学術論文

外乱オブザーバを用いた空気圧ロボットのインピーダンス制御

朴 最 圭^{*1} 則 次 俊 郎^{*2}

Impedance Control of Pneumatic Robot Manipulator Using Disturbance Observer

Jung-Gyu Park^{*1} and Toshiro Noritsugu^{*2}

In this paper, an impedance control system which uses together the inner torque control system with the disturbance observer is proposed for the pneumatic robot manipulator. It is assumed that the generated torque by a pneumatic actuator can be estimated from the pressure signals and the discharge volume. And we define that the disturbance torque includes the friction torque, load change and modeling error. At first in order to improve the control characteristics of pneumatic actuator driven by meter out method, we construct the inner torque control system by feeding back the generated torque. Secondly, to reduce the influence of the defined disturbance torque, we compose the impedance control systems with the disturbance observer which can estimate the defined disturbance torque based on the generated torque, the angular velocity and the reaction torque. In order to realize the robust impedance to the defined disturbance torque, we construct the torque based impedance control system which uses together the inner torque control system with the disturbance observer. The real command to the torque control system is generated from the impedance model and the positioning error. From some experiments, it is verified that the proposed impedance control system is effective to adjust the impedance of pneumatic robot manipulator.

Key Words: Impedance Control, Robust Control, Inner Torque Control System, Disturbance Observer, Pneumatic Robot

1. 結 言

ロボットを整備していない環境や位置、形状などが未知の対象物との接触作業に応用するためには、対象物に柔軟に接触できるマニピュレータが要求される。柔軟な接触動作を得るためには、マニピュレータの手先剛性を低下させることが必要であり、このための方法として、ハードウェアとソフトウェアによる手法が考えられる。ハードウェアによる低剛性マニピュレータには、高剛性アクチュエータと機械的なコンプライアンスを有するアームにより構成されるフレキシブルマニピュレータと低剛性アクチュエータと剛体アームにより構成される低剛性マニピュレータとが考えられる。フレキシブルマニピュレータの低剛性は衝突力などを緩和する役割を有するが、アームの低剛性に起因する手先の振動をいかにして抑制するかが問題である[1]~[3]。次に、低剛性のアクチュエータとして空気圧アクチュエータがある。空気圧の圧縮性による剛性の低下は、衝突力などの緩和には有効であるが、応答遅れが生じるとともに摩擦力や

負荷変動などの外乱の影響を受けやすくする。空気圧アクチュエータを用いたロボットマニピュレータでは、外乱の影響をいかにして低減するかが課題である。また、ソフトウェアによるマニピュレータ手先の低剛性化の手法としてはインピーダンス制御法がある[4]~[7]。

本研究では、本質的な柔軟性と任意に調整可能な柔軟性を兼ね備えたロボットマニピュレータの開発を目的として、空気圧ロボットのインピーダンス制御について検討する。空気の圧縮性による固有の柔らかさは人間等との親和性に優れ、空気圧ロボットは医療・福祉をはじめとする対人間作業用ソフトロボットとして期待されている。このような期待に応えるためには、当然、固有の柔らかさだけでは不十分であり、種々の作業要求に対応できる制御性能を確保しておく必要がある。従来、空気圧ロボットの制御性能の向上を目的とした研究がいくつか報告されているが、そのインピーダンス制御に関する研究は少ない。インピーダンス制御を実施するためには、空気圧アクチュエータの応答遅れや外乱に対する対策が必要である。このうちアクチュエータの応答遅れは内部トルク制御系を構成することにより低減できる。また、外乱の影響を低減するためには外乱オブザーバが有効である[8][9]。ここでも、同様に内部トルク制御系と外乱オブザーバを併用した制御系を構成する。ただし、イ

原稿受付 1996年5月20日

^{*1}韓国LG電子(株)生産技術センタ

^{*2}岡山大学工学部

^{*1}Manufacturing Technology Center, LG Electronics Inc., Korea

^{*2}Faculty of Engineering, Okayama University

Fig. 1 Pneumatic drive circuit

ンピーダンス制御の適用場面では、マニピュレータは対象物と接触および非接触の両状態に対応できることが望ましい。そこで、本研究では、接触・非接触の両状態に対応できる外乱オブザーバを構成する。

外乱オブザーバを用いたトルクベース形インピーダンス制御系の構成について述べた後、これを試作した空気圧ロボットに適用する。対象物への衝突過程を含む接触および非接触の連続動作を行い、空気圧ロボットにインピーダンス制御を実施することにより、空気圧システム固有の柔軟性に加え、ロボットの柔軟性を任意に設定できることを示す。

2. 制御系の構成

2.1 内部トルク制御系

Fig. 1 は本研究で用いたメータアウト方式による空気圧駆動回路のモデルを示す。ペーン型アクチュエータの一方のチャンバに一定圧力 P_s を供給し、他方のチャンバ内の圧縮空気を制御弁の開口面積を変化させることにより大気 P_A へ排出する。これにより、両チャンバに圧力差 P_L が生じて、マニピュレータが駆動される。ペーンが中央で停止している状態を基準状態として線形化したチャンバ内部の状態方程式は次式で表される。

$$(T_a s + 1)P_L(s) = K_a u(s) - K_a K_v \omega(s) \quad (1)$$

$$T(s) = D P_L(s) \quad (2)$$

ここで、 T_a 、 K_a 、 K_v と D は、それぞれ空気圧アクチュエータの時定数、制御入力 $u(s)$ を圧力 $P_L(s)$ の次元に変換する係数、角速度 $\omega(s)$ が圧力に与える影響を制御入力の次元に換算する係数およびアクチュエータの吐き出し容積であり、本研究では既知であると仮定する。 $T(s)$ は既知の吐き出し容積と圧力センサの情報によって求められる両チャンバの圧力差により推定される空気圧アクチュエータの理論的な発生トルクである。

アクチュエータの応答遅れを補償するため Fig. 2 のような内部トルク制御系を構成する [8][9]。

また、駆動部の運動方程式と対象物のモデルは次式で表される。

$$(J s + b) \omega(s) = T(s) - T_f(s) - T_L(s) \quad (3)$$

$$T_L(s) = K_e \theta(s) \quad (4)$$

J と b は慣性モーメントと粘性摩擦係数、 $T_f(s)$ は摩擦トルクであり、静止およびクーロン摩擦トルクを含む。 $\theta(s)$ は回転角の変化量を、 $T_L(s)$ はアームが対象物に接触した場合の反作用トルクを表す。 K_e は力センサの特性を含む対象物の等価剛性である。

Fig. 2 Inner torque control system

2.2 外乱オブザーバの構成

駆動部パラメータのノミナル値とその変化量を次式のように与える。

$$J = J_n + \Delta J, \quad b = b_n + \Delta b \quad (5)$$

ここで、添字 n はパラメータの同定により得られる各パラメータのノミナル値であり、 Δ 付はその変化量、もしくはモデル化誤差を表す。

式 (5) を式 (3) の左辺に代入し、既知の項と未知の項を分離して整理すれば、次式が得られる。

$$(J_n s + b_n) \omega(s) = T(s) - T_L(s) - T_{dis}(s) \quad (6)$$

$\omega(s)$ はロータリーエンコーダの情報を数値微分することにより、 $T(s)$ は式 (2) により、 $T_L(s)$ は力センサによって検出するものと考えれば、未知の項は $T_{dis}(s)$ のみである。これは次式で表され、本研究ではこれを外乱トルクと定義する。

$$T_{dis}(s) = T_f(s) + (\Delta J s + \Delta b) \omega(s) \quad (7)$$

式 (6) により、 $T_{dis}(s)$ を推定する外乱オブザーバは次式のように構成される。

$$T_{dis}(s) = T(s) - (J_n s + b_n) \omega(s) - T_L(s) \quad (8)$$

上式の右辺に Improper 項が含まれているので、この式を利用して外乱トルクを推定するためには、次式のように少なくとも 1 次以上のローパスフィルタ $H(s)$ の挿入が必要である。したがって、外乱トルクは次式のように $\hat{T}_{dis}(s)$ として推定される。

$$\hat{T}_{dis}(s) = H(s) T_{dis}(s) \quad (9)$$

この外乱オブザーバは、マニピュレータが対象物に接触しない場合、 $T_L(s) = 0$ であるため、アクチュエータの発生トルク $T(s)$ と角速度 $\omega(s)$ を入力として式 (7) で定義した外乱トルクをまとめて一つの外乱として推定するが、接触の場合、角速度は無視できるほど小さくなるため、アクチュエータの発生トルク $T(s)$ と反作用トルク $T_L(s)$ を入力として摩擦トルク $T_f(s)$ のみを推定できる特徴がある。

2.3 インピーダンス制御系

インピーダンス制御系は位置ベース形とトルクベース形に分類されるが[10]、本研究では、アクチュエータの特性を改善するため、Fig.2のように内部トルク制御系を構成しているため、トルクベース形インピーダンス制御系を構成する。位置制御ループ内のトルク制御系に与えられる目標トルク $T_{cr}(s)$ は次式で与えられる。

$$T_{cr}(s) = G_r(s)\{\theta_r(s) - \theta(s)\} \quad (10)$$

ここで、 $G_r(s)$ は関節の目標インピーダンス、 $\theta_r(s)$ は関節の目標角である。以下では、表現を簡単にするため、次式の伝達関数を用いる。また、 (s) は省略する。

$$\left. \begin{aligned} A(s) &= \frac{K_a D}{T_a s + 1}, \quad G_A(s) = \frac{K_m}{T_a s + 1} \\ P(s) &= \frac{1}{J s + b}, \quad P_n(s) = \frac{1}{J_n s + b_n} \\ H(s) &= \frac{1}{T_h s + 1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで、 $A(s)$ は空気圧アクチュエータのモデルを、 $G_A(s)$ は内部トルク制御系により改善される空気圧アクチュエータのモデルを、 $P(s)$ は駆動部のモデルを表し、 $P_n(s)$ は $P(s)$ のノミナルモデルであり、 T_h はローパスフィルタ $H(s)$ の時定数である。

2.3.1 通常のトルクベース形制御系

Fig.3 は位置制御ループの内側に反作用トルクをフィードバックしてトルク制御系を構成したインピーダンス制御系であり、本論文では、これを通常のトルクベース形インピーダンス制御系と呼んでいる。ここでは、Fig.2のような内部トルク制御系は構成しない。 C はトルクコントローラである。位置制御ループ内部のトルク制御系の閉ループ伝達関数 G_t は次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} G_t &= \frac{T_L}{T_{cr}} \\ &= \frac{K_e P A C}{(1 + P A K_v) s + K_e P (1 + A C)} \end{aligned} \quad (12)$$

マニピュレータが対象物に接触したとき、反作用トルク T_L と位置誤差 $(\theta_r - \theta)$ 、摩擦トルク T_f との関係は次式で表される。

$$\frac{T_L}{\theta_r - \theta} = G_t G_r, \quad \frac{T_L}{T_f} = \frac{-G_t}{A C} \quad (13)$$

$|G_t(j\omega)| = 1$ の周波数域において、目標インピーダンス G_r は実現される。また、摩擦トルク T_f の影響は C により低減できる。

2.3.2 外乱オブザーバを用いた制御系

Fig.4 は内部トルク制御系と外乱オブザーバを併用するインピーダンス制御系であり、本論文では、これを外乱オブザーバを用いたトルクベース形インピーダンス制御系と呼ぶ。位置制御ループの内側のトルク制御系、すなわち内部トルク制御系に

Fig.3 Torque based impedance control system using usual method

Fig.4 Impedance control system using disturbance observer

与えられる目標トルク T_{cr} から反作用トルク T_L までの伝達関数 G_{ob} は次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} G_{ob} &= \frac{T_L}{T_{cr}} \\ &= \frac{K_e P G_A}{(1 - G_A H + \frac{G_A P K_v}{K_{pa}} + \frac{G_A P H}{P_n}) s + K_e P} \end{aligned} \quad (14)$$

この伝達関数を用いれば、反作用トルク T_L 、位置誤差 $(\theta_r - \theta)$ および摩擦トルク T_f は次式の関係となる。

$$\frac{T_L}{\theta_r - \theta} = G_{ob} G_r, \quad \frac{T_L}{T_f} = \frac{-G_{ob}(1 - G_A H)}{G_A} \quad (15)$$

次式を満足するようにフィルタ H を設定すれば、摩擦トルクの影響は除去される。

$$|1 - G_A(j\omega)H(j\omega)| = 0 \quad (16)$$

3. 空気圧ロボットマニピュレータ

Fig.5 は試作した3自由度SCARA形空気圧ロボットマニピュレータと環境の概略を示す。ベーン型空気圧アクチュエータの最大駆動角は 0.5π [rad] である。各アクチュエータの両チャンバの容積が等しい状態、すなわち各アームが y 軸に対して平行の状態を基準状態とする。マニピュレータとの接触および衝突動作が行われる対象物は y 軸に対して直角の状態で置かれている固定物に付着される。

Fig. 5 SCARA robot and object

Fig. 6 Control circuit

Fig. 6 は 1 自由度当たりの制御回路を示す。計算機から出力される制御入力 u はバーン型アクチュエータからの排気流量を制御する PCM (Pulse Code Modulation) 弁およびその回転方向を制御する 3 ポート電磁弁を駆動する [8]。PCM 弁は n 個の ON-OFF 電磁弁を並列に並べることで構成されたものである。これにより、排気流量は 2^n 段階に調整でき、多段階の速度制御が可能である。各関節の回転角を検出するため、関節 1 と 2 には分解能が 2.62×10^{-4} [rad]、関節 3 には 1.56×10^{-4} [rad] のロータリーエンコーダを取り付ける。アクチュエータの両チャンバには、圧力センサ (分解能 0.234 [kPa]) を取り付ける。アクチュエータの理論発生トルクは吐き出し容積と圧力の情報により計算される。また、マニピュレータと対象物の接触時に生じる反作用力は力センサ (分解能 0.03 [N]) をマニピュ

Table 1 Parameters of pneumatic robot manipulator

	Arm 1	Arm 2	Arm 3
n	8	7	6
l [m]	0.25	0.2	0.23
D [m ³]	2.58×10^{-4}	7.6×10^{-5}	3.5×10^{-5}
K_{pa} [1/Nm]	5	9	15
K_m	0.95	0.99	0.98
T_A [s]	0.12	0.12	0.067
K_v [s/rad]	80	25	10
K_a [kPa]	14.78	144.74	131.15
T_a [s]	2.4	12	4.76
J [Nm·s ² /rad]	2.0	0.45	0.04
b [Nm·s/rad]	0.9	0.9	0.35
T_f [Nm]	4	5	1

Fig. 7 Arm 3 and object

レータの手先に取り付けて検出する。供給圧力 P_s は 490 [kPa] である。

4. 結果および考察

Table 1 に空気圧ロボットマニピュレータの基本パラメータと各パラメータの同定値を示す。 n は PCM 弁を構成する ON-OFF 電磁弁の個数である。また、アーム 3 の長さには、力センサの長さ (0.08 [m]) が含まれている。対象物は等価剛性が $K_e=670$ [Nm/rad] のゴムとする。

4.1 1 自由度マニピュレータのインピーダンス制御

ここでは、Fig. 5 で示した 3 自由度のうち、手先のアーム 3 について考察する。関節間の干渉が生じないように、アーム 1 とアーム 2 は y 軸に対して平行状態を維持するように固定する。対象物はアーム 3 の手先に取り付けた力センサと直角の状態 で接触および衝突動作が起こるように固定する。

Fig. 7 はアーム 3、力センサおよび対象物の関係を示す。アーム 3 が対象物から離れた場合は位置制御、接触する場合は、式 (10) のように目標インピーダンスと位置誤差により位置制御ループ内のトルク制御系に与えられる目標トルクを生成してトルク制御を行う。実験時のサンプリング周期は 7.7 [ms] である。

4.1.1 外乱トルクの推定

Fig. 8 は外乱オブザーバの性能を調べるために行った実験結果であり、Fig. 4 の制御系に正弦波状目標入力 $\theta_{r3} =$

Fig. 8 Estimated disturbance torque when reference angle is sinusoidal wave, $\theta_{r3} = 0.5 \sin(0.25\pi t)$ [rad]

0.5sin(0.25 π t)を与えたとき、外乱オブザーバによる推定外乱トルク $\hat{T}_{dis}$ の応答を示す。目標インピーダンスは $G_{r3}(s) = 0.5s + 10$ 、内部トルク制御系の比例ゲインは $K_{pa3} = 15$ [1/Nm]と設定した。マニピュレータはFig. 7の状態から2秒ごとに非接触・接触運動を繰り返す。推定外乱トルク $\hat{T}_{dis}$ は内部トルク制御系の目標トルク T_r にフィードバック補償をしない。外乱オブザーバはマニピュレータが非接触・接触運動を繰り返しているにもかかわらず未知の外乱トルクに相当するものを推定している。マニピュレータが非接触運動を行う場合 (0~2, 4~6[s])、外乱オブザーバは式 (7) で定義した外乱を推定している。ここでは、負荷変動は起こらないため、外乱トルクは摩擦トルクとパラメータの同定誤差を含む。また、マニピュレータが対象物に接触した場合 (2~4, 6~8[s])、 ω が小さいため、外乱オブザーバは摩擦トルク T_f のみ推定することになる。正弦波状の目標角を入力しているため、マニピュレータが対象物に衝突する瞬間は角度誤差が小さく時間が経つほど角度誤差は大きくなり、反作用トルクは増加する。ピークが生じた後、反作用トルクは減少をはじめ、やがてマニピュレータは接触状態から離れる。このようにマニピュレータの運動方向が変わるたびに摩擦トルクもFig. 8で示すようにその方向が変わる。反作用トルクが減少する区間 (Fig. 10の反作用トルクの応答参照) に相当する時刻3~4, 7~8[s]では、推定外乱トルクが急激に変動している。これはメータアウト方式に固有の問題であり、制御入力 u の符号の反転により3ポート電磁弁が切り換わることに起因して生じる現象である [9]。

4.1.2 反作用トルク制御

Fig. 9はFig. 3の制御系とFig. 4の制御系にステップ状の目標角を入力としてインピーダンス制御を行った場合の反作用トルク応答を示す。Fig. 7の状態において、各制御系に目標角 $\theta_{r3} = -0.5$ [rad]を印加する。Fig. 3におけるトルクコントローラの比例ゲインは $K_{pf3} = 9$ [1/Nm]、Fig. 4における内部トルク制御系の比例ゲインは $K_{pa3} = 15$ [1/Nm]と与えた。また、目標インピーダンスは次式のように設定する。

$$G_{r3}(s) = K_{d3}s + K_{p3} \quad (17)$$

Fig. 9 Response of reaction torque when reference angle is step input, $\theta_{r3} = 0.5$ [rad]

ここで、 K_{d3} は目標粘性摩擦であり、0.5 [Nm·s/rad]と設定し、 K_{p3} は目標剛性であり、 $K_{p3}=10$ [Nm/rad]と設定した。

細い破線は位置制御ループ内のトルク制御系に与えられる目標トルク T_{cr3} であり、式 (10) で示したように位置誤差と式 (17) の目標インピーダンスを用いて生成したものである。太い破線はFig. 3の制御系による反作用トルクの応答であり、立ち上がりが遅い。細い実線はFig. 4の制御系において、 $H(s) = 0$ と設定し推定外乱トルク $\hat{T}_{dis}$ をフィードバック補償しない場合の応答であり、内部トルク制御系によりアクチュエータの応答特性が改善されるため、反作用トルクの立ち上がりはFig. 3の制御系より速いが、摩擦トルクの影響による定常偏差を残している。太い実線は、Fig. 4の制御系において、内部トルク制御系の目標トルク T_r に外乱オブザーバにより推定した外乱トルク $\hat{T}_{dis}$ を補償しているため、定常偏差が小さい反作用トルクの応答が得られている。

以下では、Fig. 3の制御系とFig. 4の制御系の性能を比較することにより、Fig. 4の制御系の有効性を示す。

4.1.3 衝突過程制御

マニピュレータが対象物と衝突する衝突過程制御はFig. 7で示すようにマニピュレータが対象物と接触している状態から実施する。Fig. 3とFig. 4の制御系に正弦波状目標入力 $\theta_{r3} = 0.5 \sin(0.25\pi t)$ を印加した。それぞれのコントローラのゲインはFig. 9と同様に設定した。

Fig. 10は、マニピュレータが対象物に接触したとき、すなわち時刻2~4, 6~8[s]における位置誤差と目標インピーダンスを用いて生成した目標トルクに反作用トルクが追従するようにトルク制御を行った場合の結果である。点線は式 (10) により生成した位置制御ループ内のトルク制御系に与えられる目標トルク T_{cr3} を表し、実線は反作用トルク T_{L3} の応答を表す。振幅が小さいものは $G_{r3}(s) = 0.5s + 10$ 、振幅が大きいものは $G_{r3}(s) = 0.5s + 20$ とした場合の目標トルクと各制御系による反作用トルクの応答を示す。(a)では、反作用トルクが減少するとき、かなり振幅の大きい振動的な応答が得られた。(b)では、振幅が小さい反作用トルクの応答が得られた。Fig. 4の制御系は、反作用トルクが減少するとき、その応答が振動的となるメータアウト方式の固有の問題 [9] を緩和することができ

(a) In the case of Fig. 3

(b) In the case of Fig. 4

Fig. 10 Response of reaction torque when reference angle is sinusoidal wave, $\theta_{r3} = 0.5 \sin(0.25\pi t)$ [rad]

る。これは Fig. 9 で示したように Fig. 4 の内部トルク制御系により空気圧アクチュエータの応答特性が向上したため、反作用トルクが速やかに目標トルクに追従すること起因した結果である。また、反作用トルクが増加する場合、(a) の応答に比べて応答遅れも改善されている。また、マニピュレータが対象物に衝突するときに生じる衝突トルクは両制御系ともに小さい。これは空気の圧縮性により衝突力が緩和されるためである。

4.1.4 目標インピーダンスの実現

Fig. 11 は、種々の周波数の正弦波状入力を Fig. 3 と Fig. 4 の制御系に印加したとき、位置誤差と反作用トルクの比を表したものである。実験は Fig. 10 と同じ条件で行った。(a) は $G_{r3}(s) = 10$ と設定した場合、(b) は $G_{r3}(s) = 2s + 10$ とした場合を示す。実線は目標インピーダンスを表し、●印は Fig. 3 の制御系、○印は Fig. 4 の制御系により実現されるインピーダンスを表す。(a) では、Fig. 4 の制御系によるインピーダンスは低周波数域において Fig. 3 の制御系より若干改善されたが、高周波数域ではほぼ同様な結果が得られている。(b) では、Fig. 4 の制御系は Fig. 3 の制御系に比べてより高い周波数まで目標インピーダンスに追従できている。

(a) In the case of $G_{r3}(s) = 10$ (b) In the case of $G_{r3}(s) = 2s + 10$

Fig. 11 Realization of desired impedance

4.2 多自由度における位置と力制御

関節の回転角ベクトル $\mathbf{Q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ は次式によりマニピュレータの手先位置ベクトル $\mathbf{X} = [x, y, \theta]^T$ に変換される。

$$\mathbf{X} = \mathbf{L}(\mathbf{Q}) \quad (18)$$

ここで、手先の姿勢は $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ である。また、反作用力/トルクベクトル $\mathbf{F}_L = [F_x, F_y, T_\theta]^T$ は次式により得られる。

$$\mathbf{F}_L = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{T}_L \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{J}(3 \times 3)$ はヤコビ行列、 $\mathbf{T}_L = [T_{L1}, T_{L2}, T_{L3}]^T$ は各アームの先端で働く反作用トルクを表す。また、 T_θ は手先に作用する外部トルクであり、ここでは、 $T_\theta = 0$ である。

Fig. 12 はマニピュレータ手先の目標位置と姿勢を表す。目標位置は初期位置 $P_0(0.52, 0.44)$ [m] から 2[s] ごとに $P_0(0.52, 0.44) \rightarrow P_1(0.1, 0.63) \rightarrow P_2(0.1, 0.67)$ [m] とステップ状目標入力を与える。マニピュレータの姿勢は $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ と定義し、その目標姿勢は $\theta_r = 0.5\pi$ [rad] である。対象物は固定壁に取り付け P_1 と P_2 の間に位置するように固定する。この区間でマニピュレータは対象物と衝突するため、位置制御から力制御に変わる。逆運動学問題を解くことにより、各関節の目標角 θ_{rj} ($j = 1 \sim 3$) が得られる。ここでは、Fig. 3 と Fig. 4 の制御系を各関節に独立に構成した。そのため、Fig. 4 の制御系における外乱オブザーバはコリオリ力および遠心力と関節間の干渉力が式 (7) の外乱トルク項に含まれる。対象物

Fig. 12 Reference position of end effector

Table 2 Gains of controller and nominal value

		Arm 1	Arm 2	Arm 3
K_{pa}	[1/Nm]	5	9	15
K_{pf}	[1/Nm]	4	3	9
K_p	[Nm/rad]	40	20	10
K_d	[Nm·s/rad]	2	2	0.5
J_n	[Nm·s ² /rad]	2.0	0.45	0.04
b_n	[Nm·s/rad]	0.9	0.9	0.35
T_h	[s]	0.1	0.1	0.05

は $(0.1, 0.63) \Rightarrow (0.1, 0.67)$ [m] の間に固定したため、位置と力の繰り返し制御は $(0.1, 0.63) \Rightarrow (0.1, 0.67)$ [m] の間で行われる。トルクコントローラおよび目標インピーダンスの各パラメータは Table 2 の値を用いる。サンプリング周期は 11 [ms] である。

Fig. 13 は y 方向の位置応答を示す。破線はマニピュレータの手先目標位置、点線は Fig. 3、実線は Fig. 4 の制御系による応答である。目標位置に対する偏差が大きい時間はマニピュレータの手先が対象物に接触してインピーダンス制御を行う時間である。初期位置 $(0.52, 0.44)$ [m] から $(0.1, 0.63)$ [m] へ移動するとき、Fig. 3 の制御系ではオーバーシュートが生じ振動的な応答となった。これは関節間の干渉力、もしくはコリオリおよび遠心力によるものと考えられる。また、対象物と接触したとき、振動的な位置応答を示している。Fig. 4 の制御系は Fig. 3 の制御系に比べて振動が小さい応答が得られた。しかし、各制御系による位置応答はいずれも $(0.1, 0.63)$ の位置へ戻るとき、定常偏差を残している。

Fig. 14 は y 方向の反作用力の応答を示す。点線は仮想目標力であり、式 (10) により生成された位置制御ループ内のトルク制御系に与えられる目標トルク T_{cr} を式 (19) の関係を用いて力に換算したものである。実線は力センサにより測定した値である。(a) は Fig. 3 の制御系による y 方向の力応答であり、かなり振動的な応答が得られた。(b) は Fig. 4 の外乱オブザーバを用いた制御系による力応答であり、(a) の結果に比べて安定な応答が得られた。

Fig. 13 Response of position in Cartesian space

(a) In the case of Fig. 3

(b) In the case of Fig. 4

Fig. 14 Response of reaction force in Cartesian space

5. 結 言

空気圧アクチュエータは固有の柔軟性により、今後様々な分野で要求される人に優しいソフトロボットを実現するための有力な手段の一つとして注目されている。本論文は、このようなロボットを開発し実用化するための基礎として、空気圧ロボットの柔軟性を任意に制御する方法について研究したものである。柔軟性の制御手段としてインピーダンス制御法を適用した。インピーダンス制御においては、ロボットと対象物との接触およ

び非接触の両状態に対応できることが望ましい。この場合、ロボットの状態は大きく変動し、また、対象物の正確な特性は事前に予知できない場合が多い。さらに、接触作業においては摩擦係数も無視できない。このようなシステムパラメータの不確かさや変動、外部からの外乱に対応するため、外乱オブザーバを用いたインピーダンス制御系を構成した。

試作した空気圧ロボットのインピーダンス制御を実施し、外乱オブザーバの有効性を示すとともに、1~2 [Hz] 程度まで目標インピーダンスが実現できることを確認した。

本質的に柔軟で安全なロボットを構成するためには、もともと柔らかいメカニズムを必要に応じて制御により剛くして利用するのが合理的である。本論文は、このような観点から、空気圧ロボットの有用性を主張するものである。本研究で得られた目標インピーダンスの実現可能周波数領域の妥当性などについては、今後、具体的に应用される作業内容との関連で議論する必要があるが、本研究を通して、柔軟性を任意に調整できる空気圧ロボットの実現が可能であることが確認された。

参 考 文 献

- [1] 福田：“フレキシブルアームの研究動向”，日本ロボット学会誌，vol.6，no.5，pp.424-429，1988。

- [2] 呉，下山，三浦：“三次元宇宙用マニピュレータの一構成法”，日本ロボット学会誌，vol.6，no.5，pp.388-392，1988。
- [3] 小松，植之原，飯倉，三浦，下山：“2リンク柔軟マニピュレータのコンプライアンス制御”，日本機械学会論文集（C編），vol.56，no.530，pp.2642-2648，1990。
- [4] N. Hogan: “Impedance Control: An Approach to Manipulator, Part 1, Part 2 and Part 3,” ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985。
- [5] N. Hogan: “Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1047-1054, 1987。
- [6] W. McCormick and H.M. Schwartz: “An Investigation of Impedance Control for Robot Manipulators,” The International Journal of Robotics Research, vol.12, no.5, pp.473-489, 1993。
- [7] 榎，館：“インピーダンス制御の接触安定性についての一考察”，日本ロボット学会誌，vol.12，no.3，pp.489-496，1994。
- [8] T. Noritsugu and J.G. Park: “Friction Compensation in Pneumatic Robot Manipulator Using Disturbance Observer,” Proceedings of the 2nd Japan-France Congress on Mechatronics (International), vol.2, pp.715-718, 1994。
- [9] 則次，朴：“外乱オブザーバを用いた空気圧マニピュレータの力制御”，日本ロボット学会誌，vol.13，no.5，pp.711-719，1995。
- [10] D.A. Lawrence: “Impedance Control Stability Properties in Common Implementation,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1185-1190, 1988。

朴 最圭 (Jung-Gyu Park)

1961年6月23日生。1987年韓国嶺南大学校工科大学機械工学科卒業。1992年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。1995年同大学院自然科学研究科博士課程修了。博士（工学）。韓国LG電子（株）生産技術センタ勤務。超精密メカニズム設計および制御研究に従事。電気学会，大韓機械学会（日本ロボット学会正会員）

正会員。

則次俊郎 (Toshiro Noritsugu)

1949年10月19日生。1974年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。津山工業高等専門学校を経て，1986年岡山大学工学部助教授，1991年同教授。工学博士。空気圧サーボ，ロボティクス，振動制御などの研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本油空圧学会，システム制御情報学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）

会などの会員。