産業用多関節ロボットアームのトルク制限を考慮した 輪郭制御性能の限界とその実現法

中 村 政 俊*・青 木 重 人*
後 藤 聡*・久 良 修 郭**

Upper Limit of Performance for Contour Control of Industrial Articulated Robot Arm with Torque Constraints and Its Realization

Masatoshi NAKAMURA*, Shigeto AOKI*,
Satoru GOTO* and Nobuhiro KYURA**

Performance at high speed with high accuracy is required for contour control of industrial robot arms. Torque saturation existing in the industrial robot arms often causes deterioration of contour control performance. In this research, the following items of the contour control performance of industrial articulated robot arms under torque constraints is considered; 1. derivation of a relationship among the torque, accuracy of the trajectories and operation speed, 2. clarification of the upper limit of the contour control performances of industrial articulated robot arms, 3. proposal of the contour control method which enables the best contour control performance under the torque constraints. The effectiveness of the proposed contour control method was assured by experimental results of an actual industrial robot arm.

Key Words: industrial articulated robot arm, contour control performance, torque saturation, trajectory generation, modified taught data method

1. ま え が き

組立, 切削, 溶接, 塗装作業などに利用される産業用ロボットアームに関して, その作業の多様化に伴って, 要求される動作に忠実に追従する高速高精度な輪郭制御性能が必要とされている. このような要求を実現する上で問題となるのは, パワーアンプの電流制限やロボットアームのアクチュエータであるモータの仕様などからくるトルク制限や, ロボットアームを構成する各リンクの特性の相違などによる輪郭制御性能の低下である. 特に追従軌跡におけるオーバーシュートは, 製品の精度に直接影響を与えるため極力避ける必要がある.

アクチュエータ飽和問題については数多くの研究がなされているが, これらの多く^{1)~4)}はフィードバックタイプの制御器でありハードウェアの変更を伴う. 産業界において, 現

状の型式のロボットで輪郭制御を行う場合には, ハードウェアの変更は極力避け, 制御性能の限界を達成したいという要求がある. 一方我々は, この産業界における実現性を念頭においてロボットアームの輪郭制御に対するフィードフォワード, すなわち, ハードウェアの変更の必要がない手法を提案してきた^{5)~7)}. また, その他の研究でロボットアームの輪郭制御のための動的軌道生成法も提案されている⁸⁾. しかしながら, ロボットアームのトルク制限下における輪郭制御性能の限界や, その限界性能の実現法の研究成果は著者の知る限りでは未だ存在しない.

本論文では, 多関節ロボットアームの発生トルク, 輪郭制御精度, 動作速度の3者の関係を理論的に導き, トルク制限下における輪郭制御性能の限界を明らかにする. さらに, トルク制限を考慮した軌道生成と教示信号修正法⁹⁾に基づく多関節ロボットアームの輪郭制御性能限界の実現法を提案する. 提案法は, トルク制限による輪郭制御性能劣化を避けるためにトルク制限にかからない範囲でロボットアームを動作させるものであり, トルク制限が生じない軌道を作業座標系で生成し, 関節座標系でロボットアームのダイナミクスの遅れを補償するものである. 本方法では, 産業用ロボットアームの設計仕様から定まるトルクの制限値がわかると, ロボットが達成できる輪郭制御性能の限界値 (精度, 動作速度) がわか

* 佐賀大学大学院工学系研究科 佐賀市本庄町 1

** 近畿大学九州工学部 飯塚市柏の森 11-6

* Graduate school of Science and Engineering, Saga University, Saga

** Faculty of Engineering in Kyushu, Kinki University, Iizuka

(Received April 3, 1998)

(Revised October 19, 1998)

り、逆に、輪郭制御性能の仕様が与えられれば、それを実現するのに必要なトルク(パワーアンプ、モータサイズ)を決定することができる。フィードバックタイプの制御器では、ロボットアームのハードウェアの変更を必要とするが、本方法は、ロボットアームのハードウェア変更を必要としないため産業界で有効に利用でき、この手法を用いることにより、指定された作業精度を満足させ、輪郭制御性能の限界を達成することが可能となる。

2. 産業界におけるトルク制限問題

産業用ロボットアームの高精度輪郭制御を行うときに生じる制御性能の劣化の原因として、最も大きな問題としてはトルク制限がある。トルク制限は、サーボコントローラとモータの特性によって引き起こされる現象で、ロボットアームに大きなトルク指令を与えても実際にはそれに応じたトルクが発生しない現象のことを言う。

産業用ロボットアームのトルク制限の原因として、以下の3点があげられる。

- (1) 最大許容電流値によって、トルク電流が制限される。
- (2) モータへ印加する端子電圧とモータの逆起電力との差の違いによって、加減トルクに使用できる電圧値が変化する。
- (3) 制御系の操作量の飽和、すなわち、速度制御部と電流制御部のクリップによって飽和が生じる以前に制限がかけられている。

(1) に関しては、産業用ロボットアームでは、定格トルクの3～5倍程度が出力できるモータへ最大許容電流値以上の電流が流れようとする場合には、サーボ系はアラームを鳴らし、電源遮断等の方策を取り、サーボ系を停止する。この定格の3～5倍程度というのは、瞬時にモータが出力できるトルクで、これはパワーアンプの電流制限によって決定される。また定格トルク相当以上の電流が一定時間(約1[s])以上流れるときでも、サーボを停止する。これらは、過電流によりモータが焼きつくことや熱による絶縁破損を避けるための対策である。

(2) に関しては、産業用ロボットアームでは、逆起電力の補償が行われていて、高速回転時においても定格トルクの3～5倍程度の出力ができるように電流を流すことができる。この逆起電力補償とは、モータの最大回転数における逆起電力に対してPWMアンプで印加するモータの端子電圧を十分大きくとることにより、モータへの電流を定格トルクの3～5倍程度まで流す方法である。

(3) に関しては、実際の装置の安全性を考慮して、飽和にかかる以前に、サーボコントローラ内の速度制御部と電流制御部でクリップ(制限)がかけられている。速度制御部のクリップは速度の変化量、すなわち加速度がある値を超えないようにしているものであり、電流制御部のクリップは、電流がある値を超えないようにしているものと電流の変化量がある値を超えないようにしているものの両者が存在する。これ

らのクリップにより、産業用ロボットアームのトルク出力は制約を受けることになる。このトルク制限により、高速時においてロボットアームのダイナミクスが非線形となるため、輪郭制御性能が著しく劣化する。

3. 産業用ロボットアームの制御系および数式モデル

3.1 ロボットアームの制御系

本研究において対象とする多関節ロボットアームはFig. 1に示すように直線で表す2つの剛体が○で表す関節でつながっていて、先端が平面上を自由に動くようになっている。図中の (α, β) は関節座標系の関節角、 (x, y) は作業座標系におけるアームの先端の位置、 l_1, l_2 はそれぞれのリンクの長さを表す。ここで、作業座標系と関節座標系との関係を明確にするために、関節座標 (α, β) から作業座標 (x, y) への変換(キネマティクス)と、作業座標 (x, y) から関節座標 (α, β) への変換(逆キネマティクス)を示す。キネマティクスは

$$x = l_1 \cos \alpha + l_2 \cos(\alpha + \beta) \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin \alpha + l_2 \sin(\alpha + \beta) \quad (2)$$

であり、逆キネマティクスは

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{l_2 \sin \beta}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \pm \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、(4)式の符号は、作業座標が1点を表すのに、関節座標では2通りの可能性があること示している。

産業用ロボットアームで一般曲線の輪郭制御を行う際には折れ線近似が用いられる。まず作業座標系における目標軌道を微小区間に分割して折れ線近似する。次にその分割点に対応する関節角を各軸に対して計算し、各軸の関節角が分割された関節座標系における目標関節角まで一定速度で動くようにサーボモータの回転角の制御を行う。各軸のサーボモータは回転角の移動量だけ回転し、アームの機構による座標変換でアームの先端が目標軌道に沿って動く。

ロボットアームの輪郭制御性能に対する要求事項は、指定の速度で目標軌跡にできるだけ正確に追従させることである。

Fig. 1 Structure of an articulated robot arm

Fig. 2 Block diagram of the mechatronic system

ここで、軌跡とは時間の概念を取り去った空間的な図形を意味し、軌跡に対して軌道は時間の概念を含めた時間的推移を意味する。折れ線近似された目標軌跡の角の部分においては大きなトルクが必要となり、トルク制限が起きると追従軌跡にオーバーシュートが生じ、高精度な輪郭制御性能が得られない。そのため現状では、ロボットアームの輪郭制御はトルク制限が生じない速度領域で動作させているが、一方では動作の高速化への要求がある。

3.2 ロボットアームの数式モデル

産業用の多関節ロボットや工作機械では、動作する各軸のサーボモータが独立に制御されている。実際には、機構部の構成によって軸の干渉や摩擦が異なるが、各軸の干渉を減らすように機構上の工夫がなされており、多くの産業用多関節ロボットでは平行リンク機構を用いて非干渉化がなされているため、通常の動作条件では、軸干渉は無視できる。また、速度制御器はPI制御器が使われており、トルク外乱は速度PIのI動作で補償されている。そのため非線形要素は無視でき、ロボットアームの関節座標系での各軸のダイナミクスはアクチュエータであるサーボモータとその制御器をあわせて各軸独立に

$$\frac{d^2 p(t)}{dt^2} = \text{sat} \left(K_v \left(K_p(u(t) - p(t)) - \frac{dp(t)}{dt} \right) \right) \quad (5)$$

と表される (Fig. 2 参照)。ここで、 $\text{sat}(z)$ はトルク制限を表し

$$\text{sat}(z) = \begin{cases} A_{max} & (A_{max} < z) \\ z & (-A_{max} \leq z \leq A_{max}) \\ -A_{max} & (z < -A_{max}) \end{cases} \quad (6)$$

である。(5) 式の $u(t)$ は角度入力、 $p(t)$ は角度出力、 K_p は位置ループゲイン、 K_v は速度ループゲイン、(6) 式の A_{max} は各軸の最大角加速度であり、 A_{max} にモータ軸換算慣性モーメントをかけたものがトルク制限である。

トルク制限が生じない領域においては、ロボットアームのダイナミクスは

$$P(s) = \frac{K_p K_v}{s^2 + K_v s + K_p K_v} U(s) \quad (7)$$

で表される¹⁰⁾。本研究では、ロボットアームのダイナミクスが (7) 式で表されるような領域で高精度輪郭制御を実現することを目指す。

4. トルク制限下における輪郭制御性能と高精度輪郭制御法

4.1 トルク制限下における輪郭制御性能

一般に産業界で用いられているサーボコントローラでは、サーボ系への指令データは、指令時間間隔ごとに与えられており、一般曲線を作業座標系で指令時間間隔ごとにデータを分割し、この分割した点と点を結んだ直線で表現する。指令時間間隔は一般曲線を折れ線で近似しても軌跡誤差を無視できるように細かく設定している。従って、産業界では折れ線近似した目標軌道に正確に追従させることを目指すことにより、一般曲線の輪郭制御を実現している。

Fig. 3 に示されるような折れ線で表される2直線からなる目標軌跡に対して、トルク制限下における輪郭制御性能を導出する。輪郭制御において目標速度 v はできるだけ一定であることが要求されるため、2直線の角の部分において、それを実現させるのに必要な加速度が無限大となり、折れ線近似をそのままロボットアームで描かせることはできない。本研究では、Fig. 3 に示すように、目標軌跡の角の部分で円近似を行う。この円の半径を r とし、円の生成軌跡と折れ線目標軌跡の誤差の最大値を作業精度 ϵ と定義する。円の半径 r と作業精度 ϵ の関係は Fig. 3 の幾何学的関係から

$$\cos \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) = \frac{r}{r + \epsilon} \quad (8)$$

となり、(8) 式を r について解くと、作業精度 ϵ を満足する円の半径 r は

$$r = \frac{\epsilon \cos((\theta_2 - \theta_1)/2)}{1 - \cos((\theta_2 - \theta_1)/2)} \quad (9)$$

によって計算される。ロボットアームが出し得る作業座標系における最大加速度 a_{max} は装置に依存する。また、Fig. 3 に示されるように、目標軌跡において軌跡角度 θ_1, θ_2 は与えられている。輪郭制御の作業内容によって、目標速度 v と作業を行うに最低限必要な最小速度 v_{min} と作業精度 ϵ が与えられる。以下に、制御性能の指標である最小速度 v_{min} と作業精度 ϵ とトルクに関係する最大加速度 a_{max} に関する基本的な関係式を導く。

Fig. 3 Trajectory generation for the objective locus consists of two lines and one corner

Fig. 4 Structure of the contour control of the mechatronic system

4.1.1 最小速度 v_{min} が与えられた時の作業精度 ϵ の限界値
円軌道の加速度は $a = r\omega^2$ で表される。ここで、 $\omega = v/r$ であるので、これを代入すると $r = v^2/a$ となる。従って、最小速度 v_{min} と最大加速度 a_{max} で描ける円の半径の範囲は

$$r \geq \frac{v_{min}^2}{a_{max}} \quad (10)$$

で表される。半径 r と作業精度 ϵ との関係は (9) 式で表され、 ϵ について解くことにより

$$\epsilon = \left(\frac{1}{\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)} - 1 \right) r$$

となる。これと (10) 式の関係より、最小速度 v_{min} が与えられた時の作業精度 ϵ の範囲は

$$\epsilon \geq \left(\frac{1}{\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)} - 1 \right) \frac{v_{min}^2}{a_{max}} \quad (11)$$

となる。

4.1.2 作業精度 ϵ が与えられた時の最小速度 v_{min} の限界値
作業精度 ϵ が与えられた時の半径 r は (9) 式で表される。この半径 r と最大加速度 a_{max} で描ける最小速度 v_{min} は、(10) 式より $v_{min} \leq \sqrt{a_{max}r}$ で表される。この式の r に (9) 式を代入することにより、作業精度 ϵ が与えられた時の最小速度 v_{min} の範囲は

$$v_{min} \leq \sqrt{\frac{a_{max}\epsilon \cos((\theta_2 - \theta_1)/2)}{1 - \cos((\theta_2 - \theta_1)/2)}} \quad (12)$$

で表される。

4.2 トルク制限を考慮した輪郭制御

産業用ロボットアームの輪郭制御では、トルク制限が生じない領域で動作させている。そのため、ロボットアームの軌道はトルク制限領域にかからないように決定する必要がある。Fig. 4 にロボットアームの輪郭制御構成を示す。トルク制限を考慮した輪郭制御法は大きく 2 つの部分に分けられる。1 つはトルク制限が生じないような軌道を作業座標系において生成する部分と、もう 1 つはロボットアームのダイナミクスの遅れを補償する部分である。

生成軌道 $(w_x(t), w_y(t))$ は、まず、Fig. 4 に示されるように、ロボットアームがトルク制限にかからず、かつ目標軌跡 (r_x, r_y) と生成軌跡 (w_x, w_y) との誤差が作業精度 ϵ を満足するように軌道を生成する。生成軌跡 (w_x, w_y) に与える接線速度は、トルク制限領域にかからない範囲で、できる限り目標速度 v に近づける。

生成軌道 $(w_x(t), w_y(t))$ を入力軌道 $(u_x(t), u_y(t))$ に直接利用すると、ロボットアームのダイナミクスの遅れから追従軌跡 (x, y) が生成軌跡 (w_x, w_y) から劣化する。そこで教示信号修正法⁹⁾を関節座標系に組み込むことによりダイナミクスの遅れを補償し、生成軌跡 (w_x, w_y) と追従軌跡 (x, y) を指定された作業精度 ϵ 内で一致させる。

4.3 トルク制限を考慮した軌道生成

Fig. 3 に示されるような 2 直線からなる目標軌跡 (r_x, r_y) に対して時間概念を入れた軌道を生成する場合、ロボットアームのトルク制約条件下での軌道生成法を以下に示す。

(1) 目標軌跡 (r_x, r_y) に角が存在する場合には、作業精度 ϵ を満足するように円を角を近似する。

(2) 生成軌跡 (w_x, w_y) に含まれる円の半径を r とおき、トルク制約条件を満たす最小半径 $r_{min} (= v^2/a_{max})$ を最大加速度 a_{max} と接線速度 v から計算する。多関節ロボットアームでは目標軌跡 (r_x, r_y) が与えられると、指令時間間隔ごとの目標軌跡 (r_{xi}, r_{yi}) は (1), (2) 式より $\begin{pmatrix} r_{xi} \\ r_{yi} \end{pmatrix} = J_i \begin{pmatrix} r_{\alpha i} \\ r_{\beta i} \end{pmatrix}$ と表され、 $(r_{\alpha i}, r_{\beta i})^T$ について解くことにより $\begin{pmatrix} r_{\alpha i} \\ r_{\beta i} \end{pmatrix} = J_i^{-1} \begin{pmatrix} r_{xi} \\ r_{yi} \end{pmatrix}$ となる。ここで $(r_{\alpha i}, r_{\beta i})$ は目標軌跡 (r_{xi}, r_{yi}) に対応する関節角である。これより関節座標系の最大角加速度と作業座標系の最大加速度の関係は、 $\begin{pmatrix} d^2 r_{\alpha i} / dt^2 \\ d^2 r_{\beta i} / dt^2 \end{pmatrix} = J_i^{-1} \begin{pmatrix} d^2 r_{xi} / dt^2 \\ d^2 r_{yi} / dt^2 \end{pmatrix}$ となり、関節座標系の最大角加速度は $A_{max} = \max(d^2 r_{\alpha i} / dt^2, d^2 r_{\beta i} / dt^2)^T$ と表されるので、関節座標系の角加速度が最大角加速度 A_{max} 以下になるように作業座標系における最大加速度 a_{max} と設定する。ここで、 J_i はヤコビアンである。

(a) $r \geq r_{min}$ の場合：生成軌道 $(w_x(t), w_y(t))$ は接線速度が目標接線速度 v となるように計算する。

(b) $r < r_{min}$ の場合：以下の手順で軌道を生成する。

- I. t_1 から t_2 までの区間で接線速度を v から v_{min} (半径 r の円の加速度が a_{max} となる時の接線速度 $v_{min} = \sqrt{a_{max}r}$) まで最大減速度 $-a_{max}$ で減速する。
- II. t_2 から t_3 までの区間で軌跡は円を描く。
- III. t_3 から t_4 の区間で接線速度が v_{min} から v になるまで最大加速度 a_{max} で加速する。

(3) 目標軌跡の始点と終点においては、最大加速度 a_{max} で加減速を行う。

以上述べた手順によって、生成軌道 $(w_x(t), w_y(t))$ は、トルク制限にかからず、生成軌跡 (w_x, w_y) は目標軌跡 (r_x, r_y) に

Fig. 5 Modified taught data method in the joint coordinates

作業精度 ϵ 内で一致させることができる。(2) (b) の場合の生成軌道は

$$w_x(t) = \begin{cases} vt \cos \theta_1 & (t \leq t_1) \\ w_x(t_1) + (v(t-t_1) - a_{max}(t-t_1)^2/2) \cos \theta_1 & (t_1 < t \leq t_2) \\ w_x(t_2) + r(\sin(\theta_1 + v_{min}(t-t_2)/r) - \sin \theta_1) & (t_2 < t \leq t_3) \\ w_x(t_3) + (v(t-t_3) + a_{max}(t-t_3)^2/2) \cos \theta_2 & (t_3 < t \leq t_4) \\ w_x(t_4) + vt \cos \theta_2 & (t_4 < t) \end{cases} \quad (13)$$

$$w_y(t) = \begin{cases} vt \sin \theta_1 & (t \leq t_1) \\ w_y(t_1) + (v(t-t_1) - a_{max}(t-t_1)^2/2) \sin \theta_1 & (t_1 < t \leq t_2) \\ w_y(t_2) + r(\cos \theta_1 - \cos(\theta_1 + v_{min}(t-t_2)/r)) & (t_2 < t \leq t_3) \\ w_y(t_3) + (v(t-t_3) + a_{max}(t-t_3)^2/2) \sin \theta_2 & (t_3 < t \leq t_4) \\ w_y(t_4) + vt \sin \theta_2 & (t_4 < t) \end{cases} \quad (14)$$

のように導出される。ここで、減速と加速の時間間隔は $t_4 - t_3 = t_2 - t_1 = (v - v_{min})/a_{max}$ であり、円を描く時間は $t_3 - t_2 = r(\theta_2 - \theta_1)/v_{min}$ である。この方法は、条件 (2) (b) $r < r_{min}$ の場合に、急激な速度変化を防ぐため必要最低限の速度低減を行い、円を描くため制御時間が僅かであるが長くなる。しかし、角の部分での追従軌跡 (x, y) はトルク制約条件を満足し、生成軌跡 (w_x, w_y) は目標軌跡 (r_x, r_y) に作業精度 ϵ 内で一致するため高精度な輪郭制御が行える。

4.4 関節座標での教示信号修正

トルク制限を考慮した輪郭制御法では、トルク制限が生じない領域でロボットアームを動かすため、ダイナミクスは Fig. 2 から飽和特性を除いた線形 2 次系で表される。修正要素とあわせたロボットアームの各軸の制御系は、Fig. 5 のように表せる。教示信号修正法は、目標軌道を修正要素によって修正した教示信号をロボットアームの入力として用いることによって、制御対象を目標軌道に追従させる方法である⁹⁾。生成軌道を入力軌道に直接用いると、ロボットアームのダイナミクスの遅れにより追従軌跡が生成軌道から劣化する。そのため、関節座標系において修正を施すことによって、

ロボットアームのダイナミクスの遅れを補償する。修正は 1 次系モデルに基づくものと 2 次系モデルに基づくものの両方に対して設計することが可能であるが、本研究では構造が簡単な 1 次系モデルに基づく修正を用いた。修正要素 $F(s)$ はレギュレータ理論に基づいて設計し、各軸それぞれ

$$F(s) = -\frac{\gamma(s + K_p)}{K_p(s - \gamma)} \quad (15)$$

と表される。ここで、 γ はレギュレータの極である。

4.5 トルク制限を考慮した輪郭制御のアルゴリズム

トルク制限を考慮した輪郭制御法全体の手順を以下に示す。

- (1) 目標軌道 $(r_{xi}(t), r_{yi}(t))$ から 4.3 節の手順に従って (13), (14) 式を用いて軌道を作成する。
- (2) (3), (4) 式を用いて作業座標系から関節座標系への座標変換を行う。
- (3) 関節座標系において 4.4 節で示した教示信号修正法を適用し、(15) 式を用いてダイナミクスの遅れを補償する。
- (4) ロボットアームにダイナミクスの遅れを補償した生成軌道を入力し、追従軌跡を得る。
- (5) (1), (2) 式を用いて関節座標系から作業座標系への座標変換を行い、輪郭制御性能の評価を行う。

本論文では記述を簡単にするため、2 軸のロボットアームでの 2 次元の作業座標系における輪郭制御について考察したが、多軸のロボットアームの場合で 3 次元空間を動作する場合においても、作業座標系で折れ線近似を行った目標軌道における 2 直線について考えると、この 2 直線は一つの平面上にあるので 2 次元空間での方法と全く同じ手順を踏んで拡張できる。

5. トルク制限を考慮した輪郭制御の検証

5.1 仮想トルク制限発生法

提案したトルク制限を考慮した輪郭制御法を多関節ロボットアーム PERFORMER-MK3S((株) 八幡電機精工製) に適用した。PERFORMER-MK3S は 5 自由度の多関節ロボットアームで 5 つの軸をもつが、そのうち 2 つの軸を用いて実験を行った。各関節のサーボコントローラは、速度と電流制御を行うサーボコントローラに接続され、サーボモータは、位置制御を行う計算機に接続されている。各軸には、AC サーボモータ (定格速度 3000[rpm]) が用いられ、減速器を介してアームを駆動する。装置の条件は、位置ループゲイン $K_p = 25[1/s]$ 、速度ループゲイン $K_v = 150[1/s]$ 、最大角加速度 $A_{max} = 11.0[\text{rad/s}^2]$ 、サンプリング時間間隔 $\Delta t = 6[\text{ms}]$ ¹¹⁾、アームの長さ $l_1 = 0.25[\text{m}]$ 、 $l_2 = 0.215[\text{m}]$ 、各軸の減速比 $n_1 = 160$ 、 $n_2 = 161$ である。実験方法は、位置入力とモータの位置出力の差に位置ループゲイン K_p を乗じた値を速度入力として D/A コンバータを介してモータに与えている。

実験で用いた PERFORMER-MK3S は大きなトルクを出し得るが、提案した方法の有用性を確認するために、この装置に仮想的にトルク制限をかけることを試みた。この方法は、

Fig. 6 Simulation results (I) Without saturation (II) With saturation (III)(IV) Proposed method

Fig. 7 Experiment results (I) Without saturation (II) With saturation (III)(IV) Proposed method

速度入力に注目し、速度入力 v_i と速度出力 v_f の差に速度ループゲイン K_v を乗じた実測角加速度出力が

$$|K_v(v_i - v_f)| > A_{max} \quad (16)$$

を満たすならば速度入力 v_i を

$$v_i = \left| \frac{A_{max}}{K_v} \right| + v_f \quad (17)$$

のように変更し、角加速度が A_{max} 以上とならないようにするものである。トルク制限は機構に依存し機種ごとによって

特性が変化するが、この方法を用いることにより様々なトルク特性をもった装置に関する実験が一つの装置で表現できる。

5.2 シミュレーションおよび実験結果

Fig. 6, Fig. 7 に3つの手法に対する軌跡、合成速度および飽和があるB軸の加速度のシミュレーションおよび実験結果を示す。

手法 (I) として従来法 (目標軌道をそのままロボットアームの入力として用いる方法)、手法 (II) として仮想トルク制

Fig. 8 Relationship between the modelling error ratio and the position error

限発生法でトルク制限をかけた状態における従来法, 手法 (III) として軌道生成と教示信号修正法をあわせた提案法を採用した. シミュレーションおよび実験条件としては, 作業精度 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-4} [\text{m}]$, レギュレータの極 $\gamma = -30$, 指定された接線速度 $v = 0.15 [\text{m/s}]$, 最小速度 $v_{\min} = 0.0155 [\text{m/s}]$, 目標軌跡は $(0.135, 0.365) \sim (0.185, 0.365) \sim (0.185, 0.415)$ の直交する長さ $0.05 [\text{m}]$ の 2 直線とし, 4.3 節で述べた関節座標系における最大角加速度 $A_{\max}$ と目標軌跡から与えられる作業座標系における最大加速度は $a_{\max} = 1.0 [\text{m/s}^2]$ と計算された.

手法 (I) の追従軌跡ではシミュレーションおよび実験結果において角の部分で, 丸みをおびた軌跡の劣化が見られる. この劣化の原因は, ロボットアームのダイナミクスの遅れであり, トルク制限にかかっているのではないのが加速度の結果からもわかる. 一方, 手法 (II) のシミュレーションおよび実験結果において, 各軸の加速度の結果を見ると B 軸の矢印の部分の $0.33 [\text{s}] \sim 0.44 [\text{s}]$ にかけて制限にかかっているのがわかる. また, シミュレーションと実験結果の間には実験誤差が少し見られるが, 同じ傾向として追従軌跡の矢印部分では, シミュレーションで $1.35 [\text{mm}]$, 実験で $0.74 [\text{mm}]$, 合成速度の矢印部分では, シミュレーションで $0.3 [\text{m/s}]$, 実験で $0.12 [\text{m/s}]$ のオーバーシュートが見られる. オーバーシュートは, 加工精度に直接影響を与えるため極力避けなければならない. 手法 (III) のシミュレーションおよび実験結果を見ると追従軌跡の結果ではオーバーシュートがなく, 合成速度を見ると, 矢印の角の部分において必要最低限の速度低減を図っているため, 手法 (I)(II) と比べて時間がかかっているが, ロボットアームのダイナミクスを補償し, トルク制限にかかっていないのがわかる. また提案法 (III) では最小速度 $v_{\min} = 0.015 [\text{m/s}]$ の条件も満足していることがわかる.

先の結果は, 角でのトルク制限にかかるのを避け, 軌跡を重視する条件で速度を目標速度の 10 % 程度まで減速した結果について示した. 産業界では, レーザカッティング等の作業の際に角での速度を落とすすぎるとレーザの印加電流が下がりすぎ, 逆に速度を上げる時に電流を上げる時間がかかりすぎ応答が間に合わなくなり輪郭制御の精度が低下するという場合がある. そのときの速度が目標速度の 70 % 程度で

あれば印加電流の応答の遅れは問題とならない. そこで, 目標速度の 70 % までは下げられる条件の下で 4.1 節で述べた関係を用いて作業精度を計算し, シミュレーションおよび実験を行った結果を Fig. 6 と Fig. 7 の (IV) に示す. (11) 式より得られた作業精度の条件は, $\epsilon \geq 0.004 [\text{m}]$ となったので $\epsilon = 0.005 [\text{m}]$ とした. 結果よりトルク制限にかかわらず目標軌跡に追従しているのがわかる. 以上のシミュレーションおよび実験結果より, 提案法がトルク制限内において作業精度と最低速度条件を満足し, 輪郭制御性能の限界を達成しているのがわかる.

5.3 モデル化誤差に対するロバスト性の検証

提案法のモデル化誤差に対するロバスト性を調べるために, 真のモデルに対して修正要素 $F(s)$ が適切に設計されていない場合における制御性能の影響について考察する. 修正要素 $F(s)$ の K_p にモデル化誤差 ΔK_p を含んだ場合に ΔK_p が制御性能に与える影響を考える. 真値と誤差の加わった値の比率 $r_p = (K_p + \Delta K_p)/K_p$ を用いて, ΔK_p を変化させてどれだけ誤差が得られるか理論解析およびシミュレーションを行った.

理論解析においては, 数式モデルをもとに各軸における制御性能として, 関節座標系でモータにランプ入力 $u(t) = vt$ を加え, 入力から誤差の加わったモデルの応答の遅れの解析

$$P(s) = -\frac{\gamma(s + (K_p + \Delta K_p))}{(K_p + \Delta K_p)(s - \gamma)} \frac{K_p K_v}{s^2 + K_v s + K_p K_v} \frac{v}{s^2}$$

$$e = vt - p(t) \quad (18)$$

を求めた. (18) 式の理論解析に基づいて r_p を変えたときの誤差の様子を Fig. 8(a) に示す.

次に, この関節座標系における誤差を作業座標系において評価する. シミュレーションで, r_p を変えたときの目標軌跡と追従軌跡の軌跡誤差を調べた. その結果を Fig. 8 に示す.

Fig. 8(a)(b) からわかるように r_p が極端に 1 からずれても誤差は小さく, 現実的な数%の ΔK_p の誤差では軌跡誤差は無視できて, 本方法はモデル化誤差に対してロバスト性を有している.

6. ま と め

トルク制約条件下における産業用多関節ロボットアームの

発生トルク、作業精度と動作速度の3者の関係から、トルク制約条件下で実現できる輪郭制御性能を明確にした。さらに、この輪郭制御性能を実現するために、トルク制約内で指定した作業精度を満たすように軌道を作業座標系で生成し、関節座標系に教示信号修正法を適用する輪郭制御法を提案した。また本方法の有用性を示すために仮想的トルク制限発生法を多関節ロボットアーム装置 PERFORMER-MK3S に施して、シミュレーションおよび実験結果から本方法による優れた輪郭制御性能を確認した。

本方法は、産業用多関節ロボットの設計仕様から定まるトルク制限がわかると、そのロボットが出しうる輪郭制御性能の限界(精度、動作速度)がわかり、逆に、輪郭制御性能の仕様が与えられれば、実現に必要なトルク(パワーアンプ、モータサイズ)を決定することができる。また、2軸のロボットアームのみではなく、多軸のロボットアームにも適用でき、またロボットアームの入力を変更するのみでハード的な変更を必要とせず、ロボットアームの有する最高制御性能を実現できるため、産業界の各種多関節ロボットアームの輪郭制御において容易に採用することが可能である。

参 考 文 献

- 1) C.Burgat, S.Tarbouriech and M.Klai: Continuous-time saturated state feedback regulators: theory and design, *Int. J. Systems Sci.*, **25**-2, 315/335(1994).
- 2) C.W.Chan and K.Hui: Actuator saturation compensation for self-tuning controller, *Int. J. Control*, **59**-2, 543/560(1994).
- 3) 渡辺, 内田, 示村, 藤田: 制御入力に制限を受ける制御系に対する Anti-Windup and Bumpless Transfer の新しい設計法, 計測自動制御学会論文集, **30**-6, 660/668(1994).
- 4) ビチャイ, 中野: 操作量の制約を考慮したタイムスケールを用いた位置決め制御法, 計測自動制御学会論文集, **30**-7, 742/750(1994).
- 5) S.Goto, M.Nakamura and N.Kyura: A Modified Speed Data Method for Position Control of Mechanical Servo Systems, *Trans. of the SICE*, **30**-6, 641/643(1994).
- 6) S.Goto, M.Nakamura and N.Kyura: Accurate Contour Control of Mechatronic Servo Systems Using Gaussian Networks, *IEEE Transaction Industrial Electronics*, **43**-4, 469/476(1996).
- 7) 後藤, 中村, 久良: メカトロサーボ系の高精度輪郭制御のためのガウシアンネットを用いた教示信号修正法, 電気学会論文誌 C, **115C**-1, 111/116(1995).
- 8) 竹内, 亀島, 浜田, 土屋: 知能情報を用いた動的軌道生成法, 日本機械学会論文集 (C 編), **57**-535, 167/171(1991).
- 9) 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, **27**-12, 1396/1404(1991).
- 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, **226**-8, 135/140(1986).
- 11) 中村, 香田, 久良: サーボ系による連続経路制御のサンプル値制御における適正サンプル周波数の決定法, 計測自動制御学会論文集, **28**-5, 649/651(1992).

[著 者 紹 介]

中 村 政 俊 (正会員)

1943年8月20日生。73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, 74年佐賀大学講師, 75年同助教授, 88年同教授, 98年同大学院工学系研究科教授。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。97年計測自動制御学会フェロー, 電気学会, 電子情報通信学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本脳波・筋電図学会, 日本ME学会, IEEE学会等の会員。

青 木 重 人 (学生会員)

1974年9月17日生。97年佐賀大学理工学部電気工学科卒業。同年同大学院工学系研究科電気工学専攻博士前期課程入学。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。

後 藤 聡 (正会員)

1966年1月1日生。90年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士前期課程修了。同年佐賀大学理工学部電気工学科助手, 96年同講師, 98年同大学院工学系研究科助教授。現在に至る。工学博士。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, システム制御情報学会, 日本ロボット学会等の会員。

久 良 修 郭 (正会員)

1942年2月12日生。66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, メカトロ研究所所長を経て, 現在技術開発本部担当顧問, 95年から近畿大学九州工学部教授兼任。工学博士。電気学会, 日本ロボット学会等の会員。