

ポリトープ表現を用いたフレキシブルアームの H_2 制御

2009SE052 日榮祐紀 2009SE264 鈴木奏

指導教員 陳幹

1 はじめに

産業用ロボットなどに用いられているロボットアームの高速化や省エネ化といった要求に対し、アームは軽量であることが望ましい。しかし、軽量化を行うことによりアームの剛性が低下し、それまで起きなかったたわみや振動が発生してしまう問題がある。これらはロボットの性能低下に繋がるため、それを制御によって抑制する必要がある。本研究はフレキシブルアームの質量の変化によって生じる、プラントの慣性モーメントの変動に対して、 H_2 制御によるロバスト安定化を行うことを目的とする。本来、ロバスト性を持たない H_2 制御にロバスト性を持たせることで、特性変動が起こったときでも正確に目標値に収束させるような制御を行う手法を示す。

2 モデリング

2.1 フレキシブルアームについて

アーム部の重みが薄く、軽量化したロボットアームの単純モデルである。そのため剛性が低く、アームの振る舞いは非常に振動的である。フレキシブルアームの制御量はアームの先端の角度であり、操作量はアームにギアを介して取り付けられたモータに与える電圧である。また、検出量はアームの根元の角度とアームのたわみの角度となっている。

2.2 単純化モデルによるモデリング

このモデルはトルクがモータと繋がっている *hub*(モータ)の部分にのみ働き、*load*(先端)は根元との間に繋がれたバネの力のみによって運動する。トルクを加えた時 *hub*は θ だけ回転し、*load*はそこから更に α だけ回転する。よって、 $\gamma = \theta + \alpha$ が終点の絶対的な角度となる。この角度がアームの先端角に相当する。アームの中点に質点をおいたときの慣性モーメント J_{arm} は、トルクより $\frac{1}{2}\alpha$ だけ回転する。 J_{load} は *load*の慣性モーメントであり、 K_{stiff} はモデルの剛性に相当するバネ定数であるとする、以下の式が得られる。

$$J_{load}\ddot{\alpha} = -K_{stiff}\alpha \quad (1)$$

減衰固有角周波数 ω_c と α の間には常に以下の関係が成立する。

$$\ddot{\alpha} = -\omega_c^2\alpha \quad (2)$$

(1), (2) 式より以下の式が得られる。

$$K_{stiff} = \omega_c^2 J_{arm} \quad (3)$$

3 オイラー・ラグランジュの運動方程式

単純化したモデルに対してオイラー・ラグランジュの運動方程式を用いてシステムのモデリングを行う。オイラー・ラグランジュの運動方程式とは、システムを完全に表す独立な一般化座標 $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$ と、一般化座標に働く力やトルクを表す一般化力 $\tau_i (i = 1, 2, \dots, n)$ によって構成され、運動エネルギー T 、位置エネルギー U 、損失エネルギー D を一般化座標 q_i とその時間微分 \dot{q}_i の関数で表すことによってシステムの運動方程式を求める手法である。それは (4) 式である。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

3.1 フレキシブルアームへの対応

オイラー・ラグランジュの運動方程式をフレキシブルアームに適用するため、位置エネルギー、運動エネルギー、損失エネルギーを求める。

・位置エネルギー

$$U = \frac{1}{2}K_{stiff}\alpha^2 \quad (5)$$

・運動エネルギー

$$T = \frac{1}{2}J_{hub}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_{load}(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2}J_{arm}\left(\dot{\theta} + \frac{2}{3}\dot{\alpha}\right)^2 \quad (6)$$

・損失エネルギー

$$D = \frac{1}{2}B_{eq}\dot{\theta}^2 \quad (7)$$

一般化座標は θ と α の二つであり、一般化力をトルク τ とする。(5), (6), (7) より、

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = J_{hub}\dot{\theta} + J_{load}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) + J_{arm}\left(\dot{\theta} + \frac{2}{3}\dot{\alpha}\right) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = J_{hub} \ddot{\theta} + J_{load}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{arm}(\ddot{\theta} + \frac{2}{3}\ddot{\alpha}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = J_{load}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) + J_{arm}(\dot{\theta} + \frac{2}{3}\dot{\alpha}) \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = J_{load}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{arm}(\ddot{\theta} + \frac{2}{3}\ddot{\alpha}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha} = K_{stiff} \alpha \quad (13)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} = B_{eq} \dot{\theta} \quad (14)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} = 0 \quad (15)$$

よって (4) 式よりオイラー・ラグランジュの運動方程式 (16),(17) を得る.

$$J_{hub} \ddot{\theta} + J_{load}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{arm}(\ddot{\theta} + \frac{2}{3}\ddot{\alpha}) + B_{eq} \dot{\theta} = \tau \quad (16)$$

$$J_{load}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{arm}(\ddot{\theta} + \frac{2}{3}\ddot{\alpha}) + K_{stiff} \alpha = 0 \quad (17)$$

上式より

$$\ddot{\theta} = \frac{K_{stiff}}{J_{hub}} \alpha - \frac{B_{eq}}{J_{hub}} \dot{\theta} + \frac{1}{J_{hub}} \tau \quad (18)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{K_{stiff}(J_{load} + J_{arm}J_{hub})}{J_{hub}(J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \alpha + \frac{B_{eq}(J_{load} + J_{arm})}{J_{hub}(J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \dot{\theta} - \frac{J_{load} + J_{arm}}{J_{hub}(J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \tau \quad (19)$$

よってシステムの運動方程式が得られた. しかしながら, 実際に制御するにあたり, 直接操作できるのはトルクではなく, モータに与える電圧である. そのため, モータに与える電圧 V と τ との関係を求める必要がある. ここで, 電機子回路入力電圧を V , 電機子回路電流を I_m , 電機子抵抗を R_m , 電機子インダクタンスを L_m とする. E_{emf} をモータの逆起電力, 逆起電力係数を K_m とし, トータルギア比を K_g とする. また, モータのトルクを τ_m , トルク定数を K_t , モータ効率を η_m とすると以下の式を得る

$$\tau_m = \frac{\eta_m K_t (V - K_m K_g \dot{\theta})}{R_m} \quad (20)$$

これはモータのトルクであり, hu には負荷ギアを介しているため, hub に与えるトルクを計算する必要がある. モータのトルクと hub に与えるトルク τ の関係式は以下の通りである.

$$\tau = \eta_g K_g \tau_m \quad (21)$$

ただし, η_g はギアボックス効率であり, モータに与える電圧と hub に与えるトルクは以下の通りである.

$$\tau = \frac{\eta_g \eta_m K_t K_g (V - K_m K_g \dot{\theta})}{R_m} \quad (22)$$

(22) 式を (18) 式に代入する.

$$\ddot{\theta} = \frac{K_{stiff}}{J_{hub}} \alpha - \frac{B_{eq} R_m + \eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m}{J_{hub} R_m} \dot{\theta} + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{hub} R_m} V \quad (23)$$

(22) 式を (19) 式に代入する.

$$\ddot{\alpha} = -\frac{K_{stiff}(J_{load} + J_{arm} + J_{hub})}{J_{hub}(J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \alpha + \frac{(J_{load} + J_{arm})(B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_t K_m K_g^2)}{J_{hub} R_m (J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \dot{\theta} - \frac{(J_{load} + J_{arm})(B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_t K_g)}{J_{hub} R_m (J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} V \quad (24)$$

ここで

$$X = -\frac{B_{eq} R_m + \eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m}{J_{hub} R_m} \quad (25)$$

$$Y = -\frac{K_{stiff}(J_{load} + J_{arm} + J_{hub})}{J_{hub}(J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \quad (26)$$

$$Z = \frac{(J_{load} + J_{arm})(B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_t K_m K_g^2)}{J_{hub} R_m (J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \quad (27)$$

と置く.

4 システムの状態空間表現

(19) システムの状態ベクトル x を

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (28)$$

とすると制御入力を u とした状態空間表現は以下のようになる.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (29)$$

$$y = Cx \quad (30)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{stiff}}{J_{hub}} & X & 0 \\ 0 & Y & Z & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{hub} R_m} \\ -\frac{(J_{load} + J_{arm})(\eta_m \eta_g K_t K_g)}{R_m J_{hub} (J_{load} + \frac{2}{3}J_{arm})} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (33)$$

4.1 パラメータの決定

4.1.1 各種パラメータ

表1 各種パラメータ

Symbol	Description	Value[Unit]
L	アーム長	20×10^{-2} [m]
M	アーム重量	65[g]
K_t	モータトルク定数	0.00767[Nm/A]
K_m	モータ逆起電力定数	0.00767[V/(rad/s)]
R_m	モータ電機子抵抗	2.6[Ω]
η_e	ギアボックスの効率	0.9
η_m	モータ効率	0.69
J_{motor}	モータ慣性モーメント	3.9001×10^{-7} [kgm ²]
K_{gi}	遊星ギア比	14
K_{ge}	ギア比	5
B_{eq}	アーム粘性摩擦係数	0.004[Nm/(rad/s)]
m_{24}	ギア(24歯)重量	5[g]
m_{72}	ギア(72歯)重量	30[g]
m_{120}	ギア(120歯)重量	83[g]
r_{24}	ギア(24歯)直径	$0.5 \times 2.45 \times 10^{-3}$ [m]
r_{72}	ギア(72歯)直径	$1.5 \times 2.45 \times 10^{-3}$ [m]
r_{120}	ギア(120歯)直径	$2.5 \times 2.45 \times 10^{-3}$ [m]
m_1	重りの重量	129[g]
m_2	重りの質量	69[g]

4.2 減衰固有角周波数: ω_c

フレキシブルアームのアーム部をしっかりと固定し、その状態でアームに適切な初期値を与えて離す。アームは振動をしながらゆっくり減衰するので、その波形を計測する。計測した波形より周波数を測定し、その周波数を2π倍したものが、減衰固有角周波数となる。

4.2.1 細い一様な棒の慣性モーメント: J_{load}

全質量をM、棒の長さL、面密度λ、微小線素片ds、線素までの距離をsとする。λ= $\frac{M}{L}$ であるので、棒の慣性モーメントIは

$$I = \int_0^L \lambda s^2 ds = \lambda \frac{1}{3} L^3 = \frac{ML^2}{3} \quad (34)$$

$$J_{arm} = 0.0031 \quad (35)$$

$$J_{load} = 0.0013 \quad (36)$$

$$\omega_c = 20.9439 \quad (37)$$

$$K_{stiff} = 1.3598 \quad (38)$$

今回、アームに重りをつけてシミュレーション、実験を行う為、それをふまえて慣性モーメントを導出する。重りの質量をmとすると慣性モーメント J_{arm} は

$$J_{arm} = \frac{1}{3} ML^2 + mL^2 \quad (39)$$

また、100gの重りを付けた時の J_{load} と J_{arm} と K_{stiff} の値はそれぞれ

$$J_{arm} = 0.0177 \quad (40)$$

$$J_{load} = 0.0158 \quad (41)$$

$$\omega_c = 8.9714 \quad (42)$$

$$K_{stiff} = 1.4246 \quad (43)$$

となる。 K_{stiff} はバネ定数なので、変動しないと考えて平均値の $K_{stiff} = 1.3922$ とする。

4.2.2 一様な円盤の慣性モーメント: J_{hub}

全質量をM、面密度σとする。半径rとr+drで囲まれる微小面積素をdsとすると、円盤の慣性モーメントIは

$$I = \int dI = \int_0^a 2\pi\sigma r^3 dr = \frac{Ma^2}{2} \quad (44)$$

はとなる。よって、24歯、72歯、120歯の慣性モーメント J_{24}, J_{72}, J_{120} の慣性モーメントはそれぞれ

$$J_{24} = 1.0081 \times 10^{-7} \quad (45)$$

$$J_{72} = 5.4435 \times 10^{-6} \quad (46)$$

$$J_{120} = 4.1835 \times 10^{-5} \quad (47)$$

モータとアームの間には24歯と120歯のギアを一枚ずつ、72歯のギアを二枚介している。トータルギア比 K_g は $K_g = K_{gt} \times K_{ge} = 70$ である。また、 J_{hub} はギアとモータの慣性モーメントの和となるので

$$J_{hub} = J_{24} + 2 \times J_{72} + J_{120} + K_g^2 \times J_{motor} \times \eta_g \quad (48)$$

4.3 状態方程式

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 778.2256 & -41.0941 & 0 \\ 0 & -1276.0 & 10790 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 18993.0 \\ -488.9976 \end{bmatrix} u \quad (49)$$

$$y = [1 \ 1 \ 0 \ 0] x \quad (50)$$

5 制御系設計

出力を目標値に追従させるため、制御ループ内に積分器を1つ付加した拡大系を用いる。本報告ではモデル化誤差のうちアームの慣性モーメントの値に着目する。アームの慣性モーメント J_{arm} の範囲は $0.0031 < J_{arm} < 0.0177$ で、 J_{load} の範囲は $0.0013 < J_{load} < 0.0158$ である。運動方程式中の J_{load} と J_{arm} の不確かさを構造的に抽出し、不確かさの上下界の範囲においてロバストな制御系設計を試みる。 J_{load} と J_{arm} は行列A、行列Bに存在する。行列A、行列Bは以下のように表現できる。

$$AT = \begin{bmatrix} A & 0^{4 \times 1} \\ -C & 0 \end{bmatrix}, BT = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (51)$$

ロバスト H_2 制御に対する一般化制御系を以下の式と定義する。

$$E_d \dot{x}_d = A_d x_d + I4\omega + B_d u \quad (52)$$

$$z_2 = C_2 x_d + D_2 u \quad (53)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} BT \\ 0 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} Q^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R^{1/2} \end{bmatrix} \quad (54)$$

式 (54) 中の Q, R はそれぞれ状態変数に対する重み行列、入力に対する重み行列である。 J_{load} と J_{arm} の不確かさが下界であるときの A_d を A_{d1}, B_d を B_{d1} , 上界であるときの A_{d2}, B_{d2} とする。式 (52) を不確かさの上下界の範囲において安定化し、 H_2 ノルムを最小化する状態フィードバックゲイン K を求める LMI は式 (55)-(59) となる

$$\text{minimize} : \gamma \quad (55)$$

$$\text{subject to} : X > 0 \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} H_e(A_i X + BY) & B_i \\ B_i^T & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} X & (CX + DY)^T \\ CX + DY & W_s \end{bmatrix} > 0 \quad (58)$$

$$\text{trace}(W_s) < \gamma^2 \quad (59)$$

$$(i = 1, 2)$$

式 (55)-(59) を満たす X, Y を得ることで、所望のフィードバックゲイン K は以下の式で与えられる。

$$K = YX^{-1} \quad (60)$$

式 (54) の重み行列 Q, R に対して式 (55)-(59) の LMI を解いた結果、式 (60) のような状態フィードバックゲイン K が得られた。

$$Q = \text{diag}(1000, 1000, 1, 1, 2600), R = 100 \quad (61)$$

$$K = \begin{bmatrix} -3.8512 & -3.1720 & -0.1280 & -0.1477 & 5.0990 \end{bmatrix} \quad (62)$$

6 シミュレーション結果

設計したコントローラを用いて、重りを付けていない時、100g の重りを付けた時の 2 通りのシミュレーションを行った。求めたゲイン K を用いて、シミュレーションを行った結果を表したグラフが図 1 である。

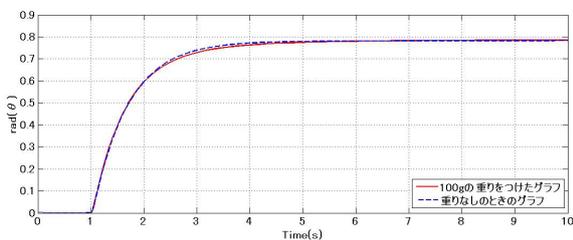


図 1 シミュレーション

シミュレーション結果より、重りなしのときも重りがある場合もほぼ同じグラフを得ることができた。よって、実験に移った。

7 実験結果

シミュレーション結果より、同様に 2 通りの実験を行った。その結果を表したグラフが次のグラフである。

実験結果より、目標値へ早く、正確に収束することがグラフからわかった。

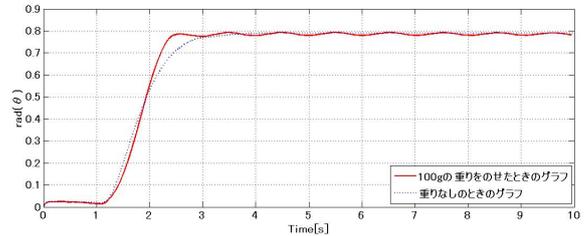


図 2 実験

8 終わりに

今回の重りを乗せたときの実験のグラフが波打っているのは、アームの先端に重りをつるしているので振り子の動きでこのような現象が起きたと考えられる。

参考文献

- [1] 井上和夫=監修 川田昌克+西岡勝博=著: 『MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学』森北出版, 東京, 2001.
- [2] 川田昌克著: 『MATLAB/Simulink による現代制御入門』森北出版, 東京, 2011.
- [3] 蛭原義雄著: 『LMI によるシステム制御』森北出版, 東京, 2012.
- [4] 水戸健詞: 最適レギュレータによるフレキシブルアームの制振制御, 南山大学数理情報学部 2010 年度卒業論文 (2012).
- [5] 松井祐介, 三輪有弘: フレキシブルアームに対する H_2 制御によるロバスト安定化, 南山大学情報理工学部 2012 年度卒業論文 (2012).