

障害物環境下におけるマニピュレータ制御

浅井 博次

Manipulator Control in the Presence of Obstacles

Hirotsugu Asai

あらまし 労働力不足や高齢化社会への解決策として期待されているロボットの実用化には、すべての人が簡単にロボットを操作できるシステムが重要である。自律制御と遠隔操作（操作者の指示）の併用により、簡易で柔軟なロボット操作を実現することが、早期実用化への解答であると思われる。そこで、本報告では、ロボットが自律的に行動するための基本行動群を充実させることを目標に、障害物環境下におけるマニピュレータの実時間経路生成手法について検討した。

キーワード 冗長マニピュレータ制御，経路生成

1. はじめに

近年のロボット技術の進展は著しく、従来の工業用ロボットに加え、既にペットロボット、案内ロボット、警備ロボットなどの民生用ロボットが多数市販されている。また、ロボットを扱った展示会では広い世代から多くの来場者を集めており、一般の人々にとってロボットが急速に身近な物へと変わりつつある。このような中、低出生率による労働者不足や高齢化社会への対応策の一つとして、日常生活の中にロボットが当然のように存在し、さまざまな役割を果たすようになるのではないかと期待されている。

日常生活の中にロボットが一般に受け入れられるためには、誰もが簡単にロボットを操作できることが重要である。従来行われてきた遠隔操作では、ロボットのすべての動作を指示する必要があるため非常に煩雑であり、複雑な操作や正確な操作が要求される場合には熟練が要求されるなど、容易にできるものではなかった。これに対し、ロボットに自律性を持たせることによって、ロボットの操作性を向上させようという試みが近年盛んに行われている。先述の案内ロボットなどもその例であり、環境とタスクを限定することで実環境での自律行動を実現している。しかしながら、常に変化する環境を正確に認識し、環境に対応しつつ目的を達成するための行動計画を実時間で自律生成することは非常に困難であるため、様々なタスクを自律制御のみで実行できるようになるにはまだまだ多くの時間が必要である。現状では、自律制御と遠隔操作（操作者の指示）の併用が最適と思われる。つまり、基本的には操作者の指示でロボットを操作し、自律制御が可能な部分はロボットが自律的に行動するシステムである。これにより、安易なロボット操作の

実現とロボットの操作性向上を図ることができると考える。そこで本報告では、ロボットが自律的に行動するための基本行動群を充実させることを目標に、ロボットにおいて最も重要な機能の1つであるマニピュレータを取り上げ、その基本行動である障害物環境下においてマニピュレータのエンドエフェクタを目標位置へ移動させる動作の自律制御について検討する。

マニピュレータの障害物回避問題については様々な研究がなされているが、オフライン型軌道計画とオンライン型軌道計画に大別できる。オフライン型軌道計画とは、障害物の情報が既知であるとして事前に目標位置までの軌道計画を行う手法で、軌道全体を評価して計画を生成できる利点がある。主に、マニピュレータの位置・姿勢を点で表現できる状態コンフィギュレーション空間を用いる方法が採用されているが、マニピュレータの自由度が増すとコンフィギュレーション空間の生成時間が指数関数的に増加するという問題点がある。この問題に対し、関節軌道をBスプライン曲線で記述しコンプレックス法により最適化する手法^[1]などいくつかの方法が提案され、現実的な計算時間を実現している。

一方、オンライン型軌道計画では、実時間での軌道生成に重きが置かれている。主に人工ポテンシャル法が用いられているが、大局的な軌道計画ができないため、デッドロックに陥ってしまう場合がある。実時間でのマニピュレータ障害物回避計画に対しては、兼子らがリンクの障害物への接近速度とエンドエフェクタ速度の関係を示す干渉ヤコビ行列を用いた手法^[2]を提案しているが、冗長マニピュレータの場合、実時間性を確保するのが困難である。また、視覚サーボを用いた手法^[3,4]も検討が進んでいる。

本報告では、冗長自由度を有するマニピュレータの障

害物回避軌道計画を実時間で実現できる手法として、大まかな認識や状況判断で制御計画が可能なファジィ推論と学習オートマトンを用いた手法^[5]の適用を検討する。

2. 適用手法

2. 1 概説

マニピュレータは冗長自由度を持ち、障害物情報（位置・サイズ）は既知であるとする。対象とするタスクは、マニピュレータのエンドエフェクタを指定された目標位置へ障害物を回避しながら安全に移動させることである。

図1に本報告で使用する制御システムを示す。

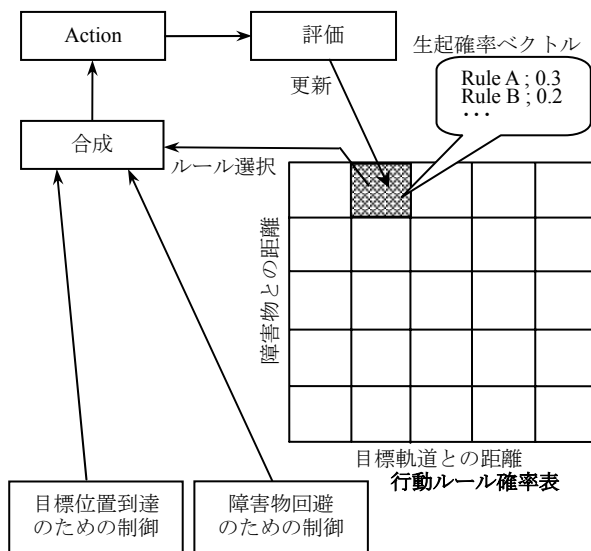


図1 制御量決定システム

本システムは、以下の5つのステップに分けることができる。

1. 制御入力算出

まず、目標位置に到達するための制御入力と障害物回避のための制御入力を独立に算出する。

2. 制御入力の合成

行動ルール確率表を元に既定の合成ルールから適用するルールを選択し、そのルールに従い最終的な制御入力を決定する。

3. 制御の実行(action)

4. 実行結果の評価

5. 行動ルール確率表の更新

実施した制御の評価に基づいて行動ルール確率表を更新する。

2. 2 目標軌道設定

本システムは基本的に局所情報に基づく手法を採用しているため、そのままでは大局的な軌道生成ができずデッドロックに陥ってしまう可能性がある。そこで、現在位置から目標位置までを補間する目標位置列を使用することでデッドロックを回避している。

初期の目標軌道はエンドエフェクタの始点と終点を結

んだ直線とする。目標軌道が障害物と交差する場合は、目標軌道と水平でない平面に投影した障害物と重ならない位置に仮想目標点を追加する。この操作を繰り返すことで、始点から終点まで障害物と交わらない目標軌道を折れ線で生成することができる。この他に、視覚サーボ系のシステムで細田らが提案しているエビポーラ拘束を用いた手法^[3]も使用することができる。エンドエフェクタが目標軌道から閾値以上離れた場合は、目標軌道を再生成する。

2. 3 タスク毎の制御入力決定

制御入力はタスク毎に独立に算出される。本システムでは、目標位置到達タスクと障害物回避タスクの2つのタスクを使用し、障害物を回避しながら目標位置に到達するタスクを実現する。

制御入力の決定にあたり、マニピュレータのエンドエフェクタ及び各ジョイントの移動速度を考慮する必要がある。回転動作の場合、移動速度が回転半径に大きく依存してしまうからだ。そこで、1ステップでの角度変更量の上限 θ_{max} を設定しておく。そうすることで、障害物との干渉評価も容易になる。また、細かいステップで制御入力を決定することで、より自然なマニピュレータ形状の生成が期待できる。

目標位置到達タスクについては、発見的手法の1つであるCCD法(Cyclic-Coordinate Descent method)を適用する。一方、障害物回避タスクについては、 $\pm \theta_{max}$ の範囲での反復評価（反復回数 $< n$ ）により障害物とリンクとの最短距離 D がより大きくなる θ を制御入力として導出する。障害物回避タスクは、 D が閾値以下の場合のみ考慮するものとする。

2. 4 合成ルールと行動ルール確率表

独立に算出された制御入力を合成する方法を決定するのが行動ルール確率表である。行動ルール確率表はマニピュレータを取り巻く状況を目標軌道・エンドエフェクタ間距離とマニピュレータ・障害物距離を用いて分割し、分割した状況毎に既定の合成ルールの中からどのルールを採用するかを決定する生起確率ベクトルを定義する。本システムでは図2に示す5つの合成ルールを使用した。

ルールNo.	ゴール到達	障害物回避
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%

図2 合成ルール

独立に算出された制御入力是对応する状況の生起確率ベクトルに基づいてルーレット方式で選択される合成ルールに従って合成される。生起確率ベクトルは実行された行動の評価に応じて更新され、環境に適應するための知識が獲得される。

2. 5 学習アルゴリズム

本項では、行動ルール確率表の生起確率ベクトルの学習アルゴリズムについて解説する。

生起確率ベクトルは当初、等しい確率に設定される。その後、選択されたActionの評価に基づいた学習により、環境に適用した行動選択能力を獲得する。ここでは、選択されたActionに対する二値評価 $b(n)$ { favorable(1), unfavorable(0) } に基づいた更新則を採用している。

If $b(n)=1$ and $a_{(n)} = a_i$

$$p_{i(n+1)} = p_{i(n)} + c(1 - p_{i(n)})$$

$$p_{j(n+1)} = (1 - c)p_{j(n)} \quad \text{for } j \neq i$$

If $b(n)=0$

$$p_{i(n+1)} = p_{i(n)} \quad \text{for all } i$$

ここで、 $a_{(n)}$ は時刻 n での行動、 $p_{i(n)}$ は時刻 n において i 番目の行動を選択する確率、 $c(0 < c < 1)$ は、学習係数である。

2. 6 行動評価

実行した行動を評価するためのファジィ行動評価器を図3に示す。静的な障害物との干渉の危険性を示す要素として障害物との距離、動的な危険性を示す要素として障害物との距離の変化を使用した。(a),(b)の評価値の大きい方を行動評価値として採用する。前項で挙げた学習アルゴリズムには、閾値を設けることで適用する。

		Change of Distance to Goal		
		Negative	Zero	positive
Distance from obstacles	Big	Positive Big	Negative Midium	Negative Small
	Medium	Positive Medium	Zero	Negative Miduim
	Small	Positive Small	Positive Midium	Negative Big

(a)

		Change of Distance to Goal		
		Negative	Zero	positive
Change of Distance from obstacles	Positive	Positive Big	Negative Midium	Negative Small
	Zero	Positive Medium	Zero	Negative Miduim
	Negative	Positive Small	Positive Midium	Negative Big

(b)

図3 行動評価ファジィルール

3. おわりに

障害物環境下において冗長自由度を持つマニピュレータのエンドエフェクタを任意の位置へ移動させるための実時間軌道生成手法についてファジィ推論と学習オートマトンを用いた手法の適用を検討した。本手法では状況を大まかに分類し、分類した状況毎にどのように行動すべきかを学習するため、教示環境への依存度が低く、一般的な行動規範を学習により獲得できる可能性が高い。

今後、様々なタスクへの適用を検討し、自律行動が可能な基本行動群の充実に繋げていきたい。また、本報告で検討したマニピュレータ制御については評価検討を進めるとともに、より柔軟な実環境への適用を検討する必要がある。例えば、本報告では障害物情報を既知としているが、実環境に適用するためには、センシングされた不確実な情報をもとに行動を計画する必要がある。環境センシング技術を取り入れることを検討していきたい。

文 献

- [1] 尾崎弘明, 林長軍, “コンプレックス法による動力学を考慮したマニピュレータの障害物回避軌道生成”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp139-144, 1997.
- [2] 兼子一, 新井健生, 井上健司, 前泰志, “干渉ヤコビ行列を用いたロボットアームの実時間障害物回避”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4, pp555-560, 2000.
- [3] 細田耕, 阪本健二, 浅田稔, “三次元再構成を行わない視覚サーボ系のための障害物回避軌道の生成”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp290-295, 1997.
- [4] 三河正彦, 吉田耕一, 丹野瑞紀, 松本三千人, “障害物回避のための視覚に基づくマニピュレータ冗長制御と画像特徴推定”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp534-539, 1999.
- [5] 青木猛, 岡利明, 鈴木達也, 大熊繁, 早川総一郎, “多段階学習による障害物回避のための行動獲得”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4, pp648-656, 1996.