

ベルト駆動ロボットにおけるPI制御とIP制御の振動抑制効果

浜松 弘・黒岩 康文*

The effect of vibration control for PI control and IP control

Hiroshi HAMAMATSU and Yasufumi KUROIWA

Abstract

This paper describes the control techniques for the mechanism with a low rigidity. The mechanism is the belt driving robot. As the belt is weak, the residual vibration is generated in this robot while operating. The PI (proportional-integral) control and the IP control are used as a control technique. Velocity responses and position responses are calculated, and the effects of the vibration absorption are compared. IP control is better than PI control for the flexible robot arm, because the arm is operated smoothly without overshooting.

Keywords : Vibration, Robot, Mechatronics, Simulation

1. 緒論

産業用ロボットは、生産性向上のため、高速高精度が要求される。半導体製造工程のウェハ搬送では、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る。ベルトは、剛性が低いため、位置決め時に残留振動が発生する。さらに搬送するウェハのサイズが大型化しているため、搬送用エンドエフェクタの慣性が大きくなり、振動発生しやすい構造となっている。振動を抑制するための制御設計を行う。本報では、PI(比例積分)制御とIP(積分比例)制御^{(1),(2)}の特性を比較し、柔軟構造であるベルト駆動ロボットに対する両制御の振動抑制効果をシミュレーションで検証する。

2. 実験装置

本研究で制御対象とするベルト駆動ロボット^{(3),(4)}と制御装置の構成を図1に示す。ベルト駆動ロボットは、アームの内側に駆動用のベルトを通しており、アームの構成は2軸である。グランド側から第1軸、第2軸、エンドエフェクタの構成である。各軸の駆動はサーボモータで行う。制御は、PCにおいて制御プログラムと制御パラメータと指令を作成する。それらをサーボコントローラに送る。指令値を基に制御プログラムを制御パラメータにより演算を行い、トルク指令電圧を算出し、サーボアンプへ出力する。サーボモータは、サーボアンプからのトルク指令電圧により定まったトルクを出力し、ベルトに伝達させ、アームを駆動させる。サーボモータのエンコーダ値の角度を検出しサーボアンプにフィードバックする。

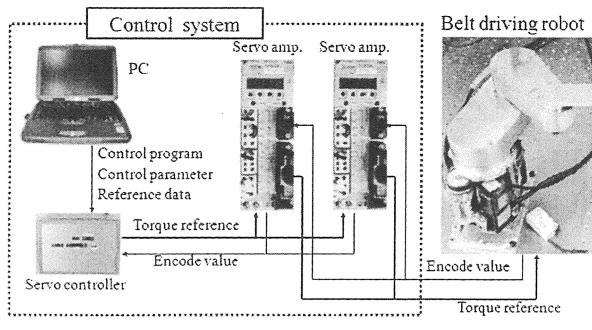


Fig.1 Experimental setup

サーボコントローラには、Mechatrolab³-Cコントローラ(安川情報システム)を使用する。この装置は、CPU、USB接続、D/A・A/D出力、カウンタ入力が一体化となった装置で、制御プログラムの開発や制御パラメータ、指令データの作成、PCとの高速通信を行うことができる。

本ロボットを、図2に示すモータ指令で駆動する。実線が速度指令、破線は速度を積分した位置指令である。アーム先端のエンドエフェクタに加速度計を設置して加速度を測定すると図3の応答が得られる。停止時に4Hzの残留振動が見られ、2次遅れ振動系となっていることがわかる。このような振動系に対して、制御系の比較を行い、特性を把握する。

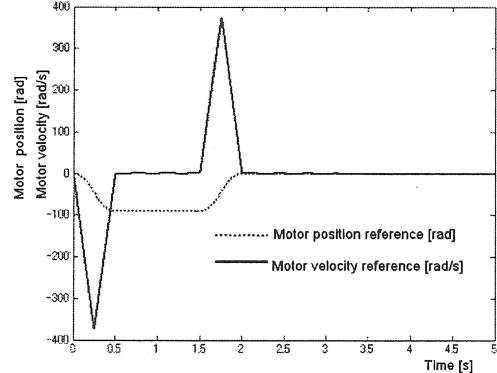


Fig.2 Reference for motor

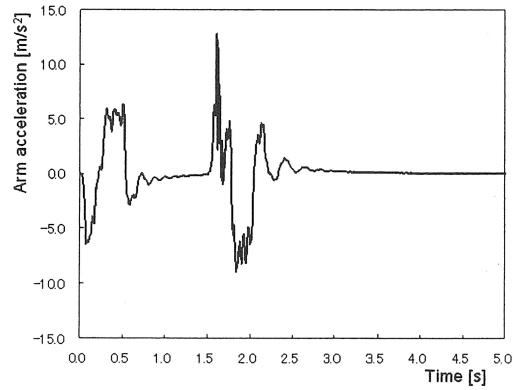


Fig.3 Arm acceleration

*制御情報工学科本科卒業 (現 安川電機)

3. 制御系

本研究で比較する位置比例、速度比例積分(P-PI制御)と位置比例、速度積分比例(P-IP制御)の二つの制御則のブロック線図を図4、図5に示す。図4はP-PI制御系であり、図5はP-IPの制御系である。 K_p は位置比例ゲイン、 K_v は速度比例ゲイン、 T_i は積分時定数、 $1/s$ は積分器である。P-PI制御とP-IP制御で異なるのは、速度制御系の構造である。P-PI制御は速度比例ゲインと積分時定数が積分器に並列につながっている。P-IP制御は速度の2重のフィードバックをかけている。

PI制御とIP制御の伝達関数を表1、表2に示す。表1は速度制御系の伝達関数であり、表2は位置制御系での伝達関数の比較である。表1においてPI制御の分子に第1項 $K_v s$ が追加されている。この項は微分動作を示すため、ステップ応答の立ち上がりを急峻にするものである。しかしこの第1項は微分特性を持つため、位置制御系を組んだ場合、 K_p を大きくできるメリットがある。

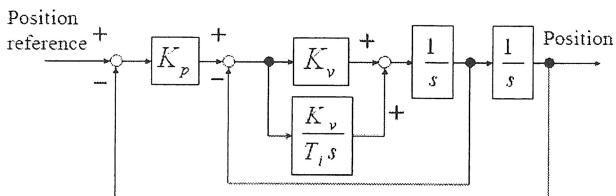


Fig.4 P-PI control system

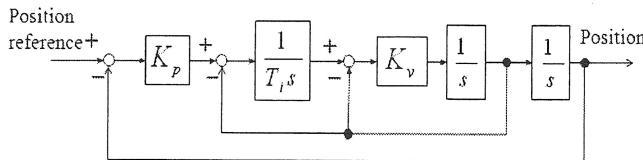


Fig.5 P-IP control system

Table 1 Transfer function of velocity control⁽²⁾

| | Transfer function |
|------------|---|
| PI control | $\frac{K_v s + \frac{K_v}{T_i}}{s^2 + K_v s + \frac{K_v}{T_i}}$ |
| IP control | $\frac{\frac{K_v}{T_i}}{s^2 + K_v s + \frac{K_v}{T_i}}$ |

Table 2 Transfer function of position control⁽²⁾

| | Transfer function |
|--------------|--|
| P-PI control | $\frac{K_p K_v s + \frac{K_p K_v}{T_i}}{s^3 + K_v s^2 \left(\frac{K_v}{T_i} + K_p K_v \right) s + \frac{K_p K_v}{T_i}}$ |
| P-IP control | $\frac{\frac{K_p K_v}{T_i}}{s^3 + K_v s^2 + \frac{K_v}{T_i} s + \frac{K_p K_v}{T_i}}$ |

表2においてP-PI制御の分子の第1項 $K_p K_v s$ が追加となっている。これは速度制御系を組んだ場合と同様に微分動作により、応答の立ち上がりを急峻にすることがわかる。

PI制御とIP制御の応答特性を比較するため、速度指令に対する応答をシミュレーションする。二つの制御則の応答を図6に示す。PI制御とIP制御を比較するうえで、ゲインの決め方が重要である。アームの動力伝達機構の機械共振特性により、速度比例ゲイン K_v の上限が決まつてくるため、ここでは K_v を同一とした。

$K_v=40[\text{Hz}]$ 、 $T_i=8[\text{ms}]$ を条件(1)とする。PI制御(1)とIP制御(1)を図6に示す。同じパラメータだが両者に差が生じている。PI制御が約40%オーバーシュートしているのに対し、IP制御は約3%程度のオーバーシュートである。理由は、PI制御の速度制御系の伝達関数の分子第1項に微分要素があるためである。

$K_v=40[\text{Hz}]$ 、 $T_i=16[\text{ms}]$ としたものを条件(2)とする。ここでは積分時定数を大きくした条件(2)のほうが両制御手法とも緩やかな応答になっている。PI制御はオーバーシュートが約20%減少した。IP制御ではオーバーシュートは全くない。

次に、位置ループを加えたP-PI制御とP-IP制御の速度応答を図7に示す。 $K_p=40[1/\text{s}]$ 、 $K_v=40[\text{Hz}]$ 、 $T_i=8[\text{ms}]$ としたものを条件(1)とする。比較のため、PI制御とIP制御のパラメータは同じ値としている。位置制御系の伝達関数でP-PI制御の分子第1項に $K_p K_v s$ があるため、応答の立ち上がりはPI制御のほうが速い。しかし、P-PI制御の応答にはうねりが生じており、目標値付近では逆にIP制御より遅くなっている。目標値の約63%に達する時間が、約25[ms](=1/40)であることから位置制御系を1次遅れ系に近似できる。応答の速さを決める時定数 T は $1/K_v$ である。これは、位置比例ゲインに対して、速度比例ゲインが十分に大きいことを意味する。ゲインバランスを考慮して、PI制御のうねりを無くすためには、積分時定数を大きくする必要がある。 $T_i=16[\text{ms}]$ とすると $K_p=63[1/\text{s}]$ となる。 K_v は同一の40[Hz]とする。この応答をPI制御の条件(2)とする。PI制御(2)はPI制御(1)と比べ、うねりが無くなり、立ち上がりが速くなっている。IP制御(2)と比較すると応答の約90%でほぼ一致している。これよりPI制御で最適ゲインとすると、IP制御の最適ゲインよりも指令に対する応答が速くなる。

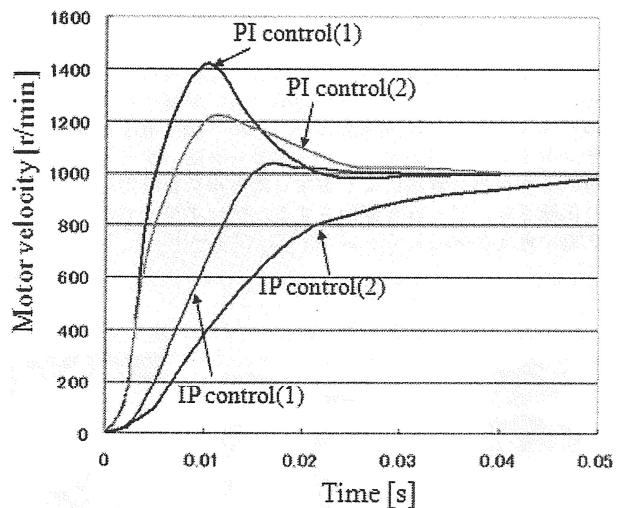


Fig.6 Step responses of velocity

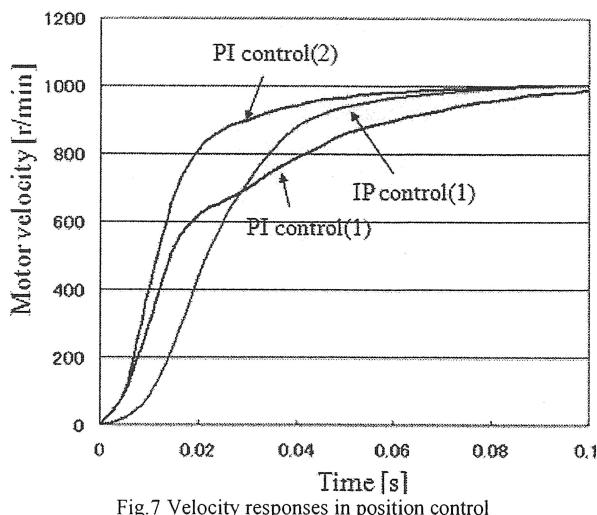


Fig.7 Velocity responses in position control

4. ベルト駆動ロボットのシミュレーション

ベルト駆動ロボットの第1軸を1.5秒間で90度旋回させ、制御系による応答の比較を行う。

まず、アームの回転角を90度とする速度指令として加速・定速・減速と変化する台形波指令を作成する。モータの定格回転数が3000rpmであるため、モータ回転数を2800rpmとする。

回転数をrpmからrpsに変換する。

$$2800[\text{rpm}] \rightarrow 2800 \times 1/60 = 46.7[\text{rps}]$$

回転をpulseに変換する.1回転=2¹³[pulse]=8192[pulse]である.

$$46.7[\text{rps}] \rightarrow 46.7 \times 8192 = 382293.3[\text{pulse/s}]$$

加速時間を0.5[s]として、速度を加速度に変換する。

$$382293.3 \text{ [pulse/s]} \times 1/0.5 = 764587 \text{ [pulse/s}^2\text{]}$$

モータの速度指令を図8に示す。台形の面積Aがモータの回転角である。減速比は60である。

$$A = 122880 \text{ [pulse/s]} \times \{(1/2) \times 0.5 \text{ [s]} + 0.5 \text{ [s]} + (1/2) \times 0.5 \text{ [s]}\}$$

$$= 122880 \text{ [pulse]}$$

アーム回転角は、 $122880[\text{pulse}] \times 360^\circ / 8192[\text{pulse}] / 60 = 90^\circ$ である。

図10にMATLAB/Simulinkで作成した第1軸のシミュレーションモデルを示す。機構部の特性は、減速機構を考慮した4慣性系でモデル化した。図10のシミュレーションモデルに使用した各パラメータを表3に示す。シミュレーションモデルのSubsystem内には、P-PI制御とP-IP制御を格納している。

図11, 図12に各制御則のシミュレーションモデルを示す.
図11, 図12のパラメータを表4に示す.

シミュレーション結果のモータ回転角度を図13に示す。3章で比較したP-PI制御とP-IP制御の特性があらわれていることがわかる。P-PI制御は、P-IP制御と比べ、立ち上がりが速いが、オーバーシュートしている。またP-IP制御は立ち上がりが緩やかになっており、オーバーシュートが全くみられない。

ベルト駆動ロボットは、半導体製造装置でのウェハ搬送の用途があり、この場合オーバーシュートのない緩やかな加速のIP制御が、ウェハのずれや落下がないため適している。

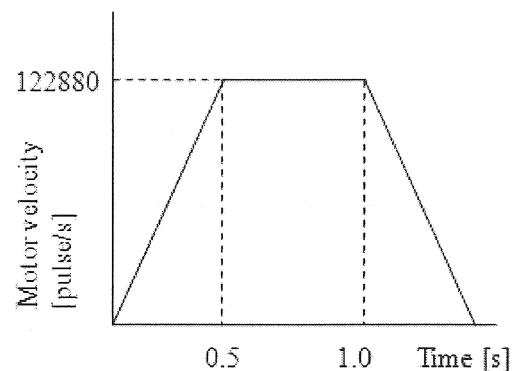


Fig.8 Trapezoid reference

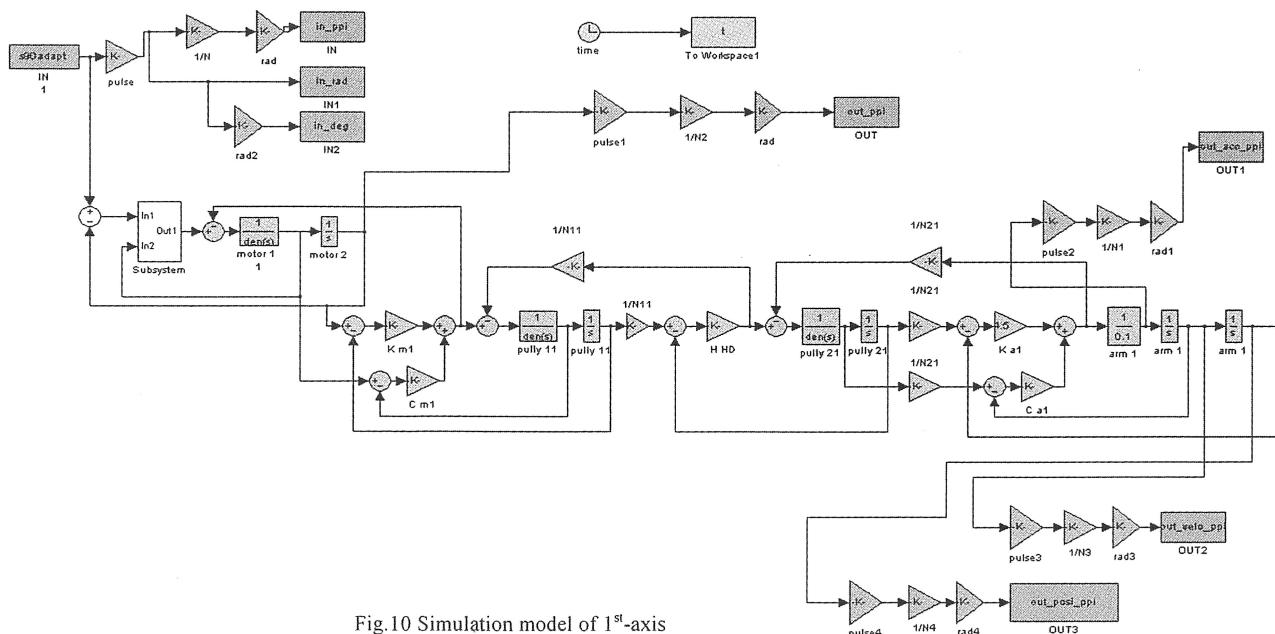


Fig.10 Simulation model of 1st-axis

Table 3 Properties of simulation model

| | | |
|----------|---|---|
| J_m | Motor's moment of inertia | $0.0166 \times 10^{-4} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
| J_{p1} | Pulley's moment of inertia | $2.814 \times 10^{-5} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
| J_{p2} | Pulley's moment of inertia | $4.299 \times 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
| J_a | Arm's moment of inertia | $4.299 \times 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
| K_m | Belt's rigidity on motor-side | $4.87 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}]$ |
| K_{GD} | Rigidity of gear | $1014 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}]$ |
| K_a | Belt's rigidity on arm-side belt | $4.5 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}]$ |
| C_m | Belt's damping coefficient on motor-side | $0.025 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}/\text{s}]$ |
| C_a | Belt's damping coefficient of arm-side belt | $0.12 [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}/\text{s}]$ |
| N_1 | Reduction ratio of gear | 50 |
| N_2 | Reduction ratio of pulley | 1.2 |

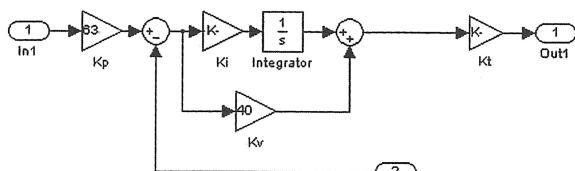


Fig.11 Simulation model of P-PI control

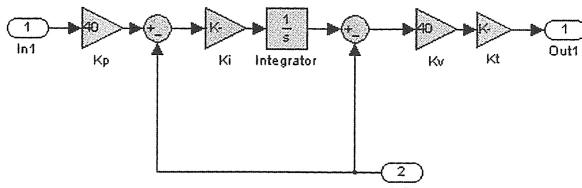


Fig.12 Simulation model of P-IP control

Table 4 Properties of P-PI and P-IP control

| | P-PI control | P-IP control |
|--|--------------|--------------|
| K_p : Position loop gain [$1/\text{s}$] | 40 | 40 |
| K_v : Velocity loop gain [$1/\text{s}$] | 63 | 40 |
| K_i : Integral gain [$1/\text{ms}$] | 62.5 | 125 |
| K_t : Motor inertia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] | 0.01 | 0.01 |

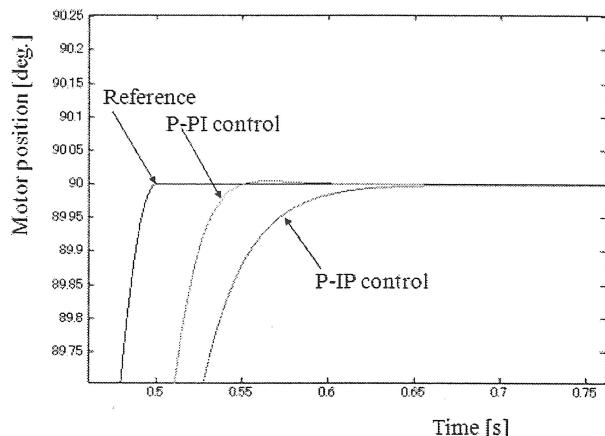


Fig.13 Motor position by simulation

5. 結論

シミュレーションから得られた結論を以下に示す。

- 1) PI制御の応答の立ち上がりは微分項の影響で速いが、オーバーシュートがある。IP制御は、応答はPIに比べて遅いが、オーバーシュート量は少ない。制御対象が柔軟構造である場合も、これらの特徴は変わらない。
- 2) P-IP制御は立ち上がりが緩やかで、目標地点に達するまでにスムーズな動作をする。そのためウェハ搬送においてP-IP制御は適している。

文 献

- (1) 二見茂、機構振動を考慮した位置制御系のPIとIP速度制御比較、精密工学会誌、Vol.54, No.8(1988), pp.1469-1474.
- (2) 加来靖彦、サーボ系の位置及び速度制御の理論的考察、技報安川電機、Vol.62, No.241, 1998, pp.264-268.
- (3) 浜松弘・内田裕和・田中義人・二見茂、ベルト駆動ロボットの動特性モデリング、日本機械学会講演論文集、No.068-1,(2006) ,pp.227-228.
- (4) 浜松弘・内田裕和、加速度フィードバックによるベルト駆動ロボットの振動抑制制御、日本機械学会講演論文集、No.078-1,(2007),pp.277-278.

(2008年10月6日 受理)