

第 4 章

路面画像地図構築

本章では，以下に挙げるカーナビゲーションに必要な技術の中で「2. 環境地図構築」に関する研究について述べる（太字で示す）。

1. 自車位置推定
2. **環境地図構築**
3. 経路探索
4. 走行環境認識
5. 情報提示

4.1 はじめに

4.1.1 背景と目的

カーナビゲーションにおいて，路面は走行基盤として重要である．図 4.1 に示すような路面を上空から俯瞰した広範囲の地図が得られれば，第 3 章で述べたような車載カメラ画像と対応付けることによる高精度な自車位置推定に利用できる．本研究ではこのような地図を路面画像地図と呼び，実際の応用では路面標示の位置や道路の進行方向などのデータを付与したデータベースとして扱う．路面画像地図は，路面のひび割れや路面標示のかすれなどの補修を目的とした路面性状調査や，デジタル地図やカーナビゲーションシステムに対する路面標示や道路形状に関する情報の調査にも利用できる．また，GIS (Geographic Information System) や，交通シミュレーション，映画やゲーム向けの CG コンテンツと応用範囲も広い．

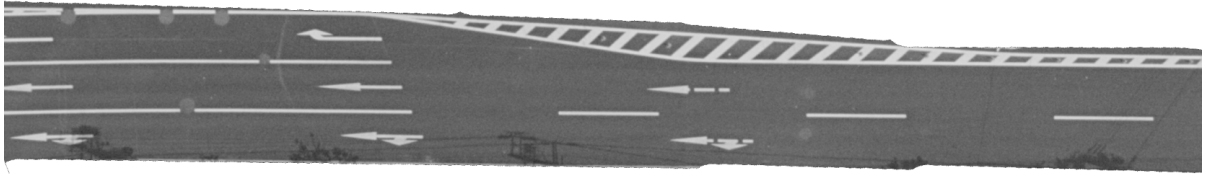


図 4.1 路面画像地図

これらの用途に利用するためには、高解像度かつ遮蔽を含まない高品質な路面画像地図が必要となる。また、このような路面画像地図を構築するため、高精度な計測装置を搭載した専用車両が用いられる。しかし、このような専用車両は計測するコストが高いため、一般車両から撮影された車載カメラ画像を用いて路面画像地図を構築できると有用である。そこで、本研究ではこのような車載カメラ画像を用いて、高解像度かつ遮蔽を含まない高品質な路面画像地図を構築することを目的とする。

4.1.2 関連研究

路面画像地図を構築するため、空撮画像および衛星画像から路面領域を抽出することが考えられる。このような研究では、画像中の道路形状の性質や路面の色情報を利用したセグメンテーションにより、路面領域を抽出している [108]。しかし、これらの画像には低解像度である場所(図 4.2(a))や、車両などにより路面が遮蔽されている場所(図 4.2(b))では、高品質な路面領域が得られない。さらに、高架下やトンネル内では空撮画像から路面領域を得ることは不可能である。また、路面の状態は時間経過にともない変化するため、路面画像地図は定期的に更新する必要がある。しかし、空撮画像および衛星画像は撮影コストが高いことから、更新周期は長くなる。

一方、車載カメラ画像中の路面領域を繋ぎ合わせることで路面画像地図を構築することが考えられる。車載カメラ画像中の自車前方の路面領域は、高解像度かつ遮蔽が含まれないため、構築した路面画像地図も高解像度かつ路面上の遮蔽が存在しないものとなる。Geigerらは車両の動きを推定することにより、路面領域をモザイクングする手法を提案している [55]。しかし、車両の動き推定には累積誤差が発生するため、広範囲の路面画像地



(a) 低解像度

(b) 遮蔽を含む路面

図 4.2 路面画像地図の構築に向かない空撮画像

図を構築することは難しい。路面画像地図の構築を目的としたものではないが、基準画像を利用することで広範囲のモザイク画像を得る手法が提案されている [112–115]。これらの研究では、衛星画像を位置の基準に用い、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) から撮影した空撮画像をモザイクしている。モザイクは、連続する時刻の空撮画像間と、空撮画像と衛星画像間の対応付けを時系列に繰り返すことにより行っている。この対応付けは、画像間で定義される目標関数を最小とするイメージレジストレーション [116] を行うことで、画像間の変換パラメータを求めている。

これらの研究を踏まえて、本研究では空撮画像を位置の基準に用いて、時系列の車載カメラ画像をモザイクする。空撮画像と車載カメラ画像の対応付けを考える際、図 4.3(a) のように路面標示が存在する場所では対応付けが容易である一方、図 4.3(b) のようにテクスチャが乏しい路面である場所では対応付けが困難となる。また、図 4.2(b) のように、空撮画像中の路面標示に遮蔽が含まれている場合も対応付けが難しい。そこで、本研究では時系列の車載カメラ画像をフレーム間で対応付けながら、空撮画像と対応付けやすいフレームのみを対応付けることで路面画像地図を構築する。また、空撮画像と車載カメラ画像をより精度良く対応付けるため、これらのイメージレジストレーションを行う際に、路面標示領域に対して重みを付けた目標関数を導入する。



(a) 路面標示が含まれる場合

(b) 路面標示が含まれない場合

図 4.3 車載カメラ画像中の路面標示

4.1.3 本章の構成

以降，4.2 節で路面画像地図の構築手法について述べる．4.3 節で実験結果を示し，考察する．そして，4.4 節で本章をまとめる．

4.2 路面画像地図の構築

図 4.4 に路面画像地図構築の概要を示す．提案手法では，各時刻の車載カメラ画像を路面画像に変換し，空撮画像上でモザイクングすることにより路面画像地図を構築する．このような手法は，イメージモザイクング（もしくはビデオモザイクング）として知られている [117, 118]．通常，イメージモザイクングは連続する画像のみを用いることで大きな画像を得るが，提案手法では全体の位置合わせのために空撮画像を基準として用いる．本研究では，以下のような空撮画像を路面画像地図の構築のために用いる．

1. 低解像度な空撮画像
2. 路面上に遮蔽を含む空撮画像

そして，各時刻 t の路面画像を空撮画像上へ変換する平面射影変換行列を A_t とする．また，本章では前章と同様に，任意の時刻の路面画像をフレームと呼ぶ．

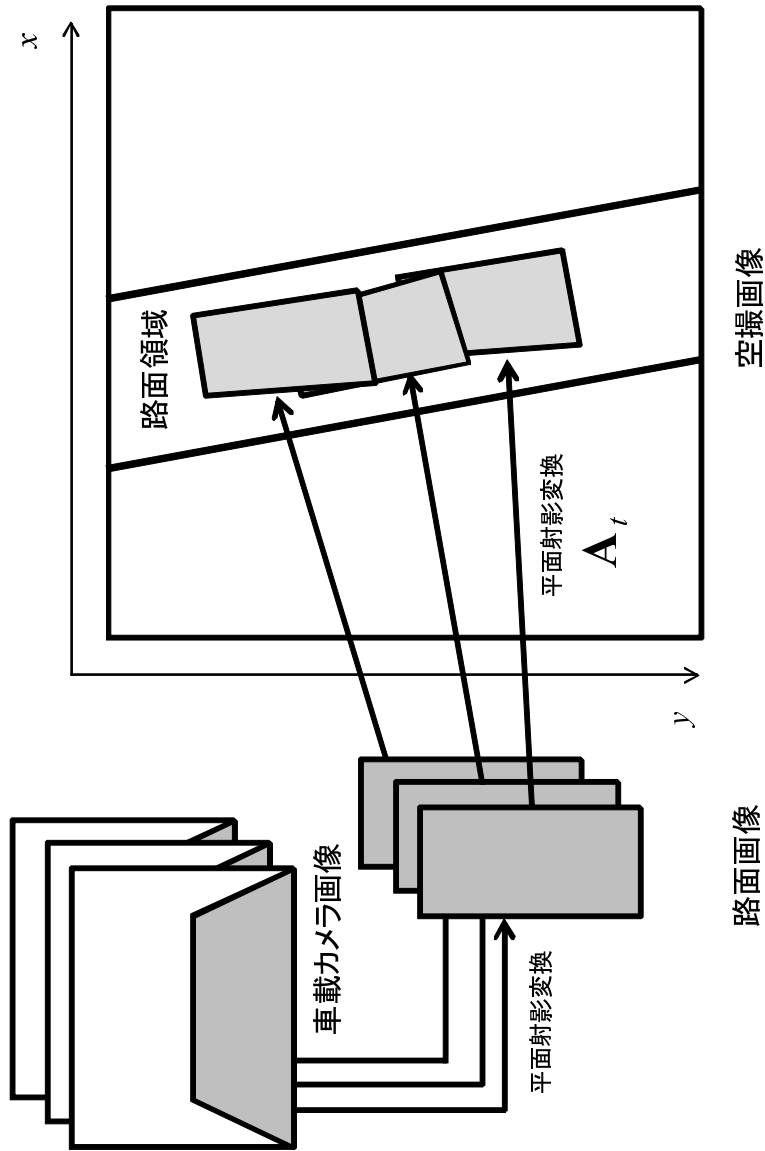


図 4.4 路面画像地図構築の概要

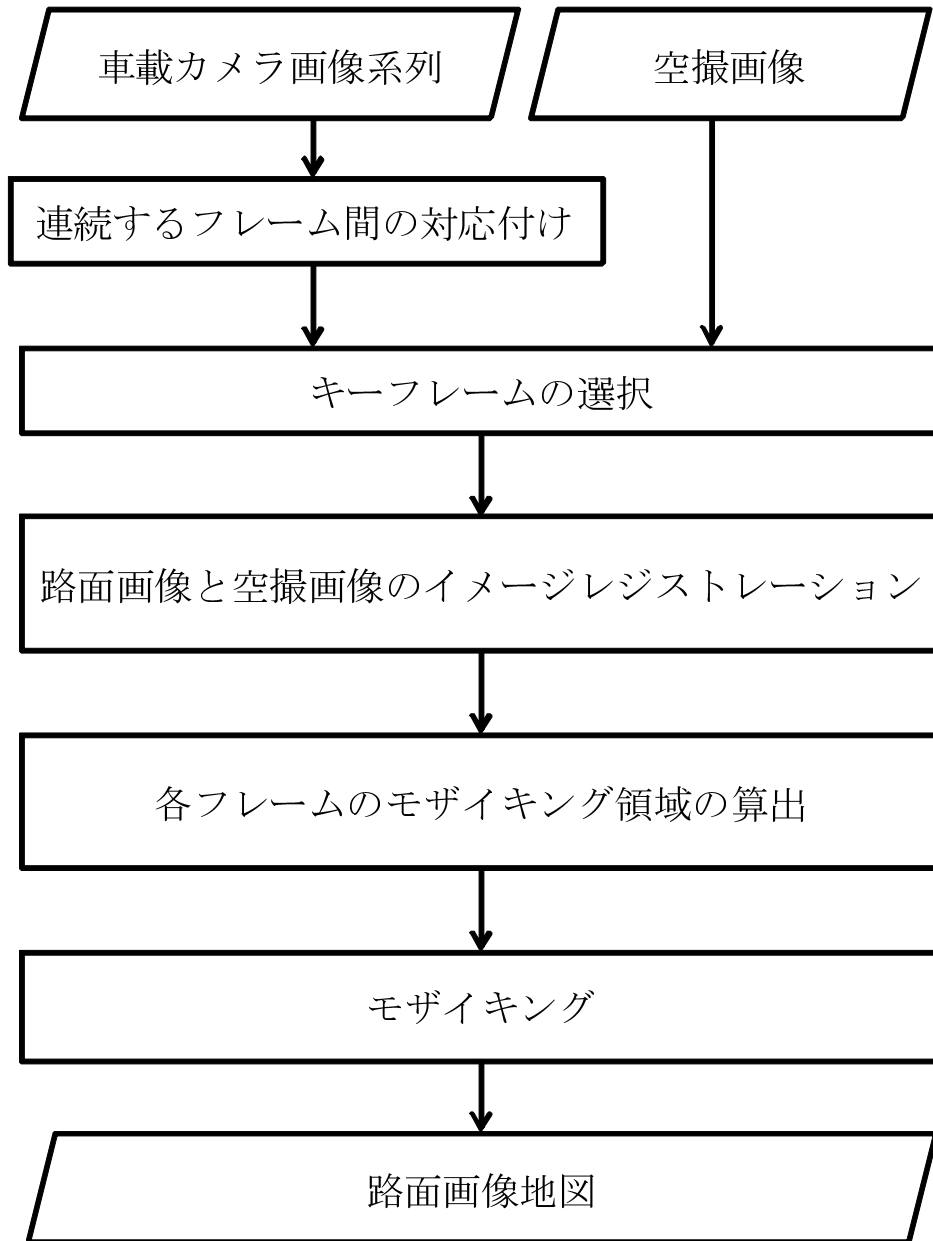


図 4.5 路面画像地図構築の流れ

4.2.1 提案手法の流れ

図 4.5 に提案手法の流れを示す。入力として、車載カメラ画像系列と空撮画像を与える。空撮画像は低解像度であるものや、路面が車両などにより遮蔽されているものを含む。車載カメラ画像は路面画像に変換した上で処理を行う。はじめに連続する路面画像フ



(a) 車載カメラ画像

(b) 路面画像

図 4.6 モザイクングに用いる路面領域

フレーム間の対応付けを行うことで、フレーム間の変換行列 M_t を求める。次に、路面画像系列から空撮画像と対応付けやすいフレームをキーフレームとして選択する。キーフレームは系列全体を等間隔に分割した区間から 1 フレームずつ選択する。そして、キーフレームとした路面画像と空撮画像をイメージレジストレーションにより対応付ける。この結果を用いて、キーフレーム以外の各フレームのモザイクング領域を算出する。最後に、これらの結果を用いて系列全体をモザイクングすることで、路面画像地図を得る。

以降、各処理の詳細を述べる。

4.2.2 路面画像への変換

3.2.3 節で述べた手法により、平面射影変換行列 P を用いて、車載カメラ画像(図 4.6(a))から路面画像(図 4.6(b))に変換する。この路面画像をモザイクングに用いる路面領域として用いる。全てのフレームに対して同じ P を用いる。

4.2.3 連続するフレーム間の対応付け

時系列の路面画像をフレーム間で対応付けることにより，フレーム間の平面射影変換行列 M_t を求める．時刻 t の路面画像を I_t と表す． M_t は， I_{t-1} 上に I_t を変換する平面射影変換行列であり，これらをイメージレジストレーションすることで求める．連続する時刻の路面画像は輝度などの変化が小さいため，画像間の類似度として輝度の二乗誤差を用いる．次式の目標関数 $E(M_t)$ を最小化する M_t を求める．

$$E(M_t) = \sum_{\mathbf{x} \in I_{t-1}} \|I_{t-1}(\mathbf{x}) - I_t(M_t \mathbf{x})\|^2 \quad (4.1)$$

この最小化は，Szeliski らの手法 [119] により行う．

そして，全てのフレーム間の M_t を求める．

4.2.4 キーフレーム選択

図 4.7 に示すように，車載カメラ画像系列を K 区間に等分割し，各区間からキーフレームを選択する．本論文では，路面画像中に路面標示が多いほど空撮画像と対応付けやすいものとする．路面標示は，路面に比べ輝度が高いため，しきい値 ρ 以上の輝度値を持つ画素数を選択基準とする．そして，各区間中でこの選択基準が最大となるフレームをキーフレームとして選択する．各区間から選択したキーフレームの時刻を t'_k ($k = 1, \dots, K$) と表す．

4.2.5 路面画像と空撮画像間の対応付け

キーフレームにおける路面画像と空撮画像間に対応付ける．路面画像フレーム間の対応付けと同様にイメージレジストレーションを行う．路面画像と空撮画像は撮影された時期が異なるなどの撮影条件の違いを含むため，両画像を輝度で正規化する．ここで，空撮画像を J と表す．そして，次式の目標関数 $E(A_{t'_k})$ を最小化する $A_{t'_k}$ を求める．

$$E(A_{t'_k}) = \sum_{\mathbf{x} \in I_{t'_k}} w(J(\mathbf{x})) \|J(\mathbf{x}) - I_t(A_{t'_k} \mathbf{x})\|^2 \quad (4.2)$$

ここで， $w(J(\mathbf{x}))$ は重み関数を表し，次式で定義する．

$$w(J(\mathbf{x})) = \begin{cases} \omega (> 1) & J(\mathbf{x}) \geq \rho \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.3)$$

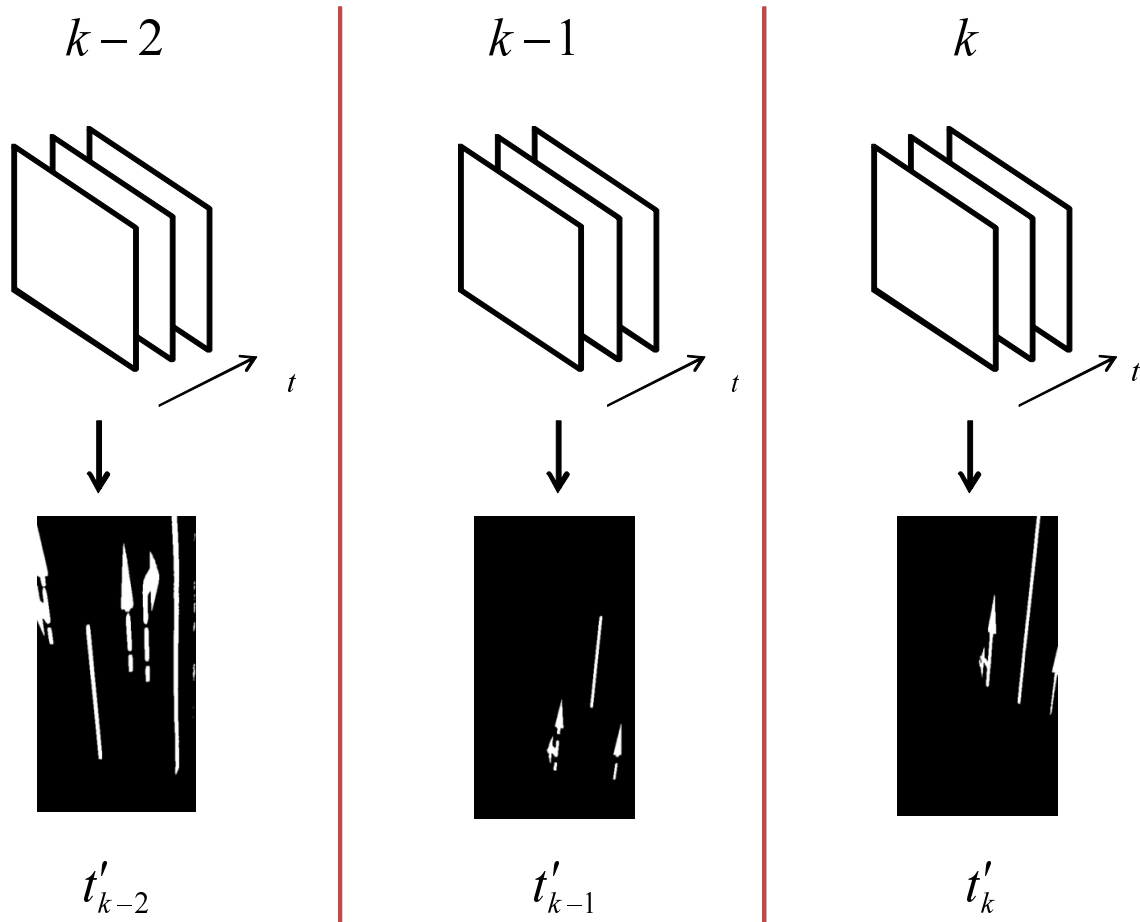


図 4.7 キーフレームの選択

これは、画像中の路面標示を精度良く対応付けるために導入する重み関数である。路面標示は道路面中で高い輝度を持つため、提案手法ではしきい値 ρ 以上の輝度の画素を路面標示とする。そして、路面標示の画素に対して重み $\omega (> 1)$ を設定し、画像間の対応付けを行う。目標関数 $E(\mathbf{A}_t)$ の最小化は、Szeliski らの手法 [119] により行う。また、初期値 $\mathbf{A}_{t'_k}^{(0)}$ は、既に求めた \mathbf{M}_t を用いて、次式で与える。

$$\mathbf{A}_{t'_k}^{(0)} = \mathbf{M}_{t'_k} \mathbf{M}_{t'_k-1} \cdots \mathbf{A}_{t'_{k-1}} \quad (4.4)$$

4.2.6 各フレームのモザイクキング領域の算出

キーフレームにおける対応付け結果を用いて、キーフレーム以外の各フレームのモザイクキング領域を算出する。まず、任意の時刻 t におけるモザイクキング領域は、 \mathbf{A}_t ($t'_{k-1} <$

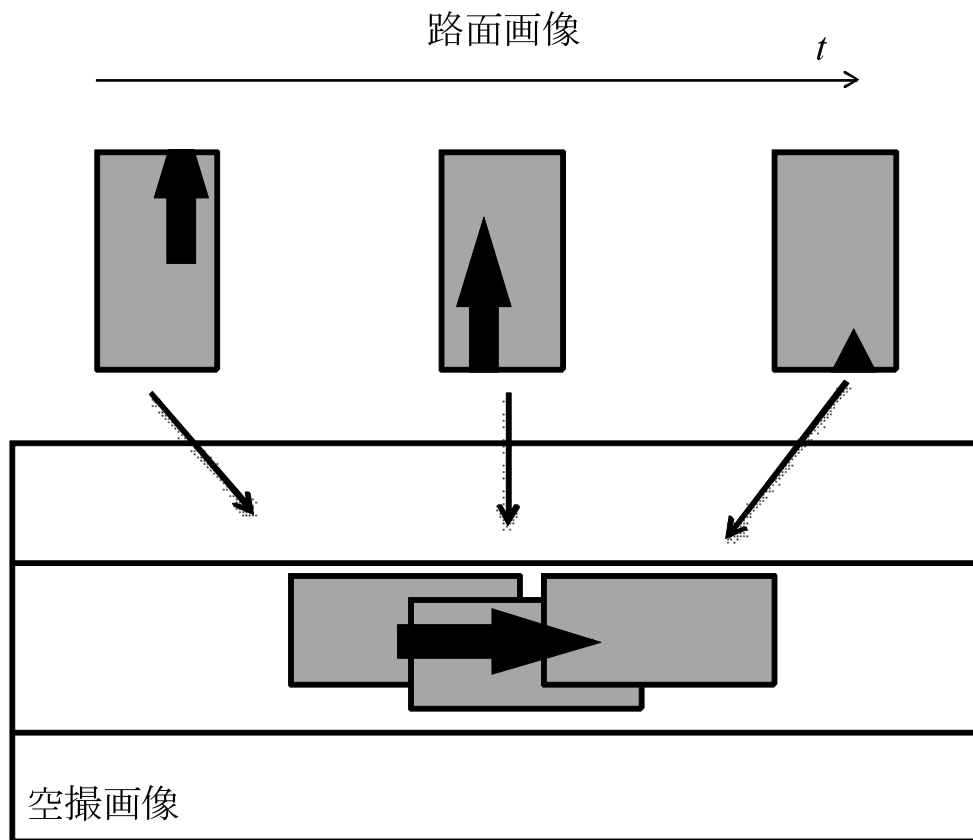


図 4.8 モザイクング

$t < t'_k$) によって与えられる．そして， A_t は，そのフレームの前後のキーフレームにおける $A_{t'_{k-1}}$, $A_{t'_k}$ を用いて算出する．路面画像の 4 端点を， $A_{t'_{k-1}}$, $A_{t'_k}$ を用いて空撮画像上へ変換した点の座標を $a_1 \sim a_4$, $b_1 \sim b_4$ とする．そして，これらの点の座標を線形補間することにより，時刻 t のモザイクング領域の 4 端点の座標 $c_1 \sim c_4$ を次式で求める．

$$c_i = (1 - \alpha)a_i + \alpha b_i \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (4.5)$$

$$\alpha = \frac{t - t'_{k-1}}{t'_k - t'_{k-1}} \quad (4.6)$$

最後に，路面画像の 4 端点の座標と $c_1 \sim c_4$ の対応から， A_t を算出する．

4.2.7 路面画像のモザイクング

図 4.8 に示すように，各時刻の路面画像を A_t を用いて空撮画像上に変換することでモザイクングする．モザイクングは時系列に行い，時刻の異なる複数の画像を重畳する場合

には、時刻の新しい画像により既に張り付けた画像を上書きする。

4.3 実験

実際に撮影した車載カメラ画像および空撮画像を用いて、提案手法により路面画像地図の構築を行った。

4.3.1 実験条件

本実験では、以下のように空撮画像の条件が異なる 2 系列の車載カメラ画像系列を用いた。

- 系列 1：空撮画像が低解像度である系列
- 系列 2：空撮画像中の路面上に遮蔽を含む系列

いずれの系列の車載カメラ画像は、500 フレームであった。

本実験に用いた車載カメラ画像の解像度は 640×480 pixels、フレームレートは 30 fps であった。また、車載カメラの設置位置は地平面から高さ 1.6 m、画角は約 36° 、焦点距離は車載カメラの解像度から求めた。対応付けに用いる車両前方の路面領域を $d_0 = 5$ m、 $d_1 = 30$ m、 $w = 6$ m とした。これらのパラメータは 3.3.2 で定義した車両モデルのものである。

空撮画像は、元の解像度が約 3 cm/pixel であるものを用いた。系列 1 の空撮画像に対しては、評価のため、約 15 cm/pixel に低解像度化して用いた。

その他のパラメータについては、予備実験によりイメージレジストレーションの重み $\omega = 100$ 、路面画像に対するしきい値 $\rho = 150$ とした。また、 $K = 10$ としてキーフレームを選択し、車載カメラ画像系列の最初と最後のフレームをキーフレームに含めた。最初のフレームにおける車載カメラ画像と空撮画像の対応付けの初期パラメータ A_0 は人手により与えた。

評価基準

構築した路面画像を評価するため、本実験では以下の 3 つの指標を用いた。

1. 解像度：

実寸が分かっている路面標示の大きさを、構築した路面画像中の路面標示の画素数

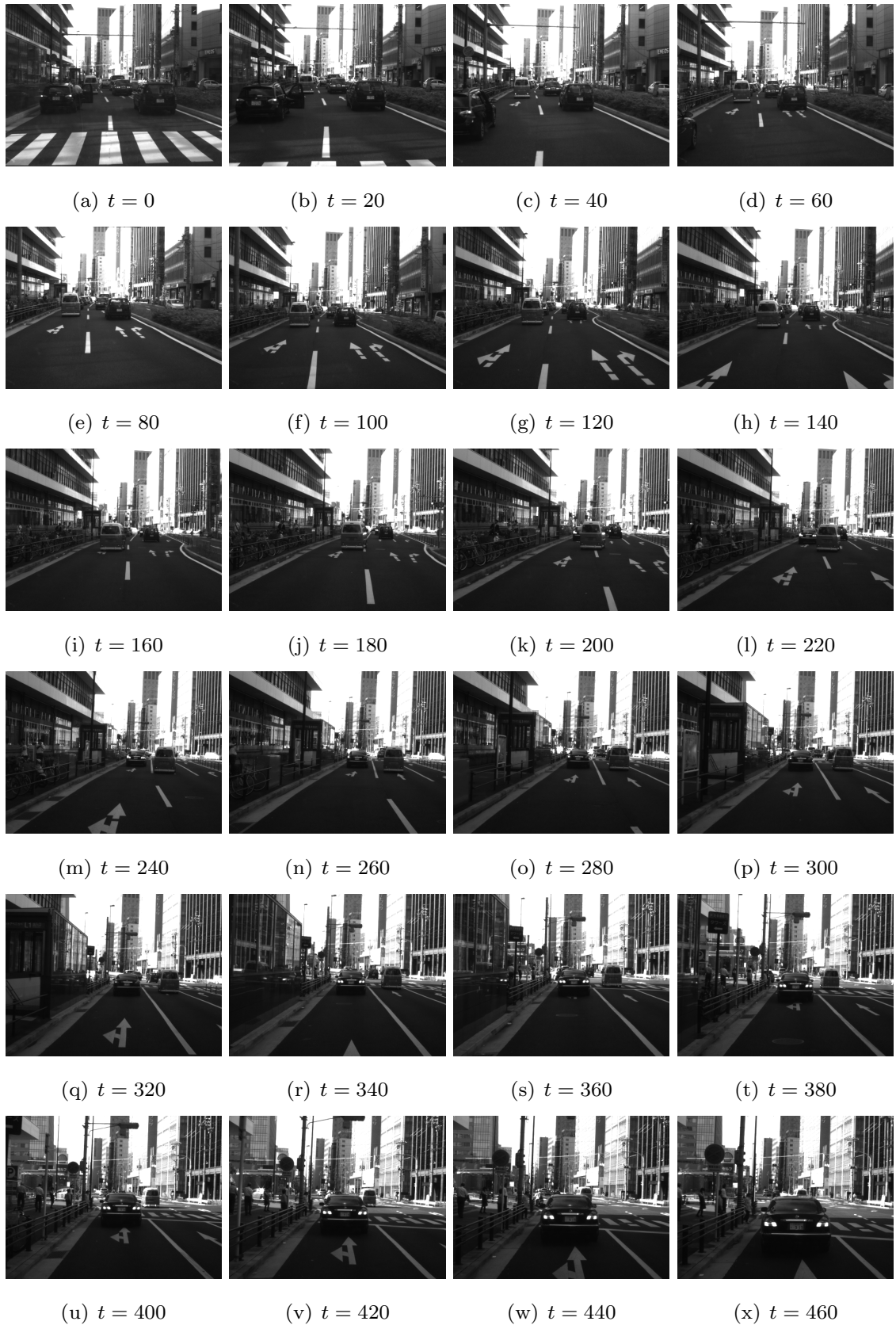


図 4.9 車載カメラ画像 (系列 1)

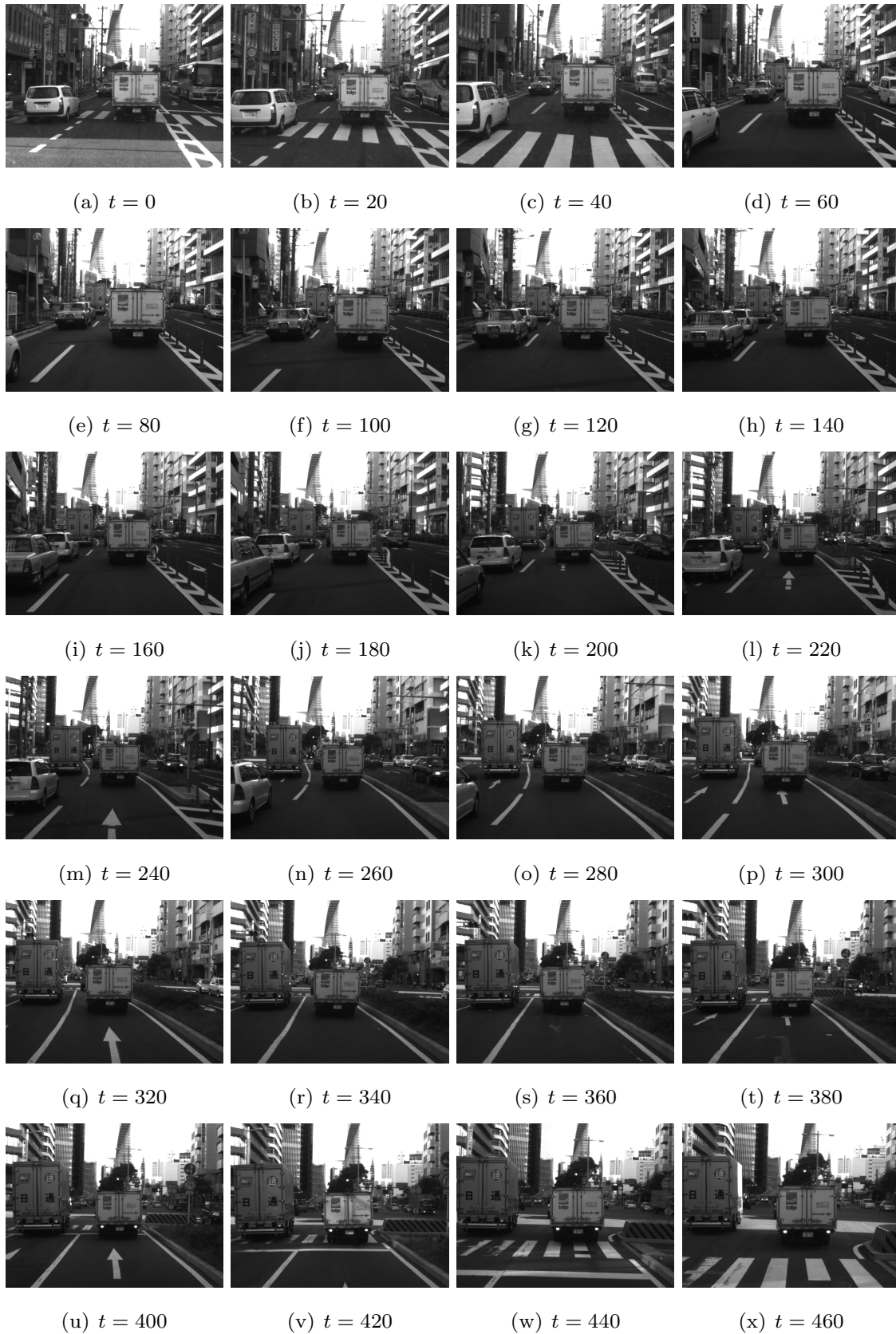


図 4.10 車載カメラ画像 (系列 2)

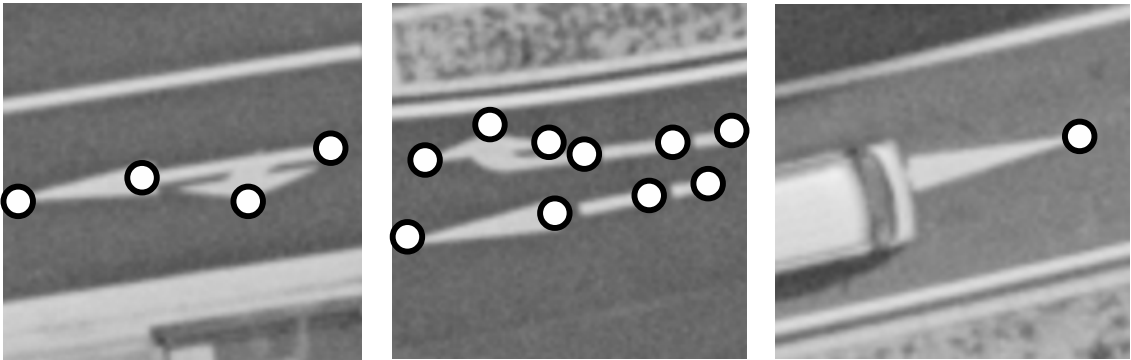


図 4.11 基準点：図中の 印により表す。

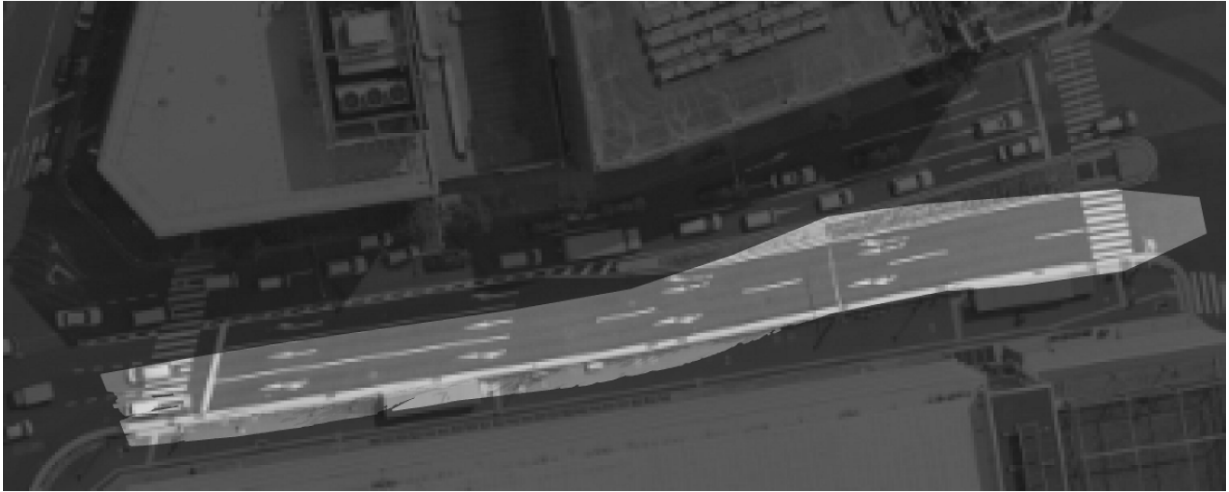
で割ることにより算出した。

2. 遮蔽の占有率：

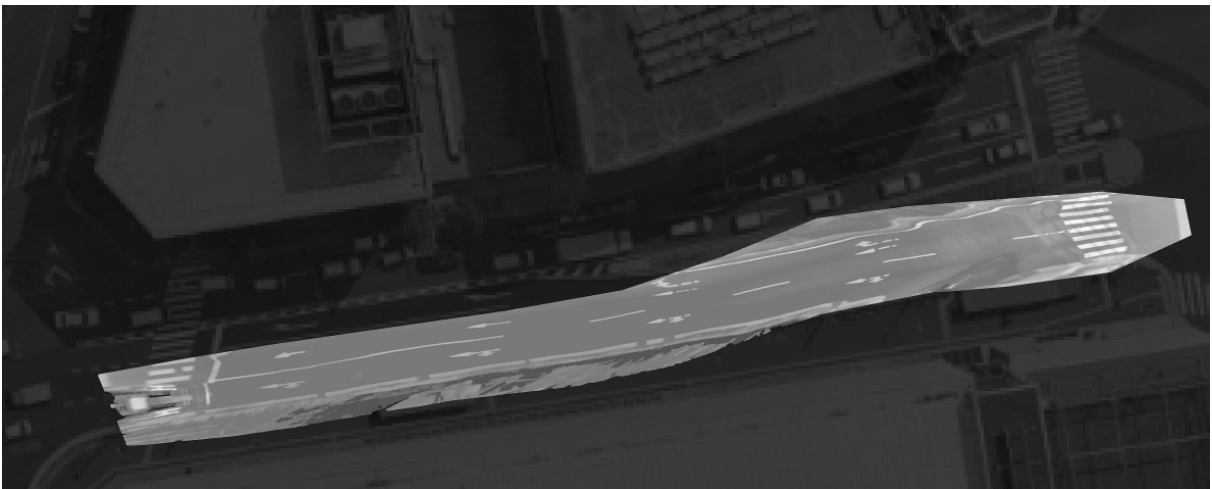
路面領域中に存在する車両などの遮蔽とみなされる画素の数を数え，全体に対する割合として算出した。

3. 基準点における平均誤差：

元の空撮画像に対する構築された路面画像の歪みの指標として，各画像から同じ地点を示す基準点の位置の平均誤差を用いた。本実験では，基準点として路面領域中に存在する路面標示の端点をプロットして用いた。図 4.11 に基準点の例を示す。

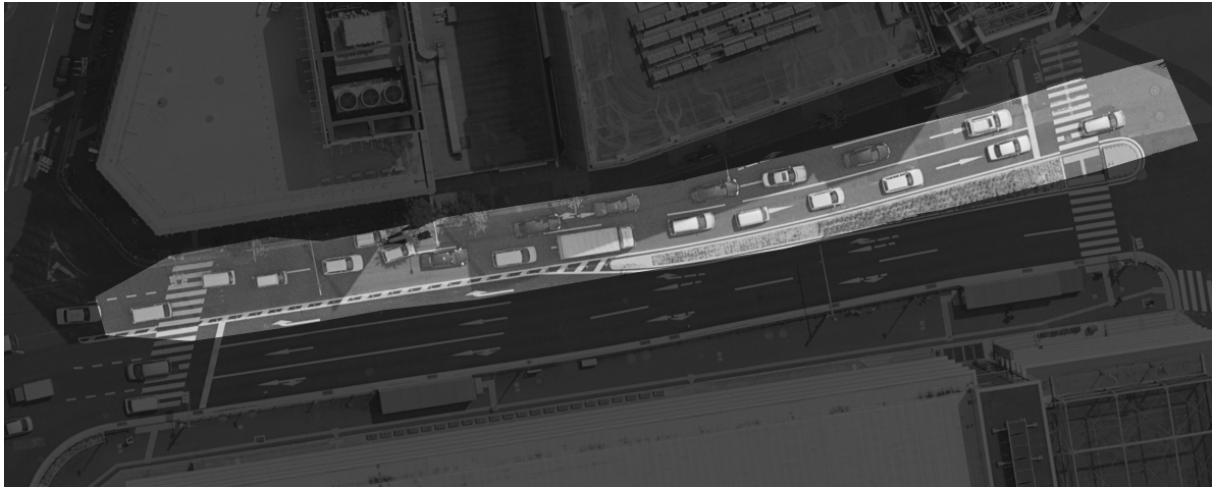


(a) 空撮画像：対象とした道路領域をハイライトで表示する．

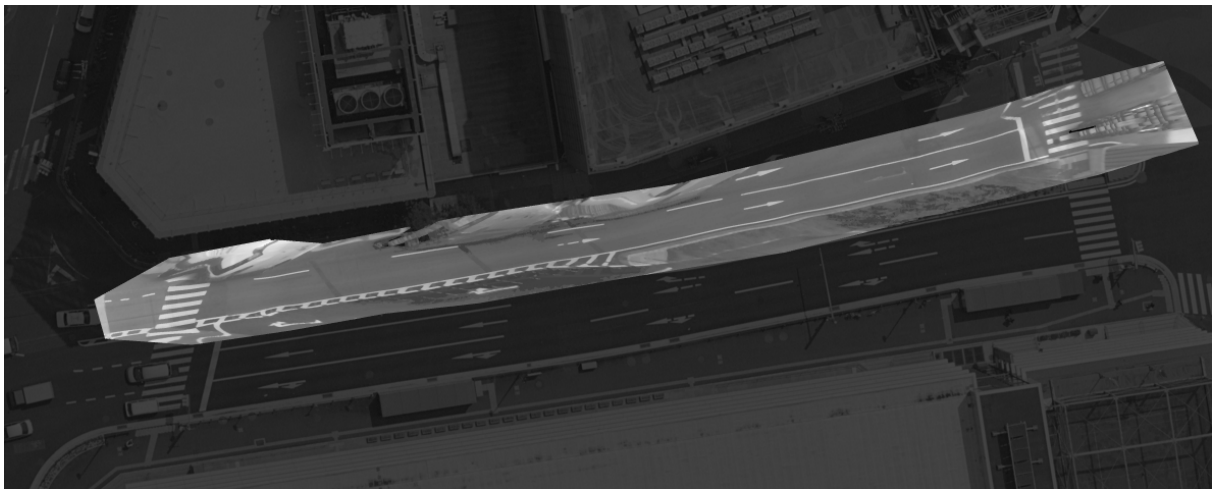


(b) 構築した路面画像：ハイライトで表示する．

図 4.12 空撮画像および構築した路面画像（系列 1）



(a) 空撮画像：対象とした道路領域をハイライトで表示する．



(b) 構築した路面画像：ハイライトで表示する．

図 4.13 空撮画像および構築した路面画像（系列 2）

表 4.1 実験結果

系列		解像度 [cm/pixel]	遮蔽の占有率 [%]	基準点の平均誤差 [cm]
1	空撮画像 構築した路面画像地図	15	2	48
2	空撮画像 構築した路面画像地図	3	16	72

4.3.2 実験結果と考察

図 4.12(b) に系列 1, 図 4.13(b) に系列 2 の路面画像地図の構築結果を示す。また, 表 4.1 に各系列の解像度, 遮蔽の占有率, 基準点の平均誤差を示す。

高解像度化の効果

系列 1, 2 とともに構築後の路面画像地図の解像度は, 約 1 cm/pixel となった。これにより, 元の空撮画像に対して高解像度なものを得られることを確認した。図 4.14 に, 系列 1 の同地点における空撮画像と路面画像画像の拡大図を示す。これから, 元の空撮画像では形状が視認できなかった路面標示が, 路面画像地図では鮮明になったことが分かる。

遮蔽の除去率

系列 2 では, 路面に対する遮蔽の占有率が 16 % から 7 % に改善した。図 4.15 に, 系列 2 中の同地点における元の空撮画像と構築した路面画像地図の一部を拡大したものを示す。この図より, 路面標示を遮蔽していた車両が除去され, 路面標示が視認できるようになっていることが分かる。しかし, 同地点の画像を切り出したにも関わらず, 路面標示の位置ずれが発生していた。これは, イメージレジストレーションを行う際に, 空撮画像中の遮蔽が影響を受けたことが原因である。このため, あらかじめ車両などを検出する必要がある。

また, 構築後の遮蔽の占有率が 7 % であった理由として, 車載カメラ画像中に駐車車両や隣接車線を並走する車両が存在したことが挙げられる。本研究では, 自車前方の路面領域には遮蔽が含まれないと仮定したが, このことが実際に成り立つ範囲に関して調査する必要がある。

路面画像地図の位置の精度

表 4.1 から, 路面画像地図の基準点の平均誤差は, 系列 1 では 48 cm, 系列 2 では 72 cm となった。これより, 低解像度である空撮画像よりも路面に遮蔽を含む空撮画像の対応付けが難しいことが分かった。これらの結果は, 自車位置推定に用いるためにはまだ不十分であるため, 改善の余地がある。

路面の対応付けの精度

提案手法で工夫した点の1つである空撮画像と車載カメラ画像を対応付ける際のレジストレーションの評価関数に対する重み付けの効果を確認するため、予備実験として重み付けを行わない対応付け手法と比較した。この結果、系列1における基準点の平均誤差が、重み付けを行わない場合に比べて約10 cm 減少し、重み付けの効果を確認した。より高精度な対応付けを行うためには、車載カメラ画像と空撮画像の解像度の違いを考慮したレジストレーションの目標関数を導入する必要があると考えられる。

キーフレーム選択の精度

提案手法では路面標示が多く存在するキーフレームのみを空撮画像と対応付けた。これに対して全ての車載カメラのフレームを対応付けに用いて実験を行ったところ、路面標示が少ないフレームにおいて対応付けに失敗し、正しく路面画像地図を構築できなかった。提案手法のもう1つの工夫点である路面標示が多く存在するキーフレームのみを空撮画像と対応付けた場合との比較として、全ての車載カメラのフレームを対応付けに用いた場合、路面標示が少ないフレームにおいて対応付けに失敗した。このことから、提案手法によるキーフレーム選択の有効性を確認した。また、本章ではキーフレームは車載カメラ画像に含まれる路面標示を基準として選択したが、空撮画像に対しても基準を設けることも必要と考えられる。

自然な画像合成の必要性

路面画像地図には、周辺の建物による影の影響で道路面の輝度が異なる場所や、モザイクキング時に画像のエッジが不連続になる場所が見られた。実際に利用する際には、輝度が一定で、エッジが連続している路面画像地図になるように自然な画像合成が必要となる。

複数系列の統合の必要性

本実験では、2系列の車載カメラ画像系列のみを対象として路面画像地図の構築を行った。しかし、一度の走行で得られる路面領域は、1台の車両が走行した範囲に限られる。このため、市街地全体の路面画像地図を構築するためには、複数回の走行により構築された路面画像地図を統合することが必要となる。

4.4 おわりに

本章では、第2章で述べたカーナビゲーションに必要な要素技術のうち、「2. 環境地図構築」に関する研究を行った。第3章で述べた自車位置推定や、路面性状調査などを行うためには、高解像度かつ遮蔽を含まない路面画像地図が必要となる。本研究では、空撮画像を位置合わせの基準として用い、車載カメラ画像中の路面領域をモザイクングすることで路面画像地図を構築した。自車前方の路面領域は高解像度かつ遮蔽を含まないため、構築された路面画像地図も高解像度かつ遮蔽を含まないものとなる。低解像度な空撮画像や、路面上に遮蔽が含まれている空撮画像を地図構築の基準として用いて実験を行った結果、高解像度かつ遮蔽を含まない路面画像地図が構築できることが確認できた。



(a) 元の空撮画像



(b) 構築した路面画像地図

図 4.14 高解像度化



(a) 元の空撮画像



(b) 構築した路面画像地図

図 4.15 遮蔽の除去

第5章

路面標示検出

本章では、以下に挙げるカーナビゲーションに必要な技術の中で「4. 走行環境認識」に関する研究について述べる（太字で示す）。

1. 自車位置推定
2. 環境地図構築
3. 経路探索
4. **走行環境認識**
5. 情報提示

5.1 はじめに

5.1.1 背景と目的

路面標示は、図 5.1 に示すように、道路面に印字された文字や記号であり、交通事故の防止や道路交通の円滑化のために設置されるものである。車載カメラ画像から路面標示を検出し、その種類を認識することにより、進行方向の提示、一時停止の支援などを行うことができる。なお、本研究では走行領域の境界を表す区画線は、性質の異なるものとして検出対象としない。

路面標示の検出は、通常車載カメラ画像を図 5.2 に示す路面画像に変換し、この画像から検出する。これにより、路面標示の大きさや形状を正規化することができるため、検出が簡便になる。路面標示は、規格により形状や大きさが定まっているため、同じ種類の路面標示は路面画像中では位置によらず、ほぼ一定となる。しかし、図 5.2 に示すように、

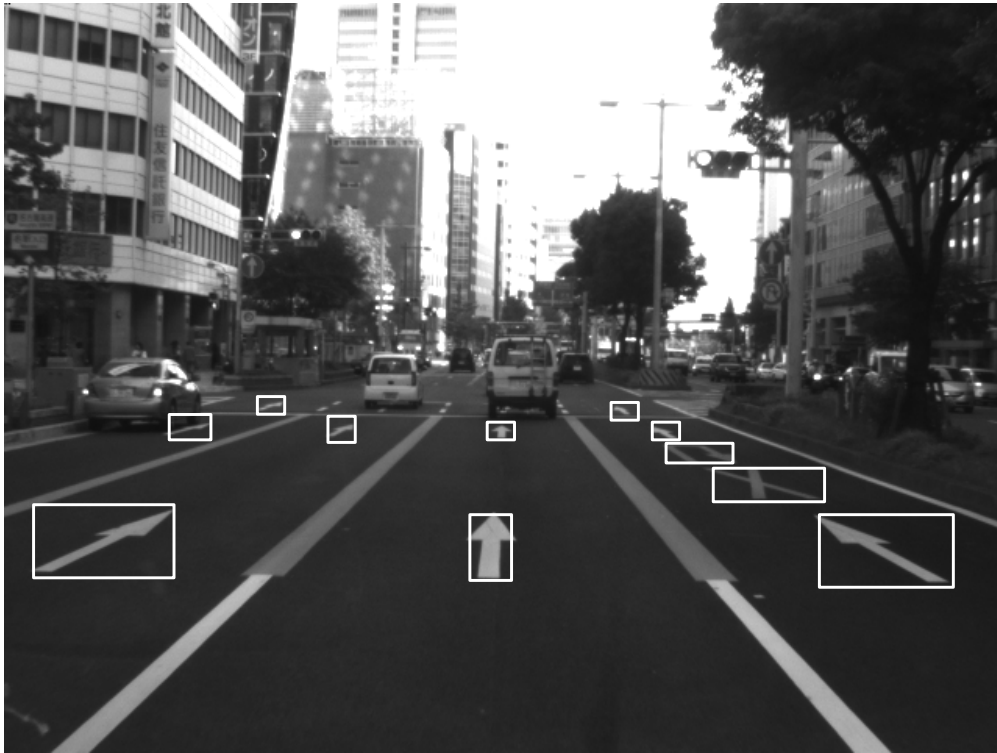


図 5.1 車載カメラ画像: 矩形は検出される路面標示を表す。

路面画像中の路面標示には、解像度や形状、ぼけなどの見えの違いが生じるため、検出性能が低下する問題がある。本章では、このような見えの変化に対して頑健に路面標示を検出することを目的とする。

5.1.2 関連研究

路面標示は路面に比べ、高い輝度を持つため、輝度に対するしきい値処理を行うことで、候補領域を検出することができる。そして、この候補領域に対して識別処理を行うことで、路面標示の検出結果とする。路面標示の種類を識別するものとして、Liらは路面標示の輪郭情報を用いている [76]。この手法では、図 5.2 のようにぼけにより明瞭な輪郭が得られない場合に精度が低下する。また、三宅らはニューラルネットワークを利用して路面標示を識別している [75]。彼らの手法では、欠けやかすれを含む路面標示の識別を行うことができる。しかし、実環境の路面標示を識別するためには、様々な見えの変化を考慮しなければならない。また、これらの手法は路面標示の種類を識別するものであり、路面標示とそうでないものの識別は行っていない。

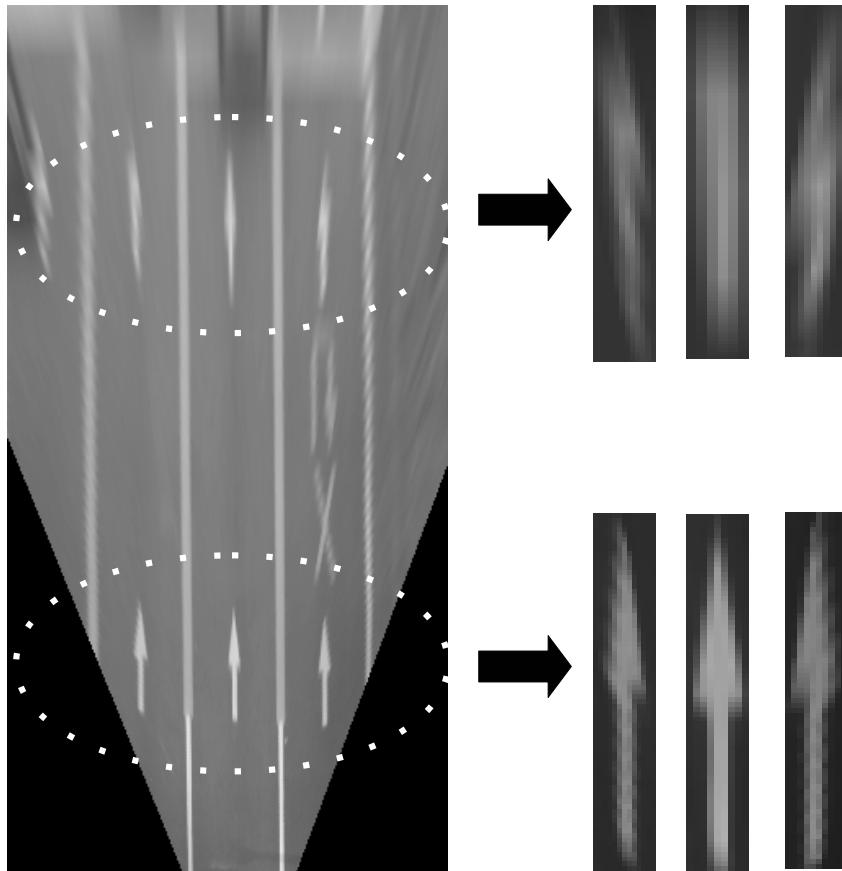


図 5.2 路面画像中の路面標示の見え：路面画像中の位置に応じて，形状，解像度，ぼけ方が異なる．

一般的な物体検出手法では，見えの変化を含んだ対象の画像を多数収集し，識別器に学習させることにより，見えの変化に対して頑健に対象を検出している．対象の見えの変化が大きいほど，様々な見えを持つ画像を学習させる必要がある．一方で，学習に用いる画像に含まれる見えの変化が大きすぎる場合，対象以外のものを対象として誤識別することが考えられる．路面標示を対象とした場合，図 5.2 に示すように，車両に近い位置では形状が高解像度かつ形状が明瞭な見えを持ち，遠い位置ほど低解像度かつ形状がぼけた見えとなる．これから，路面標示の見えが路面画像中の位置に依存していることが分かる．本研究ではこの路面標示の性質を利用して，路面画像中の位置に応じて学習した識別器を複数用いることにより，路面標示の検出精度の向上を図る．本論文では，このような識別器を位置依存型識別器と呼ぶ．また，位置依存型識別器の学習には，車載カメラ画像中の任意の位置における路面標示の学習画像を必要とする．しかし，このような学習画像を人手

で収集することは、コストが高い。このため、生成型学習法 [85] を適用することにより、位置依存型識別器の学習を行う。生成型学習法を適用する際、識別対象に適した学習画像を生成するための生成モデルが重要となる。提案手法では、3次元空間中の路面標示に対する車両の位置・姿勢を考慮した生成モデルを用いる。

5.1.3 本章の構成

以降、5.2 節では位置依存型識別器を用いた路面標示の検出手法、5.3 節では生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習法について述べる。そして、5.4 節で実験結果を示し、5.5 節で考察する。最後に 5.6 節で本章をまとめる。

5.2 位置依存型識別器を用いた路面標示検出

本節では、車載カメラ画像から位置依存型識別器を用いて、路面標示の検出を行う手法について述べる。

5.2.1 特徴量と識別器

路面標示の画像特徴量を HOG (Histograms of Oriented Gradients) 特徴量 [80] で記述し、識別器には SVM (Support Vector Machine) を用いる。HOG 特徴量と SVM を用いた物体検出手法は、歩行者 [80] や車両 [69]、道路標識 [74] などを対象として幅広く用いられており、高い検出精度が報告されている。

HOG 特徴量は、画像の局所領域における輝度の勾配方向をヒストグラム化した特徴量であり、照明変化や局所的な形状変化に頑健である。このため、本研究で扱う路面標示の検出に対しても、HOG 特徴量は有効であると考えられる。

一方、SVM は汎化性能の高い識別器であり、多くの識別問題において利用されている。本研究では、複数の種類の路面標示を識別するため、マルチクラス SVM [120] を用いる。

5.2.2 路面画像への変換

3.2.3 で述べた手法により、平面射影変換行列 P を用いて、車載カメラ画像 (図 5.1) を路面画像 (図 5.2) に変換する。本研究では車載カメラ画像ごとに共通の P を用いる。

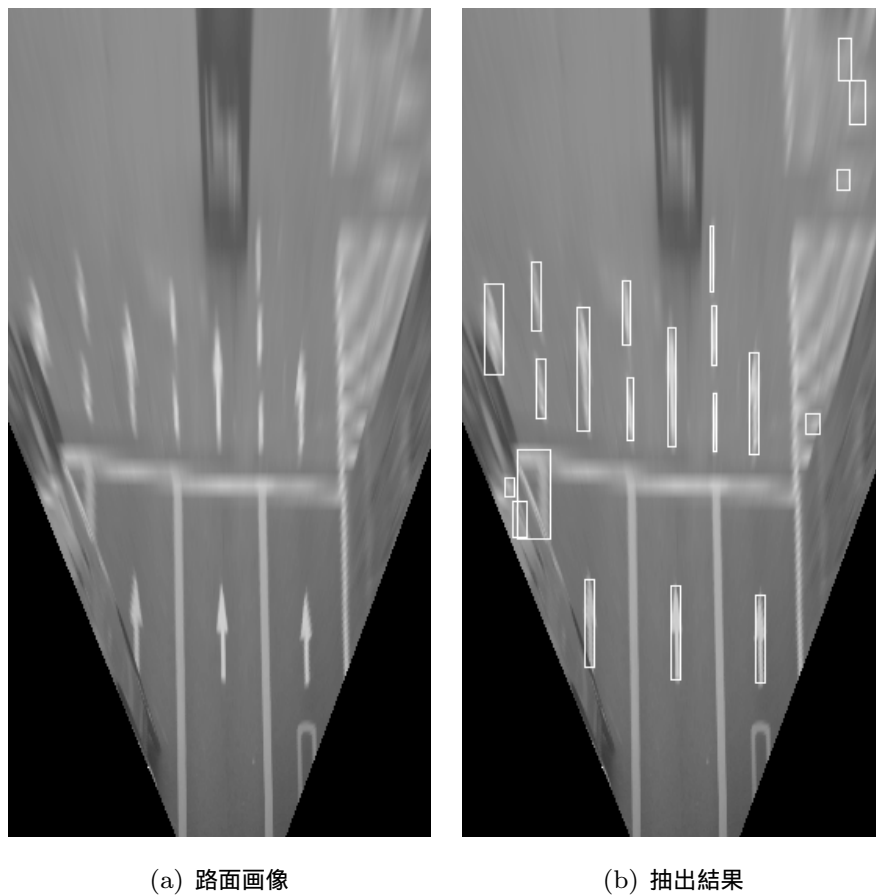


図 5.3 候補領域の抽出

5.2.3 候補領域の抽出

路面標示は、一般的に道路面に対して高い輝度を持つ。このことを利用し、輝度に対するしきい値処理によって、路面標示の候補領域を抽出する。図 5.3 (a) に示す路面画像から抽出された候補領域の例を図 5.3 (b) 中の矩形で示す。

候補領域抽出の手順を次に示す。

1. 路面画像を 2 値化し、その画像に対してラベリング処理を行う。
2. ラベリング処理の結果、得られた各領域に外接する矩形領域を算出し、候補領域とする。
3. 得られた候補領域には、図 5.4 (a) に示すように、路面標示の欠け・かすれなどの影響により、複数に分断されたものが存在する。このため、矩形の境界の距離がし

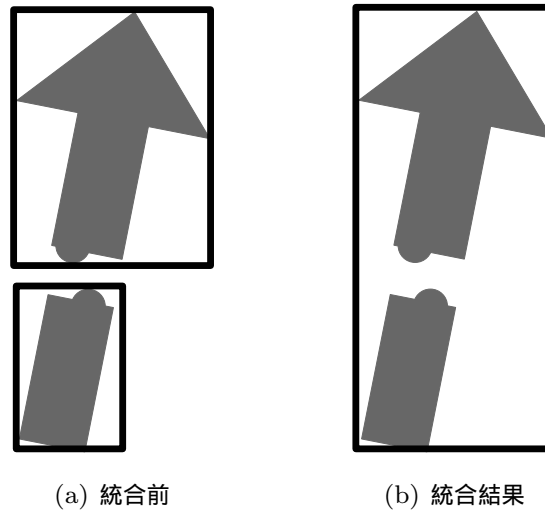


図 5.4 分断された路面標示の統合

きい値以下である複数の候補領域を包含する領域を，図 5.4 (b) に示すように新たな候補領域とする．

4. 各候補領域の大きさに対してしきい値処理を行うことで，路面標示として不適当な大きさの候補領域を除去する．
5. 最後に，路面画像から候補領域にマージンを加えたものを，候補領域画像として切り出す．このとき，候補領域の位置を矩形の左上の座標 (x, y) と表す．

5.2.4 HOG 特徴量の算出

切り出した各候補領域の大きさを正規化し，HOG 特徴量 \mathbf{v} を算出する．HOG 特徴量の詳細な算出法については，Dalal らの文献 [80] に譲る．

5.2.5 位置依存型識別器を用いた候補領域の識別

位置依存型識別器を用いて，任意の位置から抽出された候補領域を検出対象とする各種類の路面標示，あるいは非路面標示に識別する．入力された候補領域の識別結果は，その位置の近傍の識別器の出力結果を統合することで得る．

候補領域の位置 (x, y) において，その候補領域の HOG 特徴量 \mathbf{v} を識別する識別器を $f(\mathbf{v}|x, y)$ とする． N 種類の路面標示を検出対象とした場合， $f(\mathbf{v}|x, y)$ は識別結果として

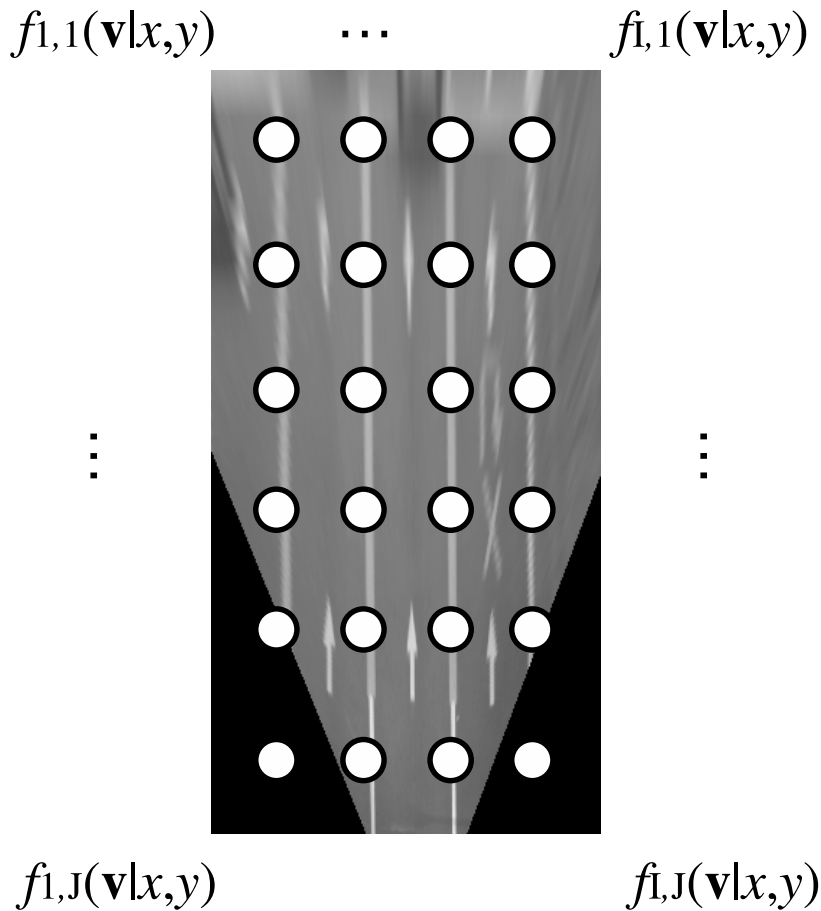


図 5.5 識別器の配置

$\{0, \dots, N\}$ のいずれかの値を出力する．ここで，出力結果 $\{1, \dots, N\}$ は対応する路面標示の種類を，出力結果 0 は非路面標示を表す．提案手法では，図 5.5 に示すように等間隔に配置した $I \times J$ 個の識別器 $f_{i,j}(\mathbf{v}|x,y)$ を用いる．これらの識別器は，5.3 節で述べる生成型学習法により，事前に学習されているものとする．そして，これらの識別器を用いて，任意の位置 (x,y) における $f(\mathbf{v}|x,y)$ の出力結果を得る．

$f(\mathbf{v}|x,y)$ の出力結果は，図 5.6 に示すように，候補領域の位置 (x,y) に対する近傍の 4 つの識別器から求める．ここで， $f(\mathbf{v}|x,y)$ の出力結果がクラス k となる確率を $p(\mathbf{v}, x, y, k) (\in [0, 1])$ と表す．このとき， (x,y) 近傍の 4 つの識別器の出力から，出力結果がクラス k である確率を求める．具体的には，近傍の識別器が出力する各クラスの確率

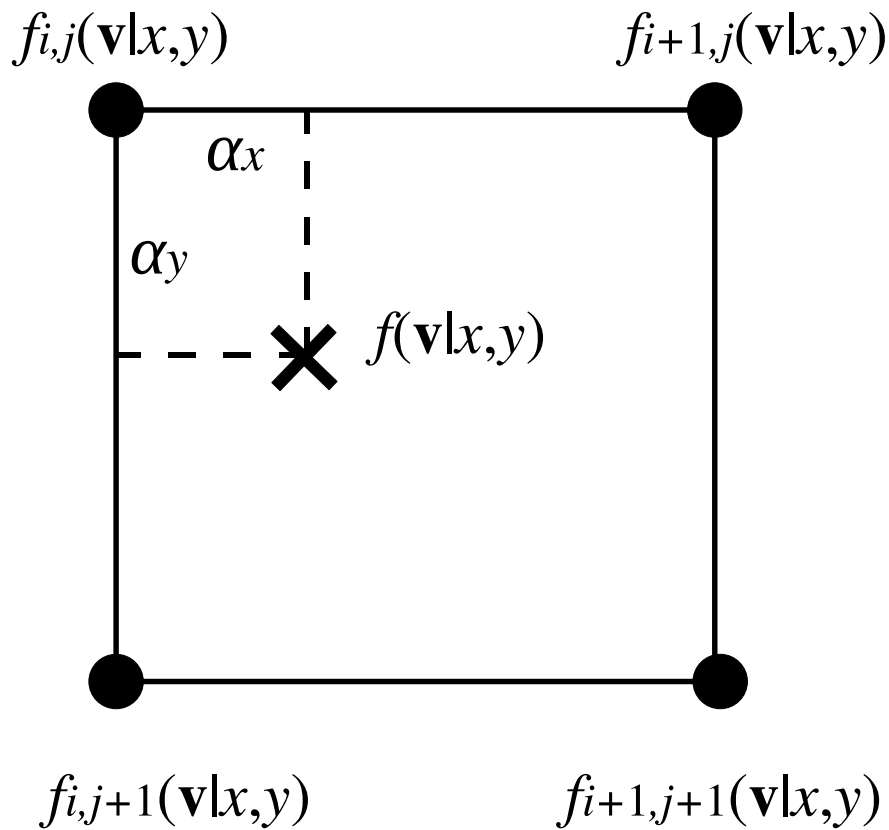


図 5.6 識別結果の統合

を以下のように線形補間で統合することにより, $p(\mathbf{v}, x, y, k)$ を求める.

$$\begin{aligned}
 p(\mathbf{v}, x, y, k) &= (1 - \alpha_x)(1 - \alpha_y)p_{i,j}(\mathbf{v}, x, y, k) \\
 &\quad + \alpha_x(1 - \alpha_y)p_{i+1,j}(\mathbf{v}, x, y, k) \\
 &\quad + (1 - \alpha_x)\alpha_y p_{i,j+1}(\mathbf{v}, x, y, k) \\
 &\quad + \alpha_x\alpha_y p_{i+1,j+1}(\mathbf{v}, x, y, k)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

α_x, α_y は, (x, y) から各識別器までの距離 $\alpha_x, \alpha_y \in [0, 1]$ を表す.

そして, クラスに属する確率が最大となるものを識別結果 k_{result} とする.

$$k_{\text{result}} = \arg \max_{k=0, \dots, N} p(\mathbf{v}, x, y, k) \tag{5.2}$$

5.3 生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習

位置依存型識別器の学習には、車載カメラ画像中の様々な位置で収集した学習画像を用いる必要がある。しかし、実際にこのような学習画像を人手で収集することはコストが高い。そこで、本研究では識別器の学習に生成型学習法を利用する。生成型学習法は、少数の原画像から形状やぼけなどの様々な変化を含んだ多数の学習画像を生成する手法である。多数の学習画像を収集する必要がないため、効率的な学習が可能となる。路面標示のように大きさや形状が規格で定められた対象は、その規格に沿った画像を原画像として用いることができるため、生成型学習は特に有効である。本研究では、路面標示の形状変化を扱うため、路面標示に対する車載カメラの3次元の位置と姿勢を考慮して、路面標示画像を生成する。従来の生成型学習法 [85] は、カメラに正対している場合が多い道路標識を生成の対象としているため、カメラの光軸と道路標識の中心が一致するモデルを用いている。このため、実画像に近い路面標示を生成するためには不十分であると考えられる。そこで、車載カメラ画像中の位置に応じた識別器を学習するため、車載カメラと路面標示の位置関係、および車両の姿勢を考慮した生成型学習法を適用する。

5.3.1 生成モデル

本研究では、車両の走行方向に対して路面標示が前方に存在すると仮定する。そして、この環境下において撮影されるであろう路面標示を含む車載カメラ画像を生成する。路面標示画像の生成を行う環境として、車両と路面標示の位置関係、車載カメラの内部特性を考慮する。車両と路面標示の位置関係を表すため、図 5.7 に示す車両モデルを考える。本研究では、車載カメラは車両に固定し、姿勢が一致するものとする。車載カメラを地面からの高さ h [m] の位置に固定し、車両から距離 d [m]、横方向のずれ l [m] に路面標示が存在するとする。また、車両の3軸まわりの回転角(ヨー, ピッチ, ロール)を (θ, ϕ, ψ) [°] とする。カメラの内部特性は、解像度 $W \times H$ [pixels]、画角 γ [°]、散乱円半径 σ [pixel] により表す。

以上をまとめると、生成に用いるパラメータを $\mathbf{p} = [h \ d \ l \ \theta \ \phi \ \psi \ W \ H \ \gamma \ \sigma]^T$ と表す。 \mathbf{p} を任意に設定することにより、路面標示画像を生成する。

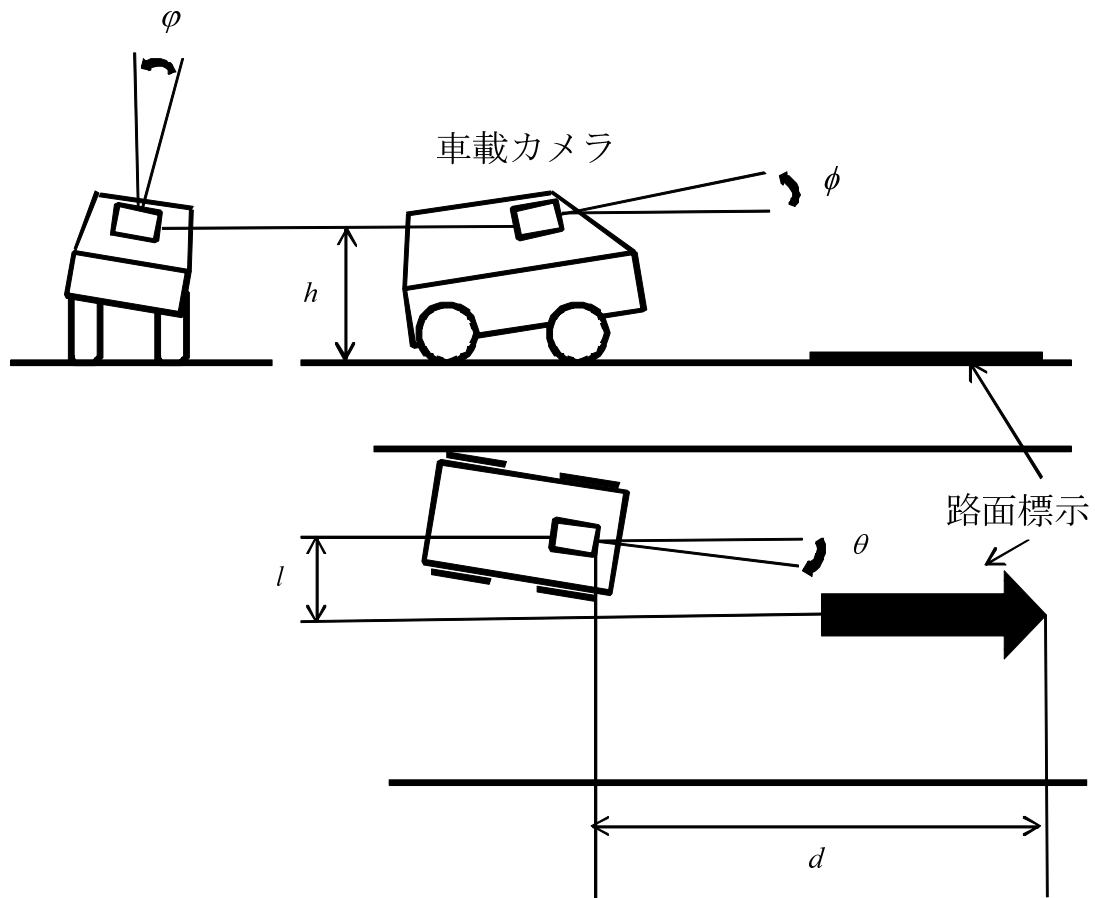


図 5.7 車両モデル

5.3.2 生成手法

図 5.8 に路面標示画像の生成過程を，図 5.9 に生成した路面標示画像を示す．以下の手順で学習に用いる路面標示画像を生成する．

1. 図 5.8 に示すように路面標示の原画像を道路面へ投影することにより，仮想的な車載カメラ画像を生成する．自車を原点とし，自車前方 d [m]，自車の正面方向に対する横位置 l [m] に路面標示を配置する．また，自車の姿勢 θ, ϕ, ψ [°] を与える．
2. 生成した車載カメラ画像に散乱円半径 σ [pixel] のガウシアンフィルタを畳み込むことで，光学ぼけを与える．

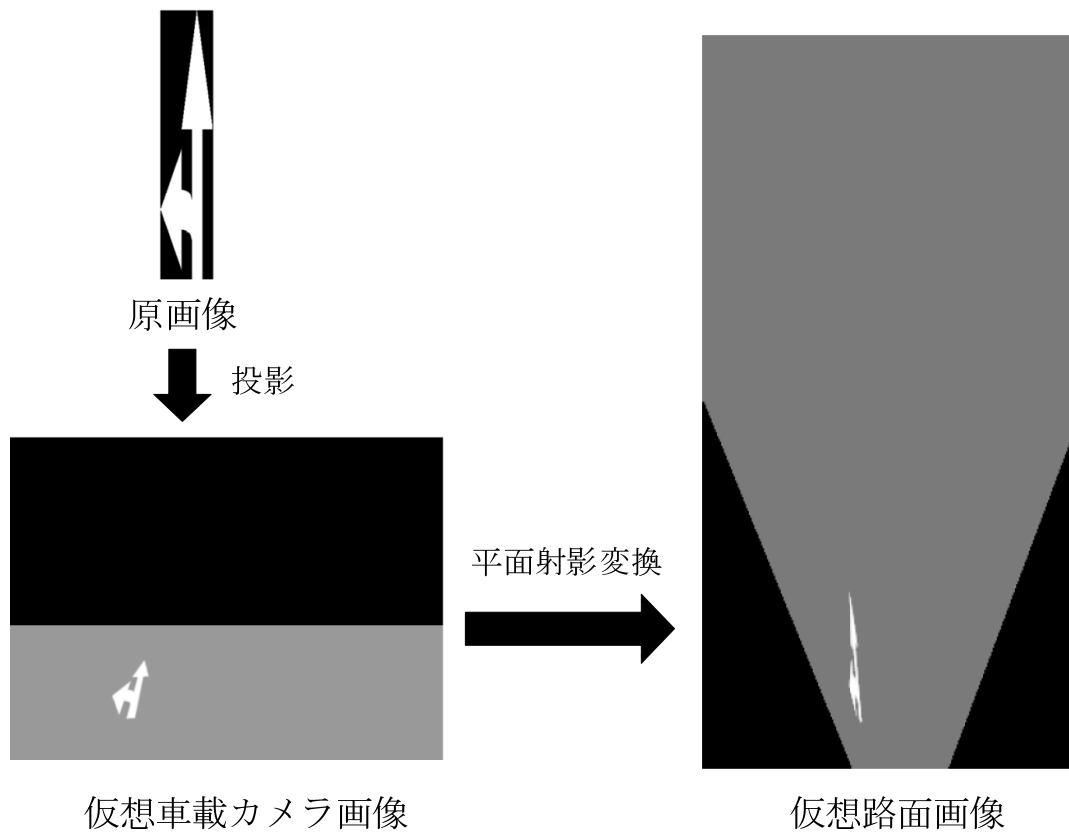


図 5.8 生成過程

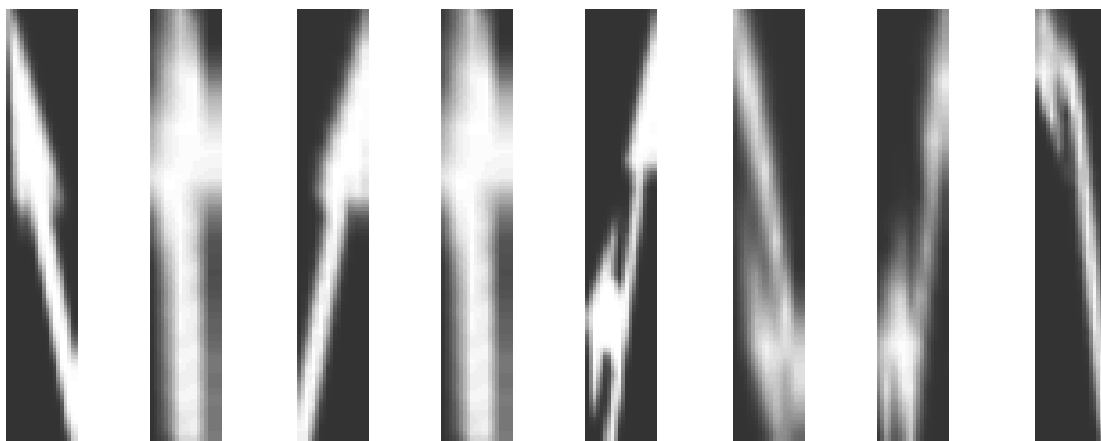


図 5.9 生成画像

3. 5.2.3 節で述べた候補領域の抽出手法を用いて、路面標示画像を切り出し、HOG 特徴量を算出する。また、切り出した路面標示画像の位置 (x, y) は、次節で述べる識

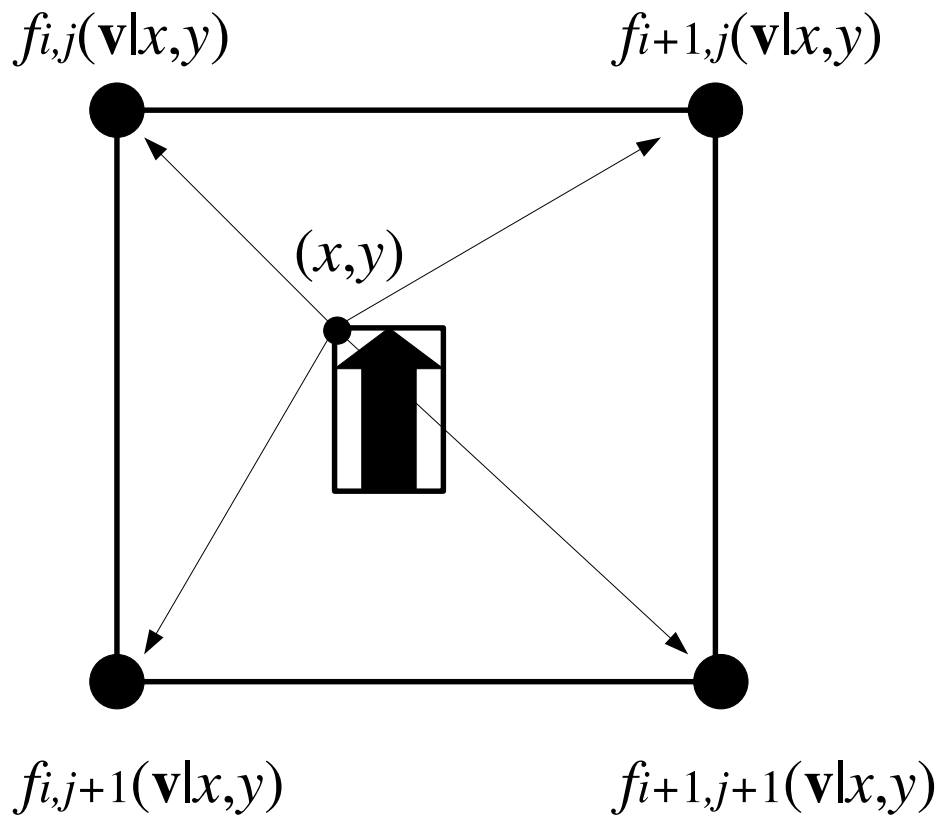


図 5.10 生成画像を用いた識別器の学習

別器を学習する際に用いる。

パラメータベクトル p を様々に変化させながら以上の処理を行うことにより、図 5.9 に示すような位置情報付きの路面標示画像を多数生成する。

5.3.3 位置依存型識別器の学習

生成した多数の路面標示画像を用い、位置依存型識別器を学習する。学習は、生成した路面標示画像、および非路面標示画像を入力とすることによって行う。非路面標示画像は、車載カメラ画像中の路面標示以外の領域からランダムに切り出すことにより収集する。生成した路面標示画像は、図 5.10 に示すように、それぞれ近傍の 4 つの識別器の学習に用いる。そして、対象とする全ての路面標示の種類に対して同様の処理を行い、生成

した路面標示画像と非路面標示画像を用いて各識別器を学習する。

5.4 実験

提案手法の有効性を示すため、実際の車載カメラ画像を用いて路面標示の検出実験を行った。

5.4.1 実験条件

本実験では、図 5.11 に示す 9 種類の路面標示を検出対象とした。なお、候補領域が画像の端に接するものは検出対象から除外した。本実験で用いた車載カメラ画像の解像度は 640×480 pixels であり、下端から 240 pixel までを検出対象領域とした。これは、通常の走行時において検出が必要と考えられる車両前方の約 30 m までの領域に対応する。合計 1,046 個の路面標示が画像中に含まれている 136 枚の車載カメラ画像を使用した。また、これらの車載カメラ画像は晴天時に車両が平坦な道を直進走行している際に撮影したものであり、一部の画像において前方車両が存在した。

本実験では、以下の手法について検出性能の比較を行った。

- 提案手法: 位置依存型識別器を用いて路面標示の検出を行う。本実験では、識別器の数による検出性能の違いを調査するため、以下に示す 4 通りについて、それぞれ実験を行った。

20 (2×10) 個を配置
40 (4×10) 個を配置
80 (4×20) 個を配置
160 (8×20) 個を配置

- 比較手法: 画像中の様々な位置で生成した路面標示を学習画像とした単一の識別器を用いる。

切り出した候補領域の大きさを 32×32 pixels に正規化した後、2,816 次元の HOG 特徴量を算出した。識別器の学習に用いる路面標示画像は、生成に用いる各パラメータを変化させることで多数生成した。生成に用いるパラメータのうち、カメラの内部特性に関するものは既知とし、表 5.1 に示す値を用いた。その他のパラメータについては、各パラ



図 5.11 検出対象とする路面標示

表 5.1 実験に用いたカメラパラメータ

パラメータ	$W \times H$	σ	γ
値	640 × 480 pixels	1 pixel	30°

表 5.2 実験に用いた車両パラメータ

パラメータ (最大-最小)	位置			姿勢		
	l	d	h	θ	ϕ	ψ
値	-3 ~ 3 m	5 ~ 30 m	1.5 ~ 1.7 m	-5 ~ 5°	-5 ~ 5°	-5 ~ 5°

メータの範囲を設定し，この範囲内からパラメータの値を一様乱数により与えた．表 5.2 に本実験で設定したパラメータの範囲を示す．これらのパラメータの範囲は，事前に計測した直進走行時における車両の位置や姿勢の変化した範囲から決定した．本実験では，図 5.11 に示す路面標示の画像を原画像とし，種類ごとに 1,000 枚ずつ路面標示画像を生成し，画像中の各位置で位置依存型識別器の学習に用いた．また，非路面標示画像として，路面標示を含まない車載カメラ画像でランダムに切り出すことにより収集した画像 2,000 枚を用いた．

表 5.3 実験結果：検出性能

	識別器数	再現率	適合率	F 値
比較手法	1	0.935 (978/1,046)	0.922 (978/1,061)	0.928
提案手法	20	0.941 (984/1,046)	0.958 (984/1,027)	0.950
	40	0.943 (986/1,046)	0.965 (986/1,022)	0.954
	80	0.943 (986/1,046)	0.966 (986/1,020)	0.954
	160	0.943 (986/1,046)	0.966 (986/1,020)	0.954

5.4.2 評価方法

本実験では，路面標示を検出した際の再現率，適合率，およびこれらの調和平均である F 値により検出性能を評価した．

$$\text{再現率} = \frac{\text{正しく検出された路面標示の数}}{\text{車載カメラ画像に含まれる路面標示の総数}}$$

$$\text{適合率} = \frac{\text{正しく検出された路面標示の数}}{\text{検出された路面標示の総数}}$$

$$\text{F 値} = \frac{2 \cdot \text{再現率} \cdot \text{適合率}}{\text{再現率} + \text{適合率}}$$

正しく検出された路面標示は，検出された路面標示が実際の路面標示の種類として正しく識別されたものとした．

5.4.3 実験結果

表 5.3 に提案手法，および比較手法の検出性能を示す．図 5.12 に提案手法による検出結果の例を矩形で示す．図 5.12 中の破線より下側を検出領域とした．

検出性能

表 5.3 から，単一の識別器を用いた比較手法に比べ，複数の位置依存型識別器を用いた提案手法による F 値の向上を確認した．提案手法では識別器の数の違いによらず，F 値



図 5.12 実験結果：白枠で検出結果を示す。

が 0.950 以上となった。図 5.12 に示すような前方車両がない場合や強い影が存在しない場合には、多くのフレームにおいて正しく検出が可能であった。また、比較手法では誤検出となったが、提案手法では非路面標示として、正しく除外されたものがあることを確認した。提案手法が 80 個の識別器を用いる場合、比較手法では誤って検出された 49 個の候補領域が、提案手法では正しく除外できた。この一例を図 5.13 に示す。図 5.13 の楕円で示す前方車両の車体の反射を抽出した候補領域が、比較手法では誤検出となったが、提案手法では正しく除外できた。また、提案手法で誤検出とされた候補領域は比較手法でも誤検出となったり、比較手法で正しく検出されたものが、提案手法で未検出となることはなかった。

識別器の数

表 5.3 から、個々の識別器を用いた比較手法と比べて、20 個の識別器を用いた提案手法による F 値が 0.928 から 0.950 と向上した。さらに多くの識別器を用いた場合、識別器の



(a) 比較手法



(b) 提案手法 (識別器 80 個)

図 5.13 誤検出の削減

数が 40 個で F 値が 0.954 となり，これ以上の数では変化しなかった．

誤検出率・未検出率

提案手法，比較手法のいずれにおいても前方車両や街路樹の木漏れ日などが誤検出される場合が見られた．また，車両から遠い位置に存在するものや，前方車両によって部分的に遮蔽されたもの，強い影が発生しているもの，路面標示自体の欠けやかすれが大きいものに対して誤検出および未検出が見られた．これらの誤検出は，路面標示としては識別されたが，種類の識別を誤ったため，誤検出とされた．

処理速度

本実験では，計算機として CPU: Core i7 2.80 GHz，メモリ: 4 GB を用いて，車載カメラ画像 1 枚あたり約 30 ms で路面標示の検出が可能であった．

5.5 考察

本節では，「位置依存型識別器を用いた路面標示検出」，「生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習」，「誤検出・未検出への対応」に対して考察する．

5.5.1 位置依存型識別器を用いた路面標示検出

路面標示は，路面画像中の位置に依存して見えが変化する．このことを利用し，車載カメラ画像（路面画像）中の路面標示の位置に応じた位置依存型識別器を検出に用いた．実験により，単一の識別器を用いる場合に比べ，提案手法による路面標示の検出性能が高かった．これによって，提案手法の路面標示検出に対する有効性を確認した．本論文では，車載カメラ画像中の路面標示の位置のみに注目したが，車両の姿勢に応じた識別器を用いることで検出精度の更なる向上が可能であると考えられる．また，本実験では 40 個以上の識別器を用いた場合に，F 値の変化が見られなかった．これは，識別器の数が多くなるほど隣接する識別器の識別結果の違いが小さくなり，統合しても結果が変わらないためである．このため，一定数以上の識別器を用いることによって，十分な検出が得られることが示された．

5.5.2 生成型学習法を用いた位置依存型識別器の学習

位置依存型識別器を学習するため、車載カメラ画像中の様々な位置における多数の路面標示の学習画像が必要である。このような学習画像を人手で収集することは、コストが高い。これに対して、生成型学習法を適用することにより、位置依存型識別器の学習を行った。本研究では、車載カメラ画像中の路面標示の位置が重要であるため、特に車両と路面標示の位置関係や車両の姿勢を考慮した生成を行った。実験では、提案手法により生成した学習画像を用いて学習した位置依存型識別器を用いた場合の F 値が 0.954 となった。また、生成型学習法を用いずに、路面標示画像として図 5.11 に示す原画像のみを用いて各識別器を学習した場合、F 値が 0.648 となった。これらから、位置依存型識別器を用いた路面標示検出に対する生成型学習法の有効性を確認した。生成型学習において生成した画像が実画像と同等の見えを持つことは重要であり、そのような学習画像を生成することによって、更なる検出精度の向上が見込める。今後、考慮すべき路面標示特有の変化として、経年劣化などによる欠けやかすれなどが挙げられる。しかし、このような変化の過程は複雑であると考えられる。そのため、検出結果を利用して欠けやかすれなどを含む路面標示の実画像を収集し、生成された路面標示と組み合わせて学習に用いるアプローチも考えられる。

5.5.3 誤検出・未検出への対応

誤検出の多くは、前方車両と街路樹の木漏れ日であった。前方車両に対しては、車両を検出することで対応できると考えられる。街路樹の木漏れ日に対しては、路面画像に特定のパターンとして模様が現れるため、これを利用して除去することが考えられる。また、あるフレームで検出した路面標示を、時間方向に追跡することにより、検出結果の信頼性を評価する手法も考えられる。他にも、路面標示の解像度が低い場合や路面標示の一部が前方車両などに遮蔽されている場合にも誤検出が見られた。これらは、認識において重要な箇所（矢印の先端など）の情報が遮蔽により欠落したためだと考えられる。

未検出に関しては、提案手法では車載カメラ画像からの候補領域を、輝度値に対して固定のしきい値を用いて行ったが、これによって候補領域自体が抽出できない場合が見られた。このため、候補領域の抽出手法の改良が今後の課題として挙げられる。

5.6 おわりに

本章では、第 2 章で述べたカーナビゲーションに必要な要素技術のうち、「4. 走行環境認識」の一つとして、道路面上に印字された路面標示を検出する研究について述べた。車載カメラ画像中では、様々な要因によって路面標示の見えが変化するため、検出が難しくなる。提案手法では、路面画像中での路面標示の位置に応じた位置依存型識別器を用いることによって検出精度の向上を図った。また、現実に近い見えを持つ路面標示の画像を生成する生成型学習法を用いることで、学習画像の収集コストを削減した。実際に走行した際に撮影した車載カメラ画像から路面標示を検出した結果、単一の識別器に比べて、複数の位置依存型識別器により性能が向上することを確認した。

第6章

結論

本章では，本論文を総括し，今後の課題と展望について述べる．

6.1 総括

本研究全体の目的は，コンピュータビジョン技術を活用することで，カーナビゲーション技術を発展させ，より安全で快適な交通社会を実現することであった．

本論文では，まず第1章で高度交通システム（ITS）について概説し，ITSにおけるコンピュータビジョン技術について述べた．そして，ITSにおけるコンピュータビジョン技術をカメラの利用方法により，以下の3つに分類した．

1. 車載カメラを用いたカーナビゲーションにおける自車位置推定と環境認識
2. 車内に設置したカメラを用いたドライバの状態理解
3. 道路環境中に設置したサーベイランスカメラを用いた環境認識

ここでは，各々に関する研究を概説し，本研究全体の目的について述べた．

続く第2章では，以上で挙げたコンピュータビジョン技術の中で，特に本研究が目的とする「1. 車載カメラを用いたカーナビゲーションにおける自車位置推定と環境認識」に関する研究を幅広く述べた．そして，本研究で対象とした路面画像処理について述べた．ここでは，カーナビゲーションに必要な要素技術として，以下の5つを挙げた．

1. 自車位置推定：走行環境中における自車の位置を知る技術
2. 環境地図構築：走行環境の地図をデータベースとして構築する技術
3. 経路探索：現在位置から目的地までの経路を求める技術

4. 走行環境認識：走行領域を特定したり，歩行者などを検出したりする技術
5. 情報提示：以上の技術で得られた情報をドライバへ提示する技術

本論文では，この中でも特に路面画像処理を活用できる以下の3つの研究について述べた．

- (a) 空撮画像を用いた自車位置推定（第3章）：「1. 自車位置推定」に関連
- (b) 路面画像地図構築（第4章）：「2. 環境地図構築」に関連
- (c) 路面標示検出（第5章）：「4. 走行環境認識」に関連

そして，これらの研究の目的と位置付けについて述べた．以降の章では，これらの研究の詳細について述べた．

第3章では，「1. 自車位置推定」を目的とした研究について述べた．高精度な自車位置を求めることは，カーナビゲーションにおける基本課題である．本研究では，特に交差点付近において高精度な自車位置を推定することを目的とした．これを実現するため，空撮画像から構築した環境地図と車載カメラ画像を対応付けた．ここでは，空撮画像と車載カメラ画像を高精度に対応付けるため，複数時刻の路面画像から構築した局所地図を用いる手法を提案した．市街地の交差点付近における4つの車載カメラ画像系列を対象とした実験を行い，提案手法による自車位置推定性能の向上を確認した．

第4章では，「2. 環境地図構築」と関連して，路面画像地図を構築することを目的とした研究について述べた．第3章で述べた自車位置推定や，路面性状調査などを行うためには，高解像度かつ遮蔽を含まない路面画像地図が必要となる．本研究では，空撮画像を位置合わせの基準として用い，車載カメラ画像中の路面領域をモザイクングすることで路面画像地図を構築した．自車前方の路面領域は高解像度かつ遮蔽を含まないため，構築された路面画像地図も高解像度かつ遮蔽を含まないものとなる．低解像度な空撮画像や，路面上に遮蔽が含まれている空撮画像を地図構築の基準として用いて実験を行った結果，高解像度かつ遮蔽を含まない路面画像地図が構築できることが確認できた．

第5章では，「4. 走行環境認識」の一つとして，道路面上に印字された路面標示を検出する研究について述べた．車載カメラ画像中では，様々な要因によって路面標示の見えが変化するため，検出が難しくなる問題があった．ここでは，特に車載カメラ画像中における路面標示の位置の違いによる見えの変化に着目した．路面標示は規格により大きさや形状が決まっているため，車両との位置関係が決まれば，その見えはある程度予想できる．

本研究では、これを利用して路面画像中の路面標示の位置に応じた位置依存型識別器を用いることによって検出精度の向上を図った。また、識別器の学習のため、3次元空間中の路面標示に対する車両の位置・姿勢を考慮した生成型学習法を適用した。これにより、学習画像の収集コストを削減した。実際に走行した際に撮影した車載カメラ画像から路面標示を検出した結果、単一の識別器に比べて、複数の位置依存型識別器を用いることにより検出性能が向上することを確認した。

次節では、これらの研究に対する今後の課題と展望について述べる。

6.2 今後の課題と展望

本論文で述べた3つの研究に関する今後の課題と展望について述べる。

(a) 空撮画像を用いた自車位置推定 (第3章)

第3章で述べた自車位置推定は、今見ている路面を上空から見たものに変換した上で、鳥の視点から自分が世界のどの位置にいるかを知るというアイデアに基づいたものである。本研究では車載カメラ画像、空撮画像に共通して存在する路面標示の対応付けを行なった。しかし、現在の車載カメラ画像、空撮画像の解像度では、これらの画像間の対応付けに路面標示以外を利用することは難しい。より高解像度の画像を撮影することができるようになれば、路面の詳細なテクスチャを対応付けることで、さらに高精度な自車位置を推定することができる。この研究を発展させることにより、地球とは異なる惑星上で、宇宙から撮影した地表の画像を参照しながら探索機を走行させることも不可能ではないだろう。

また、路面標示が存在する区間では高精度な自車位置を求めることができる一方で、それ以外の区間では自車位置の推定精度が低下する。現在のカーナビゲーションシステムがGPS測位、自律航法、マップマッチングを組み合わせたハイブリッド型であることから分かるように、単一の手法で完全に自車位置を得ることは難しい。このように、手法によって向き不向きな場所が存在するため、異なる情報に基づく自車位置推定手法を相補的に利用する必要がある。

(b) 路面画像地図構築 (第4章)

第4章で述べた路面画像地図構築は、高解像度かつ遮蔽を含まない路面画像地図を構築することを目的とした。本研究の課題として、対応付けの初期値として人手による操作が

必要であったため、これを自動化することが挙げられる。また、本研究では路面が平面であるという仮定のもとで路面画像地図を構築していたが、実際には3次元的な起伏を持つ道路も存在するため、このような道路に対応することも課題として挙げられる。

本研究では、路面画像地図を構築する目的として第3章で述べた自車位置推定に用いることを主な目的としたが、他の目的にも利用することができる。近年では、多くのユーザがGPSを搭載した車両で道路を走行した際のデータから地図を構築するOpenStreetMap [121]のようなサイトも現れている。このような地図共有サイトに路面画像地図を統合し、詳細な路面データを付加することができる。これにより、広範囲の路面性状調査や実際のデータに基づくシミュレーション、映画やゲームなどのCGコンテンツとして利用することが、より手軽に行えるようになるだろう。また、世界全ての路面画像地図を構築することもいずれは可能になるであろう。

(c) 車載カメラ画像からの路面標示検出 (第5章)

第5章で述べた車載カメラ画像からの路面標示検出は、路面画像中に出現する路面標示の位置に対する見えを考えることによって、検出性能の向上を図った。路面標示の見えは、路面画像内の位置に限らず、車両の姿勢や速度などにも依存している。このため、これらに応じた識別器を用いることで、検出性能をさらに向上できると考えられる。また、本研究で用いた生成型学習法は、このような識別器に適した学習画像を与えることができるため、相性が良い。生成型学習法は、道路標識、歩行者など様々な対象に対して一定の効果を示している。このため、本研究の位置やその他のパラメータに依存した識別器を適用することで、これらに対しても検出性能を向上できると考えられる。今後は、対象の様々な見えに対して、より頑健に検出する手法を検討していきたい。

最後に、本論文で述べた路面画像処理を含むコンピュータビジョン技術を用いたITS (高度交通システム)に関する今後の展望を述べる。ここでは、再度カーナビゲーションに必要な次の5つの要素技術を挙げた上で、それぞれについて今後の展望を述べる。

1. 自車位置推定
2. 環境地図構築
3. 経路探索
4. 走行環境認識
5. 情報提示

「1. 自車位置推定」は、カーナビゲーションを行うための基本技術であり、その最終目標は、あらゆる場所で全ての車両の位置を完全に求めることである。完全な自車位置推定が可能となれば、ピンポイントの停止や駐車支援、車両同士が衝突しない運転支援、効率的な経路設計などを実現することができるであろう。また、実世界から得た情報に対して正確な位置情報を与えることが可能となるため、環境地図を含む様々な情報を保持する高度なデータベースを構築することにも役立てられるだろう。

「2. 環境地図構築」に対して、本論文では路面画像地図を構築することについて述べた。このような路面画像地図を構築する際に、各時刻のカメラパラメータを求めることができれば、路面のみではなく周辺の環境の3次元地図を構築できる。この際、空撮画像のような基準となるものを用いることにより、広大な都市空間の地図を効率的に構築できると考えられる。多くの車両が車載カメラを搭載して走行することで、コンピュータ上に実世界と寸分違わぬ仮想世界をリアルタイムに構築することも夢ではない。

「3. 経路探索」は、自車位置と目的地を入力として、道路ネットワーク上から最適な経路を求める技術である。このため、本論文ではコンピュータビジョン技術と直接の関係はないものとして、経路探索について詳しくは述べなかった。しかし、画像理解に基づいた経路探索技術も今後必要となってくるだろう。震災時に通行不可能となった道路を空撮画像から検出し、この情報に基づき経路探索を行うことで、効率的な救援活動に役立てるなどの応用が考えられる。また、舗装された道路がない場所でカメラ画像から走行領域を検出し、経路を設計しながら走行する無人探索機などにも必要な技術となってくるだろう。

「4. 走行環境認識」で扱う範囲は広く、走行環境において認識すべきものとして、走行可能領域、衝突危険物体、道路構造物、天候など枚挙に暇がない。このような全ての対象を画像から認識することは、チャレンジングな問題である。本論文では、物体検出の1つとして路面標示検出について述べた。このような物体検出だけを見ても、実世界の検出対象は形状変化やぼけ、オクルージョンなど、様々な見えの変化を含むため、難しい問題である。走行環境のような現実世界を認識、理解することはコンピュータビジョンの主な目的である。多くのデジタルカメラに顔検出機能が標準的に搭載されるようになったように、今後も車両には様々な走行環境認識技術が搭載されていくだろう。

「5. 情報提示」に関して本論文で詳しくは扱わなかったが、以上で述べた技術により得られた情報をドライバーに伝えることは重要である。従来のカーナビゲーションシステムは、車両の現在位置と目的地、その間の経路をディスプレイ上に提示するものであった。今後、ドライバーに提示することができる情報が増えるに従い、それらを分かりやすく提示

する技術が必要となる。近年では、カーナビゲーションシステムのディスプレイ上に走行可能領域や、前方車両や歩行者の検出結果を車載カメラ画像上に重畳して表示するシステムが既に実用化されている [122]。このように、ドライバが知覚しにくいものを車両が認識し、ドライバに分かりやすく定義することで、より高度なカーナビゲーションに繋がると考えられる。

以上、「車載カメラを用いたカーナビゲーション」についての今後の展望を述べた。さらに、第1章で述べた「車内に設置したカメラを用いたドライバの状態理解」、「道路環境中に設置したサーベイランスカメラを用いた環境認識」を活用することで、今まで車両単体では知り得なかった様々な情報も得ることができる。これらを統合利用することによって、人間以上の知覚を兼ね備えた知性を持つ車両 (Intelligent Vehicle) を実現することも夢ではないだろう。

今後も本研究を発展させていくことによって、ドライバの運転支援だけに留まらず、誰もが安全で快適に暮らすことができる ITS 社会の実現を目指していきたい。

謝辞

本博士論文は、筆者が名古屋大学工学部、名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程ならびに名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程在籍中に行った研究をまとめたものである。本論文を執筆するにあたって、多くの先生方、共同研究者、村瀬研究室諸氏、友人各位、その他多くの方々の多大なる御指導、御協力に深く感謝致します。筆者が村瀬研究室に配属されてからの6年間の研究活動は、決して筆者一人では成し得なかったことです。筆者は、良く言えば多分野に渡り強い興味を持てる、悪く言えば一つのことに集中できない注意散漫な人物です。こんな未熟な筆者がここまでやってこれたのは、皆様の力添えがあつてのことです。ここに、お世話になった各人への謝意を示します。

名古屋大学大学院情報科学研究科 村瀬洋 教授に心より感謝致します。これまでの研究を取り組むきっかけを与えてくださるとともに、非常に熱心な指導をして頂き、大変有難うございました。また、活気溢れる研究室、潤沢な研究環境、国内外における発表機会を数多く与えて下さったことに感謝の意を示します。

名古屋大学大学院情報科学研究科 井手一郎 准教授には、幅広い研究分野に触れる機会を頂き、深く感謝致します。筆者自身が幅広い分野に興味を持っていたため、様々な研究に触れることは研究者としての幅を広げることにつながっていると感じています。また、論文執筆の際には、全体の構成から細部に渡るまで指導して頂きました。繰り返し、感謝の意を示します。

岐阜聖徳学園大学経済情報学部 高橋友和 准教授には、研究室配属時から、朝に夜に、平日も休日も問わず、研究室外以外を通じて、一番長い時間をともに過ごしてきました。研究に関しても最も多く御相談して頂き、幾度と無く投稿論文の校正もして頂きました。また、お酒を飲み交わして頂くこともとても多く、楽しい時間を過ごさせて頂きました。本当に心より感謝を申し上げます。

名古屋大学大学院情報科学研究科 出口大輔 助教には、旧末永研究室に所属している頃

から大変お世話になりました。村瀬研究室に移動されてからも、数多くの御指導、御助言を頂きました。研究や普段の生活に関する議論の中で、互いの考えの相違から舌鋒鋭く意見を述べることも多かったことに対しては、申し訳なく思っております。研究に関しては、いつもの射た指摘をして頂き、有意義な議論の時間を過ごすとともに、研究をより良いものにすることができました。ここに、厚く御礼を申し上げます。

中京大学情報理工学部 目加田慶人 教授には、時に真面目に、時に冗談を交わしながら御指導して頂き、深謝致します。多忙な中、時間を見つけては研究室に立ち寄り、研究に関して議論して頂き、大変嬉しく感じました。

博士論文の副査を引き受けて頂いた名古屋大学大学院情報科学研究科 長尾確 教授に感謝致します。博士論文に対するコメントだけではなく、先生の数多くの研究に関して議論する機会は非常に楽しい経験となりました。

株式会社豊田中央研究所 内藤剛志 氏、小島祥子 氏には共同研究者として、大変お世話になりました。企業としての観点から、多くの研究に関する御助言、御助力、投稿論文の添削など、研究を進める上で大きな力となって頂きました。特に小島祥子 氏には、村瀬研究室に所属する同じ博士課程学生として、研究面以外にも多くの相談に乗って頂きました。ここに感謝の意を表します。

研究から生活までともに過ごしてきた村瀬研究室諸氏に感謝致します。筆者は自らの思うところを躊躇なく言葉にしてしまうため、研究室配属時には可愛くない後輩、博士後期課程時には五月蠅い先輩であったかと思えます。このような筆者に、長い間お付き合いして頂き、大変感謝致します。特に、同じ博士課程として非常に長い間苦楽を共にした道満恵介 氏、内山裕之 氏には格段の謝意を示します。社会人博士課程学生として、井尻善久 氏、小堀訓成 氏とは多くの議論を交わしました。また、秘書の蒲文代 氏、田中弘美 氏には、出張や事務手続きなどや、生活面でもお世話になりました。森研究室(旧末永研究室) 諸氏にも感謝致します。隣接する研究室の誼みで、森健策 教授ならびに学生の皆様には、普段から話し相手となって頂いたり、飲み会に誘って頂くなど、大変仲良くして頂きました。特に、陳斌 氏とは同じ博士課程学生として、色々な悩みを共有しました。まるで2つの研究室に所属しているかのように見え、とても楽しい時間を過ごさせて頂きました。先んじて卒業してしまった方々、現在在籍している方々ともどもに、感謝の意を示します。

加えて、学会、研究会、勉強会を通じて知り合った他大学の先生や学生、多くの企業の方々にも感謝します。博士後期課程においては、学会活動や筆者の個人的な活動だったものを通じて、本当に様々な人達に出会うことができ、非常にお世話になりました。お世話

になった人たちを書き連ねると、超大なものとなってしまうため、恐れながら割愛させていただきますが、感謝の気持ちに変わりはありません。これらの人たちと出会えて得た経験は、今後の人生を過ごしていく上で千金に値するものだと思信しています。今後も、多くの方々のお世話になっていくことになると思います。それらに応えられるように、精進していきたいと思えます。

最後に、長い学生生活を遠く熊本の地から見守ってくれた家族に感謝します。これまで有意義な時間を過ごすことができたのは、あらゆる面で支えてくれた母のおかげです。最期まで「自分の好きなことをすれば良い」と言い、励まし続けてくれた故父に最上の感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 警察庁交通局運転免許課, “運転免許統計 (平成 22 年版) 補足資料 1,” 2011 .
- [2] 警察庁交通局交通企画課, “交通事故統計 (平成 23 年 10 月末),” 2011 .
- [3] 国土交通省, “高度交通システム, 第 5 章 ITS 開発・展開目標,” 2004 . <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/5Ministries/5>
- [4] “IEEE Transactions on Vehicular Technology”. <http://bbcrllab-pc9.bbcrllabpcnet.uwaterloo.ca/tvt/index.html>
- [5] “IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems”. <http://www.ewh.ieee.org/tc/its/trans.html>
- [6] “ITS World Congress”. <http://www.its-jp.org/conference/>
- [7] “IEEE Intelligent Vehicles Symposium”. <http://www.mrt.kit.edu/iv2011/>
- [8] Y. Suzuki, K. Yamamoto, K. Kato, M. Andoh, and S. Kojima, “Skin Detection by Near Infrared Multi-band for Driver Support System,” In Proceeding of the 2006 IEEE Asian Conference on Computer Vision, vol.3852, pp.722–731, 2006.
- [9] S. Baker, I. Matthews, J. Xiao, R. Gross, T. Kanade, and T. Ishikawa, “Real-Time Non-Rigid Driver Head Tracking for Driver Mental State Estimation,” In Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems, pp.1–12, 2004.
- [10] 上坂竜規, 野田雅文, 出口大輔, 目加田慶人, 井手一郎, 村瀬 洋, “視線情報を利用した運転行動予測手法の検討,” 2011 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.269, 2011 .

- [11] L. Malta, C. Miyajima, N. Kitaoka, and K. Takeda, "Analysis of Real-World Driver's Frustration," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.12, no.1, pp.109–118, 2011.
- [12] K. Takeda, J.H.L. Hansen, P. Boyraz, L. Malta, C. Miyajima, and H. Abut, "International Large-Scale Vehicle Corpora for Research on Driver Behavior on the Road," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.12, no.3, pp.1–15, 2011.
- [13] 松島宏典, 内村圭一, "オクルージョンを考慮した交通流計測," *電気学会論文誌 C*, vol.122, no.12, pp.2120–2127, 2002.
- [14] 鈴木一史, 中村英樹, "交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証," *土木学会論文集 D*, vol.62, no.3, pp.276–287, 2006.
- [15] S. Kamijo, Y. Matsushita, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi, "Traffic Monitoring and Accident Detection at Intersections," In *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.703–708, 1999.
- [16] 山田宗男, 谷寄徹也, 上田浩次, 堀場勇夫, 杉江 昇, "画像処理型路面状況判別システム," *電気学会論文誌 D*, vol.120, no.8, pp.1053–1060, 2000.
- [17] 財団法人 道路交通情報通信システムセンター, "VICS," 2011. <http://www.vics.or.jp/index1.html>
- [18] 市原栄太郎, 高尾広行, 大田友一, "NaviView : 仮想車載カメラ映像による運転者の視覚支援," *電子情報通信学会論文誌 D*, vol.82, no.10, pp.1816–1825, 1999.
- [19] マイボイスコム(株), "インターネット調査(ネットリサーチ)「カーナビゲーション, カーナビ(第5回)」," 2011. <http://www.myvoice.co.jp/biz/surveys/14906/index.html>
- [20] NHK「プロジェクト X」制作班 / NHK「プロジェクト X」制作班編, *プロジェクト X 挑戦者たち 壁を崩せ 不屈の闘志 カーナビ 迷宮を走破せよ*, NHK 出版, 2005.
- [21] 富士重工業(株), "EyeSight". <http://www.subaru.jp/eyesight/eyesight/>
- [22] Z. Hu and K. Uchimura, "Solution of Camera Registration Problem Via 3D-2D Parameterized Model Matching for On-Road Navigation," *Journal of Image and*

- Graphics, vol.4, pp.3–20, 2004.
- [23] 安田明生, “GPS 技術の展望,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J84-B, no.12, pp.2082–2091, 2001.
- [24] 熊谷秀夫, “GPS/IMU の最新動向,” 写真測量とリモートセンシング論文誌, vol.49, no.5, pp.326–331, 2010.
- [25] B.W. Parkinson and P.K. Enge, “Differential GPS,” Journal of Global Positioning System: Theory and Applications, vol.2, no.164, pp.3–50, 1996.
- [26] JAXA, “準天頂衛星システム,” 2011. <http://qzss.jaxa.jp/>
- [27] S. Thrun, B. Wolfram, F. Dieter, 上田隆一, 確率ロボティクス, Robot books, 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [28] F. Bonin-Font, A. Ortiz, and G. Oliver, “Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey,” Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol.53, pp.263–296, 2008.
- [29] A. Nuchter, K. Lingemann, J. Hertzberg, and H. Surmann, “6D SLAM: 3D Mapping Outdoor Environments,” Journal of Field Robotics, vol.24, no.8–9, pp.699–722, 2007.
- [30] S. Brakatsoulas, D. Pfoser, R. Salas, and C. Wenk, “On Map-Matching Vehicle Tracking Data,” In Proceeding of the 32th Conference on Very Large Data Bases, pp.853–864, 2005.
- [31] 岩佐英彦, 栗飯原述宏, 横矢直和, 竹村治雄, “全方位画像を用いた記憶に基づく位置推定,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J84-D-II, no.2, pp.310–320, 2001.
- [32] 興梠正克, 蔵田武志, 坂上勝彦, 村岡洋一, “パノラマ画像群を位置合わせに用いたライブ映像上への注釈提示とその実時間システム,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J84-D-II, no.10, pp.2293–2301, 2001.
- [33] 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,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J92-D, no.8, pp.1197–1207, 2009.
- [34] H. Uchiyama, D. Deguchi, T. Takahashi, I. Ide, and H. Murase, “Ego-

- localization using Streetscape Image Sequences from In-vehicle Cameras,” In Proceeding of the 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.185–190, 2009.
- [35] 佐藤准嗣, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, “GPS 座標付き全方位映像群からの市街地映像マップの構築と街並変化の検出,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J90-D, no.4, pp.1085–1095, 2007 .
- [36] S. Ikeda, T. Sato, K. Yamaguchi, and N. Yokoya, “Construction of Feature Landmark Database using Omnidirectional Videos and GPS Positions,” In Proceeding of the International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.249–256, 2007.
- [37] 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,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J92-D, no.8, pp.1440–1451, 2009 .
- [38] 渋谷奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, 小島祥子, 高橋 新, “車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J92-D, no.2, pp.215–225, 2009 .
- [39] R. Gerhard and D. Tom, “Going Out: Robust Model-based Tracking for Outdoor Augmented Reality,” In Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.109–118, 2006.
- [40] Z. Hu, K. Uchimura, and L. Francisco, “Towards A New Generation of Car Navigation System-Data Fusion Technology in Solving Camera Registration Problem,” In Proceeding of the 11th World Congress on ITS, pp.1–12, 2004.
- [41] 小島祥子, 山田啓一, 二宮芳樹, “地図と画像の融合によるレーン形状推定手法の提案,” 情報処理学会論文誌, vol.42, no.12, pp.3194–3200, 2001 .
- [42] Google, “Google Street View,” 2007. <http://maps.google.co.jp/intl/ja/help/maps/streetview/>
- [43] D. Frank, S. Steven, T. Chuck, and T. Sebastian, “Structure from Motion without Correspondence,” In Proceeding of the 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.557–564, 2000.

-
- [44] R. Szeliski, *Computer Vision Algorithms and Applications*, Springer, 2010.
- [45] C. Harris and M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector,” In *Proceeding of the 4th Alvey Vision Conference*, pp.147–151, 1988.
- [46] D. Lowe, “Object Recognition from Local Scale-Invariant Features,” In *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1150–1157, 1999.
- [47] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L.V. Gool, “SURF: Speeded Up Robust Features,” *Journal of Computer Vision and Image Understanding*, vol.110, no.3, pp.346–359, 2008.
- [48] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, “ORB: an Efficient Alternative to SIFT or SURF,” In *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1–8, 2011.
- [49] A. Kawewong, S. Tangruamsub, and O. Hasegawa, “Position-invariant Robust Features for Long-term Recognition of Dynamic Outdoor Scenes,” *Transactions on IEICE Information and Systems*, vol.E93-D, no.9, pp.2587–2601, 2010.
- [50] P.J. Besl and N.D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes,” *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.14, no.2, pp.239–256, 1992.
- [51] J. Meguro, T. Murata, Y. Amano, T. Hasizume, and J. Takiguchi, “Development of a Positioning Technique for an Urban Area Using Omnidirectional Infrared Camera and Aerial Survey Data,” In *Proceeding of the 2007 International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, vol.22, no.6-7, pp.731–747, 2007.
- [52] 株式会社 (株), “岩根研究所,” 2011 . <http://www.iwane.com/index.php>
- [53] FORUM8, “FORUM8,” 2011. <http://www.forum8.co.jp/>
- [54] J. Levinson, M. Montemerlo, and S. Thrun, “Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments,” In *Proceeding of the Robotics: Science and Systems*, pp.1–8, 2007.

- [55] A. Geiger, “Monocular Road Mosaicing for Urban Environments,” In Proceeding of the 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.140–145, 2009.
- [56] A. Geiger, M. Lauer, and R. Urtasun, “A Generative Model for 3D Urban Scene Understanding from Movable Platforms,” In Proceeding of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1945–1952, 2011.
- [57] 内山寛之, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬 洋, “複数画像系列の部分画像選択に基づく移動物体を含まない車載カメラ映像の生成,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J94-D, no.12, pp.2093–2104, 2011.
- [58] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing, 2007.
- [59] 狩野 均, 中村信昭, 中村友洋, “知識の集団を用いた GA による不特定な立ち寄り地を含む経路探索,” 人工知能学会論文誌, vol.17, no.2, pp.145–152, 2002.
- [60] T.H. Hong, “Road Detection and Tracking for Autonomous Mobile Robots,” In Proceeding of the SPIE Aerosense Conference, vol.4715, pp.311–319, 2002.
- [61] 関 晃仁, 奥富正敏, “ステレオ動画像を利用した平面領域抽出による障害物検出,” 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.45, no.SIG13, pp.1–10, 2004.
- [62] 関 晃仁, 奥富正敏, “ステレオ動画像を利用した道路面領域の抽出と追跡による自車両の運動推定,” 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.47, no.SIG5, pp.90–99, 2006.
- [63] Y. Kang, K. Yamaguchi, T. Naito, and Y. Ninomiya, “Integrating Motion and Segmentation for Road Scene Labeling,” Transactions on Computer Vision and Applications, vol.2, pp.121–131, 2010.
- [64] R. Fujita, “A Roadscape Analysis System of Vehicle Mounted Camera-image,” Digest of the 2006 Technical Papers, International Conference on Consumer Electronics, pp.425–426, 2006.
- [65] H. Kurihata, T. Takahashi, I. Ide, Y. Mekada, H. Murase, Y. Tamatsu, and T. Miyahara, “Detection of Raindrops on a Windshield from an In-vehicle Video

- Camera,” *Journal of Innovative Computing*, vol.3, no.6(B), pp.1583–1591, 2007.
- [66] K. Mori, T. Takahashi, I. Ide, H. Murase, T. Miyahara, and Y. Tamatsu, “Fog Density Recognition by In-vehicle Camera and Millimeter Wave Radar,” *Journal of Innovative Computing*, vol.3, no.5, pp.1173–1182, 2007.
- [67] K. Goto, K. Kidono, Y. Kimura, and T. Naito, “Pedestrian Detection and Direction Estimation by Cascade Detector with Multi-classifiers Utilizing Feature Interaction Descriptor,” In *Proceeding of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.224–229, 2011.
- [68] F.M. Tur, D. Vazquez, D. Geronimo, and A.M. Lopez, “Learning appearance in virtual scenarios for pedestrian detection,” In *Proceeding of the 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.137–144, 2010.
- [69] F. Han, Y. Shan, and R. Cekander, “A Two-Stage Approach to People and Vehicle Detection with HOG-Based SVM,” In *Proceeding of the Performance Metrics for Intelligent Systems*, pp.133–140, 2006.
- [70] J. Levinson, J. Askeland, J. Dolson, and S. Thrun, “Traffic Light Localization and State Detection,” In *Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation*, pp.5784–5791, 2011.
- [71] G. Overett and L. Petersso, “Large Scale Sign Detection Using HOG Feature Variants,” In *Proceeding of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.326–331, 2011.
- [72] 高木雅成, 藤吉弘亘, “SIFT 特徴量を用いた交通道路標識認識,” *電気学会論文誌 C*, vol.129, no.5, pp.824–831, 2009.
- [73] 道満恵介, 出口大輔, 高橋友和, 目加田慶人, 井手一郎, 村瀬 洋, “色変動を考慮した生成型学習法による道路標識検出器の構築,” *電子情報通信学会論文誌 D*, vol.J93-D, no.8, pp.1375–1385, 2010.
- [74] 米元 聡, 嶋村 翔, “色とエッジ情報を用いた道路標識の認識,” *電子情報通信学会技術報告 2009-ITS-108(471)*, vol.108, pp.23–28, March 2009.
- [75] 三宅智彌, 三矢武法, 舟橋典克, 長坂保典, 鈴村宣夫, “道路上の標示認識と標示まで

- の距離推定,” 電子情報通信学会技術報告 1999-PRMU-98(608) , vol.98 , pp.73–80 , Feb. 1999 .
- [76] Y. Li, K. He, and P. Jia, “Road Markers Recognition Based on Shape Information,” In Proceeding of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.117–122, 2007.
- [77] R. Brunelli, *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*, Wiley, 2009.
- [78] 藤吉弘亘 , 山下隆義 , 岡田和典 , 前田英作 , ノジクヴァンソン , 石川尋代 , ドゥソルビエフランソワ , コンピュータビジョン最先端ガイド 2 Mean-Shift, Kernel Method, Local Image Features, GPU , アドコム・メディア , 2010 .
- [79] R. Lienhart and J. Maydt, “An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection,” In Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Image Processing, vol.1, pp.900–903, 2002.
- [80] N. Dalal and B. Triggs, “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection,” In Proceeding of the 2005 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.886–889, 2005.
- [81] G. Zhang, X. Huang, S. Li, Y. Wang, and X. Wu, “Boosting Local Binary Pattern LBP-Based Face Recognition,” *Journal of Advances in Biometric Person Authentication*, vol.3338, pp.179–186, 2005.
- [82] S. Watanabe, *Knowing & Guessing — Quantitative Study of Inference and Information*, John Wiley & Sons Incorporated, 1969.
- [83] C. Cortes and V. Vapnik, “Support-Vector Networks,” *Journal of Machine Learning*, vol.20, no.3, pp.273–297, 1995.
- [84] Y. Freund and R.E. Schapire, “A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting,” *Journal of Computer and System Sciences*, vol.55, no.1, pp.119–139, 1995.
- [85] H. Ishida, T. Takahashi, I. Ide, Y. Mekada, and H. Murase, “Identification of Degraded Traffic Sign Symbols by a Generative Learning Method,” In Proceed-

-
- ing of the 2006 IEEE International Conference on Pattern Recognition, vol.1, pp.531–534, Aug. 2006.
- [86] 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, “位置依存型識別器を用いた車載カメラ画像からの路面標示検出,” 電気学会論文誌 D, vol.131, no.4, pp.466–474, 2011 .
- [87] 出口大輔, 道満恵介, 井手一郎, 村瀬 洋, “遡及型追跡に基づく標識画像の自動収集を用いた標識検出器の高精度化,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J95-D, no.1, pp.1–8, 2012 .
- [88] D. Hoiem, A.A. Efros, and M. Hebert, “Putting Objects in Perspective,” In Proceeding of the 2006 IEEE International Journal on Computer Vision, vol.80, no.1, pp.3–15, 2006.
- [89] K. Doman, D. Deguchi, T. Takahashi, Y. Mekada, I. Ide, H. Murase, and Y. Tamatsu, “Estimation of Traffic Sign Visibility Considering Temporal Environmental Changes for Smart Driver Assistance,” In Proceeding of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.667–672, 2011.
- [90] V. Kastinaki, M. Zervakis, and K. Kalaitzakis, “A Survey of Video Processing Techniques for Traffic Applications,” Journal of Image and Vision Computing, vol.21, pp.359–381, 2003.
- [91] 農宗千典, 小沢慎治, “連続道路画像からの道路構造とカメラ姿勢の同時推定,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J76-D, no.3, pp.514–523, 1993 .
- [92] S. Lovegrove, A.J. Davison, and J. Iba, “Accurate Visual Odometry from a Rear Parking Camera,” In Proceeding of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.788–793, 2011.
- [93] O. Pink, “Visual Map Matching and Localization using a Global Feature Map,” In Proceeding of the 2008 Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp.1–7, 2008.
- [94] O. Pink, F. Moosmann, and A. Bachmann, “Visual Features for Vehicle Localization and Ego-Motion Estimation,” In Proceeding of the 2009 IEEE Intelligent

- Vehicles Symposium, pp.254–260, 2009.
- [95] 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社, “<路面性状測定車> 舗装事業案内,” 2011. http://www.c-nexco-het.jp/sb_pave_01.html
- [96] S. Carlsson, “Object Detection using Model Based Prediction and Motion Parallax,” *Computer Vision – ECCV 90*, ed. by O. Faugeras, vol.427, pp.297–306, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, 1990.
- [97] H. Kyutoku, D. Deguchi, T. Takahashi, Y. Mekada, I. Ide, and H. Murase, “On-road Obstacle Detection by Comparing Present and Past In-vehicle Camera Images,” In *Proceeding of the 2011 IAPR Conference on Machine Vision Applications*, pp.357–360, 2011.
- [98] 久野徹也, 杉浦博明, 吉田潤一, “車載カメラによる路面状態検出方式の検討,” *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol.J81-D-, no.10, pp.2301–2310, 1998.
- [99] 手島知昭, 斎藤英雄, 清水雅芳, 田口哲典, “平面に沿って移動するカメラにより撮影された動画像からの鏡面領域の検出法,” *画像電子学会誌*, vol.39, no.3, pp.272–282, 2010.
- [100] J.C. McCall and M.M. Trivedi, “Video-based Lane Estimation and Tracking for Driver Assistance: Survey, System, and Evaluation,” *Transactions on IEEE Intelligent Transportation Systems*, vol.7, no.1, pp.20–37, 2006.
- [101] Y. Wang, E.K. Teoh, and D. Shen, “Lane Detection and Tracking using B-Snake,” *Journal of Image and Vision Computing*, vol.22, no.4, pp.269–280, 2004.
- [102] Google, “GoogleMaps,” 2004. <http://maps.google.com/>
- [103] トヨタ自動車(株), “トヨタ自動車、カーナビゲーションと連動し安全運転を支援する「一時停止情報提供」機能を進化 世界初「ナビ・ブレーキアシスト」開発,” 2008. http://www.toyota.co.jp/jp/news/08/Feb/nt08_015.pdf
- [104] A. Agarwal, C.V. Jawahar, and P.J. Narayanan, *A survey of planar homography estimation techniques*, Technical report, IIT-Hyderabad, 2005.
- [105] M. Nieto, L. Salgado, F. Jaureguizar, and J. Cabrera, “Stabilization of Inverse Perspective Mapping Images Based on Robust Vanishing Point Estimation,” In

-
- Proceeding of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.315–320, 2007.
- [106] B. Lucas and T. Kanade, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision,” In Proceeding of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.674–679, 1981.
- [107] J.L. Bentley, “K-d Trees for Semidynamic Point Sets,” In Proceedings of the 6th Annual Symposium on Computational Geometry, pp.187–197, SCG ’90, 1990.
- [108] 植村 匠, 上瀧 剛, 河野将人, 内村圭一, 胡 振程, “ニューラルネットを用いた航空画像における道路領域抽出,” MIRU2007 第 10 回 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, pp.1047–1051, 2007.
- [109] J. Shi and C. Tomasi, “Good Features to Track,” In Proceeding of the 1994 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.593–600, 1994.
- [110] M.A. Fischler and R.C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” Journal of the communications of the ACM, vol.24, pp.381–395, 1981.
- [111] Applanix Corporated, “POSLV,” 2005. <http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html>
- [112] A. Camargo, R.R. Schultz, and Q. He, “Super-resolution Mosaicking of Unmanned Aircraft System (UAS) Surveillance Video using Levenberg Marquardt (LM) Algorithm,” In Proceeding of the 2010 International Symposium on Visual Computing, pp.698–706, 2010.
- [113] F. Caballero, L. Merino, J. Ferruz, and A. Ollero, “Unmanned Aerial Vehicle Localization Based on Monocular Vision and Online Mosaicking,” Journal of Intelligent Robotics System, vol.55, no.4–5, pp.323–343, 2009.
- [114] Y. Lin and G. Medioni, “Map-Enhanced UAV Image Sequence Registration and Synchronization of Multiple Image Sequences,” In Proceeding of the 2007 IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1–7, 2007.
- [115] 西村 孝, 藤吉弘亘, “空撮画像と衛星画像のレジストレーションによる道路状況

- 把握のための車両移動方向の可視化,” 情報処理学会研究報告 CVIM , pp.129–136 , May 2008 .
- [116] M. Irani and P. Shmuel, “Improving Resolution by Image Registration,” *Journal of Graphical Models and Image Processing*, vol.53, no.3, pp.231–239, 1991.
- [117] R. Szeliski, “Image Mosaicing for Tele-reality Applications,” In *Proceeding of the 1994 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp.44–53, 1994.
- [118] D. Capel, *Image Mosaicing and Super-Resolution (Cphc/Bcs Distinguished Dissertations.)*, SpringerVerlag, 2004.
- [119] R. Szeliski, “Video Mosaics for Virtual Environments,” *Journal of IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.16, no.2, pp.22–30, 1996.
- [120] T.K. Huang, R.C. Weng, and C.J. Lin, “Generalized Bradley-Terry Models and Multi-class Probability Estimates,” *Journal of Machine Learning Research*, vol.7, pp.85–115, 2006.
- [121] OpenStreetMap, “OpenStreetMap,” 2004. <http://www.openstreetmap.org/http://openstreetmap.jp/>
- [122] PIONEER, “carrozzeria”. <http://pioneer.jp/carrozzeria/cybernavi/>
- [123] J.F. Barbara Zitova, “Image Registration Methods: a Survey,” *Journal of Image and Vision Computing*, vol.21, no.11, pp.977–1000, 2003.

研究業績

主たる研究業績

学術雑誌

1. 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, “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,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J95-D, no.1 , pp.466-474, 2012.
2. 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, “位置依存型識別器を用いた車載カメラ画像からの路面標示検出,” 電気学会論文誌 D, vol.131, no.4, pp.466-474, 2011.

書籍

1. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima, Takashi Naito, “Vehicle Ego-localization by Matching In-vehicle Camera Images to an Aerial Image,” Computer Vision — ACCV 2010 Workshops, ACCV 2010 International Workshops, Queenstown, New Zealand, November 8-9, 2010, Revised Selected Papers, Part II, eds. by R. Koch and F. Huang, vol.6469, pp.163-173, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, September 2011.

国際会議

1. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima, Takashi Naito, “Road Image Update using In-vehicle Camera Images and Aerial Image,” In Proceedings of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.460–465, June, 2011.
2. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima, Takashi Naito, “Vehicle Ego-localization by Matching In-vehicle Camera Images to an Aerial Image,” In Proceedings of the 2010 Computer Vision in Vehicle Technology: From Earth to Mars, pp.1–10, November 2010.
3. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima, Takashi Naito, “Recognition of Road Markings from In-Vehicle Camera Images by a Generative Learning Method,” In Proceedings of the 2009 IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp.514–517, May 2009.

研究会・シンポジウム

1. 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, “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,” ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2011) 講演論文集, pp.281–288, December 2011.
2. 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, “車載カメラ画像からの高品質な道路画像の自動構築,” 第 14 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) 論文集, pp.1558–1565, July 2011.
3. 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, “空撮画像を基準とした車載カメラ画像のモザイクキングによる道路画像生成手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 2011-PRMU-111 (48) , pp.99–104, May 2011.
4. 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, “車載位置推定のための空撮画像と車載カメラ画像の照合手法の検討,” ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2010) 講演論文集, pp.93–94, December 2010.

5. 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, “空撮画像と車載カメラ画像中の道路面の時系列照合による自車位置推定,” 第 13 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010) 講演論文集, pp.585-592, July 2010.
6. 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, “空撮画像と時系列車載カメラ画像との照合による自車位置推定,” 電子情報通信学会技術研究報告 2009-PRMU-109 (306), pp.177-182, November 2009.
7. 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, “車両の姿勢・速度情報を利用した車載カメラ画像からの路面標示認識,” 第 12 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009) 講演論文集, pp.614-621, July 2009.
8. 野田 雅文, 高橋 友和, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, “生成型学習法を用いた車載カメラ画像からの路面標示認識,” 電子情報通信学会技術研究報告 2008-PRMU-108 (263), pp.1-6, October 2008.
9. 野田 雅文, 高橋 友和, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, “生成型部分空間法を用いた車載カメラ映像中路面標示認識,” 第 11 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 講演論文集, pp.629-634, July 2008.
10. 野田 雅文, 高橋 友和, 井手 一郎, 目加田 慶人, 村瀬 洋, “車載カメラ映像中におけるフロントガラス上の遮蔽領域復元に関する検討,” 第 6 回情報科学技術フォーラム (FIT2007) 講演論文集, pp.135-137, February 2007.

全国大会・支部大会

1. 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, “空撮画像と車載カメラ画像の照合による自車位置推定の検討,” 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演予稿集, p.4, September 2009.
2. 野田 雅文, 高橋 友和, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, “生成型学習を用いた車載カメラ映像中の路面標示認識の検討,” 2008 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.220, March 2008.

受賞

1. Masafumi Noda, The Best Paper Honorable Mentioned, Computer Vision in Vehicle Technology: From Earth to Mars (CVVT2010), November, 2010.

その他の研究業績

学術雑誌

1. 王 佳な, 野田 雅文, 高橋 友和, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “Web 上の大量の写真に対する画像分類による観光マップの作成,” 情報処理学会論文誌, vol.52, no.12 , pp.3588-3592, December 2011.

研究会・シンポジウム

1. 上坂 竜規, 野田 雅文, 目加田 慶人, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “ドライバの視線情報を利用した運転行動予測,” 電子情報通信学会技術研究報告 2011-PRMU-111 (47) , pp.105–110, May 2011
2. 王 佳な, 野田 雅文, 高橋 友和, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “Web 上の大量の写真画像分類して提示する観光マップの提案,” 電子情報通信学会技術研究報告 2011-MVE-110 (457) , pp.153–158, March 2011
3. 小林 尊志, 野田 雅文, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “Twitter の実況書き込みを利用したスポーツ映像の要約,” 電子情報通信学会技術研究報告 2011-MVE-145 (186) , p.165, March 2011
4. 王 佳な, 野田 雅文, 高橋 友和, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “ジオタグ付き写真を用いた風景カテゴリマップ作成手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 2010-MVE-110 (238) , pp.79–84, October 2010
5. 小林 尊志, 野田 雅文, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “Twitter における実況書き込み検出手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 2010-MVE-110 (108) , pp.129–135, July 2010

全国大会・支部大会

1. 小林 尊志, 野田 雅文, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “Twitter ユーザの属性判別によるスポーツ映像の自動要約,” 第 17 回言語処理学会年次大会発表論文集, p.464, March 2011
2. 上坂 竜規, 野田 雅文, 出口 大輔, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, “視線情報を利用した運転行動予測手法の検討,” 2011 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, March 2011
3. 王 佳な, 野田 雅文, 出口 大輔, 井手 一郎, 村瀬 洋, “位置情報付き画像を用いた風景カテゴリマップ作成手法の検討,” 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演予稿集, August 2010
4. 上坂 竜規, 野田 雅文, 出口 大輔, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, “ドライバの視線情報を用いた運転行動予測手法に関する検討,” 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演予稿集, August 2010