カメラとジャイロセンサを組み合わせた移動ロボットの高精度な姿勢推定

小堀 訓成† 出口 大輔† 高橋 友和‡ 井手 一郎† 村瀬 洋†

†名古屋大学大学院大学院 情報科学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
‡岐阜聖徳学園大学 経済情報学部 〒500-8288 岐阜県岐阜市中鶉 1-38

E-mail: †{kobo, ddeguchi, ide, murase}@ murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, ‡ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp

あらまし 移動ロボットや自動車への実用化に向けた高精度な位置・姿勢センサとして，安価な単眼カメラと汎用のジャイロセンサおよび加速度センサを一体化したハイブリッドなシステムを提案する．ジャイロセンサおよび加速度センサ（以降，これらを慣性センサと呼ぶ）を用いて位置・姿勢の算出を行う場合，温度などの影響によりドリフト誤差が発生するため，時間経過に対して精度が劣化してしまう．一方，カメラ画像を用いた位置・姿勢推定手法もあるが，ドリフト誤差がない反面，オクルージョンが発生するため継続的に位置・姿勢を算出することは難しい. 提案手法は, 慣性センサとカメラ画像をカルマンフィルタの枠組みで組み合わせることにより，上記センサの各々が持つ問題の解決を図るものである．具体的には，SIFT 特徴量を利用し，モーションステレオによって回転行列・並進ベクトルを算出し，その情報を参照値として慣性センサの誤差を推定する．提案手法による姿勢の精度向上については，実験によりその有効性を示すことができた.

キーワード SIFT，エピポーラ幾何，カルマンフィルタ，ジャイロセンサ，加速度センサ

High Accuracy Pose Estimation for a Mobile Robot fusing a Camera and Gyro Sensors

Norimasa KOBORI† Daisuke DEGUCHI† Tomokazu TAKAHASHI‡

Ichiro IDE† and Hiroshi MURASE†

† Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho Chikusa-ku Nagoya, Aichi 464-8601 Japan
‡ Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University 1-38 Nakauzura, Gifu, Gifu, 500-8288 Japan

Abstract In this paper, we propose a hybrid system which combines an inexpensive camera with gyro and acceleration sensors for precise position and rotation estimations. When only gyro and acceleration sensors are used, it is known that drift error occurs with time. On the other hand, when only a camera is used, the drift error does not occur, but it is difficult to continuously obtain the position and rotation due to occlusions. Therefore, we propose the combination of the gyro/acceleration sensors and the camera by the Kalman Filter to solve each sensor's problem. In concrete terms, using the SIFT-features, rotation and translation vectors are calculated by the motion stereo method. Next, the errors of gyro and acceleration sensors are corrected referring to the rotation matrix and the translation vectors which are obtained from the camera-captured image information. Experimental results showed the effectiveness of our method.

Keyword SIFT, epipolar-equation, Kalman Filter, gyro sensor, acceleration sensor

1. はじめに

自動車や航空機，ロボットなどの移動体において自らの位置や姿勢を知ることは重要である．自動車では，位置はカーナビゲーションシステムに利用され，姿勢は横滑り安定装置（VSC）や統合車両姿勢安定制御システム（VDIM）などの運動制御に利用されている[1]．位置と姿勢の算出方法は用途や使用するセンサに応じていくつかの手法がある．それらの代表的なものを表 1 にまとめる．高精度な位置・姿勢を求めるには，センサコストが大きくかかってしまう．例えば，RTKGPS の場合，基準局を設置する必要があり，基準局から半径 5km 以内でないと十分な精度が出ない. また基準局との通信も要する．光ファイバジャイロは，光ファイバを巻く作業が製造工程上，量産には向かない．レーザレンジファインダも反

表 1　高精度な位置と姿勢の算出方法

使用するセンサ	手　法	用　途	精　度
GPS (単独測位/補正情報有)	GPS (ﾏｯﾌﾟﾏｯﾁﾝｸﾞ)	車載ｶｰﾅﾋﾞ (位置/方位算出)	10m程度
GPS (RTKGPS) 光ﾌｧｲﾊﾞｼﾞｬｲﾛ ｻｰﾎﾞ加速度ｾﾝｻ	GPS/INS (ｶﾙﾏﾝﾌｨﾙﾀ)	航空機用ﾅﾋﾞ (位置/姿勢算出)	約0.1m以下 約3.0deg以下
ﾚｰｻﾞｰﾚﾝｼﾞﾌｧｲﾝﾀﾞ 環境地図	SLAM (ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾌｨﾙﾀ等)	ﾛﾎﾞｯﾄ用ﾅﾋﾞ (位置/方位算出)	約0.1m以下 約3.0deg以下

射光を計測するための ADC が GHz のサンプリングを要し，ADC やレンズの部品単価が高い．さらにレンズ表面の研磨やレンズを回転させるモータ部と光軸を合わせる作業などには手作業が入るため，こちらも量産には向かない．コスト構造の異なる航空機産業を除いてはいずれも製品/実用化の点でまだ敷居が高い．

一方，低コストで位置・姿勢を求める方法としては，（1）振動型などのジャイロ，加速度センサを用いる方法と（2）カメラ画像を用いる方法がある．（1）の場合，温度などの影響でドリフト誤差は発生し，時間経過に対して誤差が蓄積してしまう．また（2）の場合，ドリフト誤差が小さい反面，オクルージョンの影響により継続的に位置・姿勢を求めることは難しい．

先行研究を例にみると，関らはモーションステレオによる時刻間での路面の対応付けを Lucas-Kanade 勾配法を用いて行い，車両の移動量を推定した[3]．さらに，エボリューショナルロボティクス社によって，VSLAM（Visual Simultaneous Localization And Mapping）という手法が製品化されている．これは，画像から求めた特徴点から環境地図を構成しておき，以降，獲得された特徴点から自己位置を推定する[4]．いずれも画像から特徴となる対象点を求め，エピポーラ幾何の枠組みで位置・姿勢を求めるものであるが，欠点はロバスト性にあり，移動障害物などが存在する動的環境下では，特徴点の算出や特徴点の対応付けが安定して出来ない．一方，前山らはあらかじめ認識しやすい色ランドマークを作成しておき，デッドレコニングで推定した自己位置をカルマンフィルタの枠組みで修正した[2]．[2]の手法は，内界センサの推定値をベースにカメラ画像からランドマークを検出した時のみ補正するハイブリッドな機構であるため，ロバスト性の観点では参考にできるが，事前にランドマークを用意しておく煩わしさがある．

本研究では，実用化に向けた高精度な位置・姿勢センサとして，安価な単眼カメラと汎用の慣性センサを一体化したシステムを提案し，個々のセンサでの課題の解決を図る．具体的には，画像から求めた回転行列・並進ベクトルを参照値として，慣性センサの誤差をカルマンフィルタの枠組みで推定する．画像から回転行列・並進ベクトルを算出する際には，画像の回転・拡小・拡大・照明の変化に頑健な SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) 特徴量[5]とモーションステレオを利用する．提案するシステムは，ビジョンと慣性センサとのハイブリッドな構成であるため，移動障害物などの影響で画像から回転行列・並進ベクトルが求まらなくても位置・姿勢の算出が可能である．また慣性センサのドリフト誤差を逐次推定するため，長時間経過後の蓄積誤差の低減が図れる．さらに，画像処理上の観点から，慣性センサから求まる回転行列・並進ベクトルの情報を画像処理側に渡すことによって，画像処理の計算負荷や特徴点の対応付けのミスマッチを容易に減らすことができる．以下，2 章には提案するアルゴリズムを，3 章には実験を，4 章ではまとめと今後の課題を述べる．

2. カメラとジャイロの融合による高精度姿勢推定

提案する手法のブロック図を図 1 に示す．SIFT 特徴量を利用して時刻の異なる画像間の対応付けを行い，モーションステレオの原理より回転行列 $\mathbf{R}_{img}$ と並進ベクトル $\mathbf{h}_{img}$ を算出する．$\mathbf{R}_{img}$ と $\mathbf{h}_{img}$ を観測量とし，状態量をジャイロセンサ，加速度センサの誤差 $\delta\omega$ ，$\delta\mathbf{g}$ としてカルマンフィルタによって誤差を推定する．推定した誤差をセンサ値から取り除くことにより姿勢・位置の精度を向上させる．以下，画像処理による観測量の導出とカルマンフィルタによる誤差の推定の 2 部構成で説明する．

2.1. 画像処理による観測量の導出

画像情報から回転行列・並進ベクトルを精度良く求めるために，SIFT 特徴量とモーションステレオの組み合わせを提案する．このとき，慣性センサからの出力を利用することにより，安定した回転・並進量の算出を実現することが提案手法のポイントである．Lowe によって提案された SIFT[5]は，画像の拡大・縮小，回転などの変化に頑健な特徴量の抽出法である．微小なアフィン変換に対しても比較的ロバストであるとの報告もある[5]．その

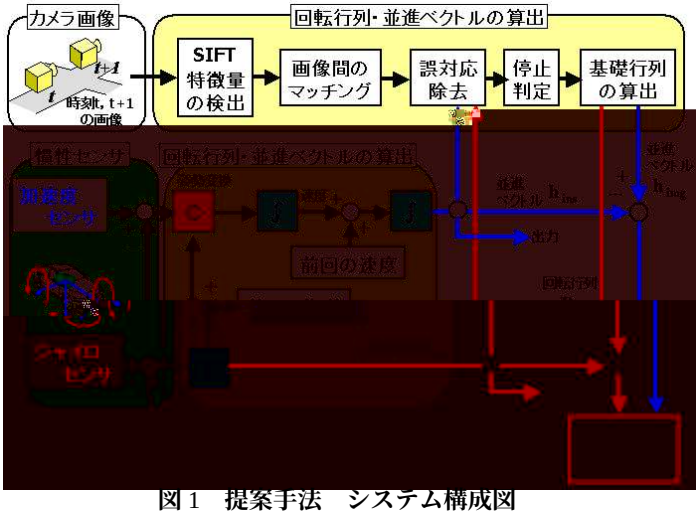
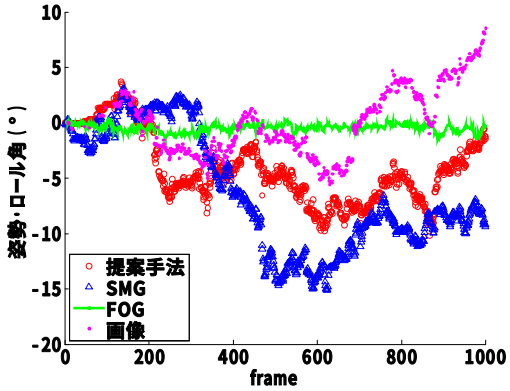


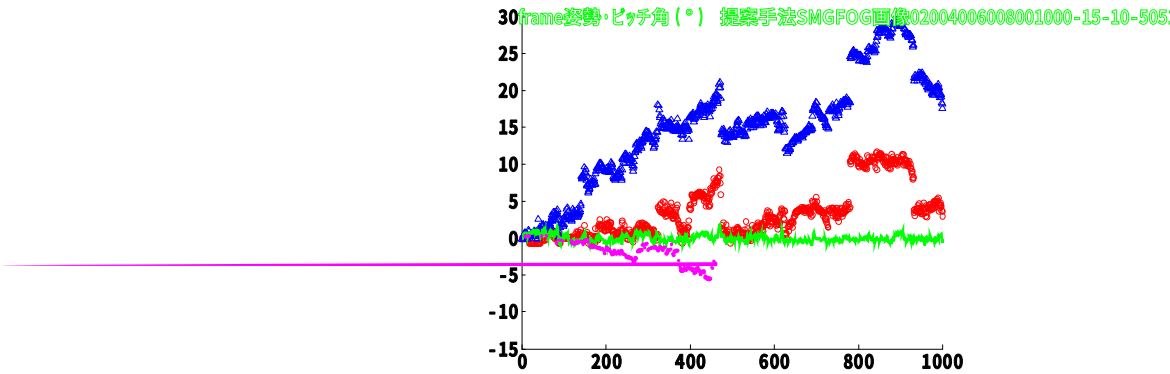
図 1　提案手法　システム構成図

ため[illegible]案手法では時刻の異なる画像[illegible]量を用いる．画像間の時間間隔[illegible]画像間[illegible]変化量も微小なアフィン変換で[illegible]体的な[illegible]は，SIFT 特徴量の検出と，以[illegible]（1）[illegible]点のマッチング（2）慣性セン[illegible]対応[illegible]（3）停止判定処理（4）基礎[illegible]ら構成される．

（1）特徴点のマッチング

まず時刻の異なる画像間で特徴点のマ[illegible]マッチングは，SIFT 特徴量の最近傍探索[illegible]う．特徴点の類似度を表す尺度として，[illegible]距離を用い，距離が最小になるものから[illegible]補とする．高次元ベクトルでの特徴量の[illegible]るじ襷る


10
5
0
-5
-10
-15
-20
0
200
400
600
800
1000
frame
姿勢・ロール角（°）
提案手法
SMG
FOG
画像


frame姿勢・ピッチ角（°） 提案手法SMGFOG画像0200400600800100015-10-505
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
0
200
400
600
800
1000

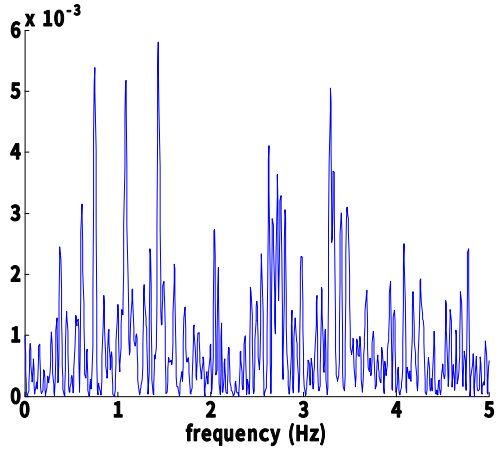


図 7　カルマンフィルタの推定量（ピッチ成分）
0～400 フレーム間の周波数解析結果

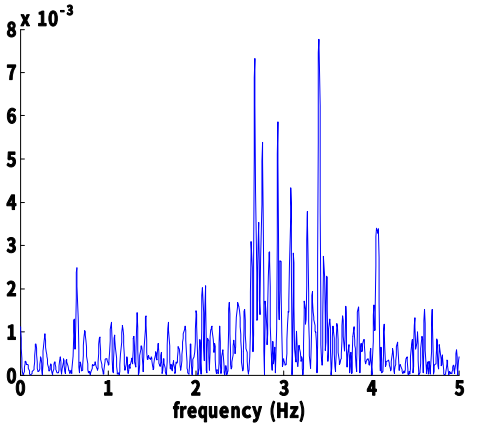


図 8　ジャイロ（SMG）の誤差量（ピッチ成分）
0～400 フレーム間の周波数解析結果

ても約 10 度以内におさえている．特に，ピッチ方向について大幅な改善が見られた．また，図 4～6 において，「画像」は画像から算出した姿勢であり，停止や F 行列の精度判定で算出できなかった場合は，ジャイロ（SMG）の値で繋いだ結果である．特にヨー方向は，FOG と一致している．この点から画像から求めた回転量が正しいと判断できる．

誤差には，温度などの要因によって徐々にずれていくもの（低周波成分）と振動などで一時的に発生するもの（高周波成分）に分けられる．図 4，6 のヨー角とピッチ角では，SMG（汎用ジャイロ）の値に注目すると緩い傾斜でずれていくことが良く分かる．これは，時間変化に比較的緩やかな直流成分型のドリフト誤差に該当する．式(17)では，高周波・低周波成分の両方を推定する．カルマンフィルタを用いなくても誤差の高周波成分であれば LPF（ローパスフィルタ）でカットできる．一方，低周波成分は静止時に誤差量を検出して，オフセットとして常時，計測値から引く方法がある．しかし，温度などの要因によって誤差の低周波成分にも緩やかな時間変化があるため，精度良く除去するのは難しい．今回計測した 0～400 フレーム間のピッチ成分には，低周波なドリフト誤差が入っていると見られる．そこで，カルマンフィルタの推定値と SMG の誤差を周波数解析して比較した．結果を図 7，8 に示す．カルマンフィルタ，SMG（汎用ジャイロ）の誤差の共に，3Hz 周辺で強度が強いことが分かる．これによりカルマンフィルタによる誤差推定ができているといえる．また，カルマンフィルタの推定値の場合，1Hz 周辺の低周波成分でも強度が強いことが分かる．これは，画像から回転行列・並進ベクトルが求まらない場合，推定値および分散値を時間方向にそのまま引継ぎするため，その直流成分が表現されていると考える．

3.2. 画像からの並進ベクトルの算出結果

今回，ジャイロセンサの誤差補正には提案手法による効果を示すことができた．一方，加速度センサの誤差補正はうまくできなかった．理由は，画像から求まる並進ベクトルの精度にある．カルマンフィルタの観測量として利用するため，ここで十分な精度が得られないと誤差の推定精度は期待できない．

画像から求まる並進ベクトルの結果を図 9 に示す．直進路 1000 フレーム間（100sec）において 400~600 フレーム間の画像から求めた並進ベクトル（ノルム 1 で正規化）の値を示す．図 9 から分かるように並進ベクトルは，FOG，サーボ加速度から求めた並進ベクトルと比較して一致していない．これは，空間における注視点と時刻 t，t＋1 のカメラ画像上の特徴点の 3 点間において三角形がしっかりできていないためと考える．ほぼ直線に近い三角形になっているため，画像間の偏差は回転成分に丸められ，並進成分が正確に算出することができない．そこで，カメラの光軸を X 軸から下 50 度傾けて同様の試験をした

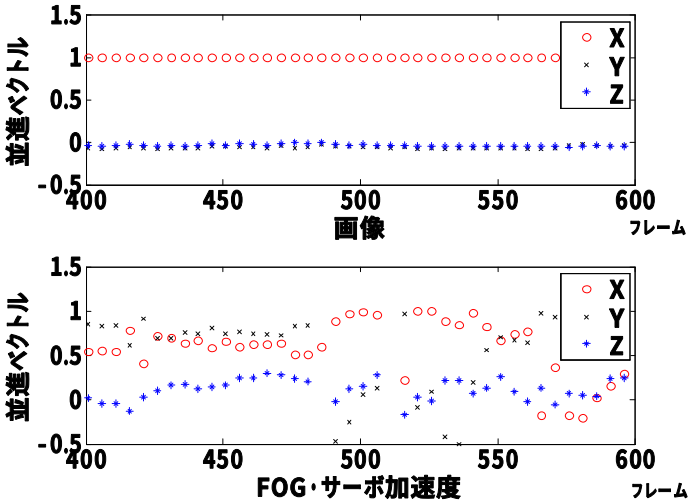


図 9　並進ベクトルの結果（400～600 フレーム間）
（上）画像から算出（下）FOG・サーボ加速度から算出

が，並進については一致しなかった．光軸方向の並進成分は常にほぼ 0.99 近い値になることから，今回の低速かつ 10Hz 周期で動く移動量では十分な三角形が作れないことが考えられる．最急勾配法の枠組みであれば，並進成分が 0 でも回転成分は求められることが分かっている[9]．そこで，今回の実験ではジャイロだけの補正を考え，状態量をδωのみの 3 次元でカルマンフィルタを構成し直した．

3.3. カーブ走行時の影響

カーブ走行時（200 フレーム）の結果を表 4 に示す．表 4 に示したとおり，カーブ時においても提案手法によって姿勢精度の改善が見られた．SIFT は微小なアフィン変換についてもロバストであるという報告がある[5]．今回，図 10 に示すようにヨー方向 0.8rad/sec の回転時においても 10Hz 周期の移動量としては微小なため十分に SIFT による対応付けができていることを確認した（この際，回転量が多い場合はジャイロの誤差も大きくなるため，誤対応除去の窓幅を 20pixel から 50pixel に変更した）．

4. まとめ

画像から求められる回転行列・並進ベクトルを利用し，カルマンフィルタによって慣性センサの誤差補正を行う手法を提案した．移動ロボットでの計測データを用いた実験の結果，姿勢については，ジャイロセンサの時間経過によるドリフト誤差をカルマンフィルタにより推定することができた．今後は，移動障害物などによるオクルージョンの影響についても優位性を評価していきたい．また今回はオフライン検証であったが，センサとして構成したい．そのためにはリアルタイム処理の実現が必要である．表 5 に現状の処理時間をまとめた．SIFT 特徴量の算出と BBF による対応付けの部分で処理負荷が大きい．処理負荷低減は，GPU（Graphics Processing Unit）の利用や FPGA（Field Programmable Gate Array）によるハードウェア化によって対処可能であり，今後取り組んでいきたい．

表 4　姿勢精度（平均誤差）の比較（カーブ走行時）

200フレーム間の平均誤差 (deg)	yaw	roll	pitch
従来手法 (ジャイロのみ)	12.88	3.79	6.21
提案手法	3.53	1.75	2.57

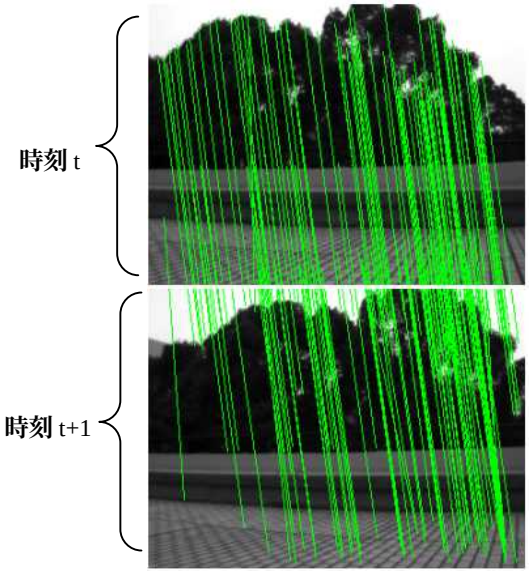


図 10　カーブ走行時(ヨー方向 0.8rad/sec)の SIFT による対応付け

表 5　提案手法の各処理時間（Intel Pentium M 1.2GHz）

	SIFT	Kdtree	BBF	LSM	KF
処理時間(ms)	645.9	9.0	96.7	36.7	1.8

文　献

[1] 鈴村将人，深谷克己，浅田宏起，“車両運動統合制御（VDIM）の現状と展望，”トヨタ・テクニカル・レビュー，vol.55，no.1，pp48-53，Nov.2006.

[2] 前山 祥一，大矢 晃久，油田 信一，“移動ロボットのための遡及的現在位置推定法 －処理時間を要する外界センサデータの利用－，”日本ロボット学会誌，vol.15，no.7，pp.115-121，Oct. 1997.

[3] 関晃仁，奥富正敏，“ステレオ動画像を利用した道路面領域の抽出と追跡による自車両の運動推定，”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.90-99, March, 2006

[4] Niklas Karlsson, Enrico Di Bernardo, Jim Ostrowski, Luis Goncalves, Paolo Pirjanian, Mario E. Munich, “The vSLAM Algorithm for Robust Localization and Mapping,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2005, pp.24-29, April.2005.

[5] D. Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,” Proc. of International Journal of Computer Vision (IJCV), 60(2), pp.91-110, 2004.

[6] R. セジウィック，“領域探索，”アルゴリズム C 探索・文字列・計算幾何，pp.205-220，（株）近代科学社，1996.

[7] J.S. Beis and D.G. Lowe., “Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces,” Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1000-1006, 1997.

[8] 金谷健一，“3 次元剛体運動の画像解析，”画像理解 3 次元認識の数理，pp.79-114，森北出版（株），2005.

[9] 藤吉弘亘，“Gradient ベースの特徴抽出 - SIFT と HOG –，”情報処理学会研究報告 CVIM 160，pp.211-224，Sep, 2007.

[10] 前山 祥一，大矢 晃久，油田 信一，“移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニング・システム，”日本ロボット学会誌，vol.15，no. 8，pp. 1180-87，Nov. 1997.

[11] 金井喜美雄，ビークル，坪内孝司（編），pp.142-173，（社）計測自動制御学会，2003.

[12] 徐剛，辻三郎，“エピポーラ幾何，”3次元ビジョン，pp.61-77，共立出版（株），2005.

[13] 坂本修（他），ジャイロ活用技術入門，多摩川精機（編），（株）工業調査会，2002.

[14] Eun-Hwan Shin, Naser El-Sheimy, “Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications,” Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp.146-157, Jan. 2002.