

市街地における完全自動運転を実現する ハイディペンダブルローカライゼーション手法の開発

Development of High Dependable Localization Method in order to Realize Fully Automated Vehicle in Urban Area

菅沼 直樹

Naoki SUGANUMA

自動車の自動運転システムでは信頼性の高い自己位置推定(ハイディペンダブルローカライゼーション)手法が必要となる。このため本研究では、走行空間の現況を記憶した自己位置推定用地図を予め用意しておき、この地図と車載センサで計測した環境情報を照合して高精度に自己位置を推定する手法を開発した。実験の結果、本手法を用いることで約14 cm程度の精度で自己位置の推定が可能であることを確認した。また国内の大学として初となる市街地の公道走行実験を通して、市街地や山間部を含む様々な現実の公道において提案手法を用いて13.2 km以上の区間を走行可能であることを確認した。

For the autonomous vehicle, it is necessary to estimate high dependable and high accuracy localization method. Therefore, in this research, novel localization method is proposed. In our method, digital map for localization is prepared beforehand; the vehicle position is estimated by comparing this digital map and onboard sensor data. From experiments, we have confirmed that the accuracy of localization is about 14 cm by proposed method. Additionally, we have conducted a first trial of public road test of autonomous vehicle in urban area among Japanese Universities and it was confirmed that the autonomous vehicle could be driven 13.2 km distance based on proposed method.

はじめに

自動運転自動車は、自動車搭乗員の安全快適な移動や、高齢過疎地域における次世代モビリティとして期待されている。このような背景から、筆者らの研究グループは日本国内の大学としては初となる自動運転自動車の市街地における公道走行実験を石川県珠洲(すず)市と共同で開始した^[1]。珠洲市は高齢過疎化による公共交通機関の不足といった問題を抱えている。このため、自動運転自動車を市内の公共交通機関の一部として活用することが期待されている。

一方、市街地における自動運転では、高速道路とは異なり白線が明確に引かれていない可能性がある。また、前方の車線が右左折専用レーンであるかといった情報を多数の車両が存在する環境で遠方から確実に認識することが難しいといった問題がある。このため、市街地走行を前提とした現在の自動運転システムでは、高精度地図を活用してその認知・判断能力を向上させる試みが多く行われている^[2, 3, 4]。一方、高精度地図を活用して自動運転を行うためには、高精度な自己位置推定が必要となる^[4]。

従来、このような自己位置推定(Localization)問題に対して、GPS(Global Positioning System)に代表されるGNSS(Global Navigation Satellite System)が多く用いられてきた。一方で、GNSSを使用した自動運転には多く問題がある。例えば東京都内など高層ビルが多く建ち並ぶ環境では、マルチパスの影響により正しい位置を計測することが困難になる問題や、トンネル内などそもそもGNSS衛星信号の捕捉が難しい状況では測位ができなくなるといった問題がある。通常このような問題を低減化するため、INS(Inertial Navigation System)等を併用し計測精度の向上や常時計測値を得られるようにする工夫がなされる^[5]が、長期間GNSS信号が受信できない環境ではやはり大きな誤差を生じてしまう問題がある。

そこで本研究では、GNSSへの依存度が低く、高精度かつ信頼性の高い自己位置推定(ハイディペンダブルローカライゼーション)を可能とする手法を提案する。

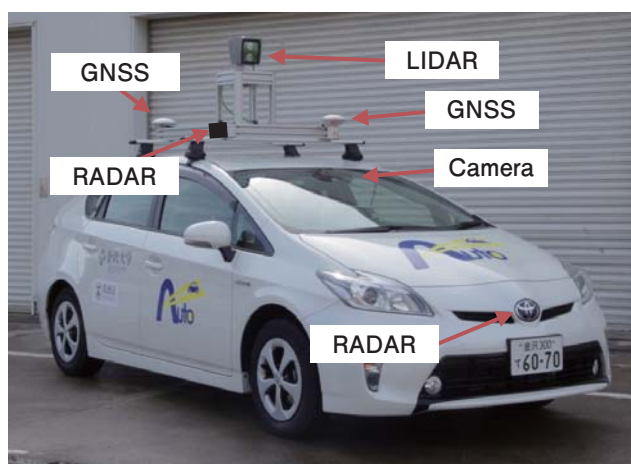


Figure 1 Autonomous vehicle used for public road driving

自己位置推定システムの概要

実験車両の概要

まず本研究で用いた実験車両の概要について述べる。**Figure 1**に示すように、本研究ではトヨタ自動車のプリウスを用いた。本車両は、ステアリング角、駆動力、ウィンカーがCAN (Controller Area Network) を介してコンピュータから制御可能な状態に改造している。また、公道における安全な実験を可能とするため、マニュアル操作によるオーバライド機能も実装している。また本車両には、GNSS/INS複合航法システム (Applanix POS-LV220) が搭載されている。本システムはDMI (Distance Measurement Indicator), IMU*¹ (Inertial Measurement Unit) および2台のGNSS受信機から構成されており、カルマンフィルタにより100 Hzで車両の位置姿勢が計測可能となっている。また、後処理補正を行うことで、車両位置姿勢を3 cm, 0.05度で計測可能となっている。また、周辺環境認識用センサとして、LIDAR*², RADAR*³およびカメラが設置されている。このうち車両上部に設置したLIDARには64本のレーザ送受信機が内蔵されており、毎秒130万点の詳細なポイントクラウド (三次元点群) を10 Hzで取得することが可能となっている。本LIDARは、レーザ照射先の反射率を取得可能であるため、昼夜を問わず白線等の道路情報を読み取ることが可能となっている。

*1: IMU: 慣性センサユニット、運動を司る3軸の角度 (または角速度) と加速度を検出する装置

*2: LIDAR (LIght Detection And Ranging, ライダ): パルス状に発光するレーザ照射に対する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するもの

*3: RADAR (Radio Detecting And Ranging, レーダ): 電波、特にミリ波を発信して目標物に当て、その反射波を受信して方向、位置や相対速度を測定する装置

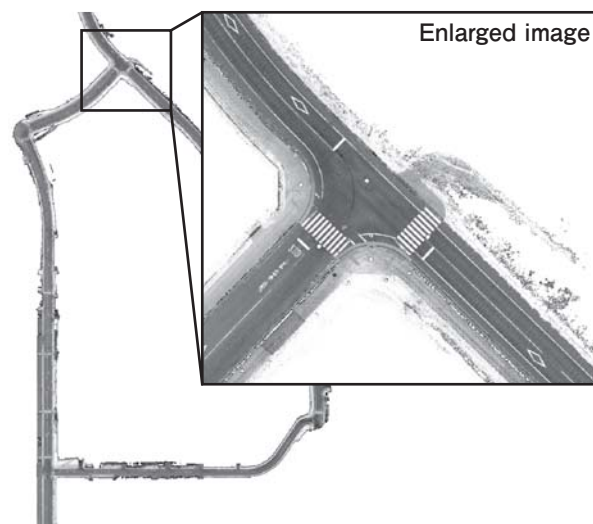


Figure 2 Example of reflectivity image

自己位置推定用地図

前述の通り、本研究で使用した実験車両にはGNSS/INSおよびLIDARが搭載されている。このため、後処理補正を行ったGNSS/INSから得られる位置姿勢情報とLIDAR反射率情報を用いることで**Figure 2**に示すようなオルソ画像 (上空から道路面を見下ろしたような画像) を取得することが可能となる。本研究では、予め作成しておいたオルソ画像とリアルタイムに得られるLIDAR反射率情報を照合することで、自動運転中はGNSSにほとんど依存せずに自己位置を推定可能としている。

一方、広大な空間のオルソ画像を単純に作成すると大量のメモリが必要となる。このため本研究では、オルソ画像を64 mサイズの小さなパッチ状に分割し、自己位置推定時には必要なパッチ状の小領域のオルソ画像群をHDDから読み込むことでメモリ使用量の効率化を図った。また、交通環境では大量の自動車等の物体が存在しており、これらを考慮せずに自己位置を推定すると誤った自己位置を推定する可能性が生じる。このため、道路面に存在するポイントクラウド*⁴のみを使用し、これらのポイントクラウドから得られる反射率情報のみを用いてオルソ画像生成および自己位置推定を行うことで大量の移動物体が存在する環境でも高精度な自己位置推定を可能とした。

*4: ポイントクラウド (point cloud): 点群、コンピュータで扱う点の集合、多くの場合、空間は3次元であり、直交座標 (x, y, z) で表現されることが多い

デジタル地図に基づく自己位置推定

次に、オルソ画像を用いて自己位置を推定する手法について述べる。

本研究では、自己位置の確率密度分布を時系列的に求め、確率密度分布のピークを求めることで車両の自己位置を推定した。ただし、直接的に車両の自己位置を計測する代わりにデッドレコニング^{*5}の誤差を推定することで、常時連続かつ滑らかな位置推定を可能としている。

本手法は、予測更新及び観測更新から構成されている。予測更新においては前時刻までに推定した自己位置の確率密度分布にガウシアンフィルタを畳み込む^{*6}ことで事前確率密度分布を取得する。また観測更新では、前節で述べた **Figure 3a**に示すようなオルソ画像と、各時刻ごとにLIDARから得られる**Figure 3b**に示すような反射率情報を記録した2次元の画像をテンプレートマッチングにより求めることで**Figure 3c**に示すような相関値分布を取得する。そして、予測更新により求めた事前確率密度分布を用いて事後確率密度分布を取得する。そして推定した事後確率密度分布のピークを検出することで、自己位置を推定する。ただし本手法では、2次元平面上のデッドレコニングの位置誤差のみを推定し、車両方位に関してはGNSS/INSシステムから得られる方位情報を直接用いることとした。これは、筆者らの長年の経験からGNSS/INSシステムから得られる方位情報はGNSS衛星信号が劣化する環境であっても比較的高精度に推定を継続可能であると判断したからである。また方位方向の推定を省くことにより、計算時間の大幅な短縮が可能となる。

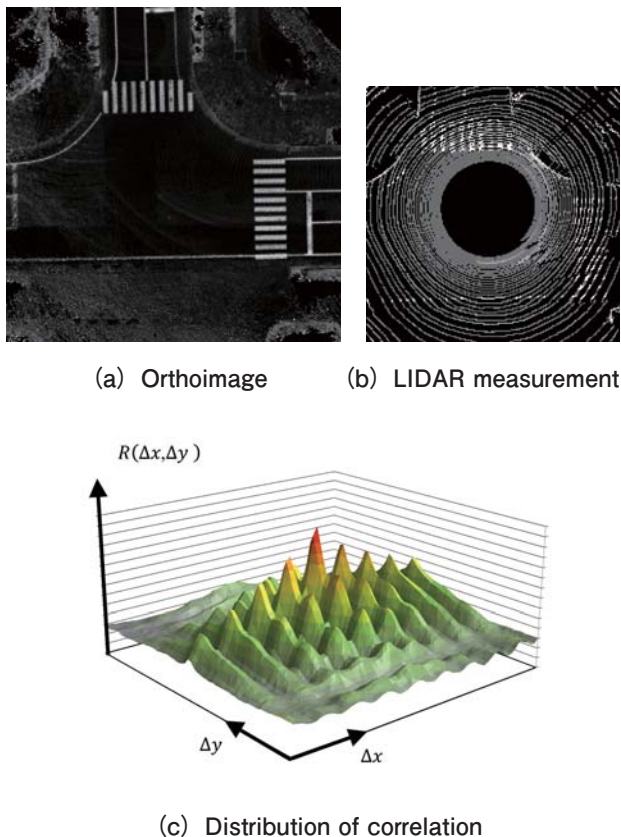


Figure 3 Example of correlation value distribution

本手法をCorei7 3.4 GHz、メモリ4 GByteのPC上に実装し処理時間を計測したところ、50 msでデッドレコニングの誤差を推定可能であることが確認された。したがってLIDARの観測周期が100 ms (10 Hz)である事を考えると十分に高速演算が可能である。一方、本LIDARを用いた場合、最大でも10 Hzでしか自己位置を推定することができない。自動車は高速で走行するため、車両制御を考慮に入れるとより高速に自己位置を推定する必要がある。このため、本研究ではデッドレコニングと上述の手法に基づくデッドレコニング誤差の推定をマルチスレッドプログラムとして実装し、これらを同時並列的に推定することでデッドレコニングの演算周期である100 Hzでの車両位置推定を可能とした。

***5**：デッドレコニング(Dead Reckoning)：自律航法、車両内に設置された、車速センサ、ジャイロセンサ、加速度センサといった運動状態を計測するセンサのみを用いて測位する技術

***6**：ガウシアンフィルタを畳み込む：平滑化処理手法

実験

本章では、前節までに述べた自己位置推定手法の検証結果について述べる。

自己位置推定精度の検証

Figure 4はGNSS/INSのリアルタイム解と、提案手法により求めた自己位置推定値をオルソ画像上に表示して比較した結果を示している。**Figure 4a**からGNSS/INSから得られる自己位置では道路からはみ出した位置を推定してしまっているのに対して、**Figure 4b**に示す提案手法による自己位置推定値では道路の中心を走行している様子が推定されていることから、提案手法の有効性が高いことが定性的に分かる。

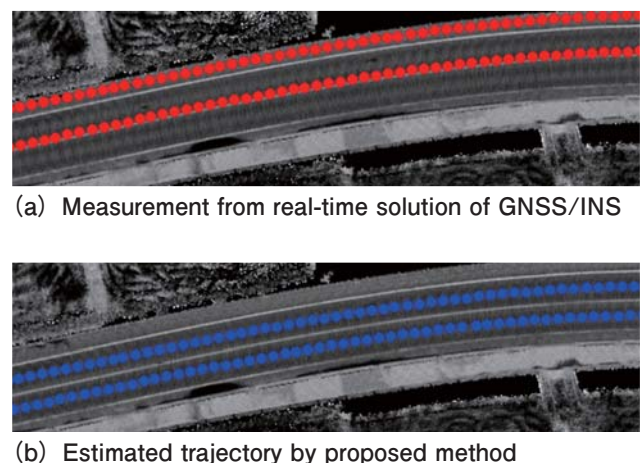


Figure 4 Comparison between real-time solution of GNSS and proposed method

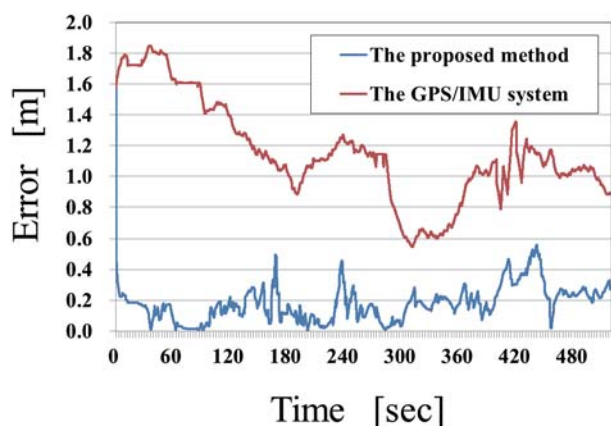


Figure 5 Autonomous vehicle used for public road driving

次に、自己位置推定精度を定量的に評価する。**Figure 5**はGNSS/INSの後処理とGNSS/INSのリアルタイム解および提案手法による推定値の差を時系列的に計測した結果を示したものである。この結果から、提案手法による自己位置推定値はGNSS/INSによる計測値よりも常に高精度に計測できていることが確認できる。また、提案手法による自己位置推定値のRMS誤差は約0.14 mであり、高精度な自己位置推定が可能であることを確認した。

公道走行による検証

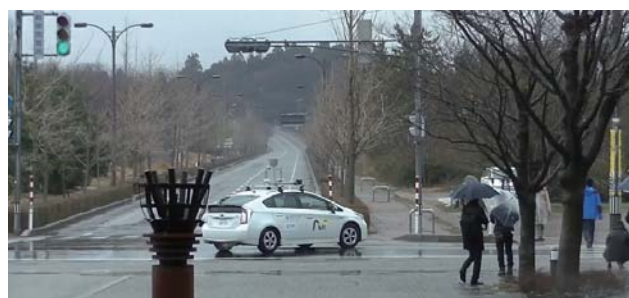
最後に、提案したハイディペンダブルローカライゼーション手法の有効性を検証するため、公道における自動運転自動車の走行実験を行った。なお公道走行実験では、提案したハイディペンダブルローカライゼーション手法に加え、筆者らの研究室においてこれまでに開発していたLIDAR, RADAR, カメラ等を用いた自動運転自動車の周辺環境の認識、デジタル地図を用いた自動運転自動車のパスプランニング^{*7}、自動運転自動車の軌道追従制御技術を組み合わせ、走行実験を行った。また、公道における自動走行に関してはあらかじめ違法性がないことを関連機関に確認の上実施した。

Figure 6は、市街地を走行中の自動運転自動車の様子を撮影した写真である。公道走行を実施した区間は、石川県珠洲市内の公道約6.6 kmの区間であり、一般の自動車や歩行者等が存在する公道を自動運転にて走行を行った。また、走行ルート上にはGNSS衛星信号を捕捉しにくい山間部の道路等も存在していたが、提案手法を用いることで往復13.2 kmのルートの走破も実現している。

また、現在では関係機関の了承のもと、走行範囲を延べ60 kmの範囲に拡張し実験を行っている。この区間では、トンネル内などGNSS衛星信号が完全に取得できない環境も存在しているが、提案したハイディペンダブルローカライゼーション手法を含む様々なシステムの搭載により、概ね



(a) Autonomous driving with many general cars



(b) Intersection with many pedestrians

Figure 6 Autonomous driving at public road

問題なく走行が可能であることを確認している。

***7: パスプランニング**: 走路環境認識結果をもとに、目的地までの最適軌道を導く技術

まとめ

本研究では、LIDARから得られる反射率情報とオルソ画像を照合して自動運転自動車の自己位置を高精度かつ信頼性高く推定する手法(ハイディペンダブルローカライゼーション手法)を提案した。本手法では、2次元のオルソ画像を用いて自己位置推定を行っているため、3次元のデジタル地図を使用する既存手法と比較すると、デジタル地図に必要とされるメモリ使用率や自己位置推定時の演算コストの面から大きな利点がある。

また提案手法を用いて公道走行実験を実施し、市街地を含む様々な走行環境下においてその有効性を確認した。自動運転自動車は、搭乗員の安全快適な移動をサポートするのみでなく、高齢過疎地域における次世代の交通機関としても注目を集めている。将来日本は少子高齢化が進み、過疎化により公共交通機関が極めて不足する地域が多数現れることが予想されている。今後も、筆者らの取り組みを通して将来の日本の地方におけるモビリティに関する課題を少しでも減少させるべく検討を進めていく。

謝辞

本研究の一部は総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE)地域ICT振興型研究開発「自動運転車の地域振興へ活用に向けた研究開発(No.152305001)」による成果を活用して行われた研究である。

参考文献

- [1] 菅沼直樹, 林悠太郎, 永田大記, 高橋謙太, “高齢過疎地域における自動運転自動車の市街地公道実証実験概要”, 自動車技術会学術講演会 講演予稿集, No.14-15S, pp.390-394, 2015
- [2] M.Montemerlo, et al., “Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge”, Journal of Field Robotics, Vol.25, No.9, pp.569-597, 2008
- [3] C.Urmson, et al., “Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge”, Journal of Field Robotics, Vol.25, No.8, pp.425-466, 2008
- [4] 菅沼直樹, 米陀佳祐, “自動車の自動運転におけるデジタル地図の活用”, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.10, pp.760-765, 2015
- [5] K. Ohno, et al., “Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based on DGPS and Odometry Data Fusion”, Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, pp.1978-1984, 2003



菅沼 直樹

Naoki SUGANUMA

金沢大学新学術創成研究機構 自動運転ユニット
准教授
博士(工学)