

推薦論文

GPS ドップラと慣性センサの統合による 車両軌跡推定手法の提案

目黒 淳一^{1,a)} 小島 祥子¹ 鈴木 徳祥¹ 寺本 英二¹

受付日 2011年3月29日, 採録日 2011年10月3日

概要: ITS 分野における車両の安全, 利便性の向上を狙った運転支援システムの開発のため, 位置推定を行うなかで重要な基盤となる軌跡推定の技術に注目し, 特に需要が高い都市部での精度向上を, 汎用的なセンサの組合せにより改善可能な手法を提案する. 特に, GPS の生データのなかでも, 擬似距離に比べ精密に計測が可能な GPS ドップラに着目し, GPS ドップラと慣性センサの複合により高精度な車両軌跡を算出する. 具体的には, ジャイロから計測できるヨーレイトを利用して, GPS ドップラから推定した方位角の信頼性を判定することで, 精度が高い方位角を定期的に推定する. そして, 推定した高い精度の方位角を基準として車速と組み合わせることで軌跡を算出する. 提案手法は, 高い精度で推定した方位角を基準としているため, 都市部の建物による遮蔽や, マルチパスの影響がある場所においても, 安定した精度で軌跡を推定できるという特徴を持つ. 名古屋駅付近のビル街の高架下を含む約 5.5 km のコースにおいて評価をしたところ, 1 m/100 m (平均) の軌跡精度を得ることが可能なことを示し, 提案手法の有効性を確認した.

キーワード: ITS, GPS, 車両軌跡, 位置推定

Vehicle Trajectory Estimation Technique Using GPS Doppler and Inertial Sensors

JUN-ICHI MEGURO^{1,a)} YOSHIKO KOJIMA¹ NORIYOSHI SUZUKI¹ EIJI TERAMOTO¹

Received: March 29, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: This paper proposes vehicle trajectory estimation technique using GPS and inertial sensors. GPS Doppler corresponds to the robustness relative velocity between the satellite and the receiver. It is thought that the accuracy of the estimated velocity based on GPS Doppler is better than the difference in absolute position based on pseudo ranges. The proposal enables robust estimation of an accurate trajectory based on accurate heading angle calculated by GPS doppler and yaw rates. The evaluation test is conducted on a road course passing by high-rise buildings and under overpasses in the vicinity of Nagoya Station, Aichi Prefecture, Japan. It shows the proposed trajectory estimation technique can provide good enough accuracy even under poor GPS satellite visibility and multipath condition.

Keywords: ITS, GPS, trajectory estimation, positioning

1. はじめに

ITS の分野において, 安全, 利便性の向上を狙った様々な運転支援システムが開発され, 精密な位置情報, 軌跡情

報を必要とするシステムの開発が進められている. 特に, 位置情報に関しては, GPS (Global Navigation System) を用いることで, 郊外路では 10 m 以下の精度で絶対位置が取得可能なことが知られている. しかし, 特に需要が高い都市部ではビルの影響により GPS 衛星が遮蔽される, も

¹ 株式会社豊田中央研究所
Toyota Central R&B Laboratories, Inc., Nagakute, Aichi
480-1192, Japan

^{a)} meguro@mosk.tytlabs.co.jp

本論文の内容は 2010 年 11 月の高度交通システム研究会にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

しくは電波の反射・回折による誤差（マルチパス）が発生するため、実時間で高い精度の位置をつねに取得可能とすることが困難な問題がある。

一方、軌跡情報に関しては、ジャイロ、車速を利用した車両運動の時間積算が用いられることが多い。慣性センサのみで成立するため、内界センサだけで車両軌跡が推定できるという利点がある。そのため、自動車の制御や挙動解析への応用 [1]、局所的に正確な地図の生成 [2] といったアプリケーションに軌跡情報が活用されている。しかし、慣性センサで長い時間の車両軌跡を描く場合、その誤差も積算されるため、大きな軌跡のずれとなってしまうという課題がある。また、「変化量しか推定できない」という性質があるため、方位が必要な場合は、磁気方位計、もしくは GPS 測位結果を利用する必要がある。ただし、磁気方位計はノイズの影響を受けやすく、また、GPS 測位の利用では、絶対位置の推定結果の差分から方位を推定するため、その誤差の影響を受けやすいという課題がある。

そこで本論文では、特に需要が高い都市部での、車両の軌跡推定の高精度化を目的とする。具体的には、GPS ドップラと慣性センサの組合せにより、汎用的なセンサの組合せで、都市部においても安定した精度で方位角が正しい車両軌跡を推定することを目指す。なお、本論文では、位置情報は絶対位置のことを示す。一方、軌跡情報は、ある地点を原点とした車両運動を表す相対位置の集合を示す。また、本論文で用いる慣性センサは、すでに車載用として多くの自動車・カーナビに搭載されている 1 軸のジャイロ（ヨーレイトを計測）と車輪速パルス（速度を計測）とする。加速度計が搭載されている車両も多く、その積分により速度を推定することができるが、車輪速パルスにより十分な精度の速度が計測できるため、本論文では使用しない。

以下、本論文では 2 章において従来研究をまとめ、3 章で重要な技術である GPS ドップラを用いた速度の算出について説明する。さらに 4 章で GPS ドップラを用いた速度推定を都市部に適用する際の課題を明確化し、5 章でその課題の解決を行う提案手法について説明する。最後に 6 章で名古屋市のビル街で提案する軌跡推定手法を評価した結果をまとめる。

2. 従来研究

従来、車両軌跡が必要な場合には、ジャイロ、車速を利用した車両運動の時間積算が用いられる。しかし、長い時間の軌跡が必要な場合では、慣性センサの誤差が蓄積されるという課題がある。また、比較対象との相対的な動きや、地図を作成する際に軌跡情報を活用するためには、方位の情報が重要になる。従来、これらの解決には GPS と慣性センサの統合が用いられてきた。ここで、GPS と慣性センサの統合に注目してみると、KF (Kalman Filter), PF (Particle Filter) を用いることで、車両位置、運動、セン

サ誤差、絶対位置を 1 度に推定する手法が広く知られている [3], [4], [5], [6], [7]。しかし、観測量として用いられる GPS の測位結果や、擬似距離、GPS ドップラにはマルチパスに起因する誤差が含まれている。特に、都市部では観測された衛星の過半数にマルチパスが含まれていることも多く、その棄却をせずに統合を行っても、誤差を最小化することはできないという課題がある [8]。

一方、GPS ドップラのみを用いて車両の軌跡を算出する手法も提案されている。Kojima ら [10] は、GPS ドップラから算出した速度の積算により、GPS 衛星の遮蔽や、マルチパスが少ない郊外路では、高精度な軌跡が算出可能なことを示している。そこで本論文では、擬似距離に比べ、精密に計測が可能な GPS ドップラに着目し、GPS ドップラと慣性センサの複合により高精度な車両軌跡を算出することを目指す。

3. GPS ドップラを用いた車両速度の算出

GPS 衛星から得られる信号は大きく分けて、「搬送波」と搬送波上に 0, 1 で付与される「コード」がある。搬送波には L1 (1,575.42 MHz) と L2 (1,227.60 MHz)、最近では L5 (1,176.45 MHz) がある。コードは GPS 衛星ごとに固有に決められた繰返しパターンである。コードの相関から伝播遅延時間を求め、自車と GPS 衛星との距離を計測したものが、「擬似距離」である。一方、ドップラ効果によって生じる周波数変化分を計測したものが「GPS ドップラ」である。

自車の速度を推定するためには、「GPS 衛星の速度」と「衛星と自車との相対速度」が必要である。衛星の速度は放送されているエフェメリスから算出できるため、衛星との相対速度を計測できれば自車の速度を推定できる。衛星との相対速度の計測方法は「擬似距離の時間変化」か「GPS ドップラ」の計測が考えられる。図 1 にコードと搬送波の信号イメージを示す。コード信号の 0, 1 のビット間隔は距離に換算すると 300 m 程度になる。一方、L1 周波数の波長は 19 cm に相当する。

擬似距離の時間変化で相対速度を算出した場合、擬似距離計測の分解能（目盛）が 300 m 程度と粗いため、誤差が大きくなる。一方、GPS ドップラは搬送波の波数変化分を計測したものであり、1/10 波長精度の計測が可能であるため数 cm オーダで距離変化を計測できる。GPS ドップラを用いた場合、衛星との距離は計測できないが、距離変化分を干渉測位並みの数 cm のオーダで計測することができるため、精度が高い。そのため、衛星との相対速度の取得には GPS ドップラが適切であり、精度の高い速度推定が期待できる。

以下、具体的に GPS ドップラを用いて車両の速度を推定する方法を簡単に示す。まず、GPS ドップラは衛星方向の衛星と自車との相対速度である。図 2 に GPS ドップラ

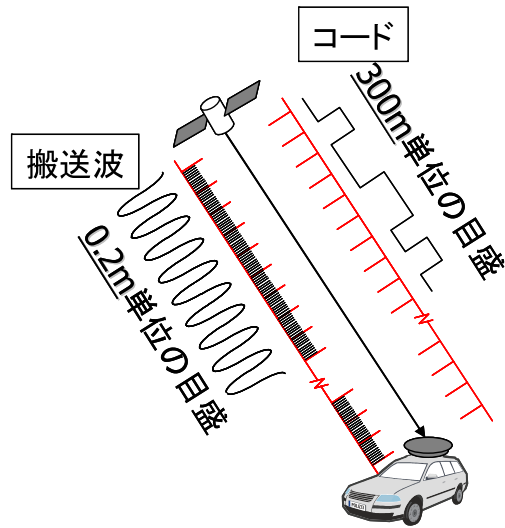


図1 GPS ドップラと擬似距離変化

Fig. 1 GPS Doppler and pseudo-range variation.

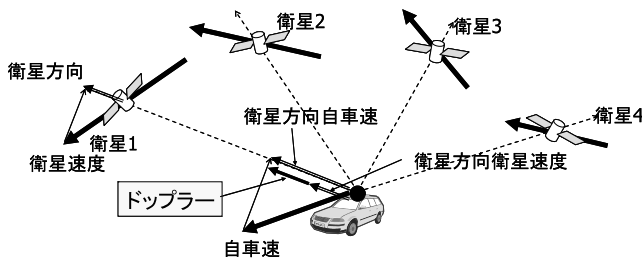


図2 GPS ドップラによる速度推定

Fig. 2 Velocity estimation by GPS Doppler.

による速度推定の簡単な仕組みについて示す。まず、衛星 i における GPS ドップラ D_i と光速 C と搬送波周波数 f_1 には、式 (1) の関係がある。

$$\begin{aligned} -D_i &= f_1 \frac{C - Vv_i + Cbv}{C - Vs_i} - f_1 \\ &= \frac{f_1}{C} \cdot \frac{Vs_i - Vv_i + Cbv}{1 - Vs_i/C} \\ &\approx \frac{f_1}{C} \cdot (Vs_i - Vv_i + Cbv) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、式 (1) を整理すると、衛星 i における衛星方向への自車の相対速度 $D_i \cdot C / f_1$ と、自車速 Vv_i 、衛星速度 Vs_i と GPS 受信器のクロックドリフト Cbv の関係は式 (2) で示される。

$$-\frac{D_i}{f_1} \cdot C = Vs_i - Vv_i + Cbv \quad (2)$$

ここで、クロックドリフト Cbv とは、GPS 受信器のクロックバイアスのドリフト量であり、ある時刻 t のクロックバイアス $Cb(t)$ 、経過時間 Δt とは式 (3) の関係がある。

$$Cb(t + \Delta t) = Cb(t) + Cbv \cdot \Delta t \quad (3)$$

また、 Vs_i 、 Vv_i は速度 3 成分 $[V^x, V^y, V^z]$ と衛星 i との視線ベクトル R_i (式 (4)) で決定され、式 (5) で示される。なお、式 (5) の添字 T は行列の転置を示す。また、3 章で

は、地球中心座標系 (X, Y, Z 軸) で速度を表している。

$$R_i = \frac{-1}{r_i} \cdot [Ps_i^x - Pv^x \quad Ps_i^y - Pv^y \quad Ps_i^z - Pv^z]^T \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Vs_i &= R_i \cdot [Vs_i^x \quad Vs_i^y \quad Vs_i^z]^T \\ Vv_i &= R_i \cdot [Vv^x \quad Vv^y \quad Vv^z]^T \end{aligned} \quad (5)$$

Ps_i^x, Ps_i^y, Ps_i^z : 衛星位置, Pv^x, Pv^y, Pv^z : 車両位置,

r_i : 衛星と車両の距離

ここで、ドップラ D_i は GPS 受信器で計測される観測量であり、光速 C 、搬送波周波数 f_1 は定数である。衛星速度 Vs_i 、および衛星位置 Ps_i はエフェメリスから算出可能である。また、車両位置 Pv は一般的な GPS の測位結果を用いることができる。GPS 衛星は約 2 万 km 上空を周回しているため、地上での数 m 程度の測位精度は、視線ベクトル R_i の精度に大きな影響を与えない。したがって、上記式 (2) において、未知数は Vv_i と Cbv である。 Vv_i は式 (5) で示されるため、未知数は $[Vv^x, Vv^y, Vv^z, Cbv]$ の 4 成分となる。式 (2) は衛星 i ごとに成立するため、可視衛星が 4 衛星以上計測される場合、自車速を求めることができる。

4. 都市部における軌跡推定の課題

4.1 都市部における軌跡推定の評価概要

3 章で示した方式により、GPS ドップラから速度が算出できる [9]。GPS ドップラを用いた速度推定の特徴として、ばらつきはあるがオフセットの誤差が非常に小さいため、その積算によりマルチパスが少ない環境ならば、1m/1km の精度で車両軌跡が得られることが確認されている [10]。そこで、4 章では GPS ドップラで算出した速度を、都市部で利用する際の課題を整理する。

ここで、愛知県名古屋市の名古屋駅前の約 5.5km のコース (図 3) で、GPS ドップラで算出した速度を評価した結果を示す。まず、このコースにおける衛星数を図 4 に示す。図 4 では、横軸に衛星数、縦軸にその衛星数が受信された場所率を累積度数分布で示している。次に、図 5 に衛星が 4 個以上捕捉できた箇所に関して、GPS ドップラにより算出した速度の誤差を示す。なお、真値は Applanix 社 POSLV610 [11] で計測した位置・速度を用いた。POSLV610 は三軸の高精度ジャイロ・GPS、専用の車輪パルスから構成され、都市部においても標準偏差 10cm の誤差で位置の推定が可能な位置計測システムである。

まず、図 4 より、衛星が 4 個以上観測できている箇所は 62% 程度であり、残りの 38% の場所では、3 章で示した方法では速度を算出できないことが分かる。加えて、図 5 から衛星を 4 個以上捕捉した場所でも、誤差が大きいところもあることが分かる。ここで、図 6(a) に図 3 のコースの中でも空が開けていた箇所の速度推定結果を、図 6(b) に周りをビルに囲まれていた箇所の速度推定結果を示す。図 6(a) からは、真値に対して標準偏差 0.3m/sec 程度のば

らつきが見受けられるが、オフセット的な誤差はないことが確認できる。一方、図 6(b) のビルに囲まれている地点では、GPS 衛星の遮蔽により捕捉できた衛星が 3 個以下になる箇所も多いため、速度の推定結果が断続的になっていることが分かる。加えて、1 m/sec 以上の速度推定誤差が発生していることが確認できる。高いビルの付近においては、電波の反射・回折により、マルチパスが発生することが知られており、GPS においても誤差要因となる。図 6(b) に示した場所においても、ビルに囲まれている場所であるため、マルチパスが発生していることが予測でき、GPS ドップラから算出した速度に誤差が発生していると考えられる。

4.2 都市部における従来手法による軌跡推定精度

この節では、従来手法による都市部における軌跡推定精度を検証する。なお、本節では、「慣性センサの組合せ（初期方位角は真値を利用）」、「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」、「Loosely Coupled (LC) GPS/IMU [4]」の 3 つのケースに関して検証する。ここで、表 1 に使用したセンサの構成とその性能を示す。GPS に関しては汎用的な受信機でも受信可能な L1 帯のみを用い、ジャイロも

IMU440 の Yaw 軸のみを用いる。また、車速に関しては、IMU440 に加速度計も搭載されているが、直接に速度を計測できる車輪速パルスを用いる。ジャイロのオフセット誤差に関しては車両の停車時の平均を、車速のスケールファクタ誤差に関しては一定値としてあらかじめ最適化した値を用いる。

なお、「慣性センサの組合せ」、「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」に関しては、式 (6)、式 (7) により軌跡 $T(t)$ を算出する。 $Vv(t)$ は時刻 t の車両の速度を示し、車輪速パルスから計測した値を用いる。 $T^e(t)$ 、 $T^n(t)$ はそれぞれ、東、北方向の軌跡を示す。 $\psi(t)$ は時刻 t における北基準の方位角を示す。速度 $Vv(t)$ はつねに車輪速パルスから計測ができるため、方位角 $\psi(t)$ の推定方法を説明する。

$$T^e(t + \Delta t) = T^e(t) + Vv(t) \sin(\psi(t)) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$T^n(t + \Delta t) = T^n(t) + Vv(t) \cos(\psi(t)) \cdot \Delta t \quad (7)$$

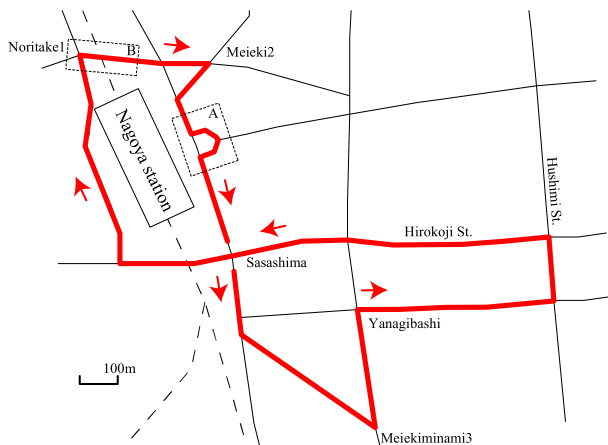


図 3 走行コース

Fig. 3 Evalietion route.

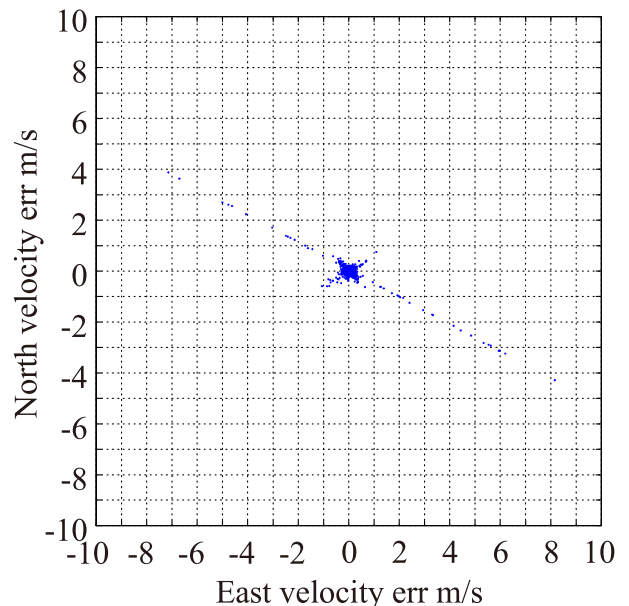


図 5 速度誤差 (GPS ドップラ)

Fig. 5 Velocity estimation error (GPS Doppler).

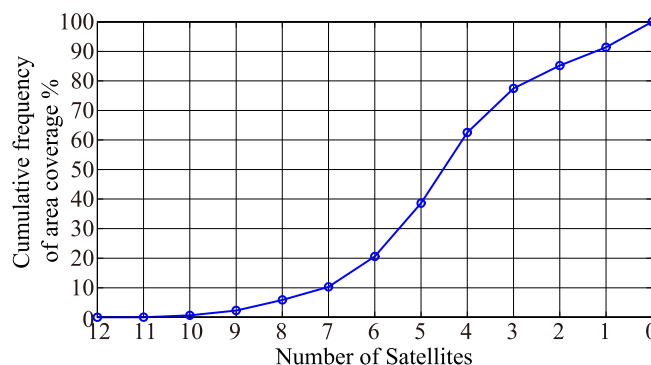


図 4 累積度数分布で示した衛星数と場所率の関係

Fig. 4 Number of satellites showed by cumulative frequency of area coverage.

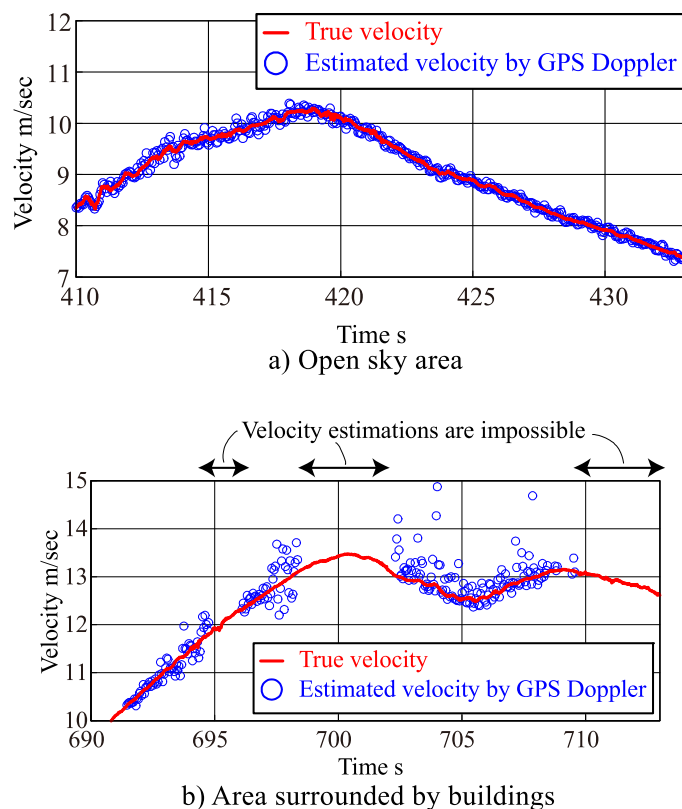


図 6 周囲環境による GPS Doppler から算出した速度精度の比較

Fig. 6 A comparison of velocity estimated by GPS Doppler in surround environment.

表 1 センサ構成

Table 1 Sensor configuration.

	GPS Receiver	Gyro
Product name	Novatel/OEMV(L1)	CrossBow/IMU440(Yawrate)
Sampling rate	20 Hz	100 Hz
Resolution	-	under 0.06 deg/sec

$T(t)$: 時刻 t の軌跡 (東, 北方向),

$\psi(t)$: 時刻 t の方位角, Δt : 時間刻み,

$Vv(t)$: 時刻 t の車両の速度

「慣性センサの組合せ」の場合は, 初期方位角が不明であるため, 式 (8) における初期の方位角 ψ には真値を設定し, 以後はジャイロから計測されるヨーレート $\dot{\psi}(t)$ で, 時刻 Δt 後の方位角 $\psi(t + \Delta t)$ を推定する.

$$\psi(t + \Delta t) = \psi(t) + \dot{\psi}(t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

$\dot{\psi}(t)$: 時刻 t のヨーレート

「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」の場合には, 基本的に GPS ドップラで算出した速度の積算により軌跡 $T(t)$ を算出する. ただし, GPS 衛星が 3 個以下しか観測できなかった地点では, 速度が推定できないため, ジャイロ・車輪速で, 次に GPS ドップラから速度が推定できるまで補間を行う. 具体的には, 最後に GPS ドップラから速度が推定された点の方位角 $\psi(t)$ を利用して, 式 (8) によりジャイロから計測されるヨーレート $\dot{\psi}(t)$ で, 時刻 Δt

後の方位角 $\psi(t + \Delta t)$ を推定する. なお, GPS ドップラから東方向, 北方向の車両の速度 $Vv^e(t)$, $Vv^n(t)$ が推定できるため, 式 (9) により方位角 $\psi(t)$ が算出可能である.

$$\psi(t) = \tan \left(\frac{Vv^e(t)}{Vv^n(t)} \right) \quad (9)$$

$Vv^e(t)$: 車両の東方向速度,

$Vv^n(t)$: 車両の北方向速度

ここで, 各方式に関して, 速度誤差, 推定した軌跡形状を図 7, 図 8, 図 9, 図 10, 図 11, および, 使用した慣性センサの誤差を図 12, 図 13 に示す. まず, 「慣性センサのみ」に注目すると, 図 12, 図 13 より, センサの誤差がジャイロ 0.20 deg/sec (標準偏差), 車速 0.08 m/s (標準偏差) で計測できていることが分かる. そのため, 基準となる方位角さえ定期的に計測ができれば, 高い精度で軌跡が算出可能な見込みがあることが確認できる (図 7).

一方, 「単純な切替え方式」では, ジャイロでは角速度しか計測できないため, 初期方位角は式 (9) により GPS ドップラから推定した値を用いる必要がある. しかし, GPS ドップラで推定した方位角には, マルチパスによる誤差が発生していることがある. 特に, 衛星が 3 個以下になる直前は, 衛星が建物に遮蔽される瞬間であり, 大きなマルチパス誤差が発生しやすい状況にある. つまり, 単純に衛星が 4 個以上観測できなくなる地点の直前を基準に式 (8) により補間を実施しても, 精度の高い方位角を算出すること

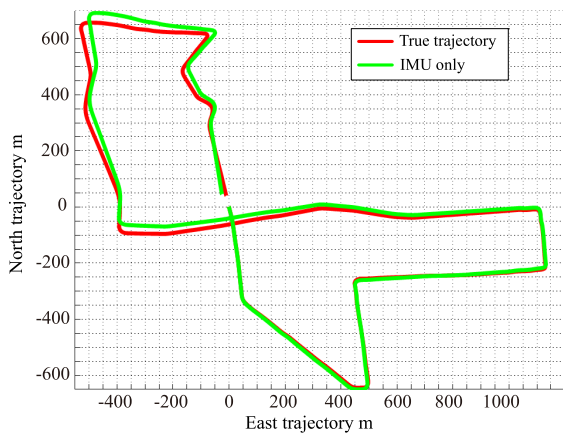


図 7 車両軌跡 (慣性センサのみ)

Fig. 7 Vehicle trajectory (only using inertial sensors).

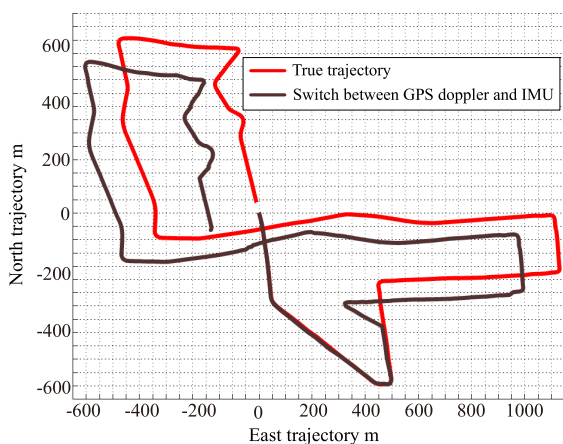


図 8 車両軌跡 (単純な切替え)

Fig. 8 Vehicle trajectory (switching GPS doppler and inertial sensors).

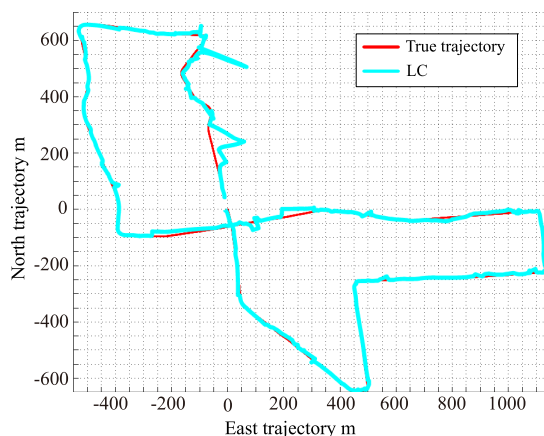


図 9 車両軌跡 (LC)

Fig. 9 Vehicle trajectory (LC).

はできない。結果として図 8, 図 10 に示すように, 大きな誤差が発生してしまう。ただし, 精度良く速度が推定できている箇所も多く, その判別により軌跡精度が向上する余地は見受けられる。

「LC GPS/IMU」では, GPS の測位結果と慣性センサ

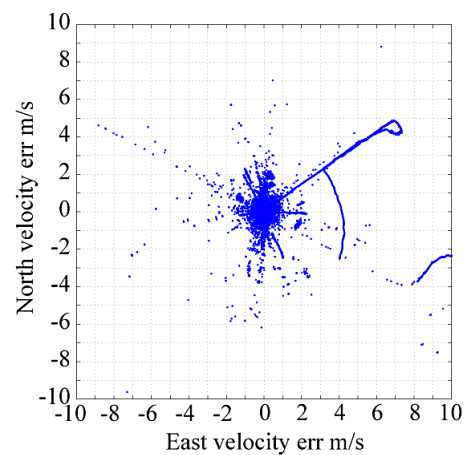


図 10 速度誤差 (単純な切替え)

Fig. 10 Velocity error (switching GPS doppler and inertial sensors).

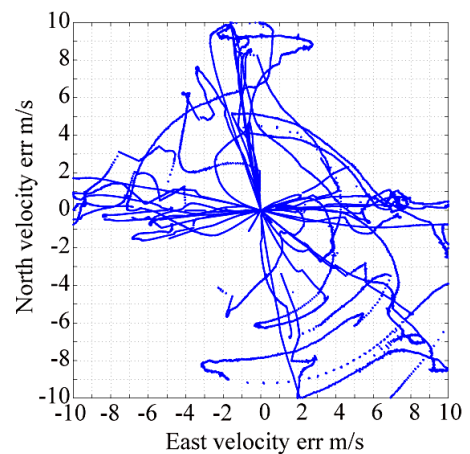


図 11 速度誤差 (LC)

Fig. 11 Velocity error (LC).

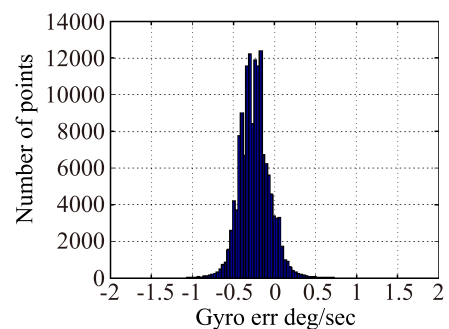


図 12 ジャイロのヨーレート誤差 (オフセット誤差補正前)

Fig. 12 Yawrate error.

の計測値を観測量として, KF により慣性センサと統合を行い, 算出した位置を用いて車両の軌跡としている。しかし, KF では観測量の誤差はガウス分布に基づくことを前提としているが, 残念ながら都市部における GPS の計測値はマルチパスの影響によりガウス性はなく, 特に連続的に大きな誤差を観測した場合に, 推定値は破綻することになる [11]。マルチパスに起因する誤差は, 「場所依存」でも

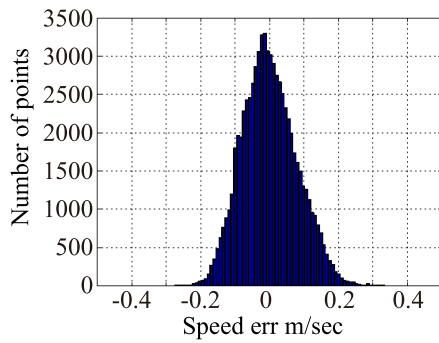


図 13 速度誤差

Fig. 13 Velocity error.

あるため、大きな誤差は連続して観測されることが多く、その誤差の棄却をしない限り、都市部において、精度が高い位置・軌跡を推定することが困難といえる。

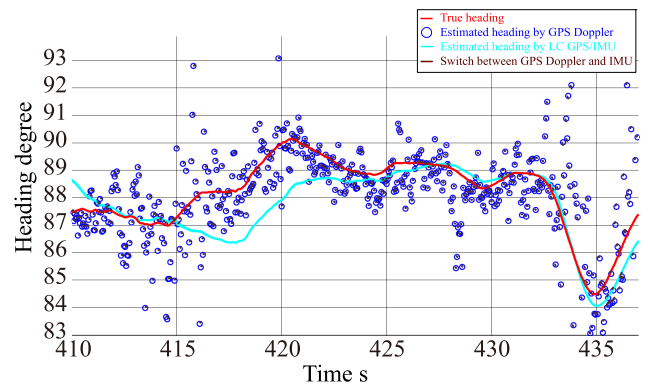
5. 提案手法の概要

5.1 提案手法の特徴

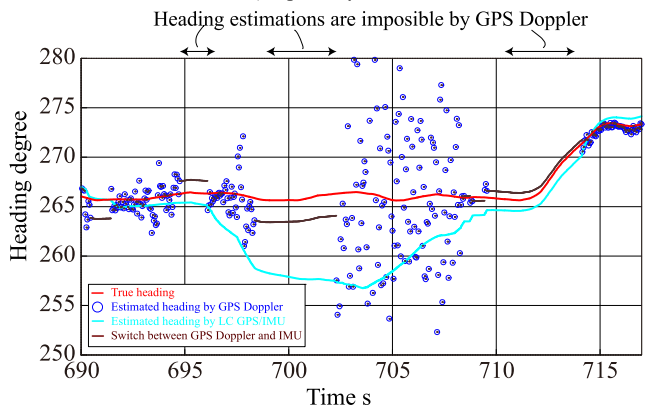
4章の結果より、慣性センサに注目すると、精度の良い方位角が定期的に推定できれば、安定した軌跡が描ける基盤がある。しかし、高い精度の軌跡を描くためには、精度の高い方位角を定期的に推定する必要がある。ここで、図 14 に図 3 に示すコースで空が開けていた箇所と、ビルに囲まれていた箇所における、「GPS ドップラ」、「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」、「Loosely Coupled (LC) GPS/IMU」により推定した方位角を示す。なお、「GPS ドップラ」では、GPS ドップラから推定した速度から、式 (9) により方位角を推定した。その他の方法では、4.2 節で用いた方位角を用いた。

図 14 より、検討した手法では、精度の高い方位角を定期的に推定することが難しいことが分かる。特に図 14 b) の建物に囲まれた環境ではマルチパスが各所で発生しているため、「GPS ドップラ」から算出した方位角にも 5 度以上の誤差が発生している箇所が多い。「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」では、GPS ドップラから方位角が算出できない地点に関しては、最後に GPS ドップラから速度が推定された点の方位角からジャイロのヨーレイトで補間を行う。そのため、最後に GPS ドップラから速度が推定された点の方位角に大きな誤差がある場合、その誤差が大きく影響してしまうという問題がある。

一方、図 14 a) に注目すると、比較的空が開けている場所では「GPS ドップラ」から算出した方位角は、約 2~3 度程度のばらつきはあるが、平均すると真値に近い方位角が推定されている。また、図 14 b) からは、誤差が大きい場所では、オフセット的な誤差はなく、真値からのばらつきが大きくなることが分かる。そこで本論文では、ジャイロから計測できるヨーレイトを利用して、GPS ドップラから推定した方位角の信頼性を判定することで精度が高い方



a) Open sky area



b) Area surrounded by buildings

図 14 周囲環境による各手法により推定算出した方位角精度の比較

Fig. 14 A comparison of heading accuracy in surround environment.

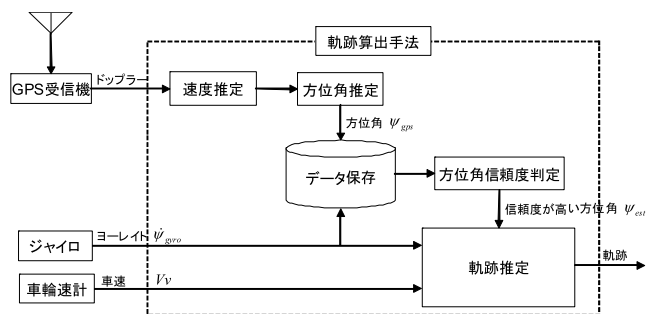


図 15 提案手法の概要

Fig. 15 Overall of proposal technique.

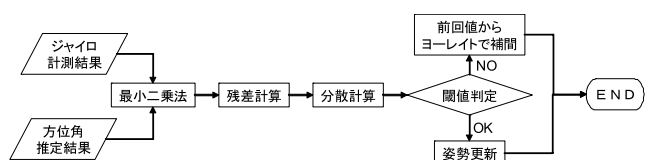


図 16 方位角信頼度判定手法

Fig. 16 Heading reliability estimation.

位角を定期的に推定し、その方位角を基準として軌跡を算出する手法を提案する (図 15, 図 16)。定期的に精度が高い方位角を推定することで、車輪速パルスから計測できる速度と組み合わせれば、精度が高い軌跡が推定可能となる。従来の手法では、GPS の擬似距離を中心とした慣性セ

ンサとの統合が多く実施されてきたため、GPS ドップラの精度の良さを活かしきれていなかった [3], [5]. また、提案する手法では、GPS ドップラと慣性センサを統合する際に、軌跡の算出に重要な方位角の精度に着目しており、速度成分の大きさのみで精度の判定を実施するよりも、精度が高い軌跡が推定できる。

5.2 ジャイロを利用した方位角の信頼度判定

以下、時刻 t_0 の方位角 $\psi_{\text{est}}(t_0)$ を推定する具体的な手法を示す。まず、ある時刻 $t_0 - k$ から t_0 における、GPS ドップラから推定した方位角 $\psi_{\text{gps}}(t)$ と、その時間のジャイロのヨーレイト $\dot{\psi}_{\text{gyro}}(t)$ を保存する。方位角 $\psi_{\text{gps}}(t)$ は、式 (9) により推定することができる。以上のデータから、時刻 $t_0 - k$ から t_0 の方位角 $\psi_{\text{gps}}(t)$ とヨーレイト $\dot{\psi}_{\text{gyro}}(t)$ のつじつまが合う方位角 $\psi_{\text{est}}(t_0)$ を、最小二乗法で推定する。

ここで、最小二乗法における推定の初期値を $\psi_{\text{init}}(t_0)$ とする。初期値 $\psi_{\text{init}}(t_0)$ は、時刻 t_0 の GPS ドップラから算出した方位角 $\psi_{\text{gps}}(t_0)$ の値を用いる。そして、式 (10) により推定の初期値 $\psi_{\text{init}}(t_0)$ から、ジャイロのヨーレイト $\dot{\psi}_{\text{gyro}}(t)$ を用いて計算した、時刻 $t_0 - k$ の予測方位角 $\Psi(t_0 - k)$ を算出することができる。

$$\Psi(t_0 - k) = \psi_{\text{init}}(t_0) - \int_{t_0 - k}^{t_0} \dot{\psi}_{\text{gyro}}(t) dt \quad (10)$$

次に、時刻 $t_0 - k$ から t_0 の間で予測方位角 $\Psi(t)$ と GPS から算出した方位角 $\psi_{\text{gps}}(t)$ の差の二乗和 (式 (11)) を考え、初期値 $\psi_{\text{init}}(t_0)$ を変動させることで、式 (11) が最少となる時刻 t_0 の方位角 $\psi_{\text{est}}(t_0)$ を探索する。

$$\psi_{\text{est}}(t_0) : \min \sum_{t_0 - k}^{t_0} (\Psi(t) - \psi_{\text{gps}}(t))^2 \quad (11)$$

ただし、重要なことは、推定した方位角 $\psi_{\text{est}}(t_0)$ が、必ずしも正確な値にはならないということである。たとえば、マルチパスが発生している環境下で方位角を推定したとしても、大きなはずれ値があるため、推定値に誤差が発生してしまう。そのため、式 (11) で推定した値に大きな誤差が発生しているか判定をする必要がある。

そこで提案する手法では、式 (11) に示す推定値した方位角 $\psi_{\text{est}}(t)$ と GPS ドップラを用いて算出した方位角 $\psi_{\text{gps}}(t)$ の差 $\text{resi}(t)$ を利用し (式 (12)), 時刻 $t_0 - k$ から t_0 の間で、 $\text{resi}(t)$ の分散に閾値を設けることで、精度が高いと予測される方位角のみを抽出する (図 16)。

$$\text{resi}(t) = \psi_{\text{est}}(t) - \psi_{\text{gps}}(t) \quad (12)$$

GPS の誤差はマルチパスが少ない環境であればガウス性があることが知られており、その情報を基に推定した方位角にも同様の傾向がある。そのため、推定値からの差の分散を考慮することで、大きなはずれ値があるか判断する

ことができ、環境に大きなマルチパスが存在するか判断することが可能となる。なお、この閾値判定により推定した方位角 $\psi_{\text{est}}(t_0)$ に大きな誤差があると判断した場合には、式 (8) の方法で前回値からジャイロから計測できるヨーレイトで補間を行う。また、分散の閾値は要求する精度に応じて設定することができる。本論文では、実験的に 1 度に設定している。

以上の方法により、精度の良い方位角を定期的に推定することができる。図 13 より、速度は車輪速パルスから精度良く取得することができるため、式 (6)、式 (7) により、精度が高い軌跡を描くことができる。

6. 評価

図 3 に示したコースで、評価を実施した結果を図 17、図 18、表 2 に示す。なお、センサは、表 1 に示す構成で実施し、真値は POSLV610 で計測した。なお、本評価では、軌跡を 100 m 単位で評価を行い、軌跡の長さが 100 m に達するごとに、その精度を真の軌跡と比較している。つまり、長さが 100 m に達するごとに、評価する軌跡の位置を真値に合わせ、誤差をリセットしてから次の 100 m の評

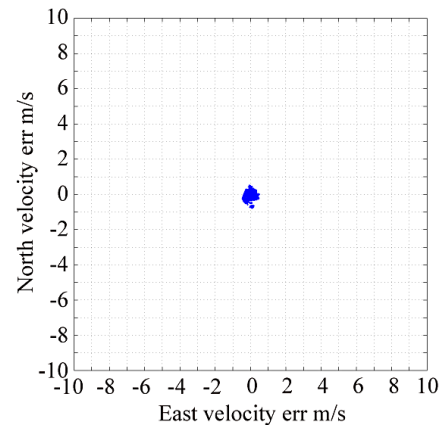


図 17 速度精度 (提案手法)

Fig. 17 Velocity accuracy (proposal technique).

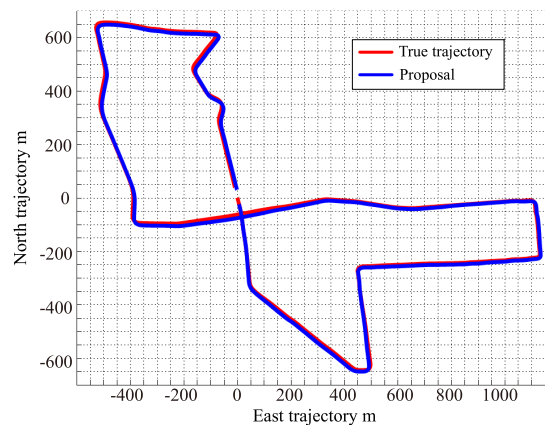


図 18 車両軌跡 (提案手法)

Fig. 18 Velocity trajectory (proposal technique).

表 2 100 m 単位での軌跡精度
Table 2 Trajectory accuracy per 100 m.

	平均 m	2DRMS m
提案手法	1.0	2.7
切り替え	6.1	31.8
LC	9.6	34.8

表 3 方位角精度
Table 3 Heading angle accuracy.

	平均 deg	標準偏差 deg
提案手法	-0.1	0.9
切り替え	2.2	14.5
LC	-7.6	32.7

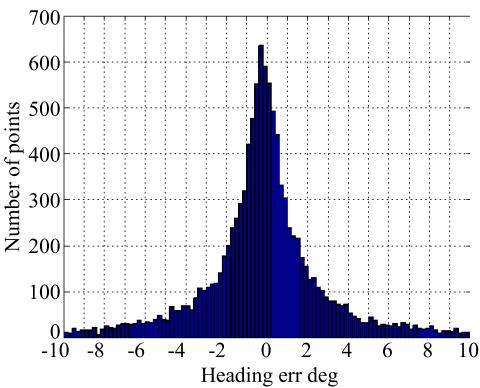


図 19 方位角推定精度 (GPS ドップラから推定)
Fig. 19 Heading angle accuracy.

価を行う。また、評価は「提案手法」,「単純な GPS ドップラと慣性センサの切替え」,「LC GPS/IMU」で行った。4 章で評価を行った「慣性センサの組合せ」は、初期方位角に真値を用いているため評価は行わない。

図 17, 図 18, 表 2 より, 4 章で示した従来手法に比べ軌跡推定精度が向上し, 提案手法では 100 m 単位の軌跡が 1.0 m (平均), 2.7 m (2DRMS: Twice the Distance Root Mean Square) の精度で推定されていることが確認できる。軌跡推定精度が向上した理由としては, 方位角精度が向上していることがあげられる。ここで, 方位角推定誤差の平均と標準偏差を表 3 に示す。表 3 より, 軌跡を算出する際に重要である方位角精度が, 従来手法に比べ向上していることが分かる。ここで, 図 19 に式 (9) により GPS ドップラから算出した方位角の誤差のヒストグラムを, 図 20 に信頼度が高いと判定した方位角の誤差のヒストグラムを示す。方位角信頼度を判定することで, 図 19 に示す標準偏差 2.9 deg の母集団から, 図 20 に示す標準偏差 0.5 deg の集団を抽出することを可能にしている。離散的ではあるが高い精度の方位角を基準にすることで, 走行コース全域においても, 方位角精度を高めることができる。また, 図 21 に図 14 と同じ環境で提案手法により方位角を算出した結果を示す。図 21 から, マルチパスが多い環境でも, 約 1 度

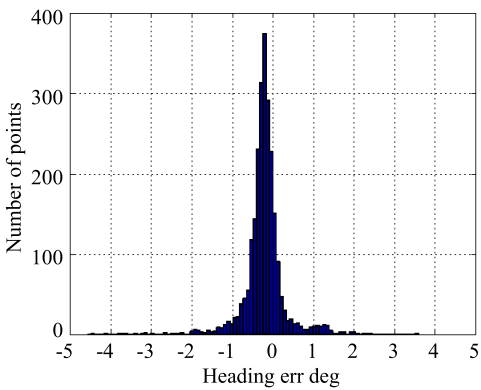
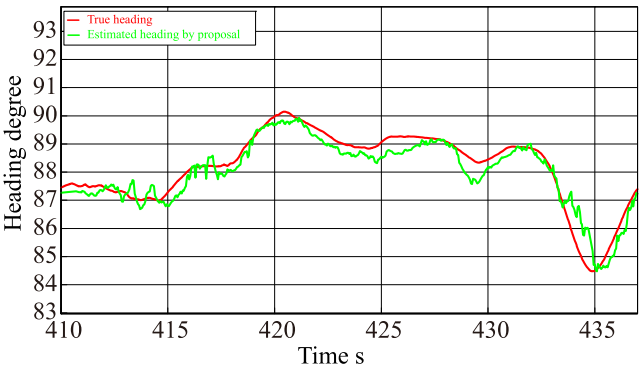
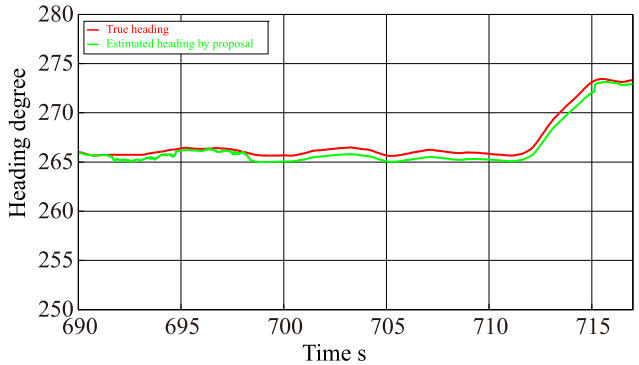


図 20 信頼度が高いと判定した方位角の精度
Fig. 20 Heading angle accuracy judged high accuracy point.



a) Open sky area



b) Area surrounded by buildings

図 21 空が開けた環境とビルに囲まれた環境での提案手法の評価
Fig. 21 Evaluations in open sky and surround by buildings.

程度の誤差で方位角が推定できていることが確認できる。

7. 結言

本論文では, 位置推定を行うなかで重要な基盤となる軌跡推定の技術に注目し, 特に需要が高い都市部での精度向上を, 汎用的なセンサの組合せにより改善可能な手法の提案を行った。具体的には, GPS ドップラと慣性センサを複合し, 信頼度が高い方位角を抽出した後に, 車速と組み合わせた軌跡を算出することで, 軌跡精度の改善を行った。評価実験により, 都市部において 1 m/100 m (平均) の軌跡精度を得ることができ, 従来手法に比べ軌跡精度を改善可能なことを確認した。

軌跡精度は位置推定の基幹技術であり、本提案手法を活用することで絶対位置推定精度を向上可能となる。すでに本論文で提案した精度が高い軌跡を利用した位置推定手法を提案しており [12]、今後は GPS ドップラと慣性センサの出力をより密に統合することで、軌跡精度を向上させ、絶対位置の推定に活用させることを目指す。

参考文献

- [1] 藤岡健彦, 大前 学: ラテラルプラトウンの制御方式に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.2, pp.109-114 (1997).
- [2] 小島祥子ほか: 汎用 GPS と車載カメラ画像を用いた高精度地図生成手法の提案—基本概念と可能性検討, 電気学会 ITS 研究会, Vol.2011, No.1, pp.35-40 (2011).
- [3] Sukkariéh, S. et al.: A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Application, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.15, No.3, pp.572-578 (1999).
- [4] Meguro, J. et al.: Autonomous Mobile Surveillance System based on RTK-GPS in Urban Canyons, *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.2, No.17, pp.218-225 (2005).
- [5] Gao, J.: GPS/Low-Cost IMU/Onboard Vehicle Sensors Integrated Land Vehicle Positioning System, *EURASIP Journal on Embedded Systems*, Vol.2007 (2007).
- [6] Ding, W.: Integration of MEMS INS with GPS Carrier Phase Derived Velocity: A New Approach, *Proc. 20th ION GNSS*, Fort Worth, USA, pp.2085-2093 (Sep. 2007).
- [7] 横地裕次ほか: 特徴点追跡と GPS 測位に基づくカメラ外部パラメータの推定, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG5(CVIM13), pp.69-79 (2006).
- [8] Iwase, T. et al.: Estimation of Multipath Range Error for Detection of Erroneous Satellites, *ION GNSS 2010* (2010).
- [9] How, J.P. et al.: GPS Estimation Algorithms for Precise Velocity, Slip and Race-Track Position Measurements, *SAE 2002 Motorsports Conference*, Indianapolis (2002).
- [10] Kojima, Y. et al.: Precise Localization using Tightly Coupled Integration based on Trajectory estimated from GPS Doppler, *10th International Symposium on Advanced Vehicle Control* (2010).
- [11] 入手先 (http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/POSLV_Specifications.pdf).
- [12] 目黒淳一ほか: GPS 生データを用いた軌跡形状に基づく位置推定手法の提案, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, SI2010 (2010).

推薦文

本論文では GPS 信号から得た情報と慣性センサを複合することにより軌跡精度の向上を図る手法を提案しており、独自性が高い方法であり新規性がある。また、十分な解析を通して高精度で軌跡を推定できることが示されており、研究としての完成度も高い。これらの結果により比較的安価な装置でも高精度に位置推定できる可能性を導いたことは有用性の面でも高く評価できる。また、内容が分かりやすく説明されており、発表時の討議も活発であった。

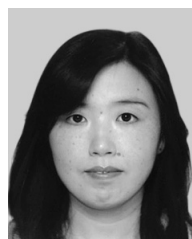
発表時の討議においては、GPS ドップラの技術の詳細に関する質問も相次ぎ、関連分野の研究者からの注目が大きいことがうかがい知れた。本論文を推薦論文として広く公表していただくことは、該当分野の研究者、開発者に非常に有用な知見を与え、ITS を含む移動体通信分野の発展に大きく寄与すると考えられる。

(高度交通システム研究会主査 屋代智之)



目黒 淳一 (正会員)

2003 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業, 2005 年同大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 2008 年同専攻博士後期課程修了, 博士 (工学)。2006 年日本学術振興会 特別研究員, 2008 年より豊田中央研究所に勤務。車両のナビゲーション, 位置推定に関する研究に従事。日本ロボット学会, The Institute of Navigation 各会員。



小島 祥子 (正会員)

1993 年名古屋大学工学部電気系学科卒業, 1995 年同大学大学院工学研究科電気系専攻修士課程修了, 同年より (株) 豊田中央研究所に勤務。センサ統合による車両周辺環境認識, 車両運動推定, 位置推定, 地図生成に関する研究に従事。電子情報通信学会, 計測自動制御学会各会員。



鈴木 徳祥

1990 年京都大学工学部電子工学科卒業, 1992 年同大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了, 2003 年豊橋技術科学大学工学研究科電子・情報工学専攻博士課程修了, 博士 (工学)。1992 年より豊田中央研究所に勤務。デジタル移動通信, 無線ネットワーク, 電波伝搬, 位置推定等に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



寺本 英二

1982 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業，1990 年より豊田中央研究所に勤務．移動体通信，電波伝搬，衛星通信，ナビゲーション，位置推定，経路案内，交通流シミュレーション，渋滞予測等に関する研究に従事．電子

情報通信学会，交通工学研究会各会員，情報処理学会準会員．