

距離データ系列の照合による自車位置推定と走行車線認識

渋谷 奈保[†] 高橋 友和[†] 井手 一郎[†] 村瀬 洋[†] 小島 祥子^{††}
高橋 新^{††}

[†] 名古屋大学 大学院情報科学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} (株) 豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1

E-mail: [†]{nshibu, ttakahashi, ide, murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本報告では、事前に構築した距離データマップと走行中の自車が測定した距離データを対応付けることで、高精度に自車位置推定を行う手法を提案する。ここでいう距離データとは、4 ラインレーザスキャナにより測定された車両前方の奥行き方向の距離分布である。我々が考案した距離データマップとは絶対位置座標とその位置における車両走行方向の距離データを高精度に対応付けたマップである。距離データマップの距離データ系列と自車が測定した距離データ系列との対応付けには DP マッチングを用いる。複数の車線がある道路の同一区間を走行しながら GPS と同期して測定されたデータ系列を用いて、実験を行った。実験の結果から距離データ系列間の対応付けにより高精度な位置推定と走行車線分類が可能となることを確認した。

キーワード ITS, 自車位置推定, レーザスキャナ, DP マッチング

Accurate Vehicle Localization and Traveling Lane Classification by Aligning Laser Scanner Data Sequences

Nao SHIBUHISA[†], Tomokazu TAKAHASHI[†], Ichiro IDE[†], Hiroshi MURASE[†], Yoshiko
KOJIMA^{††}, and Arata TAKAHASHI^{††}

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi,
464-8601 Japan

^{††} Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc. 41-1, Aza Yokomichi, Oaza Nagakute,
Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi, 480-1192 Japan

E-mail: [†]{nshibu, ttakahashi, ide, murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract We propose a method for accurate vehicle localization. The proposed method detects a vehicle's location and traveling lane by matching between a pre-constructed **Range Data Map** and laser scanner data sequences measured while the vehicle runs. The Range Data Map consists of an absolute position on the road and range data at the position. We use Dynamic Time Warping (DTW) to align multiple range data sequences. Experiments using data sequences collected while a vehicle ran on the same route with multiple traffic lanes were conducted. The results demonstrated the effectiveness of vehicle localization and traveling lane classification by the proposed method.

Key words ITS, vehicle localization, laser scanner, DP matching

1. はじめに

近年、高度な運転支援システムやカーナビゲーションシステム（以下、カーナビと呼ぶ）の発展が期待されている。自車位置を正確に知ることは、これらのシステムを実現する上で重要である。現在、GPS を用いて緯度経度を取得し、自車位置を推定

する手法がある。RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) などの高精度 GPS を用いれば、数 cm の誤差で自車位置を推定できる。しかしながら、RTK-GPS は建物などによる遮蔽に弱く、車載化には課題が多い。現在のカーナビなどで用いられている普及型 GPS（以下、ナビ用 GPS と呼ぶ）は、通常 5–30m の誤差を含む。そのため、ナビ用 GPS 単体では高精度な自車位置推

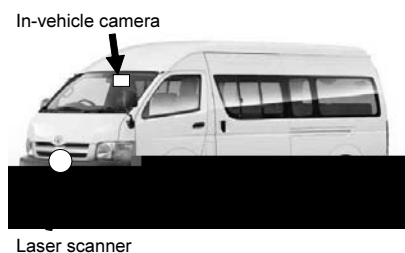


図 1 実験車両と使用機器の位置関係

定は困難である。そこで、佐藤らは全方位カメラとナビ用 GPS を用い、異なる時期に撮影した複数の映像間対応付け手法を提案し、同一地点の位置情報を平均化することで、高精度位置推定を行う手法を提案している [4]。

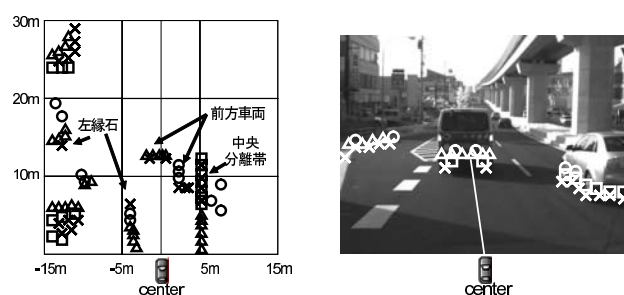
しかし、この手法は画像情報を用いるため、精度が日照条件に影響されやすく、安定した自車位置推定は困難である。そのため、我々は全方位カメラの代わりに車両前方の距離データを計測できるレーザスキャナを用いることで、日照条件や時間帯に依存しない、自車位置推定手法を提案してきた [3]。しかしながら、この手法では複数車線の存在を考慮していなかったため、車線の認識が困難であるという問題があった。車線の認識が可能になると、カーナビで予め車線変更を促すなど高度な案内が可能になったり、自車の車線変更の可能性を判断できるため、後側方警報に利用できるという利点がある。

そこで本報告では、走行中の自車が測定した距離データと、事前に構築した走行車線分の距離データマップを用いることにより、自車位置を推定するとともに走行車線を認識する手法を提案する。距離データマップとは絶対位置（緯度経度）とその位置における車両走行方向の距離データを高精度に対応付けたものである。図 1 に実験で用いた車両と使用機器の位置関係を示す。一般に実用化されているレーザスキャナは、アダプティブクルーズコントロールなどに用いられるために、図 1 の様に車両前方のバンパ付近へ設置されることが多い。実験で用いたレーザスキャナは水平スキャン型で、垂直方向に角度の異なる 4 ライン分の距離データを一度に取得できる。図 2 に、ある地点における距離データを平面上にプロットしたものとそれに対応する車載カメラ映像を示す。

提案手法は、事前に構築した距離データマップと走行中の自車が測定した距離データに対応付けることによって自車位置を推定する。次節以降では、2 章で距離データを用いた自車位置推定に関する従来研究を紹介する。3 章にて提案手法と距離データマップの構築手法を説明し、4 章で実際に行った実験の方法を記す。そして 5 章にて実験結果と考察について述べ、6 章にてまとめる。

2. 関連研究

レーザスキャナは運転支援を目的とした車間距離制御システムに応用されている。また、車外環境の認識を目的としてレーザスキャナにより測定された距離データを解析する研究も多数行われている [1]。Sparbert らは、距離データ中の測定点をクラ



(a) 距離データ (鳥瞰図) 各軸は原点 (各軸ともに 0m) を自車位置としたときの自車からの距離
(b) 対応する距離データをプロットした車載カメラ映像

図 2 ある地点におけるレーザスキャナデータと車載カメラ映像：× は下から 1 ライン目（一番下のライン）、□ は 2 ライン目、○ は 3 ライン目、△ は 4 ライン目（一番上のライン）で測定された点を示す。道路の縁石や前方車両までの距離が測定されている。レーザスキャナと車載カメラの位置関係から、(b) 車載カメラ映像にプロットした距離データは一直線上に並ばない。

スタリングすることによって、車線数や車線の幅を推定する手法を提案している [1]。しかしながら、複雑な車外環境で測定された距離データ単体から車線を認識することは難しい。

そこで、走行中の車両が測定した距離データに加え、事前に構築したマップを照合することにより自車位置を推定する手法が提案されている [2] [5] [6]。Weiss らは、標識や信号機の柱などのランドマークの位置情報を用いてマップを構築し、走行中の自車が測定した距離データとマップの照合により、自車位置を高精度に推定する手法を提案した [2]。更に、移動物体と静止物体の分類を行い、静止物体のみからなるマップを生成するアルゴリズムも提案している [6]。また、Gao らは、あらかじめ測定された複数の距離データを用いて静止物体らしさを表す尤度マップを作成し、尤度マップと現在の自車が測定した距離データとのずれを計算することで、GPS 測位誤差を補正する手法を提案している [5]。

これらの手法に対し、我々は単体の距離データの代わりに走行中の自車が測定した距離データ系列を用いる。これにより複雑な車外環境に対しても、安定に照合できると考える。今回は特に、走行車線に注目し、マップに車線情報を持たせることによって、自車位置推定と同時に走行車線認識を行う手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 概要

本システムは、次に示す 2 つのプロセスから構成される。

- 距離データマップの構築 (事前処理)
- 自車位置推定 (実時間処理)

まず、距離データマップの構築手法を 3.2 節で説明する。次に、提案手法である自車位置推定手法について 3.3 節で説明する。

自車位置推定は自車が計測した距離データと最も適合する距離データを距離データマップ中から探索することによって実現される。この際、総当りによる探索ではなく、自車が計測した距離データ系列と距離データマップから切り出した距離データ系

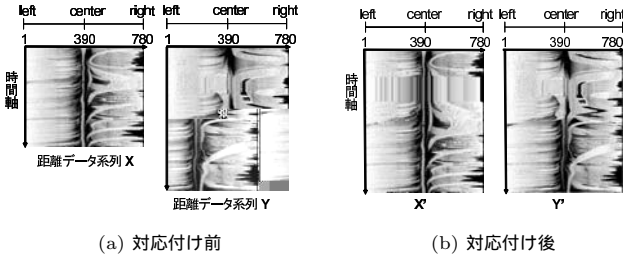


図 3 距離データ系列を DP マッチングで対応付けた一例。距離データは、4 ライン中の下から 2 ライン目で測定された 1 スキャンのデータ（ここでは 780 点）を横一列に並べており、距離は画素の明るさで表現されている。明るい画素ほど、測定された物体が自車に近いことを表す。

列の対応付けを行うことによって探索の精度向上を図る。系列どうしの対応付けには、系列を伸縮させながら対応付ける DP マッチングを用いる。図 3 (a) に対応付ける前の距離データ系列を示す。同じ区間を走行した場合においても 2 本の系列は信号待ちや走行速度変化の影響で長さが異なっている。図 3 (b) に DP マッチングを用いて対応付けた後の距離データ系列を示す。DP マッチングを施すことで、伸縮が吸収され良好に対応付けられていることが確認できる。

3.2 距離データマップの構築

距離データマップとは、地図上の道路の各点に各車線ごとに距離データを高精度に対応付けたものである（図 4）。距離データマップの構築には、距離データとそれに対応付けられた高精度な位置情報が必要である。レーザスキャナと RTK-GPS を搭載した車両があらゆる道路をあらゆる方向に最低 1 回走行し、データ収集を行うことにより距離データマップが構築できる。しかし、RTK-GPS は高価であるうえ、遮蔽に弱く、都心部では測位結果が得られないことも多い。そのため、本研究ではナビ用 GPS を用いたデータマップの構築を考える。

位置推定精度の点からみれば、ナビ用 GPS 測定値は 30m 程度の位置推定誤差を含むこともある。従って、ナビ用 GPS から得られる位置情報に何らかの補正を施して高精度化する必要がある。一般に、長期間にわたり同一地点で測定された GPS 座標の平均は真値に近づくことが知られている。そこで、はじめに複数の車両にレーザスキャナとナビ用 GPS を搭載させて自由に走行し、同一地点の測位座標を収集することで正確な座標を得る。距離データマップ構築の際、車両の走行車線は既知とする。これは、距離データマップを車線ごとに構築するためには同じ車線を走行して測定したデータ系列どうしを対応付けなければならないが、ナビ用 GPS 座標は 5–30m の誤差を含み、走行車線を判断できない場合が多いためである。

距離データマップ構築の流れを図 5 に示す。距離データマップは、図 4 の各点で $\mathbf{p}_i = (\mathbf{r}_i, l_i)$ という情報を持つ。ここで、 $\mathbf{p}_i$ は位置を表し、緯度・経度を持つベクトルである。 $\mathbf{r}_i = (r_1, \dots, r_S)$ は、その地点で計測した距離データである。 S は、水平スキャン型レーザスキャナでの 4 ラインの測定数である。 l_i は左から何車線目にいるかを表す。まず、同一区間の同じ車線を走行し、取得

したデータ系列を DP マッチングで対応付ける。次に、対応付けによって同一の地点と推定された地点の位置情報を平均して高精度化し、基準系列の距離データとともに距離データマップに格納する。以下、具体的な処理の流れを述べる。

Step 1 多数の GPS 座標付き距離データ系列から、GPS 座標を用いて、ある同一区間を走行し、取得した距離データ系列 $\{A_1, \dots, A_N\}$ を取り出す。 N は、ある同一区間の同じ車線を走行した回数、つまりデータ系列数である。ここで、各距離データ系列は $A_n = (n_1, \dots, n_{I_n})$ である。 I は、スキャン回数を表す。このとき、 $l = l'$ とし、車線 l' で距離データマップを構築することを考える。したがって、各 $\mathbf{p}_i = (\mathbf{r}_i, l')$ の情報を持つ。

Step 2 1 回目に測定したデータ系列 A_1 を基準系列とし、他の $N - 1$ 個のデータ系列 $\{A_n | n = 2, \dots, N\}$ を、それぞれ DP マッチングで対応付ける。

はじめに、 $D_n(1, 1) = d_n(1, 1)$ とし、漸化式

$$D_n(i, j) = \min \begin{cases} D_n(i-1, j) + d_n(i, j) \\ D_n(i-1, j-1) + d_n(i, j) \\ D_n(i, j-1) + d_n(i, j) \end{cases} \quad (1)$$

$$d_n(i, j) = d_{L1}(\mathbf{r}_{1,i}, \mathbf{r}_{n,j}) \quad (2)$$

を計算する。 i, j の範囲は、 $i = 1, \dots, I_1, j = 1, \dots, I_n$ である。このとき、 $d_n(i, j)$ は距離データ間の距離を表す。 $\mathbf{r}_{1,i}$ は、基準系列 A_1 の i スキャン目の距離データ。 $\mathbf{r}_{n,j}$ は、距離データ系列 A_n の j スキャン目の距離データである。距離には L1 距離を用いる。ここで、 $\mathbf{r}_{1,i} = (x_1, \dots, x_S)$ 、 $\mathbf{r}_{n,j} = (y_1, \dots, y_S)$ で表すと、式 (2) は、

$$d_{L1} = \sum_{s=1}^S |x_s - y_s| \quad (3)$$

と表される。漸化式を計算する際に、選んだ距離データ対 (i, j) を記録しておく。 $D_n(I_1, I_n)$ を計算するまでに選んだ距離データ対 (i, j) の系列が、基準データ系列 A_1 と A_n の対応を表す。

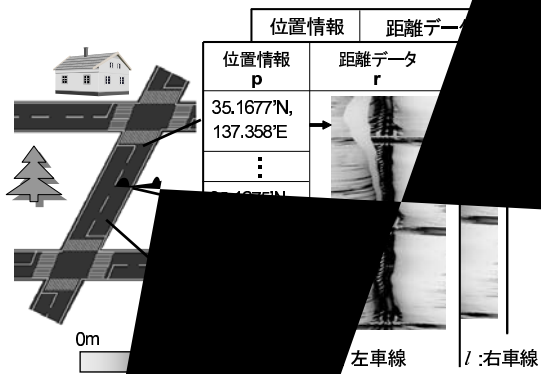
Step 3 同一地点と推定された地点の位置情報を、

$$\mathbf{p}'_i = \frac{1}{N} \sum_{j \in \mathbf{J}_i} \mathbf{p}_j \quad (4)$$

と平均し、高精度化を図る。ここで、 $\mathbf{J}_i = \{i, j | j \text{ は } \mathbf{p}_{1,i} \text{ の } i \text{ と対応付けた各 } \mathbf{p}_{n,j} (n = 2, \dots, N) \text{ の } j\}$ である。

Step 4 基準とした距離データ系列 $\mathbf{p}'_i (i = 1)$ と、高精度化された位置情報 $\mathbf{p}'_i$ と、走行車線情報 l' を各 $i = 1, \dots, I_1$ について、距離データマップに格納することで、ある区間におけるある車線の距離データマップ構築は終了する。以下の実験では、基準系列の距離データのみを距離データマップに格納したが、十分な記憶容量があれば対応付けされた全ての距離データを格納しておくことも可能である。これにより、自車位置推定のさらなる精度向上が期待できる。

最後に自車位置推定のため、車線ごとに高精度化した位置情報を利用して、異なる車線間の距離データどうしの対応付けを行う。この処理は、自車位置推定で車線変更に対応するために必要となる。



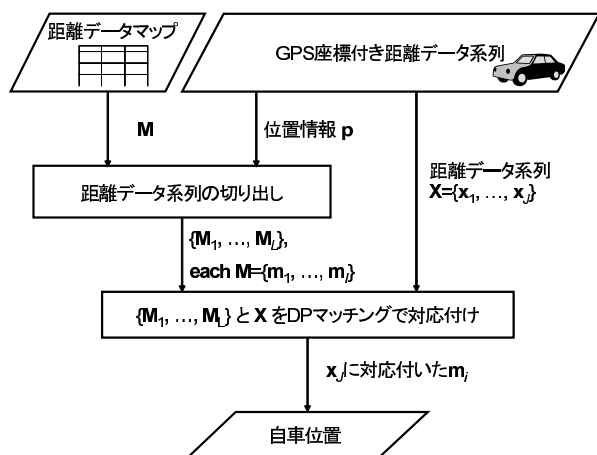


図 7 自転車位置推定手順

また、実験結果の評価用に、

- RTK-GPS (Trimble Trimble5700) [7]

を搭載した。RTK-GPS から得られた値は自転車位置の真値として用いる。

4.2 実験条件

以下を実験にて調査した。

- 走行車線分類精度
- 走行方向の位置推定精度

この実験結果を評価することで、自転車位置推定手法の有効性を示す。実験は片側 2 車線の道路のある 2 区間 A, B を走行しながら測定した合計 31 系列のデータ系列を使用した。

表 1 実験に使用するデータ

経路	距離	走行車線 (データ系列数)	交通量
A	900m	右車線 (7), 左車線 (9)	多い
B	692m	右車線 (6), 左車線 (9)	少ない

式 (3) で用いるレーザスキャナの 1 スキャンの測定データ点数は $S = 2,880 (= 720 \times 4)$ である。走行車線を表す l は、左車線走行時は $l = 1$ 、右車線走行時は $l = 2$ とした。各車線の走行回数 N は表 1 に示すデータ系列数である。

各経路において、左右 1 つずつ、基準となる系列を距離データマップとして、残り 27 個のデータ系列を DP マッチングで対応付け、自転車位置を推定した。この際、基準系列に付随する RTK-GPS の測定値をマップの高精度な位置情報として用いた。自転車位置推定で用いる距離データマップは左と右車線で各々測定されたデータが対応付けられている必要がある。そのため、左車線を走行し測定したデータを横方向のずらし照合を加えた DP マッチングでこれを対応付けた。

ナビ用 GPS を用いた距離データマップ構築に関して、使用するデータ系列数と位置情報の高精度化の関係については 5.2 節で考察する。

4.3 実験結果

走行車線分類成功率及び走行方向の位置推定精度を調査した。以下に詳細を述べる。

- 走行車線分類成功率は、平均 90.5% であった。結果の詳細を表 2 に示す。走行車線分類成功率は、実際に走行した車線

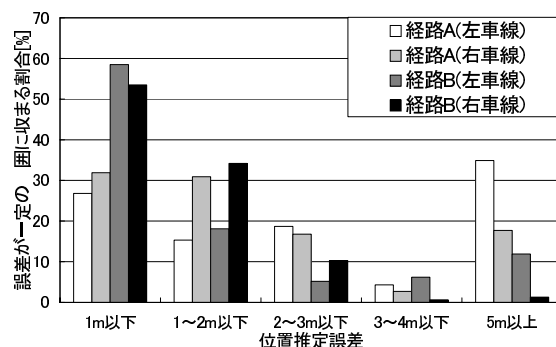


図 8 自転車位置推定結果

と推定された車線が等しいかどうかで判定した。判定は 1 スキャンごとに行った。

表 2 走行車線分類成功率

測定データ	分類成功率
経路 A (左車線)	90.9%
経路 A (右車線)	88.6%
経路 B (左車線)	92.9%
経路 B (右車線)	89.4%
平均	90.5%

- 走行中の自転車位置が、1m 以下の精度で推定された割合は平均 42.7% であった。この自転車位置推定精度は、走行中の自転車位置の真値に RTK-GPS を用い、前実験で走行車線分類が成功したスキャンのみを評価した。各経路における走行方向の位置推定精度を、図 8 に示す。

5. 考察

5.1 自転車位置推定

実験結果から車線認識と自転車位置推定を同時に行うことが可能であることを確認した。しかしながら、走行車線分類失敗が、右車線を走行中に交差点で信号待ちをしている状況で多発した。この失敗の原因は、距離データマップに用いた左車線の基準データ系列中に交差点で周囲を車両に囲まれている状況で測定された距離データ系列が存在し、周辺車両による雑音のため、分類を誤ったと考えられる。この問題を解決するために、距離データマップ構築の際に、距離データを基準系列だけでなく複数の系列を用いて平均化や各測定点に静止物らしさを表す尤度を付加することで、雑音成分の影響を低減できると考える。更に、式 (6) に走行車線移動コストをつけることで車線分類精度が向上できると考えられる。これにより、3 車線以上の道路を扱う場合でも、実際の運転状態には起こり得ない推定の失敗を抑制できる。

次に、走行方向の位置推定精度に関しては、距離データマップの位置情報が正しいものであり、走行車線分類及び走行方向の対応付けが成功したと仮定する。そうすると、レーザスキャナ 10 スキャン/秒、自転車が 40km/h ($\approx 11.1\text{m/s}$) 以下の場合、理論的に走行方向の自転車位置推定誤差は約 1.12m 以下に抑えられると考えられる。

しかしながら、実験結果の図 8 から、提案手法により推定さ



(a) 基準: 217m 地点 (b) 対応付け結果: 220m 地点

図 9 対応付け誤り例: 異なる位置で信号待ちをしている距離データ
どうしが対応付けられている。対応付け結果を可視化するため
に、距離データと同時に撮影された車載カメラ画像を示す。

れた位置が 1m 以上の位置推定誤差を含む場合がある。これは、DP マッチングによる対応付けが失敗していることが原因である。対応付け失敗は、前方車両がいて、かつ信号待ちをしている状況で多発した(図 9)。実験に用いた 27 個の距離データ系列のうち、14 個の距離データ系列について、異なる位置で信号待ちをしている距離データどうしが対応付けられていたことがわかった。この原因として考えられることは、前方車両があるために、正しい対応付けに有効な情報が欠落してしまうことである。この問題を解決するためには、取得できなかった距離データの補間及び前方車両などの雑音成分の除去が必要であると考える。具体的な解決方法は今後の課題とする。

また、実験結果を経路に関して比較すると、経路 B の方が経路 A よりも精度が良かった。これは、経路 B の方が経路 A よりも交通量が少なく、対応付けの際にノイズとなる他車両の影響が少なかったためと考えられる。

5.2 距離データマップ構築

ナビ用 GPS を用いて距離データマップを構築する際、使用するデータ系列数が位置情報の高精度化にどのような影響を与えるか考察する。そのために、距離データマップ構築の際に用いるデータ系列数(走行回数)を増加させることにより、位置情報がどの程度真値に近づくかを調査した。真値にはナビ用 GPS と同期を取って測定した RTK-GPS 座標を用いる。走行回数を変化させたときの GPS 座標の平均値の誤差を図 10 に示す。図 10 から、GPS 座標の平均化により誤差が減少する傾向がわかる。経路 A (左車線) の 6 データ系列目や経路 A (右車線) の 4 データ系列目で、平均化された GPS 座標の位置推定誤差が増加しているのは、その系列に付随するナビ用 GPS 座標の位置推定誤差が大きかったためである。このようなデータ系列があったとしても、多数のデータ系列を用いて平均化することにより真値に近づくと考えられる。

6. ま と め

本報告では距離データマップと走行中の自車が測定した距離データを対応付けることで、自車位置を推定するとともに走行車線を認識する手法を提案した。特に、走行中の自車が測定した距離データと、車線数分の距離データマップを用いた、1 対多の対応付けを行うことにより、自車の走行車線判定を行った点が重要である。

提案手法の有効性を調査するために、距離データマップと距離データ系列間対応付け実験を行った。実験データには、2 車線

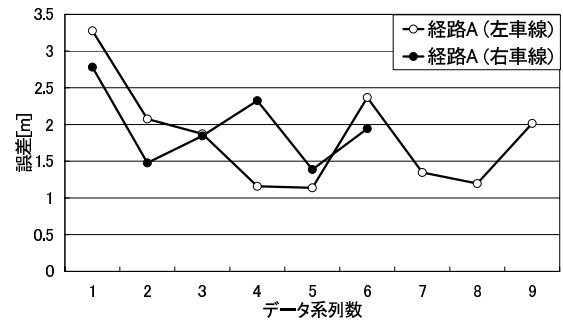


図 10 平均化による位置情報の誤差と使用したデータ系列数の関係

約 1km の道路を走行して測定した 31 系列のデータを用いた。RTK-GPS を用いて距離データマップを構築し、それを用いて自車位置推定を行った結果、

- 走行車線分類成功率 90.5%
- 走行方向の誤差 1m 以下で対応付けられた割合 42.7%

が得られた。このことから、本手法を用いることによって自車位置情報の推定精度が向上し、同時に走行車線の分類も可能であることを確認した。

今後の課題として、距離データを取得できなかった場合の補間方法、距離データ中に現れる前方車両などの雑音除去がある。

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 21 世紀 COE プログラム、文部科学省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.suenaga.m.is.nagoya-u.ac.jp/>) を使用した。

文 献

- [1] J. Sparbert, K. Dietmayer and D. Streller, "Lane Detection and Street Type Classification using Laser Range Images," Proc. 4th International IEEE Conf. on Intelligent Transport Systems, pp.454-459, August 2001.
- [2] T. Weiss, N. Kaempchen and K. Dietmayer, "Precise Ego-Localization in Urban Areas using Laserscanner and High Accuracy Feature Maps," Proc. 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2005), pp. 284-289, June 2005.
- [3] 洪久 奈保, 佐藤 准嗣, 高橋 友和, 井手 一郎, 村瀬 洋, 小島 祥子, 高橋 新, "レーザレーダデータ系列間対応付けによる自車位置推定," 電子情報通信学会技術報告, PRMU2006-55, June 2006.
- [4] J. Sato, T. Takahashi, I. Ide and H. Murase, "Change Detection in Streetscapes from GPS Coordinated Omni-Directional Image Sequences," Proc. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006), Vol. 4, pp. 935-938, August 2006.
- [5] B. Gao and B. Coifman, "Vehicle Identification and GPS Error Detection from a LIDAR Equipped Probe Vehicle," Proc. 9th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, Paper WB4.1, September 2006
- [6] T. Weiss, B. Schiele and K. Dietmayer, "Robust Driving Path Detection in Urban and Highway Scenarios using a Laser Scanner and Online Occupancy Grids," Proc. 2006 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2006), pp. 184-189, June 2006.
- [7] Trimble 社, Trimble 5700 GPS, http://www.nikon-trimble.co.jp/products/pdf/gps/5700_gps.pdf
- [8] 坂井文泰, "GPS 技術入門," 東京電機大学出版局, 2003.