

氏名 (本籍)	NJERI PAUL WAWERU (ケニア共和国)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第553号
学位授与日付	令和元年9月30日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	High-speed vibration control of a flexible manipulator (フレキシブルマニピュレータの高速振動制御)
学位論文審査委員	(主査) 教授 伊藤 聡 (副査) 教授 佐々木 実 准教授 毛利 哲也

### 論文内容の要旨

Despite the numerous advantages associated with the flexible link manipulators; low power consumption, use of small actuators, high speed and their low cost due to fewer materials requirements than their rigid counterparts, link vibrations stand in the way to reaping these benefits. This leads to time wastage waiting for vibrations to decay to safe operating levels and the possibility of mechanical failure due to vibration fatigue. This drawback has been addressed using techniques such as adaptive filters, adaptive strain feedback gain, piezoelectric transducers, etc. What was gained in operation speed was lost in waiting for the vibrations to decay to healthy levels for operation. The plant presented in this article is a 3D, two-link flexible manipulator with a variable weight attached at the distal end. It has three rotary joints driven by dc servomotors and the two flexible links assumed to have damping of the kelvin-voigt type both in the lateral and the torsional senses. The control system consists of a computer, AD and DA converters interfaced to Matlab and controlled from dSPACE control desk environment. Measurement of angular position and velocity is achieved using encoders coupled to the servomotors while link strain measurement is done by strain gauges positioned at the bottom of each link. This ongoing work seeks to contribute by developing high-speed control methods for a 3D two-link flexible manipulator. To this end, we have modelled the manipulator and validated the similarities of the model with the actual manipulator in terms of joint angles, joint velocities, link strains and power spectrum in frequency domain. The first control method involved the development of an inverse controller which was augmented with lowpass filters. Experimental results show that with careful choice of the filter order and time constant, this technique significantly reduces transient vibrations in comparison to a system without a controller. Further extension of this technique yielded a two-degree-of-freedom controller design between a filtered inverse controller and strain feedback which addressed residue vibrations resulting in a superior controller. Collocated controller, though very effective in reducing the rise time are poor in increasing the damping of the system. Non-collocated control, in the control of flexible manipulators is limited by the difficulties in the estimation of the position of the end-effector from the joint angle. Research has shown that non-collocated control where a proportion of root strain is implemented as a negative feedback increases system damping. However, too high gain results in encoder noise feedback while too little is not good for vibration suppression. Determination of the right proportion of root strain to feed back, and the timing is a research problem that has not been solved yet. Further experiments were conducted seeking to tune strain feedback gains using the artificial neural network by training using online backpropagation algorithm. Results showed that neural network could intelligently choose appropriate gains depending on the intensity of the link strain, yielding a system characterized by minimal vibrations relative to a system with constant controller gain. Since loading the manipulator is accompanied by an

increase in strain intensity and a reduction in the vibration frequency, the technique could sense changes in loading and adjust the gains accordingly.

### 論文審査結果の要旨

本論文は、フレキシブルマニピュレータの高速振動制御についての研究をおこなったものであり、2リンク 3D モデルをマルチボディーダイナミクスに基づきモデル化を行い、実験結果に基づき検証し、モデル開発に成功した。また、動的なマニピュレータのモデルは、逆モデルを作成する前に線形化し、逆システムモデルを設計し、フィードフォワードコントローラとして使用した。内部モデルと逆モデルは既存の Matlab モデルに統合され、実験は dSPACE 制御環境で実行され、逆システムコントローラのないシステムと比較して、提示された実験結果は、逆システムコントローラによって所望の関節角度を厳密に追跡しながらリンク振動の大幅な減少を示す結果がえられた。リンク速度は逆システムの時定数の値に依存していることがわかり、その慎重な選択により、高い動作速度と最小限のリンク振動を生み出す結果を示した。この研究の新たな知見は、より強化された逆システムコントローラの開発と入力整形に似た振動制御におけるこのコントローラの新たな応用技術である。この手法のメリットは、従来の入力整形方法のように軌跡が固定されないことである。外乱処理能力は高くはないが、フィルタ付き逆システムコントローラは、PID のような他の方法、すなわち積分windアップおよび高周波ノイズ増幅に影響を与えることが知られている制限なしに実施できる簡単で正確な方法である。また、本論文は、高速制御のために人工ニューラルネットワークを用いた 3D、2 リンクフレキシブルマニピュレータのための自己調整歪フィードバックゲインコントローラを提案している。このアルゴリズムは、フレキシブルマニピュレータに適したゲインの学習に成功し、振動が激しい場合はゲインを上げ、続いて振動が収まるとフィードバックノイズを制限するゲインを下げる。その結果、自動調整されたゲインがリンク歪みと関節の軌跡に関して固定ゲインを使用して達成されたものより良いパフォーマンスを達成することが示されており、これは、ひずみフィードバックはシステムの減衰を増加させて振動を低減するが、モータが動いているときにのみ必要であり、動いていないときはひずみゲージからのノイズのためのフィードバック経路を提供するという事実に起因している。これは関節の軌道追従性に悪影響を及ぼし、負荷が増大すると悪化する。他方で自動調整されたゲインは、リンク歪みに対抗する必要があるときにシステムの減衰を増加させ、その後フィードバック雑音を制限するためにゲインを減少させる。したがって、それは振動制御とフィードバックノイズ減衰との間の絶妙なバランスを実現しており、省エネルギー化にも貢献できる。

この研究知見は、次世代フレキシブルマニピュレータの高速振動制御の学術上および産業技術への社会貢献に寄与できるものと判断し、審査委員会において、審査論文に関する事項について詳細かつ厳正な審査を行い、審査委員会議の結果、本論文は博士（工学）の学術論文として価値のあるものと認める。

### 最終試験結果の要旨

学位論文を構成する学術論文として査読のあるジャーナルに 3 件、学位論文の基礎となる学術論文に関する判定基準「学術論文が査読付き学会誌や論文集 (Proceedings も含む。) に最低 2 編掲載されていること」を満たしており、博士後期課程学生としての必要な単位も修得し、令和元年 8 月 20 日に学位論文の内容を中心として、またこれに関した事項について諮問を行った結果、応答も的確であり、合格と認めた。

---

発表論文 (論文名, 著者, 掲載誌名, 巻号, ページ)

1. Gain tuning for high speed vibration control of a multilink flexible manipulator using artificial neural network, Waweru Njeri, Minoru Sasaki and Kojiro Matsushita, ASME, Journal of Vibration and Acoustics, 2019, Vol.141(4), 041011-1-11. doi:10.1115/1.4043241.
2. Two Degree-of-Freedom vibration control of a 3D, 2 Link Flexible Manipulator, Waweru Njeri, Minoru Sasaki and Kojiro Matsushita, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, Vol. 3, No. 6, pp. 412-424, 2018.
3. Enhanced Vibration control of a multilink flexible manipulator using filtered inverse controller, Waweru Njeri, Minoru Sasaki and Kojiro Matsushita, Robomech Journal, vol. 5, p. 28, Nov. 2018.