高解像度な道路画像地図を構築できることを確認した。

1 はじめに

1.1 研究の背景

自動車の運転支援技術の一つとして、高度カーナビの開発が望まれている。運転支援に対して自動車の走行領域である道路情報は重要である。本研究では図1に示すような空撮画像中の道路領域の画像地図を道路画像地図と呼び、これを利用することで従来よりも高度なナビゲーションの実現を目指す。道路画像地図は、走行領域や制限速度などの案内情報を埋め込んだデジタル地図の構築や、車両に搭載されたカメラから撮影された画像(車載カメラ画像)と道路画像地図を対応付けることによる自車位置推定[1, 2]などに利用できる。これらの目的を十分な精度で達成するためには、高解像度な道路画像地図が必要となる。このような道路画像地図を構築する方法として、空撮画像から道路領域を抽出することが考えられる[3]。しかしながら、図2のように空撮画像が低解像度である箇所では、道路画像地図構築への利用が難しい。

そこで、本研究では空撮画像および車載カメラ画像を併用することによって道路画像地図を構築

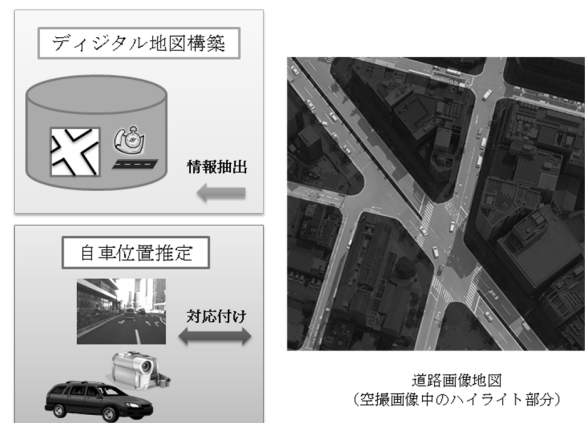


図1: 道路画像地図の利用

する。

1.2 関連研究

車載カメラ画像を用いて道路画像地図を構築する研究として、Geigerら[4]は時系列の車載カメラ画像から自車の動きを推定し、車載カメラ画像中の道路領域をモザイクキングする手法を提案している。しかしながら、この手法は広範囲の地図を構築する際に、自車の動き推定の累積誤差が大き



図 2: 低解像度の空撮画像 (GoogleMaps より引用)



図 3: 道路領域が高解像度な車載カメラ画像 (道路領域をハイライトで示す)

くなるという問題がある。

一方、モザイクング対象とする領域全体を撮影した低解像度な画像を位置合わせの基準とし、時系列の画像を対応付けることで元の低解像度な画像を高解像度化する手法 [5] が提案されている。本研究と特に関連する研究として、低解像度な衛星画像を基準とし、無人航空機 (UAV; Unmanned Aerial Vehicle) から撮影した高解像度な空撮画像をモザイクングする手法 [6, 7] が提案されている。これらの手法は、ともに地平面を上空から撮影した見た目の近い衛星画像と空撮画像を対象とする。一方、本研究では視点の違いにより画像の見た目が大きく異なる空撮画像と車載カメラ画像を対象とするため、これらの手法をそのまま適用することは困難である。

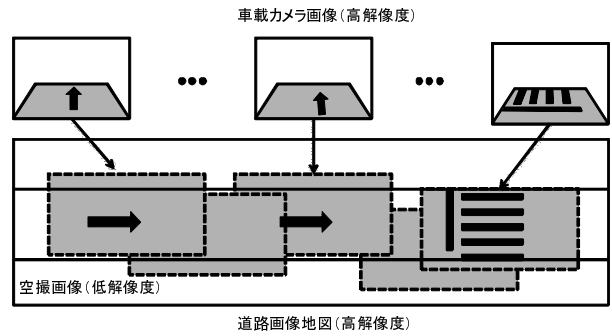


図 4: 道路画像地図構築の概要

空撮画像と車載カメラ画像を対象としたものとして、我々 [1] や Pinkら [2] はこれらの画像を対応付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。これらの手法では、それぞれの画像の道路領域から視点の位置に依存しない特徴点を検出し、画像間の対応付けに利用している。しかしながら、本研究では低解像度な空撮画像を対象とするため、特徴点の検出が困難となる。

そこで本研究では、画像中の道路領域全体をイメージレジストレーションにより対応付ける。また、ある時刻の車載カメラ画像と空撮画像を対応付ける際、その前後の対応付け結果を利用することによって、画像間の安定した対応付けを実現し、高品質な地図を構築する。

2 道路画像地図の構築

図 4 に提案手法の概要を示す。提案手法では、低解像度な空撮画像を位置合わせの基準として車載カメラ画像中の道路領域をモザイクングすることで道路画像地図を構築する。モザイクングを行う際、各時刻で車載カメラ画像を撮影した車両の位置・姿勢が必要となるため、空撮画像から構築した道路モデルと車載カメラ画像のイメージレジストレーションを行うことでこれらを求める。

以降、提案手法で用いる道路モデルおよび車両モデルについて述べ、次に道路画像地図の構築手法について述べる。

2.1 道路モデルおよび車両モデル

本節では、提案手法により道路画像地図を構築するために用いる道路モデルおよび車両モデルに

ついて述べる．

2.1.1 道路モデル

空撮画像から道路モデルを構築し，車載カメラ画像との対応付けに用いる．道路モデルは，空撮画像中の道路領域を抽出し，3次元空間中の平面として構築する．道路の標高データが得られる場合は，曲面の道路モデルを構築することも可能であるが，ここでは平面の道路モデルのみを扱う．また，空撮画像中の道路領域の抽出は手動で行う．なお，空撮画像中には道路面を遮蔽する車両などは存在しないものと仮定する．

2.1.2 車両モデル

図5に示すように，自車の3次元空間中の位置（並進パラメータ） $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ と姿勢（回転パラメータ） $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$ を用いて車両モデルを定義する．ただし，車両とカメラは単一の剛体とみなす．

2.1.3 仮想車載カメラ画像

道路モデルと車両モデルを用いることにより，図6に示すように空撮画像中のある道路領域を仮想の車載カメラ画像（以下，仮想車載カメラ画像）として得ることができる．本研究ではこのような仮想車載カメラ画像を実際的車載カメラ画像との対応付けに用いる．

仮想車載カメラ画像中の画素の位置 (x, y) は，道路モデルの点 (X, Y, Z) と変換行列 \mathbf{M} により対応付く．同次座標表現を用いると， (x, y) と (X, Y, Z) は次式の関係となる．

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

\mathbf{M} は，車両モデルのパラメータ \mathbf{p}, \mathbf{r} ，およびカメラの内部パラメータ（画角，焦点距離）から求める．

2.2 提案手法の流れ

車載カメラ画像系列の各時刻 t に対応する車両の位置・姿勢 $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を求め，これらを用いて車載

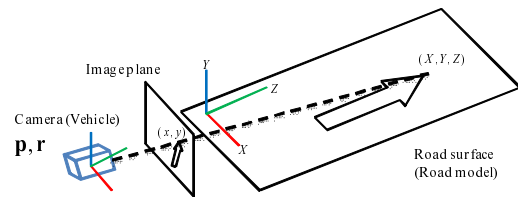


図5: 道路モデルと車両モデル

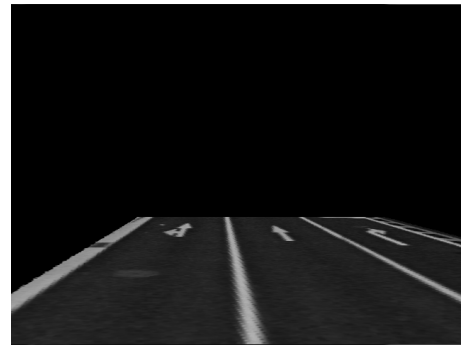


図6: 仮想の車載カメラ画像

カメラ画像中の道路面領域のモザイクングを行い，道路画像地図を構築する．具体的には，車載カメラ画像と仮想車載カメラ画像を時系列にイメージレジストレーションし，全ての時刻の $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を求める．このとき，イメージレジストレーションは各時刻で独立に行うため，連続する $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ に不連続となる場合がある．このため，前後の結果を用いて $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を補正する．

2.2.1 車載カメラ画像間のイメージレジストレーション

車載カメラ画像（図7(a)）と仮想車載カメラ画像（図7(b)）を図7(c)に示すように重ねあわせたとき，画像間の類似度が最大となるような車両の位置・姿勢を求める．本研究では，両画像間の輝度の違いに対応するため，類似度として正規化相互相関を用いる．ただし，類似度を求める領域は道路領域のみとする．道路面の対応付けを行う際は，輝度が高い路面標示領域が特に重要となることから，両画像に対してしきい値処理を施すことで一定の輝度以上を持つ画素のみを対応付けに用いる．

車載カメラ画像を I_t ，仮想車載カメラ画像を J_t とする． J_t は，適当な $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を初期値として与え

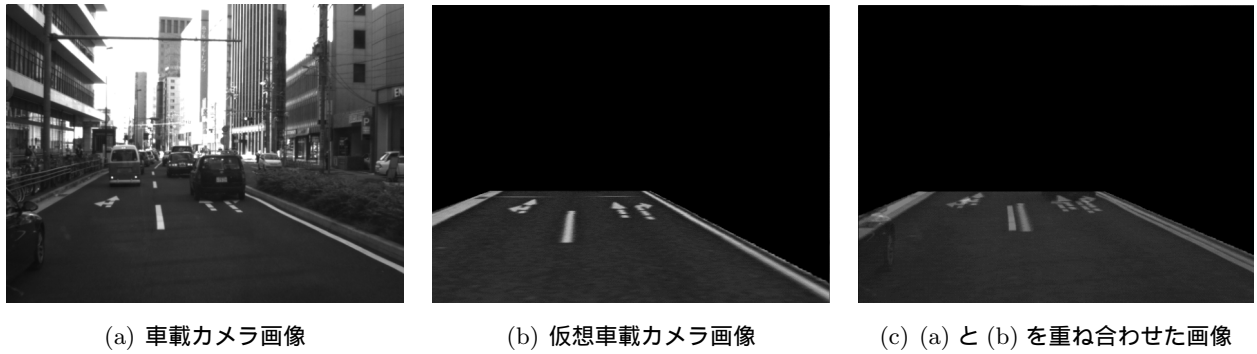


図 7: 車載カメラ画像間の対応付け

ることにより得る．次に，両画像に対してしきい値処理を行うことにより得られた画像を I'_t, J'_t とする．そして，以下の目標関数 $f(\cdot)$ を最大化する $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を求める．

$$f(\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t) = \frac{\sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{R}} I'_t(\mathbf{x}) J'_t(\mathbf{x})}{\sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{R}} I'_t(\mathbf{x}) \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{R}} J'_t(\mathbf{x})} \quad (2)$$

ここで， \mathcal{R} は車載カメラ画像中の道路領域を表し，仮想車載カメラと車載カメラ画像中の道路モデルの平面が存在する領域として定義する．また， $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ の初期値として前時刻に推定した $\mathbf{p}_{t-1}, \mathbf{r}_{t-1}$ を与える． $\mathbf{p}_0, \mathbf{r}_0$ に対する初期値は，手動で与える．

2.2.2 車両パラメータの補正

車両の運動は滑らかであると仮定し，対象フレームを含めた前後フレームにおいて推定結果の重み付き平均を取ることで，車両の位置・姿勢を補正する．

2.2.3 道路領域のモザイクング

各時刻で求めた $\mathbf{p}_t, \mathbf{r}_t$ を用いて，車載カメラ画像中の道路領域の画素と対応する道路モデル上の座標値を得る．座標値の取得には図 5 に示す関係を利用する．そして，その座標値に対して車載カメラ画像の画素値を割り当てる．これを時系列順に全ての車載カメラ画像に対して行うことで，モザイクングを行う．この結果，道路画像地図を構築することができる．

3 実験

3.1 実験条件

本実験で利用した車載カメラ画像は，解像度が 640×480 pixels，フレームレート 30fps であった．対象とした区間は約 80m であり，330 フレームからなった．また，車載カメラ画像は晴天時の昼間に撮影したものをを用い，自車直前の道路領域（前方 20m 程度）には前方車両などの障害物は存在しなかった．図 8 に車載カメラ画像系列の一部を示す．空撮画像は解像度が約 3cm/pixel のものを以下のように低解像度化して用いた．

1. 約 3cm/pixel（低解像度化なし）
2. 約 10cm/pixel
3. 約 30cm/pixel
4. 約 60cm/pixel
5. 約 100cm/pixel

これらの車載カメラ画像と空撮画像を用いて，道路画像地図を構築した．

評価指標として，道路画像地図の解像度，初期フレームからの追跡成功フレーム数，および基準点位置の精度を用いた．追跡成功フレーム数は，初期フレームから追跡が成功したフレーム数を表す．これは，車載カメラ画像と仮想車載カメラ画像のイメージレジストレーションのずれを目視により判断し，ずれが大きくなったフレームを追跡失敗とすることで求めた．基準点位置の誤差は，元の空撮画像に対する位置合わせの精度を表し，これを手動でプロットした基準点（路面標示のコーナなど）の真値に対する平均誤差と標準偏差により評価した．



図 8: 車載カメラ画像系列

表 1: 実験結果

空撮画像の解像度	追跡成功フレーム数	基準位置の誤差	
		平均	標準偏差
約 3 cm/pixel	330	31.6 cm	37.9 cm
約 10 cm/pixel	330	35.6 cm	54.8 cm
約 30 cm/pixel	250	25.8 cm	26.3 cm
約 60 cm/pixel	200	26.4 cm	20.3 cm
約 100 cm/pixel	0	-	-

3.2 実験結果と考察

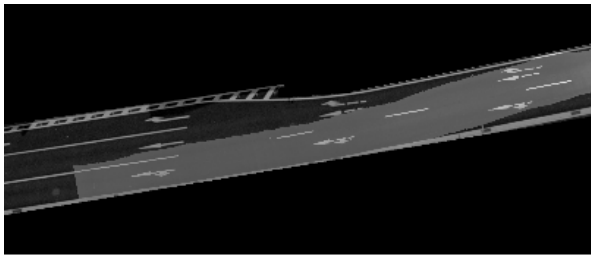
図 9 に道路画像地図の構築結果を示す。図 9 は、追跡成功フレームにおける車載カメラ画像中の道路領域のモザイクング結果を空撮画像に重畳したものである。ここでは、構築した道路画像地図の輝度を空撮画像と変えて表示している。提案手法では、空撮画像の解像度に関わらず、最大で約 1cm/pixel の解像度へと高解像度化することができた。ただし、空撮画像の解像度が約 100cm/pixel である場合、初期フレームにおけるイメージレジストレーションが失敗したため、道路画像地図は構築できなかった。高解像度化できる理由は、車載カメラ画像の自車直前の高解像度な領域が道路画像地図の構築に用いられるためである。また、車載カメラ画像中には前方車両が自車から一定の距離に存在したが、構築した道路画像地図中には現れなかった。これも同様に自車直前の領域が用いられるためである。

表 1 に各解像度に対する追跡成功フレーム数、基準点位置の精度を示す。この表から約 30cm/pixel 以上の解像度がある場合、系列全体を追跡可能であった。一方、約 60cm/pixel 以下の場合、系列全体の追跡ができず、200 フレームで追跡に失敗した。提案手法では、ある時刻でイメージレジストレーションにより求めた車両モデルのパラメータ

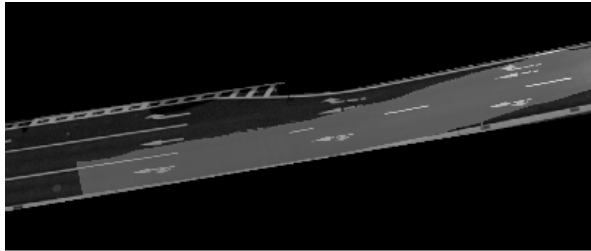
を次の時刻の初期値として与えた。このとき、イメージレジストレーションの誤差が大きい場合、適切な初期値が与えられないことが追跡失敗の要因となった。空撮画像の解像度が低い場合、イメージレジストレーションの誤差が大きくなりやすいため、追跡の失敗も起こりやすと考えられる。このような場合には系列全体を小区間に分割して、各区間でイメージレジストレーションの初期値を与えることで、長い系列に対応できると考えられる。

また、表 1 から、空撮画像の解像度に関わらず同程度の位置合わせ精度が得られていることが分かった。なお、基準点は追跡が成功したフレームから構築した道路画像地図の領域から 70 点 ~ 90 点程度をプロットした。これから、車載カメラ画像と同程度の解像度を持ち、基準点位置の平均誤差が 30cm 程度の道路画像地図を構築できることを確認した。これは、構築した道路画像地図と車載カメラ画像を正しく対応付けられるならば、車線内 (約 1.5m 以下) の自車位置の推定 [1] が可能であることを示す。また、空撮画像が低解像度である場合と比べ、高解像度である場合に基準点の位置精度が低下する理由として、高解像度の場合には構築される道路画像地図が広範囲になり、位置合わせする箇所が増加するため、高精度に構築することが難しくなると考えられる。

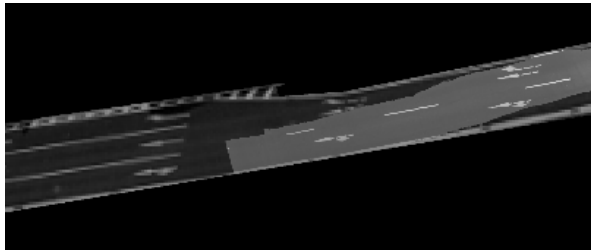
図 10 に、空撮画像および構築した道路画像地図



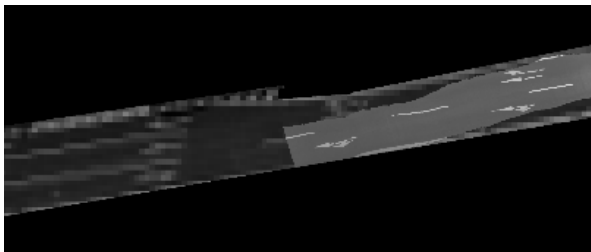
(a) 約 3cm/pixel



(b) 約 10cm/pixel



(c) 約 30cm/pixel

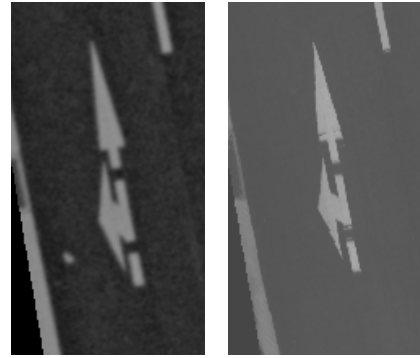


(d) 約 60cm/pixel

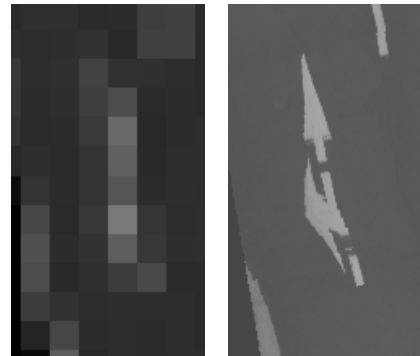


(e) 約 100cm/pixel : 空撮画像 (道路画像地図は構築失敗)

図 9: 道路画像地図構築結果: 車両は画像中の道路上を右から左に走行.



(a) 約 3cm/pixel : (左) 空撮画像 (右) 道路画像地図構築結果



(b) 約 60cm/pixel : (左) 空撮画像 (右) 道路画像地図構築結果

図 10: 拡大図

中の路面標示を拡大したものを示す. この図から, 空撮画像では輪郭がぼけていた路面標示が, 道路画像地図では輪郭が鮮明になっていることが分かる. 特に, 解像度が約 60cm/pixel の空撮画像では形状が視認できなかった路面標示が道路画像地図でははっきりと視認できた. しかしながら, 路面標示の形状が一部歪んだり, 途切れたりする箇所が見られた (図 10(b)). これは, 車両位置・姿勢の推定結果に対するフレーム間の補正が十分でなかったことが要因として考えられる. このため, 今後イメージレジストレーション手法の改良, 補正手法の改良が必要であろう.

3.3 その他の問題

提案手法では道路領域のモザイクングを行なうため, 車載カメラ画像中の道路領域を遮蔽する物体の存在が問題となる. 具体例として, 駐車車両やポールなどが挙げられる. これらに対して, 車載カメラ画像から遮蔽物を検出して除去する必要

がある．これは画像のみで行うことは難しいため，距離センサなどの異なる情報を併用することも考えられる．

4 まとめ

本発表では，低解像度な空撮画像と車載カメラ画像を用いて高解像度な道路画像地図の構築する手法を提案した．提案手法では，低解像度な空撮画像を基準として，各時刻で車載カメラ画像とイメージレジストレーションを行い，その結果を用いて車載カメラ画像中の道路領域のモザイクングを行った．実験の結果，提案手法により高解像度の道路画像地図を構築できることを確認した．今後の課題として，イメージレジストレーション手法の改良，全体最適化によるレジストレーション結果の補正手法の検討，より広範囲の道路画像地図の構築実験などが挙げられる．

謝辞

日頃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 およ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．

参考文献

- 1) M. Noda, T. Takahashi, D. Deguchi, I. Ide, H. Murase, Y. Kojima and T. Naito: “Vehicle ego-localization by matching in-vehicle camera images to an aerial image”, Proc. ACCV2010 Workshop on Computer Vision in Vehicle Technology: From Earth to Mars, pp. 1–10 (2009).
 - 2) O. Pink, F. Moosmann and A. Bachmann: “Visual features for vehicle localization and ego-motion estimation”, Proc. Intelligent Vehicles Symp., pp. 254–260 (2009).
 - 3) I. Laptev, H. Mayer, T. Lindeberg, W. Eckstein, C. Steger and A. Baumgartner: “Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes”, Machine Vision and Applications, **12**, pp. 23–31 (2000).
 - 4) A. Geiger: “Monocular road mosaicing for urban environments”, Proc. 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 140–145 (2009).
 - 5) M. Irani and S. Peleg: “Improving resolution by image registration”, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, **53**, 3, pp. 231–239 (1991).
 - 6) F. Caballero, L. Merino, J. Ferruz and A. Ollero: “Unmanned aerial vehicle localization based on monocular vision and online mosaicking”, J. Intelligent Robotics System, **55**, pp. 323–343 (2009).
 - 7) A. Camargo, R. R. Schultz and Q. He: “Super-resolution mosaicking of unmanned aircraft system (UAS) surveillance video using Levenberg Marquardt (LM) algorithm”, Proc. Int. Symp. on Visual Computing, pp. 698–706 (2010).
- 野田 雅文：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．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：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ならびにその応用に興味を持つ．電子情報通信学会会員．画像電子学会会員．
- 出口大輔：2001 年，名大・工・情報卒．2006 年，同大学院博士後期課程修了．2004 年～2006 年まで日本学術振興会特別研究員．2008 年より名古屋大学大学院情報科学研究科助教．博士（情報科学）．画像処理・パターン認識技術の開発とその ITS および医用応用に関する研究に従事．

井手一郎：1994年，東大・工・電子卒．2000年，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．2004年，名古屋大学大学院情報科学研究科助教授，2007年より准教授．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持っている．

村瀬洋：1978年，名大・工・電気卒．1980年，同大学院修士課程了．同年，日本電信電話公社（現NTT）入社．2003年，名古屋大学大学院情報科学研究科教授．工学博士．画像処理，パターン認識の研究に従事．

小島 祥子：平5名大・工・電気卒．平7同大学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．電子情報通信学会会員．情報処理学会会員．

内藤 貴志：昭62名大・工・電子機械卒、平1同大学院修士課程了．同年（株）豊田中央研究所入社．以来、ロボットおよ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．電子情報通信学会会員．ロボット学会会員．