

(論文)

溶接ロボットのウィーピング動作制御

Weaving Motion Control for Welding Robot



井上芳英*
Yoshihide Inoue



西田吉晴***(工博)
Dr. Yoshiharu Nishida

This paper describes a weaving motion control method for arc welding robots. To cancel the periodical disturbance which arises when the robot is in weaving motion, a periodic disturbance observer for the robot controller was developed. With this observer, periodical disturbances could be canceled completely. In addition, a new elastic deformation model that describes dynamic deformation of the robot arm was developed. Using these control methods, weaving motion accuracy was greatly improved.

まえばき = アーク溶接では、通常、溶接対象物であるワークの形状精度や取付精度が低い為、溶接線があらかじめロボットに教示された溶接位置からずれることが多い。また、溶接中に与えるアークの熱量によってワークが変形し、溶接中にも徐々に溶接線がずれる場合がある。溶接ロボットにとって、これら溶接線のズレをリアルタイムに検出しながら、その都度これに適応して溶接線を「倣う」ことは、非常に重要な機能の一つである。

アーク溶接ロボットにおける溶接線倣い機能は、レーザセンサを用いた非接触式やローラなどを用いた機械式などがあるが、溶接中にアーク電圧や溶接電流の変化から、溶接線のズレを検出するアーク倣いという方式が最も簡便な方法であり、多くの溶接ロボットで採用されている(図1)。高性能なアーク倣いを実現するためには、ロボットから供給される溶接ワイヤの先端を溶接線に対して直交し、かつワークに対して水平な方向(ウィーピング方向)に正弦波状に正確に動作させることが必要である。特にウィーピング方向からの(ワークに対して上下方向の)ズレは、アーク倣い機能の性能を著しく劣化させるため、上下方向のズレを抑制することが重要である。

近年、ロボットシステムの高効率化を目的として、高速溶接のニーズが一段と高まってきており、高速溶接におけるアーク倣いを実現するためには、高い周波数で正確なウィーピングを行う必要がある。

一方で、マニピュレータの機械構造は、部品点数削減や動作範囲拡大を目的として、シリアルリンク型が主流になってきている。一般的にシリアルリンク型は、パラレルリンク型と比較して、機械的な剛性が低いことや2アーム間の相互干渉の影響が強いため制御が困難である。

本稿では、溶接ロボットにおけるウィーピング精度の

向上を目的として、実用的な周期外乱オブザーバや新しい弾性変形補償を提案する。これらの制御則を実際のシリアルリンク型マニピュレータへ適用し、高速でウィー

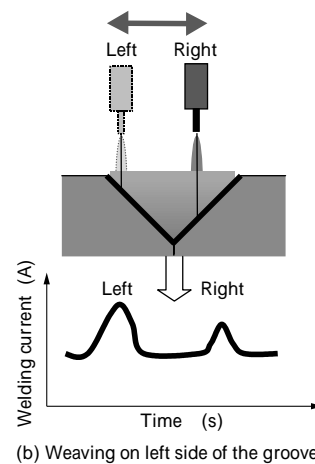
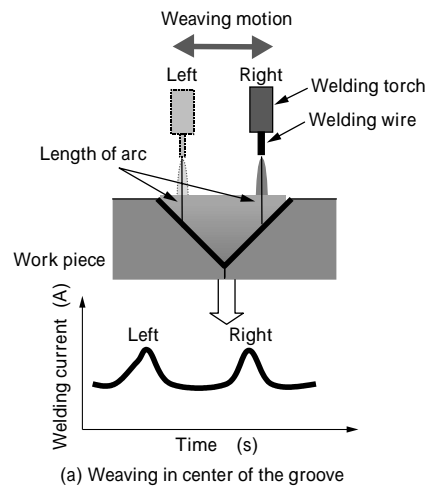


図1 アーク倣い(ウィーピング位置と溶接電流の関係)
Fig. 1 Seam tracking by arc sensor
(Relations between welding current and weaving position)

*溶接カンパニー 技術開発部 **技術開発本部 開発企画部

ピング動作を行った場合においてもマニピュレータ先端の精度が確保されていることを示す。

1. 周期外乱オブザーバの適用

1.1 周期外乱オブザーバの特性

マニピュレータの関節を剛体と仮定すれば、一般的な運動方程式はつぎのように記述できる。

$$\{J_M + J(\dot{M})\}_M + (B_M + B_L)\dot{M} + \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) + d = \dots (1)$$

ここに、

- M : モータ位置
- $J_M, J(\dot{M})$: モータ慣性, 負荷側慣性
- B_M, B_L : モータ粘性摩擦係数, 負荷側粘性摩擦係数
- $\alpha(\ddot{M}, \dot{M})$: 遠心・コリオリ力, 重力
- d : 外乱
- τ : モータトルク

である。

$$\text{いま, } J = J_M + J(\dot{M}), B = (B_M + B_L) \text{ とすると (1) 式は, } \\ J \ddot{M} + B \dot{M} + \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) + d = \dots (2)$$

となる。

$$\text{ここで, それぞれの項の公称値を } J, B, \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) \text{ とし, } \\ D = (J - \hat{J}) \ddot{M} + (B - \hat{B}) \dot{M} + \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) - \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) + d \dots (3)$$

とおくと, (2) 式は,

$$J \ddot{M} + B \dot{M} + \alpha(\ddot{M}, \dot{M}) + D = \dots (4)$$

と表される。

ウィーピング動作時には、設定された周期によってマニピュレータ先端を揺動させるため、各軸に配置しているモータも同じ周期にて動作する。このような周期動作においては、モータに加わる外乱 D もこの周期にて変動することとなる。一般的な外乱オブザーバは、外乱 D を静的なものと仮定してモデル化しているため、周期的に変動する外乱を位相遅れなく正確に推定することができない¹⁾。

今、ウィーピング周期の角速度を ω (rad/s) とすると、本手法では、ウィーピング時の外乱 D も角速度 ω で変動すると仮定し、次式にてモデル化する²⁾。

$$D(t) = -\omega^2 \hat{D}(t) \dots (5)$$

ここで (4), (5) 式にてマニピュレータの関節の状態方程式をたてると、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} D(t) \\ \dot{D}(t) \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega^2 & 0 \\ J^{-1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(t) \\ \dot{D}(t) \\ M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J^{-1} \end{bmatrix} \{ -\alpha(\ddot{M}, \dot{M}) - B \dot{M} \} \dots (6)$$

$$\dot{M} = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} D(t) \\ \dot{D}(t) \\ M \end{bmatrix} \dots (7)$$

となる。

いま、 M は観測可能なことから、2つの状態量 $D(t), \dot{D}(t)$ を推定する最小次元オブザーバを構成すると、

$$\dot{\hat{D}}(t) = -(\omega_1 + \omega_2) \hat{D}(t) + \dot{D}(t) + (\omega_1 + \omega_2) \\ [J_M^{-1} \{ -\alpha(\ddot{M}, \dot{M}) - B \dot{M} \}] \dots (8)$$

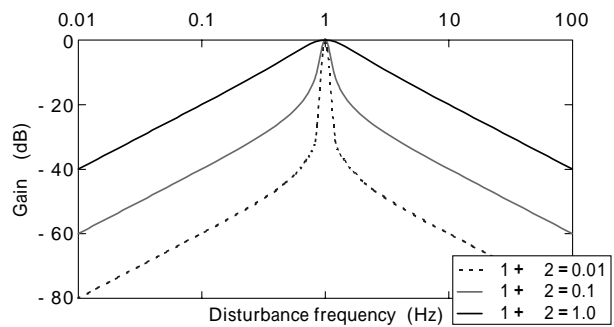


図2 周期外乱オブザーバの特性

Fig. 2 Characteristics of periodical disturbance observer

$$\dot{\hat{D}}(t) = -\omega^2 \hat{D}(t) \dots (9)$$

となる。ここで、 ω_1, ω_2 は外乱の動特性を決めるためのパラメータである。

(5)(6)(8)式より、周期外乱オブザーバの推定特性、すなわち実際の外乱から外乱推定値までの特性は、

$$D(t) = \frac{(\omega_1 + \omega_2)s}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega^2} D(t) \dots (10)$$

のように記述される。 s はラプラス演算子である。

本式によって記述されるオブザーバの、実際の外乱から推定値までのゲイン線図を図2に示す。

図2を見てわかるとおり、ウィーピング周期(角速度 ω)で変動する外乱に関しては、ゲイン α (db) で推定しているが、これ以外の周波数の外乱に関しては、ほとんど推定しないバンドパスの特性になっている。またウィーピング周期で変動する外乱に対しては位相遅れなく推定可能であり、本オブザーバの外乱推定値をフィードバックすることにより、ウィーピング周期で変動する外乱を完全に相殺し、理想的な制御性能を得ることが可能である。さらに ω_1, ω_2 の値によっては、角速度 ω のみを急峻に推定し、これ以外の外乱の推定度合いを調整可能である。これは固有振動数に近い領域でのウィーピング動作においても、ウィーピング周波数と同じ周期の外乱のみを推定しつつ、固有振動周波数の外乱をほとんど推定しないようにカットすることが可能である。すなわち、本オブザーバの外乱推定値をフィードバックしても、機械の固有振動を励起させるようなことが無く、ウィーピング周期の外乱を完全に相殺することができる。

1.2 ロボットコントローラへの適用

前節で示した周期外乱オブザーバをロボットコントローラに搭載し、その効果を確認した。図3は適用したサーボ制御系のブロック図である。 s はラプラス演算子である。

このサーボ制御系の上位に位置するコントローラでは、式(4)に示すマニピュレータの各姿勢における各軸の慣性、遠心・コリオリ力、重力および必要な加速度と速度を計算し、目標位置とともにサーボ制御系に指令する。さらに、上位コントローラはウィーピング動作を行う前には、あらかじめウィーピング周期データをサーボ系に渡す。サーボ制御系に組込まれた周期外乱オブザーバは、速度のフィードバック値、トルク目標値やウィーピング周期データから、ウィーピング周期と同じ周期の外乱を推定し、これをトルクの指令値に加えることによ

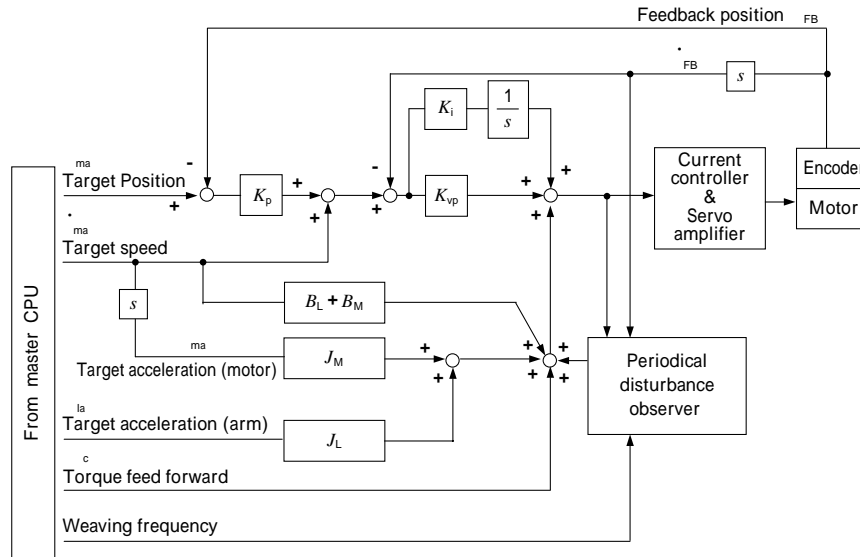


図3 サーボ制御系のブロック線図
Fig. 3 Schematic block diagram of servo control system

り、外乱を完全に相殺する。

実際のサーボ制御は、積和演算が高速に実行可能なDSP (Digital Signal Processor) を使用しているため、内部の変数 $\mathcal{X}(t)$ を用いて、式(8)(9)を次式のような積分方程式に変形し、これを演算することにより、外乱 $D(t)$ を推定している。

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{X}}(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \mathcal{X}(t) \\ + \begin{bmatrix} -(1+2)\dot{y}_M + \alpha(M, M) - B_M \\ \dot{y}_M - (1+2)\dot{y}_M + \alpha(M, M) - B_M \end{bmatrix} D(t) \end{cases} \dots (11)$$

$$\begin{bmatrix} D(t) \\ \dot{D}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \mathcal{X}(t) + \begin{bmatrix} (1+2)\dot{y}_M \\ 0 \end{bmatrix}$$

1.3 周期外乱オブザーバの効果

実際のマニピュレータを用いてウィーピング動作を行

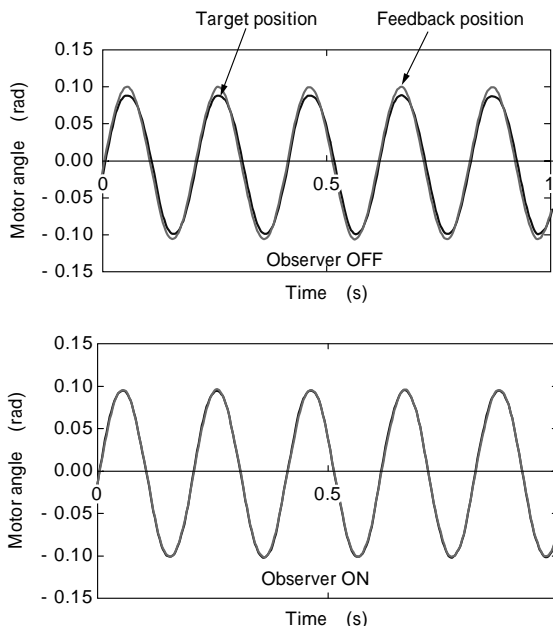


図4 周期外乱オブザーバ適用後のモータ波形
Fig. 4 Motor angle using periodical disturbance observer

い、その精度を測定した結果を図4に示す。図4は周期外乱オブザーバ適用前後のモータの目標位置およびフィードバック位置の波形である。図より周期外乱オブザーバを適用することにより、高速でウィーピング動作させた場合においても、モータの位置追従性が向上していることがわかる。

また、手首軸に用いている容量の小さいモータに関しては、静止摩擦の影響が大きく、摩擦補償を行っても高速なウィーピング動作が困難である。特に振幅が小さな低振幅指令時においては、従来のPID制御や摩擦補償だけでは十分なトルク指令が伝わらずに、目標値どおりに動作しない場合もあった。このような場合にも、周期外乱オブザーバを適用することにより、推定した外乱トルクをサーボ系にフィードバックするため、位置の追従性が向上した。

図5は、ウィーピング動作をさせたときのマニピュレータ先端の軌跡を示したものである。周期外乱オブザーバを適用する前は、右端の方で不要な振動、すなわち上下動が発生している。これは、アーク做い時にはウィーピング中心が左の方にずれていると判断することになってしまい、アーク做い性能そのものを損なう可能性もある。このような場合に周期外乱オブザーバを適用すると、図4で示したように目標位置へのモータ追従性が向上し、結果としてマニピュレータ先端の目標位置への追

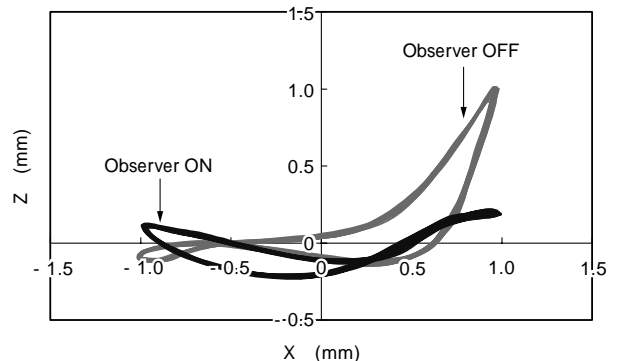


図5 マニピュレータ先端軌跡
Fig. 5 Tool point trajectory of manipulator

従性を向上することとなる。図では、周期外乱オブザーバの適用前後で上下動を約 1/3 にまで低減することができた。

本制御則は、当社の小型から大型のアーキ溶接ロボット全機種において適用済みであり、その有用性が実証されている。マニピュレータ先端の上下方向の振動が無くなるため、溶接電流の変化が開先に応じた変化のみとなり、安定したアーキ做いが可能となる。また、上下方向の振動は、溶接中のアーキ長を不要に乱し、スパッタ発生の原因ともなるため、先端の振動低減はスパッタの発生低減にも寄与している。

2. 新しい弾性変形補償

産業用ロボットの関節は、実際には剛体系ではなく、図6のように減速機が動力伝達機構として用いられる。一般的には、図6のように、減速機はバネ要素として作用し、さらにはアーム自体もたわむため、モータ側の慣性とアーム側の慣性がバネで結合されている2慣性系のモデルとして記述できる。

ウィーピング動作においては、この歪みによってモータ角度がそのままアームの角度に伝わらないため、モータでの位置追従性を向上させても、マニピュレータ先端では期待されたウィーピング振幅や方向が出ない場合がある。特に高い周波数でウィーピングした場合には、これが顕著に発生する。

これに対して、モータにかかる力の変動からあらかじめ歪量を計算し、モータ角度を補正することにより、アームでの角度を目標とされた位置へ制御する弾性変形補償を適用している。

すなわち、剛体系として表した式(2)において、ウィーピング時にモータにかかるトルクのうち、変動分は、モータ慣性を除いた慣性項と遠心・コリオリ力の和に等しい。

このため、歪量にかかわるトルクは、

$$J_L \ddot{\theta}_M + \alpha(\dot{\theta}_M, \dot{\theta}_M) = \dots \dots \dots (12)$$

となる。これより、あらかじめ測定されたバネ定数を K とおくと、その歪量は、

$$= \frac{J_L \ddot{\theta}_M + \alpha(\dot{\theta}_M, \dot{\theta}_M)}{K} \dots \dots \dots (13)$$

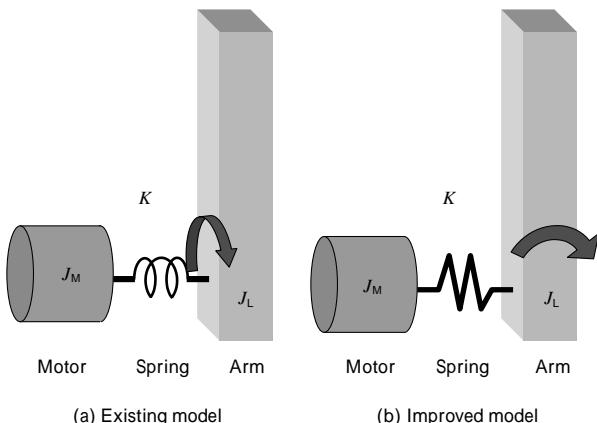


図6 新しい弾性変形モデル図
Fig. 6 New elastic deformation mechanical model

と表される。

モータにかかる加速度および遠心・コリオリ力をあらかじめ計算し、式(13)よりモータからアーム先端までの歪量を計算し、目標位置を補正する。これにより、マニピュレータ先端を所望の方向にウィーピング動作させることができる。

図7は、実機に弾性変形モデルによる補償を適用した際の、マニピュレータ先端の軌跡を示したものである。あらかじめ、歪量を計算した弾性変形補償を適用することで、目標値自体を斜めにするにより、マニピュレータ先端は、結果として斜め45度にウィーピング動作を行うことになる。

しかしながら、本方式では、軸の回転方向の歪みは補正可能であるが、回転軸と水平な方向の歪みは補正できず、十分にロボットの弾性変形を記述しているとは言えない。特に、図8のように天吊り状態でのロボットにおいて、第1回転軸中心付近($X=0$)にて高速にウィーピング動作を行う場合には、回転軸と水平な方向の歪みによる影響が顕著に出る。この姿勢において、 Y 軸方向に全振幅2mmにてウィーピング動作を実施した結果を、図9(a)に示す。第1軸回転中心に近づくにつれ、弾性変形によってウィーピング振幅が減少していることがわかる。本現象は、従来のモデルで考慮されていた第1軸目の回転方向のバネ成分よりも、第2軸目の支持部のた

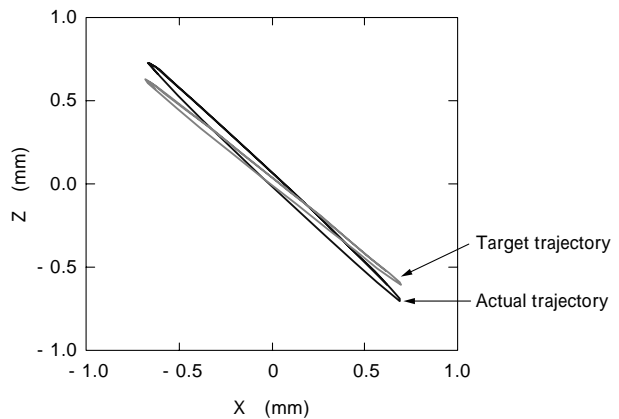


図7 従来の弾性変形補償の効果
Fig. 7 Effect of conventional elastic deformation compensation on the trajectory of tool point

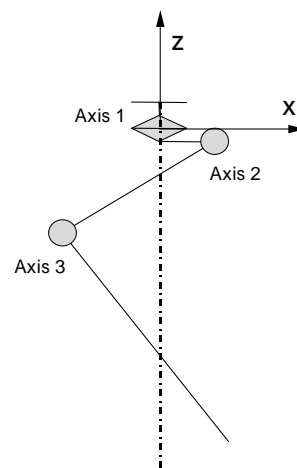


図8 第1軸回転中心近傍での弾性変形補償
Fig. 8 Elastic deformation compensation under Axis 1

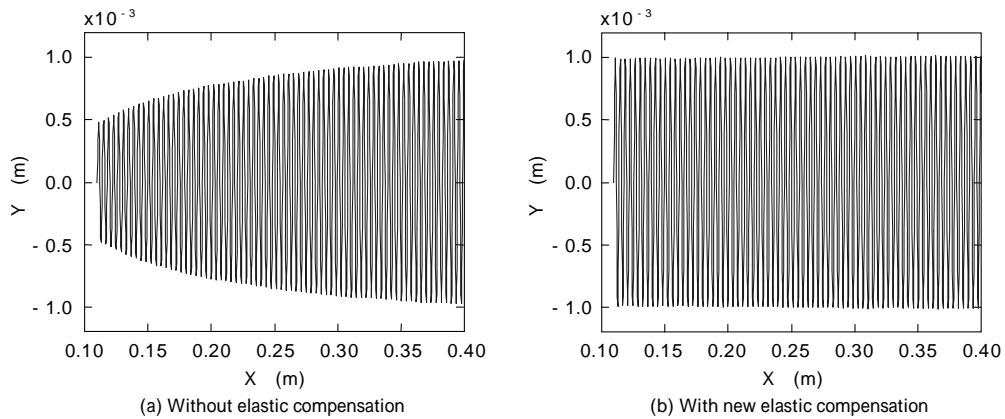


図9 第1軸回転中心近傍での弾性変形補償
Fig. 9 Elastic deformation compensation on the trajectory under axis1 in case of weaving

わみによる影響が支配的であり、これにより振幅が小さくなっていると言える。

従来の弾性変形モデルでは、慣性力が常にウィーピング振幅を増大させる方向に作用するため、振幅が小さくなる現象を説明できない。そればかりか、従来の弾性変形モデルに基づく補償では、第1軸の慣性力により、さらにウィーピング振幅を小さくしてしまう方向に作用する。

これに対して、今回、図6(b)のように軸の回転方向以外の歪みも考慮した新しい弾性変形補償モデルを構築した。このモデルに従うと、弾性変形によるウィーピング振幅の減少を表現することが可能である³⁾。

新しい弾性変形モデルに基づき、図9(a)と同じ位置にて第2軸のX軸回転方向の弾性変形を補償した実験結果を図9(b)に示す。図より、新しい弾性変形モデルに基づく弾性変形補償によって、第2軸の歪みが補正され、ウィーピング振幅の減少が完全に補償されていることがわかる。

この弾性変形モデルを適用すると、指令すなわち設定したとおりのウィーピング振幅を得ることができる。すなわち、全姿勢において、設定どおりの安定した脚長を得ることが可能であると言える。

むすび=アーク溶接ロボットのウィーピング精度の向上を目的として、ウィーピングの周期性に着目した周期外乱オブザーバを開発した。周期外乱オブザーバを実機に適用することにより、ウィーピング周期の外乱を完全に

相殺することが可能であることを示し、モータレベルでの位置追従精度を向上させることができた。

また、軸の回転方向だけでなく他の方向の歪みを記述した新しい弾性変形補償法について検討し、従来の弾性変形補償では対応できなかったアームの歪みについても、十分に補償可能であることを示した。

これらの制御則を、実際の6軸多関節マニピュレータに適用することにより、その効果および有用性を示した。

結果、当社のアーク溶接ロボットは、安定したアーク做いは元より、安定した脚長・低スパッタ化をも実現し、高い評価を得ている。

今後は、さらなる高速・高能率溶接が期待されると予想されるため、さらに高い帯域の周波数のウィーピング動作に対しても、これら制御手法を適用・向上していく予定である。

参考文献

- 1) 西田吉晴ほか：日本ロボット学会誌，Vol.12, No.3 (1994) p.466.
- 2) 野波健蔵ほか：日本機械学会論文集(C編)，Vol.58, No.545 (1992) p.68.
- 3) 西田吉晴ほか：SICE 関西支部30周年記念シンポジウム(1996), p.107.