

「C3 eMotion」 インテリジェントアクチュエータユニットの開発

渡邊昭宏, 高橋喜二, 湯本一樹, 引地哲也

Development of the C3 eMotion, Intelligent Actuator Unit

Akihiro WATANABE, Yoshiji TAKAHASHI, Kazuki YUMOTO and Tetsuya HIKICHI

ロボットの多様化・高機能化ニーズにこたえるべく、モーター、減速機、駆動回路、ブレーキ、アブソリュートエンコーダをパッケージ化した、インテリジェントアクチュエータユニット「C3 eMotion」を2020年4月にリリースした。「C3 eMotion」は、2つのアブソリュートエンコーダを組み込んだ「ダブルエンコーダ構造」を採用。独自の制御技術との組み合わせによる様々な機能を有する。本稿では、「C3 eMotion」が持つ技術的特徴について解説する。

In April 2020, Nikon released the intelligent actuator unit, “C3 eMotion,” that packages a motor, reducer, drive circuit, brake, and absolute encoders to meet the needs for diversification and high functionality of robots. The “C3 eMotion” includes Nikon’s original “double-encoder arrangement,” which incorporates two absolute encoders, and various functions that combine the original control technology with the double-encoder arrangement. This article describes the technical features of the “C3 eMotion.”

Key words ロボット用関節ユニット, ダブルエンコーダ構造, 高精度位置決め, トルク検出, 制御技術
robotic joint unit, double-encoder arrangement, high accuracy positioning, torque detection, control technology

1 はじめに

ロボット業界においては、ロボット産業の振興を戦略的に加速させるためにロボット構成要素のモジュール化が議論されている [1]。この取り組みは自由な発想によるロボット構成を可能にし、ニーズの多様化・高機能化を後押しすると考えられる。本稿では、これらのニーズにこたえるべく2020年4月にリリースした、インテリジェントアクチュエータユニット「C3 eMotion [2]」(Fig. 1) について、ダブルエンコーダ構造と独自制御技術を応用して得られる特徴とその技術要素について解説する。



Fig. 1 C3 eMotion

2 ハードウェア構成

従来、多関節ロボットの関節部を構成するためには、その構成要素となるモーターとエンコーダ、減速機、ブレーキなどのコンポーネントをそれぞれ準備し、ロボットベースやロボットアームに対して組み込む必要があった。また、ロボットの動作スピードやイナーシャ等に応じて、減速機やモーターの出力特性、エンコーダの仕様などを設計する必要があり、自由にロボットを製作するためには高い技術力が必要となる。その為、ロボットシステムを構築するためには、ロボット専門メーカーが製作したロボットを購入して使用する事が今もなお一般的である。一方で、ロボットを用いたアプリケーションは多様化する傾向にあり、世の中にない自由な構成のロボットを作りたいというニーズは高まりを見せている。

C3 eMotion は、「Connect (接続)」「Control (制御)」「Cooperate (協働)」という3つのCの実現を目指してネーミングされた。自由な発想によるロボット構成を可能にするためにC3 eMotionでは、モーター、減速機、ブレーキ、アブソリュートエンコーダ、およびモータードライバー基板を1つの筐体に詰め込んだ、オールインワンパッケージ (Fig. 2) を採用している。このパッケージ化により、ロボットを構成する際の個別コンポーネントに対する設計・

組立が不要となり、C3 eMotion を1つのロボット関節モジュールとして捉えることが可能になる。また、モーターに対してモータードライバー基板を直近に配置する構造のため、ロボット機内にモーター駆動用の動力ケーブルを配線する必要がなくなり、省配線化、およびノイズエミッションに対しても有利に働く。

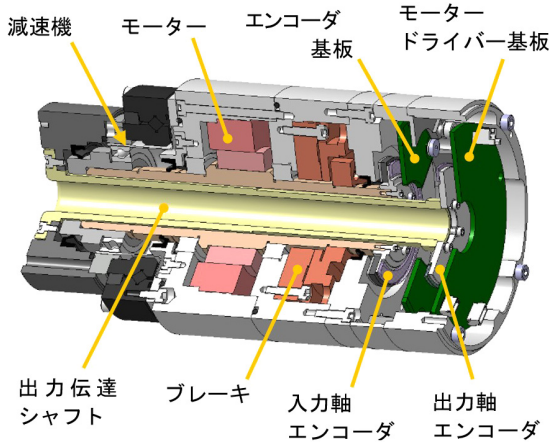


Fig. 2 C3 eMotion 内部構成

更に、C3 eMotionでは入力軸（モーター駆動軸）用のアブソリュートエンコーダに加え、出力軸側にも高分解能アブソリュートエンコーダを備えた、「ダブルエンコーダ構造」を採用している。モーターの回転は減速機によって減速され、出力軸に伝達する。出力軸の回転情報は出力伝達シャフトによってモーター軸の中空内部を伝達し、出力軸とは反対側の端面に取り付けられたエンコーダによって読み取られる。入力軸側の回転情報を読み取るエンコーダと出力軸エンコーダは隣り合う形で配置されている。それらの回転情報はシリアル通信によりモータードライバー基板に送信される。モータードライバー基板はエンコーダの直近に配置されており、上位のコントローラーからの指令値と2つのエンコーダの情報を基に、モーターの回転とブレーキをコントロールする。このエンコーダ・ドライバー基板の配置により、エンコーダの通信ケーブルの長さを最小にするとともにロボットアームからの振動衝撃が直接伝わり、且つグリスを内包している減速機からエンコーダなどの電子基板を遠ざける効果がある。

C3 eMotionのシステム構成を Fig. 3 に示す。C3 eMotion はロボット関節モジュールとして使用できることから、複数のC3 eMotionの間をアームで接続する事で簡単にロボットを構成する事が出来る。モータードライバー基板と上位コントローラーの通信は、CiA402ドライブプロファイルに対応したEtherCAT® [3] のシリアル通信により行う。EtherCAT® はデージーチェーン接続が可能となっており、ロボットアームを介してC3 eMotionを複数軸接続する事に適している。C3 eMotionの主な仕様を Table 1 に示す。現在、IAU-60とIAU-200の2機種がリリースされており、

IAU-15・IAU-30・IAU-300の3機種が開発中である。これらの5機種を用いてアームロボットを構成した例を Fig. 4 に

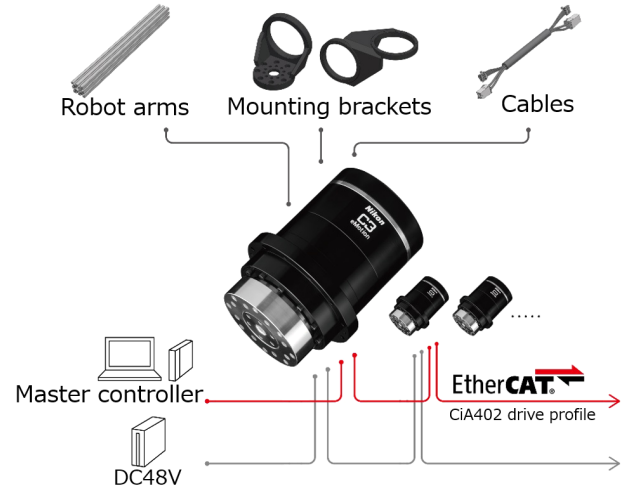


Fig. 3 システム構成

Table 1 主な仕様

型番	IAU-15 (開発中)	IAU-30 (開発中)	IAU-60	IAU-200	IAU-300 (開発中)
電源電圧	V 48				
瞬時最大トルク	N・m 4.8	30	55	200	400
定格トルク	N・m 2.4	10	30	95	130
定格回転速度	min ⁻¹ 35	30	20	15	15
最高回転速度	min ⁻¹ 60	40	40	20	20
減速比	- 100	81		101	
エンコーダ ※ IAU-15は入力軸のみ	入力軸：一回転 24 bit, 多回転 16 bit 出力軸：一回転 24 bit				
出力軸エンコーダ精度	arc-sec -	±15以下			
トルク検出範囲 (FS.)	N・m -	14	30	130	280
トルク検出精度	% -	±5 F.S.			
ドライバー／通信方式	- アクチュエータに内蔵／EtherCAT® CiA402				
外径	mm φ50	φ70	φ80	φ110	φ142
全長	mm 73.4	161.1	164	179.7	185
質量	kg 0.6	1.6	2.1	4.9	8.5



Fig. 4 C3 eMotion を用いた 5 軸ロボットの例

示す。このロボットは、低可搬重量であるものの 1000 mm のロングリーチ設計であり、アームにプラスチックを用いる等、市販のロボットには見られない特徴を備えている。

3 ダブルエンコーダ構造

歯車を用いた減速機には、加工誤差や摩擦などに起因する角度伝達誤差が存在する。C3 eMotion には、ロボットをはじめとした産業用機器に広く採用されている波動歯車減速機を採用している。波動歯車減速機には角度伝達誤差のほかに、構造的に発生するヒステリシスを含む非線形の摩擦やばね特性を持つ [4]。これらの誤差やばね特性は、従来のセミクローズド制御系ではロボット先端部において大きな位置誤差として現れる。ロボット専門メーカーでは、規格化されたロボットに対してロボットアームの高剛性化や、ロボット先端部の位置誤差を推定し補正する技術を採用するなどして位置精度の高精度化を図っている [5]。このような高精度化技術は、例えばシステムインテグレーターがモジュール化されたロボット構成要素を組み合わせることで自由な形状のロボットを構築するような場合には適用が難しい。

前述の通り、C3 eMotion は出力軸側にもエンコーダを備えた「ダブルエンコーダ構造」を採用している (Fig. 5)。出力軸エンコーダには 24 bit 分解能のアブソリュートエンコーダを採用しており、誤差補正を実施する事で ± 15 arc-sec 以下の精度を確保している。出力軸の回転情報を用いて制御することで、角度伝達誤差や非線形ばね特性の影響は排除できる事から、位置決め精度の向上が期待できる。

また、非線形ばね特性を持つ減速機はねじり弾性体と捉えることが出来るため、ねじれ量とトルクを予め計測し換算しておくことで簡易的にトルクを計測する事が可能となる。

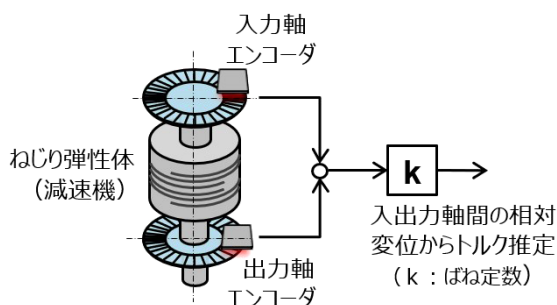


Fig. 5 ダブルエンコーダ構造

4 独自制御技術

自動車のボディー溶接、電気自動車やハイブリッド車に搭載されるバッテリーモジュールの電極接続など、レー

ザー溶接に代表されるアプリケーションでは、ロボットの TCP*1 位置決め精度の高精度化への要求が高まっている。

ニコンでは、半導体露光装置、FPD 露光装置などに代表される超精密・高精度な装置のステージ制御などにおいて、非常に高度かつ精緻な制御技術を長年培ってきている。C3 eMotion は、上位コントローラーから EtherCAT® 通信を介して位置指令、速度指令、トルク指令を与えることでモーター制御を行っているが、そこにニコンで蓄積された制御技術を応用して C3 eMotion に適した独自制御を搭載した。

独自制御である高精度位置決め制御の特徴は、前節の C3 eMotion に最適設計された「ダブルエンコーダ構造」に示すように、モーター駆動軸の位置を検出するアブソリュートエンコーダ (減速機の入力軸側エンコーダ) と、減速機出力である C3 eMotion 出力軸の位置を検出するアブソリュートエンコーダ (減速機の出力軸側エンコーダ) の 2 つの位置情報を動作条件に応じて適切にミックスさせる制御アルゴリズムを採用している (Fig. 6)。

このニコン独自のミックス制御によってフルクローズド制御とセミクローズド制御のそれぞれの利点を両立させる事が可能となり、位置決め精度の向上に繋げることが出来る。フルクローズド制御では減速機の出力軸側エンコーダで読み取った回転情報をフィードバックすることにより、減速機の角度伝達誤差や、ロボット自身のアーム重量や姿勢変化による負荷変動の影響で発生する減速機のねじれなど、減速機起因の誤差要因を排除することが可能である。一方、中高速域では出力軸側の回転情報は位相が遅れているため安定性を低下させてしまう原因になる。そこで、入力軸側の回転情報をミックスしてフィードバックすることにより、位置決め精度の向上と安定性を両立した独自制御を採用する。

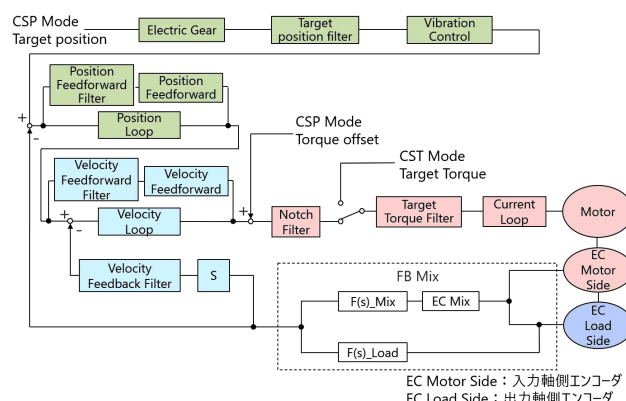


Fig. 6 制御ブロック図

*1 Tool center point の略. エンドエフェクターを制御する際の中心点。

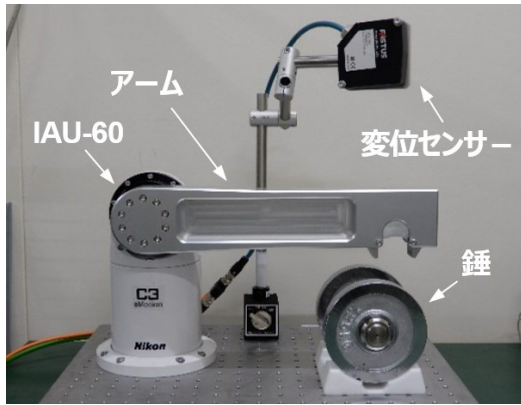


Fig. 7 位置決め性能検証装置

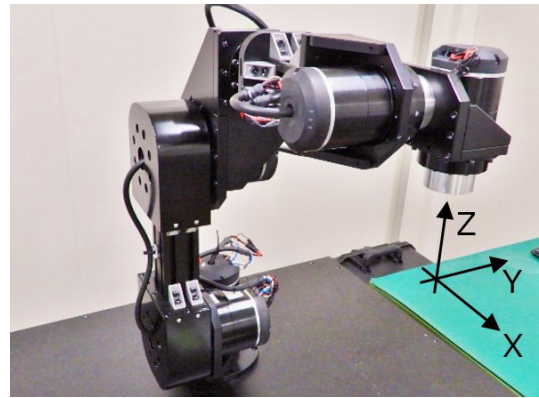


Fig. 9 精度評価用 5 kg 可搬ロボット

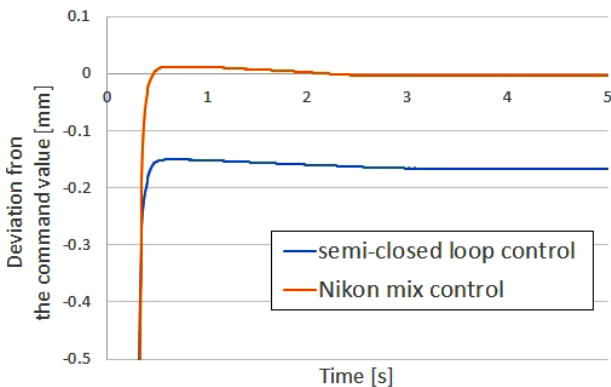


Fig. 8 各制御ループによる位置決め実験結果

5 高精度位置決め

Fig. 7 に C3 eMotion の位置決め性能検証装置を示す。IAU-60 にアームを取り付け、セミクロード制御とミックス制御にてそれぞれ錘を持ち上げる動作を行い、その際のアーム先端の位置を比較した。なお、アーム長 (IAU-60 と錘の中心間距離) は 300 mm、錘の質量は 3 kg である。比較結果のグラフを Fig. 8 に示す。出力軸側エンコーダを使用しないセミクロード制御による動作では、減速機の伝達誤差や荷重によるたわみの影響で位置指令値に対して 0.16 mm 以上の偏差が確認できる。一方、ダブルエンコーダ構造によるミックス制御の場合は、減速機のねじれや角度伝達誤差などの精度悪化要因がキャンセルされ、位置指令値に対して 0.01 mm 以下の偏差となり、セミクロード制御の場合と比較して、荷重条件下においても高い位置決め性能を発揮している。

C3 eMotion をロボットの関節として使用する場合、ロボット先端では、軸数分の減速機ねじれや角度伝達誤差が累積する。出力軸の情報を用いたミックス制御を採用する事でこれらの誤差の累積をキャンセルし、ロボット先端における位置決め精度についても向上が期待できる。C3 eMotion を用いた 5 kg 可搬のロボット (Fig. 9) を用い、ロボット先端に質量 0.5 kg と 5 kg の錘を取り付けた場合のセミクロード制御とミックス制御での繰り返し位置決

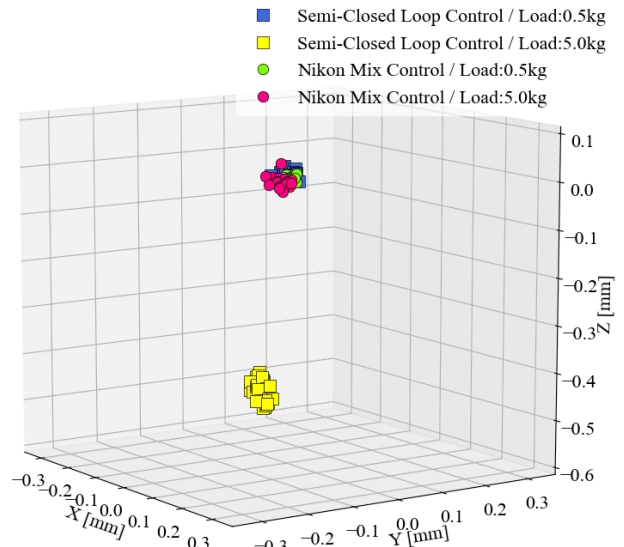


Fig. 10 ロボットでの位置決め評価結果

め性能を評価した (Fig. 10)。なお、このロボットのリーチは 830 mm であり、最大リーチの状態で評価した。セミクロード制御の場合、荷重によって減速機のねじれによる位置変化が発生している。一方、ミックス制御においては、荷重条件が変化した場合でも、安定して位置決めできていることがわかる。

この結果から、C3 eMotion に対して長さや質量の違うアームを構成した場合や、ワーク・エンドエフェクターなどの先端部の質量が変化するロボットアプリケーションにおいても、位置決め精度の劣化を最小限に抑えることができるものと期待できる。

6 トルク検出機能

前述の通り、減速機をねじり弾性体とみなしたダブルエンコーダ構造ではねじれ量とトルクの間を予め計測し換算しておくことでトルクの検出が可能となる。しかしながら、入力軸・出力軸のそれぞれのエンコーダにはエンコーダディスクの偏心などによる誤差が存在し、減速機にも角度伝達誤差が存在する。そのため、2つのエンコーダの出

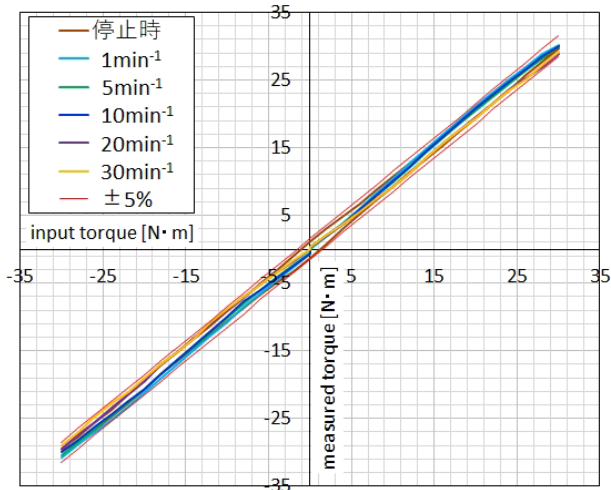


Fig. 11 回転数ごとのトルク検出値 (IAU-60)

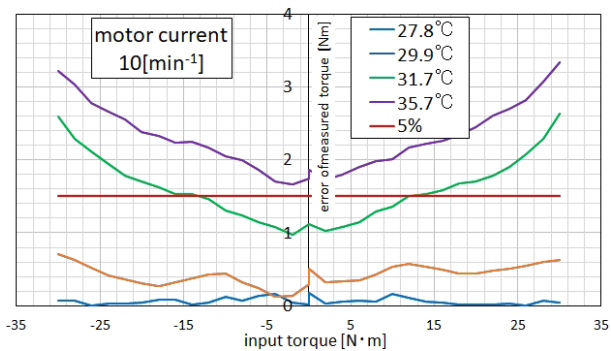


Fig. 12 温度トルク誤差特性 (モーター電流検出)

力値をそのまま比較しても正確なトルク検出はできない。C3 eMotionでは、出力軸側のエンコーダを外部の基準器によって ± 15 arc-sec以下の精度に補正している。さらに、補正された出力軸側のエンコーダ出力値と、入力軸側エンコーダ出力値を比較して得られる角度誤差値を含む角度補正値を予め記憶しておき、減速機によって生じる角度伝達誤差も補正している。これにより、エンコーダシステム全体の誤差低減を実現し、トルク検出精度を向上させている。

外部からの入力トルクに対するトルク検出値の代表例をFig.11に示す。波動歯車のねじれ特性は非線形であるため、トルク換算に用いるばね定数は近似曲線によって換算している。この例においては、出力軸回転数に依らずトルク検出値が安定してしており、トルク検出値の誤差は $\pm 5\%$ の範囲に収まっている。

一般的なサーボモーターシステムでは、モーター電流値をトルク換算することでトルクを検出している。IAU-60におけるモーター電流値換算でのトルク検出誤差の温度特性例をFig.12に示す。なお、データ取得時の回転数は 10 min^{-1} である。モーターの巻線やモーター駆動回路素子の抵抗、機構部のグリス・潤滑油の粘度などには温度依存性があることから、温度によってモーター電流値は変動する。

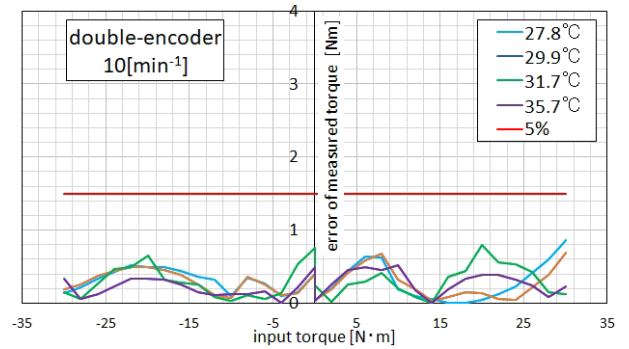


Fig. 13 温度トルク誤差特性 (ダブルエンコーダ)

そのため、正確にトルクを検知する為には温度による補正など、複雑な処理が必要となる。ダブルエンコーダ構造では、温度依存性の少ない減速機のねじれ量をエンコーダによって直接測定することから、温度に依存しない安定したトルク検出が可能となっている (Fig. 13)。

7 まとめ

C3 eMotionでは、ニコン独自の制御技術の内蔵したモータードライバーを含む各種コンポーネントをパッケージ化し、EtherCAT®によるデジチェーン接続する事で多軸接続を容易にした。また、ダブルエンコーダ構造と独自制御技術によって、高精度位置決めとトルク検出機能を実現した。C3 eMotionはこれらの技術により、これまでロボット専門メーカーでなければ実現できなかった多関節ロボットを、自由な発想で構成する事を可能にした。C3 eMotionは今後も多様なニーズにこたえるためにラインナップの拡充を図り、代表的なロボット構成に対応した専用の上位コントローラーなどの周辺機器も取り揃えていく予定である。また、更なる高精度化・高機能化を進めていく事で、ロボット技術の発展と進化に貢献していきたいと考える。

引用文献

- [1] 日本経済再生本部, “ロボット新戦略,” 首相官邸, 2015.
- [2] 株式会社ニコン, “インテリジェントアクチュエータユニットカタログ,” 24 11 2020. <https://digital-sol.nikon.com/assets/pdf/intelligent-actuator-unit.pdf>.
- [3] EtherCAT Technology Group, “EtherCAT Technology Group website,” <https://www.ethercat.org/default.htm>.
- [4] 山本純文, 岩崎誠, 沖津良史, 佐々木浩三, 矢島敏男, “波動歯車装置の角度伝達誤差に対するモデル化と補償 (第1報),” 精密工学会誌, vol. 76, no. 10, pp. 1206-1211, 2010.
- [5] 藤森潤, 家中良太, 堀内悠平, 久保田哲也, 高木登, 山和之, 脇坂明文, 川端純一, “精密加工ロボットシステム,” 川崎重工技報, no. 172, pp. 44-47, 2012.

渡邊昭宏 Akihiro WATANABE
デジタルソリューションズ事業部 開発・技術部
Development Department
Digital Solutions Business Unit

高橋喜二 Yoshiji TAKAHASHI
デジタルソリューションズ事業部 開発・技術部
Development Department
Digital Solutions Business Unit

湯本一樹 Kazuki YUMOTO
デジタルソリューションズ事業部 開発・技術部
Development Department
Digital Solutions Business Unit

引地哲也 Tetsuya HIKICHI
デジタルソリューションズ事業部 開発・技術部
Development Department
Digital Solutions Business Unit



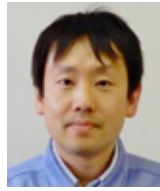
渡邊昭宏
Akihiro WATANABE



高橋喜二
Yoshiji TAKAHASHI



湯本一樹
Kazuki YUMOTO



引地哲也
Tetsuya HIKICHI