スカラ型ロボットの軌道計画・制御システム*

尾崎 弘明^{*1}, 丘 華^{*2}, 河津 秀隆^{*3}

Trajectory Planning and Control System for a SCARA Robot

Hiroaki OZAKI, Hua CHIU and Hidetaka KAWATSU

The SCARA robot control system, which comprises environment monitoring, collision-free path planning, joint trajectory generation and trajectory control, is developed. In environment monitoring, the work space is displayed on a CRT through a TV camera and obstacles are then interactively modeled. The collision-free path is planned based on the configuration space method, and the shortest path is heuristically obtained. The path is described by a set of joint trajectories using the B-spline curve. The trajectories are iteratively improved to optimize the specified performance index considering the robot dynamics. The generated trajectories are used as reference joint trajectories to control the robot. Control parameters are also determined according to the identification of the robot. This system is confirmed to be effective throughout experiments.

Key Words: SCARA Robot, Trajectory Planning, Environment Monitoring, Collision-Free Path Planning, Trajectory Optimization, B-Spline, Trajectory Control, Identification, Manipulator Dynamics

1. 緒 言

ロボット工学において、障害物回避はロボット環境などの幾何学的な関係によって定まる経路計画の問題^{(1)・(2)}として、また与えられた評価と制限条件のもとで関節の動きを求める問題は軌道計画の問題^{(3)・(6)}として、重要な分野をなしている。今後、障害物回避の問題を含めたより有効な軌道計画法の開発が望まれるが、現在まで、軌道計画は多くの場合、実システムと分離して議論されてきており、回避経路生成、軌道生成および軌道制御について一貫した立場からなされた研究は少ないようである。そこで本研究では、工業用ロボットとしてよく利用されるスカラ型ロボットを対象として、環境教示から軌道計画、軌道制御までを一貫して行うシステムを構成し、システム全体から軌道計画の問題をとらえることを試みた。また現在、動力学を考慮した障害物回避軌道計画法として有効な手法がないことから、簡便な一つの方法を提案し、その

有効性を実験によって確認する。

2. システムの概要

本システムは、ハードウェアとして、DDモータで駆動されるスカラ型ロボットの作業環境を教示するための環境教示部と、計画された軌道に追従してロボットを動かすための制御部とをもつ。ロボットの動きは、エンコーダのパルスをカウントして得られ、制御信号はD/A変換してサーボドライバに輸入される。システム全体は図1のように構成されている。

3. 制御部

各関節の動きは、他方の関節の動きによって動力学

図1 スカラ型ロボットの軌道計画・制御システム

* 平成3年3月14日 九州支部第44期総会講演会において講演、原稿受付 平成4年2月5日。

*1 正員、福岡大学工学部(〒814-01 福岡市城南区七隈8-19-1)。

*2 正員、九州産業大学工学部(〒813 福岡市東区松香台2-3-1)。

*3 久留米工業高等専門学校(〒830 久留米市小森野町1232)。

図2 関節のI-Pデジタルサーボシステム

図3 第1関節パラメータの同定データ

的な干渉を受けるが、本システムではそれを外乱とみなし、各関節を独立にI-P制御する(図2参照)。図中 θ_r は目標関節角、 θ_a は実際の関節角、 u はサーボドライバへの速度入力である。

3.1 アーム部の同定 零次ホールド、サーボドライバおよびDDアーム部を含めた系のパルス伝達関数 $G(z)$ を同定し、それをもとにDDアーム部第1関節(ベース側)、第2関節(手先側)の伝達関数 $G_p(s)$ をそれぞれ求めた。まず、 $G(z)$ の分母、分子の z^{-1} の次数を4次までとし、

$$G(z) = \frac{(e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + e_3 z^{-3} + e_4 z^{-4})}{(1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4})} \quad (1)$$

$d_1 \sim d_4, e_1 \sim e_4$ を逐次最小2乗法⁽⁷⁾によって同定した。同定のサンプリング周期は1(ms)である。第1関節のパラメータ同定の様子を図3に示す。

得られた $G(z)$ から伝達関数 $G_p = g/\{s(T_p \cdot s + 1)\}$ で近似できると判断した。その結果、第1関節では $g = 22.24 \times 10^3$ (pulse/v·s), $T_p = 4.0 \times 10^{-3}$ (s)、第2関節では $g = 47.63 \times 10^3$ (pulse/v·s), $T_p = 4.5 \times 10^{-3}$ (s)を得た。なお、第1、第2の関節角を検出するエンコードの分解能はそれぞれ256000 (pulse/rev)および163840 (pulse/rev)である。

3.2 制御則パラメータ決定 文献(8)では、望ましい応答を示す制御系の参照モデルを分母系列表現と呼ぶ形で表しておき、この系列表現における係数の値を低次から順に整えるように制御装置のパラメータを定める方法が提案されている。この方法によると、

図4 DDアームのステップ応答

参照モデルの分母の次数はどこで打切ってもよく、制御対象の次数に応じたパラメータ決定ができる。文献(8)は連続系、文献(9)はサンプル値系の設計法を提案している。

ここでは、文献(9)に従って、制御系の伝達関数を参照モデル

$$G_m(s) = 1/(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sigma \cdot s + \alpha_2 \cdot \sigma^2 \cdot s^2 + \alpha_3 \cdot \sigma^3 \cdot s^3) \quad (2)$$

に合わせるように制御パラメータ k, f_0 および σ を定めた。ここで、行き過ぎ量に関するパラメータ $\alpha_0 \sim \alpha_3$ はシミュレーションにより $\alpha_0 = \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = 0.08$ とした。これにより、第1関節では $k = 0.117 \times 10^{-4}, f_0 = 0.144 \times 10^{-2}$ (v/pulse)、第2関節では $k = 0.4712 \times 10^{-4}, f_0 = 0.6396 \times 10^{-3}$ (v/pulse)を得た。得られた制御パラメータを用いたときのステップ応答をシミュレーションと実機の場合について比較すると図4のようになった。なお図中横軸の1ステップはサンプリング間隔4.5(ms)に対応する。

4. 軌道計画部

4.1 作業環境の入力 本実験では、スカラ型の2自由度アームを対象にしているので、障害物として柱状の物体のみを取り扱っている。そこで、図1の環境教示部は、ロボットの作業域を1台のTVカメラでとらえ、画像処理ボードを介してパーソナルコンピュータに入力し、ディスプレイ上にその環境を表示する。操作者は、表示された画像を見て、環境内に存在する個々の障害物の画像上に、基本形状(円、長方形)をマウスを用いて重ね合わせる。その結果、障害物は基本形状の組み合わせとして教示される。

4.2 障害物回避経路の決定 本システムでは、ロボットの自由度は2であるから、障害物回避経路を求める方法として、関節空間に障害物を表現して経路を探索する方法(コンフィギュレーション空間法⁽¹⁰⁾)が有効である。そこで、各関節の可動範囲(本システム

図5 コリジョンマップと障害物回避経路の例

図6 改善された障害物回避経路の例

では関節1, 2それぞれ $-135^\circ \leq \theta_1 \leq 135^\circ$, $-90^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$ を適当な区間に分割し, 量子化された各々の空間 (量子化ブロック) の中心において, 4. 1 節で教示された障害物との干渉をチェックする⁽¹¹⁾. その結果, 例えば図5のように関節空間での障害物記述 (コリジョンマップ) が得られる. 図中, 黒四角印の量子化空間が障害物占有空間であり, これを除く空間が自由空間となる. 障害物回避経路は, 出発点Sを含む量子化ブロック (始端ブロック) から目標点Gを含むブロック (終端ブロック) に至る自由空間の量子化ブロック (経由ブロック) の並びとして下記の手順によって得られる.

(1) S から G に至る直線を含む経由ブロックの並

びを優先経路とする.

(2) (1) の経路にそって始端ブロックから終端ブロックに向かって経由ブロックに番号をつけ, 障害物に当たればそれに沿って時計まわりおよび反時計まわりに経路を探索する. (1) の経路に当たれば優先経路を進む.

(3) 得られた経路のうち経由ブロック数の最も少ない経路を求め, これを障害物回避経路とする.

この手順で得られる障害物回避経路の例を図5に示す.

4.3 経路の改善と軌道計画 障害物回避が可能であれば, 4. 2 節の手順でその経路は必ず得られるが, 経由ブロック数を減ずるために次の手続き (4) を追加する.

(4) 前節 (3) で得られた経由ブロックをもとに, 縦, 横, 斜め, 斜めの方向に経路を探索し, 経由ブロック数のより少ない経路が存在すればそれに更新する.

この手続きによって得られる経路の例を図6に示す.

つぎに, 上記手順で得られた経由ブロックの中心をユニフォームなBスプラインの制御点とし, SからGに至る時間 t_f を定め, 経路を軌道として表現する. このとき得られる軌道を初期軌道として, 目的にあった軌道へと更新すればよい. 文献(3)では, 指定された動力学的な制限条件のもとで, Bスプライン曲線で表現された関節経路の逐次更新と時間最適化により, 近似最短時間軌道を計画する問題としている. また文献(4)では, 一般の評価関数に対して, これを改善するように関節軌道を変更していく方法を提案している. ここでの問題は, 動作時間 t_f のどの時刻においても軌道が障害物占有空間に含まれないような制限条件のもとでの軌道の逐次改善の問題であり, 文献(3)および(5)と同様な手順をとれば, Bスプラインの制御点を逐次更新することによって軌道を改善することができる. どのような評価を用いるかによって得られる軌道が変わってくるが, ここでは評価として動力学を考慮した次の評価を用いる.

$$J = \int_0^{t_f} (|\tau_1 \cdot \dot{\theta}_1| + |\tau_2 \cdot \dot{\theta}_2|) dt \quad (3)$$

ここに, τ_1, τ_2 は関節1, 2の駆動トルク, $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ はそれぞれの関節角速度である.

5. 実験

上述のシステムを用いて行った2つの実験例を示す. 実験1の場合, その実験の風景を図7に, 教示された環境をもとにして得られたコリジョンマップ, 手順(3)で得られた経由ブロックの中心をBスプラインの制御

図7 実験1の実験風景

図8 実験1のコリジョンマップ、初期軌道および改善軌道

点とする軌道（初期軌道）および4. 3節の手続きで得られた軌道（改善軌道）を図8に示す^{**1}。軌道の改善により、評価Jの値は初期軌道に対して約5.6%程度まで減少した。図9はロボットが動く様子を障害物とともに示している。図10は改善軌道を目標軌道としてロボットを動かしたときの実際の軌道および初期軌道を示す。実験2の場合には、教示された環境によるコリジョンマップ、初期軌道および改善軌道を図11に、改善軌道に沿ってロボットの動く様子を図12に、改善軌道を目標軌道としてロボットを動かしたときの実際の軌道を図13に示している。実験2では関節可動

^{**1} 図8には時間変数が陽に現れないので、軌道ではなく経路という表現を用いるべきであるが、Bスプラインで両関節軌道を表現したものを改めて図中に記したものであるから軌道という表現を用いる。以下この表現に従う。

(a) Initial collision-free movement

(b) Improved collision-free movement

図9 実験1における障害物およびロボットの動き

(a) Joint 1

(b) Joint 2

図10 実験1の初期関節軌道、目標関節軌道および実際の関節軌道

図 1.1 実験 2 のコリジョンマップ、初期軌道および改善軌道

図 1.2 実験 2 における障害物およびロボットの動き

範囲の条件が影響し、回避条件がきびしくなる例である。軌道計画部は確実に回避経路を得て、初期軌道に対する改善軌道の評価 J の値を 15.4% 程度まで減少させた。図 1.2 と図 1.3 からわかるように、この場合第 2 関節を大きく変動させることによって障害物を回避できる様子が分かる。また、図 1.0 と図 1.3 の横軸は周期 4.5 (ms) のサンプリングのステップ数を表す。なお、動作時間 t_f は実験 1 では約 5 (s)、実験 2 では約 7.5 (s) であるが、これを 2 (s) 程度にすると、目標軌道からの偏差が増大する。例えば、実験 1 の環境下で得られた目標軌道と実際の軌道を示すと図 1.4 のようになる。この例では、軌道制御の際に障害物を除去して実験を行っているが、この偏差を十分に考慮して軌道計画を

図 1.3 実験 2 の目標関節軌道と実際の関節軌道

図 1.4 実験 1 ($t_f \approx 2.0$ sec の場合) の目標関節軌道と実際の関節軌道

行わなければ、計画段階で回避できても実際の作業では障害物と衝突することになる。図10と図14の比較から、この場合の偏差は、軌道の速度にほぼ比例しており、その要因はおもに制御系が1形であることにあるものと思われる。偏差を生ずる原因としては、このほか同定による誤差や、各関節独立に制御することから、動力学的干渉が外乱となることなどが考えられる。これらによって生ずる目標軌道からの偏差が障害物との干渉に影響を及ぼさないようにするためには、以下のような対策が考えられる。一つは、偏差を抑えるために、2形の制御系や外乱オブザーバ⁽¹²⁾などを用いて制御系を構成することである。制御系を変えない場合には、駆動トルクの上限を考慮して加速度、速度の小さい軌道を計画して偏差を抑える。あるいは、偏差の見積りが可能である場合には、障害物占有空間をそれに応じて拡大し、軌道を局所的に修正する方法が有効であると思われる。文献(13)には、障害物の移動に応じて軌道を局所的に変更する問題を扱っているが、障害物占有空間の拡大に対しても同様な手法が適用できるとと思われる。

6. 結 言

スカラ型のロボットについて作業環境の教示、制御を含めた総合的な軌道計画システムを構成し、実験によりその有効性を確認した。また本システムによる実験を通じ、下記の見解を得た。

(1) ヒューリスティックな経路改善とユニフォームなBスプラインによる軌道改善により、動力学を考慮

した簡便な障害物回避軌道計画が可能であること。

(2) 高速な動作が要求されるにつれ、システムの軌道追従性も回避軌道生成に考慮される必要があること。

スカラ型ロボットでは、ハンド部の上下運動の自由度を考慮したシステムへと機能拡張する必要があるが、この際にも本研究で行った方法を有効に組み入れることが可能であると思われる。この点については今後の課題としたい。

なお、本研究には福岡大学卒論生松尾陽一(現在、日本電気エンジニアリング)、村上誠(現在、福岡大学大学院)両君の協力を得たことを記し謝意を表す。

文 献

- (1) 尾崎, 日本ロボット学会誌, 2-6, (1984), 580.
- (2) 長谷川, 日本ロボット学会誌, 5-6, (1987), 475.
- (3) 尾崎・山本・毛利, 計自論, 23-11, (1987), 1199.
- (4) 宇野・川人・鈴木, 計自論, 24-8, (1988), 837.
- (5) 山本・尾崎・毛利, 計自論, 24-9, (1988), 942.
- (6) 寺本・小野・Turhan, Ö, 機論, 57-544, C(1991), 3869.
- (7) 中溝, 信号処理とシステム同定(1988), 135, コロナ社.
- (8) 北森, 計自論, 15-4, (1979), 549.
- (9) 北森, 計自論, 15-5, (1979), 695.
- (10) 例えば, Lozano-Pérez, T., IEEE J. Robotics Autom., 3-3(1987), 224.
- (11) 尾崎・毛利・高田, 計自論, 18-9, (1982), 942.
- (12) 駒田・大西, 日本ロボット学会誌, 8-3, (1990), 273.
- (13) 尾崎・丘, 計自論, 29-1, (1993) (掲載予定) .