

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2006-2008
課題番号：18360116
研究課題名（和文） 屋外を走行する作業自律移動機械の測位手法の定式化に関する研究
研究課題名（英文） A research for formulation of localization method for outdoor moving vehicles
研究代表者 坪内 孝司（TSUBOUCHI TAKASHI）
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号：80192649

研究成果の概要：

林道のように道路の左右や上部に木々があり、GPS 単独では精度の高い測位が行えない環境を走行する作業自律移動機械のための測位手法について知見を得た。GPS と同時に、国土地理院発行の 1/2500 数値地図に記載の道路中央線情報と、移動体にとりつけた路面を走査する走査型レーザ距離計から検出できる道路中央線とにより、移動体のデッドレコニングによる推定位置の累積誤差を修正することが有効なことがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2007 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008 年度	2,326,752	780,000	3,106,752
年度			
年度			
総 計	14,026,752	4,290,000	18,316,752

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

研究代表者が取得した平成17 年度末に終了した科研費に基づく研究では、平地において GPS の電波が建物などにより多重反射の影響を受ける場合を主として想定し、走行中の GPS による測位の信頼性が低い期間が比較的短く、オドメトリ（車輪回転数の累積）による測位補完で概ね済む場合を想定していた。実用に照らせば、この想定をさらに厳しくし、屋外自律移動体の測位手法をより実用可能レベルで定式化する必要があった。

一方、本研究における研究課題設定の動機は、屋外作業機械の自律性を高めるニーズが

極めて高いことであった。その移動体にとって、精度高く測位できることはきわめて重要な技術課題である。研究開始当初、研究代表者らが共同研究を行っていた相手先（例えば、日立建機、独立行政法人土木研究所など）との議論において話題となっている実用対象ニーズとして、

(I) バックホーによる法面構築作業の出来高管理のために、バックホーに搭載したレーザスキャナで法面形状を走査するとき、この形状を局地座標系に関する絶対位置で表示するためのバックホー位置の測位（土木研究所との共同研究）、

(2) 山間の営林地において間伐した原木をクローラダンプにより麓までの搬送するための林道走行（日立建機(株)との議論），
 (3) 山間の堰堤工事などで生ずる土砂をクローラダンプにより麓まで搬送するための取り付け道路の走行（草津谷沢川第4 砂防堰堤工事における無人化[遠隔操作化] 施工のケース），
 (4) 採石場にてホイールロードで碎石をすくい取り，ダンプの待機場所へ移動して碎石を荷台へ積載するための場内走行，
 などがある．上記項目(1)はまさしく測位そのものが技術課題であるし，上記項目(2)～(4)では作業移動体の走行が絡むタスクである．走行については，一般に，あらかじめ走行経路が局地座標系に関して指示されており，かつ移動体の測位が精度よく可能であれば比較的簡単にその経路沿いに走行できる（地図位置ベース走行）．したがって，上記の4つの例題に照らしても，移動体の測位技術がキーとなることは明らかであった．本研究では，これらの例題にも資する自律移動体向けの測位技術を実用レベルで確立し，定式化することを目指す必要があった．

2. 研究の目的

本研究は，屋外を移動する作業自律移動機械の測位手法を確立し，屋外における自律移動機械のナビゲーションに資すること，すなわち，

- (1) この作業自律移動機械に搭載した全地球測位システム（GPS）装置から得られる測位情報と，同じく移動機械に搭載した駆動車輪回転数の累積による測位情報（オドメトリ），およびジャイロなどより得られる車体の回転情報などを総合的に利用し，それらの情報の**弁別と融合**により，開けた土地だけでなく，山間の林道などにおいても利用できる頑健で実用的な測位手法を確立すること，
- (2) 上記に加え，走査型レーザ距離計によるランドマーク検出も利用する，さらに精度の高い実用的な移動体の測位手法を定式化すること，
- (3) 上記(1)および(2)による測位手法を組み合わせることによる測位精度の向上を吟味し，これにより屋外行動を行なうナビゲーション手法が確立できるようにすること，
- (4) その上で今後の同種の実用・応用に不可欠なノウハウを蓄積・公開し，屋外を移動する自律移動機械のための智能機械学に貢献すること，
 を目的とした．

3. 研究の方法

まず，実験環境として，研究実施場所の筑波大学に近い筑波山周辺の林道および公道を選定した．図1は筑波山周辺の航空写真地図



図1 航空写真地図に重ねた実験林道・公道



図2 実験環境の林道の様子



図3 実験環境の林道の様子



図4 実験環境の林道の様子

図上に，実験を行なった林道・公道を重ねたものを示した．地点AからBへのA寄り半分

は、上空が開けた環境であり、その後半、および地点 B から C および C から A に戻る経路では、図 2～図 4 のように、道路の左右に立ち木が多く、また立ち木の樹冠が道路上にせり出している場所も多い。このような場所は、GPS の測位値に大きな誤差がのることが予想される。

一方、実験装置として、図 5 のように、GPS (SF2050), IMU (NAV420), 走査型レーザ距離計 (Top-URG) および車輪の回転数を検出するエンコーダ (Corrsys Datron Wheel Encoder) を PC に接続した。図 6 が実験車両であり、実際にセンサを搭載した様子を示す。

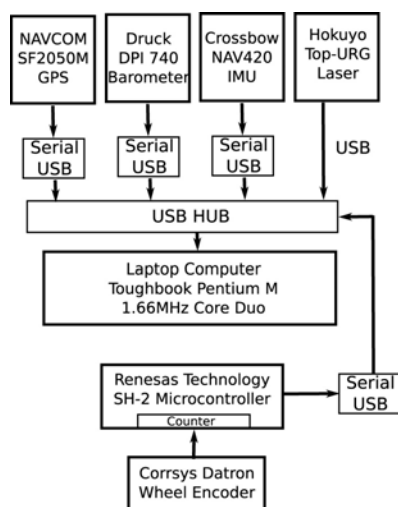


図 5 計測装置の構成



図 6 計測装置の車上配置

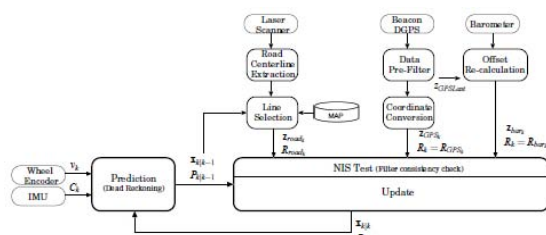
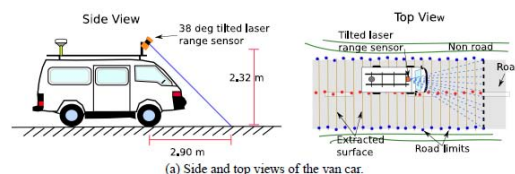
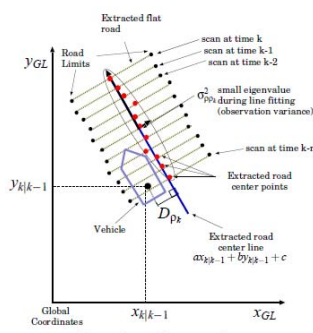


図 7 計測系のブロック線図



(a) Side and top views of the van car.



(b) Road centerline extraction.

図 8 道路中央線検出による推定系

また、図 7 のように計測系を構成した。IMU から出力される回転角速度と、車輪に取り付けたエンコーダからの車両並進速度の積分により移動体の自己位置の推定を行う（デッドレコニング）系を作った。また、GPS からの測位値のうち信頼性の高いものだけを取り出すフィルタを構成し、また次に述べる走査型レーザ距離計と市販地図を用いる自己位置推定系を構築した。これらによる自己位置計測地を用いて、カルマンフィルタの枠組みにより、デッドレコニングの累積誤差を軽減するようにした。

図 8 は、車両に搭載した走査型レーザ距離計による自己位置の推定系の説明図である。図 8(a) のように取り付けた距離計が車両直前の路面を走査する。左右路肩部分を検出し、その 2 等分線を中央線位置とする。過去 2 秒（80 走査分）の中央線位置に対して最小二乗法による線分当てはめを行い、この当てはめがよい場合に中央線が検出できたとした。この中央線位置から相対的な車両の位置を求めるため、市販の 1/2500 数値地図から抽出した道路中央線情報（局地座標系において通過点座標の列として記述された情報。この通過点座標を結ぶ線分が道路中央線）を用いて、現在走行中の場所の中央線位置を同定した。

これを道路左右方向の位置修正として、カルマンフィルタに入力できるようにした。

実験としては、GPS 単独で設定経路を走行して GPS の測位値がどうなるかを測定した。さらに、走査型レーザ距離計と道路中央線情報による、デッドレコニングの誤差修正をおこなうこと、さらに GPS 測位値と道路中央線情報を利用する誤差修正を両方用いる修正をおこなった。

4. 研究成果

図 9 は GPS のみによる図 1 の経路の測位結果の一例を示す。GPS はディファレンシャルモードを用いている。図 1 において、緑色は GPS の信頼にたる x, y, z 方向すべての測位値が求まった地点、赤色は水平 x, y 方向の測位値のみもとまった地点である。また、測位値が受信機から出力されない箇所が相当数あるのがわかる。このような箇所ではデッドレコニングの累積誤差が増大する。実際、図 12(g) は、GPS の測位値が得られない箇所でデッドレコニングのみで位置推定を行なった測位値を示しており、空色で示した誤差楕円が大きいことがわかる。このため、GPS によらないデッドレコニングの誤差修正の方法が必要である。

そこで、図 8 に示した道路中央線を走査型レーザ距離計で検出し、これと市販の数値地図情報に記載の道路中央線情報とを利用することにより自己位置を修正することを、実験対象の林道・公道でおこなってみた。この結果を図 10、図 11 に示す。図 10(a) (b) は道路の曲率が小さくほぼ直線状のため、走査型レーザ距離計に基づく計測値より中央線の検出ができた場合を示す。図 10 (c) (d) は道

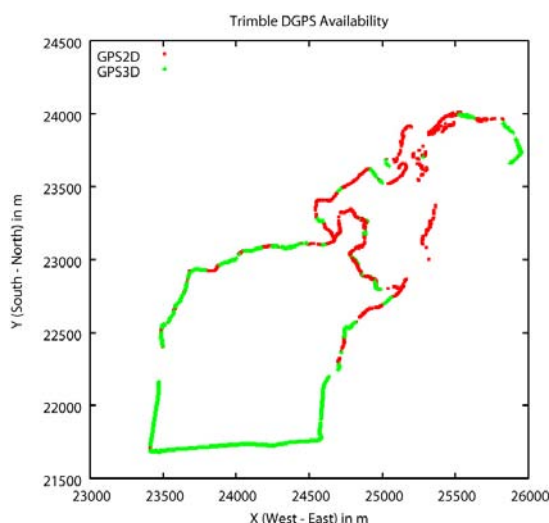


図 9 GPS による図 1 の経路の測位結果

路の曲率が大きく、中央線が距離計による計測値で中央線が検出できない場合を示す。図 11 は、実験対象道路での、デッドレコニングの累積誤差を、中央線検出による修正のみでおこなった結果である。図中の赤い点が推定位置であり、空色がその各点での誤差楕円を示している。累積誤差の増大が抑えられていることがわかる。

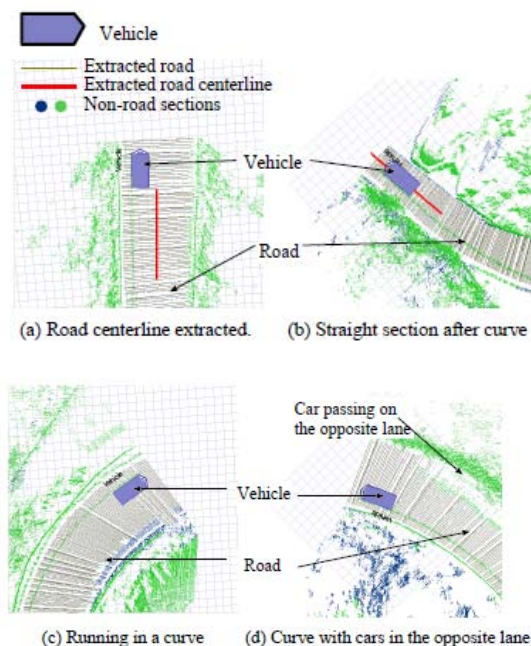


図 10 道路中央線検出による誤差修正の様子

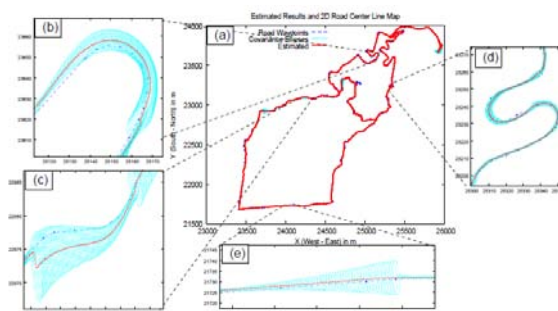


図 11 中央線検出による位置修正結果

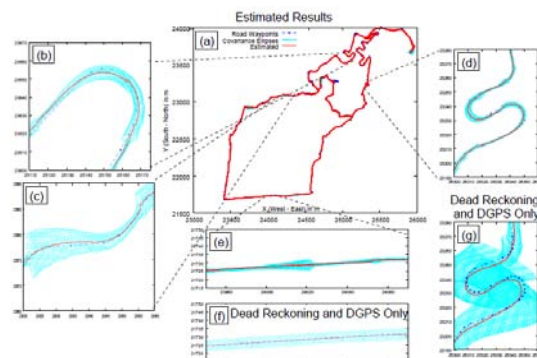


図 12 中央線検出と GPS 併用による位置修正結果

図 12 は中央線検出と GPS 併用によるデッドレコニングの累積誤差修正の様子である。GPS を併用したため、GPS の測位精度がよいところでは、図 11 の場合よりもさらに誤差楕円が小さくなっている場合があることがわかる。このように、併用による効果がよく現れていることがわかる。

以上は、本研究の成果のうち、次章発表論文における、[雑誌論文] ①, [学会発表] ①, ②, ④に密接に関連する成果を要約した。そのほか、[学会発表] ③⑥では GPS の測位値のうち信頼性の高いものを選別するフィルタリングアルゴリズムを示した。[学会発表] ⑤では、GPS 装置の測位方式のことなる機種を比較し、移動測位を前提とした場合の本研究で想定する環境中で、よりよい測位値を出力する測位方式・機種はどのようなものかを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件) .

- ① Y. Morales, A. Carballo, E. Takeuchi, A. Aburadani, and T. Tsubouchi: "Autonomous Robot Navigation in Outdoor Pedestrian Walkways," Journal of Field Robotics, vol.26, no.9, 2009 (採録決定) . 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① Y. Morales, E. Takeuchi, A. Carballo, W. Tokunaga, H. Kuniyoshi, A. Aburadani, A. Hirose, Y. Nagasaka, Y. Suzuki and T. Tsubouchi: "1Km Autonomous Robot Navigation on Outdoor Pedestrian Paths 'Running The Tsukuba Challenge 2007'," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 219-225, 2008/9/22, Nice, France.
- ② Y. Morales, E. Takeuchi and T. Tsubouchi : "Vehicle Localization in Outdoor Woodland Environments with sensor fault detection," "Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 449-454, 2008/5/19, Pasadena, USA.
- ③ Y. Morales, 坪内 孝司: 「Vehicle Localization on Outdoor Woodland Environments」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '08, 2P2-C11, (CD-ROM), 2008/6/5, 長野.
- ④ 油谷 篤志, 徳永 航, 竹内 栄二郎, Y. Morales, 坪内 孝司: 「落ち葉の多い路面における測域センサ情報に基づく障害物回避」, ロボティクス・メカトロニクス講

演会 '08, 2P2-D20, (CD-ROM), 2008/6/5, 長野.

- ⑤ Y. Morales and T. Tsubouchi: "GPS Moving Performance on Open Sky and Forested Paths," Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3180-3185, 2007/10/29, San Diego, USA.
- ⑥ 徳永 航, Y. Morales, 坪内 孝司: 「広角カメラ画像を用いた屋外ロボットナビゲーションのためのDGPS測位値弁別」, 第 8 回 SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 2F1-5, (CD-ROM), 2007/12/20, 広島.
- ⑦ 坪内 孝司, Y. Morales, 徳永 航, 竹内 栄二郎, A. Carballo, 城吉 宏泰, 鈴木 佑輔, 油谷 篤志, 廣澤 敦: 「筑波大学知能ロボット研究室『屋外組』における屋外走行ロボットのシステムインテグレーション」, 第 8 回 SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 3C3-6, (CD-ROM), 2007/12/20, 広島.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪内 孝司 (TSUBOUCHI TAKASHI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 80192649

(2) 研究分担者

大矢 晃久 (OYA AKIHISA)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号: 30241798

油田 信一 (YUTA SHIN'ICHI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 00092502

(3) 連携研究者

皿田 滋 (SARATA SHIGERU)
独立行政法人産業技術総合研究所・主任研究員
研究者番号: 00357170