学術・技術論文

教示データとセンサデータの相補的利用に基づく 空間経路生成法とそのロボット 倣い制御への応用 —システムコンセプトと経路修正アルゴリズム—

野 中 潔* 柿 崎 隆 夫*

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—

Kiyoshi Nonaka* and Takao Kakizaki*

A spatial path generation algorithm and its application to the high-reliability seam tracking robotic system which can operate even under poor sensing conditions are proposed. First, the concept of the robotic system with a wrist-mounted high performance vision sensor is presented, then an accurate spatial path generation algorithm based on the complementary use of nominal path data and sensory data of an actual path with a reliability coefficient is described. In the algorithm, the modification matrix that maps a nominal path to an actual path is generated by comparing nominal path data with actual path data acquired by a sensor located ahead of an end-effector at certain points. Then an actual path is restored by modifying nominal path data with the modification matrix. Computer simulations and experiments on a spatial path show that the proposed system operates effectively even under disturbances such as burst sensory data missing caused by joint configuration abnormalities like tack welding beads often appearing in practical applications.

Key Words: Robotic Manipulator, Spatial Seam Tracking, Nominal Path, Visual Sensing, Path Planning

1. 緒 言

ロボットによる倣い作業は、ロボット手首に装着された作業用ツールを対象ワーク上に形成された経路に沿って指定された相対位置・姿勢および速度で倣わせるものであり、代表例としてアーク溶接やシーリングなどがある。今日実用に供されている倣い作業ロボットは主として教示再生型であり、従来から、次のような問題点が指摘されてきた。

- (1) 作業対象の位置決めに要する治具コストが大きい。
- (2) 作業対象の形状誤差や熱変形等に対応できない。
- (3) 作業品質を左右するロボット教示に熟練を要する。

多品種少量生産が主流となった現状では、上記の問題は本質的である。

一方、センサの導入により上記の課題に対処しようという研究が進められてきた。先駆的研究として、河原・滝 [1] 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 [2]、花房ら [3]、中村・花房 [4][5] は作業プロセスと密接に関連した作業変数を導入し、これを直接目標値とする倣い制御系の設計法について検討した。

Nayak・Ray [6][7] は先読みセンサを用いた溶接用経路追従システムについて検討し、開先条件や溶接条件の変動に適応可能なシステム構成法および経路の位置モデルを局所的な三次経路関数で表し姿勢モデルを離散的に与える経路生成法を提案している。石黒ら [8] はリアルタイムセンサフィードバックロボットを開発し、先読みセンサデータをバッファリングして補間により教示経路の補正値を算出する経路補正制御を提案している。さらに B. Bahr ら [9] は教示されたノミナル経路に対する実経路の偏差を直交空間でセンシングし、これをマニピュレータ関節空間へ変換したのち ARMA モデルを用いて補正量を算出する方式を提案している。

このように多くの研究がなされ、さらに近年、実用に耐え得る光学センサがいくつか開発されてきているが [10]、実用化され、十分な実績を持つロボットシステムはあまり見られないようである。この主な理由として、作業対象の多様性に加えノイズや汚れなどの劣悪な作業環境でロボットシステムを使いこなす技術が十分には確立されていないことが考えられる。

センサを用いた空間経路倣い方式は、いわゆる自律倣い方式 [11] と教示データ修正倣い方式 [12] の二つに大別される。教示の容易性とシステムの自律性という観点からは前者が望ましい。文献 [11] では、先読みセンサからの経路情報に基づいて経路の位置・姿勢を区分的多項式関数で表現し、そこからツール目標

原稿受付 1997 年 10 月 30 日

*日本電信電話(株) ヒューマンインタフェース研究所

*NTT Human Interface Laboratories

値を生成する自律倣い方式が提案されている。しかし、この方式には、作業対象あるいは環境によってはバースト状にセンサデータが欠落し、結果として倣い目標値が生成できなくなる場合がある。本研究では、このように劣悪なセンシング環境での作業に対して信頼性の高いシステムを提供することを目的として、後者の教示データ修正倣い方式、すなわち、あらかじめ教示された経路情報をセンサデータにより逐次修正していく空間経路生成法を対象とする。センサには非接触型光学センサを用い、センサとツールの相対配置に関しては、ツール走行方向の一定距離前方にセンサを配置し目標経路を先読みする「先読み方式」とする。これは、アーク溶接などでは、溶融池が出現する作業点近傍の経路のリアルタイムセンシングは事実上困難であることによる。

本論文では、システムコンセプトを示した後、ロボットが倣うべき空間経路を高精度に復元する教示経路修正アルゴリズムを示す。本アルゴリズムでは、先読みセンサからの離散的経路情報と教示経路上の対応点での経路情報とを複数点で比較することにより、教示経路を実経路に写像する同次変換行列（修正行列）を決定する。このとき、センサデータの信頼度を考慮することにより修正行列の高精度化を計る。次いで、得られた修正行列と教示経路情報からツール目標値を生成して倣いを実行する。これにより、センサデータがバースト状に欠落した場合にも安定した倣いが実現できる。さらに、教示に要求される熟練度、時間および労力を低減化するための教示簡易化の手法についても示す。最後に、本システムの有効性をシミュレーションおよび実験により検証する。

2. 空間経路倣いロボットシステム

2.1 対象とする作業

本論文では、典型的な倣い作業としてロボットアーク溶接を対象とする [13]。

Fig. 1 に先読みセンサを用いたアーク溶接ロボット作業の概念図を示す。**Fig. 2** には作業対象、ツールとしての溶接トーチおよびセンサの関係を示す。アーク溶接では二つの金属部材の接合部分を開先と呼ぶ。Fig. 2 に示す重ね開先では上板の端面と下板表面との交差線を倣うべき経路とする。この経路は開先断面形状内において「特徴点」として表され、ツールを位置決めする際の目標となる。Fig. 2 の O_P は特徴点の一例である。

アーク溶接では作業対象の設置誤差、形状誤差および熱変形などが不可避で、しかも要求されるツール位置決め精度はサブ [mm] オーダであるため、センサを用いてリアルタイムで経路を検出しながら作業を遂行する必要がある。しかし、アーク光、ヒュームおよびスパッタ等は一般の光学式センサにとっては過酷な外乱であり、最悪の場合には特徴点の検出が不可能となる。さらに、仮付けビード、開先近傍のネジ穴および開先の分岐等の開先形状障害は異形断面を生じさせ、特徴点誤認識やバースト状の特徴点検出不能（センサデータ欠落）を発生させる。

2.2 システムコンセプト

本研究における空間経路倣いロボットシステム（以下これを SmarTrack と呼ぶ）のねらいは、センシング誤差、誤認識およびバースト状センサデータ欠落の影響を抑圧し、高信頼・高精

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

Fig. 2 Schematic of workpiece, tool and sensor

度な空間経路倣いを実現することにある。

作業品質の向上には、まず倣うべき経路を可能な限り高精度に復元しなければならない。SmarTrack では、教示データとセンサデータを相補的に利用することによりこれを達成する。以下では、ロボット教示データを与える基準モデル上の経路を「教示経路」、実際に倣うべき対象上の経路を「実経路」と呼ぶことにする。

ロボットは実経路に沿って所定の速度で動作する。このとき、先読みセンシングにより、ツール前方で実経路の位置・姿勢情報を逐次獲得し、それに基づいて実経路上に局所的な経路座標系を設定する。その座標系と対応する教示経路上の局所座標系とを比較することにより、教示経路を実経路に写像する同次変換行列（修正行列）を生成する。倣い動作は教示経路データに修正行列を乗じてツール目標値を算出することにより遂行する。

この方式を用いることにより、仮にセンサデータがバースト状に欠落しても安定に倣い動作を継続することが可能となる。

修正行列生成の第 1 ステップとして文献 [11] の方法を応用する。すなわち、センサデータに基づいて区分的多項式関数の形で実経路の位置・姿勢を表現し、その関数から実経路の局所座標系を決定する。このとき、センサデータの信頼度を導入してセンシング誤差を抑圧する。第 2 のステップでは、実経路と教示経路の局所座標系を複数点で比較し平滑化することにより修正行列を生成する。この二つのステップによりセンシング誤差

の影響を抑圧し、高精度な修正行列を得る。

2.3 センシング方式

アーク溶接やシーリングでは、溶融池が形成されたりシール剤が塗布される作業点近傍の経路のリアルタイムセンシングは事実上困難である。そこで、本方式では、ツール走行方向の一定距離前方にセンサを配置し目標経路を先読みする「先読み方式」を採用する。

また、ワークの位置・姿勢情報を獲得するためのセンサとしては、光切断型のレーザレンジファインダを用いる [10]。

2.4 主な座標系と経路関数生成法の概要

本研究では、経路上の参照点に局所座標系を設け、これを基準座標系で表すために経路パラメータ s の概念を導入する。 s は経路上の参照点位置を表すスカラーパラメータで、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 価関数である。
- (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。

経路パラメータ s の取り方には任意性があるが、ここでは s を経路長で代表させることとする。

微作業では、一般に、作業対象と作業仕様に基いて目標経路に対するツールの相対的な位置・姿勢（ねらい位置・姿勢）および速度を決定する。熱変形等を除けば目標経路は作業対象が設置された時点で一意に定まる。一方、ツールのねらい位置・姿勢および微速度は参照位置ごとの開先条件に応じて定まる可変的な要素である。したがってこの二つを明確に分離して扱うことにする [2]~[5]。

Fig. 2 に経路座標系 Σ_P 、ツール座標系 Σ_T およびセンサ座標系 Σ_S の関係を示す。ツールとセンサは剛体接続されてロボットの手首に装着される。ツールとセンサに固定してそれぞれツール座標系 Σ_T とセンサ座標系 Σ_S を定義する。また、経路上の各点には局所座標系として経路座標系 Σ_P を定義する。これらの座標系の定義は任意であるが、ここでは以下のように定める。なお、 Σ_A はデカルト座標系 A を表し、 ${}^A\mathbf{T}_B$ は座標系 Σ_B による位置・姿勢表現を座標系 Σ_A による表現に変換する同次変換行列である。

まず、ツール座標系 Σ_T の原点 O_T はツール軸上に置き、原点 O_T が特徴点と一致したときに、特徴点から最適な距離にツールが位置決めされるように設定する。ツール座標系 Σ_T の姿勢は、 Z_T 軸をツールの軸方向でツール先端からツールの根元に向かう向きに、 X_T 軸をツールからセンサに向かう向きにとり、 Y_T 軸を上記 2 軸と右手系をなすように設定する。

以上のツール座標系に対し、経路座標系 Σ_P を次のように定義する。原点 O_P は特徴点の位置に置く。姿勢は、 X_P 軸を経路の接線方向でツールの進む向きに、 Z_P 軸を経路に垂直な断面内で開先角を 2 等分する方向で作業対象表面から外部に向かう向きに、 Y_P 軸を上記 2 軸と右手系をなすように設定する。

アーク溶接の場合、このように定義した経路座標系 Σ_P に関する同次変換行列 ${}^R\mathbf{T}_P$ はそのままツール座標系 Σ_T の標準的な目標値 ${}^R\mathbf{T}_T^{\text{ref}}$ となる。

同次変換行列 ${}^R\mathbf{T}_P$ の要素をパラメータ s の関数として表したものを経路関数 ${}^R\mathbf{T}_P(s)$ と定義する。経路関数の姿勢成分は経路座標系 Σ_P の X_P 、 Y_P 、 Z_P 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_{X_P}$ 、 $\mathbf{e}_{Y_P}$ 、 $\mathbf{e}_{Z_P}$ を基準座標系 Σ_R で表現した上で、それぞれの方向余弦を s の関数として表す。経路の姿勢変化に比してセンシング周期が十分小さい場合には、補間姿勢の正規直交性は保存されるとみなせる。

Fig. 2 に経路座標系 Σ_P に対してツール座標系 Σ_T がねらい位置・姿勢 ${}^P\mathbf{T}_T$ を取るように位置決めされた場合を示す。

ツールの位置・姿勢目標値は、経路座標系とツールのねらい位置・姿勢から次式で与えられる。

$${}^R\mathbf{T}_T^{\text{ref}}(s) = {}^R\mathbf{T}_P(s) \cdot {}^P\mathbf{T}_T(s) \quad (1)$$

アーク溶接では、ツール軸回りの角度は原則として任意に設定できる。先読みセンシング方式では、センサ視野内に経路を捉えるためにこのツール軸回りの 1 自由度を利用できる。

3. 教示経路修正アルゴリズム

3.1 教示経路と実経路との間の線形変換

教示経路は下記の前提条件の下で実経路に写像されるものとする。

- (1) 開始点サーチ動作でセンサにより検出された点を実経路の開始点と見なす。
- (2) 教示経路および実経路上の点は開始点からの経路長 s により対応付けられる。 s 値はロボット運動データから算出する。
- (3) 剛体変位を除く教示経路と実経路との間の形状誤差や変形は小さく、着目するツール近傍での両経路間の変換は合同変換として表現できる。

3.2 修正行列の導入

Fig. 3 は教示経路と実経路のモデルであり、太線は着目するツール近傍の局所部位を示す。ここでは、両経路が剛体変位の関係にあるものとする。両経路の開始点 $s=0$ にそれぞれ経路座標系 $\Sigma_{P,0}^{MW}$ 、 $\Sigma_{P,0}^{AW}$ を定義し、その基準座標系 Σ_R 表示をそれぞれ ${}^R\mathbf{T}_{P,0}^{MW}$ 、 ${}^R\mathbf{T}_{P,0}^{AW}$ とする。いま、これら二つの座標系間に次の関係が成り立つものとする。

$${}^R\mathbf{T}_{P,0}^{AW} = \mathbf{T}_{AM} \cdot {}^R\mathbf{T}_{P,0}^{MW} \quad (2)$$

次に、教示経路上の点 s における経路座標系を $\Sigma_{P,s}^{MW}$ と置き、 $\Sigma_{P,s}^{MW}$ を Σ_R で表した同次変換を ${}^R\mathbf{T}_{P,s}^{MW}$ 、 $\Sigma_{P,s}^{MW}$ を $\Sigma_{P,0}^{MW}$ で表した同次変換を ${}^{M0}\mathbf{T}_{Ms}$ と置くと次式が成り立つ。

$${}^R\mathbf{T}_{P,s}^{MW} = {}^R\mathbf{T}_{P,0}^{MW} \cdot {}^{M0}\mathbf{T}_{Ms} \quad (3)$$

同様にして、実経路に対しても次式が成り立つ。

$${}^R\mathbf{T}_{P,s}^{AW} = {}^R\mathbf{T}_{P,0}^{AW} \cdot {}^{A0}\mathbf{T}_{As} \quad (4)$$

両経路は剛体変位の関係にあるから次式が成り立つ。

$${}^{A0}\mathbf{T}_{As} = {}^{M0}\mathbf{T}_{Ms} \quad (5)$$

Fig. 3 Modification matrix T_{AM}

したがって、式 (2)~(5) より任意の s 点について次式が得られる。

$${}^R T_{P,s}^{AW} = T_{AM} \cdot {}^R T_{P,s}^{MW} \quad (6)$$

T_{AM} は $\Sigma_{P,s}^{MW}$ を $\Sigma_{P,s}^{AW}$ に写す修正行列である。

3.3 教示経路修正アルゴリズム

3.3.1 レーザレンジセンサデータからの位置・姿勢の導出

光切断面内で対象までの距離を計測するレーザレンジファイナでは、1回の測定で経路の姿勢を確定することはできない。本方式では、隣接する2点でのセンサデータを用いて経路の接線方向を算出することにより、センシング点での経路姿勢を推定する。この場合、付録に示すように、センシングごとに両経路間の写像関係が得られる。

ところで、センサデータには計測誤差が含まれるため、1点のみのセンサデータから写像関係を推定するのは危険である。そこで、誤差の影響を抑圧するために、冗長な数 ($N \geq 2$) のセンサデータから最小自乗法により写像関係を推定する。

3.3.2 修正行列推定アルゴリズム

教示経路と実経路上の複数点の位置・姿勢の対応関係から修正行列 T_{AM} を推定するアルゴリズムについて述べる。

この種の問題は、動画処理の中の運動パラメータ解析の分野で扱われてきた。特に、問題となる回転運動の推定には、行列の最小固有値を求める問題に帰着させる方法 [14] や、特異値分解による方法 [15] などが報告されている。SmarTrack では、回転運動を $[\mathbf{v}, \theta]$ 表現 ($\mathbf{v}$ 軸回りの θ 回転) に変換し、より簡単な演算で推定値を算出する。

実経路上の第 k サンプル点における経路座標系を ${}^R T_{P,k}^{AW}$ 、対応する教示経路上の経路座標系を ${}^R T_{P,k}^{MW}$ で表し、両経路が剛体変位の関係にあるとすると次式が成り立つ。

$${}^R T_{P,k}^{AW} = T_{AM} \cdot {}^R T_{P,k}^{MW} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} {}^R \mathbf{R}_{AM} \cdot {}^R \mathbf{R}_{P,k}^{MW} & {}^R \mathbf{R}_{AM} \cdot {}^R \mathbf{p}_{P,k}^{MW} + \mathbf{p}_{AM} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\equiv \begin{bmatrix} {}^R \mathbf{R}_{P,k}^{AW} & {}^R \mathbf{p}_{P,k}^{AW} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、

$$T_{AM} \equiv \begin{bmatrix} {}^R \mathbf{R}_{AM} & \mathbf{p}_{AM} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^R T_{P,k}^{MW} \equiv \begin{bmatrix} {}^R \mathbf{R}_{P,k}^{MW} & {}^R \mathbf{p}_{P,k}^{MW} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

第 k 番目のセンサデータから算出された実経路の局所座標系を ${}^R T_{P,k}^{AWs}$ と置く。式 (8) から ${}^R T_{P,k}^{AWs}$ は次式で表される。

$${}^R T_{P,k}^{AWs} \equiv \begin{bmatrix} {}^R \mathbf{R}_{AM,k} \cdot {}^R \mathbf{R}_{P,k}^{MW} & {}^R \mathbf{R}_{AM,k} \cdot {}^R \mathbf{p}_{P,k}^{MW} + \mathbf{p}_{AM,k} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、

${}^R \mathbf{R}_{AM,k}$ … 第 k 番目のセンサデータから得られる ${}^R \mathbf{R}_{AM}$ の計測値

$$E[{}^R \mathbf{R}_{AM,k}] = {}^R \mathbf{R}_{AM} \quad (13)$$

$\mathbf{p}_{AM,k}$ … 第 k 番目のセンサデータから得られる $\mathbf{p}_{AM}$ の計測値

$$E[\mathbf{p}_{AM,k}] = \mathbf{0} \quad (14)$$

(1) 回転行列 ${}^R \mathbf{R}_{AM}$ の推定

${}^R T_{P,k}^{AWs}$ とそれに対応する ${}^R T_{P,k}^{MW}$ から算出される T_{AM} の計測値を $T_{AM,k}$ と置くと、次式が成り立つ。

$${}^R T_{P,k}^{AWs} = T_{AM,k} \cdot {}^R T_{P,k}^{MW} \quad (15)$$

この式から回転行列部分を取り出すと次式が得られる。

$${}^R \mathbf{R}_{AM,k} = {}^R \mathbf{R}_{P,k}^{AWs} \cdot ({}^R \mathbf{R}_{P,k}^{MW})^T \quad (16)$$

N 個の計測値列 $\{{}^R \mathbf{R}_{AM,k}\}$, $k = i \sim (i + N - 1)$ が平均 0 のガウスノイズを含むとして、 $\{{}^R \mathbf{R}_{AM,k}\}$ から ${}^R \mathbf{R}_{AM}$ の推定値 $\mathbf{R}_{mod}$ を求める。 $\{{}^R \mathbf{R}_{AM,k}\}$ は正規直交性を満足しているものとする。

まず、 ${}^R \mathbf{R}_{AM,k}$ を $[\mathbf{v}, \theta]$ 表現 ($\mathbf{v}$ 軸回りに θ 回転) に変換して $[\mathbf{v}_k, \theta_k]$ と置き、さらに、 $\mathbf{v}_k$ を Fig. 4 に示すように二つの角 $[\alpha_k, \beta_k]$ で表す。この結果、回転行列 ${}^R \mathbf{R}_{AM,k}$ は三つの独立な変数 $[\alpha_k, \beta_k, \theta_k]$ で表される。

このとき、Fig. 4 に示すように、後述の $\{\alpha_k\}$ の平均化処理を考慮して、例えば $\mathbf{v}_k$ が Z_R (あるいは X_R, Y_R) 軸近傍にある場合、 $\mathbf{v}_k$ と X_R (Y_R, Z_R) 軸とのなす角を α_k 、 $\mathbf{v}_k$ の Y_R - Z_R (Z_R - X_R, X_R - Y_R) 平面への射影と Y_R (Z_R, X_R) 軸とのなす角を β_k とする。ここで、

$$\mathbf{a}_k \equiv [\alpha_k, \beta_k, \theta_k]^T \in R^{3 \times 1}$$

と置く。同様に、 $\mathbf{R}_{mod}$ の $[\alpha, \beta, \theta]$ 表現を、

$$\mathbf{a}_{mod} \equiv [\alpha_{mod}, \beta_{mod}, \theta_{mod}]^T \in R^{3 \times 1}$$

 Fig. 4 Conversion from R to $[\alpha, \beta, \theta]$

と置く。 a_{mod} に対する a_k の残差を $\varepsilon_k \in R^{3 \times 1}$ と置くと、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &\equiv a_k - a_{\text{mod}} \\ &= [\varepsilon_{k,1} \ \varepsilon_{k,2} \ \varepsilon_{k,3}]^T \end{aligned} \quad (17)$$

ε_k の第 j 要素 $\varepsilon_{k,j}$ について考える ($j = 1, 2, 3$)。

$$\varepsilon_{k,j} = a_{k,j} - a_{\text{mod},j} \quad (18)$$

上式で $k = i, i+1, \dots, i+N-1$ と置いて得られる N 個の方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} \varepsilon_{i,j} = a_{i,j} - a_{\text{mod},j} \\ \varepsilon_{i+1,j} = a_{i+1,j} - a_{\text{mod},j} \\ \vdots \\ \varepsilon_{i+N-1,j} = a_{i+N-1,j} - a_{\text{mod},j} \end{cases} \quad (19)$$

ここで、次のように置く。

$$\varepsilon_{i,j} \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_{i,j} \\ \varepsilon_{i+1,j} \\ \vdots \\ \varepsilon_{i+N-1,j} \end{bmatrix}, \quad a_{i,j} \equiv \begin{bmatrix} a_{i,j} \\ a_{i+1,j} \\ \vdots \\ a_{i+N-1,j} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_{i,j}, \quad a_{i,j}, \quad u \in R^{N \times 1}$$

これより、式 (19) は次のように表される。

$$\varepsilon_{i,j} = a_{i,j} - a_{\text{mod},j} \cdot u \quad (20)$$

誤差最小化の評価関数として、残差 $\varepsilon_{k,j}$ にデータ $a_{k,j}$ の信頼度 $r_{k,j}$ で重み付けした値の二乗和をとり、それを $E_{i,j} \in R$ と置くと次式が成立する。

$$E_{i,j} = \varepsilon_{i,j}^T \cdot W_{i,j} \cdot \varepsilon_{i,j} \quad (21)$$

ここで、

$$W_{i,j} \equiv \text{diag}[r_{i,j}^2, r_{i+1,j}^2, \dots, r_{i+N-1,j}^2] \in R^{N \times N} \quad (22)$$

$E_{i,j}$ を最小にする $a_{\text{mod},j}$ は次式から与えられる。

$$\frac{dE_{i,j}}{da_{\text{mod},j}} = -2\varepsilon_{i,j}^T \cdot W_{i,j} \cdot u = 0$$

これより、 $a_{\text{mod},j}$ は次式で表される。

$$a_{\text{mod},j} = \frac{a_{i,j}^T \cdot W_{i,j} \cdot u}{u^T \cdot W_{i,j} \cdot u}, \quad (j = 1, 2, 3) \quad (23)$$

この結果、 $[a_{\text{mod},1}, a_{\text{mod},2}]$ から v_{mod} が、 $a_{\text{mod},3}$ から θ_{mod} が得られ、さらに、 $[v_{\text{mod}}, \theta_{\text{mod}}]$ から R_{mod} が算出される。

(2) 並進ベクトル p_{AM} の推定

N 個の計測値 $\{p_{AM,k}\}$, $k = i, i+1, \dots, i+N-1$ が平均 0 のガウスノイズを含むとして、回転行列の場合と同様の手順により $\{p_{AM,k}\}$ から p_{AM} の推定値 p_{mod} を求める。

(1) で得られた R_{mod} を用いると、式 (7) から次式が成り立つ。

$${}^R p_{P,k}^{AWs} = R_{\text{mod}} \cdot {}^R p_{P,k}^{MW} + p_{AM,k}^* \quad (24)$$

ここで、

${}^R p_{P,k}^{AWs} \dots {}^R p_{P,k}^{AW}$ の計測値 (誤差を含む)
 ${}^R p_{P,k}^{MW} \dots {}^R p_{P,k}^{AWs}$ に対応する教示経路上の点の位置
 の Σ_R 表示
 $p_{AM,k}^* \dots R_{AM}$ に代えて R_{mod} を用いたときに
 ${}^R p_{P,k}^{AWs}$ から算出される p_{AM} の計測値
 p_{AM} の推定値を $p_{\text{mod}} \in R^{3 \times 1}$ と置き、 ${}^R p_{P,k}^{AWs}$ に対する残差を $e_k \in R^{3 \times 1}$ と置くと次式が得られる。

$$\begin{aligned} e_k &= {}^R p_{P,k}^{AWs} - R_{\text{mod}} \cdot {}^R p_{P,k}^{MW} - p_{\text{mod}} \\ &= {}^R p_{P,k}^{AWs} - {}^R p_{P,k}^{MW_{\text{rot}}} - p_{\text{mod}} \\ &\equiv [e_{k,1} \ e_{k,2} \ e_{k,3}]^T \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、

$${}^R p_{P,k}^{MW_{\text{rot}}} = R_{\text{mod}} \cdot {}^R p_{P,k}^{MW} \in R^{3 \times 1} \quad (26)$$

e_k の第 j 要素 $e_{k,j}$ について、 $k = i, i+1, \dots, i+N-1$ と置くと次式が得られる。

$$e_{i,j} = p_{i,j}^{AWs} - p_{i,j}^{MW_r} - p_{\text{mod},j} \cdot u \quad (27)$$

ここで、

$$e_{i,j} \equiv \begin{bmatrix} e_{i,j} \\ e_{i+1,j} \\ \vdots \\ e_{i+N-1,j} \end{bmatrix}, \quad p_{i,j}^{AWs} \equiv \begin{bmatrix} {}^R p_{P,i,j}^{AWs} \\ {}^R p_{P,i+1,j}^{AWs} \\ \vdots \\ {}^R p_{P,i+N-1,j}^{AWs} \end{bmatrix}$$

$$p_{i,j}^{MW_r} \equiv \begin{bmatrix} {}^R p_{P,i,j}^{MW_{\text{rot}}} \\ {}^R p_{P,i+1,j}^{MW_{\text{rot}}} \\ \vdots \\ {}^R p_{P,i+N-1,j}^{MW_{\text{rot}}} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{e}_{i,j}, \mathbf{p}_{i,j}^{AWs}, \mathbf{p}_{i,j}^{MW_r}, \mathbf{u} \in R^{N \times 1}$$

誤差最小化の評価関数として、残差 $e_{k,j}$ にセンサデータ $R_{P,k,j}^{AWs}$ の信頼度 $r_{k,j}$ で重み付けした値の二乗和をとり、それを $J_{i,j} \in R$ と置くと次式が成立する。

$$J_{i,j} = \mathbf{e}_{i,j}^T \cdot \mathbf{W}_{i,j} \cdot \mathbf{e}_{i,j} \quad (28)$$

回転行列の場合と同様にして、 $J_{i,j}$ を最小にする $p_{mod,j}$ は次式で与えられる。

$$p_{mod,j} = \frac{(\mathbf{p}_{i,j}^{AWs} - \mathbf{p}_{i,j}^{MW_r})^T \cdot \mathbf{W}_{i,j} \cdot \mathbf{u}}{\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{W}_{i,j} \cdot \mathbf{u}} \quad (29)$$

これより、 $\mathbf{p}_{mod}$ が得られる。

$$\mathbf{p}_{mod} = [p_{mod,1}, p_{mod,2}, p_{mod,3}]^T \quad (30)$$

(3) ワークの非線形変位への対応

教示経路と実経路の関係が剛体変位のみでセンシング誤差が平均 0 のガウス分布の場合、第 M 番目のセンシングに対して $k = 0, 1, \dots, M$ として修正行列 $\mathbf{T}_{mod}$ を生成することにより、 M の増加と共に $\mathbf{T}_{mod}$ の推定精度は向上することが期待できる。

一方、変形等により両経路の関係が若干の非線形性を含んでいる場合、 $\mathbf{T}_{AM}$ は局所的に変動する。この場合には、ツール前後の長さ L の経路では近似的に剛体変位が成立するとみなし、この区間で得られた N 個のセンサデータ $\{\mathbf{T}_{AM,k}\}$, $k = i, i+1, \dots, i+N-1$ のみを用いて $\mathbf{T}_{mod}$ を算出する。これにより、ある程度の非線形変位に対処することが可能となる。

3.4 信頼度の導入

本システムでは、レーザレンジファインダにより得られる特徴点データの確からしさを表す指標として「信頼度」の考え方 [16] を導入する。

開先を構成する各部材が局所的には連続な面を構成するとすれば、その部分のレンジデータ列は本来は滑らかとなる。そこで、一般的にはレンジデータ列に直線または曲線を当てはめて各部材面を推定し [17]、それら直線または曲線の交点などから特徴点を決定している。式 (21) (28) の $\mathbf{W}_{ij}$ は各特徴点データの信頼度を対角要素とする対角行列で、最小二乗法の重み行列に対応する。最小二乗法では計測誤差の分散と共分散からなる誤差行列の逆行列として重み行列が定義されている [18]。

運動中のセンサからでは同一点を繰り返し計測することは不可能であり、誤差の分散あるいは推定された直線や曲線の確からしさを厳密な意味で評価することは難しい。しかし、誤差行列は要素間の相対値が得られていればよいので、ここでは、回帰直線（曲線）に対するレンジデータ列の残差の分散を各特徴点データの誤差の分散 $\{\sigma_k^2\}$ と考えて信頼度行列 $\mathbf{W}_{ij}$ を決定する [16]。

また、隙間や多重反射など開先の状態によっては特徴点近傍でレンジデータが得られない場合がある。その場合、特徴点から離れた所でのレンジデータ列の回帰直線や回帰曲線を外挿して特徴点を決定することになる。特徴点近傍に十分な個数のレンジデータがある場合に比べてデータ数が少ない場合の信頼度

は低下すると考えられる。そこで、本方式では得られた特徴点の近傍に一定距離の範囲を設定し、その中に存在するレンジデータの個数 n_k を調べ、個数の少ない場合には信頼度を低く、多い場合には高くなるように信頼度行列 $\mathbf{W}_{ij}$ を修正することとする [16]。具体的な距離と修正量は実験により決定する。

以上のように、本方式における信頼度行列 $\mathbf{W}_{ij}$ は $\{\sigma_k^2\}$ と $\{n_k\}$ の関数として決定する。

$$\mathbf{W}_{ij} = f[\{\sigma_k^2\}, \{n_k\}] \quad (31)$$

信頼度が一定値以下のセンサデータは棄却し、修正行列の生成には使用しない。また、仮付け部分の断面形状が正常断面に類似しているため、誤認識しているにもかかわらず信頼度の高いケースが、まれにはあるが生ずる。このようなケースに備え、センシング点間での特徴点位置の変化が一定のしきい値を越えた場合には誤認識と判断してデータを棄却する。

4. 経路教示の簡易・高精度化

修正行列と教示経路を用いてツール目標値を生成するためには、教示経路と実経路とが、実用上の範囲において、合同変換の関係で対応づけられることが必要である。しかし、有限個の点列で経路を教示するには熟練度と共に多大な時間と労力が要求される上、教示誤差は不可避である。

そこで、SmarTrack では、ラフな初期教示データをセンサデータに基づいて修正することにより、経路教示の簡易化と教示データの高精度化を達成することとした。

まず、教示に熟練していない操作者がラフに作成した教示データを用いて、教示に用いたモデル経路に対してプレイバック動作を行うことを考える。教示誤差のため、プレイバック軌跡はモデル経路からずれるが、その大きさはたかだか ± 数 [mm] 程度である。そこで、プレイバック中にセンサを動作させてモデル経路の位置・姿勢情報を獲得し、文献 [11] の経路生成アルゴリズムを用いて経路の位置・姿勢を区分的多項式関数で表現する。レーザレンジファインダの場合、視野範囲は幅、奥行きとも視野中心から ± 十数 [mm] 程度はあるから、プレイバック動作でもセンサ視野からモデル経路が外れることはほとんどない。また、レーザレンジファインダの検出精度はサブ [mm] と、非熟練操作者が作成した教示データの精度より十分高い。したがって、生成された区分的多項式関数を用いて初期教示データを修正することにより、新たに高精度な教示データを得ることができる。

5. シミュレーション

5.1 システム構成

Fig. 5 に SmarTrack の機能ブロック図を示す。センサヘッドはツールと共にマニピュレータ手首に取り付けられ、ツール前方で経路をリアルタイムで計測する。

センサコントローラはセンサヘッドの制御を行うと共に、特徴点の位置・姿勢の検出や接合する部材間の隙間値など開先状況の検出を行う。

修正行列生成部は特徴点情報、センシング時点における関節角、ロボットのキネマティクスパラメータ、および、教示デー

Fig. 5 Block diagram of SmarTrack

タに基づいて修正行列 T_{mod} を生成する。したがって、修正行列はセンシングが行われるたびに、逐次、更新される。生成された修正行列は共有メモリに書き込まれる。

ロボットコントローラは、現在のサーボ目標値を算出した経路長 s_{k-1} と与えられた倣い速度 v_T に基づいて、次のサーボ目標値を算出するための s 値 s_k を次式から算出する。ここで、 T_{sv} はサーボ周期である。

$$s_k = s_{k-1} + v_T \cdot T_{sv} \quad (32)$$

次に、教示データから $s = s_k$ の点の教示経路座標 $RT_{P,sk}^{MW}$ を算出し、これと修正行列 T_{mod} および開先に対するツールの相対的なねらい位置・姿勢 $PT_{T,sk}$ から、次式によりツール目標値 $RT_{T,sk}^{ref}$ を算出する。 v_T と $PT_{T,sk}$ は教示データとして与えるが、開先状況を観測して適応的に決定してもよい。

$$RT_{T,sk}^{ref} = T_{mod} \cdot RT_{P,sk}^{MW} \cdot PT_{T,sk} \quad (33)$$

逆運動学を解くことにより $RT_{T,sk}^{ref}$ を関節角目標値に変換し、サーボ系に入力して倣いを遂行する。

5.2 シミュレーション結果

本節では、倣いの途中でセンサデータがバースト状に欠落した場合でも、修正行列 T_{mod} と教示データからツール目標値を生成することにより、安定に倣い動作が遂行できることを、シミュレーションにより検証する。

Fig. 6 にシミュレーションに用いた教示経路と実経路を模式的に示す。

教示経路は〔直線+円弧+直線〕で構成される J 字形の経路で、基準座標系の X_R - Y_R 平面上に設定する。

実経路は曲線経路を X_R , Y_R , Z_R 軸まわりにそれぞれ 15, 10, 5 [deg] 回転した後、 X_R , Y_R , Z_R 軸方向にそれぞれ 10, 20, 30 [mm] 並進させたものである。 T_{AM} は次のようになる。

$$T_{AM} = \begin{bmatrix} 0.958 & 0.129 & -0.255 & 10.0 \\ -0.086 & 0.981 & 0.174 & 20.0 \\ 0.272 & -0.145 & 0.951 & 30.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

レーザレンジファインダは 2 [mm] 間隔でセンシングを行い、位置・姿勢データを出力する。光切断面は実経路に垂直とする。位置データには $N(0, 0.3^2)$ [mm] の、姿勢データには

Fig. 6 Schematic of nominal path and actual path for simulation

Fig. 7 Simulation result

$N(0, 2^2)$ [deg] のガウスノイズを光切断面内で付加する。また、直線区間から円弧区間にかけて、ツール～センサ間距離の約 2.5 倍の長さの区間でセンサデータを欠落させる。したがって、センサデータのみを用いて倣いを行う自律倣いシステムでは、この区間のツール目標値を生成することはできなくなる。センサデータの信頼度はすべて 1 とする。 T_{mod} の算出は $N = 10$ で行う。

Fig. 7 にシミュレーション結果を示す。上が平面図、下が正

面図である。同図はセンサデータが欠落させた部分を拡大表示したものであり、センサデータには作業対象面の接線ベクトルを併せて表示してある。

センサデータが欠落している区間でも、直前に生成された修正行列 T_{mod} と教示データを用いることにより、 ± 0.1 [mm] 以下の誤差でツール目標値が生成されている。この誤差は一般的なアーク溶接の許容誤差 (± 0.5 [mm] 程度) を十分にクリアしている。これにより、本アルゴリズムを用いて信頼度の高いシステムを構成できることが検証された。

6. 実 験

6.1 実験システム

実験システムの機能ブロック図は Fig. 5 に示した通りである。実験に用いたレーザレンジセンサは NTT FANET SYSTEMS 製レーザ視覚センサ FLP-400、ロボットは安川電機製 K3S である。なお、ロボットコントローラの詳細は文献 [19] を参照されたい。

6.2 実験結果

Fig. 8 に実験結果を示す。目標経路は半径 500 [mm]、経路長約 280 [mm] の円弧で、教示後に経路平面内で回転約 3 [deg]、並進約 2 [mm] の据え付け誤差を与えている。シミュレーションと同様、この実験でも、倣いの途中で先読み距離の 2 倍あまりの長さにわたってセンサデータが欠落するようにしている。

実験結果では、センサデータ欠落区間でも ± 0.2 [mm] 以下の誤差でツール目標値が生成されており、一般的なアーク溶接の許容誤差を十分にクリアしている。これにより、本システムの実現性が検証された。

7. 結 言

本論文では、バースト状センサデータ欠落が発生するような劣悪なセンシング環境下でも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をねらいとして、先読みセンサからの信頼度付きセンサデータと教示データとを相補的に利用する高精度な空間経路生成法と、経路教示の負荷を軽減する教示データ修正法を提案した。さらに、これを用いたロボットシステムにより高信頼度・高精度なロボット倣い作業が実現できることをシミュレーションと実験により示した。

Fig. 8 Experimental result

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) アーク溶接ロボットに代表される空間経路倣い作業システムにおいて、離散的に獲得されるセンサデータの不確実性とバースト状センサデータ欠落の影響を補償し高信頼なシステムを実現するためのコンセプトを提案すると共に、その教示経路修正アルゴリズムを開発した。
- (2) 提案したアルゴリズムでは、先読みセンシングにより作業の進行と共にツール直前の経路情報を獲得する。ついでその情報と教示データに基づいて、教示経路を実経路に写像する修正行列を生成する。さらに、センサデータの信頼度概念を導入し、これを修正行列の生成に用いることにより以下の各項を達成する。
 - (a) 倣うべき空間経路の高精度な近似復元。
 - (b) センサノイズおよびバースト状センサデータ欠落の影響の抑圧。
- (3) 曲線経路に対する倣いシミュレーションと実験により、
 - (a) 実経路はモデル経路に対して剛体変位を受けている。
 - (b) センサデータには位置・姿勢誤差がある。
 - (c) 倣い途中で、ツール～センサ間距離よりも長いセンサデータ欠落がある。

場合でも、提案したアルゴリズムを用いて実用上十分な精度でツール目標値が生成されることが確認され、本アルゴリズムの有効性が検証された。

本研究の実験による詳細な特性評価については別途報告することとしたい。

最後に、センサ関連で御協力をいただいた当所金子透主幹研究員（現、静岡大学工学部）、実験でご協力いただいた武藤伸洋研究主任および日頃御討論いただく知能ロボット研究部各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 河原、滝：“開先形状検出による溶接線ならい制御”，計測自動制御学会論文集，vol.15，no.4，pp.492-497，1979。
- [2] 浅田、花房：“工業用ロボットの空間曲線ならい制御”，計測自動制御学会論文集，vol.16，no.5，pp.740-746，1980。
- [3] 花房、吉川、中村：“関節型ロボットの自律的な制御”，計測自動制御学会論文集，vol.18，no.11，pp.1110-1116，1982。
- [4] 中村、花房：“関節型ロボットの2次元自律的な制御系の構造解析と設計”，システムと制御，vol.27，no.9，pp.598-605，1983。
- [5] 中村、花房：“関節型ロボットのセンサフィードバックによる3次元自律的な制御—構造解析と制御系設計—”，計測自動制御学会論文集，vol.21，no.2，pp.183-189，1985。
- [6] N. Nayak and A. Ray: “AN INTEGRATED SYSTEM FOR INTELLIGENT SEAM TRACKING IN ROBOTIC WELDING: Part1—Conceptual and Analytical Development,” Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'90), vol.3, pp.1892-1897, 1990.
- [7] N. Nayak and A. Ray: “AN INTEGRATED SYSTEM FOR INTELLIGENT SEAM TRACKING IN ROBOTIC WELDING: Part2—Design and Implementation,” Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'90), vol.3, pp.1898-1903, 1990.
- [8] Y. Ishiguro, et al.: “Development of a Real Time Sensor Feedback Robot,” SAE Technical Paper Series 901706, Passenger Car Meeting and Exposition, Dearborn, Michigan, 1990.
- [9] B. Bahr, et al.: “Sensory Guidance of Seam Tracking Robots,”

- Journal of Robotic Systems, vol.11, no.1, pp.67-76, 1994.
- [10] A. Ishii, et al.: "A Laser Vision Sensor for an Arc-welding Robot," Proceedings of 3rd France-Japan Congress & 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.166-169, 1996.
 - [11] 野中, 柿崎: "不確実性を持つ離散的センサデータに基づく空間経路生成法とそのロボット做い作業への応用—システムコンセプトと経路関数生成法—", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.662-671, 1998.
 - [12] 野中, 柿崎: "センサデータと教示データの相補的利用による做い作業ロボットの空間経路生成", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no.2, pp.459-460, 1996.
 - [13] (社)日本溶接協会ロボット溶接研究委員会: ロボットアーク溶接技術入門, pp.42-70, 産報出版, 1991.
 - [14] O.D. Faugeras and M. Hebert: "The Representation, Recognition, and Locating of 3-D Objects," The International Journal of Robotics Research, vol.5, no.3, pp.27-52, Fall 1986.
 - [15] K.S. Arun, T.S. Huang and S.D. Blostein: "Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.PAMI-9, no.5, pp.698-700, Sept., 1987.
 - [16] 金子, 中山: "形状処理方法", 特願平 8-317260, 1996.
 - [17] 金谷: 空間データの数理—3次元コンピュータグラフィックスに向けて—, pp.110-130, 朝倉書店, 1995.
 - [18] 中川, 小柳: 最小二乗法による実験データ解析, pp.29-53, 東京大学出版会, 1993.
 - [19] 三ツ矢: "実世界と相互作用を持つコンピュータシステム開発のためのプラットフォーム", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.34-37, 1996.

付録 レーザレンジセンサ情報と修正行列の導出

修正行列 T_{AM} を求めるためには, 教示経路と実経路の対応点について, 次のいずれかの情報が得られなければならない.

(a) 少なくとも1対応点における両経路の位置・姿勢

(b) 同一直線上にはない, 少なくとも3対応点における両経路の位置

現在, 一般に用いられているセンサでは6自由度分の位置・姿勢情報を一挙に獲得することは困難である. 例えば, センサとしてレーザレンジファインダを用いる場合, 特徴点の位置と, 特徴点を形成する二つのワーク面と光切断面との交線を表す2本のベクトルとが得られるが, 光切断面が経路を垂直に切断するとは限らないので, 1点でのセンサデータからワーク面の姿勢を確定することはできない. しかし, 隣接する2点の位置データを用いれば経路の接線方向を推定できるので, これと上述の2本の交線ベクトルからセンシング点での経路姿勢を確定できる. この場合, 条件(a)が満足されるので, センシングごとに両経路間の写像関係を求めることができる.

ワーク表面の光学的特性によっては, レーザレンジファインダから得られる交線ベクトルに大きなノイズが含まれ, 姿勢情報として実用に供せない場合がある. このようなワークに対しては, 位置のみ検出できるセンサとして利用することになる.

一般的に直線経路の出現頻度は高いので, (b)は実用上厳しい制約条件となり, 位置情報しか得られないセンサは不利となる. しかし, 実際の生産現場では, ワークの設置誤差が水平面内の並進と垂直軸回りの回転の3自由度に限定されるケースが多く見られる. このような制約条件の元では, 垂直軸方向の直線経路を除外すれば,

(c) 少なくとも2対応点における両経路の位置から修正行列を求めることが可能となる.

野中 潔 (Kiyoshi Nonaka)

1947年1月18日生. 1970年埼玉大学理工学部電気工学科卒業. 同年日本電信電話公社電気通信研究所入所. 以来, MODEM, 自動等化器および加入者系デジタルデータ伝送方式の研究実用化に従事. 1989年より NTT ヒューマンインタフェース研究所において経路追従ロボットシステムの研究開発に従事. 計測自動制御学会会員, (日本ロボット学会正会員)

柿崎隆夫 (Takao Kakizaki)

1953年9月23日生. 1979年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修了. 工学博士. 同年日本電信電話公社電気通信研究所に入所. 情報機器の研究実用化に従事. 1989年以降, NTT ヒューマンインタフェース研究所にて知能ロボットの研究開発に従事. この間, 1987年~88年米国 MIT に留学. 日本機械学会, ASME の会員. (日本ロボット学会正会員)