

ステレオ動画像を用いた視覚誘導のための平坦部の連続推定

奥 富 正 敏[†] 中 野 勝 之[†]
丸 山 純 一[†] 原 智 章[†]

本論文では、自律移動車の視覚誘導等への利用を目指し、ステレオ動画像を用いて、空間中の平坦部に対応した領域を、画像から抽出する手法を提案する。本手法では、ステレオ画像間の射影変換行列を、そのつど推定し利用することで、路面の傾斜や車両の傾き等に対しても対応可能である。また、2台のカメラから同時刻に得られる画像間の射影変換に加え、撮影時刻の異なる画像間における射影変換も求め、加えて、前時刻における射影変換と平面領域の推定結果を積極的に利用することで、処理の安定化を図っている。また、テクスチャのない領域に対して誤判定を防ぐための処理も行う。走行中の車両から実際に撮影したステレオ動画像を用いた実験結果を示し、本手法の有効性を示す。

Continuous Estimation of Planar Region for Visual Navigation Using Sequential Stereo Images

MASATOSHI OKUTOMI,[†] KATSUYUKI NAKANO,[†] JUNICHI MARUYAMA[†]
and TOMOAKI HARA[†]

In this paper, we propose a robust method to estimate planar regions using sequential stereo images for visual navigation of an autonomous vehicle. The proposed method estimates projective transformations, which represent the plane in space, for both stereo images and sequential images. This can be done robustly by utilizing sequential information, i.e. previous estimation of both the transformations and the planar region. Also, the method to prevent misdetection due to "textureless" is presented. The experimental results, using sequential stereo images taken from a moving vehicle, show that the proposed method can work robustly even in the conditions of undulation of the road and rolling and pitching of the vehicle.

1. はじめに

自律移動車の誘導において、視覚による走行環境の認識、特に走行可能な領域の検出は、重要な技術であり、さまざまな手法が提案されている。

それらは、単眼による方法と、複眼を用いる方法に分けることができる。従来の手法の多くは単眼、すなわち1つの視点から得られる画像を用いるもので、主に、高速道路等の整備された環境で用いることを想定し、路面の白線等を検出することにより、走行領域を検出している^{3),8)}。しかしながら、白線等の存在が保証されず、また路面の色やパターンがさまざまであるような一般道や駐車場等では、単眼画像に投影された濃度パターンのみから、走行可能領域と障害物を安

定に区別することは困難である。

一方、複眼による方法、すなわちステレオ画像を利用する方法では、原理的には環境の3次元構造を利用できるため、より安定に走行環境を認識できる可能性がある。特に、走行可能な領域は空間中でほぼ平面であると見なせることから、画像を2次元射影変換し、各画像の重なり具合から、平面領域か否か(障害物か)を検出するという方法が提案されている^{4),7),10),11)}。

このとき、カメラと平面の位置関係がつねに一定であれば、あらかじめキャリブレーションすることにより、同一の射影変換を行うことができる。しかし、走行面が傾斜したり、移動にともなって車体が傾いたりするため、一般には固定された射影変換で対処するこ

ここでは、障害物に衝突したりせずに自律移動車が走行可能な領域という意味で、走行可能領域とっており、必ずしも走行してよい領域を意味するものではない。
各文献においては、必ずしも射影変換という形式で出てくるわけではなく、より限定された表現になっていることもある。

[†] 東京工業大学大学院情報理工学研究所
Graduate School of Information Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

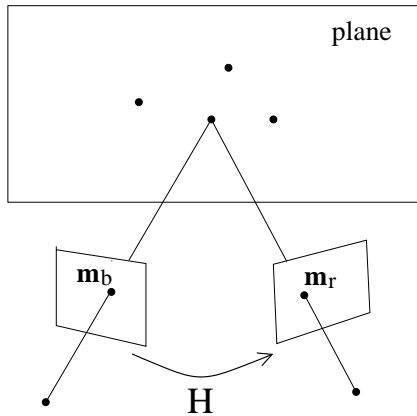


図1 平面の投影と2次元射影変換

Fig. 1 Projection of a plane and 2-D projective transformation.

とは困難である。そこで、画像からそのつど用いる射影変換を更新する必要が生じ、そのための手法も提案されている^{1),2),5),6)}。

筆者らはすでに、ロバスト推定を利用して、各時刻ごとに射影変換行列を求める手法^{5),6)}を提案しているが、本論文では特に、ステレオ動画画像から得られる時系列情報を利用することにより、より安定に、射影変換行列と平面領域を連続的に推定する手法を提案する。以下、本論文では、2章で本提案手法の基本原則と概要を述べる。3章では、ステレオ動画画像を用いて、射影変換行列を安定に求めるための方法を詳しく説明する。次いで4章では、得られた射影変換行列を利用して、画像中から平面領域を抽出する方法を述べる。そして5章において、走行中の車両から撮影された実動画像を用いた実験結果を示す。

2. 提案手法の概要

よく知られているように、空間中のある平面上の点が2枚のステレオ画像に投影されるとき(図1)、ステレオ画像における基準画像 I_b 上での同次座標を m_b 、参照画像 I_r 上での同次座標を m_r とすると、各々は以下に示すように、2次元射影変換によって関係付けられる。

$$m_r \simeq H m_b \quad (1)$$

ここで、 H は 3×3 の行列であり、 \simeq は定数倍の不定性を許して等しいことを表す。

そこで、道路等の走行可能な領域は、空間中でほぼ平面であると見なすことができると仮定すれば、一方の画像に対し適当な射影変換を施すことにより、平面の部分に対しては一致するような画像が得られる。図2にその様子を示す。図で、(a)、(b)は入力された

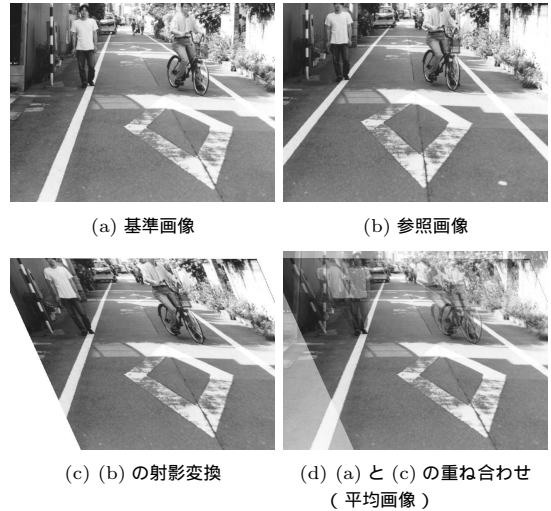


図2 射影変換と平面領域推定の原理

Fig. 2 Principle for detecting planar region using projective transformation.

ステレオ画像であり、(c)は参照画像に対して式(1)の H を用いて、射影変換した画像である。平面領域の一致具合を見るため、(d)に(a)と(c)の2枚の画像を重ね合わせ、平均値を求めた画像を示す。図より、画像中道路に対応する領域に対しては、両画像がよく一致しているが、それ以外の壁や障害物に対しては、2つの画像でずれが生じていることが分かる。提案手法では、この性質を利用して、入力された画像中から、走行可能な空間中の平面領域を抽出する。

ここで、どのように射影変換を表す行列を求めるかということが重要になる。前章でも述べたとおり、走行面自体が傾いたり、走行中にカーブや路面の凹凸で車体が傾斜したり、カメラが振動したりするため、射影変換行列は一定ではなく、そのつど画像から求め直す必要がある。

一般に画像から射影変換行列を求める手法は、特徴ベースの手法と、領域ベースの手法の2通りに分けることができる。特徴ベースの手法は、画像から特徴点を抽出し、2枚の画像の最低4点以上の特徴点の対応から射影変換行列を求めるものである。この手法の問題は、いかに特徴点の正しい対応付けを行うかということで、かつ、その特徴点は平面に対する画像領域内から抽出されたものでなければならない、ということにある。筆者らはすでに、この問題に対し、breakdown point を可変にしたロバスト推定を利用した手法を提案している^{5),6)}。

一方、領域ベースの手法は、片方の画像の全部あるいは一部の領域を射影変換した結果、それがもう一

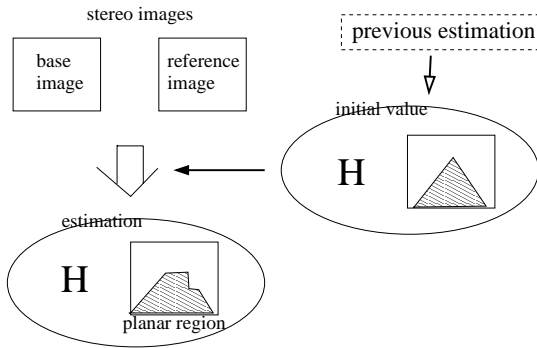


図3 時系列情報の利用

Fig. 3 Using sequential information.

方の画像に最も合う（濃度パターンが一致する）ときの射影変換行列を求めるものである⁹⁾。この場合、画像間の点ごとの対応付けは行わず、いわば領域全体のマッチングを行うことになるため、より安定した射影変換の推定が行えることが期待できる。ただし、推定には非線形な最適化を必要とするため、誤ったローカルミニマムに陥ることを防ぐには、適当に近い初期値から始める必要があり、かつ、計算に用いる領域も、求めたい射影変換行列に対する平面にほぼ対応したものでなければならない。

本論文で提案する手法では、時系列情報を利用することでこの問題を解決する。すなわち、時間的に連続した画像間では、射影変換行列と画像中の平面領域ともに、それほど大きくは変化しないと考えられるため、前時刻で推定された射影変換行列と平面領域を利用して、現時刻の推定のための初期値と計算領域を得る（図3）。

また本手法では、同時刻に撮影されたステレオ画像間の射影変換行列に加え、同一のカメラで時刻を隔てて撮影された画像間の射影変換をも推定する。それは、時間経過による画像上の位置の移動を表すので、前時刻で得られた平面領域抽出結果から、現時刻での平面領域を予測することができる。それをを用いることで、上述の計算領域をより妥当なものとしたり、また、現時刻の平面領域推定の際に、前時刻からの変動を制限することで、より安定な結果を得たりすることができる。

次章では、時系列のステレオ画像を利用した、射影変換行列の推定法について具体的に説明する。ただし、前時刻の結果が利用できない最初の時刻の射影変換行列推定には、筆者らが以前提案した手法^{5),6)}を一部改良して用いている。



(a) 基準画像 (b) 参照画像

図4 ステレオ原画像

Fig. 4 Original stereo images.

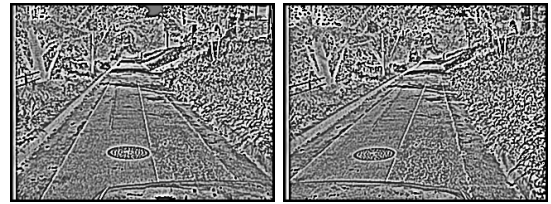


図5 LOGフィルタ+ヒストグラム平坦化

Fig. 5 LOG filtering and histogram equalization.

3. ステレオ動画をを用いた射影変換行列の推定

まず入力された画像は、カメラ間の明るさの違い等を除くため、LOGフィルタをかけ、さらにヒストグラム平坦化処理を施す。図4に入力されたステレオ原画像の一例を、図5には、その処理後の画像を示す。

次いで、領域ベースの手法により、平面に対応する射影変換行列を求める。すなわちある領域 R^I 内で、以下の評価関数 $e(H)$ を最小化する H を、繰返し最適化により求める⁹⁾。

$$e(H) = \sum_{\mathbf{m}_b \in R^I} \{I_r(H\mathbf{m}_b) - I_b(\mathbf{m}_b)\}^2 \quad (2)$$

ただし、 $I_b(\mathbf{m})$ 、 $I_r(\mathbf{m})$ は、それぞれ画像位置 \mathbf{m} での基準画像、参照画像の濃度値を表す。

前章でも述べたように、上記の推定には、適当に真値に近い初期値としての射影変換行列 H^I と、領域 R^I （本論文では、以後「計算領域」と呼ぶことにする）を必要とする。そこで本手法では、時系列情報を利用し、以下に述べる方法により、それらを求める。

まず本手法においては、各時刻においてステレオ画像間の射影変換行列 H_s と、基準画像の時間的に連続する2画像間の射影変換行列 H_m 、および基準画像に対する平面領域 R を求めていく。そして、ある時刻 t の推定の際には、前時刻 $t-1$ までの上記推定結果を利用する。図6を参照しながら、以下にその方法を説明する。

- (1) まず連続する基準画像 $I_b(t-1)$ 、 $I_b(t)$ 間の射影変換行列 $H_m(t)$ を求める。そのとき、射影

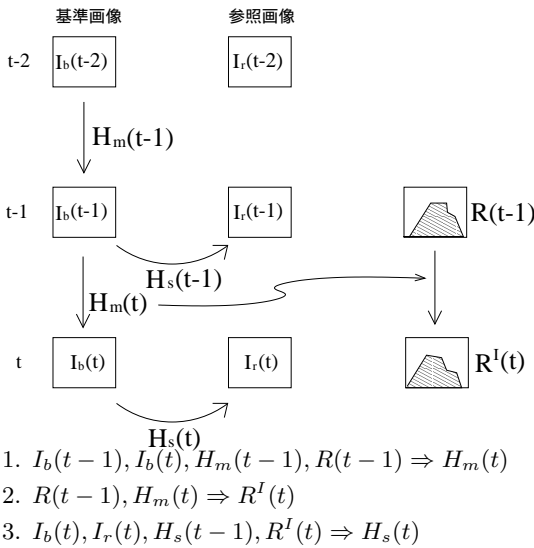


図 6 時系列情報を利用した射影変換行列の推定

Fig. 6 Estimation of projective transformation using sequential information.

変換行列の初期値としては、前時刻に推定された射影変換行列 $H_m(t-1)$ を、また計算領域としては、 $I_b(t-1)$ に対して前時刻で求められている平面領域 $R(t-1)$ を用いることができる。

- (2) 次いで、上で求められた $H_m(t)$ を用いて、前時刻の平面領域 $R(t-1)$ を変換することにより、現時刻における平面領域の予測値 $R^I(t)$ を求める。
- (3) さらにステレオ画像 $I_b(t), I_r(t)$ 間の射影変換行列 $H_s(t)$ は、前時刻において推定された $H_s(t-1)$ を初期値とし、上記 $R^I(t)$ を計算領域として求められる。

以上のような方法により、時系列画像を用いた連続推定において、十分に近い初期値と計算領域を用いることができるため、安定な推定を可能にしている。

また、ここで述べた方法においては、射影変換行列 H_s, H_m はそのつど画像から求めることができるため、カメラの内部パラメータや 2 台のカメラ配置、カメラと平面との位置関係等は知る必要がなく、また、走行中にそれらが変化しても対応することができる。

4. 平面領域の抽出

前章で求めた射影変換行列を利用して、基準画像中から平面に対応した領域を抽出する。図 7 に図 4 のステレオ画像を用いた一連の処理結果を示す。(a) は基準画像、(b) は前章で述べた方法により推定した H_s

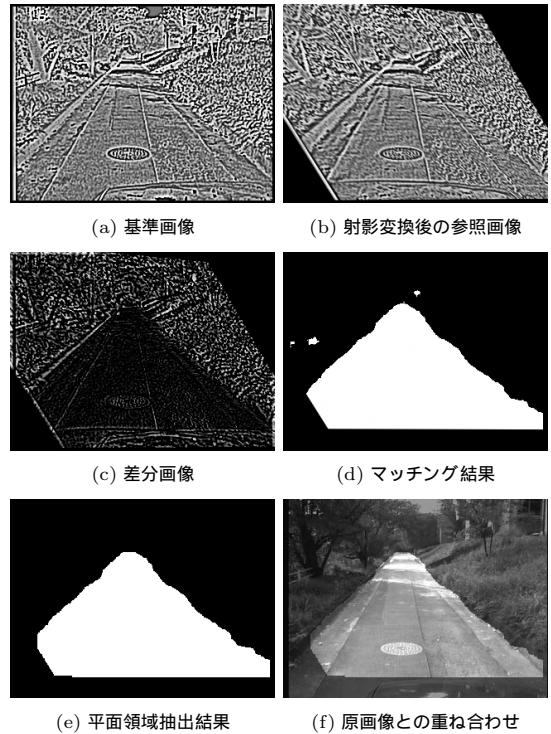


図 7 平面領域抽出結果

Fig. 7 Detection of planer region.

を用いて射影変換した参照画像である。この 2 つの画像の差分 (差の絶対値) を求めたものが (c) である。この画像を見ると、平面 (道路面) に対しては、(a), (b) 両画像の位置が一致しているため全体的に黒く、それ以外の部分ではずれているため白っぽく見える。次いで差分画像に対し、平均化フィルタをかけたうえで 2 値化したものが (d) である。これは、(a) と (b) の画像に対し、SAD (Sum of Absolute Difference) を用いたマッチングを行っていることに相当する。

ここで、前時刻の平面領域抽出結果が利用できる場合には、その結果を以下のように利用する。前章でも述べたように、前時刻の平面領域 $R(t-1)$ と基準画像の時系列間の射影変換行列 $H_m(t)$ より、現時刻において予想される平面領域が得られる。時系列画像間では平面領域がそれほど急激には変化しないとすれば、図 8 に示すように、現時刻における平面領域と非平面領域の境界は、前時刻から予想される境界に対してある一定の幅に収まると考えられる。そこで、それ以外の部分に関しては、前時刻の結果より平面領域ないし非平面領域と見なすことができるため、それを

画像下部は、自車の先端部が写り込んでいるため、処理から除外している。

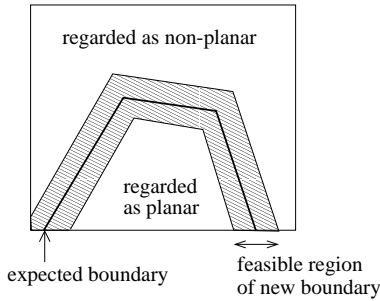


図 8 前時刻から予想される領域

Fig. 8 Expected regions from previous result.

図 7(d) のマッチング結果に反映する。さらに、走行可能な平面領域はある程度の大きさを持っていると考えられるため、収縮・膨張処理により、面積が小さな領域や細長い領域を除く処理を施した結果が (e) である。(f) は、抽出された結果が原画像とどう対応しているのかが分かるように、原画像に対し、抽出された平面領域以外の明るさを落して表示したものである。この図より、抽出された領域が実際の道路面によく一致していることが分かる。

一方、ここで述べた方法においては、基準画像と射影変換後の参照画像で、平面以外に対する画像上の位置がずれ、その結果、画像濃度に差が生じるということを期待している。しかしながら、たとえば、テクスチャのない建物の壁が画像上で大きな領域を占めるような場合には、問題が生じる。そのような領域では、たとえ位置がずれていても、濃度の差が生じないからである。図 9 (a), (b) は、そのような画像の例を示しており、この場合のマッチング結果(図 7 の (d) に相当)は、(d) に示すものとなる。明らかに、正面の建物の壁を含んでしまっている。

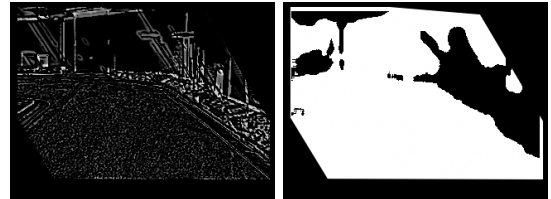
そこで、このような問題に対処するため、以下のような処理を施す(図 10 参照)。

- (1) LOG フィルタの出力結果が 0 に近い領域をテクスチャレス領域として抽出し、領域ごとにラベリングする(図 10(a) の A, B)。これらの領域は、マッチングによる平面領域判定が困難な部分である。実際、このような画像に対してマッチングによる判定を行うと、(c) の斜線部のような領域が得られ、結果として C の部分が誤判定となる。
- (2) テクスチャレス領域 A, B に対し、次のような判定を行う(図 10(d) を参照)。
 - あるテクスチャレス領域の全体が、(c) のマッチング結果に含まれていけば、そのテクスチャレス領域は、平面領域とする。(領域 B の場合)



(a) 基準画像

(b) 参照画像



(c) 差分画像

(d) マッチング結果

図 9 大きなテクスチャレス領域が存在するシーン

Fig. 9 A scene containing large textureless region.

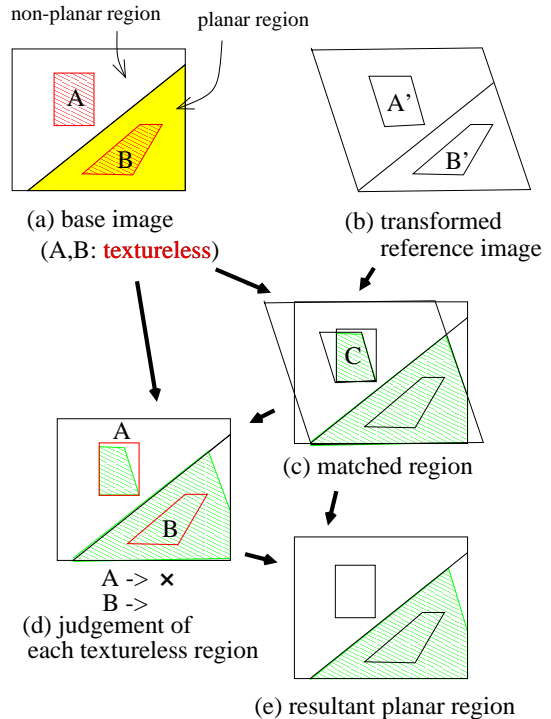


図 10 テクスチャレスな領域への対処

Fig. 10 Measures for textureless regions.

域 B の場合)

実際の平面領域と非平面領域の間には、画像上でエッジや濃淡の差等の何らかの境界が存在すると考えられる。その境界部は、本手法では、テクスチャレス領域とはならず、かつマッチング領域に属することになる。したがって、テクスチャレス領域が仮に平面領域の縁に存在しているような場合でも、処理結果においては、テクスチャレス領域が、マッチング領域内で境界部の分だけ内側に現れることになる。

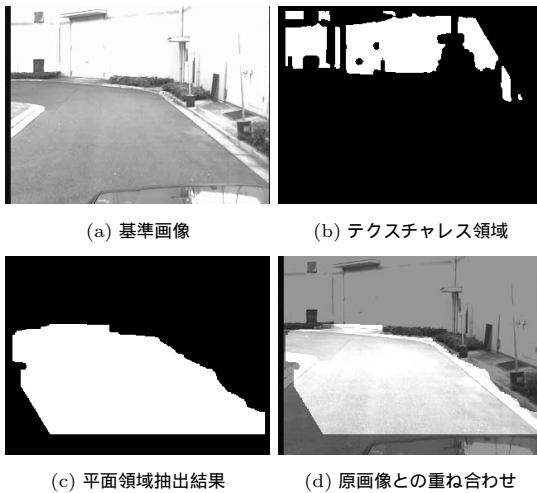


図 11 平面領域抽出結果 (大きなテクスチャレス領域が存在する場合)

Fig. 11 Detected planar region (in case of existence of large textureless region).

- そうでなければ, そのテクスチャレス領域全体を非平面領域とする (領域 A の場合).

(3) (c) のマッチング結果から, 上で非平面領域と判定されたテクスチャレス領域を除く (e) .

ここで述べたテクスチャレス領域処理は, 以下のよう
に解釈することができる. まず, テクスチャレス領域
では, 局所的なマッチングを行っても, 位置ずれが生
じているかどうかの判定をすることができない. そこ
で, テクスチャレス領域をまとめ, 各々の領域を“塊”
として, ずれの判定を行う. その際, 平面領域に含ま
れるテクスチャレス領域では, 当然位置ずれがないた
めに全体がマッチングすることになるが, 非平面領域
中のテクスチャレス領域の場合には, 位置がずれるた
め, 領域のある部分が必ず周囲の別の領域と重なり,
その部分はマッチングにより非平面部と判定されるこ
とになる. そこで, そのようなテクスチャレス領域全
体を非平面領域と判定する.

以上の処理を付加して得られた結果を図 11 に示す.
図で, (b) は基準画像に対してテクスチャレス領域を
抽出した結果であり, (c) が, ここで述べたテクスチャ
レス領域処理を加えて平面領域を抽出した結果, (d)
はその原画像との重ね合わせ表示である.

また図 12 に, 別の結果を示す. この例では, 空 (非
平面領域) の部分と, 路面のペイント (平面領域) の
部分にテクスチャレス領域が存在しているが, 上に述
べた処理により, 空 (非平面領域) に対応したテクス
チャレス領域のみがマッチング結果から除かれ, (e),
(f) に示すように良好な結果が得られている.

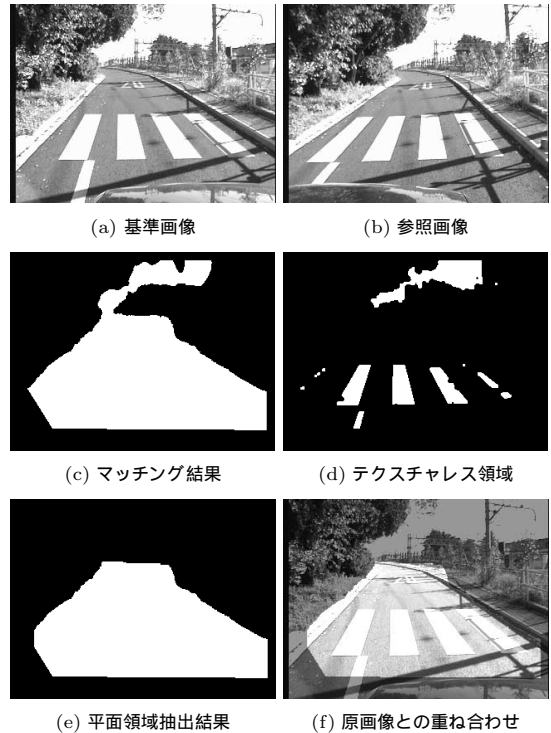


図 12 平面領域抽出結果 (平面領域内にもテクスチャレス領域が存在する場合)

Fig. 12 Detected planar region (in case of existence of textureless regions appearing also inside of the planar region).

5. その他の実験結果

本手法の有効性を確認するため, 車に搭載したカメラ
で撮影したステレオ動画像に対し, 本手法を適用し
た結果を示す.

図 13 は, 約 1,500 フレームの画像シーケンスに対
する処理結果から, 30 フレーム (1 秒) ごとの結果を
抜き出して表示している. 路面上に落ちる影や, さま
ざまな路面パターン, 路面の起伏やカーブでの車体の
傾き等に影響されずに, ほぼ安定に道路に対応した平
坦部が連続的に抽出されていることが分かる.

また比較のため, 射影変換行列をそのつど推定せず,
最初に求めたものを固定して用いた場合の結果を図 14
に示す. 図で, 左側は図 13 に示した連続する 3 枚を,
右側が, 固定の射影変換行列を用いたときの結果を示
しているが, カーブで車体が傾いたときに, 固定の射
影変換では路面の抽出が行えていないことが分かる.

さらに, 図 15, 16 に, 別のシーンに対する結果を,
同様に 30 フレーム (1 秒) ごとに抜き出して示す. 図
15 では, テクスチャレスな建物の壁が多く現れ, ま
た図 16 では, 路面に描かれたペイントや, 明るさが

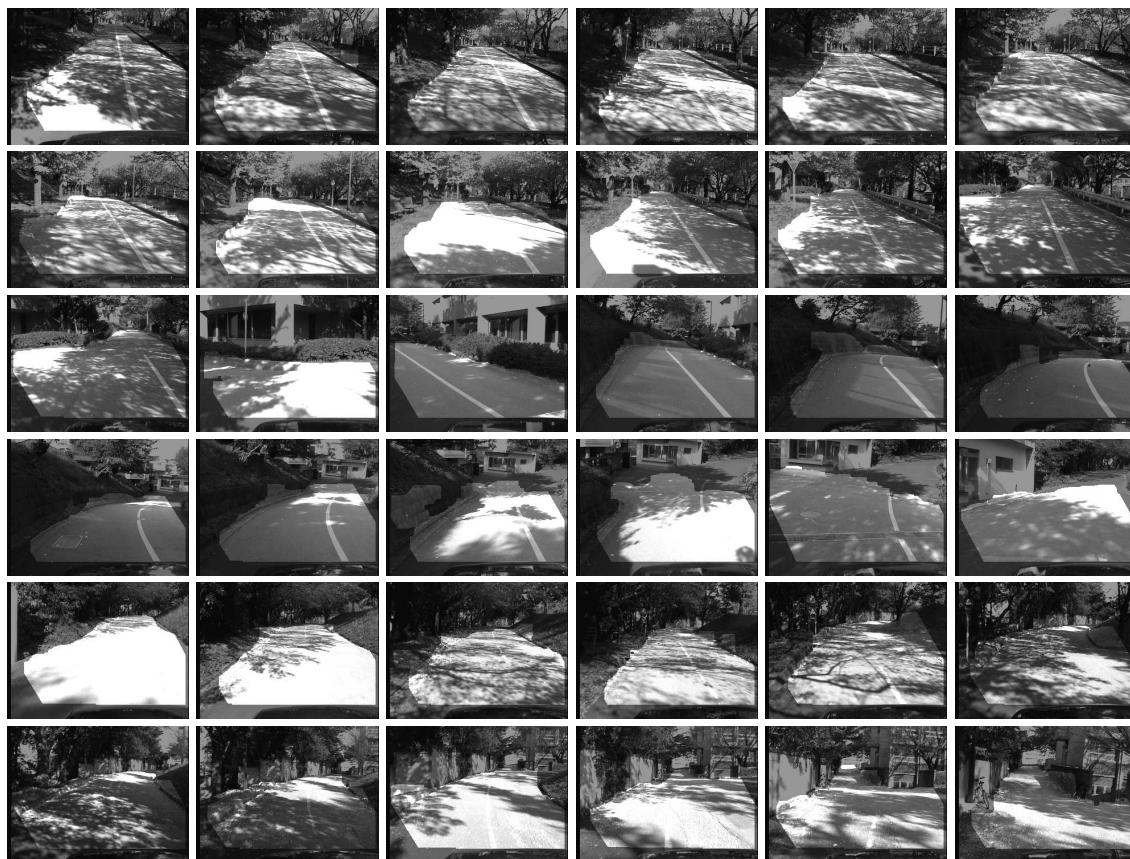


図 13 連続推定結果 (1) (左上から順に右へ 30 フレーム (1 秒) ごとの結果を示す)
 Fig. 13 Results of continuous estimation (1) (from top-left to right, showing every 30 frame (1 sec)).

一様な空が広い範囲に見られるが、それでもほぼ安定に道路面のみが抽出されていることが分かる。

6. おわりに

本論文では、ステレオ動画を用いて、画像中から走行可能な平坦部を抽出する手法を提案した。特に、2台のカメラから同時刻に得られる画像間の射影変換に加え、撮影時刻の異なる画像間における射影変換や、前時刻における平面領域推定結果を互いに密接に関連付けたうえで、前時刻の各推定結果を利用することにより、全体として推定の安定化を図っている。また、テクスチャのない領域に関しては、テクスチャレス領域を抽出し、各領域を塊として平面領域か否かの判定を行うことにより、誤判定を防いでいる。走行車両から撮影した実動画をを用いた実験を行い、手法の有効

性を確認した。

今後の課題としては、まず処理の高速化があげられる。現在、Pentium III (1GHz) dual CPU の汎用パーソナルコンピュータを利用して、1 フレーム (2枚の 320×240 pixel のステレオ画像) あたり約 1 秒の処理時間を要している。必要な処理時間は、本手法の応用方法や、適用する環境、走行車の移動速度等に依存するものであるが、今後さらに高速化を図る必要があるものと思われる。射影変換行列の計算法等のアルゴリズムの改良や、フィルタリング等の単純な処理のハードウェア化等を検討していきたい。

さらに現時点では、雨天や夜間等の環境に関しては考慮していない。本手法は、必ずしも屋外における利用に限定しているわけではないが、屋外における実際の利用を考える場合には、そういう状況も考慮していく必要があるものと考えられる。

謝辞 多くの時系列ステレオ画像の撮影およびそのデータベース化に協力していただいた、東京工業大学

本手法による実験結果は、
<http://www.ok.mei.titech.ac.jp/res/res.html#VN> にて、
 動画で閲覧可能である。

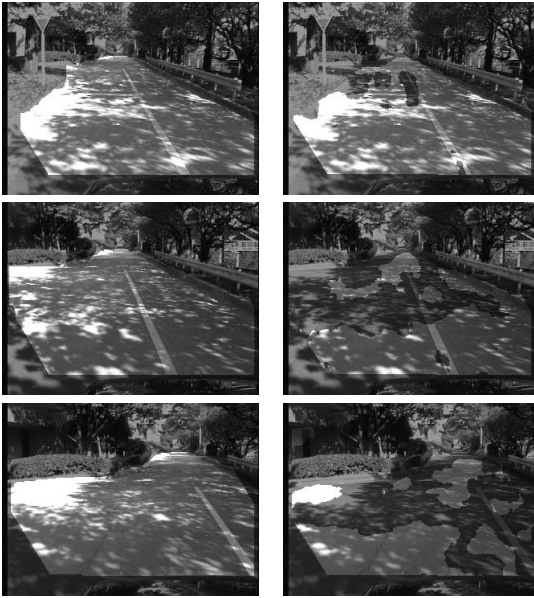


図 14 固定の射影変換行列を用いて求めた結果との比較 (左側: 提案手法, 右側: 固定の射影変換)

Fig. 14 Comparison with results using fixed projective transformation (left: proposed method, right: fixed projective transformation).

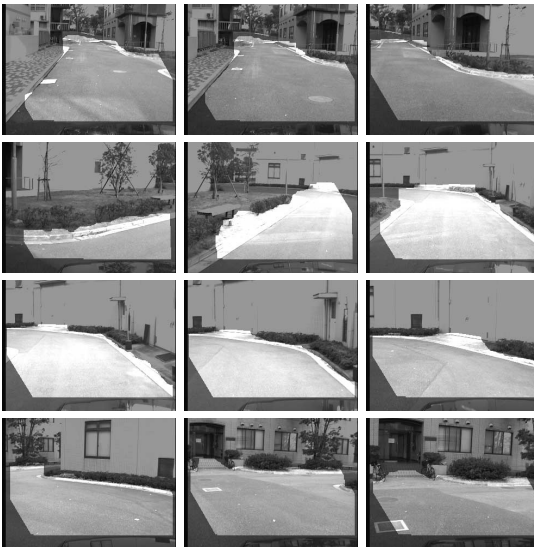


図 15 連続推定結果 (2) (左上から右へ)

Fig. 15 Results of continuous estimation (2).

大学院情報理工学研究科中島健介氏, 大木貴氏, 長谷川雄一氏に感謝する。

参 考 文 献

1) Chow, Y.H. and Chung, R.: Obstacle Avoidance of Legged Robot without 3D Reconstruc-

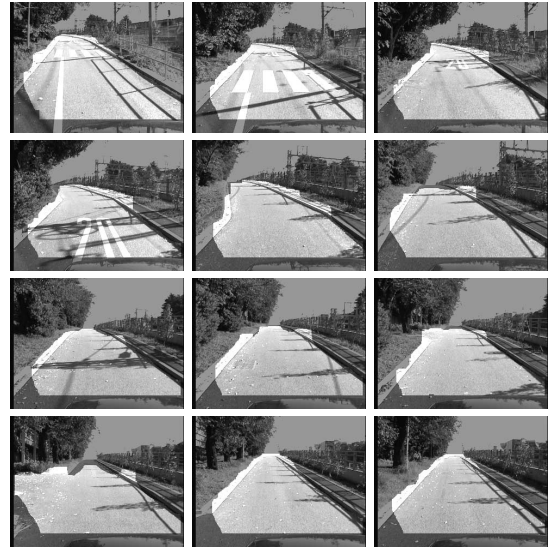


図 16 連続推定結果 (3) (左上から右へ)

Fig. 16 Results of continuous estimation (3).

tion of the Surroundings, *Proc. IEEE Int'l. Conf. Robotics and Automation*, pp.2316-2321 (2000).

- 2) 服部 寛: 対応探索とカメラキャリブレーションが不要なステレオ法, 情報処理学会研究報告 2000-CVIM-122, Vol.2000, No.50, pp.25-32 (2000).
- 3) 伊東敏夫, 山田憲一: 走行環境認識のための画像処理手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU97-25 ~ 36, Vol.97, No.41, pp.1-8 (1997).
- 4) Luong, Q.-T., Weber, J., Koller, D. and Malik, J.: An Integrated stereo-based approach to automatic vehicle guidance, *Proc. ICCV*, pp.52-57 (1995).
- 5) Okutomi, M. and Noguchi, S.: Extraction of Road Region Using Stereo Images, *Proc. ICPR'98*, pp.853-856 (1998).
- 6) 奥富正敏, 野口 卓, 中野勝之: ステレオ画像からの射影変換行列の抽出による道路領域検出, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.51-57 (2000).
- 7) Onoguchi, K., Takeda, N. and Watanabe, M.: Planar Projection Stereopsis Method for Road Extraction, *Proc. IROS*, pp.249-256 (1995).
- 8) Ozaki, T., Ohzora, M. and Kurahashi, K.: An image processing system for autonomous vehicle, *SPIE Mobile Robots IV*, pp.256-266 (1989).
- 9) Shum, H.-Y. and Szeliski, R.: Panoramic Image Mosaics, Technical Report MSR-TR-97-23, Microsoft Research (1997).
- 10) Storjohann, K., Zielke, T., Mallot, H. and von Seelen, W.: Visual Obstacle Detection for Automatically Guided Vehicles, *Proc. ICRA*, pp.716-766 (1990).

- 11) Xie, M.: Matching free stereo vision for detecting obstacles on a ground plane, *Machine Vision and Applications*, Vol.9, No.1, pp.9-13 (1996).

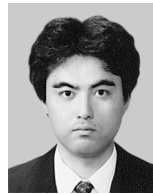
(平成 12 年 10 月 24 日受付)

(平成 14 年 1 月 16 日採録)



奥富 正敏 (正会員)

1981 年東京大学工学部計数工学科卒業。1983 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年キャノン(株)入社。1987~1990 年カーネギーメロン大学コンピュータサイエンス学科客員研究員。1994 年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻助教授。コンピュータビジョン, 画像処理, 画像計測に関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 画像電子学会, IEEE 各会員。



中野 勝之 (正会員)

1994 年京都大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年防衛庁技術研究本部入庁。2001 年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士後期課程(社会人課程)単位取得退学。現在防衛庁技術研究本部第 4 研究所勤務。移動ロボット, 画像処理の研究に従事。電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。



丸山 純一

1998 年東京工業大学工学部制御システム工学科卒業。2000 年同大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。現在(株)日立製作所システム開発研究所勤務。



原 智章 (学生会員)

2001 年東京工業大学工学部制御システム工学科卒業。同年同大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程入学。