

第7章 2自由度可変粘弾性マニピュレータの簡易モデル構築

7.1 本章の概要

第6章では、可変粘弾性関節の特性を総合的に利用することで瞬間的な出力の発生をおこない、さらにその制御をおこなった。しかしながら、これまでのマニピュレータは1自由度マニピュレータであり、手先の速度は関節の出力に依存している。一方で人間がダイナミックな運動をおこなう場合、各関節の出力だけでなくそれらの相互作用も利用している。例えば、投擲動作は振りかぶることで肩の靭帯や腱にエネルギーを蓄え、そして肩、肘、手先へと運動エネルギーを伝えることで手先速度を増加させることができる。このようにアクチュエータのスペックだけでなく制御によってパフォーマンスを上げることは、ロボットにおいても重要な課題である。

そこで本章と第8章では、これまでの可変粘弾性関節マニピュレータの多自由度化を進める。そして、多自由度化されたマニピュレータに瞬発力を伴う動作を目標として与え、その達成を目指す。本研究では、目標の運動として投擲動作を設定した。これは投擲動作が人間の基本的な動作の一つであり、例で述べたように多リンクでの運動として適していると考えたためである。また、本動作はロボットにおいても有益であり、軽量物体の搬送や、災害地において小型の探索ロボットを自動配置するなどの用途が期待されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。他にも、投擲による物体の飛距離を見ることで結果の評価がしやすいという点や、跳躍などの脚部の動作に比べてロボット本体の重量に関する制限が少ないという利点がある。

しかし、本マニピュレータの非線形特性により、目標とする投擲運動から初期状態や入力値を決定することは困難である。これは投擲動作に限らず、第6章においても動特性モデルを利用した試行錯誤によって制御手法の検討を行っていた。そのため、投擲動作の達成にもモデルを利用し、シミュレーションの繰り返しによって投擲動作に関わるパラメータを決定する。

ここで課題となるのは本モデルの計算量の多さと探索のアルゴリズムである。第4章で構築した可変粘弾性関節マニピュレータの動特性モデルは、空気圧応答の遅れを実際の要素ごとにモデル化しており計算量が多い。これは本マニピュレータの特性を一つずつ把握できるという点で、研究としては重要であるが、シミュレーションに要する時間が増大してしまう。また、投擲運動を検討する際のアルゴリズムも考慮する必要がある。これまではシミュレーションを試行錯誤的に用いていたが、パラメータの増加とともに探索に要する試行数が急激に増加する。

そこで本章では、これらの課題のうちモデルの軽量化を進める。そのため本マニピュレータの特性を近似することで簡易な動特性モデルを構築し、本モデルが実機の応答を十分に再現できることを示す。また、投擲運動に向けて本マニピュレータと動特性モデルの2自由度化をおこなう。

最後に、本動特性モデルを用いた投擲運動のシミュレーションを試験的に行う。

7.2 関節剛性を用いた瞬発力発生手法

6章 6.3.1 項では可変粘弾性関節による瞬発力の発生手順を説明した。本手法では拮抗配置した人工筋肉の片側だけを利用し、人工筋肉のポテンシャルエネルギーを利用していると見なせる。しかし、拮抗筋を利用していないため関節剛性を制御できていない場面が生じ、運動方向も限られる。そこで、本節では関節剛性制御を伴った瞬発力発生手順を説明する。また、Fig.7.1 に手順を図示する。

- 1)まず、MR ブレーキを可変トルクブレーキとして利用し、関節の回転を拘束する。
- 2)次に、力学的平衡モデルによって決定した各人工筋肉の空気圧を印加し、弾性エネルギーを蓄積する。
- 3)そして、MR ブレーキの拘束を急速に開放することで、蓄積した弾性エネルギーを運動エネルギーに変換する。

これにより目標角度と関節剛性の制御が可能となり、両方向への運動も可能である。また、これまでは人工筋肉単体にポテンシャルエネルギーを蓄積すると見なしていたが、本手法では関節剛性をバネと見なし、目標角度と現在の角度の差からポテンシャルエネルギーが蓄積していると見なせる。

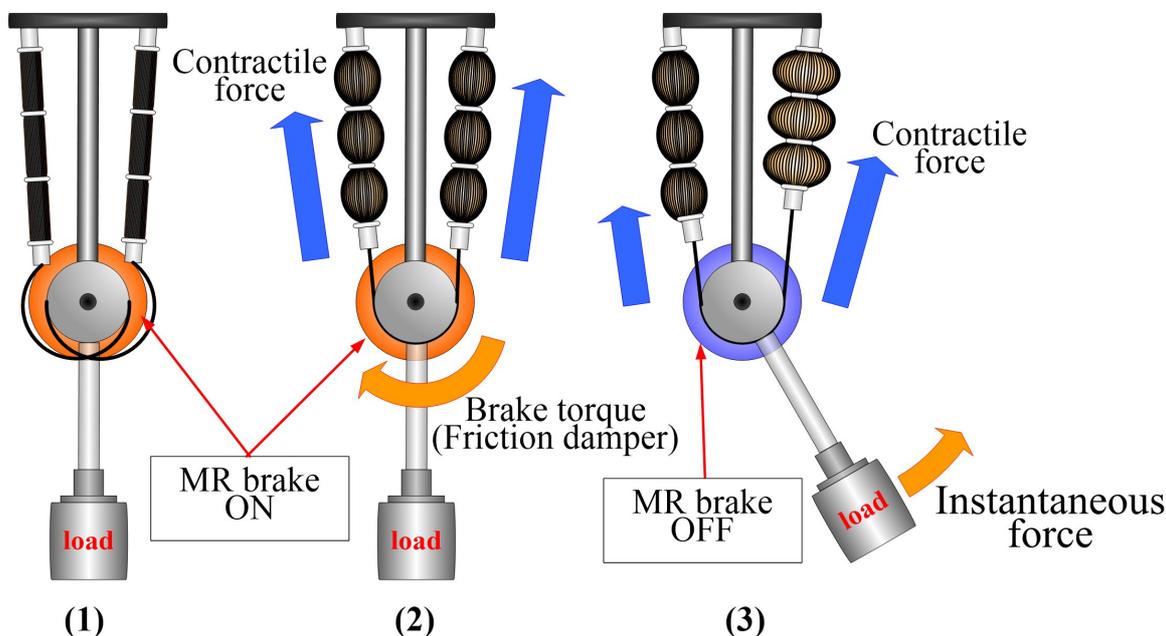


Fig. 7.1 Generation of instantaneous force

7.3 可変粘弾性関節マニピュレータの単関節バネモデル

7.3.1 単関節ばねモデル

4章で述べたマニピュレータの動力学モデルは、比例電磁弁の速度応答、空気管路内の空気圧の伝播、人工筋肉内の圧力変化といった要素をモデル化している。これにより、マニピュレータの運動を詳細に検討することができるが、計算量が多くシミュレーションに時間がかかっていた。一方で、本章では2自由度可変粘弾性マニピュレータによる投擲動作の検討を目的としている。そのため、シミュレーションを繰り返し行う際には、従来のモデルでは計算量が膨大になり、多くの時間を要する。

そこで本節では、はじめに本マニピュレータの簡易な1自由度モデルを構築する。ここで、著者らは提案した瞬発力発生手法の特徴に注目した。本手法ではあらかじめ空気圧を人工筋肉に印加し、以降の電磁弁は圧力を保つだけである。そのため、空気圧をステップ入力する制御に比べ、空気圧応答の遅れの影響は非常に小さいものと仮定する。また7.2節で提案した手法では、関節剛性をバネと見なせると述べた。これらを踏まえ、提案する簡易モデルを Fig.7.2 に示す。本モデルでは、マニピュレータの関節部はねじりバネを有し、瞬発力発生手法による運動はアームの減衰振動とみなす。また、ねじりバネは定常状態での角度とばね定数を可変にできるバネとし、関節部には可変粘性ダンパが備わっているとす。ここで、図中における K_j は関節剛性ねじりバネのバネ定数 (= 関節剛性)、 c は関節の粘性係数、 I はアームの慣性、 m は負荷である。そして、本モデルの運動方程式を以下に示す。

$$H(\theta)\ddot{\theta} + D(E)\dot{\theta} + K_j(P_1, P_2)(\theta_d - \theta) = 0 \quad (7.1)$$

ここで、 H は慣性項、 D は粘性項、 K は関節剛性の項、 E はMR ブレーキへの印加電圧、 P_1 、 P_2 は各人工筋肉への印加圧力である。また、実機において関節剛性は空気圧によって制御されるため、式 7.1 中に P_1 、 P_2 を入れているが、シミュレーションにおいては関節剛性や関節角度を直接操作する。

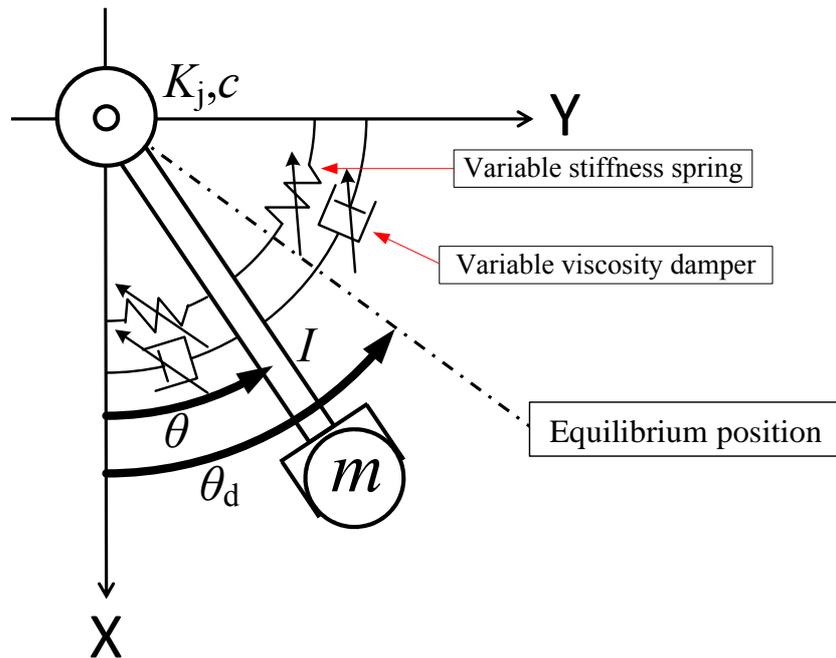


Fig. 7.2 Spring model of 1-DOF manipulator

7.3.2 バネモデルの検証実験

7.3.2.1 関節剛性制御実験

提案したバネモデルでは、関節をねじりバネとみなしている。そこで、実機において関節剛性制御を行い、この仮説を検討する。本実験では第6章と同じ実験システムを使用し、力学的平衡モデルによって関節剛性制御をおこない、外力によってアームに変位を与える。そして、変位ごとに関節トルクを測定し記録する。ここで、関節剛性は 0.08, 0.10, 0.12Nm の3通りであり、関節の平衡角度は 30, 60deg の2通りである。また、変位は 5deg ごとに与える。

本実験結果を Fig.7.3, Fig.7.4 に示す。本結果より、関節剛性は力学的平衡モデルによって広い角度範囲において保たれていることがわかる。これにより、提案したモデルにおいて関節は線形なねじりバネとしてみなすことができると考える。

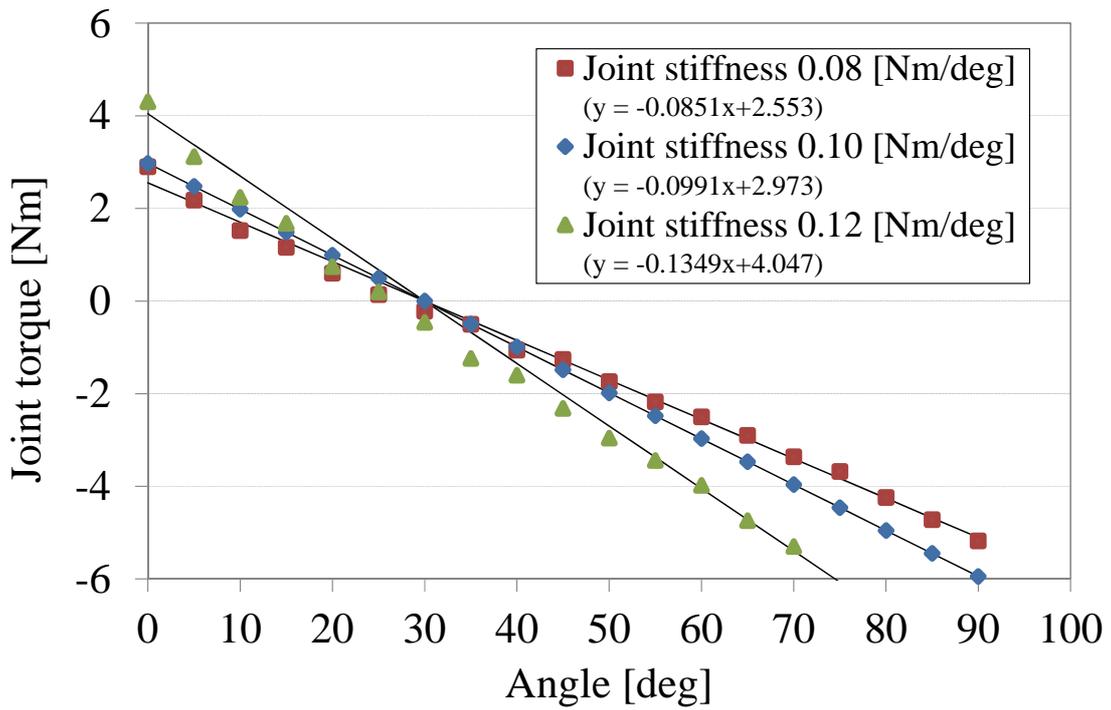


Fig. 7.3 Relationship between joint torque and displacement of the joint (equilibrium position of the arm is 30 deg)

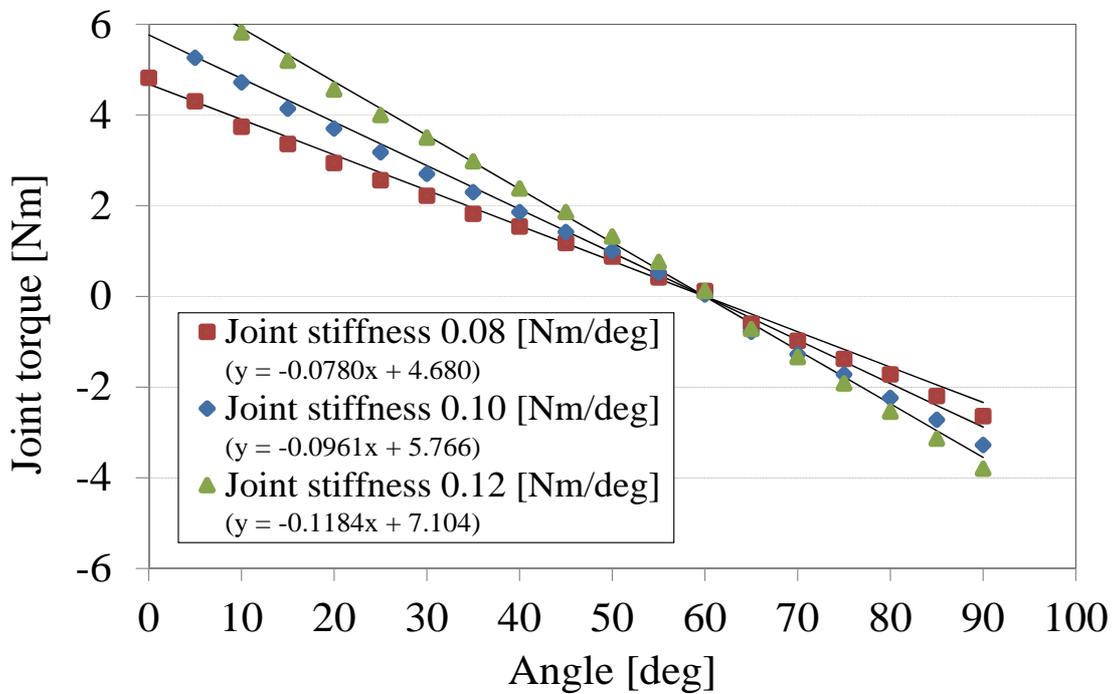


Fig. 7.4 Relationship between joint torque and displacement of the joint (equilibrium position of the arm is 60 deg)

7.3.2.2 動的な応答の検証

本マニピュレータで使用している電磁弁は内部に圧力を維持する機能を備えている。そのため、一定の指令圧力値を与えている場合であっても、人工筋肉の運動によって生じた圧力の変動を補償するように働く。しかし、このための空気の出入りはわずかであり、動特性に与える影響は無視できるものとしてモデル化した。そこで、本実験ではこの仮定を検証するために、実機実験による応答とモデルによるシミュレーション結果を比較する。ここで、関節剛性は 0.08, 0.10, 0.12Nm であり、関節の目標角度は 60deg とする。また、アームの先端には 8.33N の負荷を取り付け、関節部の粘性は MR ブレーキの基底粘性のみとする。

そして、本実験結果を Fig.7.5, Fig.7.6, Fig.7.7 に示す。また、各応答のピーク値や定常値を Table 7.1 に示す。結果より、シミュレーション結果は関節剛性の変化によらず実験結果を再現できており、ピーク値の差や定常偏差も小さい。これにより、空気圧応答の遅れの影響は小さいとした仮定は本モデルで利用できると考える。

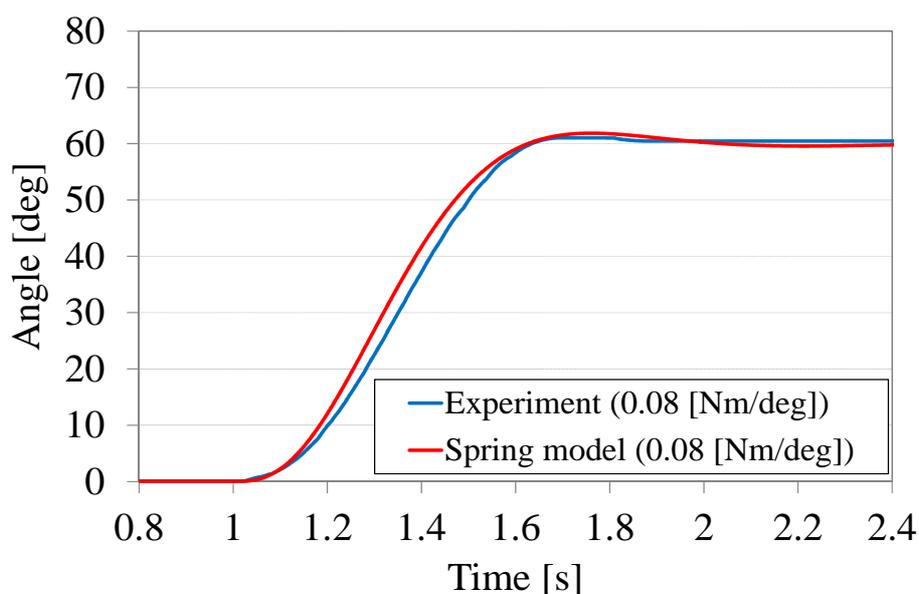


Fig. 7.5 Experimental result and simulation result of dynamic response (joint stiffness is 0.08 Nm/deg)

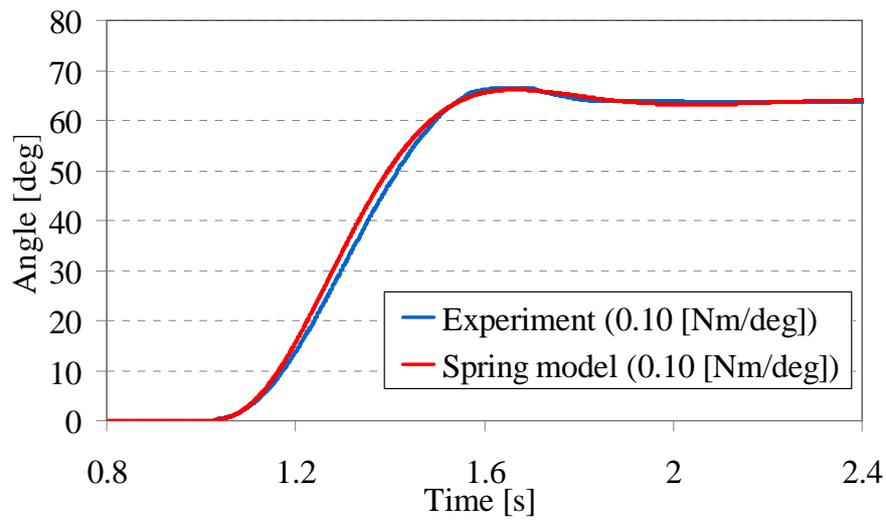


Fig. 7.6 Experimental result and simulation result of dynamic response (joint stiffness is 0.10 Nm/deg)

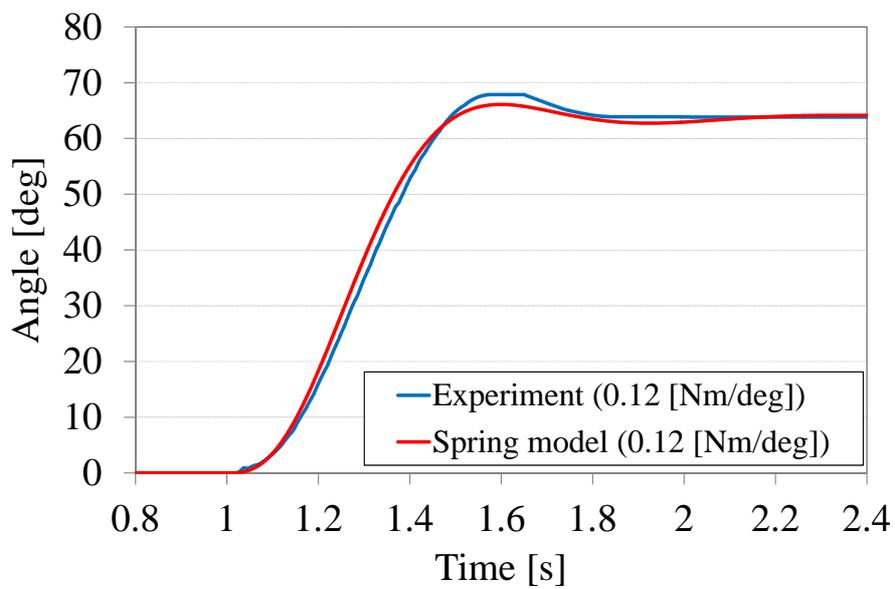


Fig. 7.7 Experimental result and simulation result of dynamic response (joint stiffness is 0.12 Nm/deg)

Table 7.1 Result of validation of dynamic spring joint assumption

Joint stiffness [Nm/deg]	0.08		0.10		0.12	
	Experiment	Spring model	Experiment	Spring model	Experiment	Spring model
Peak angle [deg]	61.0	61.8	66.4	66.1	67.8	66.1
Steady state [deg]	60.4	60.0	63.7	64	63.8	64
Error of Peak angle [deg]	0.8		0.3		1.7	
Steady state error [deg]	0.4		0.3		0.2	