

車線レベル地図の作成と車線推定 Lane-Level Map Generation and Lane Estimation

高木 里実[†] 金山 雅人[†] 柿沼 篤樹[†] 加藤 圭志[†] 大橋 純[†] 三浦 庸平[‡]
Satomi Takagi Masato Kaneyama Atsuki Kakinuma Keishi Katoh Jun Ohashi Yohei Miura

1. はじめに

自動運転車と現行車が混在する時代、出口渋滞や合流による自動運転車との出会い頭事故を防ぎ、全体交通を円滑にするためには、車線レベルのナビゲーションが必要になる。

高度な位置把握を可能にする計測車は、複数の GPS 受信機で相対測位を行い、2 周波計測により物理的に電離層遅延を補正する等の対策で、1cm 以下の誤差を実現できる[1]。しかし、現在車検登録の大多数を占めている現行車は、自車位置推定のために単独測位 GPS(以下 GPS)をデッドレコニング等で補正して用いており数メートルの誤差がある[2]。車線の幅は 3m~3.5m であるため、そのままでは車線の特定は難しく GPS を補正して車線にマップマッチングする必要がある[3]。しかし、ナビゲーション等に用いられる一般地図(以下 SD マップ)には、車線の情報がない。ダイナミックマップなど自動運转向けの高精度地図は車の走行目標として車線中心線を持っているが、高額な計測車で現地計測するオンライン処理のため、作成や更新に多額の費用がかかり、整備されているのは高速道路の一部のみである。

こうした課題を解決するため、SD マップや衛星画像の情報を用いるオフライン処理によって車線推定レベルの地図を作成する研究が進んでいる[4]。日本では高精度地図や高詳細地図と呼ばれるこれらの地図は、多くが車線推定レベルの精度(車線幅員の半分以下)で、自動運転レベル(0.5m 以下、ダイナミックマップからの相対誤差 0.2m 以下)ではないものが多いが、将来的には座標を補正して精度を上げ、オンライン処理による高精度地図の作成や更新にかかる費用を抑えるための手法とするための研究が進められている[4]。

OpenStreetMap (以下 OSM) は、世界中で無償利用できるオープンソースの SD マップである[5]。日本の OSM は、幅員 3m 以上の道路を原則としてすべて取得しているデジタル道路地図データベース(以下、DRM)との比較で、東京 23 区内であれば 91%以上の高いカバー率と座標の精度を持つことが検証されている[6]。さらに、OSM は DRM よりも座標数が多く、すべらかな曲線を描けることから車線中心線の作成に適していると考えられる。

本研究ではこの点に着目し、高精度地図の不足と GPS 誤差の課題を解決、一般車の車線推定を可能にするため、SD マップ(OSM)から車線中心線を作成、現行車の GPS 誤差を補正して、作成した車線中心線にマップマッチングを行うことで、現行車の車線推定を行う。

本研究で有用性を主張できるのは、下記の点である。

1. SD マップ(OSM)からオフラインでの車線中心線作成
2. 確率分布を用いた GPS 誤差補正
3. 車線へのマップマッチングによる車線推定

[†] 本田技研工業株式会社

Honda Motor Co., Ltd.

[‡] ホンダ・ディベロップメント・アンド・

マニュファクチュアリング・オブ・アメリカ

Honda Dev. and Mfg. of America, LLC

2. 車線中心線の作成

本項では、車線中心線の作成に関する先行研究をレビューし、現地を計測せずに幾何計算のみで作成する方法を考案、作成した車線中心線の精度を検証する。

2.1 オフライン処理における車線中心線

車線中心線の作成は、画像処理や計算幾何の分野に先行研究がある。カメラや LiDAR を搭載した車で現地を走行して地図を作成、OSM のスケルトンに適用するオンライン処理のみならず、現地に行かず地図情報や衛星写真などの公開情報のみを用いて車線中心線を作成するオフライン処理も多く試みられており[4]、衛星画像から道路幅員を推定し OSM のネットワーク構造に照合させる方法や[2]、道路縁の形状からドロネー三角形分割によって車線中心線を計算する方法が提案されている[7]。

しかし、これらを日本で適用するには、衛星画像で認識できない道路が多いことや、SD マップに道路縁の座標が記載されていないといった課題が残されている。

2.2 道路中心線の取得

OSM は Overpass API を通じてサーバから地図情報を取得できる。レインボーブリッジ周辺の矩形の頂点を緯度経度で指定して抜き出し、Highway タグと、道路名「首都高速 11 号台場線」「首都高速 11 号台場線・東京港連絡橋」を持つ、レインボーブリッジの道路中心線を抜き出した(図 1)。

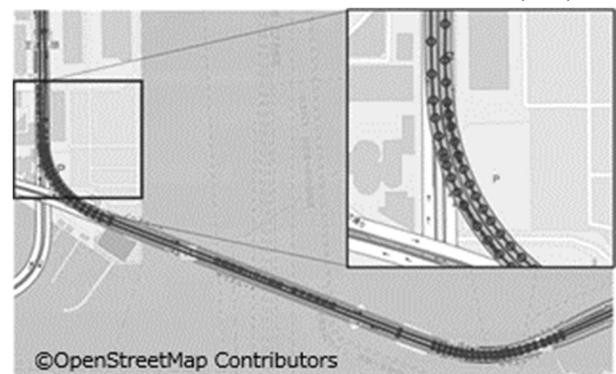


図 1 レインボーブリッジの道路中心線

2.3 車線中心線の計算

道路中心線は道路の一部分を表す直線で、隣り合う直線の情報を持っているリンクと、リンクの始点/終点であり、緯度経度座標を持つノードによって構成される(図 2)。

道路中心線と車線中心線の関係について説明する。車線中心線は、たとえば 2 車線道路であれば、車線の外郭(路肩や側帯との境界)と道路中心線を等分する位置に引かれた平行線である。つまり、道路中心線より車線幅員の半分だけ外側に平行線を引くことで車線中心線を作成できると考えた。

OSMより取得した道路中心線のリンクに車線幅員の半分の長さを持つ垂線を2本ずつ発生させ、2本の垂線の端点を結んだ線分を延長させて車線中心線のリンクとし、同様に作成した前後の車線中心線のリンクとの交点を車線中心線のノードとして車線中心線を作成した。この計算方法であれば、道路中心線が複雑な曲線であっても少ない計算量で車線幅員を維持した車線中心線を書くことができた(図3)。

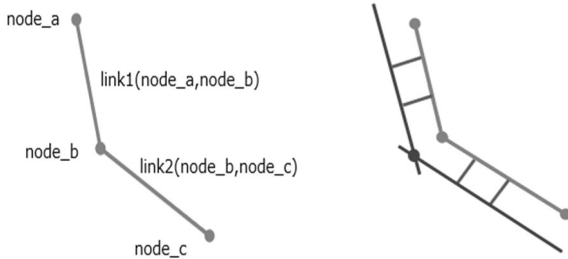


図2 道路中心線

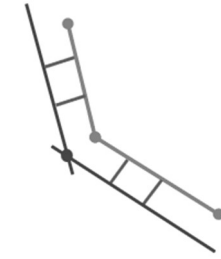


図3 車線中心線

ここで垂線の長さを決めるためには車線幅員の情報が必要になる。日本の車道は、道路構造令5条4項に道路の区分ごとに制限速度と標準幅員が定められている。車道の道路区分は速度規制図などから制限速度の情報を参照して道路構造令に照合することで推定できる。

レインボーブリッジの高速部分は、速度規制図によれば設計速度は60km/hであるので、道路の区分は第1種4級であり、標準車線幅員は3.25mとわかる[8]。

なお、最も外側の車線幅員は標準幅員から部分的に増加/減少することがあるが、車線推定はマップマッチングを行った後のGPS座標から左右の車線中心線に垂線を下ろし、垂線の長さによって道路中心線の左右どちら側に位置するかを判定する計算であるため、マッチングの対象は道路中心線から左右に同じ距離の座標に引いた平行線であればよく、最も外側の道路であれば幅員に部分的な増減があっても車線推定の精度には影響しないと考えられた。

また、地球上は平面ではなく、経度はその緯度の高さによって1ポイントあたりの長さが異なるため、精度の良い幾何計算を行うためには座標変換が必要になる。本研究では国土地理院が管理する平面直角座標に投影して幾何計算を行う。平面直角座標は、測量や建築に用いられる国家座標で、地球を楕円体として緯度経度座標を平面へ投影、緯度経度共に1ポイント1mで扱うことができ、数メートルほどの短い距離ではより高い精度での計算が可能になる[8]。平面直角座標上で計算した車線を図4に、緯度経度に直して地図上に表示した車線を図5に示す。

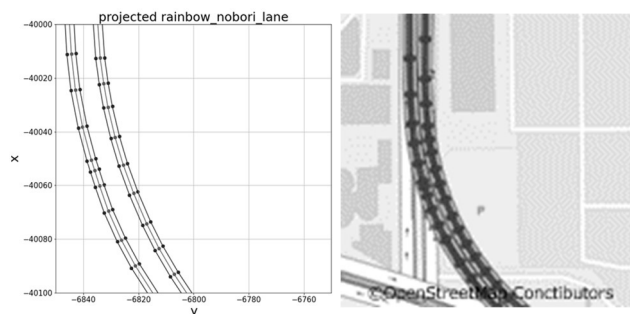


図4 平面直角座標

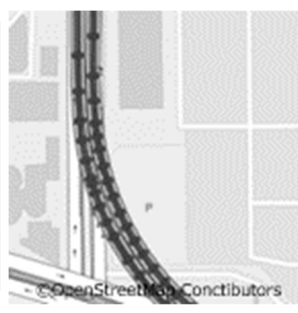


図5 緯度経度

2.4 車線中心線の精度検証

本研究は車線推定を目的としているため、求められる精度は車線幅員の半分以下である。レインボーブリッジ高速部の幅員は3.25mであるため、1.625m以下が目標となった。

車線中心線の精度検証方法を説明する。レインボーブリッジは基本的に2車線であり、OSMにも2車線と登録されているが、分岐や合流によって部分的に3車線以上になる場所があり、ダイナミックマップにはこれらの支線が登録されている。まず、目視による特定で、ダイナミックマップよりレインボーブリッジの本線に該当する車線中心線のみを抜き出した。つぎに、抜き出したダイナミックマップの各座標から、OSMより作成した車線中心線に垂線を下ろし、最も垂線の大遠距離が短い車線を選んで車線中心線同士のマップマッチングを行い、対応付けられたペアの垂線の大遠距離を作成した車線中心線の誤差とした。

計測した誤差は98.5%が車線幅員の半分(1.625m)以内で、誤差の中央値は0.46mであった。誤差が車線幅員の半分を超えた箇所を目視で確認したところ、合流や分岐によって車線数が多くなる部分であったため、あらかじめ画像などから道路の構成(車線数、路肩の有無など)を把握することで補正できると考えた。

道路の構成は、ドラレコ画像やGoogle Maps画像から目視で確認できる。これらの画像はカメラが広角レンズであることも多いため、車線や路肩の幅員を計算することはできない。ただし路肩や側帯も車線同様に道路構造令で道路の区分ごとに定められているため、標準幅員を推定できる[8]。ここで推定した車線や路肩等の幅員と、2.1章で記載した平行線を引く手法により、路肩や道路縁の情報を含んだ、安価な高精度地図を作成することが可能である。今後、カメラによる自己位置推定が可能な車からより正確な位置情報が取得できるようになれば、OSMの道路中心線を補正して、より正確で安価な車線中心線や路肩等作成できると考える。

3. 車線推定

本項では、マップマッチングと車線推定の先行研究をレビューし、GPSの研究からGPS軌跡の誤差パターンを4つに分類し、それぞれの補正方法を考案する。

3.1 マップマッチングと車線推定

車から送信されるGPSは、そのままではノイズの多い点群であり座標は必ずしも道路上に位置しないため、車がどの道路を走行したか判別するにはマップマッチングが必要である。オンライン処理では、GPS座標から周囲の道路リンクに垂線を引いて最も距離の短い道路にマッチングする幾何的マッチング等が用いられる。オフライン処理では、周囲の道路リンクにおおした垂線の距離を各道路にいた確率、GPS座標間の距離と道路を進んだ距離の差をほかの道路に遷移した確率とするビタビアルゴリズムが代表的である[10]。

ただし、車線推定では、これらの手法をそのまま車線に適用することはできない。GPSは数メートル程度の誤差があり、3m~3.5m程度の車線幅員を超えてしまうためである[2][3]。

そこで、車線推定のための車線変更/右左折検知の研究が進められている。たとえば二車線道路において、車が右車線変更を行った場合、車が現在いる車線は右車線であり、それまで走行していた車線は左車線である。走行ログと地図の車

線情報に路面凹凸情報などを付与した経験地図を組み合わせれば、85%の確率で車線を推定できる[11].車線変更検知は、操舵角と操舵角速度を用いて時間窓ごとに隠れマルコフモデルで車線変更と通常走行を判断する研究に端を発し[12],特徴量を作りこみ一般道で 88%の検知を可能にした研究や[13],速度,ヨー加速度,操舵角などから機械学習で 96%の正解率で車線を分類した研究がある[14].

ただし,これらは長い走行ログと,公開情報からは作成できない路面凹凸などをふくめた経験地図が必要であり,高頻度のセンサ情報を必要とするためオンライン処理に限定されるという課題がある.高精度地図が未整備の道路を走る現行車に改造を加えずに,車線レベルの位置推定を可能にするには,GPS を補正する必要がある.

3.2 観測された GPS 誤差

実車実験は,ほぼ直線のバイパス道路で,上下分離した2車線道路をもつ富士見川越バイパスで行った(図 6).テストは

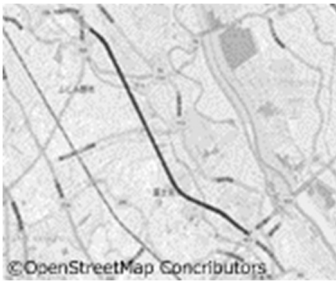


図 6 富士見川越バイパス

私たちは車を運転する際,なるべく車線の中央を走るように心がけている.本研究では車が車線中心線上を走っていたとみなして,GPS 誤差の距離と向きを計算する.

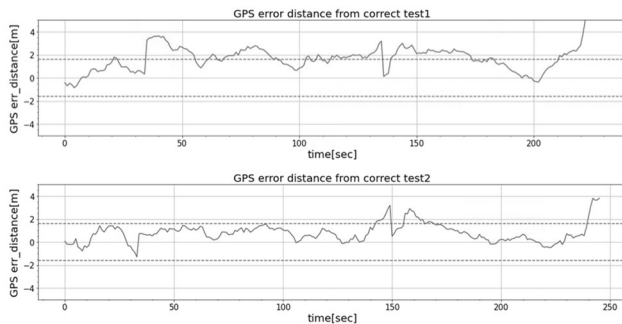


図 7 GPS 誤差

GPS 誤差の距離は座標から車線中心線に下した垂線の大遠距離とした.向きは座標が車線よりも北東にあった場合をプラス,南西にあった場合をマイナスとして算出した.図9は富士見川越バイパスを走行した時のテストデータの誤差をプロットしたグラフである.破線は車線幅員の半分的位置に引いた補助線で,実線は GPS 誤差の距離を表している.GPS 誤差が補助線の間に入れば,GPS 座標は車線幅員内にあることになる.富士見川越バイパスには,プラス(北東)方向へのドリフト,うねり,スパイク,細かいノイズが見られ,テストデータにおいて車線幅員内にあった GPS 座標は 51%であった.

3.3 GPS 誤差の 4 分類

先行研究から GPS 誤差の要因と特徴をまとめ,GPS 誤差の補正方法を考案した.GPS 誤差のうち衛星本体に起因する衛星クロック誤差と衛星軌道情報による誤差は,計測システムの問題である[17][16]ため本研究では補正対象としない.GPS 受信機の位置による誤差には,マルチパスと衛星補足数変化による誤差が挙げられる[17][16].マルチパスは,補正には車にしかないセンサを必要とするため本研究では対象としない.

衛星補足数変化は,高層ビル付近を通過するなど,受信機が補足できる衛星数が変化するときスパイク様の変化として現れる[15]車が道路を走った実走行距離と,大遠距離で求めた GPS2 座標間の距離は指数分布に従うため[10],スパイクは走行距離に比して妥当でない変化量が現れたことで判定できると考えた.

GPS の電波伝達に関する誤差は,電離層遅延と対流圏遅延があげられる[75][16].特に影響の大きい電離層遅延は当該時間帯に電離層にある電子の量に依存するが,広範囲に同じ影響が起こり特定方向へずれる(ドリフトする)[16].GPS の誤差は 0 平均のガウス分布に従うため[2],理論値に合うよう緯度経度座標をアフィン変換して誤差を補正できると考えた(表 1).本研究ではドリフトとスパイクを対象とする.

表 1 GPS 誤差の分類と補正方法

影響度	誤差の種類	概念図	推定する誤差の原因	有効と思われる補正方法
大	ドリフト		電離層遅延	GPS誤差を理論値の0平均のガウス分布に近づける
中	うねり		マルチパス	CANセンサが求めた変化量と比較し誤差が大きいポイントを修正する
小	スパイク		利用可能衛星数の変化	CANセンサが求めた変化量と比較し誤差が大きいポイントを削除する
小	ノイズ		すべての要因	ローパスフィルタなどを用いてスムージングを行う

3.4 GPS 誤差補正とマッチングによる車線推定

GPS 誤差を補正して,車線推定を行った.電離層遅延によるドリフトの大きさは計測日時によって影響の大きさは異なる多少異なるものの[16],本研究の 2 日間の実験で観測できた GPS 座標は一樣に北東にずれており,程度の差はあるもののすべてのラップの大半の座標はプラス側に大きかったため,GPS 誤差を理論値の 0 平均に近づけるようずらす補正が有効と考えられた.

まず,無作為に選んだ 8 割の訓練データで電離層遅延によるドリフトの誤差を学習した.上下 2 車線,合計 4 本の車線中心線を北・東方向へ 0.1m ずつずらして GPS 誤差を計算するグリッドサーチによって,最も GPS 座標が車線幅員内に収まる割合が高くなるようアフィン変換の平行移動ベクトルを求めた.

補正前の車線と,補正前のテストデータの GPS 誤差を図 10 に示す.補正前において車線幅員内に収まった座標は 51%で,誤差はプラス方向に大きく,最大で 6.87m,平均で 1.67mであった.4 本の車線を北へ 2m,東へ 0.3m アフィン変換(富士見川越バイパスでは平行移動のみ)したところ,車線範囲に収まった座標は 85%,誤差の絶対値平均は 0.91m になった.

ただし、補正前にずれ方が極端に小さかったラップには平行移動量が大きすぎ、誤差が増加することがあった。

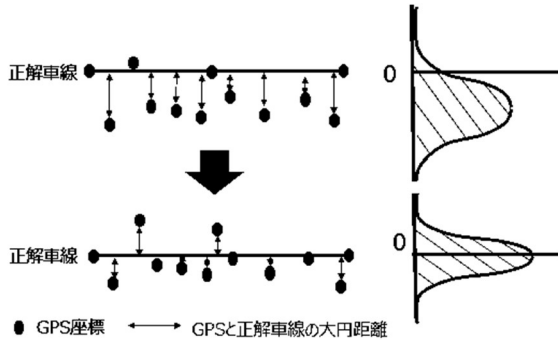


図8 アフィン変換によるドリフト補正

次に、スパイクを検知した、車が道路を走った実走行距離と、GPS2 座標間の大円距離の差異は指数分布に従うため[10]、車の挙動にそぐわない大きな GPS の移動によって検知できると考えた。本研究ではテストデータの車速から推定した1秒間の走行距離とGPS2座標間の大円距離の差異が1m以上あるものスパイクとして検知しマップマッチング対象から外した。

テストデータは1509座標あったが、スパイクとして検知した329座標を対象から外し、車線幅員内に収まる座標は86%、誤差の絶対値平均は0.81mになった。確率分布を利用して車の位置を正確に知るためにはGPS誤差の分布をそのまま維持することが望まれるが、車線推定の際は車の挙動とは異なるGPS座標をマップマッチングの対象から外すことで、車線推定の精度を向上させ、垂直方向のスパイクを車線変更や蛇行運転と見誤ることを防ぐことができた。図9に補正・除外前のGPS誤差を、図10に補正・除外後のGPS誤差を、それぞれヒストグラムで示す。

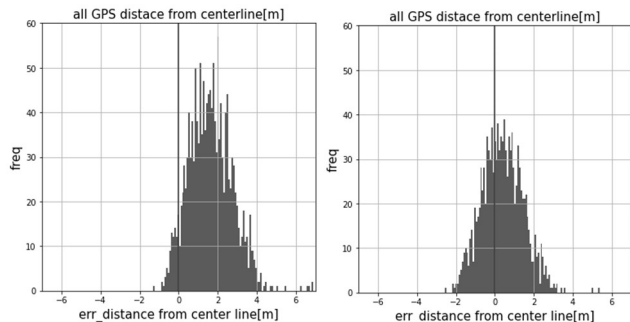


図9 補正・除外前

図10 補正・除外後

最後に、車線中心線へのマップマッチングを行った。ドリフト補正した4本の車線中心線と、検知したスパイクを判定から外したGPS座標を用いて車線中心線へのマップマッチングを行った。

ドリフト補正前の車線中心線とスパイク除外前のGPS座標での車線正解率は70%であったが、ドリフト補正・スパイク除外後のGPS座標と車線中心線での車線正解率は90%になった(表2)。

表2 実験結果

	補正前	補正後
座標数	1509	1180
車線内(<1.825)	0.51	0.86
正解(マッチング)	0.70	0.90

4. 今後の課題

作成した車線中心線は車線推定の精度はあるが、自動運転向けの精度はない。しかし、現在の確率分布による誤差補正に加えて物理的な方法でGPS補正精度を上げること、将来IMUと車両挙動による高度な位置把握が可能な計測車や[1]、地図なしで走れる低速自動運転車から、より正確な座標が送信された際に座標を用いることによって、作成した車線中心線の精度を向上させられると考える。

車線推定不正解の座標は、ほかのラップに比べて電離層遅延のずれ方が極端に小さいラップであった。2日間同じベクトルを用いるのではなく、時間帯ごとに電離層遅延の大きさを把握して補正することで、精度を向上させられると考える。

参考文献

- [1] Jun Nakahara, Masaaki Miyakawa, "Validation of Ride Comfort Simulation using a Test Vehicle, which Measures Road Profile and Vehicle Vibrations Simultaneously", 5th Stuttgart International Symposium (2003)
- [2] Van diggelen, "GPS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics" GPS World (1998)
- [3] Jay A Farrell, Guoyuan Wu, Wang Hu, David Oswald, Peng Hao, "Lane-Level Localization and Map Matching for Advanced Connected and Automated Vehicle Applications", A Research Report from the National Center for Sustainable Transportation (2023)
- [4] Younghun Cho, Jee-Hwan Ryu "SIO-Mapper: A Framework for Lane-Level HD Map Construction Using Satellite Images and OpenStreetMap with No On-Site Visits" arXiv:2504.09882
- [5] Mordechai Haklay, Patrick Weber, "OpenStreetMap: User-Generated Street Maps IEEE Pervasive Computing., vol.7, No.4(2008)
- [6] 金杉 洋, 瀬戸 寿一, 関本 義秀, 柴崎 亮介 "オープンストリートマップ道路データとデジタル道路地図の比較-位置と完全性に着目して", GIS-理論と応用, Vol27, No.1 (2019).
- [7] Tian Lei, Gaoyao Xiao, Xiaohong Yin, "Targeting Lane-Level Map Matching for Smart vehicles: Construction of High-Definition Road Maps Based on GIS" Applied Science Vol13 Issue2 (2023)
- [8] 国土交通省, 「道路構造令の各規程の解説」 https://www.mlit.go.jp/road/sign/kouzourei_kaisetsu.html
- [9] 国土地理院, 「国家座標の表し方, 日本の測地系, 平面直角座標」 <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/kokkazahyo.html>
- [10] Paul Newman, John Krumm "Hidden Markov Map Matching Through Noise and Sparseness" ACM SIGSPATIAL GIS (2009).
- [11] Heba Aly, Anas Basalamah, Moustafa Youssef, "Lane Quest: An Accurate and Energy-Efficient Lane Detection System" arXiv:1502.03038
- [12] Nobuyuki Kuge, Tomohiro Yamamura, Osamu Shimoyama, Andrew Liu "A Driver Behavior Recognition Method Based on Driver Model Framework" SAE Transactions (2000)
- [13] Guofa Li, Shengbo Eben Li, Yuan Liao, Wenjun Wang, Bo Cheng, Fang Chen "Lane Change Maneuver Recognition via Vehicle State and Driver Operation Signals-Results from Naturalistic Driving Data" IEEE Intelligent Vehicles Symposium (2015)
- [14] 根山 亮, 福島 真太郎, 宮崎 勝彦, 那和 一成, "一般道実走行における自車センサ情報を用いた車線変更の検出", Web DB Forum (2015)
- [15] 久保 信明, "第5章 GPSによる測定値と誤差要因" 測位公報学会チュートリアルセッション(2010)
- [16] 石井 守, "安定した電波利用のために 電波伝搬障害研究プロジェクト", NICT NEWS, 2009年5月号, No.380.
- [17] 酒井 丈泰, 『GPS技術入門』東京電機大学出版局, (2003)