レーザーを用いた機械系の軌道制御[†]

三 平 満 司*・古 田 勝 久*

Digital Control of Three-Dimensional Linear Motion Mechanical System Using Laser

Mitsuji SAMPEI* and Katsuhisa FURUTA*

This paper is to propose a method to control a mechanical system to move along laser beam, which may be useful for the teaching of the movement to robots. The mathematical model of the controlled system is constructed so that one of the coordinate corresponds to the laser beam, and the control problem is divided into the control along the beam and that of the deviation from the beam. Two controllers to track ramp are designed and practically realized by a minicomputer for these controls. They work satisfactorily when they are used for the control of three-dimensional linear motion mechanical system.

The sensor to measure the direction of and the deviation from the laser beam is also experimentally constructed and used for the experiment.

Keyword : application

1. はじめに

近年のロボット制御の発達にはめざましいものがあり, point to point や軌道制御に関して多くの論文が提出されている¹⁾. しかし, ロボットを手動により自由自在に, かつ容易な方法で動かすということはロボットのティーチングやメンテナンスのために必要なことであるにもかかわらずその方法に対する提案はほとんどなされていない.

本論文では人がレーザービーム発光源を用いてロボットを誘導する方法を提案し, その第一歩としてレーザービームのビームに沿って前後に制御対象を動かす系を設計した. 制御則は追従線と制御物体の偏差をセンサで測定し, それをフィードバックしていく意味で

自律的なならい制御²⁾に近いものである. しかし多くのならい制御^{2), 3)}においては追従線の進行方向の測定誤差による非干渉化誤差, またそれに伴う追従性能の劣化を考慮していないのに対し, ここでは追従線の方向の測定に誤差があっても偏差なく追従するロバストな系を設計した. その際, 制御対象のモデルの座標の基底の一つをレーザービームの方向と一致させることにより制御をビーム方向とビームに直交する平面内の二つに分解し, それぞれにランプ追従型制御系を構成することにより制御系設計を容易に行えることを示した. また実際にセンサの試作ならびに直交座標型アクチュエータによる制御実験により提案する方法の有効性を確認した. ここで用いたセンサは他の多くの光学的センサ^{4)~6)}が視覚(外部環境の認識)を目的としているのに対し, レーザービーム自体の情報を認識しようとするものであり, 他のセンサとは目的を異にしている. また構造が簡単で小型軽量であり, 複雑な計算を必要としないので高精度である. また原理的には視覚センサにも応用できるものである.

このようなレーザービーム追従系は他のアクチュエータが制御しようとする物体から離れた所にある測定器から位置を間接的に求めるのと異なり, レーザービームから物体の位置情報を直接得ることができるため, レーザービームの使用法によっては高精度の直線追従の可能性をもっている.

2. 制御対象

Fig. 1 に本報告で用いた制御対象である3次元直交座標型アクチュエータを示す. これは著者らがラジコンヘリコプタのトレーニングシミュレータ⁷⁾に用いたもので水平に動く台車とその上で上下できるエレベータの動きがすべて地上に固定されたモータにより行われるという特徴をもっている. このシステムではタイミングベルトにより動力が伝達され, 位置は動力源であるモータの回転角によって測定されるためパッ

† 第26回自動制御連合講演会で発表(昭58・11)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo
(Received August 15, 1983)
(Revised December 22, 1983)

Fig. 1 Structure of plant

クラッシュなどの機械的な誤差により位置制御が高精度に行えなかった。そのため空間内を与えられた直線によって高速に、かつ高精度で動くことは困難であった。そこで本研究では制御量であるエレベータの位置にレーザー光の受光装置（センサ）を置き、台車がレーザービーム上を動くような追従制御系を構成した。台車は姿勢が固定しているため以下に述べるように赤外 LED を用いてセンサ自体にレーザービームの方向による姿勢制御を行った。

3. センサ

3.1 センサの概要

レーザービームには以下の二つの情報が含まれている。

- (1) 追従直線の方角（ビームの方角）
- (2) 追従直線と制御点の偏差（ビームに直交する平面内におけるビームの受光点と制御点の偏差）

これらの情報を得るために今回試作したセンサの構成を Fig. 2 に示す。このセンサは三つの部分からなっている。

- (1) センサ面内におけるレーザービームの受光点を知るためのビーム・センサ。
- (2) ビーム・センサの法線とレーザービームのな

Fig. 2 Structure of sensor

Fig. 3 Configuration of beam sensor

す角を測定するためのアングル・センサ。

- (3) ビーム・センサの法線方向とレーザービームの方向を一致させ、XYZ 絶対座標系におけるビームの方向を測定するためのポテンショメータ付ジンバルと駆動モータ。

以下それぞれの部分の詳細を示す。

3.2 ビーム・センサ

ビーム・センサはセンサ面内におけるレーザービームの受光点を測定するものである。2次元の光位置を測定するため主な素子としてポジション・センサ⁸⁾(付録)を用いた。ビーム・センサの原理図を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 において ξ 方向を考える。端子電流 $I_{\xi 1}$, $I_{\xi 2}$ は背景光による出力 $I_{\xi 1B}$, $I_{\xi 2B}$ とレーザービームによる出力 $I_{\xi 1L}$, $I_{\xi 2L}$ の和であり (3.1) 式で表わされる。

$$\begin{cases} I_{\xi 1} = I_{\xi 1B} + I_{\xi 1L} \\ I_{\xi 2} = I_{\xi 2B} + I_{\xi 2L} \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで背景光はビーム・センサの全面に当たるとすれば各端子の背景光による出力は同じである。よって次式が成立する。

$$I_{\xi 1B} = I_{\xi 2B} \quad (3.2)$$

そのため (A.3) 式の分子は

$$I_{\xi 1} - I_{\xi 2} = I_{\xi 1L} - I_{\xi 2L} \quad (3.3)$$

となり背景光と無関係となる。また (A.3) 式の分母はレーザービームの出力が安定であることから一定と考えてよく、Fig. 3 の構成により受光点を知ることができる。今回試作したビーム・センサの有効受光面積は 400 mm^2 である。

3.3 アングル・センサ

Fig. 4 Configuration of angle sensor

Fig. 5 Circuit connection for angle sensor

アングル・センサは前述のビーム・センサの法線とレーザービームのなす角を測定するものである。原理図を Fig. 4, 回路構成を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 に示すようにレンズを用いて赤外 LED の光をポジション・センサ上に結像させ、赤外 LED とアングル・センサの中心を結ぶ線と、アングル・センサの中心線とのなす角をポジション・センサ上の平面位置に変換することにより測定する。このとき

- ・ LED 発光源がレーザー発光源の十分近くにある。
- ・ ビーム・センサの法線方向とアングル・センサの中心線方向が一致している。
- ・ レーザービームがアングル・センサの十分近くを通っている。

ならば、アングル・センサの出力は近似的にビーム・センサの法線とレーザービームのなす角を示す。

今回試作したアングル・センサの仕様は以下である。

- ・ LED 発光 出力 240 mW
点灯周波数 5 kHz
- ・ 測定可能角 $\pm 15^\circ$
- ・ 測定可能範囲 LED-センサ間 0.5~4 m

3.4 ジンバル部

ジンバルはビーム・センサの法線とレーザービームの方向を一致させる目的と、レーザービームの XYZ 絶対座標系における方向を知る目的で用いる。実際にはアングル・センサの出力を零とするようなサーボ系をジンバルに組む。

Fig. 2 においてジンバルはモータにより動かされる。モータはポテンショメータを内蔵して回転角

Fig. 6 Control configuration for sensor's gimbals

θ, φ を測定できる。サーボ系はステップ追従型とし、Fig. 6 にそのブロック線図を示す。Fig. 6 に見られるように偏差はアングル・センサの出力で与えられる。

さて、ビームセンサの中心は θ, φ 軸上にあり、ジンバルが動いてもビームセンサの中心は不動となるようにしてある。またビームの方向はジンバルの姿勢角 θ, φ により測定される。この際ジンバルの動きはアクチュエータの動きに対して十分早いものとし、その動特性は無視する。

4. 制御系の設計

4.1 制御対象のモデル

Fig. 2 に示した 3 次元直交座標型アクチュエータの状態方程式は図に示した XYZ 絶対座標系においてつぎのように表わされる。 $x^T = (x, y, z)$ をエレベータの絶対位置、 u を三つのモータの入力として、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u \quad (4.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -4.9 & 0 & 0 \\ 0 & -2.6 & 0 \\ 0 & 0 & -4.9 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 & -0.8 \\ -2.0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8 & -0.7 \end{bmatrix}$$

4.2 座標変換

XYZ 絶対座標系のほかに $\alpha\beta\gamma$ 回転座標系を用いる。 $\alpha\beta\gamma$ 座標系は以下の方法により Fig. 7 のように決定される。

- (1) XYZ 座標系において Z 軸を中心に θ 回転し、Y 軸に対応する軸を β 軸とする。
- (2) β 軸を中心に φ 回転し、X 軸に対応する軸

Fig. 7 Base coordinate

を α 軸, Z 軸に対応する軸を γ 軸とする.

- (3) このときの α 軸はレーザービームの方向と一致するように θ, φ を決定する.

このような座標の回転 θ, φ は前述のセンサのジンバルの θ, φ と対応する. またビーム・センサの中心から β, γ 方向に対応するように ξ, η 座標を作ればこの座標は θ, φ に無関係にビーム・センサ上に固定された座標となる.

$\alpha\beta\gamma$ 座標を $\alpha^T=(\alpha, \beta, \gamma)$ としたとき座標の変換はつぎのように表わされる.

$$x = T\alpha \quad (4.2)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \theta & -\sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta & \cos \theta & -\sin \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

この T は正規直交変換であるから $T^{-1}=T^T$ である.

4.3 状態方程式の変形

レーザービーム追従という制御問題は本質的に二つの問題に分解できる.

- (1) レーザービームに追従させたい点 (Fig. 7 で はビーム・センサの中心 S 点) を含みビームに直交する平面 (同, ビーム・センサ面) において, ビームの受光点 (同, B 点) と追従させたい点 (同, S 点) の間の偏差 (同, ビーム・センサの出力) を零にする.

- (2) 上記の平面を平面の法線方向 (同, n 方向) つまりビームの方向に一定速度で進める.

前節で述べた座標変換は (1) を β, γ 方向に, (2) を α 方向に限定することができる. しかし状態方程式が $\alpha\beta\gamma$ 方向で干渉したり, 回転角 θ, φ によって変化するのでは不都合である. そこでつぎに示すような状態方程式の変形を行う.

(4.1) 式に (4.3) 式のようなフィードバックを行い (4.4) 式を得る. これは系が等方性をもったことになる.

$$u = B^{-1}[-w_n^2 I, -A - 2\zeta w_n I] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + u_2 \quad (4.3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -w_n^2 I & -2\zeta w_n I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u_2 \quad (4.4)$$

この状態方程式に対して座標変換を行えば (4.5) 式を得る.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & I \\ -w_n^2 I & -2\zeta w_n I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T^{-1} B \end{bmatrix} u_2 \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -T^{-1}(2\zeta w_n \dot{T} \alpha + \ddot{T} \alpha + 2\dot{T} \dot{\alpha}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{T}^{-1} x + T^{-1} \dot{x}$$

これに対し (4.6) 式のような入力変換を行い (4.7) 式を得る.

$$u_2 = B^{-1}[T u_3 + (2\zeta w_n \dot{T} \alpha + \ddot{T} \alpha + 2\dot{T} \dot{\alpha})] \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -w_n^2 I & -2\zeta w_n I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u_3 \quad (4.7)$$

この状態方程式は変換行列 T に見かけ上無関係であり $\alpha\beta\gamma$ 方向に非干渉化されている. そのため設計は各軸ごとに行えばよい.

実験では (4.3) 式のフィードバックをマイナー的に Op. Amp. 回路で構成した. また $w_n = 6.13$ [rad/s], $\zeta = 0.4$ とした.

4.4 制御系の設計

前節で示したように系は $\alpha\beta\gamma$ 方向に非干渉化されているため設計は各軸ごとに行えばよい. つまりつぎの式を考えればよい.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -w_n^2 & -2\zeta w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.8)$$

設計は Davison の手法⁹⁾ によりサーボ系を構成する. この際ビーム方向の測定に誤差のある場合を考慮に入れて α, β, γ 全軸ともランプ入力追従型の系を構成する. Davison によればつぎの拡大系を考えればよい.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -w_n^2 & -2\zeta w_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.9)$$

この拡大系に対し状態フィードバックを極配置問題の解として与える. 実験ではつぎのように極配置した.

$$\alpha \dots \dots -3 \pm 1.5j, -5, -6$$

$$\beta, \gamma \dots \dots -4 \pm 2j, -6.5, -7$$

このサーボ系のようすを Fig. 8 に, また座標変換も含めた全体の補償器のようすを Fig. 9 に示す.

5. 実験

制御系の構成を Fig. 10 に示す. 主な制御装置と

Fig. 8 Control configuration

Fig. 9 Control configuration

Fig. 10 Configuration of laser beam following system

して日本データゼネラル社のミニコン MP-200 を用い、A/D、D/A コンバータにより入出力を行う。MP-200 の入力には各部モータの回転角、回転速度、ビーム・センサの出力、ジンバルの回転角である。

制御は慣性項を無視し ($\dot{T} = \ddot{T} = 0$) サンプルングインターバル 13 (m/s) で行った。結果を Fig. 11~Fig. 14 に示す。

Fig. 11; 制御物体の軌跡を描いたもので、どの方向にも追従可能であることがわかる。

Fig. 12; α 方向の追従のようすを示す。図中で α_r は目標値を示している。

Fig. 13; ビーム・センサの出力である。この図からレーザービームが中心にくるように制御されている

Fig. 11 Trajectory of plant position

Fig. 12 Ramp response for α axis

ようすがわかる。

Fig. 14; ジンバルの θ 方向の測定に 7 度の定常誤差があった場合のビーム・センサの出力 ξ と計算機内部で計算している β のようすを示している。このよ

Fig. 13 Output of beam sensor

Fig. 14 Comparison with ξ and β

うに β 方向のランプ状外乱に対しても偏差なく追従している。

6. おわりに

本報告ではレーザービームを用いてアクチュエータを誘導する方法を確立する第一歩としてレーザービームに沿って動く系を制御する方法を提案した。特にレーザービーム方向を制御対象モデルの座標の基底の一つと一致させることにより、ビーム方向とビームに直交する平面内の制御を分けて考えることができることを示し、それぞれの制御系構成法を述べた。さらに、この提案する方法を実際の3次元空間を動く機構の制御に適用し、その有効性を確かめた。

最後に本研究を行うにあたりいろいろお手伝いいただいた熊本大学の汐月哲夫氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Brady, J.M. Hollerbach, T.L. Johnson, T. Lozano-Perez and M.T. Mason: Robot Motion, MIT Press (1982)
- 2) 花房, 吉川, 中村: 関節形ロボットの自律的な制御, 計測自動制御学会論文集, **18-11**, 1110/1116(1982)
- 3) 浅田, 花房: 工業用ロボットの空間的な制御, 計測自動制御学会論文集, **16-5**, 740/746 (1980)
- 4) 松島, 片桐: 相関を利用した工業ロボットの簡単な眼に関する基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, **8-1**, 51/58 (1972)
- 5) 長谷川: ロボットの作業環境のモデリングとモニタリング, 計測自動制御学会論文集, **17-5**, 589/595 (1981)
- 6) Okada: A Short-Range Finding Sensor for Manipulators, Bulletin ETL, **42-6**, 492/504 (1978)
- 7) 汐月, 古田, 岡崎: MFS を用いたラジコンヘリコプタ用トレーニングシミュレータの設計, 計測自動制御学会論文集, **19-7**, 574/581 (1983)
- 8) 袴田: 新半導体光位置検出器と応用, 電子技術, **12**, 43/50 (1970)
- 9) Davison: The Output Control of Linear Time-Invariant Multivariable System with Unmeasurable Disturbance, IEEE Trans. on Automatic Control, **AC-17-5**, 621/629 (1972)

《付 録》

ここではビーム・センサ, アンクルセンサに用いられている光半導体位置検出素子 (ポジション・センサ) について説明する. Fig. A.1 に1次元ポジション・センサの原理図を, Fig. A.2 に等価回路を示す.

Fig. A.1 のようにポジション・センサに光が照射されるとその位置に Fig. A.2 に見られるように電流源が接続された形となる. この電流は X, Y なる対向した電極に I_x, I_y として流れるのであるが P 形抵抗層を通るため照射位置から電極までの距離に反比例して分割出力される.

$$I_x = I_L \frac{L - Z}{L} \quad (\text{A.1})$$

$$I_y = I_L \frac{Z}{L} \quad (\text{A.2})$$

これらの式より次式を得る.

$$\frac{I_x - I_y}{I_L} = \frac{L - 2Z}{L} \quad (\text{A.3})$$

ここで $I_L = I_x + I_y$ あり照射光の強さに比例する量である. よって (A.3) 式によって照射光の強さの変化に無関係に照射位置を知ることができる. 2次元のポジション・センサは以上の原理を2次元に拡張したものである.

Fig. A.1 Position sensor

Fig. A.2 Equivalent circuit