学術論文

垂直多関節型ロボットマニピュレータの関節剛性測定 —同時測定と独立測定による比較—

周 桑 完^{*1} 前 田 浩 一^{*2}

Joint Stiffness Measurements of Multi-joint Type Robot Manipulators with Serial Mechanisms

—A Comparison between Simultaneous Measurement and Individual Measurement—

Sangwan Joo^{*1} and Hirokazu Mayeda^{*2}

When a force is applied at the endpoint of a manipulator arm, the endpoint will deflect by an amount which depends on the stiffness of the arm and the force applied. There are several sources, for example, arm links, transmissions, reducers, and servo drive systems that produce deflections or vibrations of the industrial manipulator arm. We've investigated the measuring methods of the equivalent joint stiffness of a industrial robots with serial mechanisms. In this paper, two measuring methods are proposed. One is simultaneous measurement method, and the other individual method. According to the experimental conditions, the former is divided into two methods further, servoing state measurement, and mechanically fixed state measurement. The experimental results for the typical industrial robot, PUMA560, show that we can regard the equivalent stiffness of each joint to be linear.

Key Words: Joint Stiffness, Simultaneous or Individual Measurement, Fine Deflection Measurement System

1. は じ め に

一般に、ロボットのモデリングは運動方程式の記述法とその中に現れる物理定数の同定法とに分けられる。前者はすでに確立された方法があるが、後者についてはいろいろな研究が進んできている。これらはロボットの運動のモデリングに関する研究の進展であって、運動方程式に本来は関与しているはずの駆動力伝達機構のダイナミクスや物理定数の同定法についての議論は未だ深められていない。これらの中で、最も問題となるものがモータの駆動トルクをリンク側に伝える駆動力伝達機構の剛性特性の影響のモデル化である。例えば、伝達機構の複雑なメカニズムからくる関節剛性特性の影響でロボットの位置決めや、振れ止めの際の残留振動、ゆらぎなどが引き起こされるのでこれらの現象を制御・補償するには関節剛性の特性を必ず同定しておく必要がある [9]。

さらに、ロボットの高精度な制御を行うとすると、アームの弾性変形、サーボ剛性なども考慮しなくてはならない。これらによる誤差は、姿勢、ワークの重量、運動状態によって変化し、リンクパラメータをキャリブレーションすることでは校正することはできない。すなわち、手先位置決め誤差、振動のような

現象は駆動力伝達系の関節剛性以外に、リンクの弾性、サーボ剛性にも依存するので、マニピュレータの手先剛性はこれらを重ね合わせた等価関節剛性によって決まることになる。特に、垂直多関節型ロボットマニピュレータの場合、この手先剛性はロボットの姿勢によっても変わるので、各関節ごとの等価関節剛性を正確に同定し、モデリングすることは非常に重要である。

このように、関節剛性は従来からマニピュレータの重要なパラメータとして認識されてきたにもかかわらず、それを実測によりモデリングし、手先位置決め精度の向上や振動制御などに用いた例はあまり見当たらない。関節剛性を直接測定した例としては次の二つがある。D.E. Whitney ら [4] はマニピュレータの非幾何パラメータによる誤差の補償モデルを構成してキネマティックキャリブレーションに用いるため、PUMA560 の第 2, 3 関節のみの剛性を測定した。彼らはセオドライト（経緯儀：水平角と仰角を測定する測量機械）を用いて測定を行ったが、測定時のロボットの条件（すなわち、サーボを掛けた状態で測定を行ったか、あるいは機械的にモータ側を止めて測定したか）と、他の軸に関するデータについては述べていない。しかし、これによる測定はかなりの費用と努力がかかる。M.C. Leu ら [5] はパラレルメカニズムを持つ垂直多関節型ロボット GE P-50（General Electric 社製）の 1~4 軸の関節剛性を独立に測定したデータを発表している。しかし、関節ごとに独立に測定する方法は一般に手間が非常に掛かり、彼らの方法は一般性を持たないためできる限り汎用性を持つ方法を模索すべきである。

そこで、我々は垂直多関節型ロボットマニピュレータに汎用

原稿受付 1994 年 2 月 2 日

^{*1}大阪大学基礎工学部

^{*2}立命館大学理工学部

^{*1}Faculty of Engineering Science, Osaka University

^{*2}Faculty of Science and Technology, Ritsumeikan University

的に適用可能な方法として、手先の外力とその微小変位（6要素）を精密測定し、マニピュレータの静力学的関係を用いて各軸の等価関節剛性を同時に推定することを試みた。この方法を以下では**同時測定法**と呼ぶことにする。さらに、同時測定結果の信頼度を確認するため、各軸の剛性を独立にも測定し（以下、**独立測定法**と呼ぶ）、その結果を比較した。同時測定による推定値は、測定時のマニピュレータの姿勢や手先に加える外力の方向、手先の微小変位を測定する測定装置の測定誤差、リンクの弾性による運動学モデルの誤差などによって若干のばらつきが見られた。しかし、その平均値は独立測定による結果と数値的にはほぼ一致し、また、両方ともほとんど線形な特性とみなせることが分かった。

以下、第2章では回転関節のみを持つマニピュレータに対する同時測定のための静力学的考察を行う。第3章では、測定装置の紹介や座標系の設定、外力による手先の微小変位の測定法を述べる。第4章では、PUMA560を対象として同時測定と独立測定を行い、その結果を比較検討する。また、同時測定のノウハウについても述べる。

2. マニピュレータの運動学

この章では、マニピュレータアームの弾性変形が無視できる場合、マニピュレータの静力学的関係を用いて、各関節の剛性を同時に同定することを述べる。これは第4.1節の同時測定実験にそのまま適用され、アームの弾性を考慮した独立測定の結果と比較される。

2.1 静力学的関係

三次元空間でロボットマニピュレータの手先の位置ベクトルを $\mathbf{X}$ とすると、

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{a}, \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\Theta}) \quad (1)$$

と記述される。ここで、 $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_l)^T$ はリンクの長さ、 $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_l)^T$ はリンクのねじれ角、 $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_l)^T$ はリンク間距離、 $\boldsymbol{\Theta} = (\theta_1, \dots, \theta_l)^T$ はリンク間角度であり、回転関節のみを持つマニピュレータは $\boldsymbol{\Theta}$ が関節変数で、その他はリンクが剛体ならば定数パラメータとなる。したがって、手先の微小変位 $\Delta \mathbf{X}$ は、

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta}) \Delta \boldsymbol{\Theta}, \quad (\Delta \boldsymbol{\alpha}, \Delta \mathbf{a}, \Delta \mathbf{d} \rightarrow 0) \quad (2)$$

のように線形化できる。ここで、 $\mathbf{J}$ はマニピュレータのヤコビ行列、 $\Delta \boldsymbol{\Theta} = (\delta \theta_1, \dots, \delta \theta_l)^T$ は関節の微小変位を表す。式(2)は、手先に加わる適当な外力によって生じる手先の微小変位 $\Delta \mathbf{X}$ を精密測定すれば、対応する関節の微小変位 $\Delta \boldsymbol{\Theta}$ が得られることを意味する。

一方、静力学的にマニピュレータの手先に発生する力と等価な関節駆動力 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_l)^T$ は、手先の外力を $\mathbf{F} = (\mathbf{f}^T, \mathbf{n}^T)^T$ とすると、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (3)$$

と表される。外力 $\mathbf{F}$ を測定するには6軸力センサを用いればよい。

Fig. 1 A serial spring model of revolutinal joint

2.2 マニピュレータの関節剛性

マニピュレータの関節剛性は次式で表される。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K} \Delta \boldsymbol{\Theta} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, \dots, k_l)$ は駆動力伝達系の剛性にサーボ剛性も含んだ等価関節剛性と考えてもよい。 $k_i \neq 0$ ($i = 1, \dots, l$) であれば $\mathbf{K}$ は可逆で、式(3)の $\boldsymbol{\tau}$ を式(4)に代入すると、

$$\Delta \boldsymbol{\Theta} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (5)$$

となる。したがって、 $\mathbf{J}$ が正則ならば式(2)より、

$$\mathbf{F} = \bar{\mathbf{K}} \Delta \mathbf{X} \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = (\mathbf{J} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \quad (7)$$

という関係を得る。この $\bar{\mathbf{K}}$ が手先剛性行列で、マニピュレータアームの強さを表す。これは上式のように、等価関節剛性 $\mathbf{K}$ とヤコビ行列 $\mathbf{J}$ によって決まる。したがって、 $\mathbf{K}$ が未知であれば姿勢によって変わる手先の位置誤差などの補償は非常に困難となる。

一方、関節 i の減速ギア比を η_i (≥ 1) とすれば、

$$k_{(\text{out})_i} = \eta_i^2 k_{(\text{in})_i} \quad (8)$$

という関係がある。ここで、 $k_{(\text{in})_i}$ はモータ側から見た等価関節剛性、 $k_{(\text{out})_i}$ はリンク側から見た等価関節剛性である (Fig. 1)。実験装置、測定方法などを考慮すると $k_{(\text{out})_i}$ の方が測定しやすい。

$k_{(\text{out})_i}$ を測定するには、マニピュレータを任意の姿勢 $\boldsymbol{\Theta}_j$ ($j = 1, \dots, m$) にして、手先に外力 $\mathbf{F}_k$ ($k = 1, \dots, n$) を加える。そのとき、手先の微小変位 $\Delta \mathbf{X}_{jk}$ が精密測定できれば、次の式(9)(10)によって各姿勢と外力に対する等価関節トルクと関節変位が得られる。

$$\tau_{jk} = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\Theta}_j) \mathbf{F}_k \quad (9)$$

$$\Delta \boldsymbol{\Theta}_{jk} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\Theta}_j) \Delta \mathbf{X}_{jk} \quad (10)$$

したがって、各関節において、 $(\delta \theta_{ijk}, \tau_{ijk})$ のデータ組より、最小自乗法などを用いて $k_{(\text{out})_i}$ が推定される。

Fig. 2 Fine deflection measurement system for robot manipulator endpoint

3. 測定の準備

関節剛性をより正確に推定するためには、手先の外力 F を測定する 6 軸力センサの変形も考慮すべきであるが、今回の実験で用いたもの（ピーエル・オート・テック製、定格荷重は、力：30 [kgf]、トルク：300 [kgf·cm]）は十分大きな剛性を持っているためその影響は無視した（実測によって確認）。

3.1 測定装置

手先の微小変位を精密測定するために、我々はレーザ式変位センサを用いたロボットマニピュレータ用手先微小変位測定装置 [3] を開発した (Fig. 2)。これは、変位を測定したい物体に立方体（キューブと呼ぶ）を取り付け、その微小変位（位置と姿勢）を精密に測定するものである。この測定システムはキューブ、6 個の半導体レーザ式変位センサを適切に取り付けたセンサセット（以下、このセットをテストリグと呼ぶ）、アンプユニット、A/D 変換ボード、パーソナルコンピュータで構成されている。

テストリグに取り付けるおのこの半導体レーザセンサ（キーエンス社製）は、基準距離（零点位置）がセンサ本体から 40 [mm]、基準距離からの測定範囲が ± 10 [mm]、分解能は測定条件によって異なるが最高 2 [μ m] の性能を持っている。これらを Fig. 2 のように構成したシステム全体の精度は、標準偏差で距離 0.05 [mm] 以上、姿勢 0.06° 以上である（この測定システムの精度検定法については参考文献 [3] を参考）。本研究ではキューブをマニピュレータの手先に取り付け、キューブに外力を加えることによって生じる手先の微小変位を精密測定する。

Fig. 3 は適当な姿勢で外力 F による手先（キューブ）の微小変位を測定する様子である。

3.2 座標系の設定と手先変位測定

実験に用いた PUMA560 の機械的原点とリンク座標系の設定を Fig. 4 に示す。マニピュレータの幾何パラメータは公称値をそのまま用いた。基準座標系を Σ_R 、第 i リンク座標系を Σ_i 、6 軸力センサの座標系を Σ_E 、手先のキューブ座標系を Σ_C とすると、基準座標系 Σ_R から Σ_C までの同次変換行列 ${}^R T_C$ は次式で表される。

$${}^R T_C = {}^R T_1 {}^1 T_2 \cdots {}^5 T_6 {}^E T_C \quad (11)$$

Fig. 3 Simultaneous measurement of joint stiffness using the fine deflection measurement system

i	α_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	Remarks
1	0	0	0	(θ_1)	$l_1 = 150$ [mm]
2	0	90°	l_1	$(\theta_2 + 90^\circ)$	$l_2 = 433$ [mm]
3	l_2	180°	0	$(\theta_3 + 90^\circ)$	$l_e = 20$ [mm]
4	l_e	-90°	$-l_3$	(θ_4)	$l_3 = 432$ [mm]
5	0	90°	0	(θ_5)	$l_f = 83.65$ [mm]
6	0	-90°	0	(θ_6)	$l_C = 64.2$ [mm]
7	0	180°	l_f	-90°	F/T sensor
8	0	0	l_C	-90°	Cube

Fig. 4 A coordinate frame of PUMA560

テストリグの座標系 Σ_T の Σ_R に対する絶対位置と姿勢はロボット手先のキューブまわりにテストリグを近接させて検出できる。すなわち、キューブとテストリグの間は可変リンクと見なされ、 Σ_T に対する Σ_C の同次変換行列は（以下、Fig. 5 参考）。

$${}^C T_T = \begin{bmatrix} {}^T R_C & {}^T P_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (12)$$

Fig. 5 Fine displacements of endpoint and coordinate transformations

$$= \begin{bmatrix} {}^C R_T & -{}^C R_T {}^T P_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

となり、 Σ_T の絶対位置・姿勢 ${}^R T_T$ は式 (14) となる。

$${}^R T_T = {}^R T_C {}^C T_T \quad (14)$$

次に、手先（キューブ）に任意の外力 F を加えると Σ_R に対する Σ_C の微小変位ベクトル ΔX_C が測定される。

$$\Delta X_C = \begin{bmatrix} {}^R P_{C,C'} \\ {}^R \omega_{C,C'} \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、

$$\begin{aligned} {}^R P_{C,C'} &= {}^R R_C ({}^C P_T + {}^C R_T {}^T P_{C'}) \\ &= {}^R R_C {}^C P_{C,C'} \end{aligned} \quad (16)$$

$${}^R \omega_{C,C'} = {}^R R_C {}^C \omega_{C,C'} \quad (17)$$

4. 等価関節剛性の測定

4.1 同時測定

測定時のロボットの条件によって、同時測定法はさらにサーボを掛けている状態での同時測定と機械的固定状態の同時測定に分けられる。サーボ状態での同時測定はマニピュレータを任意の位置に静止させて、手先に適当な外力を加え、手先の微小変位を精密測定することにより各関節の剛性を同時に推定する方法である。この場合は、コントローラのサーボ剛性も測定できる。しかし、実際の実験においては、実験対象のコントローラのサーボ剛性が小さかったため、わずかな外力でも手先の変位が測定装置の測定可能範囲（±10 [mm]）を超えて、外力ゼロからの測定データを得ることはできず、ある程度の基本外力（2～3 [kgf]）を加えた上で測定を行った。なお、この場合はサーボ系に及ぼす影響などを考慮して最大外力を 6 [kgf] とした。

一方、機械的固定状態の同時測定は、駆動モータにサーボを掛けないで、モータ側を機械的に固定させた状態（Fig. 6）で、サーボ状態と同様に測定する方法である。この場合は、リンク、減速ギア列などの強度を考慮して最大 8 [kgf] の外力をランダムに加えて測定を行った。この方法は、前者に比べて安全かつ広い範囲の外力に対応する測定が行えるが、全軸のモータ側を機械的に止めるのにかなりの手間が掛かることと、サーボ剛性も含んだ等価関節剛性は計測できないことが欠点である。

Fig. 6 Simultaneous measurement of joint stiffness (Mechanically fixed state)

同時測定では、マニピュレータの姿勢や加える外力の方向決めが非常に重要である。経験上最も良い決め方は、外力によって各軸に掛かるトルクが均等に振られるようマニピュレータの姿勢と外力の方向を決めることである。例えば、ある外力に対して等価関節トルクがほとんど発生されない関節が一つ以上あると、正しいデータを得ることができない。

なお、実際のマニピュレータの各リンクには弾性要素が含まれるので、同時測定のための基本式である式 (1)～(10) は厳密には正しくない。特に、第 1 軸から手先までのリンクの変形量は、同一の外力に対しても、マニピュレータの姿勢によって異なるので、計算上誤差が生じる。独立測定では、リンクの弾性も含んだ関節剛性を測定し、同時測定の結果と比較する。同時測定の実験で取ったマニピュレータの姿勢は $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -40^\circ \sim -65^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ \sim 60^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ \sim 105^\circ$, $\theta_5 = 80^\circ \sim 90^\circ$, $\theta_6 = 0^\circ$ である。

4.2 独立測定

独立測定法は電源を切って各関節の等価剛性（駆動力伝達系の剛性＋リンクの弾性）を独立に測定する非常に単純かつ正確な方法である。付録 A に各関節の独立測定の様子と計算式を示す。第 1 軸の等価剛性を測定するときの姿勢は実験の都合上 $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_3 = 60^\circ$ でその他はゼロにした。ここでは、第 2 関節の測定例だけを簡単に説明するが、他の関節に対しても同様に説明できる。

第 2 関節の等価剛性を独立に測定するためのロボットの姿勢としては、 $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, 他はゼロにした。第 2 軸のモータ側を機械的に固定し、第 1 軸には平行に、第 2 軸には垂直方向に外力を加える。このとき、手先の変位 δu_2 はリンク 2 の長さに比べて微量な量であるので、リンクの弾性も考慮した第 2 関節の等価剛性は近似的に次式によって簡単に計算できる。

$$\delta \theta_2 = \tan^{-1} \frac{\delta u_2}{l_2} \quad (18)$$

$$k_{(out)2}^d = \frac{F l_2}{\delta \theta_2} \quad (19)$$

独立測定法は測定器として普通のダイヤルゲージなどでも十分測定可能である。しかし、この方法も手間が非常に掛かるのが欠点である。なお、今回の実験ではサーボを掛けた状態での独立測定は行っていない。

Table 1 Equivalent joint stiffnesses of PUMA560 ($k_{(out)_i}$)

Unit : [Nm/deg]

i	Gear Ratio (η_i)	Simultaneous measurement				Individual measurement	Remarks
		Servoing state		Fixed motor	$\frac{k^{s-e}_{(out)_i}}{k^m_{(out)_i}}$		
		$k^s_{(out)_i}$	$k^{s-e}_{(out)_i}$		$k^d_{(out)_i}$		
1	62.611	65.48	118.1	472.2	0.250	175.3	The equivalent stiffness of 1st joint is not exact because, in calculation, it depends upon the end point position from the 1st joint axis. The joint angles of robot when measuring are explained at section 4.1 and 4.2.
2	107.825	236.3	1297	990.9	1.309	1007	
3	53.706	151.7	220.4	239.2	0.921	243.6	
4	76.036	23.46	30.39	33.51	0.907	27.11	
5	71.923	27.89	29.02	37.81	0.768	39.05	
6	76.686	19.19	21.69	32.68	0.664	22.61	
Remarks		With servo-stiffness	Without servo-stiffness	Purely mechanical stiffness

Fig. 7 Mechanical equivalent joint stiffness of PUMA560 (Without servo-stiffness)

4.3 測定結果と検討

Table 1 に同時測定および独立測定による PUMA560 の等価関節剛性を示す。第 1 軸の等価関節剛性は、外力によるリンク

の変形がロボットの姿勢，すなわち第 1 軸から手先までの距離によって変わるので，作業空間のすべての位置における測定を行わない限り正確な値を示すことはできない。サーボ状態で等

価関節剛性を同時測定するとき、得られたデータ ($k_{(out)i}^s$) から測定時の各軸のエンコーダ (いずれも、4000 [pulses/rev] のものを使用) 値の変化分を引いて計算すると純粋な駆動力伝達系のみの関節剛性 ($k_{(out)i}^{s-e}$) が得られる。この値はモータを機械的に固定して同時測定した値 ($k_{(out)i}^m$) と本来は等しいはずであるが、実際は Table 1 のように約 ± 30 [%] の差を見せている。

また、同時測定と独立測定による結果にも差が出ているが、これらの原因としては、リンクの変形によって生じる計算誤差と測定誤差、各関節や伝達機構に存在する摩擦の影響などが考えられる。外力によってリンクが変形すると定数パラメータとしてモデリングした α , a , d が変化し、マニピュレータやコピアンが不正確になるため計算上の誤差が生じるのが最も大きい原因である。例えば、実験で用いた PUMA560 の第3リンクは厚さ 0.8 [mm] のアルミ板を矩形にしたものであるため、外力による変形が大きく、これによる計算上の誤差が上のように現れる。したがって、リンクの変形が小さいマニピュレータであれば、より正確に関節剛性の同時測定が可能と見られる。

Table 1 に示した各関節の等価剛性はおおの 34 回の測定データを最小二乗法で処理したものである。測定データをプロットした Fig. 7 より各関節の等価剛性は線形と見なしてよいことが分かる。

5. おわりに

関節の等価剛性は力制御、位置制御、キネマティックキャリブレーションなどの分野で考慮せざるを得ない重要な要素である。特に、次世代の産業用ロボットシステムでは、CAD データに基づくオフラインプログラミングやロボット言語を用いた作業実行システムなどの実現を目指している。このようなシステムではロボットの絶対位置精度が高いことが必須条件となる。絶対位置精度を高めるためには、本稿で取り上げた等価関節剛性の同定が非常に重要である。

本研究では、我々が開発して測定精度の検定を行ったレーザ式手先微小変位測定装置を用いて、等価関節剛性を三つの方法で計測、比較検討を行った。独立測定法は最も単純かつ正確であるが一般性を持たず手間も掛かるので、本研究では一般性を持つ同時測定を試み、その実用可能性を確認した。なお、実測した等価関節剛性を用いたモデリングによる制御性能と、従来の柔軟関節を持つマニピュレータに対する制御系設計法による制御性能を比較するのも興味深いことであろう。経験的には、機械的等価関節剛性だけの測定には独立測定を、サーボ剛性を含んだ等価関節剛性の測定には同時測定法を推奨する。

参考文献

- [1] R.H. McEntire: "Three Dimension Accuracy Measurement Methods," The Industrial Robot, pp.105-112, 1976.
- [2] 森和男, 前田祐司, 西澤昭一郎: "産業用ロボットの特性試験法 (第3報)", 精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.119-120, 1989.
- [3] 周桑完, 前田浩一: "ロボットマニピュレータ用三次元測定装置の開発とその精度検定", 日本ロボット学会第10回学術講演会予稿集, no.1, pp.193-196, 1992.
- [4] D.E. Whitney, C.A. Lozinski and J.M. Rourke: "Industrial Robot Forward Calibration Method and Results," J. Dyn. Sys. Meas. and Cont, vol.108, pp.1-8, 1986.
- [5] M.C. Leu, V. Dukovski and K.K. Wang: "An Analytical and Experimental Study of The Stiffness of Robot Manipulators with Parallel Mechanisms," In Robotics and Manufacturing Automation, M. Donath and M. Leu, Editors, ASME, pp.137-143, New York, 1985.
- [6] P.V. Kokotovic: "Recent Trends in Feedback Design-An Overview," Automatica, vol.21-3, pp.225-236, 1985.
- [7] K. Khorasani and M.W. Spong: "Invariants Manifolds and Their Application to Robot Manipulators with Flexible Joints," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.978-983, 1985.
- [8] 岡本健一, 大須賀公一ほか: "柔軟関節を持つマニピュレータの適応的軌道追従制御", 日本ロボット学会誌 vol.7, no.2, pp.59-64, 1989.
- [9] 有本卓: "これからのロボットのモデリング", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.84-88, 1989.
- [10] 吉川恒夫: "ロボット制御基礎論", コロナ社, 1988.
- [11] H. Asada and J.J.E. Slotine: "Robot Analysis and Control," John Wiley & Sons, Inc., 1986.

周桑完 (Sangwan Joo)

1959年11月30日韓国ソウル生まれ。1993年大阪大学大学院基礎工学研究科(制御工学専攻)修士課程修了。現在、同大学院博士後期課程(機械工学専攻)在学中。組み立て作業アルゴリズム、手先効果器の開発について研究している。新しいメカニズム、測定装置などの考案に興味を持つ。

(日本ロボット学会学生会員)

前田浩一 (Hirokazu Mayeda)

1943年10月5日生。1966年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1971年同大学院基礎工学研究科博士課程単位取得退学。同年同大学基礎工学部制御工学科助手。助教授を経て、1992年より立命館大学理工学部情報工学科教授。この間(1978~1979)トロント大学電気工学科客員研究員。現在、ロボットのモデルベース制御および運動、作業知能などの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、システム制御情報学会、IEEEの会員。

(日本ロボット学会正会員)

付録 A. 独立測定の様子

$i=1, \dots, 6$	Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4	Joint 5	Joint 6
$\delta\theta_i \simeq$	$\tan^{-1} \frac{\delta u_1}{l_2 c_2 + l_{3cf} \cdot s_{32}}$	$\tan^{-1} \frac{\delta u_2}{l_2}$	$\tan^{-1} \frac{\delta u_3}{l_3}$	$\tan^{-1} \frac{\delta u_4}{l_{cf}}$	$\tan^{-1} \frac{\delta u_5}{l_{cf}}$	$\delta\theta_6 = \left(\begin{array}{l} \text{Directly measured} \\ \text{by the test rig} \end{array} \right)$
$k_{(out)_i} =$	$\frac{F(l_2 c_2 + l_{3cf} \cdot s_{32})}{\delta\theta_1}$	$\frac{F \cdot l_2}{\delta\theta_2}$	$\frac{F \cdot l_3}{\delta\theta_3}$	$\frac{F \cdot l_{cf}}{\delta\theta_4}$	$\frac{F \cdot l_{cf}}{\delta\theta_5}$	$\frac{F \cdot \tau_6}{\delta\theta_6}$
where, $c_2 = \cos \theta_2$, $s_{32} = \sin(\theta_3 - \theta_2)$, $l_{3cf} = (l_3 + l_c + l_f)$, $l_{cf} = (l_c + l_f)$

Fig. A-1 Individual measurements of joint stiffness