H^∞ 制御に基づくセンサレス力制御

正員 大石 潔 (大阪工大)
 准員 宮崎 勝 (大阪工大)
 准員 藤田 昌弘 (大阪工大)

Sensorless Force Control Based on H^∞ Control Theory

Kiyoshi Ohishi, Member, Masaru Miyazaki, Associate, Masahiro Fujita, Associate (Osaka Institute of Technology)

This paper proposes the new force control without force sensor. The proposed system is designed by H^∞ control theory. Generally, The force sensor is usually used on the force control system. However, according to both the performance of force sensor and the condition of target environment, the force sensor can not be mounted to the robot manipulator.

Acceleration controller based on the disturbance observer has been studied to overcome the problem of force disturbance and nonlinear effect. However, it is difficult for this system to take account of the frequency characteristics of both sensor noise effect and disturbance rejection systematically. This paper proposes the new acceleration controller and the torque observer based on H^∞ control theory. These proposed systems are systematically designed by the mixed sensitivity H^∞ control design method. These systems have a simple and robust structure.

キーワード： H^∞ 制御，加速度制御，トルクオブザーバ，力制御

1. ま え が き

ロボットマニピュレータにおいて，力制御に代表されるモーション制御を高精度に行うには，種々のセンサを用いて周囲の環境を認識し，その情報を考慮に入れてマニピュレータを制御することが非常に重要である⁽¹⁾⁽²⁾。更に，モーション制御においては，その動作に伴い干渉力や摩擦力などの様々な外力がマニピュレータのアクチュエータに印加される。高速で正確なモーション制御を行うために，この外力の影響を克服する様々な努力がなされてきた。分解加速度制御⁽¹⁾や適応制御もそれらを克服する一つの方法であるが，制御則の計算が複雑であるなどの理由から，あまり実用化されていない。

このため，外乱オブザーバ⁽³⁾やモデル追従加速度制御系⁽⁴⁾⁽⁵⁾のような加速度指令に基づいて制御する加速度コントローラが提案されてきた。この加速度コントローラを用いると，ロバストなモーション制御が簡

単に行うことができることが知られている。しかしながら，外乱オブザーバやモデル追従加速度制御系による加速度コントローラでは，観測雑音や外乱抑圧の周波数特性を系統的に考慮して設計することが難しい場合がある。そこで本論文では，加速度コントローラに所望の周波数特性をもたせるために，まず， H^∞ 制御の混合感度問題を導入して，加速度コントローラの設計を行う。

また力制御では，マニピュレータと環境との間の接触力を測定するのに，一般に力センサを用いている。しかしながら，この力センサには次に示す問題が存在する^{(6)~(8)}。

(1) 力センサを設置したマニピュレータの剛性が低くなり，全体の機構がぜい弱になる。

(2) 力センサの出力と実際の力の関係は非線形になることが多い。

(3) 力センサを設置すると，マニピュレータの作業空間により，その動作が制約されることがある。

(4) 高温下での動作など、環境により力センサを設置できない場合がある。

本論文ではトルクオブザーバを用いて、目標環境に印加された力を推定する機構を設け、その信号を加速度コントローラに基づく力制御系にフィードバックする。これより、力センサを必要としない力制御系を構成することが可能となる。このトルクオブザーバも H^∞ 制御の混合感度問題に基づいて構成されるので、所望の周波数特性をもった力制御系が、力センサを必要とせずに実現できることになる。

2. H^∞ 加速度コントローラ

ロボットマニピュレータの各関節に設置されるアクチュエータのメカニカルな部分の構成図を図1に示す。モーション制御において、アクチュエータには摩擦力 T_{fr} 、干渉力 T_{int} 、重力 T_g 、負荷トルク T_l などから外力 T_{dis} が印加される。また、パラメータ変動として慣性力の変動 $\Delta J\dot{\omega}$ や粘性力の変動 $\Delta D\omega$ も存在する⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの影響を瞬時に抑圧し加速度指令 $\dot{\omega}^{cmd}$ に追従するコントローラを、 H^∞ 制御の混合感度問題に基づいて設計する。

加速度コントローラを設計するための混合感度問題の一般化プラントシステムは、図2のように考える。 $P(s)$ は制御対象であり、 $K(s)$ は混合感度問題を解いて求められる補償器である。 d は制御対象 $P(s)$ に入力される外乱である。ロボットマニピュレータのアクチュエータでは、外乱 d は $P(s)$ の前段に挿入されるのが通常である。しかしながら、出力への影響という点で着目すれば、外力 T_{dis} は図2の左側の部分のよう

図1 アクチュエータの構成図
Fig. 1. Block diagram of actuator.

図2 混合感度問題の一般化プラント
Fig. 2. Augmented system for mixed sensitivity H^∞ control design method.

に考えることができる。また、慣性力の変動 $\Delta J\dot{\omega}$ や粘性力の変動 $\Delta D\omega$ などのパラメータ変動を、制御対象の乗法的摂動とみなすと、外力 T_{dis} の一部と考えることができる。

(1)式は外乱抑圧特性を表す感度関数 $S(s)$ であり、(2)式は耐雑音特性を表す相補感度関数 $T(s)$ である。重み関数の $W_1(s)$ と $W_2(s)$ は、それぞれ $S(s)$ と $T(s)$ に対応している。また、 $S(s)$ と $T(s)$ は(3)式の関係がある。加速度コントローラの場合、アクチュエータの外乱抑圧特性を耐雑音特性を重視するため、所望の周波数特性を有する $S(s)$ と $T(s)$ が得られるように、 $W_1(s)$ は低い周波数領域で大きくなるように、 $W_2(s)$ は高い周波数領域で大きくなるように定める。これより H^∞ 制御の混合感度問題を解いて補償器 $K(s)$ を求める⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)K(s)} \quad (1)$$

$$T(s) = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} \quad (2)$$

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (3)$$

求めた補償器 $K(s)$ を用いて、図3に示すような加速度コントローラを構成する。ここで、 w は観測雑音である。この制御系における加速度指令 $\dot{\omega}^{cmd}$ から位置 θ までの伝達関数は(4)式のように表される。そして、外乱 d から位置 θ までの伝達関数は(5)式のように表される。(4)式より本加速度コントローラの応答は、相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性のみに依存して加速度指令 $\dot{\omega}^{cmd}$ に追従することになる。これより、本論文では提案する加速度コントローラを H^∞ 加速度コントローラと称する。 H^∞ 加速度コントローラは高ゲインコントローラになる。すなわち、高ゲインコントローラにすることによって、乗法的摂動 $\Delta(s)$ である $\Delta J\dot{\omega}$ と $\Delta D\omega$ の変動や外乱による変動を速やかに抑圧している。また、高ゲインコントローラになることによって起こされる安定性の問題は、 H^∞ 制御理論における小ゲイン定理によって証明される⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

H^∞ 加速度コントローラは、外乱抑圧や観測雑音の

図3 H^∞ 加速度コントローラの構成図
Fig. 3. Schematic diagram of H^∞ acceleration controller.

図 4 加速度コントローラ
Fig. 4. Acceleration controller.

影響が所望の周波数特性に設計されるので、実用上の周波数範囲では図 4 のように表すことができる。これに対して、モデル追従加速度制御系に代表される従来の加速度コントローラは、加速度指令に含まれる観測雑音に対して、考慮することが難しかった。このことは、加速度指令から出力までの伝達関数を比較すると、容易に理解される⁽¹²⁾。 H^∞ 制御理論の混合感度問題では、この点を系統的に考慮して、加速度コントローラを設計することができる。この点が H^∞ 加速度コントローラによって改良された点になる。

$$\frac{\theta}{\dot{\omega}_{cmd}} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} \frac{1}{s^2} = T(s) \frac{1}{s^2} \cdots (4)$$

$$\frac{\theta}{d} = \frac{1}{1+P(s)K(s)} = S(s) \cdots (5)$$

3. 加速度コントローラによる力制御

加速度コントローラによる力制御系は図 5 のように構成される。同図において、 J_n は任意に設定できる仮想慣性モーメントで、 K_ω は目標環境との間の振動を抑制するためのフィードバック項である。マニピュレータが目標環境に力を加えると、同じ大きさの反力 T_{reac} がアクチュエータにも加わる。反力の大きさは目標環境の粘性定数 D_{en} とばね定数 K_{en} により定まる。この力制御系の力指令 T_{cmd} から反力 T_{reac} までの伝達関数は、加速度コントローラの成立している周波数領域では(6)式のように表すことができる。この伝達関数より、力制御系の応答特性は仮想慣性モーメント J_n によって定めることができることがわかる。このとき、力の情報は通常力センサからのフィードバック信号によって得ることになる。しかしながら、何らかの都合で力センサを装着できない場合、この力制御系は構成することができなくなる。そこで本論文では、トルクオブザーバによる反力推定機構を用いて、力センサを必要としない力制御を実現する。

$$\frac{T_{reac}}{T_{cmd}} = \frac{D_{en}s + K_{en}}{J_ns^2 + (J_nK_\omega + D_{en})s + K_{en}} \cdots (6)$$

4. H^∞ トルクオブザーバ

トルクオブザーバによる反力推定機構を実現するために、ロボットマニピュレータのアクチュエータに印

図 5 加速度コントローラに基づく力制御系の構成図
Fig. 5. Schematic diagram of force control system based on acceleration controller.

図 6 トルクオブザーバの構成図
Fig. 6. Block diagram of torque observer.

加される力を推定するトルクオブザーバを、本論文では H^∞ 制御の混合感度問題に基づいて設計する。

一般に、トルクオブザーバは図 6 のように表される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。制御対象のアクチュエータのダイナミクス $P(s)$ と並列に規範モデル $P_m(s)$ を配置し、それぞれの出力の偏差を並列補償要素 $H(s)$ に入力する。並列補償要素 $H(s)$ の出力が外力 T_{dis} の推定値 $\hat{T}_{dis}$ となる。このとき、その伝達関数は、(7)、(8)式のようにになる。また、図 6 のトルクオブザーバは図 7 のシステムに等価変換することができる。ただし、 $C_1(s)$ と $C_2(s)$ は(9)、(10)式のようにになる。

図 7 のシステムに対して H^∞ 制御の混合感度問題を考えると、図 8 のような一般化プランが考えられる。ここで、 $C_2(s)$ は補償器 $K(s)$ となる。また、このトルクオブザーバの伝達関数は(11)、(12)式となり、それぞれ感度関数 $S(s)$ と相補感度関数 $T(s)$ に一致する。

$$\frac{\hat{T}_{dis}}{T_{dis}} = \frac{1}{1/[F(s)\{1 - P_m^{-1}(s)P(s)\}] - 1} \cdots (7)$$

$$\frac{\hat{T}_{dis}}{T_{dis}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)} \cdots (8)$$

図 7 トルクオブザーバの等価変換図
Fig. 7. Equivalent system of torque observer.

図 8 トルクオブザーバにおける混合感度問題の一般化プラント

Fig. 8. Augmented system for mixed sensitivity H^∞ control design method of torque observer.

$$C_1(s) = \frac{1}{1-F(s)} \quad (9)$$

$$C_2(s) = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)}{1-F(s)} \quad (10)$$

$$\frac{\theta}{d} = \frac{1}{1 + \frac{F(s)}{1-F(s)}P(s)P_m^{-1}(s)} = \frac{1}{1+P(s)K(s)} = S(s) \quad (11)$$

$$\frac{\theta}{\omega} = \frac{\frac{F(s)}{1-F(s)}P(s)P_m^{-1}(s)}{1 + \frac{F(s)}{1-F(s)}P(s)P_m^{-1}(s)} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} = T(s) \quad (12)$$

以上より、加速度コントローラを設計したときと同様に、所望の周波数特性をもつ補償器 $K(s)$ を H^∞ 制御によって求めることができることになる。図 8 の補償器 $K(s)$ と並列補償要素 $H(s)$ との間には (13) 式と (14) 式の関係が成立する。また、(8) 式は (15) 式のように表せるので、トルクオブザーバは相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性で外力 T_{dis} を推定することになる。従って、トルクオブザーバでは、外力 T_{dis} の推

定値に含まれる雑音の影響を抑えるため、相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性が対雑音特性を満足するように H^∞ 制御の混合感度問題の重み関数を設定することになる。

$$H(s) = F(s)P_m^{-1}(s) \quad (13)$$

$$F(s) = \frac{K(s)}{P_m^{-1}(s) + K(s)} \quad (14)$$

$$\frac{\hat{T}_{dis}}{T_{dis}} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} = T(s) \quad (15)$$

5. 反力推定機構

ロボットマニピュレータの各関節に設置されたアクチュエータは動作時に外力 T_{dis} が印加される。これは、負荷トルク T_l 、干渉力 T_{int} 、重力 T_g 、摩擦力 T_{frc} 、慣性力の変動 $\Delta J\dot{\omega}$ とロボットマニピュレータが、目標環境に力を加えたときに生じる力 T_{reac} の総和となる。これは (16) 式のように表される。一般に、力制御時は非常に低速であるので、干渉力 T_{int} と慣性力の変動 $\Delta J\dot{\omega}$ はほとんど無視できるほど小さい値となる。従って、(16) 式は (17) 式のように表せることになる。また、(17) 式において、負荷トルク T_l と重力 T_g は通常は既知である。従って、 H^∞ トルクオブザーバを用いて外力 T_{dis} を推定し、アクチュエータ自身の摩擦力 T_{frc} 、負荷トルク T_l と重力 T_g を考慮すれば、反力 T_{reac} は (18) 式のように求めることができる。ここで、 $\hat{\cdot}$ の付いた値は推定値を表す。

$$T_{dis} = T_l + T_{int} + T_g + T_{frc} + T_{reac} + \Delta J\dot{\omega} \quad (16)$$

$$T_{dis} \approx T_{frc} + T_{reac} + T_l + T_g \quad (17)$$

$$\hat{T}_{reac} = \hat{T}_{dis} - \hat{T}_{frc} - T_l - T_g \quad (18)$$

アクチュエータ自身に加わる摩擦には速度に比例して反力を発生する粘性摩擦と、速度の符号だけに依存して大きさが一定のクーロン摩擦と、物体が静止時から動き始めるときに生じる静止摩擦が一般に考えられる。実際に力制御を行っているときには、アクチュエータが動いているので、本論文では摩擦モデルを (19) 式のように扱うこととする。ただし、 D は粘性摩擦係数、 D_{frc} はクーロン摩擦を表す。粘性摩擦係数 D とクーロン摩擦 D_{frc} を同定するアルゴリズムとして、本論文では逐次計算型最小二乗推定法を用いることにする⁽¹¹⁾。

$$T_{frc} = D\omega + D_{frc} \quad (19)$$

未知パラメータベクトルを $\alpha(k)$ 、測定値ベクトルを $m(k)$ 、モデル出力を $\gamma(k)$ とすると、逐次計算型最小二乗推定法は (20)～(22) 式ようになる。これより、本同定アルゴリズムは (23)、(24) 式ようになる。

ここで、 $P(k)$ は適応ゲイン行列と呼ばれる。その初期値 $P(0)$ は(25)式のように表され、そのとき η は大きな正数をとることになる。ただし、 I を単位行列とする。ここで、 η は忘却係数である。

$$\alpha(k) = [D(k) \ D_{trc}(k)]^T \dots\dots\dots (20)$$

$$m(k) = [\omega(k) \ 1]^T \dots\dots\dots (21)$$

$$\gamma(k) = \hat{T}_{dis}(k) \dots\dots\dots (22)$$

$$\alpha(k+1) = \hat{\alpha}(k) + \frac{P(k)m(k+1)\{\gamma(k+1) - m^T(k+1)\hat{\alpha}(k)\}}{\mu + m^T(k+1)P(k)m(k+1)} \dots\dots\dots (23)$$

$$P(k+1) = \frac{1}{\mu} \left\{ P(k) - \frac{P(k)m(k+1)}{\mu + m^T(k+1)} * \frac{m^T(k+1)P(k)}{P(k)m(k+1)} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$P(0) = \eta I \dots\dots\dots (25)$$

以上より、反力推定機構は図9に示すように H^∞ トルクオブザーバと同定アルゴリズムの二つの部分から構成される。まず、初めに摩擦モデルを同定する。これはロボットマニピュレータを目標環境に力を印加させていない状態で等加速度運動させ、同定アルゴリズムにより摩擦モデルを同定する。次に、同定した値を用いて摩擦モデルを構成し、図9より摩擦モデルの同定アルゴリズムを切放す。そして、 H^∞ トルクオブザーバによって推定した外力 $\hat{T}_{dis}$ の値から、摩擦モデルによる摩擦力の推定値を引くことにより、反力の推定値 $\hat{T}_{rec}$ を得ることになる。この反力の推定値を力センサの代わりに、力制御系にフィードバックすることになる。

とになる。

この摩擦モデルはオフラインで求められるので、実際に力制御を行う直前に摩擦モデルを同定して、実際の摩擦力との差が極力小さくなるようにする必要がある。ただし、ロボットマニピュレータのアクチュエータにDDモータを用いる場合には、摩擦モデルの係数の変動は非常に小さいので、摩擦モデルの変動は無視できると考える。

図9 反力推定機構の構成図

Fig. 9. Schematic diagram of reaction force estimation system.

図10 センサレス力制御系の構成図

Fig. 10. Schematic diagram of force control system without force sensor.

6. センサレス力制御系

H^∞ 加速度コントローラに基づく力制御系に、 H^∞ トルクオブザーバにより構成された反力推定機構によって推定された反力 $\hat{T}_{\text{reac}}$ をフィードバックすることにより、力センサを必要としない力制御系が図 10 のように構成できる。このとき、 H^∞ 加速度コントローラの相補感度関数は、ロバストな加速度コントローラを実現する周波数領域を雑音の影響を考慮して設定することになる。また、 H^∞ トルクオブザーバの相補感度関数は、力制御系の周波数応答特性を考慮して設計することになる。以上より、センサレス力制御系の全体のシステムは H^∞ 制御の混合感度問題に基づいて統一的に設計されることになる。

7. 実験結果

実験に用いたロボットマニピュレータは、図 11 に示すスカラ型 2 関節 DD マニピュレータである。このロボットマニピュレータの 1 軸目は DD モータによって、2 軸目は DC サーボモータと遊星ギアによって駆動される。なお本実験において、第 2 関節は図 11 に示すように第 1 関節の延長上に延ばした状態を保っている。実験のハードウェアシステムは図 12 のようになる。制御系はすべて DSP μ PD 77230 のソフトウェアアルゴリズムにより構築されている。サンプリング時間は $400 \mu\text{s}$ である。

実験に用いた H^∞ 加速度コントローラの感度関数 $S(s)$ と相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性は図 13 のように示される。このときの重み関数 $W_1(s)$, $W_2(s)$ はそれぞれ (26), (27) 式のように与えられる。また、 H^∞ トルクオブザーバの感度関数 $S(s)$ と相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性は図 14 に示される。そして、その重み関数 $W_3(s)$, $W_4(s)$ はそれぞれ (28), (29) 式

である。

$$w_1(s) = \frac{0.028(0.001s+1)}{0.001s} \quad (26)$$

$$w_2(s) = \frac{3 \times 10^{-6}s^2}{1} \quad (27)$$

$$w_3(s) = \frac{0.3(0.02s+1)}{0.02s} \quad (28)$$

$$w_4(s) = \frac{4 \times 10^{-5}s^2}{1} \quad (29)$$

本実験ではまず、摩擦モデルの同定実験を行った。(23), (24) 式の同定アルゴリズムを用いて、ロボットマニピュレータに一定の加速度指令を与えて空振りさせた状態で同定実験を行った。このとき用いた同定アルゴリズムの定数を表 1 に示す。同定実験の結果は図 15 に示される。本同定アルゴリズムによって得られ

図 11 スカラ型 2 関節 DD ロボットマニピュレータ

Fig. 11. Tested two-degrees-of-freedom DD robot manipulator.

図 12 DD ロボットマニピュレータのハードウェアシステム

Fig. 12. Hardware system of tested DD robot manipulator.

た摩擦モデルの値は、同定実験の25～30秒の間の同定値を平均している。これによって求められた摩擦モデルなどの値は表2に示される。

次に、センサレス力制御の実験結果を示す。本実験は方形波状の力指令 T_{cmd} に対する目標環境の力の応答を、仮想慣性モーメント J_n を変化させた状態で観測した。実験結果は図16に示す。比較のために力セ

ンサフィードバックによる力制御の実験結果も図16に示している。

実験結果より、提案するセンサレス力制御系が、任意の仮想慣性モーメントに対して、所望の力応答を達成していることがわかる。また、このセンサレス力制御と従来の力センサフィードバックによる力制御と比較しても、遜色のない力応答が得られていることもわ

図 13 H^∞ 加速度コントローラの周波数特性
Fig. 13. Frequency characteristics of experimental H^∞ acceleration controller.

図 14 H^∞ トルクオブザーバの周波数特性
Fig. 14. Frequency characteristics of experimental H^∞ torque observer.

(a) パラメータ推定時の位置指令 θ^{ref}

(b) 粘性摩擦係数 $\hat{D}$ の同定結果

(c) クーロン摩擦 $\hat{D}^{fc}$ の同定結果

図 15 摩擦モデルの同定結果

Fig. 15. Experimental results of identification algorithm of tested DD robot manipulator.

表1 同定アルゴリズムのパラメータ
Table 1. Parameter of identification algorithm for friction model.

Parameter	Value
η	50
μ	0.999

表2 反力推定機構のパラメータ
Table 2. Parameter of reaction force estimation system.

粘性摩擦係数 $\hat{D}$	8.22×10^{-8} kg · f · s
クーロン摩擦 $\hat{D}_{mc}$	1.38×10^{-4} kg · f
重力 T_g	0.0 kg · f
負荷トルク T_l	0.0 kg · f

かる。

8. ま と め

本論文では、 H^∞ 制御により系統的に設計した H^∞ 加速度コントローラと H^∞ トルクオブザーバを用いて、力センサを使わないで力制御を行うセンサレス力制御を提案した。提案するセンサレス力制御系は、従来の力制御方式と比べて以下の点が改良されている。

- (1) 力センサを必要としない。
- (2) 力制御の周波数帯域を相補感度関数によって指定できる。
- (3) 位置センサからの観測雑音を相補感度関数によって考慮することができる。

新しい段落へ提案する制御系は DSP のソフトウェアにより容易に構築される。実験結果より、提案する

(i) $J_n = 0.637 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(i) $J_n = 0.637 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(ii) $J_n = 1.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(ii) $J_n = 1.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(iii) $J_n = 3.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(a) 力センサを用いた力制御の実験結果

(iii) $J_n = 3.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

(b) センサレス力制御の実験結果

図 16 実験結果

Fig. 16. Experimental results of force control based on virtual inertia J_n .

センサレス力制御系は所望の応答を実現し、力センサフィードバックによる力制御と比較しても、遜色なく応答することが確認された。

(平成3年12月12日受付)

文 献

- (1) C. H. An, C. G. Atkeson & J. M. Hollerbach: Model-Based Control of A Robot Manipulator (1988) The MIT Press
- (2) 杉本: 「ロボットアームの力フィードバック制御」, 計測と制御, **25**, 45 (昭61-1)
- (3) 駒田・村上・大西: 「加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」, 電学論 D, **109**, 325 (平元-5)
- (4) 松田・大石: 「位置情報だけを用いた DSP による加速度制御系」, 同上 D, **110**, 101 (平2-2)
- (5) 大石・松田: 「DD アクチュエータの力とコンプライアンスのロバスト制御」, 同上 D, **110**, 1133 (平2-11)
- (6) K. S. Fu, R. C. Gonzalez & C. S. G. Lee: ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence (1987) McGraw-Hill
- (7) J. J. Craig: Introduction to Robotics Mechanics & Control (1986) ADDISON WESLEY
- (8) 館・橋・荒井・西澤・ホセ: 「力センサを用いないダイレクトドライブマニピュレータのインピーダンス制御」, ロボット学誌, **7**, 60 (平元-6)
- (9) 美多: 「ロバスト制御」, 電学誌, **110**, 649 (平2-8)
- (10) 木村: 「LQG から H^∞ へ」, 計測と制御, **29**, 111 (平2-8)
- (11) 中溝: 信号解析とシステム同定 (昭63) コロナ社
- (12) 藤田・宮崎・大石・萩野・谷口: 「モデル追従加速度制御系と H^∞ 加速度コントローラとの特性比較」, 平4 電気学会全大, No. 639

大 石 潔 (正員)

昭和32年10月生。61年3月慶応大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月大阪工業大学電気工学科講師, 平成元年同助教授, 現在に至る。工学博士。

1986年IEEE/IECON'85 Outstanding Paper Award。主として, 電動機制御, ロボットに関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会会員。

宮 崎 勝 (准員)

昭和43年10月生。平成3年3月大阪工業大学電気工学科卒業。現在, 同大学大学院工学研究科修士課程在学中。主として, モーションコントロールの研究に従事。

藤 田 昌 弘 (准員)

昭和43年3月生。平成3年3月大阪工業大学電気工学科卒業。現在, 同大学大学院工学研究科修士課程在学中。主として, モーションコントロールに関する研究に従事。