視覚センサによるハンド位置の計測とキャリブレーション*

松山 滋樹^{*1}, 中澤 和夫^{*2}Calibration and Position Measurement of Robot Hand
Using Vision Sensor

Shigeki MATSUYAMA and Kazuo NAKAZAWA

A robot has its original error of link length and angular offsets. Consequently, it has low absolute positioning accuracy, although the robot has good repeatability. For this reason, calibration of manipulator is required. This paper proposes the calibration method using information obtained through a vision sensor, which is installed on the hand. First, the robot makes a series of movements with a vision sensor. Next, the sensor projects laser into an object and takes an image at each position, and then 3D position of the spot on the sensor coordinates is obtained. Finally, parameters are calibrated using error of 3D position by the Newton method. Additionally, this paper shows the calibration results by the proposed method.

Key Words: Calibration, Vision Sensor, Positioning

1. 結 言

従来のオンライン制御からオフライン制御への移行にともなって、ロボットに自律的かつ正確に作業を行わせるためには、ロボットの動く軌道が3次元座標空間で算出され、繰り返し精度よりも絶対位置決め精度が要求される。そのためには、各リンク長さ、ジョイントのオフセット値などの諸パラメータのキャリブレーションは不可欠である。

遠山ら[1]によると、マニピュレータのキャリブレーションはLevel-IからLevel-IVまでに分類している。これによると最終的には、ロボットハンドと対象物の相対的な位置、姿勢を計測することが重要であると指摘している。そのため筆者らは、これを実現するために、図1に示すようにロボットのハンドに取り付けた視覚センサ[2][3]による環境認識の研究を行なっている。そこで本論文では、この視覚センサをマニピュレータ先端に装着し、その情報からハンドの3次元位置の計測とその位置情報からマニピュレータのキャリブレーションを行う手法について述べる。従来の方法では三次元測定器[4]、ハンドに取り付けたブロックの3次元位置を特殊な測定器を用いて計測する手法[5]、超音波[6]を用いてハンドの先端位置を求めるものが報告されている。これらの手法は、キャリブレーションを行なうために新たに装置を必要とする。ロボットの位置決め誤差の原因としては、各リンクの長さ、関節のねじれ、エンコーダのオフセットなどがある。これらは幾何学的にモデリングすることができるためキャリブレーションするパラメータの設定が容易である。また重力によるリンクや減速器のたわみ、バックラッシュ、減速比の周期的ばらつきなどは、パラメータを場合分けして設定する必要があるためキャリブレーションが複雑になる。そこで本手法では、遠山らが指摘しているように最終的な位置決めはハンドに取り付けた視覚センサを用いて行なうという立場に立ち、この視覚センサで幾何学的にモデリング可能なパラメータのみをキャリブレーションすることを目的とする。

視覚センサを用いた例ではTsai[7][8], Agin[9],

Fig.1 Experimental set-up of the calibration system using vision sensor.

* 原稿受付 1997年3月18日.

^{*1} 慶應義塾大学大学院 (☎ 223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1).

^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部.

Fig.2 Optical arrangement of sensor

H. Zhuang「10」らによって報告されているが、これらと比較して本手法は簡便な視覚センサで3次元位置、特にセンサに対して奥行き方向の精度良く計測できるという点が特徴である。

2. 視覚センサによる3D位置計測

2.1 センサ座標系における位置計測 ここでは、センサ座標系 Σ におけるレーザが照射された点の位置を求める方法について述べる。

図2に示すように、スポット光をある点Pに照射し、この像をレンズの中心Oがセンサ座標系で $(0, -d, 0)$ にあるCCDカメラによって撮像する。このとき焦点距離を f 、イメージプレーン上でスポットの重心を $P'(u, v)$ とする。 z_i 平面を計測したとき、スポットはイメージプレーン上で $P'_0(u_0, v_0)$ に撮像されることがわかっているとす。このイメージプレーン上の基準点と平面までの距離を用いて P' の z 座標値を求める

Fig.3 Determination of position of laser spot on the reference plane R

と、

$$z_i = Z_i + \frac{Z_i^2(v_i - v)}{f \cdot d + Z_i(v - v_i)} \quad (1)$$

となる。さらに P' に近い2つの基準面を使って計算を行い、それらによって求められた z_i, z_{i+1} で内挿することによってほぼ収差の影響を取り除いて P' の z 座標を求めることができる。

$$z_z = \frac{z_i(v_{i+1} - v) + z_{i+1}(v - v_i)}{v_{i+1} - v_i} \quad (2)$$

$$x = y = 0$$

となる。ただし、 v_i, v_{i+1} は z_i 平面、 z_{i+1} 平面を計測した際のイメージプレーン上の位置である。

2.2 ワールド座標でのハンドの位置計測

ここでは、レーザ照射点Pのワールド座標系での位置を求める手法について述べる。図3のようにワールド座標の座標軸を $^wX, ^wY, ^wZ$ とする。 wZ 方向に面の法線を合わせ、 wX 方向、 wY 方向共に間隔 a で格子状にドットを描いた基準平面Rを用意する。P点は、その平面にレーザが照射された点である。この点の位置は平面が既知であるから、近傍の点 $^wa_0, ^wa_1, ^wa_2$ の3次元位置から次式より求めることができる。

$$^wP = \frac{d_{y0}}{a} (^wa_1 - ^wa_0) + \frac{d_{x0}}{a} (^wa_2 - ^wa_0) + ^wa_0 \quad (3)$$

次にイメージプレーン上で計測された値からワールド座標系における3次元位置の求め方について述べる。いま、カメラ座標で $(x_p, y_p, z_p)^T$ と表される基準平面R上の点 cP が、イメージプレーン上で $(u_p, v_p)^T$ に撮像されたとする。この時 cP は、カメラ座

Fig.4 Calculation of position of laser spot.

標で

$${}^cP_C = (u_p, v_p, f)^T \quad (4)$$

となる. ただし, f は焦点距離を表す. また, cP は任意の変数 t を用いて,

$${}^cP = (x_p, y_p, z_p)^T = t \cdot (u_p, v_p, f)^T \quad (5)$$

と表せる. ここでカメラ座標での平面 R の方程式がわかれば, cP の座標がわかる.

次に, カメラ座標での消失点の位置から平面の求め方について述べる. 図からもわかるように, 平面 R に平行な直線の消失点の, カメラ座標原点に対する位置ベクトルは, 全て平面 R と平行である. このようなベクトルを 2 つ求め,

$${}^cm_1 = (x_{m1}, y_{m1}, f)^T, \quad (6)$$

$${}^cm_2 = (x_{m2}, y_{m2}, f)^T \quad (7)$$

とすると平面 R の法線ベクトル cn は,

$${}^cn = {}^cm_1 \times {}^cm_2 = (f\alpha, f\beta, \gamma)^T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \alpha &= y_{m1} - y_{m2} \\ \beta &= x_{m1} - x_{m2} \\ \gamma &= x_{m1}y_{m2} - x_{m2}y_{m1} \end{aligned}$$

となる. ここでは, 消失点は, cP を取り囲む 4 点による正方形から求められる. 法線ベクトルの分かっていた平面の式を仮に

$$f\alpha x + f\beta y + \gamma z + d = 0 \quad (9)$$

としておくと, P の位置は次のようになる.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = -\frac{d}{f} \cdot \frac{1}{\alpha u_p + \beta v_p + \gamma} \cdot \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ f \end{pmatrix} \quad (10)$$

同様に ${}^wa_0, {}^wa_1, {}^wa_2, {}^wa_3$ のカメラ座標系における位置も求められ, これらの結果から (3) 式における d_{x0}, d_{y0} を求めることができる.

3. マニピュレータのモデリング

まず実験で用いる多関節ロボットの各回転軸に座標系を設け, 隣接する座標間の関係を記述する. 本手法では, 機構モデルとして視覚的にもわかりやす

Fig. 5 Definition of coordinate system.

いベクトル記法[4]を用いることにする.

ベクトル記法では 2 つの座標系間の関係を表すパラメータが並進, 回転の 6 個になる. この表記法を多リンクマニピュレータに適用すると, 回転軸上に座標系を設定し, 各座標軸が関節と一致するようにおかれる. 6 個のパラメータを用いた同次変換行列 ${}^iT_{i-1}$ により座標系 Σ_i に対する Σ_{i-1} の位置と姿勢が一意に求まる. この同次変換行列を用いることにより対象物の特徴点のワールド座標系に対する 3 次元位置 wP は各パラメータを用いて以下のように表せる. sP はセンサで特徴点の位置を計測したときの 3 次元位置である.

$${}^wP = {}^wT_s \cdot {}^sP \quad (11)$$

但し,

$${}^wT_s = {}^wT_b \cdot {}^bT_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_s$$

本システムに用いるマニピュレータの機構モデルを図5に示す. ロボットのワークエリア内にワールド座標系を設定し, マニピュレータの各回転軸に z 軸が回転軸になるように座標系を設定する. 本システムでは視覚センサがハンド先端にとりつけられている. キャリブレーションの対象となるパラメータは各座標系における並進, 回転の 6 個でワールド座標系からセンサ座標系までの 36 個となる.

4. ニュートン法によるパラメータ推定

以上前節で述べた機構モデルにおいて視覚センサ情報を用いてキャリブレーションを行なう手法について述べる. これは基本的には石井ら[4]によって報告されている手法による. 推定するパラメータは, 既に述べたように $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ とし, センサ座標系における計測点 sP のワールド座標系への座標変換は, パラメータ q の関数となる.

Tab.1 Configuration of the manipulator and 3D position of measured points on sensor and world coordinates.

no.	Angle of joint(deg)					Sensor (mm)			World (mm)		
	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	$\theta 4$	$\theta 5$	x	y	z	x	y	z
1	5	0	-40	30	-20	0.00	0.00	115.16	295.00	173.38	10.00
2	-12	10	-90	80	30	0.00	0.00	156.05	235.86	142.65	10.00
3	-8	-5	-10	-15	20	0.00	0.00	147.61	258.81	151.86	10.00
4	15	10	-70	45	-20	0.00	0.00	118.10	227.86	107.30	10.00
5	5	-10	-20	30	20	0.00	0.00	125.83	331.24	60.00	10.00
6	-20	20	-100	50	30	0.00	0.00	158.79	128.45	157.39	10.00
7	5	10	-80	55	-40	0.00	0.00	132.54	212.39	239.44	10.00
8	20	15	-90	52	-15	0.00	0.00	111.82	151.37	80.55	10.00
9	-5	-15	-10	25	-20	0.00	0.00	105.55	331.51	254.01	10.00
10	-5	20	-100	50	-20	0.00	0.00	131.05	99.93	236.75	10.00
11	10	-24	0	40	-20	0.00	0.00	114.80	364.38	121.10	10.00
12	20	-1	-25	0	-25	0.00	0.00	131.97	256.90	80.50	10.00
13	-15	14	-100	70	25	0.00	0.00	132.13	163.99	170.01	10.00
14	30	5	-50	30	-30	0.00	0.00	132.19	247.71	16.28	10.00

$${}^w p = f(q) \quad (12)$$

$$\Delta q = B^* \cdot \Delta^w p \quad (16)$$

ここで、 $f(q)$ は式(11)より得られるものである。しかし実際には、マニピュレータには機構誤差が含まれるため式(2)を式(11)に代入して求められた ${}^w p$ と式(3)により求められたその値とに差が生ずる。この位置決め誤差はマニピュレータの機構誤差 Δq によるものであるから、

$$\Delta^w p = J \Delta q \quad (13)$$

となる。これは2次以下の項を無視した形になるが、近似的に誤差パラメータに対応する手先位置の誤差を示す。 Δq は機構パラメータ q に関するヤコビ行列である。

実際にキャリブレーションを行なうための計測回数は、求めるパラメータ数を n 個とすると($n/3$)回以上必要である。マニピュレータの姿勢を変えて、計測回数を m 回とすると、

$$\Delta^w p = [\Delta^w p_1^T, \Delta^w p_2^T, \dots, \Delta^w p_m^T]^T, \quad (14)$$

$$B = [J_1^T, J_2^T, \dots, J_m^T]^T \quad (15)$$

ここで B はマニピュレータの m 個の姿勢に対応した拡張ヤコビ行列である。すると計測誤差 $\Delta^w p$ からパラメータ誤差は、

から求めることができる。ここで、 B^* は B の疑似逆行列で

$$B^* = V \Sigma^* U^T \quad (17)$$

より求めることができる。ここで $U = [u_1, u_2, \dots, u_{3m}]$ 、は($3m \times 3m$)の行列で u_i は $B \cdot B^T$ の直交固有ベクトル、 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ は($n \times n$)の行列で、 v_i は $B^T \cdot B$ の直交固有ベクトルである。また $\Sigma^* = \text{diag}(\sigma_1^{-1}, \sigma_2^{-1}, \dots, \sigma_h^{-1}, 0, \dots, 0)$; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_h$; B の特異値、 h ; ランクである。

よって初期パラメータに誤差成分を加え、

$$q_{i+1} = q_i + \Delta q_i \quad (18)$$

として新たなパラメータとしておきなおし、 Δq が0に近づき、 q が一定値に収束するまでニュートン法より繰り返し計算される。

4. 実験による検証

本システムで用いている視覚センサは、筆者らが開発したFiber Grating(FG)を用いた視覚センサでこれをロボットのハンド部に装着し実験を行なった。今回はFGから照射される0次回折光を作業領域に投影し、この照射された位置を三角測量の原理に基づいて計測し ${}^s p$ とした。また実験に用いたロボットは三菱電機製のMIVE MASTER EXでアーム長はアッパー

Tab.2 Singular Values.

no.	singular values	no.	singular values
1	56.01	13	1.95
2	51.97	14	1.37
3	26.74	15	1.34
4	13.74	16	0.93
5	9.03	17	0.60
6	6.04	18	0.39
7	5.36	19	0.31
8	4.12	20	0.25
9	3.66	21	0.19
10	2.90	22	0.14
11	2.74	23	0.11
12	2.58	24	0.11

Fig.6 Calibration error by the number of singular values.

Fig.7 Parameter error by the number of singular values.

アーム250mm, フォアアーム160mmである。また計測点は、直径4mmで15mm間隔でプロットした。

表1にマニピュレータの姿勢とそのとき計測された sP , wP の値を示す。この表において sP は z 値のみが値を持っているが、 x , y 座標値は0次回折光のために0である。また wP の z 値は10mmと一定であるが、これは作業領域上の高さが一定の平面を計測しているためである。この結果では、 B のランク h は24となったが、その特異値は表2に示す通りであ

る。これから条件数は552となる。

これらの特異値を用いて B^* を計算すると小さな値の特異値の逆数を用いるために、センサの誤差やマニピュレータの非幾何学的な誤差の影響が拡大されてしまう。石井らは式(16)における固有ベクトルの方向を調べ冗長性を排除していたが、本手法では、考慮する特異値の数を変えてキャリブレーションの性能が変化するか調べた。図6に考慮する特異値の数を変えたときに変化する誤差の平均を示す。

各折れ線は、マニピュレータの姿勢を変えてキャリブレーションを行った結果である。また図7に同様に考慮する特異値の数を変えたときのパラメータのバラツキを示す。両結果から考慮する特異値の数は、19程度でよくセンサの誤差やマニピュレータの非幾何学的誤差の影響は少なくなっていることがわかる。以上の結果から、誤差平均20.4mm標準偏差2.6mmからそれぞれ1.4mm, 0.8mmと改善することができた。

5. 結 論

以上マニピュレータのハンド部に取り付けた視覚センサより得られる情報を利用してマニピュレータをキャリブレーションする手法について述べ、実験によりその確実性を確認した。今後はキャリブレーション作業の自動化、ハンドと対象物の相対的位置計測法の開発を行なう予定である。

謝 辞

本研究は(財)東レ科学振興会の研究助成のもとで行なわれたものであることをここに記し、深く感謝する。

また本論文は、故松山滋樹君が修士課程在学中に行なった研究をまとめたものであり、同君のご冥福をお祈り申し上げます。

文 献

- (1) 遠山, " ロボットのモデリングとキャリブレーション", 日本機械学会, ロボティクスメカトロニクス講演会'92, pp. 455-459, 1992.
- (2) 中澤, " 非点収差ビームアレイ投光器による三次元視覚センサの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 7, 1993, pp. 936~941.
- (3) 中澤, " 2次元濃淡画像と疎な距離情報の融合による小型ロボットビジョンセンサの開発", 電学論C, Vol.115-C, No. 3, pp. 389-395, (平7-3).
- (4) 石井, 坂根, 柿倉, 三上, " 3次元モデルに基づくロボットシステムのためのマニピュレータ・キャリブレーション", 日本ロボット学会誌, Vol. 7, NO. 2, pp. 182-pp. 190, 1989.
- (5) H.W. Stone and A.C. Standerson, " A PROTOTYPE ARM SIGNATURE IDENTIFICATION SYSTEM", in Proceedings of the Robotics and Automation, 1987, pp.175-182.
- (6) 青柳, 神谷, 岡部, 佐々木, 高野, " 超音波を用いたロボットの位置, 姿勢精度計測システムの開発", 日本機械学会, ロボティクスメカトロニクス講演会'92, pp. 461-466, 1992.
- (7) R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", International Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.
- (8) R. Y. Tsai and R.K.Lenz, "A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration", Transaction on Robotics and Automation, Vol.5, No.4, pp.345-358, 1989.
- (9) G.J.Agin, "Calibration and Use of a Light Stripe Range Sensor Mounted on the Hand of a Robot", in Proceedings on the Robotics and Automation, pp.680-685, 1985.
- (10) H.Zhuang, W.C.Wu, Z.S.Roth, Camera-Assisted Calibration of SCARA Arms, Robotics and Automation Magazine, pp.46-53, 1996
- (11) 伊理, 児玉, 須田: " 特異値分解とそのシステムの制御への応用", 計測と制御, Vol. 21, No. 8, pp. 763-pp. 772, 1982.