

## 空気圧浮上ガントリーの加速度補償を用いた精密速度制御<sup>†</sup>

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  
with the Acceleration Feedback Compensation

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. In this paper, to reduce the velocity fluctuation and the range of deviation between the gantry legs due to the input disturbances, the velocity control scheme with the acceleration feedback compensation is proposed and examined on a miniature gantry. First, the control is experimented for various acceleration feedback gain and integral time, where the position and the velocity gains are fixed. The results show how the acceleration gain and integral time effect on the velocity control. Next, the velocity controls without acceleration compensation and with acceleration P compensation and acceleration PI compensation are experimented after the control parameters optimization for each control. Comparison of results of the three controls shows that the acceleration compensations are very valid for the control purposes.

**Key Words:** gantry control, velocity control, acceleration feedback compensation

### 1. ま え が き

フラットパネルディスプレイ製造において近年ガラス基板の大型化が著しく進み、それに対する樹脂塗布では、従来のスピンコーターに替わってスリットノズルを搭載したガントリータイプのコーターが使用されるようになってきた。ガラス基板サイズが大きくなるにつれスリットダイの重量も大きくなるが、塗布樹脂の膜厚を均一に保つなどのためガントリーを精密速度制御することが要求される。また、高速度化や立ち上げ距離の短縮も望まれていることから、速度制御への要求内容はさらに厳しくなっている。筆者らはこの要求に応えるため、空気圧浮上ガントリーの精密速度制御の研究を行ってきた<sup>1)</sup>。そこではクロスカップリング制御とゲイン切替により、ガントリーの速度変動率と左右脚の位置の差(以後、左右偏差と呼ぶ)が十分要求仕様内に収まることの実験を用いて検証されている。しかしながら、液晶パネルにおいては今後のさらなる高品質化が要求されており、このためガ

ントリーの速度制御精度をさらに高める、あるいはどこまで高精度化できるかに挑戦することが求められている。

ガントリーの速度変動と左右偏差はガントリーの揺れ、ケーブルの牽引、モータの着磁ピッチムラ、レールの汚れなどに起因する入力外乱によって生じる。本研究では、加速度補償によりこれらの入力外乱の影響を早期に抑制することにより定速期の速度変動率と左右偏差をできるだけ小さくすることを試みる。ガントリーの制御方式には左右独立制御とクロスカップリング制御の2つがある。前者は制御パラメータ調整の考え方が簡単であるが、一方の脚の運動による他方の脚への干渉力を無視している。後者はこの干渉力を動特性に含めて制御できるが並進制御系と左右偏差制御系の制御パラメータ調整のかねあいに難しさが残る。本研究では制御パラメータ調整の簡単さおよび、加速度補償により上の干渉力を入力外乱に加えても速度制御への影響を低減できると思われるので前者の制御方式を採用する。

加速度補償は従来より提案されてきた技術であり<sup>2)</sup> 入力外乱を早く抑制することや目標軌道への追従性の向上などに効果があるとされているが、加速度の推定ノイズが大きいため加速度補償ゲインを高くできずその効果は十分には確認されてこなかった。しかし、最近は加速度センサの高精度化に伴いこの技術を見直す機運が生じつつある。

加速度は近年その分解能が非常に高くなったリニアスケ-

<sup>†</sup> IEEE TENCON 2006 で一部を発表 (2006・11)

\* 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 February 9, 2007)

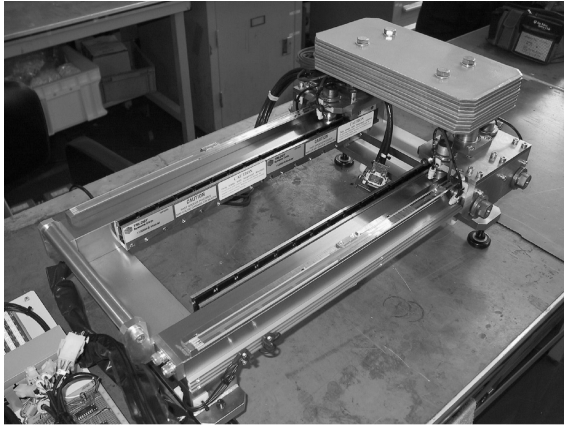


Fig. 1 View of the gantry

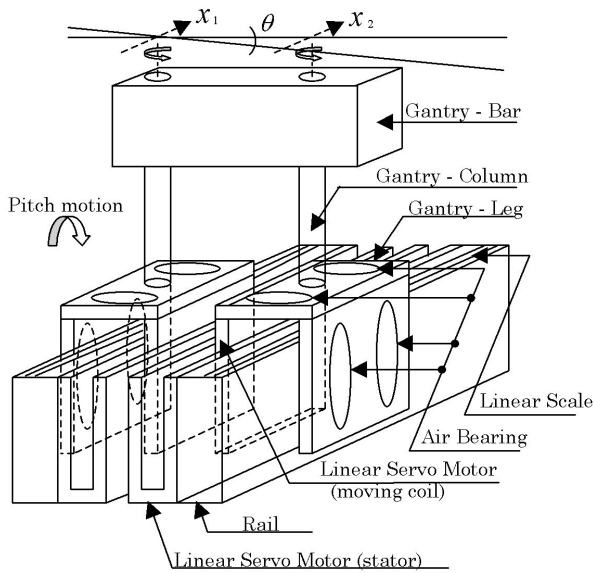


Fig. 2 Structure of the gantry

ルによる位置情報を2階差分し、それをフィルターすることでも推定ノイズを低減できる。本研究では加速度センサを用いることなく、空気圧浮上ガントリーに装備されている高分解能リニアスケールによる加速度推定値を利用することとする。この方式においては、差分値に対するフィルターの遮断周波数の選定が1つのポイントとなる。これが高いと推定ノイズが大きくなり、低いとフィルターの位相遅れのため加速度補償が遅れその効果が低下することになる。また、この推定値を用いて加速度補償を行なうと、その影響のため速度と位置のフィードバックゲインを加速度補償しなかった場合と比べて小さくしなければならないという問題も生じる。加速度補償がこれらの問題点を補ってどれだけ効果があるかを調べることは実用上重要な問題である。

本研究では、左右独立制御方式において加速度補償を用いた速度制御則を提案し空気圧浮上ミニチュアガントリーに適用した実験を行なう。ここでは定速期における速度変動率と

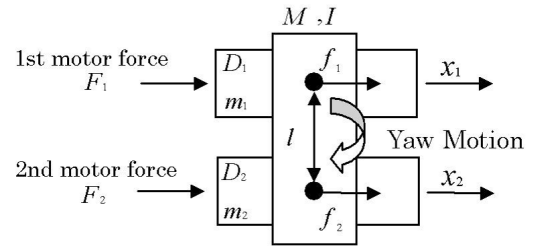


Fig. 3 Model of the gantry

左右偏差、および人為的に突発的な入力外乱を加えた場合の速度変動の3つを評価指数として、加速度補償を行なわなかった場合と行なった場合を比較し、加速度補償の効果と有効性を実証する。なお、加速度補償はP補償とPI補償の2つを行なっている。

本稿の構成は、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章では加速度補償を用いた速度制御則を提案し、速度と加速度推定フィルターの選定について論じる。4章では最初に実験条件について述べ、つぎに速度、位置ゲインを一定とし、加速度補償なしの場合および加速度P補償で比例ゲインを変化させた場合と加速度PI補償で比例ゲインを一定とし積分時間を変化させた場合の実験を行ないそれらの結果を比較する。これにより、加速度補償比例ゲインと積分時間の効果を検証し、速度、位置ゲインが一定の場合に定速時の速度変動率と左右偏差および突発的な入力外乱による速度変動の3つの評価指標のすべてについて加速度補償を用いて制御性能の改善を試みる。さらに、加速度補償なしおよび加速度P補償と加速度PI補償がある速度制御で、各制御において速度変動率を主に左右偏差を従にこれらが小さくなるように制御パラメータ調整を行ないこのときの速度変動率と左右偏差と突発的な入力外乱による速度変動の結果を比較する、これにより、これら3つの評価指標について加速度補償の有効性を実証する。

## 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・テーブルの概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50[Kg]である。

ガントリーの構造は以下のとおりである。無電解ニッケルメッキされた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のおのの脚に装備されていて、 $0.02[\mu\text{m}/\text{pulse}]$

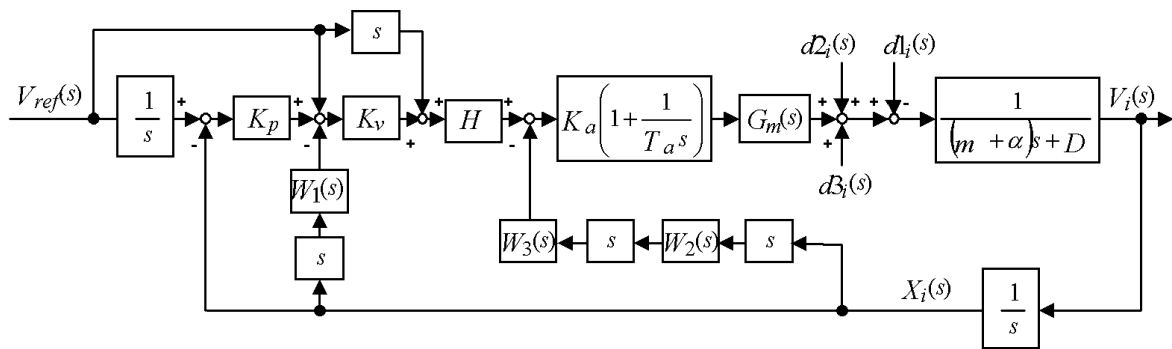


Fig. 4 Block diagram of the gantry

の分解能をもったリニアスケールがガントリー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、この構造が、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。

本装置は実機のミニチュアタイプであるが、その寸法に対して重量や重量配分および、エアーベアリングのパネ定数は実機に近い固有振動数を有するように選定されている。したがって、リニアサーボモータ出力をスケール比に比例させて小さくするとその運動は実機と同様になる。また、ケーブルによる入力外乱はケーブルの剛性がスケールほど小さくならないでかえって相対的に少し大きくなっていると考えられる。これらのことは文献1)の実機での実験の準備として行なった本ミニチュアガントリーの速度制御結果が実機のそれらに近いものであったことでも正当であると推定される。したがって、本ミニチュアガントリーでの制御結果の有効性はリニアスケールの分解能が同等であれば実機においても実現できるものと考えられる。

## 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>。

$$sX_1(s) = [F_1(s) - \beta s^2 X_2(s) - k(X_1(s) - X_2(s))/l^2 + d_{11}(s) + d_{21}(s)] / [(m_1 + \alpha)s + D_1] \quad (1)$$

$$sX_2(s) = [F_2(s) - \beta s^2 X_1(s) + k(X_1(s) - X_2(s))/l^2$$

$$+ d_{12}(s) + d_{22}(s)] / [(m_2 + \alpha)s + D_2] \quad (2)$$

ただし  $X_1(s), X_2(s), F_1(s), F_2(s)$  は  $x_1, x_2, f_1, f_2$  にそれぞれラプラス変換を施したものである。  $\alpha = (M/4 + I/l^2)$ ,  $\beta = (M/4 - I/l^2)$  である。  $k$  は脚の偏差 ( $x_1 - x_2$ ) と両側面のエアーベアリングに起因する力に関連するパネ定数である。また、  $d_{11}(s)$  と  $d_{12}(s)$  はケーブル牽引による力とモータの着磁ピッチムラによる推力の変動であり、  $d_{21}(s)$  と  $d_{22}(s)$  はガントリーのピッチ揺れによる影響を外乱と見なした力である。

## 3. 加速度補償を用いた速度制御則

提案する加速度補償を用いた速度制御則の第  $i$  脚 ( $i=1,2$ ) の制御系のブロック線図は Fig. 4 のようになる。ここでは  $m_1 = m_2 = m$ ,  $D_1 = D_2 = D$  としている。また、  $V_i(s) = sX_i(s)$ ,  $d_{3i}(s) = \beta s^2 X_j(s) + k(X_j(s) - X_i(s))/l^2$  とおく。ただし、  $i = 1$  のときは  $j = 2$  であり、  $i = 2$  のときは  $j = 1$  とする。  $d_{3i}(s)$  は横木のヨー運動と左右偏差により、第  $i$  脚に加わる力であるが、  $d_{1i}(s)$  や  $d_{2i}(s)$  と同様に入力外乱とみなすこととする。  $G_m(s)$  はモータの伝達関数であるが、その静的ゲインは  $m + \alpha$  となるようスケールされている。  $K_p$  と  $K_v$  はそれぞれ位置と速度のフィードバックゲインであり、  $K_a$  と  $T_a$  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、  $P$  補償のときは  $(1 + K_a)/K_a$ ,  $PI$  補償の場合は 1 とする。  $W_1(s)$  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 次フィルターである。  $V_{ref}(s)$  は速度目標を表わす。

速度はサンプル周期 100[ $\mu$ sec] 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。文献 1) の実機による研究ではリニアスケールの分解能は 0.1[ $\mu$ m/pulse] であり、本ミニチュアガントリーでも当初同じ分解能のものを用いていたが、これでは速度はフィルターを通して推定できるが、加速度はノイズが格段に大きくなり、いかなるフィルターを用いても加速度フィードバックゲインを上げられず、加速度補償の効果はまったくみられなかった。そこで本研究ではできるだけ高い分解能のリニアスケールを用いることとし、リニアサーボ



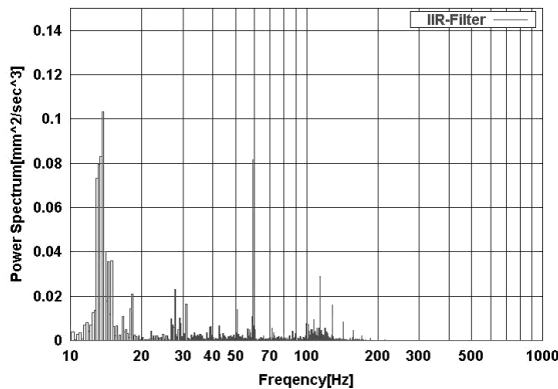


Fig. 5 Power spectrum of an acceleration data with filters

モータの力率検知の安定性とのかねあいから  $0.02[\mu\text{m}/\text{pulse}]$  のリニアスケールを採用することとした。これを用いると当然、速度フィードバックだけでも分解能が  $0.1[\mu\text{m}/\text{pulse}]$  のときよりも制御性能がかなり向上するが、本研究は加速度補償によりさらに制御性能が改善されることを検証するものである。ただ、このように高い分解能のリニアスケールを用いても量子化と時間離散化によるノイズはまだ大きい。そこでこれらのフィルターをどう選定するかは重要なポイントとなる。

速度および加速度推定フィルターはその位相遅れによる制御性能の劣化を防ぐため 1 次フィルターとした。また、その遮断周波数はこのためには高いほうが望ましいが、高すぎると推定ノイズが低減されずフィードバックゲインを十分に大きくできないので制御性能が向上しない。また、制御中の抑制したい振動の周波数よりも遮断周波数を高く設定する必要がある。これらを指針として遮断周波数を変えて制御実験を行ない、最適な妥協点を探索した。その結果、速度推定フィルター  $W_1(s)$  の遮断周波数を  $100[\text{Hz}]$ 、加速度フィルター  $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数をそれぞれ  $50[\text{Hz}]$  に設定する。加速度推定ノイズは速度推定ノイズと比較して格段に大きいことおよびゲイン  $K_a$  をある程度高くしないと加速度補償の効果がなくなることから 1 次フィルターを 2 段にして用い、定速時の速度の振動は比較的低い周波数帯で大きいので  $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  の遮断周波数は  $W_1(s)$  のそれと比べて低めにするのが適当であったと解釈できる。

参考のため Fig. 5 に定速期における  $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$  を用いた制御時の加速度推定値のパワースペクトルを示す。定速期ではあるが制御中なので多少の信号成分が存在することを考慮すると、制御帯域を  $150[\text{Hz}]$  と考えてノイズ成分は  $0.01[(\text{mm})^2/\text{sec}^3]$  以下に収まっていると推定される。これはフィルタを用いなかった場合の加速度推定値のパワースペクトルの約  $1/100$  となっている。

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>3)</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る必要があり、一般的には両脚の平均速度の偏差が  $\pm 0.5[\%]$  以下とされているが、ここではまえがきで述べた要求のためできるだけ小さくすることを試みる。また、ガントリーは左右独立に駆動、制御されるため、左右偏差はさげがたいものであるがこれも樹脂の塗布ムラの一因となる。したがって脚間の偏差も小さくする必要があり、一般的には  $\pm 100[\mu\text{m}]$  以下とされているがここではこの範囲内で左右偏差の変動幅をできるだけ小さくすることを試みる。

## 4. 制御実験

### 4.1 実験条件

本実験において、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。本論文においては  $1.5[\text{sec}]$  から  $5[\text{sec}]$  の区間の速度変動率と左右偏差に注目し、この区間を定速区間と呼び、 $75[\text{mm}/\text{sec}]$  の速度において  $\pm 0.5[\%]$  の速度変動率は  $\pm 0.375[\text{mm}/\text{sec}]$  の速度偏差となる。

ガントリーの走行においてはレールに付着した汚れなどのため前に述べた入力外乱のほかに突発的な入力外乱が生じる可能性がある。この外乱の速度と左右偏差への影響を評価するため、つぎのような外乱発生装置を用いる。

まず電磁石を第 2 脚基部に吸着させ、その電磁石に係をつけてその他端をレール端に固定する。係は最初はたるんでいるが、定速走行中に張力を発生し、電磁石が脚基部から脱落するような長さとなっている。この係の張力を高速応答センサを用いて計測したところ、係の伸びのため極く短時間であるが、張力は 0 から次第に増加し約  $4[\text{N}]$  に達した時に電磁石が脱落し瞬間的に 0 に戻るというのこぎり歯状の入力外乱となっている。実用上どのような範囲の力とその形状の突発的な入力外乱を想定すべきか不明な点が多いが、ここではこのような入力外乱を用いて評価することとする。

### 4.2 速度位置ゲイン一定の場合の加速度補償効果検証実験

ここでは加速度 P 補償の比例ゲイン  $K_a$  および加速度 PI 補償の積分時間  $T_a$  がどのように制御性能に影響するかを見るため速度ゲイン  $K_v$  と位置ゲイン  $K_p$  をそれぞれ  $150$  と  $25$  に固定し、 $K_a$  と  $T_a$  を係が振動的にならない範囲で変化させた制御実験を行なう。比較のため加速度補償がない場合についても制御実験結果を示す。

まず、Fig. 6、Fig. 7、Fig. 8 に加速度補償がない場合のガントリーの中心速度、左右偏差、外乱を加えた場合の第 2 脚の速度と外乱として加えたのこぎり歯状の負荷を示す。このときの速度偏差は  $\pm 0.05[\text{mm}/\text{sec}]$  であり、左右偏差の変動幅は  $5.3[\mu\text{m}]$  である。

つぎに速度ゲインと位置ゲインを一定のまま、加速度 P 補償の比例ゲイン  $K_a$  を  $0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  と大きくしていったところ、係が振動的にならない限り、 $K_a$  が大きいほど良い結果が得

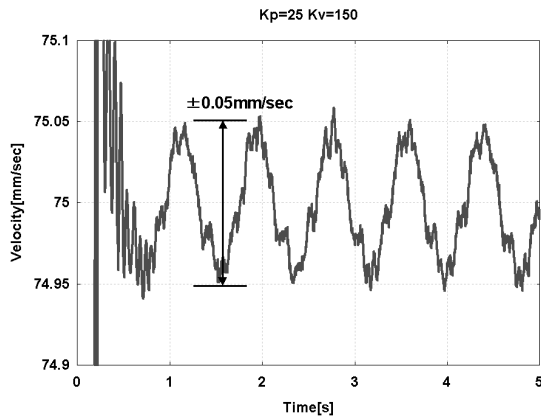


Fig. 6 Gantry center velocity without acceleration compensation control

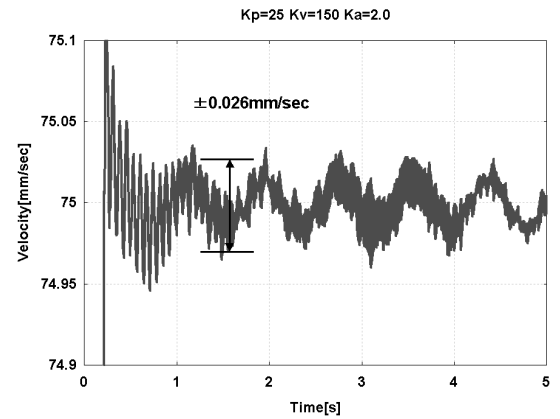


Fig. 9 Gantry center velocity with P acceleration compensation

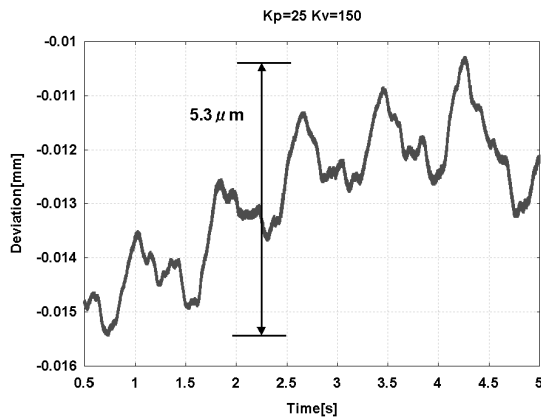


Fig. 7 Leg deviation without acceleration compensation control

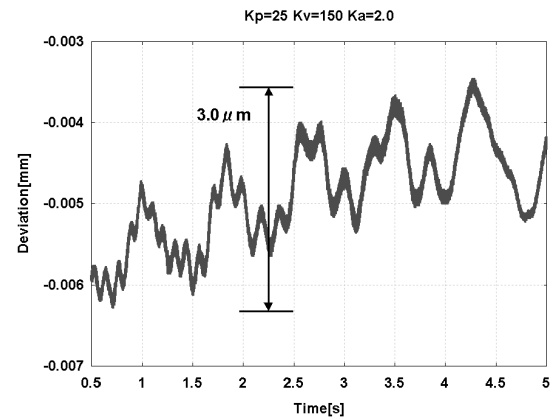


Fig. 10 Leg deviation with P acceleration compensation

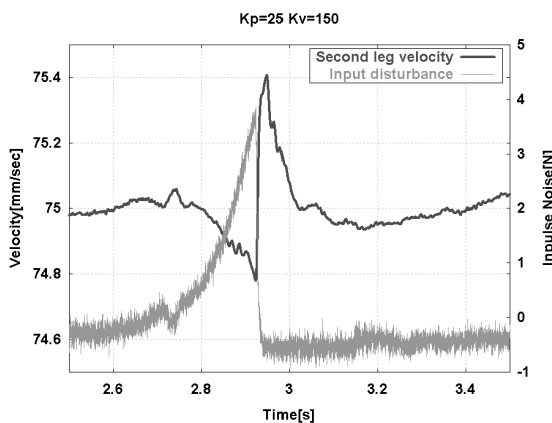


Fig. 8 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of without acceleration compensation control

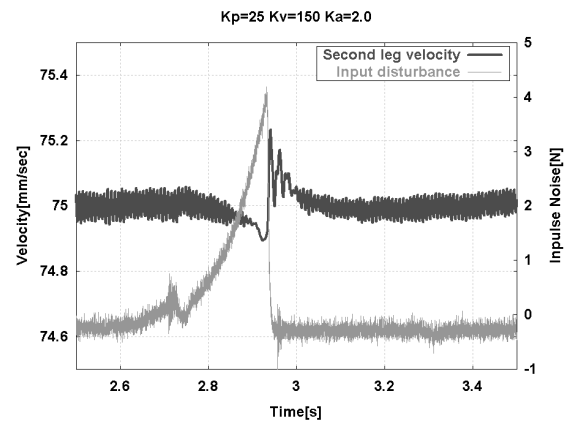


Fig. 11 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with P acceleration compensation

られた． $K_a = 2.0$  のときの 3 つの評価項目の結果を Fig. 9 , Fig. 10 , Fig. 11 に示す．速度偏差は  $\pm 0.026$  [mm/sec] , 左右偏差の変動幅は  $3.0$  [ $\mu$ m] まで改善された．また，外乱を加えた場合の速度はピーク値が下がり，元の速度に戻るのも早くなっている．

さらに位置ゲインと速度ゲインを一定の状態 で  $K_a$  を 1.0 に固定しておき  $T_a$  を  $100$  [msec] から  $50, 20, 10, 8$  [msec] と変化させ加速度 PI 補償の実験を行なった．系が振動的にならない限り  $T_a$  が小さいほど制御性能がよくなる． $T_a = 8$  [msec] の場合の 3 つの評価項目の結果を Fig. 12 , Fig. 13 , Fig. 14 に示す．速度偏差は  $\pm 0.0083$  [mm/sec] , 左右偏差の変動幅

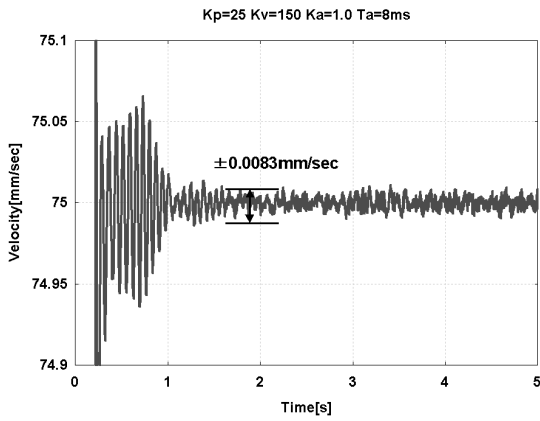


Fig. 12 Gantry center velocity with PI acceleration compensation

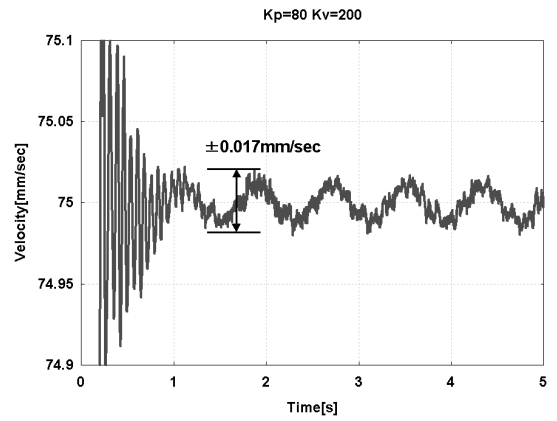


Fig. 15 Gantry center velocity without acceleration compensation with parameter optimization

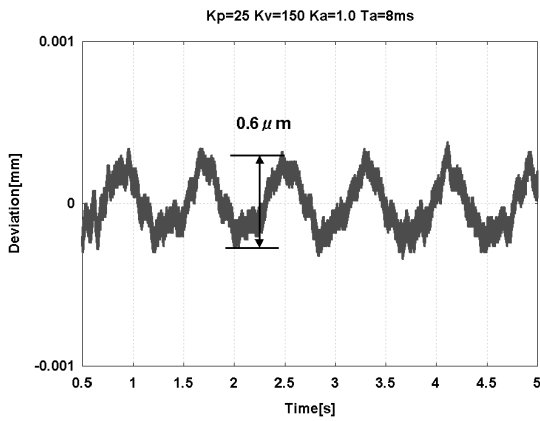


Fig. 13 Leg deviation with PI acceleration compensation

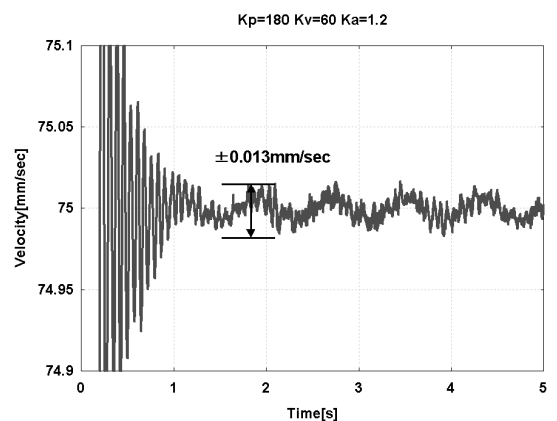


Fig. 16 Gantry center velocity with P acceleration compensation with parameter optimization

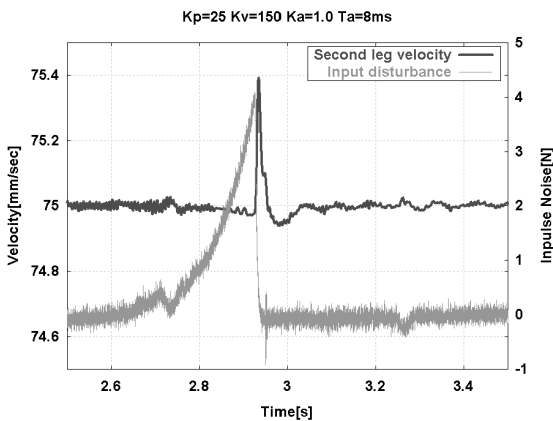


Fig. 14 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with PI acceleration compensation

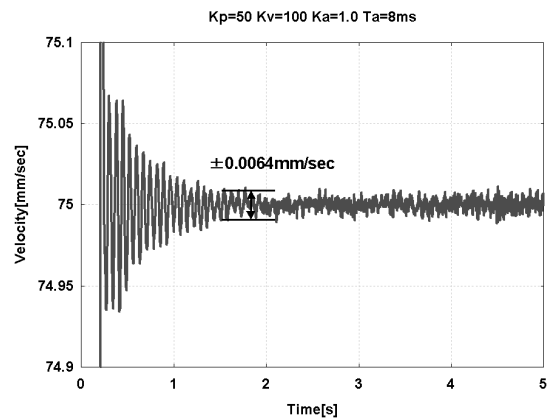


Fig. 17 Gantry center velocity with PI acceleration compensation with parameter optimization

は  $0.6[\mu\text{m}]$  となり、積分の効果により左右偏差の変動は 0 を中心としたものになり、加速度 P 補償の場合よりも良い結果が得られた。PI 補償の積分は低周波領域でゲインをあげた効果をもち、モータの着磁ピッチムラのような低周波の入力外乱の影響をなくしていると思われる。また、Fig.14 からわかるように外乱を加え始めピークにいたるまでの間も速度が外

乱の影響を受けることなく、元の速度を保っている。ただ速度変動のピーク値は加速度 P 制御のほうが小さくなっている。このピークは入力外乱が瞬間的に 0 になることによる反動で生じるもので加速度フィルターと積分を用いた補償では補償しきれないことを示している。

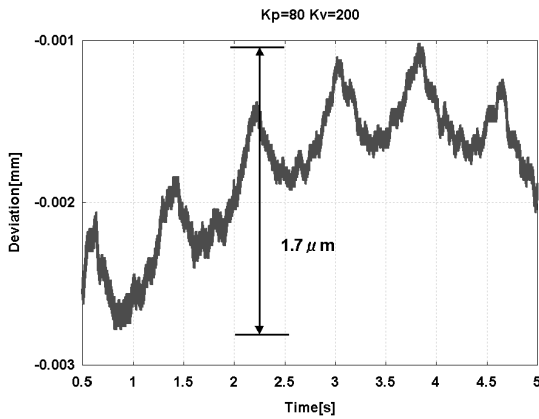


Fig. 18 Leg deviation without acceleration compensation with parameter optimization

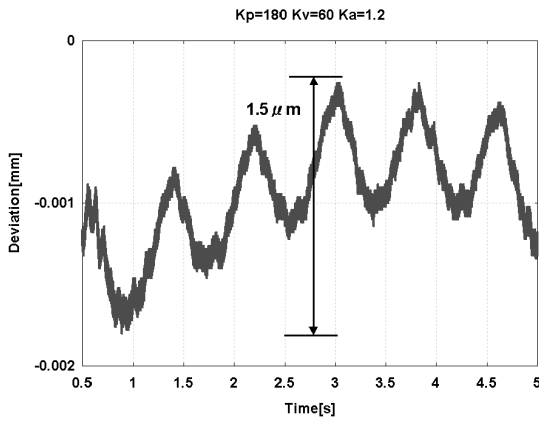


Fig. 19 Leg deviation with P acceleration compensation with parameter optimization

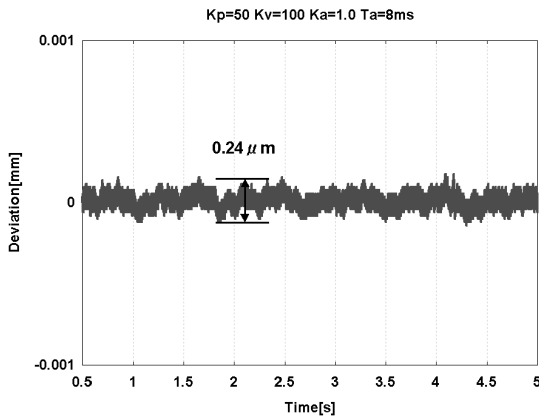


Fig. 20 Leg deviation with PI acceleration compensation with parameter optimization

以上をまとめると、系が振動的にならない限り  $K_a$  は大きいほど、 $T_a$  は小さいほど制御成績はよくなる。また、加速度補償がない場合に比して、加速度 P 補償を行なった場合、速度偏差、左右偏差の変動幅、外乱を加えた場合のいずれにおいても制御性能は向上し、加速度 PI 補償を行なうと、さら

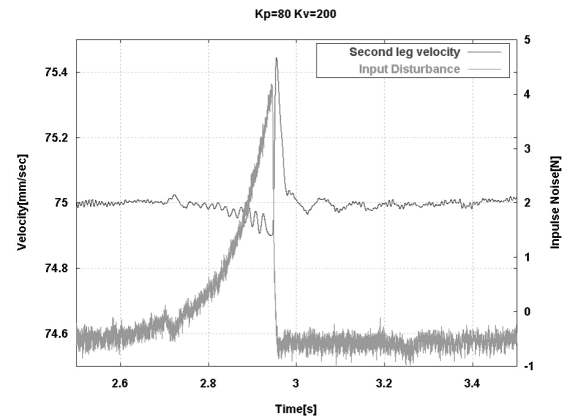


Fig. 21 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of without acceleration compensation with parameter optimization

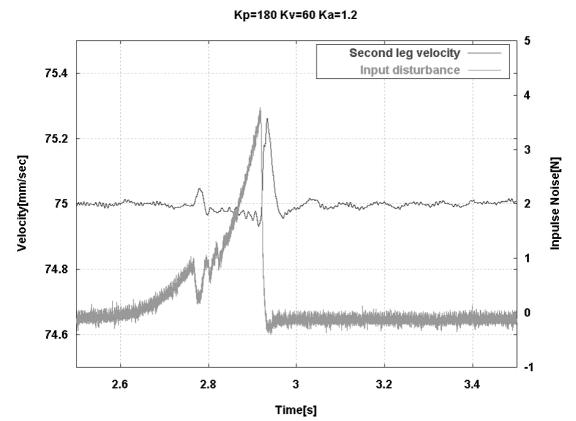


Fig. 22 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with P acceleration compensation with parameter optimization

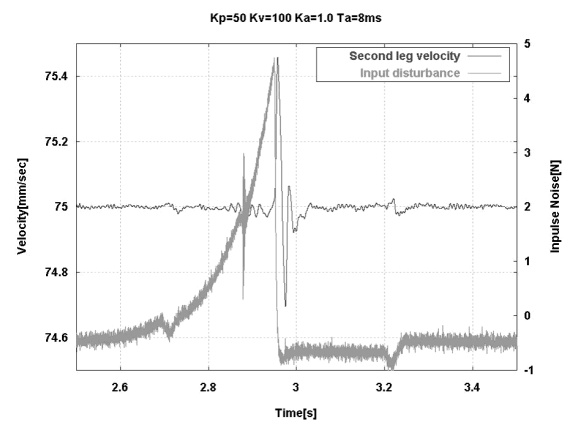


Fig. 23 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with PI acceleration compensation with parameter optimization

に、制御性能が向上する結果が得られた。

#### 4.3 制御パラメータ最適調整後の加速度補償効果検証実験

4.2 節では  $K_v$  と  $K_p$  を一定とした実験を行なったが、加速

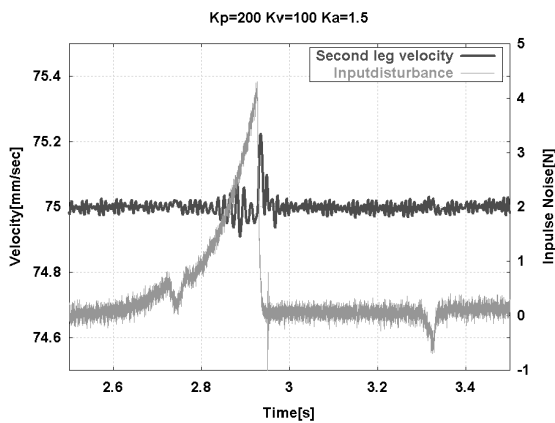


Fig. 24 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with P acceleration compensation with best parameter optimization for input disturbance

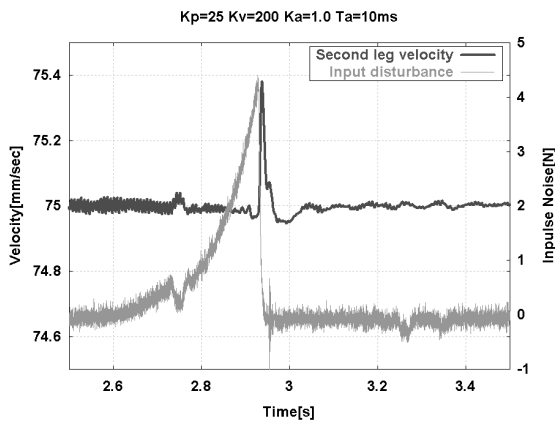


Fig. 25 Second leg velocity when the input disturbance is applied in case of with PI acceleration compensation with best parameter optimization for input disturbance

度補償を用いるためこれらを低く設定している。したがって、加速度補償の有効性を検証するには、加速度補償なし、加速度 P 補償、加速度 PI 補償のおののについて制御パラメータを最適調整したものについて比較を行なう必要がある。

ここでは速度偏差を小さくすることを主に左右偏差の変動幅を小さくすることを従として制御パラメータの調整を行なった。このときの、加速度補償なし、加速度 P 補償、加速度 PI 補償の場合の場合の中心速度をそれぞれ Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 に、左右偏差をそれぞれ Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20 に、突発的な入力外乱の第 2 脚速度への影響をそれぞれ Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 に示す。

速度偏差に関しては Fig.15 では  $\pm 0.017$ [mm/sec], Fig.16 では  $\pm 0.013$ [mm/sec], Fig.17 では  $\pm 0.0064$ [mm/sec] となっている。加速度 P 補償は効果があるもののあまり大きくなく、加速度 PI 補償の効果は非常に大きくなっている。当然のことながら、これらのいずれの場合も速度と位置ゲインを一定としたときよりも制御成績は改善されている。

左右偏差に関してはその変動幅が Fig. 18 で  $1.7[\mu\text{m}]$ , Fig. 19 で  $1.5[\mu\text{m}]$ , Fig. 20 で  $0.24[\mu\text{m}]$  となっている。加速度 P, PI 補償の効果は速度偏差の場合と同様であるが、特に、加速度 PI 補償の場合は左右偏差の変動が 0 を中心に相当小さいものとなっている。

突発的な入力外乱が加わったときの第 2 脚の速度変動については、外乱が加わり始めてからピークに達するまでは、加速度 P 補償、加速度 PI 補償の順に変動は小さくなっている。ただピーク値やその直後の速度の戻りに関してはほとんど効果が見られず、加速度 PI 補償ではかえって悪化している。これは速度変動と左右偏差の改善を目標にパラメータを調整したため、加速度 P 補償では位置、速度、加速度補償ゲインを必要以上に大きくできず、加速度 PI 補償では積分時間を限度まで小さくしていることが原因である。そこで、この入力外乱による速度変動を小さくすることを目標に制御パラメータの再調整を試みた。加速度 P 補償の場合を Fig. 24 に、加速度 PI 補償の場合を Fig. 25 に示す。これらより、速度変動や左右偏差の多少の悪化が許されるとすれば、加速度補償により突発的な入力外乱の速度への影響のピーク値やその直後の速度の戻りを改善できることがわかる。

以上より、加速度補償は速度偏差、左右偏差の変動幅、突発的な入力外乱の速度への影響の 3 つの評価に関していずれも効果があり、とくにリニアサーボモータの着磁ピッチムラの影響と思われる低周波の速度と左右偏差の変動に対しては加速度 PI 補償の効果が大きいと結論できる。ただ、突発的な入力外乱による速度変動のピーク値やその直後の速度の戻りに関しては、最適な制御パラメータが異なるということがあるが、これらの現象の原因である入力外乱の大きな瞬間的な変化は実用上あまりないと考えられるので大きな問題とはならないと思われる。

## 5. あとがき

空気圧浮上ガントリーの左右脚独立速度制御において、定速期の速度変動率と左右偏差および突発的な入力外乱のそれらへの影響を低減する加速度補償制御則を提案し、ミニチュアガントリーを用いてその有効性を検証した。まず、速度と位置のフィードバックゲインを一定とした場合は加速度補償比例ゲインと積分時間の逆数は系が振動的にならない範囲では大きいほど制御性能が向上することを検証した。

つぎに、各制御方式で制御パラメータを最適調整した結果を比較することにより加速度補償の効果と有効性を実証した。本研究で用いたミニチュアガントリーは実機に近い運動特性を有しているため、これらの結果は実機においてもリニアスケールの分解能が同等であれば実装できると思われるので、たいへん有用であると考えられる。

加速度補償においてはリニアスケールによる加速度推定ノイズの低減が重要な問題である。さらに高い分解能のリニアスケールを用い、モータの位相特性を改善することで、加速度補償をさらに有効にできると思われる。



クロスカップリング制御における加速度補償の有効性の検証およびガントリーの加速期においても加速度補償を用いて速度変動率と左右偏差を小さくすることを現在検討中である。

[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) 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)
- 3) 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)



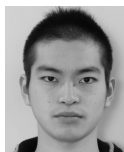
1974年早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修了。同年東レエンジニアリング(株)入社。FAコントローラ, NC制御コントローラの開発に従事。

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。同年同大学基礎工学部制御工学科助手。助教を経て, 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。

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。