

ステップモータによる力制御の実現と ロボットフィンガへの応用*

張 勤** 神谷好承*** 関 啓明*** 疋津正利*** 野村久直†

Force Control for Robotic Fingers Driven by Stepping Motor

Qin ZHANG, Yoshitsugu KAMIYA, Hiroaki SEKI, Masatoshi HIKIZU and Hisanao NOMURA

This paper describes details of a set of robotic fingers driven by stepping motors. Robotic fingers need position, velocity and force control realized by stepping motor. New control system proposed in this study contains a generating system of real-time pulse series for driving stepping motor in the control loop. So, real-time sensor feedback can be achieved in the controlling stepping motor. When the robotic fingers complete a work as an operation, velocity controlled robotic fingers must change to the another control mode such as position or force control. This study treats a method how to provide force control to a robotic finger, and shows a method how to supply a sensor feedback to a stepping motor. It is found that a force controlled robotic finger shows a good performance of parts handling.

Key words: force control, robotic finger, stepping motor, sensor feedback

1. はじめに

ステップモータはモータ軸の回転角度等を検出する必要のないアクチュエータ¹⁾であり、また負荷を駆動するのに必ずしも減速器を必要としないほどの駆動トルクと同時に保持トルクも有している。このため軽量かつコンパクト化が要求されるロボットフィンガ用アクチュエータとして非常に適しているように思われる。これに対してセンサフィードバックのような制御をステップモータにおいても可能にしてくれる手法はこれまであまり広く利用されてきていなく^{2)~4)}、ステップモータの利用は位置決め用に限られていた。これより本研究では通常のサーボモータのように、ステップモータにも力制御のようなセンサフィードバックを可能にする制御手法を提案するとともに、その応用例として2本の指を持つロボットフィンガによる把持物体のハンドリング事例に基づきステップモータを用いたセンサフィードバック系の制御性能を評価する。

2. ロボットフィンガのシステム構成

実験に使用した2本指を持つロボットフィンガを図1に示す。両フィンガはそれぞれ独立した2つのステップモータにより駆動される。ステップモータにより駆動されるロボットフィンガは位置、速度あるいは力制御といった各制御モードを作業に応じて切り替えてその目的を達することになる。本システムは両フィンガ部に貼り付けられたひずみゲージによりフィンガへの作用力や押付け力を検出してフィードバックする、いわゆるセンサフィードバック系を構成している。本システムではステップモータ自身のコンプライアンスに比べフィンガ部に十分大きなコンプライアンスを持たせ、ステップモータの位置制御による押付け量の大きさにより力制御を実現させる。またステップモータは脱調しない自起動周波数内の運動を与えることを条件とする。

2.1 ロボットフィンガの位置制御系

ステップモータにより駆動されるロボットフィンガの位置制御系を図2に示す。ステップモータを用いた通常の制御では、モータ軸の所望の回転量を得るために、パルス列をオフラインで準備しておき、そうしたパルス列をモータドライバへ与えることによりモータを駆動している⁵⁾。このためモータ軸の回転状況に応じたオンライン制御は困難である。これに対して本研究では図2(a)に示すようにモータ駆動のためのパルス列発生用のV-F変換器を制御ループ中に含めているため⁴⁾、フィンガの目標位置の変更に対してもオンラインでそれに応じたパルス列の生成が可能になる。またロボットフィンガに貼り付けられたひずみゲージの電圧値をオンラインでフィードバックできるためセンサフィードバック系を構成することが可能になってくる。なお、制御系内には電圧値のようなアナログ信号をパルス列に変換するためのV-F変換器を含んでいるためアナログ信号とパルス列のようなデジタル信号が同一制御系内に混在していることになる。またV-F変換器によって出力された総パルス数はパルスカウンタにより管理することによりV-F変換時に現れる誤差の累積を防止している。

アナログ信号をパルス列に変換するV-F変換器は信号の非線形な変換であるが、その機能を等価的に K_{vf} と置くことによりフィンガ (J : フィンガ部の慣性モーメント, k : フィンガ部

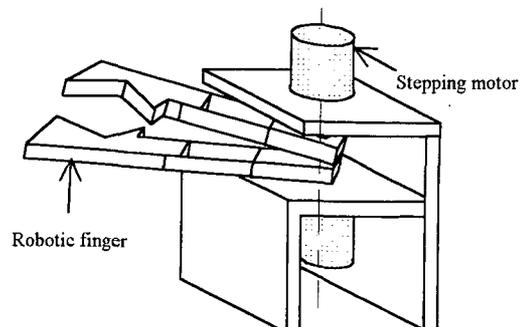


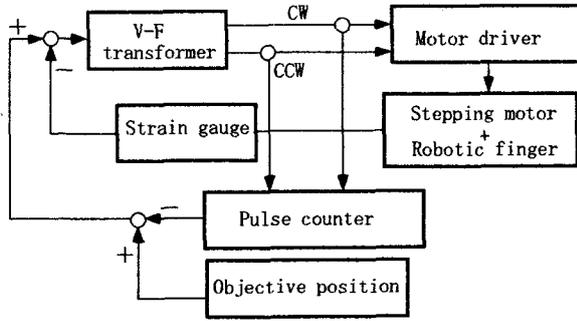
Fig.1 Robotic fingers driven by stepping motors

* 原稿受付 平成 11 年 11 月 26 日

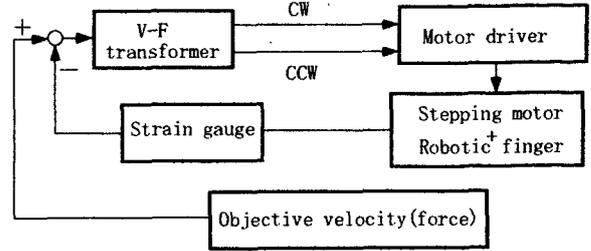
** 学生会員 金沢大学大学院 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 正会員 金沢大学工学部

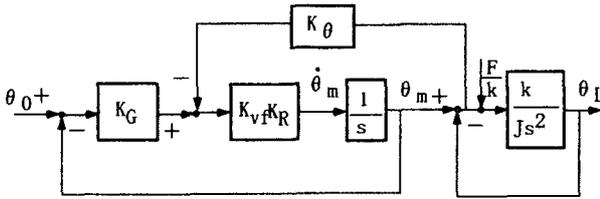
† 金沢大学工学部



CW: Clockwise
CCW: Counterclockwise
(a) Position control system

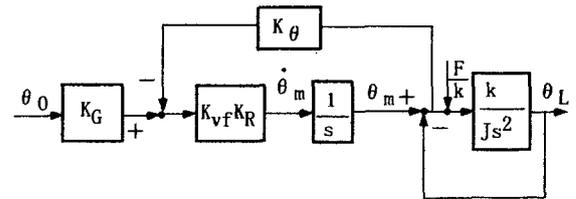


CW: Clockwise
CCW: Counterclockwise
(a) Velocity (force) control system



K_{vf} : V-F transformer
 K_R : $\pi/5000$ rad/pulse
 θ_L : Motion of robotic finger (rad)
 θ_m : Motion of stepping motor (rad)

(b) Block diagram of position control system



K_{vf} : V-F transformer
 K_R : $\pi/5000$ rad/pulse
 θ_L : Motion of robotic finger (rad)
 θ_m : Motion of stepping motor (rad)

(b) Block diagram of velocity (force) control system

Fig.2 Position control system of robotic finger

Fig.3 Velocity (force) control system of robotic finger

のばね定数)に貼り付けられたひずみゲージ電圧値をフィードバック (K_θ : フィードバック係数)する, 図2 (a) に示す位置制御系のブロック線図は同図 (b) のように表される. ここにステップモータは自起動周波数内の運動を考えているためステップモータは指令値通りに動いてくれることになる. このためステップモータにはほとんど運動の遅れを生じることなく, ロボットフィンガの動特性としては近似的にフィンガ部のみを扱えばよいことになる. これより K_{vf} が等価的に線形近似できる範囲においてはこの系の伝達関数は式(1)のように表すことができる.

$$\theta_L = \frac{kK_G K_{vf} K_R}{Js^3 + JK_{vf} K_R (K_G + K_\theta) s^2 + ks + kK_G K_{vf} K_R} \theta_0 + \frac{s + (K_G + K_\theta) K_{vf} K_R}{Js^3 + JK_{vf} K_R (K_G + K_\theta) s^2 + ks + kK_G K_{vf} K_R} F \quad (1)$$

この系は Hurwitz の安定判別法により次式を満たしていることが自明なため安定であることがわかる.

$$D_2 = K_\theta K_{vf} K_R \frac{k}{J} > 0 \quad (2)$$

式(1)よりフィンガの目標位置 θ_0 とフィンガに加えられる力 F とがフィンガの位置 θ_L に与える影響を定量的に評価できることがわかる. また式(2)より図2に示すフィンガの位置制御系においてはロボットフィンガに貼り付けられたひずみゲージの電圧値をフィードバック (K_θ) することがフィンガ部に振動抑制

効果を持たせていることもわかる.

2.2 ロボットフィンガの速度 (力) 制御系

本研究で用いるロボットフィンガの速度 (力) 制御系の構成を図3 (a) に示す. V-F 変換器より出力されたパルス列をパルスカウンタにより計数してフィードバックするループを除けばその基本的な制御系の構成はフィンガの位置制御系と同じである. 本速度制御系においてもモータ駆動のためのパルス列発生用の V-F 変換器を制御ループ中に含み, またフィンガに貼り付けられたひずみゲージの電圧値をフィードバックしている. 速度制御系と力制御系とはほとんど同じ制御系であり, 力制御系の方は速度制御系に比べひずみゲージ電圧値のフィードバックゲインを等価的に大きくしただけのものである. このため位置, 速度あるいは力制御といった各制御モードの切り替えは計算機中でのソフト的な条件分枝により非常に簡便に行うことができる.

図3 (a) に示す速度 (力) 制御系のブロック線図を同図(b) に示す. またこの速度 (力) 制御系の伝達関数は式(3)のように表すことができる.

$$s\theta_L = \frac{kK_G K_{vf} K_R}{Js^2 + JK_\theta K_{vf} K_R s + k} \theta_0 + \frac{s + K_\theta K_{vf} K_R}{Js^2 + JK_\theta K_{vf} K_R s + k} F \quad (3)$$

本研究で構成する速度 (力) 制御系は安定であり, フィンガに加えられる力 F とフィンガの位置 θ_L との関係を定量的に評価できると同時に, フィンガに貼り付けられたひずみゲージ電圧値のフィードバックがフィンガ部の振動抑制効果を示すこともわかる.

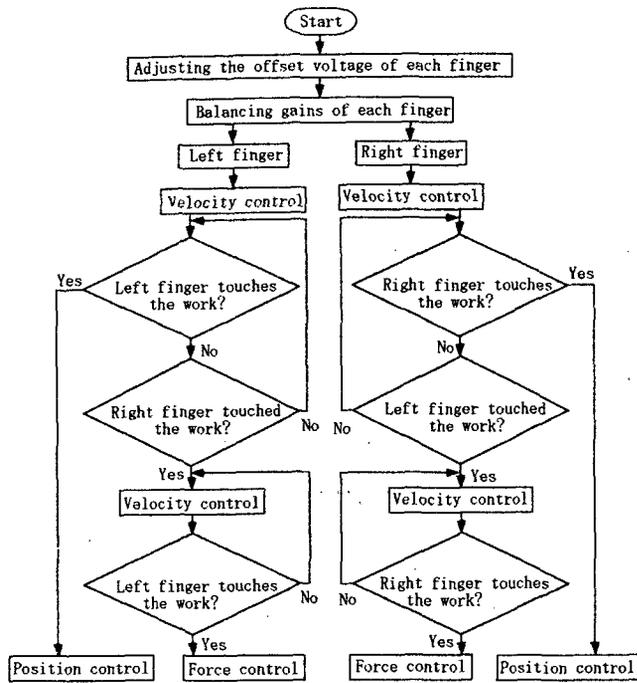


Fig.4 Control strategy for robotic fingers

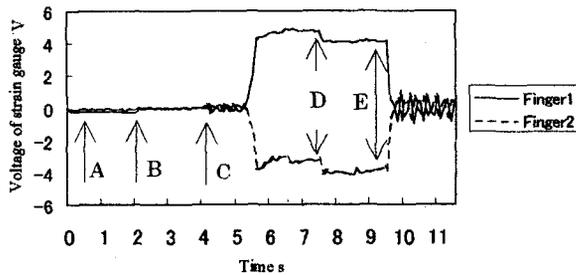
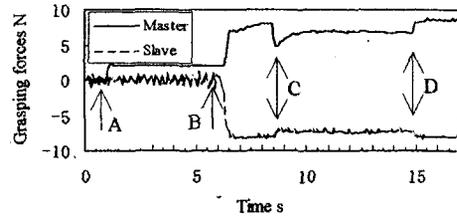


Fig.5 Adjusting initial conditions of robotic

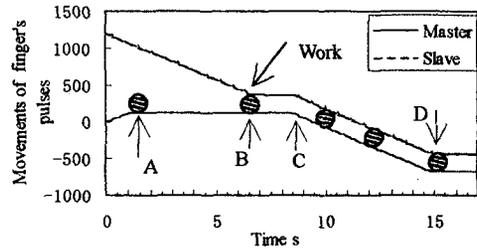
2.3 ロボットフィンガの制御システム

ロボットフィンガに要求する機能としてはまずワークを把持することであるが、ワークの把持において把持したいワークが両フィンガ間の中心に存在していない場合も考えられる。このためロボットフィンガとしては両フィンガ間の任意の位置に存在するワークであっても把持できる機能が求められる。またロボットフィンガのインテリジェント化のためにワークへの把持力だけでなくワークに外力である外乱力が作用した場合にもワークを落とさないようなロボットフィンガの柔軟な対応も望まれる。これらの動作はロボットフィンガの位置と速度と力制御を適当に切り替えることにより可能にし得るものであり、本研究では両フィンガ間の中心にないワークの把持と把持したワークに外乱力が作用する場合におけるロボットフィンガの挙動を中心として、センサフィードバックを構成したステップモータにより駆動されるロボットフィンガの制御性能を示すこととする。

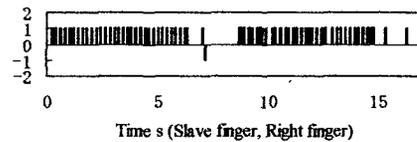
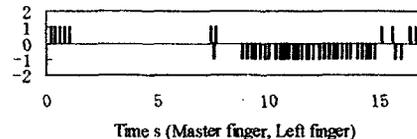
両フィンガ間の中心に置かれていないワークを把持するための両フィンガの制御フローを図4に示す。まずフィンガの速度制御により両フィンガを閉じる動作を開始する。次にどちらのフィンガが把持したいワークに触れたかを判断する。この判断はフィンガに貼り付けられたひずみゲージ電圧値があるレベルに達したかどうかで判断する。ワークに触れたフィンガはこれ以上の押付け力をワークに与えないようにするために制御モー



(a) Grasping force generated by robotic finger



(b) Position of each finger



(c) Pulse series generated by V-F transformer

Fig.6 Example of work handling

ドを速度から位置制御へ移す。いわゆるマスタ・スレーブ系⁶⁾におけるマスタ側を受け持たせることとする。その後ワークに触れたもう一方のフィンガにはスレーブ側を受け持たせる。スレーブ側のフィンガがワークに触れた後は制御モードを力制御へ移すことにする。ワークの目標とする位置への移動はマスタ側にその目標とする移動量を与えることで可能になる。この時スレーブ側のフィンガはマスタ側のフィンガの動きに追従して動いてくれることになるためワークには常に一定の把持力を与えた移動が可能となる。こうしたマスタ・スレーブ系を構成することにより、両フィンガ間の中心にないワークの把持と目的とする任意の力でワークが把持できることになる。

2.4 ロボットフィンガの初期調整

他方、ロボットフィンガとしては2本のフィンガの持つ特性のバランスも重要である。本研究では2本のフィンガに貼り付けられたひずみゲージ電圧値の0レベルの設定とひずみゲージ電圧値のゲイン調整をロボットフィンガの初期調整としてオンラインで行っている。

その一例を図5に示す。図5中でA-B区間が両ひずみゲージ電圧値のオフセットを示すものであり、B-C区間がオフセット除去後の各ひずみゲージ電圧値である。C-D区間は両フィンガに力制御を機能させ対向させている区間であり、お互いのフィンガには同じ作用力を発生させているにもかかわらずこの区間では異なる電圧値を示している。D-E区間はひずみゲージ電圧値のゲイン調整により2本のフィンガの持つ特性をバランスさせた状態である。実際にはこうした初期調整後にワークの把持及びハンドリングを行うことになる。

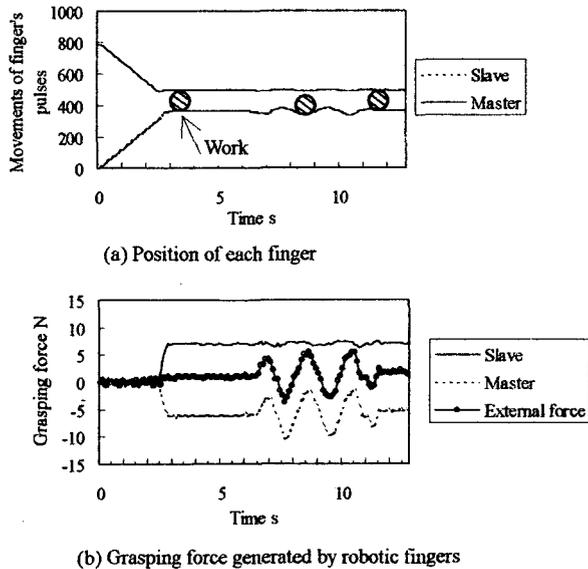


Fig.7 Motion of both fingers controlled by master-slave system

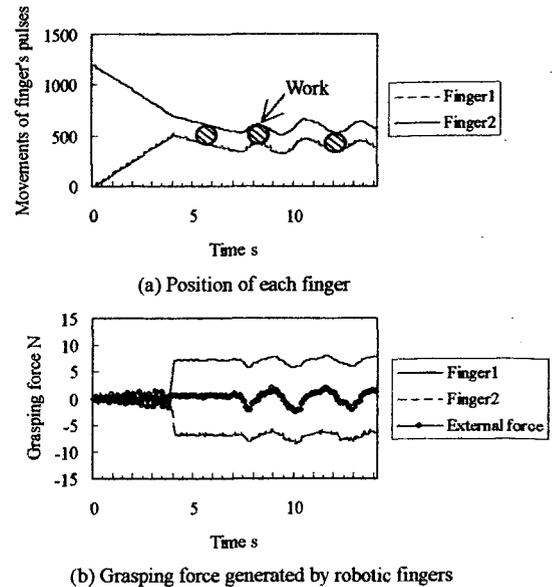


Fig.8 Motion of force controlled fingers

3. 物体の把持とハンドリング事例

3.1 両フィンガ間の中心に置かれていないワークの把持

把持したいワークが両フィンガ間の中心にない場合のワーク把持を試みた。この時の両フィンガが発生した力の様子を図6 (a)に、両フィンガの移動の様子を同図(b)に示す。速度制御により両フィンガは互いに閉じる方向へ移動し始め、A点において一方のフィンガがワークに触れたことを示している。ワークに触れたことはフィンガのワークへの押付け力が2Nに達したことで判断するようにしている。ワークに触れた方のフィンガはその後制御モードを位置制御に移し、ワークに触れたまま停止し、マスタ・スレーブ系におけるマスタ側を受け持つ。速度制御を続けているもう一方のフィンガはB点でワークに触れ、制御モードを力制御に移し、スレーブ側となる。B-C区間においては静止しているワークに目標とする把持力(7N)を与えたつもりであるが、図6 (a)に示すようにワークに与えている押付け力はマスタ側フィンガの方が小さくなっていることがわかる。この差は床上に置かれたワークに働くクーロン摩擦力によるものであるといえる。その後マスタ側に目標とする移動量を与え(図6中C~D)、その場で停止(図6中D点)させている。

図6 (a)より把持したワークを移動させているC~D区間ではワークへの把持力が低下している様子が伺える。こうした現象はマスタ・スレーブ系を構成したときに現れる現象であり、こうした現象の解析を式(3)を用いて示す。

ロボットフィンガがワークを把持したまま停止している時、すなわち $s\theta_L = 0$ の場合には、力制御しているロボットフィンガにおいて、その目標とするワーク把持力 ($k\theta_0$) とワークからフィンガが受ける力 F_0 との関係は式(3)より $s = 0$ とおくことにより

$$-F_0 = \frac{K_G}{K_\theta} k\theta_0 \quad (4)$$

のように与えられる。他方、ワークを把持したままフィンガが移動する時 ($s\theta_L \neq 0$) には目標とするワーク把持力 ($k\theta_0$) とワークからフィンガが受ける力 F との関係は同様に式(3)より

$$\begin{aligned} & -(s + K_\theta K_v K_R)F \\ & = K_G K_v K_R k\theta_0 - (Js^2 + JK_\theta K_v K_R s + k)s\theta_L \end{aligned} \quad (5)$$

のように与えられる。本実験のようにワークを比較的ゆっくり移動させる場合には上式は

$$-F = \frac{K_G}{K_\theta} k\theta_0 - \frac{k}{K_\theta K_v K_R} s\theta_L = -F_0 - \frac{k}{K_\theta K_v K_R} s\theta_L \quad (6)$$

のように近似できる。これよりマスタ側フィンガの正方向の回転運動、実験装置においてはスレーブ側フィンガを押付ける方向の運動についてはワークへの把持力が増大し、逆にマスタ側フィンガの負方向の回転運動、すなわちスレーブ側フィンガを引き離す方向の運動についてはワークへの把持力が減少することがわかる。本実験の場合にもスレーブ側フィンガを引き離す方向の運動であるためワーク把持力が減少している。また図6 (c)には両フィンガ駆動のためにV-F変換器より出力されたパルス列の様子を示す。

3.2 ワークに外力が作用した時のフィンガの挙動

把持したワークへの把持力は力制御により任意に設定できる。また両フィンガにより与えられるワークへの押付け力は方向が反対でその大きさが同じである。このため両フィンガを押付けている力の和はゼロとなる。これよりワークに対して把持力以外の外力が作用する場合には両フィンガが発生する力の和よりその外力を推定することが可能となる。こうした外力を推定することはワークに作用した外力の大きさの判断から例えばワークを手放すといったロボットフィンガの次の作業工程を組むときに必要となる。本研究ではロボットフィンガがマスタ・スレーブ系を構成してワークを把持している状態においてワークに外力を加えた時のロボットフィンガの挙動を実験した。その一例を図7に示す。ワークに外力を加えたとき力制御を機能させているスレーブ側フィンガはその外力の大きさにより移動するのに対して位置制御系を構成しているマスタ側フィンガはほと

んど動かないことが図7 (a) よりわかる。図7 (b) にはこの時の各フィンガが発生した力と、2本のフィンガがワークを押付けている力の和よりワークに加えられた外力の推定値を示す。スレーブ側フィンガがワークを押付けている力はほぼ一定であるにもかかわらず、マスタ側フィンガには外力とほぼ同じ大きさの力が加わっている様子がわかる。こうした性質より、マスタ・スレーブ系を構成したロボットフィンガにおいては把持力より大きな外力に対してワークとマスタ側フィンガとが離れてしまうこともあり得ることになる。

次に、両ロボットフィンガが共に力制御系を構成してワークを把持している状態において、ワークに外力を加えたときのロボットフィンガの挙動を実験した。この一例を図8に示す。図8 (a) に示すようにロボットフィンガが共に力制御系で構成されているためわずかな力であってもロボットフィンガはその力の方向によく動く系をつくりあげることができる。図8 (b) にはこの時の各フィンガが発生した力と2本のフィンガが発生した力の和より推定された外力の様子を示す。両フィンガ共に力制御系を構成しているため本来ならば2本のフィンガが発生している力の大きさはそれぞれの目標とする押付け力の大きさからあまり変化しないはずであるが、ステップモータの運動が外力の変化に追従しきれていないために2本のフィンガには把持力の変動が現れたものと思われる。両フィンガ共に力制御がうまく機能させられる場合には、ワークの位置決めは難しいが、外力が加わっても一定の把持力を与えることが可能なためワークと両フィンガとが離れてしまうことはないといえる。

4. 考 察

本研究で行った実験結果の定量性を実験条件に基づき評価する。本研究で用いたロボットフィンガ自身の固有振動数は約10Hzである ($k/J = (2\pi \times 10)^2 \text{ (rad/s)}^2$)。ステップモータとしては10000パルスで1回転するものを使用した。V-F変換のためのサンプリング周波数は250Hzとした。これよりステップモータの最高回転速度は $\pi/20 \text{ rad/s}$ となり、この時ロボットフィンガは約40秒間で1回転することになる。またロボットフィンガに貼り付けられたひずみゲージ電圧値のフィードバックゲインとして $K_p = 300 \text{ 1/rad}$ を与えた。ロボットフィンガの位置制御系においてはV-F変換器のしきい値⁴⁾として1を与え、速度制御系においては10、そして力制御系においてはこのしきい値を1としフィードバックゲインを10倍程度大きく与えている。これよりロボットフィンガの速度制御系においては $K_v K_R = \pi/200 \text{ rad/s}$ となり、位置と力制御系においては $K_p K_R = \pi/20 \text{ rad/s}$ となる。また、位置制御系において $K_c = 5000/\pi$ 、速度制御系では $K_c = 200/\pi$ 、力制御系では $K_c = 15/\pi$ 、として実験を行った。実験装置として用いたロボットフィンガに以上の諸量を式(1)、(3)で表した伝達関数に用いれば、式(1)における特性方程式は

$$(s + 297.1)s^2 + (2.0)(0.73)(57.61)s + (57.61)^2 = 0 \quad (7)$$

のようになり、また式(3)の速度制御系及び力制御系における特性方程式は

$$s^2 + (2.0)(0.0375)(62.8)s + (62.8)^2 = 0 \quad (8)$$

のようになる。式(7)より本研究で用いたロボットフィンガの位置制御系においてはその応答として約9.1Hzまで目標値通りの

応答を示してくれることが、またロボットフィンガの速度及び力制御系においては式(8)より約10Hzまで目標値通りの応答を示してくれることがわかる。これらの特性はロボットフィンガに外力が作用した場合にもフィンガの運動に同様の影響を与えることもわかる。ただしロボットフィンガの最高回転速度がV-F変換器のもつサンプリング周波数により与えられるため $\pi/20 \text{ rad/s}$ を上限界としている。図6、7に示されている実験結果はほぼ上記範囲内での実験であったためほぼ理想的な応答を示してくれているようであるが、図8に示されている結果においては力制御系を構成しているにもかかわらずワークに与える把持力が変化してしまっている。これは力制御によりステップモータに要求される回転角速度が大き過ぎてワークに作用する外力に対してフィンガの応答が追従できなかったことによるものであることがわかる。

5. 結 言

本研究ではステップモータのようにパルス列を与えることにより駆動するアクチュエータに対して力制御のようなセンサフィードバックを可能にする手法の提案を行い、その応用としてロボットフィンガによるワークのハンドリング事例を示した。この結果次のような結論を得た。

- (1) ステップモータのようなパルス列入力のアクチュエータに対して、V-F変換器を制御ループ中に含ませることにより、位置、速度、力制御のような制御系をほぼ同じ制御系の構成により実現可能にした。
- (2) ステップモータを用いて駆動されるロボットフィンガに対して位置、速度、力制御といった各制御モードを切り替えて用いることによりフレキシブルなワークのハンドリングを可能にした。
- (3) 本研究で提案した制御系は定量的評価が可能であり、それぞれのステップモータの性能に基づく制御系の設計が可能となる。

本研究で用いたロボットフィンガの最高回転速度はV-F変換器のサンプリング周波数により与えられるためより高速なサンプリングを用いればより高速なフィンガの運動が実現できるが、その上限はステップモータの脱調限界の回転数までである。

最後に本研究の一部は笹川科学研究助成によって行われたことを付記し、ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 大木 創：ステップモータの理論と応用，実教出版，(1979)。
- 2) 佐々木啓介，橋本豪之，対馬一憲：ステップモータを用いたスカルロボットの力制御，日本機械学会論文集，61，592，C (1995) 4674。
- 3) 橋本豪之，対馬一憲：柔軟関節軸を持つロボットのトルクフィードバック制御とフィードフォワード制御による軌道制御，日本機械学会論文集，63，614，C (1997) 3565。
- 4) 張 勤，神谷好承，関 啓明，正津正利：NC制御とセンサフィードバックとの融合，精密工学会誌，65，4 (1999) 559。
- 5) 池辺 潤：数値制御通論，オーム社，(1971)。
- 6) S. Dong and K.M. Jame: Position and Force Control of Two CRS A460 Robots Manipulating a Flexible Sheet: Theory and Experiment, ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control, 120 (Dec. 1998) 529。