

(技術資料)

# ケーブル内蔵溶接ロボット「ARCMAN™-GS」

## Built-in Cable Type Welding Robot "ARCMAN™-GS"



稲田修一\*1  
Shuichi INADA



近藤 亮\*1  
Makoto KONDO



井上芳英\*1  
Yoshihide INOUE



湊 達治\*1  
Tatsuji MINATO



西田吉晴\*2(工博)  
Dr. Yoshiharu NISHIDA



和田 堯\*2  
Takashi WADA

This paper describes the features of the "ARCMAN™-GS", a welding robot having built-in cables. The robot was launched to the market in September 2011. To reach deep inside hollow workpieces, the robot has a sufficient motion range especially for an overhead-suspended system and has the torch-integrated arm that is suitable for teaching. These features make the "ARCMAN™-GS" a more versatile machine, enabling welding of various workpieces, improving the customers' production. The robot is expected to be sold worldwide.

まえがき＝当社のアーク溶接ロボットは、中厚板分野（建設機械、鉄骨、橋梁、鉄道車両）をターゲットとして、これまで国内および海外のユーザにおいて数多く採用されてきた。中厚板分野のユーザニーズには、①生産性の向上（自動化率の向上）、②溶接品質の向上、③省スペース化、④生産コスト低減などがある。

①の具体例を挙げると、建設機械分野では溶接対象物の内面深くに溶接トーチが入り込む場合が多く、溶接トーチおよびトーチケーブルが溶接対象物と干渉しやすい。その場合、ロボットを用いた溶接ができず、人の手で溶接することになる。このような作業環境において生産性を向上させるためには、トーチケーブルをロボットの上腕に通すことにより溶接対象物との干渉を回避する「ケーブル内蔵ロボット」が必要といわれていた。

一方、溶接対象物が大型化する反面、システムは小形・省スペース化の要望が強くなっている。このため、大型溶接対象物へアプローチがしやすく、省スペース化を図ることができる天吊りシステムの需要が増加してきた。

そこで、①トーチケーブルと溶接対象物が干渉しにくいケーブル内蔵、②天吊りシステムに適した広い動作範囲、という特長を有するケーブル内蔵ロボット ARCMAN™<sup>(注)</sup>-GS (図1)を開発した<sup>1)</sup>。

ARCMAN-GSはケーブルを内蔵する新たに開発した構造であり、従来のARCMANシリーズと異なる機械的な特長を持つ。そのため、高精度な位置追従精度（ウィービング精度およびセンシング精度など）を実現することを目的に、同時に新制御技術も開発した。これら機械および制御開発を成しえたことで、高機能・高性能な新ロボットが完成した。

ARCMAN-GSの名前は、「Global Standards（世界標準）」

脚注）ARCMAN（**ARCMAN™**）は当社の商標である。

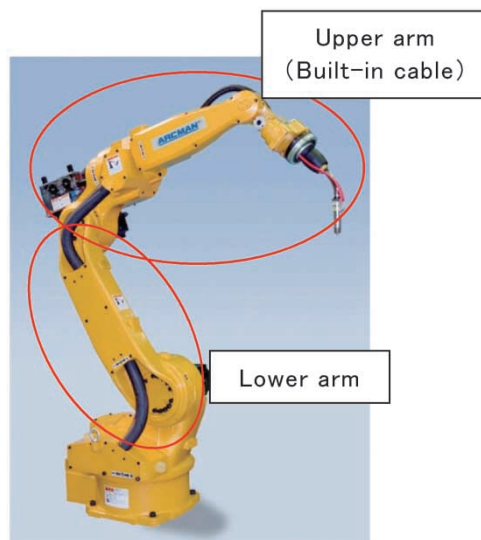


図1 ARCMAN-GSの外観<sup>1)</sup>  
Fig. 1 Appearance of ARCMAN-GS<sup>1)</sup>

「Global Strategy（世界戦略）」などの頭文字から取っており、海外の多くのユーザにおいて活躍するロボットをつくり上げるという当社の思いが込められている。

### 1. ARCMAN-GSの特長

1.1 システムに合わせて選べるトーチケーブル内蔵方式  
ARCMAN-GSは次の2種類のトーチケーブル内蔵方式が選択できる。

①溶接トーチを手首に、トーチケーブルを上腕に通す方式（図2）

②溶接トーチを手首に通し、トーチケーブルを上腕に通さない方式（図3）

①の方式では、溶接トーチを手首に、トーチケーブルを上腕に通すことで溶接対象物との干渉が従来機に比べ大幅に低減する。②の方式では、シングル／タンデムト

\*1 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 \*2 技術開発本部 生産システム研究所

ーチの自動交換など、複数の溶接トーチ・トーチケーブルを持替える場合、手首周りの干渉低減に有効である。

図4は、建設機械の溶接対象物に対して従来機 ARCMAN-SRがアプローチする様子である。溶接対象物の狭隘（きょうあい）箇所にあプローチする際、溶接対象物とトーチが干渉することや、トーチケーブルが溶接対象物に絡みつくななどの問題がある。この例は、送給装置から伸びたトーチケーブルが溶接対象物内面に接触する寸前の状態である。①のトーチケーブル内蔵方式を採用することにより、トーチケーブルが溶接対象物との干渉を回避できることがわかる。したがって、ロボット動作の教示も容易になり、パソコンでのオフライン教示にも適している。

後述のシングル／タンデムトーチの自動交換など、トーチケーブルを上腕に内蔵できない場合には②のトーチケーブルを上腕に通さない方式を採用する。この場合でも溶接トーチは、ロボットの軸構成（図5）におけるS6軸中心を通りロボットから張出すことがないため、溶接対象物の狭隘箇所深くに溶接トーチが入り込んで溶接す

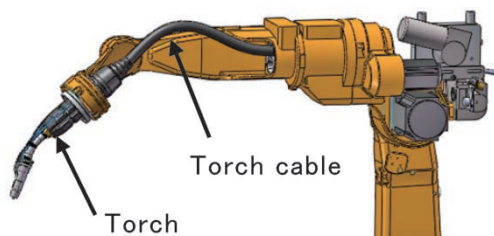


図2 トーチケーブルを上腕に通す方式  
Fig. 2 Upper arm with built-in torch cable type

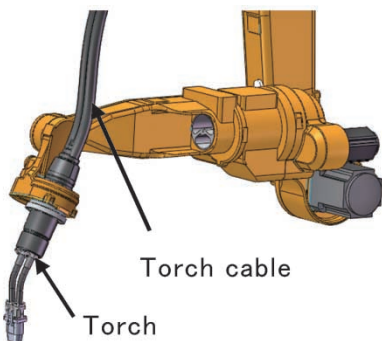


図3 トーチケーブルを上腕に通さない方式  
Fig. 3 Torch-integrated wrist axis type

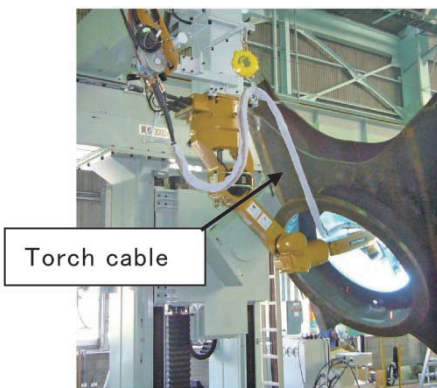


図4 ARCMAN-SRの建設機械への施工状況  
Fig. 4 Working condition of ARCMAN-SR approaching to construction machinery

る際も、溶接対象物との干渉を少なくすることができる。

このようなトーチケーブル内蔵を実現するために従来機とは異なる新しい手首構造を開発した。

## 1.2 新しい手首構造

ARCMAN-GSの手首構造は、上腕にトーチケーブルを内蔵すること、さらにシングル／タンデムトーチの自動交換を考慮して上腕のS4軸に対して左右非対称構造（片持ち）とした（図6）。従来機（ARCMAN-MP他）は、トーチケーブルが非内蔵となっており、S4軸に対して左右対称の構造である（図7）。

トーチケーブルを内蔵しながらも手首構造をスリム化するため、S5軸およびS6軸のタイミングベルトを交差して配置し、新たなゼロバックラッシュギヤ構造を採用するなど従来機とは全く異なる配置とした（図8）。

溶接トーチおよびトーチケーブルを内蔵することで手

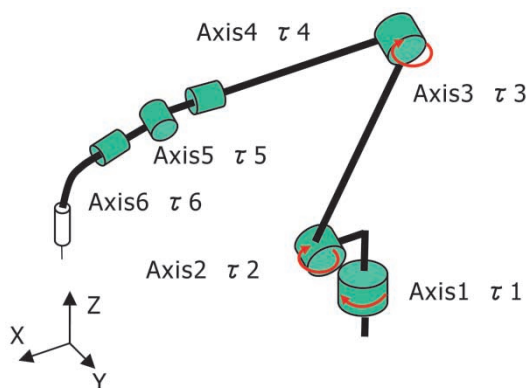


図5 各軸のトルク  
Fig. 5 Torque of each axis

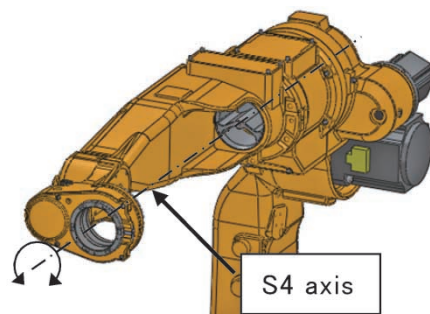


図6 ARCMAN-GSの左右非対称構造（片持ち）手首  
Fig. 6 Asymmetrical wrist of ARCMAN-GS

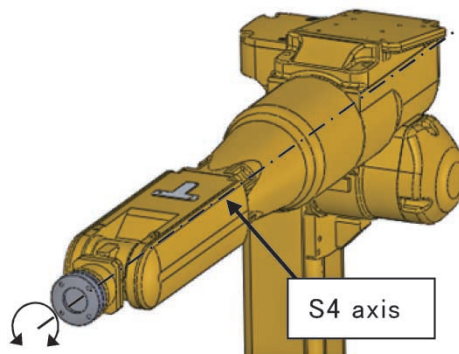


図7 従来機（ARCMAN-MP）の左右対称構造手首  
Fig. 7 Symmetrical wrist of conventional robot (ARCMAN-MP)



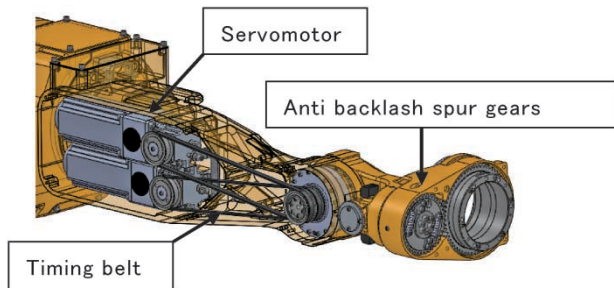


図8 手首構造  
Fig. 8 Wrist structure

首先端に突出する部分がなく、トーチケーブルの絡まりや溶接対象物との干渉が生じにくい構造を実現した。

### 1.3 シングル/タンデム溶接トーチ自動交換（ツールチェンジ）

ARCMANシリーズの特長として、中厚板溶接での溶接効率を高めるタンデム溶接（2電極溶接）がある。ARCMAN-GSではタンデムトーチをS6軸中心に内蔵することが可能である。トーチケーブル内蔵ロボットの特長を生かし、従来では不可能であった狭隘箇所でのタンデム溶接の適用率が向上する。また、ARCMAN-GS専用のツールチェンジと組み合わせることで、溶接工程内でシングル/タンデムトーチの自動交換ができ、溶接対象物形状や継手形状によって溶接トーチを使い分けすることができる（図9）。

図10は、シングルトーチを自動交換する動作を示す。シングルトーチを置き台に固定し、トーチ先端側からロボットのS6軸を挿入させて溶接トーチの着脱動作を行う。これにより、最適な溶接トーチに自動交換することで適用率を最大限まで向上させることができる。

### 1.4 S3軸の逆エルボ

ロボットアームの上腕がロボット後方まで折れ曲がる姿勢を「逆エルボ姿勢」と呼ぶ。溶接対象物の大きな中厚板溶接に適した天吊りシステムでロボットが上方からアプローチするとき、逆エルボ姿勢によって従来よりも大きな動作範囲を得ることができる。

図11にARCMAN-GSと従来機（ARCMAN-MP）の天吊り姿勢での動作範囲を比較する。赤色で示すロボット後方の溶接可能範囲が、従来機に比較して40%拡大している。ARCMAN-GSでは逆エルボ姿勢をとることが可能なため、アームサイズがARCMAN-MPと同クラスでありながら、天吊りでの動作範囲を大きくすることができる。

図12は天吊りでの溶接対象物へのアプローチの例である。逆エルボ姿勢が取れることにより、同じ溶接位置にアプローチする場合でも、溶接対象物の形状を考慮し、干渉を回避する姿勢を取ることが可能である。従来であれば、干渉を回避するために移動装置（ロボット自体を移動させる架台）でロボットをいったん遠ざけて溶接対象物との干渉を回避していた。しかしARCMAN-GSでは、移動装置を動かすことなくロボットの動作だけで干渉回避でき、移動装置のストロークが短くできる。この事例のように、システム全体の省スペース化・軽量化の可能性が広がった。

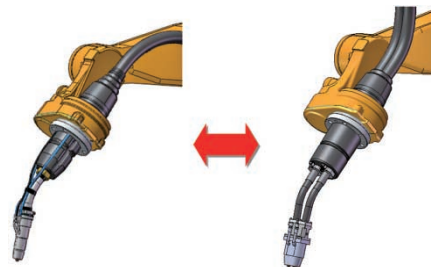


図9 左：シングルトーチ，右：タンデムトーチ  
Fig. 9 Single torch (left) and tandem torch (right)

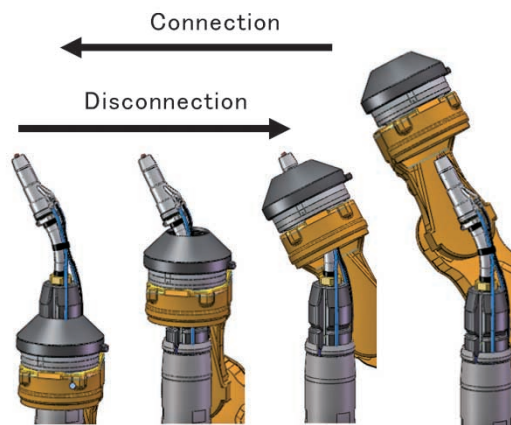


図10 シングルトーチの自動交換動作  
Fig.10 Automatic exchange operation of single torch

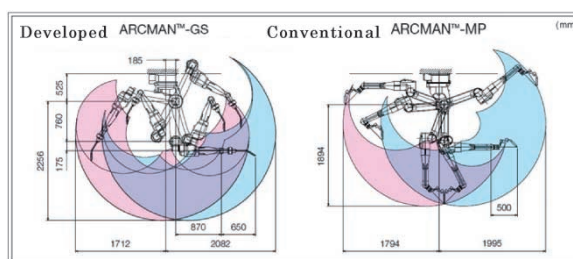


図11 動作範囲比較  
Fig.11 Comparison of working area

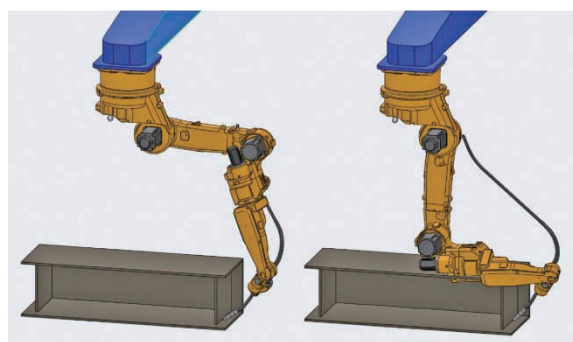


図12 左：逆エルボ姿勢 右：従来姿勢  
Fig.12 Reverse posture (left) and conventional posture (right)

## 2. 新制御技術の開発

ARCMAN-GSはこれまでのARCMANシリーズとは異なる「非対称の手首構造」を有する。そのため、中厚板分野の溶接ロボットにとって重要な性能（ウィービング精度、センシング精度など）をこれまでと同等もしくはそれ以上を実現するためには、次の新たな制御技術の開発が必要であった。

- ①全軸フィードフォワード完全モデル
- ②全軸ひずみ予測制御
- ③新ガタ補償
- ④新クーロン摩擦補償
- ⑤新加減速波形

本稿では紙面の都合上、上記①、②のみを取上げて説明する。

### 2.1 全軸フィードフォワード完全モデル

ロボットの関節を剛体と仮定すれば、一般的な運動方程式は次のように記述できる。

$$\{J_M + J_L(\theta_M)\} \ddot{\theta}_M + (B_M + B_L) \dot{\theta}_M + C(\dot{\theta}_M, \theta_M) + F = \tau \quad \dots (1)$$

ここに、 $\theta_M$ ：モータ位置

$J_M, J_L(\theta_M)$ ：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

$C(\dot{\theta}_M, \theta_M)$ ：遠心、コリオリ力、重力

$F$ ：外力

$\tau$ ：モータトルク

式(1)は一軸のみの一般的な式であり、従来は式(2)で示すとおり、ロボット先端位置に大きく影響を与える軸は主軸(S1軸～S3軸)のみと考えられた。ARCMAN-GSでは、手首構造の大形化および左右非対称な上腕の構造により手首軸(S4軸～S6軸)もロボット先端位置に大きな影響を与えることがわかった。このため式(2)を拡張し、全軸考慮したモデルを新たに開発した(式(3))。

式(3)を用いて動作時にあらかじめ必要なトルクを計算し、制御系にフィードフォワードとして加算することで高い位置追従精度を実現できた。当初導出したモデル式は約2万回の演算量であり、ロボットコントローラへの実装が困難なレベルであった。しかし、数式の実機検証を重ねることによって演算量を当初の20分の1にまで低減でき、コントローラへの実装が可能な計算量となった。

#### (1) 従来の制御則

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + C(\theta_1, \theta_2, \theta_3) + F \quad \dots (2)$$

#### (2) 新制御則

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} + C(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) + F \quad \dots (3)$$

全軸動作時の先端(S6軸)でのトルク推定結果を図13、図14に示す。既存の制御技術をARCMAN-GSに採用した場合、トルクの推定値とフィードバックトルクに誤差が生じたが(図13)、新制御技術を採用することでトルクを正確に推定できていることが確認できる(図14)。この正確なトルク推定値をフィードフォワードとして制御系に加算することで高い位置追従精度を実現した。

### 2.2 全軸ひずみ予測制御

ARCMAN-GSでは、前述した手首部の重量化および複

雑化による手首部のひずみの影響により、ロボット先端のウィービング精度の確保が困難であった。このため、ひずみ予測制御を従来の3軸から6軸(式(4))にまで拡張することにより、必要なウィービング精度を確保することができた。

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta\theta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_6^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

ここに、 $K$ ：バネ定数

上記モデルを用いることにより、ロボットアームなどのひずみを予測でき、ARCMAN-GSにおいても所望のロボット先端軌跡に追従させることが可能となった<sup>2)</sup>。予測例を図15に示す。横軸はロボット先端のX方向の座標、縦軸はZ方向の座標を示す(図5参照)。斜め45度でロボット先端を動作させることを目標としたとき、ひずみを予測した目標軌跡は緑色の実線となる。この緑色の軌跡を目標軌跡としてロボットを動作させると、実際の軌跡は青色の実線のように目標とした斜め45度で動作した。つまり、ひずみを正確に予測できていることがわかる。

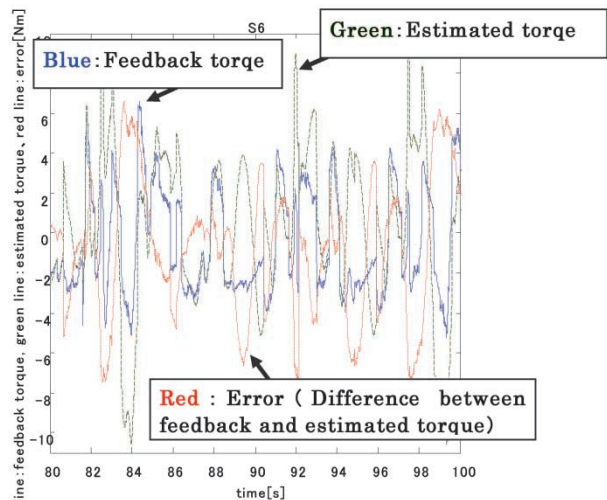


図13 既存制御でのトルク推定結果 (S6軸)  
Fig.13 Estimated torque with existing control (Axis6)

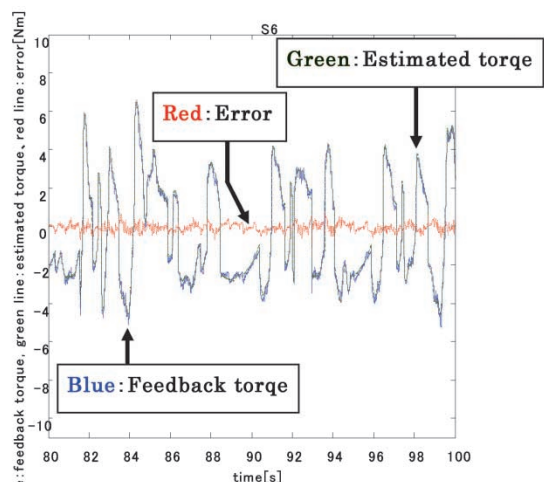


図14 新制御でのトルク推定結果 (S6軸)  
Fig.14 Estimated torque with new control (Axis6)

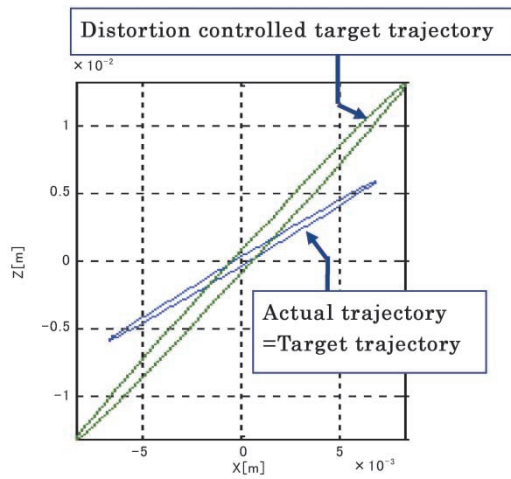


図15 新制御での予測結果  
Fig.15 Prediction result with new control

むすび=ARCMAN-GSの開発では、新たな機械技術と新たな制御技術を融合させることで世界最高レベルのロボットを上げることができた。

今後は、本開発で得た経験を生かしてロボット技術を向上させ、高性能ロボットの開発に努めていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 湊 達治. 技術ガイド 技術レポート. 2011-9, Vol.51, p.1-6.
- 2) 西田吉晴ほか. 中厚板向けアーク溶接ロボットの動作制御. 計測と制御. 2012, Vol.51, No.9.