視覚センサを用いたシーリングロボットの 作業軌道の自動教示法*

張 暁 林^{*1}, 藤 堂 勇 雄^{*2}

Automatic Teaching Method of Task Trajectories for a Sealing Robot Using a Vision Sensor

Xiao-lin ZHANG and Isao TODO

In this paper, we propose a method for automatically generating task trajectories of a sealing robot using a three-dimensional vision sensor to teach a sealing task. In this method, the desired trajectory of a robot for a sealing task can be generated by detecting its position and orientation at a seam position through a vision sensor attached to a robot hand. A method for determining the control parameters of the teaching system is also presented by simplifying the block diagram. Since the accuracy of the trajectory generated for the sealing task by this method is not under the influence of the motion of the robot, the task trajectory can be obtained with high accuracy. The effectiveness of the present methods is demonstrated experimentally, and the robot has been shown to move smoothly by determining the control parameters from the simplified block diagram of the teaching system.

Key Words: Measurement and Control, Mechatronics and Robotics, Robot, Digital Control, Sensor, Trajectory Generation, Vision Sensor, Sealing Robot, Automatic Teaching

1. ま え が き

自動車の鋼板の継目にシール剤を塗布する作業をロボットによって行う場合、その継目ラインの形状が複雑になるに従ってロボットにシーリング作業(以下、シール作業と呼ぶ)を教示する手間は増大する。教示されたシーリングロボットの作業軌道を再生中に修正するという方式が視覚センサ付きシーリングロボットの分野でいくつか報告^{(1)~(3)}されているが、シール作業のための軌道の自動生成法についての研究は、いまだ見当たらない。そこで本論文では、シーリングロボットの作業軌道を自動的に生成させて教示を行うという方法を提案した。

産業ロボットに作業させるための教示は、オフライン教示^{(4)~(6)}とオンライン教示とに大別される。オフライン教示は、教示のときロボットを稼働させる必要がないので生産性を高めることができる。しかし、オフライン教示では、再生のとき同一の作業環境を再現できない場合には、実際のロボットを用いて教示内容を

微調整する必要がある。一方、オンライン教示では、作業環境下でロボットを用いるので実際の状況を把握できるため、精度の高い作業軌道を生成することができる。しかしながら、現場での手動のオンライン教示では、長い教示時間を必要とし、作業が複雑で教示作業者の疲労が多く、生産性が落ちる。これに対して、本論文で提案したシーリングロボットの作業軌道を自動的に生成させて教示を行う方法は、教示時間を大幅に短縮できるため、生産性を向上させることができる。

本論文で提案した自動教示法は、視覚センサを継目ラインに沿って移動させる視覚フィードバック制御系を必要とする。従来の視覚センサ付きロボットの視覚フィードバック制御のほとんどの研究^{(7)~(11)}では、視覚センサにより検出した予見情報を用いて、目標軌道を生成しながら、この目標軌道に沿ってロボット(または、手首)を移動させるという方式を用いている。しかし、本論文の自動教示を行うのに必要とする視覚フィードバック制御系では、視覚センサの位置・姿勢を制御量としているため、視覚センサにより検出した情報は、制御量の偏差であり予見情報ではない。このため、従来の方式を本研究の視覚フィードバック制御に適用することはできない。

本論文では、視覚センサの位置・姿勢を制御量とす

* 原稿受付 1995年3月20日。

^{*1} 正員、横浜国立大学大学院 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

^{*2} 正員、横浜国立大学工学部。

る視覚フィードバック制御系を提案し、この視覚フィードバック制御系を近似的に等価変換して安定条件と視覚フィードバックゲインを求めた。ついで、本自動教示法の有効性を実験によって確かめた。

2. 視覚センサ付き シーリングロボットの構成

図1(a)は視覚センサ付きシーリングロボットの構成であり、平行リンク機構をもつ6自由度ロボットの手先にノズルと視覚センサが取り付けられている。図1(b)はその運動学モデルである。シーリングロボットの運動を記述するため三つの座標系 Σ_B , Σ_S , Σ_N を設定する。

ベース座標系 Σ_B は、ロボットベース上の関節軸の上に原点をもち、空間に固定された静止座標系である。視覚センサ座標系 Σ_S は、視覚センサ上に設定され

た動座標系である。ノズル座標系 Σ_N は、ノズルの中心軸と座標系 Σ_S の x_S 軸との交点を原点とする動座標系である[図1(b)参照]。座標系 Σ_B に対する座標系 Σ_S の原点の位置を ${}^B\mathbf{p}_S$ 、姿勢(すなわち、回転行列)を ${}^B\mathbf{R}_S$ とし、座標系 Σ_N の原点の位置を ${}^B\mathbf{p}_N$ 、姿勢を ${}^B\mathbf{R}_N$ とする。座標系 Σ_S から Σ_B への変換行列 ${}^B\mathbf{T}_S$ 、座標系 Σ_N からベース座標系 Σ_B への変換行列 ${}^B\mathbf{T}_N$ は

$${}^B\mathbf{T}_S = \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{R}_S & {}^B\mathbf{p}_S \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B\mathbf{T}_N = \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{R}_N & {}^B\mathbf{p}_N \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

で表される。すなわち、 ${}^B\mathbf{T}_S$, ${}^B\mathbf{T}_N$ は、それぞれ Σ_B から見た Σ_S , Σ_N の位置・姿勢でもある。

ロボットの関節角 $\boldsymbol{\theta}$ から ${}^B\mathbf{T}_S$ への運動学関数を $\mathbf{A}_S(\boldsymbol{\theta})$ とし、 $\boldsymbol{\theta}$ から ${}^B\mathbf{T}_N$ への運動学関数を $\mathbf{A}_N(\boldsymbol{\theta})$ とすれば

$${}^B\mathbf{T}_S = \mathbf{A}_S(\boldsymbol{\theta}), \quad {}^B\mathbf{T}_N = \mathbf{A}_N(\boldsymbol{\theta}) \quad \cdots \cdots (1)$$

で表される。ただし

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$$

図1(b)は $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}$ のときの姿勢を表すものとする。ベース座標系 Σ_B における位置・姿勢 ${}^B\mathbf{T}_S$, ${}^B\mathbf{T}_N$ が与えられたとき、逆運動学関数をそれぞれ $\mathbf{A}_S^{-1}$, $\mathbf{A}_N^{-1}$ とすれば、

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A}_S^{-1}({}^B\mathbf{T}_S) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{A}_N^{-1}({}^B\mathbf{T}_N) \quad \cdots \cdots (3)$$

の関係がある。

3. 三次元視覚センサの構成

シーリングロボットのための三次元視覚センサは、図2のように1台のカメラと2台のスリット光源から構成される⁽¹²⁾。スリット光源の中心軸とカメラの中心軸は一つの平面上にある。二つのスリット光源の中心軸は平行であり、これらの中心軸とカメラの中心軸とのなす角を ϕ とする。

カメラの中心軸延長線とスリット光源1, 2の中心

(a) System schematic representation

(b) Kinematics model

Fig. 1 Sealing robot with visual sensor

Fig. 2 Illustration of vision sensor

軸延長線との交点をそれぞれ A, B とする。座標系 Σ_s の原点を AB の中点 0 に置いたのち、 z_s 軸をカメラの中心軸と一致させ、 x_s 軸を視覚センサ平面上に設定する。

4. シール対象の作業座標系

シール対象の継目ライン上に作業座標系 Σ_w を設定する[図 1 (b)を参照]。図 3 (a)のように板を重ね合わせる場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の接平面の法線に設定する。ただし、継目ラインが曲線状の場合、シール方向は作業点の接線方向とする。図 3 (b)のように 2 枚の板を曲げてから合せる場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の両接平面のなす角を 2 等分する平面上に設定する。図 3 (c)のように板の穴の周辺をシールする場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の接平面の法線に設定する。

以上からわかるように、シール対象の継目ライン上に無数の作業座標系 Σ_w が存在する。 Σ_w の位置と

Fig. 3 Task coordinates Σ_w

Fig. 4 Relationship between Σ_{ws} and Σ_s

姿勢の軌道は、シーリングロボットのデカルト座標系における作業軌道である。図 4 のように原点が座標系 Σ_s の y_s z_s 平面上にある作業座標系 Σ_w を Σ_{ws} と呼ぶ。座標系 Σ_s における Σ_{ws} の原点位置を $(0, d_y, d_z)$ 、ロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ とし

$$\mathbf{f} = [0, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば、図 2 に示す三次元視覚センサ⁽¹²⁾を用いて $\mathbf{f}$ を検出することができる。さらに、ベース座標系から見た Σ_{ws} の位置・姿勢をシール作業の目標位置・姿勢とすれば、この目標位置・姿勢は Σ_N の位置・姿勢と $\mathbf{f}$ を用いて算出できる。 Σ_N を Σ_{ws} と一致させたときのロボット関節角 θ_{wN} をシール作業の目標関節角と呼ぶ。この θ_{wN} の軌跡が再生時におけるシール作業の軌道である。

5. シーリングロボットの作業軌道の自動生成法

本章では、3 章で記述した三次元視覚センサを用いて 6 自由度シーリングロボットのシール作業のための軌道を自動的に教示する方法を提案する。

シーリングロボットの作業軌道を生成するために、ロボットの手先に取付けた視覚センサをシール対象の継目ラインに沿って走行させる必要がある。この作業軌道を自動生成するための教示制御システム(以後、教示システムと呼ぶ)を図 5 に示す。座標系 Σ_s が Σ_{ws} と一致するときのロボット関節角 θ_{ws} を教示システムの目標関節角と呼び、 θ_{ws} の軌跡を教示システムの目標軌道と呼ぶ。

本手法では、まず操作盤で操作を行い、ロボットの視覚センサ座標系 Σ_s をシール対象のシール作業終点の作業座標系と一致させ、そのときの関節角 θ_f を記憶する。ついで、 Σ_s をシール作業の開始位置の作業座標系 Σ_w と一致させたのち、三次元視覚センサを用いて座標系 Σ_{ws} の位置と姿勢を検出しながら Σ_s を Σ_{ws} と一致するように継目ラインに沿って走行させる。ロボットの関節角 θ が θ_f に十分近くなったとき教示を終了させる。

本教示システムは、(1)シーリングロボットの手先の視覚センサをシール対象の継目ラインに沿って走行させるための視覚フィードバック制御系(図 5 の左中央の破線枠以外の部分)、および、(2)(1)の走行制御を行いながらシーリングロボットの作業軌道を自動的に生成するシステム(図 5 の左中央の破線で囲んだ部分)の二つの部分から構成される。右側の破線で囲んだ部分は視覚センサを表す。

5.1 教示のための視覚フィードバック制御

Fig. 5 Block diagram of trajectory generating system
($k=0, 1, 2, \dots; i=0, 1, 2, \dots$)

ボットを駆動する制御系 $G(z)$ のサンプリング周期を T とし、視覚センサによって画像を取込む周期を mT とする。ただし、 m は正の整数とする。ロボットを駆動する制御系のサンプリング時点を $t=kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$) とし、視覚センサのサンプリング時点を $t=imT$ ($i=0, 1, 2, \dots$) とする。ただし、 $k=0$ のとき $i=0$ とする。

Σ_S から見た Σ_{WS} の位置・姿勢 ${}^S T_{WS}$ は

$${}^S T_{WS} = T_r(f) \quad \dots \dots \dots (5)$$

で表される。ただし、 $T_r(\quad)$ は並進回転変換関数であり、

$$h = [d_1, d_2, d_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$$

とおけば、

$$T_r(h) = \text{Trans}(d_1, d_2, d_3) \cdot \text{Rot}(z_s, \theta_3)$$

$$\times \text{Rot}(y_s, \theta_2) \cdot \text{Rot}(x_s, \theta_1) \quad \dots \dots \dots (6)$$

で与えられる。Trans(d_1, d_2, d_3) はベクトル $d_1 \mathbf{i} + d_2 \mathbf{j} + d_3 \mathbf{k}$ だけ並進させる変換行列であり、Rot(x_s, θ_1), Rot(y_s, θ_2), Rot(z_s, θ_3) はそれぞれ、 x_s, y_s, z_s 軸回りに角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ だけ回転させる変換行列である⁽¹³⁾。また、 ${}^S T_{WS}$ の値が与えられたとき、 $T_r(\quad)$ の逆関数を $T_r^{-1}(\quad)$ とすれば

$$f = T_r^{-1}({}^S T_{WS}) \quad \dots \dots \dots (7)$$

の関係がある。

$k=0$ のときロボットの初期位置・姿勢 ${}^B T_S$ をシール作業開始位置での作業座標系の位置・姿勢 ${}^B T_{WS}$ と一

致させる。図5で示すロボットを駆動する制御系 $G(z)$ の Σ_B から見た k 時点の目標位置・姿勢 ${}^B T_d(k)$ は、(1) 視覚センサから検出した位置・姿勢の偏差と (2) $k-1$ 時点から k 時点までの間にノズルが移動した距離を用いて ${}^B T_d(k-1)$ を修正することによって求められる。すなわち、

$${}^B T_d(k) = \begin{cases} {}^B T_S(0) = {}^B T_{WS}(0) & (k=0) \\ {}^B T_d(k-1) \cdot T_r(\Delta r(k-m)) & (k=1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (8)$$

で表される。ただし、

$$\Delta r(k-m) = [d_x(k), 0^T]^T + f^*(k-m) \quad \dots \dots (9)$$

$$f^*(k-m) = \frac{1}{m} K \cdot f(im-m) \quad \dots \dots \dots (10)$$

である。

$d_x(k)$ は、サンプリング時点 kT から $(k+1)T$ までの間、座標系 Σ_S の原点がシール方向に走行する距離である。サンプリング時点 kT から $(k+1)T$ までの間の走行速度の平均値を $v(k)$ とおけば、この距離 $d_x(k)$ は

$$d_x(k) = v(k)T \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad \dots \dots \dots (11)$$

で表される。

画像処理のサンプリング時点 imT から $(i+1)mT$ までの間に座標系 Σ_S の原点が走行した距離 $l(i)$ は

$$l(i) = \sum_{k=i}^{(i+1)m-1} d_x(k) \quad \dots\dots\dots (12)$$

で表される。本論文では継目ラインの曲率や生成する作業軌道の許容精度などを考慮して $l(i)$ の最大値 $l_{\max}$ を指定し、 $l(i)$ が $l_{\max}$ を超えないように $v(k)$ を設定する。

$G_h(s)$ は零次ホールドであり、

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-mTs}}{s} I \quad \dots\dots\dots (13)$$

で表される。ただし、 I は単位行列である。また、図5の中の O は零行列である。

視覚フィードバック系の制御パラメータ K を

$$K = \text{diag} [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6]$$

とする。 K の値を決定するため、図5の左中央の破線枠の外側のブロック線図を以下のようにして簡略化する。

逆運動学関数 $J_s^{-1}(\)$ を用いると、式(8)から、

$$\theta_d(k) = \begin{cases} J_s^{-1}({}^B T_{ws}(0)) = \theta_{ws}(0) & (k=0) \\ J_s^{-1}({}^B T_d(k-1) \cdot T_r(\Delta r(k-m))) & (k=1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。いま

$$\Delta \theta_d(k) = \theta_d(k) - \theta_d(k-1) \quad \dots\dots\dots (15)$$

とおけば、 Δr の各要素が微小であるため、

$$\Delta \theta_d(k) = \begin{cases} 0 & (k=0) \\ J_s^{-1}(\theta_d(k-1)) \cdot \Delta r(k-m) & (k=1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (16)$$

が成立する。 $J_s^{-1}(\)$ は逆ヤコビ行列であり、式(9)を式(16)に代入すると

$$\Delta \theta_d(k) = e_x(k) + e^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。ただし、

$$e_x(k) = J_s^{-1}(\theta_d(k-1)) \cdot [d_x(k), 0]^T \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$e^*(k-m) = J_s^{-1}(\theta_d(k-1)) \cdot f^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$e_x(k)$ は、座標系 $\Sigma_s(k)$ の原点が x_s 軸方向に d_x だけ移動したときロボットの各関節が回転する角度である。式(17)を式(15)に代入すると

$$\theta_d(k) = \theta_d(k-1) + e_x(k) + e^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (20)$$

が得られる。このため、図5の視覚フィードバック制御系(左中央の破線枠の外側)を図6(a)のように等価変換することができる。

mT が十分小さいため

$$J_s^{-1}(\theta_d(k-1)) \doteq J_s^{-1}(\theta_d(im)) \quad (im \leq k < (i+1)m) \quad \dots\dots\dots (21)$$

が近似的に成り立ち、また、 $G_h(s)$ と K は対角行列であるため、図6(a)は図6(b)のブロック線図で近似することができる。 $e(im)$ は

$$e(im) = J_s^{-1}(\theta_d(im)) \cdot f(im)$$

で表される。この $e(im)$ は、視覚センサにより検出した $k=im$ における座標系 $\Sigma_s(im)$ の位置・姿勢と作業座標系 $\Sigma_{ws}(im)$ の位置・姿勢との偏差をロボットの関節角に変換したものである。すなわち、

$$e(im) = \theta_{ws}(im) - \theta(im)$$

である。図6の逆ヤコビ行列 $J_s^{-1}(\)$ は、説明便宜の

(a) Simplified representation of Fig. 5

(b) Approximation of block diagram in Fig. 6(a)

Fig. 6 Equivalent block diagram of Fig. 5

Fig. 7 Equivalent block diagram of Fig. 6

 Fig. 8 Teaching system with sampling period mT

ために用いられているが、実際の制御には不要である。

図7は図6(b)を等価変換したものである。ホールダ $G_h^*(s)$ の入力 $\theta_d^*(im)$ と出力 $\theta_d(k)$ との間には次のような関係がある。

$$\begin{aligned} \theta_d(k) &= \theta_d^*((i-1)m) \\ &+ \frac{\theta_d^*(im) - \theta_d^*((i-1)m)}{m} \cdot (k - im + 1) \\ (im \leq k < (i+1)m) &\dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

図5の中のロボットを駆動する制御系 $G(z)$ ではPI-D制御を行う。ただし

$$\begin{aligned} K_P &= \text{diag} [K_{P1} \ K_{P2} \ K_{P3} \ K_{P4} \ K_{P5} \ K_{P6}] \\ K_I &= \text{diag} [K_{I1} \ K_{I2} \ K_{I3} \ K_{I4} \ K_{I5} \ K_{I6}] \\ K_D &= \text{diag} [K_{D1} \ K_{D2} \ K_{D3} \ K_{D4} \ K_{D5} \ K_{D6}] \end{aligned} \dots\dots\dots (23)$$

とする。制御系 $G(z)$ が安定ならば、 $m \gg 1$ の場合、近似式

$$\theta(im) \approx \theta_d^*((i-1)m) \dots\dots\dots (24)$$

が成立する。すなわち、図7(b)の $G^*(Z)$ は近似的に

$$G^*(Z) = Z^{-1}I \dots\dots\dots (25)$$

で表される。ただし、

$$Z = e^{mTs} = z^m$$

とする。図7(b)は図8のように変換することができる。図8の特性方程式は

$$Z^2 - Z + K_j = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 6) \dots\dots\dots (26)$$

であるため、教示システムの安定条件は

$$0 < K_j < 1 \quad (j=1, 2, \dots, 6)$$

である。 $K_j = 0.25$ ($j=1, 2, \dots, 6$) のとき、応答 $\theta(im)$

Fig. 9 Control system for payback operation

($i=0, 1, 2, \dots$) は臨界減衰となる。

5.2 シール作業のための軌道の生成 図5の破線枠の中は作業軌道を生成する部分である。ベース座標系 Σ_B から見た座標系 Σ_S の位置・姿勢 ${}^B T_S$ はロボットの関節角から求められ、検出した f の値から作業座標系 Σ_{WS} の Σ_S における位置・姿勢 ${}^S T_{WS}$ を算出できるため、 Σ_B から見た作業座標系 Σ_{WS} の位置・姿勢 ${}^B T_{WS}$ を求めることができる。図5に示すように視覚センサの出力 f から算出した ${}^S T_{WS}$ の値を ${}^S T_{WS}^*$ 、 ${}^B T_{WS}$ の値を ${}^B T_{WS}^*$ とすると

$$\begin{aligned} {}^B T_{WS}^*(im-m) &= {}^B T_S(im-m) \cdot {}^S T_{WS}^*(im-m) \\ &= {}^B T_S(im-m) \cdot T_r(f(im-m)) \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

の関係がある。

シール作業の軌道 $\theta_{wN}(im-m)$ ($i=1, 2, 3, \dots$) は

$$\begin{aligned} \theta_{wN}(im-m) &= A_N^{-1}({}^B T_{WS}^*(im-m)) \\ (i=1, 2, 3, \dots) &\dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

から求められる。

自動生成された作業軌道を再生する制御系は、図5の $G(z)$ と同じ制御方式をとり図9で示される。図9の目標値 $\theta_{wN}(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$) には、教示時に記憶されている

$$\theta_{WN}[i-1] = \theta_{WN}(im-m) \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (29)$$

の値を用いる。目標値 $\theta_{WN}(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$) を用いたシール作業の走行速度は $l(k)/T$ ($k=0, 1, 2, \dots$) であるため、これ以外の走行速度でシール作業を行いたい場合、記憶してある $\theta_{WN}[i-1]$ ($i=1, 2, 3, \dots$) の値から新しい作業軌道を算出する必要がある。また、視覚センサに測定雑音がある場合には、 $\theta_{WN}(k)$ をフィルタに通すことによって、滑らかな作業軌道を作ることができる。

6. 教示実験の結果

シーリングロボットの本体には(株)安川電機製マニピュレータ Motoman K3S を用いて実験を行った。

実験で用いた制御パラメータ K_P , K_I , K_D の値を表 1 に示す。サンプリング周期 T を $T=5 \text{ ms}$ とし、 $m=20$, $K=0.25I$ に設定する。自動教示時におけるロボット手先の視覚センサの走行速度は台形とし、加減速度は 0.2 m/s^2 、走行速度が一定になったときの速度は 0.02 m/s である。

実験で用いたシール対象を図 10 に示す。鋼板の厚さは 0.6 mm であり、継目ラインの形状は、開始点から (1) 直線 (280 mm)、(2) 半円 (半径 150 mm)、(3) 直線 (120 mm)、(4) 直線 (120 mm) の順になっている。(3) と (4) の直線のなす角は 165° である。鋼板全体は

Table 1 Parameters used in the experiment

i	K_{Pi} V/rad	K_{Ii} V/rad	K_{Di} V/rad
1	7 360	6.25	8.05
2	5 790	7.08	6.86
3	6 910	8.22	6.08
4	581	14.72	3.32
5	1 356	18.51	2.57
6	740	21.00	2.43

Fig. 10 Sealing object used in the experiment

ロボットのベース座標系の y_B 軸回りに 20° だけ回転し座標系 Σ_B に対して図 10 のように設置する。

図 11 は、 ${}^B T_d(im)$, ${}^B T_s(im)$, ${}^B T_{ws}^*(im)$, ${}^B T_{ws}(im)$ の中の位置ベクトル ${}^B p_d(im)$, ${}^B p_s(im)$, ${}^B p_{ws}^*(im)$, ${}^B p_{ws}(im)$ の軌跡である。 ${}^B T_{ws}(im)$ は、図 10 のシール対象の特徴点のみを計測し、これを画像サンプル点における値に換算したものである。ただし、

$${}^B p_d(im) = [{}^B x_d(im), {}^B y_d(im), {}^B z_d(im)]^T$$

$${}^B p_s(im) = [{}^B x_s(im), {}^B y_s(im), {}^B z_s(im)]^T$$

$${}^B p_{ws}^*(im) = [{}^B x_{ws}^*(im), {}^B y_{ws}^*(im), {}^B z_{ws}^*(im)]^T$$

$${}^B p_{ws}(im) = [{}^B x_{ws}(im), {}^B y_{ws}(im), {}^B z_{ws}(im)]^T$$

である。

(a) $x_B y_B$ plane

(b) $y_B z_B$ plane

Fig. 11 Experimental Results

Fig. 12 Response of error E_s

Fig. 13 Response of error E_{ws}^*

図 12, 13 はそれぞれ次式で定義される偏差値 $E_s(i)$, $E_{ws}^*(i)$ を示す。

$$E_s(im) = \| {}^B p_{ws}(im) - {}^B p_s(im) \|_2 \cdots \cdots (30)$$

$$E_{ws}^*(im) = \| {}^B p_{ws}(im) - {}^B p_{ws}^*(im) \|_2 \cdots \cdots (31)$$

ただし, $\| \cdot \|_2$ はユークリッドノルムを表す。

本手法によって生成された作業軌道 $\theta_{wn}[i]$ の精度は視覚センサの測定精度と同じであり, 図 13 では E_{ws}^* は ± 1 mm 以内である。教示時におけるロボットの走行軌道は図 12 に示すように実際の継目ラインから多少ずれているが, これは図 13(すなわち, 作業軌道の精度)には影響を及ぼさないことがわかる。すなわち, 継目ラインが視覚センサの撮像領域中にあれば, 本手法によって作業座標系の正確な位置と姿勢を生成できることが実験からも確かめられた。

7. ま と め

これまでシーリングロボットのオンライン教示は手動で行われており, 本論文によって初めて自動化が可能となった。本論文で得られた結果は次のとおりである。

(1) 三次元視覚センサを用いてシーリングロボットの作業軌道を自動的に生成させて教示を行うという方法を提案した。ついで, 教示実験によって本手法の有効性を確かめた。

(2) 本教示システムのブロック線図を近似的に等価交換して制御パラメータを決定するという方法を示した。ついで, 教示システムが臨界減衰となるように

ゲイン K の値を設定することにより, 滑らかな教示走行を実現することができることを実験によって確かめた。

(3) 本教示法では, 教示システムの中で視覚センサの位置・姿勢が補正されているので, 高精度の作業軌道が得られる。このことを実験でも確かめた。

文 献

- (1) Sawano, S., Ikeda, J., Utsumi, N., Ohtani, Y., Kikuchi, A. and Ito, Y., *Robotica*, **2**(1984), 41-46.
- (2) 張曉林・沢野 進・富川英亮・藤堂勇雄, 機論, **59** 563, C (1993), 2191-2197.
- (3) 張曉林, 藤堂勇雄, 機論, **60** 577, C(1994), 3130-3137.
- (4) Buchal, R. O., Cherchas, D. B., Sassani, F. and Duncan, J. P., *Int. J. Robotics Research*, **8** 3(1989), 31-43.
- (5) Hornick, M. and Ravani, B., *Int. J. Robotics Research*, **4**-4(1986), 18-31.
- (6) 沖野教郎, 日本ロボット学会誌, **3** 2(1985), 118-123.
- (7) Feddema, J. T. and Mitchell, O. R., *IEEE Trans. Robotics and Autom.*, **5**-5(1989), 691-700.
- (8) Weiss, L. E., Sanderson, A. C. and Neuman, C. P., *IEEE J. Robotics and Autom.*, **3**-5(1987), 404-417.
- (9) Agapakis, J. E., Katz, J. M., Friedman, J. M. and Epstein, G. N., *Int. J. Robotics Research*, **9** 5(1990), 17-33.
- (10) Ishii, M., Sakane, S., Kakikura, M. and Mikami, Y., *Int. J. Robotics Research*, **6** 2(1987), 45-59.
- (11) 橋本秀紀・久保田孝・佐藤基夫・原島文雄, 日本ロボット学会誌, **8** 4(1990), 390-396.
- (12) Agapakis, J. E., *Int. J. Robotics Research*, **9** 5(1990), 3-16.
- (13) Paul, R. P., *Robot Manipulators*, (1981), 13, 15, MIT Press.