

サスペンションによるアンチダイブ力を用いた車輪型ロボットの段差越え

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-Climb Control of Wheeled Robot Using Anti-Dive Force from Suspension

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 a step that is higher than the radius of the wheel. In conventional method, the velocity at the moment of impact and impact force must be increased in order to climb the step, which causes troubles of wheeled robot. This paper proposes a method utilizing variable loads arised by changing speed and anti-dive force from suspension to climb the step more safely. 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, 壁反力推定オブザーバ, サスペンション, アンチダイブ力 (Wheeled robot, Step climbing, Slip ratio control, Reaction force observer, Suspension, Anti-dive Force)

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。しかしこの場合段差を登っても高い衝突力による破損の恐れが憂慮される。また文献⁽⁸⁾では加速しながら走行すると前輪の荷重が小さくなることを利用した段差越えを提案したが, この場合迅速性に問題があった。

電気自動車や PMV には安定性向上のためサスペンションが取り付けられている場合が多い⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。サスペンションを付けている場合正負のアンチダイブ力が生じる⁽¹¹⁾。特

に減速しながら走行している場合は前輪が軽くなるような力が生じるため段差越えに有利である。また速度を上げる必要がないため衝撃が緩和でき, さらに迅速性も上がると期待される。本稿ではパッシブなサスペンションのみ取り付けした車輪型ロボットの段差越えについて検討する。

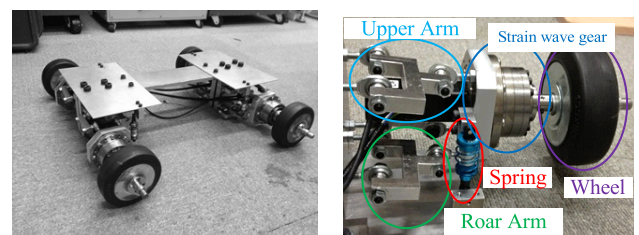
2. 実験機と車輪型ロボットのモデル化

2-1 実験機 本節では, 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。

また各車輪にダブルウィッシュボーン式のサスペンションを取り付けている。取り付け位置を変更することにより瞬間中心角を変更できる。

2-2 車輪型ロボットの段差越えに関する運動方程式 本節では, 車輪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



(a) 車輪型ロボット

(b) 車輪部

図1 実験機

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

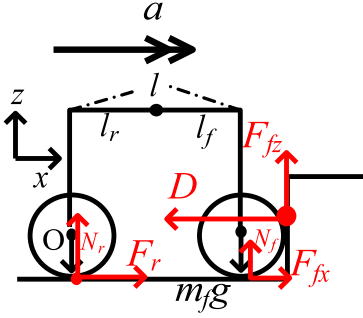


図 2 アンチダイブ力を考慮した段差越えモデル図

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。

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

x 方向, θ 方向に関して式 (2), (3) が成り立つ。

$$F_r - D = M\ddot{x} - m_f l \ddot{\theta} \sin \theta - m_f l (\dot{\theta})^2 \cos \theta \dots \dots (2)$$

$$F_f(l \cos \theta + r) + F_c l \cos \theta + F_r r + D l \sin \theta = m_f l^2 \ddot{\theta} - m_f l \ddot{x} \sin \theta + m_f g l \cos \theta \dots \dots (3)$$

式 (2) 及び (3) を線形化すると式 (4), (5) が成り立つ。ただし l は r より十分大きいとする。また前輪が浮上する瞬間の方程式であるため式 (3) の左辺第 3 項も無視する。

$$F_r - D = M\dot{v}_x \dots \dots \dots (4)$$

$$(F_f - m_f g + F_c)l = m_f l \dot{v}_z - m_f v_x v_z \dots \dots \dots (5)$$

3. 車輪型ロボットの段差越えのための条件

本章ではアンチダイブ力が車輪型ロボットの段差越えに与える影響について考察する。

3.1 段差を越えるための条件 式 (3) より θ 方向のモーメントは式 (6) で表される。

$$I\ddot{\theta} = F_f(l \cos \theta + r) - m_f g l \cos \theta + F_r r + D l \sin \theta (6)$$

前輪が浮上していない時は $\theta = 0$ であるため、前輪が浮上するためには $\ddot{\theta} > 0$ となる必要がある。この条件は式 (6) より以下のように求まる。ただし l に比べて r は非常に小さいと仮定する。

$$\theta > \arctan \frac{m_f g - F_f - F_c}{D} = \theta_{th} \dots \dots \dots (7)$$

前輪が浮上していない時は $\theta = 0$ であるため、前輪が浮上するためには $\theta_{th} < 0$ を満たす必要がある。式 (7) より式 (8) が成り立つ必要がある。

$$F_f + F_c > m_f g \dots \dots \dots (8)$$

3.2 静的な場合の段差越えに関する考察 ($\dot{v}_x = 0$ かつ $\theta \approx 0$ の場合) 本節では、静的な場合 ($\dot{v}_x = 0$ かつ $\theta \approx 0$) における段差を越えるための条件を述べる。なお静的な場合においては加減速による荷重変動 F_c を無視するため、式 (8) は式 (9) となる。

$$F_f > m_f g \dots \dots \dots (9)$$

式 (9) より、段差を越えるためには前輪駆動力 F_f を大きくする必要がある。

前輪の段差との摩擦係数を μ_f とおくと、 F_f と D の間には式 (10) の関係が成り立つ。

$$F_f = \mu_f D \dots \dots \dots (10)$$

ここで、前輪と段差の最大静止摩擦係数を μ_{f0} とおくと、 $\mu_f \leq \mu_{f0}$ より F_f と D について式 (11) が成り立つ。

$$F_f \leq \mu_{f0} D \dots \dots \dots (11)$$

式 (11) より前輪の最大駆動力は $\mu_{f0} D$ となる。従って、 F_f を大きくするためには μ_f と D を大きくする必要がある。ここでは反力 D について考察する。

式 (4) を用いると D は式 (12) で表される。

$$D = F_r - M\dot{v}_x \dots \dots \dots (12)$$

静的な条件 ($\dot{v}_x = 0$) では式 (12) より $D = F_r$ となる。ここで、後輪の摩擦係数、および最大静止摩擦係数をそれぞれ μ_r , μ_{r0} とおくと、 F_r に関して式 (13) の条件が成り立つ。

$$F_r = \mu_r m_r g \leq \mu_{r0} m_r g \dots \dots \dots (13)$$

前輪が浮上していない時の前後輪の質量比を $k (= \frac{m_r}{m_f})$ と定義すると、式 (10) ~ (13) より F_f に関して式 (14) が成り立つ。

$$F_f \leq \mu_{f0} \mu_{r0} m_r g = k \mu_f \mu_r m_f g \dots \dots \dots (14)$$

式 (14) より、式 (9) の条件を満たすためには k が式 (15) の条件を満たす必要がある。

$$k > \frac{1}{\mu_{f0} \mu_{r0}} \dots \dots \dots (15)$$

$\mu_{f0}, \mu_{r0} \leq 1$ であるため、静的な条件の場合、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、 $k > 1$ の場合以下に示す問題が生じる。

- 後輪が段差を登るのが困難になる
- コーナリング等車輪型ロボットの他の操作に影響を及ぼす

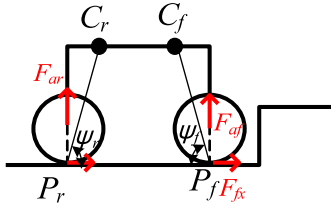


図3 サスペンションジオメトリ

そのため、 $k = 1$ であることが望ましいが、式(14)より $F_f \leq m_f g$ となってしまう、式(9)を満たさない。

以上より、荷重変動のためのアクチュエータを用いない段差ロボットの場合、前後輪の荷重を等しくすると静的な条件では段差を登ることができないことが示された。次章では、動的な条件における段差越えに関して考察する。

3.3 段差越えに関する動的な考察 ($v_x \neq 0$ の場合)
本節では、走行中の車輪型ロボットが段差に衝突した瞬間に関する考察について述べる。

段差に衝突した瞬間に衝突力 F_I [N] が発生する。

$$F_I = -Mv_x \dots \dots \dots (16)$$

そのため、式(12)より D が大きくなる。この時、式(11)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(9)が成り立ち、前輪が地面から浮上すると考えられる。

4. 加減速やアンチダイブ力により生じる荷重変動が段差越えに与える影響

本章では、加減速やアンチダイブ力により生じる荷重変動が段差越えに与える影響について考察する。

4.1 車輪型ロボットの加減速により生じる荷重変動
車輪型ロボットが加減速しながら走行する場合、重心点周りに発生するピッチングモーメントを打ち消すために荷重変動が生じる。 a [m/s²] を並進方向の加速度であるとすると、前後輪の荷重 N_f [N] 及び N_r [N] は式(17)及び式(18)で表される。

$$N_f = m_f g - F_n \dots \dots \dots (17)$$

$$N_r = m_r g + F_n \dots \dots \dots (18)$$

ただし、 F_n は式(19)で表される。

$$F_n = \frac{h}{l} Ma \dots \dots \dots (19)$$

等速運動の場合 ($a = 0$)、 $F_n = 0$ となるため前後輪の荷重は変動しない。それに対し加減速を行うと F_n により荷重が変動する。減速運動する場合 ($a < 0$) は前輪の荷重が重くなるのに対し、加速運動する場合 ($a > 0$) は後輪の荷重が重くなり前輪が軽くなる。そのためサスペンションを用いない場合、車輪型ロボットにおける段差昇りがしやすくなると考えられる。

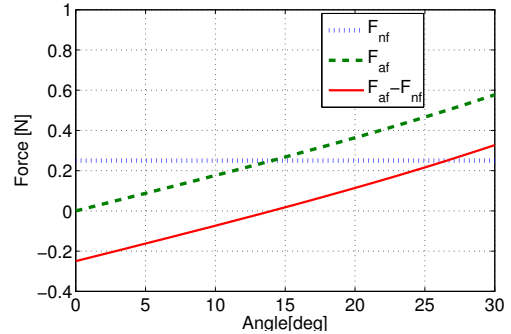


図4 F_{nf} と F_{af} の関係

Fig. 4. Relationship between F_{nf} and F_{af}

4.2 サスペンションにより生じるアンチダイブ力
本節では、サスペンションにより生じるアンチダイブ力について述べる。

図3に前後輪の駆動力が作用した時のサスペンションジオメトリを示す。接地点 P_f, P_r に働く駆動力に対し、瞬間回転中心 C_f, C_r ではその駆動力と反対の力が働く。そのため前後輪それぞれ C_f 及び C_r を中心とした上下運動が発生し、その上下運動により発生するのがアンチダイブ力である⁽¹¹⁾。 ψ_f, ψ_r を瞬間回転中心角とすると、前後輪には式(20)、(21)で表されるアンチダイブ力 F_{af} [N]、 F_{ar} [N] が働く。ただし F_{fx} [N] は x 方向に働く前輪駆動力である。

$$F_{af} = -F_{fx} \tan \psi_f \dots \dots \dots (20)$$

$$F_{ar} = F_r \tan \psi_r \dots \dots \dots (21)$$

4.3 アンチダイブ力が段差越えに与える影響
段差に衝突した瞬間に前輪に関して z 方向で正のアンチダイブ力 F_{af} を発生させれば、前輪速度 v_z が増え、前輪浮上を助けると思われる。このためには前輪駆動力 F_{fx} が負である必要がある。 $F_{fx} < 0$ となるのは前進しつつ減速する場合であるため、加速する時とは逆に段差に衝突する前の速度は大きくなる。そのためサスペンションがない場合に比べて早く段差昇りができると考えられる。

しかし減速している場合 F_f が発生すると同時に F_{nf} が生じる。式(19)より F_{nf} は減速している時は負になるため、この力は段差昇りに対しマイナスとなってしまう。

ここで、 F_{nf} は加速度により変化するが、 F_{af} は加速度(駆動力)のみならず瞬間回転中心角にも依存する。 $a = -0.08$ とした場合の瞬間回転中心角を変化させた時の荷重変動とアンチダイブ力の関係を図4に示す。瞬間回転中心角が大きくなるほどアンチダイブ力は増え、減速による荷重変動より大きくなる。

以上より、減速時に前輪荷重が軽くなるようサスペンションを設計すれば、減速しながら段差昇りの前輪浮上距離が増加すると考えられる。

5. 段差を越えるための制御系⁽⁷⁾

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

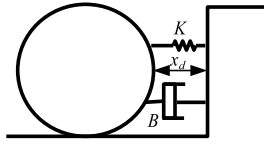


図 5 壁反力 D のモデル図

Fig. 5. Model diagram of counterforce D

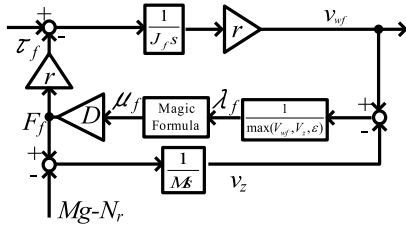


図 6 前輪の z 方向のブロック線図

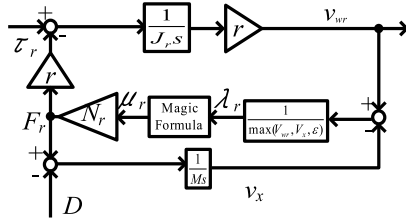


図 7 後輪の x 方向のブロック線図

動力を増やせば、式 (6) 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⁽⁹⁾を応用した制御系を提案する。

5・1 壁反力 D のモデル化 本項では、シミュレーションの際に用いた壁反力 D のモデルについて述べる。

図 5 に反力 D のモデル図を示す。タイヤをバネ (弾性 K [kg/s²]) とダンパー (B [kg/s]) を用いてモデル化すると、壁反力 D はタイヤの弾性力と粘性摩擦力の合計値となる。 x_d [m] をタイヤの押し込み量とすると、 D は式 (22) で表される。

$$D = Kx_d + B\dot{x}_d \dots \dots \dots (22)$$

5・2 前後輪のモデル 前後輪のモデル図を図 6, 7 に示す。車両の運動方程式は、式 (23) ~ (26) で表される。

$$J_i \dot{\omega}_i = \tau_i - rF_i \dots \dots \dots (23)$$

$$m_f \dot{v}_f = F_f - m_f g \dots \dots \dots (24)$$

$$M \dot{v}_r = F_r - D \dots \dots \dots (25)$$

$$v_{\omega_i} = r\omega_i \dots \dots \dots (26)$$

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_{ω_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 (27) で表される。

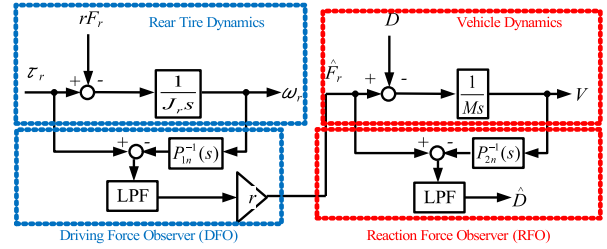


図 8 壁反力推定オブザーバブロック線図

Fig. 8. Block diagram of Reaction Force Observer(RFO)

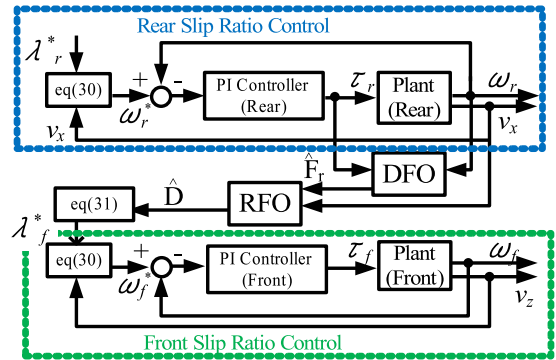


図 9 前後輪スリップ率制御のブロック線図

Fig. 9. Block diagram of front/rear slip ratio control

$$\lambda_i = \frac{v_{\omega_i} - v_j}{\max(v_{\omega_i}, v_j, \epsilon)} \dots \dots \dots (27)$$

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⁽¹⁰⁾ を用いる。また、前後輪の駆動力 F_f と F_r はそれぞれ式 (??) と式 (7) を用いる。

5・2・1 壁反力推定オブザーバ (RFO) 本項では、提案する壁反力推定オブザーバ (RFO:Reaction Force Observer) について述べる。

図 8 に提案する RFO のブロック線図を示す。ノミナルプラント $P_{1n}(s)$ と $P_{2n}(s)$ はそれぞれ式 (28), (29) となる。

$$P_{1n}(s) = \frac{1}{J_{rn}s} \dots \dots \dots (28)$$

$$P_{2n}(s) = \frac{1}{M_n s} \dots \dots \dots (29)$$

文献 (9) で提案された駆動力オブザーバ (DFO:Driving Force Observer) により、駆動力 \hat{F}_r が推定できる。推定された F_r と車体速 v_x をもとに外乱オブザーバを組み合わせることにより壁反力 D が推定できる。

5・2・2 スリップ率制御⁽⁹⁾を用いた段差越えのための制御系 本項では、提案する制御系について述べる。提案する制御系のブロック線図を図 9 に示す。式 (27) 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。

$$\omega_i^* = \frac{v_j}{r(1-\lambda_i^*)} \dots \dots \dots (30)$$

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、第4.2.3項で設計したRFOを用いて推定した \hat{D} を用いて式(31)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。

$$\lambda_f^* = \begin{cases} 0 & (\hat{D} \leq D_{th}) \\ 0.2 & (\hat{D} > D_{th}) \end{cases} \dots \dots \dots (31)$$

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(6)より F_f を大きくすることが可能である。

6. シミュレーション

本章では提案法をシミュレーションにより比較する。

車輪型ロボットを、サスペンションなしで等速運動させながら段差と衝突させた場合(従来法1)、サスペンションなしで加速運動させながら段差と衝突させた場合(従来法2)、サスペンションありで減速させながら段差と衝突させた場合(提案法)において浮上距離を比較する。なお衝突した時の並進速度は0.15 m/sとなるようにする。また、従来法2の加速度は0.08 m/s²、提案法の減速度は-0.08 m/s²とする。

結果を図10に示す。従来法と提案法を比較すると、壁反力Dは同じ大きさでありながら、浮上距離は提案法の方が伸びている。以上より、提案法を用いる方が衝撃を抑えつつ従来法より段差越えに適しているといえる。

7. 実験

本章では、提案法の有効性を検証するための実験を行ったので結果を示す。

サスペンションを用いた車輪型ロボットの段差昇り制御の有効性を示すために行った実験とその結果について述べる。

車輪型ロボットを、サスペンションなしで等速運動させながら段差と衝突させた場合(case1)、サスペンションなしで加速運動させながら段差と衝突させた場合(case2)、サスペンションありで減速させながら段差と衝突させた場合(case3)において浮上距離を比較する。なお衝突した時の並進速度は0.15 m/sとなるようにする。また、従来法2の加速度は0.08 m/s²、提案法の減速度は-0.08 m/s²とする。サスペンションの瞬間回転中心角は20 degとした。なお、前輪の浮上距離は加速度センサを用いて測定できるz方向の加速度を2回積分した値を用い、衝突力は5.3節で述べたRFOの推定値を用いる。

また、提案法の迅速性を確認するため、車輪型ロボットが段差に到達するまでの時間も計測する。段差より0.15 m手前Aの位置から段差に到達するまでの時間を計測し、迅速性の指標とする。

結果を図11に示す。3つの手法の衝撃力はほぼ同じである。case1は他の2つと比較し浮上距離が短い。一方case2

とcase3では浮上距離の差はあまりないが、迅速性の面においてcase3の方が優れている。

以上より、車輪型ロボットの段差昇りに関し、サスペンションによるアンチダイブ力を用いて減速させながら段差と衝突させ提案法の制御を行う場合の有効性が実験により示された。

8. まとめ

本稿では、サスペンションをつけた車輪型ロボットの段差越えに関する検討を行った。等速走行において前輪浮上距離を増やすためには衝突時の速度を上げる必要があるが、その場合衝突力が増え、車輪型ロボットの故障の危険性が高まる。そのため加サスペンションによるアンチダイブ力による荷重変動が生じる。サスペンションを用いた場合加減速によるアンチダイブ力を用いた段差越えについて検討を行った。サスペンションの瞬間回転中心角を大きくした場合減速することにより前輪荷重が軽くなるため前輪の浮上距離が大きくなることを、シミュレーションと実験により示した。

今後の課題としては実際の環境を想定した試験を行う。また、段差越えのみならず車輪型ロボットにおいて衝撃を緩和しながら段差を降りる方法についても検討を行う。

参考文献

- (1) C. Nakagawa, K. Nakano, Y. Suda, and Y. Hirayama: "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) Masaki Higashino, Hiroshi Fujimoto, Yoshiyasu Takase, and Hiroshi Nakamura: "Proposal of Step Climbing of Wheeled Robot Using Slip Ratio Control",

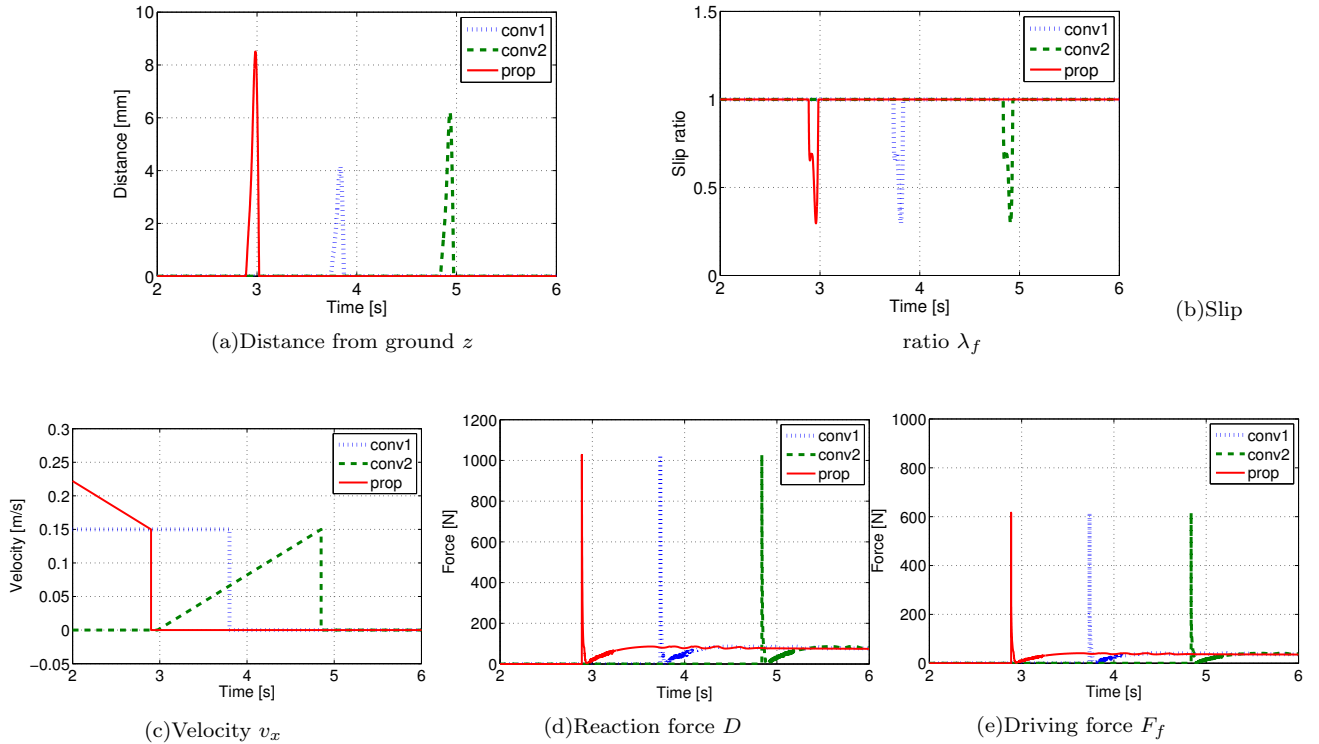


図 10 シミュレーション結果 (前輪浮上距離の比較)
Fig. 10. Simulation results (Comparison of distance from ground)

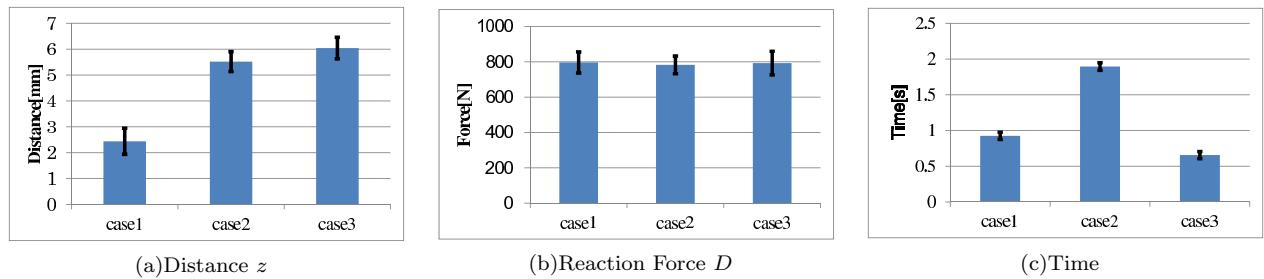


図 11 実験結果
Fig. 11. Experimental Results

39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013), pp. 6543–6548 (2013)

(8) M. Higashino, H. Fujimoto, Y. Takase, and H. Nakamura: “Step Climbing Control of Wheeled Robot Based on Slip Ratio Using Dynamics of Impact”, Proc.IEEJ Industry Applications Society Conf.(JIASC2013), vol. 2, pp. 223–226(2013)(in Japanese)

(9) 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)

(10) 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)

(11) N. Ochi, H. Fujimoto, and Y. Hori: “Proposal of Roll Angle Control Method Using Positive and Negative Anti-dive Force for Electric Vehicle with Foru In-wheel Motors”, IEEE International Conference on Mechatronics, pp.815–820 (2013)

(12) D. Chugo, K. Kawabata, H. Kanetsu, H. Asama, and T. Mishima: “Step Climbing Omnidirectional Mobile Robot with Passive Linkages”, Proc. of SPIE, vol.6502, pp.1–12(2005)

(13) K. Skonieczny, and G. M. T. D’Eleuterio: “Improving Mobile Robot Step-Climbing Capabilities with Center-of Gravity Control”, Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, pp.1–8(2010)