

制御設計のためのがたを持つベルト駆動ロボットのモデリング

Modeling of Belt Driving Robot With Backlash for Control Design

正 浜松 弘(北九州高専)

○ 楠根 大央(北九州高専専攻科)

Hiroshi HAMAMATSU

Kitakyushu National College of Technology, Shii, Kokura-minami-ku, Kitakyushu

Hirohisa KUSUNE

Kitakyushu National College of Technology

Keywords: belt drive, backlash, control, modeling

1. 緒論

半導体製造工程のウェハ搬送は、動作が限定されるため、ベルト駆動のロボットが利用されている。ウェハの生産向上のためには、搬送用ロボットの高速・高精度化が求められている。しかし、ベルトは、ゴムの老朽化や張力のゆるみによりがたが生じることがあるため、位置決め精度が低下する。

本研究では、がた系を持つ装置を制御によって、位置決めの高精度化を行う。本報では、がた系の制御法の検討とモデル化を行う。

2. モデル化

本研究で対象とするベルト駆動ロボットを図1に示す。また、ベルト駆動ロボットのアーム内部の駆動部を図2に示す。本ロボットは、ベルト張力のゆるみの影響により、アームの角度にして約3度のがたが生じている。それにより位置決め精度が低くなっている。がたはその特性を線系方程式で表現できない非線形である。これは重ね合わせの原理が成立しないので解析が困難となっている。がた系の制御を行うに当たり、まずがたのモデル化と対象装置のモデル化を行う。本研究では記述関数を用いてがたのモデル化を行う。記述関数は

$$N(a) = k\{1 - q(\mu)\} \tag{1}$$



Fig1. Belt driving robot



Fig2. Belt and pulley in arm

$$q(\mu) = \frac{2}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu} \sqrt{1 - \frac{1}{\mu^2}} \right\} \tag{2}$$

とする<sup>[1]</sup>。対象ロボットのアーム部を質量、ベルト部をばねとダンパとし、モデル化したものを図3に示す。システムパラメータは以下のとおりとする。

$m$ :質量       $P$ :外力       $k$ :ばね定数  
 $d$ :減衰係数    $\mu$ :がたの大きさ    $x$ :変位

この振動系の運動方程式は以下ようになる。

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kR(x; \mu) = P \tag{3}$$

ここで  $R(x; \mu)$  は図3と式(4)で表される区分線形関数である。

$$R(x; \mu) = \begin{cases} R_1(x) = x & (x \geq 0) \\ R_2(x) = 0 & (-\mu < x < 0) \\ R_3(x) = x + \mu & (x < -\mu) \end{cases} \tag{4}$$

3. シミュレーション

前述の記述関数を用いてがたを周波数伝達関数に置き換え、シミュレーションを行う。シミュレーションは、がたがない場合 ( $\mu = 0$ ) と、 $\mu = 2$  の場合と、 $\mu = 4$  の場合の三通りの単位ステップ応答と  $\mu = 2$  の場合の  $-1$  入力のステップ応答のシミュレーションを行う。シミュレーション結果を図5に示す。

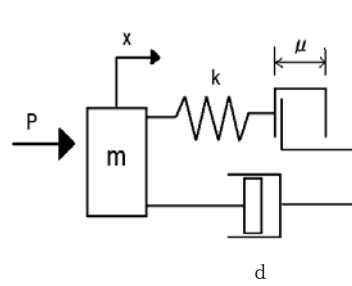


Fig3. Modeling of belt driving robot

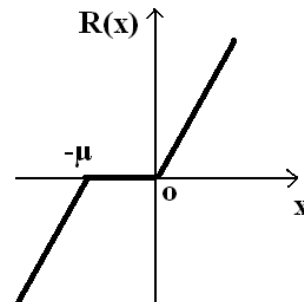


Fig4. Function with dead zone

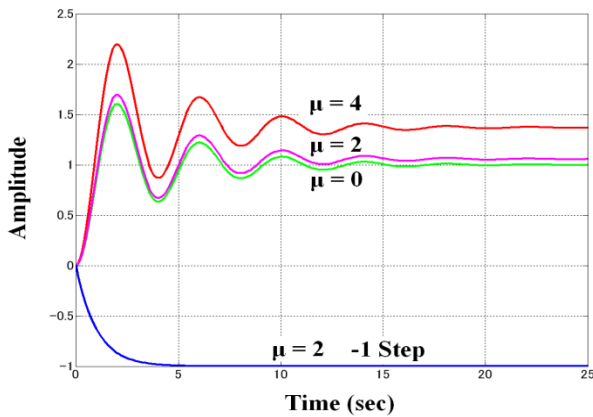


Fig5. Simulation result

がたがある場合はない場合と比べて定常偏差が発生していることがわかる。この結果より、がたがある場合は位置決め精度が低下する。また、がたの大きさ  $\mu$  を  $\mu = 2$ ,  $\mu = 4$  と大きくするほど定常偏差が大きくなることがわかった。また、がたの大きさ  $\mu = 2$  で  $-1$  のステップ入力を入れた場合、がたの存在によりばねの振動が伝達されなかったことがわかった。

がた系は非線形の性質を持っているため、非線形制御の性質をもつ制御方法が有効と考えられる。そこで、非線形制御の性質を持つスライディングモード制御<sup>[2]</sup>を用いてがたを持つ制御対象に対する制御法の検討を行う。図3のがたを持つ制御対象についてスライディングモード制御を用いたシミュレーションを行った。入力を左方向に与え、がたの大きさ  $\mu$  を  $\mu = 1$  として変位  $x$  を  $-1$  で安定させる制御を行った。

制御対象の状態方程式と初期値は

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$[x_1(0) \quad x_2(0)]^T = [0.5 \quad 1]^T$$

とする。位置決め制御系であるため、目標値  $\theta_R$ 、出力  $\theta_y$  の差の積分値  $z$  を付加した拡大系を構成する。

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \theta_R \quad (6)$$

$$z = \int_0^t (\theta_R - \theta_y) dt$$

$$\theta_y = cx_1$$

式(6)を

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{E}\theta_R \quad (7)$$

とおき、切換線を

$$\mathbf{S} = [S_1 \quad S_2 \quad I] = [1 \quad 2 \quad 1] \quad (8)$$

とすると、切換関数は

$$\sigma = \mathbf{S}\mathbf{x} = [S_1 \quad S_2 \quad I] \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

であり、制御入力

$$u = -(\mathbf{S}\mathbf{B})^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{S}\mathbf{E}\theta_R) - G \frac{\sigma}{|\sigma| + \varphi} \quad (10)$$

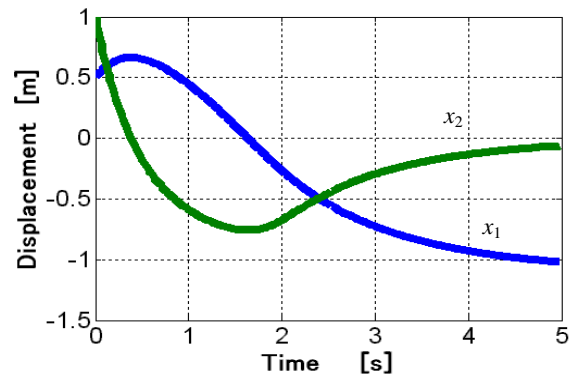


Fig6. SMC Simulation

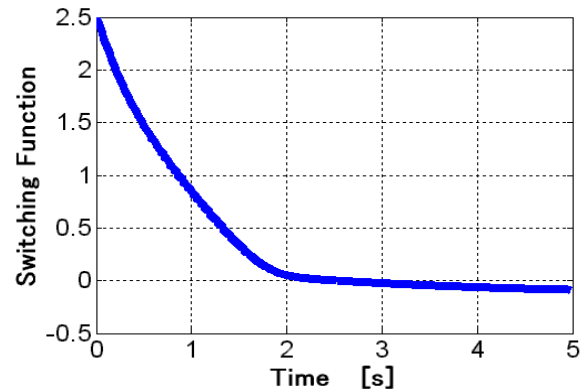


Fig7. SMC Switching function

となる。 $G$  はフィードバックゲインで、10 と  $-10$  を切換関数により切替える。 $\varphi$  はチャタリング防止の平滑関数である。

図6に変位  $x(=x_1)$  とその速度  $\dot{x}(=x_2)$  の結果を示す。また図7に切換関数の値を示す。

スライディングモード制御を用いることにより、がたを持つロボットモデルを制御することができた。また、切換関数が0になっていることからスライディングモードが発生していることが確認できる。スライディングモード制御の有効性を確認した。

#### 4. 結論

がたを持つベルト駆動ロボットのモデル化を行い、記述関数を用いてがたを周波数伝達関数に置き換える制御法の検討とスライディングモード制御を用いてがたを持つ制御対象を制御する方法の検討を行った。

がた系に対してスライディングモード制御の有効性を確認した。今後は、ロボットのモデル詳細化、そのモデルでのスライディングモード制御の設計、実機での検証を行う。

#### 参考文献

- [1] 菅井齊喜・得丸英勝・花房秀朗・吉川恒夫・和田力, 精密工学講座9 制御工学(1979), コロナ社
- [2] 野波健蔵・田宏奇, スライディングモード制御—非線形ロボット制御の設計理論—(1994), コロナ社