

慣性負荷変動を考慮したベルト駆動二慣性系のロバスト制御

Robust Control of belt driving two inertial systems with consideration of load inertial variation

○米沢 友孝*

正 佐藤 拓史**

正 小林 泰秀*

Tomoyuki Yonezawa*

Hiroshi Satoh**

Yasuhide Kobayashi*

*Nagaoka University of Technology : Kamitomioka-cho1603-1, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188 Japan

**Nagaoka National College of Technology : Nishikataki-machi888, Nagaoka-shi, Niigata 940-8532 Japan

Key Words: Robust Control, Gain-Scheduling Control

1. 緒言

市販のサーボモータにはオートチューニング、チューニングレスといった PID を基礎とするゲインの自動調整が広く行われている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし PID 補償器は構造が単純であるため、制御対象が低剛性、高慣性比の場合、ゲイン調整が困難になるという欠点がある。このような制御対象の例として本論文では柔軟ベルトを含むベルト駆動二慣性系の速度制御問題を考える。ベルト駆動系は低コスト、機構の自由度が高いなどの特性を持ち産業用ロボットや搬送作業など多くの場面で用いられる。その一方で、ベルト駆動系は強度、振動、騒音などの欠点も有しておりベルト駆動系の剛性に関する研究も行われている⁽³⁾。

また、先にあげたオートチューニングなどは性能保証が十分ではなく、ユーザーが調整すべきパラメータが残っているのが現状である。しかしロバスト制御を用いれば系統的な設計手法に基づき閉ループ系の性能を補償することができる。さらにゲインスケジューリングを用いればプラントの先見情報を積極的に利用し制御性能を向上させることもできる。

本論文では、慣性負荷変動を持つベルト駆動二慣性系の速度制御問題に対して、慣性モーメントをパラメータとするゲインスケジューリング(以降 GS と呼ぶ)補償器を設計し、慣性負荷変動を一つの補償器で考慮するロバスト補償器に対する有効性を実験的に検証することを目的とする。

2. 実験装置

実験装置の概要を Fig.1 に示す。装置の左端に AC サーボモータ(安川電機Σ-V シリーズ SGMV-02A)、右端に慣性負荷を設置しベルトで接続する(歯付ベルト、 $t=1771.65, z=186$)。本論文では二種類のアルミニウム円盤($\phi 45, 70, t=25$)を付け替え実験を行う(以降、慣性モーメントが小さいものを d1, 大きいものを d2 とする)。円盤の形状等から算出した負荷側慣性モーメント J_L は d1 で $2.26 \times 10^{-4}(\text{kgm}^2)$, d2 で $6.23 \times 10^{-4}(\text{kgm}^2)$, 駆動側慣性モーメントは $J_M=7.57 \times 10^{-5}(\text{kgm}^2)$ である(ベルトの質量は無視)。

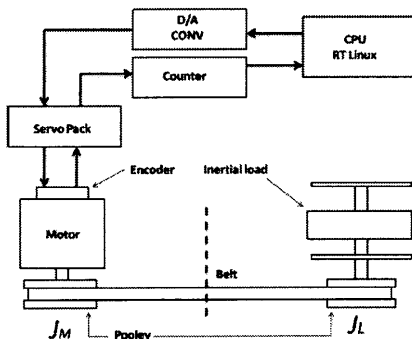


Fig.1 Experimental apparatus

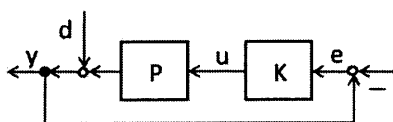


Fig.2 Closed-loop system

制御系のブロック線図を Fig.2 に示す。P は制御対象、K は補償器である。P の入力 u はモータの駆動トルク、y はモータの回転速度である。y を目標速度 r に近づけるようにモータのトルク u を制御する K を求める問題を考える。その結果外乱速度 d が y に与える影響が小さくなる。

3. プラントモデルの同定

3-1 周波数応答実験

u を正弦波状に変化させて u から y までの周波数応答実験を行う。実験結果を Fig.3 の点に示す。濃い点が d1, 薄い点が d2 の場合である。d1 の方がプラントのゲインが高く、共振周波数も高いことがわかる。本論文では簡単のため、低周波域のゲイン変動に重点を置きプラントモデルを決定する。

(a) ロバスト制御：負荷変動を未知とし、負荷変動に依存しないノミナルプラント $P0(s)$ を設計する。

(b) GS制御：負荷変動を既知とし、負荷変動に依存するノミナルプラント $P0(J,s)$ を設計する。

ロバスト制御用のノミナルプラント $P0(s)$ は d1, d2 の周波数応答実験の結果を平均したものを、部分空間同定法を用いて 5 次近似することにより求めた。この周波数応答を Fig.3 の破線に示す。ゲイン特性は二つの周波数応答実験の結果の間にあることがわかる。GS制御用のノミナルプラント $P0(J,s)$ は $P0(J,s) = \bar{J}/J \times P0(s)$ とおく。ここで $J=J_M+J_L$ とし、 $\bar{J}=J_M+(J_L(d1)+J_L(d2))/2$ とする。d1, d2 に対するノミナルプラントの周波数応答をそれぞれ Fig.3 の実線に示す。低周波数域において、周波数応答実験結果をよく近似していることがわかる。

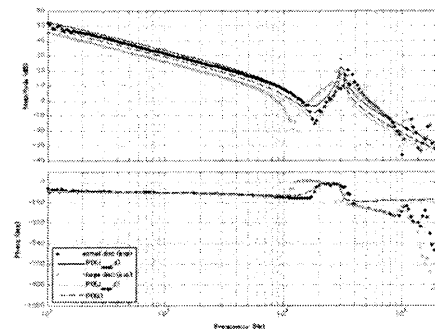


Fig.3 Frequency response of plant

3-2 モデル化誤差の見積り

モデル化誤差に対する安定性を保証するため、本論文では乗法的摂動モデル $P(s) = P0(s)(1 + W_T(s)\Delta(s))$ を導入する。モデル化誤差 $PIP0-1$ のゲイン特性を Fig.4 の濃い点(ロバスト制御)、薄い点(GS制御)に示す。それぞれの重み関数 $W_T(s)$ は以下の式で表し破線および実線に示す。慣性負荷の情報を利用することにより、低周波数域でモデル化誤差が小さくなっていることがわかる。

$$W_T(s) = k_T \frac{(s + \omega_{T1})\omega_{T2}}{(s + \omega_{T2})\omega_{T1}}$$

$$\omega_{T1} = 2\pi \times 5, \quad \omega_{T2} = 2\pi \times 2000$$

この際、 k_T をロバスト制御の場合 0.7, GS制御の場合 0.4

とした。

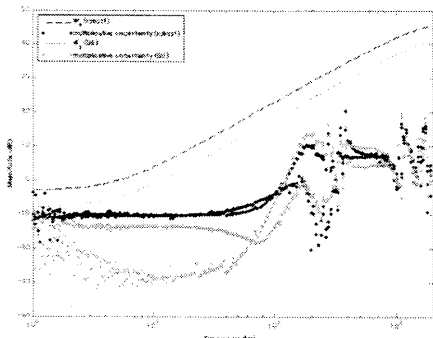


Fig.4 Magnitude plot of modeling error and weighting function

4. 補償器設計

4-1 ロバスト制御系設計

モデル化誤差に対するロバスト安定化を図るため H_∞ 制御問題 (混合感度問題) を解いて補償器を求める:

- (i) 閉ループ系が内部安定.
- (ii) 閉ループ系の H_∞ ノルムが 1 未満となる.

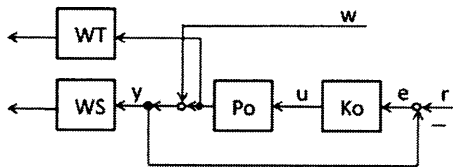


Fig.4 H_∞ control problem

ここで $P0(s)$ は前節で求めたノミナルプラント, $W_T(s)$ は重み関数である. $W_S(s)$ は性能重みで, $W_S(s) = 30 \times ws1 / (s + ws1)$ とした. 余裕を見て, 閉ループ系の H_∞ ノルムが約 0.85 となるように $ks = 30$ として $K0(s)$ を求めた.

4-2 GS制御系設計

$K(s) = J/\bar{J} \times K0(s)$ とおけばノミナルプラントの係数 \bar{J}/J が相殺され, 設計問題は慣性負荷に依存しない問題に帰着される. すなわち, 前述のロバスト制御系設計において, W_T をGS制御用のものに置き換えた問題を解いて $K0(s)$ を求める. $W_S(s)$ は上記と同様で, 閉ループ系の H_∞ ノルムが約 0.85 となるように $ks = 80$ とした.

4-3 補償器の比較

補償器のボード線図を Fig.5 に示す. d1 に対するGS補償器は, ロバスト制御と同等の性能しか期待できないが, d2 に対するGS補償器はロバスト補償器よりも大きなゲイン特性を有しており, 良い性能が期待できる. 得られた補償器は, サンプリング周期 0.25(ms) で離散化し, 制御実験に用いる.

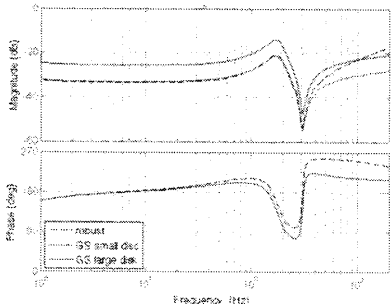


Fig.5 Bode diagram of controller

5. 速度制御実験

5-1 ロバスト制御実験

目標速度 r を 5(rad/sec) \rightarrow 10(rad/sec) \rightarrow 5(rad/sec) とステップ状に変化を与えた. 時間応答を Fig.6(d1), Fig.7(d2) に示す. d1 では二つの補償器に大きな差はないが, d2 ではGS

制御の方が立ち上がり, 定常偏差ともよい性能を示している. ロバスト補償器, GS 補償器を用いた場合のモータの駆動トルクを Fig.8 に示す(濃い: ロバスト補償器, 薄い: GS 補償器). d2 の場合, GS 制御の駆動トルクが大きく変化しており, 慣性負荷に依存したより積極的な補償器となっていることがわかる.

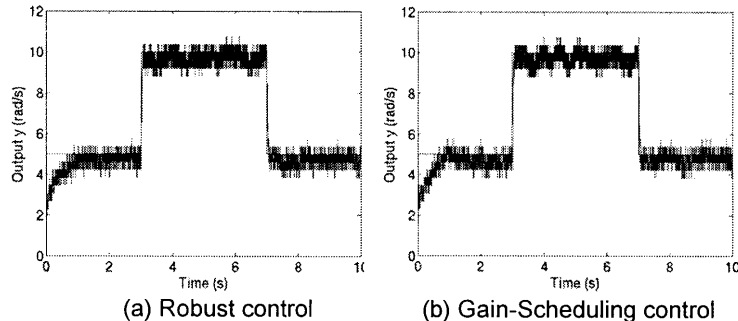


Fig.6 Time response of rotational speed y for d1

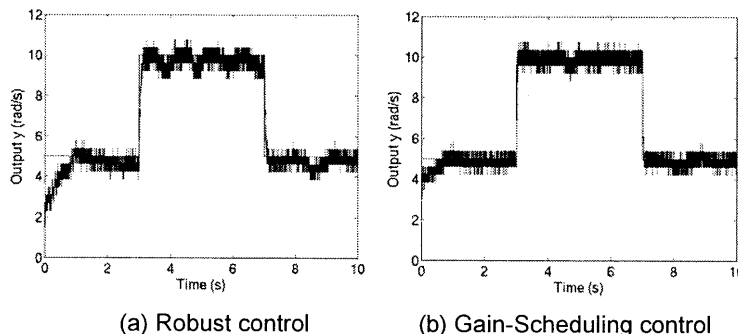


Fig.7 Time response of rotational speed y for d2

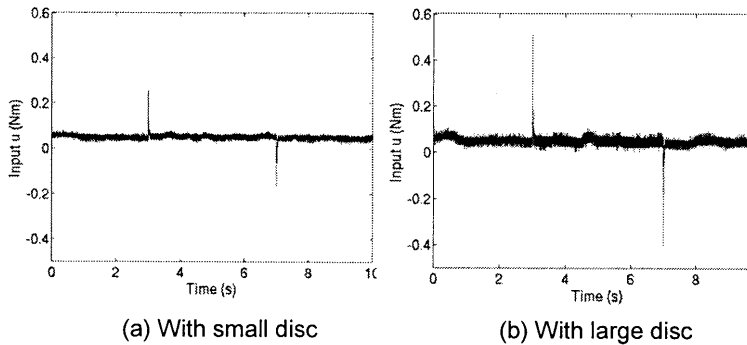


Fig.8 Time response of input torque u

6. 結言

プラントのパラメータを利用しないロバスト制御系に対して, プラントのパラメータを利用するGS制御系を構成し後者の利点を実験的に示した.

今後の課題として, 共振周波数を含む中間周波数帯域における動特性変動をプラントモデルに取り込んだ場合について検討する.

7. 文献

- (1) 安川電機株式会社: Σ -V シリーズユーザーマニュアル設計保守編 資料番号 SIJP S800000 45E
- (2) 三菱電機株式会社: 三菱電機 MR-J3-□A サーボアンプ技術資料集
- (3) 李 亨・武居直行・古荘純次・田中秀明: 「サーボ駆動系としての歯付ベルトの剛性に関する研究」, 日本機械学会論文集(C編) 69-681, pp162-169 (2003-5)