

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04061

研究課題名(和文) CMG荷重移動装置を利用した無人二輪ロボットのハイモビリティ制御

研究課題名(英文) High mobility control of a unmanned two-wheel robot using a weight shifting device by CMG

研究代表者

小谷 斉之(Kodani, Nariyuki)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：10804502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動体のハイモビリティを実現するために、通常姿勢安定装置として利用されるコントロールモーメントジャイロ(CMG)を次の動作へスムーズに移行できる予備動作になる疑似荷重発生装置としての利用方法を検証することを目的とし、無人の二輪車であってもスムーズな旋回走行を行う制御系設計を行った。数値シミュレーションにより、二輪車の旋回動作に応じたバンク姿勢変化によって荷重移動がないときよりも旋回性能が向上できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、無人運転、無人配送、無人探査など無人移動ロボットの社会利用が益々高まっている。これら移動ロボットの駆動機構としては走破性や機動性に優れた車輪型が多い一方、安全性の観点から車輪型の利点である機動性が十分に発揮されていない現状がある。本研究で提案する自ら力を生み出すことができるCMGを次動作に大きく影響する疑似的な荷重移動発生装置として利用することで、移動ロボットに高度な動きを実現させることが期待できる。この方法は車輪型ロボットだけでなく、歩行ロボットや飛行ロボットなどへも応用することが可能であり、高機動な動作を実現させることで今までにない新たなロボットの開発や利用方法を生み出すものである。

研究成果の概要(英文)：A control moment gyro (CMG) can be used as not only a attitude stabilizer but also a pseudo weight shifting generator. In this research, we aim to construct the weight shifting control method by CMG for the high mobility control of a mobile robot, and we proposed a control design method so that a unmanned motorcycle can turn smoothly by the weight shifting of the CMG. The effectiveness of the control method are confirmed by numerical simulations.

研究分野：制御工学

キーワード：無人二輪車 姿勢制御 コントロールモーメントジャイロ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

比較的人間に近い場所に配置して活躍する生活支援、医療補助、産業ロボットがある一方、近年では各自動車メーカーによる無人運転、民間配送業者による無人配送、自然災害現場や惑星表面における探査など広範囲で活躍できる移動ロボットに対する関心が高まっている。これら移動ロボットの駆動機構は、車輪型、多足歩行型、無足歩行型があるが、広範囲に動く用途では走破性や機動性に優れた車輪型が適切である。ただし、車輪型が本領を発揮するのは整地された平地とされ、凸凹が激しい不整地では転倒による行動不能状態を回避するため、カタピラと呼ばれるクローラ型を含む4輪以上の車輪や重心の荷重移動が姿勢安定領域を超えないような低重心・低速走行を前提とした安定性重視の機構や動作に限定した開発や運用がされる傾向にある。しかし、車輪数の増加は安定性が向上する一方で、車輪間の構造における幾何学的制約や車輪が横滑りをしない力学的な運動制約も増加するため、車輪型の利点である移動性が十分に発揮されていない。そこで、高速で移動するロボットの姿勢安定を確保しつつ、車輪型の利点である移動性も兼ね備えたハイモビリティロボットの開発と制御手法の確立を目指す。

2. 研究の目的

広範囲で使われる用途の移動ロボットは、駆動機構として走破性や機動性に優れた車輪型が適切である。しかし、転倒による行動不能状態を回避するために安定性重視の運用とされることが多く、車輪型の利点である移動性が十分に発揮されていない現状がある。そこで、本研究は先行研究で開発したコントロールモーメントジャイロ(CMG)のジャイロ効果によって無人二輪車が単独で自立安定できるシステムを発展し、自立安定と高機動化(ハイモビリティ)の両方を兼ね備えた無人二輪車の開発と制御手法の確立を目指す。この高機動化の実現には、旋回運転時に人間が行う体重移動をCMGによって疑似的に作り出すことで実現することを考える。すなわち、CMGを姿勢安定装置として使うだけでなく、疑似的な荷重移動装置としても利用することによって、姿勢安定と機動性を兼ね備えたハイモビリティロボットの制御手法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

二輪車の運転は目標に沿った軌道を走行するための操舵制御と直進および旋回走行時に二輪車が倒れないように二輪車姿勢のバランスを行う荷重移動制御が必要である。特に旋回走行開始時には、二輪車が受ける遠心力によって二輪車が旋回外側に倒れようとする力と重力によって旋回内側に倒れようとする力のバランスが保つように、バンク姿勢と呼ばれる二輪車本体を予め斜めの姿勢へと変化させる荷重移動を行いながら操舵制御を開始する必要がある。先行研究においてCMGのジャイロ効果を用いた無人二輪車の直進走行姿勢制御は既に行っているが、操舵を有するCMG搭載型無人二輪車のモデル開発は行っていない。そこでまず(1)無人二輪車の操舵を固定して一定の旋回半径を旋回する静的な旋回走行を行うことを考え、二輪車の姿勢が適切なバンク角を維持した旋回走行制御が必要であることを姿勢モデルの導出及び数値シミュレーションによって確認を行う。続いて(2)旋回半径が一定でない旋回走行を行うために動的な操舵モデルを追加し、CMGを用いずに操舵のみによって無人二輪車の旋回走行を行うことができる動的な旋回操舵制御系設計を導出する。続いて(3)CMGおよび動的な操舵制御を併せ持った無人二輪車に対してCMGを用いた荷重移動機能によるバンク操作を考慮することによって、さらに(2)よりも短い旋回半径で旋回走行ができることを確認する。

4. 研究成果

(1) CMGを用いた無人二輪車の静的旋回走行制御

先行研究である無人二輪車のCMGを用いた直進走行自立姿勢制御から発展して旋回走行を実現するために、本事業ではまず二輪車の操舵角を固定した旋回半径が一定であるような静的な旋回走行に対して静的な旋回走行制御を行った。

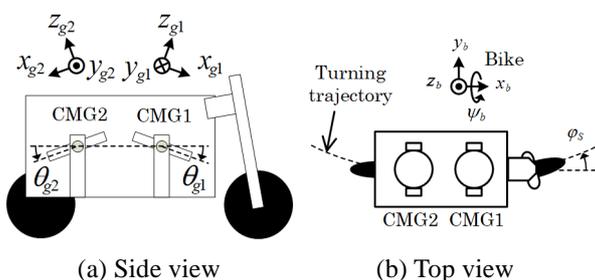


Fig.1 Geometric models of a motor bike

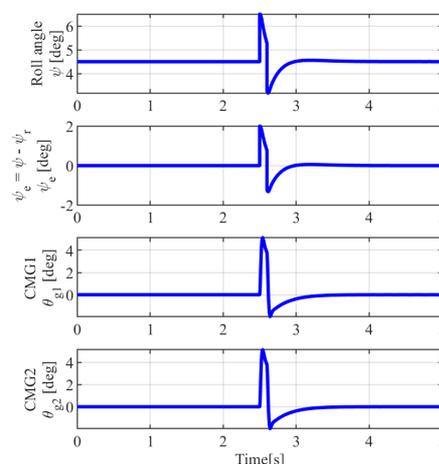


Fig.2 Simulation results

Fig. 1 は2つのCMGを有する無人二輪車が旋回半径 R を旋回走行するときの幾何モデルであり、ラグランジュの運動方程式により次式の数学線形近似モデルを導出した。

$$\begin{cases} J_{\psi b} \ddot{\psi}_e = -J_{\psi g1} \dot{\theta}_{g1} - J_{\psi g2} \dot{\theta}_{g2} + M_0 R \omega_b^2 l_b \cos \psi_b + M_0 l_b g \sin \psi_b \\ k_g J_{g1} \ddot{\theta}_{g1} = J_{g1} \omega_g \dot{\psi}_e + \tau_{g1} \\ k_g J_{g2} \ddot{\theta}_{g2} = J_{g2} \omega_g \dot{\psi}_e + \tau_{g2} \end{cases}$$

第1式目は無人二輪車本体に関する運動方程式であり、右辺第3項と第4項は遠心力と重力項を示していることから、二輪車が旋回半径に応じたバンク姿勢によってトルクバランスが取ることができれば、右辺第1項と第2項で示されるCMGからのジャイロ効果によって二輪車の姿勢が制御できることを示唆しており、このことは旋回半径 10[m]をバンク角を 4.5[deg]で維持しながら走行する必要があることを Fig. 2 の数値シミュレーションでも確認した。

(2) CMGを用いない操舵制御のみによる無人二輪車の動的旋回走行制御

ハンドル操作を有する二輪車モデルを開発するために、Fig. 3 に示す車体系（後輪系）と操舵系（前輪系）に分離した二慣性二輪車モデルを考える。この操舵系（前輪系）と車体系（後輪系）を融合したモデルを設計するために、各慣性の重心は横滑りをしないものと仮定することによって、以下の操舵系を有する二輪車の運動方程式を導出した。制御系設計においては、目標値 φ_{sr} に追従させるためには操舵系にサーボ系を構成した制御対象に対して最適レギュレータによる制御則を求めて数値シミュレーションによる検証を行った。その結果、二輪車の目標操舵指令 φ_{sr} へ追従するように操舵 φ_s を変化させると同時に二輪車の姿勢も傾き始め（Fig. 4）、最終的には左コーナー90[deg]をバンク角 ψ を維持しながら旋回走行ができることを確認した（Fig. 5）

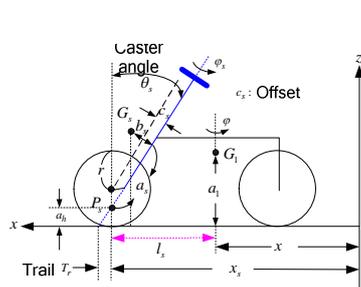


Fig. 3 Geometric model of a bike with a steering

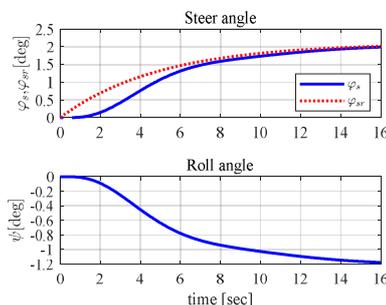


Fig. 4 Steer angle and Roll angle

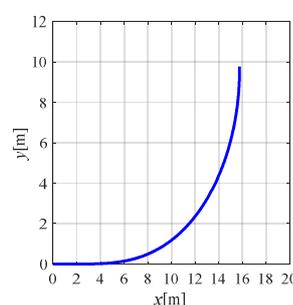


Fig. 5 Running path

(3) CMGによる荷重移動と姿勢制御を行った無人二輪車の旋回走行制御

前述の車体系（後輪系）と操舵系（前輪系）の二慣性系の二輪車にCMGを搭載した Fig. 6 に示すモデルを提案し、通常CMGが発生させるジャイロ効果による力は二輪車が倒れないように自立制御用のアクチュエータとして利用するだけでなく、二輪車の姿勢を直立状態から敢えて旋回する方向へ倒れるようにCMGのジャイロ効果を生じさせる疑似的な荷重移動装置として利用した。具体的には、前述（2）と同じ目標操舵指令 φ_{sr} に対する旋回走行を行う際に、操舵角 φ_s （旋回半径 R に影響する）および旋回角速度 $\dot{\varphi}$ による旋回状況に応じた二輪車の目標バンク角 ψ_r を導出し、そのバンク角となるよう二輪車の姿勢を変化させる疑似荷重トルクを与えた（Fig. 7, Fig. 8）。その結果、疑似荷重トルクを与えてない Fig. 4 および Fig. 5 よりも早く目標とする旋回操舵 φ_{sr} に追従した操舵制御が行えていることが分かり、また二輪車の旋回走行軌道においても短い旋回半径で左旋回を実現できることを確認した（引用文献）

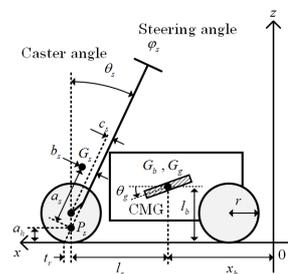


Fig. 6 Geometric model of a bike with a steering and a CMG

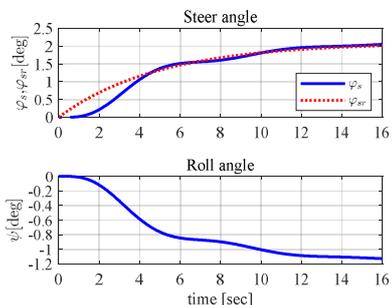


Fig. 7 Steer angle and Roll angle

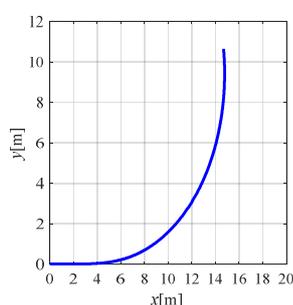


Fig. 8 Running path

本事業で当初計画していたが実現することができなかった外部環境測定を用いたSLAMおよびその経路に基づいて旋回走行を行う高機動化の検証を行う予定である。

<引用文献>

小谷 斉之, 大内 茂人, 稲葉 毅, KISTEC Innovation Hub 2019 予稿集, 2019, 1PS-8
 小谷 斉之, 小野治, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 2020, pp.208-209

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小谷齊之, 大内茂人, 稲葉毅
2. 発表標題 ツインCMGによる無人二輪車の自立姿勢制御
3. 学会等名 KISTEC Innovation Hub 2019, IPS-8
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小谷齊之, 小野治
2. 発表標題 CMG搭載型無人バイクの旋回走行制御
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会, pp.208-209
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nariyuki Kodani, Shigeto Ouchi, Takeshi Inaba and Marizan Mubin
2. 発表標題 Self-sustaining Posture Control of an Unmanned Motorbike using a TwinControl Moment Gyroscope
3. 学会等名 The 5th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2019)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 大谷 良, 稲葉 毅, 大内茂人, 小谷齊之
2. 発表標題 CMG 搭載型無人バイクの自立走行制御 -ツインジャイロによるピッチ角変化への対応-
3. 学会等名 第19回 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 (SI2018)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 大谷 良, 稲葉 毅, 大内茂人, 小谷齊之
2. 発表標題 CMG 搭載型無人バイクの自立走行制御 -CMG による荷重移動制御手法の一提案-
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2018 (Robomech2018)
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大内 茂人 (Ouchi Shigeto) (20287030)	早稲田大学・理工学術院・客員上級研究員(研究院客員教授) (32689)	
研究分担者	稲葉 毅 (Inaba Takeshi) (90242271)	東海大学・情報理工学部・教授 (32644)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------