

車輪型移動ロボットの動的な前輪持ち上げ

高島 亨 (東北大学) 高橋隆行 (福島大学) 中野栄二 (東北大学)

Front Wheel Lifting Control of a Wheeled Mobile Robot by Acceleration

*T.Takashima (Tohoku University), T.Takahashi (Fukushima University)
and E.Nakano (Tohoku University)

Abstract— Wheeled mobile robots are used in various places because of their highly mobile ability on flat surfaces. However, in general their locomotion capability is not so high on rough terrains. It is especially difficult for a wheeled mobile robot with passive wheels to negotiate even a small difference in level. In this paper we propose a front wheel lifting control of a 4-wheeled mobile robot with passive front wheels by the acceleration of the 2 active rear wheels in order to deal with small obstacles on the way. Finally, we describe the mechanical design of a wheeled mobile robot to transit from its 4-wheeled state to its 2-wheeled state.

Key Words: Wheeled Mobile Robot, Front Wheel Lifting, Acceleration, Inverted Pendulum

1 緒言

車輪型移動ロボットは、主に工場内の搬送用ロボットなど様々な場所で利用されている。その主な理由は、平坦地走行能力 (エネルギー効率や走行速度) が優れており、脚型等と比較して機構も簡単であり、アクチュエータが少なく低コストであるためである。また、搬送物の荷重を車体と比較して大きくできるため、一回の移動で多くの物を輸送できるという長所がある。しかしながら、段差などの不整地対応能力は低いので整地された場所で用いられることが多い。特に、キャストなどの受動輪を備えたものは、受動輪の特性により著しく段差踏破性が低く、わずかな段差でさえ踏破することは大変困難なものとなる。また、受動輪は大きな旋回スペースを必要とするため、設計上その径を大きくすることが困難であり、径を大きくしてもその段差踏破性は低いままである。しかしながら、受動輪はアッカーマンリンク等の機構が必要とならないため、低コストであり車輪型移動ロボットの長所を活かすことができる。

本研究では、車輪型移動ロボットが本来備えている長所を活かすため、段差を踏破するための特殊な機構を極力用いずに、ある程度の段差のある環境で、荷物を運搬する車輪型ロボットを開発することを目指している。ロボットは後輪が駆動輪であり前輪が受動輪である 4 輪を想定し、通常の平地走行時は静的安定を保ち、段差踏破等の必要な場合にのみ、後輪のみ接地している 2 輪状態に遷移を行う。段差昇降にあたり前輪を段差に乗せる必要があり、本発表では、前輪の持ち上げ動作として、加速による静的安定状態から不安定状態への遷移の解析と制御を行う。また、車輪型倒立振り子ロボットの関係を述べ、その設計指標を導出する。

2 モデルと実験機

2.1 モデル化

まずロボットの静的不安定状態である 2 輪接地状態のモデルを Fig.1 に示す。ここで θ_1, θ_2 が変数であり、その他は定数となっている。各パラメータを以下に示す。

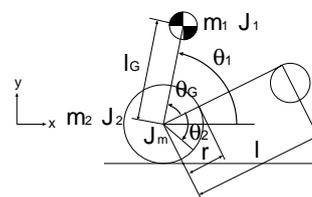


Fig. 1: Physical parameters of the experimental wheeled mobile robot in its 2-wheeled state

θ_1 : 車体傾斜角度	l_G : 車体重心距離
θ_2 : 駆動輪回転角度	θ_G : 車体重心角度
J_1 : 車体重心回り慣性モーメント	r : 駆動輪半径
J_2 : 駆動輪慣性モーメント	l : ホイールベース
J_m : モータの慣性モーメント	f_{r2} : 駆動輪の粘性抵抗
m_1 : 車体質量	n : 減速比
m_2 : 駆動輪質量	τ_2 : 減速後のトルク

2.2 運動方程式

運動方程式を式 (1) に示す。

$$\begin{bmatrix} \gamma + \delta & -\beta \sin \theta_1 + \delta \\ -\beta \sin \theta_1 + \delta & \alpha + \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\beta \theta_1^2 \cos \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{r2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ f_{r2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 \cos \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし

$$\alpha = J_2 + m_1 r^2 + m_2 r^2 \quad (2)$$

$$\beta = r m_1 l_G \quad (3)$$

$$\gamma = J_1 + m_1 l_G^2 \quad (4)$$

$$\delta = n^2 J_m \quad (5)$$

$$k_2 = m_1 l_G g \quad (6)$$

とする。式 (1) において、左辺第 1 項は慣性項、第 2 項は遠心力項、第 3 項は粘性項、第 4 項は重力項になっていて、右辺は入力トルク項になっている。

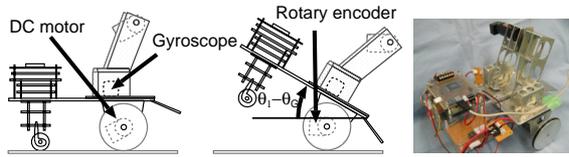


Fig. 2: Structure and photograph of the experimental mobile robot

Table 1: Parameters in the equation of motion

α : 6.976×10^{-3} [kgm ²]
β : 5.944×10^{-3} [kgm ²]
γ : 3.277×10^{-2} [kgm ²]
δ : 1.044×10^{-3} [kgm ²]
k_2 : 1.651×10^{-0} [Nm]
f_{r2} : 5.500×10^{-3} [Nm/(rad/s)]

2.3 実験機の構成

実験機の構成を Fig.2 に示す．車体傾斜角速度 $\dot{\theta}_1$ はジャイロにより測定し，その数値積分を車体傾斜角度 θ_1 としている．また，車輪回転角度 θ_2 はモータのエンコーダにより算出した角度と θ_1 との差となる．また，重心角度 θ_G は 67.0[deg] である．Table.1，Table.2 にそれぞれ実験機，モータのパラメータを示す．

3 実験

3.1 制御方法

ここでは部分線形化を行い， θ_1 を τ_2 によって制御することを考える．このとき制御しきれない θ_2 が Zero Dynamics となる．まず，制御を行う準備として運動方程式 (1) を整理し式 (7) のようにおく．

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

これより

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{-d_{22}p_1 + d_{12}p_2}{d_{11}d_{22} - d_{12}^2} + \frac{d_{22} - d_{12}}{d_{11}d_{22} - d_{12}^2} \tau_2 \quad (8)$$

の関係を得る．よって

$$\ddot{\theta}_1 = v \quad (9)$$

の部分線形化を達成する制御入力

$$\tau_2 = -\frac{-d_{22}p_1 + d_{12}p_2}{d_{22} - d_{12}} + \left(\frac{d_{11}d_{22} - d_{12}^2}{d_{22} - d_{12}} \right) v \quad (10)$$

となる．制御としては， θ_1 をある目標軌道に沿って追従させるため

$$v = \ddot{\theta}_{1d} - f_1(\theta_1 - \theta_{1d}) - f_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1d}) \quad (11)$$

の PD 制御を行う．ここで $\ddot{\theta}_{1d}$ ， $\dot{\theta}_{1d}$ ， θ_{1d} はそれぞれ車体傾斜目標軌道の角加速度，角速度，角度である．この場合，誤差方程式は次に示すような線形 2 次系になっている．

$$\ddot{e} + f_2\dot{e} + f_1e = 0 \quad (12)$$

ここで， \ddot{e} ， \dot{e} ， e はそれぞれ軌道誤差の角加速度，角速度，角度であり， e を次のように定義する．

$$e = \theta_1 - \theta_{1d} \quad (13)$$

Table 2: Physical parameters of the DC motor

Reduction ratio of the gear	$n: 1.371 \times 10^1$
Efficency of the gearhead	$\eta: 8.000 \times 10^{-1}$
Torque constant of the motor	$K: 2.420 \times 10^{-2}$ [Nm/A]
Armature resistance	$R_a: 2.210 \times 10^{-0}$ []

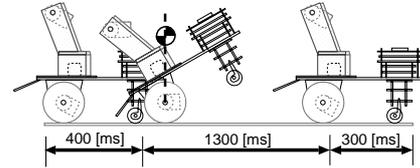


Fig. 3: Target motion in experiments

3.2 目標軌道

実験のイメージを Fig.3 に示す．車体傾斜角度には，400[ms] 後に重心位置が駆動輪軸の鉛直上になり，1300[ms] 間その倒立振子状態のまま前進し，その 300[ms] 後に前輪が地面に対してソフトランディング ($\dot{\theta}_1 = 0$) を行うような軌道を与える．これを目標軌道 (a) とする．軌道生成には初期時刻と終了時刻での $\dot{\theta}_1$ ， θ_1 ， θ_1 それぞれ 6 個を与えるために 5 次多項式を用い，これを組合せた．

また，同様に倒立振子状態に移行する別の軌道を (b)，6.2[V] ステップ応答の軌道为目标軌道としたものを (c) とし，この目標軌道に追従させる実験を行う．

3.3 実験結果

目標軌道に追従させた実験結果を Fig.4 に示す．このときサンプリング周期は 1[ms] とした．目標軌道 (a)，(b)，(c) とともに全体的によく追従しているのが分かる．よって目標軌道により偏差特性が変わらず，式 (12) に基づいているといえる．またソフトランディングを地面に対してでなく段差に対して行うことにより，前輪の着地時の衝撃を小さくすることができる．

4 設計指標

ここでは，車輪型移動ロボットが静止した状態から前輪を持ち上げて倒立振子状態に車輪を滑らせずに移行するための機械設計上の課題に焦点を当て，その設計パラメータを決定する際の指標を導出する．また，その際に各物理パラメータではなく，以下に定義する無次元パラメータを用いる．またアクチュエータとして DC モータを想定し，その特性を考慮した上で，最大の電圧を加えた際に倒立振子状態移行可能と不可能の境界の無次元パラメータ群を探索し設計指標を導出する [1][2]．なお，この設計指標は車輪型倒立振子ロボットが車体を傾けて休止している状態から通常の倒立振子状態へ移行する際に満たさなければならない車体パラメータに関するそれと等価である．

4.1 アクチュエータによる制約条件

ロボットの運動性能は，アクチュエータの性能に大きく左右される．アクチュエータとして DC モータを想定し，DC モータの特性を考慮する．ここでは，広く用いられている式 (14) を DC モータの特性方程式と

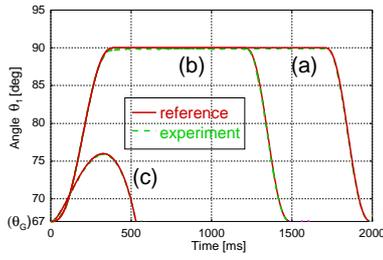


Fig. 4: Experimental results (θ_1)

して採用する．また，減速後の出力トルク τ_2 とモータのトルク τ_m との関係は式 (15) になる．モータの回転数が大きくなるほど，逆起電圧の影響でトルクは出しにくくなる．静止した状態から前輪を持ち上げて倒立振り状態に移行する際に加速が必要であり，モータの回転数が大きくなるためモータの出力トルクに制限が生じる．この制限内で目的の運動を実現させなければならず，よって設計には D C モータの特性を考慮することが不可欠となる．

$$\tau_m = \frac{K}{R_a}(V - K\omega_m) \quad (14)$$

τ_m : モータの出力トルク R_a : 電機子抵抗
 K : トルク定数 ω_m : モータ回転数
 n : 減速比 η : ギアヘッド効率

$$\tau_2 = n\eta\tau_m \quad (15)$$

4.2 運動方程式の無次元化

運動方程式 (1) を無次元化するために無次元時間 τ を定義する．

$$\tau = \omega t \quad (16)$$

ここで ω は無次元化係数である．無次元化された運動方程式は D C モータの特性方程式 (14), (15) を考慮すると式 (17) で表され，また無次元パラメータは式 (18) から式 (22) で表される．また， θ_1, θ_2 を無次元化したものがそれぞれ θ'_1, θ'_2 となっている．

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \gamma' + \delta' & -\sin \theta'_1 + \delta' \\ -\sin \theta'_1 + \delta' & \alpha' + \delta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}'_1 \\ \ddot{\theta}'_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\theta}'_1{}^2 \cos \theta'_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f'_{r2}(\dot{\theta}'_1 + \dot{\theta}'_2) \\ f'_{r2}(\dot{\theta}'_1 + \dot{\theta}'_2) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \cos \theta'_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_v V \\ K'_v V \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{J_2 + (m_1 + m_2)r^2}{rm_1l_G} \quad (18)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma}{\beta} = \frac{J_1 + m_1l_G^2}{rm_1l_G} \quad (19)$$

$$\delta' = \frac{\delta}{\beta} = \frac{n^2 J_m}{rm_1l_G} \quad (20)$$

$$f'_{r2} = \frac{n^2 \eta \frac{K^2}{R_a}}{\beta \omega} = \frac{n^2 \eta \frac{K^2}{R_a}}{m_1 l_G \sqrt{r g}} \quad (21)$$

$$K'_v = \frac{n\eta \frac{K}{R_a}}{\beta \omega^2} V_{\max} = \frac{n\eta \frac{K}{R_a}}{m_1 l_G g} V_{\max} \quad (22)$$

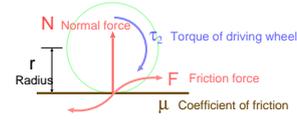


Fig. 5: Forces related to the driving wheel

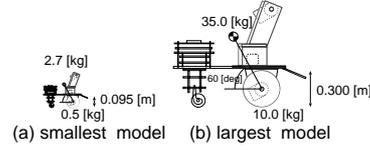


Fig. 6: Range of the robot size on simulation

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (23)$$

ここで V_{\max} はモータの定格電圧であり，入力 V の最大値が $V = 1$ となるような正規化を行った．

4.3 無次元パラメータを用いた車輪の滑りの条件

最大電圧を加えた際に，車輪が滑ってしまう場合も考えられる．ここでは，車輪が滑らず倒立振り状態へ移行することを対象としているため，車輪が滑らない条件を加える必要がある．車輪に作用する力の簡易モデルを Fig. 5 に示す．また車輪に作用する力を式 (24), (25) に示す．また，車輪に作用する力には，車体の回転運動による遠心力などが働くが，その影響は最大電圧の 2 倍，3 倍の電圧を加えた場合でも十分に小さいことを確認しており，ここでは簡単のためこれらを採用する．

$$N = (m_1 + m_2)g \quad (24)$$

$$F = \frac{\tau_2}{r} \quad (25)$$

ここで，滑らない条件を摩擦力 < 最大摩擦力とすると

$$F < \mu N \quad (26)$$

となる．静止している状態から最大電圧を加えた際，式 (14), (15) より最も滑りやすい初期状態のみを考慮し無次元パラメータで表すと結局

$$K'_v < \mu \rho_\alpha \alpha' \quad (27)$$

となる．ここで ρ_α は

$$\begin{aligned} \rho_\alpha &= \frac{(m_1 + m_2)r^2}{J_2 + (m_1 + m_2)r^2} \\ &= \frac{(m_1 + m_2)}{(m_1 + \frac{3}{2}m_2)} \end{aligned} \quad (28)$$

で表され， J_2 が車輪の慣性モーメントが支配的であるとして

$$J_2 = \frac{1}{2}m_2r^2 \quad (29)$$

と仮定している． ρ_α は車体質量 m_1 と駆動輪質量 m_2 の比で表され，これはメカニズム設計の際に設計者が決める値であり約 0.80 ~ 0.92 の値をとる．

Table 3: Nondimensional parameters

	00	01	02	03	04	
α' :	5.044	7.042	9.040	11.04	13.04	$\times 10^{-1}$
γ' :	5.513	5.757	6.000			$\times 10^0$
δ' :	8.080	119.1	1756			$\times 10^{-4}$

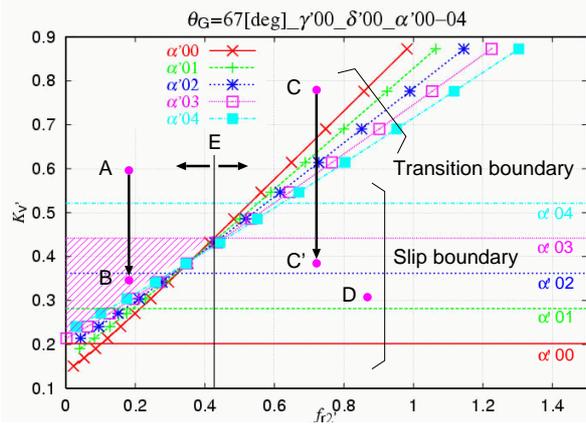
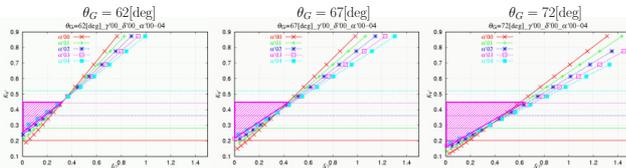


Fig. 7: Possible range of the parameters on the transition to the inverted pendulum state (2-wheeled state)

Fig. 8: Effect of θ_G on the transition to the inverted pendulum state (2-wheeled state)

4.4 探索結果と考察

倒立振り子状態移行可能と不可能の境界の無次元パラメータ群を探索する際のシミュレーション方法とその結果に関して述べる。シミュレーション方法は、式(18)から式(22)の無次元パラメータ α' , γ' , δ' , K'_v と重心角度 θ_G をそれぞれ想定している最大値から最小値まで刻み、その各々の組み合わせにおいて最大の電圧を加えた際に倒立振り子状態移行可能と不可能の境界の f'_{r2} を探索する。ここでシミュレーションを行う範囲を Fig.6 に示す。Fig.6 の (a) が現在製作してある実験機であり想定している最小の大きさであり、(b) が現在想定している最大の大きさである。慣性モーメントや必要なモータを適切に見積もり、式(18)から式(22)より各無次元パラメータを算出し、これらを全て含むような範囲で各無次元パラメータを変化させてシミュレーションを行い探索する (Table.3 参照)。

探索の結果を Fig.7 に示す。横軸が f'_{r2} 、縦軸が K'_v であり、 α' によって遷移限界曲線が分かれる。これらは影響力が大きく、特に f'_{r2} と K'_v はモータと減速比に関するものであり、それらの選択が重要であることを意味する。また、 K'_v , α' は式(27)より滑り限界曲線にも用いられる。一方想定している範囲内において γ' , δ' の影響力は小さい。また、重心角度 θ_G の影響は後で述べる。遷移限界曲線より上側が倒立振り子状態移行可能領域であり、下側が不可能領域となっている。また、滑りに関しては式(27)より滑り限界曲線の上側が滑る領域であり、下側が滑らない領域である。なお、ここでは摩擦係数 $\mu = 0.5$, $\rho_\alpha = 0.8$ を用いている。よって α' が 03 の場合、斜線で囲まれた領域が滑らずに倒立

Table 4: Classification of the transition to the inverted pendulum state (2-wheeled state)

	Transition possibility	Non-slip	Comments
A			1
B			
C		×	2
D	×		

- 1: non-slip transition being possible by reducing the input V
- 2: non-slip transition being impossible

振り子状態に遷移可能な領域となる。したがって、点Dが遷移不可能なものであり、点Bが滑らず遷移可能なものであり、点Aと点Cが遷移可能であるが滑ってしまうものである。しかし、点Aと点Cでは特徴が異なる。点Aのパラメータを持つロボットの場合、入力 V を小さくすることにより点Bに移行できるため滑らず遷移が可能である。ここで式(17)より、入力 V を調整し小さくすることは Fig.7 上で K'_v を調整することと同じである。しかし点Cでは、入力を小さくして滑らない領域にある点C'に移行しても遷移不可能領域になってしまうため適切に滑りを制御せざるを得ない。そしてこの境界が線Eとなっている。以上のことを踏まえて Fig.7 の点Aから点Dに関して Table.4 にまとめる。

以上より、滑りに関して必ずしも制御が必要ないという観点においては点A、点Bが望ましく、選択できる入力の幅が広く倒立状態までに生成できる軌道の多様性から考えると点Bよりも点Aのパラメータを持つロボットの方が優れているといえる。また、重心角度 θ_G の影響を Fig.8 に示す。重心角度 θ_G が倒立状態に近くなると、遷移可能な領域が増えていくのが分かる。

5 結言

車輪型移動ロボットを用いて、少ないアクチュエータでかつ簡単な機構で段差を踏破するために、前輪の持ち上げ動作として車輪型移動ロボットの移動状態遷移の解析と制御を行った。制御には部分線形化を用いて、車体傾斜角度 θ_1 をある目標軌道に追従させた。また、地面に対してソフトランディングを実現し、これを段差に対して行うことにより、前輪の着地時の衝撃を小さくすることができる。また、前輪を持ち上げて倒立振り子状態へ遷移可能なロボットを設計するための設計指標を導出した。現在は後輪乗り上げの解析を行っている。

参考文献

- [1] 有川, 広瀬: 3D荒地用歩行ロボットの研究, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.138-144,1995
- [2] 有川, 美多: 多自由度跳躍ロボットの設計, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.2, pp.214-222,2000