

自律走行のための白線と縁石に基づく自己位置推定

土谷 千加夫^{1,a)} 浅井 俊弘^{1,b)} 植田 宏寿^{1,c)} 佐野 泰仁^{1,d)} 古性 裕之^{1,e)}

概要

高度運転支援システム (ADAS) や自動運転を実現する上で、自車の位置 (自己位置) を正確に知ることは必要不可欠である。現在走行している多くの自動車はナビゲーションのために GPS を用いて路線レベルの自己位置を得ているが、ナビゲーション以上の支援を実現するためには車線レベルかそれ以上の精度で自己位置を求める必要がある。

本論文では、白線と縁石の位置が正確に記された高精細 2次元地図と、車載センサによる車両近傍のセンシング結果から自己位置を推定することでサブメータ精度の自己位置を推定する方法について述べる。

本手法は、魚眼レンズカメラとレーザレンジファインダを用いて白線と縁石を検出するが、周囲を走行する車両によるオクルージョンを極力避けるため、これらの検出範囲を自車近傍に限定する。観測範囲の狭さを補うために、車速センサとヨーレートセンサから推定されるオドメトリに基づいて過去の検出結果を繋ぎ合わせ、仮想的に広範囲の観測を得る。これと高精細 2次元地図を ICP アルゴリズムでマッチングすることで、自己位置が推定される。本手法を車両に適用した結果、GPS の受信精度が悪化する建物の陰においても正確に車線をトレースできることを確認した。

1. はじめに

高度運転支援システム (ADAS) や自動運転を実現する上で、自車の位置 (自己位置) を正確に知ることは必要不可欠である。車載センサによる観測から車線の形状を推定し、道路標識や標示に基づいて車線の意味 (進行方向、制限速度、停止位置等) を理解した上で、滑らかに走行することは極めて難しい。この問題に対する近年の主要なアプローチは、高精細地図を事前に用意しておき、それと車両周辺の実世界とを対応付けることで、地図に記載された事前知

識を活用することである。地図と実世界の対応をとるために必要な情報が自己位置であり、それを求めるのが自己位置推定である。

高精細地図を用いるアプローチにおいて、地図の正確さと鮮度は極めて重要である [11]。しかしながら、高度なモバイルマッピングシステム (MMS) を用いて作成した地図であっても、数メートルのズレを含む場合がある。この場合、GPS によるグローバルな自己位置が正確であったとしても、それをもとに地図上での自己位置を得ることはできない。すなわち、地図に記載された事前知識を実世界に投影するという目的では、求めるべきものはグローバルな自己位置ではなく、地図上での自己位置である。本研究では前者を **global pose**、後者を **map pose** と呼ぶ。

高精細地図を用いた自己位置推定の多くは、車載センサによる車両近傍の観測値と高精細地図の位置合わせ (レジストレーション) に基づく [1], [2], [5], [8], [10]。これらの手法は主に車線区分線 (以下、白線という) やランドマークとなりうる地物を検出し、それらを地図と照らし合わせることで自己位置を推定する。様々なランドマークを含む地図は作成・更新のコスト、および、それを用いた自己位置推定の計算コストが大きく、全国規模での実施は難しい。一方で、白線や縁石など、道路構造を規定する地物に限定した地図であれば、コストを抑えることができる。

本研究では、白線と縁石の位置のみが正確に記載された地図を用いる。白線はカメラで検出し、縁石はレーザレンジファインダ (LRF) で検出する。ある一時刻における白線と縁石の観測は自車近傍に限定されるため、誤検出や未検出の影響を受けやすい。そこで、車輪速センサとヨーレートセンサから自車のオドメトリを推定し、それをもとに過去の複数の観測をつなぎ合わせることで、観測範囲を拡大し、前述の問題に対処する。

提案手法を実験車に実装し、プライベートエリアにて自己位置推定実験を行った。その結果、提案システムが正確に車線をトレースできることを確認した。

本論文は 6 章からなる。第 2 章では、自己位置推定に用いる高精細地図について説明する。第 3 章では白線と縁石の検出結果から周辺の地図を復元する方法を述べ、第 4 章で高精細地図と復元地図の位置合わせによる自己位置推定

¹ 日産自動車株式会社 総合研究所 モビリティ・サービス研究所
〒246-0123 神奈川県厚木市森の里青山 1-1

a) ctsuchiya@mail.nissan.co.jp

b) t-asai@mail.nissan.co.jp

c) hiro-ueda@mail.nissan.co.jp

d) ysano@mail.nissan.co.jp

e) h-furusuo@mail.nissan.co.jp

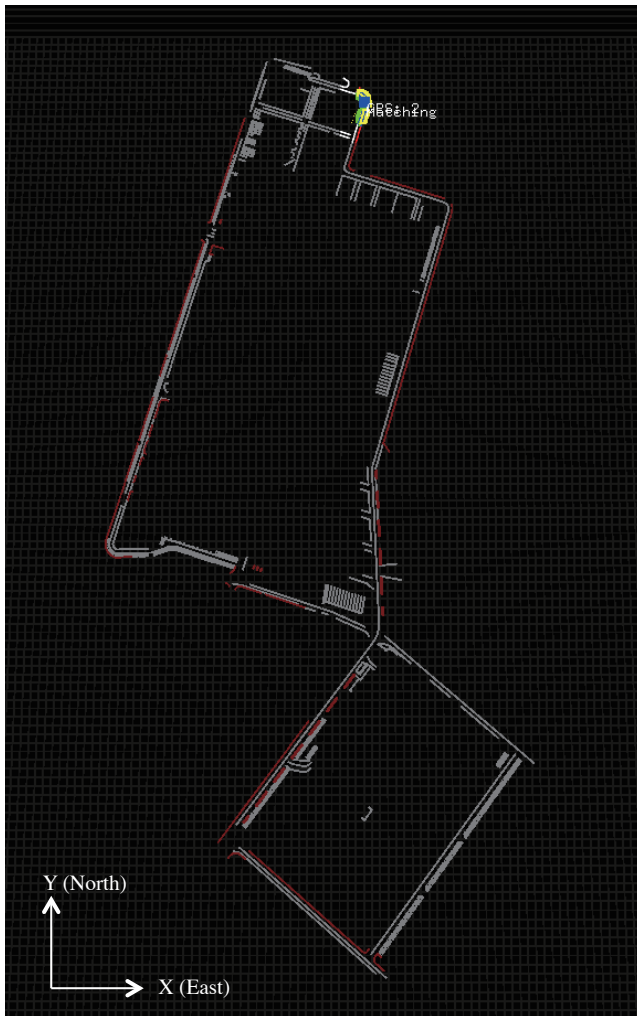


図 1 High-definition map. Lane markings and curbs are shown by white lines and red lines, respectively.

を提案する。第 5 章では提案システムの評価結果を示し、最後に第 6 章でまとめる。

2. 高精細地図

地図に記載する内容を白線と縁石に限定することでデータ量を削減し、計算コストと記憶コストを抑制する。図 1 に示すように、ある基準点を原点に東向きに X 軸、北向きに Y 軸をとる直交座標系を定義し、その上で白線と縁石を線分として記述する。実際の白線はある幅を持つが、地図作成の際は輪郭をトレースするのではなく、その中心線を線分で表現する。縁石に関しては、車両から検出できる面、すなわち、車道側の面の位置を地図に記載する。本研究では、後述する自己位置推定精度の評価のためにこの方式でプライベートエリア内に設けられた全長約 3km の片側 1 車線道路の地図を作成した (図 1)。

3. 白線と縁石に基づく地図復元

3.1 システム概要

本研究では自車近傍の白線を検出するための魚眼レンズ

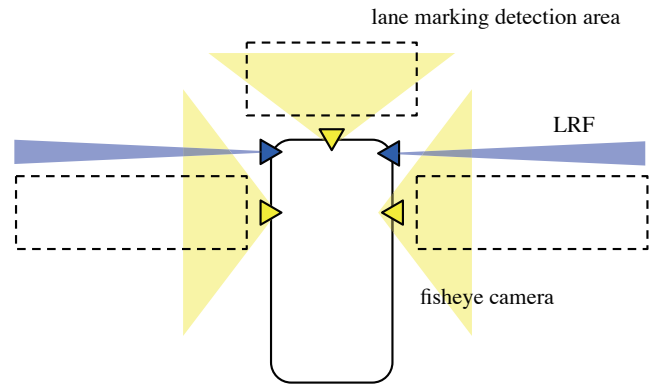


図 2 Sensor layout of our test car. The fisheye cameras are mounted on the door mirrors and the front grill. The LRFs are installed inside the fog lamp holes at the front bumper.

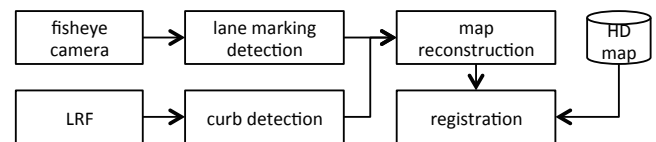


図 3 System diagram.

カメラ、縁石を検出するための LRF、オドメトリを推定するための車輪速センサとヨーレートセンサ、それに高精細地図を搭載する車両を試作した。図 2 にセンサのレイアウトを示す。カメラは約 180 度の画角を有し、左右ドアミラーとフロントグリルにそれぞれ一つずつ搭載される。LRF は 1 ラインスキャン型で、道路の断面形状を計測するために車両進行方向に対して垂直方向を走査するように搭載される。

提案するシステムのブロック図を図 3 に示す。本研究では、白線と縁石の観測と高精細地図とを位置合わせすることで自己位置を推定する。しかし、ある一時刻における白線と縁石の観測は自車近傍に限定されるため誤検出や未検出の影響を受けやすい。そこで、車輪速センサとヨーレートセンサからオドメトリを推定し、それをもとに過去の複数の観測をつなぎ合わせる。このようにして自車の走行経路に沿った地図を復元する。これを復元地図と呼ぶことにする。復元地図は事前に用意した高精細地図と照合され、自己位置が推定される。

白線と縁石の検出自車近傍に限定したことで、周囲を走行する車両によるオクルージョンの影響を軽減できる。また、復元地図は仮想的に観測範囲を拡大したことに相当し、地図との位置合わせ精度の向上に寄与する。

3.2 白線検出

近年、車線維持支援 (LKA) や車線逸脱警報 (LDW) のための白線検出が実用化されているが、その多くが画角 30 度程度のカメラを用いて、車線延伸方向に深い検出範囲を

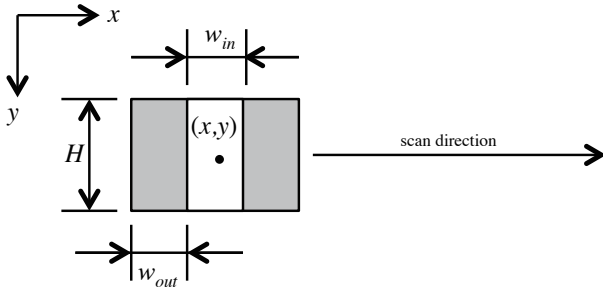


図 4 Template of lane marking detection.

設けている。そのため、先行車との車間距離が短くなる渋滞時等に先行車によるオクルージョンが発生し、白線が検出できないことがあった。自己位置推定は常時機能する必要があるため、このような状況にも対応する必要がある。

先行車によるオクルージョンを回避するため、本研究では自車近傍の白線に観測を限定する。車両の左右に取り付けられた魚眼レンズカメラは、車線の左右の白線を検出し、車両前方の魚眼レンズカメラは車線変更時に自車がまたぐ白線を捉える。

Han ら [2] は SLT [9] を拡張した ESLT を提案した。SLT (ESLT) は注目領域とその隣接領域の平均輝度差に基づいて白線を検出する。本研究ではこれを発展させ、注目領域とその隣接領域の統計的分離度に基づく白線検出法を提案する。

図 4 に示すように注目領域と隣接領域を設定する。各領域の平均輝度値を μ_{in}, μ_{out} 、輝度値の分散を $\sigma_{in}^2, \sigma_{out}^2$ 、面積 (画素数) を N_{in}, N_{out} とする。このとき、 (x, y) を中心とする 2 領域の統計的分離度 $S_{x,y,w_{in}}$ は次式で定義される：

$$S_{x,y,w_{in}} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_B^2 + \sigma_W^2}. \quad (1)$$

ここで、 σ_B^2 はクラス内分散、 σ_W^2 はクラス間分散であり、それぞれ以下で定義される：

$$\sigma_B^2 = \frac{N_{in}N_{out}(\mu_{in} - \mu_{out})^2}{(N_{in} + N_{out})^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_W^2 = \frac{N_{in}\sigma_{in}^2 + N_{out}\sigma_{out}^2}{N_{in} + N_{out}}. \quad (3)$$

なお、式 1 は $[0, 1]$ に正規化される。

入力画像を縦 $2L$ 、横 W の俯瞰画像に変換し、その上下中央を図 4 のテンプレートで x 軸方向へ走査し、1次元のヒストグラムを得る。ヒストグラムのビン x の値は位置 (x, y) の分離度とする。実際には様々な幅の白線に対応するため、注目領域の幅 w_{in} を事前に設定された範囲で変えながら繰り返し走査を行う。その結果、幅の場合の数だけのヒストグラムが得られる。

ここまでに述べた白線検出器では車両の進行方向と平行な白線しか検出できない。車両の進行方向に対して角度のついた白線を検出するために、本研究ではテンプレートを変形させるのではなく、画像を歪ませて、その画像に対し

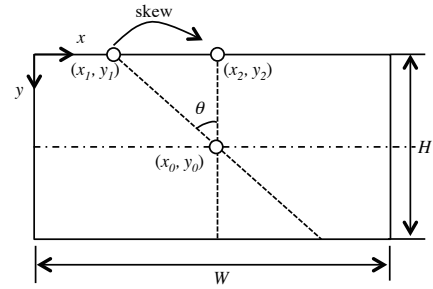


図 5 Skew.

て同一テンプレートを適用する方法を提案する。以下、歪み角度 θ の歪み画像の生成方法を示す。図 5 に示すように俯瞰画像の左上を原点として、 xy 軸の直交座標系を設定し、俯瞰画像の中心座標を (x_0, y_0) 、ある画素の変換前の座標を (x_1, y_1) 、変換後の座標を (x_2, y_2) とする。このとき、歪み変換は次式で与えられる：

$$x_2 = (y_0 - y_1) \tan \theta + x_1, \quad (4)$$

$$y_2 = y_1 \quad (5)$$

以上の手続きをまとめると、テンプレートの中央領域の幅 w_{in} と、歪み角度 θ を変えながらヒストグラムを作成する。式 4, 5 から明らかなように、歪み画像と元の画像の $y = y_0$ のラインは一致するため、異なる歪み角度のヒストグラムは直接比較可能である。そこで、すべてのヒストグラムの各点での最大値をとることで合成ヒストグラムを得る。最後に、合成ヒストグラムから事前に設定された閾値 τ 以上の極大値を選択し、その位置を白線の位置とする。

3.3 縁石検出

縁石は車道と歩道を区分する一般に 15cm 以上の構造物である。これまでステレオカメラを用いた縁石検出方法が検討されている [3], [4], [6] が、一般的なステレオカメラの画角は広くても 40 度程度であり、渋滞時の先行車によるオクルージョンの問題には対処できない。一方で、上述した魚眼レンズカメラはオクルージョンの問題に対応できるが、縁石の僅かな高低差を単眼カメラで検出するのは容易ではない。そこで、縁石検出に LRF を用いる。一般的な車載 LRF はレーザを水平に照射し、周囲の車両や歩行者等を検出するために用いられる。本研究ではレーザを垂直に照射するように LRF をフォグランプの位置に垂直に搭載する。図 6 にこの LRF で得たポイントクラウドの例を示す。

路面は必ずしも平坦とは限らないので、絶対的な高さではなく、局所的な高低差に着目して縁石を検出する。また、縁石は道路の端に位置するので、自車から離れる方向に走査し、事前に設定された閾値 κ 以上の高低差を持つ最も車両寄りの段差を縁石として検出する。

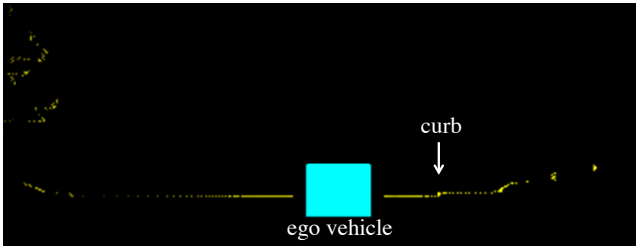


図 6 Point cloud from LRFs.

3.4 地図復元

ある一時刻における白線と縁石の観測は自車近傍に限定されるため、オクルージョンや誤検出、未検出の影響を受けやすい。そこで、車輪速センサとヨーレートセンサから自車のオドメトリを推定し、それをもとに過去の複数の観測をつなぎ合わせることで、周辺の地図を復元する。これは、車両近傍に限定される白線と縁石の観測を仮想的に拡大したことに相当する。

オドメトリの推定式を次式に示す [7] :

$$\begin{pmatrix} X_{t+1} \\ Y_{t+1} \\ \theta_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ \theta_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_t \cos \theta_t \Delta t \\ v_t \sin \theta_t \Delta t \\ \omega_t \Delta t \end{pmatrix} \quad (6)$$

オドメトリの推定は誤差を含むため、ループを含む経路を走行した場合、復元される地図では必ずしもループが閉じない。SLAM 等の研究ではループクローズング処理を行うことで、この問題に対処しているが、計算コストが大きいという問題があった。

本研究の目的は事前地図と復元地図を位置合わせして自己位置を求めることなので、必ずしもループクローズング処理は必要ない。事前地図と復元地図の位置合わせにより自己位置が拘束されるためには、直前のカーブを含む範囲で地図を復元すれば十分である。この考えに基づき、下記の手続きで復元地図の範囲調整を行う :

- (1) 自車の現在の姿勢角 θ を求める。
- (2) 自車のトラジェクトリ (X_t, Y_t, θ_t) (図 7 の赤丸) を時間を遡るように走査し、現在の姿勢角 θ とのなす角を求める。なす角が Θ 以上のとき、車両がカーブしたと判断する。
- (3) 自車直近の L [m], および、直近のカーブから L [m] に含まれるポイントクラウドを残し、それ以外を削除する。

4. 事前地図と復元地図の位置合わせに基づく自己位置推定

前章で述べた復元地図は白線と縁石の検出点の集合 (ポイントクラウド) である。事前地図をあらかじめポイントクラウドに変換しておけば、両地図間の位置合わせには ICP (Iterative Closest Point) が適用できる。

ICP は局所探索であるため、妥当な初期値を与える必要

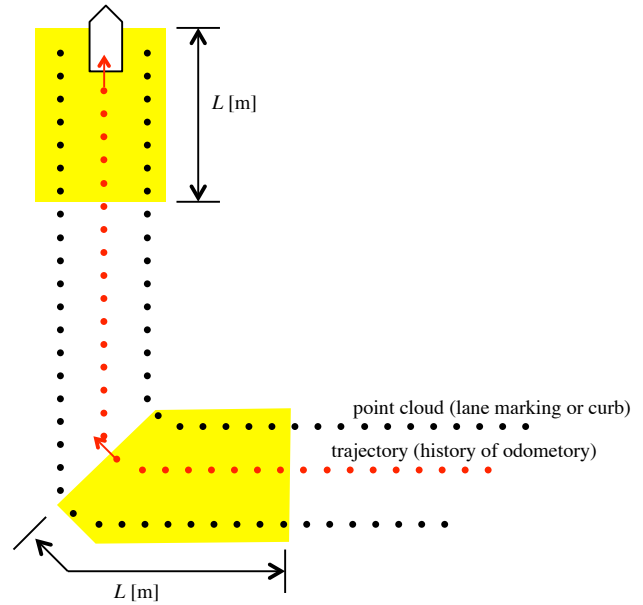


図 7 Map reconstruction procedure.

がある。地図復元に用いたオドメトリを用いれば、前回の自己位置推定値からの移動量を求めることができるので、ここではオドメトリに基づいて補正した前回値、すなわち、オドメトリに基づく自己位置を ICP の初期値とする。

自己位置推定のフローチャートを図 8 に示す。図中の 2 箇所の空走補償は、前回値から ICP の初期値を得るために、ICP の計算中に自車が空走してしまう量を補正するために必須の処理である。対応点探索では、復元地図に含まれる点と事前地図に含まれる点とを対応づける。このとき、白線、縁石という属性毎に対応点探索を行う。コストは対応点間のユークリッド距離の 2 乗で定義され、それを最小化するように自己位置 (X, Y, θ) を調整する。また、自己位置推定が一定時間間隔 (周期 T [sec]) で実施されるように、対応点探索からコスト最小化に至る ICP のループの中で処理に要した時間を計測し、 $0.9T$ [sec] が経過したところでループを脱出するようにする。誤検出点の削除は、白線と縁石の誤検出による悪影響を提言するためのものであり、過去 N タイムステップに渡って事前地図と対応付けられなかった点を削除することで実現する。

5. 実験と評価

提案手法を評価するために、プライベートエリア内に設定された全長約 3km の片側 1 車線のコース (図 1) を走行した。初期位置は手で設定した。このときの精度は概ね 1m 程度の誤差を含む。また、車両には RTK-GPS を搭載し、これによる測位結果を真値とした。これは評価目的のみに使われ、自己位置推定には用いられないことに注意されたい。

表 1 に評価に用いたパラメータを示す。白線検出に用いる俯瞰画像は $4m \times 1m$ の範囲をカバーするように 0.2 [m/pixel]

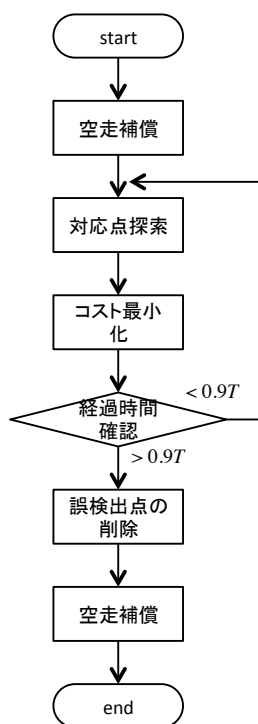


図 8 Flow chart of registration between the reconstructed map and the prior map.

表 1 Parameter configuration for the evaluation.

パラメータ	値
地図復元用角度パラメータ (Θ)	20 [deg]
地図復元用距離パラメータ (L)	50 [m]
ICP 周期 (T)	0.1 [sec]
白線検出用俯瞰画像解像度	0.02 [m/pixel]
白線検出用分離度閾値 (τ)	0.15
白線検出用テンプレート高さ (h)	50 [pixel]
白線検出用テンプレート注目領域幅	5, 6, ..., 10 [pixel]
白線検出用テンプレート歪み角度	-30, -20, ..., 30 [deg]
緑石検出用高さ閾値 (κ)	0.1 [m]
誤検出点判定用パラメータ (N)	30 (3 [sec] 相当)

の解像度で作成した (図 2)。車両進行方向に対して角度のついた白線を検出するためには、10 度刻みで-30 度から+30 度の 7 通りの歪み画像を作成した。緑石検出では緑石と判断する局所的な高低差の閾値を 10cm とした。

図 9 は 3.4 節で述べた手続きで走行軌跡に沿って地図を復元した様子を示している。図 9(上) は自車が第 1 のカーブに進入した時の復元地図であり、カーブ手前の直線区間の検出点からなる。図 9(中) はカーブを抜け、次のカーブに差し掛かったときの復元地図である。このとき、自己位置を拘束するためにカーブ直前の直線区間の検出点は保持されているが、カーブ直後の検出点は自己位置の拘束には不要なので削除されている様子が見て取れる。最後に、図 9(下) は第 2 のカーブを抜けた直後の様子である。このとき、第 2 のカーブの前後の検出点のみで自己位置を拘束することができるので、第 1 のカーブ周辺の検出点は削除さ

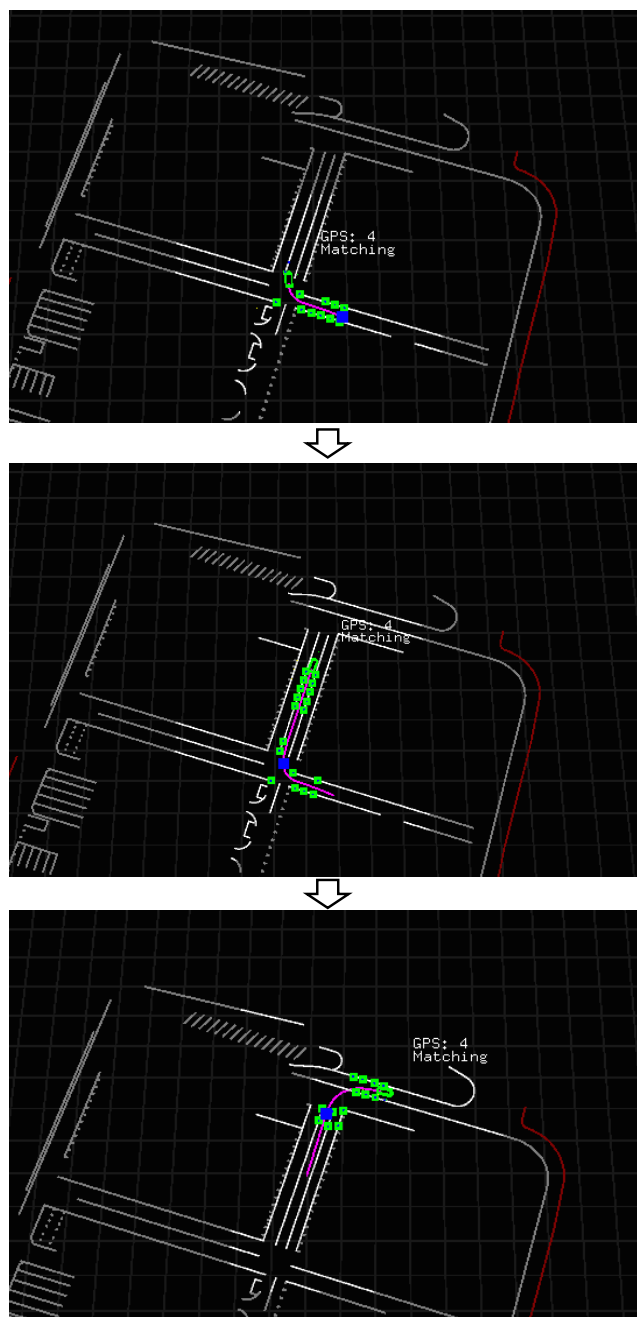


図 9 An example of map reconstruction.

れている。このように、必要以上の検出点を保持しないことで、計算コストの削減が実現されている。

図 10 は各時刻における自己位置推定結果と RTK-GPS の値の誤差を位置と姿勢角についてプロットしたものである。図中の黄色い編みかけ部は RTK-GPS がうまく信号を受信できず位置精度が大きく低下した区間、緑色の編みかけ部は車両がカーブしている区間をそれぞれ示している。前述の通り、初期位置は誤差を含んでいるので走行開始直後の誤差は大きくなっているが、最初のカーブを曲がったところから徐々に誤差が減少していることがわかる。また、カーブを曲がった後から次のカーブに差し掛かるまでの間、位置誤差が徐々に大きくなっていることがわかる。こ

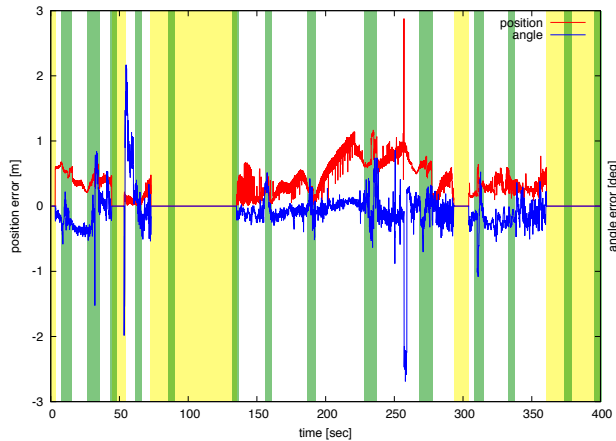


図 10 Estimation error. The errors are not shown, because the GPS didn't work in the yellow shaded areas. The green shaded areas show curves where the vehicle's orientation changed rapidly.

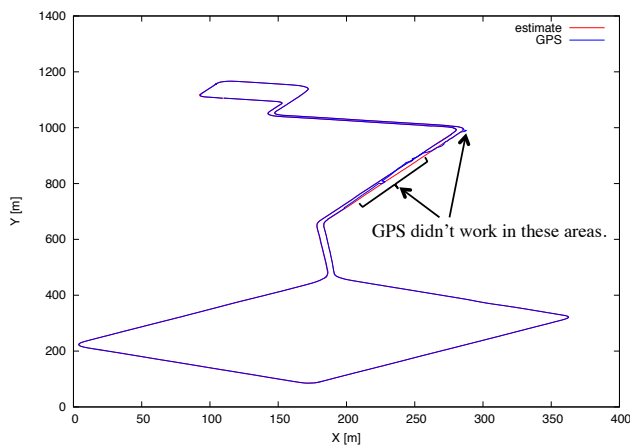


図 11 Estimated trajectory and ground truth from the RTK-GPS. Note that the GPS didn't work well in some areas due to poor signal quality.

の現象は 190 秒から 220 秒付近で顕著である。一方で、自己位置推定結果と RTK-GPS の軌跡を比較した図 11 では、RTK-GPS がうまく機能しなかった区間を除外すれば、両者はほぼ一致している。このことから、車線に対して横方向の位置精度は高く、車線に沿った方向の位置精度がカーブ直後から徐々に大きくなったことがわかる。この原因として考えられるのは、車輪速センサの誤差が蓄積し、直前のカーブからの復元地図の長さ、実際の長さ(事前地図の該当エリアの長さ)のズレである。

現状では長い直線路を経てカーブや交差点に差し掛かった場合に、車線に対して前後方向に誤差が乗ってしまう。これは自動制御で交差点を右左折することを考えると、重大な問題である。これに対する一つの対策は、交差点直前に設けられた停止線等を用いて位置合わせすることであり、今後の重要な課題である。

6. おわりに

本論文では、白線と縁石の位置が正確に記された高精細地図と、車載センサによって復元された自車近傍の地図とを位置合わせすることで、自己位置を推定する方法を提案した。提案手法では渋滞時の先行車によるオクルージョンを回避するために、観測を自車近傍に限定した。観測範囲の狭さを補うために、オドメトリに基づいて観測結果をつなぎ合わせ、仮想的に観測範囲の拡大を図った。提案手法を実験車に実装し、先行車、対向車の存在する環境にて自己位置推定精度を評価したところ、オクルージョンの影響を受けることなく、正確に車線をトレースできることがわかった。また、処理の簡素化により、自己位置推定を 10Hz で実行できることを示した。

今後は、長い直線路での位置誤差を低減するために、停止線等の位置合わせ機能を追加していく予定である。

参考文献

- [1] D. Gruyer, R. Belaroussi, and M. Revilloud, "Map-aided localization with lateral perception," IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, pp.674–680, Jun. 8–11, 2014.
- [2] S.J. Han and J. Choi, "Real-Time Precision Vehicle Localization Using Numerical Maps," ETRI Journal, Vol. 36, No. 6, pp.968–978, 2014.
- [3] 石田皓之, 目黒淳一, 小島祥子, 内藤貴志, "Conformal Geometric Algebra を用いた道路物理境界検出," 信学技報, PRMU2012-36, IBISML2012-19, 2012.
- [4] 葛西達哉, 小野口一則, 佐藤正明, 岩瀬耕二, "平面投影ステレオ視を用いた路肩検出," 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5, pp.639–647, 2010.
- [5] J. Levinson, M. Montemerlo, and S. Thrun, "Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments," Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS), 2007.
- [6] 松井俊樹, 菅沼直樹, "縦断勾配を有する路面領域の抽出に関する研究," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.77, No.782, pp.3737–3749, 2011.
- [7] S. Thrun, "Probabilistic robotics," The MIT Press, 2005.
- [8] A. Schindler, "Vehicle self-localization with high-precision digital maps," IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.141–146, Gold Coast, QLD, Jun. 23–26, 2013.
- [9] T. Veit, J.P. Tarel, P. Nicolle, and P. Charbonnier, "Evaluation of Road Marking Feature Extraction," IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst., pp.174–181, Beijing, China, Oct. 12–15, 2008.
- [10] 山口一郎, 古城直樹, 安藤敏之, 古性裕之, 柳拓良, "全周囲魚眼カメラによるロバストな自己位置推定技術の開発," 自動車技術会論文集, Vol.45, No.3, pp.597–602, 2014.
- [11] 二宮芳樹, "自動運転のためのビジョン技術," ViEW2014 特別講演, 2014.