

レーザ光源と光学センサを用いたスリッパに頑強な 移動ロボット用位置推定システムの構築

Robust Positioning Device with Optical Sensor and Dual Laser Sources for Mobile Robots Traversing Slippery Terrains

○正 永井 伊作 (岡山大) 正 渡辺 桂吾 (岡山大)
正 永谷 圭司 (東北大) 正 吉田 和哉 (東北大)

Isaku NAGAI, Okayama University, in@sys.okayama-u.ac.jp
Keigo WATANABE, Okayama University, watanabe@sys.okayama-u.ac.jp
Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@ieee.org
Kazuya YOSHIDA, Tohoku University, yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

This paper describes the development of a sensing device that can be used to estimate the position of mobile robots on slippery terrains. The device consists of an optical sensor designed for a computer mouse and dual laser light sources for generating a laser speckle pattern. It detects the motion of a moving surface at a large distance from the surface, from 80 mm to 300 mm, by tracking the laser speckle pattern. The use of dual laser light sources makes the tracking robust for large distances from the ground. Some fundamental experiments validated the performance of the device, which tracked surfaces with high accuracy under various height conditions. Finally, the device was mounted on our mobile robot, and simple experiments were conducted on a slippery sandy terrain to evaluate the usefulness of the device as a noncontact odometry system.

Key Words: Mobile Robot, Positioning, Laser, Optical Sensor

1. はじめに

惑星探査ローバーが月面上のレゴリスと呼ばれる砂状路面を走行するために、あるいは、レスキューロボットが瓦礫や岩などが散らばる不整地を移動するために、幅の広い車輪やクローラがそのような移動ロボットではよく用いられる。これらのロボットが自律的な移動を行うためには自己位置推定の仕組みも必要となる。しかしながら、上で述べた状況下では車輪と地面との間に生じる滑りが大きいため、車輪の回転情報を利用する従来のオドメトリでは十分な精度の位置情報を得ることができない。車輪のすべりに影響されずに位置を推定するためには、非接触な方式の計測手段を用いることが考えられる。そのような計測手段のひとつにレーザや LED 光源を用いる光学式マウスためのセンサがある。光学式マウスに使われるセンサは本来、マウスカーソルによるポインティングを実現するためのものであるが、このセンサを移動ロボットの本体下部に走行面へ向けて取り付けることで、ロボットの移動量や2次元的位置を推定することができる。このセンサ単体ではロボットの姿勢変化までは推定できないが、2個以上のセンサを使うことでロボットの姿勢を含む平面位置を推定することができる[1]。ただし、この場合、センサはもともマウス用途に設計されているため、センサは走行面に密着させた状態でなければ十分に機能せず、走行面からわずかでも離れたりとすると、計測精度が著しく低下したり、機能しなくなったりする。よって、このセンサをそのまま使っても、地面が柔らかいために車輪が沈むような状況で使うロボットのための実用的な位置計測手段とはならない。走行面からある程度離れた高さで使用するために、センサに標準で付属するレンズを取り外し、ある焦点距離をもつ別のレンズを組み合わせる方法もあるが、レンズを正確に位置させる難しさや、レンズのためにスペースが必要となる問題が生じる。また、そのようにレンズを併用する場合、高さ変化にともなって視野幅が変化することに起因する推定移動量の変化という問題もある。高さすなわち対象面までの距離に影響されることなく物体を常に一定の大きさで撮影する手段としてテレ

セントリックレンズという特殊なレンズもあるが、それは大変高価な上に、高さ方向にかなり大きなスペースを必要とし、また、被写界深度がそれほど大きくないという欠点をもつ。

本研究では、車輪が滑ったり地面に沈んだりする移動ロボットの位置推定のために、光学式マウス用のセンサを用いた位置推定装置を開発した。本装置ではメーカーが提供するセンサ専用のレンズ、ピンホール部品およびレーザ光源はセンサから取り外されており、代わりに2個の別のレーザ光源が組み合わされている。以降では開発した装置、基本性能を評価した実験結果および我々の研究グループで開発した移動ロボットに取り付けて位置推定を行った実験結果について述べる。

2. 位置推定装置

2.1 レーザスペckルと非接触計測

開発した位置推定装置の計測原理は、レーザスペckルの画像追跡に基づく。レーザスペckルとは、物体の表面で反射したレーザ光の干渉によって生じるコントラストの強い不規則な模様のことである。レーザ光は元々、位相がよく揃ったコヒーレントな、すなわち可干渉性をもつ光であるが、その波長より十分に大きな表面荒さを持つ対象面で反射した場合、反射光において位相が揃う場所と揃わない場所が空間上に無数に生じる。位相がよく揃っている点は反射光同士の干渉によって明るく、揃っていない点は暗くなり、このような反射光が2次元画像センサへ入射してレーザスペckルは観察される。このような発生原理のため、レーザスペckルおよびその移動はレンズ使用の有無に関わらず離れた位置で観測できる。光学式マウスでは、微小領域を拡大して分解能を向上させるためにレンズを用いている。

このようなレーザスペckル現象はレーザ光の発明された当初から知られており、変位やひずみの計測に応用されてきた。また、移動ロボットにおけるすべり計測にレーザスペckル速度計を使った例[2]もある。レーザスペckルはカメラのCCDやマウスの光学センサによって簡単に撮影できるが、

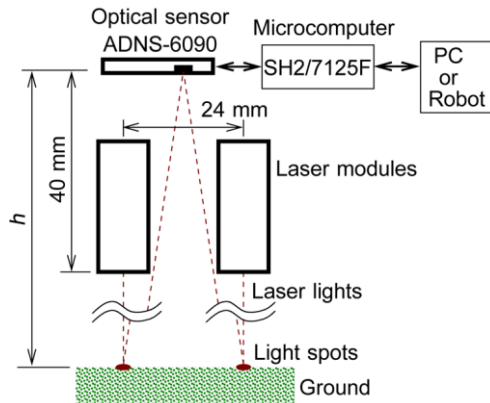


Fig. 1 Distances between the optical sensor, ground, and laser modules in sensing device.



Fig. 2 Optical sensor and two laser modules.

撮像素子上でのスペックルの移動量はセンサおよびレーザ光源とレーザスポットの距離や角度によって複雑に変化する[3, 4]. なお, ここで述べた光源からスポットまでの距離については, レーザ光の平行度によっても変わり, 単純に光源からスポットまでの物理的な距離というわけではない. レーザ光の平行度を測定することは容易ではないこともあり, 本研究では高さ変化にともなう移動量の変化特性を, 装置と移動面との距離 h を様々に変化させて実験的に調べることにした.

2.2 位置推定装置の設計

本装置における構成要素間の各距離およびブロック図を図1に示す. また, 本装置には図2に示すように光学マウス用センサ Avago ADNS-6090[5]とレーザ光源モジュール LM-101-A2 が用いられる. この光学センサはメーカーの提供する標準レンズが付いた状態で, 1650 mm/s の追跡可能な最大速度, 31.5~118 カウント/mm の選択可能な分解能という仕様をもつ. 用いた光源モジュールにはレンズが内蔵されておりほぼ平行な赤色(波長 650 nm, 出力 1mW 未満)のレーザ光が放射される. 目視による測定でレーザ光のスポット径は 3.7mm である. レーザ光源モジュールは2個取り付けられており, 切り替えスイッチによりビーム本数を1本または2本から選択できる.

本装置による位置推定の流れは次のとおりである. まず, センサはX軸およびY軸方向のフレーム時間あたりの微小移動量を計測する. 次に, これらの微小移動量は 0.2 ms ごとにマイコンボード SH2/7125F へ送信され, このマイコン内で積算され, 相対移動量が更新される. 本装置を利用するロボットあるいはPCはこのマイコン内に蓄えられている相対移動量を任意のタイミングで読み出すことができる. 最後に, ロボットあるいはPCは読み出した値を積算することで現在位置



Fig. 3 Experiment environment. A robot arm moves the sensing device in a specified direction with accuracies of 0.1 mm in position and 0.1° in posture.

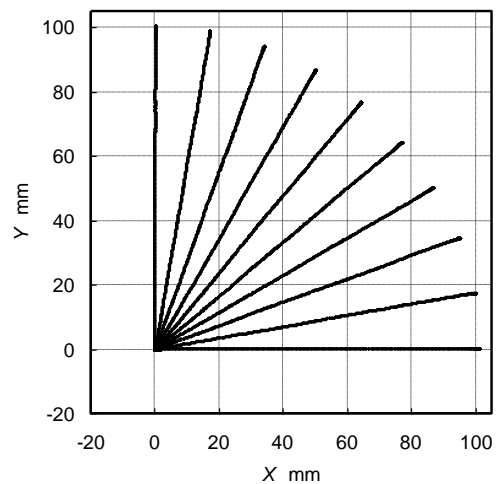


Fig. 4 Measurement result obtained by moving sensing device from origin in different directions.

を得る.

3. 基本性能の評価

ロボットの位置推定のために十分な性能を本装置が持っているかどうか確認するために, いくつかの実験を行って基本的な性能を評価した. 本装置を図3に示すロボットアーム Mitsubishi RV-M2 の手首に取り付けて移動させ, ロボットに与えた移動量と本装置の出力を比較することで計測精度を評価した. このロボットアームは位置 0.1 mm, 角度 0.1° の繰り返し位置決め精度を持つ. また, すべての実験に先立って本装置の位置分解能を実測により得た. ロボットアームにより本装置を対象面からの高さ 100 mm, 速度 50 mm/s で白紙上をセンサのY軸方向へ 200 mm だけ移動させたところ, 本装置の分解能は 11.3 カウント/mm であった. 以降で述べる実験では本装置の分解能としてこの値を用いている.

3.1 高さ変化のない並進移動

本装置を高さ変化が生じないように様々な方向へ並進移動させて, 移動方向によって精度に違いがあるかどうかを調べた. 白紙上からの高さを 100mm に保ったまま速度 50 mm/s で, ロボットアームにより本装置を原点から 10 種類の方向へ 100

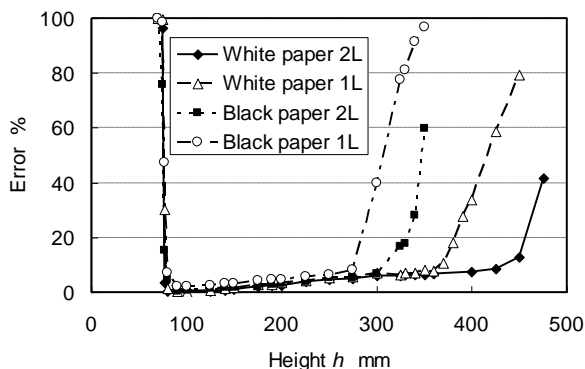


Fig. 5 Measurement errors for different distances between sensor and surface. White and black papers were used in the experiment. 2L and 1L indicate the number of laser sources used.

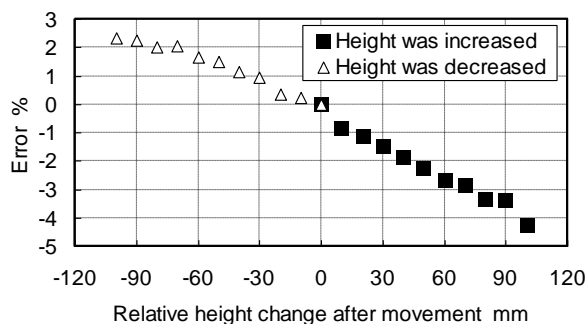


Fig. 6 Measurement error for different heights during 200-mm translation in Y-direction.

mm 移動させたときの結果を図4に示す。この図は10種類のすべての方向について本装置から読み出した値をプロットしたものである。移動量に対する終点における理想値との誤差の平均は0.6%であった。またその誤差の最大は1.5%であった。これらの結果から本装置には移動方向による計測精度の違いはほとんどないと言える。またこの図から本装置が出力する位置のばらつきはほとんどないことが分かる。

3.2 高さの違いによる影響

対象面からの高さによって計測値がどう異なるかを調べた。対象面として白と黒の2種類の紙を用いた。また、レーザー光源が1つの場合と2つの場合のそれぞれについて調べた。ある高さを維持したままロボットアームによって本装置を速度50 mm/s でY軸方向へ200 mm 並進移動させたときの推定値の誤差を図5に示す。この図で2Lおよび1Lはレーザー光源の数を示す。この結果から、推定値の誤差は、高さが80 mmから大きくなるに従って徐々に大きくなり、ある高さ付近から急激に上昇する結果となった。黒紙より白紙の方が、また、光源の多い方が、高さの広い範囲に対応できる結果になった理由は、対象面で反射するレーザー光の輝度が大きく、センサ内における画像追跡に貢献したものと思われる。実験の結果、高さによって計測値が異なる傾向はあるものの、高さを100 mmから200 mmに限って言えばその差は5%未満であった。

3.3 高さ変化を伴う並進移動

移動ロボットが柔らかい地面上を走行する場合、その車輪

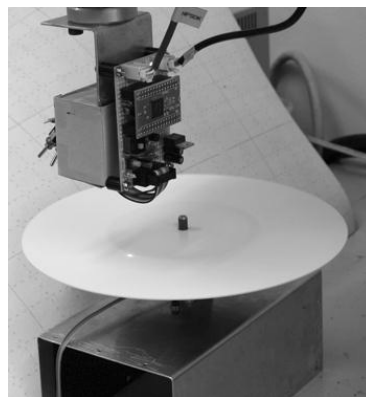


Fig. 7 Turntable driven by motor for measuring maximum velocity of tracking.

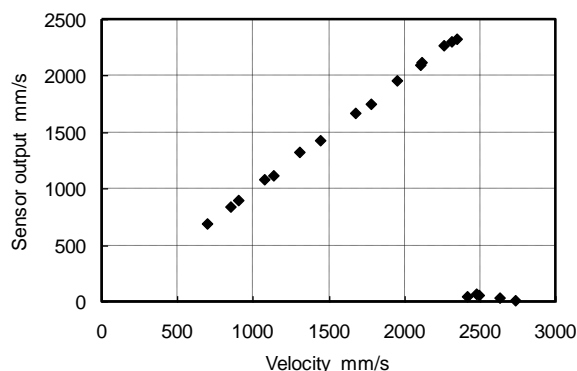


Fig. 8 Result of sensor output for surface moving at very high speed with sensor placed on plastic plate rotated by turntable.

は走行するにつれて地面の中へ沈む。このような水平方向の移動と垂直方向の移動が同時に発生する条件下での本装置の計測精度を調べた。センサのY軸方向に200 mmだけ移動させる間に指定した量だけ高さが比例して増加あるいは減少する運動をロボットアームにより発生させたとき、本装置が推定したY座標の誤差を図6に示す。この図の水平軸は終点における高さ変化量を示す。この実験結果から、移動中に高さが増加すると推定値は正確な値に対して小さめに出力され、逆に、高さが減少すると推定値は大きめに出力されることが分かる。高さ変化は推定値へ影響を与えるものの、高さが100mm変化した場合でも推定された並進移動量の誤差は5%未満であった。

3.4 計測可能な最大速度

本装置で精度良く計測できる速度の最大を調べた。ここまでの実験に用いたロボットアームでは500 mm/s以上の速度を発生させられないため、図7に示すモータによって駆動する回転テーブルを用いて、対象面の高速な移動を発生させた。この回転テーブルのテーブル表面は白色プラスチックでできており、その回転数は回転テーブルの下に設置した反射型フォトインタラプタが出力するパルスの周期から計算できる。そして、この回転数および中心軸からセンサ受光部までの半径から周速度すなわち対象面の移動速度を求めた。与えた移動速度と本装置の出力から求めた速度の関係を示す実験結果

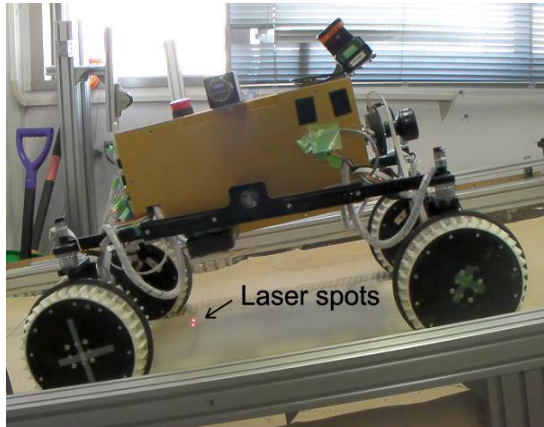


Fig. 9 Rover vehicle with proposed sensing device climbing 10° inclined sandy terrain.

を図8に示す。この結果から本装置は速度 2300 mm/s (約 8.3 km/h) までは大きな誤差もなく対象物の動きを追跡できることが分かる。この速度限界は我々が使用しようとするロボットにとって十分に大きい。

4. ローバーの位置推定実験

ここまで述べた実験の結果から本装置は移動ロボットの位置推定に十分利用できることと結論付け、実際のロボットに取り付けて位置推定性能を評価することとした。本装置を図9に示す研究用月面探査ローバーに取り付け、傾斜した砂地面を登坂させて、車輪回転情報に基づく走行量(以下オドメトリ)と本装置による推定値とを比較した。この図で左後輪近くにレーザーのスポットが見えることから分かるように、ローバー本体の左後輪近くに高さ 150mm で地面に対して垂直になるよう本装置を設置した。このローバーは重量 24 kg, 車輪径 100 mm である。この実験ではローバーの車輪を、すべりが無い状態で速度 40 mm/s とする回転数すなわち 7.5 rpm で定速回転させた。また、この砂地ではローバーの車輪は走行するにつれて 30 mm 程度沈んだ。

地面の傾斜角を 10° に設定してローバーを 3 回走行させたときの結果を表 1 示す。ここで実測値はメジャーを用いて得た値である。傾斜角が 10° の場合、車輪は多少滑りながらローバーは走行し、オドメトリの平均誤差は 38.3% であった。一方、本装置による位置推定値はその平均誤差が 1.7% であった。

傾斜角を 12° に設定してローバーを 3 回走行させたときの結果を表 2 示す。傾斜角を 12° と少し大きくしただけで、ローバーの車輪はかなり滑る条件となった。そして、オドメトリの平均誤差は 10° のときよりもかなり大きく 177.3% となった。しかしそのような条件下でも本装置による位置推定値の平均は 2.2% であり、車輪の滑りが相当増えた状況でも安定した位置推定結果が得られた。

これらの実験結果から本装置によって、車輪の滑りや沈みに対して、従来の車輪情報に基づくオドメトリよりもロバストな位置推定が達成されたと言える。

5. まとめ

車輪が滑ったり沈んだりするような柔らかい路面を走行する移動ロボットの自己位置推定のために、光学マウスのセンサとレーザー光源を用いた位置推定装置を提案し、その装置の基本的な性能を評価した実験結果および実際の移動ロボットに取り付けて位置を推定した実験結果について述べた。

Table 1 Absolute error in displacement estimated by conventional odometer and proposed sensing device on sandy terrain inclined at 10°.

Trial	Actual [mm]	Absolute error [%]	
		Mechanical odometer	Proposed sensing device
1	1030	37.9	3.9
2	950	40.0	1.1
3	970	37.1	0.0
Average		38.3	1.7

Table 2 Absolute error in displacement estimated by conventional odometer and proposed sensing device on sandy terrain inclined at 12°.

Trial	Actual [mm]	Absolute error [%]	
		Mechanical odometer	Proposed sensing device
1	970	175.3	1.0
2	910	193.4	2.2
3	900	163.3	3.3
Average		177.3	2.2

実験の結果、本装置は平面内運動を X 軸と Y 軸の両方向とも同程度の精度で計測できることが分かった。また、レーザー光をより多く反射する対象面の方が、より大きな高さでの計測に対応できることが分かった。さらに、レーザー光源は 1 個より 2 個の方がより大きな高さでの計測に対応できることが分かった。水平方向に 200 mm 移動する間に高さが 100 mm 変化する運動に対しても推定位置の誤差は 5% 未満であることが分かった。回転テーブルを用いた実験の結果、本装置で計測できる速度の上限は 2300 mm/s であることが分かった。

提案装置を研究用月面探査ローバーに取り付け、傾斜した砂地を走行させる実験の結果、車輪の回転情報に基づくオドメトリは滑りと沈みの影響により大きな位置誤差を生じたが、本装置は平均誤差 2.2% 未満の安定した位置推定結果を出力した。よって、本装置は滑りやすい路面を走行する移動ロボットの位置推定装置として十分利用できることと判断できる。

本装置はロボットの姿勢変化すなわち回転運動を計測することが原理的にできないため、ロボットの姿勢計測も可能な位置推定システムを構築するには、ジャイロセンサなどの他のセンサを組み合わせる必要があると思われる。また、本装置は小型かつ低コストで製作できるため、複数センサを組み合わせることも難しくない。複数センサを使った場合には精度の改善や 3 次元の位置推定ができると思われる。

謝辞

本研究は科研費 (21360110) の助成を受けたものである。

文献

- [1] D. Sekimori, F. Miyazaki, "Precise dead-reckoning for mobile robots using multiple optical mouse sensors," *Informatics in Control, Automation and Robotics II*, pp.145-151, 2007.
- [2] 竹迫康次, 西本澄, "車輪型移動ロボットのすべりの計測(レーザースペックルの変位計測の適用)", 日本機械学会中国四国支部第 36 期総会・講演会論文集, pp.285-286, 1998.
- [3] I. Yamaguchi, "Theory and applications of speckle displacement and decorrelation," *Speckle Metrology*, edited by R.S. Sirohi, Marcel Dekker, Inc., New York, pp.1-39, 1993.
- [4] 山ロー一郎, "レーザースペックルひずみ計と最近の展望(連載講義)", 溶接学会誌, vol.73-7, pp.502-506, 2007.
- [5] Avago, ADNS-6090 Gaming Laser Mouse Sensor Data Sheet, <http://www.avagotech.com>, 2008.