フレキシブルマニピュレータの障害物回避のための最適軌道設計*

李 承 宰^{*1}, 山 川 宏^{*1}

Trajectory Optimization of Flexible Manipulators for Collision-Free

Seung-Je LEE^{*2} and Hiroshi YAMAKAWA^{*2} Waseda University, Dept. of Mechanical Engineering, Ohkubo 3-4-1, Shinjuku Tokyo, 169-8555 Japan

We develop a new method of trajectory optimization of redundant flexible manipulators for collision-free utilizing the B-spline function and a mathematical programming method. We adopt an approximate flexible manipulator model which consists of rigid bar elements and spring elements. We use B-spline function for determining the approximate trajectory and the expressions of the outline of obstacles. The used total performance index consists of 2 performance indices. The first is the driving energy, and the second is the trajectory deviation which is caused by the approximate modeling for the flexible manipulator. We design optimal collision-free trajectory of flexible manipulators by searching optimum positions of the control points for B-spline approximation which minimize the performance index subject to constraint condition for collision-free. Some examinations through numerical examples show the effectiveness of the method.

Key Words: Flexible Structure, Space Robot, Manipulator, Collision-Free, Optimal Trajectory, B-Spline Function, Redundant Manipulators

1. 緒言

経済的なコスト削減や動力部の小型化などのために、ロボットマニピュレータの運転などに必要なエネルギーの削減やその運搬・運動を容易にするためには、ロボットマニピュレータを軽量化する必要がある。さらに、宇宙空間で使用される場合には、宇宙用ロボットマニピュレータの質量が大きいと、打ち上げコストが増大したり、微小重力下で動かすと余計な反作用を起こすなどの問題があり、ロボットマニピュレータの軽量化は切に望まれている課題である。

ところが、軽量化されたフレキシブルロボットマニピュレータは、内部減衰が低いために、わずかな外乱にも振動の励起や、軌道追従の低下などが生じやすい。そのためにその解決策を探るさまざまな研究がなされてきている。しかしその多くは制振のための付加的な制御系の設計に関する研究^{(1)~(3)}が主となっている。

しかしながら、フレキシブルマニピュレータの軌道を最適化することにより、振動の励起や、軌道追従の低下などの問題を解決することが可能ならば、付加的

な制御系の設計に加えて、制振および軌道追従度のさらなる向上が期待できる。特に複数の作業が特定でき、ある程度の軌道の存在する範囲が限定される場合には有効であると考えられる。

マニピュレータの障害物回避問題を含む軌道最適化または軌道計画問題に関する研究^{(4)~(8)}は剛体マニピュレータを対象したものがほとんどであり、フレキシブルマニピュレータの軌道最適化または軌道計画問題を扱った研究はほぼ皆無である。また、従来の剛体マニピュレータの障害物回避問題を扱った研究においても、次のような問題が残っており、必ずしもその手法が確立されているとは言い難い。

- (1) 軌道と経路を別々に扱っており、障害物回避経路を求めた後、決められた経路上での軌道計画を行わなければならない。
- (2) 作業空間の幾何学的情報のみを考慮し、できるだけ障害物と離れた経路、または終点までの最短経路を求める報告が多く、動力学解析を行いエネルギーや作業時間を併せて考慮した研究は非常に少ない
- (3) 多くが関節空間での経路を行っているため多リンクロボットマニピュレータの場合には関節空間で表現された経路は非常にわかりにくく、見通しが悪い。著者らは、以前から上述した問題点を踏まえ、

* 原稿受付 1999年10月5日。

^{*1} 正員、早稲田大学理工学部 (☎ 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)。

E-mail: yisj@yamakawa.mech.waseda.ac.jp

- (1) フレキシブルマニピュレータの振動を抑制できるなめらかな軌道の設計
 - (2) 経路だけではなく時間の関数である軌道の最適化
 - (3) 実空間で設計できる見通しのよい軌道の設計
 - (4) 多リンクの冗長性を有効に活用できる軌道の設計
 - (5) エネルギーなど動力学特性を評価できる軌道の設計
- などを目指し、B-スプライン関数による近似と駆動エネルギー、作業時間、最大操作性などの評価関数を用いた剛体ならびにフレキシブルマニピュレータの最適軌道設計に関連する一連の研究^{(9)~(12)}を進めてきており、いくつかの成果を得ている。本研究ではさらに、冗長性をもつ平面フレキシブルマニピュレータを対象とした障害物回避のための最適軌道設計法を提示し、計算例を通じてその有効性を示す。

2. 障害物の近似と障害物回避のための

幾何学的制約条件

2.1 障害物の近似 B-スプライン関数を用いた障害物の外形の表現方法について説明する。パラメータ s の関数で表されるB-スプライン関数 $P(s)$ は

$$P(s) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(s) \quad (1)$$

で表される⁽¹³⁾。ここに P_i は曲線定義ポリゴンの位置ベクトルを、 n は[(曲線定義ポリゴンの数) - 1]を、 k は位数を表している。位数 k の i 番目の正規化されたB-スプラインの基底関数 $N_{i,k}(s)$ はつぎの反復公式

$$N_{i,k} = \begin{cases} 1 & (x_i \leq s < x_{i+1}) \\ 0 & (s < x_i, s \geq x_{i+1}) \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,k}(s) = \frac{(s - x_i)N_{i,k-1}(s)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - s)N_{i+1,k-1}(s)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (3)$$

より与えられる。このようなB-スプライン関数を用い、図1に示すように障害物の形状をマニピュレータのエンド・エフェクタの大きさ等を考慮した適切な余裕を持たせて近似する。その際にB-スプライン関数の位数を変化させることにより同一の障害物に対していろいろな形式の近似が可能となり、その精度を変えることができる。

2.2 障害物回避のための幾何学的制約条件 空間内のあるリンクならびに点に対する障害物との衝突判定ならびに障害物回避のための可動範囲の制約を見出す方法について述べる。リンクに対しては障害物の配置を図2に示すようにCase 1からCase 4までに場合分けをし、衝突判定を行い、その際の制約条件を設定する。

Fig. 1 Approximation of obstacles B-spline function

Fig. 2 Judgement of collision for i -th link with obstacle

Fig. 3 Judgement of collision for point p_i with obstacle

2.2.1 リンクに対する制約条件(Case 1) 図2の(a)に示されているように、絶対座標系 $O-XY$ を i 番目のリンクの根元に平行移動させた相対座標系 $o_i-x_iy_i$ を設置し、原点 o_i を中心に $link\ i$ の長さを半径とする円 S_i とする。 j 番目の障害物 ($obst_j$) 上の各点の内、円 S_i に含まれる点と原点 o_i を結ぶ線分が軸 x_i となす角度の最大値 α_{ij}^{max} と最小値 α_{ij}^{min} を求め、その差 α_{ij} ($\alpha_{ij} > 0$) と α_{ij} を二等分する線分 c_{ij} と軸 x_i がなす角度 β_{ij} を求める。この場合の障害物回避のための制約条件は、 i 番目のリンクが軸 x_i となす角度を q_i とすると

$$|q_i - \beta_{ij}| > \frac{1}{2} \alpha_{ij} \quad (3)$$

となる。

Fig. 4 Approximate model with rigid beams and springs

2.2.2 リンクに対する制約条件(Case 2) 図2の(b)のように障害物上の点の内、円 \$S_i\$ に含まれる点がない場合は、障害物上のすべての点と原点 \$o_i\$ を結ぶ線分が \$x_i\$ 軸となす角度の最大値 \$\alpha_{ij}^{max}\$ と最小値 \$\alpha_{ij}^{min}\$ を求め Case 1 と同様に \$\beta_{ij}\$ を求める。この場合障害物回避のための制約条件は

$$|q_i - \beta_{ij}| \geq 0 \quad (4)$$

となる。このように障害物上の点の内、円 \$S_i\$ に含まれる点がない場合は、一般的には各リンクに対する制約条件は必要ではないが、制約条件が連続性を保つようにするために式(4)の制約を設ける。

2.2.3 リンクに対する制約条件(Case 3) 障害物の外形が凸ではなく凹を含んでいる場合は Case 1 のように制約条件を設けるとリンクが図2の(c)の斜線の部分に入れなくなる場合が存在する。これを避けるため、障害物の外形が凹の場合は障害物が凸となるように障害物を分解し、分解された個々の障害物に対し、Case 1 の制約を設ける。

2.2.4 リンクに対する制約条件(Case 4) 計算機では角度を \$\pi\$ [rad] から \$-\pi\$ [rad] までしか表現できないため、図2の(d)のように障害物が \$o_i\$-\$x_i\$-\$y_i\$ 平面の第2, 第3象限にまたがる場合には Case 1 のように最大値 \$\alpha_{ij}^{max}\$ と最小値 \$\alpha_{ij}^{min}\$ を求めると \$\pi\$ [rad] と \$-\pi\$ [rad] となり \$\alpha_{ij}\$ が \$2\pi\$ [rad] となってしまう。この場合はリンクと障害物を \$y_i\$ 軸に対称移動させたあと Case 1 の制約条件を設ける。

2.2.5 点に対する制約条件 図3のように絶対座標系を平行移動させ空間内のある点 \$p_i\$ に原点を持つ相対座標系 \$o_i\$-\$x_i\$-\$y_i\$ を設置する。2.2.1の方法と同様に障害物上の各点と原点 \$o_i\$ を結ぶ線分が \$x_i\$ 軸となす角度の最大値 \$\gamma_{ij}^{max}\$ と最小値 \$\gamma_{ij}^{min}\$ を求め、その差 \$\gamma_{ij}\$ (\$\gamma_{ij} > 0\$) を求める。図3からもわかるように \$p_i\$ が障害物に近付くほど角度 \$\gamma_{ij}\$ は大きくなり障害物の内部に入った場合は \$2\pi\$ となることから、\$p_i\$ に対する障害物との衝突回避のための制約条件は次のように設定することができる。

$$\gamma_{ij} < 2\pi \quad (5)$$

Fig 5 Initializing of the control points

3. 近似フレキシブルマニピュレータ

本研究ではより簡便な手法を目指し図4に示されているような2次元フレキシブルマニピュレータに対し近似フレキシブルマニピュレータモデルを用いる。このモデルでは各リンクを \$n\$ 個の剛体要素と剛体要素の根元に付した回転バネを用いて近似し、定式化を行う。この際、各バネのバネ定数 \$k_{ij}\$ は、連続な片もちばりのモーメント荷重に対する先端のたわみと、近似フレキシブルマニピュレータの各リンクのモーメント荷重に対する先端のたわみが等価になるように各要素のヤング率、断面2次モーメント、長さを用いて定める。各リンクの最初の要素はその位置に取り付けられていると仮定しているアクチュエータを表し、2番目要素から \$n\$ 番目要素がアームを表している。また、図1の \$\theta_i\$ (\$i=1, 1+n, 1+2n, 1+3n, \dots, 1+(m-1)n\$) は関節の回転角度、\$\theta_i\$ (\$i=2, 3, \dots, n, n+2, n+3, \dots, 2n, 2n+2, 2n+3, \dots, mn\$) はフレキシブルリンクの曲げによって生じるたわみ角を示している。以上の近似を用いることによって、絶対座標を用いたフレキシブルマニピュレータの運動方程式は式(6)のように定式化できる⁽¹²⁾。

$$[I] \cdot \ddot{q} + [K] \cdot \dot{q} + \{h\} = \{T\} \quad (6)$$

ここに \$q\$ は図1の各要素の相対角度 \$\theta\$ を絶対角度に変換したものである。また、\$[I]\$ は慣性マトリクス、\$[K]\$ は剛性マトリクス、\$\{h\}\$ 遠心力に対応するベクトルである。\$\{T\}\$ は関節トルクベクトルを表している。

4. 指標軌道の生成

4.1 コントロールポイントの設定 図5に示すように与えられた始点 \$(x_1, y_1)\$ と終点 \$(x_g, y_g)\$ の間に次式に示すいくつかのコントロールポイントを設計者が障害物の外部に設定する。

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{x}_2 & \dots & \hat{x}_k \\ \hat{y}_1 & \hat{y}_2 & \dots & \hat{y}_k \end{bmatrix} = [\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_k] \quad (7)$$

$$\hat{r}_i = \{\hat{x}_i, \hat{y}_i\}^T \quad (8)$$

ここに g は始点・終点を含む各コントロールポイントの数である。 $\hat{r}_i (i=1, 2, \dots, g)$ は各コントロールポイントの位置を示すベクトルである。デカルト空間にコントロールポイントを設定するため、設計者は自身の意図した軌道をイメージしながら軌道を表現する数少ないコントロールポイントを設定することができ、設計者の意志を設計に反映させやすい。

4.2 姿勢の最適化 設定した各コントロールポイントでの逆運動学解析を行う。冗長自由度を持つマニピュレータはその冗長性のためにエンドエフェクタの経路を定めても経路上の各点における逆運動学の解、つまり関節角度からなるマニピュレータの姿勢が一意に決まらない。よって設計者は無数にある可能な姿勢から最適な姿勢の一つを定める必要がある。

本研究ではマニピュレータの各リンクが障害物を回避するための幾何学的制約条件を設け、ロボットマニピュレータの操作性を表す尺度の一つとしてあげられる可操作度⁽¹⁴⁾を評価関数とし、数理計画法を用いて姿勢の最適化を行い、一つの解

$$\hat{\Theta} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{1,1} & \hat{\theta}_{1,2} & \hat{\theta}_{1,3} & \cdots & \hat{\theta}_{1,g} \\ \hat{\theta}_{1+m,1} & \hat{\theta}_{1+m,2} & \hat{\theta}_{1+m,3} & \cdots & \hat{\theta}_{1+m,g} \\ \hat{\theta}_{1+2m,1} & \hat{\theta}_{1+2m,2} & \hat{\theta}_{1+2m,3} & \cdots & \hat{\theta}_{1+2m,g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_{1+(n-1)m,1} & \hat{\theta}_{1+(n-1)m,2} & \hat{\theta}_{1+(n-1)m,3} & \cdots & \hat{\theta}_{1+(n-1)m,g} \end{bmatrix}$$

$$= [\hat{\theta}_1 \ \hat{\theta}_2 \ \cdots \ \hat{\theta}_i \ \cdots \ \hat{\theta}_g] \quad (9)$$

$$\hat{\theta}_i = \{\hat{\theta}_{1,i}, \hat{\theta}_{m+1,i}, \hat{\theta}_{2m+1,i}, \dots, \hat{\theta}_{(n-1)m+1,i}\}^T \quad (10)$$

を定める。ここに g は始点・終点を含む各コントロールポイントの数、 n はマニピュレータのリンクの数、 m は各リンクの分割数を示している。また、 $\hat{\theta}_i (i=1, 2, \dots, g)$ は各コントロールポイントにおける障害物回避のための最適姿勢つまり各リンクの関節角を表すベクトルである。最適化問題の具体的な定式化は

$$\text{Find } \hat{\theta}_i, \text{ which} \quad (11)$$

$$\text{maximize } w = \sqrt{\det(J(\hat{\theta}) \cdot J^T(\hat{\theta}))} \quad (12)$$

$$\text{subject to } r_i = f(\hat{\theta}_i) \text{ and} \quad (13)$$

$$|q_j - \beta_{jk}| > \frac{1}{2} \bar{\alpha}_{jk} \text{ or} \quad (14)$$

$$|q_j - \beta_{jk}| \geq 0 \quad (15)$$

となる。ここに $i=1, 2, \dots, g$ で g は始点・終点を含む各コントロールポイントの数、 $j=1, 2, \dots, n$ で n はロボットマニピュレータの自由度、 k は障害物の番号である。

また、関数 f は関節変数ベクトルとエンドエフェクタの位置ベクトルとの幾何学的関係を表す関数であり、式(14)と式(15)は第2章で示した障害物回避のための幾何学的制約条件である。この姿勢の最適化を行うことで、障害物が回避できる姿勢の中で最も操作性のよいマニピュレータの姿勢を得ることができる。最適化の具体的な手法としては傾斜投影法 (Gradient projection method, G.P.M)⁽¹⁵⁾を用いる。

この際、外力および慣性力によって生じる弾性変位は、各関節のトルクまたは各加速度が未知のため、あらかじめ解析的に求めることは困難である。そのため、本研究では各リンクを仮想的に剛体リンク、すなわち弾性変位が0と仮定して逆運動学解析を行う。

4.3 指標軌道の生成 始点と終点含む各コントロールポイントにおける可操作度を最大とする最適な姿勢、つまり式(9)、(10)のような離散的関節角度が得られた後は、位数4のB-スプライン関数を用いて得られた離散的関節角度を近似し、時間に対して2階の導関数まで連続になる指標軌道

$$\bar{\theta} = \{\bar{\theta}_1(t), \bar{\theta}_{1+m}(t), \bar{\theta}_{1+2m}(t), \dots, \bar{\theta}_{1+(n-1)m}(t)\}^T \quad (16)$$

を求める。この際、生成される軌道の始点と終点において関節角速度と関節角加速度が0になる境界条件を満たすように式(9)の散散的関節角度の最初と最後に $\hat{\theta}_1$ と $\hat{\theta}_g$ を二つずつ加えた $g+4$ 列の新たな $\hat{\Theta}$ を用いる。また、 $\hat{\Theta}$ の最初と最後の列を除いた各列に作業時間を均等に割り当て $g+2$ 要素となる離散的時間ベクトル作成する。式(16)の $\bar{\theta}_i$ を位数4のB-スプライン近似をするための式は次のようになる⁽¹⁶⁾。

$$t(s) = t_k + \Delta t \cdot s \quad (17)$$

$$\bar{\theta}_i(s) = \hat{\theta}_{i,j-1} N_{j-1}(s) + \hat{\theta}_{i,j} N_j(s) + \hat{\theta}_{i,j+1} N_{j+1}(s) + \hat{\theta}_{i,j+2} N_{j+2}(s) \quad (18)$$

ここに、式(18)の添字 i はマニピュレータの各関節の番号、 j は $j=2, 3, \dots, g+2$ である。式(17)の t_k は離散的時間ベクトルの k 番目要素である。また $N_{j-1}(s), \dots, N_{j+2}(s)$ は位数4のB-スプライン関数の基底関数であり、次のようになる。

$$N_{j-1}(s) = \frac{1}{6}(1-s)$$

$$N_j(s) = \frac{1}{6}\{(1-s)^2(s+2) + (2-s)(1-s)(s+1) + (2-s)^2s\}$$

$$N_{j+1}(s) = \frac{1}{6}\{(1-s)(s+1)^2 + (2-s)s(s+1) + (3-s)s^2\}$$

$$N_{j+2}(s) = \frac{1}{6}s^3 \quad (19)$$

前述のように位数4のB-スプライン近似を用いているので、その2階の導関数まで連続になり、連続関

数としての角速度, 角加速度が容易に求まる. また, B-スプラインを用いることで軌道の制御のためのパラメータがコントロールポイントの位置のみとなるので, 後述する軌道最適化の際の設計変数を大幅削減することができる.

5. 軌道最適化

5.1 駆動トルク 指標軌道が決定され連続的な各リンクの関節角, 角速度, 角加速度が求まれば, 逆動力学解析を行い, ロボットマニピュレータの駆動のため各関節に加わるべき関節トルク

$$T = \{\tau_1(t) \quad \tau_{1+m}(t) \quad \tau_{1+2m}(t) \quad \cdots \quad \tau_{1+(n-1)m}(t)\}^T \quad (20)$$

を求めることができる. この逆動力学解析には対象とするフレキシブルマニピュレータの柔軟性だけを無視したモデル, つまりマニピュレータの自由度, 各リンクの外形と密度が同一である剛体マニピュレータモデルを用いる. ここで各リンクの一番目の要素だけがアクチュエータを持ち, 他の要素には外力としてのトルクは存在しないと近似的に仮定する. この剛体マニピュレータの仮定に伴って, 実際にはエンドエフェクターの空間経路における偏差が生じる.

5.2 試軌道の生成 求められた駆動トルクと第2章で説明したフレキシブルマニピュレータの運動方程式を用い, 順動力学解析を行い, フレキシブルマニピュレータの障害物回避のための試軌道

$$\theta = \{\theta_1(t) \quad \theta_2(t) \quad \theta_3(t) \quad \cdots \quad \theta_m(t)\}^T \quad (21)$$

を発生させる. この順動力学解析にはニューマークβ法を用いる. 求められた試軌道は後述する軌道最適化のための初期軌道となる.

5.3 障害物回避のための最適軌道の生成 求められた試軌道と指標軌道の間にはマニピュレータの柔軟性に起因するエンド・エフェクタの空間経路における偏差が生じ, その結果マニピュレータは目標とする終点にたどり着かなくなってしまう. その結果マニピュレータが障害物の領域に侵入してしまう可能性もある. また, マニピュレータが終点にたどり着くための空間経路は多数存在するので, 工学的に適切な評価基準を設け, その中から一つに定める必要がある. ここではマニピュレータの軌道の最適化を行い, 上記の問題を解決を試みる. 設計変数としては式(7)と式(8)のコントロールポイントの位置とし, 評価関数としては種々考えられるが, ここでは駆動トルクによる仕事と軌道の偏差 (発生軌道と指標軌道との偏差) の重み付きの線形和を用いる. すなわち, 軌道を指標軌道に追従させるとともに, その際の駆動エネルギーの最小化も

Fig. 6 Planar 3-links model of flexible manipulator

Fig. 7 Finite elements for a link

試みる. また制約条件は障害物回避のための幾何学的制約条件と各コントロールポイントの変動範囲とする. 最適化問題の具体的な定式化としては

$$\text{Find} \quad \hat{r}_i = \{\hat{x}_i \quad \hat{y}_i\}, \text{ which} \quad (22)$$

$$\text{minimize} \quad \Phi = \alpha \cdot \frac{E}{E_{init}} + (\alpha - 1) \cdot \frac{D}{D_{init}} \quad (23)$$

$$\text{subject to} \quad \gamma_{kj} < 2\pi \quad (24)$$

$$\sqrt{(x_i - x_{init,i})^2 + (y_i - y_{init,i})^2} \leq d_i \quad (25)$$

となる. 式(22)の $\hat{r}_i$ は式(8)で示した各コントロールポイントの位置ベクトルであり, 式(23)の E と D はトルクによる駆動エネルギー

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\int_{\theta_i(0)}^{\theta_i(t_q)} \tau_i(t) \cdot d\theta_i(t) \right) \quad (26)$$

と軌道偏差

$$D = \sum_{i=1}^p \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

を示している. また, 式(24)は2.2.5節で述べた空間内のある点に対する障害物回避のための制約条件である. 式(25)は各コントロールポイントに対する変動範囲を制約条件として加えたものである. 添字 i は関節の番号を, j は障害物の番号を, p は空間内に生成された軌道上の点の番号を, k はコントロールポイントの番号を, n はマニピュレータの自由度を表している. また, (x_i, y_i) は発生された試軌道におけるエンドエフェクタの空間経路上の i 番目の点であり, $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ は指標軌道におけるエンドエフェクタの空間経路上の i 番目の点である. 式(23)の E_{init} と D_{init} は各々初期軌道の駆動エネルギーと軌道の偏差を表している.

Fig. 8 Work spaces of manipulator

Fig. 9 Path of end-effector and posture of trial trajectory

Fig. 10 Joint angles of trial trajectory

Fig. 11 Pareto solutions

Fig. 12 Path of end-effector and posture of optimal trajectory at $\alpha=0.5$

Fig. 13 Joint angles of optimal trajectory

6. 計算例

6.1 解析モデル 図6に示すような平面3リンクフレキシブルロボットマニピュレータを対象として、障害物回避のための軌道最適化の計算例を以下に示す。フレキシブルロボットマニピュレータの各リンクの長さはマニピュレータの根元から手先に向かって一番目のリンクが0.50 [m]、二番目のリンクが0.30 [m]、三番目のリンクが0.20 [m]である。また、各リンクを長さ0.10 [m]の要素で分割し、一番目のリンクを5要素、二番目のリンクを3要素、三番目のリンクを2要素とする。以後、一番目のリンクを第1リンク、二番目、三番目のリンクを第2リンクおよび第3リンクと称する。図5.7には各要素の形状を示す。各リンクのヤング率は210 [GPa]、密度は $7.86 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ である。また各要素の幅は $50.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$ であり、厚さは $0.30 \times 10^{-3} [\text{m}]$ である。なお、本モデルではエンドエフェクターの質量は無視している。計算例では図8に示すような障害物の位置と始点・終点の位置が異なる2つの作業空間を用いる。図8の(a)を作業1 (JOB1)、図8の(b)を作業2 (JOB2)と以後称する、なお各作業の作業時間は3[s]と固定されている。以下に作業1と作業2に対する障害物回避のための軌道最適化の結果を詳しく述べる。

6.2 作業1 図9から図13までに、図8(a)の作業1の対する障害物回避のための最適軌道設計の例を示す。マニピュレータは始点 (0.20, 0.20) から終点

(0.70, 0.50)へと移動するものとする。本計算例では4つのコントロールポイント CP_1 , CP_2 , CP_3 , CP_4 を設定しており、その初期位置はそれぞれ $CP_1(0.35, 0.30)$, $CP_2(0.40, 0.50)$, $CP_3(0.50, 0.60)$, $CP_4(0.60, 0.55)$ である。

6.2.1 作業1の試軌道 図9に作業1の試軌道の空間経路と各リンクの姿勢を示す。灰色の領域は障害物が占有している空間を示す。マニピュレータは始点(start)から出発して終点(goal)に向かう。始点と終点を結ぶ破線は指標軌道を表しており、実線は試軌道を表している。試軌道と指標軌道には偏差が生じ、終点近傍では試軌道は障害物の領域に侵入してしまっていることがわかる。

図10には作業1の試軌道の各関節角度の時間による変化を示す。実線が第1リンクを、一点斜線が第2リンクを、破線が第3リンクを表している。また薄い色が指標軌道を濃い色が試軌道を示している。この図からも試軌道と指標軌道の偏差が存在することが確認できる。この試軌道における偏差の値は式(27)から $42.1 [\text{m}]$ である。また式(23)から計算される駆動エネルギーは $34.8 \times 10^{-3} [\text{J}]$ である。このような偏差はフレキシブルマニピュレータの柔軟性によるものと考えられ、次に示す最適軌道では本研究で提示する軌道最適化手法を用いることで、このような偏差を大きく改善できることを示す。

6.2.2 作業1の最適軌道 図11には軌道最適化のための評価関数である式(23)の重み α を0.0から1.0まで0.1ずつ変化させながら得られた最適解の曲線を示す。この図から重み α が0.4, 0.5, 0.6のとき駆動エネルギーと軌道の偏差の両方が比較的に小さくなるよい解が得られていることがわかる。その他の α の値では α

Fig. 14 Path of end-effector and posture of trial trajectory

Fig. 15 Joint angles of trial trajectory

Fig. 17 Path of end-effector and posture of optimal trajectory at $\alpha=0.8$ Fig. 18 Joint angles of optimal trajectory at $\alpha=0.8$

Fig. 16 Pareto solutions

が0.0あるいは1.0に近づくにつれ、駆動エネルギーと軌道の偏差が同時に大きくなる。また、重み α が0.4, 0.5, 0.6の場合には駆動エネルギーと軌道の偏差が互いのトレードオフの関係にあり、図11に斜線を施したこの区間の比較的滑らかな曲線はパレート解⁽¹⁷⁾の曲線を形成していると考えられる。

図12には図11の $\alpha=0.5$ の場合の最適軌道の空間経路と各リンクの姿勢を示す。図9と同じく、始点と終点を結ぶ破線は指標軌道を表しており、実線は最適軌道を表している。図5.9の試軌道のものとは比べ、提示する軌道最適化手法を用い得られた最適軌道は指標軌道との偏差がほとんどなく、軌道のずれによる障害物との衝突もないことがわかる。この最適軌道の軌道の偏差と駆動エネルギーの値は各々2.30[m]と 24.3×10^{-3} [J]である。

図13には図11の $\alpha=0.5$ の場合の最適軌道の各関節角度の時間による変化を示す。図10と同様、実線が第1リンクを、一点斜線が第2リンクを、破線が第3リンクを表している。また薄い色が指標軌道を、濃い色が最適軌道を示している。この図からも最適軌道における指標軌道への追随性が大幅に改善でき、ほぼ指標軌道と重なっていることがわかる。

6.3 作業2 図14から図18には図8(b)の作業2に対する計算例を示す。マニピュレータは始点(0.20, 0.70)から終点(0.70, 0.30)へと移動するものとする。作業2において設定したコントロールポイントの初期位置は $CP_1(0.15, 0.55)$, $CP_2(0.25, 0.40)$, $CP_3(0.40, 0.35)$,

Table 1 Results of collision-free trajectory optimization for JOB 1

	Trial Trajectory	Optimal trajectory ($\alpha=0.5$)
Position of control points	start point(0.20, 0.20) cp1(0.35, 0.30) cp2(0.40, 0.50) cp3(0.50, 0.60) cp4(0.60, 0.55) goal point(0.70, 0.50)	start point(0.20, 0.20) cp1(0.27, 0.32) cp2(0.38, 0.51) cp3(0.49, 0.58) cp4(0.62, 0.53) goal point(0.70, 0.50)
Trajectory deviation m	42.2	2.30
Driving energy $\times 10^{-3} J$	44.7	24.3

Table 2 Results of collision-free trajectory optimization for JOB 2

	Trial Trajectory	Optimal trajectory ($\alpha=0.8$)
Position of control points	start point(0.20, 0.70) cp1(0.15, 0.55) cp2(0.25, 0.40) cp3(0.40, 0.35) cp4(0.55, 0.3) goal point(0.70, 0.30)	start point(0.20, 0.70) cp1(0.23, 0.54) cp2(0.25, 0.40) cp3(0.39, 0.35) cp4(0.56, 0.29) goal point(0.70, 0.30)
Trajectory deviation m	10.7	0.67
Driving energy $\times 10^{-3} J$	27.0	21.1

$CP_4(0.55, 0.30)$ である。

6.3.1 作業2の試軌道 図14に作業2の場合の試軌道の空間経路と各リンクの姿勢を示す。マニピュレータは始点(start)から出発して終点(goal)に向かう。始点と終点を結ぶ破線は指標軌道を表しており、実線は試軌道を表している。作業1と比べその程度は小さく、試軌道と言えども障害物領域への侵入はないものの、やはり指標軌道とは偏差が存在していることがわかる。

図15には作業2の試軌道の各関節角度の時間による変化を示す。実線が第1リンクを、一点斜線が第2リンクを、破線が第3リンクを表している。また薄い色が指標軌道を、濃い色が試軌道を示している。この図からも試軌道と指標軌道の偏差を確認できる。作業2における試軌道の軌道の偏差の値は10.7[m]であり、駆動エネルギーは 27.0×10^{-3} [J]である。

6.3.2 作業2の最適軌道 図5.16には軌道最適化のための評価関数である式(23)の重み α を0.0から1.0まで0.1ずつ変化させながら得られた最適解の曲線を示

す. この図から重み α が 0.5 から 0.9 の間は駆動エネルギーと軌道の偏差の両方相対的に小さくなるよい解が得られており, この時の駆動エネルギーと軌道の偏差が互いにトレードオフの関係を有することがわかる. つまり図 11 に斜線を施したこの区間の曲線はパレート解の曲線を形成しているものと考えられる.

図 17 には最適解の一例として図 16 で示したパレート解を形成している部分から $\alpha=0.8$ の場合の最適軌道の空間経路と各リンクの姿勢を示す. 始点と終点を結び破線は指標軌道を表しており, 実線は最適軌道を表している. 図 14 の試軌道のものとは比べ, 提示する軌道最適化手法を用い得られた最適軌道は指標軌道との偏差がほぼ 0 であり, 指標軌道とほとんど一致していることが確認できる. この最適軌道の軌道の偏差と駆動エネルギーの値は各々 $0.67[m]$ と $21.1 \times 10^{-3}[J]$ である.

図 18 には上記の最適軌道の各関節角度の時間による変化を示す. 実線が第 1 リンクを, 一点斜線が第 2 リンクを, 破線が第 3 リンクを表している. また薄い色が指標軌道を濃い色が最適軌道を示している. この図からも最適軌道においては指標軌道への追随性が大幅に改善され, 各リンクの角度の時間による変化が指標軌道のそれとほぼ一致していることがわかる.

以上結果例より, 本研究で提示した軌道最適化手法がフレキシブルマニピュレータの障害物回避軌道設計に有効に利用できることが確認されたと言えよう. 表 1 と表 2 に作業 1 と作業 2 における軌道最適化の結果をまとめる.

7. 結言

冗長性をもつフレキシブルマニピュレータを対象とし, B-スプライン関数による軌道と障害物の外形の近似と駆動エネルギー, 軌道追随性, 操作性等を示す評価関数ならび障害物回避のための制約条件を用い, 障害物回避のために最適軌道設計法を提示した. 提示した設計法を基に求めたいいくつかの計算例より, その有効性が示され, さらに以下のことがわかった.

- (1) 提示した最適軌道設計手法を用いたいくつかの計算例より, 従来まで全く扱われていないフレキシブルロボットマニピュレータの障害物回避のための最適軌道設計ができることがわかった.
- (2) 目標とする指標軌道への軌道追随性向上のための評価関数と駆動トルクによる駆動エネルギー削減のための評価関数を設定することにより, 得られた最適軌道は障害物回避はもちろん駆動エネルギーも初期軌道より大幅削減でき, また偏差も小さく, 目標とする終点にも確実に到達できることがわかった.
- (3) 設定した駆動エネルギーと軌道の偏差の 2 つの評価関数に付した重みを変化させ得られた最適解の曲線か

ら, ある重みの変動範囲では駆動エネルギーと軌道の偏差がトレードオフの関係を示し, その範囲に対応する最適解の曲線はパレート解であることがわかり, 設計者はこのパレート解の中から軌道を選ぶことが適切であると考えられる.

参考文献

- (1) 吉川・村上・細田, "2本のフレキシブルリンクを有する3自由度マニピュレータのモデリングと制御", 日本ロボット学会, 9-1 (1991) 1-10
- (2) 荒川・福田, "フレキシブルロボットアームの制御(第4報, 3自由度系に関する制御実験)", 日本機械学会論文集中編, 75-539 (1991) 2313-2320
- (2) 北村・岩渕・野波・西村・小林, "弾性アームの周波数成形型スライディングモード位置決め制御", 日本機械学会論文集中編, 63-606 (1997) 431-437
- (4) T. Hasegawa, H. Terasaki, "Collision Avoidance: Divide-and Conquer Approach by Space Characterization and Intermediate Goals", IEEE Trans Systems. Man. Cybernetics, Vol. SMC-18-3 (1988) 337-347
- (5) 斎藤, "極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画", 日本ロボット学会誌, 11-5 (1993) 702-709
- (6) 馬場・久保田, "遺伝的アルゴリズムを用いたロボットマニピュレータの軌道生成および障害物回避", 日本ロボット学会誌, 11-2 (1993) 299-302
- (7) 尾崎・林・麻生, "Bスプライン制御点最適化によるマニピュレータ障害物回避軌道の生成", 日本機械学会論文集中編, 61-586 (1995) 2495-2500
- (8) 山本・毛利, "大域的探索とこう配法によるマニピュレータの障害物回避準最短時間軌道計画", 日本機械学会論文集中編, 62-597 (1996) 1872-1879
- (9) 李・山川, "剛体マニピュレータの障害物回避のための最小エネルギー軌道設計に関する研究", 日本機械学会論文集中編, 63-610 (1997) 210
- (10) Lee and Yamakawa, "Study on Optimal Collision Free Trajectory Planning of Rigid Manipulators under Consideration of Driving Energy and Work Hours", Proc. of the 2nd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (1997) 369
- (11) Lee and Yamakawa, "Simultaneous Trajectory and Shape Optimization of Flexible Manipulators", Proc. of 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, (1998), p. 1475
- (12) 李・山川, "フレキシブルマニピュレータの軌道と形状の同時最適化", 日本機械学会論文集中編, 65-638 (1999), p. 4084
- (13) 山口, "コンピュータグラフィックス", 日刊工業新聞社 (1979)
- (14) T. Yosikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", Int. J. of Robotic Research, 14-2 (1985) 3-9
- (15) 山川, "最適化デザイン", 培風館 (1993)
- (16) 尾崎・秀田・山本・毛利, "空間経路が指定されるマニピュレータの動作時間短縮", 計測自動制御学会論文集中編, 22-10 (1987) 1074-1079
- (17) 中山・谷野, "多目的計画法の理論と応用", 計測自動制御学会 (1994)