

衝突時のダイナミクスを用いた車輪型ロボットの スリップ率に基づく段差越え制御

東野昌記*, 藤本博志 (東京大学), 高瀬善康, 中村裕司 (安川電機)

Step Climbing Control of Wheeled Robot Based on Slip Ratio Using Dynamics of Impact
Masaki Higashino*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)
Yoshiyasu Takase, Hiroshi Nakamura (Yaskawa electric corporation)

Abstract

This paper proposes a method which enables wheeled robot to climb the step that is higher than the radius of the wheel at speed up. In conventional method, robot cannot climb the step that is higher than the wheel radius, because driving force of front wheel is not enough. This paper proposes a method utilizing dynamics of impact between the wheel and the step to maximize the normal force, and hence the driving force of the front wheel. Effectiveness of the proposed method is verified by simulations and experiments.

キーワード：車輪型ロボット, 段差越え, スリップ率制御, 壁反力, 壁反力推定オブザーバ, 衝突ダイナミクス
(Wheeled robot, Step climbing, Slip ratio control, Reaction force, Reaction force observer, Dynamics of Impact)

1. はじめに

高齢社会への対応等の観点から新たな移動手段の一つとして注目されているパーソナルモビリティビークル (PMV)⁽¹⁾⁽²⁾ や, 工場などにおいて使用される産業用マニピュレータ⁽³⁾ 等, 様々な形の移動汎用モビリティ (以後モビリティ) の開発が進められている。これらのモビリティの課題の1つに, 車輪半径より高い段差越えの問題があり⁽⁴⁾, 様々な研究機関においてモビリティの段差越えに関する研究が行われている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。従来の研究では脚機構ロボット⁽⁴⁾ や脚車輪機構ロボット⁽⁵⁾⁽⁶⁾ など, アクチュエータを用いて荷重を変動させたり脚を移動させることにより段差越えを実現する研究が主に進められてきた。しかし, これらはアクチュエータの増加により, エネルギー消費の増大やシステムの複雑化の問題が生じてしまう⁽⁶⁾。

本研究の目的は, 脚移動や荷重変動のためのアクチュエータを用いない車輪型ロボットによる段差乗り越えの実現である。車輪型ロボットの場合, 車両が段差に押し付ける力が大きければ前輪駆動力が増大し段差を乗り越えられる⁽⁶⁾。ここで, 段差を押し付ける力は後輪の駆動力とロボットが段差に衝突する際に生じる衝突力に依存する⁽⁶⁾。後輪駆動力のみでは段差に押し付ける力が小さいため, 段差を乗り越えるために必要な前輪駆動力が生じない⁽⁶⁾。それに対し, ロボットが段差に衝突した瞬間は大きな衝突力が発生し, 段差を押し付ける力が大きくなる。そのため著者らは文献(7)において, 衝突した瞬間に前輪駆動力が大きくなるような制御法を提案した。

しかし, 文献(7)においてはロボットが等速の場合のみの検討であるため, 汎用性に欠けた。本稿では, 加速しながら段差に衝突した場合段差を登れるかについてシミュレーションと実験を行う。また, 段差に衝突した際に生じるモー

表 1 実験機のパラメータ

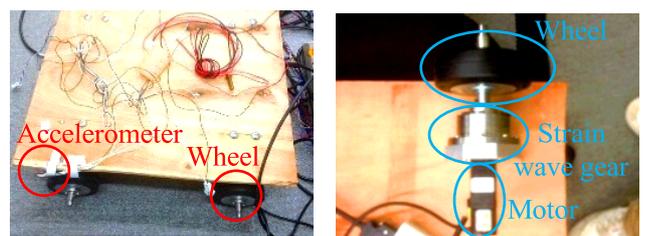
the radius of the wheel r [m]	0.050
wheelbase l [m]	0.50
wheeled robot height h [m]	0.15
the mass of wheeled robot M [kg]	10

メントを元に段差越えのために必要な前輪駆動力の条件についても検討を行う。

2. 実験機

本章では, 本研究のために製作した車輪型ロボットについて述べる。

図1に製作した車輪型ロボットを示す。図1(a)に車輪型ロボットの概観を, 図1(b)に車輪部の拡大図を示す。本車輪型ロボットにはDCモータを4輪全てに搭載しており, 4輪を独立に制御できる。モータと車輪の間には波動歯車装置を接続しており, 各車輪は十分な力を出すことが可能である。波動歯車装置の減速比は1/100であり, 1輪あたりに発生可能な最大トルクは14 Nmである。車輪半径, 車高, ホイルベース, 車両重量のパラメータを表1に示す。



(a) 車輪型ロボット

(b) 車輪部

図 1 実験機

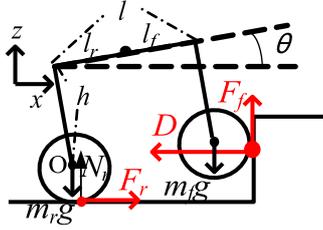


図2 段差越えのモデル図

3. 車輪型ロボットの段差越えにおける考察

本章では、車輪型ロボットが段差に接した状態において車輪を駆動させた場合における段差越えの条件について考察する。

3・1 車輪型ロボットの運動方程式 本節では、車輪型ロボットが段差に接している時の運動方程式について述べる。図2に段差を越えるためのモデル図を示す。ここで、 F_f [N]、 F_r [N] は前後輪の駆動力、 N_r [N] は後輪荷重、 m_f [kg]、 m_r [kg] は前後輪の質量、 g [m/s²] は重力加速度、 θ [rad] は車体のピッチ角である。 D [N] は車輪型ロボットが段差を押し付ける力であり、本稿では以後壁反力と呼ぶ。また、 m_f と m_r の間には式(1)の関係が成り立つ。

$$m_f + m_r = M \dots \dots \dots (1)$$

車体の x 方向について、車体の x 方向の速度を v_x [m/s²] とおくと式(2)が成り立つ。

$$M\dot{v}_x = F_r - D \dots \dots \dots (2)$$

また、前輪の z 方向について、前輪の z 方向の速度を v_z [m/s²] とおくと式(3)が成り立つ。

$$M\dot{v}_z = F_f + N_r - (m_f + m_r)g \dots \dots \dots (3)$$

ここで後輪荷重 N_r は式(4)により表される。

$$N_r = m_r g + aM \frac{h}{l} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 a [m/s²] は車輪型ロボットの加速度である。後述する静的な場合においては、 $N_r = m_r g$ となるため、式(5)が成り立つ。

$$M\dot{v}_z = F_f - m_f g \dots \dots \dots (5)$$

F_f と F_r は式(6)、(7)で表される。ただし μ_f 、 μ_r は前後輪の摩擦係数である。

$$F_f = \mu_f D \dots \dots \dots (6)$$

$$F_r = \mu_r N_r \dots \dots \dots (7)$$

3・2 段差越えのための条件 ($v_x = 0$ かつ $\theta \simeq 0$ の場合)⁽⁷⁾ 本節では、静的な場合 ($v_x = 0$ かつ $\theta \simeq 0$) にあ

ける段差を越えるための条件を述べる。

文献(7)より、車輪型ロボットが段差越えを実現するためには式(8)が成り立つ必要がある。

$$F_f = \mu_f D > m_f g \dots \dots \dots (8)$$

静的な条件の場合、式(8)を満たすためには後輪の質量を前輪の質量より重くする必要がある。しかしこの場合他の特性に悪影響を及ぼしてしまう⁽⁷⁾。そのため前後輪の荷重が等しいことが望ましいが、この場合式(8)を満たさないため段差を登ることができない。

3・3 段差越えに関する動的な考察 本節では、動的な場合 ($v_x \neq 0$) における段差越えについて考察する。

車輪型ロボットが段差に衝突した瞬間衝突力 $F_I (= -M\dot{v}_x)$ が発生するため、式(9)より D が大きくなる。

$$D = F_r + F_I \dots \dots \dots (9)$$

この時、式(6)より前輪の駆動力最大値が大きくなるため、車輪型ロボットが段差に衝突した瞬間に F_f を制御することにより式(8)が成り立ち、前輪が地面から浮上すると考えられる。

車輪型ロボットの前輪が浮上した後、後輪の中心点 O_r を中心としたモーメントが発生する。車体全体の慣性モーメントを I [kg・m²] とおき、後方へ転倒する方向を正とすると、モーメントは式(10)で表される。

$$I\ddot{\theta} = F_f(l \cos \theta + r) - m_f g l \cos \theta + m_r g r + D l \sin \theta \dots (10)$$

前輪が地面に接している場合 $\theta = 0$ であるため、 $\ddot{\theta} > 0$ となれば $\theta > 0$ となり前輪が浮上し、式(10)より正のモーメントが発生するため段差を登ることができる。

$\ddot{\theta} > 0$ となるための条件を導出する。式(10)より、 $\ddot{\theta} > 0$ となるためには θ が式(11)で表される θ_{th} を越える必要がある。ただし l に比べて r は非常に小さいと仮定する。

$$\theta_{th} = \arctan \frac{m_f g - F_f}{D} \dots \dots \dots (11)$$

ここで $F_f > m_f g$ を仮定すると、式(11)より $\theta_{th} < 0$ となる。そのため $F_f > m_f g$ を満たせば常に $\theta > \theta_{th}$ となり、前輪が浮上し続ける。 $F_f > m_f g$ は式(8)と一致するため、前輪浮上のための条件が動的な考察からも導けたといえる。

4. 段差を越えるための制御系

第3.3節の考察より、車輪型ロボットが段差に衝突した瞬間に前輪が浮上すれば段差越えが実現できる。段差に衝突した瞬間に前輪を制御することにより前輪駆動力を増やせば、式(8)より前輪は浮上する。本章では、電気自動車において研究されてきたスリップ率制御⁽⁸⁾を応用した制御系を提案する。

4・1 前後輪のモデル 前後輪のモデル図を図3、4に示す。車両の運動方程式は、式(12)~(15)で表される。

$$J_i \dot{\omega}_i = \tau_i - r F_i \dots \dots \dots (12)$$

$$m_f \dot{v}_f = F_f - m_f g \dots \dots \dots (13)$$

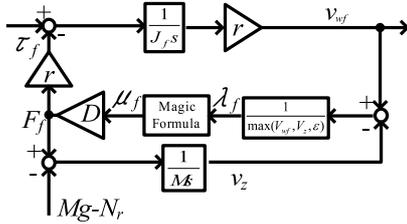


図3 前輪のz方向のブロック線図

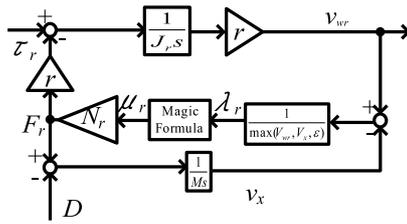


図4 後輪のx方向のブロック線図

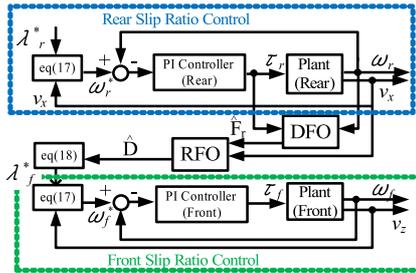


図5 前後輪スリップ率制御のブロック線図

$$M\dot{v}_r = F_r - D \dots\dots\dots (14)$$

$$v\omega_i = r\omega_i \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 i は前輪の場合は f 、後輪の場合は r を表し、 ω_i [rad/s] は車輪角速度、 J_i [kg・m²] は車輪慣性モーメント、 τ_i [N・m] はモータトルク、 $v\omega_i$ [m/s] は車輪速度である。また、前後輪のスリップ率 λ_i は式 (16) で表される。

$$\lambda_i = \frac{v\omega_i - v_j}{\max(v\omega_i, v_j, \epsilon)} \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 ϵ は零割を防ぐための微小数である。 j は x 方向の車体速の場合は x を、 z 方向の車体速なら z を示す。 $i = f$ の場合は $j = z$ 、 $i = r$ の場合は $j = x$ となる。

λ_i と μ_i の関係は Magic Formula⁽⁹⁾ を用いる。また、前後輪の駆動力 F_f と F_r はそれぞれ式 (6) と式 (7) を用いる。

4.2 スリップ率制御⁽⁸⁾を用いた段差越えのための制御系

提案する制御系のブロック線図を図5に示す。DFOは駆動力オブザーバ、RFOは壁反力オブザーバ(Reaction Force Observer)⁽⁷⁾を示す。式(16)より v_z と目標スリップ率 λ_i^* から目標車輪角速度 ω_i^* rad/s が求まる。

$$\omega_i^* = \frac{v_j}{r(1 - \lambda_i^*)} \dots\dots\dots (17)$$

ω_i^* を指令値として、車輪角速度について速度制御を組むことができる。制御器にはPI制御器を用い、極配置法によりゲインを決める。

前輪のスリップ率指令値は、RFOを用いて推定した \hat{D} を用いて式(18)のように決める。ただし、 D_{th} Nは任意で定めた閾値である。

$$\lambda_f^* = \begin{cases} 0 & (\hat{D} \leq D_{th}) \\ \lambda_{peak} & (\hat{D} > D_{th}) \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

スリップ率制御を用いて前輪のスリップ率を指令値に追従させることにより、 μ_f が μ_{f0} となるようにすれば、式(8)より F_f を大きくすることが可能である。

5. シミュレーション

本章では、提案した制御系を用いて等速時、加速時におけるシミュレーションを行い、その結果について考察する。

使用するパラメータは製作した実験機を想定し、表1を用いる。前輪が浮上していない場合は前後輪の質量が等しいと仮定する。スリップ率制御器のゲインは極配置法で決め、極は前後輪とも -30 rad/s とする。前輪スリップ率制御のスリップ率指令値は式(18)で与え、 D_{th} は 10 N とする。後輪のスリップ率指令値は、等速時は車体速が 0.15 m/s で一定となるように定め、加速時は加速度 a が 0.3 m/s² となるように定める。

車輪型ロボットが無限に高い壁に衝突した場合を想定し、前輪の浮上した距離を比較検証する。結果を図6に示す。等速の場合に比べ加速時の方が浮上距離が伸びていることがわかる。以上より、前輪浮上距離における加速時のスリップ率制御の有効性がシミュレーションにより実証された。

6. 車輪型ロボットを用いた段差越えに関する実験

本章では、製作した実験機を用いて実験を行い、その結果について考察する。

6.1 等速時と加速時の比較

0.060 m の段差に対して一定速(速度 0.15 m/s)に衝突し、段差を登れるか検討した。比較手法としては、一定速(速度 0.15 m/s)で衝突した場合と 0.30 m/s² で加速しながら衝突した場合の2通りを比較する。なお、本実験において、前輪は第4章で述べた制御系を施し、後輪は単純な速度制御系を用いた。また、段差に衝突するまでの距離は共に 0.15 m とした。

結果を図7に示す。加速時の方がわずかながら浮上距離の上昇がみられた。

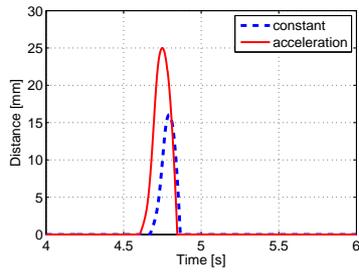
6.2 再現性の確認

実験結果の再現性を実証するため、上記の実験を複数回を行い、浮上距離の平均と標準偏差について調べた。比較手法としては前述の2通りに加え、制御なしで等速で衝突した場合の計3通りについて比較する。

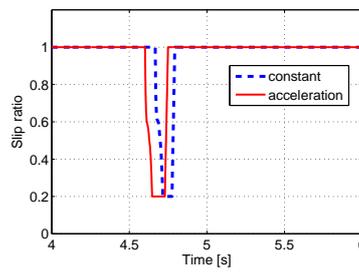
結果を図8に示す。加速時において提案法を用いて制御した場合が浮上距離が一番大きく、再現性も高いと言える。

7. まとめと今後の課題

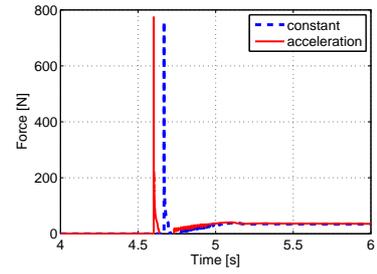
本稿では、荷重変動のためのアクチュエータを用いない車輪型ロボットにおける段差越え実現のための制御系を提案し、加速時において段差を登れるかについて検討を行っ



(a) 前輪浮上距離 z

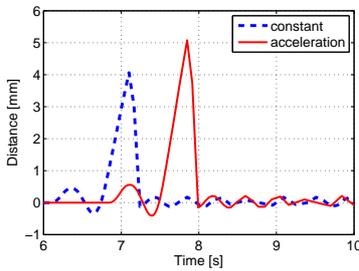


(b) 前輪スリップ率 λ_f

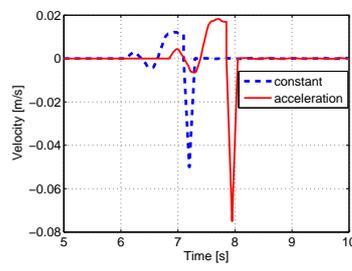


(c) 前輪駆動力 F_f

図 6 シミュレーション結果 (前輪浮上距離の比較)



(a) 前輪浮上距離 z



(b) 速度 v_z

図 7 実験結果 (前輪浮上距離比較)

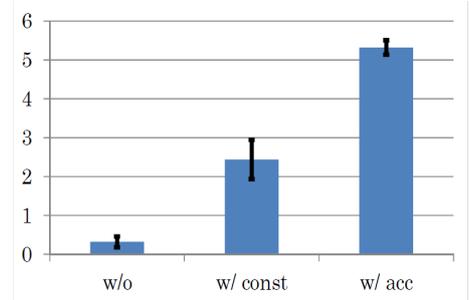


図 8 実験結果 (再現性確認)

た。加速時に提案法の制御を行った場合等速時より浮上距離が伸びたことをシミュレーションと実験により示し、再現性も実証した。また、動的な場合におけるモーメントの式より前輪浮上のための条件を導出し、静的な場合における前輪浮上条件と一致することを示した

本稿では車輪型ロボットを 2 質点の系として考えている。今後は 3 質点の系としてモデル化を行い、検討を行っていく。

参考文献

- (1) C. Nakagawa, K. Nakano, Y. Suda, and Y. Hiramaya: "Stability of the Two-Wheeled Inverted Pendulum Vehicle Moved by Human Pedaling", *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.5, No.3, pp.389-402(2011)
- (2) J. Masood, M. Zoppi, and R. Molfino: "Investigation of Personal Mobility Vehicle Stability and Maneuverability under Various Road Scenarios", *Intelligent Robots and System(IROS)*, pp.4859-4864(2012)
- (3) K. Murai, and T. Murakami: "A Realization of Pushing Operation by Compliance Control based Mobile Manipulator Considering Road Friction", *Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-11-134, pp.87-92(2011)(in Japanese)
- (4) Y. Sugahara, K. Hashimoto, N. Endo, T. Sawato, M. Kawase, A. Ohta, C. Tanaka, A. Hayashi, H. Lim, and A. Takanishi: "Development of a Biped Locomotor

with the Double Stage Linear Actuator", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1850-1855(2007)

- (5) T. Naiki, and T. Kubota: "Evaluation of Traversability of Rover Mobility System with Active Suspension", *MOVIC2011*, No.12, pp.309-312(2011)(in Japanese)
- (6) T. Terui, K. Hirano, Z. Wang, and E. Nakano: "Motion of Wheeled Mobile Robot with Passive Compliance mechanism", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, "2P1-E15(1)"-"2P1-E15(4)"(2009)(in Japanese)
- (7) M. Higashino, H. Fujimoto, Y. Takase, and H. Nakamura: "Basic Study on Step Climbing of Wheeled Robot Using Slip Ratio Control", *Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-13-113, pp.13-18(2013)(in Japanese)
- (8) M. Yoshimura, and H. Fujimoto: "Proposal of Slip Ratio Control Method for Electric Vehicle with In-Wheel Motors on Split- μ Road", *Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-10-101, pp.23-28(2011)(in Japanese)
- (9) H. B. Pacejka and E. Bakker: "The Magic Formula Tyre Model", *Tyre models for vehicle dynamic analysis: proceedings of the 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, held in Delft, The Netherlands(1991)