オブジェクト座標系に基づいた絶対位置制御法

学生員 中野 圭介* 正員 村上 俊之*

An Approach to Absolute Position Control based on Object Coordinate

Keisuke Nakano*, Student Member, Toshiyuki Murakami*, Member

This paper describes an accurate position control in object coordinate. In case the motion control of industrial robot placed in global coordinate is considered in object coordinate, it is preferable and convenient to decide its motion by the teaching of robot operator. However the teaching procedure requires much time and effort. Moreover, as often as relative position between robot and object is changed, the operator needs to do the teaching operation again. To improve the above issue, it is required to develop the strategy that decides the robot motion without the teaching operation. This paper proposes a control strategy that is not required the teaching operation and enables to realize the desired motion without affecting the relative position error between the robot and the target object in object coordinate defined by PSD (Position Sensitive Detector). In the proposed approach, the estimation algorithm of the kinetic transformation between global and object coordinates is introduced by using PSD output, and the error of coordinate transformation estimated by the proposed approach is compensated in global coordinate. The validity of the proposed method is shown by simulations and experiments.

キーワード：マニピュレータ，オブジェクト座標系，絶対位置，PSD，作業空間オブザーバ

Keywords: manipulator, object coordinate, absolute position, position sensitive detector, workspace observer

1. 序 論

従来の産業界において，ロボットは主に単純な作業を高精度に行うために用いられてきた。しかし近年は技術の進歩によるロボットの多様化によって，作業の効率化および完全自動化が目的とされてきている⁽³⁾⁽⁷⁾。その結果として工場の無人化が推し進められたことにより，人間が危険な環境で作業を行う必要がなくなり，人間とロボットの接触などによる事故の危険性も少なくなっている。また，無人搬送車の導入などにより加工対象物の移送も簡単となり，作業時間の短縮化・効率化がなされている。特に夜間の工場などでは無人化が進み，完全にロボットだけで作業が行われることも多くなっている。

しかしながら，工場における産業用ロボットの多くは，グローバル座標系に対する位置決め性能を向上させるために人の教示作業によってロボットの最終動作を決定している。つまり，ロボットが未知の座標系に存在する対象物に対して作業を行うには人の介入が必要となっている。ロボットによる反復作業の場合，ロボットと対象物の相対的な位置

関係が変化しなければ教示作業は一度行えば良いが，相対的な位置関係が変化してしまうと再び教示作業を行わなければならない，多くの時間と労力を要するという問題がある。そのため，同作業を必要としないロボットによる完全自動的な動作決定手法が必要となっており，様々な研究が行われてきている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。さらに，実システムへの利用という問題に取り組むのに必要となるのがロボットと対象物の相対的な位置関係を検知する外界センサである⁽⁴⁾。そこで本論文では，ロボットの外部に取り付けた外界センサとロボット自身の内界センサを同時に用いることによるセンシングの冗長性を利用した絶対位置制御手法を示す。提案手法により，対象物に任意に設定した外界センサの座標系におけるロボットの制御構成が可能となり，対象物とロボットの相対的な位置関係が変化しても，相対位置変化に伴う座標変換式を推定することによって対象物に対して所望の作業を高精度に実現することができる。

本論文では，マニピュレータの存在する座標系をグローバル座標系と表現し，外界センサである PSD (Position Sensitive Detector) によって定義される対象物の座標系をオブジェクト座標系と表現する。本論文ではオブジェクトに対する作業を考えており，オブジェクトを中心にセンサ配置を決定するためオブジェクト座標系と表現した。提案手法では，まず特徴点が設置されたマニピュレータの先端をオ

* 慶應義塾大学

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Keio University

3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

プロジェクト座標系の原点に一致させることでグローバル座標系とオブジェクト座標系のスケールを合わせる。続いて複数の PSD によって得られるオブジェクト空間におけるマニピュレータの先端位置情報と、内界センサであるエンコーダから得られるグローバル空間での先端位置情報を用いてオブジェクト座標系とグローバル座標系間の幾何学関係式を推定する。同幾何学関係式を用いた制御をオブジェクト空間で行い、さらにグローバル空間においてロバスト制御系を構成する⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁸⁾ ことによって、幾何学関係式に含まれる推定誤差の補償も行われ、より安定した高精度な絶対位置制御がオブジェクト座標系において実現可能となる。

本論文の構成を示す。第 2 章において実験で用いた 4 自由度マニピュレータのモデル化を行い、第 3 章で関節空間、作業空間においてオブザーバを用いたロバストな制御系の実現について説明する。第 4 章で PSD 情報に基づいたオブジェクト座標系について定義を行い、第 5 章でオブジェクト座標系とグローバル座標系の変換について説明する。第 6 章においてシミュレーションを通じて提案する制御法の有効性を確認し、第 7 章において実機による実験およびその結果を示す。最後に第 8 章で結論を述べる。

2. 4 自由度マニピュレータのモデル化

本論文で用いたマニピュレータは、図 1 のような 3 次元空間で稼動する 4 自由度マニピュレータである。図中の 1~5 は座標系の設置場所を示し、 l_i 、 d_i は各関節角が 0 rad 時のグローバル座標系の y 軸方向、z 軸方向の並進距離を表す。また、グローバル座標系の原点は 1 と同じ位置に設置した。

2.1 順運動学 図 1 より、隣接する座標系の同次変換行列 ${}^{i-1}T_i$ は以下になる。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

図 1 4 自由度マニピュレータのモデル化
Fig. 1. The model of 4 DOF manipulator.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ -\cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ -\sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & l_3 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & l_4 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

これらの同次変換行列 ${}^{i-1}T_i$ を用いて、グローバル座標系におけるマニピュレータの手先位置 x_E は先端座標系における位置 u_E から式 (7) のように幾何学的に表すことができる。

$${}^0T_E = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \dots\dots\dots (6)$$

$$x_E = {}^0T_E u_E \dots\dots\dots (7)$$

ここで、同次変換行列 ${}^{i-1}T_i$ における回転を表す行列を ${}^{i-1}R_i$ 、位置を表す行列を ${}^{i-1}p_i$ とし、各関節 i から手先までの位置ベクトルを ${}^0p_{E,i}$ とすると、ヤコビ行列 J の成分は式 (10) のように求められる。

$${}^0z_i = {}^0R_i e_z \dots\dots\dots (8)$$

$${}^0p_{E,i} = {}^0p_E - {}^0p_i \dots\dots\dots (9)$$

$$J = \begin{bmatrix} {}^0z_1 \times {}^0p_{E,1} & {}^0z_2 \times {}^0p_{E,2} & {}^0z_3 \times {}^0p_{E,3} & {}^0z_4 \times {}^0p_{E,4} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $e_z = [0, 0, 1]^T$ である。作業空間と関節空間におけるマニピュレータの速度・加速度の関係式はヤコビ行列を用いて次式のように得られる。

$$\dot{x}_E = J \dot{\theta} \dots\dots\dots (11)$$

$$\ddot{x}_E = J \ddot{\theta} + \dot{J} \dot{\theta} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、式 (12) において右辺第二項の値が第一項と比較して十分に小さいことから無視できるものと考え、加速度次元の変換についてもヤコビ行列を用いることとする。

2.2 逆運動学 作業空間から関節空間への変換には通常逆ヤコビ行列を用いるが、本論文で用いたような冗長自由度を持つマニピュレータでは $3 \times n$ 行列 ($n > 3$) の逆行列を得ることができない。これより、式 (13) から求められる擬逆ヤコビ行列 J^+ を用いる。

$$J^+ = J^T (J J^T)^{-1} \dots\dots\dots (13)$$

図 4 それぞれの座標系の定義

Fig. 4. Definition of each coordinate.

図 5 3次元位置情報算出のブロック線図

Fig. 5. The diagram of calculating 3D position.

できる。そこで、2 台の PSD が直交していることを利用して図 5 のように基準距離 (base length) ともう一方の PSD で算出された値を用いて新たな奥行きとし、現在の絶対位置を算出する。この計算を 2 つの PSD 交互に行うことによって空間 3 次元位置情報を算出する。また、算出された位置情報を 1 次の LPF を通して微分することによって速度情報を得ることができる。

$$\dot{x}_o = \frac{sgl}{s + g_l} x_o \quad (20)$$

5. 座標系の変換

オブジェクト座標系とグローバル座標系の座標変換式の導出、制御系の構成を以下の手順で行う。

- 特徴点が設置されたマニピュレータの先端をオブジェクト座標系の原点に合わせる
- グローバル座標系での運動制御に基づき、オブジェクト座標系での運動を PSD により計測し、両座標系間の座標変換式を導出する
- 座標変換式を含む PD 制御器をオブジェクト空間において構成する

5.1 変換式の導出

図 5 において、奥行きの値として基準距離 (base length) 利用するため、特徴点であるマニピュレータの先端をオブジェクト座標系の原点に一致させる必要がある。その方法について説明を行う。原点に一致させた後、変換行列の導出を行う。

[1] グローバル座標系における運動制御とオブジェクト座標系での運動計測

まず、グローバル座標系における指令値と応答値を用いてマニピュレータの先端を x 軸と y 軸方向にそれぞれ単位長さ l 移動させる。このとき、マニピュレータの先端がオブ

図 6 相対的な座標系の回転

Fig. 6. Relative rotation between coordinates.

ジェクト座標系の原点に合っていると仮定して、PSD から原点までの距離 (base length) を用いてオブジェクト座標系上での擬似的な移動距離 ($\delta x_{o_x}, \delta y_{o_x}, \delta z_{o_x}, \delta x_{o_y}, \delta y_{o_y}, \delta z_{o_y}$) を測定する。これによって、図 6 のようにオブジェクト座標系とグローバル座標系の回転の関係式を求めることができる。ここで、オブジェクト座標系の原点を中心とした運動と仮定しているが、同仮定により生じる誤差は式 (22) 中の l/α に含めることができる。

$$\delta x_g = H_o \delta x_o \quad (21)$$

$$H_o = \frac{l}{\alpha} R_{x_o} R_{y_o} R_{z_o} \quad (22)$$

$$\alpha = \sqrt{\delta x_{o_x}^2 + \delta y_{o_x}^2 + \delta z_{o_x}^2} \quad (23)$$

$$R_{x_o} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{x_o} & \sin \theta_{x_o} \\ 0 & -\sin \theta_{x_o} & \cos \theta_{x_o} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$R_{y_o} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{y_o} & 0 & -\sin \theta_{y_o} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{y_o} & 0 & \cos \theta_{y_o} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$R_{z_o} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{z_o} & \sin \theta_{z_o} & 0 \\ -\sin \theta_{z_o} & \cos \theta_{z_o} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\theta_{x_o} = \text{atan} 2(\delta z_{o_y}, \delta y_{o_y}) \quad (27)$$

$$\theta_{y_o} = -\text{atan} 2\left(\delta z_{o_x}, \sqrt{\delta x_{o_x}^2 + \delta y_{o_x}^2}\right) \quad (28)$$

$$\theta_{z_o} = \text{atan} 2(\delta y_{o_x}, \delta x_{o_x}) \quad (29)$$

[2] オブジェクト座標系における原点までの移動

式 (22) を用いた制御をオブジェクト空間で行うことにより、マニピュレータの先端をオブジェクト座標系の原点に合わせることができる。これによって、[1] の変換行列導出時に含まれ得る l/α の誤差がなくなる。なお、このときの指令値および応答値はマニピュレータの先端がオブジェクト座標系の原点に合っていると仮定して算出されたオブジェクト座標系での擬似的な値を用いる。制御系の説明は 5.2 にて行う。

図7 変換行列を含むPD制御

Fig. 7. PD control including transformation matrix.

続いて、特徴点がオブジェクト座標系の原点に合った状態でオブジェクト座標系における方向とグローバル座標系での方向を変換する式を導出する。

[3] オブジェクト座標系原点近傍でのグローバル座標系における運動制御とオブジェクト座標系での運動計測特徴点であるマニピュレータの先端をオブジェクト座標系の原点に一致させる工程と同様に、グローバル座標系においてマニピュレータの先端を x 軸, y 軸方向にそれぞれ単位長さ l 移動させる。このときのオブジェクト座標系での移動距離を測定し、式 (22) に代入することによってグローバル座標系とオブジェクト座標系間の変換式を導出することができる。

[4] オブジェクト座標系における所望動作の実現
このようにして推定された座標変換行列 H_o を用いた制御をオブジェクト空間で行うことにより、オブジェクト座標系における所望の動作を実現することができる。

5.2 変換式を含む制御系 導出された座標系間の変換行列 H_o を用いた全体のPD制御系は図7のようになる。オブジェクト空間において生成された加速度参照値を変換行列 H_o によってグローバル空間に変換することでグローバル空間に存在するマニピュレータを動作させることができ、PSDによってオブジェクト空間での応答値を得る。これによって、3.2で述べたオブザーバをオブジェクト空間において構成することが可能となり、座標系の変換誤差に対してもロバストな制御系を構成できる。つまり、PD制御のループ内の逆ヤコビ行列を変化させる推定した座標変換行列 H_o に含まれる誤差は図7の制御によって補償し、さらにオブザーバを構成することによってロバストな制御系を構成している。

6. シミュレーション

本論文で提案した手法の有効性を検証するためにOpenGLによる3次元グラフィックスを利用し、4自由度マニピュレータの計算機による数値シミュレーションを行った。PSDの配置はグローバル座標系で行い、オブジェクト座標系の原点を計算によって決定した。しかし、ここで用いた値はPSDから原点までのそれぞれの距離のみである。マニピュレータの先端をオブジェクト座標系の原点に一致させ、変換行列 H_o を推定した後にオブジェクト座標系の $x_o y_o$ 平面において半径0.05 mの円を描かせた。そのときのオブジェクト座標系における指令値 (Command) および応答値 (Response) の結果を図8に示す。また、推定された変換行列 H_o

図8 オブジェクト座標系における円軌道

Fig. 8. Circular trajectory in object coordinate.

図9 グローバル座標系に変換した円軌道

Fig. 9. Circular trajectory in global coordinate.

によってグローバル座標系に変換した値 (Command, PSD Response) と順運動学から計算された応答値 (Response) の結果を図9に示す。また、推定した変換行列の有効性を確認するため、同じ条件でオブジェクト座標系とグローバル座標系が一致していると仮定した変換行列を用いないシミュレーションも行ったが、円軌道を描かず途中で応答値が発散した。

図8より、提案した座標系の変換法の有効性が確認できた。また、理想的な状況下では正確な座標変換行列の推定を行えることが図9より確認できた。これらの結果より、提案した変換行列の推定および変換行列を用いた制御手法の有効性が確認できた。

7. 実験

提案した座標系の変換の有効性を示すため、実機を用いて実験を行った。

7.1 実験システム 全体の実験システムを図10に示す。PSDは直交を保つようにフレームで固定し、フレームを任意に設置して実験を行った。このとき、PSDからオブジェクト座標系の原点までの距離は $x_o z_o$ 平面までを

図 10 実験システム

Fig. 10. Experiment system.

表 1 制御系に関するパラメータ

Table 1. The parameter of control system.

Position Gain	K_p	100.0
Velocity Gain	K_v	20.0
Disturbance Observer Gain	g_j	100.0
Workspace Observer Gain	g_w	82.0
Pseudo-differential Gain (joint angle)	g_{lj}	600.0
Pseudo-differential Gain (absolute position)	g_{lw}	100.0
Gain for Noise Mitigation	κ	0.2

表 2 モデル化に関するパラメータ

Table 2. The parameter of modeling.

Length of Link (y direction)	l_1	0.15	[m]
	l_2	0.20	[m]
	l_3	0.20	[m]
	l_4	0.05	[m]
Length of Link (z direction)	d_1	0.07	[m]
	d_2	0.02	[m]
	d_3	0.02	[m]
Mass of Link	m_1	0.35	[kg]
	m_2	0.20	[kg]
	m_3	0.18	[kg]
	m_4	0.15	[kg]
Motor Nominal Inertia	J_{m1}	0.081	[kg·m ²]
	J_{m2}	0.043	[kg·m ²]
	J_{m3}	0.015	[kg·m ²]
	J_{m4}	0.0025	[kg·m ²]

0.83 m, y_0z_0 平面までを 0.74 m とした。制御系に関するパラメータ, モデル化に関するパラメータを表 1, 表 2 に示す。また, PSD によって得られるオブジェクト空間での絶対位置は LPF を通した値を用いた。このときのカットオフ周波数 g_l は 300.0 とした。また, 制御系のサンプリング周期は 1 ms で, RT-Linux の機能によって管理されている。

7・2 実験結果 単位長さ l を 0.1 m とし, 特徴点として先端に LED を取り付け付けたマニピュレータを動作させ, 変換行列 H_o を推定した後にオブジェクト座標系の x_oy_o 平面において半径 0.02 m の円を描かせた。そのときのオブジェクト座標系での指令値 (Command) および応答値 (Response) の結果を図 11 に示す。また, 推定された変換行列 H_o によってグローバル座標系に変換した値 (Command, PSD Response) とエンコーダ情報から計算された応答値 (Response) の結果を図 12 に示す。

7・3 検 討 図 11 より, オブジェクト座標系で与えた指令どおりにグローバル座標系にあるマニピュレー

図 11 オブジェクト座標系における円軌道

Fig. 11. Circular trajectory in object coordinate.

図 12 グローバル座標系に変換した円軌道

Fig. 12. Circular trajectory in global coordinate.

タが動作しており, 提案した座標系の変換のための制御手法の有効性が確認できた。また, 図 12 より, 推定した変換行列 H_o によってグローバル座標系に変換した値とエンコーダの情報から順運動学によって計算された値に差が生じていることがわかる。これは変換行列 H_o に誤差が含まれたことを表しており, モデル化誤差や 2 台の PSD のノイズによる影響が原因として挙げられる。また, 振動を誘発しやすいというマニピュレータの特性により, PSD に基づいた作業空間での制御はゲインを下げる結果となってしまった。これらのことが問題点として挙げることができる。しかしながら, 評価対象である図 11 より, 変換行列 H_o に誤差が含まれたとしてもオブジェクト座標系における制御はロバストであることがわかる。以上の結果より, 提案した座標系の変換のための制御手法によりオブジェクト空間での指令どおりにグローバル空間に存在するマニピュレータが動作していることが確認できた。

8. 結 論

本論文では, 工場におけるロボット教示作業の負担を低減するため, オブジェクト座標系とグローバル座標系の変

換行列推定法と推定変換行列に基づいた制御手法を提案した。提案手法では、座標系を変換する変換行列を推定し、同変換行列を作業空間にオブザーバに基づいたPD制御ループ内に含めることによって変換誤差による安定性の劣化を出来るだけ低減し、同時に変換誤差による位置偏差も補償可能な制御系構成法を示した。提案手法の有効性はシミュレーションおよび実験において確認した。今後の、PSDの視野やノイズの問題などのシステムの改善によっては無人搬送車などその適用の拡大が期待される。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省平成15年度21世紀COEプログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」によるものであることを記し、謝意を表す。

(平成16年7月2日受付, 平成16年11月15日再受付)

文 献

- (1) K. Ohnishi: "Robust Motion Control by Disturbance Observer", *Journal of RSJ*, Vol.11, No.4, pp.486-493 (1993) (in Japanese)
大西公平:「外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール」, 日本ロボット学誌, 11, 4, pp.486-493 (1993)
- (2) T. Murakami, et al: "Robust Motion Control of Based on Projection Plane in Redundant Manipulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.49, No.1, pp.248-255 (2002)
- (3) J.M. Borg, et al: "An Ideal Proportional Navigation Guidance System for Moving Object Interception-Robotic Experiments", *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.5, pp.3247-3252 (2000)
- (4) Veryha, Y, et al: "Method and System for Robot End Effector Path Correction Using 3-D Ultrasound Sensors", *IEEE Intelligent Control and Automation*, Vol.2, pp.1240-1243 (2000)
- (5) S. Muto and K. Shimokura: "Teaching and Control of Robot Contour-Tracking Using Contact Point Detection", *IEEE Robotics and Automation*, Vol.1, pp.674-681 (1994)
- (6) A. Stopp, et al: "The Manufacturing Assistant: Safem, Interactive Teaching of Operation Sequences", *IEEE Robot and Human Interactive Communication*, pp.386-391 (2002)

- (7) T. Sugawara and T. Murakami: "Cooperative Control Based on Absolute Position Information of Grasped Object in Multiple Mobile Manipulators", *IEEE Trans. IA*, Vol.123, No.6, pp.689-695 (2003-6) (in Japanese)
菅原俊晴・村上俊之:「把持対象物の絶対位置情報に基づいた複数台移動マニピュレータの協調制御」, 電学論誌 D, 123, 6, pp.689-695 (2003-6)
- (8) S. Shibata and T. Murakami: "Variable Structure Control for Redundant Manipulator with Absolute Position by PSD", *JASCO3*, Vol.II, pp.601-606 (2003) (in Japanese)
柴田 聡・村上俊之:「PSDの絶対位置情報による冗長マニピュレータの構造可変制御」, 平15 電気学会産業応用部門全大講演論文集, Vol.II, pp.601-606 (2003)
- (9) Y. Ise and T. Murakami: "Bilateral Control of Mobile Manipulator Based on Task Division Area", *JASCO3*, Vol.II, pp.579-584 (2003) (in Japanese)
伊勢保章・村上俊之:「区分動作領域に基づく人操作型移動マニピュレータの制御」, 平成15 電気学会産業応用部門全大講演論文集, Vol.II, pp.579-584 (2003)

中 野 圭 介 (学生員) 1981年5月9日生。2004年3月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。同年4月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程入学。

村 上 俊 之 (正員) 1965年10月5日生。1993年3月慶應義塾大学大学院電気工学専攻博士課程終了。現在、同大学理工学部システムデザイン工学科助教授。工学博士。