室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

ビーム上のボール位置制御

メタデータ	言語: jpn
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-03-04
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 山下, 光久, 久保田, 譲, 疋田, 弘光
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/746

ビーム上のボール位置制御

山下光久・久保田　譲・疋田弘光

Position Control of a Ball and Beam System

Mitsuhisa YAMASHITA, Yuzuru KUBOTA, and Hiromitsu HIKITA

Abstract

In this paper, the position control of a ball rolling on a grooved beam is considered.
A controller is constructed with two subcontrollers: the utmost compensator type controller and a load insensitive position servo controller.
The results of the experiment show that the controller is usefull for controlling the ball and beam system.

1．まえがき

V字形のみぞをもつビーム上のボールをビーム角度の変化でころがり移動させ，希望する位置に静止させるボール位置制御系は2重積分型不安定系の制御例として良く取り上げられている。

本研究では，このような制御系として重要な要求である次の条件

i）ステップ入力に対して行き過ぎ量なしで到達し，かつ，定常偏差を残さない。

ii）制御対象のパラメータ変動に対し制御特性が著しく変化しない。

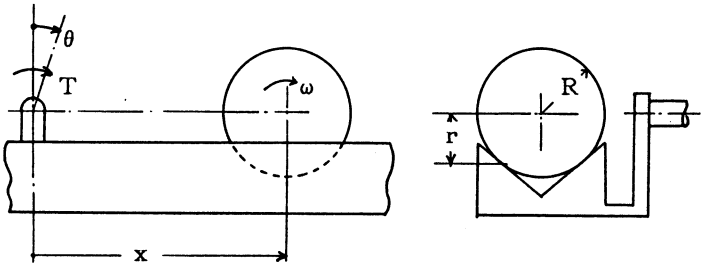
を満足する制御器の構成を検討した。

ビームは，DCサーボモータで駆動されている。これによって正確なビーム角度を与えることができる反面，モータ系に対して任意入力に追従する負荷変動に強い位置サーボ系を要求している。

本論文ではボール位置制御および付随して生じた高速位置制御サーボ系の問題を解決するため，制御対象を2つの部分に分離し，その各々に補償限界型制御器[1)]を適用した。分離することにより生じる問題は容易に解決でき，また拘束条件は各々の制御器設計に振り分けることができる。

最後に設計例と実験結果を示し，この制御方法の有効性を述べるとともに，ある種の非線形特性の存在に対しても，この方法が有効であることを確認した。

2．制御対象の記述



図－1
ビームとボール部の概略図

表－1　使用記号

M：ボール質量	R_B：ボール半径	r：ボールのころがり半径
M_B：ビーム質量	I_B：ビームの慣性モーメント	h：ビーム重心－回転軸間距離
K_T：トルク定数	K_E：誘起電圧定数	I_M：モータの慣性モーメント
D：粘性摩擦係数	L：電機子インダクタンス	R：電機子抵抗
μ：サーボ増幅器ゲイン		

ビームとボール部の概略を図-1に，使用記号の内容を表-1に示す。

『ボールはすべることなくビーム上をころがりながら移動する。』と仮定して運動方程式を求め，状態変数を$x_1=x$，$x_2=\dot{x}$，$x_3=\theta$，$x_4=\dot{\theta}$，$x_5=i$とし，平衡点（$X=X^0$）近傍で線形化を行なうと制御対象に関する(1)～(5)式を得る。

$$\dot{x}_1=x_1 \quad \cdots(1)$$

$$\dot{x}_2=g/\alpha\cdot x_3 \quad \cdots(2)$$

$$\dot{x}_3=x_4 \quad \cdots(3)$$

$$\dot{x}_4=(M\cdot g\cdot x_1-M_B\cdot g\cdot h\cdot x_3-D\cdot x_4+K_T\cdot x_5)/\beta \quad \cdots(4)$$

$$\dot{x}_5=(-K_E\cdot x_4-R\cdot x_5+\mu\cdot u)/L \quad \cdots(5)$$

ここで

$$\alpha=1+\frac{2}{5}\left(\frac{R}{r}\right)^2,\quad \beta=I_B+I_M+M(x_1^0)^2$$

βはボール位置によって変化する係数である。制御対象のブロック図を図-2に示す。

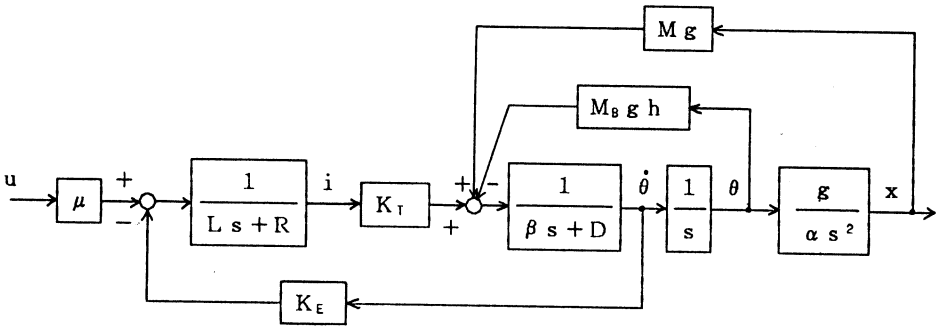
3．制御器の構成

本研究ではボール位置制御系に次の仕様を与えた。

i）ステップ入力に対して，ボールは行き過ぎなしで，定常偏差を残さない。

ii）制御対象のパラメータ変動に対して制御特性が著しく変化しない。

この条件を満たす制御系の構成を以下に述べる。



図－2　制御対象のブロック図

まず，図-2の制御対象を2つの部分に分離して考える。

a）ビーム・ボール系（図-2の$\theta-x$間の部分）

b）電気サーボ系　　（図-2の$u-\theta$間の部分）

このとき図-2のxおよびθからモータへトルク負荷として作用する径路は，電気サーボ系への外乱トルクと考える。

次に，分離された各々の系に対して補償限界型制御器を用いた制御系を作る。各々の制御器は次のように得られる。

3.1　ビーム・ボール系の制御器

ビーム・ボール系で観測できる状態量は，ボール位置のみであるから，I型で最少次数の補償限界型制御器は図-3となる。

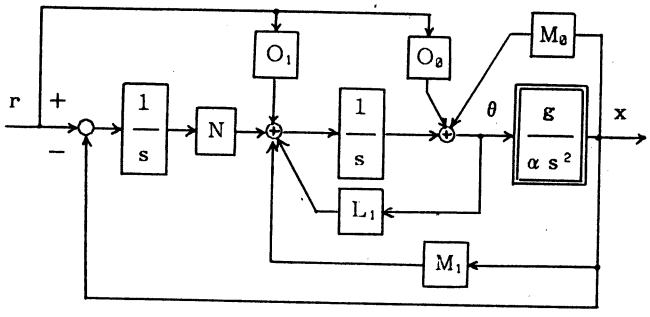
このとき指定可能な$r-x$間の伝達関数$G_{rx}(s)$は，(6)式である。

$$G_{rx}(s)=\frac{P_1P_2P_3P_4(s+s_0)(s+s_1)/s_0s_1}{(s+P_1)(s+P_2)(s+P_3)(s+P_4)} \tag{6}$$

ここで，$P_1\sim P_4$は指定極，s_0，s_1は指定零であり，仕様i）および運動の拘束条件を満たすように定めれば良い。

3.2　電気サーボ系の制御器

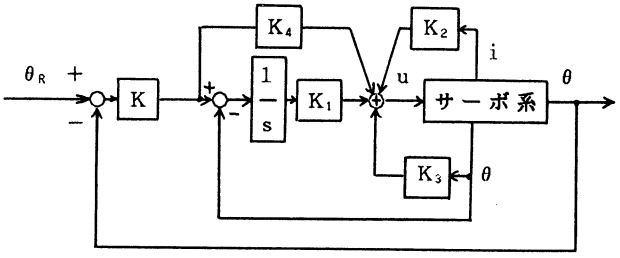
負荷変動を考慮したサーボ系の設計法は各種提案されているが[2]，本研究では低感度高速電気サーボ系の設計法[3]を用いた。



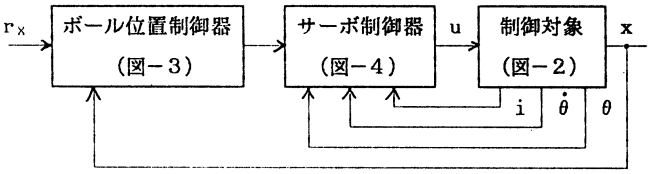
図－3　ビーム・ボール系の制御器

この設計法は電気サーボの速度制御系にI型の補償限界型制御器を用い，その外側に定ゲインフィードバックの位置制御系を作るものである。図-4にその構成を示す。

図-4のK_1，K_2，K_3は速度制御系で指定する極と零によって定まる。この指定極および零を虚軸から左へより遠くに指定することによって，Kによって定まる代表極をより低感度にすることができる。



図－4　低感度高速電気サーボ系



図－5　制御器の構成

3.3　制御器の構成

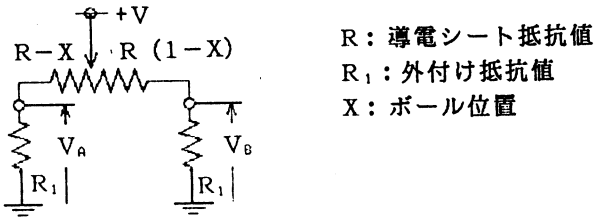
制御系全体の構成を図-5に示す。3.2におけるゲインKを3.1で指定した極に比較して大きく設定すれば，サーボ系の動特性が制御系全体に及ぼす影響を非常に小さくすることができる。

4. 実験装置

ビームの全長は，1mである。DCサーボモータは減速比1/50のハーモニックドライブを介してビーム回転軸と結合している。実験装置の各定数を表-2に示す。ビーム角度はポテンショメータにより，ビーム角度はモータ軸のタコジェネレータから，電機子電流はサーボ増巾器の出力部に挿入した抵抗の端子電圧から得ている。ボール位置は次の方法で検出している。

表－2　制御対象の各係数値

M：0.7365(Kg)	R_B：0.0158(m)
r：0.01368(m)	M_E：0.7365(Kg)
I_B：3.559×10^{-2}(Kg·m²)	h：0.0236(m)
K_T：3.234(N·m/A)	
K_E：6.49×10^{-2}(V·sec/rad)	
I_M：0.098(Kg·m²)	L：1.7×10^{-3}(H)
R：1.3(Ω)	μ：4.5



図－6　ボール位置検出部の等価回路

ビーム表面の一方に電極材を，他

方に導電シートを取り付ける。ボールは両表面を電気的に短絡しながらころがる。導電シートの両端電圧（V_A，V_B）を検出端とする図-6の回路を構成する。

ボールの最大移動範囲を±1で表わすと，ボール位置Xは

$$X=\frac{1}{2}-\frac{R+2R_1}{2R}\frac{V_A-V_B}{V_A+V_B} \tag{7}$$

である。この値は割り算器を含む簡単な演算回路を作ることによって得られる。ボールとシート間の接触抵抗は(7)式に現われていない。かつ，ビーム上の全範囲において線形特性を得ることができるのが本検出方法の特長である。

5．設計例と実験結果

5.1　設計例

これまでに述べた手順に従った設計例を示す。計算には，補償限界型制御器の設計法を含むCADシステム[4)]を用いている。

i）ビーム・ボール系の制御器

$r-x$ 間の希望伝達関数 $G_{rx}(s)$ を

$$G_{rx}(s)=\frac{0.16}{(s+0.4)^2(s+1.0)^2} \tag{8}$$

とする。これは，ボールがすべらずころがるための拘束条件（$|\ddot{\theta}|\leq 0.81^{rad}/_{sec}$）を満足している。制御器の各係数は，

$N=0.02512$，$M_0=-0.4333$，$M_1=-0.1758$，$L_1=-2.8$，$O_0=O_1=0.0$

である。

ii）電気サーボの制御器

ハーモニックドライブの振動が生じない範囲で，できるだけ高速の系とする。次のように指定する。

$K=10$

速度制御系の希望伝達関数 $G_\theta(s)$

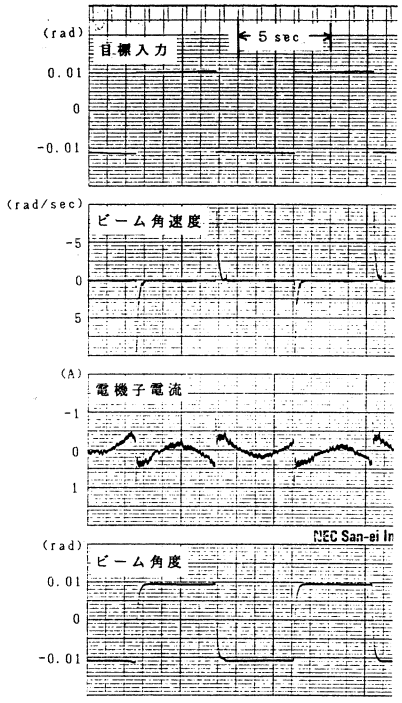
$$G_\theta(s)=\frac{200^3}{(s+200)^2} \tag{9}$$

このとき，位置サーボ系に振動極は生じない。制御器の各係数を示す。

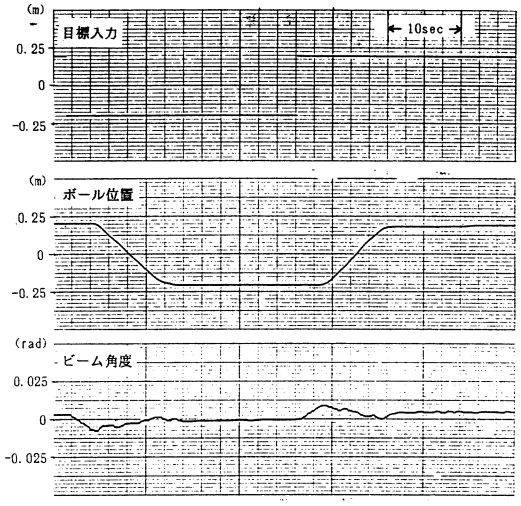
$K_1=19.9$，$K_2=0.1118$，$K_3=-0.9572$，$K_4=0$

5.2　実験結果

5.1で得られた各係数値にもとずいて制御器をアナログ計算機上に実現し実験を行なった。



図－7　電気サーボ系のステップ応答



図－8　ボール位置のステップ応答

i）電気サーボ系の位置制御

図-4の制御系に±0.01*rad* のステップ入力を与えた結果を図-7に示す。この結果はシミュレーションによる予測と良く一致している。

さらに，系の負荷変動範囲内でその影響をほとんど受けないことが確認された。

ii）ボール位置の制御

実験結果の代表例として，ボールを±20*cm* の位置に指定した場合の結果を示す。(図-8)

図は希望した制御が行なわれていることを示している。なお，目標値の切換えに対しボールの移動開始が遅れているのは，ボールの運動に非線形摩擦（始動ころがり摩擦）が存在しているためである。この摩擦の存在にもかかわらずボールは目標位置で静止していることがわかる。

6．あとがき

2重積分型不安定系の制御として，ビーム上のボール位置制御を行なった。

制御器は次のように構成した。

まず制御対象をビーム・ボール部と電気サーボ部に分離し各々に補償限界型制御器を用いた制御系を構成し，次にそれらを直列結合する。

実験を行ない制御器の有効性を確認した。制御対象のモデリング時に考慮していない非線形ころがり摩擦に対しても，本方法は有効であった。

参考文献

1）R. Tagawa：On the Compensation in Llnear Feedback Control Systems. IFAC World Congress（1981）
2）大槻ほか：負荷無反応形電気サーボ機構　計測自動制御学会論文集　Vol. 21　No. 10
3）白　ほか：低感度高速電気サーボ系の基礎的研究　同上　Vol. 19　No. 8
4）余湖ほか：小規模計算機を用いた制御系のCADシステムの試作開発
計測自動制御学会北海道支部講演会（1983）