

速度履歴に基づくねじ推進ヘビ型ロボットの先頭追従制御

有 泉 亮* 福 島 宏 明* 松 野 文 俊*

Front-Unit-Following Control of a Snake-like Robot Using Screw Drive Mechanism Based on Past Velocity Commands

Ryo Ariizumi*, Hiroaki Fukushima* and Fumitoshi Matsuno*

This paper presents a front-unit-following control method for a snake-like robot using screw drive mechanism. The operators are required to command only one unit in the head, then commands for the rest of the units are automatically calculated to track the path of the preceding units. The proposed method estimates the tracking error expressed in the Frenet frame using past velocity commands in order to determine the control inputs. Since the past velocity commands stored at discrete points are used for estimation of the tracking error, we also propose a method to dynamically change the data storage interval for reducing the amount of data stored, without losing the accuracy of estimation. Effectiveness of the proposed method is demonstrated by computer simulations and laboratory experiments.

Key Words: Snake-like Robot, Screw Drive Mechanism, Path Tracking, Search and Rescue

1. は じ め に

近年、ヘビのように細長い形状をもつヘビ型ロボットの研究が活発になされている。ヘビ型ロボットは狭く複雑な領域に進入するのに適した形状であり、倒壊した家屋内などでの救助活動のほか、床下・配管の検査などに有効であると考えられている [1]~[6]。これらヘビ型ロボットの典型的なものとしてクローラを直列に接続したものがあるが、ロボットの上下でクローラの回転方向が異なるため天井とロボットが接してしまった場合には前進できず、狭隘地への進入が難しい。そのため、四角柱状のロボットの四つの側面にそれぞれ別のクローラを配置し、独立に駆動させる機構を搭載したヘビ型ロボットも開発されている [7] [8]。

一方、ねじの原理に基づいた推進機構により、体幹の周囲 360°のいずれかの点が環境に接していれば推進力を得ることが可能なねじ推進ヘビ型ロボットの開発も進められている [9]。このロボットは、ねじ推進ユニットと呼ばれるユニットを複数個直列に接続した構造をもち、天井の低い狭隘地でねじ推進ユニットの上部と下部の両方が環境に接した場合でも、同じ方向に推進力を発生できる。さらに、各ユニットの回転の方向や速度を適切に変えることにより全方向への移動も可能である。里村ら [10] は、ねじ推進ユニットを四つ連結したねじ推進ヘビ型ロボット

の運動学モデルを導出し、先頭ユニットの位置・姿勢、および各関節角度を与えられた目標軌道に追従させる制御系の設計を行っている。

ところが、一般にヘビ型ロボットはアクチュエータの数が多いため、オペレータがヘビ型ロボットを遠隔操縦する際には、すべての関節角に対して同時に適切な目標軌道を与えることが困難である場合が多い。そこで文献 [11] では、ねじ推進ヘビ型ロボットの運動学モデルに基づき、オペレータが先頭ユニットの速度指令値のみを与え、後続ユニットは先頭ユニットの経路に自動的に追従するような先頭追従制御則を提案している。しかしこの手法は、目標経路の曲率が一定の場合にのみ収束性を保証するものであるため、目標経路の曲率が急激に変化する場合には大きな追従誤差が生じうるという問題を残している。

ヘビ型ロボットの経路追従問題に関連する研究として、文献 [12] では連続曲線に区分的線形曲線をフィッティングさせる手法が提案されている。この方法を用いることにより、与えられた経路に重なるようなヘビ型ロボットの形状を求めることができる。ところが、本研究においてはロボットは推進しながら経路追従を行う必要があるため、ロボットがフィッティングすべき目標経路は常に変化する。与えられた曲線にフィッティングする目標関節位置の探索や目標関節角への追従にはある程度の時間がかかるため、本論文の制御問題に対する文献 [12] の方法の適用可能性や有効性は明らかではない。

他方、文献 [13]~[15] では、追従誤差をフレネ標構系で表現しそれに基づく経路追従制御を行っているが、これは通常の変速連結車両を対象とする手法であり、構造の大きく異なるねじ推

原 2011 年 2 月 28 日

*京都大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

■ 本論文は学術性で評価されました。

進ヘビ型ロボットにそのまま適用することは困難である。しかしながら、ねじ推進ヘビ型ロボットの場合にもフレネ標構で表現される追従誤差を用いたフィードバック制御を導入することにより、追従性能を向上できると考えられる。さらに、これらの研究では目標経路は与えられていることが前提であるが、本研究では、オペレータが先頭ユニットの速度指令値を与えてロボットを操作する場合を想定しているため、オペレータによる速度指令値のサンプルからリアルタイムに後続の目標経路を推定する必要がある。

そこで本研究では、ねじ推進ヘビ型ロボットを対象とし、先頭に対する過去の速度指令値の情報を用いて後続関節の追従誤差を推定し、その推定値を用いたフィードバック制御による先頭追従制御を提案する。追従誤差の推定に用いる先頭への速度指令値の情報は離散的に記録されるため、その記録間隔を動的に変化させ、推定の精度を落とすことなく記録される情報量を低減する手法も提案する。さらに、シミュレーションおよび実験により提案手法の有効性を検証する。

以下、2章ではねじ推進ヘビ型ロボットの運動学モデルについて概説し、3章において制御目的を明確化し、制御則を導出する。4章ではシミュレーションを、5章では実験を行い提案手法の有効性を示し、6章で本論文をまとめる。

2. ねじ推進ヘビ型ロボット

本章では、制御対象とする実験機とその運動学モデルの概略を述べる [10]。

Fig. 1 にねじ推進ヘビ型ロボットの全体図を示す。ロボットは、右ねじ推進ユニットと左ねじ推進ユニットの2種類のユニットを交互に四つ連結した構成になっている。また、ねじ推進ユニットはピッチ、ヨーの2自由度を持つ関節ユニットにより直列に連結されており、各関節の可動範囲は $\pm\pi/2$ [rad] である。ただし、本研究ではピッチ方向の関節を固定し、水平面上の運動に限定する。

Fig. 2 にねじ推進ユニットの概略図を示す。ねじ推進ユニットの回転軸と受動車輪の回転軸との角度を α とする。ここで、Fig. 2 の左図では α が正、右図では負となっており、それぞれ左ねじ推進ユニット、右ねじ推進ユニットと呼んでいる。受動車輪が横滑りしないと仮定すると、スクリューを矢印 A の方向へ回転させたとき、ユニット中心部では矢印 B の方向に並進

速度を生じる一方、受動車輪は矢印 C の方向へ回転するため、結果的にユニットの中心点 o では、受動車輪の回転軸方向に速度が発生する。

Fig. 3 のように、 $O-xy$ を絶対座標系とし、ロボット先頭の制御点 P の座標を (x_p, y_p) 、先頭リンクの姿勢を ψ_p とする。また、リンク i のスクリュー部の中心の絶対座標系に関する位置を $[x_i, y_i]^T$ とする。各リンクの先端からねじ推進ユニット中心までの距離を L_1 、ねじ推進ユニット中心からリンク終端までの距離を L_2 とする。ねじ推進ユニット i の回転軸から受動車輪の回転軸までの角度を α_i 、リンク i とリンク $i+1$ のなす角を関節角 ϕ_i とし、リンク i の姿勢 ψ_i を絶対座標系の x 軸からの偏角とする。すなわち、 $\psi_1 = \psi_p$ 、 $\psi_i = \psi_p + \sum_{k=1}^{i-1} \phi_k$ ($i = 2, 3, 4$) である。また、ねじ推進ユニット i の回転角速度を $\dot{\theta}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) とする。

まず、幾何学的な関係から、第 i リンクのスクリュー部の中心の位置座標は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} x_i &= x_p + L_1 \cos \psi_p + \sum_{j=1}^{i-1} (L_2 \cos \psi_j + L_1 \cos \psi_{j+1}) \\ y_i &= y_p + L_1 \sin \psi_p + \sum_{j=1}^{i-1} (L_2 \sin \psi_j + L_1 \sin \psi_{j+1}) \end{aligned} \quad (1)$$

次に、式 (1) の時間微分を受動車輪の速度拘束式

$$\dot{x}_i \cos(\alpha_i + \psi_i) + \dot{y}_i \sin(\alpha_i + \psi_i) + r \dot{\theta}_i \sin \alpha_i = 0 \quad (2)$$

に代入する。ここで、 r は Fig. 2 のように、ねじ推進ユニットの半径 (ユニットの中心から接地点までの距離) とする。この

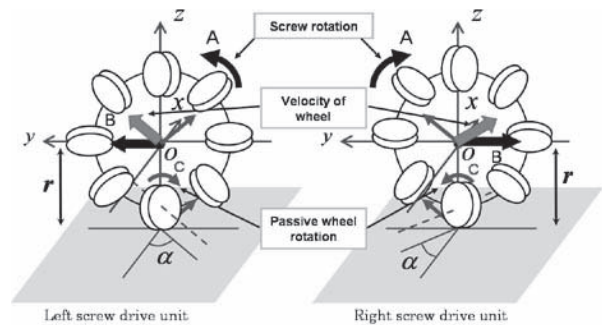


Fig. 2 Model of left and right screw drive units

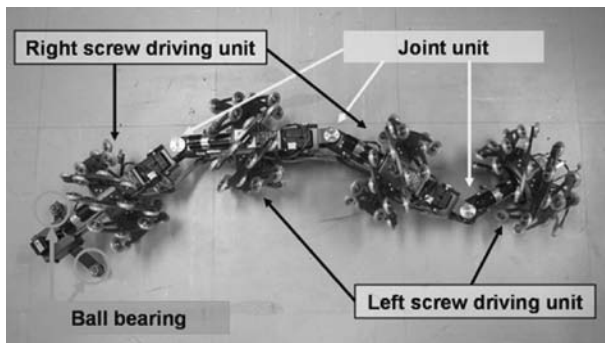


Fig. 1 Snake-like robot with screw drive units

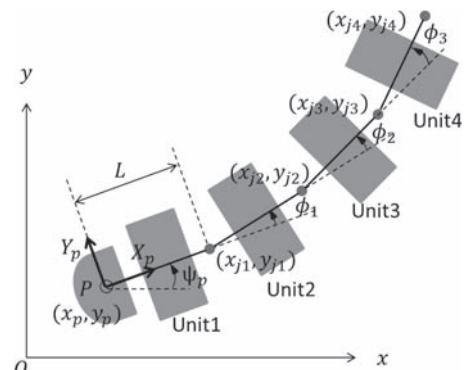


Fig. 3 Schematic of a screw drive snake-like robot

とき、運動学モデルは次のように導ける。

$$A\dot{w} = Bu \quad (3)$$

ただし、 $w := [x_p \ y_p \ \psi_p \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3]^T$ は被制御量、 $u := [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4 \ \dot{\phi}_1 \ \dot{\phi}_2 \ \dot{\phi}_3]^T$ は入力であり、 A と B は

$$A := \begin{bmatrix} A_1 \\ 0 \ E_3 \end{bmatrix}, \quad B := \text{block diag}(B_1, E_3)$$

$$A_1 := \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \end{bmatrix}$$

$$B_1 := -r \text{diag}(\sin \alpha_1, \sin \alpha_2, \sin \alpha_3, \sin \alpha_4)$$

$$a_{i1} := \cos(\alpha_i + \psi_i), \quad a_{i2} := \sin(\alpha_i + \psi_i)$$

$$a_{13} := L_1 \sin \alpha_1, \quad a_{23} := L_1 \sin(\alpha_2 + \phi_1) + L_1 \sin \alpha_2$$

$$a_{24} := L_1 \sin \alpha_2, \quad a_{33} := L_1 \sin(\alpha_3 + \phi_1 + \phi_2) + a_{34}$$

$$a_{34} := L \sin(\alpha_3 + \phi_2) + L_1 \sin \alpha_3, \quad a_{35} := L_1 \sin \alpha_3$$

$$a_{43} := L \sin(\alpha_4 + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3) + a_{44}$$

$$a_{44} := L \sin(\alpha_4 + \phi_2 + \phi_3) + a_{45}$$

$$a_{45} := L \sin(\alpha_4 + \phi_3) + L_1 \sin \alpha_4, \quad a_{46} := L_1 \sin \alpha_4$$

ここで、 $L := L_1 + L_2$ 、 E_k は $k \times k$ の単位行列である。なお、本研究で用いる実験機では、各物理パラメータの値は $L_1 = 0.103$ [m]、 $L_2 = 0.123$ [m]、 $r = 0.075$ [m]、 $\alpha_i = -\pi/4$ [rad] ($i = 1, 3$)、 $\alpha_i = \pi/4$ [rad] ($i = 2, 4$) となっている。

3. 先頭追従制御則

操縦者により、先頭ユニットの並進速度 $v_1(t)$ および角速度 $\omega_1(t)$ が与えられるとする。なお、この設定はロボット先頭に設置したカメラの映像をもとに操縦する状況を念頭に入れたものである。カメラの設置位置に関しては、狭隘地に進入することを前提としており、ロボットの上部や左右など、本体から突出するようにカメラを設置することは望ましくないため、先頭に取り付ける設定を考えている。 $v_1(t)$ は Fig. 3 に示す先頭リンクに固定された座標系 $P-X_pY_p$ の X_p 軸方向を正の向きとしており、本研究においては前進のみを考えるため、 $v_1 < 0$ となる。また、状態ベクトル w は測定できるものとする。

本研究の目的は、操縦者によって与えられた先頭ユニットの速度指令値

$$\dot{x}_p = v_1 \cos \psi_p, \quad \dot{y}_p = v_1 \sin \psi_p, \quad \dot{\psi}_p = \omega_1 \quad (4)$$

を達成し、かつ後続ユニットを先頭 P が通った経路に沿って追従させる制御入力 u を決定することである。ただし、Fig. 4 のように、先頭リンクの姿勢 ψ_p は定義より常に P の経路 γ' の接線方向に一致するため、先頭リンクの終端である第1関節の位置は γ' が直線であるなどの特殊な場合を除き、 γ' から外れてしまうことは避けられない。したがって、より正確には第1関節が通った軌道 γ に沿って後続の関節を追従させる問題を考える。

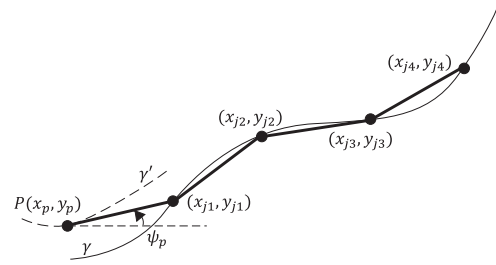


Fig. 4 Trajectory of each joint

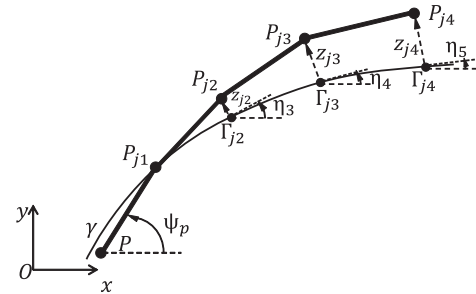


Fig. 5 Frenet frames associated with each joint

3.1 制御則の導出

本論文で対象とする運動は平面的な運動であり、すべて二次元で考察することが可能であるが、導出過程の表現が簡略であるため三次元で考察する。

絶対座標系 $O-xyz$ を Σ_A とし、 Σ_A で表された第 i 関節の位置を $[x_{ji} \ y_{ji} \ 0]^T$ とする。便宜上、第4リンクの終端を第4関節とよぶこととし、その絶対座標を $[x_{j4} \ y_{j4} \ 0]^T$ と定める。すると、隣接する関節間には速度について次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ji} &= \dot{x}_{j(i-1)} - L\dot{\psi}_i \sin \psi_i \\ \dot{y}_{ji} &= \dot{y}_{j(i-1)} + L\dot{\psi}_i \cos \psi_i \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 5 に示すように、 P_{ji} を第 i 関節の位置とし、 Γ_{ji} を点 P_{ji} から目標軌道 γ へ下ろした垂線の足とする。点 Γ_{ji} を原点とし軌道 γ に沿ったフレネ標構 $\Sigma_B : (\Gamma_{ji}, t, n, b)$ を考え、点 Γ_{ji} と点 P_{ji} との (符号付きの) 距離を z_{ji} とする。ここで、 t, n, b はそれぞれ、点 Γ_{ji} における曲線 γ の単位接ベクトル、単位主法ベクトル、単位陪法ベクトルである。このとき、制御目的は各 z_{ji} を 0 に漸近収束させることであるということができる。

点 Γ_{ji} における目標軌道 γ の接ベクトルの、絶対座標系 Σ_A に対する姿勢角を η_{i+1} とすると、絶対座標系 Σ_A に対するフレネ標構 Σ_B の姿勢を表す回転行列 ${}^A R_B$ は

$${}^A R_B = [{}^A t \ {}^A n \ {}^A b] = \begin{bmatrix} \cos \eta_{i+1} & -\sin \eta_{i+1} & 0 \\ \sin \eta_{i+1} & \cos \eta_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

と書ける。ここで、例えば ${}^A t$ はベクトル t を座標系 Σ_A で表現したものを表す。

また、絶対座標系 Σ_A から見た、 Σ_A の原点から点 P_{ji} 、点 Γ_{ji} へ向かうベクトルをそれぞれ ${}^A p_{ji}$ 、 ${}^A \gamma_{ji}$ とする。さらに、

フレネ標構 Σ_B から見た, Σ_B の原点 Γ_{ji} から点 P_{ji} へ向かうベクトルを ${}^B z_{ji} = [0 \ z_{ji} \ 0]^T$ とする. このとき次式が成り立つ.

$${}^A p_{ji} = {}^A \gamma_{ji} + {}^A R_B {}^B z_{ji} \quad (7)$$

この式の両辺を時間微分すると

$${}^A \dot{p}_{ji} = {}^A \dot{\gamma}_{ji} + {}^A \dot{R}_B {}^B z_{ji} + {}^A R_B {}^B \dot{z}_{ji} \quad (8)$$

となり, 両辺に ${}^A R_B^{-1}$ を左からかけることにより

$$\begin{aligned} {}^A R_B^{-1} {}^A \dot{p}_{ji} &= {}^B \dot{\gamma}_{ji} + {}^A R_B^{-1} {}^A \dot{R}_B {}^B z_{ji} + {}^B \dot{z}_{ji} \\ &= {}^B \dot{\gamma}_{ji} + {}^B \omega_{ji} \times {}^B z_{ji} + {}^B \dot{z}_{ji} \end{aligned} \quad (9)$$

を得る. ただし, ${}^B \omega_{ji} = [0 \ 0 \ \dot{\eta}_{i+1}]^T$ はフレネ標構 Σ_B から見た, 絶対座標系 Σ_A に対する Σ_B の角速度ベクトルである. また, ${}^B \dot{\gamma}_{ji}$ は Σ_A に対する点 Γ_{ji} の速度を Σ_B で表したベクトルであり, P_{ji} の曲線座標を s_{ji} とすると ${}^B \dot{\gamma}_{ji} = [\dot{s}_{ji} \ 0 \ 0]^T$ である. したがって, 式 (9) から

$${}^A R_B^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ji} \\ \dot{y}_{ji} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}_{ji} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\eta}_{i+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ z_{ji} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{z}_{ji} \\ 0 \end{bmatrix}$$

すなわち,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{ji} \cos \eta_{i+1} + \dot{y}_{ji} \sin \eta_{i+1} \\ -\dot{x}_{ji} \sin \eta_{i+1} + \dot{y}_{ji} \cos \eta_{i+1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}_{ji} - z_{ji} \dot{\eta}_{i+1} \\ \dot{z}_{ji} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる. 式 (10) の第 2 成分と式 (5) とから, 次の式が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{z}_{ji} &= -\dot{x}_{j(i-1)} \sin \eta_{i+1} + \dot{y}_{j(i-1)} \cos \eta_{i+1} \\ &\quad + L \dot{\psi}_i \cos(\psi_i - \eta_{i+1}) \end{aligned} \quad (11)$$

よって, ある正の定数 k_i を用いて, 第 i リンクの角速度を

$$\dot{\psi}_i = \frac{\dot{x}_{j(i-1)} \sin \eta_{i+1} - \dot{y}_{j(i-1)} \cos \eta_{i+1} - k_i z_{ji}}{L \cos(\psi_i - \eta_{i+1})} \quad (12)$$

とすれば, 追従誤差 z_{ji} は $\dot{z}_{ji} = -k_i z_{ji}$ を満たし, したがって z_{ji} は 0 に漸近収束する. ここで, 本研究においては $\psi_i - \eta_{i+1} \neq \pm \pi/2$ であると仮定する. もし, 追従誤差が大きくリンクが目標軌道に垂直となる場合には $\psi_i - \eta_{i+1} = \pm \pi/2$ となるが, このときには角速度 $\dot{\psi}_i$ は有界でない. このような場合に対する制御系の設計は今後の課題である.

式 (5) を式 (12) に繰り返し用いて, $\dot{\psi}_i$ ($i = 2, 3, 4$) を $\dot{x}_{j1}, \dot{y}_{j1}$ を用いて表すと次式のようになる.

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_2 &= \frac{\dot{x}_{j1} \sin \eta_3 - \dot{y}_{j1} \cos \eta_3 - k_2 z_{j2}}{L \cos(\psi_2 - \eta_3)} \\ \dot{\psi}_3 &= \frac{\dot{x}_{j1} \sin \eta_4 - \dot{y}_{j1} \cos \eta_4 - L \dot{\psi}_2 \cos(\psi_2 - \eta_4) - k_3 z_{j3}}{L \cos(\psi_3 - \eta_4)} \\ \dot{\psi}_4 &= \frac{1}{L \cos(\psi_4 - \eta_5)} \\ &\quad \times \{ \dot{x}_{j1} \sin \eta_5 - \dot{y}_{j1} \cos \eta_5 - L \dot{\psi}_2 \cos(\psi_2 - \eta_5) \\ &\quad - L \dot{\psi}_3 \cos(\psi_3 - \eta_5) - k_4 z_{j4} \} \end{aligned} \quad (13)$$

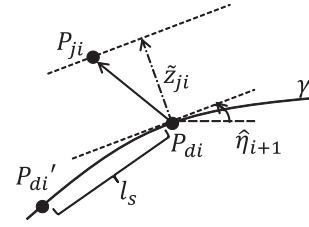


Fig. 6 Tracking error estimation

第 1 関節の速度 $(\dot{x}_{j1}, \dot{y}_{j1})$ は, 先頭 P の速度 $(\dot{x}_p, \dot{y}_p)$ を用いて

$$\begin{aligned} \dot{x}_{j1} &= \dot{x}_p - L \dot{\psi}_p \sin \psi_p \\ \dot{y}_{j1} &= \dot{y}_p + L \dot{\psi}_p \cos \psi_p \end{aligned} \quad (14)$$

であるから, 式 (4) から先頭ユニットに対する速度指令値 (v_1, ω_1) を用いて, 次のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{j1} &= v_1 \cos \psi_p - L \omega_1 \sin \psi_p \\ \dot{y}_{j1} &= v_1 \sin \psi_p + L \omega_1 \cos \psi_p \end{aligned} \quad (15)$$

ゆえに, フレネ標構の姿勢 η_{i+1} と追従誤差 z_{ji} が与えられれば, 各リンクに対する目標角速度 $\dot{\psi}_i$ を計算することができ, 入力 u の成分のうち $\dot{\phi}_i$ ($i = 1, 2, 3$) は $\dot{\phi}_i = \dot{\psi}_{i+1} - \dot{\psi}_i$ によって求められる. スクリューの回転角速度 $\dot{\theta}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) は運動学モデルの式 (3) に $(\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3)$ を代入することにより求まり, 以上から, 制御入力 u のすべての成分が決定される.

3.2 速度履歴に基づく追従誤差推定

上記の制御則を用いるためには, フレネ標構の姿勢 η_{i+1} と追従誤差 z_{ji} とを知らなければならず, これらの値を推定するためには, 速度指令値の履歴から得られる目標軌道 γ についての情報を蓄える必要がある. したがって, 第 1 関節がある長さ l_s 進むたびに, 目標軌道 γ の接線の絶対角 (これを η_2 とする) の値を保持することとする. この情報を取得した点をサンプル点とよぶ. なお, η_2 は次式から得られる.

$$\eta_2 = \arctan \frac{\dot{y}_{j1}}{\dot{x}_{j1}}, \quad -\pi \leq \eta_2 \leq \pi. \quad (16)$$

また, 長さ l_s を経路情報取得間隔とよぶこととする.

目標経路 γ についての情報は離散的であるため, 現在の関節位置 P_{ji} に最も近いサンプル点を記録されたサンプル点群から選んでその点を P_{di} とし, P_{di} を原点とするフレネ標構を用いて, 追従誤差 z_{ji} を次のように推定する.

$$\tilde{z}_{ji} = (y_{ji} - y_{di}) \cos \hat{\eta}_{i+1} - (x_{ji} - x_{di}) \sin \hat{\eta}_{i+1} \quad (17)$$

ここで, $\tilde{z}_{ji}$ は z_{ji} の推定値, $\hat{\eta}_{i+1}$ は点 P_{di} において記録された経路の接線の絶対角 η_2 の値である. Fig. 6 に示すように, 追従誤差 z_{ji} の推定値 $\tilde{z}_{ji}$ はベクトル $\overrightarrow{P_{di}P_{ji}}$ の, 点 P_{di} における経路 γ の法線への射影となる. なお, Fig. 6 の点 P'_{di} は, 関節位置 P_{ji} に二番めに近いサンプル点である.

3.3 追従誤差の推定の正確さ

追従誤差 z_{ji} の推定値 $\tilde{z}_{ji}$ の正確さについて考察するために, 目標軌道 γ の曲率が隣接するサンプル点間で一定とみなせるとして, 推定誤差 $e := |z_{ji} - \tilde{z}_{ji}|$ の上限を求める.

命題 目標経路 γ の曲率半径（経路の曲率の逆数の絶対値）が定数 r で与えられているとする。このとき、経路情報取得間隔 l_s が $l_s < r\pi$ を満たすなら、 e は

$$e \leq e_{\max} = \left(\frac{1}{\cos(l_s/2r)} - 1 \right) (r + |\tilde{z}_{ji}|) \quad (18)$$

と評価できる。

証明 Fig. 7 に示すように、目標経路 γ 上のサンプル点のうち、一般性を失うことなく、第 i 関節の現在位置 P_{ji} に最も近いサンプル点 P_{di} が点 $(r, 0)$ であり、 P_{ji} に二番めに近いサンプル点 P'_{di} が第一象限にあるとする。

3.2 節で提案した追従誤差推定法は、サンプル点における経路の接線同士を結んでできる近似経路に対する追従誤差を求めていることになる。したがって、式 (17) で計算される $\tilde{z}_{ji}$ は、Fig. 7 に示す破線で表される近似経路 $\tilde{\gamma}$ からの偏差に等しい。なお、経路 γ 上の P_{di} 、 P'_{di} はサンプル点を表す。点 O を曲率中心とすると、二つの隣接するサンプル点の間の中心角 β は $\beta = l_s/r$ であり、仮定より $|\beta| \leq \pi$ を満たす。

まず、第 i 関節が Fig. 7 の近似経路 $\tilde{\gamma}$ の外側（点 O の逆側）に位置している場合（ケース 1）について考える。

このとき、次の式であらわされる線分 l （Fig. 7 の一点鎖線で示される線分）

$$l = \left\{ (x, y) : x = r + |\tilde{z}_{ji}|, 0 \leq y \leq (r + |\tilde{z}_{ji}|) \tan \frac{\beta}{2} \right\}$$

を考えると、第 i 関節が l 上にあれば、追従誤差の推定値は常に同じ値となる。したがって、点 Q を l 上の点 $(x, y) = (r + |\tilde{z}_{ji}|, (r + |\tilde{z}_{ji}|) \tan \frac{\beta}{2})$ とすると、 z_{ji} の推定誤差 e は、関節位置 P_{ji} が Q に一致する場合に最大となる。この場合の追従誤差を z_{jimax} とすると、

$$|z_{jimax}| = \frac{1}{\cos(\beta/2)} (r + |\tilde{z}_{ji}|) - r \quad (19)$$

が成り立つ。ケース 1 では、 z_{ji} と $\tilde{z}_{ji}$ は同符号となることから、

$$\begin{aligned} e &= |z_{ji} - \tilde{z}_{ji}| = |z_{ji}| - |\tilde{z}_{ji}| \\ &\leq |z_{jimax}| - |\tilde{z}_{ji}| = \left(\frac{1}{\cos(\beta/2)} - 1 \right) (r + |\tilde{z}_{ji}|) \end{aligned} \quad (20)$$

を得る。式 (20) が任意の $\tilde{z}_{ji}$ に対して成り立つことから、ケース 1 においては $e \leq e_{\max}$ となる。

関節 i が近似経路 $\tilde{\gamma}$ の内部に位置している場合（ケース 2）を考えると、ケース 1 と同様に考えて

$$e \leq \left(\frac{1}{\cos(\beta/2)} - 1 \right) (r - |\tilde{z}_{ji}|) \quad (21)$$

が導かれる。

$1/\cos(\beta/2) - 1 \geq 0$ かつ $|\tilde{z}_{ji}| \geq 0$ が成り立つことを考慮すると、式 (21) で表される推定誤差 e が $e_{\max}$ を超えることはない。以上から命題が証明された。

この命題から、許容される推定誤差の上限 $e_{\max}^d$ が与えられたとき、経路情報取得間隔 l_s を次式に示すように定めることにより、経路の曲率に合わせて動的に変更することができる。

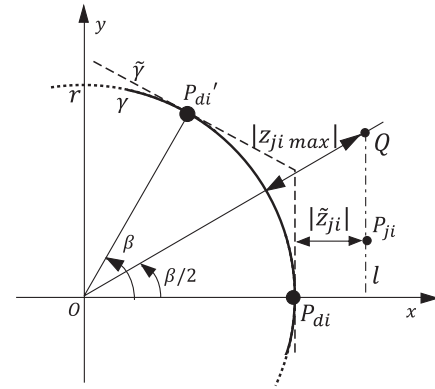


Fig. 7 Evaluation of estimation error

$$l_s = 2r \cos^{-1} \left(\frac{r + |\tilde{z}_{ji}|}{e_{\max}^d + r + |\tilde{z}_{ji}|} \right) \quad (22)$$

目標経路 γ の曲率半径 r を正確に知ることは困難であるが、経路上の曲線座標が s である点における経路の接ベクトルの姿勢角を η とすると、曲率 κ が $\kappa = d\eta/ds$ で定義されることから、その逆数の絶対値である曲率半径として次の近似を用いる。

$$r(t) \simeq \left\| \frac{\delta}{\eta_2(t) - \eta_2(t - \delta)} \mathbf{v}_2 \right\| \quad (23)$$

ここで、 $\mathbf{v}_2 := [\dot{x}_{j1}, \dot{y}_{j1}]^T$ は第一関節の並進速度である。また $\eta_2(t)$ は時刻 t での第 1 関節位置における目標経路 γ の接線の姿勢角であり、式 (16) から得られる。したがって、この計算のためには各時刻において η_2 を求め、時間 δ 前までの η_2 の値を保持しておく必要がある。このとき、時刻 $t - \delta$ から t において $\|\mathbf{v}_2\|$ が変化しないとみなせる程度に十分小さい場合には、式 (23) の右辺は曲率半径 r をよく近似できると考えられる。

4. シミュレーション

第一ユニットの並進速度 v_1 、角速度 ω_1 に対する速度指令値を

$$\begin{aligned} v_1 &= -\pi/60 \text{ [m/s]} \\ \omega_1 &= \begin{cases} -\pi/30 \text{ [rad/s]}, & (t < 30 \text{ [s]}) \\ \pi/30 \text{ [rad/s]}, & (t \geq 30 \text{ [s]}) \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

と与え、サンプリング周期を 0.1 [s]、式 (13) におけるフィードバックゲイン k_i ($i = 1, 2, 3$) はすべて 1.0 としてシミュレーションを行った。ロボットのリンク長は $L = 0.226$ [m] であり、経路情報取得間隔は $l_s = L/5$ 、初期状態を $w(0) = [0, 0, 3\pi/2, 0, 0, 0]^T$ とした。

$t = 85$ [s] までの各関節の軌跡を、提案手法の場合について Fig. 8 に、従来手法 [11] の場合について Fig. 9 に示す。また、それぞれの手法によるシミュレーションで観測された最大の追従誤差を Table 1 に示す。この結果から、提案手法によるシミュレーションの場合の追従誤差は、従来手法による場合の 30% 程度以下に抑えられていることが分かる。また、第二、第三関節の追従誤差の時間変化を Fig. 10、Fig. 11 に示す。これらの図から、経路の曲率の切り替わる時刻 30 [s] から 50 [s] までの

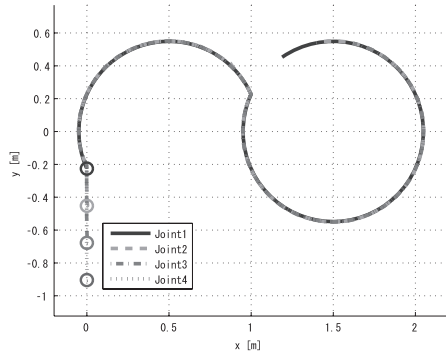
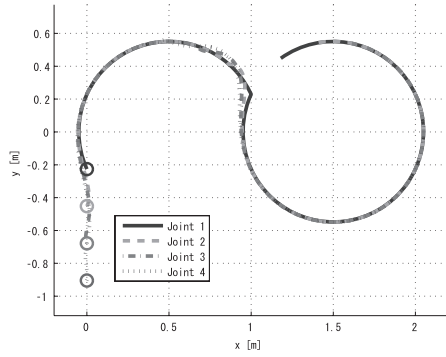
Fig. 8 $x-y$ plot of each joint (proposed method)Fig. 9 $x-y$ plot of each joint (existing method)

Table 1 Maximum tracking error in simulation

	z_{j2}	z_{j3}	z_{j4}
proposed method [m]	0.0098	0.0064	0.0074
existing method [m]	0.0367	0.0524	0.0640

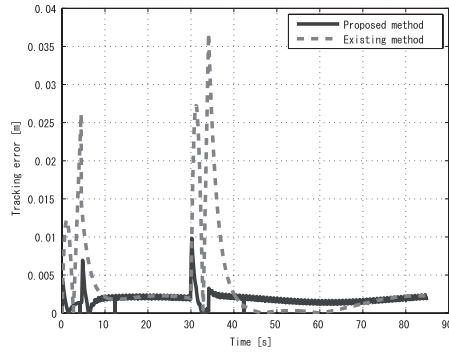


Fig. 10 Tracking error in Joint 2

間、従来手法では大きな追従誤差が生じているが、提案手法では小さな追従誤差に抑えられることが確認できる。

さらに、経路情報取得間隔 l_s を経路の曲率に合わせて動的に変化させる手法の有効性を示すためのシミュレーションを行った。先頭ユニットの並進速度、角速度の速度目標値は次のように与えた。

$$v_1 = -\frac{\pi}{60} \text{ [m/s]}, \quad \omega_1 = -\frac{\pi}{30} \cos\left(\frac{\pi}{60}t\right) \text{ [rad/s]}$$

また、式 (22) に現れる推定誤差の上限 $e_{\max}^d$ は 10^{-3} [m] とし、1 ステップ前の時刻に観測された追従誤差の推定値のうち

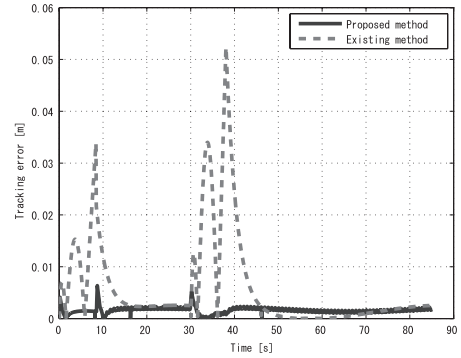


Fig. 11 Tracking error in Joint 3

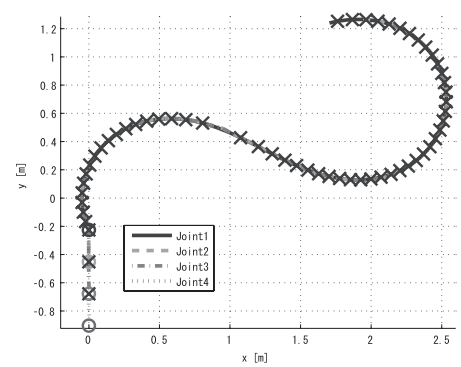
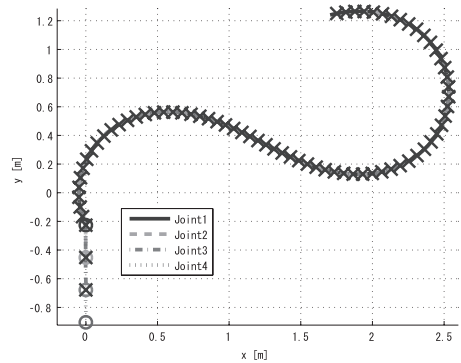
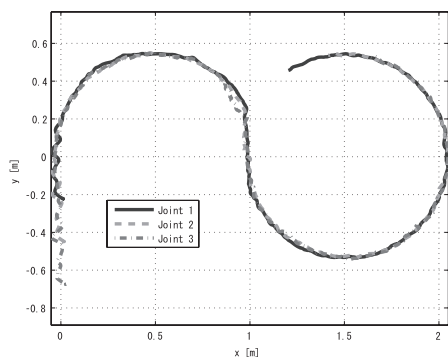
Fig. 12 $x-y$ plot of each joint (variable l_s)Fig. 13 $x-y$ plot of each joint (fixed l_s)

Table 2 Maximum tracking error in simulation

	z_{j2}	z_{j3}	z_{j4}
variable recording interval [m]	0.0126	0.0129	0.0124
fixed recording interval [m]	0.0126	0.0129	0.0124

最大のものを、式 (18) における $|\tilde{z}_{ji}|$ として用いた。式 (23) の δ としてはサンプリング周期 0.1 [s] を用いた。

経路情報取得間隔 l_s を動的に変化させた場合と固定した場合の各関節の軌跡をそれぞれ Fig. 12, Fig. 13 に示す。 l_s を固定する場合には、 $l_s = 2L/7$ とした。「×」印は経路の接線の絶対角 η_2 の情報が取得された位置を示す。 l_s を動的に変化させた場合には、情報の取得回数は 59 回であり、 l_s を固定した場合には 73 回であった。さらに、それぞれの場合について、観測された最大誤差は Table 2 に示すように、 l_s を動的に変化さ

Fig. 14 $x-y$ plot of each joint path (proposed method)

せた場合と固定した場合とで同じという結果が得られた。これらの結果から、 l_s を動的に変化させることにより、追従精度を変えることなく蓄積する情報量を軽減することができるが分かる。

5. 実 機 実 験

シミュレーションとの比較を行うため、式 (24) と同じ先頭ユニットへの速度指令値を用いて実機実験を行った。ただし実機においては、モデル化誤差や外乱の影響で式 (4) を満たすことが困難であり、オペレータが操縦する際と同様に、ロボット先頭の動きに合わせて速度指令値を修正する必要がある。そこで、三次元位置計測装置 QuickMag IV ((株) 応用計測研究所) により計測した先頭リンクの位置・姿勢 (x_p , y_p , ψ_p) を用いて、先頭への速度指令値 (4) を次のように修正した。

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= \dot{x}_p^d + k_x(x_p^d - x_p) \\ \dot{y}_p &= \dot{y}_p^d + k_y(y_p^d - y_p) \\ \dot{\psi}_p &= \dot{\psi}_p^d + k_\psi(\psi_p^d - \psi_p)\end{aligned}\quad (25)$$

ここで、 $(\dot{x}_p^d, \dot{y}_p^d, \dot{\psi}_p^d)$ は式 (4) の速度指令値

$$\dot{x}_p^d = v_1 \cos \psi_p^d, \quad \dot{y}_p^d = v_1 \sin \psi_p^d, \quad \dot{\psi}_p^d = \omega_1, \quad (26)$$

であり、 (x_p^d, y_p^d, ψ_p^d) は式 (26) の初期値 $(x_p^d(0), y_p^d(0), \psi_p^d(0)) = (x_p(0), y_p(0), \psi_p(0))$ に対する積分である。フィードバックゲイン k_x , k_y , k_ψ は、提案手法に対しては $k_x = k_y = 1.0$, $k_\psi = 0.75$ とした。提案手法による実験の場合の、各関節の軌跡を Fig. 14 に示す。一方、従来手法 [11] については、実験室の変更により、文献 [11] の実験環境と現在の実験環境が大きく異なっていることから、現在の実験環境で再度パラメータ調整を行い、 $k_x = k_y = 1.0$, $k_\psi = 2.0$ とした。Fig. 15 に従来手法によって得られた各関節の軌跡を示す。また、第二、第三関節の追従誤差の時間変化を Fig. 16, Fig. 17 に示す。この結果から、提案手法では追従誤差を従来手法の場合の 50% 程度に抑えられていることが分かる。さらに、本論文で行った実験 (Fig. 14 と Fig. 15) と、文献 [11] で掲載した実験結果における追従誤差の最大値を Table 3 に示す。この表から、従来手法による文献 [11] の結果と今回新たに行った実験の両方の結果と比較しても、提案手法を用いることにより追従誤差が抑えられていることが分かる。

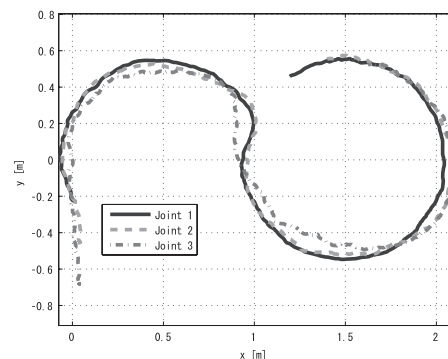
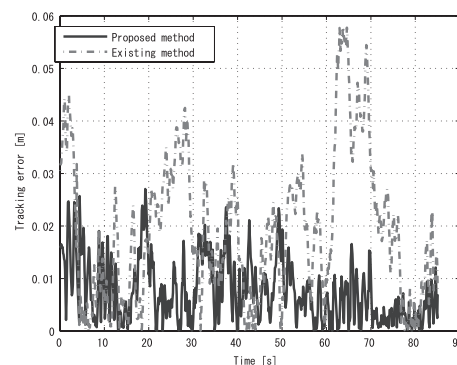
Fig. 15 $x-y$ plot of each joint path (existing method)

Fig. 16 Tracking error in joint 2

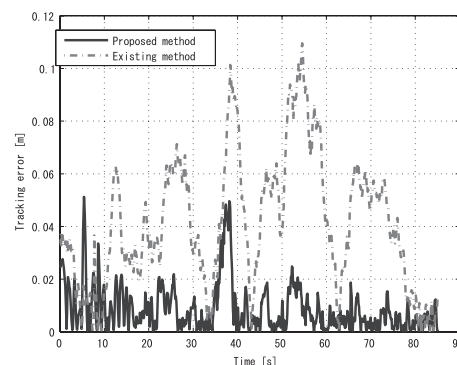


Fig. 17 Tracking error in joint 3

Table 3 Maximum tracking error in experiments

	z_{j2}	z_{j3}	z_{j4}
proposed method [m]	0.0271	0.0513	0.0896
existing method [m]	0.0578	0.1096	0.2998
existing method (Ref. [11]) [m]	0.0652	0.0976	0.2617

6. お わ り に

本研究では、ねじ推進ヘビ型ロボットを対象とし、先頭に対する過去の速度指令値の情報を利用して後続関節の追従誤差を推定し、その推定値を用いたフィードバック制御による先頭追従制御を提案した。また、追従誤差の推定に用いる先頭への速度指令値の情報は離散的に記録されるため、その記録間隔を動的に変化させることにより、推定の精度を落とすことなく、記録

される情報量を低減する手法も提案した。さらに、シミュレーションおよび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、実際にオペレータが操縦する際の速度指令値を想定し、様々な経路に対して追従性能の解析を行う必要がある。特に、障害物回避などの場合に先頭リンクが小さく蛇行すると、第一関節がリンク先端を支点に大きく蛇行し、本論文で仮定した $\psi_i - \eta_{i+1} \neq \pm\pi/2$ が満たされない場合も考えられる。このような場合に目標経路や制御則をどのように修正するかも検討が必要である。さらに、動力学モデルを導出し、高速移動時におけるロボットの慣性が追従性能に及ぼす影響を評価することも必要である。

参 考 文 献

- [1] T. Kamegawa, T. Yamasaki, H. Igarashi and F. Matsuno: "Development of The Snake-like Rescue Robot KOHGA," Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp.5081-5086, 2004.
- [2] T. Takayama and S. Hirose: "Development of "Souryu I & II"—Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space—," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.15, no.1, pp.61-69, 2001.
- [3] M. Arai, T. Takayama and S. Hirose: "Development of "Souryu-III": Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces," Proc. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.52-57, 2004.
- [4] T. Aoki, H. Ohno and S. Hirose: "Design of Slim Slime Robot II (SSR-II) with Bridle Bellows," Proc. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.835-840, 2002.
- [5] S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui and K. Suyama: "Design and Experiments of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25, \phi 50, \phi 250$ Pipes," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.12, pp.310-317, 2000.
- [6] S. Wakimoto, J. Nakajima, M. Takata, T. Kanda and K. Suzumoto: "A Micro Snake-Like Robot for Small Pipe Inspection," International Symposium on Micromechatronics and Human Science 2003, pp.303-308, 2003.
- [7] J. Borenstein, M. Hansen and A. Borrell: "The OmniTread OT-4 Serpentine Robot—Design and Performance," Journal of Field Robotics, vol.24, no.7, pp.601-621, 2007.
- [8] K. Osuka and H. Kitajima: "Development of Mobile Inspection Robot for Rescue Activities: MOIRA," Proc. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.4, pp.3373-3377, 2003.
- [9] 松野文俊, 川合徹: ねじの原理に基づく推進装置及びそれを用いた推進ユニット, 特願 2003-293656, 2003.
- [10] 里村章悟, 原正哉, 福島宏明, 亀川哲志, 五十嵐広希, 松野文俊: "ねじ推進ヘビ型ロボットのモデリングと制御", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.5, pp.779-784, 2007.
- [11] 福島宏明, 田中基康, 亀川哲志, 松野文俊: "ねじ推進ヘビ型ロボットの先頭追従制御", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.6, pp.707-714, 2010.
- [12] S.B. Andersson: "Discrete approximations to continuous curves," Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2546-2551, 2006.
- [13] C. Altafini: "A Path-Tracking Criterion for an LHD Articulated Vehicle," Int. J. Robot. Res., vol.18, pp.435-441, 1999.
- [14] C. Altafini: "Path Following With Reduced Off-Tracking for Multibody Wheeled Vehicles," IEEE Trans. Cont. Sys. Tech., vol.11, pp.598-605, 2003.
- [15] B. Murugendran, A.A. Transteth and S.A. Fjerdigen: "Modeling and Path-following for a Snake Robot with Active Wheels," Proc. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3643-3650, 2009.



有泉 亮 (Ryo Ariizumi)

2010 年京都大学工学部物理工学科卒業。2012 年同大学大学院工学研究科機械理工学専攻修士課程を修了。同年同専攻博士課程に進学し現在に至る。ヘビ型ロボットの研究に従事。2009 年度日本機械学会 畠山賞受賞。日本機械学会の学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)



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 年京都大学大学院工学研究科 (機械理工学専攻) 教授となり、現在に至る。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。1993 年度システム制御情報学会論文賞、

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、2009 年度日本機械学会ロボット・メカトロニクス部門学術業績賞などを受賞。IEEE などの会員。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)



福島宏明 (Hiroaki Fukushima)

2001 年京都大学大学院情報学研究科博士課程修了。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 (機械理工学専攻) 助教を経て、2010 年より同講師となり、現在に至る。主に、システム同定、ロボスタ制御の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEE の会員。博士 (情報学)。

(日本ロボット学会正会員)