学術・技術論文

Non-Backdrivable な減速器をもつ 柔軟関節マニピュレータの振動抑制制御

高橋 隆行* 村山 泰* 王 志東* 中野 栄二*

A Control Method to Reduce the Oscillation of a Robot Manipulator with Elastic Joints and Non-Backdrivable Gear Trains

Takayuki Takahashi*, Yasushi Murayama*, Zhi-Dong Wang* and Eiji Nakano*

A control method to reduce the oscillations of a robot manipulator with elastic joints and non-backdrivable gear trains is proposed. The examined robot manipulator will be used as an arm for robots which work in the human living fields. Such a manipulator should be carefully designed from the safety point of view. Focusing on the interaction force between a human and a manipulator, there are two important aspects to gain the safety. When the manipulator contacts slowly with a human, the elasticity of the joints and the body will play an important role to prevent any injury. On the other hand, if the manipulator collides against a human with rather high speed, the kinetic energy will be the main index to measure the expected damage. The authors will point out that the effective manipulator mechanisms used where a human is in the robot's working space is one with high-gear-ratio gear trains (as a result of non-backdrivable) and elastic joints. However, the elastic joints cause oscillations. The main purpose of this paper to propose a new method to reduce such an oscillation. This method is discussed based on the stability analysis with Lyapunov's theorem. The simulation and experimental results are also given to show the effectiveness of the method.

Key Words: Safety for a Human and Surroundings, Robot Manipulator, Elastic Joint, Non-backdrivability, Reduction of Oscillation

1. 序 論

近年、非製造業界へのロボット応用に向けた研究が活発化してきている。例えば、筆者らはオフィスや学校といった屋内環境において、書類の運搬・来客の案内などを想定したメッセンジャロボットの研究開発を行っている [1]。また、高齢者や障害者自身の生活支援、あるいは肉体的負担の大きいその介護者を補助するためにロボット技術を応用する研究も行われている [2] [3]。

このような人間の生活する環境下で働くロボットには、産業用ロボットとはまったく異なる観点からの、安全性に関する十分な検討が必要となってくる。

人間とマニピュレータとが同じフィールドに存在する場合、互いに接触、あるいは衝突が起こることが予想される。接触とは互いの相対速度が低い状態での物理的接触であり、衝突とは高い相対速度での物理的接触である。両者の本質的な違いは、物理的接触の際に発生する相互作用力に、慣性力が含まれるか否かという点にある。

まず、衝突に対する安全性について考えよう。衝突力は、関節やリンクに柔軟性を持たせるだけではさほど緩和することは

できない。衝突力を緩和するためには、作業中のマニピュレータの運動エネルギーを低く抑える必要があり、そのためにはマニピュレータの軽量化および上限速度の制限が必要になる。人間のいる環境下で働くロボットに搭載されるマニピュレータの作業速度は、産業用に比してそれほど高いものは要求されないと考えられるので、上限速度を制限することが、衝突力を緩和するためにより選択である。

さて、マニピュレータの上限速度を抑えるためにはいくつかの方法が考えられる。大きくは制御装置による方法と機械的に最大速度を低く設計する方法の二つに分けられる。制御機器の故障まで含めたフェイルセーフの考え方に立つと、後者の選択が望ましいと考えられる。現在容易に入手可能なアクチュエータは、ほとんどすべてが高速非力型であり、機械的な最大速度を低く保つためには、高い減速比をもつ機構を用いる必要が出てくる。その結果、関節は non-backdrivable となる。

次に、接触に対する安全性について考えよう。この場合、関節に柔軟性を持たせることで、腕全体に接触力の緩和特性が生まれ、その結果として、外部環境に与える損傷を軽減することができる。また上記の最大速度が制限されているということを併せると、回避するための時間が大きくとれるというメリットも生まれる。

以上、衝突と接触を前提とした安全性という観点から考察し

原稿受付 1999年3月8日

*東北大学大学院情報科学研究科

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

てきたが、その結果、柔軟関節を持ち、しかも高い減速比（結果として non-backdrivable）を有する機構により構成されたマニピュレータが、人間のいる環境下で用いられるマニピュレータとして有効な機構の条件であると考えられる。また、減速比が高いことからソフトウェアコンプライアンスを実現するのは難しいと考えられるので、柔軟関節はメカニカル（パッシブ）コンプライアンスにより構成されることになる [4]。

さらに、このような機構にすることの利点として、関節の non-backdrivability により、何らかの原因で突然電力の供給が途絶えてしまうような不測の事態でも、ブレーキを用いることなく、腕が落下して周囲の環境や人間にダメージを与えることを防ぐことができる。また中野・Piero ら [5] は、各関節を軟らかくすることで得られる特徴について考察し、通常のマニピュレータでは位置制御と力制御の併用が必要であった接触作業にも、位置制御のみで行えるという利点があり、制御系の簡単化にもつながることを指摘している。

一方で欠点として、自由空間で動かしたとき、関節の柔軟性に起因して振動してしまうことが挙げられる。この振動を抑える方法についてはいくつかの研究がなされている。例えば feedback linearization [6] や適応ロバスタ制御 [9]、あるいは適応分散制御 [8] といった手法が試みられている。しかしながらこれらの方法は、モデル化誤差の影響を受けやすかったり、あるいは制御則のなかに高次の微分量が含まれていたりといった問題を持っている。これらの研究はすべて backdrivable な関節機構を対象としており、non-backdrivable なものにそのまま適用することはできない。また各関節にブレーキを取りつけその機械的な ON/OFF 動作を利用して制振を試みた研究もある [10]。この機構は non-backdrivable であるが、文献 [10] では安定性の解析の際に重力項を無視し、かつ機構を backdrivable なものとして扱っている。

そこで本報告では、non-backdrivable な減速器を持つマニピュレータについて、柔軟関節であることに起因する振動を抑制する方法を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験を通して検証する。

2. 運動方程式

柔軟関節機構のモデルを Fig. 1 に示す。ただし、 J ：モータを含む減速器部の慣性モーメント、 I ：リンクの慣性モーメント、 u ：入力トルク、 β ：減速器出力軸の角度、 θ ：リンク角度である。機械的なコンプライアンスの効果を有効に利用するために、ばねは減速器とリンクの間に配置されている。

この機構を持つシリアルリンクマニピュレータの運動方程式

Fig. 1 Simple model of an elastic joint

は以下のように容易に求まる。

$$M\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + G + K(\theta - \beta) = 0 \quad (1)$$

$$J\ddot{\beta} - K(\theta - \beta) = u \quad (2)$$

ただし、 M ：慣性行列、 $C\dot{\theta}$ ：遠心力およびコリオリ力、 G ：重力項、 K ：剛性行列である。

ところで、本論文で対象としている機構は non-backdrivable である。この場合、力の伝達方向が減速器側からリンク方向の一方向のみで、その逆へは伝達しない。すなわち、式 (2) の左辺第二項が 0 となり、その結果、式 (2) は

$$J\ddot{\beta} = u \quad (3)$$

となる。以後、式 (1) および式 (3) で表されるシステムを対象に議論を行う。

3. 振動抑制法

Fig. 1 のようなシステムの振動を抑えるための制御系としては、厳密な線形化等いくつかの方法が考えられる。しかし、正確な物理モデルを前提とする方法では、モデル化誤差や把持物が変わることによってモデルの正確性が失われ、満足な性能を得るのが難しくなってしまう。また適応制御や学習制御は繰り返し同じ作業をするものには適しているが、本研究で目的とするような単発動作が主となるものには向いていない。

一方、正確な物理モデルを前提としない方法もいくつか報告されている。例えば Tomei [7] は、backdrivable なシステムに関して、モータ側の角度のみを用いて PD フィードバックを行うことで、Fig. 1 のようなシステムを大域的に漸近安定化できることを示している。本論文では同様の視点から、non-backdrivable なシステムに有効な制御法を構築する。

3.1 安定化制御則

以下のような制御入力 u を与えることで、式 (1) および式 (3) で表される non-backdrivable な減速器を持つ柔軟関節マニピュレータを大域的に漸近安定化できる。

$$u = K_p(\beta_d - \beta) - K_d\dot{\beta} + G(\theta_d) + K(\theta - \beta) \quad (4)$$

ただし、 θ_d ：リンク目標角度、 β_d ：減速器出力軸目標角度、 K_p ：比例ゲイン対角行列、 K_d ：微分ゲイン対角行列であり、 $\beta_d = \theta_d + K^{-1}G(\theta_d)$ である。

式 (4) の有効性は、以下のように Lyapunov の安定性定理から証明できる。今、Lyapunov 関数の候補を

$$V = \frac{1}{2} [\dot{\theta}^T M \dot{\theta} + \dot{\beta}^T J \dot{\beta}] + P(\phi) - P(\phi_d) \quad (5)$$

とおく。ただし、

$$P(\phi) = \frac{1}{2} (\phi_d - \phi)^T \hat{K} (\phi_d - \phi) + U(\theta) - \theta^T G(\theta_d)$$

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K + K_p \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{\partial U}{\partial \theta}$$

$$\phi = [\theta^T \beta^T]^T$$

である。このとき V は正定で radially unbounded となる [7]。

式 (5) を時間微分し、式 (1) (3) および式 (4) を用いて整理すると、

$$\dot{V} = -\dot{\beta}^T K_d \dot{\beta} \quad (6)$$

となる。したがって、 $K_d > 0$ ならば大域的に漸近安定となり、式 (4) で示した制御則の有効性が示される。

ここで、式 (4) の意味について若干考察を加える。右辺第 1 項から第 3 項までは backdrivable なシステムに関して Tomei により報告されたものと同じであり、モータ側の角度のみをフィードバックしている点に特徴がある。これは、システムの backdrivability により、リンク側の情報（トルク）がばねを通してモータ側へ反映されるため、モータ側を安定化させれば結果としてリンク側も安定させることになると解釈できる。ところが non-backdrivable なシステムにおいては、リンク側の情報はモータ側へはまったく伝わらないため、そのような効果は期待できない。仮に前 3 項のみで制御系を組んだ場合、式 (1) にはダンピング項がないことから、駆動軸の静止後、持続的な自由振動が生じる。そこで式 (4) の右辺第 4 項を加えることにより、リンク側の情報をモータ側へ戻して non-backdrivable なマニピュレータへ適用しようという考え方に基づいている。

しかしこのままでは、安定はするものの収束性があり高くないことが、数値シミュレーションおよび実験の結果から明らかになった (3.3 項および 5.3 項を参照)。そこで次に、収束性を高める方法について考察する。

3.2 ダンピング効果の導入

収束性を高めるために、ソフトウェアダンピング項を導入した次式のような制御入力を用いることを考えよう。

$$\begin{aligned} u = & K_p(\beta_d - \beta) - K_d\dot{\beta} + G(\theta_d) + K(\theta - \beta) \\ & - r(\dot{\theta} - \dot{\beta}) - K_c\dot{\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 r はダンピング係数の対角行列、 K_c は微分ゲイン対角行列である。右辺第 5 項および第 6 項が式 (4) に対して新たに加えられた項である。この制御則と等価な機械的效果を Fig. 2 に図示した。ところで式 (7) で表される制御則を用いた場合、 r 、 K_c あるいは K_d の値によっては、システムが不安定な挙動を示してしまうことがあった。

そこで、再び Lyapunov 関数の候補を式 (5) のようにおき、時間微分して式 (1) (3) および式 (7) を用いて整理すると、

$$\dot{V} = -\dot{\beta}^T K_d \dot{\beta} - \dot{\beta}^T r(\dot{\theta} - \dot{\beta}) - \dot{\beta}^T K_c \dot{\theta}$$

Fig. 2 Equivalent mechanical model of the improved control law which includes additional damping terms

$$\begin{aligned} &= -\dot{\beta}^T (K_d - r) \dot{\beta} - \dot{\beta}^T (r + K_c) \dot{\theta} \\ &= -(K_d - r) \|\dot{\beta}\|^2 - (r + K_c) \dot{\beta}^T \dot{\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。なお、解析を容易にするため r 、 K_d および K_c は要素をそれぞれ r 、 K_d 、 K_c とする対角行列と仮定した。以下、式 (8) に基づいて制御則を検討する。

様々な条件で数値シミュレーションを行った結果、スライディングモード制御 [11] の考え方を導入した以下のような方法が、良好な性能を発揮することが分かった。すなわち、例えば r を可変、 $0 < K_c < K_d$ を定数として、

$$r = k \cdot \frac{K_d \|\dot{\beta}\| - K_c \|\dot{\theta}\|}{\|\dot{\beta}\| + \|\dot{\theta}\|} \quad (9)$$

とする。ただし $k (> -1)$ は

$$\begin{cases} k < 1, & (K_d \|\dot{\beta}\| > K_c \|\dot{\theta}\|) \\ k > 1, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

であり、これを 1 に十分近い値とすれば、式 (8) の右辺は、定義域のほとんどの部分で負となる。厳密には、

$$K_d \|\dot{\beta}\| - K_c \|\dot{\theta}\| = 0 \quad (11)$$

$$K_d \|\dot{\beta}\| < K_c \|\dot{\theta}\| \quad \text{and} \quad \frac{K_d \|\dot{\beta}\| - K_c \|\dot{\theta}\|}{\|\dot{\beta}\| + \|\dot{\theta}\|} < -\frac{K_c}{k} \quad (12)$$

のいずれかの条件が成り立つときに $\dot{V} < 0$ が保証できなくなる。そのときには p を適当な正定数として、式 (9) においてそれぞれ $r = -p$ 、 $-K_c$ とすることにより、 $\dot{\beta} = 0$ および $\dot{\beta} = \dot{\theta} = 0$ を除いて式 (8) の右辺を恒等的に負とすることができる。ただし、式 (11) および (12) の条件を $\|\dot{\beta}\| - \|\dot{\theta}\|$ 空間内でみると、前者は傾き K_d/K_c の直線、後者は k が 1 に十分近いとき $\|\dot{\theta}\|$ 軸のごく近傍の狭い領域となり、実際の制御性能への影響は小さい。

一方、式 (9) を実際に利用する際には、 r が異常に大きくなるのを防ぐために、適当な正定数 q を用いて以下の条件も加える。

$$\text{分母} = \begin{cases} \|\dot{\beta}\| + \|\dot{\theta}\|, & (\|\dot{\beta}\| + \|\dot{\theta}\| > q) \\ q, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

3.3 ダンピング方式の検討

さて前項の結果のうち、 r ではなく、例えば K_d や K_c を可変としても同様の制御則を作ることができる。以下では、それらの制振性能について比較した結果について述べる。

Table 1 Examined sets of damping factors in the simulation

No.	incorporated	variable
1	K_d	—
2	K_d, K_c, r	K_d
3	K_d, K_c	K_c
4	K_d, K_c, r	K_c
5	K_d, r	r
6	K_d, K_c, r	r

検討した組み合わせのうち、代表的な 6 パターンを **Table 1** に示す。これらのすべてにおいて、システムを大域的に漸近安定化できる。特にパターン 1 は、3.1 項の式 (4) を用いた場合であり、式 (7) で導入したダンピング項の効果を見るために取り上げてある。このうち、どの組み合わせがアームのとり得る様々な姿勢に対して高い収束性を示し、制振に有効かについて数値シミュレーションを通して検討した。シミュレーションに使用したマニピュレータのモデルは、**Fig. 3** に示すような空間 3 自由度のシリアルリンク型である。図では便宜上各リンクが段差を持って取り付けられているように書かれているが、実際には同一平面上に配置されている。使用した物理パラメータを **Table 2** に示す。

シミュレーションの方法は、以下の通りである。

- アームの全動作空間を 5,000 等分し、その中心点のランダムな組を始点および終点として与える。分割した 1 区画

Fig. 3 Schematic manipulator model for the simulation

Table 2 Physical parameters of the manipulator model for the simulation

Parameter	Link 0	Link 1	Link 2	unit
Length l_i	0.05	0.25	0.25	[m]
Mass m_i	0.6	0.7	0.7	[kg]
Stiffness k_i	9	9	9	[Nm/rad]

Fig. 4 Number of under-damped case

あたりの体積はおよそ $1.05 \times 10^{-4} [\text{m}^3]$ となり、1 辺が約 47 [mm] の立方体に相当する。

- 与えられた始点・終点を関節空間で時間の 3 次補間をして軌道を作り、それに沿って自由空間内で動かす。このとき各関節の角速度が $\pi/2 [\text{rad/s}]$ を超えないように軌道計画を行う。
- 目標位置を中心とした半径 2 [mm] の球内に、手先が目標時間から 3 [s] 以上経っても収束しない場合を制振不十分として、その個数をカウントする。

なお **Table 2** 中 Link 2 の質量は、手先に 200 [g] の重り（リンク単体質量の 40%）を取りつけた状態で与えてある。これは実際の応用を考慮して、手先に何らかの物体を把持した状態を模擬し、より振動しやすい条件とするためである。これを、**Table 1** に示す 6 パターンについて行った。結果を、**Fig. 4** に示す。さらに、**Table 2** に示す値を保存したまま、第 2 リンクの重心位置を、第 2 リンクの中心に近い場合と手先に近くより振動しやすい場合の二通りについて行った。結果を、**Fig. 4** に併せて示す。

この図から明らかなように、マニピュレータの取り得る様々な姿勢に対して最もよい収束性を示しているのは、パターン 6 のダンピング係数 K_d , K_c , r の三つを用い r を可変とする場合であることが分かる。

4. 柔軟関節機構

4.1 リンク部の柔軟関節機構

関節の柔軟性は、**Fig. 5** に示すように、台形梁を片持ちして作り出している。関節軸付近の色の濃い部分は、梁を軸に取りつけるための金具を装着する部分であり、ばねとしては機能しない。また、最大幅を小さく抑えながら必要なばね定数を得るために、間にスペーサを挟んで 2 枚重ねて用いている。各関節に用いたばねの設計仕様は **Table 3** に示す通りである。ばねはすべての関節で同じ物を用いている。

リンク部の駆動は、まずモータにより関節軸が回転し、それによりばねが撓む。ばね先とリンクとはスライダで接続されているので、それを通して力がリンクへ伝達されるという仕組みになっている。

また、スライダによりばねの有効長を変化させることで関節剛性値を変更できるようにしてある。有効長 l と関節剛性値

Table 3 Spring specification

item	specification	unit
material	Be-Cu alloy C1720-H	—
shape	trapezoidal beam	—
stiffness coefficient E	118	[GPa]
thickness h	1.2	[mm]
maximum width b_0	21	[mm]
minimum width b_1	2	[mm]
length L	190	[mm]
offset length (link only) L_0	10	[mm]
guide length (base only) L_1	102	[mm]

Fig. 5 Flexible joint mechanisms of links except for base

$K(l)$ の理論的關係は、

$$K(l) = 2 \cdot \frac{b_0 E h^3 (l + L_0)^2}{12 \alpha(l)} \quad (14)$$

で与えられる。ただし E は弾性係数であり、 $\gamma = b/b_0$ として

$$\alpha(l) = \frac{l^3}{(1-\gamma)^3} \left\{ \frac{1}{2} - 2\gamma + \gamma^2 \left(\frac{3}{2} - \ln \gamma \right) \right\} \quad (15)$$

である。

4.2 ベース部の柔軟関節機構

ベース部も同様に台形梁を片持ちして用いることで、柔軟性を作り出している。Fig. 6 にその概略を示す。駆動原理は、リンク部とは多少異なっている。まずモータによってスプリングボックスが回転する。スライダとスプリングボックスとは固定されているので、ばねが撓む。その撓みによる力がガイドに伝達され、それによって z 軸周りの回転を生み出す仕組みになっている。

ベース部のばねもリンク部と同様に、スライダによりその有効長を変化させることができる。これにより Fig. 6 中の $\delta\phi$ に対するばね定数を変化させることができる。ただしリンク部とは駆動原理が違うため、同じばねを使用しているもののばね定数は異なっている。ベース部に関して、ばねの有効長 l と関節剛性値 $K(l)$ との理論的關係は、

$$K(l) = 2 \cdot \frac{b_0 E h^3 L_1^2}{12 \alpha(l)} \quad (16)$$

Fig. 6 Flexible joint mechanisms of base

で与えられる。ただし、 $\gamma = b/b_0$ として

$$\alpha(l) = -\frac{l^3}{(1-\gamma)^3} \left\{ \ln \gamma + \frac{3}{2} - 2\gamma + \frac{\gamma^2}{2} \right\} \quad (17)$$

である。

4.3 関節剛性値の理論値と実測値

各関節の剛性値をキャリブレーションした結果を以下に示す。実験により得られた各ばねの有効長 l に対する関節剛性値 $K(l)$ を、Marquardt-Levenberg アルゴリズムによる非線形最小 2 乗推定を用いて求めると、

$$K(l) = \begin{cases} 1.802 \cdot \frac{(l + 0.01325)^2}{l^3} & (\text{link}) \\ 0.01801 \cdot l^{-3} - 0.3155 \cdot l^{-1} & (\text{base}) \end{cases} \quad (18)$$

なる実験式を得る。式 (14) および式 (16) から得られた理論値、実測値および式 (18) をプロットしたものを Fig. 7 に示す。

結果から明らかなように、理論値と実測値はおおむね一致している。不一致部分は、寸法誤差等によるものと考えられる。以下、各関節のばねの有効長と関節剛性値の關係は、実測値から求めた式 (18) を用いることとする。

(a) Link

(b) Base

Fig. 7 Stiffness calibration

5. 実験による検証

5.1 実験機の構成

製作した実験機は、Fig. 8 に示したような 3 自由度マニピュレータである。各関節部には 4 章で述べた柔軟関節機構が組み込まれている。実機の主な仕様を Table 4 に示す。各関節の減速器は、機械的上限速度を抑えるために高い減速比で設計されており、non-backdrivable とみなせるものである。なお、機械的上限速度の設計値は、定格負荷時に各関節とも約 $\pi/2$ [rad/s] となるようにした。

ベース部と第 1 リンクは DC サーボモータ (Maxon 2326.948-12.216-200, 定格出力 6 [W]) と遊星歯車、かさ歯車、平歯車から構成されている。また第 2 リンクは、それらに加えてベルト・プーリユニットを用いている。これは、リンクの重心を先端からできるだけ離すためである。また各関節部には、リンクおよび減速器出力軸の角度を測定するために、それぞれ二つずつエンコーダ (Nemicon OME-500-2MCA, 分解能 500P/R)

Fig. 8 Manufactured manipulator

Table 4 Physical parameters of the manufactured manipulator

Parameter		value	unit
Mass	base m_0	0.945	[kg]
	1st link m_1	1.128	[kg]
	2nd link m_2	0.200	[kg]
Gear Ratio	base	379.43	—
	1st link	379.43	—
	2nd link	379.74	—

が取り付けられている。

実験機の制御システムを Fig. 9 に示す。Main Processor Board には INMOS IMST805 32-bit Transputer が搭載されている。またこのボードには Universal Pulse Processor (UPP) を 2 個装着し、2 相エンコーダ 6 個、PWM2ch 駆動のモータ 3 個の入出力を行っている。Motor Driver には HI-TACHI POWER MOS FET (4A12) を使用し、各 DC モータを PWM 制御している。サンプリング周期は 2.5 [ms] である。

5.2 実験方法

製作した実験機により、式 (7) および式 (9)~(13) で示した制御則の有効性を検証した。

実験機に与える軌道は、リンク 2 の先端が始点 (0.1, 0.0, 0.2) [m] および終点 (0.35, 0.1, 0.1) [m] を通るよう

Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup

Table 5 Settings of stiffness for the experiments

Setting	Length l [mm]	Stiffness [Nm/rad]
Soft	base	115
	1st joint	188
	2nd joint	188
Hard	base	60
	1st joint	40
	2nd joint	40

に、またそれら両端点において先端速度がゼロとなるように関節空間内で時間の3次補間をして作成し、それに沿って自由空間で動かした。座標系は、Fig. 3 および Fig. 8 に示したように、実験機に向かって前後方向が x 軸、左右方向が y 軸、上下方向が z 軸となるように設定してある。さらに、第2リンクの先端に 0.4 [kg] の負荷を取りつけ、より振動しやすい条件とした。なおこの変更は、制御則の $G(\theta_d)$ の項に反映してある。

実験は、ダンピング項の効果を比較するために、Table 1 の No.1 および No.6 について行った。このときゲインは、実験を通してよいものを選ぶこととし、No.1 の場合は $K_p = 160$, $K_d = 22$, No.6 の場合は $K_p = 150$, $K_d = 40$, $K_c = 12$ とした。さらに、関節剛性値の影響をみるために、Table 5 の条件についても組み合わせて行った。また式 (9) 中の k は、様々な条件下での数値シミュレーションの結果から

$$k = \begin{cases} 0.99, & (K_d \|\dot{\beta}\| > K_c \|\dot{\theta}\|) \\ 1.01, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (19)$$

とし、併せて $p = 10$, $q = 0.001$ と選んである。

5.3 実験結果

関節剛性を最も柔らかくして行った実験の結果を、Fig. 10 に示す。図では、第2リンク先端の z 軸方向の位置のみ示してある。図から明らかなように、式 (7) および式 (9)~(13) で与えられる制御則は、応答速度がダンピングによって若干遅くなるものの、目標値付近での振動を抑えるために有効であることが分かる。なお、目標値付近での残偏差は、重力項のモデル化誤差や各軸の摩擦、各軸が完全には non-backdrivable となっていないことなどによるものである。この偏差に対するオンライン補正に関しては、別報にて報告する予定である。

Fig. 10 Experimental result (measured tip motion) with soft setting of stiffness

Fig. 11 Experimental result (measured tip motion) with hard setting of stiffness

一方、関節剛性を最も強くして行った実験の結果を、Fig. 11 に示す。同様に、安定して振動がよく抑えられていることが分かる。ただしこの場合には、ダンピング項がなくても、およそ満足できる制振が行われている。なお、関節剛性値が高くなったことにより、各関節の固有振動数が高くなっている。サーボ系のサンプリング時間は、関節剛性を堅くした場合の固有周波数を基準に決定する必要があることを注意しておく。

さらに、関節剛性を最も柔らかくして、第2リンクの先端に未知の負荷(質量 0.4 [kg])を取りつけた場合の結果を Fig. 12 に示す。このとき制御系は先端質量を 0.1 [kg] と仮定して組んである。ただしこの場合、上で述べた軌道を使うと、関節の撓みの関係から先端を実験機の可動範囲内で動かすことができなかったため、始点を (0.2, 0.0, 0.2) [m]、終点を (0.4, 0.1, 0.0) [m] と変更してある。目標値付近での残偏差は下向きに増加してい

Fig. 12 Experimental result (measured tip motion) with soft setting of stiffness and unknown tip load

るものの、振動はよく抑えられていることが分かる。先端負荷が様々に変化するような使用法を考えた場合、それらに対するロバスト性は重要な要素であり、この点に関しても良好な性能を有していることが分かる。

6. 結 論

本報告では、人間のいる環境下で用いるマニピュレータについて、衝突および接触を前提とした安全性の確立が必要であり、そのような安全性を実現するには、人間を含めた外部環境とマニピュレータとの間に働く相互作用力を緩和する必要があることを指摘した。結果として、高い減速比をもつ減速器（通常の場合 non-backdrivable となる）を用いること、また各関節は柔軟構造を有することが有効であるとの観点から、そのような機構を用いた場合に問題となる振動を、効果的に抑制するための制御法について理論的および解析的に検討を行った。

その結果、PD フィードバック制御を基礎におく場合、一種のスライディングモード制御を行うことで、有効に制振を行え

ることを示し、いくつかの条件について、数値シミュレーションを通して考察した。そして、製作した実機により、提案した手法の有効性を検証した。

本文中でも述べたが、重力項のモデル化誤差や各軸が完全には non-backdrivable となっていないことなどに起因する目標値付近での残偏差を抑える方法等については、別に報告したい。

最後に、本研究の実験機を作るに当たり、本学工学部試作センター第二分室の八重樫浩一技官ならびに川端鋭雄技官には、大変なご苦勞をお掛けしました。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 中野栄二, 高橋隆行, 王志東, 大久保宏樹: “メッセンジャロボットの開発とその機能”, 第3回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp.145-148, 1998.
- [2] 中野栄二: “高齢障害者支援ロボットに対するパブリックアクセプタンスについて”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp.618-621, 1993.
- [3] 加藤一郎: “リリスロボット—生活支援ロボット—の構想”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp.614-617, 1993.
- [4] 村山泰, 高橋隆行, 王志東, 中野栄二: “Non-Backdrivable なギアトレインをもつ柔軟関節マニピュレータの振動抑制制御”, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.855-856, 1998.
- [5] Piero Velletri, 中野栄二: “拘束付き作業におけるロボットマニピュレータの受動的コンプライアンスの有効性の検証”, 第158回計測自動制御学会東北支部研究集会資料, no.158, vol.7, 1995.
- [6] M.W. Spong: “Modeling and Control of Elastic Joint Robots,” J. of Dynamic Sys., Meas., and Control, vol.109, pp.310-319, 1987.
- [7] P. Tomei: “A Simple PD Controller for Robots with Elastic Joints,” IEEE Trans. on Automatic Control, vol.36, no.10, pp.1208-1213, 1991.
- [8] J.S. Yu, R. Hu and P.C. üller: “An Approach to Adaptive Decentralized Control of Flexible Joint Robots,” IEEE Int. Conf. on IROS '93, pp.8-13, 1993.
- [9] L. Tian and A.A. Goldbenberg: “Robust Adaptive Control of Flexible Joint Robots with Joint Torque Feedback,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1229-1234, 1995.
- [10] T. Morita and S. Sugano: “Development and Evaluation of Seven-D.O.F. MIA ARM,” Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.462-467, 1997.
- [11] 杉江俊治: “リアプノフの方法に基づく非線形系のロバスト制御—ロボットの軌道制御を中心に—”, 計測と制御, vol.30, no.8, pp.663-668, 1991.

高橋隆行 (Takayuki Takahashi)

1961年11月1日生。1987年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了, 同年4月同大学工学部助手, 1993年より同大学情報科学研究科講師, 現在に至る。博士(工学)。非線形機械の制御, 移動ロボットなどの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

王 志東 (Zhi-Dong Wang)

1965年10月24日生。1995年東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士後期課程修了, 同年4月同大学情報科学研究科助手, 1998年より同大学情報科学研究科講師, 現在に至る。博士(工学)。複数移動ロボットの協調, 自律移動ロボットなどの研究に従事。日本機械学会, IEEEの会員。

(日本ロボット学会正会員)

村山 泰 (Yasushi Murayama)

1974年7月5日生。1997年東北大学工学部機械知能工学科卒業。1999年, 東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年, トヨタ自動車(株)入社。現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)

中野栄二 (Eiji Nakano)

1942年3月24日生。1970年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。1987年東北大学工学部教授。1993年東北大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。この間, 1976年から1977年米国スタンフォード大学人工知能研究所客員研究員。不整地移動ロボット, マルチロボット, メッセンジャロボット等の研究開発に従事。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)