

## 物体搬送作業を想定した操作型フレキシブルアームの操作支援系の設計

## Operational Support System of Manual-operating Flexible Robot Arm for Object Transfer

○学 佐藤 悠斗<sup>\*1</sup>, 正 佐藤 拓史<sup>\*1</sup>Yuto SATO<sup>\*1</sup>, Hiroshi SATOH<sup>\*1</sup><sup>\*1</sup> 長岡工業高等専門学校 National Institute of Technology, Nagaoka College

## Abstract

In this paper, we report on the configuration of an operational support system that does not vary with different objects to be transported, assuming that a human operator manipulates a robot arm to transport an object. In general, manual-operated robot arms tend to seek high work efficiency, and high operational skill is required for tasks involving high-speed movements. However, there are problems in training skilled operators, such as the long training period. In this study, the operational support system that enables a beginner operator to manipulate the robot arm and efficiently transfer an object was constructed using the  $\mu$ -synthesis method, a robust control system design method. The effectiveness of the configured control system was verified through transport task experiments with beginner operators, and it was confirmed that the performance of the system was equivalent to that of skilled operators.

**Key Words** : Flexible robot arm, Operational support system, Vibration suppression, Object transport task,  $\mu$ -synthesis method

## 1. 緒 言

近年, 宇宙空間, 医療, 災害現場などロボットアームを用いる需要が高まってきている<sup>(1)~(3)</sup>. これらは用途によって, 長尺なアームを用いたり, 狭い場所を通す必要があるため, アームを動かす際に振動が発生しやすく, その操作は高度な技術が必要となる. 現に, 宇宙用ロボットアームの操作では, 一度発生した振動を収めることが難しいため, 専属のミッションスペシャリストが数時間かけてアームを駆動させながら作業を行う必要があり, 誰もが簡単に扱える訳ではない<sup>(4)</sup>. 一般に, このような操作型のシステムは熟練者がその作業を担当することになるが, 熟練者の養成にはトレーニング期間が長いなどの問題がある<sup>(5)</sup>.

長尺なロボットアームを高速動作させると駆動時や停止時に手先の振動が発生しやすくなる. 熟練者であれば, 経験により振動を発生することなく動作させることが可能であるが, 初心者ではこの加減速の調整が難しい. 単にアームの振動を抑えるだけであれば, 現代制御理論の一つであるLQG制御などを用いることで実現できる. しかし, ロボットアームで物体を搬送するような作業においては, 物体の有無でアームの振動特性が大きく変化し, LQG制御では対応しきれない. 熟練者であっても振動を抑えた作業を行うためには, 細心の注意を払って操作するなどオペレータへの負荷も高くなる.

そこで, 本研究では, 長尺なロボットアームで物体搬送の作業を行うシステムにおいて, 初心者でもアームの振動を抑えた操作が行える操作支援系を構築することを目的とする. 搬送物の有無でアームの振動特性が変化するが, 各振動モードごとに分けて考慮することでロバスト制御系設計法の一つである $\mu$ 設計法を用いて実現する. 設計した制御系の有効性をロボットアーム操作の初心者による搬送実験を行うことで検証する.

## 2. システム構成

本研究のシステム構成図を図1に示す. 制御対象は, 1リンクアーム型のフレキシブルアームであり, そのアーム部は長さ750 [mm], 幅50 [mm], 厚さ3 [mm] のアルミ材としている. このアームをハーモニックドライブを介したDCモータで駆動する. DCモータは内部に速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動され, アームの回転角はエンコーダにより測定する. アームの揺れは, アームに貼り付けたひずみゲージにより測定する.

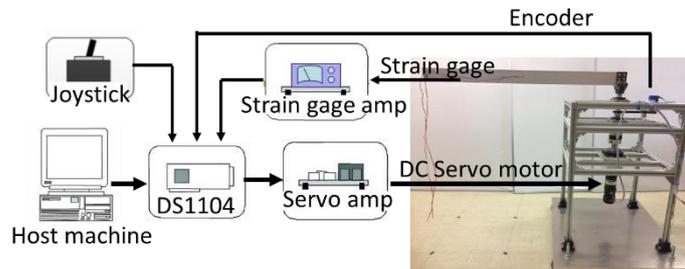


Figure 1 System configuration

コントローラの実装には dSPACE 社の DS1104 を用いる。エンコーダの出力をカウンタポート、ひずみゲージアンプの出力を A/D ポートを通じて入力し、コントローラはそれに基づく制御量を算出する。算出された制御量は D/A ポートを通じて出力され、サーボアンプに入力される。コントローラ的设计には MATLAB, Simulink を用いる。ロボットアームの操作は、ジョイスティック操作により行う。

## 2. $\mu$ 設計法による制御器の設計

### 2.1 設計指針

本研究の目的は初心者が現場でロボットアームを操作し作業を行うことを想定しているため、実際に現場で用いられているロボットアームを参考に搬送物の質量変化の範囲、アームの振幅の許容範囲を設定する。文献(5), (7), (8)を参考にし、制御対象のサイズよりアーム先端の振幅は、 $\pm 0.5$  [mm] 以内に収めることにする。また、搬送中は  $\pm 0.75$  [mm] 以内までのアーム先端の振幅は許容するものとする。この性能を何も保持しない 0 [g] から最大 1000 [g] までの搬送物に対しても維持できるように制御系を構成する。

また、直感的に操作できるように、文献(9)の人が自動車を運転する際、赤信号を認知し反応するまでの時間は 1.3 ~ 1.5 [s] が最も多いことから、本研究では、アームの振動は 1.3 [s] 以内に抑えることが望ましいと判断した。また、操作入力の許容遅延は被験者操作実験により 0.2 [s] 以内と設定した。

### 3.2 ノミナルモデルの設定

搬送物の有無でアームの振動特性は大きく変化する。 $\mu$ 設計法による制御器を設計するためには、ノミナルモデルを設定する必要がある。ここでは、搬送物が無い状態から、搬送物を 300 [g], 600 [g], 1000 [g] に対応させた場合の制御対象の周波数特性を FFT により測定した。その結果を図 2 に示す。

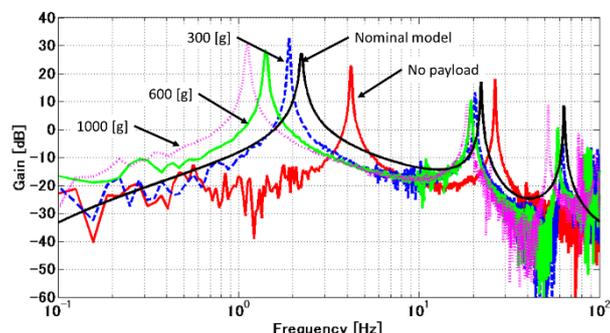


Figure 2 Frequency responses of robot arm model

図中の破線が搬送物が無い場合の周波数応答であり、点線が 300 [g] 時、一点鎖線が 600 [g] 時、点マーカーが 1000 [g] 時の周波数応答である。図 2 より分かるように、搬送物が重くなるにつれ、各振動モードのピーク周波数は低周波数へ移るが特に 1 次振動モードの変化が著しい。各振動モードの共振周波数をまとめたものを表 1 に示す。

ノミナルモデルは、各振動モードの変動の中間の特性となるように設定し、その周波数応答は図 2 中の実線となる。

Table 1 Changes in vibration mode frequency

	0 [g]	300 [g]	600 [g]	1000 [g]
1 <sup>st</sup> mode [Hz]	4.19	1.89	1.41	1.10
2 <sup>nd</sup> mode [Hz]	26.37	20.47	19.45	18.41
3 <sup>rd</sup> mode [Hz]	73.01	62.66	58.53	51.92

### 3・3 一般化プラントの構成と重みの設定

各振動モードに対して摂動  $\Delta_{a1}$ ,  $\Delta_{a2}$ ,  $\Delta_{a3}$  を考えることで、構造的な摂動として表現し、モデルに反映していない4次振動モード以降は1つの摂動として  $W_s$  と表現することで、図3に示す一般化プラントを構成した。

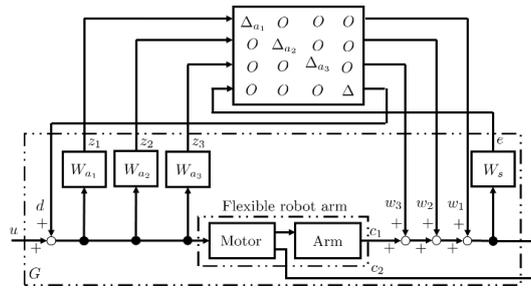


Figure 3 Generalized plant

本研究では、これらの摂動を加法的摂動とし、各摂動に対する重みは次式とした。

$$W_{a1} = \frac{0.2038s^2 + 81.5160s + 0.2038}{s^2 + 8s + 140}, \quad W_{a2} = \frac{0.0023s^2 + 342s + 22.8}{s^2 + 40s + 18000}$$

$$W_{a3} = \frac{0.177s^2 + 265.5s + 88.5}{s^2 + 130s + 150000}, \quad W_s = \frac{4.7s^2 + 235.5s + 353.25}{s^2 + 225s + 1000}$$

## 4. 物体搬送実験

### 4・1 実験方法

物体搬送実験は、実際にロボットアームを操作し、作業を行うことを想定し、以下に示す内容のタスクを被験者に行ってもらった。

1. スタート(地点A)からアームを  $45 \pm 1$  [deg] (地点B)まで移動させる
2. 地点Bにてアーム先端の振幅を  $\pm 0.5$  [mm] 以内に抑える
3. 地点Bから地点A ( $0 \pm 1$  [deg])までアームを移動させる
4. 地点Aにてアーム先端の振幅を  $\pm 0.5$  [mm] 以内に抑える
5. この作業を5往復行う

ここで、搬送物の有無で場合分けを行い、搬送物の無い場合から、搬送物の軽い順に Case1~4 を 0 [g], 300 [g], 600 [g], 1000 [g] とし、この4パターンに対して実験を行う。

本研究の目的は、初心者でも熟練者と同様な効率で作業を行える操作支援系を設計することであるので、比較する熟練者の操作時間を決定する必要がある。振動系の操作では、台形状の速度入力を与えることで振動を抑えた操作が可能であり、ここでは、機械的に作った操作入力を与えた場合に、往復にかかるベストタイムを熟練操作のデータとして扱うことにする。Case 1~4 に対してのベストタイムはそれぞれ 11 [s], 18 [s], 31 [s], 34 [s] であった。設計した制御系が有効であれば、被験者のタスク時間は熟練者の搬送時間と同程度か、それ未満の時間であると考えられる。また、

5 往復でのばらつきも少なくなると考えられる。そこで、評価項目としては、1 往復毎のタスク時間とその平均値、搬送中のアームの挙動を制御器毎に行う。

### 4・3 実験結果

Case1, 4 の各被験者毎のタスク時間をまとめたものを表 2 に示す。各ケースともに縦方向が各被験者毎のデータであり、横方向が各往復にかかった搬送時間を示している。

Table 2 Results of operating experiment

Tester No.	Case 1						Case 4					
	Task Time[s]						Task Time [s]					
	1	2	3	4	5	Ave.	1	2	3	4	5	Ave.
1	9.28	9.29	8.56	9.37	7.93	8.89	28.56	28.93	22.63	22.09	23.96	25.23
2	10.48	10.70	9.90	9.33	8.83	9.84	26.52	23.88	23.86	23.70	24.28	24.45
3	10.25	11.27	10.22	9.28	9.76	10.16	22.90	24.00	24.40	21.50	21.35	22.95
4	7.54	7.58	7.73	7.61	7.47	7.59	19.65	17.88	19.23	16.94	17.00	18.14
5	12.60	11.30	10.50	10.68	9.96	11.01	23.94	27.88	29.80	28.43	29.95	28.00

表 2 より、Case1, 4 の場合での被験者毎の往復にかかる時間のばらつきは少なかった。この結果は、制御器により、アームの揺れを操作者が意識せずとも搬送出来ることを示しており、制御系を構築したことの効果と言える。また、被験者間では、Case1 においてはばらつきは少なく、Case4 では慎重に操作する人と上手に操作する人とで差が出ている。これは Case4 は搬送物が重く、ちょっとした操作でアームが大きく揺れようとするためではないかと思われる。各ケース毎の結果を比べると、Case1 では、熟練者と同程度の搬送時間でタスクを行うことが出来ている。Case4 では、被験者全員の搬送時間が熟練者の搬送時間よりも Case4 は約 32% 短縮することができ、最も搬送時間が短かった被験者は熟練者の約半分の搬送時間でタスクを完了することができ、制御系を構成したことで作業効率を向上できたと言える。

## 5. 結 語

長尺なロボットアームで物体搬送の作業を行うシステムにおいて、初心者でもアームの振動を抑えた操作が行える操作支援系を構築することを目的とし、 $\mu$ 設計法を用いた制御器を設計した。設計した制御系の有効性をロボットアーム操作の初心者による搬送実験を行い、被験者によらず搬送時間のばらつきが少なく安定した操作が実現出来た。また、熟練者と比較し、作業効率は Case1 では同程度、Case4 ではそれ以上に向上することができ、設計した制御系の有効性を確認することが出来た。

## 文 献

- (1) 庄司道彦, 大矢智之, “軽量高速ヒューマノイドアームの振動抑制制御”, NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, Vol.13, No.3 (2004), pp.48-51.
- (2) “ロボット支援手術が急増！ダビンチとはどんなロボットか?”, <https://robotstart.info/2018/11/08/davinci-luke-01.html>.
- (3) “福島第一原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦 3”, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris\\_3.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris_3.html).
- (4) “JAXA 宇宙飛行士にはどのような種類の役割があるのですか?”, <https://humans-in-space.jaxa.jp/faq/detail/000434.html>.
- (5) “JAXA 有人宇宙技術部門 JEMRMS (「きぼう」ロボットアーム)”, <https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000226.html>.
- (6) 増井詠一郎, “操作型フレキシブルロボットアームの振動制御”, 長岡高専電子機械システム工学専攻特別研究論文 (2012).
- (7) 河西賢一, 山丈政之, 村田直史, 大西献, “福島第一原子力発電所燃料デブリ横取り出しに向けたロボット開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.6 (2018), pp.403-407.
- (8) “DOBOT MG400 産業用途のために進化した DOBOT Magician”, <https://techshare.co.jp/product/dobot/mg400>.
- (9) 大山正, “反応時間研究の歴史と現状”, 特集・反応時間と人間工学, Vol.21, No.2 (1985).
- (10) 野波健蔵, 西村秀和, 平田光男, “MATLAB による制御系設計”, 東京電機大学出版局 (2006).