

車輪アームをもつ形態可変ロボットの 部分線形化による倒立制御

福島 宏明^{*1} 新村 諭^{*2} 松野 文俊^{*1}

Transformation Control to an Inverted Pendulum Mode of a Mobile Robot with Wheel-arms Using Partial Linearization

Hiroaki Fukushima^{*1}, Satoru Shinmura^{*2} and Fumitoshi Matsuno^{*1}

This paper presents a shape transformation control method of a mobile robot with wheel-arms. The proposed method aims at transformation from a four-wheeled mode for high speed mobility to an inverted pendulum mode, which has advantages of high viewing position and small turning radius. The transformation starts with lifting up the wheel-arms to raise the center of gravity of the whole body. From such initial states, the body is lifted up and controlled to the target angle by partial linearization, while returning the arms to the initial angle. Then, the wheels are slowed down by properly changing the target pitch angle of the body. Stability analysis is carried out by taking into account the transient response of the body angle to the target value, which is neglected in existing work. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by experiments.

Key Words: Variable Structure Type Mobile Robot, Wheeled Inverted Pendulum, Partial Linearization

1. はじめに

車輪型移動ロボットは整地環境において高い移動能力をもつ反面、段差の多い不整地での走破性能は脚型やクローラ型移動ロボットに比べて劣る場合が多い。そのため、車輪からクローラに変形可能な移動機構 [1] や車輪型と脚型の両方の利点を併せもつロボット [2]~[5] など、車輪型移動ロボットの不整地走破性の向上を目的とした研究が行われている。また、2 リンクの本体と受動車輪のついたアームで構成され、本体の屈曲角やアームの角度を変えることにより、段差乗り越え、4 輪車から倒立振り子への変形を行うことを目的としたロボットの研究が行われている [6]。

これらの研究と同様に車輪型移動ロボットの不整地走破能力の向上を目的として、車輪アームをもつ形態可変ロボットが提案されている [7]。Fig. 1 に示すように、このロボットは中央に位置する本体ユニットと左右アームユニットの三つのユニットから構成されており、本体前方にはカメラが装着されている。また、Fig. 2 に示す五つの形態をもち、Mode 3 では車輪アームを用いることにより高い段差を乗り越えることが可能である [8]。また、倒立振り子モード (Mode 4, Mode 5) に変形することにより、

より、高い視点を確保し、最小半径での旋回が可能となる。他の車輪型移動ロボットには見られない特徴として、Mode 1 で

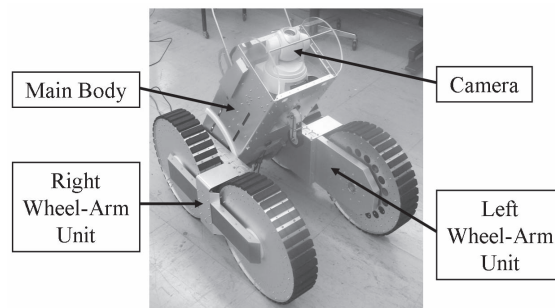


Fig. 1 Mobile robot with wheel-arms

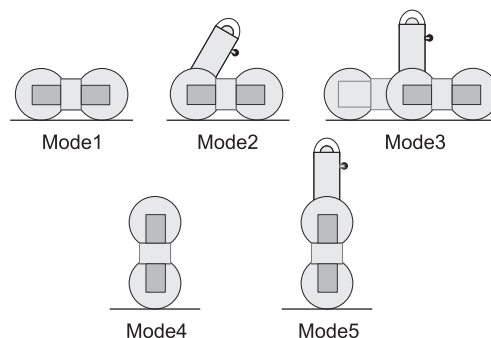


Fig. 2 Five locomotion modes

原稿受付 2010 年 11 月 9 日

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

^{*2} CKD 株式会社

^{*1} Graduate School of Engineering, Kyoto University

^{*2} CKD Corporation

■ 本論文は学術的に評価されました。

は通常の車輪型移動ロボットと同じ形態となり、車輪型移動ロボットの本来の利点である整地環境での移動能力を保持しながら、なおかつアームを用いた障害物踏破、倒立振子への変形が可能である点が挙げられる。

本研究では、通常走行モード (Mode 1) からアームアップ倒立振子モード (Mode 4) へ変形する問題を考える。文献 [7] では、Fig. 2 の Mode 3 の状態から左右のアームを本体に対して対称に持ち上げることで、Mode 4 への変形を行っている。この方法ではロボットの重心が常に支持点の鉛直軸上にあり、平衡状態が維持されるため、アームを低速で動かす場合には線形状態フィードバックによる制御が可能であると考えられる。文献 [7] では制御系の安定性に関する理論的な解析は行われていないものの、実機実験により線形制御器の有効性が検証されている。ところが、この変形方法以外を用いる場合には一般にロボットの状態は平衡点近傍にはないため、より迅速かつ多様な変形を行うためにはシステムのもつ非線形性を考慮した制御が必要になると考えられる。

倒立振子型の移動ロボットに関する研究は従来より数多く報告されているが、ほとんどは倒立状態の近傍で線形近似したモデルを用いて線形状態フィードバック制御器を設計している [9]～[12]。また、文献 [13] では先端に車輪がついたアームを用いて 4 輪車両から倒立振子への変形を実現している。この変形においても、アームを使って本体を持ち上げることで、重心を駆動車輪の真上近くまで移動させてから倒立制御を開始させるため、線形状態フィードバックによる制御が可能となっている。また、文献 [6] においても 4 輪車両から倒立振子への変形を行っているが、ロボットの重心を常に接地点の真上に保つように本体の屈曲角やアームの角度を調節することで倒立状態に制御されており、本研究を含めた多く研究とは倒立制御の方法が大きく異なる。本研究では、対象とするロボットのアームの角度を調節するだけで倒立状態を維持することは難しいこと、アームの目標角度が倒立制御とは独立に決定されていることから、文献 [6] の手法を用いることは困難である。

一方、文献 [14] では部分線形化 [15] を用いた非線形制御手法を提案し、計算機シミュレーションにより有効性を確認している。この方法は、部分線形化によりロボット本体を目標角度に制御する下位の制御器と、本体の目標角度を操作して車輪の角速度を制御する上位の制御器から構成される。ところが、制御系の安定性の理論的な解析が難しいという問題点があり、ロボット本体の目標角度への追従誤差や角速度が無視できるという強い仮定の下で車輪の角速度の制御則を導出している。また、本研究で対象とするロボットのアクチュエータ出力の限界と重量を考慮すると、この方法をそのまま適用して通常走行モードから直接倒立振子モードに制御することは困難であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では車輪アームを利用してロボットの重心を高くした状態から、部分線形化に基づいてロボット本体とアームの角度を同時に制御し、倒立状態へ変形させる。次に、ロボット本体の目標角度を操作することにより、車輪を減速させる。ただし、従来手法 [14] と異なり、この操作では目標状態に収束させることは目的とせず、与えられた線形制御器で制御可能な状態に収束させることにより、最終的に線形制御器に切

り替えて目標状態への制御を達成することを目的とする。また、本論文で提案する手法に対して、文献 [14] で無視されていたロボット本体の目標角度への追従誤差や角速度も考慮して目標状態への収束性を解析し、安定性を保証するために設計パラメータが満たすべき条件を導く。さらに、実機実験により提案手法の有効性を検証する。

2. 制 御 目 的

本研究で考える変形の概略を Fig. 3 に示す。まず、図中 1 の 4 輪走行の状態から、左右両アームを回転させ、より重心の高い 2 の状態に変形させる。次に、3 章で述べる制御手法により、2 から 3 の状態を経て最終的に 4 のような倒立振子の状態で停止させる。ただし、1 から 2 への変形は容易であるため、本論文では 2 から 4 への変形のみを考える。したがって、以下では 2 から 4 の状態におけるロボットの動力学モデルを導出する。なお、Fig. 3 のように左右のアームは常に同じ角度になるように制御を行うため、ここではアームと本体の相対角度は左右等しいものとする。また、左右の車輪の角速度は常に等しく、ロボットの運動は二次元平面上に限定されるものとする。

Fig. 4 に示すように、 q_1 を本体の姿勢の絶対角、 q_2 を車輪の回転角、 q_3 をアーム・本体間の相対角と定義する。また、制御入力には u_1 がアーム・本体間の相対角を制御するモータ電流値、 u_2 が車輪駆動モータ電流値として与えられる。その他のパラメータの定義は Table 1 に示すとおりである。このとき、ラグランジュの方法により運動方程式が次のように得られる。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = Eu \quad (1)$$

ただし、 $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ 、 $u = [u_1, u_2]^T$ であり、 $M(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^3$ 、 $G(q) \in \mathbb{R}^3$ 、 $E \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ の成分は以下のように表される。

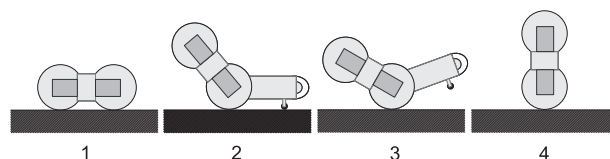


Fig. 3 Schematic of transformation

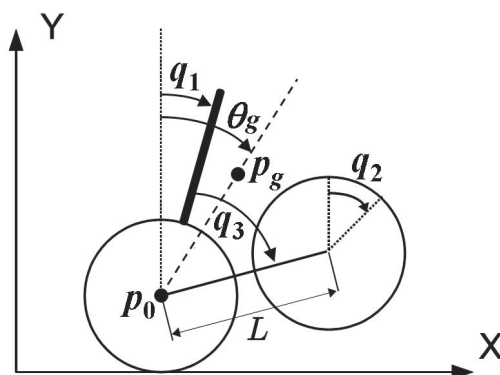


Fig. 4 Schematic of parameters

Table 1 Definition of parameters

m_1	Mass of main body	14 [kg]
m_2	Mass of rear wheel	2 [kg]
m_3	Mass of arm	3.5 [kg]
m_4	Mass of front wheel	1 [kg]
J_1	Moment of inertia of main body	0.5 [kgm ²]
J_2	Moment of inertia of rear wheel	0.04 [kgm ²]
J_3	Moment of inertia of arm	0.08 [kgm ²]
J_4	Moment of inertia of front wheel	0.02 [kgm ²]
r	Radius of the wheel	0.2 [m]
l_1	Length to COG of main body	0.25 [m]
l_2	Length to COG of arm	0.225 [m]
L	Length of the arm	0.45 [m]
g	Gravitational constant	9.81 [m/s ²]
n_1	Arm motor gear ratio	133.5
n_2	Wheel motor gear ratio	42.9
K_{t1}	Arm motor torque constant	33.3 [mNm/A]
K_{t2}	Wheel motor torque constant	16.8 [mNm/A]

$$\begin{aligned}
M_{11} &= m_1 l_1^2 + 2m_3 l_2^2 + 2m_4 L^2 + J_1 + 2J_3 \\
M_{12} &= M_{21} = r\{m_1 l_1 \cos q_1 + 2(m_3 l_2 + m_4 L) \cos(q_1 + q_3)\} \\
M_{13} &= M_{31} = 2m_3 l_2^2 + 2J_3 + 2m_4 L^2 \\
M_{22} &= (m_1 + 2m_3 + 2m_4 + 2m_2)r^2 + 2J_4 + 2J_2 \\
M_{23} &= M_{32} = 2(m_3 l_2 + m_4 L)r \cos(q_1 + q_3) \\
M_{33} &= 2m_3 l_2^2 + 2J_3 + 2m_4 L^2, \quad C_1 = C_3 = 0 \\
C_2 &= -r\{m_1 l_1 \dot{q}_1^2 \sin q_1 + (2m_3 l_2 \dot{q}_1^2 + 4m_3 l_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2m_4 L \dot{q}_1^2 \\
&\quad + 4m_4 L \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2m_3 l_2 \dot{q}_3^2 + 2m_4 L \dot{q}_3^2) \sin(q_1 + q_3)\} \\
G_1 &= -m_1 g l_1 \sin q_1 - 2(m_3 l_2 + m_4 L)g \sin(q_1 + q_3) \\
G_2 &= 0, \quad G_3 = -2(m_3 l_2 + m_4 L)g \sin(q_1 + q_3) \\
E_{11} &= -E_{31} = -2n_1 K_{t1}, \quad E_{21} = 0 \\
E_{12} &= E_{32} = -E_{22} = -2n_2 K_{t2}
\end{aligned}$$

さらに、状態ベクトルを $x := [q^T, \dot{q}^T]^T$ とすると、式 (1) のシステムは状態方程式

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\
f &:= \begin{bmatrix} \dot{q} \\ M(q)^{-1}(-C(q, \dot{q}) - G(q)) \end{bmatrix}, \quad g := \begin{bmatrix} 0 \\ M(q)^{-1}E \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (2)$$

で記述できる。なお、Fig. 4 において p_g は次式を満たすロボット全体の重心の位置ベクトルである。

$$mp_g = m_1 p_1 + 2(m_3 p_2 + m_4 p_3) \quad (3)$$

となる。ただし、 $m := m_1 + 2(m_3 + m_4)$ は全体の質量、 p_1 , p_2 , p_3 はそれぞれ本体、アーム、前輪の重心位置ベクトル

$$\begin{aligned}
p_1 &= [l_1 \sin q_1, l_1 \cos q_1]^T + p_0 \\
p_2 &= [l_2 \sin(q_1 + q_3), l_2 \cos(q_1 + q_3)]^T + p_0 \\
p_3 &= [L \sin(q_1 + q_3), L \cos(q_1 + q_3)]^T + p_0
\end{aligned} \quad (4)$$

であり、 p_0 は後輪の中心の座標である。ここで、「後輪」とは本体に取り付けられている車輪 (Fig. 4 で接地している車輪)、「前輪」とはアームの先端に取り付けられている車輪を意味して

いる。さらに、Fig. 4 に示すように、ロボット全体の傾き θ_g を時計まわりを正として、後輪の中心 p_0 からロボット全体の重心 p_g までのベクトルが鉛直上方向のベクトルとなす角と定義する。

倒立振り子の移動ロボット ($q_3 = 0$ に固定した場合に相当) に関する研究の多くは、平衡状態近傍で線形近似したシステムに基づいて設計された線形制御則を用いており、その有効性が指摘されている [9]~[12]。すなわち、車輪の目標角度を q_{2r} とすると、Fig. 3 の 4 のような目標状態 $x_r := [0, q_{2r}, 0, 0, 0, 0]^T$ の近傍では、線形システム

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= Ax + Bu \\
A &:= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_r} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad B := \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x=x_r} = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x=0}
\end{aligned} \quad (5)$$

を安定化する線形制御則 $u = -K(x - x_r)$ ($K \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$) が有効である。なお、式 (6) では f , g がいずれも q_2 に依存しないことを用いている。一方、Fig. 3 の 2 のように $x = x_r$ から大きく離れると線形制御則は有効ではない。そこで本研究では、線形補償器が有効な状態 x の範囲の一部が既知であるという仮定のもとで、そのような状態まで部分線形化を用いて制御したあとで線形補償器に切り替える方法を提案する。具体的には以下を仮定する。

仮定 1 与えられたフィードバックゲイン $K \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ と定数 η ($0 < \eta < \pi/2$)、および任意の定数 q_{2r} に対して、式 (2) のシステムに線形制御則 $u = -K(x - x_r)$ を適用することにより

$$x_0 = [q_1(0), q_{2r}, 0, 0, 0, 0], \quad |q_1(0)| \leq \eta \quad (7)$$

を満たす初期状態から目標状態 x_r に収束することが分かっているものとする。

上記の仮定 1 では任意の定数 q_{2r} に対して条件が成り立つことを仮定しているが、式 (2) の f , g が q_2 に依存せず、 q_2 の初期値が $q_2(0) = q_{2r}$ であるため、実際にはある値 (例えば $q_{2r} = 0$) で条件が成り立てば任意の q_{2r} で条件が成り立つ。また、式 (2) の非線形システムと式 (5) の線形システムの違いは $|q_1|$ に依存して大きくなるため、多くの場合には $|q_1(0)| = \eta$ に対して条件が成り立てば $|q_1(0)| \leq \eta$ で条件が成り立つ。したがって、予備実験などから仮定 1 を満たす K と η を得ることは比較的容易であり、現実的な仮定であると考えられる。

本論文では仮定 1 のもとで、Fig. 3 で示す変形を達成するために q_1 , q_3 , $\dot{q}_2$ を目標値 0 に収束させることを目的とする。なお、車輪の角度 q_2 、すなわちロボットの位置の制御は本論文では考慮しない。上記の車輪の角度の目標値 q_{2r} は制御目的として与えられるものではなく、後述する制御アルゴリズムの中で線形制御器への切り替えを行う時刻の q_2 の値として自動的に与えられる定数である。

3. 制 御 系 設 計

提案する制御アルゴリズムの概略を以下に示す。

Step 1: 部分線形化に基づき、 q_1 , q_3 を 0 に制御する。

Step 2: ロボット本体の姿勢角の目標値を変更することにより, $|\dot{q}_2|$ を減少させ, 車輪を静止させる.

Step 3: 線形制御器に切り替え, $q_1, q_3, \dot{q}_2$ を 0 に制御する. 上記アルゴリズムの中で, 安定解析を行う上で最も重要になるのが Step 2 である. Step 3 の線形制御器でシステムを安定化するためには, Step 3 に切り替わる時刻で式 (7) のように $|q_1| \leq \eta$, $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = \dot{q}_4 = 0$ を満たす必要がある. したがって, Step 2 で $|\dot{q}_2|$ を減少させる必要があるが, $\dot{q}_2$ を制御すると $q_1, \dot{q}_1$ の値に影響を与えるため, いかに $|q_1| \leq \eta$, $\dot{q}_1 = 0$ が満たされている状態で車輪を静止させるかが重要である.

なお, $q_3 \neq 0$ の場合には $q_1 = 0$ に制御してもロボット全体の傾きは $\theta_g \neq 0$ であり, 倒れやすい状態にある. したがって, Step 1 ではロボット全体の傾き θ_g と q_3 を 0 に制御することにより, 間接的に $q_1 = 0$ に制御する.

以下では, まずロボット全体の傾き θ_g を q_1, q_3 の関数として表し, 次に上記の各ステップについて述べる.

3.1 ロボット全体の傾き

まず, 式 (3) から次式が得られる.

$$m(p_g - p_0) = \begin{bmatrix} c_1 \sin q_1 + 2c_2 \sin(q_1 + q_3) \\ c_1 \cos q_1 + 2c_2 \cos(q_1 + q_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし, $c_1 := m_1 l_1$, $c_2 := m_4 L + m_3 l_2$ である. 次に, 式 (8) より次式を得る.

$$\begin{aligned} \theta_g &= \tan^{-1} \frac{c_1 \sin q_1 + 2c_2 \sin(q_1 + q_3)}{c_1 \cos q_1 + 2c_2 \cos(q_1 + q_3)} \\ &= \tan^{-1} \frac{(c_1 + 2c_2 \cos q_3) \sin q_1 + 2c_2 \sin q_3 \cos q_1}{(c_1 + 2c_2 \cos q_3) \cos q_1 - 2c_2 \sin q_3 \sin q_1} \\ &= q_1 + \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

$$\alpha := \tan^{-1} \frac{2c_2 \sin q_3}{c_1 + 2c_2 \cos q_3} \quad (10)$$

さらに, θ_g の時間微分は次式で与えられる.

$$\dot{\theta}_g = \dot{q}_1 + \zeta(q_3)\dot{q}_3, \quad \zeta(q_3) := \frac{4c_2^2 + 2c_1 c_2 \cos q_3}{c_1^2 + 4c_2^2 + 4c_1 c_2 \cos q_3} \quad (11)$$

3.2 部分線形化による本体姿勢とアームの制御 (Step 1)

Fig. 5 に Step 1 の制御系のブロック線図を示す. Step 1 では θ_g, q_3 を制御するため, 次の状態変数を定義する.

$$z_1 := \theta_g, \quad z_2 := \dot{\theta}_g, \quad z_3 := q_3, \quad z_4 := \dot{q}_3 \quad (12)$$

式 (2) の f, g の要素をそれぞれ $f_i, g_{ij} (i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2)$ とすると, 式 (2), (11) より

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 + \dot{\zeta} q_3 + \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_4 + \frac{\partial \zeta}{\partial q_3} \dot{q}_3^2 + \zeta f_6 \\ f_6 \end{bmatrix} + Du \\ D &:= \begin{bmatrix} g_{41} + \zeta g_{61} & g_{42} + \zeta g_{62} \\ g_{61} & g_{62} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

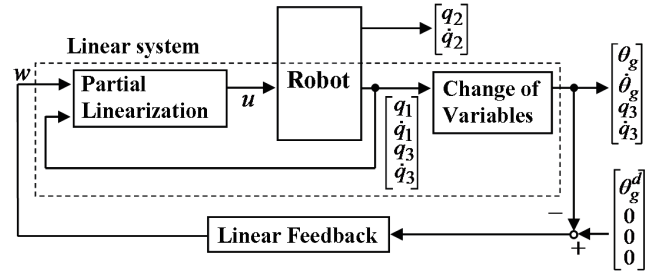


Fig. 5 Block diagram of the control system in Step 1 and 2

となるので, 制御入力 u を

$$u = D^{-1} \begin{bmatrix} w_1 - f_4 - \frac{\partial \zeta}{\partial q_3} \dot{q}_3^2 - \zeta f_6 \\ w_2 - f_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

とすることにより, 式 (12) の状態変数に対して

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = w_1, \quad \dot{z}_3 = z_4, \quad \dot{z}_4 = w_2 \quad (15)$$

のような線形システムを構成することができる. ただし, $w = [w_1, w_2]^T$ は新たに導入された仮想的な入力である. これらの入力は, θ_g の目標値 $\theta_g^d = 0$, q_3 の目標値 $q_3^d = 0$ として

$$\begin{aligned} w_1 &= -k_1(\theta_g - \theta_g^d) - k_2 \dot{\theta}_g \\ w_2 &= -k_3(q_3 - q_3^d) - k_4 \dot{q}_3 \end{aligned} \quad (16)$$

と与えられる. ただし, k_1, k_2, k_3, k_4 は正数である.

以上のように, 式 (14) による線形化と式 (16) の線形制御器により, θ_g, q_3 を目標値に収束させることができる. また, 式 (9) より q_1 も目標値 0 に収束することが分かる. 一方, $\dot{q}_2$ は式 (14), (16) の制御入力では制御することができない. したがって, θ_g, q_3 が目標値近傍に収束したら, $\dot{q}_2$ を制御する Step 2 に切り替える.

なお, 式 (14) の u を適用するためには D , および式 (2) における M の可逆性が重要である. 任意の物理パラメータに対して M の可逆性を議論するのは困難であるが, Table 1 のパラメータ値に対しては

$$\begin{aligned} \det(M) &= 1.29 - 0.306 \cos^2(q_1 + q_3) - 0.331 \cos^2 q_1 \\ &\geq 1.29 - 0.306 - 0.331 > 0 \end{aligned}$$

が成り立つので, 常に可逆である. また, D に対して, 物理パラメータの値によらず

$$\det(D) = E_{11} E_{12} (2M_{22} + M_{12} + M_{23}) / \det(M)$$

が成り立つ. ここで, $|q_1| \leq \pi/2, |q_1 + q_3| \leq \pi/2$ より $M_{12} \geq 0, M_{23} \geq 0$ となる. したがって, $E_{11} E_{12}, M_{22}$ が正であることと $\det(M)$ の有界性より D は可逆である.

3.3 重心の操作による車輪角速度の制御 (Step 2)

前節で述べたように, Step 1 から Step 2 に切り替わる時刻で θ_g, q_3 は目標値 $\theta_g^d = q_3^d = 0$ 近傍にある. Step 2 では q_3^d は変更せず, θ_g^d を操作することにより車輪を減速させる. これにより, アームの角度に関しては引き続き $q_3 \simeq 0, \dot{q}_3 \simeq 0$ が維

持される。したがって、式 (16) より $w_2 \simeq 0$ 、式 (9)、(10) より $\theta_g \simeq q_1$ も成り立つ。

このような場合の車輪の動特性を調べるため、まず、式 (14) の制御入力 u を式 (2) に代入して次式を得る。

$$\ddot{q}_2 = \psi_1 f_4 + f_5 + \psi_2 f_6 - \psi_1 w_1 + \psi_1 \dot{\zeta} \dot{q}_3 - (\psi_2 - \psi_1 \zeta) w_2$$

$$\psi_1 := \frac{961952 - 951962}{941962 - 942961}, \quad \psi_2 := \frac{951942 - 941952}{941962 - 942961}$$

ここで、 $q_3 = \dot{q}_3 = w_2 = 0$ 、 $\theta_g = q_1$ を代入すると

$$\ddot{q}_2 = \psi_1 f_4 + f_5 + \psi_2 f_6 - \psi_1 w_1$$

$$= \frac{(C_1 + C_2 \theta_g^2) \sin \theta_g}{C_3 \cos \theta_g + C_4} - \frac{C_2 \cos \theta_g + C_5}{C_3 \cos \theta_g + C_4} w_1 \quad (17)$$

を得る。ただし、 C_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は次のような物理パラメータからなる正の定数である。

$$C_1 = (4m_4 L + m_1 l_1 + 4m_3 l_2)g$$

$$C_2 = (2m_1 l_1 + 4m_3 l_2 + 4m_4 L)r$$

$$C_3 = (m_1 l_1 + 4m_3 l_2 + 4m_4 L)r$$

$$C_4 = 4J_2 + 4J_4 + 2r^2 m_1 + 4r^2 m_3 + 4r^2 m_4 + 4r^2 m_2$$

$$C_5 = 4J_3 + J_1 + m_1 l_1^2 + 4m_3 l_2^2 + 4m_4 L^2$$

Step 2 においても Step 1 と同様に制御系のブロック線図は Fig. 5 で表され、 θ_g^d はステップ信号である。ただし、 θ_g^d の値を、Step 1 から Step 2 へ切り替わった時刻 t_2 における $\dot{q}_2$ の値に依存して、以下のように変更する。

$$\theta_g^d = \begin{cases} -\sigma \dot{q}_2(t_2), & \text{if } |\dot{q}_2(t_2)| \leq \eta/\sigma \\ -\eta \operatorname{sgn}(\dot{q}_2(t_2)), & \text{if } |\dot{q}_2(t_2)| > \eta/\sigma \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 $\sigma > 0$ は設計パラメータであり、この値の選び方に関しては 4 章で考察する。

以下では、 θ_g^d を式 (18) のように決定する理由について概略を述べる。いま仮に、 θ_g が目標値 θ_g^d に収束したとすると、式 (16) より、 $\dot{\theta}_g = w_1 = 0$ が成り立つ。したがって、式 (17) は以下のように求められる。

$$\ddot{q}_2 = \Gamma(\theta_g^d) \sin \theta_g^d, \quad \Gamma(\theta_g^d) := \frac{C_1}{C_3 \cos \theta_g^d + C_4} \quad (19)$$

ここで、 $|\theta_g^d| < \pi/2$ であるので、 $\Gamma(\theta_g^d) > 0$ となる。したがって、式 (19) より、 $\theta_g^d < 0$ のとき $\ddot{q}_2$ は減少し、 $\theta_g^d > 0$ のとき $\ddot{q}_2$ は増加する。このことから、式 (18) のように、 θ_g^d の符号が $\dot{q}_2(t_2)$ と逆になるように選ぶことにより $|\dot{q}_2|$ が減少すると考えられる。ただし、以上の議論は θ_g が θ_g^d に収束するまでの過渡応答の影響を考慮していない。すなわち、 θ_g の過渡特性も考慮して目標状態への収束性を保証するためには、 θ_g^d の符号が $\dot{q}_2(t_2)$ と逆になるように選ぶだけでは不十分である。本論文では、式 (18) の右辺 1 行目のように θ_g^d を $\dot{q}_2(t_2)$ の一次関数とし、 θ_g の過渡特性も考慮して目標状態への収束性を保証するための定数 σ の条件を 4 章で考察する。なお、式 (18) の右辺 2 行目で $|\theta_g^d| \leq \eta$ の範囲に限定しているのは、ロボットの重心の傾き $\theta_g \simeq q_1$ を線形制御則で安定化できる範囲に抑えるため

である。

車輪が減速し、 $\dot{q}_2$ が 0 近傍に達したとき、Step 3 の線形制御則に切り替える。具体的には車輪角度の指令値 q_{2r} を、Step 2 から Step 3 に切り替えた時刻 t_3 における車輪角度 $q_2(t_3)$ に設定し、仮定 1 で与えられたフィードバックゲイン K を用いて線形制御則 $u = -K(x - x_r)$ を適用する。ここで、 $q_{2r} = q_2(t_3)$ と選ぶ理由は、線形制御器でシステムを安定化するためにはすべての状態変数が指令値近傍にあることが重要であり、仮定 1 においても式 (7) のように、線形制御器を適用する初期時刻において $q_2 = q_{2r}$ を前提としているからである。

4. 安定性に関する考察

第 3.3 節の最後で述べたように Step 2 から Step 3 に切り替わる時刻 t_3 で $q_2(t_3) = q_{2r}$ が成り立っているため、さらに時刻 t_3 において $\dot{q}_2 \simeq 0$ が成立し、 q_3 が 0、 q_1 が $|q_1(t_3)| \leq \eta$ を満たす値に収束していれば、仮定 1 より目標状態への収束を保証できる。

3.2 節で述べたように、Step 1 から Step 2 に切り替わる時刻 t_2 で θ_g と q_3 は目標値 0 近傍にある。また、時刻 t_2 以降も $\dot{q}_3^d = 0$ であるため、 $q_3 \simeq 0$ が維持される。したがって、ここでは次の仮定の下で議論を進める。

仮定 2 $\theta_g(t_2) = \dot{\theta}_g(t_2) = 0$ および $q_3(t) = 0$ ($t \geq t_2$) が成り立っているものとする。

このとき、式 (15)、(16) より θ_g に対する閉ループ系は

$$\dot{x}_{\theta e} = \Phi x_{\theta e}$$

$$x_{\theta e} := \begin{bmatrix} \theta_g - \theta_g^d \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix}, \quad \Phi := \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

であるので、Step 2 においては

$$x_{\theta e}(t_2 + s) = e^{\Phi s} x_{\theta e}(t_2) = -e^{\Phi s} v \theta_g^d, \quad v := \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

となる。また、仮定 2 により 3.3 節で述べたように車輪の角加速度に関して式 (17) が成り立つ。

3.3 節で述べたように、Step 3 への切り替えは Step 2 において最初に車輪が静止したときに行われる。実用上は厳密に $\dot{q}_2 = 0$ となる瞬間に切り替えることは難しく、この値の近傍に到達した際に切り替えを行うが、ここでは次の仮定の下で議論を進める。

仮定 3 Step 3 への切り替えは $\dot{q}_2 = 0$ となる瞬間に行われる。さらに以下を仮定する。

仮定 4 与えられた正数 T に対し、 $s \geq T$ で $\phi(s) := e^{\Phi s} v$ は 0 とみなせるものとする。

仮定 4 で定める T は θ_g の過渡応答をどの程度考慮に入れるかを表している。3.3 節において $\theta_g = \theta_g^d$ 、 $\dot{\theta}_g = 0$ という仮定のもとで、式 (18) のように θ_g^d の符号が $\dot{q}_2(t_2)$ と逆になるように選ぶことにより車輪を減速させることができることを述べたが、この仮定は $T = 0$ として θ_g の過渡応答を無視することに対応する。

仮定 2 と式 (9) より, Step 2 においては $q_1 = \theta_g$, $q_3 = 0$ である. また, 式 (18) より $|\theta_g^d| \leq \eta$ であるため, Step 3 に切り替える時刻 t_3 の状態が仮定 1 を満たすためには, 最初に $\dot{q}_2 = 0$ となる時刻に θ_g が θ_g^d に収束していればよい. したがって, Step 2 に切り替わる時刻 t_2 から, θ_g が θ_g^d に収束する時刻 $t_2 + T$ までの間に $\dot{q}_2$ の符号が一度も変わらないことが示されれば, 仮定 1 が満たされ, Step 3 における目標状態への収束が保証される. 以下では, この条件を満たす σ の上界を求める. なお, $\dot{q}_2(t_2) = 0$ のときは σ の値にかかわらず安定性は保証されるので, $\dot{q}_2(t_2) \neq 0$ の場合のみを考える.

まず, 式 (21) より

$$\theta_g(t_2 + s) = (1 - \phi_1(s))\theta_g^d \quad (22)$$

となる. ただし, ϕ_i は ϕ の i 番目の要素である. したがって, θ_g は定義より $|\theta_g| \leq \pi/2$ であること, および式 (18) より $|\theta_g^d| \leq \eta$ であることから

$$|\theta_g(t_2 + s)| \leq \min\{\Lambda\eta, \pi/2\}, \quad \forall s \in [0, T] \quad (23)$$

が成り立つ. ただし, $\Lambda := \max_{s \in [0, T]} |1 - \phi_1(s)|$ である.

車輪の角加速度に関する式 (17) に式 (16) を代入すると

$$\ddot{q}_2 = F_1 + F_2 + F_3 \quad (24)$$

と書ける. ただし,

$$F_1 := H_1 \sin \theta_g, \quad F_2 := H_2 \dot{\theta}_g^2 \sin \theta_g, \quad H_1 := \frac{C_1}{H} \quad (25)$$

$$F_3 := H_3(k_1(\theta_g - \theta_g^d) + k_2\dot{\theta}_g), \quad H_2 := \frac{C_2}{H}$$

$$H_3 := \frac{C_2 \cos \theta_g + C_5}{H}, \quad H(\theta_g) := C_3 \cos \theta_g + C_4 \quad (26)$$

である. ここで, 式 (23) より $t_2 \leq t \leq t_2 + T$ において

$$0 < H_1 \leq \bar{H}_1, \quad 0 < H_2 \leq \bar{H}_2, \quad 0 < H_3 \leq \bar{H}_3$$

$$\bar{H}_1 := \frac{C_1}{\underline{H}}, \quad \bar{H}_2 := \frac{C_2}{\underline{H}}, \quad \bar{H}_3 := \frac{C_2 + C_5}{\underline{H}}$$

$$\underline{H} = \max\{H(\Lambda\eta), C_4\} \quad (27)$$

が成り立つ. したがって, 式 (25), (27) より

$$\left| \frac{F_1(t_2 + s)}{\theta_g(t_2 + s)} \right| \leq H_1 \left| \frac{\sin(\theta_g(t_2 + s))}{\theta_g(t_2 + s)} \right| \leq \bar{H}_1 \quad (28)$$

$$\left| \frac{F_2(t_2 + s)}{\theta_g(t_2 + s)} \right| \leq \bar{H}_2 \dot{\theta}_g^2(t_2 + s) = \bar{H}_2 \left[-\phi_2(s)\theta_g^d \right]^2$$

$$\leq \bar{H}_2 \eta^2 \phi_2^2(s) \quad (29)$$

となる. また, 式 (18), (22) より

$$-\frac{\theta_g(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} = -\frac{\theta_g^d}{\dot{q}_2(t_2)}(1 - \phi_1(s))$$

$$\leq \sigma |1 - \phi_1(s)| \quad (30)$$

であるため,

$$-\frac{F_1(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} = -\frac{\theta_g(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} \frac{F_1(t_2 + s)}{\theta_g(t_2 + s)}$$

$$\leq \bar{H}_1 \sigma |1 - \phi_1(s)| \quad (31)$$

$$-\frac{F_2(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} = -\frac{\theta_g(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} \frac{F_2(t_2 + s)}{\theta_g(t_2 + s)}$$

$$\leq \bar{H}_2 \eta^2 \phi_2^2(s) \sigma |1 - \phi_1(s)| \quad (32)$$

となる. さらに, 式 (21), (26) より

$$F_3(t_2 + s) = -H_3 K \phi(s) \theta_g^d \quad (33)$$

を得る. よって, 式 (18) より

$$-\frac{F_3(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} \leq \bar{H}_3 \sigma |K \phi(s)| \quad (34)$$

となる. ここで,

$$\psi(s) := (\bar{H}_1 + \bar{H}_2 \eta^2 \phi_2^2(s)) |1 - \phi_1(s)| + \bar{H}_3 |K \phi(s)| \quad (35)$$

を定義すると, 式 (24), (31), (32), (34) より $s \leq T$ に対して

$$-\frac{1}{\dot{q}_2(t_2)} \int_{\tau=0}^s \ddot{q}_2(t_2 + \tau) d\tau \leq \sigma \int_{s=0}^T \psi(s) ds$$

となる. したがって,

$$\sigma < 1 \left/ \int_{s=0}^T \psi(s) ds \right. \quad (36)$$

を満足する正数 σ に対して

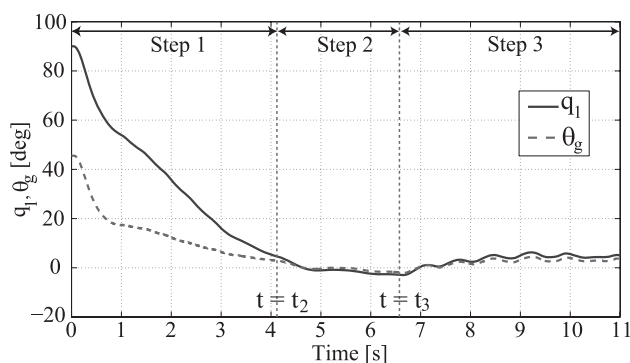
$$\frac{\dot{q}_2(t_2) - \dot{q}_2(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} = - \int_{\tau=t_2}^{t_2+s} \frac{\ddot{q}_2(\tau)}{\dot{q}_2(t_2)} d\tau < 1 \quad (37)$$

つまり,

$$\frac{\dot{q}_2(t_2 + s)}{\dot{q}_2(t_2)} > 0 \quad (38)$$

が成立する. このとき, $\dot{q}_2(t_2) > 0$ の場合には $\dot{q}_2(t_2 + s) > 0$ であり, $\dot{q}_2(t_2) < 0$ の場合には $\dot{q}_2(t_2 + s) < 0$ であることが分かる. すなわち, Step2 に切り替わる時刻 t_2 から, θ_g が目標値 θ_g^d に収束するまでの時間 $t_2 + s$ ($0 \leq s \leq T$) に車輪の速度の方向は変わらないことが保証される.

以上の議論から, 提案手法により目標状態への制御を達成する σ を選定する指標として式 (36) が得られた. これによると σ は右辺の上界よりも小さい値を選ぶ必要があるが, 一方で式 (27) など上界の見積もりが保守的な箇所もあるため, 式 (36) が満足されていなくても目標状態への収束性が達成される場合も存在すると推測される. このことを踏まえて, 次章の実験検証では σ は式 (36) の上界の値に設定する. なお, 式 (36) の積分や式 (23) の Λ は解析的に求めることは難しいため, 実装の際には s を小さな刻み幅で離散化することにより数値的に推定する.

Fig. 6 Time responses of q_1 and θ_g

5. 実験検証

5.1 パラメータの設定

まず、式 (16) のフィードバックゲインを式 (15) のシステムを安定化するように $k_1 = 10$, $k_2 = 5$, $k_3 = 3$, $k_4 = 3$ と与える。これに対して、仮定 4 のパラメータ T を ϕ_1 , ϕ_2 がそれぞれピーク値の 2% 以内に収まる $T = 2.1$ と設定した。また、式 (23) の Λ は s を刻み幅 0.01 で離散化したサンプルの最大値を求めることにより $\Lambda = 1.02$ と選定した。同様に s を離散化して式 (36) の積分を求めることにより、 σ の上界は 0.027 と算出されたため、ここでは $\sigma = 0.027$ とする。さらに、Step 3 の線形制御器は状態と入力に対する重み行列をそれぞれ $Q = \text{diag}(5, 8, 3, 5, 1, 1)$, $R = \text{diag}(20, 10)$ として最適レギュレータにより設計した。この制御器の安定化可能領域を表すパラメータを予備実験により $\eta = 10$ [deg] と選定した。なお、Step 1 から Step 2 への切り替え条件を $|\theta_g| < 5$ [deg], $|q_3| < 10$ [deg] とし、Step 2 から Step 3 への切り替え条件を $|\dot{q}_2| < 5$ [deg/s] のように設定した。

5.2 実験結果

本節では実験結果を示す。なお、本体の角速度 $\dot{q}_1$ はジャイロセンサにより計測し、これを積分することにより q_1 を算出している。また、 q_2 , q_3 はエンコーダにより計測し、差分を用いて $\dot{q}_2$, $\dot{q}_3$ を推定している。制御入力にはロボット本体に搭載されたノート PC によりサンプリング周期 5 [ms] で与えられる。

初期状態を Fig. 3 の 2 で本体に対するアームの相対角が 126 [deg] で静止した状態、すなわち $x(0) = [90, 0, -126, 0, 0, 0]^T$ としたときの q_1 , θ_g の時間応答をそれぞれ Fig. 6 の実線、破線で示す。また、 q_2 , q_3 の時間応答をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。さらに、Fig. 9 にスナップショットを示す。これらの結果から提案手法により Mode 4 への変形が達成されていることが分かる。ただし、 q_1 , q_3 でいずれも 5 [deg] 程度の定常誤差、車輪の角度 q_2 は Step 3 で与えられる目標値 $q_2(t_3)$ から 100 [deg] 以上の定常誤差が見られるなど、追従精度に関しては改善の余地がある。また、Fig. 8 のようにアームの角度 q_3 の応答が左右で顕著に異なるなど、モデルとは異なる特性が見られることから、モデルの精度も改善が必要であると考えられる。

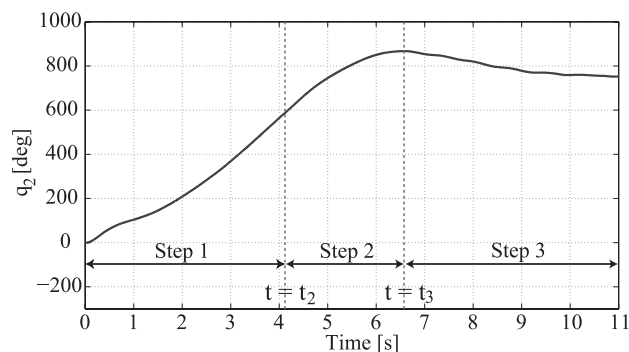
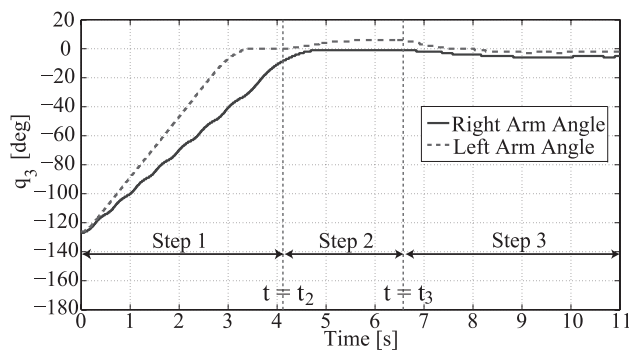
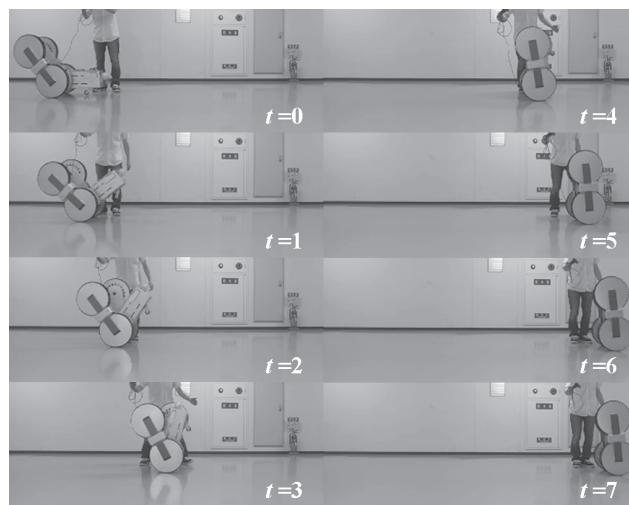
Fig. 7 Time response of q_2 Fig. 8 Time response of q_3 

Fig. 9 Snapshots of experiment

6. おわりに

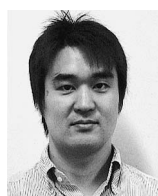
本論文では、車輪アームをもつ形態可変ロボットを 4 輪走行モードから倒立振りモードへ変形させる制御手法を提案した。この方法では、まず車輪アームを利用してロボットの重心を高くした状態から、部分線形化に基づいてロボット本体とアームの角度を同時に制御し、倒立状態へ変形させる。次に、ロボット本体の目標角度を操作して車輪を減速させ、最終的に線形状態フィードバック制御に切り替える。また、提案した手法に対して、従来研究では無視されていたロボット本体の目標角度への追従誤差や角速度の影響も考慮して目標状態への収束性を解

析し、安定性を保証するために設計パラメータ σ が満たすべき条件を導いた。さらに、実機実験により提案手法の有効性を検証した。今後の課題として、前節で挙げた問題の改善のほか、システムのパラメータ変動に対する制御系のロバスト性、および不整地におけるロバスト性の評価が挙げられる。また、車輪の角度 q_2 も被制御変数に含めた変形制御、および他のモードへの変形制御に関しても研究の必要がある。なお、本研究では文献[7]のロボットを対象としているが、能動関節で連結されたリンク系を振子とする車輪型倒立振子とみなせる他のロボット[6][13]にも提案手法が応用可能であることが期待される。提案手法の他の機構・用途への有効性の検討も今後の課題である。

本研究は文部科学省科学研究費（基盤 B20360107）によって行われたものである。また、実験環境の構築においてご協力いただいた川淵一郎氏（株式会社川淵機械技術研究所）、佐藤徳孝氏、根和幸氏（京都大学）に謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] Galileo Mobility Instruments, <http://www.galileo-mobility.com>
- [2] O. Matsumoto, S. Kajita, M. Saigo and K. Tani: "Dynamic trajectory control of passing over stairs by a biped type leg-wheeled robot with nominal reference of static gait," Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.406-412, 1998.
- [3] O. Matsumoto, S. Kajita and K. Komoriya: "Flexible Locomotion Control of a Self-contained Biped Leg-wheeled System," Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2599-2604, 2002.
- [4] M. Lauria, Y. Piguet and R. Siegwart: "Octopus—An Autonomous Wheeled Climbing Robot," Proc. of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, 2002.
- [5] T. Estier, Y. Crausaz, B. Merminod, M. Lauria, R. Piguet and R. Siegwart: "An innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities," Proc. Space and Robotics 2000, 2000.
- [6] 保井毅, 山藤和男: "腕と本体が3リンクで構成された平行二輪車型移動ロボットの運動制御 (第1報, 直立姿勢安定化制御と階段昇降)," 日本機械学会論文集 (C 編), vol.57, no.538, pp.1904-1909, 1991.
- [7] N. Shiroma, Y. Chiu, Z. Min, I. Kawabuchi and F. Matsuno: "Development and Control of a High Maneuverability Wheeled Robot with Variable-Structure Functionality," Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.4001-4006, 2006.
- [8] N. Shiroma, Y. Fujino and F. Mstauno: "Automatic Step Climbing by Wheeled Robot HANZO with Variable Structure Functionality using 3D Range Sensor," Proc. IEEE Intl. Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, 2006.
- [9] Y.-S. Ha and S. Yuta: "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot," Robot. Autonom. Syst., vol.17, pp.65-80, 1996.
- [10] F. Grasser, A.D. Arrigo, S. Colombi and A. Rufer: "Joe: A mobile, inverted pendulum," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.49, no.1, pp.107-114, 2002.
- [11] A. Salerno and J. Angeles: "The control of semi-autonomous two-wheeled robots undergoing large payload-variations," Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, pp.1740-1745, 2004.
- [12] A. Blankespoor and R. Roemer: "Experimental verification of the dynamic model for a quarter size self-balancing wheelchair," Proc. Amer. Contr. Conf., pp.488-492, 2004.
- [13] S.-H. Jeong and T. Takahashi: "Stable and Quick Standing-Sitting Motion of I-PENTAR by Whole-body Motion with Force Control," Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.199-204, 2008.
- [14] K. Pathak, J. Franch and S.K. Agrawal: "Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization," IEEE Trans. Robotics, vol.21, no.3, pp.505-513, 2005.
- [15] J.-J. Slotine and W. Li: Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall, 1991.



福島宏明 (Hiroaki Fukushima)

2001 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了。1999 年から 2004 年まで日本学術振興会特別研究員, 2004 年より電気通信大学助手, 2009 年より京都大学大学院工学研究科助教, 2010 年より同講師となり, 現在に至る。主に, ロバスト制御, システム同定の研究に従事。2001 年度システム制御情報学会奨励賞, 2003 年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)



新村 諭 (Satoru Sinmura)

2007 年電気通信大学知能機械工学専攻修士課程修了。同年 CKD 株式会社入社, 現在に至る。在学中, 非線形制御理論, 移動ロボットの制御系設計の研究に従事。



松野文俊 (Fumitoshi Matsuno)

1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学, 神戸大学, 東京工業大学, 電気通信大学を経て 2009 年より京都大学工学研究科 (機械理工学専攻) 教授となり, 現在に至る。2002 年より NPO 国際レスキュー研究機構理事, 2005 年より副会長。主に, ロボティクス・制御工学・レスキュー学に関する研究に従事。1989 年度日本ロボット学会研究奨励賞, 1993 年度システム制御情報学会論文賞, 1997 年度消防防災科学論文賞 (消防庁長官表彰), 2001 年度, 2006 年度計測自動制御学会論文賞, 2001 年度同学会武田賞, 2006 年度船井情報科学振興賞などを受賞。IEEE, 日本機械学会などの会員, 工学博士。(日本ロボット学会正会員)