バネ機構を利用した位置/力センサレス把持制御

上級会員 島田 明* 非会員 岸和田 優*

Position/Force Sensorless Grasping Control Making Use of Mechanical Spring

Akira Shimada*, Senior Member, Yuh Kishiwada*, Non-member

This paper introduces a grasping control technique by a simple robot hand. The machine under the experiments is not a robot hand correctly. However alternatively we treat a linear machine driven by a DC servo motor as a simple robot hand. A feature of the hand is tensioned by mechanical springs. We have introduced a position sensor-less control method. It uses an observer to realize observability by using mechanical springs. It has an estimation error if the hand has collision with objects. However we have discovered that the error caused to realize a kind of compliance control on the hand. So, we present a new force control technique making use of this estimation error. In this paper, we show that the control system realize a compliance control mathematically and the typical application result of grasping control using a boiled egg.

キーワード：センサレス制御，ロボットハンド，力制御，把持，DC サーボモータ

Keywords: sensor-less control, robot hand, force control, grasping, DC servo motor

1. はじめに

センサレス制御技術は，センサで観測できない物理量を，観測可能な別の物理量から推定し，その推定値が所望の値になるように制御する技術である。電気機械系において，何らかの物理量を推定する目的でオブザーバが利用されるが，DC モータの印加電圧値と電流値を観測して位置を推定しようとしても，不可観測となり，オブザーバが設計できない。そのため，これまではオブザーバを用いた DC モータの位置センサレス制御は実現できなかった。これに対し，島田・榎本らはバネ機構を利用すると，印加電圧と駆動電流の 2 つの電気情報を観測すると，可観測性が得られ，機構の位置と速度とが推定でき，位置センサレス制御が可能になる方法を提案し，シミュレーションと実験で，実現可能であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。一方，AC モータに関しては，突極型同期モータを中心に磁極位置を推定するセンサレス制御技術が提案され，技術の基盤が築かれつつある^{(5)~(7)}。また，前記したバネ機構を利用するセンサレス制御技術を AC モータに拡張する方法も検討されている⁽³⁾。

本稿では，同センサレス制御技術をさらに発展をさせるため，制御対象が環境と接触する現象を調べ，同制御系がそのままコンプライアンス制御系の機能も果たすことを

示す⁽⁴⁾。コンプライアンス制御とは，力 f に対する変位 z の関係が $z = C_{mp} \cdot f$ となる制御のことである。具体的には，提案した位置センサレス制御実験で用いる台車が弾性を有する把持対象物に接触する際の状態変数の最終値を求め，台車が目標位置と接触位置との間隔にほぼ比例した力で対象物を押すことを示す。この台車と対象物の関係は，同制御技術をロボットハンドに応用する場合の指と把持対象物との関係を模擬したものである。そこで，対象物の弾性係数を変化させた場合の制御系のシミュレーション結果と実験結果とを紹介し，さらに応用実験として，ゆで卵を台車と剛体壁との間に挟み込み，安定な把持が実現できることを示す。その結果，提案する制御技術は，廉価なバネ機構を利用するだけで，位置センサも力センサも用いずに，接触対象がないときは位置制御系として動作し，対象物があるときはコンプライアンス制御系として動作することが示される。

2. バネを含むシステムの構造とモデリング

制御対象として，タイミングベルトを介して DC モータで駆動される台車に，バネ機構を付加した直動機構を仮定する（図 1 参照）。モータの回転運動を台車の直線運動に換える機構を用いることに本質的な意味はなく，バネの取り付けが容易で，実験がし易いためである。タイミングベルトは剛性が高く，質量が無視でき，モータ内部のロータ，プーリー，タイミングベルト，台車は互いに連結されて，一慣性系と見なせるものとする。基本構成が同様ならば他の

* 職業能力開発総合大学校電気システム工学科
〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1
Dept. of Electrical System Engineering, Polytechnic University
4-1-1, Hashimoto-dai, Sagami-hara 229-1196

図 1 センサレス制御装置図

Fig. 1. Structure of sensor-less control apparatus.

構造でも良い。図中左端の位置センサは評価用にのみ用いる。制御対象の支配方程式は式 (1)~(5) で表される。

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + K_e \cdot \dot{\theta} \quad (1)$$

$$\tau = K_t \cdot i \quad (2)$$

$$\tau = J \cdot \ddot{\theta} + D_m \cdot \dot{\theta} + f \cdot r \quad (3)$$

$$f = M \cdot \ddot{z} + D_z \cdot \dot{z} + n \cdot K \cdot z + f_c \cdot \text{sgn}(\dot{z}) \quad (4)$$

$$\dot{z} = r \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

但し、電圧 V 、電流 i 、回転角速度 $\dot{\theta}$ 、抵抗 R 、インダクタンス L 、発生トルク τ 、トルク定数 K_t 、誘起電圧定数 K_e 、慣性モーメント J 、モータの粘性係数 D_m 、台車の変位 z 、質量 M 、台車の粘性係数 D_z 、クーロン摩擦係数 f_c 、プーリの半径 r 、バネ定数 K 、バネの個数 n とする。 f は台車に与える力である。式 (4) 右辺第 4 項はクーロン摩擦を表す。また、式 (5) に見られるように、回転運動系の角速度と直動運動系の速度は互いに独立でないため、式 (1), (3) を式 (5) を用いて直動運動に統一して表すことができる。 $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [z, \dot{z}, i]^T$, $u = V$, $y = i$ として状態方程式を作成すると式 (6), (7) のように表される。

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + \left[0, -\frac{J_c}{\alpha} \text{sgn}(x_2), 0 \right]^T \quad (6)$$

$$y = C \cdot x \quad (7)$$

$$\text{但し, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{n \cdot K}{\alpha} & -\frac{\beta}{\alpha} & \frac{K_t}{r \cdot \alpha} \\ 0 & -\frac{K_e}{L \cdot r} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix},$$

$$C = [0, 0, 1], \alpha := J/r^2 + M, \beta := D_m/r^2 + D_z.$$

式 (6) の右辺第 3 項のクーロン摩擦項は第 2 行成分しかない。ところが、B 行列は第 3 行成分しかなく、クーロン摩擦項は制御入力で打ち消すことはできないクラスに属する。しかし、予め、摩擦補償電圧 $V_c(V)$ を与えると、実用上は打ち消すことができ、式 (6) の右辺第 3 項が無視できる。

3. 環境との接触を考慮したシステムのモデリング

ロボットハンドで把持を行うとき、ハンドの指が把持対象物の位置まで移動し、接触して、適当な力を加えることで把持が可能となる。この把持を台車の制御に置き換えると、ハンドが把持対象物に向かって移動する動作は台車の位置制御に相当する⁽¹⁾⁽²⁾。そして、ハンドが把持対象物に接触することは、台車が対象物に接触することに相当する。図 2 に、前記した機構の上部に壁 (Wall) を設置した実験

図 2 ハンド機構の構成

Fig. 2. Structure of mechanical hand.

図 3 手の外観

Fig. 3. View of hand.

図 4 位置センサレス制御系ブロック図

Fig. 4. Block Diagram of position sensor-less control system.

装置の外観を示す。図 3 は人の手の外観であり、図 2 の Mechanical finger を同図の手の親指に、Wall を人差し指から小指までの四本指で作る壁に見立てられる。

ここで、弾性特性を持つ把持対象物の左端を Wall に接触させ、Mechanical finger を右端に接触させたシステムのモデル化を行い、接触を考慮しないオブザーバと位置制御系とを設計する。このオブザーバは、右辺第 3 項を無視した式 (6) に対応し、状態変数 x を推定する同次元オブザーバである。推定値を $\hat{x} = [\hat{z}, \hat{\dot{z}}, \hat{i}]^T$ とする。接触開始時の台車の位置を原点とする。位置制御系のブロック図を図 4 に示す。但し、摩擦補償で式 (6) の右辺第 3 項を無視している。 z_r は位置参照値、 S_L は状態変数推定値から位置推定値 $\hat{z}$ を選択する機能を表す。 $\hat{z}$ が z_r に追従する制御系を意味する。 ΔA が、接触時の把持対象物に対応する。図 5 に制御対象とオブザーバを伝達関数で表現した図を示す。右上

図5 位置センサレス制御系伝達関数ブロック図
Fig.5. Block Diagram of position sensor-less control system transfer function.

の点線部が図4の ΔA に対応する。この図を辿ると、位置推定が可能であることを理解できる。つまり、バネに当たる $n \cdot K$ ブロックにより、位置 z の情報が反力として力 f 側にに戻り、加速度 $\ddot{z}$ と速度 $\dot{z}$ を経て、誘起電圧 $K_e \cdot \dot{\theta}$ として入力電圧 V 側にに戻り、電流 i の変化を生んでオブザーバに伝わる。 $V_c = R \cdot r \cdot f_c \cdot \text{sgn}(\hat{z}) / K_t (V)$ はクーロン摩擦補償電圧である。同補償でクーロン摩擦が補償できる理由を述べる。図5の中の入力電圧 V から i までの伝達関数は誘起電圧 $K_e \cdot \dot{\theta}$ を省くと、 $1/(sL + R)$ だが、その時定数 $\tau = L/R$ は小さく、摩擦補償電圧 V_c の変化を考える時、同電圧関数は $1/R$ と見なせる。そのため、 V_c から力 f までの動特性が無視でき、モータへの入力電圧 $V = u + V_c$ とおけば、制御入力 u から見た制御対象の挙動は摩擦のない線形系と見なせる。オブザーバの設計法にはクーロン摩擦を含む非線形モデルを用いる非線形オブザーバを用いる方法もあるが、本稿では、線形オブザーバを用い、摩擦補償電圧 V_c によって生じる電流の増分 $i_* = V_c/R$ を実電流値 i から差し引いて線形オブザーバで状態推定を行う。以上を踏まえた線形系の状態方程式を式(8)、オブザーバを式(9)、位置偏差 $\dot{w}$ を式(10)、その積分値 w を用いた制御則を式(11)に表す。さらに、位置偏差 $\dot{w}$ の積分値 w を状態変数に加えた $\bar{x} = [x, w]^T$ を新たな状態変数とする拡大系を作り、その状態フィードバックゲイン $\bar{K} = [Fb, K_d]$ をLQ制御法により求め、 $u = -\bar{K}\bar{x}$ を得た後、式(11)のように展開する。

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A) \cdot x(t) + B \cdot u(t) \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - HC)\hat{x}(t) + Bu(t) + HCx(t) \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{w}(t) = -S_L \hat{x}(t) + z_r \dots\dots\dots (10)$$

$$u(t) = -F_b \hat{x}(t) + K_d w(t) \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -k_z/\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_b = [f_1 \quad f_2 \quad f_3],$$

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]$$

ΔA は対象物に対応する加法的な不確かさである。 k_z は対象物の弾性定数である。 F_b はフィードバックゲイン、 K_d は積分補償ゲイン、 H はオブザーバゲインを表し、システムが安定となる極となるように選ぶ。オブザーバに ΔA が含まれないのは対象物の存在を故意に考慮しないためである。

4. 接触時のオブザーバ推定値と制御系の振る舞い

制御入力である式(11)を式(8),(9)に代入すると式(12),(13)が得られ、式(10),(12),(13)から制御系全体を表わす式(14)が得られる。

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A) \cdot x(t) - BF_b \hat{x}(t) + BK_d w(t) \dots\dots (12)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - HC - BF_b) \hat{x}(t) + BK_d w(t) \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + \Delta A & -BF_b & BK_d \\ HC & A - HC - BF_b & BK_d \\ 0_{n \times m} & -S_L & 0_{n \times m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{n \times m} \\ 0_{n \times m} \\ I \end{bmatrix} z_r \dots\dots\dots (14)$$

式(14)の最終値から、台車動作時の状態変数値がどのような値に収束するかを調べる。システムが漸近安定ならば、 $t \rightarrow \infty$ のとき、 $\dot{x}(\infty), \dot{\hat{x}}(\infty), \dot{w}(\infty) \rightarrow 0$ となる。

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ \hat{x}(\infty) \\ w(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z(\infty) \\ \dot{z}(\infty) \\ i(\infty) \\ \hat{z}(\infty) \\ \dot{\hat{z}}(\infty) \\ \hat{i}(\infty) \\ w(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nK \cdot z_r / (nK + k_z) \\ 0 \\ nK \cdot r \cdot z_r / K_t \\ z_r \\ 0 \\ nK \cdot r \cdot z_r / K_t \\ i_{inf} \end{bmatrix} \dots\dots (15)$$

$$i_{inf} = (f_1 K_t + nKrR + 2KrRf_3)z_r / (K_t K_d)$$

式(15)の右辺第2式の第2行と第5行から、台車の速度と推定速度は0[m/s]に収束するとわかる。第1行と第4行の比較より、台車の位置 $z(\infty)$ と推定位置 $\hat{z}(\infty)$ は一致しない。第1行に着目すると、対象物の弾性 k_z に応じて収束位置が変わり、 $k_z = 0$ ならば $z(\infty) \rightarrow z_r$ に至り、対象物が剛体で $k_z \rightarrow \infty$ ならば $z(\infty) \rightarrow 0$ となる。注目すべきは、 $\hat{z}(\infty) = z_r$ であり、台車が対象物に接触して静止しているにも関わらず、オブザーバの推定位置は位置参照値 z_r に収束するのである。次に注目すべきは、モータに流れる電流 $i(\infty)$ と推定電流 $\hat{i}(\infty)$ の収束値である。電流の収束値 $nK \cdot r \cdot z_r / K_t$ に K_t を乗ざるとモータトルクの収束値となり、プーリ半径 r で割ると、力の収束値 $f(\infty) = nKz_r$ となり、

台車の実位置 $z(\infty)$ や対象物の弾性係数 k_z によらない。台車は位置 $z(\infty)$ に静止するために、既に、力 $nKz(\infty)$ を発生して静止しているはずであるから、さらに、位置参照値 z_r まで台車が到達するために要する電流分との差分の力 $nK \cdot (z_r - z(\infty))$ で、把持対象物を押していると解釈できる。逆に、力の収束値 $f(\infty) = nKz_r$ で、機械体のバネと対象物の等価的なバネの双方を並列に押すことで、位置 $z(\infty)$ に収束することから、 $f(\infty) = nKz_r = (nK + k_z)z(\infty)$ が成り立ち、その結果、第1行の $nK \cdot z_r / (nK + k_z)$ が得られる。もし、位置センサを用いたPID制御等による台車の位置制御を行うならば、台車に対象物に接触しても位置参照値に到達するまで制御入力が増え続け、式(15)で示す値に収束する結果は得られない。 i_{inf} は積分値の最終値であり、フィードバックゲインを含む多くのパラメータ値によって定まる値に収束する。

5. 制御シミュレーション結果

制御系の挙動を MathWorks 社製の MATLAB/Simulink を用い、シミュレーションにより評価する。シミュレーション条件として、把持対象物の弾性定数を 2400 [N/m], 8000 [N/m] の2通りとし、ステップ状の位置参照値を 0.025 [m] を与える。前者は比較的柔らかい対象物、後者は固い対象物に相当する数値例である。台車に対象物に接触する位置と初期位置を原点とする。表1に以降のシミュレーション及び実験で用いるパラメータ値を示し、図6、図7にシミュレーション結果を示す。表中の Observer 値は、図4の連続系オブザーバと等価なデジタルオブザーバの極であり、 K_p は図4には記載しなかった z_r から制御入力 u へのフィードフォワードゲインである。また、 $n = 2$ とした。

いずれの場合も、台車の推定位置は実位置と異なり、参照位置に収束し、台車の速度と推定速度は共に 0 [m/s] に収束し、モータに流れる電流とオブザーバの推定電流は一定値に収束している。前者の台車の位置の収束値は原点から少し正值に移動した値に収束し、後者はほぼ原点付近に収束している。両者の位置収束値と電流値は、式(15)に数値を代入して得た最終値と完全に一致する。

6. 制御実験結果

制御実験の結果を紹介する。制御装置はマイウェイ技研(株)製の PE-PRO インバータユニット MWINV-4R22 を

表1 物理パラメータ値と制御パラメータ値

Table 1. Physical and control parameters.

R	3.6 Ω	L	0.9mH
K_e	0.036 Vsec/rad	K_t	0.036 Nm/A
J	4.7×10^{-6} kgm ²	D_m	2.8×10^{-3} Nmsec/rad
M	0.16 kg	D_z	0.035 Nsec/m
f_c	1.54 N	r	0.008825m
K	160 N/m	T_s	0.1 ms
Q	diag($10^6, 10^4, 10, 10^4$)	R	10
Observer	0.991, 0.992, 0.99	K_p	574

用いる。図8参照のこと。同装置はPWMインバータの駆動関数等を持ち、制御プログラムをC言語で作成するので、制御プログラムをホストコンピュータからPE-PRO上のDSP(TI社製TMS320C25)に転送して、実行する。

図6 制御シミュレーション結果(参照値 0.025 [m] 把持対象物の弾性定数 2400 [N/m])

Fig. 6. Control simulation result (Reference 0.025 [m] Elastic constant 2400 [N/m]).

図7 制御シミュレーション結果(参照値 0.025 [m] 把持対象物の弾性定数 8000 [N/m])

Fig. 7. Control simulation result (Reference 0.025 [m] Elastic constant 8000 [N/m]).

図8 制御装置の構成

Fig. 8. Structure of control unit.

図9 制御実験結果 (参照値 0.025 [m] 壁の弾性定数 2400 [N/m])

Fig. 9. Result of control experiment (Reference 0.025 [m] Elastic constant 2400 [N/m]).

図10 制御実験結果 (参照値 0.025 [m] 壁の弾性定数 8000 [N/m])

Fig. 10. Result of control experiment (Reference 0.025 [m] Elastic constant 8000 [N/m]).

PWM インバータの電源電圧は DC20 V, キャリア周波数は 10 kHz とする。DC サーボモータは山洋電気 (株) 製の V402T-011, 電流センサはナナ・レム (株) 製の SY-03 を用い, 観測される電流値は 12 ビット A/D 変換器より DSP に取り込み, 台車の位置を計測する評価用ポテンシオメータの出力を A/D 変換器で DSP に取り込む。

図 9, 図 10 は位置参照値 z_r を 0.025 [m] とし, 対象物の弾性定数を 2400 [N/m], 8000 [N/m] とした場合の位置, 電流の制御実験結果である。波形表示ツールは 4 変数までしか表示できないため, 位置波形 (台車の位置, 推定位置) と電流波形 (モータ電流, 推定電流) のみを描画した。実験仕様はシミュレーションと同じである。位置推定値 $\hat{z}(\infty)$ は位置参照値 z_r に収束し, 位置波形はシミュレーション結果と同様に, 把持対象物の弾性定数に対応する位置で停止する。但し, 図 10 の電流波形には, 推定値に誤差が見られるが, パネの弾性係数の非線形性による誤差と推測され

図 11 実際の力と計算結果との比較

Fig. 11. Comparison of actual force and calculation result.

る。つまり, 硬い壁に遮られて微小変位を生じる際の弾性係数 K は公称値より小さく, 式 (15) の $i(\infty)$ が小さい値に収束するのにに対し, $\hat{i}(\infty)$ の K は公称値のままであるために実際より大きい値に収束したと考えられる。

ここで, 提案する制御系を定量的に評価するため (株) 中村製作所製の KANON 棒型テンションゲージ TK(II)1000cN (弾性係数 $k_z = 3[N]/17[mm]$) を用い, 台車が把持対象物を押す力の実測値と計算値との比較の結果を図 11 に示す。横軸はテンションゲージを台車に押し当てた場合 (力は正值) と引っ張った場合 (力は負値) に対する変位誤差 $z_r - z(\infty)$, 縦軸はテンションゲージの出力値と計算値 $nK \cdot (z_r - z(\infty))$ をプロットしたものである。図の傾きは nK であり, k_z によらない。計算値は実測値とよく一致しており, 計算式が正しいことを示すと思われる。

7. ハンド機構の把持制御への応用実験

提案技術をハンド機構の把持に応用する。図 12 は実験結果である。(a) 図は制御中に, 原点と位置参照値 (台車の下にある目盛りの左端) の間に対象物がない場合であり, 台車は位置参照値に到達する。(b) 図は, 原点位置と位置参照値の間にゆで卵を置いた場合である。このとき, 台車が前章で説明した力でゆで卵を押し, ゆで卵が台車と壁の間に挟まれた状態が保たれる。(c) 図は, (b) 図と比較するため, 位置センサを用いた PID 制御による位置制御を行った例であり, 台車が位置参照値に到達するまで制御入力が増え続け, ゆで卵を押しつぶしてしまう。ゆで卵の弾性係数 k_z は $k_z = 750[N/m]$ 程度であった。

8. おわりに

以上, DC サーボモータを用い, 電圧と電流の電気情報のみを用い, 位置センサも力センサも用いない位置/力センサレス制御法を提案し, 理論解析と共に, シミュレーションと実験により, その実現が可能であることを示した。さらに, 実験装置をロボットハンドに見立てて, ゆで卵を用いた把持制御実験を実施し, その実用性を検証した。(平成 17 年 3 月 23 日受付, 平成 17 年 6 月 24 日再受付)

(a) 位置 / カセンサレス制御 (ゆで卵無)

(a) Position/Force Sensor-less Control (with no boiled egg)

(b) 位置 / カセンサレス制御 (ゆで卵有)

(b) Position/Force Sensor-less Control (with boiled egg)

(c) PID 制御 (ゆで卵有)

(c) PID control (with boiled egg)

図 12 位置 / カセンサレス制御の応用実験結果

Fig. 12. Experimental Results of Position/Force Sensor-less Control Application.

文 献

- (1) A. Shimada and K. Enomoto: "Realization of Position Sensor-less Control System Using Spring", *Trans. of IEEE IA*, Vol.125, No.12, pp.1268-1273 (2004-12) (in Japanese)
島田 明・榎本浩司:「バネ機構を利用した位置センサレス制御系の実現」, 電学論 D, **124**, 12, pp.1268-1273 (2004-12)
- (2) A. Shimada, Y. Kishiwada, M. Fujita, and N. Arimura: "Sensor-less Control based on Observability Using Mechanical Spring", The 47th Automatic Control Annual Joint Conference, 912 (2004)
島田 明・岸和田優・藤田真宜・有村教世:「バネ機構による可観測

化に基づくセンサレス制御」, 第 47 回自動制御連合講演会, 912 (2004)

- (3) M. Arimura, A. Shimada, and M. Terauchi: "AC Servo Motor Position Sensor-less Control using Mechanical Springs", The papers of technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEEE, IIC-05-56 (2005) (in Japanese)

有村教世・島田 明・寺内美奈:「バネ機構を利用した AC サーボモータの位置センサレス制御」, 電気学会産業計測制御研資, IIC-05-56 (2005)

- (4) Y. Kishiwada and A. Shimada: "Robot Hand Grasping Control Making Use of Mechanical Spring", The papers of technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEEE, IIC-05-32 (2005)

岸和田優・島田 明:「バネ機構を利用したハンド機構のセンサレス把持制御」, 電気学会産業計測制御研資, IIC-05-32 (2005)

- (5) S. Ichikawa, Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma: "Sensorless Controls of Salient-Pole Permanent Magnet Synchronous Motors Using Extended Electromotive Force Models", *Trans. IEEE IA*, Vol.122, No.12, pp.1088-1096 (2002-12) (in Japanese)

市川真士・陳 志謙・富田睦雄・道木慎二・大熊 繁:「拡張誘起電圧モデルに基づく突極型永久磁石同期モータのセンサレス制御」, 電学論 D, **122**, 12, pp.1088-1096 (2002-12)

- (6) S. Shinnaka, A. Toba, and D. Zhang: "Control Technologies for Sensorless Drive of Permanent Magnet Synchronous Motors, IEEE IA Conference", Symposium, 1-S15-4, 1-107-112 (2004) (in Japanese)

新中新二・鳥羽章夫・張 東寧:「永久磁石同期電動機の制御技術」, 平 16 電気学会産業応用部門大会, 1-S15-4, 1-107-112 (2004)

- (7) N. Takeshita, M. Ichikawa, J. Lee, and N. Matsui: "Back EMF Estimation-Based Sensorless Salient-Pole Brushless DC Motor Drives", *Trans. of IEEE IA*, Vol.117, No.1, pp.98-104 (1997-1) (in Japanese)

竹下隆晴・市川 誠・李宙禾石・松井信行:「速度起電力推定に基づくセンサレス突極形ブラシレス DC モータ制御」, 電学論 D, **117**, 1, pp.98-104 (1997-1)

島田 明 (上級会員) 1958 年 9 月生。1983 年 3 月電気通

信大学電子工学科卒業。同年 4 月 (株) 第二精工舎 (現セイコーインスツル (株)) に入社し, ロボットコントローラ開発に従事。1994 年 4 月より千葉大学非常勤講師を兼務, 1999 年 4 月より客員教授を兼務。2001 年 4 月より職業能力開発総合大学校電気システム工学科助教授。博士 (工学) (1996 年, 慶応義塾大学)。IEEE, 計測自動

制御学会, 日本ロボット学会等の会員。

岸和田 優 (非会員) 1982 年 1 月生。2005 年 3 月職業能力

開発総合大学校電気工学科卒業。同年 4 月職業能力開発総合大学校研究課程 (= 修士課程) 電気情報専攻入学。モーションコントロール, センサレス制御, AC サーボモータのベクトル制御等の研究に従事。