

## アームのたわみを考慮した Force-Display の力制御

### Force Control of Force-Display Considering the Deflection of the Arm

○草野恵佑<sup>1</sup>, 吉田洋明<sup>2</sup>\*Keisuke Kusano<sup>1</sup>, Hiroaki Yoshida<sup>2</sup>

Abstract: In this paper, Force-Display considering the deflection of the arm is considered. Simulations were performed in the case of the rigid arm and the arm considering the deflection. Furthermore, experiments of static and dynamic characteristics were performed using the control law of the flexible arm. As a result, good performance was obtained.

#### 1. はじめに

仮想空間内に再現した力感覚を操作者に呈示する装置を Force-Display と呼ぶ。以前製作した 1 自由度 Force-Display 装置では予期しない振動が発生した。この振動はアームのたわみによるものと推定されたため、アームの中間に板ばねを加えた 2 自由度のアームを製作した。本研究では、アームのたわみを考慮した場合とそうでない場合をシミュレーションによって比較し、2 自由度 Force-Display で仮想ばねを再現した場合の静特性と動特性の試験を行った。

#### 2. Force-Display 装置の構成

本研究で製作した 2 自由度 Force-Display 装置<sup>[1]</sup>は 2 自由度アーム、モータ、ロータリーエンコーダ、ひずみゲージ、コントローラから構成されている。構成を Fig.1 に示す。コントローラはひずみゲージによりアームに加わる力を、ロータリーエンコーダよりアームの角度を読み取る。

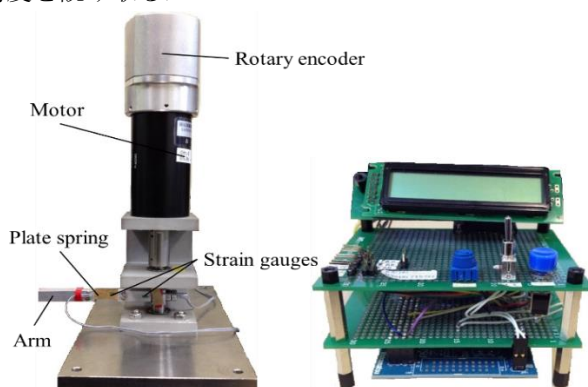


Figure 1. Force-Display & Controller unit

#### 3. Model Following Control

Model Following Control とは、装置に規範モデルと同じ振る舞いを行わせる制御である。本研究では、規範モデルを 1 自由度系とした。装置が 1 自由度である

と仮定した時に、ばねの力を再現する制御則を (1) 式に示す。

$$\tau_{\text{arm}} = \left( B_{\text{arm}} - \frac{J_{\text{arm}}}{J_{\text{mdl}}} B_{\text{mdl}} \right) \dot{\theta}_{\text{arm}} + \left( \frac{J_{\text{arm}}}{J_{\text{mdl}}} - 1 \right) T_h - \frac{J_{\text{arm}}}{J_{\text{mdl}}} K_{\text{mdl}} \theta_{\text{arm}} \quad (1)$$

$\tau_{\text{arm}}$  : 制御トルク [Nm],  $J$  : 慣性モーメント [kgm<sup>2</sup>],  
 $B$  : 粘性トルク係数 [Nms/rad],  $K$  : ばね定数 [Nm/rad],  
 $K_{\text{mdl}}$  : 再現したいばね定数 [Nm/rad],  
 $T_h$  : 外力トルク [Nm],  $\theta$  : 角度 [rad],  
 添え字 arm : 実機リンク 1, mdl : モデル.

アームのたわみを考慮して、アームが 2 自由度であると仮定した時に、ばねの力を再現する制御則を (2) 式に示す。

$$\tau_{\text{arm}} = \left( B_{\text{arm}} - \frac{J_{\text{arm}}}{J_{\text{mdl}}} B_{\text{mdl}} \right) \dot{\theta}_{\text{arm}} - B_{\text{sp}} \dot{\theta}_{\text{sp}} - K_{\text{sp}} \theta_{\text{sp}} + \frac{J_{\text{arm}}}{J_{\text{mdl}}} (T_h - K_{\text{mdl}} \theta_{\text{arm}}) \quad (2)$$

添え字 sp : 実機リンク 2

#### 4. シミュレーション

2 自由度の装置に、装置が 1 自由度であると仮定した制御則と 2 自由度であると仮定した制御則を適応してシミュレーションを行った。シミュレーションはオペレータが正弦波を加えたものとして行った。赤線はリンク 1 の角度、青線は再現すべき規範モデルの角度である。

1 : 日大理工・院 (前)・精密 2 : 日大理工・教員・精密

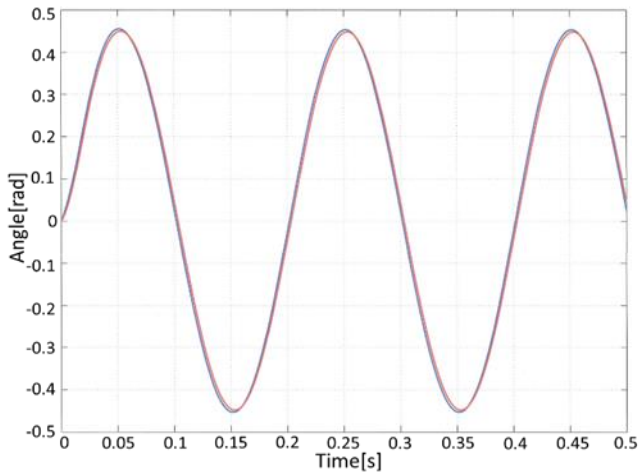


Figure2. Simulation of not considering the deflection

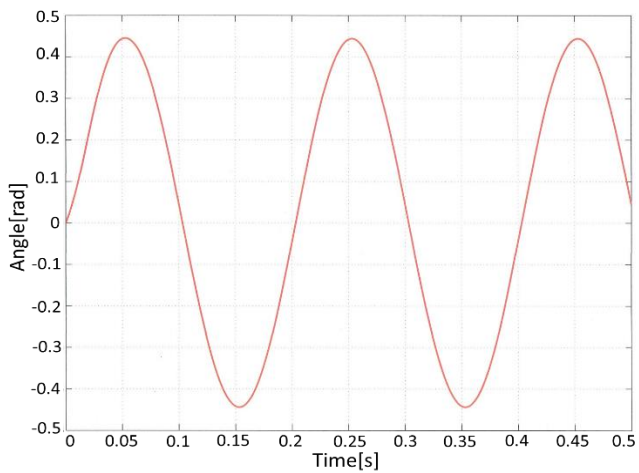


Figure3. Simulation of considering deflection

装置が 1 自由度であると仮定した Fig.2 では装置のリンク 1 の角度が規範モデルの角度に一致しておらず、規範モデルが再現されていない。装置が 2 自由度であると仮定した Fig.3 ではリンク 1 の角度と規範モデルの角度が一致しており、規範モデルが再現されていることが分かる。

## 5. 特性実験

装置が 2 自由度であると仮定した制御則を適用して、ばねの力の再現性を静特性及び動特性について実験を行った。

### 5.1 静特性試験

再現すべきばねのばね定数を  $1[\text{Nm}/\text{rad}]$  と設定した Force-Display のアームを指でゆっくり往復させることで静特性試験を行った。その時のアームの角度とトルクを Fig.4 に示す。

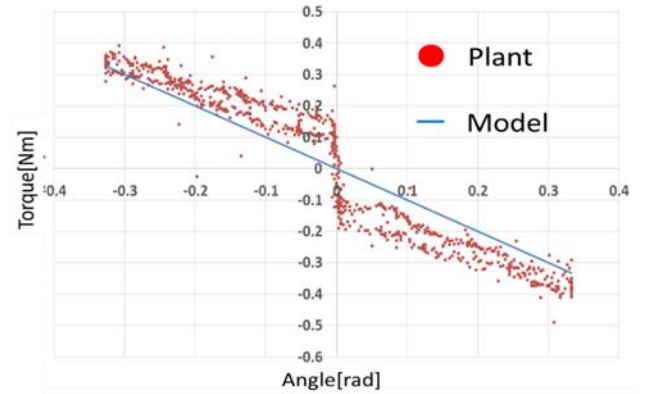


Figure4. Static Characteristics

### 5.2 動特性試験

静特性試験と同様の条件で Force-Display のアームを指で素早く往復させることで動特性試験を行った。その時のトルクを Fig.5 に示す。

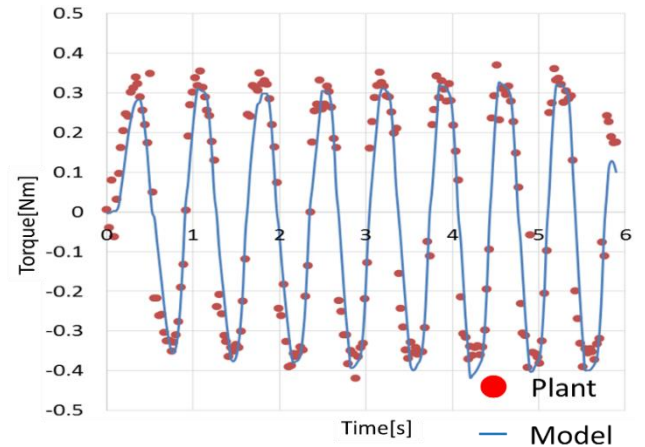


Figure5. Dynamic Characteristic

Fig.5 より Force-Display が所望のトルクを概ね再現しているのが分かる。

## 6. おわりに

アームのたわみを考慮した場合、1 自由度の制御則では誤差が生じることが分かった。また、2 自由度の制御則を適用すれば、規範モデルを再現できることが確認された。アームのたわみを考慮した制御則によって、力の再現性についての特性試験を行った。その結果、概ね力の再現が出来ていることが確認された。

### 参考文献

- [1] 草野恵佑, 藤井翔也 : 「Force-Display の力制御-アームのたわみを考慮した力制御-」, 日本大学理工学部精密機械工学科平成 25 年度卒業研究報告書