

自転車位置推定のための車載カメラ映像と市街地映像データベースの位置ずれや遮へいに頑健なフレーム対応付け

久徳 遙矢^{†a)} 出口 大輔^{††} 高橋 友和^{†††} 目加田慶人^{††††}
井手 一郎[†] 村瀬 洋^{†b)}

Ego-Localization Based on Frame Correspondences between In-Vehicle Camera Images and Streetview Database

Haruya KYUTOKU^{†a)}, Daisuke DEGUCHI^{††}, Tomokazu TAKAHASHI^{†††}, Yoshito MEKADA^{††††}, Ichiro IDE[†], and Hiroshi MURASE^{†b)}

あらまし 本論文では、自転車前方を撮影した車載カメラ映像を用いた高精度な自転車位置推定手法を提案する。提案手法では、車載カメラ映像と位置情報付き市街地映像データベースのフレーム対応付けを行い、対応づけられたデータベース中のフレームがもつ位置情報を参照することで自転車位置推定を行う。同じ道路で撮られた映像同士であっても、走行速度や軌跡は異なるため、単純な画像照合による対応付けは困難である。そこで、画像特徴による照合ではなく、カメラ間の位置関係を反映したフレーム間の距離尺度を用いることで、フレーム対応付け精度の改善を図る。まず車載カメラ映像とデータベースのフレーム間で対応点を求め、それらからフレーム間の基礎行列を求める。次に、基礎行列から算出されるエピポールの位置を用いてカメラ間の距離を算出する。そして、これを距離尺度とする DP マッチングにより、フレーム同士を対応づける。実際の車載カメラ映像を用いた評価実験の結果、提案手法の有効性を確認した。

キーワード 車載カメラ, ITS, 自転車位置推定

1. ま え が き

近年、運転者支援システムとしてカーナビゲーションシステムが普及してきている。これは、自転車位置情報と地図情報をもとに、運転者を目的地まで案内するシステムである。より詳細な案内の実現には、正確な自転車位置情報が必要不可欠である。しかし、自転車位置を得るためのセンサとして広く一般に用いられている

普及型 GPS による位置情報は、数 m から数十 m の誤差を含み、トンネルなどでは計測そのものが不可能である [1]。そのため、より高精度に自転車位置を求める技術の実現が望まれている。

一方、車載カメラ映像をもとにした市街地カメラ映像データベース (DB) も整備されつつある^(注1)。車載カメラは事故時の記録を目的としたドライブレコーダに組み込まれており、それをを用いた前方車両検出などによる運転者支援システムを搭載したカーナビゲーションが実用化されるなど、広く普及しつつある。また近年、記憶媒体の大容量化が著しく、車載カメラによる大規模な市街地映像 DB の蓄積も可能である。このような技術の発展により、車載カメラ映像の収集・蓄積による DB の構築、及び走行中の車両での DB の利用が実現可能になりつつある [2]。

以上のような背景から、車載カメラと位置情報付き市街地車載カメラ映像 DB を用いた自転車位置推定手法

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市 Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 名古屋大学情報連携統括本部, 名古屋市 Information and Communications Headquarters, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{†††} 岐阜聖徳学園大学経済情報学部, 岐阜市 Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University, Gifu-shi, 500-8288 Japan

^{††††} 中京大学情報理工学部, 豊田市 School of Information Science & Technology, Chukyo University, Toyota-shi, 470-0393 Japan

a) E-mail: kyutoku@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

b) E-mail: murase@is.nagoya-u.ac.jp

(注1) : Google ストリートビュー, <http://maps.google.co.jp/>

が注目を集めている。これは、走行中の車載カメラ映像の各フレームに対応する DB 中のフレームを求め、対応づいたフレームに付随した位置情報を用いて自転車位置を推定するものである。ここで、フレームの対応付けによって正確な自転車位置を推定するためには、正確な位置情報が付いた市街地車載カメラ映像 DB が必要である。このような DB の構築には、MMS [3] (モバイルマッピングシステム) のような高精度な位置計測システムを搭載した特殊車両を用いる手法などが考えられる。

用いるカメラの種類に組合せて注目して分類を行うと、これらの従来研究は以下のように大別される。

- 入力・DB 共に左右側方を向いたカメラを利用
佐藤らは、全方位カメラ映像から切り出した左右側方を向いたカメラ映像を用いたフレーム対応付けにより自転車位置を推定する手法を提案している [2]。しかし、いずれも対応付けに画像全体の見えに基づく特徴を用いており、走行位置のずれや路上障害物による遮へいから生じる見えの変化に弱いという問題がある。小野らも、同様に全方位カメラ映像から切り出した左右側方を向いたカメラ映像を用いた自転車位置推定手法を提案している [4]。時空間特徴を用いることで精度良い対応付けを可能としているが、依然として遮へいによる見えの変化には弱い。

- 入力に斜め側方を向いた通常カメラ、DB に全方位カメラを利用
内山らは、車両進行方向に対し左斜め側方にカメラを設置し、自転車位置を推定する手法を提案している [5]。この手法は、DB として全方位カメラ映像を用い、部分画像マッチングにより自転車位置を推定する。画像の拡大縮小などにより位置ずれを考慮しているが、DB との照合を領域ベースで行うため、遮へいによる見えの変化に弱い。また、画像の拡大縮小だけでは対応できない大きな走行位置のずれへの対応は困難である。

- 入力・DB 共に正面向きカメラを利用
石川らは、正面向きカメラ映像を用いたフレーム検索による自転車位置推定手法を提案している [6]。しかし、類似度に画像全体の見えに基づく特徴を用いており、走行位置のずれや路上障害物による遮へいから生じる見えの変化に弱いという問題がある。更に、同一地点を検索する上で重要な特徴である街並みは、正面向き通常カメラ映像から得られるフレームの両端に現れ、画像全体に対して占める割合が小さいため、得られる

特徴が少ないのも欠点である。

これらの手法は領域ベースの画像特徴を用いるため、障害物などによる遮へいや、走行位置・進行方向の変化に伴う大きな見えの変化に弱いという共通の問題がある。また、正面向きカメラ映像は街並みが映る割合がフレーム全体に対し小さく、走行位置ずれによる見えの変動も大きいいため、自転車位置推定に用いるのは困難である。しかし、ドライブレコーダや障害物検出等の目的で既に普及しているため、正面向きカメラを用いた高精度な自転車位置推定は有用である。

以上の背景から、本論文では入力映像及び DB 共に正面向き車載カメラ映像を用いる。ここで DB は、道路方向と車両進行方向が平行な状態で撮影された走行映像から構成されると仮定する。そして、遮へいや走行位置の変化に伴う見えの変化に頑健なフレーム対応付けによる自転車位置推定手法を提案する。以降、2. で提案手法について述べ、3. で実験について説明し、4. にて提案手法の有効性について議論する。そして、最後に 5. で本論文をまとめる。

2. 車載カメラ映像と市街地映像 DB のフレーム対応付けによる自転車位置推定

入力である走行中の正面向き車載カメラ映像を $A = \{A_i\}$ 、道路に沿って走行して撮影された DB の正面向き車載カメラ映像を $B = \{B_j\}$ とする。ここで、 A_i 及び B_j は、それぞれの映像の i, j 番目のフレームを表す。入力映像と DB の映像間のフレーム対応付けは、 A_i と最も近い位置で撮影された B_j を求めることに対応する。正面向き車載カメラを用いる場合、同じ道路で撮られた車載カメラ映像であっても、走行軌跡の違いによる見えの変化が存在する。その変化が大きい場合は、拡大・縮小・回転などを用いた単純な画像照合では精度良く対応づけることが困難である。また、遮へいなどによる見えの変化の影響を強く受けるという問題も存在する。そこで、入力及び DB の映像を撮影した 2 カメラ間の位置関係を反映したフレーム間距離尺度を提案し、これを用いた DP マッチングによってフレーム対応付けの高精度化を図る。以降、2 フレーム間の距離尺度及びこれを用いたフレーム対応付けについて説明する。

2.1 カメラ間の位置関係を考慮したフレーム間距離尺度

本節では、エビポーラ幾何の概念 [7] を利用し、2 カ

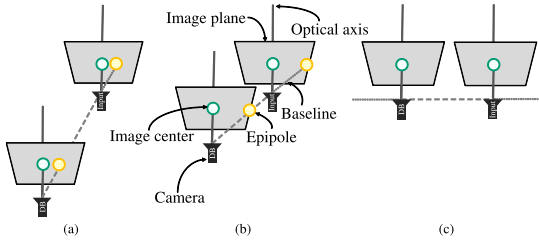


図 1 2 カメラの位置とエピポールの位置の関係
Fig. 1 Relation between the positions of two cameras and epipoles.

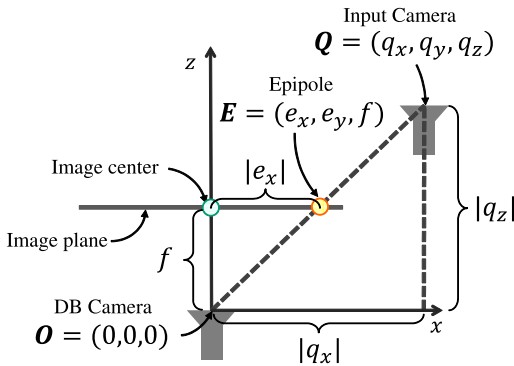


図 2 画像中心とエピポール間の距離と、進行方向に対するカメラ間のずれとの関係
Fig. 2 Relation between the distance of the image center to the epipoles, and its relation with the gap between the cameras from the vehicle's direction.

メラ間の位置関係を反映したフレーム間距離尺度について述べる。図 1 は、光軸が平行である二つのカメラ位置とエピポール位置の関係を示している。エピポールは、一方のカメラから見た他方のカメラの画像平面上での位置を表す。図から分かるように、光軸方向に 2 カメラが離れている場合はエピポールと画像中心の距離は小さくなり、カメラが近づくほどその距離は大きくなる、という性質がある。図 2 は 2 カメラ間の幾何学的な関係を図示したものである。これは、光軸が平行な 2 カメラの位置を上空から俯瞰した図である。ここで、焦点距離、すなわち光学（カメラ）中心 $O = (0, 0, 0)$ から画像平面までの距離を f 、光学中心から見た他方のカメラ位置を $Q = (q_x, q_y, q_z)$ 、同じくエピポールの位置を $E = (e_x, e_y, f)$ とおく。入力カメラ位置 Q とスケール s を用いると、エピポールの位置は $E = sQ$ と表される。ここで、エピポール位置の z 成分 sq_z は焦点距離 f に等しいため、 E は

$$\begin{aligned} E &= (e_x, e_y, f) \\ &= \frac{1}{f} \left(\frac{q_x}{q_z}, \frac{q_y}{q_z}, 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

と書き換えることができる。つまり、画像中心を原点とした画像平面上のエピポール位置 (e_x, e_y) は、車両進行方向に対するカメラ間距離 $|q_z|$ が大きいほど原点に近づき、小さいほど原点から遠ざかることが分かる。ここで、車両は道路平面上を走行する。すなわち、カメラは x - z 平面で移動するため、 e_y は用いず、 e_x のみに注目すると、以下の関係が成り立つ。

$$\frac{f}{|e_x|} = \frac{|q_z|}{|q_x|} \quad (2)$$

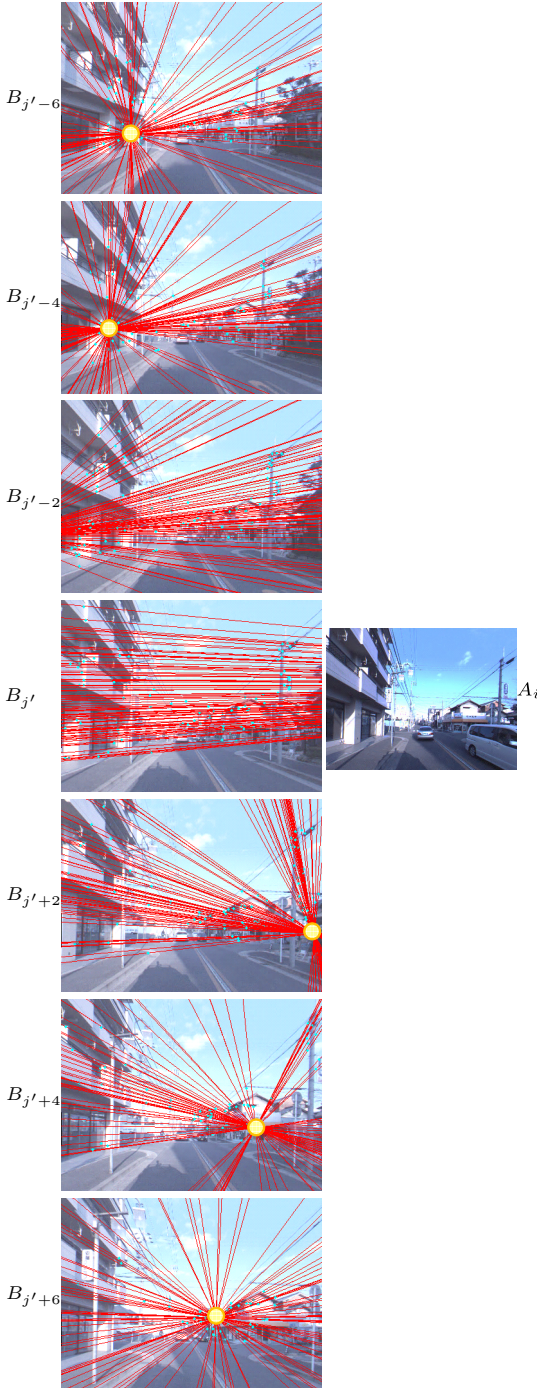
式 (2) より、 f と q_x が一定であるという条件のもとで $\frac{1}{|e_x|}$ は、カメラ間距離 $|q_z|$ に応じて増減することが分かる。本論文では、カメラの移動中に f は変化しないと仮定する。また、車両はカメラの光軸方向に移動するため、短い区間では $|q_x|$ が急激に変化することは少ないと考えられる。以上の幾何学的解釈から、画像中心とエピポール位置の x 軸方向の距離の逆数 $\frac{1}{|e_x|}$ は、車両進行方向である z 軸方向の相対位置を正確に反映した距離尺度となる。従来、このような手法をフレーム間の距離尺度として利用した例はない。

例として、実際の車載カメラ映像中の入力フレーム A_i と、別の映像中の最も近い位置で撮影されたフレーム B_j 、及びその前後のフレームに対し、エピポールの位置を描画したものを図 3 に示す。図から、2 カメラ間の距離 $|q_z|$ 、つまり A_i に対応する B_j からのずれに応じて図 1 と同様にエピポールの位置（図中の丸印）が変化することを確認できる。

2.2 DP マッチングによるフレーム対応付け

まず、入力映像とデータベースのフレームから SIFT 特徴 [8] を用いて特徴点を求める。次にそれらの特徴点間の対応を求め、この対応点群から RANSAC アルゴリズム [9] を用いて基礎行列を推定する。そして、基礎行列から得られるエピポールの位置を使ってフレーム間距離を算出し、DP マッチングによってフレーム間の対応を求める。

ここで、基礎行列を求める際の RANSAC アルゴリズムは、多くの対応点から外れ値を除外しつつもっともらしいパラメータを推定する手法である。しかし基礎行列を正しく推定するためには、対応点群中に正しい対応点対が一定数 α 以上必要となる。そこで、入力フレーム A_i とデータベースのフレーム B_j 間で信



Line: Epipolar-Line, Circle: Epipole.

図3 ある入力フレーム A_i (右図) に対応するデータベース中のフレーム $B_{j'}$ 及びその前後のフレーム (左列) におけるエピポール位置の変化.

Fig. 3 The position of epipoles between the input frame A_i (right image) and its closest frame $B_{j'}$ and adjacent frames in the database (right column).

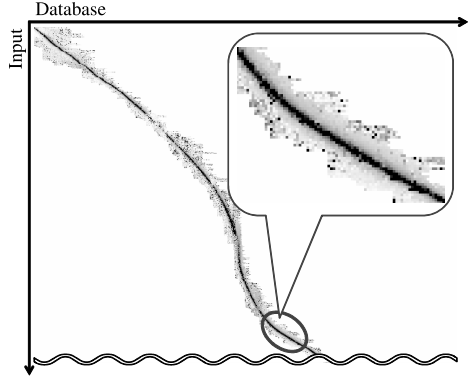


図4 フレーム間距離 $p(i, j)$. 縦軸, 横軸は各々入力とDBの系列に対応する. 画素が黒いほど距離が近く, 白いほど距離が遠い.

Fig. 4 Frame distances $p(i, j)$. The vertical and the horizontal axes correspond to the input and the database sequences, respectively. A black pixel indicates close distance, and a white pixel indicates far distance.

頻度が高い対応点の組数を $N_{i,j}$ とし, これを DP マッチングにおけるフレーム対応付けコストのペナルティ算出に利用する. 具体的には, 2.1 で述べた距離尺度にこのペナルティを加え, 次式により A_i と B_j のフレーム間距離を算出する.

$$p(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{|e_x| + \varepsilon} & \text{if } N_{i,j} \geq \alpha \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで, ε は正の小さな値である. ただし, 本論文では未校正のカメラを想定し, $\alpha = 8$ とする. 式 (3) を用いることで, フレーム番号対 (i, j) に到達するまでの最小のフレーム系列間対応付けコスト $P(i, j)$ は, 漸化式

$$P(0, 0) = p(0, 0),$$

$$P(i, j) = \min \begin{cases} P(i-1, j) + p(i, j) \\ P(i-1, j-1) + p(i, j) \\ P(i, j-1) + p(i, j) \end{cases} \quad (4)$$

を再帰的に計算することで得られる. ここで, A_i に対応する系列 B 中のフレーム番号を j' とすると, j' は

$$j' = \underset{j}{\operatorname{argmin}} P(i, j) \quad (5)$$

により求められる.

以上の手順により, 入力フレーム A_i に対応するデー

データベース中のフレーム $B_{j'}$ を求め、 $B_{j'}$ がもつ位置情報を出力する。実際の車載カメラ映像における式 (3) の値の例を図 4 に示す。黒い画素ほど距離の近いフレーム対を表し、白い画素ほど距離の遠いフレーム対を表す。ただし、式 (4) において $P(i, j)$ が ∞ となるフレーム対も白で表している。

3. 実験

本節では、提案手法の評価実験について述べる。まず実験に用いたデータ、正しい対応フレーム対の作成方法、比較手法について述べ、最後に実験結果について述べる。

3.1 実験条件

3.1.1 実験用データ

本研究は正面向き通常カメラを用いた自車位置推定を目的としているが、実験の都合（評価のため）で、全方位カメラで撮影した映像中の車両正面に対応する部分を実験用データとして用いた。具体的には、図 5 に示す Point Grey Research 社製全方位カメラ Lady-bug3 を図 6 に示すように実験車両の中央部、高さ約 160 cm に搭載し、フレームレート 15 fps で撮影した。ここで、Lady-bug3 は側方 5 個、上方 1 個の計 6 個のカメラからなる。そのうちの正面向きのものを正面向き車載カメラとした。ここで得られるフレームは図 7 のように縦方向の画角が広い。そのため、通常車載カメラの画角に対応する、図中の枠で示す 406×300 画素の領域を切り出して用いた。

実験に用いる映像は、約 300~500 m の 3 経路を複数回走行して撮影し、計 8,195 フレームを取得した。撮影は、同じ日の夕方に連続して行った。いずれも片側 1 車線の道路であり、住宅街 2 経路、商店街 1 経路である。また、走行速度約 30 km/h で撮影したため、

フレーム間隔は約 50 cm である。精度評価は、同一経路を走行した映像同士でデータベースと入力を変えながら、計 10 対の対応付け結果を用いて行った。

3.1.2 正しい対応フレーム対の作成

フレーム対応付けの評価のために、実験用映像の全てのフレームに対し、正しいフレームの対応を人手で与えた。具体的には、全方位カメラ映像中の自車側方の街並みを用いて次のように正解を与えた。まず、図 8 に示すように消失点（丸）を人手で与え、その方向から 90° の位置の街並み（線）が同じ位置にくるように、目視でフレーム間の正しい対応を作成した。

3.1.3 比較手法

提案手法の有効性を確認するため、次のようなフレーム間距離を用いる手法と比較を行った。

- 比較手法 1：領域ベースのフレーム間距離
- 比較手法 2：特徴点ベースのフレーム間距離

ここで比較手法 1 は、フレーム全体の正規化相互相関係数を 1 から引いたものをフレーム間距離尺度として用い、式 (3) を次式で置き換えたものとした。

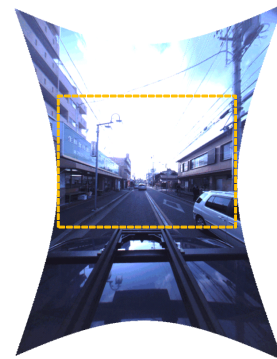


図 7 Lady-bug3 の正面向きカメラから得られるフレーム
Fig. 7 A frame obtained from a front-view camera in Lady-bug3.

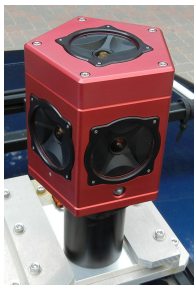


図 5 Lady-bug3
Fig. 5 Lady-bug3.



図 6 Lady-bug3 を搭載した車両
Fig. 6 A vehicle mounted with Lady-bug3.



図 8 Lady-bug3 から得たパノラマ画像
Fig. 8 Panorama image obtained from Lady-bug3.

表 1 手法ごとの平均誤差 [フレーム], 最大誤差 [フレーム], 標準偏差 [フレーム]. 比較手法 1 (NCC) は正規化相互相関, 比較手法 2 (POINTS) は対応点数を用いた結果である.

Table 1 Average error [frames], maximum error [frames], standard deviation [frames] of each method. Comparative method 1 (NCC) used normalized cross correlation, and Comparative method 2 (POINTS) used the number of corresponding points.

	Proposed method	Comparative method	
		1 (NCC)	2 (POINTS)
Average error	0.50	1.78	1.11
Maximum error	15	39	37
Standard deviation	1.02	2.51	1.41

$$p_{\text{NCC}}(i, j) = 1 - \text{NCC}(i, j) \quad (6)$$

$\text{NCC}(i, j)$ はフレーム A_i とフレーム B_j 間の正規化相互相関係数である. 一方比較手法 2 は, SIFT 特徴によって求められた対応点の数の逆数 [10] をフレーム間距離尺度として用い, 式 (3) の分母を対応点数に置き換えた次式をフレーム間距離とした.

$$p_{\text{POINTS}}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{M_{i,j}} & \text{if } N_{i,j} \geq \alpha \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで, $M_{i,j}$ はフレーム A_i とフレーム B_j 間の対応点数であり, 提案手法で基礎行列を求める際に使われたものを用いた. 両比較手法とも, 式 (3) の変更以外は提案手法と同じである. また, 本実験ではいずれの手法においても DP マッチングを両端点固定で行い, 対応づいたフレーム対の系列を評価に用いた.

3.2 実験結果

各手法における精度評価結果を表 1 に示す. 提案手法 (Proposed), 比較手法 1 (NCC), 比較手法 2 (POINTS) それぞれにおける平均誤差 [フレーム], 最大誤差 [フレーム], 及びそれらの標準偏差 [フレーム] である. また, 位置推定誤差 [フレーム] の累積分布を図 9 に示す.

4. 考 察

3. における実験結果とともに, 対応付け精度, 見えの変化, 天候の変化に対する提案手法の頑健性について考察する.

4.1 提案手法によるフレーム対応付け精度

表 1 から, 提案手法の平均誤差は, 比較手法 1 の 3 分の 1 以下, 比較手法 2 の 2 分の 1 以下であった. こ

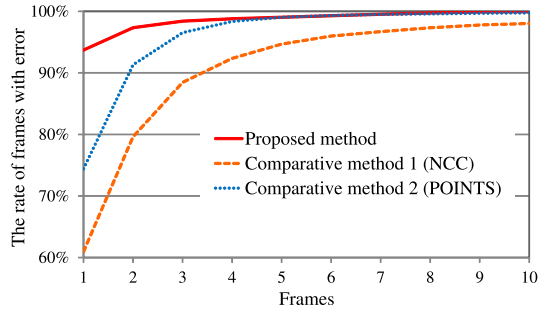


図 9 位置推定誤差 [フレーム] の累積分布
Fig. 9 The cumulative distribution of ego-localization errors [frames].

こで, 本実験に用いた映像のフレーム間隔は約 50 cm であり, フレーム間の正しい対応のものに約 25 cm の誤差が含まれる. これと対応付けの平均誤差から, 提案手法の車両進行方向に対する位置推定精度は約 50 cm とみなすことができる. この結果から, 高い精度で位置推定できたことが分かる. また標準偏差や最大誤差も小さいことから, 提案手法によるフレーム対応付けが他手法と比較して安定していることが分かる. 更に図 9 から, 提案手法により誤差 1 フレーム以内で正しく推定できた割合は, 比較手法 1 に比べ約 1.5 倍, 比較手法 2 に比べ約 1.3 倍である. また誤差 2 フレーム以上を見ても他手法より高精度であり, 信頼性の高い手法であることが分かる.

ここで, 自車の走行経路と DB の走行経路の間で交差や接近が生じたとき, すなわち二つのカメラが非常に接近したとき, エピポール位置の推定は不安定となる. 更に, 完全にカメラ位置が一致する場合にはエピポールそのものの計算ができない. また, DB と自車の走行経路が直線的かつ光軸が完全に一致している場合, エピポールは常に画像の中心に位置し, 提案手法のフレーム間距離尺度では正しく対応づけることができない. しかし, これらのような状況が長時間続くことは考えにくく, 本手法では対応付けに DP マッチングを用いているため, カメラ間の距離がある程度大きな他のフレーム対のフレーム間距離を用いることで, 大きな対応付けの誤りを防ぐことができる. そのため, 応用上は問題とならないと考えられる. また, 設置位置の異なる 2 台以上のカメラを搭載した車両を用いて DB を構築し, 適宜対応付けに用いる系列を切り換えることで, これらの問題の発生を防ぐことができる.

本実験において, Xeon X5650 2.67 GHz×2 の計算

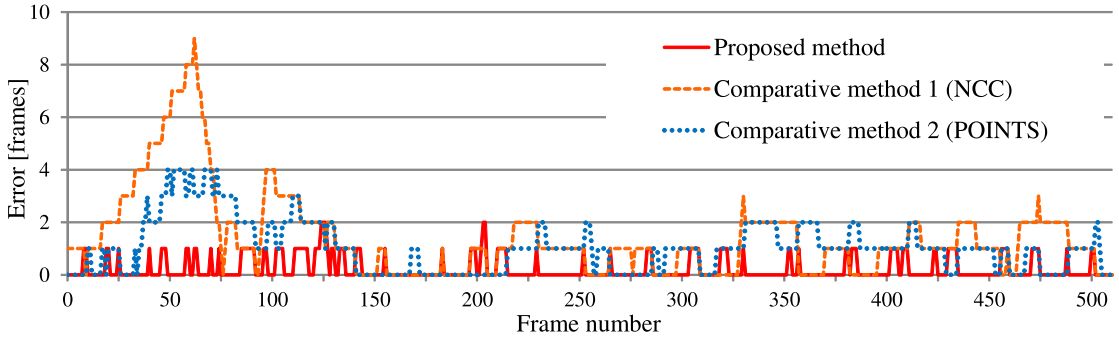


図 10 ある系列の各フレームの誤差
Fig.10 Error of each frame in a sequence.

機を用いたとき、1 フレーム当りの処理時間は 0.5 秒程度であった。今後は、実装の見直しなどにより高速化することで、オンラインでの利用を目指していきたい。

4.2 障害物回避による見えの変化

ある系列の対応付け結果の各フレームにおける誤差を図 10 に示す。0 から 150 フレームを見ると、比較手法の誤差が大きいたことが分かる。これらは、路上駐車車両の回避行動により大きく走行位置が変化した区間である。また、図 11 はその中の 1 フレームを示している。左図は正面向きカメラ、右図は左側方カメラに対応する。また、図中の縦線は、3.1.2 で正しいフレーム対応を与える際に使用した位置合せの基準線、数字は正しい対応フレームからのずれ [フレーム] である。図 11 の比較手法 1 による対応付け結果を見ると、左側方の建物の画像中での大きさが似ている、離れた地点のフレームに対応づけられていることが分かる。このように、領域ベースの距離尺度を用いる比較手法 1 では、走行位置の違いに伴う見えの変化の影響を強く受けることが分かる。それに対し、特徴点ベースである提案手法及び比較手法 2 は、局所特徴を用いることで走行位置の違いに伴う見えの変化の影響が小さかったと考えられる。しかし比較手法 2 は、遮へいに伴う対応点の減少により、誤差が大きくなったと考えられる。これらに対し提案手法では、ほぼ全てのフレームで 1 フレーム以下の誤差となっている。また図 11 の側方画像からも、精度良く対応付けできたことが分かる。以上から、領域ベースの手法に比べ特徴点ベースの手法の方がフレーム全体の見えの変化に頑健であり、特徴点から算出したカメラ間の位置関係を用いる提案手法では、走行位置のずれや遮へいに対し

でも頑健に対応付けできることが確認できた。

4.3 対応付けの始点の決定及び異なるシーンや天候変化に対する頑健性

本実験では、2.2 におけるフレーム対応付けの始点を人手で与えた。この初期対応付けについては、実環境下では GPS 情報などを用いて決定することが可能であると考ええる。GPS による位置情報には数 m から数十 m の誤差が含まれるが、信号待ちなどの停車時の情報を活用することで、ある程度の精度で位置推定が可能であると考えられる。

本実験に用いたデータは住宅街及び商店街における車載カメラ映像であり、撮影条件も近いため、比較的对応点を得やすい映像であると考えられる。そこで、以下の異なる二つのシーンに対して提案手法を適用し、シーンの違いに対する頑健性を評価した。ここで用いる映像は、カメラを車両のダッシュボード上に設置して取得した。なお、正解対応フレームは、画面端に映る路面標示などを基に与えた。まず一つ目のシーンは、図 12 (a) のような片側 3 車線の幹線道路（都心部）の約 130 m の区間である。このシーンでは、道幅が広く、特徴点を得られる街並みまでの距離が離れている。走行位置が約 4 m 離れた隣の車線を走行する系列と対応づけた場合、対応付け誤差は平均でおよそ 2 フレームであった。この系列のフレーム間隔は約 20 cm であり、住宅街や商店街の系列と同等の精度で対応付けできたといえる。二つ目は、図 12 (b) のような約 250 m のトンネル内で撮影したシーンである。このシーンは類似した特徴が多く、かつ現れ方に周期性がある。このシーンに提案手法を適用した結果、対応付け誤差は平均でおよそ 0.4 フレームであった。この系列のフレーム間隔は約 40 cm であり、他のシーンと



図 11 図 10 と同じ系列のあるフレームに対する各手法の対応付け結果の例。左図は正面向きカメラ映像、右図は図 8 の左側方部分の画像及び道路方向と垂直な位置の線、括弧内の数字は正しい対応フレームからのずれを示す。

Fig. 11 Example of matching results by each method applied to the same sequence as in Fig. 10. The left column shows the frontal image, and the right column shows the sideways image, where the line indicates the position perpendicular to the direction of a road. The numbers in parentheses indicate the differences from the correct corresponding frame.

同等の対応付け精度であるといえる。これに関して、対応付けの際に計算されたフレーム間距離を分析したところ、類似した特徴やその現れ方に周期性があっても、正解フレームとのフレーム間距離が最も小さくなるフレームが多いことが分かった。DP マッチングの効果により、これらのフレームが他のフレームの大き

な対応付け誤りを防いだと考えられる。以上の結果から、提案手法は街並みまでの距離が離れているシーンや類似した特徴が現れるシーンに対しても適用可能であると考えられる。

また、車載カメラ映像は屋外で撮影されるため、天候や時間帯の変化に伴う見えの違いも生じる。これは、2.1 におけるフレーム間の点の対応を求める処理に影響を与える。具体的には、各点の特徴量の算出に影響し、誤対応点が増える可能性がある。この影響の確認のため、異なる天候下で撮影された系列に提案手法を適用した。具体的には、図 12(a) の幹線道路で撮影した晴天時と少雨時の系列（同一車線）に対し提案手法を適用した。その結果、対応付け誤差は平均でおよそ 0.2 フレームであった。これは、RANSAC アルゴリズム [9] によって外れ値を除外しているため、提案手法で用いた SIFT 特徴量 [8] であっても特徴点の大きな対応付け誤りが発生しなかったためだと考えられる。このことから、提案手法はある程度の天候変化に対し頑健であると考えられる。一方、安定した特徴点を得られない樹木などに囲まれた道路や、特徴点そのものが得られない道路への提案手法の適用は困難である。近年、局所特徴量記述・対応点探索手法 [11]~[13] が盛んに研究されており、それらの利用によって、この問題に対処天候変化に対しても頑健にフレーム間距離を求めることができると考えられる。

5. む す び

本論文では、走行中の車載カメラ映像とデータベースの車載カメラ映像とのフレーム対応付けによる自転車位置推定手法の提案とその精度評価を行った。この対応付け手法では、まず入力とデータベースの車載カメラ映像のフレーム間の対応点対から求められるエピポールと消失点との距離を用いてフレーム間距離を求める。このフレーム間距離は自車のカメラとデータベースのカメラの位置関係に基づいており、進行方向に対する 2 カメラ間の距離の変化に応じて増減する指標である。これを DP マッチングのコストとして実際の車載カメラ映像に適用したところ、平均 25 cm の誤差で位置推定ができることを確認した。

今後の課題として、カーブや右左折、広い道路や狭い道路など、様々な道路の走行映像を用いた評価が必要である。また、より高精度に基礎行列を推定する手法の検討が挙げられる。

謝辞 日ごろより熱心に御討論頂く名古屋大学村



(a) A wide road in city center.



(b) A tunnel.

図 12 その他のシーンの例
Fig. 12 Examples of other scenes.

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] 日本自動車研究所, “移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書,” March 2005.
http://www.jari.or.jp/research-project/research_results/seminar_information/demonstrated_social-experiment%20/
- [2] 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,” 信学論 (D), vol.J90-D, no.4, pp.1085–1095, April 2007.
- [3] 前川啓一, 瀧口純一, 石川貴一郎, “話題の製品と技術高精度 GPS 移動計測装置三菱モバイルマッピングシステム (MMS),” 画像ラボ, vol.22, no.1, pp.74–81, Jan. 2011.
- [4] 小野晋太郎, 松久亮太, 川崎 洋, 池内克史, “時空間特徴を用いた車載カメラ映像マッチング,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2010 講演予稿集, pp.1145–1152, July 2010.
- [5] 内山寛之, 出口大輔, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, “拡張 DP マッチングを用いた視角の異なるカメラ映像間の時空間対応付けによる自車位置推定,” 信学論 (D), vol.J93-D, no.12, pp.2659–2665, Dec. 2010.
- [6] 石川尊之, 山崎俊彦, 相澤清晴, “GPS と画像特徴を用いた車載ライフログ映像処理,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2005 講演予稿集, pp.604–609, July 2005.
- [7] 佐藤 淳, コンピュータビジョン—視覚の幾何学, コロナ社, 1999.
- [8] D.G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” Int. J. Comput. Vis., vol.60, no.2, pp.91–110, Nov. 2004.
- [9] M.A. Fischler and R.C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” Commun. ACM, vol.24, no.6, pp.381–395, June 1981.
- [10] 亀田能成, 大田友一, “街中での歩行者カメラによるオンライン位置推定のための検討,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2010 講演予稿集, pp.364–369, July 2010.
- [11] Y. Ke and R. Sukthankar, “PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 2004, vol.2, pp.506–513, July 2004.
- [12] 西村 孝, 清水彰一, 藤吉弘亘, “2 段階の randomized trees を用いたキーポイントの分類,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2010 講演予稿集, pp.1412–1419, July 2010.
- [13] 安倍 満, 吉田悠一, “高速かつメモリ消費量の少ない局所特徴量,” 画像の認識・理解シンポジウム MIRU 2011 講演予稿集, pp.1682–1689, July 2011.
(平成 24 年 2 月 13 日受付, 6 月 10 日再受付)



久徳 遙矢 (学生員)

平 20 名大・工・情報卒。平 22 同大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、同研究科博士後期課程在学中。画像処理・パターン認識技術の基礎及び ITS への応用に興味をもつ。



出口 大輔 (正員)

平 13 名大・工・情報卒。平 18 同大大学院情報科学研究科博士後期課程了。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 20~24 まで同大大学院情報科学研究科助教。平 24 より同大情報連携統括本部情報戦略室准教授。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。CARS2004 Poster Award, CADM2004 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会員。



村瀬 洋 (正員：フェロー)

昭 53 名大・工・電気卒。昭 55 同大大学院修士課程了。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。



高橋 友和 (正員)

平 9 茨城大・工・情報卒。平 12 同大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。



目加田慶人 (正員：シニア会員)

平 3 名大・工・情報卒。平 8 同大大学院博士課程了。平 8 宇都宮大工学部情報工学科助手。平 13 名大大学院工学研究科情報工学専攻助教。平 16 中京大学生命システム工学部教授。平 20 より情報理工学部教授。平 18~22 名大大学院工学研究科特任教授を兼任。画像処理・パターン認識とその医用応用に関する研究に従事。博士(工学)。平 10 日本医用画像工学会論文賞, 平 17 CADM 館野賞。IEEE, 日本医用画像工学会各会員。



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。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・准教授兼任。平 17~19 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所上級訪問研究員。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, ACM 各会員。