技術論文

メカトロサーボ系の指令時間間隔ごとの
定常的速度変動の発生と特性解析江頭 成人^{*1} 中村 政俊^{*2} 久良 修郭^{*3}Analysis of Stational Velocity Ripples at each Reference Input Time
Interval for Mechatronic Servo SystemsNaruto Egashira^{*1}, Masatoshi Nakamura^{*2} and Nobuhiro Kyura^{*3}

Velocity ripples at each reference input time interval occur in the contour control of mechatronic servo systems. The stationary velocity ripples were analysed by introducing an appropriate analytical model of the mechatronic servo system, and the analytical result of the velocity ripples was evaluated based on an experiment of an industrial DC servo motor. The experimental results gave important information for designing the controller for mechatronic servo systems.

Key Words: Robot, Machine Tools, Contour Control, Velocity Ripples, Reference Input Time Interval

1. ま え が き

産業用ロボット（多関節形ロボットなど）やNC工作機械（直交移動形NC工作機械など）を総称したメカトロサーボ系においては、作業端（end-effector）を目標軌跡に目標速度で追従させる輪郭制御が行われている。輪郭制御における制御性能の劣化は、加工物の精度や製品の強度などの品質に直接影響するので、高精度制御性能の維持が大切である。制御性能劣化の一つである速度変動が生じると、溶接作業においては溶接むら、カッティング作業においては面粗さとなって表れる。産業界でとられている高精度制御性能維持の方策としては、作業速度を遅くすることが多くとられているが、一方では作業能率の向上やレーザカッティングなどにおいては、高速での作業が要求される。

ロボット制御、特にロボットマニピュレータにおける制御性能を高めるための過去の研究をみると、ロボットの軌道制御においては、線形適応制御の適用[1]、非線形適応制御の適用[2]、ロボットアームをフレキシブルとみなしての適応制御[3]などがある。近年は、軌道制御だけでなく速度制御や力制御に関しても盛んに研究されており[4][5]、ロバストな制御[6]を行って制御性能を向上させる報告もされている。一方、目標軌道追従制御系の制御性能劣化に関する研究も行われており、ロボットの作業座標系と関節座標系との非線形の座標変換を線形

近似することによる影響の解析[7][8]などがある。これらいずれの研究においても、ロボットや工作機械などの制御対象は連続系とみなした議論であり、多軸構成であるために生じる制御性能劣化の問題が議論されている。また、ロボットや工作機械の制御性能に関しては、コントローラは理想的な性能を持つものと仮定して解析がなされている。しかし、現実のコントローラはメーカーにおける永年の経験と努力によって構築されており、その経験則で対処されている問題に対して、ほとんど理論的説明がなされていない。したがって、メカトロサーボ系の制御性能を理論的に解析することは重要な意味を持つ。

メカトロサーボ系は複雑なメカニズムを持ち、各軸ごとに一つのサーボモータを有し、その複数のサーボモータの管理および制御は、デジタルあるいはアナログのコントローラによってなされている。デジタルコントローラにおいては、演算時間が必要となるため、各軸に対する位置指令は一定時間間隔（指令時間間隔という）ごとになされるので、メカトロサーボ系の応答には指令時間間隔ごとに速度変動が発生する。この速度変動は定常状態においても発生するため避けることは不可能であり、多軸構成時にはこの速度変動が軌跡むらの原因となることから軌跡精度とも関係するので、産業界で解明のニーズの高い問題である。しかし、過去の研究においては、この指令時間間隔の粗さによって生じる速度変動の性質に関する研究は我々が調査した限りでは存在していない。

本論文では、メカトロサーボ系における速度変動の最も大きな原因の一つである指令時間間隔の影響について、指令時間間隔と速度変動の定量的な関係を導出し、その結果の効用を明らかにする。解析のポイントは、本来高次で非線形なメカトロサーボ系をその目的に合った適切な線形2次の連続系モデルで表し、指令時間間隔ごとの離散的な入力を階段関数で表現し

原稿受付 1996年10月31日

^{*1}久留米高専

^{*2}佐賀大学

^{*3}近畿大学

^{*1}Kurume National College of Technology

^{*2}Saga University

^{*3}Kinki University

て、問題の本質を抽出するところにある。この階段関数入力に対する応答の解析解は、この定式化に基づいて周知の解析手法によって比較的容易に求められ、その解析解の妥当性を、産業界で使用されているサーボモータを用いた実験装置で実際に発生する速度変動との一致性をもって検証する。この指令時間間隔と速度変動の関係は、モーター軸ごとの問題に関する特性であり、ロボットや工作機械などの多軸系において通常の動作範囲、動作速度においては、その一軸ごとの特性が組み合わされて表に出てくる[7]。換言すると、一軸の特性をおさえておけば、通常の動作範囲、動作速度における多軸の特性はただちに分かる。本論文で得られる関係式を用いると、実現したい制御性能に対して適切な指令時間間隔を設定できる。また、それらのメカトロサーボ系を新しい自動化システムに適用する際に、その作業に必要な制御性能から適用の可否を容易に判断できるようになる。

2. メカトロサーボ系のモデル

2.1 メカトロサーボ系の構成

メカトロサーボ系は、管理部、指令生成部、位置制御部、速度制御部、電流制御部、電力増幅部、モータ部、機構部からなる。一般にメカトロサーボ系の機構部は多軸構成であり、各軸には位置制御系が組み込まれた一つのモータが対応している。管理部、指令生成部、位置制御部の部分はデジタルコンピュータで構成され、速度制御部、電流制御部、電力増幅部の部分はアナログ回路によって構成されている現在産業界で最も普及しているメカトロサーボ系を考える。管理部は、メカトロサーボ系全体の管理を行う部分であり、作業内容の入力や作業の開始、停止などの制御を行う。指令生成部は、管理部で定められた作業内容をもとに機構部の各軸ごとの動作を決定し、各軸へ位置指令値を出力する。各軸独立に、位置制御部では位置ループ、速度制御部では速度ループ、電流制御部では電流ループが構成されていて、それぞれ位置ループゲイン、速度ループゲイン、電流ループゲインが設定されている。電力増幅部は、電流制御部からの電流指令に従ってモータを駆動するための電力増幅回路であり、モータトルクに相当する電流値を検出するための電流センサが取り付けられていて、その出力電流はモータに印加される。モータ部にはサーボモータがあり、モータ回転速度を検出するためのタコジェネ、モータ回転位置（角度）を検出するためのパルスエンコーダが取り付けられている。モータの動作は、減速比が十分大きな（現在産業界では7～10倍）減速機を介して機構部に伝えられる。機構部は、産業用ロボットでは多関節形機構が、NC工作機械では直交移動形機構が使われていて、その作業端が作業を行う。

2.2 デジタルコントローラに起因する速度変動の発生

普及形のメカトロサーボ系のコントローラは、デジタルコントローラ部（管理部、指令生成部、位置制御部）とアナログコントローラ部（速度制御部、電流制御部）が併用されている。デジタルコントローラ部においては階層構造がとられており、管理部が上部階層にあってオフラインに実行され、その下で指令生成部と位置制御部がオンラインに実行される。制御性能をあげるためには、指令生成部と位置制御部の制御時間間隔を短

くすればよいことが、一般的に知られている。位置制御部においてはP制御もしくはPI制御が行われていて、それらは簡単な整数演算であるので演算時間は短くてすみ、短い時間間隔で実行することが可能である。

これに対し指令生成部において、管理部から与えられた作業内容から各軸の目標位置指令値を計算する際には、多関節形ロボットでは指令値を直交座標－関節座標変換の計算を行うために、また直交形のNC工作機械では楕円などの目標軌跡の曲線を区分的に直線近似するために実数演算が必要となり、長い演算時間を要する。このため、指令生成部が各軸の位置制御部に指令を出す時間間隔（これを指令時間間隔という）は、その演算時間間隔にオーバーランなどのシステムの監視を行う時間を加えた、粗い時間間隔となる。したがって、位置制御部に対する指令入力は指令時間間隔ごとにサンプルアンドホールドされた入力となるので、以下速度指令部、電流指令部、電力増幅部を介して回転するモータの回転速度にむらが生じ、そのモータによって駆動される機構部の作業端の応答には速度変動が発生し、制御性能が劣化する。

一般にメカトロサーボ系の速度変動の因子は、過渡の状態において多数存在し、その変動は定常状態よりも大である。そこで、実用上は過渡的状态の部分を避けて定常状態のみをうまく利用してメカトロサーボ系の動作の精度を保たせるような使用方法や1軸のみで作業する方法もあるが、本研究で対象とする指令時間間隔ごとの速度変動は、定常状態や1軸のみの作業においても避けることはできない。また、メカトロサーボ系の速度変動の要因は多数存在するので、その要因一つ一つを抽出して解析を行うことが重要である。したがって、メカトロサーボ系の指令時間間隔と速度変動の関係を解析することは、その制御性能を解析する上で重要である。

2.3 速度変動を解析するためのメカトロサーボ系の数式モデル

メカトロサーボ系の指令時間間隔ごとの速度変動を解析するためのモデルを構成するにあたって、以下のような基本方針を用いた。

i) 1軸ごとに分離 一般にメカトロサーボ系は多軸で構成されている。その制御を議論するうえで、各軸ごとに発生する問題と、多軸構成にして初めて発生する問題に分離して考える。指令時間間隔ごとに発生する速度変動の問題は、デジタルコントローラ部の演算時間が多軸構成になって増えたために表面化した問題であるが、速度変動自体は1軸ごとに発生しているので、指令時間間隔と速度変動の間の解析は1軸ごとに行う。したがって、多軸構成にしたことによって初めて生じる問題点を除いては、このように1軸ごとの特性を解析し、1軸において問題が解決できれば、多軸でもその組み合わせによって解決することができる。

ii) 各軸独立近似 メカトロサーボ系の作業目的は輪郭制御であり、輪郭制御においてはモータ定格回転速度の1/5以下の速度が用いられている。その通常の動作条件においては、以下のことがいえて、各軸独立に解析が可能である。NC工作機械などに用いられている直交座標型機構ではまったく多軸の干渉はなく、産業用ロボットなどの用いられている関節座標型機

構では並行リンク機構を用いるなどの対策によって多軸の干渉を極力減らす努力がなされており [15], メカニズムは剛体とみなすことができ, モータとの接続には減速比が十分に大きな減速機を用いているので, メカニズムの反力や多軸の干渉の影響は無視できる. 電流ループは, 外乱を打ち消すように調節されていて, トルクや電流に飽和は生じず, その伝達関数は 1 とみなすことができる.

iii) 線形近似 通常の動作条件においては, 以下のことがいえて, 非線形項は無視できる [10]. コリオリ力の影響やコギングトルクは無視できる. 軸受けなどはなめらかであり, クーロン摩擦, 粘性摩擦とも無視できる. 速度制御系に PI 制御を用いて重力の影響を排除している. 電力増幅部の PWM や電源の周波数は機構部の固有振動数よりも十分高いので, それらの影響は無視できる. パルスエンコーダや D/A 変換器は十分なビット数を持つので, それらの量子化の影響は無視できる.

iv) 直交座標系近似 多関節形ロボットでは, 関節座標と作業座標の非線形変換が必要であるが, アームが伸びきった状態や限界付近まで大きく折れ曲がった状態での作業領域を除いた, 通常の作業で動作されている領域は, 作業線形近似可能領域と定義され, この領域内では多関節形ロボットの動作を近似的に直交座標上で表すことが可能である [7].

以上の基本方針を用いると, 指令時間間隔と速度変動の関係を解析するためのメカトロサーボ系のモデルは, Fig. 1 に示すようなサンプル値を含む連続の 2 次系で表すことができる. ここで, r は目標軌跡, ΔT は指令生成部から位置制御部へ指令値を出力する指令時間間隔, h_r は指令生成部における 0 次ホールド, u_p は位置指令値, K_p は位置ループゲイン, Δt_p は位置ループ制御時間間隔, h_p は位置制御部における 0 次ホールド, u_v は速度指令値, K_v は速度ループゲイン, v は動作速度, p は動作位置である. 通常の作業では, 目標軌跡 r は, 目標速度を v_{ref} として $r = v_{ref} t$ のランプ入力である. 厳密に言えば, 位置ループゲイン K_p , 速度ループゲイン K_v は, メカトロサーボ系全体の特性を 2 次モデルで表したときのパラメータであり, コントローラの位置指令部や速度指令部に設定する位置ループゲインや速度ループゲインとは別のものである. しかし, 2 次モデルで近似誤差が無視できるほど小さいとき (今の問題) には, ループゲインとモデルゲインの値は同一として取り扱う. メカトロサーボ系においては, 軌跡にオーバーシュートを生じてはならないので, $K_v > 6.7 K_p$ である [10].

Fig. 1 のメカトロサーボ系の動作速度は

$$\dot{v}(t) = -K_v v(t) + K_v u_v(t) \quad (1)$$

Fig. 1 A block diagram of a simplified second order model for mechatronic servo system

で表される.

k を指令時間間隔 ΔT の段数, j を ΔT 内の位置ループのサンプリングの段数 ($0 \leq j < \Delta T / \Delta t_p$) とすると, 任意の時刻は $(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau)$ で表すことができる ($0 \leq \tau < \Delta t_p$).

位置指令値 u_p は, 目標軌道 $r(t) = v_{ref} t$ を指令時間間隔 ΔT でサンプリングし, 0 次ホールドした $u_p(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau) = v_{ref} k \Delta T$ である. したがって, 速度指令値 $u_v(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau)$ は,

$$\begin{aligned} u_v(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau) \\ = \{v_{ref} k \Delta T - p(k \Delta T + j \Delta t_p)\} K_p \end{aligned} \quad (2)$$

で表される.

動作速度 $v(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau)$ は, 式 (1) に式 (2) を代入して, 逆ラプラス変換を行うことにより

$$\begin{aligned} v(k \Delta T + j \Delta t_p + \tau) \\ = (1 - e^{-K_v \tau}) \{v_{ref} k \Delta T - p(k \Delta T + j \Delta t_p)\} K_p \\ + v(k \Delta T + j \Delta t_p) e^{-K_v \tau} \\ (0 \leq \tau < \Delta t_p) \end{aligned} \quad (3)$$

と, 容易に解析解を求めることができる.

式 (3) の $e^{-K_v \tau}$ の部分が Δt_p 内の変化を表し, $v_{ref} k \Delta T - p(k \Delta T + j \Delta t_p)$ の部分が ΔT 内における Δt_p ごとの変化を表している. このように, Fig. 1 に示すようなメカトロサーボ系においては, 速度変動が発生する.

3. 速度変動の対策法

3.1 その 1

産業界においては, このような速度変動を極力なくすよう努力されてきた. その一つは指令時間間隔 ΔT を位置ループ制御時間間隔 Δt_p と等しくおくことである [14].

メカトロサーボ系の動作速度式 (3) において, $\Delta t_p = \Delta T$ の条件を代入し, 定常状態の条件を加味して初期値を消去すると, その動作速度は

$$\begin{aligned} v(k \Delta T + \tau) = \{v_{ref} k \Delta T - p(k \Delta T)\} K_p \\ (0 \leq \tau < \Delta T) \end{aligned} \quad (4)$$

となり, 動作速度 $v(k \Delta T + \tau)$ は指令時間間隔 ΔT の間, 一定値となることが分かる. よって, 指令時間間隔ごとの定常的速度変動は発生しないことが示せた.

この方法は簡単であるが, Δt_p を粗くして ΔT に合わせると位置ループの特性を上げることができなくなって制御性能が劣化し, ΔT を短くして Δt_p に合わせるためにはサンプリング周波数を上げなければならないのでコストがかかるという短所がある.

3.2 その 2

もう一つの方法は, Fig. 1 において, 指令生成部で計算した各軸位置指令値の指令時間間隔ごとの 0 次ホールド h_r を 1 次ホールドに変更する方法である [10].

ランプ状の目標軌道 $r(t) = v_{ref} t$ を ΔT 間で1次ホールドすると $v_{ref} t$ となるので、位置指令値は $r(t) = v_{ref} t$ が位置ループのサンプリング時間間隔 Δt_p ごとに0次ホールドされて、 $u_p(k\Delta t_p + \tau) = v_{ref} k\Delta t_p$ となる。したがって、式(3)の動作速度は、 ΔT を Δt_p に置き換えてまとめると

$$v(k\Delta t_p + \tau) = \{v_{ref} k\Delta t_p - p(k\Delta t_p)\} K_p \quad (0 \leq \tau < \Delta t_p) \quad (5)$$

となり、動作速度 $v(k\Delta t_p + \tau)$ は Δt_p の間、一定値となることと分かる。よって、指令時間間隔ごとの定常的速度変動は発生しないことが示せた。

この方法は、 ΔT を粗く、 Δt_p を短くすることができるので、指令時間間隔 ΔT を極端に短くする必要はなくなる。しかし、位置制御部が整数演算で構成されているため、位置指令値の1次ホールドを整数値で求めなければならない、端数管理などのアルゴリズムが複雑になる。

4. 速度変動とメカトロサーボ系のパラメータの関係

4.1 定常状態における速度変動

前章の速度変動抑制の対策法がいつも可能であるとは限らない。近年、位置ループの組み上がったメカトロサーボ系が市販されるようになり、管理部や指令生成部をパソコンなどで構成し、簡単にメカトロシステムを構築できるようになった。このような製品を用いると、あらかじめ位置ループが組み上がっているため、前章のような対策法をとることが難しい。また、近年盛んに研究されているモジュールロボットや自己組織化ロボットにおいては、位置ループの組み上がった軸の数や個体数を自由にとることができるようにするため、研究室などでメカトロサーボ系を構築する際は、複雑な軌道計算を行わせることが多い。したがって、このような場合における定常的速度変動を理論的に解析することは、制御性能の予測や設計、調節において重要である。

上記のような状態下におけるメカトロサーボ系においては、 $\Delta T \gg \Delta t_p$ であるので、位置ループは連続系とみなすことができる。したがって、位置制御部、速度制御部、モータ部とメカニズム部の数式モデルは

$$\ddot{p}(t) = -K_v \dot{p}(t) - K_v K_p p(t) + K_v K_p u_p(t) \quad (6)$$

で表される。ここで、入力 $u_p(t)$ は

$$u_p(k\Delta T + \tau) = v_{ref} k\Delta T \quad (7)$$

の階段関数で表される。式(6)(7)より、定常状態における k 段目の速度応答は

$$v(k\Delta T + \tau) = \frac{ab}{a-b} \left(\frac{e^{-b\tau}}{1-e^{-b\Delta T}} - \frac{e^{-a\tau}}{1-e^{-a\Delta T}} \right) v_{ref} \Delta T \quad (8)$$

となる。ここで、 $a = (K_v + \sqrt{K_v^2 - 4K_v K_p})/2$ 、 $b = (K_v - \sqrt{K_v^2 - 4K_v K_p})/2$ である。したがって、速度変動 e_v は、式(8)の指令時間間隔 ΔT 内の極大値と極小値より

$$e_v = \frac{ab}{a-b} \left(\frac{1-e^{-a t_{max}}}{1-e^{-a\Delta T}} - \frac{1-e^{-b t_{max}}}{1-e^{-b\Delta T}} \right) v_{ref} \Delta T \quad (9)$$

$$t_{max} = \frac{1}{a-b} \log \frac{a(1-e^{-b\Delta T})}{b(1-e^{-a\Delta T})} \quad (10)$$

と求めることができる。

このように、メカトロサーボ系においては、定常状態においても速度変動が発生し、その大きさは目標速度 v_{ref} に比例していることが分かる。

4.2 解析結果の活用法

前節で導出した指令時間間隔 ΔT と速度変動 e_v との関係を表す式(9)をもとに、得られる特性をグラフ化し、その活用方法について検討する。

速度変動 e_v の特性をグラフ化するには、関係するパラメータが e_v 、 K_p 、 K_v 、 v_{ref} 、 ΔT と5個あり、それを速度変動の相対比 e_v/v_{ref} 、ゲイン比 $n = K_v/K_p$ と $K_p \Delta T$ の3個にまとめ、グラフを求めた。ゲイン比 $n = K_v/K_p$ を7, 10, 15, 20とそれぞれ固定して、 e_v/v_{ref} を縦軸に、 $K_p \Delta T$ を横軸にグラフ化したものがFig. 2である。このグラフより、 $K_p \Delta T$ の増大に従って速度変動の相対比 e_v/v_{ref} は大きくなり、またゲインの比 n が大きいほど、速度変動の相対比は大きくなることと分かる。

産業界におけるメカトロサーボ系の設計手順は、まず作業目的に応じてメカニズムを設計・工作し、完成したメカニズムの特性を測定し、次に測定した特性から、オーバシュートを生じないような制御パラメータ（速度や位置のループゲイン）を決定し、最後に、決定された制御パラメータを実現できるデジタルコントローラを構成する。Fig. 2を利用すると、速度変動をもとにコントローラの設計や機種選定を行うことができる。メカニズムの特性から、ゲイン $K_p = 20$ [1/s]、 $K_v = 140$ [1/s]とした場合、速度変動の相対比が $e_v/v_{ref} = 4\%$ 以内に収まるように、指令生成部の指令時間間隔 ΔT を決定することを考

Fig. 2 Characteristics of the relative velocity ripples for the parameter $K_p \Delta T$.

える. Fig. 2 の $n = K_v/K_p = 7$ のグラフと $e_v/v_{ref} = 4\%$ の交点から, $K_p \Delta T = 0.22$ と読み取れる. 指令時間間隔は $\Delta T = (0.22/20) \times 1,000 = 11 [\text{ms}]$ 以下となるように, コンローラを設計あるいは選定すればよいことになる.

Fig. 2 の別の活用法としては, メカトロサーボ系のパラメータ $K_p, K_v, v_{ref}, \Delta T$ が与えられると, そのメカトロサーボ系で発生する速度変動を事前に推察することができる. 例えば, $K_p = 15 [1/\text{s}]$, $K_v = 150 [1/\text{s}]$, $v_{ref} = 50 [\text{cm/s}]$, $\Delta T = 20 [\text{ms}]$ の場合, Fig. 2 の $n = K_v/K_p = 10$ のグラフと $K_p \Delta T = 15 \times 0.02 = 0.3$ の交点から, $e_v/v_{ref} = 10.0\%$ と読み取ることができる. したがって, 速度変動は $e_v = 50 \times 0.10 = 5.0 [\text{cm/s}]$ となり, このメカトロサーボ系で発生する速度変動の大きさを事前に知ることができる.

5. 制御実験による解析結果の妥当性の検証

5.1 実験装置と実験条件

速度変動の特性を表す式 (9) の妥当性を確認するために, Fig. 3 に示すような DEC-1 実験装置を用いた実験を行った. この実験装置は, 産業界で用いられている DC サーボモータとサーボドライバを使用し, 負荷として発電機が取り付けられていて, 実際のメカトロサーボ系の特性をよく表している.

DEC-1 実験装置においては, 速度ループはサーボドライバのなかに構成されていて, 位置ループはパソコンに組み込んだ. パソコン (PC-9801DS) で計算された速度指令は D/A 変換器を介してサーボドライバに加えられ, DC サーボモータが駆動される. モータの速度の検出はタコジェネの出力電圧を A/D

Fig. 3 Structure of experimentation system: DEC-1

変換を用いて, 位置の検出はパルスエンコーダの出力をカウンタを用いてパソコンに取り込むことによって行った.

DEC-1 実験装置のサーボドライバの速度ループゲインの値は, 測定の結果 $K_v = 100 [1/\text{s}]$ であった. 位置ループゲインは, パソコンのなかに $K_p = 5 [1/\text{s}]$ と指定し, 指令時間間隔 $\Delta T = 40 [\text{ms}]$, 目標速度 $v_{ref} = 100 [\text{rpm}]$, 位置ループのサンプリング間隔を $\Delta t_p = 1 [\text{ms}]$, 制御時間を 1 秒間として実験を行った.

5.2 実験結果

速度変動が定常になった 0.9~1 秒間の実験結果を Fig. 4 の左図に示す. 横軸は時間 $t [\text{s}]$, 縦軸は速度 $v [\text{rpm}]$, 実線が速度応答である. 動作速度はタコジェネ出力を A/D 変換してパソコンに取り込んでいるため, 高周波の雑音が混入しているが, 目標速度 100 [rpm] 付近で ΔT ごとに顕著な速度変動を発生していることが分かる. 本実験結果との対比をとるため, 2 次モデルに基づく式 (8) の解析的速度出力を破線で示した. 実験と破線の波形の形状はよく似ていることが図から読みとれる. 実験における速度変動の平均値を図から読み取ると 4.5 [rpm] であり, 前章で導出した速度変動特性を表す式 (9) から計算した理論値 $e_v = 4.3 [\text{rpm}]$ とほぼ等しい.

次に, 3.1 節に示した速度変動抑制対策その 1 ($\Delta t_p = \Delta T$) を施したメカトロサーボ系の場合の実験結果およびシミュレーション結果を Fig. 4 の右図に示す. この場合には, 指令時間間隔ごとの速度変動はほとんど発生していないことが分かる.

以上の実験結果より, メカトロサーボ系の速度変動の解析のために導出したサンプル値を含む連続系の数式モデルを構成する際の仮定, その仮定に基づいて構成した数式モデル式 (1), そのモデルをもとに導出した指令時間間隔と速度変動の関係を表す式 (9) の妥当性が検証できた.

以上 1 軸の実験を介して式 (9) の妥当性を検証したが, 直交移動形メカトロサーボ系に関しては, 1 軸を単に組み合わせで多軸化するだけで拡張できるし, さらに通常の作業領域内である線形近似可能領域では関節形メカトロサーボ系は直交座標上で近似できるので [7], 関節形メカトロサーボ系においても, 本方法の妥当性が間接的に検証ができたといえる.

Fig. 4 Velocity ripples of an experimental result in DEC-1 and its computer simulation based on second order model of mechatronic servo system: normal type (left side) and type of suppression of persistent velocity ripples (right side)

6. ま と め

本研究では、メカトロサーボ系において指令時間間隔の粗さによって発生する速度変動の特性を理論的に明らかにした。その得られた解析解の妥当性を、DEC-1 実験装置で実際に発生する速度変動との一致性をもって検証した。

この導出した速度変動に関する解析解をもとに、速度変動と関係のあるパラメータとの関係グラフを作成し、具体的な活用例を示して、本研究で導いた速度変動の特性の式の有用性を示した。

参 考 文 献

- [1] S. Nicosia and P. Tomei: "Model Reference Adaptive Control Algorithms for Industrial Robots," *Automatica*, vol.20, no.5, pp.635-644, 1984.
- [2] 宮里, 大島: "ロボットマニピュレータの非線形適応制御", 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.1, pp.63-68, 1988.
- [3] J. Yuan and Y. Stepanenko: "Composite Adaptive Control of Flexible Joint Robots," *Automatica*, vol.29, no.3, pp.609-619, 1993.
- [4] J.T. Wen and K. Kreutz-Delgado: "Motion and Force Control of Multiple Robotic Manipulators," *Automatica*, vol.28, no.4, pp.729-743, 1992.
- [5] 駒田, 石田, 大西, 堀: "位置と力の2階微分量に基づくロボットの位置と力のハイブリッド制御", 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.10, pp.1176-1183, 1993.
- [6] 成清, G. Schmidt, 芥田: "ロボットマニピュレータのロバストな位置と力のハイブリッド制御", 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.7, pp.810-818, 1993.
- [7] 後藤, 中村, 久良: "産業用多関節ロボットアーム制御系の線形モデルの近似誤差の評価とモデルの妥当性", システム制御情報学会論文誌, vol.7, no.3, pp.59-68, 1994.
- [8] R.G. Roberts and A.A. Maciejewski: "Repeatable Generalized Inverse Control Strategies for Kinematically Redundant Manipulators," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.38, no.5, pp.689-699, 1993.
- [9] 吉川, 野瀬: "マニピュレータの動的制御の階層化に関する研究", システム制御情報学会論文集, vol.1, no.7, pp.255-262, 1988.
- [10] 久良修郭: "ニューメカ講座, サーボ技術, 位置ループと速度ループの関係", 日経メカニカル, no.226, 8, pp.135-140, 1986.
- [11] 後藤, 中村, 久良: "ロボットアームの高速高精度位置決めのための教示信号修正法", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.12, pp.1396-1404, 1991.
- [12] Richard P. Paul: *ロボット・マニピュレータ*, コロナ社, pp.187-209, 1984.
- [13] 安川電機製作所編: *メカトロニクスのためのサーボ技術入門*, 日刊工業新聞社, pp.12-25, 1986.
- [14] 佐々木龍成: *デジタルサーボのソフトウェア*, 近代図書, pp.118-124, 1994.
- [15] K. Youcef-Toumi and A.T.Y. Kuo: "High-Speed Trajectory Control of a Direct-Drive Manipulator," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.9, no.1, pp.102-108, 1993.

江頭成人 (Naruto Egashira)

1962年3月9日生。1986年佐賀大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年佐賀県立多久工業高等学校教諭, 1992年久留米工業高等専門学校助手, 1996年同講師になり現在に至る。主としてメカニカルシステム制御の研究に従事。電気学会, 計測自動制御学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

久良修郭 (Nobuhiro Kyura)

1942年2月12日生。1966年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)安川電機入社, 研究所, 技術開発センター, 基礎研究所部長を経て, 現在同社基礎研究所制御技術担当顧問。近畿大学九州工学部教授を併任。工学博士。計測自動制御学会, 電気学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

中村政俊 (Masatoshi Nakamura)

1943年8月20日生。1973年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手, 佐賀大学講師, 助教授, 1988年同教授になり現在に至る。工学博士。システム制御の理論と応用の研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気学会, 日本脳波・筋電図学会, 日本 ME 学会, IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)