教示データとセンサデータの相補的利用に基づく

空間経路生成法 SmarTrack*

(経路変形への適用性評価とパラメータ設計)

野 中 潔^{*1}, 柿 崎 隆 夫^{*2}

Spatial Path Generation Algorithm "SmarTrack" by Complementary Use of Nominal and Sensory Path Data (Applicability Evaluation and Parameter Design in the Case Where Actual Paths are Transformed)

Kiyoshi NONAKA and Takao KAKIZAKI^{*3}

^{*3} Department III, Nippon Telegraph and Telephone Corporation,
2-3-1 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8116 Japan

This paper describes applicability evaluation and parameter design of SmarTrack Algorithm in the case where actual paths are transformed. SmarTrack is the spatial path generation algorithm based on the complementary use of nominal path data and sensory data of an actual path proposed by the authors to realize a high reliability seam tracking robotic system which can operate even under poor sensing environments. SmarTrack is basically premised on that a nominal path and an actual path have a relation of rigid body motion. To evaluate applicability of this algorithm in the case where actual paths are transformed, path transformation is modeled by three kinds, bend, arc and cyclic, then the position error and the orientation error of the generated path by SmarTrack to the three kinds of path transformation are investigated in the simulation. As a result of the simulation, relation between the amount of transformation and the algorithm parameters, and the position error and the orientation error of the generated path by SmarTrack was clarified quantitatively. This result indicates that by using the revision matrix obtained in the partial section which sandwiches a tool, SmarTrack can apply to the case where actual paths are transformed. Also it is shown clearly that SmarTrack has the applicable domain to the amount of transformation of the actual path which happen by arc-welding. Based on the results, algorithm parameters design criterion appropriate to the task specification is described for SmarTrack algorithm.

Key Words: Robot, Manipulator, Sensor, Spatial Seam Tracking, Nominal Path Data, Sensory Path Data, Spatial Path Generation Algorithm, Parameters Design

1. 結 言

少子高齢化・団塊の世代の引退による労働力不足や多品種変量生産への対応から、製造業における次世代産業用ロボットの導入・拡大が必要とされている⁽¹⁾。

特に、「倣い」はセンサロボットの基本機能の一つであり、空間経路倣いロボットシステムはアーク溶接やシーリング作業などに代表される生産ラインの自動化・省力化に大きく貢献してきた。しかし、その多くは教示再生型であり、ワークの据付誤差や形状誤差、熱変形などによる作業品質の劣化が指摘されてきた。他品種変量生産が進む今日では、ワークの多様化による教示や治具のコスト増大という問題も加わり、教示再生型に代わる新たなシステムの実現が望まれている。

この問題の解決に向け、センサによりリアルタイムで目標経路の位置姿勢を検出してツールの位置姿勢を制御するセンサベース空間経路倣いロボットシステムの研究がなされてきた。河原・滝⁽²⁾は視覚センサデータに統計的処理を加えて特徴点推定を行う溶接線倣い制御システムを提案した。浅田・花房⁽³⁾、花房・吉川・中村⁽⁴⁾、中村・花房⁽⁵⁾⁽⁶⁾は作業プロセスと密接に関連した作業変数を導入し、これ为目标値とする倣い制御系の設計法を検討した。N. Nayak・A. Ray⁽⁷⁾⁽⁸⁾は先読みセンサを用いた溶接用自律経路倣いシステムについて検討し、システム構成法と経路生成法を提案した。また、Y. Ishiguro ら⁽⁹⁾、J.T. Huang ら⁽¹⁰⁾は教示経路をセンサデータで補正する方式を提案した。

このように多くの研究がなされてきているが、生産ラインで実績を挙げている例はあまり見られないようである。その主な理由の一つが、劣悪なセンシング環境下で安定かつ十分な精度で目標経路を復元する技術

* 原稿受付 2007年2月19日。

^{*1} NTTエレクトロニクス(株) (☎ 221-0052 横浜市神奈川区栄町3-12)。

^{*2} 正員、フェロー、日本電信電話(株) (☎ 100-8116 東京都千代田区大手町2-3-1)。

E-mail: tkokaki@sepia.ocn.ne.jp

が確立されていない点にあるとされている。例えばアーク溶接では、アーク光やヒューム・スパッタ等が計測誤差を惹き起こし、最悪の場合には特徴点の検出が不可能（センサデータ欠落）になる。さらに、仮付けビードや経路近傍の凹凸・経路の分岐等が異形断面を形成し、連続的な特徴点認識やセンサデータ欠落を発生させてロボットの異常動作を引き起こす。したがって、生産現場にセンサベースロボットシステムを導入するためには、センサデータ不確実性が惹き起こすこれらの問題を解決し、安定で高精度に目標経路を復元できる空間経路復元アルゴリズムの実現が重要であり、そのための研究がなされてきた^{(11)~(16)}。

文献(11),(13),(15)では、詳細な経路教示の不要な自律型空間経路復元ロボットシステム CubeTrack が提案され、経路復元アルゴリズムとその特性、パラメータ設計法が述べられている。また、文献(12),(14),(16)では、センシング環境がより厳しく、データ欠落の発生しやすい作業への適用を目的として、教示データとセンサデータとを相補的に利用する空間経路復元ロボットシステム SmarTrack が提案され、経路復元アルゴリズムとその特性、誤差解析、パラメータ設計法が述べられている。

基本的には、SmarTrack は実経路と教示経路とが剛体変位の関係にある（実経路の変形は存在しない）ことを前提としたアルゴリズムである。文献(16)では剛体変位の場合についての経路復元特性を評価した。しかし、実際のアーク溶接では、ワークの形状誤差や熱変形などによる経路の変形が避けられず、変形が存在する場合の経路復元特性の評価を行う必要がある。

本論文では、SmarTrack の経路変形に対する経路復元特性をシミュレーションにより評価し、その適用領域を明らかにすると共に、アルゴリズムパラメータ設計法を示す。それにより、他の経路復元アルゴリズムとの経路復元特性や適用領域の比較および現場への導入の適否判断に資するデータを明らかにする。以下、第2章で SmarTrack の概要とワーク変形が経路復元特性に与える影響について述べる。第3章ではシミュレーションの方法とシミュレーションによる経路復元特性の評価結果を示し、第4章ではパラメータ設計法を示す。最後に第5章で結論を述べる。

2. SmarTrack 空間経路復元ロボットシステム

2.1 対象とする作業 本論文では、典型的な空間経路復元作業であるロボットアーク溶接を対象とする。アーク溶接でのツール（溶接トーチ）位置決め要求精度はサブミリメートルオーダーである。しかし、ワ

ークの形状誤差や据付誤差、熱変形などはそれを上回るため、センサで実経路を検出しながら倣い作業を行う必要がある。ところがアーク溶接では溶融池が形成されるため、ツール直下の作業点における経路の位置・姿勢の計測ができない。そこで、センサをツールの前方に装着し、経路情報を先行取得しながら倣いを行う「先読み方式」を採用する。溶接中に発生する実ワークの変形にリアルタイムで反応して高精度な倣いを実現するためにはツールセンサ間距離 L_{ST} を出来るだけ小さくしたいが、溶融池の大きさや経路関数の生成メカニズムなどから、実際のシステムでの L_{ST} は最小でも 20.0mm 程度となる。

図1はアーク溶接ロボット作業の概念図で、先読みセンサでツール前方の経路情報を取得し、それに基づいてリアルタイムでツール目標値を生成しながら倣いを実行する。図2にはワーク、ツールおよび先読みセンサの関係を示す。アーク溶接では2つの金属部材の接合部分を「開先」と呼ぶ。図2に示す「重ね開先」

Fig.1 Schematic of sensor-based robot arc-welding as typical spatial path tracking task

Fig.2 Schematic of workpiece, tool and sensor

では上板の端面と下板の表面との交差線が目標経路となる。この経路は開先断面形状内では「特徴点」と呼ばれ、ツールを位置決めする際の目標となる。図2の O_p は特徴点の一例である。

2.2 SmarTrack アルゴリズム 安定で高信頼なセンサベースロボットシステムを実現するためには、計測誤差・センサデータ欠落・連続的な特徴点誤認識などの存在下でも安定に目標経路を復元できる技術が必要である。SmarTrack ではこの目的を達成するために、教示データとセンサデータとを相補的に利用する。

本研究では経路上の参照点に局所座標系を設け、その位置を表すために経路パラメータ $s \in R$ を導入する。 s については以下の前提を置く。

- (1) s は経路上の1点と1対1に対応する。
- (2) 局所座標系の位置姿勢は s の1個関数である。
- (3) s の連続的な変化に対して局所座標系の位置姿勢も連続的に変化する。

s の取り方には任意性があるが、ここでは s を経路開始点から参照点までの経路長として定義する。

また、 Σ_A はデカルト座標系Aを表し、基準座標系を Σ_0 で表す。 ${}^A T_B \in R^{4 \times 4}$ はベクトルの Σ_0 による表現を Σ_A による表現に変換する同次変換行列であり、 Σ_0 の Σ_A による表現でもある。以下、 ${}^A T_B$ を式(1)で表す。ここで、 ${}^A R_B \in R^{3 \times 3}$ は回転行列で Σ_0 の姿勢の Σ_A による表現であり、 ${}^A p_B \in R^3$ は並進ベクトルで Σ_0 の原点位置の Σ_A による表現である。

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A p_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

図2に示すように、経路上の参照点に経路座標系 Σ_p 、ツールにツール座標系 Σ_T 、センサにセンサ座標系 Σ_s を定義する。これら座標系の定義は任意であるが本論文では次のようにする。まず、 Σ_p は原点 O_p を特徴点に置き、 X_p 軸は経路の接線方向でツールの進む向き、 Z_p 軸は経路に垂直な断面内で開先角を二等分しワーク表面から外部に向かう向き、 Y_p 軸はそれらと右手系をなす向きとする。 Σ_T の原点 O_T はツール軸上に置き、 O_T が O_p に一致したときにツール先端と特徴点との距離が最適になるように設定する。 Z_T 軸はツール軸方向でツールの先端から根本に向かう向き、 X_T 軸はツールからセンサに向かう向き、 Y_T 軸はそれらと右手系をなす向きに設定する。 Σ_s はセンサで定義される。

SmarTrack では初めにセンサで離散的に実経路の位置姿勢情報を取得し、実経路上に局所的な経路座標系を設定する。次に、CubeTrack⁽¹⁰⁾を用いて、実経路の位置姿勢を s に関する $(n-1)$ 階微分まで連続な m 次の区分的

多項式関数 $P_i(s)$ で表す。関数はセンサデータの取得ごとに区間ずつ生成される。すなわち、第 $(i-1)$ 区間 $(s_{i-2} \leq s \leq s_{i-1})$ の経路関数 $P_{i-1}(s)$ まで生成されているとき、その先の N 点 $(s = s_i, s_{i+1}, \dots, s_{i+N-1})$ で得たセンサデータを用いて、 $P_{i-1}(s)$ と s に関する $(n-1)$ 階微分まで連続な s の m 次関数 $P_i(s)$ を生成する。このとき $N \geq m - n + 2$ として、 $P_i(s)$ を $P_{i-1}(s)$ との n 回の接続条件を満足し、 N 点のセンサデータに対して最小二乗誤差を与える回帰曲線とする。続いて、点 s_i における CubeTrack 関数値と教示データから教示経路を実経路に写像する変換行列 T_{Ami} を算出する。CubeTrack 関数が誤差を含むため T_{Ami} も誤差を含む。そこで、 M 点の $\{T_{Amk}\}$, $k = i - M + 1, \dots, i - 1, i$ の平均値として変換行列の推定値 T_{mdi} (以下、修正行列と呼ぶ) を算出する。点 s_j におけるツール目標値 ${}^R T_{Tj}^{ref}$ は、 M 個の $\{s_k\}$ の平均値が最も s_j に近い修正行列 T_{mdi} を用いて次式から算出される。

$${}^R T_{Tj}^{ref} = T_{mdi} \cdot {}^R T_P^{MW}(s_j) \cdot {}^P T_T(s_j) \quad (2)$$

ここで、 ${}^R T_P^{MW}(s_j)$ は教示経路の位置姿勢、 ${}^P T_T(s_j)$ は経路座標系で表したツール座標系の位置姿勢である。

2.3 SmarTrack と経路変形 実経路に変形がない場合は、教示経路を並進・回転させて実経路に一致させることができ(剛体変位)、変換行列は経路上の全ての点で同じ値になる。センシング誤差の平均が0であれば、得られた全ての変換行列の平均値から修正行列の推定値が得られ、センシング点数の増加と共に修正行列の推定精度の向上が期待できる。

しかし、アーク溶接では部材の加工・組立や仮付溶接、実際の溶接などでワークに変形が生ずる。実経路に変形がある場合、変換行列は局所的に変化する。その場合は、ツールを挟む局所区間で近似的に剛体変位が成立すると見なし、その区間で得られた変換行列のみから局所的修正行列を求める。局所的修正行列を用いてツール目標値を算出することにより、ある程度の変形には対応できる。

2.4 実経路の変形と経路復元誤差

2.4.1 変形と誤差要因

変形の形態と変形量が直接的な経路復元誤差の要因となるが、ツール目標値算出位置とツール目標値の算出に使用する局所的修正行列の算出位置とにズレ(以下これをズレ量 D と呼ぶ)が生ずると、ズレ量は二次的な誤差要因となる。

センシング間隔 L_s や N, M の増加と共に局所的修正行列算出位置は後方に移り、局所的修正行列算出位置がツール目標値算出位置よりも後方になる場合がある。実経路に変形がある場合には局所的に修正行列が変化

するので、ツール目標値算出位置 (s_j) での局所的修正行列を用いてツール目標値を算出しなければならない。しかし、ツール目標値算出位置での局所的修正行列が算出されていない場合には、その時得られている最も s_j に近い点での局所的修正行列を用いてツール目標値を算出せざるを得ず、ツール目標値の位置・姿勢に二次的な誤差が生ずる。

2.4.2 ズレ量の導出

図3に、ツールを位置決めし、センシングを行い、CubeTrack 関数を生成し、局所的修正行列を生成した時点での、 L_s , L_{ST} , N , M とズレ量 D との関係を示す。センシング点と次のツール目標値算出点との間隔を l_1 、センシング点と修正行列算出点との間隔を l_2 と置き、 l_1 , l_2 をセンシング間隔数で表すと次式のようになる。

$$l_1 = \frac{L_{ST}}{L_s} - 1 \quad (3)$$

$$l_2 = (N-1) + \left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil_{\text{int}} \quad (4)$$

ここで、 $\lceil x \rceil_{\text{int}}$ は x の整数部を意味する。ズレ量をセンシング間隔数で表した値 D は次式で表される。

$$D = l_1 - l_2 = \frac{L_{ST}}{L_s} - N - \left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil_{\text{int}} \quad (5)$$

ただし、 $D \geq 0$ の場合は次のツール目標値算出点での修正行列が生成されるのでズレ量 $D = 0$ とする。 $D < 0$ の場合はツール目標値算出点より $D \cdot L_s$ 後方の点での修正行列を用いてツール目標値を算出する。

表1は、 $L_{ST} = 20.0\text{mm}$ の場合のパラメータ L_s mm, N , M とズレ量 D mm との関係を示している。太枠内でズ

レが発生している。

3. シミュレーション

本章では、教示経路を直線とし、実経路に変形が生じた場合に、SmarTrack で復元した経路と変形した実経路との間にどれだけの位置・姿勢誤差が発生するかをシミュレーションにより定量的に評価する。

3.1 シミュレーションの方法

シミュレーションでは、変形を屈折、円弧および周期的の三種類でモデル化する。実システムではワークをクランプするので、屈折や円弧変形のように変形し続けることはないが、ここでは、局部的に屈折や円弧状の変形が発生する場合を想定している。変形量は実システムで想定される値より大きめに設定し、屈折変形では屈折角 $\theta_b = 1.0, 3.0, 5.0\text{deg}$ 、円弧変形では曲率半径 $r_a = 200.0, 300.0, 400.0\text{mm}$ 、周期的変形では変形を $\cos$ 曲線として周期 $P_c = 50.0, 100.0, 200.0\text{mm}$ 、振幅 $A_c = 1.0, 2.0, 3.0\text{mm}$ とする。システムパラメータは $L_s = 1.0, 2.0, 4.0\text{mm}$, $N = 4, 7, 10$, $M = 4, 7, 10$ として、各変形ごとに全ての組み合わせについてデータを収集する。

なお、センサからは実経路の正確な位置・姿勢情報が与えられるものとする。

ズレ量が位置・姿勢誤差に与える影響を評価するために、 $L_s = 2.0\text{mm}$ で ($N=7, M=10$) と ($N=10, M=4, 7, 10$) の場合は $L_{ST} = 30.0\text{mm}$ とし、 $L_s = 4.0\text{mm}$ で ($N=4, 7, 10, M=4, 7, 10$) の場合は $L_{ST} = 60.0\text{mm}$ として、ズレ量 $D=0$ の場合の復元経路の位置・姿勢誤差を求める。

なお、SmarTrack の中で用いる CubeTrack のパラメータは文献(11)の CaseA と同様に、次の値を用いる。

①経路関数 (区分的多項式関数) の次数: $m=3$

②区間接続条件の数: $n=2$ (1階微分まで連続)

シミュレーションの結果から、上記パラメータ値の範囲において以下の知見が得られた。

Table 1 Distance D (mm) between next tool position and position where revision matrix $T_{mod,j}$ was generated ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)

N	M	L_s		
		1.0	2.0	4.0
4	4	0.0	0.0	4.0
	7	0.0	0.0	8.0
	10	0.0	0.0	16.0
7	4	0.0	0.0	16.0
	7	0.0	0.0	20.0
	10	0.0	4.0	28.0
10	4	0.0	4.0	28.0
	7	0.0	6.0	32.0
	10	0.0	10.0	40.0

Fig.3 Relation between D and algorithm parameters

3・2 シミュレーション結果

3・2・1 屈折変形

ズレ量 $D=0$ の場合もズレ量 $D \neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$) の場合も、パラメータ値 L_s mm, N , M が一定の場合、復元経路に含まれる位置・姿勢誤差のピーク値は屈折角 θ_b deg に比例する。その比例係数をそれぞれ位置誤差係数 c_{pb} mm/deg および姿勢誤差係数 c_{ob} とすると、位置・姿勢誤差のピーク値 e_{pb} mm, e_{ob} deg はそれぞれ次の実験式で表される。

$$e_{pb} = c_{pb} \cdot \theta_b \quad (6)$$

$$e_{ob} = c_{ob} \cdot \theta_b \quad (7)$$

表2にズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ の場合の位置誤差係数 c_{pb} を示す。これらの係数の実測値に対する誤差は0.5%以内である。また、表3にズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ の場合の姿勢誤差係数 c_{ob} を示す。これらの係数の実測値に対する誤差は最大で10.7%、他はほぼ0%である。

表2および表3のズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ との差を比較すると、ズレ量の増加に伴い位置・姿勢誤差の大きさと共に強い相関のあることがわかる。ズレ量=0の範囲では、パラメータ値 L_s mm, N , M の増加に伴う位置・姿勢誤差係数の増加量は小さいが、ズレ量の増加に伴い位置・姿勢誤差係数は大きく増加する。

Table 2 Coefficient of position error c_{pb} (average (mm/deg)) in case of bend transformation

L_s mm	$N \setminus M$	$D=0$			$D \neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)		
		4	7	10	4	7	10
1.0	4	0.00580	0.00691	0.01278	same as $D=0$	same as $D=0$	same as $D=0$
	7	0.00896	0.00683	0.01173	"	"	"
	10	0.01188	0.00903	0.01140	"	"	"
2.0	4	0.01160	0.01381	0.0298	"	"	"
	7	0.01393	0.01366	0.0235	"	"	0.0323
	10	0.0238	0.01806	0.0228	0.01771	0.0313	0.0656
4.0	4	0.0295	0.0328	0.0597	0.01960	0.0764	0.1268
	7	0.0279	0.0312	0.0512	0.0936	0.1702	0.230
	10	0.0475	0.0361	0.0498	0.210	0.286	0.353

Table 3 Coefficient of orientation error c_{ob} (average) in case of bend transformation

L_s mm	$N \setminus M$	$D=0$			$D \neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)		
		4	7	10	4	7	10
1.0	4	0.360	0.503	0.450	same as $D=0$	same as $D=0$	same as $D=0$
	7	0.629	0.497	0.451	"	"	"
	10	0.615	0.528	0.457	"	"	"
2.0	4	0.640	0.503	0.550	"	"	"
	7	0.629	0.508	0.549	"	"	0.625
	10	0.615	0.528	0.562	0.524	0.724	0.824
4.0	4	0.640	0.503	0.550	0.360	0.650	0.755
	7	0.629	0.508	0.549	0.922	0.963	0.974
	10	0.615	0.528	0.562	1.056	1.036	1.025

3・2・2 円弧変形

ズレ量=0の場合もズレ量 $\neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)の場合も、パラメータ値 L_s mm, N , M が一定の場合、復元経路に含まれる位置・姿勢誤差のピーク値は円弧の曲率半径 r_a mm に反比例する。その係数をそれぞれ位置誤差係数 c_{pa} mm 2 および姿勢誤差係数 c_{oa} mm $\cdot$ deg とすると、位置・姿勢誤差のピーク

値 e_{pa} mm, e_{oa} deg はそれぞれ次の実験式で表される。

$$e_{pa} = c_{pa} (1/r_a) \quad (8)$$

$$e_{oa} = c_{oa} (1/r_a) \quad (9)$$

表4にズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ の場合の位置誤差係数 c_{pa} を示す。これらの係数の実測値に対する誤差は最大で2.9%、他はほぼ1.0%以下である。また、表5にズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ の場合の姿勢誤差係数 c_{oa} を示す。これらの係数の実測値に対する誤差は最大で2.3%、他はほぼ0.5%以下である。

表4および表5のズレ量=0とズレ量 $\neq 0$ との差を比較すると、ズレ量の増加に伴い位置・姿勢誤差係数は大きく増加しており、ズレ量と位置・姿勢誤差の大きさと共に強い相関のあることがわかる。

Table 4 Coefficient of position error c_{pa} (average (mm 2)) in case of arc transformation

L_s mm	$N \setminus M$	$D=0$			$D \neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)		
		4	7	10	4	7	10
1.0	4	0.762	2.02	4.27	same as $D=0$	same as $D=0$	same as $D=0$
	7	0.807	2.02	4.28	"	"	"
	10	1.213	2.03	4.28	"	"	"
2.0	4	4.50	8.54	18.48	"	"	"
	7	4.52	8.54	18.50	"	"	21.5
	10	4.85	8.56	18.50	7.15	26.6	58.4
4.0	4	17.92	34.0	73.4	12.30	65.9	170.3
	7	17.98	34.0	73.5	110.4	237	415
	10	21.6	34.0	73.4	354	553	803

Table 5 Coefficient of orientation error c_{oa} (average (mm $\cdot$ deg)) in case of arc transformation

L_s mm	$N \setminus M$	$D=0$			$D \neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)		
		4	7	10	4	7	10
1.0	4	45.5	49.8	86.2	same as $D=0$	same as $D=0$	same as $D=0$
	7	54.7	52.8	86.9	"	"	"
	10	66.5	60.7	91.4	"	"	"
2.0	4	114.2	99.3	171.7	"	"	"
	7	114.2	105.5	173.1	"	"	179.4
	10	133.1	121.3	182.2	184.6	355	526
4.0	4	227	199.5	346	124.0	471	827
	7	228	212	349	819	1160	1510
	10	267	243	367	1511	1850	2191

3・2・3 周期的変形

表6と表7にそれぞれ、ズレ量 $\neq 0$ ($L_{ST}=20.0\text{mm}$)におけるパラメータ値 L_s mm, N , M , 周期的変形の周期 P_c mm, 振幅 A_c mm と位置誤差 (ピーク値) e_{pc} mm および姿勢誤差 (ピーク値) e_{oc} deg との関係を示す。

変形周期が短いほど、また、変形振幅が大きいくほど位置・姿勢誤差は大きい。 $P_c=100.0$, 200.0mm では位置・姿勢誤差はほぼ変形振幅 A_c に比例するが、 $P_c=50.0\text{mm}$ では比例以上の増加を示している。特に、 $P_c=50.0\text{mm}$ の「×」のセルでは復元経路の一部で逆行 (本来の経路進行方向とは逆の向きに経路が復元される) が発生している。

ズレが有る領域での位置・姿勢誤差はズレが無い領

域に比べ、それぞれ20倍および7倍近く大きな値となっており、ここでもズレ量と位置・姿勢誤差の大きさとの間に強い相関のあることがわかる。

式(10)によりズレ量 D を変形周期で規格化(D_{nor} deg)し、表6の位置誤差 >0.1 mmの領域と比較すると、おおよそズレ量 D_{nor} が25degを超えた領域で位置誤差 ≥ 0.1 mmとなることがわかる。

$$D_{nor} = 360 \cdot (D/P_c) \quad (10)$$

4. パラメータ設計法

本章では、アーク溶接で許容される位置・姿勢誤差量と第3章で得られたシミュレーション結果からアルゴリズムパラメータ(L_s , N , M)を設計する方法について述べる。

アーク溶接では、一般に、良い位置誤差の許容値は ± 0.5 mm以内とされている⁽⁷⁾。これに対して、アーク

溶接における良い姿勢誤差の許容値についての一般的な指針は見当たらない。そこで、本論文では仮に良い姿勢誤差の許容値を ± 5.0 deg以内とする。

SmarTrack から得られる復元経路は良い制御の目標値として使用される。制御誤差を考慮して、復元経路の位置・姿勢誤差の許容値を良い位置・姿勢誤差の許容値よりも幾分厳しく設定し、各変形に配分される復元経路の許容位置誤差を ± 0.1 mm、許容姿勢誤差を ± 3.0 degとしてパラメータ設計方法を示す。

4.1 屈折変形 屈折変形に配分される制御目標値の許容最大位置誤差を ± 0.1 mmとすると、屈折変形の許容最大屈折角は式(6)から、次式で表される。

$$\theta_b \leq 1/(10 \cdot c_{pb}) \quad (11)$$

式(11)に表2のズレ量 $\neq 0$ の c_{pb} を代入して屈折変形の許容最大屈折角を算出すると表8が得られる。

また、屈折変形に配分される制御目標値の許容最大姿勢誤差を ± 3.0 degとすると、屈折変形の許容最大屈折角は式(7)から、次式で表される。

$$\theta_b \leq 1/(10 \cdot c_{ob}) \quad (12)$$

式(12)に表3のズレ量 $\neq 0$ の c_{ob} を代入して屈折変形の許容最大屈折角を算出すると表9が得られる。

実際に発生する屈折角を 3.0 deg以下と仮定すると、表8および表9の太枠内がこの条件をクリアしている。表8の太枠内領域と表9の太枠内領域のANDをとる

Table 6 Position error (peak value (mm)) in case of cyclic transformation

Ls/mm	P/mm	A/mm	N			4			7			10		
			4	7	10	4	7	10	4	7	10	4	7	10
1.0	50.0	1.0	0.012	0.030	0.062	0.0124	0.029	0.061	0.0183	0.024	0.056			
		2.0	0.030	0.068	0.129	0.027	0.066	0.127	0.036	0.057	0.120			
		3.0	0.030	0.190	0.27	0.036	0.143	0.26	0.053	0.132	0.26			
	100.0	1.0	0.0030	0.0078	0.017	0.0032	0.0077	0.0164	0.0047	0.0074	0.0161			
		2.0	0.0061	0.0155	0.033	0.0063	0.0153	0.033	0.0095	0.0147	0.032			
		3.0	0.0096	0.023	0.049	0.0095	0.023	0.048	0.0142	0.022	0.047			
	200.0	1.0	0.0007	0.0020	0.0042	0.00080	0.00196	0.0042	0.00119	0.00194	0.0042			
		2.0	0.0015	0.0039	0.0084	0.00159	0.0039	0.0083	0.0024	0.0039	0.0083			
		3.0	0.0022	0.0059	0.0125	0.0024	0.0059	0.0125	0.0036	0.0058	0.0124			
2.0	50.0	1.0	0.044	0.120	0.20	0.045	0.099	0.29	0.052	0.30	0.73			
		2.0	0.094	0.32	0.56	0.087	0.30	0.70	0.102	0.60	x			
		3.0	0.154	x	x	0.121	0.96	x	0.149	x	x			
	100.0	1.0	0.0117	0.033	0.063	0.0124	0.031	0.079	0.021	0.095	0.21			
		2.0	0.023	0.066	0.126	0.025	0.064	0.165	0.042	0.194	0.43			
		3.0	0.035	0.102	0.192	0.037	0.098	0.26	0.063	0.30	0.89			
	200.0	1.0	0.0039	0.0083	0.0165	0.0040	0.0082	0.020	0.0065	0.025	0.055			
		2.0	0.0079	0.0167	0.033	0.0083	0.0165	0.041	0.0130	0.050	0.111			
		3.0	0.0089	0.025	0.050	0.0095	0.025	0.082	0.0194	0.075	0.167			
4.0	50.0	1.0	0.152	0.85	1.60	1.05	1.89	2.2	1.99	2.5	2.4			
		2.0	x	x	x	x	x	4.5	4.0	5.0	4.8			
		3.0	x	x	x	x	x	x	5.1	x	2.2			
	100.0	1.0	0.045	0.24	0.58	0.38	0.79	1.26	1.09	1.60	2.1			
		2.0	0.092	0.50	1.18	0.76	1.59	2.6	2.2	3.2	4.2			
		3.0	0.144	0.81	1.83	1.15	2.4	3.9	3.2	4.8	6.3			
	200.0	1.0	0.047	0.062	0.157	0.104	0.22	0.38	0.33	0.50	0.71			
		2.0	0.093	0.195	0.32	0.21	0.44	0.76	0.65	1.01	1.42			
		3.0	0.035	0.188	0.48	0.31	0.67	1.14	0.98	1.51	2.1			

Table 7 Orientation error (peak value (deg)) in case of cyclic transformation

Ls/mm	P/mm	A/mm	N			4			7			10		
			4	7	10	4	7	10	4	7	10	4	7	10
1.0	50.0	1.0	0.70	0.75	1.24	0.86	0.81	1.26	1.08	0.96	1.36			
		2.0	1.51	1.91	2.6	1.96	1.92	2.6	2.1	1.93	2.6			
		3.0	1.79	4.9	6.7	2.3	4.9	6.7	3.0	4.9	6.8			
	100.0	1.0	0.179	0.196	0.34	0.22	0.21	0.34	0.27	0.24	0.36			
		2.0	0.36	0.39	0.67	0.43	0.41	0.67	0.53	0.48	0.71			
		3.0	0.53	0.58	0.98	0.65	0.62	0.99	0.79	0.72	1.05			
	200.0	1.0	0.045	0.048	0.085	0.054	0.052	0.086	0.068	0.060	0.080			
		2.0	0.090	0.098	0.170	0.108	0.104	0.171	0.132	0.120	0.181			
		3.0	0.135	0.147	0.26	0.162	0.158	0.26	0.198	0.180	0.27			
2.0	50.0	1.0	1.35	1.38	2.2	1.72	1.53	3.2	2.5	4.9	6.9			
		2.0	2.4	5.7	7.2	3.2	5.7	8.3	4.9	10.5	x			
		3.0	4.4	x	x	4.4	14.6	x	7.3	x	x			
	100.0	1.0	0.36	0.38	0.65	0.44	0.41	0.71	0.67	1.33	1.96			
		2.0	0.71	0.78	1.28	0.87	0.82	1.51	1.35	2.7	4.0			
		3.0	1.05	1.12	1.85	1.29	1.20	2.5	2.0	4.1	6.1			
	200.0	1.0	0.118	0.105	0.179	0.108	0.104	0.171	0.170	0.34	0.50			
		2.0	0.179	0.196	0.34	0.22	0.21	0.34	0.34	0.68	1.01			
		3.0	0.27	0.29	0.51	0.33	0.31	0.52	0.51	1.01	1.52			
4.0	50.0	1.0	x	8.4	7.8	9.1	10.0	9.4	10.9	10.3	9.4			
		2.0	x	x	x	x	x	16.7	21	20	18.6			
		3.0	x	x	x	x	x	31	x	27	27			
	100.0	1.0	0.48	1.76	2.8	3.0	3.9	4.6	4.9	5.5	5.7			
		2.0	1.01	3.6	7.8	5.9	7.8	9.2	8.7	10.8	11.3			
		3.0	1.6	5.6	11.7	8.8	11.7	13.7	14.6	16.1	16.8			
	200.0	1.0	0.122	0.45	0.77	0.78	1.10	1.39	1.42	1.70	1.96			
		2.0	0.24	0.90	1.54	1.56	2.2	2.8	2.8	3.4	3.9			
		3.0	0.36	1.35	2.3	2.3	3.3	4.2	4.2	5.1	5.8			

Table 8 Bend angle (deg) which gives maximum allowable SmarTrack position error(± 0.1 mm)

Ls mm	N	M		
		1.0	2.0	4.0
1.0	4	17.2	14.5	7.8
	7	14.4	14.6	8.5
	10	8.4	11.1	8.8
2.0	4	8.6	7.2	3.4
	7	7.2	7.3	3.1
	10	5.6	3.2	1.5
4.0	4	5.1	1.3	0.8
	7	1.1	0.6	0.4
	10	0.5	0.3	0.3

Table 9 Bend angle (deg) which gives maximum allowable SmarTrack orientation error(± 3.0 deg)

Ls mm	N	M		
		1.0	2.0	4.0
1.0	4	8.3	6.0	6.7
	7	4.8	6.0	6.7
	10	4.9	5.7	6.6
2.0	4	4.7	6.0	5.5
	7	4.8	5.9	4.8
	10	5.7	4.1	3.6
4.0	4	8.3	4.6	4.0
	7	3.3	3.1	3.1
	10	2.8	2.9	2.9

と、結局、表 8 の太枠内領域が SmarTrack の屈折変形への適用領域になる。

また、このことから、屈折変形では位置誤差が適用領域を決める要因であることが分かる。

4.2 円弧変形 円弧変形に配分される制御目標値の許容位置誤差を $\pm 0.1\text{mm}$ とすると、円弧変形の許容最小半径は式(8)から、次式で表される。

$$r_a \geq 10 \cdot c_{pa} \quad (13)$$

式(13)に表 4 のズレ量 $\neq 0$ の c_{pa} を代入して円弧変形の許容最小半径を算出すると表 10 が得られる。

また、円弧変形に配分される制御目標値の許容姿勢誤差を $\pm 3.0\text{deg}$ とすると、円弧変形の許容最小半径は式(8)から、次式で表される。

$$r_a \geq c_{oa}/3.0 \quad (14)$$

式(14)に表 5 のズレ量 $\neq 0$ の c_{oa} を代入して円弧変形の許容最小半径を算出すると表 11 が得られる。

実際に発生する円弧変形の曲率半径を 300mm 以上と仮定すると、表 10 および表 11 の太枠内がこの条件をクリアしている。表 10 の太枠内領域と表 11 の太枠内領域の AND をとると、結局、表 10 の太枠内領域が SmarTrack の円弧変形への適用領域になる。

また、このことから、円弧変形でも位置誤差が適用領域を決める要因であることが分かる。

4.3 周期的変形 周期的変形に配分される制御

Table 10 Radius of curvature(mm) which gives maximum allowable SmarTrack position error($\pm 0.1\text{mm}$)

L_s mm	N	M		
		1.0	2.0	4.0
1.0	4	76.2	20.2	42.7
	7	80.7	20.2	42.8
	10	12.13	20.3	42.8
2.0	4	45.0	85.4	184.8
	7	45.2	85.4	215
	10	71.5	266	584
4.0	4	123.0	659	1703
	7	1104	2370	4150
	10	3540	5530	8030

Table 11 Radius of curvature(mm) which gives maximum allowable SmarTrack orientation error($\pm 3.0\text{deg}$)

L_s mm	N	M		
		1.0	2.0	4.0
1.0	4	15.17	16.60	28.7
	7	18.23	17.60	29.0
	10	22.2	20.2	30.5
2.0	4	38.1	33.1	57.2
	7	38.1	35.2	59.8
	10	61.5	118.3	175.3
4.0	4	41.3	157.0	276
	7	273	387	503
	10	504	617	730

目標値の許容位置誤差を $\pm 0.1\text{mm}$ とすると、表 6 のゴシック体セルがこの条件を満たしている。また、制御目標値の許容姿勢誤差を $\pm 3.0\text{deg}$ とすると、表 7 のゴシック体セルがこの条件を満たしている。表 6 のゴシック体セル領域と表 7 のゴシック体セル領域の AND をとると、結局、表 6 のゴシック体セル領域が SmarTrack の周期的変形への適用領域になる。

また、このことから、周期的変形でも位置誤差が適用領域を決める要因であることが分かる。

4.4 パラメータ設計法 外部条件として、作業仕様から復元経路の位置・姿勢誤差の許容値と倣い速度が与えられる。また、使用するセンサから計測ノイズ特性が与えられる。これらから、センシング間隔 L_s が定まり、外部条件を満足する N , M の値が求まる⁽¹⁶⁾。その際、ここで得られた経路変形を許容する N , M の範囲を満足するように N , M を決定することにより上記外部条件と経路変形からの要求とを共に満足するパラメータ設計が行える。

5. 結 論

製造業界では、少子高齢化・団塊の世代の引退などによる労働力不足や多品種変量生産への対応などから、過酷なセンシング環境下で高信頼に動作する空間経路倣いロボットシステムの実現が求められている。このため、センシング誤差・誤認識およびセンサデータ欠落などのセンサデータ不確実性の影響を抑圧する能力を備えた経路復元アルゴリズム SmarTrack が提案されてきた⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾。

本論文では、基本的には実経路と教示経路とが剛体変位の関係にある(変形は存在しない)ことを前提としたアルゴリズムである SmarTrack のワーク変形に対する適用性を調べるために、アーク溶接で発生するワークの変形を屈折、円弧および周期的の三種類でモデル化し、それらに対する SmarTrack の経路復元誤差をシミュレーションにより評価し、その適用領域を明らかにすると共に、アルゴリズムパラメータの設計法を示した。

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 経路の変形を屈折、円弧、周期的の三種類でモデル化し、各変形モデルについて、変形量およびアルゴリズムパラメータ (L_s , N , M) と SmarTrack による復元経路の位置・姿勢誤差との関係をシミュレーションにより定量的に明らかにした(表 2~表 7)。
- (2) 基本的には、SmarTrack は実経路と教示経路とが剛体変位の関係にある(変形は存在しない)ことを前提としたアルゴリズムである。しかし、ツールを挟む局

所区間で近似的に剛体変位が成立すると見なし、その区間で得られた変換行列のみから得られた局所的修正行列を用いることにより、SmarTrack が実経路の変形に対応できることを示した(表2~表7)。

(3) 実経路に変形がある場合には、ツール目標値算出位置とツール目標値の算出に使用する局所的修正行列との位置ズレが復元経路の誤差要因となることを示し、パラメータ値とズレ量との関係を導出した(図3, 表1)。

(4) いずれの変形モデルにおいても、検討したパラメータ値の範囲では、ズレ量と位置・姿勢誤差との間に強い相関があり、ズレ量が位置・姿勢誤差の支配的要因であることを明らかにした(表1~表7)。

(5) 屈折変形では位置・姿勢誤差(ピーク値)が屈折角に比例し、円弧変形では位置・姿勢誤差(ピーク値)が円弧の曲率半径に反比例することを明らかにし、それぞれの実験式を導出した。

(6) 周期的変形では、ズレ量 D_{nr} (ズレ量 D を変形周期で規格化した量) がおよそ 25deg を超えた領域で位置誤差 $>0.1\text{mm}$ となることを明らかにした。

(7) 各変形とも、位置誤差 $\leq 0.1\text{mm}$ 、姿勢誤差 $\leq 3.0\text{deg}$ となる領域の比較から、位置誤差が SmarTrack の適用領域を決定することを明らかにした(表2~表7)。

(8) 位置・姿勢誤差量はパラメータ値と変形量の関数であり、変形量と各変形に配分される復元経路の位置・姿勢誤差の許容値を設定すれば、それを満足するパラメータ値の範囲を求めることができることを明らかにし、パラメータ設計法を示した(表6~表11)。

(9) 検討したパラメータ値の範囲では、アーク溶接で起こり得る変形量に対して、SmarTrack が適用可能な領域を有していることを定量的に明らかにした(表6~表11)。

最後に、ワークの熱変形に関する情報をご提供頂いた NTT サイバーソリューション研究所武藤伸洋主任研究員に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Ministry of Economy, Trade and Industry, *Robot policy study group interim report* (in Japanese), (2005), p.11.
- (2) Kawahara, M. and Taki, K., Tracking Control for Guiding Electrodes along Joints by Pattern Detection of Welding Groove, *Transactions of The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.15, No.4 (1979), pp.492-497.
- (3) Asada, H. and Hanafusa, H., Spatial Curve Tracing Control of Industrial Robots, *Transactions of The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.16, No.5 (1980), pp.740-746.
- (4) Hanafusa, H., Yoshikawa, T. and Nakamura, Y., Autonomous Contouring Control of an Articulated Robot, *Transactions of The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.18, No.11 (1982), pp.1110-1116.
- (5) Nakamura, Y. and Hanafusa, H., Structural Analysis and Synthesis of Two Dimensional Autonomous Trajectory Control System for Articulated Robot Manipulators, *SYSTEMS AND CONTROL*, Vol.27, No.9 (1983), pp.598-605.
- (6) Nakamura, Y. and Hanafusa, H., Analysis and Synthesis of Sensor Based 3D Autonomous Trajectory Control System of Robot Manipulators, *Transactions of The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.21, No.2 (1985), pp.183-189.
- (7) Nayak, N. and Ray, A., AN INTEGRATED SYSTEM FOR INTELLIGENT SEAM TRACKING IN ROBOTIC WELDING: Part 1 - Conceptual and Analytical Development, *Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'90)*, Vol.3, pp.1892-1897.
- (8) Nayak, N. and Ray, A., AN INTEGRATED SYSTEM FOR INTELLIGENT SEAM TRACKING IN ROBOTIC WELDING: Part 2 - Design and Implementation, *Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'90)*, Vol.3, pp.1898-1903.
- (9) Ishiguro, Y., Katoh, Y., Nakano, M., Koide, M., Hayashi, C. and Minoshima, H., Development of a Real Time Sensor Feedback Robot, *SAE Technical Paper series 901706, Passenger Car Meeting and Exposition, Dearborn, Michigan* (1990).
- (10) Huang, J.T. and Bahr, B., et al., Sensory Guidance of Seam Tracking Robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol.11, No.1 (1994), pp.67-76.
- (11) Nonaka, K. and Kakizaki, T., Spatial Path Generation Algorithm using Sampled Sensory Data with Uncertainty and its Application to a Seam Tracking Robotic System - System Concept and Path Generation Theory -, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.16, No.5 (1998), pp.662-671.
- (12) Nonaka, K. and Kakizaki, T., Spatial Path Generation by the Complementary Use of Nominal Path Data and Sensory Path Data and its Application to a Seam Tracking Robot - System Concept and Path Generation Algorithm -, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.16, No.6 (1998), pp.851-859.
- (13) Nonaka, K. and Kakizaki, T., Spatial Seam Tracking using Sampled Visual Sensory Data having Uncertainty for Industrial Robotic Application, *Proceedings of 1998 Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation - International Conference on New Technological Innovation for the 21st Century* -, (1998), pp.1017-1024.
- (14) Nonaka, K. and Kakizaki, T., Spatial Path Generation by the Complementary Use of Nominal Path Data and Sensory Data and its Application to a Seam Tracking Robot, *Proceedings of 14th International Conference on Computer-Aided Production Engineering*, (1998), pp.469-474.
- (15) Nonaka, K., Spatial Path Generation Algorithm using Sampled Sensory Data with Uncertainty and its Application to a Seam Tracking Robotic System - 2nd Report: Simulation and Parameter Design -, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.2 (2000), pp.221-229.
- (16) Nonaka, K. and Kakizaki, T., Error Analysis and Parameter Design of Spatial Path Generation Algorithm "SmarTrack" by the Complementary Use of Nominal Path Data and Sensory Path Data, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.692 (2004), pp.1053-1060.
- (17) The Japan Welding Engineering Society ed., *An introduction to robot arc welding technology* (in Japanese), (1991), p.100, The Japan Welding Engineering Society.