三叉ヘビ型ロボットの Point-to-Point フィードバック制御*

石川 将人[†]・南 裕樹[†]・杉江 俊治[†]

Point-to-Point Feedback Control of a Trident Snake Robot*

Masato ISHIKAWA[†], Yuki MINAMI[†] and Toshiharu SUGIE[†]

This paper is concerned with point-to-point feedback control of a trident snake robot. The robot is proposed in our recent work as a new example of nonholonomic systems with two generators. In this paper, a new feedforward type periodic algorithm is proposed to achieve smooth and quantitative locomotion of the robot. Then, a periodic feedback control method is also given which drives the state of the robot to a desired one. The proposed methods are examined by numerical simulations and experiments.

1. はじめに

三叉ヘビ型ロボットとは、著者らが提案してきた新しい移動原理に基づく車輪型移動ロボットである[1,2]。中央のベースリンクに従来のヘビ型ロボットを三叉状に連結することで構成されている。このロボットは、速度拘束を有する非ホロノミックシステムであり、その運動学モデルは2ジェネレータ drift-free システムとよばれる非線形状態方程式で表される。

Drift-free システムは連続な状態フィードバックによる漸近安定化が不可能であるため[3]、不連続あるいは時変状態フィードバックによるアプローチの格好の題材として扱われてきた。なかでも chained form や時間軸状態制御形などに代表される1ジェネレータのシステムに関しては、盛んに研究が行われ、その制御方法の本質はおおむね解決されている[4]。一方、2ジェネレータ[5]とよばれるクラスのシステムについてはまだ少数の研究があるのみで（文献[6,7]および文献[5]の参考文献参照）、非線形制御の観点からみてきわめて興味深い対象である。

先行研究で著者らは、まず3入力2ジェネレータのプロトタイプとして1リンクの三叉ヘビ型ロボットを考案し、ベキ零近似と時間軸状態制御系に基づく切り替

え制御法により、原点近傍で有効なフィードバック制御を実現した[1]。しかしながらこの方法では、目標状態付近での微調整には適しているが、大きな移動を目的とした並進や回転運動は困難であった。そこで著者らは、可制御性解析とホロノミーの原理に基づいてこの機構の推進原理を明らかにし、単純な定数入力と周期入力を組み合わせることにより、回転運動と並進運動をそれぞれ実現するフィードフォワード制御を提案した[2]。

本論文では、文献[2]で考慮されていなかった二つの問題点に取り組み、1リンク型の三叉ヘビ型ロボットのより正確な推進運動を実現する。まず第一に、先行研究の方法では推進運動を実現するために、定数入力と周期入力を2段階に組み合わせる必要がある。そのため不連続な切り替えが生じ、滑らかな推進運動が実現できない。また回転運動と並進運動を実行するアルゴリズムがそれぞれで異なるため、回転と並進を同時に行うこともできなかった。そこで本論文では、周期入力だけで滑らかな推進運動を実現するためのフィードフォワード入力の設計法を提案する。さらに、それを拡張することで任意に指定された姿勢・位置変化を同時に実現する。そして第二に、フィードフォワード制御のみでは正確に目標状態に到達させることが困難であるため、フィードバック制御を併用する手法を提案する。具体的には提案する制御方策を利用し、周期的なフィードバック制御を行うことで、ロボットの状態を所望の状態に到達させる Point-to-Point 制御を実現する。またロボットの軌道追従問題などに対応するため、一回の周期入力ごとに生じ

* 原稿受付 2006年4月20日

[†] 京都大学 大学院 情報学研究科 Graduate School of Informatics, Kyoto University; Gokasho, Uji city, Kyoto 611-0011, JAPAN

Key Words: nonholonomic system, nonlinear system, mobile robot.

る誤差を周期入力のパラメータに反映させる反復修正法を提案する．なお，本論文で提案する手法の有効性は，数値シミュレーションと実機実験により検証する．

2. 三叉ヘビ型ロボット

2.1 モデル設定

本論文で扱う 1 リンク型の三叉ヘビ型ロボットの概観を Fig.1 に示す [8]．ベースリンクは正三角形であり，その三つの頂点には受動車輪のついた足（リンク）が駆動関節を介して接続されている．ベース中心から関節までの距離および関節から車輪までの距離はいずれも 10 [cm] であり，関節駆動用のアクチュエータには Hitech 製 R/C サーボモータ (HSR-5995TG, Speed: 0.15 [sec/60°], Torque: 24 [kg·cm]) を使用している．

Fig. 1 Trident snake robot

本論文では，このロボットを Fig.2 に示すようなモデルとして考える．そして，ロボットは平坦な地面に置かれているものとし，運動はすべて平面上で考える．さらに簡単のため，ベースリンク中心から各頂点までの距離を 1，各関節から車輪までの距離を 1 とし，2 番目の足が連結されている頂点の方向をベースの正面とする．ロボットの状態は，ベースの配置（位置・姿勢）を表すベクトル $w := [x, y, \theta_0]^T$ ，およびロボットの形状（各関節の相対角度）を表すベクトル $\phi := [\phi_{11}, \phi_{21}, \phi_{31}]^T$ で決まる．以降では各足が放射状に開いた形状 $\phi = \mathbf{0}$ を基準形状とよぶことにする．

Fig. 2 Model of the trident snake robot

2.2 運動学モデルと状態方程式の導出

以上の設定に基づいて，まず運動学モデルを導出する．各リンクの車輪の位置のホロノミック拘束および，車輪が滑らないという非ホロノミック拘束により，運動学モデルは次式となる（導出の詳細は文献 [2] を参照）．

$$A(\phi)R_{\theta_0}^T \dot{w} = \dot{\phi} \quad (1)$$

$$R_{\theta_0}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 & 0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

つぎに状態方程式を導出する．運動学方程式 (1) より， $A(\phi)$ は ϕ が特異状態の値を取らないとき正則であるため

$$\dot{w} = R_{\theta_0} A(\phi)^{-1} \dot{\phi} \quad (3)$$

を得る．これより，各関節の角速度 $\dot{\phi}$ を独立な制御入力 u として与えることができることがわかる．すなわち，ロボットの運動学の状態方程式は， $u = \dot{\phi}$ とおき，状態変数を $\xi = \begin{bmatrix} \phi \\ w \end{bmatrix}$ とおくと

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} I_3 \\ R_{\theta_0} A(\phi)^{-1} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

と表される．また，上式右辺の 6×3 行列値関数の各列ベクトル場を $g_1(\xi)$, $g_2(\xi)$, $g_3(\xi)$ とおくと

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} g_1(\xi) & g_2(\xi) & g_3(\xi) \end{bmatrix} u \quad (5)$$

の形の 3 入力 6 状態の対称アフィンシステムを得る．

3. 速度制御入力設計法

3.1 先行研究の手法

先行研究では，(5) 式に入力変換 $v = A(\phi)^{-1} u$ を施した状態方程式に対して可制御性解析を行った．そして，Stokes の定理に基づく 1 階の Lie 括弧積運動を利用することで以下に示す周期入力と定数入力を組み合わせた 2 ステップの制御方策を提案し，回転制御と並進制御を実現した（詳細は文献 [2] を参照）．ここで回転制御とは，ロボットの最終的な形状を基準形状に保ったまま全体の向き θ_0 を増減させる制御であり，並進制御とは，全体の位置 x, y を動かす制御である．

推進制御のアルゴリズム [2]

1. 状態方程式の三つの入力のうち二つを組み合わせた単周期入力により状態を遷移させる．
2. 定数入力により基準形状に戻す．

本論文では，2 ステップで実現していた推進制御を 1 ステップで行うために，まず状態方程式 (5) に対して可制御性解析を行う．そして，回転制御と並進制御を同時

に実現できるような速度入力的设计法を提案する.

3.2 可制御性の解析

ベクトル場の集合 $G = \{g_1, g_2, g_3\}$ に対して, 1 階の Lie 括弧積 $g_{12} := [g_1, g_2]$, $g_{23} := [g_2, g_3]$, $g_{31} := [g_3, g_1]$ を考えると, G が生成する可制御接分布が

$$\bar{G} = \text{span}\{g_1, g_2, g_3, [g_1, g_2], [g_2, g_3], [g_3, g_1]\} \quad (6)$$

と表される. 特に $\phi = \mathbf{0}$, $\theta_0 = 0$ のときは

$$\bar{G}(\mathbf{0}) = \text{span} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 0 \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{1}{3\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{3\sqrt{3}} & \frac{1}{3\sqrt{3}} & \frac{1}{3\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

となり, $\dim \bar{G}(\mathbf{0}) = 6$ が成り立つ. またこの構造からわかるように, Lie 括弧積運動により, 単周期入力を与えることでロボットの形状を基準形状に保ったまま姿勢を変化させることができる. たとえば, 周期入力

$$\mathbf{u}(t) = [-Aw \sin \omega t, Aw \cos \omega t, 0]^T \quad (8)$$

を与えると $g_{12}(\mathbf{0})$ の方向に状態が遷移する. またその推進量は πA^2 に比例する値にほぼ等しい [2].

3.3 速度入力の設計

1 ステップで推進制御を達成するために, 入力 $\mathbf{u}$ に適当な変換を施すことを考える. すなわち, 所望の状態変位を得るような Lie 括弧積運動の組合せを見つけ, それを実現するような制御入力 $\mathbf{u}$ を決定する. 以下では, まず任意方向への並進制御について議論する.

まず, 入力 $\mathbf{u}$ がつぎのように 2 入力 $\bar{\mathbf{u}}$ で決まるとする.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} \\ K_{12} & K_{22} \\ K_{13} & K_{23} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \quad (9)$$

すると, $\bar{\mathbf{u}}$ を入力とする状態方程式として

$$\dot{\xi} = [\bar{g}_1 \ \bar{g}_2] \bar{\mathbf{u}} \quad (10)$$

を得る. ただし, $\bar{g}_1, \bar{g}_2$ は, 入力ベクトル場 g_1, g_2, g_3 の線形結合として次式で表される.

$$\bar{g}_1 = \sum_{i=1}^3 K_{1i} g_i, \quad \bar{g}_2 = \sum_{i=1}^3 K_{2i} g_i \quad (11)$$

任意の進行方向へ並進させるには, 状態変位として $\xi_T = [0, 0, 0, \cos \beta, \sin \beta, 0]^T$ が得られればよい. ここで β は, 進行方向 (x 軸となす角) を決定する定数である. そして, 周期関数

$$\bar{\mathbf{u}} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2]^T = [-Aw \sin \omega t, Aw \cos \omega t]^T \quad (12)$$

を考えると, 二つのベクトル場 $\bar{g}_1, \bar{g}_2$ の 1 階の Lie 括弧積の効果により状態を ξ_T に遷移させることができる. すなわち,

$$\xi_T \simeq \left[\sum_{i=1}^3 K_{1i} g_i, \sum_{i=1}^3 K_{2i} g_i \right] \quad (13)$$

と表せる. さらに上式右辺は, Lie 括弧積の歪対称性を用いると

$$\left[\sum_{i=1}^3 K_{1i} g_i, \sum_{i=1}^3 K_{2i} g_i \right] = \kappa_{12} g_{12} + \kappa_{23} g_{23} + \kappa_{31} g_{31} \quad (14)$$

となる. ただし, $\kappa_{12} = K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}$, $\kappa_{23} = K_{12}K_{23} - K_{13}K_{22}$, $\kappa_{31} = K_{13}K_{21} - K_{11}K_{23}$ である. (7) 式および (13), (14) 式を用いると, つぎの関係式を得る.

$$\begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 0 \\ \frac{1}{6\sqrt{3}} & \frac{1}{6\sqrt{3}} & -\frac{1}{3\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3\sqrt{3}} & \frac{1}{3\sqrt{3}} & \frac{1}{3\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_{12} \\ \kappa_{23} \\ \kappa_{31} \end{bmatrix} \quad (15)$$

したがって, $\kappa_{12}, \kappa_{23}, \kappa_{31}$ が満たすべき条件は

$$\begin{bmatrix} \kappa_{12} \\ \kappa_{23} \\ \kappa_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3\cos \beta + \sqrt{3}\sin \beta \\ -3\cos \beta + \sqrt{3}\sin \beta \\ -2\sqrt{3}\sin \beta \end{bmatrix} \quad (16)$$

となる.

つぎに, この $\kappa_{12}, \kappa_{23}, \kappa_{31}$ から K_{1i}, K_{2i} , ($i=1, 2, 3$) を決める. これは,

$$\boldsymbol{\kappa} = [\kappa_{12}, \kappa_{31}, \kappa_{23}]^T$$

$$\mathbf{K}_j = [K_{j1}, K_{j2}, K_{j3}]^T, \quad j=1, 2$$

としたときの $\boldsymbol{\kappa} = \mathbf{K}_1 \times \mathbf{K}_2 = \hat{\mathbf{K}}_1 \mathbf{K}_2$ を満たす, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ を見つけることと同じである. ここで,

$$\hat{\mathbf{K}}_1 = \begin{bmatrix} -K_{12} & K_{11} & 0 \\ K_{13} & 0 & -K_{11} \\ 0 & -K_{13} & K_{12} \end{bmatrix} \quad (17)$$

である. しかしながら, ベクトル積が $\boldsymbol{\kappa}$ となる, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ の組合せは一意ではなく, 決め方には自由度がある. ただし, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ は $\boldsymbol{\kappa}$ に直交し, 互いに平行でないことが必要である. そこでまず, $\mathbf{K}_1$ を $\boldsymbol{\kappa}$ に直交するように適当に定める (たとえば $\mathbf{K}_1 = [1, 1, 1]^T$ と選べばよい). さらに, $\mathbf{K}_1$ と $\mathbf{K}_2$ の内積の大きさを $\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{K}_2 = c$ と決める (本論文では, $c=0$ とし, 二つのベクトルが直交するようにする). そして,

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\kappa} \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{K}}_1 \\ \mathbf{K}_1^T \end{bmatrix} \mathbf{K}_2 =: \mathbf{K} \mathbf{K}_2 \quad (18)$$

より, K_2 を

$$K_2 = K^+ \begin{bmatrix} \kappa \\ c \end{bmatrix} \quad (19)$$

と決める. ここで K^+ は行列 K の疑似逆行列である. 以上で K_{1i} , K_{2i} , ($i=1,2,3$) が求まったので, あとは, $\bar{u}$ を満足する入力 u が (9) 式により求まる.

実際, $K_1 = [1, 1, 1]^T$ とすれば,

$$K_2 = \begin{bmatrix} -\cos\beta - \sqrt{3}\sin\beta \\ 2\cos\beta \\ -\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta \end{bmatrix}$$

となり, β の方向に並進させるための制御入力 u として次式を得る.

$$\begin{cases} u_1 = A\omega(-\sin\omega t - (\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta)\cos\omega t) \\ u_2 = A\omega(-\sin\omega t + 2\cos\omega t\cos\beta) \\ u_3 = A\omega(-\sin\omega t - (\cos\beta - \sqrt{3}\sin\beta)\cos\omega t) \end{cases} \quad (20)$$

Fig. 3 に $A=0.3$, $\omega=4$ [rad/s] としたときの並進制御 ($\beta=0$) のシミュレーション結果を示す. 図は, ロボットの位置 x, y および姿勢 θ_0 の時間応答を示している. これより, 一回の周期入力 (約 1.57[sec]) を与えると, ロボットの位置 y (破線) および姿勢 θ_0 (一点鎖線) がほぼ初期状態に戻り, ロボットの位置 x (実線) のみが増加していることが確認できる. そして, 周期入力を 6 回繰り返すことにより約 1.7 単位長の並進を実現している. また, このときロボットの形状は基準形状のままである.

Fig. 3 Simulation result (Translation, $\beta=0$)

また, 回転制御の場合も並進制御と同様の操作で制御入力を決定することができる. 1 ステップで, $[0, 0, 0, 0, 0, \Delta\theta_0]^T$ の変位を得るとすれば, κ が

$$\kappa = [\sqrt{3}\Delta\theta_0, \sqrt{3}\Delta\theta_0, \sqrt{3}\Delta\theta_0]^T$$

となる. そして, $K_1 = [1, -2, 1]^T$ とすれば,

$$K_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}\Delta\theta_0}{2}, 0, -\frac{\sqrt{3}\Delta\theta_0}{2} \end{bmatrix}^T$$

となり, 入力 u として次式を得る.

$$\begin{cases} u_1 = A\omega(-\sin\omega t + \frac{1}{2}\sqrt{3}\Delta\theta_0\cos\omega t) \\ u_2 = 2A\omega\sin\omega t \\ u_3 = A\omega(-\sin\omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3}\Delta\theta_0\cos\omega t) \end{cases} \quad (21)$$

Fig. 4 に, $\Delta\theta_0=2$, $A=0.15$, $\omega=4$ [rad/s] としたときのシミュレーション結果 (位置 x, y および姿勢 θ_0 の時間応答) を示す. これより, 一回の周期入力 (約 1.57[sec]) を与えると, ロボットの位置 x, y (実線および破線) がほぼ初期状態に戻り, ロボットの姿勢 θ_0 (一点鎖線) のみが増加していることが確認できる. そして, 周期入力を 6 回繰り返すことにより, 1 [rad] 程度の回転を実現している.

Fig. 4 Simulation result (Rotation)

以上の並進制御と回転制御の場合と同様に 1 ステップで並進と回転を同時に実現する場合の制御入力を求めることができるが, 式が煩雑になるためここでは割愛する.

4. 周期フィードバック制御

4.1 Point-to-Point フィードバック制御

前節の入力設計で周期入力のみで回転制御と並進制御が実現できるようになった. 本論文ではつぎに, これらの制御方策を用い, 周期的なフィードバック制御を行うことでロボットの状態を目標状態に到達させる Point-to-Point 制御を実現する. 以下では, 簡単のため並進制御のみを用いた制御を考える.

フィードバック制御では, 目標とする状態と現在の状態との偏差を周期入力のパラメータである振幅 A と進行方向 β に比例させる. 振幅 A の計算方法は, 一回の周期入力により得られる変位が $(\Delta x, \Delta y) = (\pi A^2 \cos\beta, \pi A^2 \sin\beta)$ で近似できることを用いて,

$$A = \sqrt{\frac{1}{\pi} \{ (x_d - x(t)) \cos\beta + (y_d - y(t)) \sin\beta \}} \quad (22)$$

If $A > A_{\max}$, then $A = A_{\max}$

とした. ただし, x_d, y_d は目標状態の (x, y) 座標であり, 振幅の最大値 $A_{\max}$ を設定しているのは, 目標状態の選び方により, 振幅が大きくなりすぎるのを防ぐためである. また, β については

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y}{x_d - x} \right) \quad (23)$$

で計算する．実際，目標状態を $[0, 0, 0, 1.5, 0, 0]^T$ としたときのシミュレーションおよび実験結果を Figs. 5, 6 に示す．ただし，周期入力振幅の最大値を $A_{\max} = 0.2$ ，周波数を $\omega = 4$ [rad/s] とした．Fig. 5 はロボットの位置 x, y および姿勢 θ_0 の時間応答を示しており，周期入力（約 1.57 [sec]）を繰り返すことで，ロボットの状態が目標状態に収束していることが確認できる．位置 y （破線）に関しては，並進する際に負方向へのドリフトが見られるが，フィードバック制御により最終的に目標状態に収束していることがわかる．そして，Fig. 6 は制御入力の振幅 A および進行方向 β の変化の様子を示している．これより，状態が目標状態に近づくにしたがって，周期入力の振幅 A （実線）が 0 に収束していくことが確

認できる．また， $\beta = 0$ の並進運動を実行しているにもかかわらず， β の値（破線）が変動しているのは，上述した y 方向へのドリフトを修正しているためである．

（注意 1）Point-to-Point フィードバック制御則の安定性について述べておく．推進制御では，周期入力一回ごとの近似変位量（(13) 式の右辺）が振幅の 2 乗 (A^2) に比例し，誤差は 3 乗以上のオーダー ($O(A^3)$) になる [2]．つまり状態 ξ は，振幅 A が十分小さければ，たとえ誤差があったとしても初期状態よりは目標状態に近いところに遷移する．したがって，振幅 A ，進行方向 β の更新と周期入力を繰り返せば，状態は目標状態に収束する．

4.2 反復修正を用いた軌道追従制御

Point-to-Point 制御により，周期入力により生じる誤差を吸収し，目標状態に達成させることができた．つぎに目標状態が遠い場合や，軌道追従問題を考える．まず，一定速度での正確な並進制御を実現させる．ここでは，現在のロボットのベース中心位置を (x, y) としたとき，つぎの目標値として一回の周期入力でたどり着ける値より大きなものを選び， $(x + 0.2, y)$ と設定する．このように目標値を一定間隔で動かすことにより，一定速度の並進ができる．いま，ロボットの初期位置を $(0, 0)$ とし x 軸上をまっすぐ並進させたときのシミュレーションおよび実験結果を Fig. 7 に示す．この図は周期入力を 20 セット行った結果であり，ベース位置の $x-y$ 平面の運動を表している．また図中の丸印は 1 セットごとのベ

(a) Simulation

(b) Experiment

Fig. 5 PTP Control

Fig. 6 Parameter of periodic input

(a) Simulation

(b) Experiment

Fig. 7 Path tracking control

ス位置である。これより、フィードバック制御だけでは、周期入力によって生じる誤差が y 軸方向に蓄積されていき、所望の方向へ直進することができないことが確認できる（白丸）。そこで本論文では、1 セットごとに生じる誤差を周期入力のパラメータである β に反映させることで、誤差を除去する反復修正法を提案する。

まず、目標とする進行方向を β とする。そして、一周期を $\Delta t := 2\pi/\omega$ とするとき、実際にロボットが進んだ方向が

$$\tan^{-1} \left(\frac{y(t) - y(t - \Delta t)}{x(t) - x(t - \Delta t)} \right)$$

となることから、進行方向の誤差がつぎのように表される。

$$\Delta\beta = \beta - \tan^{-1} \left(\frac{y(t) - y(t - \Delta t)}{x(t) - x(t - \Delta t)} \right) \quad (24)$$

つぎの試行において β 方向に進行させる場合、あらかじめ前回の試行で生じた誤差 $\Delta\beta$ を加えた方向に進行させることで、誤差を低減することができると考えられる。したがって、目標とする方向に $\Delta\beta$ を加えた

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y}{x_d - x} \right) + \Delta\beta \quad (25)$$

の値を用いることにする。

この方法を用いて前述の軌道追従実験を行った結果が、Fig. 7 の黒丸で表されるものである。各試行ごとに修正を行うことで、誤差が蓄積せず、 x 軸と並行に直進していることが確認できる。 x 軸上を移動していないのは、1 回目の試行のときに生じた誤差が残っているためである。

つぎに x 軸上を並進させることを考える。すなわち、1 試行ごとの目標値を $(x+0.2, 0)$ とする。そして、誤差修正を用いて周期入力を 30 セット繰り返すシミュレーションおよび実験を行った。その結果を Fig. 8 に示す。ただし、初期位置を $(0, 1)$ とし、図中の丸印は、1 セットごとのベース位置を表している。まず、修正なしの場合は、フィードバック制御により x 軸に近づいてはいるが、シミュレーションおよび実験結果ともに 0.06 単位長程度のオフセットが生じ、 x 軸上を並進することができていない。これは、フィードバック制御で x 軸に近付こうとする周期入力を決定しているが、実際に得られる変位に誤差が生じてしまうためである。これに対して、修正を用いると、誤差なく x 軸上を並進できていることが確認できる。

なお、反復修正を用いた軌道追従制御の安定性およびパラメータ A , β の収束性は自明でなく、厳密な証明が今後の課題として残されている点を付記しておく。

5. おわりに

本論文では、まず先行研究で用いていた入力変換を必要としない形で可制御性解析を行い、周期入力だけで並

(a) Simulation

(b) Experiment

Fig. 8 Path tracking control

進および回転制御を実現する周期入力の設計法を提案した。そして、先行研究で別々の運動として扱っていた回転と並進を同時に実現した。さらにこの制御方策を用いた周期フィードバック制御を提案し、シミュレーションおよび実験によりロボットの Point-to-Point 制御を実現した。また、一回の周期入力によって生じる誤差を次の試行に反映させる誤差修正法を提案し、計画した軌道上に沿って並進させる軌道追従を実現した。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究(B)No. 17760349）による支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 岩谷, 石川, 原: 三叉ヘビ型移動ロボットの運動解析と制御; 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 12, pp. 1159–1161 (2003)
- [2] 石川: 三叉ヘビ型ロボットの推進原理と周期入力による制御; 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 5, pp. 520–528 (2006)
- [3] R. W. Brockett: Asymptotic stability and feedback stabilization; *Differential Geometric Control Theory*, Vol. 27, pp. 181–191, Springer Verlag (1983)
- [4] 三平: 非ホロノミックシステムのフィードバック制御; 計測と制御, Vol. 36, No. 6, pp. 396–403 (1997)

-
- [5] 石川：非ホロミックシステムの位相構造-未解決問題への誘い；システム/制御/情報, Vol. 45, No. 9, pp. 536–543 (2001)
 - [6] 岩谷, 石川, 原：一次の可制御構造を持つ対称アフィン系のフィードバック制御-時間軸状態制御系に基づく切り替え制御戦略-；計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 10, pp. 839–844 (2002)
 - [7] 浦久保, 土屋, 辻田：あるクラスの非ホロミックシステムに対するリャプノフ制御；計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 11, pp. 1020–1025 (2001)
 - [8] M. Ishikawa, Y. Minami and T. Sugie: Development and control experiment of the trident snake robot; *Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 6450–6455 (2006)
-