

ロボットアームの動力学モデリングに基づく振動抑制制御技術

Vibration-Suppression Control Technology for Robot Arms Utilizing Dynamics Modeling

大明 準治

■ OAKI Junji

自動化ラインの生産性向上のために導入するロボットアームを高速化するには、各関節を駆動するモータの高加減速化が必要である。しかし高加減速化すると、関節に内蔵される減速機の弾性によってアーム先端に振動が発生する。作業時間短縮の障害になる振動を抑制するには、計測できない関節の軸ねじれ角速度を推定してフィードバックすることが有効であり、ロボットアームの動力学モデルに基づく制御が必要になる。しかし、その推定に用いる非線形状態観測器のゲイン設計は難しい。

そこで東芝は、ロボットアームの動力学モデルの同定精度が良いことを利用してゲイン設計が不要な非線形状態観測器を考案し、従来制御系への追加が容易な振動抑制制御技術を開発した。

Serial-link robot arms have been introduced into automated lines in order to improve productivity. To further increase their speed of operation, these robot arms must be controlled with high acceleration and deceleration while suppressing arm-tip vibration due to elasticity of the reduction gears built into each joint of the arms. A dynamic model-based control technology taking joint torsions of the robot arm into consideration is required for this purpose. However, it is difficult to design feedback gains of the nonlinear observer for estimation of the torsion angular velocity.

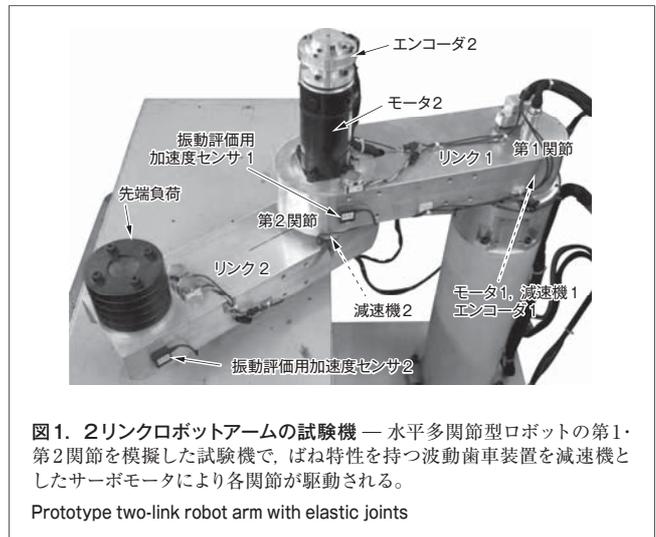
As a solution to this issue, Toshiba has developed a vibration-suppression control technology using a torsion angular velocity feedback scheme with a nonlinear observer that eliminates the need to design feedback gains by taking advantage of the high identification accuracy of the dynamic model employed. This technology can be implemented as a controller that can be plugged into existing joint servos.

1 まえがき

自動化ラインの生産性向上のために導入するロボットアーム⁽¹⁾を高速化するには、位置決め機構の各関節を駆動するモータの高加減速化が必要である。しかし、高加減速化だけでは関節に内蔵される減速機の弾性でアーム先端が振動するため、位置決め動作の整定に待ち時間が必要で作業時間短縮の障害になる。振動の抑制には、ロボットアームの動力学モデルに基づく制御が必要だが、これを記述するための物理パラメータについては、東芝は既に、数秒間のロボット動作データから迅速かつ高精度に推定する技術を開発している^{(2), (3)}。

シリアルリンク^(注1)で構成されるロボットアームの振動抑制制御では、エンコーダで計測するモータ角度と動力学モデルに基づいて各関節の軸ねじれ角速度（リンク角速度とモータ角速度の差）を状態観測器で推定してフィードバックし、振動を減衰させる方式⁽⁴⁾が有効である。しかし、動力学モデルは非線形なので状態観測器のゲイン設計が容易ではなく、状態観測器が不要なフィードフォワード方式⁽⁵⁾も考えられるが、フィードバック方式より外乱に弱く振動抑制性能は劣る。

そこで当社は、動力学モデルの同定精度の良さを利用してゲイン設計が不要な非線形状態観測器を考案し、軸ねじれ角速



度のフィードバックによる振動抑制制御技術を開発した⁽⁶⁾。これは、既存の位置決め制御系への追加が容易である。ここでは、2リンクロボットアームの試験機を用いた振動抑制と位置決め高速化の検証について述べる。

2 2リンクロボットアームの動力学モデル

図1に示す試験機は、水平多関節型のロボットアーム⁽¹⁾の第

(注1) 複数の連結機構を直列に配して、先端の位置決めをする構造。

1・第2関節を模擬している。各関節は、ばね特性を持つ波動歯車装置を減速機としたサーボモータで駆動される。減速機1と減速機2の減速比は、いずれも1/50である。ここで、モータ側の回転角度はエンコーダで計測できるが、リンク側の回転角度は計測できないことから、振動抑制制御の評価用に各リンクに加速度センサを貼り付ける。そして、加速度センサ信号の積分とエンコーダ信号の時間差分を融合させた信号処理によって、リンク角速度とリンク角度を演算する⁽²⁾。

2リンクロボットアームの動力学モデルは、1リンク2慣性系^(注2)の線形微分方程式二つと、ラグランジュの運動方程式から導かれる2リンク剛体機構の非線形微分方程式二つとを組み合わせてベクトル化して、式(1)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 M_M \ddot{\theta}_M + D_M \dot{\theta}_M + f_M \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_M) &= E u - N_G [K_G (N_G \theta_M - \theta_L) + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)] \\
 M_L(\theta_L) \ddot{\theta}_L + c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) + D_L \dot{\theta}_L &= K_G (N_G \theta_M - \theta_L) + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)
 \end{aligned} \quad (1)$$

- $\theta_M = [\theta_{M1}, \theta_{M2}]^T$: モータ角度 (1, 2は関節番号)
- $\theta_L = [\theta_{L1}, \theta_{L2}]^T$: リンク角度
- $M_L(\theta_L) \in R^{2 \times 2}$: リンク慣性行列
- $c_L(\dot{\theta}_L, \theta_L) \in R^{2 \times 1}$: 遠心・コリオリトルクベクトル
- $M_M = \operatorname{diag}(m_{M1}, m_{M2})$: モータの回転体の慣性
- $D_M = \operatorname{diag}(d_{M1}, d_{M2})$: モータの粘性摩擦係数
- $D_L = \operatorname{diag}(d_{L1}, d_{L2})$: リンクの粘性摩擦係数
- $K_G = \operatorname{diag}(k_{G1}, k_{G2})$: 減速機のばね定数
- $D_G = \operatorname{diag}(d_{G1}, d_{G2})$: 減速機の粘性減衰係数
- $N_G = \operatorname{diag}(n_{G1}, n_{G2})$: 減速比 ($n_{G1}, n_{G2} \leq 1$)
- $f_M = [f_{M1}, f_{M2}]^T$: モータ軸クーロン動摩擦トルク
- $E = \operatorname{diag}(e_1, e_2)$: 電圧 (電流指令値) トルク変換定数
- $u = [u_1, u_2]^T$: 入力電圧 (モータ電流制御系への指令値)

ここで、 $\dot{\theta}_M$ 及び $\ddot{\theta}_M$ はモータの角速度及び角加速度、 $\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_M)$ は $\dot{\theta}_M$ の符号化関数、 $\dot{\theta}_L$ 及び $\ddot{\theta}_L$ はリンクの角速度及び角加速度を表す。また、 $[\]^T$ は転置行列、 $\operatorname{diag}(\)$ は対角行列、 $R^{2 \times 2}$ は実数の 2×2 行列の集合、 $R^{2 \times 1}$ は実数の 2×1 ベクトルの集合を表す。

次に、モータのエンコーダ信号を用いた従来の角度・角速度制御系について述べる。これは、図2に示す破線部を除いた部分で構成され、式(2)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 u_i &= k_{FVi} v_{MRi} + k_{IVi} \int (v_{MRi} - \dot{\theta}_{Mi}) dt - k_{PVi} \dot{\theta}_{Mi} \\
 v_{MRi} &= k_{PPi} (\theta_{MRi} - \theta_{Mi}) \quad (i = 1, 2)
 \end{aligned} \quad (2)$$

- i : 関節番号
- θ_{MRi} : モータ角度目標値
- k_{PPi} : モータ角度比例フィードバック制御ゲイン

(注2) 二つの慣性体 (モータの回転子とリンク) が一つのばね要素 (減速機) で結合された構造。慣性の法則での慣性系とは異なる。

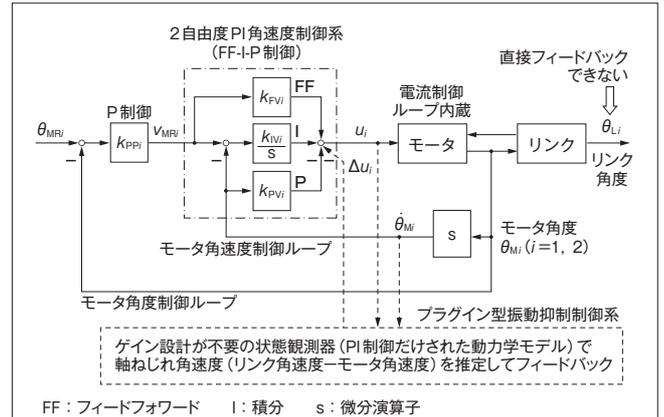


図2. 従来の角度・角速度制御系とプラグイン型振動抑制制御系のブロック図 — 従来制御系は、モータ角速度制御ループとその外側のモータ角度制御ループから構成される。振動抑制制御系は、状態観測器に基づくフィードバックを従来制御系にプラグイン方式で容易に追加できる。
Block diagram of conventional motor-angle controller and plug-in feedback controller for vibration suppression

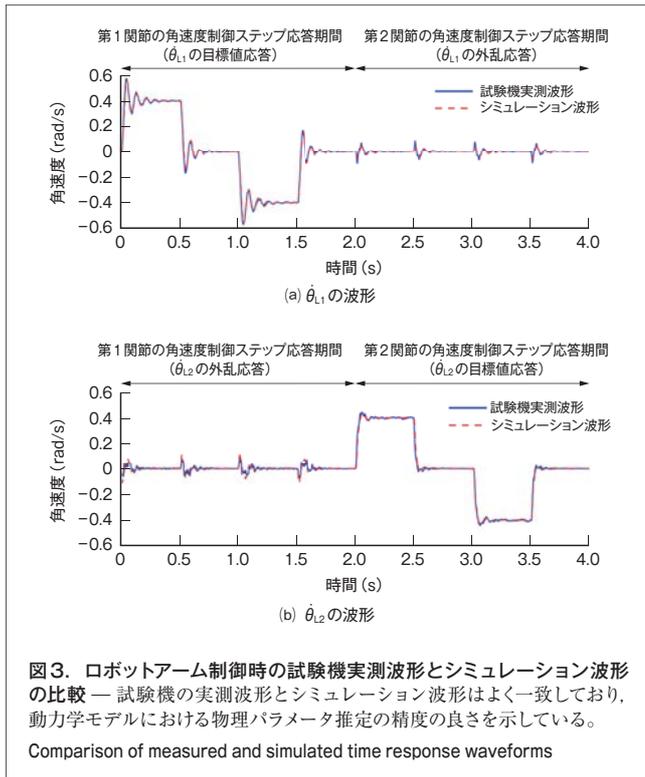
- v_{MRi} : モータ角速度目標値
- k_{FVi} : モータ角速度目標値フィードフォワード制御ゲイン
- k_{IVi} : モータ角速度偏差積分フィードバック制御ゲイン
- k_{PVi} : モータ角速度比例フィードバック制御ゲイン

式(1)に式(2)を代入することによって、動力学シミュレータを構築する。ここでは、図2でモータのP (比例) 角度制御ループを除いたモータの2自由度PI (比例、積分) 角速度制御系を用いて動力学モデルの精度を確認する。

試験機の $\dot{\theta}_{L1}$ 及び $\dot{\theta}_{L2}$ の実測波形とシミュレーション波形を図3に示す。第1関節の角速度制御ステップ応答の上げ下げ (第2関節は制御で固定)、及び第2関節の角速度制御ステップ応答の上げ下げ (第1関節は制御で固定) を行う4秒間の動作データを用いた。リンク1・リンク2角速度の目標値応答を示す第1・第2関節のステップ応答期間の波形や、リンク1・リンク2角速度の外乱応答を示す第2・第1関節のステップ応答期間に制御で固定したときの波形はよく一致している。動力学モデルの同定精度の良さ、具体的には、動力学モデルを記述するための物理パラメータである慣性モーメント、摩擦係数、及びばね定数の推定精度が良いことが確認できる^{(2), (3)}。また図3から、第1関節が第2関節に比べより振動的であることがわかる。

3 振動抑制制御系の構成方法と実験

ロボットアームの振動抑制制御では、エンコーダで計測するモータ角度と動力学モデルに基づいて各関節の軸ねじれ角速度を状態観測器で推定してフィードバックし、振動を減衰させる必要がある。しかし、動力学モデルが非線形でありロバスト性まで考慮に入れた状態観測器のゲイン設計は容易ではな



い。そこで、動力学モデルの推定精度の良さを利用し、前記の角速度制御系を用いたシミュレータを状態観測器として採用すると、式(3)及び(4)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_M = & M_M^{-1} \{-D_M \dot{\theta}_M - f_M \operatorname{sgn}(\hat{\theta}_M) \\ & + E\tau - N_G [K_G (N_G \hat{\theta}_M - \hat{\theta}_L) + D_G (N_G \hat{\theta}_M - \hat{\theta}_L)]\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_L = & M_L (\hat{\theta}_L)^{-1} [-c_L (\hat{\theta}_L, \hat{\theta}_M) - D_L \hat{\theta}_L \\ & + K_G (N_G \hat{\theta}_M - \hat{\theta}_L) + D_G (N_G \hat{\theta}_M - \hat{\theta}_L)] \end{aligned}$$

$$\tau = K_{PV} (\hat{\theta}_M - \hat{\theta}_M) + K_{IV} \int (\hat{\theta}_M - \hat{\theta}_M) dt + u \quad (4)$$

$K_{PV} = \operatorname{diag}(k_{PV1}, k_{PV2})$: 速度偏差比例制御ゲイン

$K_{IV} = \operatorname{diag}(k_{IV1}, k_{IV2})$: 速度偏差積分制御ゲイン

$\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$: 状態観測器内での入力 (モータ電流指令値)

ここで、 $\hat{\cdot}$ は推定値を表す。状態観測器のゲインは、モータ角速度制御系のPとI(積分)のゲインと同じものを選び、状態観測器への入力として、 $\hat{\theta}_M$ と u を用いる。式(3)を数値積分すれば、リンク角速度の推定値とモータ角速度の推定値が得られるので、両者の差から軸ねじれ角速度のフィードバック則が作れ、式(5)で表すことができる。

$$\Delta u_i = k_{TVi} (\hat{\theta}_{Li} / n_{Gi} - \hat{\theta}_{Mi}) \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

ここで、 k_{TVi} は軸ねじれ角速度の比例フィードバックゲインである。式(5)の Δu_i を式(2)の u_i から差し引くことによって、図2の振動抑制制御系が得られる。 k_{TVi} の値は、振動波形が減

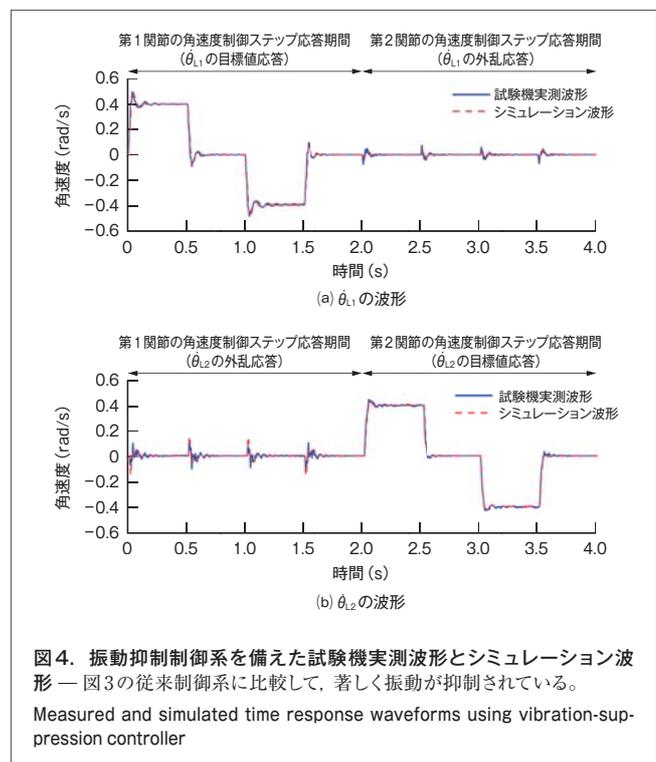
衰するように調整する。軸ねじれ角速度のフィードバックは、従来制御系の速応性を変化させずに減衰率だけを增加させる効果があり⁽⁶⁾、既存のロボットコントローラに追加が容易なプラグイン型の振動抑制制御系を構成できる。ロボットアーム先端の負荷を変更する場合は、動力学モデルにおける慣性モーメントの値を入れ替えればよい。

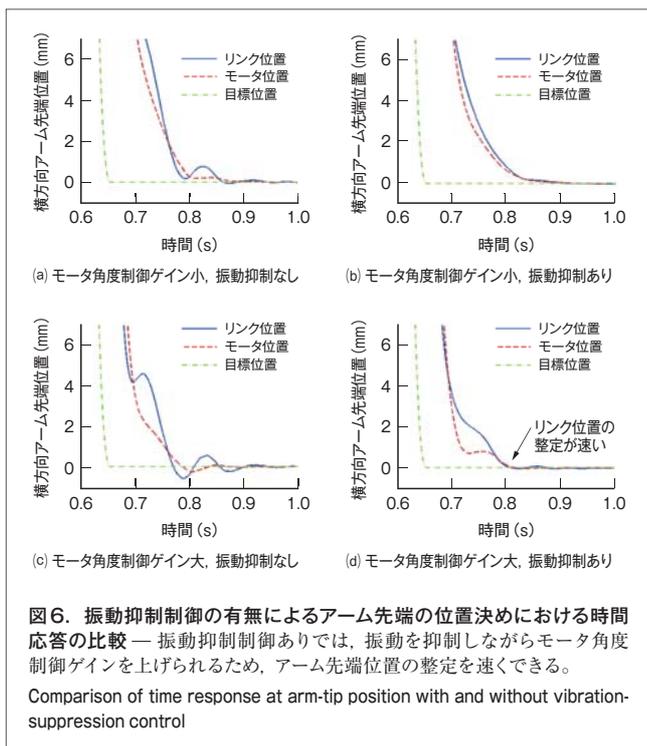
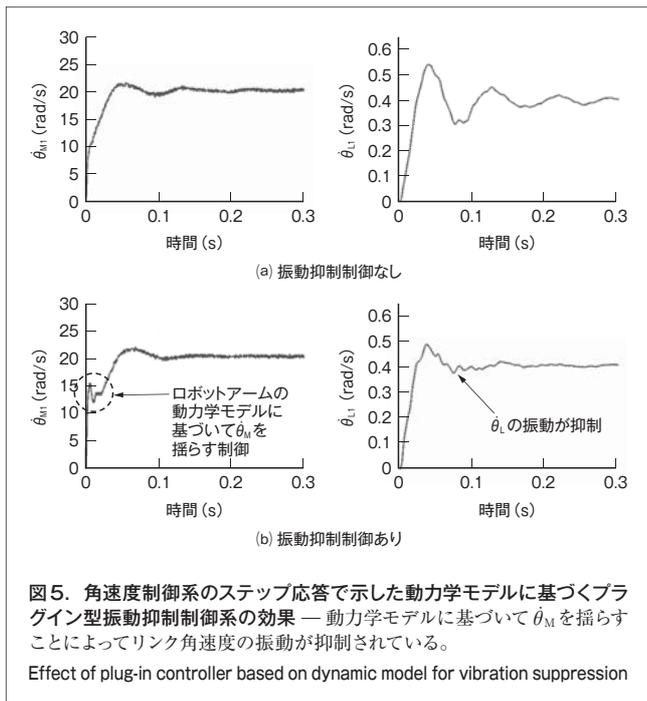
図2でモータ角度制御ループを除いたモータの2自由度PI角速度制御系を用いて振動抑制制御系を構築し、図3の場合とまったく同じ動作をさせた場合の $\hat{\theta}_{L1}$ 及び $\hat{\theta}_{L2}$ の実測波形とシミュレーション波形を図4に示す。図3に比べて著しく振動が抑制されていることがわかる。

図5(a)及び(b)は、図3及び図4の最初の0.3秒間における第1関節の角速度制御ステップ応答で、 $\hat{\theta}_{M1}$ と $\hat{\theta}_{L1}$ を振動抑制制御の有無で比較した波形である。図5(b)で明らかなように、振動抑制制御ありでは、動力学モデルに基づいて $\hat{\theta}_{M1}$ を揺らすことによって $\hat{\theta}_{L1}$ の振動が抑制されていることがわかる。

次に、試験機を用いて図2でモータ角度制御ループとモータの2自由度PI角速度制御系を含めた振動抑制制御系を構築し、角度制御系の位置決め整定時の実測波形について評価する。角度目標値は、S字加減速と呼ばれる滑らかな時間軌道で与える。第1、第2関節を同時に急加速した後に同時に急減速しロボットアーム先端を停止させるようなPTP (Point to Point) 動作を行わせた。

位置決め整定時のアーム先端位置の波形を図6に示す。リンク位置は各関節の θ_L から計算したアーム先端位置、モータ





位置は減速比を掛けた各関節のモータ角度から計算した仮想的なアーム先端位置、目標位置は各関節の目標リンク角度から計算したアーム先端の目標位置である。ロボットアームをまっすぐにした状態が停止位置で、第1、第2関節とも 0 rad、アーム先端位置の2次元座標値は (0, 0) mm である。図6では、横方向の変位 (y 座標の位置) だけを示している。

図6(a)及び(b)は、従来の制御系で調整した k_{PPi} を用いた場

合で、(b)の振動抑制制御ありでは(a)の振動抑制制御なしに比べてリンク位置が滑らかに整定している。一方、(c)及び(d)は、 k_{PPi} の値を25%大きくした場合である。(c)の振動抑制制御なしではオーバーシュートが出るので実用に供しないが、(d)の振動抑制制御ありでは、オーバーシュートを出さずに従来制御系の(a)より0.1秒も整定を速くすることができる。

4 あとがき

動力学モデルの同定精度の良さを利用してゲイン設計が不要な非線形状態観測器に基づく振動抑制制御技術を開発し、位置決め的高速化ができることを実証した。この振動抑制制御系は、従来のモータ角度・角速度制御系に容易に追加できるので、多くのメカトロニクス機器に応用できると考えている。

文献

- 東芝機械. “産業用ロボット”. 東芝機械ホームページ. <<http://www.toshiba-machine.co.jp/product/robot/index.html>>, (参照 2015-03-19).
- Oaki, J. et al. "Decoupling Identification Method of Serial Two-link Two-inertia System for Robot Motion Control". Proc. 18th IFAC World Congress. Milano, Italy, 2011-07, IFAC. 2011, p.14359 - 14366.
- 大明準治. ロボット運動制御のための動力学モデリングと物理パラメータ推定技術. 東芝レビュー. 67, 7, 2012, p.33-37.
- Spong, M. W. Modeling and Control of Elastic Joint Robots. J. Dynamic Systems, Measurement and Control. 109, 4, 1987, p.310 - 318.
- De Luca, A. "Feedforward/feedback laws for the control of flexible robots". Proc. 17th IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA, USA, 2000-04, IEEE. 2000, p.233 - 240.
- Oaki, J. et al. "Plug-in Feedback Using Physically Parameterized Observer for Vibration-Suppression Control of Elastic-Joint Robot". Proc. 13th European Control Conference. Strasbourg, France, 2014-06, EUCA. 2014, p.2058 - 2065.



大明 準治 OAKI Junji, Ph.D.

生産技術統括部 生産技術センター 制御技術研究部主任研究員、博士(工学)。システム同定理論の応用に関する研究・開発に従事。計測自動制御学会、電気学会、日本機械学会、IEEE会員。Control Technology Research Dept.