

フレキシブルロボットマニピュレータの軌道、形状および制御系の

同時最適化に関する研究

Simultaneous Optimization of Trajectory, Shape and Control System of Flexible Manipulator

山川 宏*

Hiroshi YAMAKAWA

*工博 早稲田大学 理工学部 機械工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

To reduce the payloads, the flexible manipulators are often used in space structures. The flexible manipulators may behave large deformations and it is necessary to consider their geometric non-linearity when to analyze. However, little studies have been done to consider the non-linearity because of the complexity in computation. The author studied on simultaneous optimization of trajectory, shape and controllers for flexible manipulators to consider their non-linearity. Here I will propose a new method for those problems and confirm the effectiveness from the numerical results.

Key Words: Simultaneous Optimization,
Nonlinear Dynamics,

Flexible Manipulator
Structural Control

1. はじめに

各種の生産ラインにおいて、ロボットマニピュレータが用いられ、現在の高度な生産自動化の重要な技術となっている。生産ラインでは使用エネルギーの低減が重要な要素の一つであり、また、宇宙空間において使用するロボットマニピュレータは、打ち上げ時の運搬重量の低減から、ロボットマニピュレータの重量の低減が求められている。運搬および運動などの際に必要なエネルギーを削減するために軽量化がなされた低剛性なロボットマニピュレータはたわみ易く、フレキシブルマニピュレータと呼ばれている。フレキシブルマニピュレータは内部減衰が低いため、わずかな外乱にも振動の励起や軌道追従の低下等が生じる。従来までは軌道、形状、制御系の設計はそれぞれ別々に扱われていたが、それらを同時最適化することによりシステム全体としてよりよいシステムが得られることが期待できる。著者らは以前から、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に関する一連の研究を進めてきており、いくつかの成果を上げた。そこで本研究では、軌道、形状に加え制御系をも対象とし、かつ幾何学的大変形も考慮したフレキシブルマニピュレータの軌道と形状と制御系の同時最適化手法を提示する。また、目標点の変動した場合に既に得られた最適解のロバスト性についての検討も行う。

2. 幾何学的非線形を考慮した設計法

ここでは、低剛性で変形において生じる非線形性を考慮したロボットマニピュレータのモデル化を行い、そのロボットマニピュレータを制御する制御系の設計を示す。さらに、軌道、形状と制御系の同時最適化問題の定式化を行う。

2.1 ロボットマニピュレータのモデル化

線形はり理論によるモデル化では、はりのたわみが

大きくなるにつれて、軸方向の変位が無視できなくなるために、本研究では、幾何学的非線形性を考慮することが可能な簡易なモデル化を行う。すなわち、ロボットマニピュレータは図1に示す剛体要素と大変形を可能とする回転バネによる有限要素にてモデル化を行う。

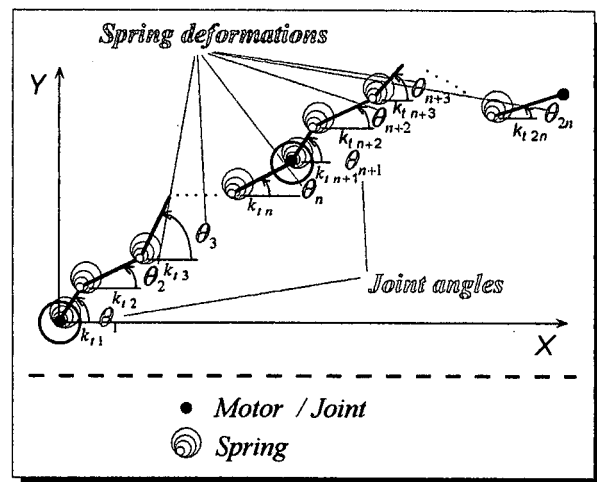


図1 剛体要素と回転バネによる近似モデル

このようにモデル化することにより、式(1)のように運動方程式が構成される。

$$[J]\ddot{\theta} + [K]\theta + \{h\} = \{\tau\} \quad (1)$$

ここにおいて、 θ はたわみ角ベクトルであり、 $[J]$ は慣性行列、 $[K]$ は剛性行列、 $\{h\}$ は遠心力ベクトル、 $\{\tau\}$ は関節モータによる与えられるトルクである。

2.2 制御系の設計

マニピュレータに関する多くの制御法が提案されており、ここでは、剛体モデルにおいて多く用いられている計算トルク法を用いて制御系の設計を行う。図2

に制御系のブロック線図を示す。

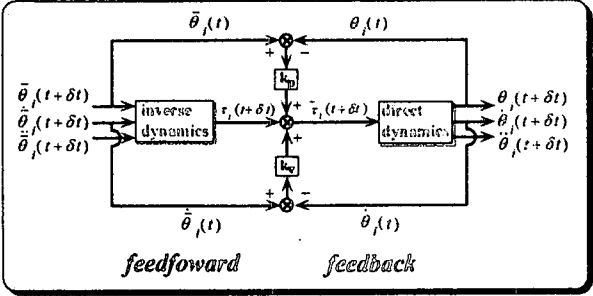


図2 計算トルク法のブロック線図

ここでは、フィードフォワード部とフィードバック部とから構成される。フィードフォワード部では、関節角 θ より、(1)式のパネ変形量を0とした剛体によるモデル化を行った場合の運動方程式を用いた逆動力学により、駆動トルク τ を算出し、フィードバック部では、駆動トルクより、関節角 θ を(1)式による順動力学により求め、両者の差を取ることで補正する。

フィードバック制御において使用するフィードバックゲインは可変であり、図3に示すとおり、いくつかの離散量より、Bスプライン関数を用いて近似する。

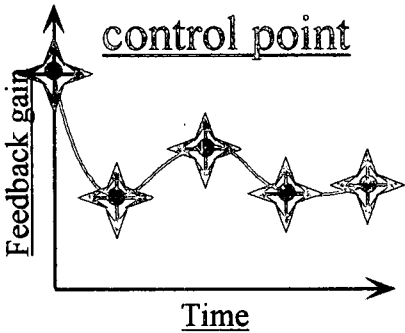


図3 フィードバックゲインのスプライン近似

2.3 軌道設計

ロボットマニピュレータの動作の開始点と終了点とその中間の点の位置座標をいくつか選定し、軌道のコントロールポイントと呼ぶ。その位置座標にマニピュレータの先端が位置するように関節角を離散的に定めたものを軌道とする。間接角は先に定めた離散的な間接角を制御点とし、角加速度までの連続性を保障するために、位数4のB-スプライン関数により近似する。

2.4 同時最適化問題の定式化

マニピュレータに関する形状、軌道および制御系の設計において定めるべき量を設計変数とした最適化問題を定式化する。具体的には、設計変数として軌道を表すBスプラインの制御点座標、フィードバックゲインの変化を表すBスプラインの制御点座標、マニピュレータの剛体部の形状（幅）を設計変数とする。目的関数は、駆動エネルギーと軌道偏差とし、これらの最小化を目的とする。マニピュレータの重量の上限および

先端位置の移動に関する制約を設け定式化される。二つの目的は線形加重にて単一化され、目標点の近隣の値をいくつか算出し平均化することによりロバスト性も考慮する。

3. 数値計算例

数値計算例にて用いた特性値を表1に示し、検討結果を図4、5および表2に示す。

表1 特性値

Young's modulus	2.10×10 ¹¹ [N/m ²]
Density	7.86×10 ³ [kg/m ³]
Length of each link	1st link 0.42[m]
	2nd link 0.36[m]
Cross section area	30.0×10 ⁻³ [m] × 1.00×10 ⁻³ [m]

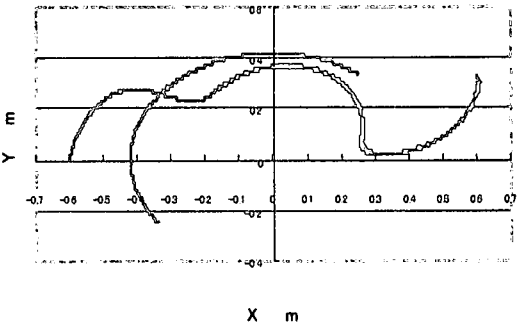


図4 最適軌道（初期軌道と最適軌道）

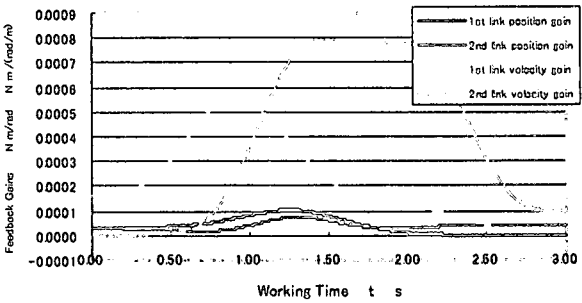


図5 最適フィードバックゲイン

表2 目的関数の推移

	Initial Value	Optimal Value			
		Value	reduction rate %	Value	reduction rate %
Energy E J	0.2845	0.2903	1.428	0.2882	2.139
Deviation D m	26.92	7.991	70.318	5.478	79.647
Torque T Nm	124.3	122.4	1.529	121.6	2.172
Value of Objective Function	1.000	0.6411	35.690	0.6911	40.690

4. おわりに

本研究では、Bスプライン関数を用いたマニピュレータの軌道、形状および制御系の同時最適化のための新しい方法を提示した。ロバスト性を考慮した定式化を行い、いくつかの数値計算により有効性を確認した。

参考文献

(1) 岩田他，機論，Vol. 57, No. 534, 1991, 221.
(2) 北村他，機論，Vol. 63, No. 606, 1997, 111.