

非接触型の並進移動量計測装置を用いた屋外移動ロボットの 自己位置推定モジュールの開発と屋外フィールドにおける性能評価

Development and Evaluation of Localization Module
using Non-contact Translation Measurement Device

○学 山内 元貴 (東北大) 正 永井 伊作 (岡山大)
正 永谷 圭司 (東北大) 正 吉田 和哉 (東北大)

Genki YAMAUCHI, Tohoku University, yamauchi@astro.mech.tohoku.ac.jp
Isaku NAGAI, Okayama University
Keiji NAGATANI, Tohoku University
Kazuya YOSHIDA, Tohoku University

In extreme environments, such as lunar surface or disaster area in the earth, it is expected for mobile robots to explore instead of human. However, in such environments, wheels or tracks of the robots are typically slipped, and thus, localization based on odometry is unreliable. To improve odometry localization, our research group has been developing a non-contact translation measurement device that uses a red laser module and an optical device. In this research, we developed a localization module that consists of the measurement device, Inertial Measurement Unit (IMU), and Global Positioning System (GPS). Furthermore, we developed 3D range system based on the localization module and a Laser Range Finder (LRF). In this paper, we introduce the localization module and an initial experimental result of recognition of 3D environment.

Key Words : Outdoor localization, Mobile robot, 3D Mapping

1 緒言

人の立ち入ることが困難な極限環境では、移動ロボットによる探査活動が期待されるが、解決すべき課題も多い。例えば、図 1(a) に示す月面や火星上における惑星探査ローバーは、地球との通信にかかる遅れや、通信量の制限といった問題があるため、ローバーには、走行経路の決定や障害物回避など、ある程度の自律性が要求される。その場合に必要となるテクノロジーとして、ロボット自身の正確な自己位置推定が挙げられる。また、図 1(b) に示す災害地における探査を行うレスキューロボットは、通常、遠隔操縦で動作するが、環境情報や要救助者の位置を認識し、これをオペレータに正確に伝えるためには、ロボット自身が自己位置を正確に把握する必要がある。

以上に示した通り、極限環境における位置推定能力は、極限作業ロボットには必要不可欠な能力であるが、車輪型やクローラ型の移動機構を有するロボットの場合、ロボットが砂や岩、瓦礫などに覆われた不整地環境を走行する際、車輪もしくはクローラと地面との間に生じるスリップにより位置推定精度が劣化する。したがって、車輪やクローラの回転数を計数して自己位置を推定するオドメトリ手法では、位置推定に大きな誤差が発生する可能性がある。

このような問題を解決するため、我々の研究グループでは、近年、非接触式の赤色レーザー光源と光学センサを用いた移動量計測装置 [1] を開発した。この移動量計測装置は、赤色レーザー光源と光学マウスに用いられる光学センサから構成されており、赤色レーザーを地面に照射し、そのレーザースペckルを光学センサが画像追跡することにより、並進移動量を計測することが可能となる。なお、レーザースペckルとは、レーザーを地面などの粗面に照射させた際に見られる、特有の明暗の模様のことである [2]。

この移動量計測装置と 1 軸ジャイロスコープを小型移動ロボットに搭載し、屋外環境における二次元自己位置推定を行ったところ、屋外において、ある程度の動作見込みが確認できた [3]。そこで、本研究では、移動量計測装置と慣性計測装置を用いて、自己位置推定モジュールを開発し、この



(a) Mars Exploration Rover (b) Rescue Robot(Quince)

Fig. 1 Mobile robots

モジュールの位置推定精度の評価を行うこととした。このモジュールは、移動量計測を非接触で行うことができるため、本モジュール単体で、ロボットの位置・姿勢計測を行うことが可能となる。さらに、本研究では、このモジュール前部に測域センサを斜めに固定して二次元距離情報の取得を行い、上述の自己位置推定と組み合わせることで、三次元環境地図の構築を試みる。

本稿では、移動量計測装置と慣性装置を用いた自己位置推定モジュールの構成と自己位置推定モジュールの評価結果について説明する。さらに、二次元距離情報を用いた三次元地図構築手法と、獲得した三次元環境地図について紹介する。

2 自己位置推定手法

移動量計測装置によって計測した移動速度と、慣性装置によって推定した姿勢を組み合わせることで、ロボットの自己位置は、(1),(2),(3)式で表すことができる [4]。

$$x_n = v_n \cos(\theta_n) \cos(\phi_n) \Delta t + x_{n-1} \quad (1)$$

$$y_n = v_n \sin(\theta_n) \cos(\phi_n) \Delta t + y_{n-1} \quad (2)$$

$$z_n = v_n \sin(\phi_n) \Delta t + z_{n-1} \quad (3)$$

ここで、 x, y, z はロボットの位置、 v は並進移動速度、 Δt は微小時間、 θ, ϕ はロボットのヨー角とピッチ角である。本式では、時刻 $n-1$ における位置 $x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}$ と、時刻 $n-1$ から n の間における位置推定計算を行うことで、時刻 n における位置 x_n, y_n, z_n を求めている。

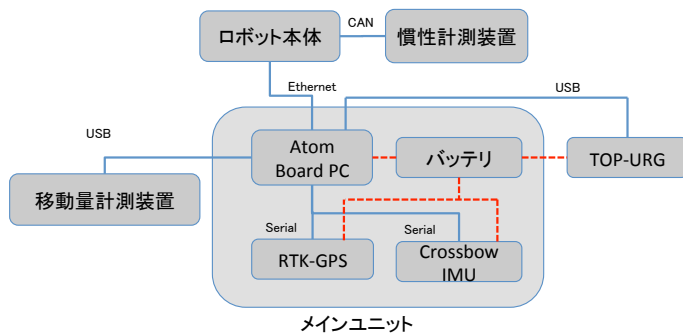


Fig. 2 Hardware system

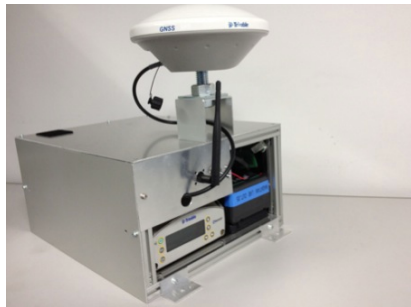


Fig. 3 Main unit

3 自己位置推定モジュールの開発

開発した自己位置推定モジュールは、ロボット底部に設置する移動量計測装置と、ロボット上部に設置する、メインユニットから構成される。図2に、開発したモジュールのハードウェア構成を示す。メインコントローラは、Axiomtek社製 Atom Board PC(SBC84831)を採用し、このボードPCに、移動量計測装置、慣性計測装置、測域センサを接続した。外部との通信には、Ethernet 経由にて行うこととした。なお、本稿執筆時には、慣性計測装置については、メインユニット内部の慣性計測装置 (Crossbow 社製 NAV440) ではなく、ロボット本体に搭載されたものを利用した。また、バッテリーは、IDX 社製 enduraH9S を用いることとした。開発したモジュールのメインユニットは、全幅 250mm、全長 350mm、全高 155mm、重量 7.2kg である。図3に開発したメインユニットを示す。

以下に、移動量計測装置と、慣性計測装置、GPS について説明する。

3.1 移動量計測装置

本研究で用いる移動量計測装置は、4 個の赤色レーザー光源と 1 個の光学センサから構成される(図4)。屋外環境において、レーザーを照射している対象に太陽光が入ると、移動量を計測できなくなるという問題があるため [3]、本装置は、ロボットの底面など、太陽光が入らない場所に設置する必要がある。

3.2 慣性計測装置

慣性計測装置には、ロール、ピッチ角推定を行う Silicon Sensing 社製 1 軸ジャイロスコープ (CRS07-02S)2 台、ヨー角推定を行う同社製の 1 軸ジャイロスコープ (CRS09-12)1 台、Crossbow 社製 3 軸加速度センサ (CXL04GP3) 1 台から構成されるものを用いることとした。ここで、ジャイロ

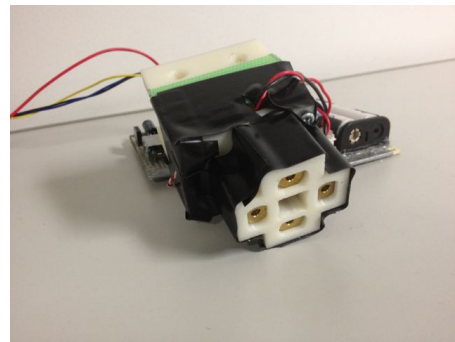


Fig. 4 Non-contact translation measurement device



Fig. 5 Outdoor mobile robot (El-verde)

スコープによって計測される各軸角速度、エンコーダーの計測値、加速度センサから計測される各軸加速度が十分に小さい場合、ロボットは静止していると判断し、その時のジャイロスコープの出力電圧からバイアス値の更新を行う。さらに、加速度センサから重力方向のベクトルを計測し、ロール角とピッチ角の補正を行うこととした [4]。なお、ジャイロスコープのバイアス値とは、ジャイロスコープが静止時に出力される電圧の値であり、センサ回転時には、バイアス値からのオフセットより角速度を計測する。

3.3 GPS

移動量計測装置と慣性計測装置に加え、Trimble 社製 GPS 受信機 (SPS-852) と GPS アンテナ (Zephyre Model 2) を、自己位置推定モジュールに搭載した。

3.4 実装

慣性計測装置を用いた自己位置推定精度の試験を行うにあたり、テストベッドとして、図5に示す屋外不整地移動ロボットを用いることとした。この移動ロボットは、ロッカリンク機構を有するステアリング型 4 輪駆動移動ロボットであり、ロボットのサイズは、全長 800mm、全幅 700 mm、高さ 350mm であり、重量がおよそ 30kg である自己位置推定モジュールのメインユニットは、移動ロボットの上部に設置し、移動量計測装置については、移動ロボットの底部に設置した。さらに、太陽光がロボットの底部に入らないように、ひさしを取り付けた。

4 屋外走行実験評価

4.1 実験方法

開発した位置推定モジュールの性能評価を行うため、東北大学工学部食堂横の広場にて三次元位置推定実験を行った。図6に実験環境を示す。この環境には勾配があり、総走

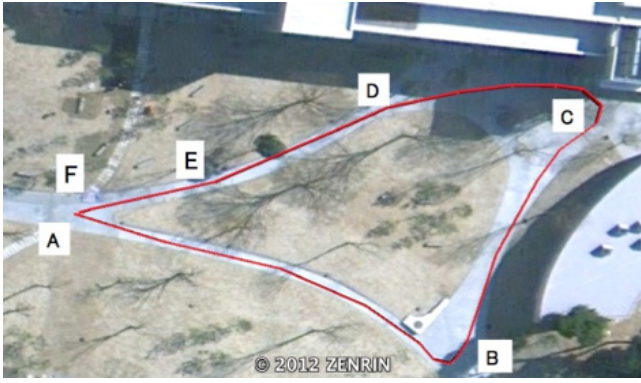


Fig. 6 Target environment

行距離を 200m ほど取れる。また、建物付近の一部を除き、GPS 衛星が十分に補足できることから、精度よく走行軌跡を取得することが可能である。走行実験は、遠隔操縦にて計 3 回行い、RTK-GPS により測位した実際の走行軌跡と、開発した位置推定モジュールが推定した位置との比較により、以下の 2 項目について評価を行った。なお、図 6 に示す、A,B,C,D,E,F 点付近にてロボットを停止させ、バイアス値の更新、ロール角、ピッチ角の補正を行った。

1. 移動量計測誤差

移動ロボットの実際の移動量に対する、移動量計測装置の計測誤差を以下の式より評価する。RTK-GPS により測位した地点間のノルムを、実際の移動量とした。

$$Error_{trans} = \frac{trans - trans_{GPS}}{trans_{GPS}} \quad (4)$$

ここで、 $trans$ は、移動量計測装置によって計測した移動量であり、 $trans_{gps}$ は RTK-GPS により計測した移動量である。

2. 位置推定誤差

走行を終了した時点での、RTK-GPS により測位した位置に対する、自己位置推定誤差を評価する。

4.2 実験結果および考察

計 3 回走行した結果、実際の走行距離と計測した移動距離を表 1 に示す。表 1 では、実際の走行軌跡との誤差 (m) と誤差率 (%) を表記した。

この結果より、195m の走行すると、平均で 4.3m ほど移動量計測に誤差が発生した。また、移動量計測装置による移動量の計測誤差率の平均は 2.16 % となり、屋内における砂上での計測実験における計測誤差率の 1.7 % とほぼ同等であった [1]。

Table 1 Errors in measuring translation

Trial	$Transition_{GPS}$ [m]	$Transition$ [m]	Error	
			[m]	[%]
1	195.65	192.83	2.82	1.44
2	196.54	192.38	4.16	2.11
3	195.92	190.15	5.77	2.94
Average	-	-	4.34	2.16

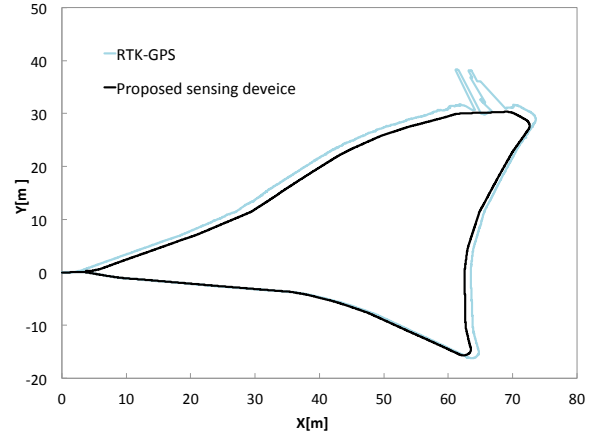


Fig. 7 2D localization result

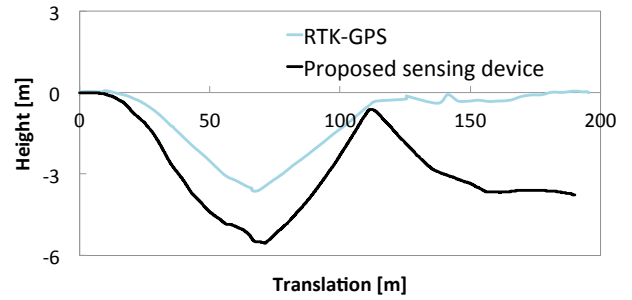


Fig. 8 Estimation height error

次に、走行軌跡の一例を 2 次元平面上に投影したものを図 7 に示す。(x,y)=(60,30) 付近の地点にて、RTK-GPS によって測位した位置が乱れている区間があるが、これは、食堂建物のごく近くを走行したことにより、マルチパスが発生したことが原因と考えられる。そこで、この区間付近においては、ホイールメジャーを用いて距離を測ることで、ロボットの走行軌跡の真値を求めることとした。

一方、走行を終了した地点における位置推定誤差を示したものを表 2 に示す。表 2 において、1 回目の走行では、推定誤差が X 方向に 11.34m、Y 方向に 3.27m、Z 方向に -1.20m となった。この走行結果は、2,3 回目の走行結果と比べ、大きな誤差が発生している。表 1 より、並進移動量の誤差は 3m 程度であるのに対し、位置推定誤差が、並進移動量の計測誤差よりも大きくなった要因として、慣性計測装置による姿勢推定に誤差が発生したものと考えられる。

次に、横軸に走行距離、縦軸に走行時の高さ方向の変位をとったものを図 8 に示す。この図より、ピッチ角推定に、多少の誤差が発生していることが分かる。誤差の原因として、実験場所の気温が低かったことにより発生した温度ドリフトが考えられる。なお、並進移動量が 100m 付近において、ピッチ角の傾きが他の区間と比較して大きく変動しているが、

Table 2 Estimation position errors

Trial	Estimated position error [m]		
	X	Y	Height
1	11.34	3.27	-1.20
2	0.37	2.37	-3.37
3	-0.30	3.23	-3.88
Average	3.80	2.96	-2.51

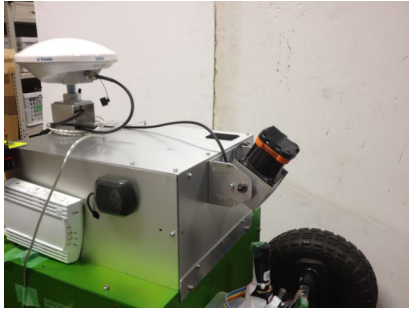


Fig. 9 Tilted TOP-URG

これは、ロボットを停止中、風の影響により、慣性計測装置の静止判定が行われなかったにもかかわらず、その地点に1分程度停止していたことから、誤差が蓄積したと考えられる。走行終了地点では、ピッチ角は安定していることから、静止判定が行われれば、補正は正常に行われることがわかった。

5 三次元環境認識

次に、開発した自己位置推定モジュールに測域センサを搭載して行った、3次元環境認識試験について述べる。測域センサには、北陽電機社製のTOP-URGを用いた。TOP-URGは、最大30[m]の測距能力を有し、270[deg]の二次元平面内の物体までの距離を0.25[deg]刻みで測定することが可能である。二次元スキャンに要する時間は25[msec]であり、25[msec]毎に1081点分の測距データと同期信号を出力する。

本研究では、TOP-URGを下向き斜めに30deg傾けて固定した(図9)。自己位置推定モジュールにより推定した自己位置と、TOP-URGで取得した2次元スキャンデータより3次元環境認識試験を行った。試験は、東北大学内のロータリーにて行った。図10(a)に試験環境を示す。

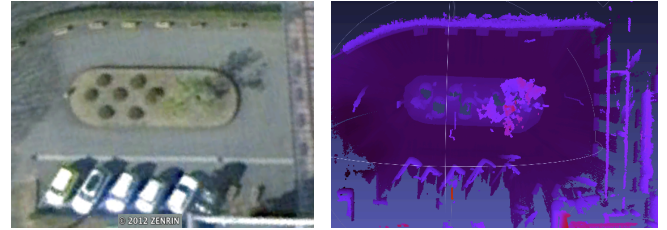
5.1 結果および考察

自己位置推定モジュールにより推定した自己位置と、2次元スキャンデータより構築した、3次元環境を図10(b)に示す。図10(b)より、ロボットが走行した環境情報が、提案した自己位置推定モジュールで獲得することができたことが分かる。本研究では、TOP-URGを下向き斜めに傾けて、距離情報を計測したため、周囲の3次元環境を取得するためには、走行する必要がある。認識できる環境には、限界があった。また、移動体が存在する場合、ノイズとして残ってしまうといった問題も認識された。

6 結言

非接触の移動量計測装置と慣性計測装置を用いて、自己位置推定モジュールを開発した。この装置を利用し、東北大学工学部食堂横の広場にて、自己位置推定モジュールの3次元自己位置推定実験を行い、移動量計測誤差の評価と、位置推定誤差の評価を行った。

次に、自己位置推定モジュールのメインユニットに、測域センサを取り付け、自己位置推定モジュールにより推定した位置と、測域センサの2次元スキャンデータより、3次元環境認識を行った。測域センサは斜めに固定したため、移動ロボットが停止した状態では、周囲の環境を取得することができない。今後は、測域センサを回転させることにより、移動ロボットが停止した状態でも周囲の環境を取得できるように変更する予定である([5])。



(a) Target environment (b) Point cloud

Fig. 10 3D mapping result

文献

- [1] Isaku Nagai, Keigo Watanabe, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Noncontact Position Estimation Device with Optical Sensor and Laser Sources for Mobile Robots Traversing Slippery Terrains", 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3422-3427 (2010-10)
- [2] 朝倉利光, 魚住純, "レーザースペックル研究の展開", 電子科学研究, Vol.4, pp.4-12, 1997.
- [3] 山内元貴, 永井伊作, 野寄敬宏, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, "超小型ロボットに搭載可能な非接触型自己位置推定デバイスの屋外環境での性能評価. 第12回(社)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論文集, (2011-12)
- [4] Keiji NAGATANI, Naoki TOKUNAGA, Yoshito OKADA, Kazuya YOSHIDA, "Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain", Proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.25-30 (2008-10)
- [5] 大竹一樹, 岡田佳都, 永谷圭司, 吉田和哉, "測域センサと赤外線カメラを用いた三次元温度分布マッピングシステムの構築", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2011, 1P1-E03, 1-4 (2011-05)