

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420217

研究課題名(和文) 接地点検出車輪とジャイロセンサを用いる移動ロボットの高精度三次元自己位置推定

研究課題名(英文) A new 3D-odometry using tactile wheels and gyroscopes

研究代表者

市村 智康(大谷智康)(Ichimura, Tomoyasu)

群馬工業高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号：60360327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：車輪型移動ロボットの三次元自己位置推定において、従来から利用されるジャイロセンサに加え、接地点検出車輪を用いて、三次元空間での正確なロボットの運動を求め、その位置を推定する手法について取組んだ。まず、本手法において重要な接地点検出車輪を考案し試作した。また、この車輪とジャイロセンサを備える検証用ロボットを試作した。さらに、FRP製の走行面とモーションキャプチャ装置を用いて、本手法を検証するための実験を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new 3D-odometry using tactile wheels and gyroscopes to achieve a better locational accuracy of standard 3D-odometry. This method estimates the location of a robot by integrating the turning motion around an instantaneous 3D axis that is computed from data on the wheel-terrain contact points and the attitude. Firstly, a tactile wheel using an infrared proximity sensor was made and evaluated. Furthermore, we made a verification bike robot equipped with the tactile wheels and gyroscopes. Finally, the new method was verified on an uneven terrain made of FRP by a motion capture system.

研究分野：移動ロボット

キーワード：三次元自己位置推定 接地点検出 ジャイロセンサ 2輪ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

現在、屋外における移動ロボットの研究が盛んに行われ、ロボットの移動範囲は、年々拡大している。レーザレンジファインダ、ステレオカメラ、GPSなどの外界センサを用いる自己位置推定法の発展が、こうした状況の背景にある。一方、車輪の回転角などの内界センサを用いる自己位置推定法は、平坦でない環境へは適用できず、屋外では限定的な手法とされてきた。しかし、内界センサを用いる自己位置推定法は、累積誤差の問題を有するが、確実性、リアルタイム性、低コストなどのメリットがある。こうした中、近年、車輪の回転角に加え、ジャイロセンサの情報を用いる三次元の自己位置推定法が提案され、内界センサによる手法も見直されつつある。ところが、ジャイロセンサを用いる手法の多くは、船舶や航空機のように、ジャイロセンサが示す機体前後方向の速度を積分し、自己位置を推定する。そのため、本来考慮されるべき走行面の情報が推定値へ反映されず、特に走行面の高さ方向の誤差が大ききという問題がある。

そこで、この問題を解決するため、ジャイロセンサの情報に加え、接地点情報を考慮する三次元の自己位置推定法について研究を行ってきた。本手法の基本的な手順は、ロボットの姿勢情報と車輪の接地点情報を用いて、瞬間的なロボットの旋回軸(点ではない)を求め、正確なロボットの速度ベクトルを算出、積分することである。

まず、接地点検出の方法について、研究を行った。これまで、車輪の接地点検出法として、ひずみゲージ、小型スイッチ、反射型赤外線センサを用いる手法が提案されている。しかし、多くの接地点検出車輪は、センサを車輪へ内蔵するため、その構造が車輪の大きさに依存し、用途は限定される。そこで、センサを車輪外部へ装着する2種類の接地点検出車輪を独自に考案した。一方はイメージセンサを用いる手法、他方は機械的な探針を用いる手法である。

また、申請課題を理論的に検証するために、特に車輪と走行面の空間的な関係を具体的に扱える解析手法を必要とする。そこで、車輪型ロボットの曲面上の走行解析のための運動学シミュレーション法を提案した。本シミュレーション法を用いて、従来のジャイロのみを用いる自己位置推定法と提案する申請課題の手法を比較し、提案手法の有効性を示した。

さらに、接地点検出の精度が推定値へ与える影響を明らかにするために、接地点位置の誤差を含む自己位置推定シミュレーションを行い、接地点検出誤差と自己位置推定値の関係について明らかにした。現在、申請課題の手法を実証するためのロボットを試作している。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで積極的に利用されてこなかった走行面の情報を用いて、内界センサによる高精度な三次元自己位置推定法を検証することである。

## 3. 研究の方法

### (1) 接地点検出車輪の改良

既にイメージセンサや機械的な探針を用いる2種類の接地点検出車輪を提案しているが、自己位置推定シミュレーションの結果、接地点の検出誤差が推定結果へ大きく影響することが分かった。そこで、これまでより精度の良い新たな接地点検出車輪を検討中である。イメージセンサを用いる手法は、非接触型であるため車輪の接地状態へ干渉しないが、分解能に問題があった。また、機械的な探針を用いる手法は、ポテンショメータを用いるため高い分解能を有したが、走行時に検出誤差が大きくなる問題があった。そこで、両者の利点を融合し、探針の先端に小型の赤外線近接センサを取付け、車輪の接地状態へ影響を与えず高い分解能を有する新たな接地点検出車輪を考案し、試作する。

### (2) ロボットの完成

平坦でない屋外環境を対象とする移動ロボットの課題として、不整地における走破性、車輪のスリップなどがあり、こうした問題を解決する優れた手法や機構が提案されている。しかし、本研究では、自己位置推定法の問題に注力するため、操舵可能な車輪型ロボットとして最も単純であり、また非平面上において原理的にスリップの生じにくいステアリング型2輪ロボット(1輪駆動かつ1輪操舵)を採用し、試作を行っている。本ロボットは実証実験用であり、極めて低速で走行する場合も考慮し、慣性ロータと1軸のジャイロセンサを用いる倒立機構を備える。試作した倒立機構は比較的大きなロータを採用しており、傾斜のある走行面であっても十分に安定走行を行える。本ロボットへ、改良した接地点検出車輪、3軸ジャイロセンサなどのセンサ系を追加し、自己位置推定を行えるシステムとして完成させる。

### (3) 走行面の製作

走行面については、自然環境を利用する方法も考えられるが、ロボットの経路をモーションキャプチャで測定するため、屋内において製作、設置する。また、実証実験に用いる走行面は、出来る限り広い方が好ましいが、立体の構造物であるため、費用の面で問題がある。そこで、まず三次元CADソフトウェアを用いて走行面を設計し、これを等高線へ変換する。さらに、この等高線をスタイロフォーム(硬質の発泡スチロール)の板へ貼り付け、等高線の形状にしたがい切り抜く。これを積み重ね走行面の概形を製作し、その隙間を石膏で埋め成形する。

(4) 接地点検出車輪とジャイロセンサを用いる三次元自己位置推定法の精度評価

三次元自己位置推定の実験へ入る前に、予備実験として走行面上でロボットの試験走行を行う。また、モーションキャプチャの機能を応用し、次のように走行面の数値データを取得する。まず、走行面上に多数の反射マーカを取付け、モーションキャプチャを用いてマーカの三次元座標値を測定する。次に、得られた測定値を三次元地表マップ作成ソフトウェアへ取り込み、走行面の数値データへ変換する。上述の走行面の数値データを用いて、事前にシミュレーションを行い理論上の推定結果を算出しておくとともに、推定経路と走行面形状の関係を調べる資料とする。

次に、形状の異なる様々な走行面上において実験を繰り返し、ロボットの自己位置推定を行う。ロボットの経路については、モーションキャプチャを用いて取得し、従来のジャイロセンサのみを用いる手法と、接地点情報を考慮する提案手法の精度を比較する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 接地点検出車輪の改良

本車輪は、図1に示すように、ポテンシオメータ、DCモータ、アーム、平歯車、赤外線近接センサから構成される。

ポテンシオメータとDCモータは車輪の回転の影響を受けないロボット本体に固定される。アームは車輪と同軸周りで自由に回転できるように車軸へ取り付けられる。また、アームはDCモータと歯車で駆動され、その先端の赤外線近接センサを用いて車輪円周上を走査する。なお、アームの回転角は、平歯車を介したポテンシオメータを用いて検出される。

模擬接地面上において接地点を変化させ、各接地点の接地角を測定した。その結果、最大検出誤差は、1.5degであった。これは、イメージセンサを用いる手法より小さいが、機械的な探針を用いる手法と同程度である。しかし、本車輪は、多点検出が可能であり、車輪の接触状態へ影響を与えないため、本研究に最適であり、本車輪を採用することとした。

##### (2) ロボットの完成

ステアリング型倒立2輪ロボットへ上述の接地点検出車輪と3軸ジャイロセンサを追加し、自己位置推定を行えるシステムとした。接地点検出車輪と3軸ジャイロセンサは、それぞれ前後輪と重心近くへ配置した。

本ロボットのシステム構成を図2示す。本ロボットは3つのMCUを用いて制御される。MCU1は、MCU2、3の管理と自己位置推定および外部との通信を行う。また、MCU1は、自己位置推定を行うため、接地点検出装置、慣性計測装置、操舵角検出用ポテンシオメータ、駆動輪回転角検出用ロータリエンコーダに直結される。MCU2、3は、それぞれ操舵を含む走行と倒立を制御する。

##### (3) 走行面の製作

当初の計画にしたがい、形状を三次元CADソフトウェア上で設計し、走行面をスタイロ

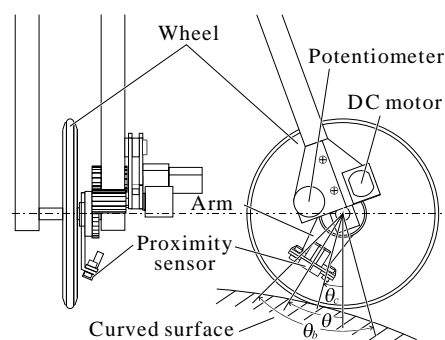


図1 赤外線近接センサ型接地点検出車

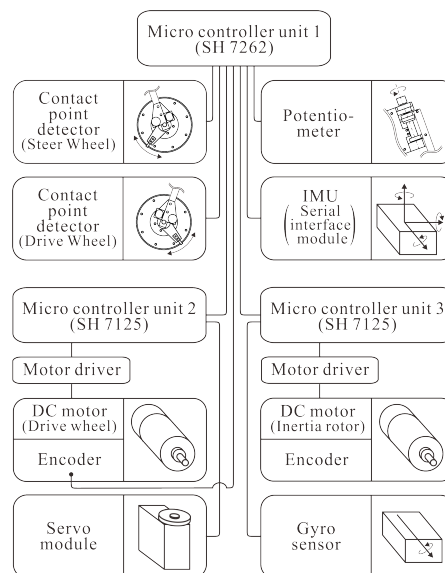


図2 2輪ロボットのシステム構成

フォームと石膏で成形した。しかし、2輪ロボットの基本走行実験を繰り返したところ、走行面である石膏の一部に欠けが発生した。自己位置推定方の検証実験において、走行面の形状維持は重要である。そこで、走行面の材質を再検討し、試作した石膏の走行面を型として、FRP（繊維強化プラスチック）を用いて走行面を成型した。本成型は、FRP成型に必要な物品購入費と作業時間を考慮し、外注によって実施した。

##### (4) 接地点検出車輪とジャイロセンサを用いる三次元自己位置推定法の精度評価

当初計画においては、平成28年度に、モーションキャプチャ装置の機能を応用し、走行面の数値データを測定後、同じ走行面上で2輪ロボットの走行と自己位置推定を行い、自己位置の推定結果と実測結果およびシミュレーション結果を比較する計画であった。しかし、平成27年度の申請者の現在の所属機関である群馬工業高等専門学校への異動のため、モーションキャプチャ装置の使用が不可能となったため、異動前の平成26年度内に前所属機関において、代替簡易測定システムを購入した。平成27年度に、簡易測定システムを用いた実験を行ったが、より高精

度な計測の必要なことが分かった。そこで、平成 28 年度に異動前所属機関の教員の協力を求め、申請時のモーションキャプチャ装置を使用し測定実験を行った。しかし、他機関に設置された装置であるため、十分な実験期間を設けられず、当初の計画終了年度である平成 28 年度内での申請課題の完了が困難となった。平成 29 年度におけるモーションキャプチャ装置の貸与について、前所属機関の教員の協力を得た上で、申請課題の実施期間の延長を行い、引続き実験を行った。

まず、製作した走行面において、2 輪ロボットの試験走行を行った。曲面上の直進、低速における旋回および操舵角変更時の安定性の確認を行い、製作した曲面上において 2 輪ロボットが転倒せずに走行可能であるのが確認された。

つぎに、走行面の形状を測定するため、曲面上に 0.1m 間隔で反射マーカを設置し、3D モーションキャプチャを用いて反射マーカの位置を計測した(図 3)。地表マップ作成ツールを用いて、上述の計測されたマーカの位置座標データを地形データへ変換し、さらにその地形データを、3 次元メッシュ処理システムを用いて STL データへ変換し、シミュレータへ取り込んだ(図 4)。

上述の走行面の数値データをもとに、曲面上における走行シミュレーションと実走行の比較を行った。直進走行の比較結果から、一定方向に軌跡がずれるのが分かった。これは、本シミュレータが運動学のみを考慮しており、曲率の大きい面を走行する場合に発生する車輪のスリップを再現できないためと考えられる。また、旋回走行の比較結果から、走行距離の増加にともない、進行方向面において大きな誤差が発生するのが分かった。この主な原因は、2 輪ロボットの操舵機構のバックラッシュであり、曲率の大きな面において、車輪が横方向の力を受け、操舵角が変化したためと推測される。上述のように、予備実験における問題点が明らかとなり、その対策が必要となった。

今年度が最終年度であり、自己位置推定法の検証に至らなかったが、検証実験における車輪のスリップ、操舵機構などの問題点は明らかになった。今後は、既に完成した実験環境において検証を継続し、接地点検出車輪とジャイロセンサを用いる三次元自己位置推定法の実現を検討する。

#### 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 3 件)

T. Ichimura and W. Choi: Influence of Wheel-Terrain Contact Point Information Errors on the Accuracy of Three-

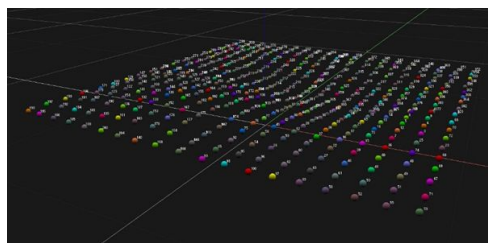


図 3 走行面形状の測定結果

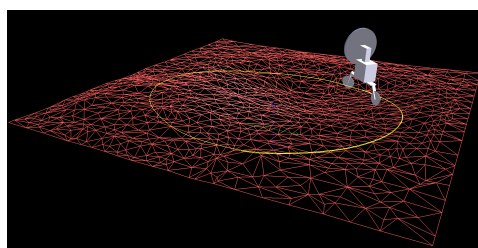


図 4 実走行面上のシミュレーション

Dimensional Space Odometry Using Tactile Wheels and Gyros, 査読有, Proc. of the 17th Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp.985-988, 2017.

T. Ichimura: 3D-Odometry Using Tactile Wheels and Gyros: Localization Simulation of a Bike Robot, 査読有, Proceedings of the 16th Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp.1349-1355, 2016.

T. Ichimura and S. Hoshino: Development of a Tactile Wheel for a Small Robot Using an Infrared Proximity Sensor, 査読有, Proc. of the 6th Int. Conf. on Advanced Mechatronics, pp.302-303, 2015.

[学会発表](計 1 件)

市村智康, 石井貴大: 赤外線近接センサを用いる車輪の接地点検出法, 査読無, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014 年 5 月 17 日, 富山.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

市村 智康 (TOMOYASU ICHIMURA)  
群馬工業高等専門学校・電子情報工学科・  
准教授  
研究者番号: 60360327

##### (2)研究分担者

無し

##### (3)連携研究者

無し