

## 空気圧浮上ガントリーの加速，整定期における精密速度制御

苅 北 一 朗\*・前 田 浩 一\*\*  
北 野 岳 志\*\*・徳 平 裕 介\*\*

Precise Velocity Control of the Air Floating Gantry Type Precision Stage  
During the Acceleration and the Settling Periods

Ichiro KARIKITA\*, Hirokazu MAYEDA\*\*,  
Takeshi KITANO\*\* and Yusuke TOKUHIRA\*\*

Recently, the gantry type precision stage and its precise velocity control are required in the field of inspection machine and slit nozzle coater of the flat panel display, since the glass substrate becomes large. The authors have shown in the previous works, that both the deviations of velocity and of right and left legs are reduced enough in the constant velocity period by the gain scheduling scheme and the acceleration feedback compensation in the velocity control. In this paper, it is examined to shorten the elimination distance that means the ineffective coated area in the LCD panel. For this purpose, the authors focus on the velocity deviation and leg deviation during the acceleration and the settling periods. These deviations are caused by the disturbance forces mainly from cable dragging and the pitch motion of the gantry. These disturbance forces in the acceleration and the settling periods are much larger than those in the constant velocity periods. Thus, the problem in this study is in a quite different and difficult situation from that of the previous works. In this paper, to reduce the elimination distance the cross coupling control scheme with the gain scheduling in the velocity controller and difference controller and the acceleration feedback compensation in the velocity controller is proposed. First, the control scheme with the gain scheduling only in the velocity controller is experimented. Second, to reduce the leg deviation during the acceleration period, the control scheme added the gain scheduling in the difference controller to the first one is examined. Third, to reduce the velocity deviation by the disturbance forces, the control scheme added the acceleration feedback compensation in the velocity controller to the second one is tried. It is shown that the elimination distance becomes shorter in the order and finally reaches close to the theoretical limit.

**Key Words:** gantry, velocity control, cross coupling control, gain scheduling scheme, acceleration feedback compensation

### 1. ま え が き

近年フラットパネルディスプレイの製造においてガラス基板の大型化が進み，その樹脂塗布や検査のためガントリータイプのコーターの使用が一般的となってきた．ガラス基板のサイズが大きくなるにつれ樹脂塗布用スリットダイヤガントリー本体の重量が増大し塗布面積も広くなるにもかかわらず，塗布膜厚を均一に保つためガントリーの速度制御には従来と同様の高い精度が要求されるので，この速度制御問題は難しいものとなる．また，今後はディスプレイのさらなる高品質化，塗布速度の高速化や除外距離（塗布を始めてから塗布膜

厚の変動率が要求仕様に収まるまでの走行距離）の短縮も望まれており速度制御への要求内容はさらに厳しいものとなってきている．

この要求に応えるため，著者らはこれまでに空気圧浮上ガントリーを対象として，加速，整定後の定速期における速度変動率と左右脚の位置偏差（以後，左右偏差と呼ぶ）の変動幅をできるだけ小さく保つ制御の研究を行ってきた<sup>1), 2)</sup>．

文献 1) では，クロスカップリング制御方式<sup>3)</sup>で中心速度と左右偏差の PID 制御を行ない，加速期では安定性とオーバーシュートの大きさの関係上，中心（左右脚位置間の中点）速度制御系の位置フィードバックゲインを低めに選び，定速到達以降それを大きくするというゲイン切替制御により，定速期における速度変動率と左右偏差の変動幅を要求仕様よりかなり小さくできることを示している．また，文献 2) では，ミニチュアガントリーに対して左右脚独立速度制御方式で外乱の影響を低減するために加速度補償を加えた制御を試

\* 東レエンジニアリング（株）

\*\* 立命館大学理工学部

\* Toray Engineering Co. Ltd.

\*\* Ritsumeikan University

(Received November 6, 2007)

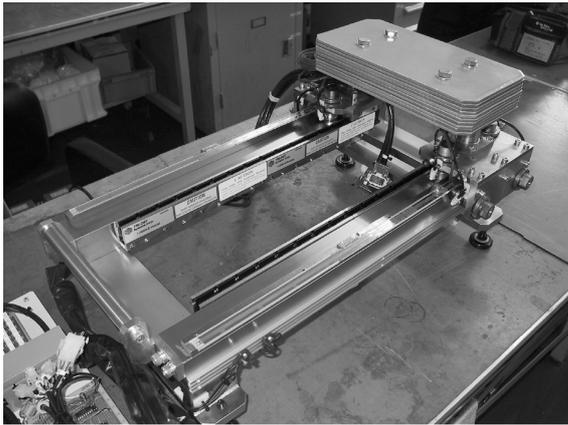


Fig. 1 View of the miniature gantry

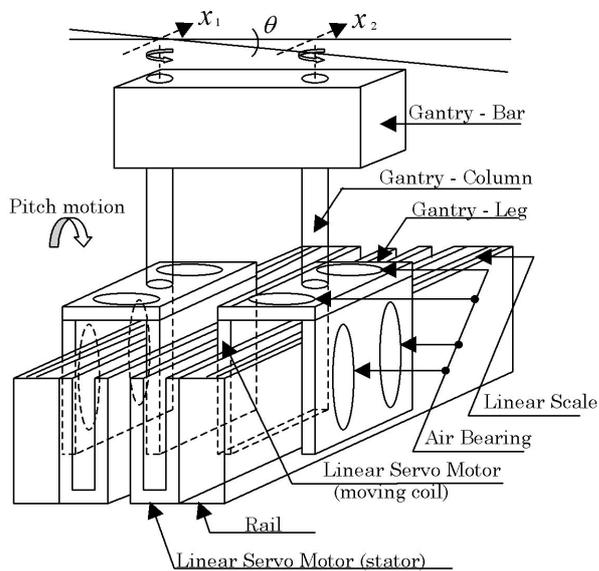


Fig. 2 Structure of the gantry

み、ここでも定速期における制御性能が要求仕様よりも非常に良くなることを示すとともに加速度補償の効用を明らかにしている。

以上の研究により定速期における速度変動率と左右偏差の変動幅を十分小さくすることが可能となったので、本研究では加速、整定期におけるそれらをできるだけ早く小さくし、除外距離を短くすることを試みる。樹脂塗布において除外距離分のガラス基板が規格外として廃棄されるので、これはコスト上重要な問題である。定速期において対処すべき主な入力外乱はケーブル牽引力とモーターの着磁ピッチムラで比較的小さなものであったが、加速、整定期においては加速度運動によりケーブル牽引力とその変化がかなり大きくなる。また、左右脚にかかるこのケーブル牽引力のアンバランスも大きくなるので非常に大きなガントリーのヨー揺れ（左右偏差の揺れ）を引き起こす。その上、ガントリーのピッチ揺れもかなり大きなものとなる。これらがすべて速度と左右偏差に

影響するので、除外距離を短縮する問題は定速期の速度制御と比べてかなり様相が異なり難しいものとなる。

これらの外乱は計測やモデル化が困難であることから、フィードフォワードで補償できるものではない。また、パラメータ変動も速く適応制御や外乱オブザーバを用いても速度推定ノイズが大きいため十分な収束の速さを確保できず、これらの外乱の影響の抑制に有効でないと判断される。そこで、本研究では文献 1), 2) と同様に基本的に高ゲインフィードバックにより、これらの外乱の影響を抑制することとし、外乱の様相に応じてゲイン切替を行ない、あわせてその影響の早期抑制に加速度補償を用いる方策を採用する。

本研究では、ヨー揺れを抑えるために左右偏差を直接制御できるクロスカップリング制御方式を採用する。この制御方式においてまず、加速、整定期では左右偏差制御系のフィードバックゲインを高く、中心速度制御系のフィードバックゲインを低く選び、整定期の途中で定速期に適したゲインに切り替えることを試みる。つぎに、ピッチ揺れの影響を抑えるためこの制御系の上に、加速、整定期において中心速度制御系に加速度補償を適用し、整定期の途中でこれを切る制御を試みる。さらに、高い加速度補償ゲインを長時間用いることは安定性を損なう恐れがあり、除外距離には加速期から整定期に移行する前後のピッチ揺れが大きく影響するので、この間だけ部分的に加速度補償を行なう制御を試みる。加速度補償が有効であるためには高分解能のリニアスケールが必要であるので<sup>2)</sup>、本研究では実機よりリニアスケールの交換が容易であった文献 2) と同じミニチュアガントリーを用いることとする。

本稿の構成はつぎのとおりである。まず、2章で空気圧浮上ミニチュアガントリーの構成と動特性モデルを示す。3章ではクロスカップリング制御方式における加速度補償をおり込んだ中心速度コントローラと左右偏差コントローラについて述べる。4章では実験条件と制御目標について述べる。5章では最初に中心速度コントローラだけのゲイン切替を行ない、つぎに左右偏差コントローラにおけるゲイン切替を加えた実験を行なう。さらに、加速期に加速度補償を全面的にきかせた実験と加速度補償を部分的にきかせた実験を行ない、それぞれにおいて定速への整定のおおよそや除外距離を比較しておのおのの効果の検証と考察を行なう。

## 2. 空気圧浮上ガントリー

### 2.1 装置概要

本研究で使用する空気圧浮上ミニチュアガントリー・テーブルの外観と構造の概略図をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。装置の寸法は 409W[mm] × 676L[mm] × 299H[mm] であり概略重量は約 50[Kg] である。

空気圧浮上ミニチュアガントリーの構造の詳細については文献 2) で述べられているとおりであるが概略は以下のとおりである。2本のレールがベース上に固定されていて、エアベアリングにささえられたガントリーがそのレールの上を動

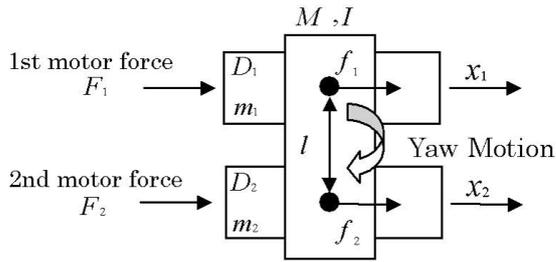


Fig. 3 Model of the gantry

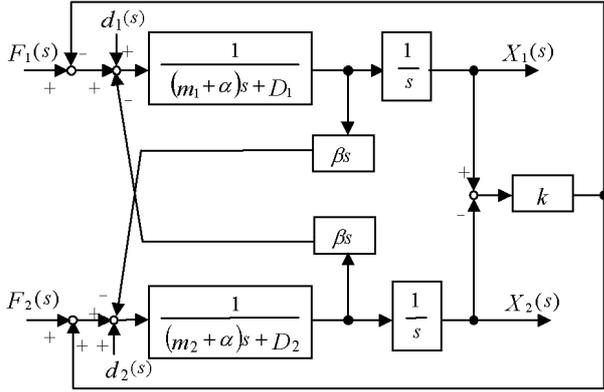


Fig. 4 Block diagram of the gantry

く、ガントリーは対になった柱と脚と実機のスリットノズルのかわりに横木と呼ばれる鉛の板からなっている。

それぞれの脚はガントリーを支えるエアベアリングとトラバース方向の動きを規制するパネつきのエアベアリングをもっている。また、ガントリーを駆動するためのリニアサーボモータがおおのこの脚に装備されていて、 $0.02[\mu\text{m}/\text{pulse}]$ の分解能をもったリニアスケールがガントリーの脚の位置を光学的に検知している。横木と脚は柱の周りを自由に回ることができ、この構造により左右偏差が大きくなった場合でも脚とレールが衝突するのを防止している。本装置の両脚の部分には給電用や信号用のケーブルとエア供給用のチューブが接続されており、これらはできるだけ左右均等に配分され、ケーブルの一端は脚に固定されており、もう一端は地上側のケーブル支柱の上部に固定されていて、ガントリー動作時には外力として作用している。

また、本装置は実機のミニチュアタイプであり、その寸法に比した重量と実機と同じ重量配分となるよう設計されている。また、ガントリーのヨー揺れ、ピッチ揺れに関するエアベアリングのパネ定数は実機に近い固有振動周波数を有するように選定されている。リニアサーボモータ出力をスケール比に比例させることでこのミニチュアガントリーの運動特性は実機に近いものとなる。ただ、ケーブル牽引力はケーブル剛性をスケール比ほど小さくできないので相対的に少し大きくなっている。また、本体を支えるエアベアリングのパネ定数は傾いた状態や動的状況における変動が不明であるのでピッチ揺れが実機と多少異なる可能性がある。しかしながら、こ

これらの差異の動特性への影響は小さいので、本ミニチュアガントリーに対する制御則とパラメータ調整法はリニアスケールの分解能が同等であれば、実機に対しても有効であると考ええる。このことは文献 1) の実機での速度制御の準備として行なった本ミニチュアガントリーに対する制御法で実機においてもミニチュアガントリーに近い制御結果が得られたことで裏付けられている。

## 2.2 ガントリーの動作モデル

ガントリーのモデルは Fig. 3 に示される。

ここで

$F_i$  : 第  $i$  リニアモータの出力 ( $i=1,2$ )

$x_i$  : 第  $i$  支柱の位置座標 ( $i=1,2$ )

$m_i$  : 第  $i$  支柱の質量 ( $i=1,2$ )

$D_i$  : 第  $i$  支柱の移動に関する粘性摩擦係数 ( $i=1,2$ )

$M$  : 横木の質量

$I$  : 横木の重心まわりの慣性モーメント

$f_i$  : 第  $i$  支柱が横板に与える力 ( $i=1,2$ )

$l$  : 第 1 と第 2 の支柱の回転軸間の距離

である。

これらの変数の運動方程式から以下の 2 式が導きだされる<sup>1)</sup>。

$$sX_1(s) = [F_1(s) - \beta s^2 X_2(s) - k(X_1(s) - X_2(s)) / l^2 + d_1(s)] / [(m_1 + \alpha)s + D_1] \quad (1)$$

$$sX_2(s) = [F_2(s) - \beta s^2 X_1(s) + k(X_1(s) - X_2(s)) / l^2 + d_2(s)] / [(m_2 + \alpha)s + D_2] \quad (2)$$

ただし  $X_1(s)$ ,  $X_2(s)$ ,  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$  は  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  のラプラス変換であり、 $\alpha = (M/4 + I/l^2)$ ,  $\beta = (M/4 - I/l^2)$  である。 $k$  は左右偏差 ( $x_1 - x_2$ ) と両側面のパネ付きエアベアリングに起因する力に関連するパネ定数で付属パネのパネ定数にほぼ等しいものである。これらをブロック線図で表わすと Fig. 4 となる。ここで  $d_1(s)$  と  $d_2(s)$  はそれぞれの脚にかかる外乱であり具体的にはガントリーのピッチ揺れによる力、ケーブル牽引による力、モータの着磁ピッチムラによる推力の変動などである。

(1), (2) において  $m_1 = m_2 = m$ , また  $D_1$  と  $D_2$  はエアベアリングを用いていることから  $D_1 = D_2 = 0$  と考えられ、以下の 2 式が得られる。

$$s(X_1(s) + X_2(s)) = \frac{G_M(s)(F_L(s) + d_1(s) + d_2(s))}{((m + \frac{M}{2})s)} \quad (3)$$

$$X_1(s) - X_2(s) = \frac{G_M(s)(F_\theta(s) + d_1(s) - d_2(s))}{(m + 2I/l^2)s^2 + 2k/l^2} \quad (4)$$

ただし  $G_M(s)$  はモータ伝達関数であり、 $F_L(s) = F_1(s) +$

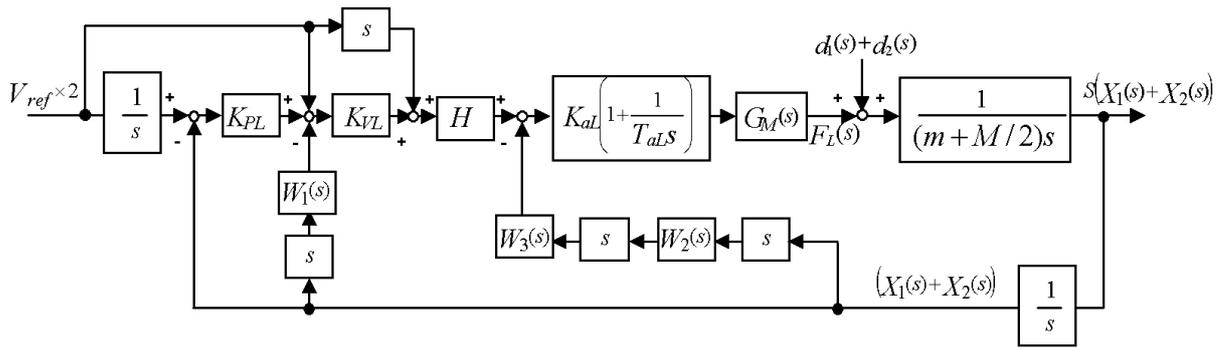


Fig. 5 Block diagram of the velocity controller

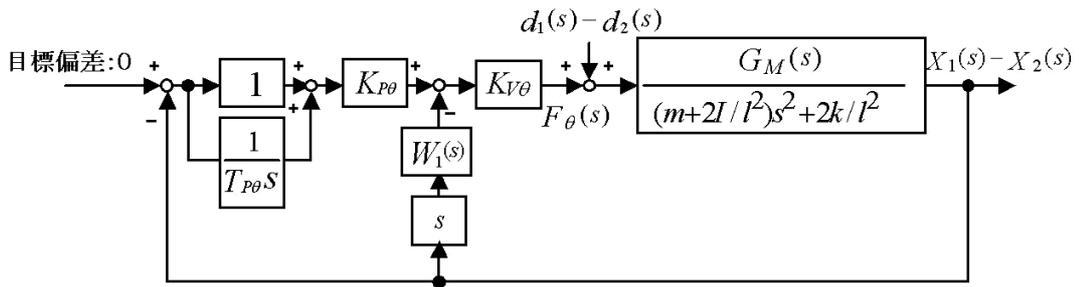


Fig. 6 Block diagram of the difference controller

$F_2(s)$ ,  $F_\theta(s) = F_1(s) - F_2(s)$  である。

入力外乱についてはピッチ揺れはガントリーの加速度運動により引き起こされ、それがガントリーの速度にも影響する。このように制御対象と相互干渉する動特性をもつが、それに関係する本体を支えるエアベアリングのパネ定数や粘性係数の傾いた状態や動的状況での値が不明であり、非線形も有すると推定される。また、ケーブルもバネと粘性および質量効果を有し、ガントリーと結合された振動系を形成するが、これらの係数は位置などによって変動し測定が困難である。そこでこれらの動特性を制御対象に組み入れても制御系設計に反映させることが困難である。本研究ではこの理由により、文献 1), 2) と同様にピッチ揺れとケーブル牽引の影響を入力外乱と考え、高フィードバックゲインでこれらの速度則への影響を抑制することとする。これは安定論的には厳密には正しいとはいえないが、1つの現実的な対処法である。しかし同時に、このことが速度推定ノイズと共にフィードバックゲインを高くすることに限界を与えている。モータの着磁ピッチムラは比較的小さなものであり、加速、整定期では要求速度精度から見てもあまり問題とはならない。

### 3. 速度制御則

本研究においてはガントリーのヨー揺れを引き起こす左右偏差を直接制御できることからクロスカップリング制御を用いることとし、コントローラを以下のように設計した。(3)において  $s(X_1(s) + X_2(s))$  はガントリーの中心速度の2倍であり、これを目標中心速度の2倍に近づけるものを中心速度コントローラといい、本研究ではこれに加速度補償を加え

たものを用いた。また、本研究の目標のひとつである除外距離を短くするにはガントリーを指令速度からの遅れを少なくする必要があり、加速度フィードフォワードを用いた。これらのブロック線図を Fig. 5 に示す。

Fig.5 において  $G_M(s)$  が、その静的ゲインは  $m + M/2$  となるようスケールされている。 $K_{PL}$  と  $K_{VL}$  はそれぞれ中心速度コントローラにおける位置と速度のフィードバックゲインであり  $K_{aL}$  と  $T_{aL}$  はそれぞれ加速度補償のゲインと積分時間である。 $H$  は加速度補償を行なっても速度制御系における制御対象の静的ゲインが加速度補償を行なわなかった場合のそれと同じになるように挿入された係数であり、加速度 P 補償のときは  $(1 + K_{aL})/K_{aL}$ 、加速度 PI 補償の場合は 1 とする。加速度補償を用いない場合は  $W_3(s)$  からのフィードバック信号を切り  $H = K_{aL} = 1$ ,  $1/T_{aL} = 0$  となる。 $W_1(s)$  は速度推定用、 $W_2(s)$  と  $W_3(s)$  は加速度推定用のローパス 1 次フィルタである。

Fig.5 において速度はサンプル周期 100[μsec] 間のリニアスケールからのパルス数から推定され、加速度は連続した 2 つのサンプル周期での速度差から推定される。本研究においてはそれらに起因する推定ノイズをできるだけ小さくするために 0.02[μm/pulse] の高分解能リニアスケールを用いている。また、さらなるノイズ除去のためには速度推定用フィルタ  $W_1(s)$ 、および、加速度推定用フィルタ  $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  を用いる。 $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  は文献 2) と同様に加速度推定のための速度差分をとる前段と後段に配置している。これらの遮断周波数は後の実験において適当なものを選定する。

(4) において  $X_1(s) - X_2(s)$  はガントリーの左右の位置座

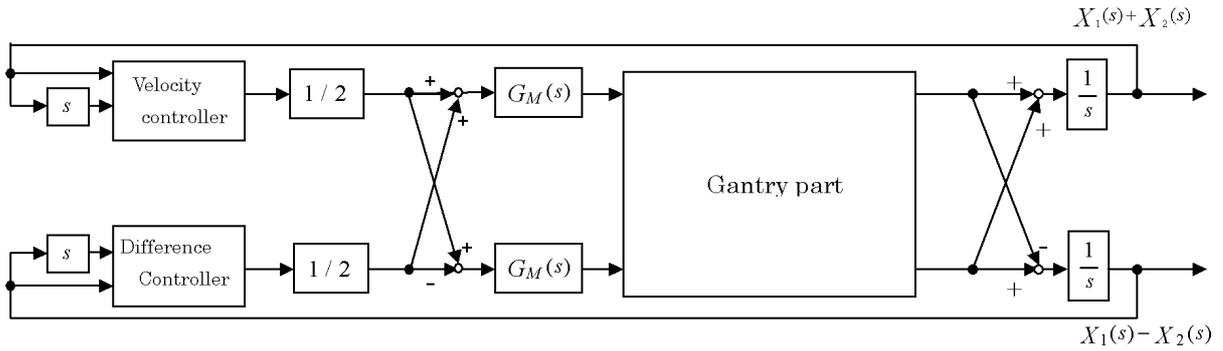


Fig. 7 Block diagram of the total system

標の差であり，これをゼロに近づけるコントローラを左右偏差コントローラと呼びブロック線図を Fig. 6 に示す．これらをまとめたクロスカップリング制御方式の全体のブロック図を Fig. 7 に示す．

#### 4. 制御目標

本研究において，ガントリーは  $0[\text{mm}/\text{sec}]$  から  $75[\text{mm}/\text{sec}]$  まで  $0.2[\text{sec}]$  の間に正弦波曲線で加速され，その後  $4.9[\text{sec}]$  の間  $75[\text{mm}/\text{sec}]$  の速度が維持され，最後の  $0.2[\text{sec}]$  の間に  $0[\text{mm}/\text{sec}]$  まで減速される指令速度にしたがうように制御される．

ガントリーが加速される  $0.2[\text{sec}]$  までを加速期と呼び，指令速度が  $75[\text{mm}/\text{sec}]$  一定になってからガントリーの振動が十分減衰する  $0.2[\text{sec}]$  から  $0.5[\text{sec}]$  の間を整定期と呼び， $0.5[\text{sec}]$  以降  $4.9[\text{sec}]$  までを定速期と呼ぶこととする． $0.5[\text{sec}]$  はこれまでの実験<sup>1), 2)</sup>により設定された値である．

文献 1), 2) ではこの定速期における速度変動率と左右偏差の変動幅を小さくすることが研究されたが，本研究では加速期と整定期におけるこれらを小さくし  $0.2[\text{sec}]$  以降速度を  $75[\text{mm}/\text{sec}]$  から定められた誤差範囲にできるだけ早く整定させることを試みる．

樹脂塗布においては膜厚はスリットダイの樹脂吐出流量とガントリーの移動速度の比に比例する<sup>6)</sup>．また，樹脂吐出流量を一定とすれば塗布膜厚の目標値に対する変動率は移動速度の目標値に対する変動率と一致する．したがって，膜厚を一定にするには移動速度の目標値に対する変動率を極力小さくすればよい．一般的には，この速度変動率は  $\pm 0.5[\%]$  以下ならよいとされているが，近年液晶パネルにおいては高品質化が要求されており，本研究では  $\pm 0.13[\%]$  以下すなわち，速度を  $75 \pm 0.1[\text{mm}/\text{sec}]$  以内に収めることとする．また，左右偏差は  $\pm 100[\mu\text{m}]$  以内に収めることとする<sup>1)</sup>．

ガントリーの移動速度を文献 1) と同様に左右脚の位置を結ぶ線分の各点の速度とすると，線分のすべての点の速度が  $75 \pm 0.1[\text{mm}/\text{sec}]$  以内に整定することが必要であるが，この線分の任意の点の速度は左右脚の速度の間にあるので，このことは左右脚両方の速度を  $75 \pm 0.1[\text{mm}/\text{sec}]$  以内に整定させることと同等である．定速期を対象とした文献 1), 2) の研究

では左右偏差の変動が十分微小であったので中心速度で評価したが，加速，整定期を対象とする本研究では左右偏差の変動を無視できないので左右脚両方の速度で評価することとする．

左右脚の目標速度からの偏差をそれぞれ左右脚速度偏差と呼ぶこととすると，樹脂吐出量は  $0.2[\text{sec}]$  以降一定であるとして除外距離は  $0.2[\text{sec}]$  以降，左右脚速度偏差が  $\pm 0.1[\text{mm}/\text{sec}]$  以内に整定し，左右偏差が  $\pm 100[\mu\text{m}]$  以内に整定するまでに中心位置が初期位置から移動した距離と考えることができる．本研究の制御目標はこの除外距離をできるだけ短くすることである．ここでこの除外距離の最小限界値は  $7.5[\text{mm}]$  となるが，2.2 節で述べたように，入力外乱が動特性を有するために，フィードバックゲインを高くするには限度があり，除外距離をこの最小限界値に等しくすることは非常に困難である．ここでは 3 章で述べた制御則を用いて，ゲイン調整を行なうことにより除外距離をどこまで小さくできるかを試みる．

樹脂吐出量を加速期間での目標速度に合わせて除外距離をさらに短縮することも考えられるが，加速中の速度変動率を小さくするのはあまり容易でないので，本研究では対象としないこととした．なお，速度を評価する際に  $100[\text{Hz}]$  以上の速度周波数成分は無視してよいと考えられるのでここでは  $100[\text{Hz}]$  でゲインが  $-3[\text{dB}]$  となる窓幅  $7[\text{ms}]$  のハニングフィルタを用いて速度評価を行なっている．

#### 5. 制御実験

##### 5.1 中心速度制御におけるゲイン切替制御

ここではまず，加速期の安定性を確保し，整定期における速度波形の振動を抑え，定速期の速度偏差をできるだけ小さくするため，中心速度コントローラのフィードバックゲインを加速期では比較的低くし，整定，定速期ではそれらを高く選ぶ制御を試みる．

本研究において速度偏差を小さくするには中心速度コントローラの  $K_{VL}$  をどこまで大きくすることができるかが重要なポイントとなる．そこで，速度推定用フィルタ  $W_1(s)$  はこの  $K_{VL}$  をできるだけ大きくできるものが望ましい． $W_1(s)$  の遮断周波数が低いと  $W_1(s)$  の位相遅れによる安定度の劣化により，高いとノイズの影響のため  $K_{VL}$  を大きくできない．ここではガントリーを静止させた状態で  $W_1(s)$  の遮断周

波数を変えて  $K_{VL}$  を系が振動を起こすまで大きくする実験から、 $W_1(s)$  の遮断周波数を 100[Hz] としたときに  $K_{VL}$  を最も大きくできることが判明した。そこで以降の実験において  $W_1(s)$  の遮断周波数はすべて 100[Hz] とすることとする。

定速期のゲインは文献 1) の方法にしたがって調整し、 $K_{VL} = 250$ ,  $K_{PL} = 150$ ,  $K_{V\theta} = 300$ ,  $K_{P\theta} = 50$ ,  $T_{P\theta} = 0.01$  とする。以降、定速期のゲインはすべてこれらの値を用いることとする。

加速期では左右偏差コントローラゲインは定速期と同じとし、中心速度コントローラゲインは、安定度を良くするため PI 制御の積分時間の逆数となる  $K_{PL}$  をできるだけ小さくし<sup>1)</sup>、 $K_{VL}$  だけを調整することにする。 $K_{VL}$  を小さくすると目標速度追従性が悪化し、大きくすると 0.2[sec] 直後の行き過ぎが大きくなり、ともに除外距離が大きくなる。ここではガントリーを静止させることができる限界値として  $K_{PL} = 0.01$  とし、 $K_{VL}$  を徐々に大きくして除外距離が最も小さくなるよう調整して  $K_{VL} = 175$  とした。定速期と比べて  $K_{PL}$  をかなり小さくしたにもかかわらず  $K_{VL}$  も小さくしなければならぬ結果となっている。

ゲイン切替のタイミングは文献 1) と同様に中心速度が 0.2[sec] 経過後初めて 75[mm/sec] になったときとした。速度が 75[mm/sec] になるまで切替を待つのは入力不連続になることによるショックを避けるためである。この結果、整定期のほとんどの期間は定速期と同じコントローラゲインとなっている。

この実験の左右脚速度の時間変化を Fig. 8 に、左右脚速度偏差の時間変化を Fig. 9、走行距離に対する変化を Fig. 10 に、左右偏差を Fig. 11 に示す。これらより、加速、整定期では定速期と比べて左右偏差と左右脚速度偏差が非常に大きくなり、左と右の脚速度に違いとズレが生じていることがわかる。ここでの除外距離は 11.725[mm] であった。左右偏差は全期間を通じて  $\pm 100[\mu\text{m}]$  の範囲に十分留まっており除外距離は左右脚速度偏差だけで決まっている。これは以下の実験でも同様である。

## 5.2 左右偏差制御におけるゲイン切替制御

5.1 節の制御においては、加速、整定期における左右脚速度偏差と左右脚速度のズレが大きいことが除外距離を大きくする原因となっている。そこで、中心速度コントローラゲインは 5.1 節と同じとし、加速、整定期の左右偏差コントローラゲインを調整して、整定期の途中で定速期のゲインに切り替えることで除外距離を小さくする制御を試みる。

Fig.6 にしめした左右偏差コントローラを通常の PID 制御器の形に等価変換すると、 $K_{V\theta} \cdot K_{P\theta}$  が比例ゲイン、 $K_{P\theta}$  は微分時間の逆数、 $T_{P\theta}$  は積分時間となる。定速期では定常偏差をなくすため積分補償を効かせていたが、加速期では速応性を重視して  $T_{P\theta} = \infty$  として積分器を無効とし、微分時間は定速期と同じにする意味で  $K_{P\theta} = 50$  とし、比例ゲインだけを大きくするために  $K_{V\theta}$  を用いる。この  $K_{V\theta}$  の調整は  $K_{V\theta}$  を徐々に大きくしてゆき系が速度ノイズによる振動を起

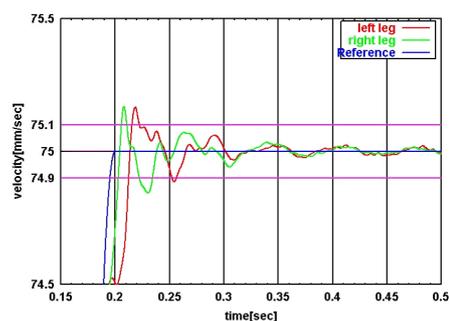


Fig. 8 Right and left leg velocities in experiment 5.1

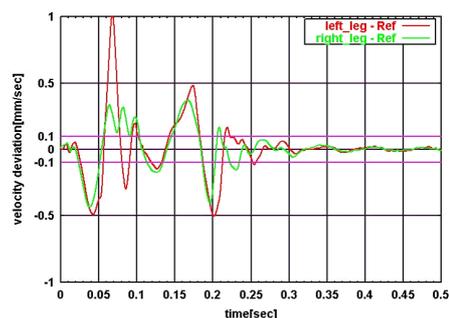


Fig. 9 Right and left leg velocity deviations in experiment 5.1

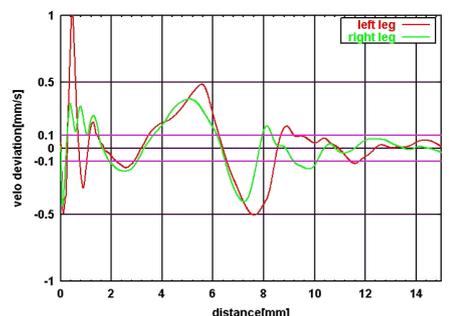


Fig. 10 Right and left leg velocity deviations vs distance in experiment 5.1

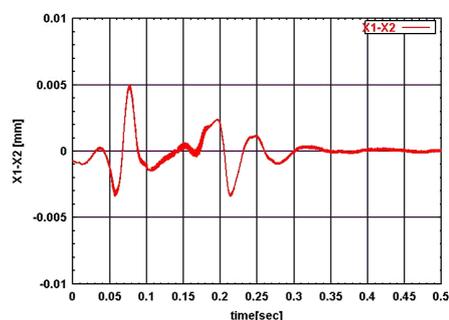


Fig. 11 Right and left leg deviation in experiment 5.1

こさない範囲で、ガントリーの静止状態における左右偏差制御系のステップ応答ができるだけ臨界制振に近い値を選ぶことを行なう。これは左右偏差制御系の速応性が良くても振動的であることは速度制御に好ましくない影響を与えるからである。この調整の結果  $K_{V\theta} = 700$  とする。この値は定速期

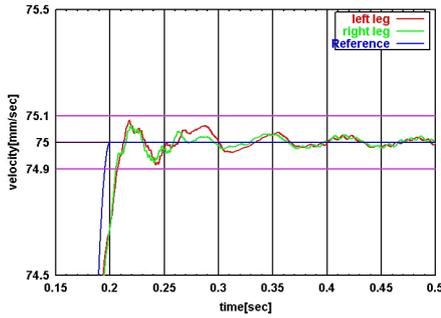


Fig. 12 Right and left leg velocities in experiment 5. 2

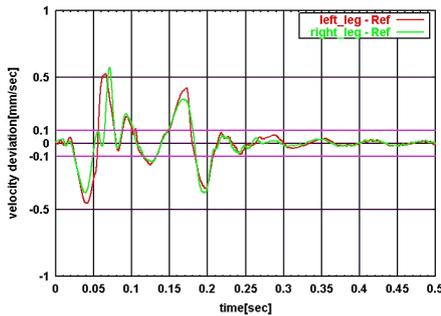


Fig. 13 Right and left leg velocity deviations in experiment 5. 2

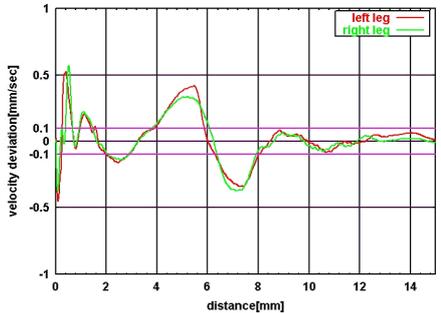


Fig. 14 Right and left leg velocity deviations vs distance in experiment 5. 2

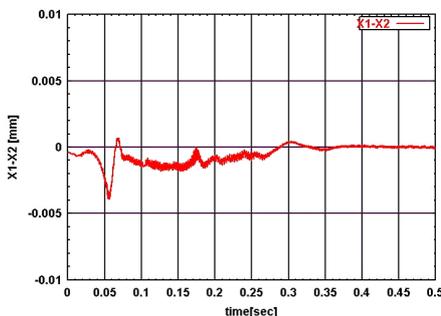


Fig. 15 Right and left leg deviation in experiment 5. 2

のものよりかなり大きくなっている．左右偏差コントローラのゲイン切替のタイミングは 5.1 節の実験結果では左右脚速度のズレが 0.2[sec] 以降も残っているのが小さくなる 0.25[sec] とする． $K_{P\theta}$  をもっと小さく選び、微分補償を効かせて比例ゲインをさらに大きくすることが考えられるが、こ

の場合  $K_{V\theta}$  を非常に大きく選ぶ必要があり、速度ノイズの影響で系に振動が生じるので上記の値が最も適当であった．

この制御を用いたときの実験結果を 5.1 節と同じ順で示すと、Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 のようになる．これらから、加速、整定期（特に 0.2[sec] 前後）で左右偏差がかなり小さくなり、左右の脚速度の違いとズレが解消されていることがわかる．また、左右偏差が小さくなったので左右脚にかかるケーブル牽引力の和の変動が小さくなり 0.2[sec] 付近の速度のオーバーシュートも抑えられている．結果として除外距離は 8.014[mm] となり大きく改善されている．

### 5.3 加速度補償を用いた制御

除外距離に影響する速度波形の振動は主にガントリーのピッチ揺れやケーブル牽引力の変動による入力外乱により引き起こされる．入力外乱の影響を早く抑制するには加速度補償が有効であるので<sup>2)</sup>、ここでは加速、整定期の中心速度制御に加速度補償を用いることを試みる．

加速度補償を用いる場合、加速度推定用フィルタの遮断周波数の選定が重要なポイントであり<sup>2)</sup>、遮断周波数が高すぎるとノイズ削減の効果がなく加速度補償のゲイン  $K_{aL}$  をあげることができず、加速度補償の効果は期待できない．また、低すぎると  $K_{aL}$  をあげることができるがフィルタの位相遅れの影響で系の安定度が損なわれる．5.2 節の実験データに  $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  を適用して加速度推定ノイズのレベルを調べた結果、 $W_2(s)$  と  $W_3(s)$  の遮断周波数は 50 ~ 200[Hz] が適当と判断された．また、 $W_2(s)$  の遮断周波数と  $W_3(s)$  のそれを異なる値としてもその効果は明確でなく、後の選定をいたずらに複雑にしないため、ここでは  $W_2(s)$  と  $W_3(s)$  の遮断周波数の値は同じ値とする．

加速、整定期におけるここでの制御は 5.1, 5.2 節と同じ考え方で  $K_{PL} = 0.01$ ,  $T_{P\theta} = \infty$ ,  $K_{P\theta} = 50$  とし、左右偏差コントローラの  $K_{V\theta}$  と中心速度コントローラの  $K_{aL}$ ,  $K_{VL}$  の調整と  $W_2(s)$  と  $W_3(s)$  の遮断周波数の選定を行なう．加速度補償の効果を上げるため  $K_{aL}$  をできるだけ大きくすることがポイントであるが、これには上述のように、 $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  の遮断周波数が関係する．また、これらのフィルタの位相遅れのため安定性が劣化するので  $K_{VL}$  を下げる必要が生じる．左右偏差制御は中心速度制御と独立のはずであるが実際にはケーブル牽引を通じて少しではあるが相互干渉し、中心速度制御系が加速度補償により安定度をかなり下げた設計となる関係上、 $K_{V\theta}$  を少し小さくすることが要求される．これらすべての要素が相互関係をもちながら左右脚速度偏差に影響するのでここでの調整と選定は少々複雑なものとなる．

これらの調整と選定は具体的には以下に行なう．まず、5.2 節の制御実験で  $K_{V\theta}$  を左右脚速度偏差と左右脚速度のズレが顕著にならない程度まで 700 から小さくする．また、 $K_{VL}$  を速度追従性が悪化しても振動や行き過ぎがほとんど出ない程度に安定度が確保できる値まで小さく選ぶ．これらの値は後に再調整される．つぎに、 $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  の遮断周波数を 50 ~ 200[Hz] でいろいろ変え、各遮断周波数につ

いて  $K_{aL}$  を徐々に大きくして制御実験を行なう。そして加速度推定ノイズの影響で速度波形に高周波振動が現われない限度の  $K_{aL}$  の値を選定する。ノイズの影響に着目しているため、 $K_{VL}$  は小さければ何であってもこの  $K_{aL}$  の値はほとんど変わらない。つぎに、この  $K_{aL}$  に対して  $K_{VL}$  を最初の値より徐々に大きくしてゆき高周波振動が現われず 0.2[sec] 直後の行き過ぎが適当で除外距離が最小となるような値を選定する。最後に  $K_{V\theta}$  を最初の値付近で変えて上の各遮断周波数に対する  $K_{aL}$  と  $K_{VL}$  の選定を行なう。これらすべての実験結果の中で除外距離が最小となるものを選ぶと、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数は 100[Hz]、 $K_{aL} = 1.0$ 、 $K_{VL} = 150$ 、 $K_{V\theta} = 500$  の組合わせとなった。5.2 節の場合より  $K_{VL}$ 、 $K_{V\theta}$  を小さくしなければならないことがわかる。また、加速、整定期は定定期より安定度が要求され、文献 2) の場合より  $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数を高くする結果となっている。

本加速度補償制御では安定度の劣化のため整定期の後半では速度波形が 5.2 節の結果より振動的になる。除外距離の短縮のため速度追従性と 0.2[sec] 直後の行き過ぎの抑制は必要であるため、ここでは 0.25[sec] 後、中心速度が初めて 75[mm/sec] になったときに中心速度コントローラゲインを切替えることとする。左右偏差コントローラゲインの切替タイミングは 5.2 節と同様に 0.25[sec] とする。

このコントローラを用いて実験を行なった結果を Fig. 16、Fig. 17、Fig. 18、Fig. 19 に示す。これらより、5.2 節の結果と比べて 0.2[sec] 直前の速度は目標曲線に近づいており、その直後は左右偏差が若干大きくなるもののオーバーシュートが抑えられていることがわかる。これにより除外距離は 7.7206[mm] まで改善されている。

本加速度補償制御実験では加速度補償ノイズのための  $K_{aL}$  を十分大きくできないことがその効果に限界を与えている。リニアスケールの分解能の向上などによりこのノイズを低減できればさらに効果が期待できる。

#### 5.4 部分的に加速度補償を用いた制御

加速度補償においては、加速度推定用フィルタの位相遅れのため安定性が劣化するので長期間これを用いると速度波形の振動が大きくなる。このため 5.3 節では  $K_{VL}$  と  $K_{V\theta}$  を小さくしていたが、除外距離に最も影響するのは 0.2[sec] 前後の速度波形の振動であるため、ここではこの前後の期間だけ部分的に加速度補償を行ない  $K_{VL}$  と  $K_{V\theta}$  を大きくする制御を試みる。

ここでは、中心速度コントローラゲインと左右偏差コントローラゲインは最初、加速度補償なしの 5.2 節のものを用い、0.17[sec] 後、中心速度が初めて目標速度と一致したときに加速度補償を加え、0.25[sec] 後、中心速度が初めて 75[mm/sec] になったときに中心速度コントローラゲインを、0.25[sec] で左右偏差コントローラゲインを定定期のものに切替えることとする。この加速度補償制御においては  $K_{aL}$ 、 $K_{VL}$ 、 $K_{V\theta}$  の調整と  $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数の選定は 5.3 節と同様の手順で行なった。この結果、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数

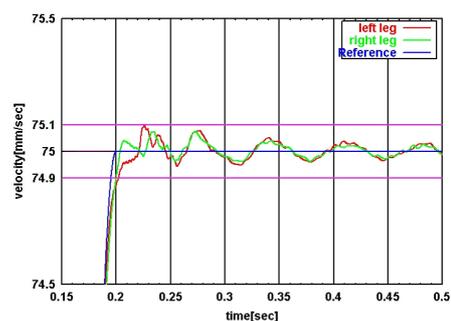


Fig. 16 Right and left leg velocities in experiment 5.3

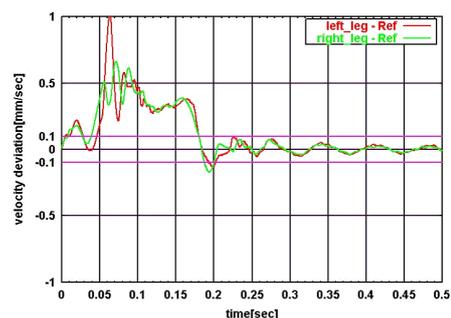


Fig. 17 Right and left leg velocity deviations in experiment 5.3

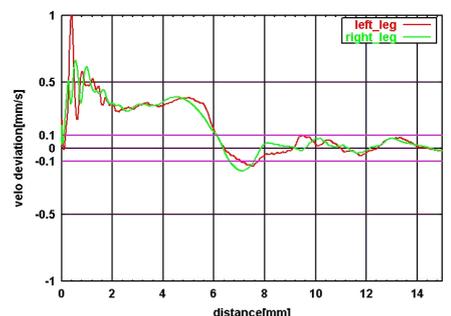


Fig. 18 Right and left leg velocity deviations vs distance in experiment 5.3

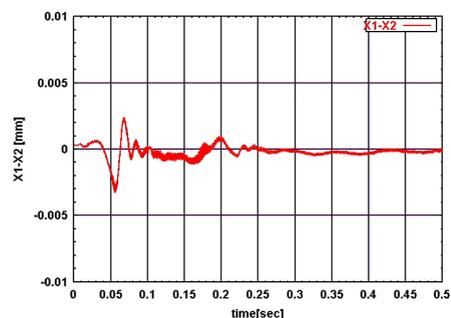


Fig. 19 Right and left leg deviation in experiment 5.3

は 75[Hz]、 $K_{aL} = 1.0$ 、 $K_{VL} = 200$ 、 $K_{V\theta} = 600$  となった。5.3 節と比べて  $K_{VL}$ 、 $K_{V\theta}$  を大きくできていることがわかる。また、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数が低くなっているにもかかわらず、 $K_{aL}$  が変わっていないのは、この場合加速度推定ノイズの影響を低減し、 $K_{aL}$  をわずかに大きくするより

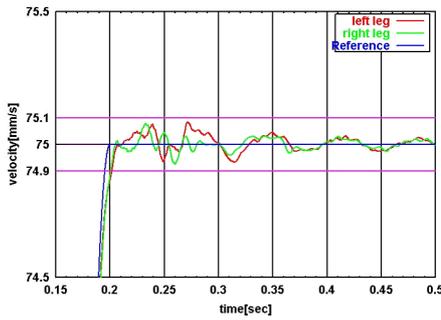


Fig. 20 Right and left leg velocities in experiment 5.4

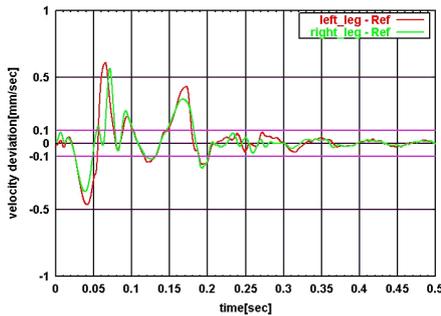


Fig. 21 Right and left leg velocity deviations in experiment 5.4

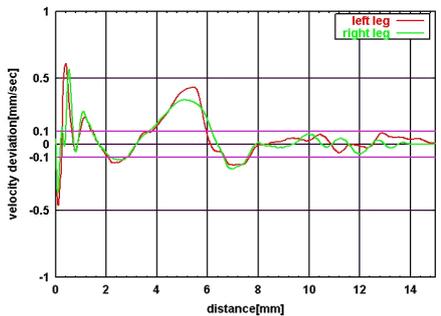


Fig. 22 Right and left leg velocity deviations vs distance in experiment 5.4

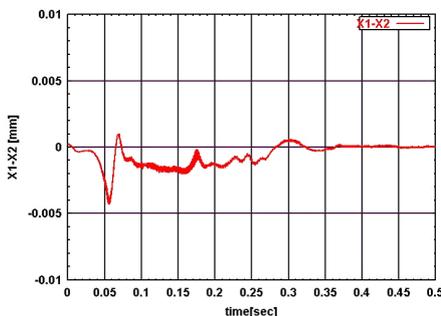


Fig. 23 Right and left leg deviation in experiment 5.4

$K_{VL}$ ,  $K_{V\theta}$  を大きくするほうが、除外距離短縮に効果があったと解釈できる。なお、切替タイミング 0.17[sec] は 5.3 節の実験結果から速度が目標速度と同じになるタイミングを考慮して速度波形から選んだものである。また、 $K_{V\theta}$  は立上げ開始時は 700 であるが加速度補償時の 600 とあまり差がなく、

切替に伴う入力の不連続性は好ましくないので最初から 600 を用いることとした。

この制御を用いたときの実験結果を Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 に示す。5.3 節の結果と比べると 0.2[sec] 直後の行き過ぎが抑えられ目標値追従性がわずかに改善されている。除外距離は 7.6298[mm] で少し改善されている。

除外距離は 5.1 節のものより最終的にかなり最小限界値に近い値まで短縮できたといえる。ここでのゲイン切替のタイミングは実験的に定めたものであり、実機では微調整の必要があるかもしれない。

## 6. あとがき

空気圧浮上ガントリーの加速、整定期の精密速度制御において、速度偏差を早く目標範囲に整定させ除外距離を短縮するための制御則を提案し、実験によりその有効性を示した。

・最初にクロスカップリング制御方式における中心速度コントローラのフィードバックゲインを、加速期では安定度を重視し除外距離を短くするため比較的低くし、整定期では速度偏差をできるだけ小さくするため高くするというゲイン切替制御を行った。ここでの除外距離はさほど短くはならなかった。

・つぎに上の制御系の左右偏差コントローラにおいて、加速、整定期における左右速度の偏差とズレを抑えるため、速度フィードバックゲインを加速、整定期で大きくするゲイン切替制御を行なった。これにより、左右脚速度のズレもなくなり、除外距離をかなり短縮できた。

・さらにピッチ揺れとケーブル牽引の速度への影響を抑えるため、上の中心速度コントローラにおいて加速、整定期に加速度補償を加えた制御を行なった。これにより除外距離はさらに短縮できた。また、加速度補償は加速度推定用フィルタの位相遅れの影響を少なくするため部分期間で用いるほうがよいという結果を得た。

除外距離はコスト削減にかかわるものであり、少しでも短いほうが良いという性格のものである。ここではこの除外距離を単なる速度フィードバック則の場合と比べてかなり短縮し最小限界値に近い値を実現している。また、実機においても同様の結果が見込める。よって本研究の結果は十分有用であると考えられる。

樹脂の吐出量を加速中の目標速度にあわせる制御を行えば、除外距離をここでの最小限界値を越えてさらに短縮できる可能性がある。これはかなりの技術的困難性を伴うので本研究では対象としなかった、現在、加速期間での目標速度の形を工夫しそこでの速度変動率を小さくすることで、樹脂吐出量制御への負担を軽減する方向でこの方法を検討中である。

## 【参考文献】

- 1) 苅北一朗, 前田浩一: ガントリータイプ精密テーブルの精密速度制御について, 計測自動制御学会産業論文集, 5-11, 75/82 (2006)
- 2) 苅北一朗, 前田浩一, 北野岳志, 徳平裕介: 空気圧浮上ガントリー

- リーの加速度補償を用いた精密速度制御, 計測自動制御学会産業論文集, 6-7, 52/60 (2007)
- 3) DELTA TAU SYSTEMS, INC. : CROSS-COUPLED DRIVE OF DUAL-MOTOR GANTRY SYSTEM, (技術資料) (1997)
- 4) 堀 洋一: 加速度制御形サーボシステム, 公開特許公報, 昭和64-65608 (1989)
- 5) 末松, 山田: 画像処理工学, P75, コロナ社 (2000)
- 6) 濱口正良他: Electric Journal 別冊「2006LCD 工場・設備・装置」, 第4章第7節, 電子ジャーナル (2005)

.....

[ 著 者 紹 介 ]

苅 北 一 朗 (正会員)



1974年早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修了。同年東レエンジニアリング(株)入社。FAコントローラ, NC制御コントローラの開発に従事。

前 田 浩 一 (正会員)



1966年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。71年同大学大学院基礎工学研究科博士課程単位取得退学。(72年工学博士)同年同大学基礎工学部制御工学科助手。助教授を経て, 92年立命館大学理工学部情報工学科教授。96年同大学理工学部ロボティクス学科教授。この間(78-79)トロント大学電気工学科客員研究員。現在, ロボットのモデルベース制御および運動, 作業知能などの研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, システム制御情報学会, IEEEの会員。

北野岳志



2005年3月立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業, 06年4月立命館大学大学院入学。空気圧浮上ガントリーの精密速度制御の研究に従事。2007年4月より日揮(株)に勤務。

徳平裕介



2006年3月立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業, 06年4月立命館大学大学院入学。空気圧浮上ガントリーの精密速度制御の研究に従事。

.....