

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[†]

苅 北 一 朗*・前 田 浩 一**

Precise Velocity Control of the Gantry Type Precision Stage

Ichiro KARIKITA* and Hirokazu MAYEDA**

Recently, gantry type precision stage and its precise velocity control are required in the field of inspection machine and slit nozzle coater of flat panel display, since the glass substrate becomes large. To avoid the friction force, the gantry is sustained by air bearings. But, this causes pitch and yaw motions of the gantry, which act as new type disturbances. Hence, the control problem treated in this paper is very different from that of conventional gantries. In this paper, the requirements for the stage velocity control are discussed. The cross coupling PID control scheme is adopted here, and it is shown that the control performance satisfying the requirements sufficiently is obtained after the parameters tuning taking into account of the velocity noise and the disturbances. Moreover, the gain scheduling scheme is added to the cross coupling control scheme, and it is reported that the control performance is much improved by this.

Key Words: gantry control, velocity control, cross coupling control, gain scheduling scheme

1. ま え が き

大型ガラスが使用されるフラットパネルディスプレイの樹脂塗布や検査などのため、近年ガントリータイプの精密テーブルが必要とされてきている。液晶用コーティング樹脂塗布装置を例にとると、ガラスサイズが小さい第5世代(ガラスサイズ約1100[mm]×1300[mm])まではガラスを回転させて樹脂を均一に塗布するスピンコーターが主流であったが、液晶パネルの大型化やコスト低減のため大型化したガラスにおいてはこの方式では回転させることが困難であり、コーティング樹脂のほとんどが無駄になるという欠点が大きな問題となってきた。そこで、第5世代からはガラスをテーブルの上に固定し、樹脂を吐出するスリットダイを搭載したガントリーを移動させて塗布を行なう方法が使用されている。第5世代以降さらにガラスサイズは第6世代(約1850[mm]×1500[mm])、第7世代(約1850[mm]×2100[mm])と大型化が進み、このようなガラスサイズの大型化に伴い、スリットダイの重量も増し、そのスリットダイを高い精度で保持するためのガントリーの重量も増してきた。しかしながら重量が増しても、ガラス端部からの膜厚の均一性が要求され、さらにガントリーに要求される加速時間は逆により短くなる傾向にあり、加速

時とその直後の塗布ムラを生じさせないために、これまでに増して非常に高精度な移動速度制御と左右偏差を極小に抑える制御が要求されている。本研究はこれらを実現するコントローラを開発するものである。

従来、ガントリーは天井クレーンに代表されるようなリジッドな本体が左右のレール上を走行するタイプが広く用いられている。しかし、本体とレール間の摩擦の影響のためこの方式では要求される速度精度と左右偏差を満たすことは困難である。本研究ではこの摩擦をなくすため、本体を石製のレールの上にエアベアリングで浮上させ、横振れを抑えるためにもエアベアリングを用いたガントリーを用いる。このような構造の装置は重量のあるガントリーがレール上を5[μm]程度の微小な間隙をもって浮かんで走行するものであり、摩擦はほとんど無くなるもののガントリーのピッチ揺れ、ヨー揺れが避けられない。速度制御に対するこれらの影響により、このガントリーの速度制御問題は従来のものとは異なり新しいタイプの問題となる。

本研究では、樹脂塗布を目的としてクロスカップリング制御方式で移動速度と左右偏差のPID制御を行なう。ここでは速度推定ノイズの大きさや揺れの影響を考慮したパラメータ調整を行ない、要求性能を満足する結果が得られた。同時に、加速時と定速時ではガントリーの揺れの影響が異なり、加速時の安定性確保のためフィードバックゲインを高くできないことも判明した。そこで、ゲイン切り替え制御方式を併用して定速時のフィードバックゲインを高くすることを試みた。この結果、定速時の制御性能が大きく改善された。

石定盤の上にエアベアリングで浮上させた構造物の精密運

[†] 第48回自動制御連合講演会で発表(2005年11月)

* 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 April 13, 2006)



Fig. 1 Outer view of the gantry type precision stage

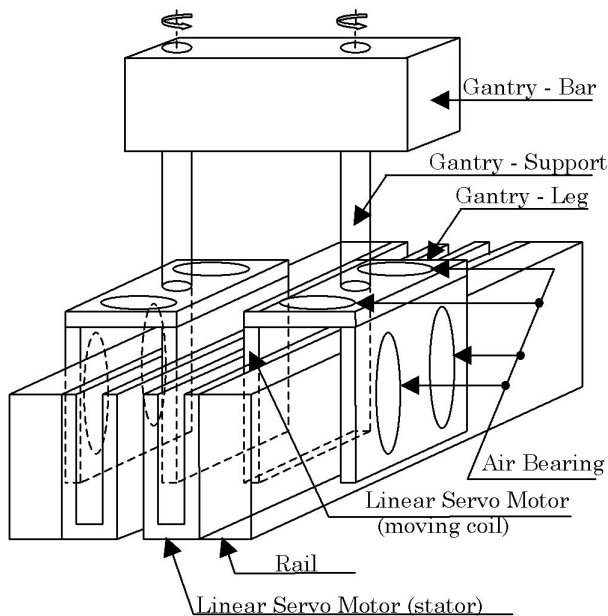


Fig. 2 Structure of the gantry

動制御の研究としては、これまでに半導体検査用の超精密 XY ステージの高速化と経路誤差の極小化の研究がある¹⁾。しかし、制御目標、構造物の寸法、重量あるいは位置計測装置の相違から、コントローラ開発については本研究とはかなり異なるものである。

本稿では、まずガントリータイプ精密テーブルの概要と樹脂の塗布ムラを小さくするための速度制御性能目標について述べる。つぎに、ガントリーの動特性モデリングを行ない、これに対するクロスカップリング制御方式のコントローラの構成をしめす。また、移動速度の評価法と計測分解能についても考察を加える。最後に、この方式の制御実験結果をしめし、制御性能目標を十分に満足することおよびこの方式が左右独立制御方式より優れていることを明らかにする。また、ゲイン切替制御を付加することにより、制御性能がさらに大きく改善されることをしめす。

2. ガントリータイプ精密テーブル

2.1 装置概要

本研究で用いるガントリータイプ精密テーブルの概観およびそのガントリーの構造の概略図をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。装置の概要は以下のとおりである。

樹脂を塗布されるガラス(約 1850[mm] × 2100[mm])は石製の固定テーブルの上に置かれる。このテーブルの左右両側には石製のレールが配置され、このレール上をエアベアリングでガントリーが前後に移動する。ガントリーはコーティング樹脂を吐出するスリットダイを搭載した石製の横木およびそれを支える左右 2 組の支柱と足からなる。各足にはガントリー全体を浮上させるためレール上面に対してエアベアリングが、横振れを抑えるためレール側面に対してパネ付きのエアベアリングが装着されている。また、ガントリーを移動させるためのリニアサーボモータも各足に配置されている。このリニアサーボモータに並列してリニアスケールが置かれガントリーの位置が検出される。リニアスケールの分解能は 0.1[μm/pulse] である。ガントリーにピッチ揺れが発生した場合理論的にはスリットダイと足の間には位置、速度の誤差が生じることになるが、揺れによる力は無視できないもののこれらの誤差は極めて微小で塗布ムラに対する影響は無視できると考えられる。そこでここでは上のリニアスケールによる足の速度を制御することとする。横木と足は支柱に対して自由に回転できる構造を採用し、左右の足に位置偏差が生じても足とレールの擦れを防止したりガントリーのヨー揺れを軽減できるようにしている。

これらを制御するコントローラには比較的安価に入手できる PC-AT 規格の PC(Personal Computer) を使用した。これにリアルタイム OS, Art-LINUX を搭載し 100[μsec] のサンプリングタイムを実現している。加速パターンは台形加速、S 字加速あるいは多段加速などが PC 内で選択可能であり、制御則を含むすべての動作パターンも PC 内で生成される。

このガントリーの精密速度制御においては、空気浮上しているため摺動抵抗はほぼ無視できるものの、ガントリー本体のピッチ揺れによる力とガントリーが牽引する給電、信号ケーブルや給気チューブの抵抗力が主な入力外乱となる。

2.2 制御性能目標

2.2.1 移動速度

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²⁾。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。樹脂吐出流量は比較的精度よく正常に保つことができるので、本研究では塗布ムラを抑えるためガントリーの移動速度変動率を出来るだけ小さく保つことを問題とする。塗布ムラは膜厚変動率のガントリーの進行方向に関する空間周波数にも影響される。すなわち、塗布された樹脂の拡散効果により高い空間周波数の膜厚変動率は最終的には塗布ムラとしては無視できることが経験的

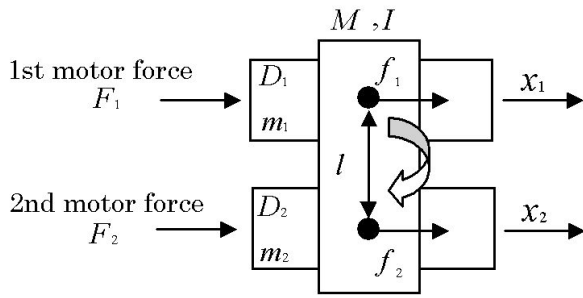


Fig. 3 Model of the gantry

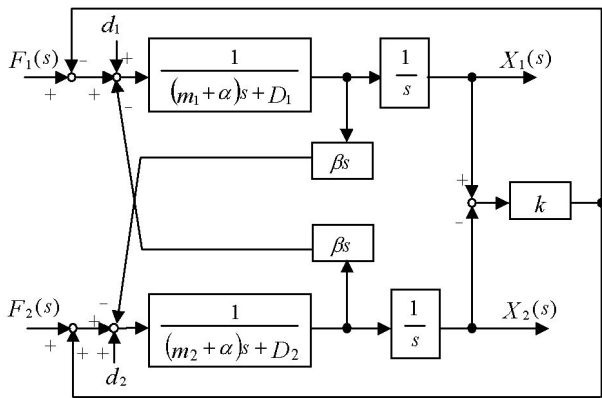


Fig. 4 Block diagram of the gantry

に知られている．また，この膜厚変動率の空間周波数は移動速度がほぼ一定のとき移動速度変動率の時間周波数に比例する．そこで，塗布ムラを抑えるためには適当な周波数以下の領域での移動速度変動率を考慮すればよいことになる．以上のことを勘案して，ここでは，目標移動速度を 100[mm/sec] と設定し，移動速度変動率を 50[Hz] 以下の領域で少なくとも $\pm 0.5[\%]$ 以下で，かつ出来るだけ小さく保つことを目標とする．また，同時に将来の高品質化を考慮し，移動速度変動率をどこまで小さくできるかに挑戦することも目標とする．

ガントリーは樹脂塗布の開始時ではガラス基板の端で静止していることが要求され，その状態からガントリーを目標速度まで加速する．また，スリットダイの樹脂吐出流量もこの加速中に一定値まで増加させる．この両者の同期を取るとは極めて困難であり，加速中に膜厚を制御することはできない．したがって，この加速中の移動距離に相当するガラス基板が無駄となるので，加速時間を短くすることが重要となる．いっぽう，加速時間を短くすると，加速度やその変化が大きくなりガントリーの揺れが移動速度に大きく影響する．特に，加速から定速への移行時に移動速度変化率が定速時とくらべて大きく振動しそれがなかなかおさまらないという問題が生じる．ここでは，加速時間を 0.2[sec] と設定し，正弦波を用いた S 字状の加速パターンを採用して，加速から定速への移行時における移動速度変化率の振動振幅と定速までの整定時間をできるだけ小さくすることも目標とする．移動速度の変化が極めてなめらかであれば，正常な塗布をできるだけ早くするため，樹脂の吐出ポンプを制御して吐出流量を移動速度

に一定部分同期させることも考えられるが，この調整は極めてやかかいであり精度も限定的であるので，ここではこの方法を考慮しないものとする．

2.2.2 左右の偏差

ガントリーが左右の足にそれぞれおかれたリニアサーボモータで駆動するため，左右の足の位置に偏差が生じる．この位置偏差の変化はスリットダイの垂直軸まわりの回転を意味し，スリットダイに蛇行移動を生じさせることから塗布ムラの一因となる．また，この位置偏差が大きいと足とレールが擦れる恐れもある．そこで，この位置偏差を抑制する必要がある．ここでは，位置偏差を移動中を通じて少なくとも $\pm 100[\mu\text{m}]$ 以下に保つことを目標とする．また同時にこれをできるだけ小さく保つことも目標とする．

左右の足の速度偏差はスリットダイの各点で移動速度に違いがあることを意味し，特に左右端の速度差が最も大きいものとなる．この要因の塗布ムラへの影響を抑えるため前項の速度変化率の目標を左右の足およびそれらの中間点の速度に適用することとする．

従来は左右それぞれにサーボのループを組んで独立に制御する方式がとられていたが，本装置では上の目標を達成するためにクロスカップリング制御³⁾ (同期制御) の考え方を導入して実験を行なった．

3. ガントリーモデリングと制御方式

3.1 モデリング

ガントリーの運動モデルは Fig. 3 のように表わされる．

ただし

- F_i : 第 i 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 支柱の運動粘性抵抗摩擦係数 ($i=1,2$)
- 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．

これらにおいて以下の運動方程式がなりたつ．

第 1 支柱の運動方程式

$$m_1 \ddot{x}_1 + D_1 \dot{x}_1 = F_1 - f_1 \quad (1)$$

第 2 支柱の運動方程式

$$m_2 \ddot{x}_2 + D_2 \dot{x}_2 = F_2 - f_2 \quad (2)$$

横木の運動方程式 (重心) 併進の運動方程式

$$M(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2)/2 = f_1 + f_2 \quad (3)$$

横木の運動方程式 (重心) 回転の運動方程式

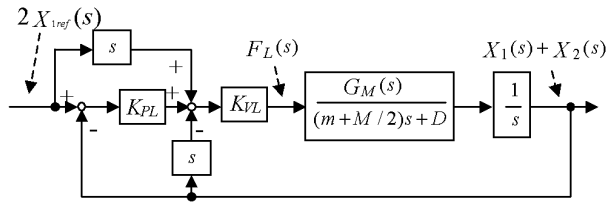


Fig. 5 Block diagram of the velocity controller

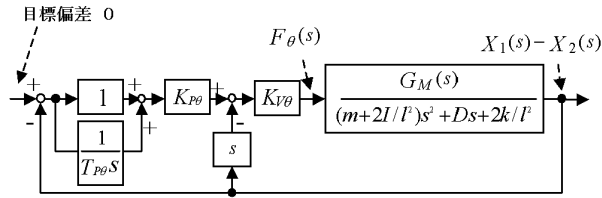


Fig. 6 Block diagram of the difference controller

$$I(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2)/l = l(f_1 - f_2)/2 - k(x_1 - x_2)/l \quad (4)$$

ただし k は x_1 と x_2 が異なる場合にレール側面に対するバネ付きのエアベアリングにより発生するモーメントに対するヨー揺れの等価バネ定数である。

これらにおいて f_1, f_2 を消去し、ラプラス変換を施すことにより以下の2式(5),(6)が得られる。

$$sX_1(s) = \frac{F_1(s) - \beta s^2 X_2(s) - k(X_1(s) - X_2(s))/l^2}{(m_1 + \alpha)s + D_1} \quad (5)$$

$$sX_2(s) = \frac{F_2(s) - \beta s^2 X_1(s) + k(X_1(s) - X_2(s))/l^2}{(m_2 + \alpha)s + D_2} \quad (6)$$

ただし $X_1(s), X_2(s)$ は x_1, x_2 に、また $F_1(s), F_2(s)$ は f_1, f_2 にラプラス変換を施したものであり、 $\alpha = (M/4 + I/l^2), \beta = (M/4 - I/l^2)$ である。これらをブロック線図で表わすと Fig. 4 となる。Fig.4 につけ加えた d_1, d_2 はそれぞれの脚にかかる外乱であり具体的にはピッチ揺れやケーブル類やエア配管類やレール上に固着した樹脂などによるものである。

3.2 制御方式

Fig.4 を制御する方式として2通り考えられる、ひとつは左右独立制御であり、もうひとつの方法はクロスカップリング制御である。左右独立制御とは左右のモーターそれぞれに対してコントローラを配してサーボの速度ループと位置ループを組む制御方式であり、左右は独立の動きをしてそれぞれに速度補正、位置補正をかけながら動かす制御方式である。

これに対してクロスカップリング制御方式は(5),(6)において $m = m_1 = m_2, D = D_1 = D_2$ として変形するとつぎの(7),(8)の2式に非干渉化されることに注目して行なう制御方式である。

$$s(X_1(s) + X_2(s)) = \frac{G_M(s)}{((m + \frac{M}{2})s + D)} F_L(s) \quad (7)$$

$$X_1(s) - X_2(s) = \frac{G_M(s)}{(m + 2I/l^2)s^2 + Ds + 2k/l^2} F_\theta(s) \quad (8)$$

ただし $G_M(s)$ はモーター伝達関数であり、 $F_L(s) = F_1(s) + F_2(s), F_\theta(s) = F_1(s) - F_2(s)$ である。

上において $(X_1(s) + X_2(s))$ はガントリーの左右の位置座標の和であり $(X_1(s) - X_2(s))$ はガントリーの左右の位置座標の差である。前者をガントリー中心位置の目標値の2倍に近づけ、後者をゼロに近づけるコントローラを設計すれば左右の偏差をゼロに保ちつつ、目標速度で動かすことができる。これがクロスカップリング(同期制御)方式と呼ばれる方式である。

Fig. 5 に左右の座標の和を目標座標の2倍に近づける速度コントローラのブロック線図を示す。ただし、Fig.5 において K_{PL} と K_{VL} は位置フィードバックゲインと速度フィードバックゲインである。この制御系は位置制御系の形で表現しているが、簡単なブロック線図の等価変換により、ゲイン K_{VL} 、積分定数 $1/K_{PL}$ としての速度のPI制御系と解釈できる。Fig. 6 に左右の偏差をゼロに近づける偏差コントローラのブロック線図を示す。同じく、Fig.6 において $K_{P\theta}$ と $K_{V\theta}$ は位置フィードバックゲインと速度フィードバックゲインである。また $1/T_{P\theta}$ は偏差を絶対値のゼロに近づけるための積分定数であるが、ここでの実験においてはこの積分補償は、これがなくとも偏差が十分速く小さい値に収束したので、用いないこととする。

これらをまとめたクロスカップリング制御(同期制御)方式の全体のブロック図は Fig. 7 となる。

3.3 移動速度の評価

ガントリーの各足の移動速度は、各足のリニアスケールからのパルス数を $100[\mu\text{sec}]$ のサンプル周期でカウントし、この間の移動量をサンプル周期で割ったもので計測できる。しかし、サンプル周期が短い場合はこの計測値は大きな量子化ノイズを含むこととなる。本研究においては、速度制御性能を評価する場合は2.2節で述べたように $50[\text{Hz}]$ 以上の速度周波数成分は無視してよい。そこで、ここでは $50[\text{Hz}]$ でゲインが $-3[\text{dB}]$ となる窓幅 $14[\text{msec}]$ のハニングフィルター⁴⁾で上の計測値を平滑化したものを速度制御性能評価に用いることとする。時間平均フィルターを用いることも考えられるが、ゲインの減衰特性の良さからハニングフィルターを採用することとした。このハニングフィルターの周波数特性を Fig. 8 に示す。

コントローラにおける速度フィードバックを実行するためにも移動速度値は実時間で必要となる。この場合も量子化ノイズを低減するためにフィルターを用いることが考えられるが、フィルターの位相遅れのため速度フィードバックゲインを大きくすると安定度が悪化する傾向を生じる。ここでは、この後者を重視して上の速度計測値をそのまま速度フィードバックに用いることとした。

3.4 移動速度の計測分解能

本研究でのガントリーではエアベアリングを用いて摺動抵抗を極めて小さくしているため、移動速度変動は計測分解能に近くまで制御できると推定される⁵⁾。そこで、この計測分

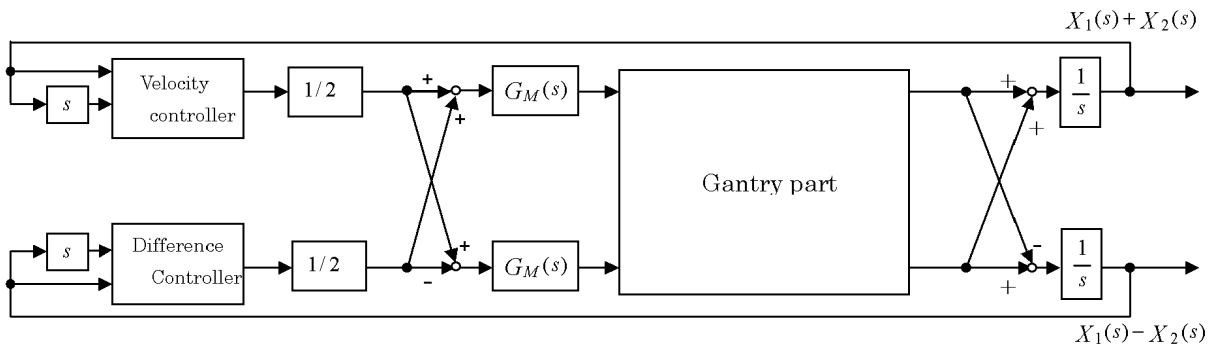


Fig. 7 Block diagram of the total system

解能について述べておく．

リニアスケールから計測される速度の分解能 δV [%] は一般につきのように考えられる．

$$\delta V = \pm(P/(T \times V)) \quad (9)$$

ただし、 P はリニアスケール分解能、 T は計測時間、 V は速度である。(9)式より δV は速度 V が計測時間内で一定であるとき、リニアスケールからの 1 パルスの時間平均速度に与える影響の大きさと解釈することができる．計測時間 T が大きいほど、また速度 V が大きいほどこの分解能 δV は小さくなることになる．

速度制御性能評価にはハニングフィルターを用いるとしたが、このときの分解能は(9)式で直接評価できない．そこで、50[Hz] でゲインが-3[dB] となる計測時間 $T = 8.8$ [ms] の時間平均フィルターを上ハニングフィルターにほぼ等価と考えて評価すると、リニアスケールの分解能 P が 0.1 [$\mu\text{m}/\text{pulse}$]、速度 $V = 100$ [mm/sec] であることから、分解能 $\delta V = \pm 0.011$ [%] となる．これは速度制御性能評価には十分な分解能であると考えられる．ちなみに、速度フィードバックに用いる速度値のほうは計測時間 $T = 100$ [μsec] であることから分解能 $\delta V = \pm 1$ [%] とかなり悪くなっている．

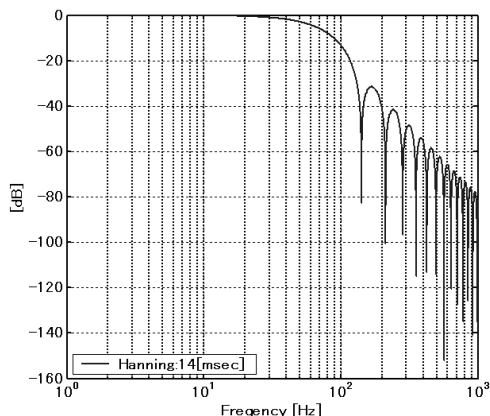


Fig. 8 Frequency characteristics of the hanning window filter

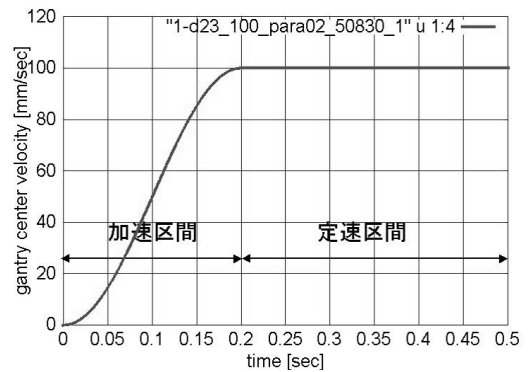


Fig. 9 Reference velocity

4. 制御実験

4.1 クロスカップリング制御

クロスカップリング制御の実験に用いた立上げ時の目標速度パターンを Fig. 9 に示す．0[sec] から 0.2[sec] までの間に 0[mm/sec] から 100[mm/sec] まで S 字カーブで加速を行っている．また、約 5[sec] までの間 100[mm/sec] の速度を維持した後 0.2[sec] で 0[mm/sec] に戻す速度曲線にて以降の実験を行なった．

クロスカップリング制御方式におけるパラメータ調整の方法は以下のとおりである．

[全体の調整フロー]

STEP1:すべてのパラメータを安定的に動作する十分に小さい値に設定する．

STEP2:偏差コントローラの $K_{P\theta}, K_{V\theta}$ を固定して速度コントローラの K_{PL}, K_{VL} を下のサブルーチンにしたがって調整する．

STEP3: K_{PL}, K_{VL} のいずれれもが調整前に比して下がることなくどちらかが上がり、定速区間の速度波形の変動幅が小さくなったかを調べ、これらの条件をみだしていなければ調整の終了．これらの条件を満たしていればつぎに進む．

STEP4: K_{PL}, K_{VL} を固定し $K_{P\theta}, K_{V\theta}$ を下のサブルーチンにしたがって調整して STEP2 に進む．

[$K_{VL}(K_{V\theta}), K_{PL}(K_{P\theta})$ の調整サブルーチン]

STEP1: $K_{PL}(K_{P\theta})$ を固定して $K_{VL}(K_{V\theta})$ をあげていき、速度波形に約 70[Hz] 以上の高周波ノイズが顕著になる値から約 25[%] 程度さげたとこに設定する。

STEP2: $K_{VL}(K_{V\theta})$ を固定して $K_{PL}(K_{P\theta})$ をあげていき、不安定となる直前の値から約 25[%] 程度さげたとこに設定する。

以上によりゲイン調整はなされる。最初からゲインが高いと不安定となるので、ゲインをあげていく際には加速区間と定速区間のいずれにおいても発振しないゲインをみつける必要がある。また、本研究の目的のひとつである速度変動を小さくするには揺れによる入力外乱が比較的低周波であることを考慮すると、速度コントローラの位置ループゲインを大きくとったほうが良いので、いったん速度ループゲインと位置ループゲインが定まった後に速度ループゲインをさげながら位置ループゲインをあげていき、発振しない最良のポイントをみつけることにより速度変動が小さくなる場合もある。

Fig. 10 にクロスカップリング制御方式の速度変動の結果を示す。100[mm/sec] に達した後の定速時の速度変動率は約 ± 0.04 [%] となっている。また同じ実験において 100[mm/sec] に立ち上げた直後の速度変動のようすを Fig. 11 に拡大図として示す。立ち上げ直後のピーク速度は 100.3[mm/sec] となっている。

立上げてから 0.5[sec] 間における左右の偏差の状態を Fig. 12 に示す。左右の偏差は $-3[\mu\text{m}] \sim +1[\mu\text{m}]$ となっていて目標に比べて大幅に小さな値となっている。Fig. 10 のグラフはガントリー中心部の速度であるが、左右偏差制御の結果が良好であったので、左右端の速度の変動率も約 ± 0.04 [%] に収まっている。

同じ速度パターンで左右独立制御方式の実験を行なったが、速度変動についてはゲイン調整はクロスカップリング制御方式の場合と同様に加速区間、定速区間のいずれにおいても振動しない範囲で高くとる必要があり、得られた結果は速度変動についてはクロスカップリング制御方式の場合とほぼ同じとなった。

左右独立制御方式の実験において、立上げてから 0.5[sec] 間における左右の偏差の状態を Fig. 13 に示す。この場合の左右の偏差は $-8[\mu\text{m}] \sim +5[\mu\text{m}]$ となり、いずれの結果も 2.2.2 節の左右の偏差における目標値はクリアしているものの、クロスカップリング制御方式のほうが左右の偏差に関しては左右独立制御方式より良い結果が得られることが判明した。

4.2 クロスカップリング制御+ゲイン切替制御

Fig. 10 をみると定速時の速度変動率は約 ± 0.04 [%] で最低限の目標移動速度変動率を満足しているものの、これをさらに小さくすることを試みる。定速区間の位置ループゲインを高くすると速度変動は改善されると思われるが、最初から高い位置ループゲインでは加速時に不安定になる。そこで速度変

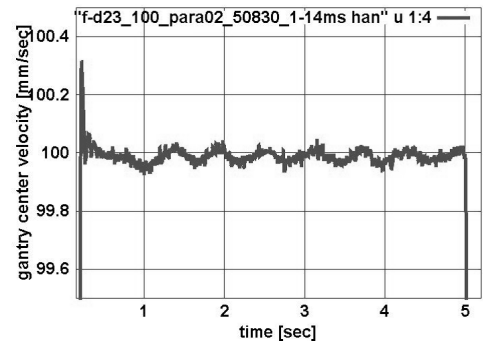


Fig. 10 Velocity of the cross coupling control

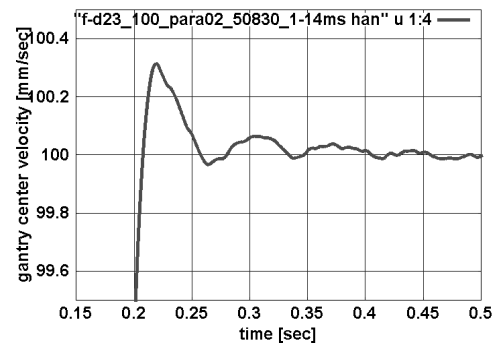


Fig. 11 Velocity of the cross coupling control

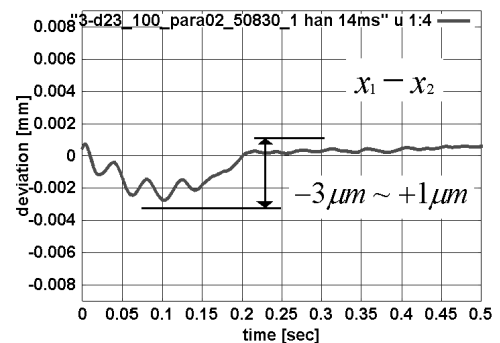


Fig. 12 Deviation of the cross coupling control

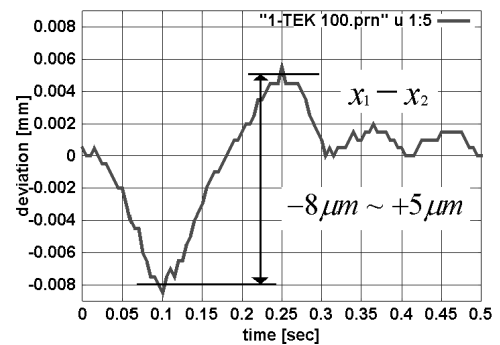


Fig. 13 Deviation of the independent control

動を極力少なくしようとして、加速時の安定限界に近い高い値で位置ループゲインを設定してみると加速区間から定速区間への移行時に揺れが大きくなる。本実験においても Fig.11 を

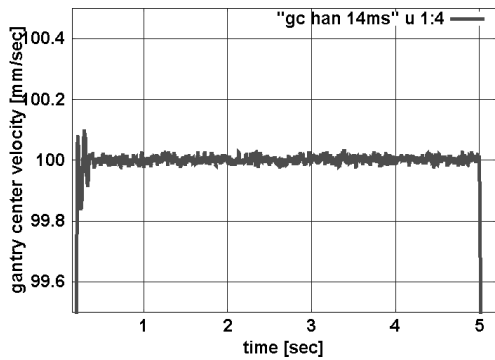


Fig. 14 Velocity of the cross coupling control and gain scheduling scheme

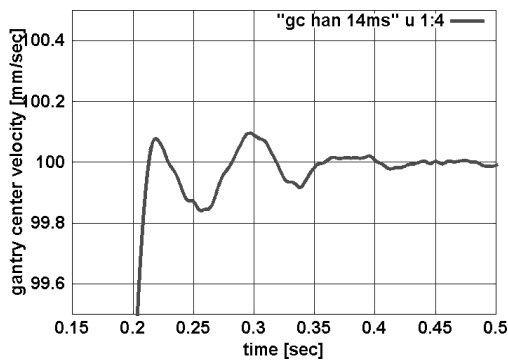


Fig. 15 Velocity of the cross coupling control and gain scheduling scheme (zoomed)

みればわかるようにクロスカップリング制御のみでは加速区間から定速区間に到達した後の速度の振動振幅が大きくなっている。

したがって高いゲインのセットと低いゲインのセットを2つもち、加速区間は低いゲインで立上げ加速区間から定速区間に達したときに速度の振動振幅を小さく押え、定速区間は位置ループゲインを高くすることにより、速度変動を改善することができるのではと考え、クロスカップリング制御にゲイン切替制御を併用する実験を行なった。

ゲイン切替制御の概要は以下のとおりである。クロスカップリング制御においては、平均速度を制御するコントローラにおける速度ループゲインと位置ループゲイン、また左右の偏差を制御するコントローラにおける速度ループゲインと位置ループゲインの4つが存在し、あらかじめこれらを2セットもっておき加速区間は低い位置ループゲインをもったセットで立上げ、フィードバック速度が目標速度に到達した後に高い位置ループゲインをもったセットへと切替える。

また、ゲイン切替制御を行なう際にそのままゲイン切替を行なうと Fig.5 の速度コントローラの場合 F_L (モータ指令値) の演算結果が急速に増大しステップ状の出力がなされガントリーに衝撃が加わる。これを避けるために F_L を計算する際にゲイン切替を行なった以降は目標位置からゲイン切替時の位置誤差を減ずることによりこの衝撃を回避しスムーズ

な切替を可能とする。

ゲイン切替制御におけるゲインの選定は以下のように行なう。速度ループゲインである K_{VL} を定速区間で大きくとっても全体的に振動的になり、速度変動率の改善も見られないためにクロスカップリング制御のみの場合と同じ値とし、ゲインの切替は行なわなかった。いっぽう位置ループゲインである K_{PL} は加速区間では比較的小さめに、定速区間では大きくした。理由は加速区間ではゲインが小さいほうが切替時の加速度が小さくなり、速度の低周波振動の振幅を小さく押えることができ、また定速区間で位置ループゲインを大きくすることは Fig.5 において速度のPI制御において積分をきかせることになり、低周波領域で速度ループゲインを高くした効果が得られるので、低周波の速度変動が改善されると考えられるからである。

なお、Fig.6 の偏差コントローラにおける位置フィードバックゲイン $K_{P\theta}$ と速度フィードバックゲイン $K_{V\theta}$ はゲインの切替を行なっても速度変動率の改善における効果は見られなかったので加速区間も定速区間も同じ値のままとした。

ゲイン切替制御を行なった場合の速度変動の状況を、Fig. 14 に示す。速度変動率はクロスカップリング制御のみの場合の $\pm 0.04[\%]$ から計測分解能に近い $\pm 0.02[\%]$ まで改善されている。また Fig. 15 をみればわかるように定速区間に達した後の速度の低周波振動の振幅を小さく押えることができている。また定速への整定時間もクロスカップリング制御のみの場合に比して少し速くなっている。

5. あとがき

クロスカップリング制御方式では加速区間から定速区間への移行時に振動が大きくなるものの、左右の偏差や定速区間における、速度変動率において目標を達成する制御結果が得られた。また、クロスカップリング制御方式の場合、左右独立制御方式の場合に比して左右の偏差は良い結果が得られた。

クロスカップリング制御方式に加えゲイン切替制御方式を加えることにより定速区間で位置ループゲインを大きくすることにより、クロスカップリング制御方式単独の場合に比して速度変動率をさらに小さくすることができた。また、加速区間において位置ループゲインを小さくすることにより、クロスカップリング制御方式単独の場合に比して加速区間から定速区間へ到達時の加速度が小さくなり、速度の低周波振動の振幅を小さく押えることができると同時に、定速への整定時間を短くすることができた。

ガントリータイプの精密テーブルにおいて速度変動率は、エアベアリングを用いて摺動抵抗が少ない装置の場合はリニアスケールの分解能をあげればさらに速度変動率が小さくなることが予想される。

今後は加速をスムーズに行ない定速に移行した後にさらに安定した速度変動を得て、なおかつ外乱が入っても速度ムラへの影響が少なくなるように加速度フィードバック制御や加速度フィードフォワードの制御の実験を行ない効果を確かめ

てみることも考慮中である。

参 考 文 献

- 1) 川地俊一：超精密ステージの開発，日本機械学会誌，108-1039,48/49(2005)
- 2) 濱口正良他：Electric Journal 別冊「2006LCD 工場・設備・装置」，電子ジャーナル，第4章，第7節 (September 2005)
- 3) DELTA TAU SYSTEMS, INC. : CROSS-COUPLED DRIVE OF DUAL-MOTOR GANTRY SYSTEM, (技術資料) (June 1997)
- 4) 末松，山田：画像処理工学，コロナ社，P75(2000)
- 5) (株)ジイエムシーヒルストン：速度リップルについて，(同社製シャフトモーター選定資料) (2005)

[著 者 紹 介]

菊 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。F A コントローラ，N C 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。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ド制御および運動，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。