2 自由度フレキシブルマニピュレータの省エネルギー フィードフォワード制御法*

阿部 晶^{*1}, 根本 翔太^{*2}

An Energy Saving Feedforward Control Technique for a 2-DOF Flexible Manipulator

Akira ABE^{*1} and Shota NEMOTO

^{*1} Department of Systems, Control and Information Engineering, Asahikawa National College of Technology
2-2-1-6 Syunkodai, Asahikawa, Hokkaido 071-8142, Japan

This paper investigates a feedforward control technique for saving the operating energy of a 2-DOF flexible manipulator with a point-to-point (PTP) motion, in which the residual vibration also can be suppressed. The 2-DOF manipulator has one prismatic joint and one revolute joint. The Lagrangian approach in conjunction with the assumed modes method is applied to derive the equations of motion of the manipulator system. For the PTP motion task, the trajectory of the translational motion is set to a cycloidal motion. On the other hand, the trajectory of the rotational motion is designed to simultaneously minimize the residual vibration and the operating energy. In the present method, we attempt to express the trajectory of the joint angle by an artificial neural network (ANN), and then a vector evaluated particle swarm optimization (VEPSO) algorithm, which is a multi-objective optimization algorithm, is used for learning the ANN. By operating the manipulator along the trajectory obtained by the proposed method, the residual vibrations can be suppressed under the minimum energy condition. The numerical simulation results are compared with the experimental results; this comparison reveals the applicability and effectiveness of the proposed method.

Key Words : Vibration Control, Motion Control, Positioning, Flexible Manipulator, Neural Networks, Vector Evaluated Particle Swarm Optimization

1. は じ め に

産業用ロボットの高速化, 省エネルギー化を目的として, マニピュレータの軽量化が望まれている。一方, マニピュレータの軽量化に伴い, その剛性が低下して振動が生じ易くなる。このような背景のもと, フレキシブルマニピュレータの振動制御に関する基礎的研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。国内のフレキシブルマニピュレータのフィードフォワード制御に関する研究として, 小島らによって残留振動抑制を目的とした軌道計画法が提案されている^{(3)~(7)}。一方, 著者らはこれまでに 1 リンクフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題を扱い, 駆動エネルギーと残留振動を同時に最小化する多目的最適化に基づく軌道計画法⁽⁸⁾を提案してきた。この軌道計画法においては, 関節角軌道を 3 次スプライン関数で表現し, その補間点を探索パラメータとした。そして, 残留振動の最大値と駆動エネルギーの 2 つを目的関数として設定し, 多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を図った。この手法で生成された軌道を用いてマニピュレータを旋回させると, 残留振動が抑制される。すなわち, フィードフォワード振動制御が確立される。数値シミュレーションとモデル実験から, 大きな残留振動が生じるサイクロイド曲線軌道よりも小さな駆動エネルギーで残留振動が抑制されることを示した。また, 駆動エネルギー最小化と残留振動抑制の間にトレードオフの関係があることも明らかにした。

さらには, 関節角軌道をニューラルネットワークで表現し, その係数を多目的最適化手法の 1 つである Vector

* 原稿受付 2011 年 9 月 14 日

^{*1} 正員, 旭川工業高等専門学校システム制御情報工学科
(〒071-8142 北海道旭川市春光台 2 条 2-1-6)

^{*2} 北海道大学工学部機械知能工学科
(〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: abe@asahikawa-nct.ac.jp

Fig. 1 2-DOF flexible manipulator

Evaluated Particle Swarm Optimization (VEPSO)⁽⁹⁾の探索パラメータとした，残留振動を抑制する省エネルギー軌道計画法を提案した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾．この手法を用いれば，残留振動抑制とともにこれまでの手法(8)よりもさらなる省エネルギー化が図られることを確認した．ここで提案されたニューラルネットワークを用いた手法は，駆動エネルギーが最小化されるように滑らかな軌道を生成し，あらゆる位置決め機構の振動制御に応用可能であると考えられる．

本研究では，並進と回転機構を有する2自由度フレキシブルマニピュレータのPTP制御に対して，残留振動を抑制するフィードフォワード制御に関する研究を実施する．この系は，制御対象となるフレキシブルマニピュレータの振動に関する1つのダイナミクスに対して，並進運動と回転運動の2つの自由度をもつ系といえる．これと同様なものとして，文献(5)の2関節フレキシブルロボットアーム(第1リンクが剛体，第2リンクがフレキシブルリンク)が挙げられる．文献(5)においては，フレキシブルリンクの残留振動抑制のために，2つの関節角軌道の最適化を実施している．一方，本研究では並進運動はサイクロイド曲線軌道に沿って行なわせ，文献(10)，(11)の手法を適用して残留振動と駆動エネルギーが同時に最小化となる関節角軌道の生成を試みる．この様に，2自由度系において1つの自由度の運動を最適化することにより，振動抑制と省エネルギー化が図られる点が本研究の1つの特色といえる．オフラインシミュレーションに基づく制御法の妥当性を検証するために，モデル実験をも実施した．そして，シミュレーションならびにモデル実験の両面から，ニューラルネットワークとVEPSOを組み合わせたフィードフォワード振動制御法が，省エネルギーで残留振動を抑制することを示す．

2. マニピュレータの運動方程式

本研究では，図1に示されるような並進と回転機構を有する2自由度1リンクフレキシブルマニピュレータを扱う．図中の z は並進移動距離， θ は回転角， a は回転関節部の半径， s はマニピュレータに固定した座標系すなわち物体座標系である．著者らはこれまでフレキシブルマニピュレータのモデリングにおいて，大たわみによる有限変形理論を適用すれば，高精度なモデルが得られることを報告してきた⁽¹²⁾．そこで本研究においても，マニピュレータは塑性変形を起すことなく大きな弾性変形が可能と仮定し，有限変形理論を適用して運動方程式を導出する．

マニピュレータの任意の位置 s を基準座標系 (X, Y) で表すと

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a+s+u) \cos \theta - w \sin \theta \\ (a+s+u) \sin \theta + w \cos \theta + z \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる．ここで， w はマニピュレータのたわみ， u は大たわみによる x 軸方向の変位である．軸方向の変位 u は，

有限変形理論と中立軸の不伸張に基づいて次式によって与えられる⁽¹²⁾。

$$u = -\frac{1}{2} \int_0^s \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 ds \quad (2)$$

系の運動エネルギー T は次式によって与えられる。

$$T = \frac{1}{2} \left(m\dot{z}^2 + J\dot{\theta}^2 + \rho A \int_0^l \dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{r}} ds \right) \quad (3)$$

ここで, m, J は関節部の質量ならびに慣性モーメントであり, ρ, A および l はそれぞれマニピュレータの密度, 断面積, 長さである。一方, 系のポテンシャルエネルギーは,

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right)^2 ds \quad (4)$$

と与えられる。

本研究では, PTP 制御時のマニピュレータの挙動は高次モードの影響は比較的小さく, 1 次振動モードにより近似的に表し得ると仮定する。そこで, マニピュレータの変位 w を, 一端固定・他端自由のはりの 1 次振動モードの固有関数 $\phi(s)$ を用いて次式のように近似する。すなわち,

$$w(t, s) = W(t)\phi(s) \quad (5)$$

ラグランジュ関数 $L = T - U$ を導入し, オイラー・ラグランジュの方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{W}} \right) - \frac{\partial L}{\partial W} = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = F \quad (6)$$

に式 (3), (4) を代入して式 (5) を用いると, フレキシブルマニピュレータ, 回転運動ならびに並進運動に関する方程式がそれぞれ

$$\begin{aligned} & (1 + \alpha_4 W^2) \ddot{W} + (2\zeta \omega + \alpha_5 \dot{W} W) \dot{W} + \omega^2 W + (\alpha_1 + \alpha_6 W^2) \ddot{\theta} \\ & + (\alpha_2 - \alpha_7 W^2) W \dot{\theta}^2 + (\alpha_3 \cos \theta - \alpha_8 W \sin \theta) \ddot{z} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & [\beta_1 - (\beta_4 - \beta_5 W^2) W^2] \ddot{\theta} - (\beta_6 - \beta_7 W^2) \dot{W} \dot{\theta} W \\ & + [(\beta_2 - \beta_9 W^2) \cos \theta - \beta_8 W \sin \theta] \ddot{z} + (\beta_3 + \beta_{10} W^2) \ddot{W} + \beta_{11} \dot{W}^2 W + c \dot{\theta} = \tau \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & [(\gamma_1 - \gamma_2 W^2) \cos \theta - \gamma_3 W \sin \theta] \ddot{\theta} - (\gamma_4 \sin \theta + \gamma_5 W \cos \theta) \dot{W} \dot{\theta} + \gamma_6 \ddot{z} \\ & + (\gamma_2 \cos \theta + \gamma_7 W \sin \theta) \ddot{W} + [(-\gamma_1 + \gamma_2 W^2) \sin \theta - \gamma_5 W \cos \theta] \dot{\theta}^2 - \gamma_7 \dot{W}^2 \sin \theta = F \end{aligned} \quad (9)$$

と求まる。ここで, F は駆動力, τ は駆動トルク, c と ζ はそれぞれモデル実験を考慮して付加された粘性摩擦係数および粘性減衰係数である。並進方向の移動が目標値に追従して制御可能である, すなわち, 位置 z , 速度 $\dot{z}$ および加速度 $\ddot{z}$ の追従制御が実現されると仮定すれば, 並進運動の方程式を扱う必要がなくなる。本研究ではこの仮定を採用し, 並進運動の方程式 (9) を扱わないこととする⁽¹²⁾。したがって, 式 (7) と (8) が本研究で扱う支配方程式となる。なお, 本研究ではパラメータを正確に把握するために, 係数 c, ζ, α, β および固有振動数 ω をパラメータ同定実験から求めることとする。

3. 実験装置の概要

本研究で用いたモデル実験装置の写真を図 2 に示す。モデル実験では, 長さ × 幅 × 厚さ = 515[mm] × 50[mm] × 1[mm] の真鍮製のはりを, フレキシブルマニピュレータとして用いた。マニピュレータの変位を計測するためにひずみゲージを用い, マニピュレータ固定端から 40[mm] の位置の値を測定した。マニピュレータの並進方向の駆動にはリニアサーボモータ (安川電機: SGLCW) を使用した。一方, マニピュレータの旋回には, AC サーボモータ

Fig. 2 Photograph of the experimental setup

Table 1 Identified parameters

Parameter	Value
α_1	2.394×10^{-1} [m]
α_2	6.785×10^{-1} [—]
α_3	6.594×10^{-1} [—]
ζ	9.893×10^{-3} [—]
ω	12.72 [rad/s]
β_1	1.758×10^{-2} [kg · m ²]
β_2	1.366×10^{-2} [kg · m]
β_3	6.002×10^{-2} [kg · m]
c	3.301×10^{-2} [N · m · s]

タ (安川電機 : SGMMJ) を用いた . この 2 つのサーボモータは , ドライブユニットにおいて速度制御モードに設定して駆動した . この際 , 並進方向の移動 , すなわち , リニアサーボモータの目標軌道 $z_d(t)$ の追従制御として , 次式の PD 制御とフィードフォワード制御を併用し , ドライブユニットへの指令電圧 v とした .

$$v = K_1(z_d - z) + K_2(\dot{z}_d - \dot{z}) + v_{ref} \quad (10)$$

ここで , v_{ref} は $\dot{z}_d$ に対応する指令電圧 , K_1 と K_2 はフィードバックゲインである . マニピュレータの目標角への追従制御においても式 (10) と同様な制御方式を採用した . 2 つのモータ駆動のための計測制御ならびに変位のモニタリングは , DSP ボード (dSPACE : DS1104) を使用してサンプリング時間 2[ms] にて実施した .

フィードフォワード制御においては , モデルリングの精度が制御性能に直接影響を及ぼすことが知られており , 高精度なモデリングが要求される . そこで , このフレキシブルマニピュレータの高精度なモデルを得るために , パラメータ同定実験を実施し , 式 (7) , (8) の係数を求めた . 同定法⁽¹³⁾としては , 実機においてサイクロイド曲線軌道を用いてマニピュレータを並進ならびに回転駆動させ , マニピュレータの振動波形と AC サーボモータ駆動トルクを計測する . そして , 数値シミュレーション結果がこれらの実験値と一致するようにパラメータの値を探索した . 同定結果を表 1 に示す . なお , $\alpha_4 \sim \alpha_8$ および $\beta_4 \sim \beta_{11}$ の影響は極めて小さいため , これらを見捨て値を 0 とした . なお , この場合 , 式 (7) に W^2 や W^3 などの非線形項が存在しないこととなる . しかしながら , 有限変形理論の影響は $W\dot{\theta}^2$ の係数 α_2 に表れることに注意されたい⁽¹²⁾ .

Fig. 3 Schematic diagram of the trajectory generation

4. 省エネルギーフィードフォワード制御

4.1 Neural Networks による軌道生成

本研究では，時間 T_E でマニピュレータを距離 Z_E 並進移動させるとともに，関節角を初期角度 θ_s から目標角度 θ_E に回転させる PTP 制御を扱う．そして，並進移動はサイクロイド曲線軌道

$$z(t) = Z_E \left[\frac{t}{T_E} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi t}{T_E} \right) \right] \quad (0 \leq t \leq T_E) \quad (11)$$

に沿って行なわせ，フレキシブルマニピュレータの残留振動抑制と旋回駆動エネルギー最小化を両立する関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ をニューラルネットワークにより生成⁽¹⁴⁾を試みる．なお，サイクロイド曲線は始点と終点で 1 階および 2 階微分値が 0，すなわち，速度と加速度が 0 となる滑らかな軌道を生成するので，ここで採用している．この手法の概念図を図 3 に示す．ニューラルネットワークは図 3 に示されるような 1 入力 1 出力の 3 層構造を採用する．入力層には駆動終了 T_E までの時間 t を与え，これをそのまま中間層の入力とする．中間層の i 番目の素子の出力は以下のシグモイド関数を用いる．

$$y_i(t) = \frac{1}{1 + \exp[-a_i(t - b_i)]} + c_i \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (12)$$

ここで，

$$b_i = \frac{i-1}{I-1} T_E, \quad c_i = \frac{-1}{1 + \exp(a_i b_i)} \quad (13)$$

と定義されており， $1/a_i$ は温度とよばれる定数， I は中間層の素子数， c_i は閾値である．得られる角速度ならびに角加速度が滑らかな軌道となるように，無限階微分可能な関数としてシグモイド関数を採用している．ネットワークの出力 $O(t)$ は $y_i(t)$ に重み w_i を掛けたものを加え合わせた次式とする．

$$O(t) = \sum_{i=1}^I w_i y_i \quad (14)$$

一方，マニピュレータの PTP 制御においては，始点と終点で角速度のみならず角加速度も 0 であることが望ましい．したがって本研究では，以下の境界条件式を考える．

$$\dot{\theta}_{opt}(0) = \dot{\theta}_{opt}(T_E) = \ddot{\theta}_{opt}(0) = \ddot{\theta}_{opt}(T_E) = 0 \quad (15)$$

上式を満足する関数として前述のサイクロイド関数

$$\Phi(u) = (\theta_E - \theta_s) \left[u - \frac{\sin(2\pi u)}{2\pi} \right] + \theta_s \quad (0 \leq u \leq t/T_E) \quad (16)$$

が挙げられる．そこで，ネットワークの出力 $O(t)$ をサイクロイド関数の入力として与えた次式によって，関節角軌道を生成する．すなわち，

$$\theta_{opt}(t) = \Phi[O(t)] \quad (17)$$

なお，PTP 制御の軌道の境界条件として，当然のことながら

$$\theta_{opt}(0) = \theta_S, \quad \theta_{opt}(T_E) = \theta_E \quad (18)$$

を満足する必要がある．これを満たすためには，ニューラルネットワークの出力が

$$O(0) = 0, \quad O(T_E) = 1 \quad (19)$$

となる必要がある．そこで本研究では， $O(0) = 0$ ，すなわち， $y_i(0) = 0$ を満たすよう閾値 c_i を式 (13) のように設定した．また，重み w_I は $O(T_E) = 1$ を満たすように定めた．以上により，関節角軌道 $\theta_{opt}(t)$ が生成される．

4.2 VEPSO による軌道生成アルゴリズム

前節で説明されたニューラルネットワークに基づく軌道生成法を用いて，マニピュレータの残留振動と旋回駆動エネルギー最小化を両立させる関節角軌道を多目的最適化手法である VEPSO により求める．このアルゴリズムを以下に示す．

この PTP 制御問題において，残留振動抑制と旋回駆動エネルギー最小化の観点から，2 つの目的関数 F_1 と F_2 を次式のように定義する．

$$F_1 = |W_{\max}|, \quad F_2 = \int_0^{\Delta\theta} |\tau| d\theta \quad (20)$$

ここで， $|W_{\max}|$ は位置決め後のフレキシブルマニピュレータの最大振幅， F_2 は旋回駆動エネルギーを表しており， $\Delta\theta = |\theta_E - \theta_S|$ と定義されている．式 (20) の目的関数を同時に最小化するように VEPSO を適用し，式 (12)，(14) のニューラルネットワークを学習させ，最適な軌道を求める．ここで，VEPSO によって最適化されるパラメータは，式 (12) の $a_1, a_2, \dots, a_I$ と式 (14) の重み $w_1, w_2, \dots, w_{I-1}$ である．VEPSO に基づく軌道生成アルゴリズムの手順を以下に示す．

- [1] 最適化する目的関数の数に合わせて群 $S_1, S_2, \dots, S_p$ を考える．ここで， p は目的関数の数である．本研究では残留振動と駆動エネルギー最小化の 2 つを目的とするため， $p = 2$ である． k 番目の群の i 番目の粒子の位置ベクトル $X_i^k = [X_{i,1}^k, X_{i,2}^k, \dots, X_{i,M}^k]$ と速度ベクトル $V_i^k = [V_{i,1}^k, V_{i,2}^k, \dots, V_{i,M}^k]$ をそれぞれ乱数で初期化する．ここで， M は最適化されるパラメータ数である．なお本研究の場合， $M = 2I - 1$ であり，位置ベクトルの要素の $X_{i,1} \sim X_{i,I}$ は $a_1 \sim a_I$ ， $X_{i,I+1} \sim X_{i,2I-1}$ は $w_1 \sim w_{I-1}$ に対応している．
- [2] 位置ベクトルから各個体の各群における評価値を計算する．この値で $pbest_i^k$ (群 k の個体 i がこれまでに探索した中で最良の位置ベクトル) を初期化する．また， $gbest^k$ (群 k の全個体が探索した中で最良の位置ベクトル) を初期化する．
- [3] 各個体の位置ベクトル，速度ベクトルを次式によって更新する．

$$V_i^k(n+1) = \chi \left\{ V_i^k(n) + c_1 r_1 [pbest_i^q - X_i^k(n)] + c_2 r_2 [gbest^q - X_i^k(n)] \right\} \quad (21)$$

$$X_i^k(n+1) = X_i^k(n) + V_i^k(n+1) \quad (22)$$

ここで， n は現在の反復回数であり， r_1 と r_2 はそれぞれ独立した $0 \sim 1$ の範囲の一様乱数である．なお，係数 χ ， c_1 ， c_2 の間には次式のような関係がある．

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}}, \quad \varphi = c_1 + c_2, \quad \varphi > 4 \quad (23)$$

本研究では，これまでの PSO での値と同様に $c_1 = c_2 = 2.05$ の値を採用した⁽¹³⁾．また，式 (21) 中の q は次式によって定義される．

$$q = \begin{cases} p & \text{if } k = 1 \\ k-1 & \text{if } k = 2, 3, \dots, p \end{cases} \quad (24)$$

- [4] [3] で更新された位置ベクトルから各個体の評価値を計算する．各個体において評価値が $pbest_i^k$ よりも優れていれば， $pbest_i^k$ を更新する．各群における全個体の最良の評価値が $gbest^k$ よりも優れているならば $gbest^k$ を更新する．

Fig. 4 Simulation and experimental results ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = \pi/2[\text{rad}]$, $Z_E = -0.3[\text{m}]$, $T_E = 1[\text{s}]$): (a) translational position, (b) translational velocity, (c) joint angle (present method), (d) angular velocity (present method), (e) tip displacement (present method), (f) motor torque (present method), (g) tip displacement (cycloidal motion), and (h) motor torque (cycloidal motion)

[5] 反復回数 n が最大反復回数未満ならば，反復回数を更新 ($n = n + 1$) する．最終的に得られた $gbest^k$ が各群における最適解となる．

上記のアルゴリズムによって生成された軌道に沿ってマニピュレータを旋回すると，省エネルギーで残留振動が抑制される．すなわち，省エネルギーフィードフォワード制御が確立される．

5. シミュレーションおよび実験結果

本研究で採用した省エネルギーフィードフォワード制御法の有効性および実現性を検証するため，数値シミュレーションおよびモデル実験を行った結果を以下に示す．軌道生成における VEPSO のパラメータとしては，各群

Fig. 5 Simulation and experimental results ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = \pi/6[\text{rad}]$, $Z_E = -0.2[\text{m}]$, $T_E = 0.9[\text{s}]$): (a) translational position, (b) translational velocity, (c) joint angle (present method), (d) angular velocity (present method), (e) tip displacement (present method), (f) motor torque (present method), (g) tip displacement (cycloidal motion), and (h) motor torque (cycloidal motion)

の個体数 100，最大反復回数 200 とした．VEPSO によって最適化されるパラメータの探索範囲を

$$\left. \begin{aligned} a_i &\in [-20, 20], \quad (i = 1, 2, \dots, I) \\ w_i &\in [-1, 1], \quad (i = 1, 2, \dots, I-1) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

と設定した．また，ニューラルネットワークの中間層素子数として $I = 11$ を採用した．なお，この軌道生成は駆動条件ごとに行なわれ，その計算時間は PC(CPU: Intel Core i5 650[3.2GHz]) で 10 分程度である．

図 4 は，駆動条件を ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = \pi/2[\text{rad}]$, $Z_E = -0.3[\text{m}]$, $T_E = 1[\text{s}]$) と設定し，本手法で得られた軌道に沿ってマニピュレータを旋回させたときと，次式のサイクロイド曲線軌道

$$\theta_{\text{cyc}}(t) = (\theta_E - \theta_S) \left[\frac{t}{T_E} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_E}\right) \right] + \theta_S \quad (0 \leq t \leq T_E) \quad (26)$$

Fig. 6 Simulation and experimental results ($\theta_S = 0$, $\theta_E = \pi/2[\text{rad}]$, $Z_E = 0.2[\text{m}]$, $T_E = 0.8[\text{s}]$): (a) translational position, (b) translational velocity, (c) joint angle (present method), (d) angular velocity (present method), (e) tip displacement (present method), (f) motor torque (present method), (g) tip displacement (cycloidal motion), and (h) motor torque (cycloidal motion)

で旋回させたときの結果の比較である．図 (a), (b) はマニピュレータの並進移動の位置および速度であり，(c), (d), (e), (f) は本手法で得られた旋回角度，角速度，マニピュレータ先端の変位ならびにモータのトルクである．サイクロイド曲線軌道で得られた変位とトルクは図 (g), (h) に示される．なお，これらの図中の実線，破線はそれぞれ実験結果およびシミュレーション結果である．図 4(a)~(d) より，実線の実験結果と破線の目標軌道がほぼ完全に一致していることがわかる．これより，4 章で示された目標軌道への追従制御が妥当であると認められる．また，図 4(e)~(h) から実験結果とシミュレーション結果は十分によく一致しており，パラメータ同定が適切であるといえる．図 4(g) から，サイクロイド曲線でマニピュレータを旋回させると，位置決め後の 1[s] 以降に振幅約 7[cm] 程度の大きな残留振動が発生する．一方，図 4(e) に示されるように，本手法で得られた軌道に沿ってマニピュレータを旋回させると，残留振動が十分に抑制される．実験結果においても残留振動が効果的に抑制されており，採用した手法の実現性を認めることができる．

Fig. 7 Simulation and experimental results ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = 0$, $Z_E = 0.3[\text{m}]$, $T_{Ez} = 1.0[\text{s}]$, $T_{E\theta} = 1.2[\text{s}]$): (a) translational position, (b) translational velocity, (c) joint angle (present method), (d) angular velocity (present method), (e) tip displacement (present method), (f) motor torque (present method), (g) tip displacement (cycloidal motion), and (h) motor torque (cycloidal motion)

図5, 6は駆動条件をそれぞれ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = \pi/6[\text{rad}]$, $Z_E = -0.2[\text{m}]$, $T_E = 0.9[\text{s}]$), ($\theta_S = 0$, $\theta_E = \pi/2[\text{rad}]$, $Z_E = 0.2[\text{m}]$, $T_E = 0.8[\text{s}]$)と設定したときの結果である。ここで、図6の並進移動の方向は図4, 5とは逆向きであることに注意されたい。これらの図においても、実線の実験結果と破線のシミュレーション結果は十分に一致しており、実験装置における追従制御ならびにマニピュレータのモデリングが良好であることがわかる。図5(e), 6(e)より、異なる条件においても、本手法のフィードフォワード制御の適用により、位置決め後の残留振動がしっかりと抑制されていることがわかる。これより、本手法は残留振動抑制に効果的といえる。また、駆動中のマニピュレータの最大振幅に着目すると、図4(e), (g)と5(e), (g)から本手法とサイクロイド曲線軌道の両者においてその値は同程度である。一方、図6(g)のサイクロイド曲線軌道においてはマニピュレータ駆動中に最大約19[cm]程度の振動が生じるが、図6(e)の本手法においてはこれが約13[cm]程度と低減されている。これより、駆動条件においては、本手法は駆動中の振動も低減することが認められる。

Fig. 8 Simulation and experimental results ($\theta_S = -\pi/2[\text{rad}]$, $\theta_E = 0$, $Z_E = 0.4[\text{m}]$, $T_{Ez} = 1.5[\text{s}]$, $T_{E\theta} = 0.8[\text{s}]$): (a) translational position, (b) translational velocity, (c) joint angle (present method), (d) angular velocity (present method), (e) tip displacement (present method), (f) motor torque (present method), (g) tip displacement (cycloidal motion), and (h) motor torque (cycloidal motion)

以上の駆動条件では、マニピュレータの並進運動の駆動時間 (T_{Ez}) と回転運動の駆動時間 ($T_{E\theta}$) を一致させてきた、すなわち、 $T_E = T_{Ez} = T_{E\theta}$ 。次いで、本手法の汎用性をさらに検証するために、この2つの駆動時間が異なる場合についての検討を試みる。駆動時間を $T_{Ez} = 1.0[\text{s}]$, $T_{E\theta} = 1.2[\text{s}]$ と設定した PTP 制御の結果を図7に示す。この場合においても、サイクロイド曲線軌道では残留振動が生じるものの、本手法においては完全に制御されていることが読み取れる。これに対して、回転の駆動時間を並進のものよりも短くしたもの ($T_{Ez} = 1.5[\text{s}]$, $T_{E\theta} = 0.8[\text{s}]$) を図8に示す。この場合、マニピュレータ目標角度 θ_E 到達後の $0.8[\text{s}]$ から $1.5[\text{s}]$ まで並進運動が続いているためか、本手法を適用しても僅かながら振動が生じる。しかしながら、サイクロイド曲線軌道との比較から本手法の振動抑制に関する有効性を確認することができる。このように、2自由度系の PTP 制御において、異なる駆動時間に対しても本手法は残留振動を効果的に抑制することができ、汎用性に富むものといえる。

最後に、本手法の省エネルギー効果について検討する。これまでのグラフから、本手法の VEPSO が式 (20) の

Table 2 Comparison of driving energy F_2 [J]

Figure	Present method	Cycloidal motion
4	0.855	1.00
5	0.607	0.677
6	0.451	0.669
7	0.141	0.186
8	0.458	0.548

残留振動を表す評価関数 F_1 の最小化を図っていることがわかるが、駆動エネルギーを示す F_2 の最小化を読み取ることができない。そこで、本手法より得られた評価関数 F_2 の値を、サイクロイド曲線軌道のものと比較し、省エネルギー効果を計ることとする。両軌道でマニピュレータを旋回させたときの F_2 を表 2 に示す。これより、本手法の値は大きな残留振動が生じるサイクロイド曲線軌道のものよりも減少していることがわかる。ゆえに、本研究で採用したフィードフォワード制御は残留振動を抑制するとともに旋回エネルギーをも減少させる効果があるといえる。

6. ま と め

本研究では、並進運動と回転運動の 2 自由度を有する 1 リンクフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題に対して、ニューラルネットワークと VEPSO に基づくフィードフォワード制御法を適用した。ここで、並進運動はサイクロイド曲線軌道に沿って行なわせ、残留振動と旋回エネルギーの両者が最小となる関節角軌道を探索した。この様に、並進と回転の 2 自由度系に対して、回転運動のみの軌道計画により振動が抑制される点が本手法の特長である。なお、モデリングの際にマニピュレータは駆動時に大変形を起こすものと仮定し、有限変形理論に基づく軸方向の変位を考慮した。数値シミュレーションとモデル実験の両者は十分に一致していることから、本研究のマニピュレータのモデリングならびにフィードフォワード振動制御法が有効かつ実現性を有するものであることを確認した。さらに、サイクロイド曲線軌道のものとの比較から、本手法は残留振動抑制と省エネルギー化の両立が図られることを示した。また、本手法は並進、回転運動の駆動時間が異なる場合においても有効であり、汎用性が高いフィードフォワード制御法といえよう。

謝 辞

本研究費の一部は、第 25 回 (2009 年度) マツダ研究助成によるものである。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Benosman, M. and Vey, L.G., " Control of Flexible Manipulators: A Survey ", *Robotica*, Vol. 22, No. 5 (2004), pp. 535-545.
- (2) Dwivedy, S.K. and Eberhard, P., " Dynamic Analysis of Flexible Manipulators: A Literature Review ", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, No. 7 (2006), pp. 749-777.
- (3) 小島宏行, " 関節角目標値計画法によるフレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御に関する研究 ", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 635 (1999), pp. 2659-5664.
- (4) 小島宏行, 戸塚輝成, 近藤厚哉, " 関節角目標値計画法と外乱オブザーバを用いたフレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御の実験 ", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 646 (2000), pp. 1876-1881.
- (5) 小島宏行, 木部哲治, " 遺伝的アルゴリズムを用いた最適軌道計画による 2 関節フレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御 ", 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7 (2001), pp. 905-912.
- (6) 小島宏行, " 遺伝的アルゴリズムを用いた CP 制御フレキシブルロボットアームの軌道計画 ", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 670 (2002), pp. 1784-1790.
- (7) Kijima, H. and Hiruma, T., " Evolutionary Learning Acquisition of Optimal Joint Angle Trajectories of Flexible Robot Arm ", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 18, No. 1 (2006), pp. 103-110.

- (8) 阿部晶, 笹森和典, “ フレキシブルマニピュレータの最適軌道計画 (駆動エネルギーと残留振動を最小化するためのアプローチ) ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 46, No. 2 (2010), pp. 130-132.
 - (9) Parsopoulos, K.E., Tasoulis, D.E. and Vrahatis, M.N., “ Multi-Objective Optimization Using Parallel Vector Evaluated Particle Swarm Optimization ”, *Proceedings of the IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2004)*, Innsbruck, Austria, Vol. 2 (2004), pp. 823-828.
 - (10) 阿部晶, 小椋数馬, “ フレキシブルマニピュレータの省エネルギーフィードフォワード制御法 ”, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, (2010), pp. 731-734.
 - (11) Abe, A. and Komuro, K., “ An Energy Saving Open-Loop Control Technique for Flexible Manipulators ”, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, (2011), pp. 416-421.
 - (12) 阿部晶, “ 大変形を考慮した 1 リンクフレキシブルマニピュレータのモデリングと振動制御 ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 719 (2006), pp. 2177-2184.
 - (13) 阿部晶, “ 駆動トルクに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画 ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 745 (2008), pp. 2246-2253.
 - (14) Abe, A., “ Trajectory Planning for Flexible Cartesian Robot Manipulator by Using Artificial Neural Network: Numerical Simulation and Experimental Verification ”, *Robotica*, Vol. 29, No. 5 (2011), pp. 797-804.
-