415　エラスティックネット法によるロボットの経路計画

北海道文理科短大　○高取則彦，　北大工　嘉数侑昇

要　旨

冗長自由度をもつ多関節型ロボットアームの経路計画問題を扱う．すなわち，始点，終点と途中の通過点を与え，これらを結ぶエンドエフェクタの最短経路を決定し，さらにその経路上の各点の位置・姿勢を実現するロボットの各関節変数を求める．この問題に対して，エラスティックネットによる解法を提案する．方法の概略と実験結果を報告する．

1．緒言

本報では，ロボットの作業計画の一つである経路計画問題を扱う．与えられた始点から終点までの途中の経路をエラスティックネットを利用して計算する方法を提案する．ここでは，特に冗長型のロボットアームを対象とし，その方法の概略と計算機実験の結果を報告する．

2．問題の記述

ロボットの経路計画問題とは，始点，終点を与えてロボットの移動経路を決定する問題である．このとき，ロボットの機構のなどの制約条件を考慮して，障害物との衝突回避や移動時間の最小化などが目標とされることが多い．

また，ロボットに何らかの作業を行わせる場合，目標点までの経路と，ロボットアーム先端に取付けられたエンドエフェクタの位置・姿勢とを決める必要がある．普通，エンドエフェクタの位置・姿勢が初めに与えられ，これらからロボットの各関節の変数の値を求める．これは一般に逆問題と呼ばれ，難しい問題の一つである．特に，冗長自由度を持つロボットアームにおいて，これを解くのは極めて困難である．

これらを背景に，ここでは次のような問題を扱うことにする．すなわち，

“始点，終点と途中の通過すべき点を与え，これらを結ぶエンドエフェクタの最短経路を決定する．さらに，その経路上の各点の位置・姿勢を実現するロボットの各関節変数を求める．”

3．エラスティックネット法

エラスティックネット法は，Durbinらにより巡回セールスマン問題（ＴＳＰ）の一解法として提案された[1]．そこでは，

X_i：都市 i の位置ベクトル（$i=1,\ \cdots,\ I$），
Y_j：ネット上の点 j （以下ネット点と呼ぶ）の位置ベクトル（$j=1,\ \cdots,\ J;\ J>I$）

として次のようなエネルギー関数を導入している．

$$E=-\alpha K\sum_i \log\sum_j \exp\left(-\left|X_i-Y_j\right|^2/2K^2\right)+\beta\sum_j\left|Y_j-Y_{j+1}\right|^2 \quad \cdots(1)$$

ここで，Kはパラメータ，α，βは定数である．このエネルギー関数の最小値を与えるネット点の状態がＴＳＰの解である．このような状態を求めるため，適当な初期状態から出発して，次式によりネット点の移動量を繰り返し計算し，ネットを変形していく．

$$\Delta Y_j=-K\frac{\partial E}{\partial Y_j}=\alpha\sum_i w_{ij}\left(X_i-Y_j\right)+\beta K\left(Y_{j+1}+Y_{j-1}-2Y_j\right) \quad \cdots(2)$$

ただし，

$$w_{ij}=\frac{\exp\left(-\left|X_i-Y_j\right|^2/2K^2\right)}{\sum_k \exp\left(-\left|X_i-Y_k\right|^2/2K^2\right)} \quad \cdots(3)$$

エラスティックネットによる経路決定の様子を図１に示す．条件は，都市数 $I=30$，ネット点数 $J=75$，$\alpha=0.2$，$\beta=2.0$，$K=0.1$である．

4．定式化

ロボットの経路決定問題では，ＴＳＰ問題での都市を，始点，終点そして通過点と考えることができる．

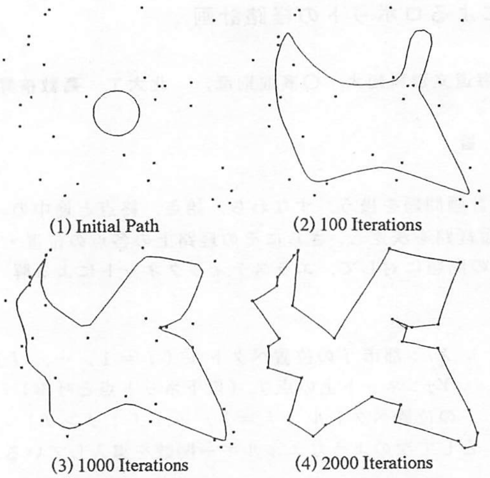

Fig.1 TSP Path Generation by the Elastic Net Method

この問題で特徴的なことは，ネット点 Y_jがロボットの関節角 θ_jの関数であるということである．ロボットの自由度をN，関節 n($n=1,2,\cdots,N$) の変数をθ_{jn}とすれば，次のようになる．

$$Y_j = Y_j(\theta_{j1},\theta_{j2},\cdots,\theta_{jN}) \qquad \cdots(4)$$

したがって，ＴＳＰの場合の$\partial E / \partial Y_j$の代わりに，$\partial E / \partial \theta_j$を計算すればよい．

さて，ロボットのリンク座標系間の関係は，よく知られているように，次のようなマトリクスで表される（図２）[2]．

$$[A_i] = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\phi_i & \sin\theta_i\sin\phi_i & a\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\phi_i & -\cos\theta_i\sin\phi_i & a\sin\theta_i \\ 0 & \sin\phi_i & \cos\phi_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \cdots(5)$$

エンドエフェクタの位置・姿勢 $[T]$ は，

$$[T] = [A_1][A_2]\cdots[A_N] \qquad \cdots(6)$$

となるから，Y_jは式(6)により計算される．

５．実験

以上を検証するため，SPARC station1上でシミュレーションを行った．エネルギー関数 Eの最適化手法として，準ニュートン法[3]を用いた．今回のモデルは，２次元４自由度で関節はすべて回転型とした．図３は実験結果である．通過点の数(始点，終点を含む) $I=10$，ネット点数 $J=30$，α

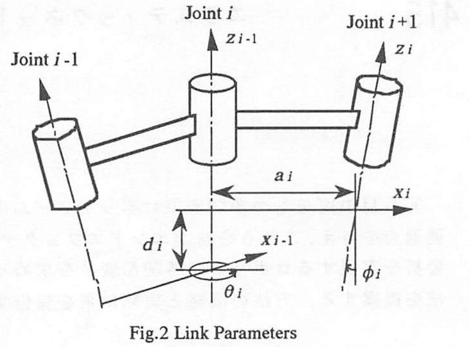

Fig.2 Link Parameters

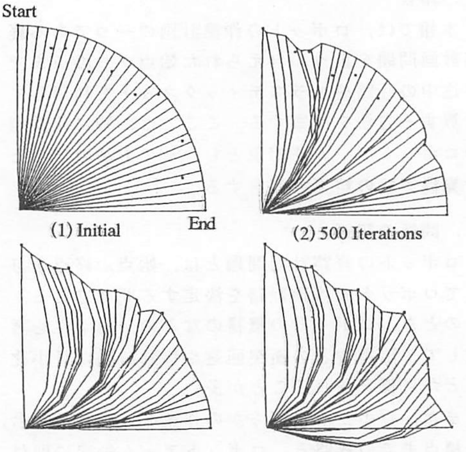

Fig.3 Simulation Results of Robot Trajectory Generation by the Elastic Net Method

$=0.5$，$\beta=0.5$，$K=0.1$である．エンドエフェクタの経路が形成されていく様子と，ネット上の各点に対応するアームの構成がわかる．

６．結言

エラスティックネット法を用いた，ロボットの経路計画法を提案し，計算機実験を通して方法の可能性を確認した．今後の課題として，障害物の回避が挙げられよう．

参考文献

1)Durbin,R.and Willshaw D., An Anologue Approach to the Travelling Salesman Problem Using an Elastic Net Method, NATURE 326 (1987),689.

2)Paul,R.P., Robot Manipulators:Mathematics, Programming, and Control, MIT Press (1981).

3)大野，磯田 監修，新版 数値計算ハンドブック，オーム社，(1990)，797.