

数式処理を用いたフレキシブルマニピュレータのモデル化と制御

Modeling and Motion control of a Flexible Manipulator Using a Formula Manipulation

○正 佐々木 実 (岐阜大) 嶋崎 寛之 (岐阜大)
伊藤 聡 (岐阜大) 清水 年美 (茨城大)

Minoru Sasaki, Gifu University, sasaki@gifu-u.ac.jp

Hiroiyuki Shimasaki, Gifu University, l3028025@edu.gifu-u.ac.jp

Satoshi Itou, Gifu University, satosi@gifu-u.ac.jp

Toshimi Shimizu, Ibaraki University, toshimi@mx.ibaraki.ac.jp

This paper describes modeling and motion control of a flexible manipulator using a formula manipulation. Flexible arm is defined as low stiffness of a robot arm. We create a flexible manipulator model by using the formula manipulation language software MapleSim™. Using the multi-body dynamics model of the flexible manipulator we investigate the effect of elastic deformation and elastic vibration of the manipulator. The physical parameters are identified from the experimental data of the real manipulator experimental setup. Comparing between the simulations and the experiments, the effectiveness of the modeling is evaluated and clarified. PD control of the joint angles and feedback control of link base strains are applied to motion control of the flexible manipulator. We confirm the effectiveness of the proposed control method and modeling of the manipulator.

Key Words: Flexible manipulator, Simulation, MapleSim™, Multibody dynamics, Modeling, Motion control.

1. 緒言

現在の産業用ロボットは、作業効率向上のために、高速動作や、省エネルギー化のために軽量化が望まれている。

また宇宙開発用ロボットでは、作業範囲の拡大のための大型化と一度のロケット打ち上げでの積載量の増加のために軽量化が望まれている。それらのためにロボットアームの剛性の低下や、作用する力と自重の増加に伴う弾性変形により、アームの先端の位置誤差と弾性振動が無視できなくなる。

そこでアームを柔軟性を持つアーム（フレキシブルアーム）として扱った、弾性変形を考慮した制御法が必要になってくる[1]-[15]。そこで、数式処理に基づく複合モデル開発ソフト MapleSim を用いてモデルを作成し、数値シミュレーションを行い、フレキシブルマニピュレータの弾性変形を伴う運動について実機との実験結果と比較・検討を行い、モデル化の有効性の検証を行う。

2. モデルの作成

2.1 モデル化対象

モデル化するフレキシブルマニピュレータは図 2-1、図 2-2 に示すような 2 リンク 2 自由度型である。

各ジョイントは、回転型であり、エンコーダ内蔵型の DC サーボモータを使用し、減速器には軽量で高い減速比が得られるハーモニックドライブを使用している。

また、各リンクの根元にはひずみゲージが取り付けられている。実験装置の構成は、MATLAB のパッケージの一つである Simulink を使用して作成され DSP で演算処理された後、制御入力として D/A ボードを通して出力され速度制御型サーボアンプを介してモータに送られる。

ひずみゲージの信号は動歪測定器によって増幅され、A/D ボードを介して DSP に取り込まれる。実験装置の各パラメータを表 2-1 に示す。

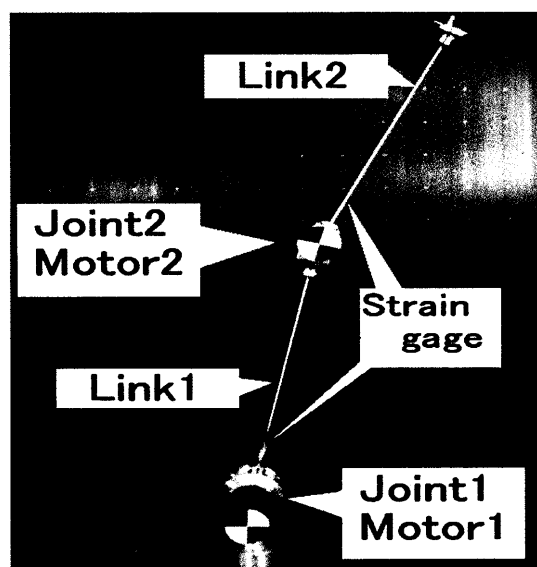


Fig.2-1 Flexible arm.

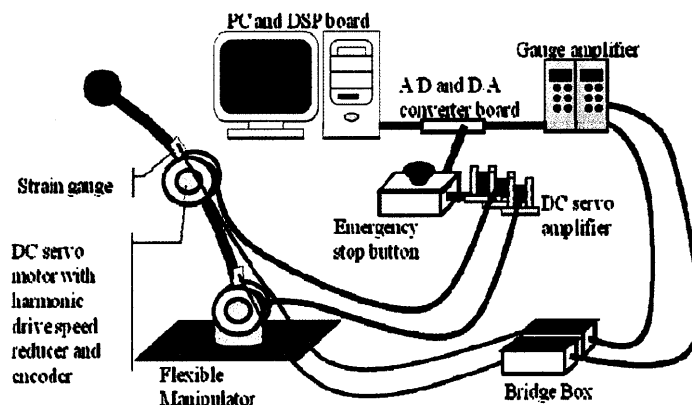


Fig.2-2 Experimental setup.

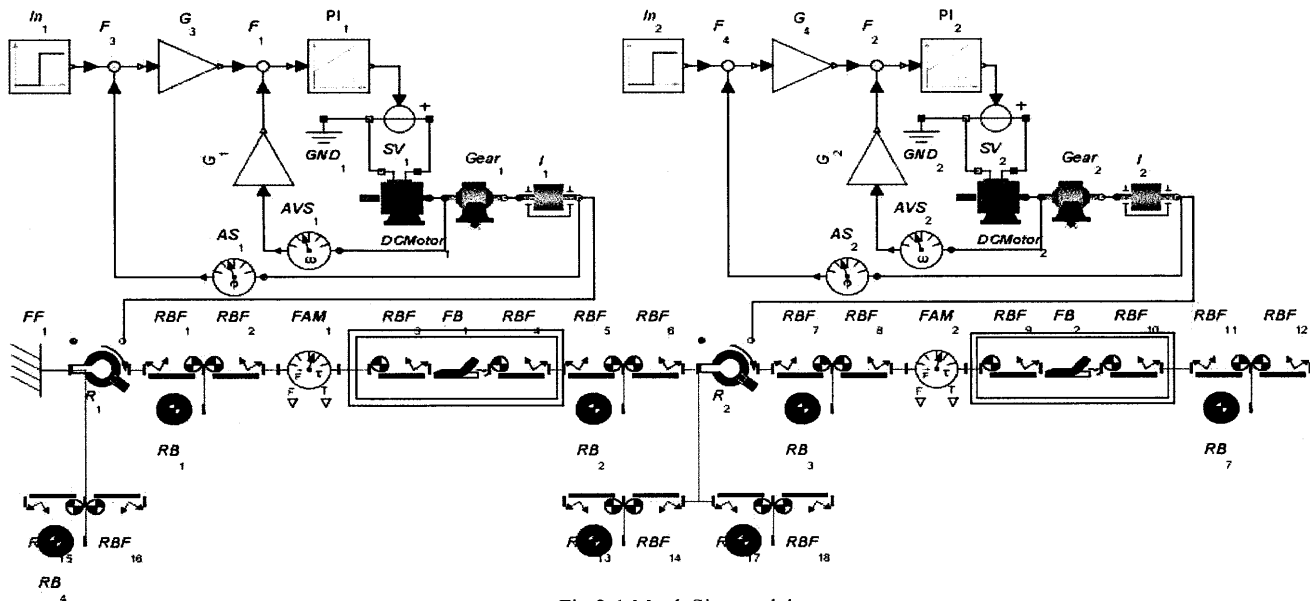


Fig.2-1 MapleSim model.

Table.2-1 Parameter of System.

Motor1	Type	V511-012EL8	
	Rated power	105	W
	Rated spindle speed	3000	rpm
	Rated torque	0.326	N・m
	Maximum torque	0.784	N・m
	Mass	1.1	Kg
Motor2	Type	V404-012EL8	
	Rated power	39	W
	Rated spindle speed	3000	rpm
	Rated torque	0.11	N・m
	Maximum torque	0.323	N・m
	Mass	0.55	Kg
Encoder	Resolution	1000	P/R
	Type	Incremental	
Reduction Gear Joint1	Reduction ratio	1/100	
	Mass	0.15	Kg
	Type	CSF-40-100-2AR-SP	
Reduction Gear Joint2	Reduction ratio	1/100	
	Mass	0.09	Kg
	Type	CSF-17-1002A-R-SP	
Link1	Length	0.44	M
	Radius	0.005	M
	Material	Stainless	
Link2	Length	0.44	M
	Radius	0.004	M
	Material	Aluminum	
Strain Gauge	Type	KGF-2-120-C1 -23L1M2R	

2.2 MapleSim によるモデルの作成

図 2-1 に示した実機を MapleSim を用いてモデル化したのが次に示す図 2-2 である。図 2-2 の四角で囲んであるところが、フレキシブルアームの部分となっており、その上下にあるのは、ジョイントとアームをつなぐ剛体部分となっている。図 2-2 の左側に示すのは、モータとサーボシステムをモデル化したものである。

3. シミュレーション

3.1 実機との検証

まず作成したモデルの妥当性を検証する。実機とモデルに同じ大きさの人力を与え、各ジョイントの角度変化と各リンク根元のひずみ値の大きさを測定する。また振動数を知るためにひずみ値に対して FFT 解析を行う。人力信号としては、ステップ信号を用いて行った。その結果が図 3-1(a)~図 3-1(c) である。角度変化については、ほぼ一致する結果が得られた。ひずみ量については、減衰のモデル化が難しく振幅の減衰による振幅の大きさが一致しないが、振動数については、ほぼ一致した結果を得ることができた。

振幅の差の原因については、内部減衰や摩擦などのモデル化が正確にできていないための影響が出ているためと考えられる。この点以外は、数値シミュレーションと実験はほぼ一致しており、実機の特徴を捉えたモデルが作成できたのではないかと考えられる。

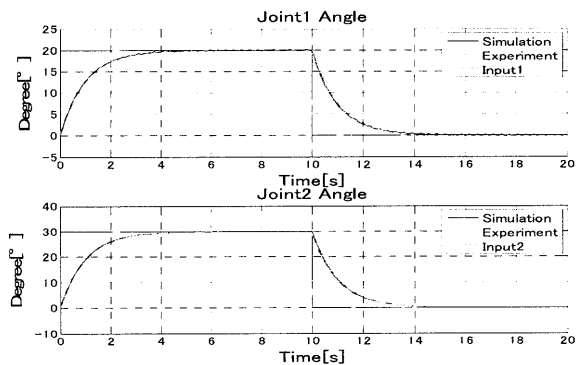


Fig.3-1 (a) Joint angle response.

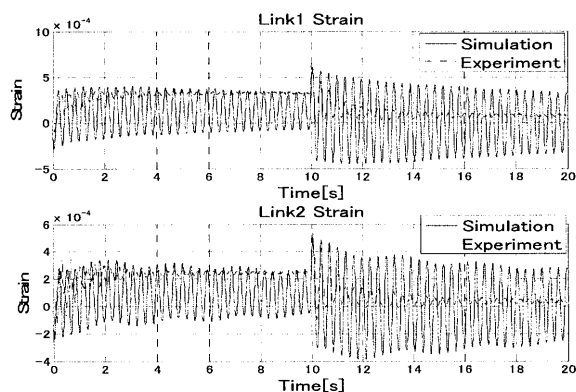


Fig.3-1(b) Link base strain response.

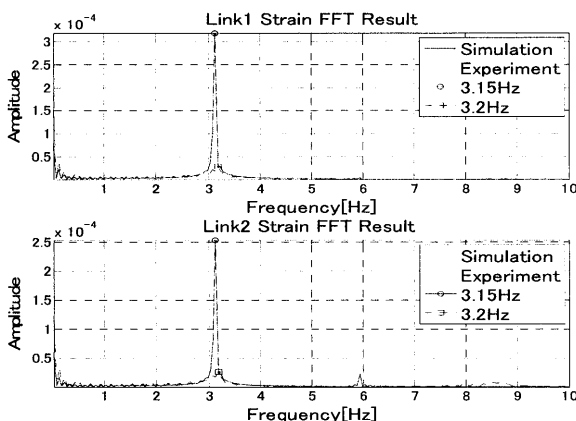


Fig.3-1(c) FFT analysis for link base strain.

3.2 マニピュレータの先端位置

今回使用した実機では、マニピュレータの先端位置を直接測定することができない。そこで、剛体アームのマニピュレータをフレキシブルマニピュレータと同じパラメータで作成し、剛性変化による振動によって先端位置がどのような影響を受けているのかを検証する。その結果が図 3-2 である。

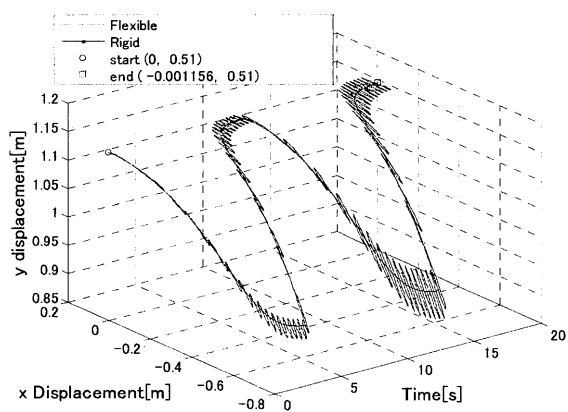


Fig.3-2 End Effector Displacement.

剛体アームの軌道が振動しているフレキシブルアームの軌道の中心より少し上側を通っているのがわかる。振動が、重力に影響により鉛直下方向に強く振れているのがわかる。

4. 制振制御

フレキシブルアームが静止状態の時には弾性振動の他に、自重や作用力によるたわみが発生する。しかし、振動している状態ではたわみによる誤差がどの程度のものなのかかわからない。そこでまず制振制御を行ってから、たわみの変化量について検証する。図 4-1 に示すのが制振制御に用いたコントローラのブロック図である。

θ_d は目標関節角度、 ε はリンク根元ひずみ量、 θ は関節検出角度、 G_1 は関節角度誤差に対するゲイン、 G_2 がひずみフィードバックに対するゲインである。

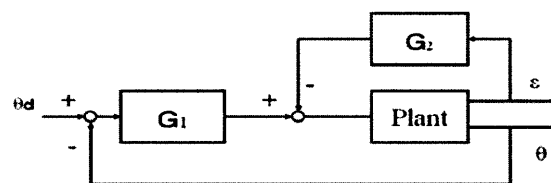


Fig.4-1 Block diagram.

ゲイン G_1 、 G_2 は、試行錯誤的に $G_1=4$ 、 $G_2=0$. 45 と決定した。その制振制御結果を図 4-2 と図 4-3 に示す。だいたい 2 秒前後で振動が収束していることがわかる。また若干ではあるが、角度誤差が生じてしまっているが、これは、モータが基本的に速度制御型のドライバを使用しており、目標値の修正で簡単に補正可能である。

また同様の理由により G_1 が大きく、 G_2 が小さいと制振する時間が長くなり、 G_1 が小さく、 G_2 が大きいと制振する時間は短くなるが、大きな角度誤差が発生することになった。制振された状態の時のマニピュレータの先端位置を図 4-4 に示す。図 4-4 から x 座標 y 座標とも約 5 mm 程度の誤差が発生していることがわかった。

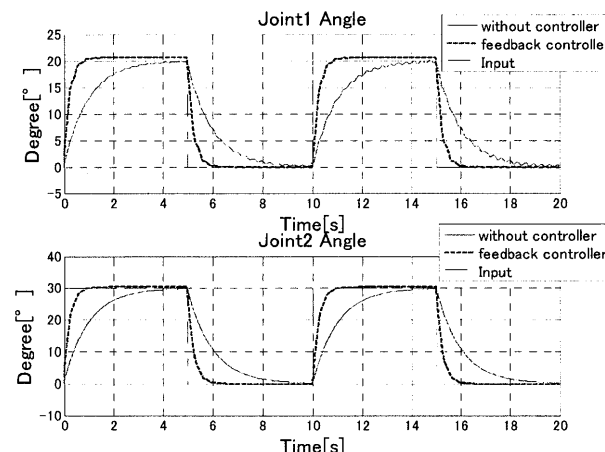


Fig.4-2 Joint angle response.

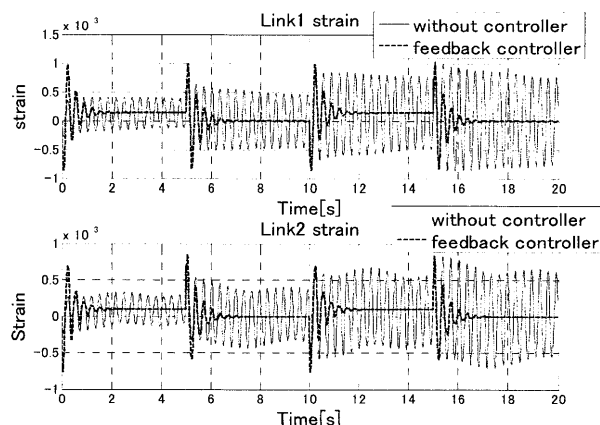


Fig.4-3 Link base strain response.

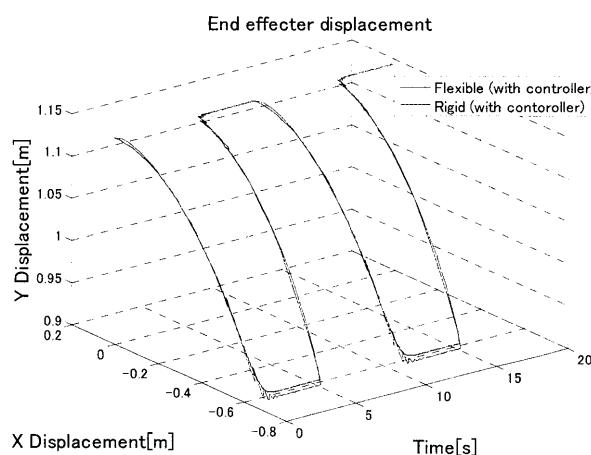


Fig.4-4 End Effector Displacement.

5. 結言

数式処理言語ソフト MapleSim により、フレキシブルマニピュレータのモデル化と数値シミュレーションを行い、実験結果と比較・検討することで実機の特徴を捉えたモデルを作成することができた。また、剛体モデルとの比較により、弾性振動によってマニピュレータ先端がどのような影響を受けているのかについても確認した。実験によって定量的な検証はまだであるが、物理的な直感に則した定性的な傾向は実機と一致していると思われる。

また、関節角度フィードバックとリンク根元のひずみ量のフィードバックを用いたコントローラを設計し、その制振効果の有効性を確認した。

今後の課題としては、実機の減衰特性に基づいて、内部減衰などをモデルに組み込む方法について検討することと 3 ジョイント 2 リンク型のモデルへの拡張・改良を行い実機で検証していきたい。

文献

[1] 奥田幸治, 久原和征, 佐々木実, 藤澤 三夫, “2 自由度制御系

を用いたフレキシブルアームの力制御”, 日本機械学会論文集, (C 編) Vol.64-620, pp.1382-1389, 1998.

- [2] 佐々木実, 浅井秀夫, 奥田幸治, “フィードバック制御則の切り換えを必要としない並進フレキシブルアームの接触力制御”, 日本 AEM 学会誌, Vol.7-4, pp.409-418, 1999.
- [3] 清水年美, 佐々木実, “2 自由度フレキシブルマニピュレータの受動性に関する考察”, 計測自動制御学会論文集, Vol.38-3, pp.862-867, 2002.
- [4] 浅井 章弘, 村澤 春樹, 佐々木 実, 伊藤 聡, “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制御”, 日本 AEM 学会誌, Vol.16-3, pp.214-220, 2008.
- [5] 清水年美, 佐々木実, 岡田徳次, “ダイナミクスの拡張に基づいた 2 自由度平面フレキシブルマニピュレータの手先位置制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.44-5, pp.389-395, 2008.
- [6] V. Gosavi, V. Shekhar, and A. G. Kelkar, “Passivity-based robust control of piezo actuated flexible beam”, Proc. of American Control Conference, pp.2492-2497, 2001.
- [7] Eric H. K. Fung and Cedric K. M. Lee, “Variable Structure Tracking Control of a Single-Link Flexible Arm Using Time-Varying Sliding Surface”, Journal of Robotic Systems, Vol.16-12, pp.715-726, 1999.
- [8] A. G. Cree and C. J. Damaren, “Causal Approximate Inversion for Control of Structurally Flexible Manipulators Using Nonlinear Inner-Outer Factorization”, Journal of Robotic Systems, Vol.18-7, pp. 391-399, 2001.
- [9] W. J. Cao and J. X. Xu, “A Learning Variable Structure Controller of a Flexible One-Link Manipulator”, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.122-4, pp.624-631, 2000.
- [10] M. Moallem, R. V. Patel, and K. Khorasani, “Nonlinear tip-position tracking control of a flexible-link manipulator”, Theory and experiments, Automatica, Vol.37-11, pp.1825-1834, 2001.
- [11] P. Bigras, M. Saad, and J. O'Shea, “Robust Trajectory Control in the Workspace of a Class of Flexible Robots”, Journal of Robotic Systems, Vol.18-6, pp. 275-288, 2001.
- [12] C. I. Byrners, A. Isidori, J. C. Willems: Passivity, “Feedback Equivalence, and the Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.36-11, 1991.
- [13] Z. H. Luo and B. Guo, “Further Theoretical Results on Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.40-4, pp.747-751, 1995.
- [14] 松野文俊, 村田和隆, “先端負荷をもった 2 リンク柔軟アームの PDS 制御”, システム制御情報学会論文誌, Vol.14-1, pp.26-32, 2001.
- [15] X. Zhang, W. Xu, S. S. Nair, and V. Chellaboina, “PDE Modeling and Control of a Flexible Two-Link Manipulator”, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol.13-2, pp.301-312, 2005.