

平成21年6月23日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760158

研究課題名（和文） 消費エネルギー最小化と残留振動抑制を目指したフレキシブル
マニピュレータの軌道計画研究課題名（英文） Trajectory Planning for Minimizing the Consumption Energy and
Suppressing the Residual Vibration of a Flexible Manipulator

研究代表者

阿部 晶（ABE AKIRA）

旭川工業高等専門学校・制御情報工学科・准教授

研究者番号：30313729

研究成果の概要：本研究では、最適化手法を適用し、フレキシブルマニピュレータの駆動エネルギー最小化と残留振動抑制を両立させる軌道計画法を提案した。数値シミュレーションから、駆動エネルギー最小化と残留振動抑制の間にトレードオフの関係があることを明らかにした。数値シミュレーションとモデル実験結果の比較から、提案された軌道計画法は残留振動と駆動エネルギーを同時に抑制する軌道を生成し、有効かつ実現性を有するものであることを確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	330,000	2,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：フレキシブルマニピュレータ、軌道計画、振動制御、残留振動、駆動エネルギー、最適化問題

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットの高速化、省エネルギー化を目的として、マニピュレータの軽量化が望まれている。一方、マニピュレータの軽量化に伴い、その剛性が低下して振動が生じ易くなる。このような背景のもと、フレキシブルマニピュレータの振動制御に関する基礎的研究が盛んに行われている。この振動制御法はフィードバック制御とフィードフォワード制御の二つに大別できる。フィードフォ

ワード制御は、フィードバック制御に対して振動を計測するセンサが不要となり、安価にシステムを構築して振動を抑制できる利点がある。これより、ワークの搬送等の同じ動作パターンを繰り返し行う産業用ロボットのマニピュレータにおいては、コストパフォーマンスに優れたフィードフォワード制御が望ましいといえる。

フレキシブルマニピュレータのフィードフォワード振動制御に関する研究として、入

力整形(Input Shaping)に基づく手法、関節角をフーリエ級数と多項式の組み合わせで表現して最適問題を解く手法や残留振動抑制を目的とした軌道計画法の提案がなされている。しかしながら、これらにおいて残留振動抑制を目的とした軌道計画に関する研究が報告されているが、駆動エネルギーを考慮したフレキシブルマニピュレータの軌道計画および制振駆動に関する研究はなされていない。近年、京都議定書の発効を契機にして地球温暖化防止対策の運動が展開されており、CO₂排出量の削減、すなわち省エネルギー化が多方面で求められている。これより、フレキシブルマニピュレータの研究においても、さらなる省エネルギー化を目指したアプローチが必要であると考えられる。

2. 研究の目的

フレキシブルマニピュレータは剛体マニピュレータに比べ軽量であることから、消費エネルギーを抑制できる利点を有している。しかしながら、消費エネルギー最小化を目的としたマニピュレータの軌道計画に関する研究は「剛体」に限られており、フレキシブルマニピュレータを扱ったものは国内のみならず国外でもなされていない。今日の産業用ロボット等で用いられるマニピュレータは、物体を Pick-and-Place する同じ動作パターンを繰り返し行うものが多く、この際の振動制御と省エネルギー化のための軌道計画法の確立は多くのニーズがある課題といえよう。そこで本研究では、フレキシブルマニピュレータの Pick-and-Place 作業における位置決め制御を考え、消費エネルギー最小化とともに残留振動抑制を目的とした最適軌道計画法を提案し、数値シミュレーションとモデル実験の両面を通じてその手法の確立を目指す。研究項目は以下の3点である。

(1) 有限変形理論(幾何学的非線形性)を適用してマニピュレータの運動方程式を導出し、フィードフォワード振動制御のための高精度なモデルを得る。

(2) (1)で得られた知見を基に、フレキシブルマニピュレータの振動をフィードバックすることなく残留振動が抑制され、かつ、消費エネルギーを最小にする軌道計画法の確立を目指す。

(3) モデル実験装置を開発して実験を行い、数値シミュレーション結果との比較検討から本研究の妥当性、有効性および実現性の検証を行う。

3. 研究の方法

(1)モデル実験装置の製作

理論解析ならびに数値シミュレーション結果の妥当性および有効性を検証するためには、実験装置から得られる結果と比較する

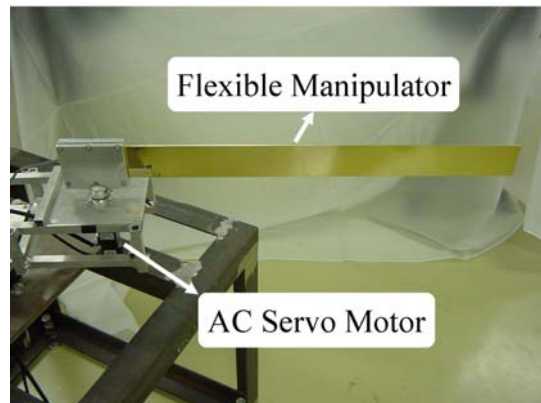


図1 モデル実験装置

必要がある。そこで、フレキシブルマニピュレータのモデル実験装置を製作した。製作した実験装置を図1に示す。モデル実験では、長さ 86[mm] のハブに長さ×幅×厚さ=514[mm]×50[mm]×1[mm]の真鍮製のはりを取り付け、これをフレキシブルマニピュレータとして用いた。旋回には減速比 1:25 の AC サーボモータを使用し、速度制御型のサーボパックを介して駆動した。サーボモータの駆動トルクの計測には、サーボパックのアナログモニタ機能を用いた。マニピュレータのたわみを計測するためにストレインゲージを用いることとし、マニピュレータ固定端から 4[cm]の位置に取り付けた。

(2) マニピュレータのモデリング

製作された実験装置を用いたパラメータ同定実験により、マニピュレータのモデリングを行った。

高精度なモデルを得るために、理論解析ではフレキシブルマニピュレータを大変形するはりと仮定し、有限変形理論(幾何学的非線形性)を考慮してモデル化した。はじめに、有限変形理論に基づき曲率非線形性と軸方向の変位等のポテンシャルエネルギーを評価し、マニピュレータのたわみを振動モードの固有関数を用いて近似して、オイラー・ラグランジュ法によりマニピュレータの運動方程式を導出した。フレキシブルマニピュレータは分布定数系であり、無限自由度系である。そこで、Point-To-Point (PTP)制御を想定した数値シミュレーションを実施して、各振動モードが応答に及ぼす影響を明らかにし、モデルの適切な低次元化を行った。

次いで、得られたマニピュレータの運動方程式のパラメータを、製作された実験装置による同定実験から求めた。マニピュレータのエンドエフェクタが、決められた動作時間で決められた始点と終点を運動しようとする PTP 制御実験を行い、関節角および変位の時系列データを計測した。得られた実験結果と数値シミュレーション結果が一致するよう

に最適化手法を適用し、理論解析で得られた運動方程式のパラメータの同定を行った。これより、フレキシブルマニピュレータの適切な数学モデルを構築した。

(3) 消費エネルギー最小化と残留振動抑制を目的とした軌道生成法の提案

上記のモデルを用いて、フレキシブルマニピュレータの振動をフィードバックすることなく残留振動が抑制され、かつ、消費エネルギーを最小にする軌道計画法の確立を目指した。

① 駆動トルク最小化に基づく軌道計画

はじめに、時間 T_E で関節角を θ_E 回転させる PTP 制御を考え、フレキシブルマニピュレータの駆動トルク最小化に基づく関節角軌道を Particle Swarm Optimization (PSO) により求める軌道計画法を提案した。なお、PSO は遺伝的アルゴリズム (GA)、シミュレーテッドアニーリング (SA) 等のメタヒューリスティックの一つであり、連続変数を決定する最適化問題の解法である。この軌道計画法においては、マニピュレータ旋回中の駆動トルクと旋回終了後の 1 秒間のトルクの総和からなる評価関数を設定した。前者は旋回時の省エネルギー化、後者は残留振動抑制を図るために考慮した。そして、関節角軌道を 3 次スプライン関数で表現してその補間点を探索パラメータとし、PSO を適用してこの評価関数の最小化を図った。

② 多目的最適化による軌道計画

上記①の軌道計画法を基にし、1 リンクフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題を扱い、駆動エネルギーと残留振動を同時に最小化する多目的最適化に基づく軌道計画法を提案した。軌道計画法においては、マニピュレータの関節角軌道を 3 次のスプライン関数で記述し、その補間点を探索パラメータとして二つの目的関数が最小化されるよう最適化を図った。最適化の手法としては、パレートランキング法に基づく多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。

③ モデル実験および有効性の評価

数値シミュレーション結果とモデル実験結果との比較検討を行い、本研究のマニピュレータのモデリングと上記①、②で提案された軌道計画法の妥当性、実現性を詳細に検証した。そして、本研究の有効性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) マニピュレータのモデリング

本研究は PTP 制御においてマニピュレータの駆動エネルギーと残留振動を最小化する軌道生成に関する研究であり、振動制御法としてはフィードフォワード制御に属する。一般的に、フィードフォワード制御の性能は

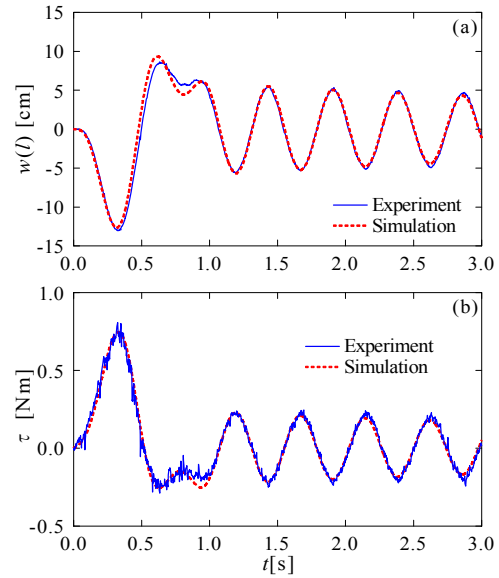


図2 パラメータ同定結果

モデルの精度に依存し、高精度なモデルが必要とされる。そこで本研究では、より適切なモデリングとして有限変形理論を適用してマニピュレータの支配方程式を導出した。この数値シミュレーション結果と実験結果の比較を図2に示す。

図(a), (b)はそれぞれマニピュレータ先端の変位および駆動トルクを表している。なお、図中の実線、破線はそれぞれ実験結果およびシミュレーション結果を示している。図より、実験結果とシミュレーション結果は十分によく一致していることが認められる。これより、有限変形理論を適用したマニピュレータのモデリングが適切であることを明らかにした。

(2) 駆動トルク最小化に基づく軌道計画

本研究で提案した駆動トルク最小化に基づく軌道計画法の数値シミュレーションおよび実験結果を以下に示す。

一例として、位置決め時間 1.1[s]、目標旋回角 π [rad] の PTP 制御に対する結果を図3に示す。図(a), (b)は本軌道計画法から得られた軌道でマニピュレータを旋回させたときの变位および駆動トルクである。一方、図(c), (d)はサイクロイド曲線軌道で旋回させたときの結果である。なお、図中の実線および破線はそれぞれ実験結果およびシミュレーション結果を表している。図からサイクロイド曲線で旋回させた場合、位置決め後 1.1[s]以降に 6.5[cm]程度の残留振動が生じ、それに伴って関節角度を目標角に保持するための保持トルクが発生している。これより、旋回終了後もモータのエネルギーが消費されることがわかる。一方、本手法で求めた軌道で旋回させた場合、残留振動はほぼ完全に抑制さ

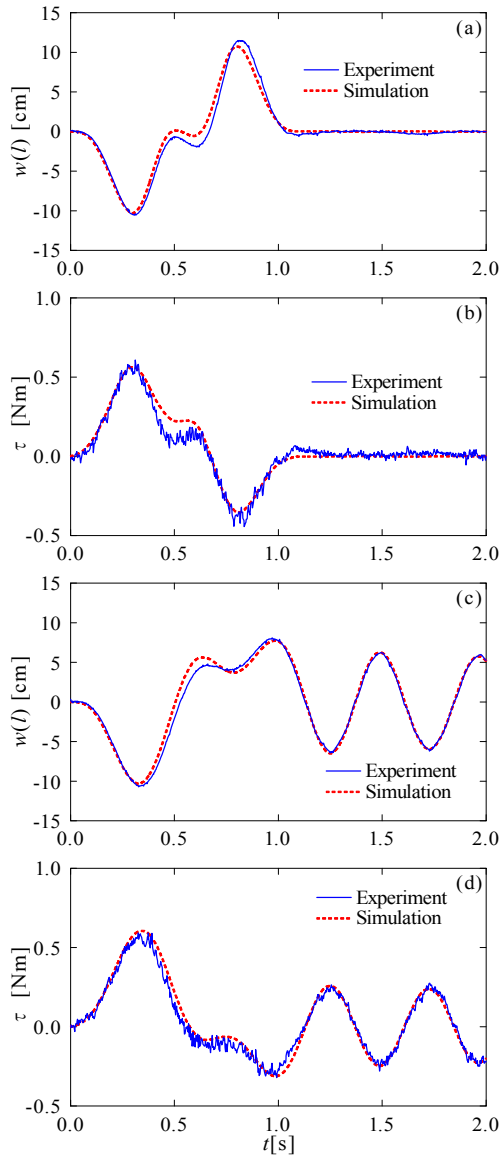


図3 本手法とサイクロイド曲線軌道の比較

れており、サイクロイド曲線において見られた大きな保持トルクも発生していない。さらには、数値シミュレーション結果と実験結果は十分に一致していることも認められる。したがって、提案された軌道計画法は、旋回時の駆動トルクの最小化を図りつつ残留振動が抑制される軌道を生成しており、残留振動抑制に有効かつ実現性を有するものであることがわかる。

(3) 多目的最適化による軌道計画

上記(2)と同様にフレキシブルマニピュレータの PTP 制御問題を扱い、駆動エネルギーと残留振動を最小化する多目的最適化に基づく軌道計画法の結果を以下に示す。

一例として、目標関節角 $3\pi/4$ [rad] の位置決めを駆動時間 1[s]で行かせたときの本手法の多目的最適化から得られた二つの目的関数 f_1

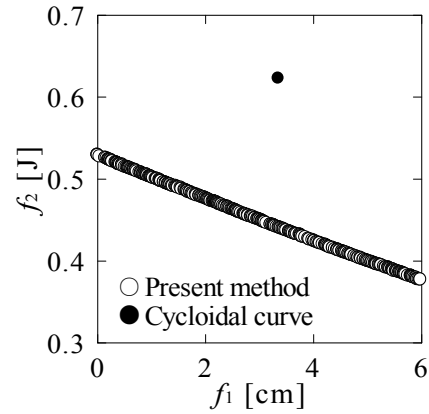


図4 パレート解集合

表1 評価関数 f_1 [mm] の比較

θ_E [rad]	Cycloidal curve	Present study
$\pi/2$	17.6 (15.7)	3.00×10^{-1} (1.16)
$3\pi/4$	33.5 (31.7)	1.54×10^{-1} (3.25)
π	56.9 (55.4)	7.40×10^{-1} (4.04)

表2 評価関数 f_2 [J] の比較

θ_E [rad]	Cycloidal curve	Present study
$\pi/2$	0.282 (0.282)	0.228 (0.214)
$3\pi/4$	0.623 (0.621)	0.529 (0.471)
π	1.08 (1.03)	0.935 (0.848)

と f_2 のパレート解の分布を図4に示す。ここで、目的関数 f_1 は位置決め後1秒間におけるマニピュレータ振幅の最大値であり、 f_2 は駆動エネルギーを表している。なお図中の●印は、サイクロイド曲線軌道で旋回させたときの結果である。図より、残留振動を抑制させると駆動エネルギーが上昇する傾向が認められる。これから、残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の間にはトレードオフの関係が成立していることが認められる。またサイクロイド曲線のものよりも、残留振動および駆動エネルギーがともに抑制されている解が得られていることがわかる。

駆動時間 1[s] と固定して関節目標角 θ_E を変化させた場合、本手法とサイクロイド曲線から得られる目的関数 f_1, f_2 の比較をそれぞれ表1, 2に示す。ここで、本手法の値として残留振動最小軌道を採用しており、括弧内の数字は実験結果から求めた値である。残留振動を示す f_1 および駆動エネルギー f_2 の値とも、本手法で得られた軌道の方がサイクロイド曲線で旋回したものよりも小さいことがわかる。また、実験結果は数値シミュレーション結果とほぼ一致しており、本手法は実現性を有するものであることが認められる。以上の結果から、提案された軌道計画法は、残留振動と駆動エネルギーを同時に抑制する軌道を生成しているといえよう。

(4) 本研究の総括

本研究では、フレキシブルマニピュレータのPTP制御問題を扱い、残留振動と駆動エネルギーを最小化する軌道計画法を提案した。ここで、マニピュレータの高精度なモデルを得るために、有限変形理論を適用した支配方程式を導出した。数値シミュレーションおよびモデル実験の両面から、マニピュレータのモデリングの精度の高さと、提案された軌道計画法が有効かつ実現性を有するものであることを示した。したがって、フレキシブルマニピュレータの振動をフィードバックすることなく残留振動が抑制され、かつ、駆動エネルギーを最小化する軌道計画法の確立がなされたといえる。

本研究の結果から、残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の間にはトレードオフの関係があることを明らかにした。これは、振動を抑制するにはエネルギーを付加する必要があることを示唆している。しかしながら、提案された軌道計画法に基づけば、大きな残留振動が生じるサイクロイド曲線よりも小さな駆動エネルギーで残留振動を抑制することが認められた。これより、柔軟構造物のPTP制御における振動抑制と省エネルギー化の両立を図るには、適切な軌道計画を行う必要性があると考えられる。

駆動エネルギー最小化を目的としたマニピュレータの軌道計画に関する研究は、これまで「剛体」に限られており、フレキシブルマニピュレータを扱ったものは国内のみならず国外でもなされていない。これより、本研究成果は、フレキシブルマニピュレータの高精度化・省エネルギー化への新たな一面を切り開いたといえる。また、提案された手法は非常に簡便であることから、産業用ロボット等で用いられる多リンクマニピュレータにも拡張可能であると考えられる。今後の課題の一つとして、提案手法の多リンクマニピュレータへの適用が挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 阿部 晶, 駆動トルクに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画, 日本機械学会論文集C編, 74(745), 2246-2253, (2008). 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① 阿部 晶, ニューラルネットワークを用いたフレキシブルマニピュレータの軌道生成, 第9回計測自動制御学会SI部門講演会, (2008.12.7), 長良川国際会議場.
- ② 笹森和典, 阿部 晶, フレキシブルマニ

ピュレータのPTP制御における駆動エネルギー最小化, 2008年度精密工学会北海道支部学術講演会, (2008.9.6), 旭川工業高等専門学校.

- ③ 阿部 晶, 大変形を考慮した2リンク剛体-フレキシブルマニピュレータのモデリングと残留振動抑制, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, (2008.9.3), 慶應義塾大学.
- ④ 阿部 晶, 笹森和典, GAを用いたフレキシブルマニピュレータの軌道計画(駆動エネルギーと残留振動を最小化するためのアプローチ), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, (2008.6.7), 長野市ビッグハット.
- ⑤ 阿部 晶, 駆動エネルギーに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画, 第8回計測自動制御学会SI部門講演会, (2007.12.21), 広島国際大学.
- ⑥ 阿部 晶, フレキシブルマニピュレータの最適軌道に関する基礎的検討, 日本機械学会北海道支部第46回講演会, (2007.9.29), 函館工業高等専門学校.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 晶 (ABE AKIRA)

旭川工業高等専門学校・制御情報工学科・准教授

研究者番号: 30313729

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし