協調動作する 2 台のロボットへの アークセンサの適用に関する研究*

笠上文男** 石松隆和*** 久貝克弥** 倉橋孝治†

Application of Arc Sensor on Coordinated Motion of Two Robots

Fumio KASAGAMI, Takakazu ISHIMATSU, Katsuya KUGAI and Kouji KURAHASHI

Owing to the gravity, the performance of the arc welding is strongly effected by the posture of the welding target as well as the posture of the welding torch. Therefore, it is desired to move the welding target and the welding torch coordinately. One welding system to realize such coordinated movements employing two industrial playback robots was proposed. In this paper, one method to use an arc sensor is presented which compensates the teaching error and the deformation of the welding target those are inevitable for the playback robot system. The arc sensor corrects the coordinated movements so that the welding torch traces the welding groove accurately. The proposed method proved to work efficiently by experiments.

Key words: coordinated motion, playback robot, arc welding, arc sensor

1. はじめに

産業用ロボットは生産設備として広く導入され、アーク溶接作業の分野でも自動化に大きく貢献している。アーク溶接法では、金属が溶けた溶融部が存在し、これが重力の影響を受け、溶接品質に影響を与える。そこで、近年産業用ロボットと、ワークを保持するポジション等の周辺装置を組み合わせて、あるいは、2台の産業用ロボットを用いて、溶接トーチとワークとを連動させて、すなわち協調動作させて作業する制御方式が提案されている¹⁾²⁾。筆者らはロボットが持つ機構的な誤差や重力によるたわみを受けた状態で作業プログラムを作成することにより、溶接トーチとワークとの相対的な位置姿勢は高い再現精度を有する点に着目し、ティーチングプレイバック方式を採用した制御方式を提案し、極めて高品質な溶接が実現できることを確認した³⁾⁴⁾。しかし、ワークの寸法にばらつきが大きい場合や、ワークの固定精度が悪い場合、あるいは、溶接熱によるワークの変形が大きい場合に、所定の位置からずれて溶接されるという問題が、協調動作を行うロボットシステムでは、より顕著に生じる。その対策としてアークセンサによる補正が効果的と考えられるが⁵⁾、ワークを能動的に動かすために、従来からの補正の方式を適用することは困難である。

本論文では、協調動作する2台のアーク溶接ロボットシステムに対して、村上らが提案するアークセンサ⁶⁾を適用し、溶接線のずれを自動補正する制御方式を提案する。本制御法に基づくロボットシステムを製作し、実験によりその有用性を検討した。

2. ロボットシステムの構成

ロボットシステムの全体構成を図1に示す。1台の制御装置で2台のロボットを制御し、一方のロボットには溶接トーチを取り付け、他方のロボットにはグripperを介してワークを保持させる。2台のロボットの協調動作は、教示ペンダントを用い

て教示される。溶接トーチと溶接電源との間には、アーク溶接中の溶接電流を検出し、溶接トーチが溶接線に沿うための補正量を算出するアークセンサを設ける。溶接作業時には、2台のロボットはアークセンサからの補正情報に基づく補正を加えつつ協調動作する。

ワークに対する溶接トーチの相対位置を考慮した取扱いを実現するために、対象とするシステムの座標系を図2のように設定した。

図2の座標系において各記号は次のように定義した。

Z_t : ワールド座標系を基準とした溶接トーチ側マニピュレータのベースを表す同次変換行列

Z_w : ワールド座標系を基準としたワーク側マニピュレータのベースを表す同次変換行列

T_t : 溶接トーチ側マニピュレータを表す同次変換行列

T_w : ワーク側マニピュレータを表す同次変換行列

E_t : 溶接トーチを表す同次変換行列

Fig. 1 Schematic diagram of robot system

Fig. 2 Definitions of coordinate systems

* 原稿受付 平成5年8月20日

** 正会員 (株)ダイヘン・メカトロ事業部(摂津市南千里丘5番1号)

*** 正会員 長崎大学工学部(長崎市文教町1番14号)

† (株)ダイヘン・メカトロ事業部

Fig. 3 Principle of consumable electrode arc welding

E_w : ワーク保持のグリップを表す同次変換行列

上記の同次変換行列を使うと、ワールド座標系に対するワーク座標系の位置姿勢は、

$$(\text{world } X \text{ work}) = Z_w \cdot T_w \cdot E_w \quad (1)$$

ワールド座標系に対するツール座標系の位置姿勢は、

$$(\text{world } X \text{ tool}) = Z_t \cdot T_t \cdot E_t \quad (2)$$

となり、座標系の関係から次式が成立する。

$$(\text{world } X \text{ tool}) = (\text{world } X \text{ work}) \cdot (\text{work } X \text{ tool}) \quad (3)$$

協調動作においては、ワークに対する溶接トーチの相対位置姿勢 (work X tool) が所定のものとなるように指定する。その結果、ワークの動き (world X work) を指定すると、式 (3) より、溶接トーチの位置姿勢 (world X tool) は自動的に定まることになる。

なお、以下で提案する制御方式では、アークセンサの情報に基づいて (work X tool) が補正される。

3. アークセンサの概要

消耗電極式アーク溶接の原理を図3に示す。溶接トーチのコンタクトチップを介して、溶接ワイヤに電力を供給し、被作業物のワークとの間でアークを発生させ、その高熱でワーク及びワイヤを溶かし、ワイヤは送給装置によって連続的に供給される。アーク及び溶融部はシールドガスによって大気から保護される。

村上らの溶接アーク長の動的解析⁶⁾によると、ワイヤ送給速度 v_f 、ワイヤ突出し長さ L_w 、平均アーク電流 I_{av} との間には次式が成り立つ。

$$v_f - \frac{4L_w}{dt} = K_2 \cdot \frac{d^2 I_{av}}{dt^2} + (K_1 + b \cdot K_2 \cdot I_{av}^2) \frac{dI_{av}}{dt} + \{a + b(L_a - K_0 + K_1 \cdot I_{av}) \cdot I_{av}\} \quad (4)$$

ただし、 K_0 , K_1 , K_2 , 及び a , b は溶接電源と溶接条件とによって定まる定数である。

すなわち、平均アーク電流 I_{av} の動的な変化を検出することによって、ワーク突出し長さ L_w が求まり、溶接条件によって定まるアーク長 L_a を加算することによって、コンタクトチップとワーク間との距離 L_x を知ることができる。

そこで、図4に示すように、溶接作業中に溶接トーチをウィービングさせ、1周期のウィービングの平均アーク電流を検出することにより、溶接トーチのトーチ方向補正量 (上下方向補正量 ΔS_x) とウィービング方向補正量 (左右方向補正量 ΔS_y) を算出できる。

(a) Compensated welding position

(b) Non compensated welding position

Fig. 4 Principle of arc sensing

4. 協調動作の教示作業手順

作業者は教示ペンダントを使って実際に2台のロボットを操作し、所望するワークの溶接線の傾斜と、溶接線に対する溶接トーチの状態を、順次作成し、その時の状態を教示データとして保存する⁴⁾。教示データとしては、ワークの位置姿勢 (world X work) と溶接トーチの位置姿勢 (work X tool)、さらに、教示ペンダントで数値指定する溶接条件、すなわち、溶接速度 v 、溶接電流 I_{av} 、溶接電圧 V_{eo} 、ウィービング周波数 f_{wv} と振幅 L_{wv} とを用いる。

5. 再生時の制御方式

ワークと溶接トーチを動かして、教示された位置姿勢を順次再生する。この再生時に、アークセンサからの補正情報を受けてワークに対する溶接トーチの位置を補正する。第 j 番目から第 $j+1$ 番目への教示点への動作を行わせる手順は、図5に示すように、

- 1) 作業プログラムに記憶した j 番目および $j+1$ 番目における位置姿勢の教示データ (work X tool), (world X work) と、溶接条件 (V , I_{av} , V_{eo} , f_{wv} , L_{wv}) を取り出す。
- 2) ワークに対する溶接トーチの位置 (work X tool) の変化量を求め、指定された相対速度 V から2点間の総補間点数 N (所用時間 T) を算出する。また、溶接電源に (I_{av} , V_{eo}) を指示する。
- 3) 教示点間でワークがなめらかに変化するものとして、第 j 教示点と第 $j+1$ 教示点との間の i 番目の補間点における、ワークの位置姿勢 (work X tool) _{i} と、溶接トーチの位置姿勢 (world X work) _{i} とを求める。
- 4) 溶接トーチが、アークセンサの情報に基づいて、開先の中心を通るように、(work X tool) _{i} を補正し、さらに、ウィービングを加算した位置姿勢 (work X tool) _{i} * を求

Fig. 5 Flow chart for control of playback

める。

- 5) $(\text{work } X \text{ tool})_i^*$ と $(\text{world } X \text{ work})_i$ を式 (3) に代入し、溶接トーチの位置姿勢 $(\text{world } X \text{ tool})_i$ を求め、逆変換によって、各マニピュレータの関節変数を算出する。
- 6) 両マニピュレータが、求めた関節変数を持つようにサーボ制御する。
- 7) $j+1$ 番目の教示点に到達するまで、3)以降を補間時間間隔 ΔT で繰り返す。

このようにして、教示データを補正しつつ再生することができる。

なお、上述した 4) の詳細は以下のようにする。

- 4-1) 進行ベクトル ν_i を、ワーク座標系を基準とした溶接トーチの移動方向と定義し、溶接トーチの $(i-1)$ 番目の補間点から i 番目の補間点に向かうベクトルとして算出する (図 6)。
- 4-2) 進行座標系 Σ_{seam} を、ツール座標系の原点を座標原点とし、進行ベクトル ν_i を Z 座標軸とし、ツール座標系の

 Fig. 6 Schematic diagram of seam vector ν_i and seam coordinate system Σ_{seam}

Z 座標軸と進行ベクトル ν_i との外積を Y 座標軸とするように定義する。具体的には、 i 番目における、溶接トーチの位置姿勢を次式とくと、

$$(\text{work } X \text{ tool})_i = [wnt, wot, wat, wpt] \quad (5)$$

進行座標系 Σ_{seam} は次式となる。

$$\text{tool } X \text{ seam} = [tns, tos, tas, 0] \quad (6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} wRt &= [wnt, wot, wat], \\ tas &= wRt^{-1} \times \nu_i / \|\nu_i\|, \\ tos &= tas \times [0, 0, 1], \\ tns &= tos \times tas \end{aligned} \quad (7)$$

- 4-3) アークセンサからのウィービング方向補正量 ΔS_y とトーチ方向補正量 ΔS_x を取り込み、各々の累積補正量 $\Sigma S_y, \Sigma S_x$ に加算する。

- 4-4) 溶接トーチをウィービングさせるための移動量 ΔL_{wv} は、次式によって算出し、進行座標系 Σ_{seam} の Y 軸方向に加算する。

$$\Delta L_{wv} = L_{wv} \cdot \sin(2\pi \cdot \Delta T \cdot f_{wv}) \quad (8)$$

- 4-5) よって、第 i 補間時刻における進行座標系を基準とした溶接トーチの位置 $\text{seam } X \text{ tool}$ は次式となる。

$$\text{seam } X \text{ tool} = [0, 0, 0, P] \quad (9)$$

ただし、

$$P = [\Sigma S_x, \Sigma S_y + \Delta L_{wv}, 0, 1]^T \quad (10)$$

- 4-6) 式 (5)、式 (6)、式 (9) により、第 i 補間時刻におけるワーク座標系を基準とした溶接トーチの位置姿勢 $(\text{work } X \text{ tool})_i^*$ は、次式で計算される。

$$\begin{aligned} (\text{work } X \text{ tool})_i^* &= (\text{work } X \text{ tool})_i \cdot \\ &\quad \text{tool } X \text{ seam} \cdot \text{seam } X \text{ tool} \end{aligned} \quad (11)$$

6. 補正動作の評価

アークセンサを使用し協調動作を行うプレイバック方式の溶接ロボットシステムとして、図 7 に示す装置を製作した。両マニピュレータの仕様を表 1 および表 2 に示す⁷⁾。また、それらの設置関係を図 2 に示した記号と対応させて表 3 に示す。

図 7 に示すように、2 枚の軟鋼平板 (SPCC) をワーク側マニピュレータに保持させ、その 2 枚を溶接させる協調動作を行わせた。

ただし、溶接中にワークを下方に一定速度 13.43 mm/s で動かした。さらに、溶接終了端における教示点は、図 8 に示すよ

Fig. 7 Experimental setup

Table 1 Link parameters for tool manipulator

Link	a_i	a_i	d_i	θ_i
1	1.570 796	150.0	550.0	θ_1 (variable)
2	0.0	500.0	0.0	θ_2 (variable)
3	1.570 796	100.0	0.0	θ_3 (variable)
4	1.570 796	0.0	700.0	θ_4 (variable)
5	-1.570 796	0.0	0.0	θ_5 (variable)
6	0.0	0.0	100.0	θ_6 (variable)

Table 2 Link parameters for workpiece manipulator

Link	a_i	a_i	d_i	θ_i
1	1.570 796	-100.0	630.0	θ_1 (variable)
2	0.0	400.0	0.0	θ_2 (variable)
3	1.570 796	150.0	0.0	θ_3 (variable)
4	1.570 796	0.0	880.0	θ_4 (variable)
5	-1.570 796	0.0	0.0	θ_5 (variable)
6	0.0	0.0	185.0	θ_6 (variable)

Table 3 Parameters of Z_i , Z_w , E_i and E_w

$Z_i = \text{Trans}(0, 0, 0) \cdot \text{Rot}(X, 0) \cdot \text{Rot}(Y, 0) \cdot \text{Rot}(Z, 0)$
$Z_w = \text{Trans}(1\ 645, 313, 25) \cdot \text{Rot}(X, 0) \cdot \text{Rot}(Y, 0) \cdot \text{Rot}(Z, 3.141\ 592)$
$E_i = \text{Trans}(150, 0, 235) \cdot \text{Rot}(Y, 0) \cdot \text{Rot}(X, 3.141\ 592)$
$E_w = \text{Trans}(-150, 0, 100) \cdot \text{Rot}(X, 0) \cdot \text{Rot}(Y, 1.570\ 796) \cdot \text{Rot}(Z, 0)$

Fig. 8 Outline of coordinated motion

うに 5 mm ずらした。

再生動作の溶接条件を表 4 に示す。補正された再生動作の結果を図 9 に示す。溶接トーチは、ウイービング方向の累積補正

Table 4 Condition of arc welding

1. Method	Active gas metal arc welding with pulsed voltage control
2. Current and voltage	190 A, 20 V
3. Velocity	16.67 mm/s {100 cm/min}
4. Weaving	4.9 Hz

Fig. 9 Experimental result of compensated welding path

量 ΣS_y に対応した補正、及び、トーチ方向の累積補正量 ΣS_x に対応した補正が施され、開先中心からの偏差は約 1 mm 以内の経路を保った。溶接作業は良好な結果を得た。

7. ま と め

2 台のマニピュレータを用いて、ワークと溶接トーチとを協調動作させながら、アークセンサによって溶接線を検出し溶接トーチの位置を補正する制御方式を提案した。そして、実験によって精度を評価した結果、約 1 mm 以内の偏差で溶接線を保ち、良好な溶接結果を得た。

今後の課題は、ワークの位置と姿勢とを検出できるビジョンセンサ等を採用し、センサ情報をツール側のみならずワーク側にも施すことによって、2 台のロボットによる協調作業の特徴を有効に生かした作業を行う制御方式を検討したい。

参 考 文 献

1) K. Fernandez and E. Cook : A Generalized Method for Automatic Downhand and Wirefeed Control of a Welding Robot and Positioner, NASA Tech. Paper 2807, Feb. (1988).
2) S. Ahmad and S. Luo : Coordinated Motion Control of Multiple Robotic Devices for Welding and Redundancy Coordination through Constrained Optimization in Cartesian Space, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., Philadelphia, PA, Apr. 24-29, (1988) 963.
3) 笠上文男, 石松隆和 : ティーチングプレイバック方式における協調動作の制御, 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 521.
4) 笠上文男, 石松隆和, 藤田雅成 : 協調動作を行う ティーチング・プレイバックロボット の制御方式, 日本ロボット学会誌, 11, 1 (1993) 165.
5) 小笠原隆明, 宗実良明 : アークセンサの薄板への適用, 溶接学会全国大会講演概要, 第 44 集, (1989) 36.
6) 村上悦三, 久貝克弥, 山本英幸 : 溶接アーク長の動的解析とアークセンシングへの応用, 溶接法研究委員会編「溶接法ガイドブック 2」, 溶接学会, (1990) 89.
7) R. Paul : Robot Manipulator: Mathematics, Programming, and Control, MIT Press, (1981).