

弾性要素を用いた小型ロボットフィンガの角度制御

A Joint Angle Control of Micro Robot Finger with Elastic Element

非 小河原洋一（慶應大） 非 川戸祐介（慶應大）  
 正 前野隆司（慶應大） 正 竹村研冶郎（慶應大）

\*Yoichi OGAHARA, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku, Kanagawa  
 Yusuke KAWATA, Keio University Takashi MAENO, Keio University  
 Kenjiro TAKAMURA, Keio University

**Abstract** : This paper proposes the method to control joint angles of the robot finger whose joints consist of elastic element with wire driving. For non-linear characteristic of elastic element, we adopted the feedforward controller with Neural Network or with an equation derived from a model of the finger to control joint angles of a 3 DOF finger on the experiment.

**Key Words** : Robot Hand, Elastic Element, Non-linear, Joint Angle Control, Neural Network

1. はじめに

近年、微小対象物を数  $\mu\text{m}$  ~ 数  $\text{mm}$  オーダで操作するマスタ・スレーブシステムが開発されている<sup>[1]</sup>。エンドエフェクタは、自由度の小さいグリッパであり、作業目的に特化した操作しか行うことができなかった。しかし、マイクロマシン技術や高度医療技術の発展に伴い、様々な微細作業のニーズが高まっており、多種多様な操作を行うことのできるエンドエフェクタの開発が期待されている。このため、著者らは、微細かつ複雑な操作を実現するために、新しい機構を用いた小型5指スレーブハンドの開発を行った<sup>[2]</sup>。本ハンドにおいて、フィンガの関節に弾性要素が用いられており、フィンガはワイヤにより駆動される。関節角度とフィンガが静力学的に釣り合うために必要なワイヤ張力は非線形な関係にあり、また、弾性要素が非線形性を示すため、制御法の開発が不可欠である。このため、本研究ではハンドの基本機構となる3自由度フィンガを対象に、フィードフォワード補償(以下FF補償)を用いた制御法とニューラルネットワーク(以下NN)を用いた制御法を提案する。FF補償を用いた制御法では、フィンガ関節の弾性要素を線形ねじりばねで近似している。NNを用いた制御法では、非線形な弾性要素の近似は行わない。そして、実際にフィンガ関節の角度制御を行うことを目的とする。

2. 釣り合い方程式と運動方程式の導出

図1に本研究で対象とするフィンガのモデルを示す。関節角度を  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)^T$ 、ワイヤ張力を  $\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3)^T$  とした。まず、静力学的な釣り合い方程式

$$\mathbf{t} = -\mathbf{t}_f(\mathbf{q}) \tag{1}$$

を導出した。ここで、 $\mathbf{t} \in R^{3 \times 1}$  は弾性要素の復元トルク、 $\mathbf{t}_f(\mathbf{q}) = (t_{f1}, t_{f2}, t_{f3})^T$  は張力  $\mathbf{f}$  によって生じる関節回りのトルクである。 $\mathbf{t}_f(\mathbf{q})$  は仮想仕事の原理を用いて、

$$\mathbf{t}_f(\mathbf{q}) = \mathbf{G}(\mathbf{q})\mathbf{f} \tag{2}$$

と表わせる。ただし、 $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in R^{3 \times 3}$  である。式(1)、(2)からフィンガが静力学的に釣り合うために必要なワイヤ張力  $\mathbf{f}$  は、

$$\mathbf{f} = -\mathbf{G}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{t} \tag{3}$$

と表わされる。式(3)から関節角度とフィンガが静力学的に釣り合うために必要なワイヤ張力は非線形な関係であることが示された。次に、フィンガの関節をばね・ダンパモデルにモデル化する。関節の弾性要素を線形ねじりばねで近似し、ラグランジュの運動方程式

$$\mathbf{I}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\Delta\mathbf{q} + \mathbf{q}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = -\mathbf{t}_f(\mathbf{q}) \tag{4}$$

を導出した。ここで、 $\mathbf{I}(\mathbf{q}) \in R^{3 \times 3}$  は慣性行列、 $\mathbf{C} \in R^{3 \times 3}$  は粘性行列、 $\mathbf{K} \in R^{3 \times 3}$  は剛性行列、 $\mathbf{q}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \in R^{3 \times 3}$  は非線形項である。ここで  $\mathbf{q}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$  には摩擦力及び重力によるトルクを含んでいる。

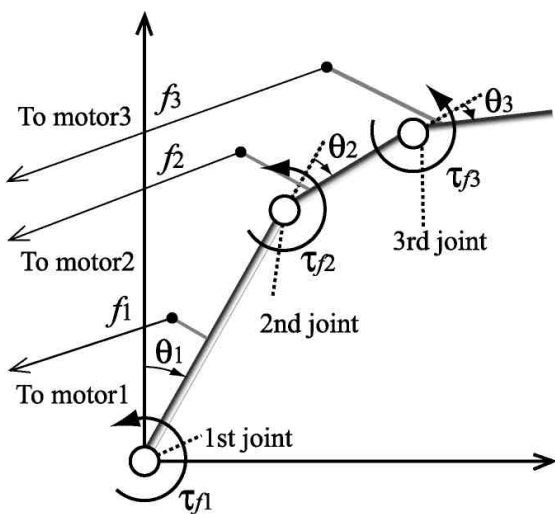


Fig.1 Model of finger with elastic element

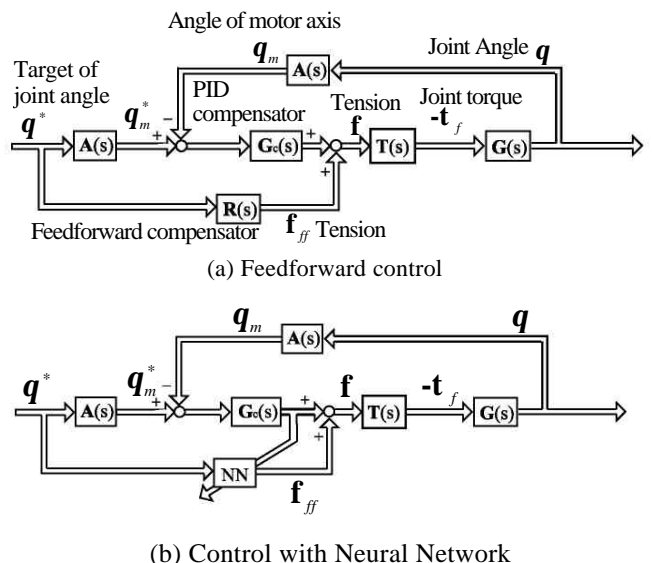


Fig.2 Block diagrams of control method

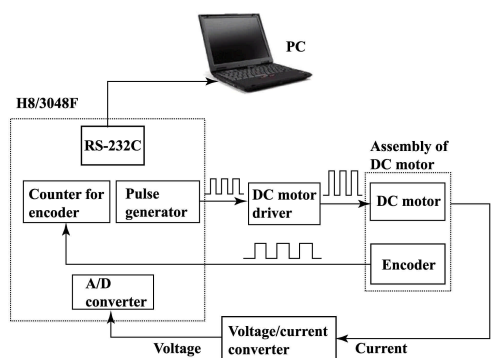
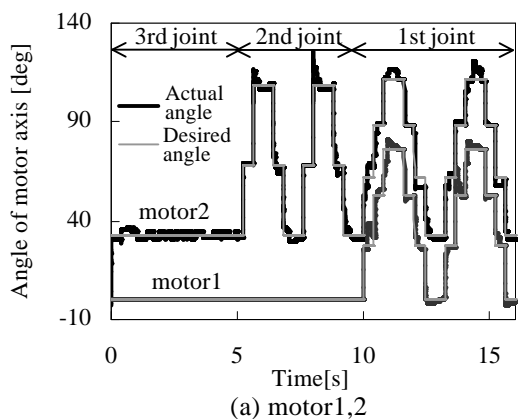
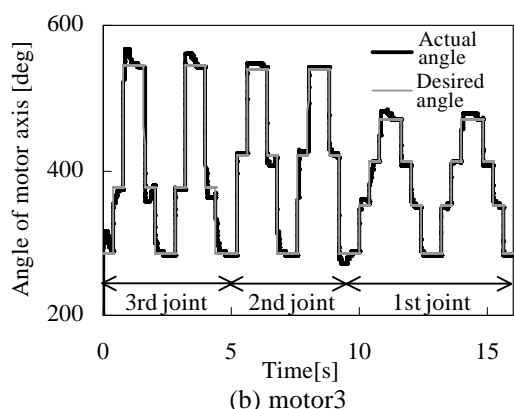


Fig.3 Control system of the experiment



(a) motor1,2

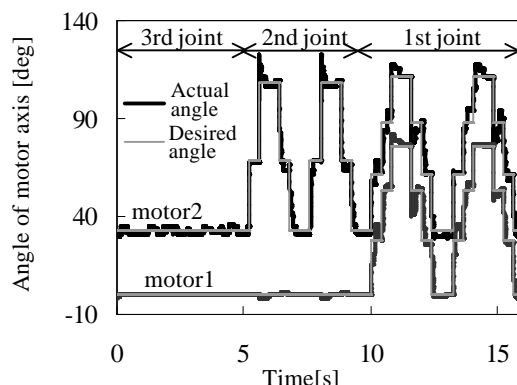


(b) motor3

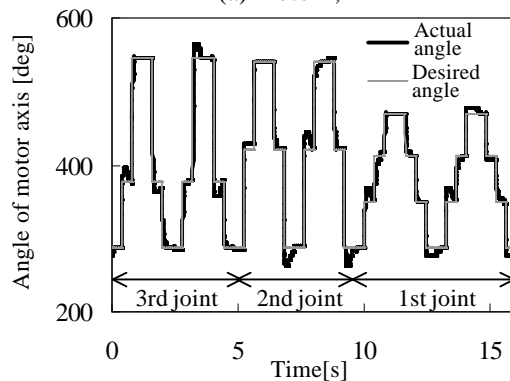
Fig.4 Angle trajectories of motor axis during feedforward control

### 3. 制御手法

フィンガの角度制御法として、図2に示す制御法を提案する。A(s)はフィンガの関節角度をモータ軸の回転角度に変換する伝達関数、 $G_c(s)$ はPID制御器の伝達関数、R(s)はFF補償器の伝達関数、T(s)はワイヤ張力からワイヤ張力によって生じる関節トルクに変換する伝達関数、G(s)はフィンガの伝達関数である。図2(a)では、PID制御器から求められる張力に加え、フィンガが静力学的に釣り合うために必要な張力をフィードフォワード制御。この際、FF補償器R(s)において、フィンガの弾性要素を線形ねじりばねで近似したモデルを用いて、式(3)の計算を行う。後に示すように、実際のフィンガでは、各関節にねじりばねとヒンジを用いているので、弾性要素の非線形性を考慮しなければならない。そのため、FF補償を用いた制御では、モデル化誤差が生じ、制御性が悪い可能性がある。このため、FF補償器R(s)に換わり、NNを用いた制御も試みる。NNを用いた制御のブロック線図を図2(b)に示す。NNは入力層、中間層、出力層から成る階層型であり、入力は関節角度の3要素、出力はワイヤ張力の3要素とする。NNはフィンガの静力



(a) motor1,2



(b) motor3

Fig.5 Angle trajectories of motor axis during control with Neural Network

学的な釣り合いのみを補償するために用いる。よって、NNはフィンガの過渡応答に関係なく、定常状態において、PID制御器からの出力を誤差信号として、フィードバック誤差学習を行う。

### 4. 制御実験

FF補償を用いた制御法とNNを用いた制御法により、フィンガの角度制御実験を行った。実験に用いたフィンガの弾性要素は線形ねじりばねとヒンジで構成される。制御実験に用いたシステムの構成図を図3に示す。アクチュエータとしてはDCモータを、回転角度の計測にはエンコーダを用いた。モータのトルクはモータに流れる電流を計測し、トルク定数を乗じて求めた。なお、制御器としては日立製のマイクロコンピュータH8/300Hを用いた。モータドライバとしては東芝製のTA8440Hを用い、PWM制御を行った。本実験では、フィンガの各関節を独立に駆動した。図4および図5にFF補償およびNNを用い、ステップ状に変化する目標値への追従制御の結果をそれぞれ示す。ただし、両者ともPID制御器の各ゲインは同じとした。いずれも、目標値にある程度追従しており、本研究の範囲では、両制御法とも有効であることが分かった。

### 5. 結論

関節部に弾性要素を用いた3自由度フィンガの角度制御法として、FF補償を用いた制御及びNNを用いた制御法を適用し、関節の角度制御を行った。その結果、両制御法の有効性を確認した。

### 6. 参考文献

- [1]G.S.Guthart and J.K.Salisbury,Jr.: The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application, Proc.IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation, 2000,618-621
- [2]川戸祐介：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集,2003.掲載予定