

解 説

高速ビジョンに基づく動的補償および産業用ロボットへの応用

Dynamic Compensation based on High-speed Vision and its Application to Industrial Robots

黄 守 仁^{*1} 山 川 雄 司^{*1} 妹 尾 拓^{*1} ベリストロム ニクラス^{*2}

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科 ^{*2}株式会社自律制御システム研究所

Shouren Huang^{*1}, Yuji Yamakawa^{*1}, Taku Senoo^{*1} and Niklas Bergström^{*2}

^{*1}Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo ^{*2}Autonomous Control Systems Laboratory Ltd.

1. は じ め に

産業用ロボットの高速高精度制御の性能は、製造プロセスの生産性や質に直結し、さらなる性能向上が望まれている。一方で、大量生産の時代から多品種少量生産の時代に移行していくなかで発展してきたフレキシブル生産ライン (flexible manufacturing system, FMS) を構築するためには、ランダム性や動的な変化を有する対象・環境にいち早く適応する能力も産業用ロボットの重要な機能である。

従来の産業用ロボットは基本的にモデルベースで制御が実現されており、高速性や位置決め精度は動力学モデルや運動学モデルの正確さに依存している。例えば、ロボットの関節の弾性項を動力学モデルに含めていないと高速動作時にロボットの機構が振動し、高速高精度な位置決めが不可能になる。また、温度変化による運動学パラメータの変動は絶対位置決め精度を悪化させる。これらに対して、ロボットの動力学挙動を考慮したダイナミクス補償制御 [1] やモデル規範適応制御 [2] 等の様々な手法が提案されているものの、煩雑な計算、計算量拡大によるサンプリングレートの低下やモデル化誤差に起因する安定性の欠如などにより、実用に耐えうる高速高精度制御は実現されていないようである。また、主流である教示・再生による軌道生成手法は、あらかじめ産業用ロボットに目標となる位置・姿勢をティーチングする方式で、作業工程は煩雑であり、かつ時間を要し、加えて教示誤差や工具およびワークの変形・位置変動などの不確定要素に対する自律性とロバスト性に欠けている。力センサやビジョンセンサなどを用いたリアルタイムフィードバック制御手法は外部からの不確定な変動に対応することができるが、これらの手法においてロボット自身の不確定性に対するロバスト性は考慮されていない。また、ロボットの高速動作時におけるダイナミクスの不確

定性が存在するため、高精度制御を実現するために、低い作業速度という制約があり、現実的な手法とは言い難いようである。ロボット自身による不確定性 (モデル誤差や機械的なバックラッシュなど) と作業環境による不確定性 (キャリブレーション誤差やワークの位置ずれなど) が存在する条件下で、高速かつ高精度な位置決め制御の実現は産業用ロボットのさらなる応用にとって解決すべき重要な課題である。

上述した問題を解決するために、筆者らは高速ビジョンと高速補償機構で構成されたロボット補償モジュールを開発し、産業用ロボットの手先に搭載することで、様々な不確定要素を高速ビジュアルフィードバックに基づいてダイレクトに補償するといった動的補償手法を提案している。本解説論文では、補償モジュールを搭載した産業用ロボット (動的補償ロボット) の構築例を示し、動的補償ロボットを用いたタスク実現例として、組み立て作業を対象としたペグ・アンド・ホールアライメントと、溶接や塗布などの作業を対象とした軌道トレーシングを中心に解説する。

2. 動的補償手法 [3] [4]

本章では、システムおよび外部環境からの不確定性が存在しながら、高速度と高精度の両立を実現するための、coarse-to-fine 戦略に基づく動的補償 (Dynamic Compensation) 手法を説明する。動的補償の方針として、高速高精度の位置決めの実現を二つのサブタスクに分解し、並列で実行させる。

- (1) 1 台の汎用の産業用ロボットが大範囲で大まかな位置決めを行う。
- (2) 高速高精度の補償モジュール (高速補償機構および高速ビジョン) を産業用ロボットに搭載することにより、ローカルな高速ビジュアルフィードバックにより、様々な不確定性に対する補償を行う。

2.1 簡易モデルによる解析 [5]

本節では、動的補償手法の大域的漸近安定性について簡易モデルを用いて解析する。図 1 に示すように、ロボットの手先を目標位置 A (動かないと仮定) に向けて高速位置決めする制御問題を考える。補償モジュールをロボットの

原稿受付 2017 年 7 月 3 日

キーワード: High-speed Vision, Dynamic Compensation, High-speed Robot, Visual Feedback, Uncertainty

^{*1}〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

^{*2}〒261-7132 千葉市美浜区中瀬 2-6-1

^{*1}Bunkyo-ku, Tokyo

^{*2}Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba

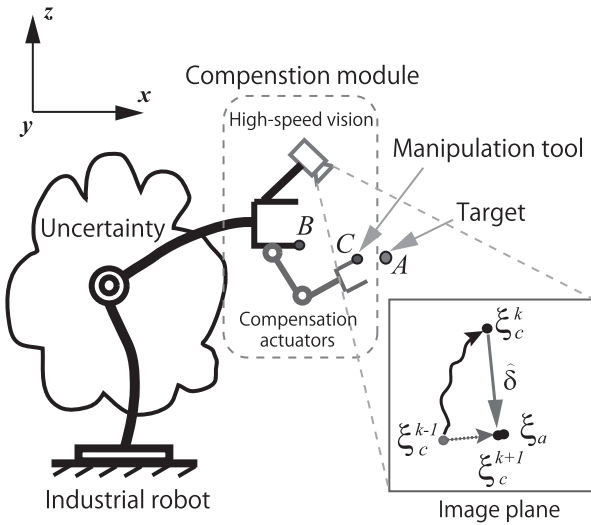


図1 Concept of dynamic compensation approach

手先に搭載することにより、手先位置が変わるが、本解析ではロボットツールポイント B とツールポイント C の初期位置は同じと仮定する。 A と C のそれぞれの位置を高速ビジョンの画像座標系において ξ_a と ξ_c と定義すると、画像内の位置誤差 e および速度誤差 \dot{e} は次式で記述できる。

$$e = \xi_c - \xi_a \quad (1)$$

$$\dot{e} = \dot{\xi}_c \quad (2)$$

ツールポイント C の速度 ($\dot{\xi}_c$) をメインロボットと補償モジュールを用いて次式で制御する。

$$\dot{\xi}_c = J_m \dot{\theta}_m + J_c \dot{\theta}_c, \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\theta}_m$, $\dot{\theta}_c$ はメインロボットと補償モジュールそれぞれの関節速度ベクトル、 J_m と J_c はそれぞれのヤコビアン行列（関節空間から画像特徴量までの変換）を示している。ここで、補償モジュールに制御は加えないことにする ($\dot{\theta}_c = 0$) と、理想的には次式のようなフィードバック制御系を構成すれば、現在位置 ξ_c^{k-1} から目標位置 ξ_a までの指数関数的な収束性が確保される。

$$\dot{\theta}_m = -\omega J_m^+ e, \quad (4)$$

ここで、 ω は収束速度にかかわる係数、 J_m^+ は J_m の擬似逆行列を示している。しかし、現実問題として、任意のロボットに対して、正確に J_m^+ を得ることが困難である。また、モデリングやキャリブレーションに伴う誤差も生じるため、それらを含めた不確定部分を総じて ΔJ_m^+ として表記する。したがって、式 (3) (4) は

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_c &= -\omega J_m \cdot (J_m^+ + \Delta J_m^+) e \\ \dot{e} &= -\omega e - \delta \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで、 δ は画像空間で反映されたそれぞれ不確定要素の総計である。この不確定要素により、 ξ_c^{k-1} は目標位置 ξ_a に到達せず、 ξ_c^k への位置決め制御となる（図1内のImage plane）。

次に、補償モジュールの制御を追加し、入力として $J_c \dot{\theta}_c = \hat{\delta}$ を与える場合を考える。ここで、 $\hat{\delta}$ は δ の画像内の相対誤差に相当する推定値である。補償モジュールを加えた制御システムは、

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\omega e + \hat{\delta} - \delta \\ &= -\omega e - \tilde{\delta} \end{aligned} \quad (6)$$

と書き換えられる。ここで、 $\tilde{\delta} = \delta - \hat{\delta}$ である。

$\hat{\delta}$ の適切な更新則を得るために、次式のリアプノフ関数を考える。

$$V(e, \delta) = e^T P e + \tilde{\delta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\delta} \geq 0 \quad (7)$$

ここで、 P と Γ は正定値対称行列である。補償モジュールは 1,000 [Hz] の高速ビジュアルフィードバックにより制御されるため、1 [ms] の短い制御周期の間には δ を定数項として近似でき、 $\dot{\tilde{\delta}} = -\hat{\delta}$ とおける。したがって、リアプノフ関数 V の時間微分は、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} - 2\tilde{\delta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\delta}} \\ &= -2\omega e^T P e - 2\tilde{\delta}^T \Gamma^{-1} (\Gamma P e + \hat{\delta}) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。 $\dot{V} = -2\omega e^T P e \leq 0$ を成立させるための条件として、 $\hat{\delta}$ の更新則は、

$$\dot{\hat{\delta}} = -\Gamma P e \quad (9)$$

と導出できる。

以上の解析により、メインロボットにおける不確実性が存在するにもかかわらず、動的補償手法を用いることによりシステムの大域的漸近安定性が保証されることが分かる。本解析は運動学だけで行っており、動力学は考慮していない。しかし、補償モジュールはメインロボットより十分広い帯域幅を有するという条件下では、依然として合理的な解析結果であると考えられる。また、目標位置は動かない ($\xi_a = \text{const.}$) という仮定での解析だが、1,000 [fps] の高速ビジョンによる観測下では、 ξ_a の低周波変動は無視できるほど十分小さいため、同じ解析を適用できると考えられる。

2.2 既存産業用ロボットとのインテグレーション

補償モジュール（高速補償機構および高速ビジョン）を産業用ロボットに搭載することにより、既存の産業用ロボットと簡単にインテグレーションできるのも提案手法のメリットである。既存の産業用ロボットは、安全性や知的財産面から制御ループにかかわるパラメータやアルゴリズムはブ

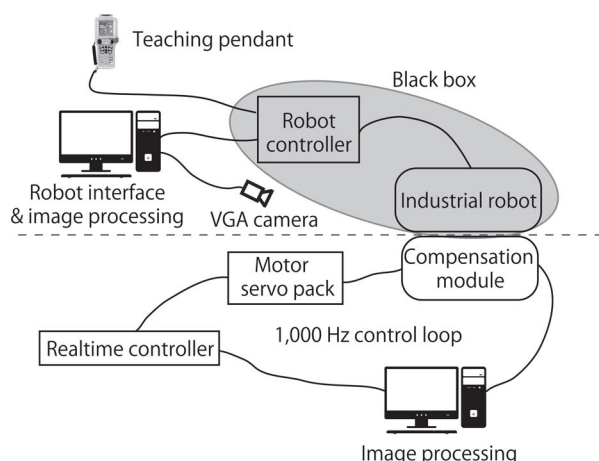


図2 Separated control scheme of dynamic compensation robot

ラックボックス化されており、ユーザとしては各メーカーから提供されたインタフェースを用いて単純な軌道計画のみが可能で、外部センサ情報をロボットの内部制御ループに組み込むことは難しい。この観点から、産業用ロボットと補償モジュールの制御ループを分離した動的補償手法が適切であると考えられる。図2に示すように、ブラックボックスであった産業用ロボットを変更せず、補償モジュールによる動的補償に必要な高速ビジュアルフィードバック制御を産業用ロボットと独立した形で構築するのが好ましい。

動的補償手法において、産業用ロボットは高速かつ粗い位置決め役を果たしており、軌道計画は従来の教示・再生手法で行えばよい。操作対象に対する想定誤差をカバーできるくらい（補償モジュールの動作範囲内に収まる）の粗い教示だけですむため、複雑形状の対象軌道に対しても教示点数を大幅に減少することが可能であり、教示作業も大幅に軽減できる。さらに、人間による教示の代わりに、グローバルな視覚情報（図2内のVGA camera）を用いて対象位置や対象軌道に沿う粗い位置決め自動軌道生成手法も考えられる。従来の産業用ロボット自体を外部センサでリアルタイムフィードバック制御するより、本手法のほうが実現しやすく、精度と安定性も高く、より現実的な手法と考えられる。

3. 応 用 例

一つめの応用例として、1台の平行リンクロボットを用いて、位置情報は未知の複数の対象ホールに対して高速な粗い位置決めをさせながら、搭載した補償モジュールが細かい誤差に対する補償を行い、高速かつ高精度な位置決めを実現する。もう一つの応用例としては、外乱下で任意の平面軌道対象に対する高速高精度トレーシングを実現する。これらの技術を実現することにより、標準化した補償モジュールを任意のロボットに搭載することで、既存の

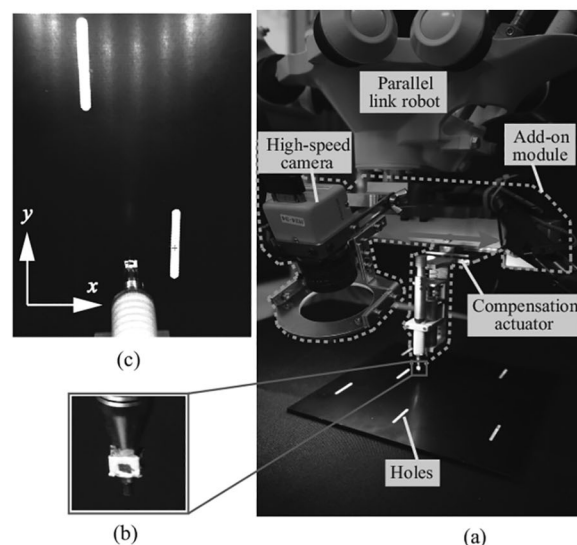


図3 Experiment system for peg and hole alignment

表1 Specification of compensation mechanism

可動範囲	最大速度	最大加速度	質量
100 [mm]	1.6 [m/s]	200 [m/s ²]	0.86 [kg]

ロボットを活用しつつ、作業速度と精度を大幅に向上させることが期待できる。

3.1 ペグ・アンド・ホールアライメント [5]

実験システムは、平行リンクロボットと高速高精度の補償モジュールから構成されており（図3(a)）、開発した補償モジュールは、1台の小型高速カメラ（解像度：512×512ピクセル、分解能：1ピクセル当たり約0.14[mm]）と1自由度の高速リニアアクチュエータ（表1）で構成されている。補償機構は1自由度（ x 方向）であるため、ワーク上の対象のホールは補償できない方向（ y 方向）に長くしている（図3(c)）。図3(b)に示すマーカで画像上のペグの位置を検出しており、ペグの位置から最短の対象ホールの中心位置も画像処理で検出している（図3(c)）。グローバルカメラを用いて各対象ホールを画像上で検出し、事前に行った粗いキャリブレーションにより三次元空間での軌道計画を行う。タスクを実行するには、平行リンクロボットを2,000[mm/s]の指令速度で計画された軌道（六つのホールに沿う粗い位置決め）に沿って移動しながら、補償モジュールは高速カメラのローカルの画像情報（1,000[fps]）から得られたペグとホールの中心位置の誤差を用いて高速リニアアクチュエータを制御する。1回の試行ごとに、ワークの位置を変更し、外部からの不確定性のシミュレーションを行う。ペグの直径は1[mm]で、ホールの内径は2[mm]であるため、ペグ・イン・ホールのクリアランスは±0.5[mm]である。

実験結果[5]から見ると、2,000[mm/s]の指令速度でパ

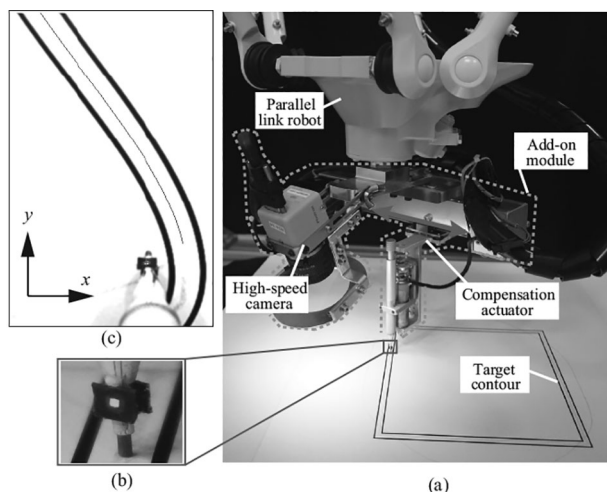


図4 Experiment system for contour tracing

ラレルリンクロボットが大まかな位置決めを行うとともに、搭載された高速高精度ロボットモジュールでロボット自身による不確実性と外部からの不確実な変動を補償しつつ、多くの場合において0.3秒以内に0.14[mm]の精度で位置決めを実現している。10回の連続実験（60回のペグ・イン・ホール）のうち、挿入に失敗したのは2回だけで、成功率は96%であった。実験の様子は、我々の研究室のウェブサイト[7]で見ることができる。

3.2 軌道トレーシング[6]

軌道トレーシングを、上述ペグ・アンド・ホールアライメントタスクと同じ実験システムを用いて行った。目標とする対象軌道（図4）はA3の紙の上に印刷されており、高速リニアアクチュエータの先に固定されたペンによって、実際の軌道を描画している。提案手法の有効性を示すために、滑らかな曲線軌道と長方形軌道の二つの典型的な平面輪郭形状を対象とした軌道トレーシング実験を行った。平行リンクロボットの粗い位置決め軌道を生成するには、グローバルカメラを用いて対象軌道に対してキーポイントを画像上で検出し、粗いキャリブレーションの下で三次元空間での軌道計画を行う。タスクを実行するには、平行リンクロボットを300[mm/s]の指令速度でキーポイントを順番に滑らかな軌道でなぞる。また、両対象軌道に対する実験のとき、外乱をシミュレーションするために、紙を乗せた台を常に手でランダムに揺らしている。

図5と図6は実際に二つの対象軌道に対するトレーシング結果を示している。また、図7と図8はそれぞれのトレーシングプロファイルを表している。これらの結果を見て分かるように、滑らかな曲線軌道トレーシングに対する平均二乗誤差は約0.24[mm]で、最大誤差は約0.58[mm]であることが確認できた。また、長方形軌道に対しては、平均二乗誤差は約0.32[mm]であったが、最大誤差は1.31[mm]

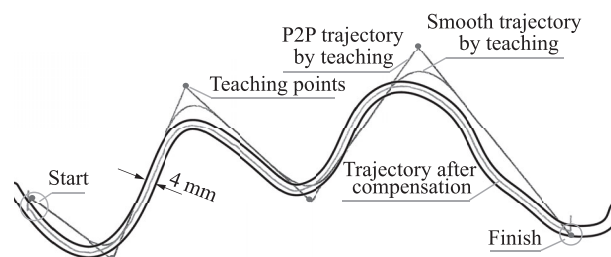


図5 Smooth-curvature trajectory tracking result

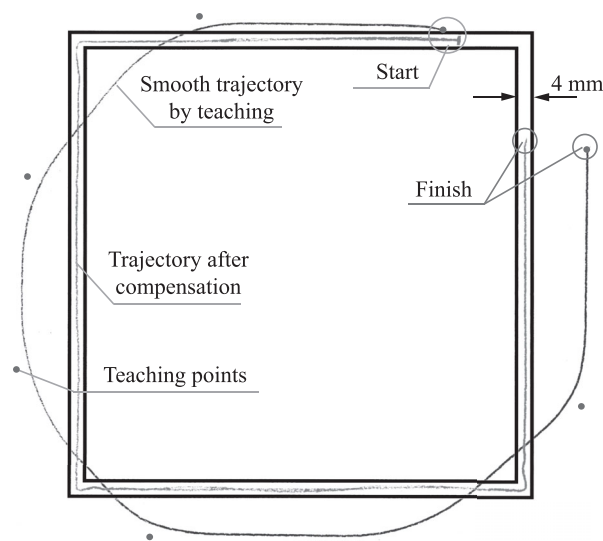


図6 Rectangular trajectory tracking result

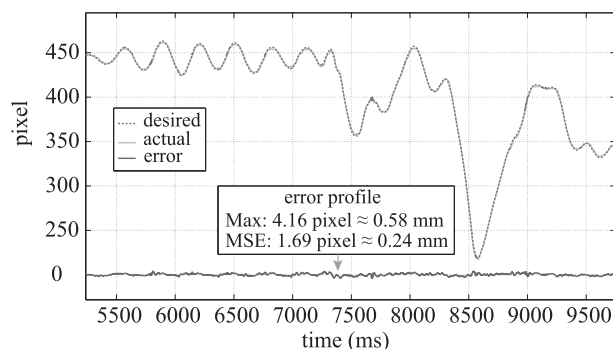


図7 Tracking profiles for smooth-curvature trajectory

であることも確認された。この最大誤差は長方形軌道の角で発生しており、角でターゲットの画像特徴量（対象軌道の中心位置）が急変するため、単純なフィードバック制御ではオーバーシュートが避けられないことが原因として考えられる。文献[8]で述べたフィードフォワード制御を導入することによって、より精度の高いトレーシングが実現できると考えられる。実験の様子は、我々の研究室のウェブサイトで見ることができる[9]。

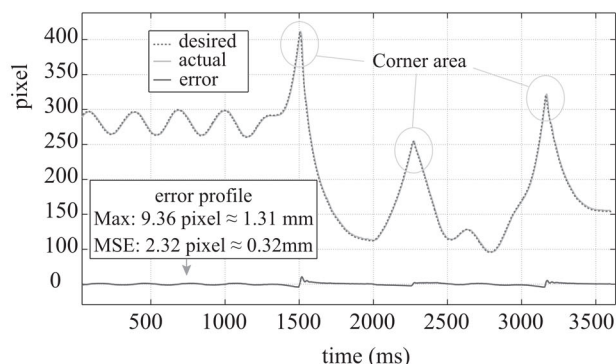


図8 Tracking profiles for rectangular trajectory

4. ま と め

本解説論文では、高速ビジョンの産業用ロボットへの応用として、ロボット自身による不確定性（モデル誤差や機械的なバックラッシュなど）と作業環境による不確定性（校正誤差やワークの位置ずれなど）を補償し、高速かつ高精度なマニピュレーションを実現するための動的補償ロボットシステムを紹介した。

従来の産業用ロボットに対する煩雑な教示・再生やフィードバック制御による軌道生成とは異なり、産業用ロボットによるグローバルな粗い位置決めと補償モジュール（高速補償機構と高速ビジョンで構成される）によるローカルな補償動作を並行した coarse-to-fine の戦略で動的環境での高速高精度マニピュレーションを実現してきた。高速ビジョンと高速アクチュエータを統合した補償モジュールでは、高時間分解能の画像データから有意な情報をミリ秒オーダーで抽出し、リアルタイムでフィードバックすることにより、早い反応・運動速度の達成だけでなく、様々な不確定要

素も直接観測できる点で、従来の予測や学習などフィードフォワードによる軌道生成手法よりロバストであり、現実的な手法であると考えられる。

このように、高速ビジョンと高速アクチュエータから構成される標準化した補償モジュールを任意のロボットに搭載することで、既存のロボットを活用しつつ、作業速度と精度を大幅に向上させることが期待される。

参 考 文 献

- [1] W. Verdonck and J. Swevers: "Improving the Dynamic Accuracy of Industrial Robots by Trajectory Pre-Compensation," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.3423-3428, 2002.
- [2] C.C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura and S. Arimoto: "Approximate Jacobian Control for Robots with Uncertain Kinematics and Dynamics," IEEE Trans. Robot. Autom. vol.19, no.4, pp.692-702, 2003.
- [3] S. Huang, Y. Yamakawa, T. Senoo and M. Ishikawa: "Dynamic Compensation by Fusing a High-speed Actuator and High-speed Visual Feedback with Its Application to Fast Peg-and-Hole Alignment," Advanced Robotics, vol.28, no.9, pp.613-624, 2014.
- [4] 石川正俊, 山川雄司, 妹尾拓, 黄守仁: "Dynamic Compensation の提案とその応用", 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.302-303, 2015.
- [5] S. Huang, N. Bergström, Y. Yamakawa, T. Senoo and M. Ishikawa: "Applying High-Speed Vision Sensing to an Industrial Robot for High-Performance Position Regulation under Uncertainties," Sensors, vol.16, no.8:1195, pp.1-15, 2016.
- [6] S. Huang, N. Bergström, Y. Yamakawa, T. Senoo and M. Ishikawa: "High-Performance Robotic Contour Tracking based on the Dynamic Compensation," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.3886-3893, 2016.
- [7] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/pih/index-j.html>
- [8] J. Baeten and J. De Schutter: "Hybrid Vision/Force Control at Corners in Planar Robotic-Contour Following," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.7, no.2, pp.143-151, 2002.
- [9] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/dctracking/index-j.html>



黄 守仁 (Shouren Huang)

2006 年華中農業大学機械工学科卒業。同年華中科技大学コンピュータサイエンス学科を第二専攻として学士学位を取得。2009 年北京航空航天大学大学院ロボット研究所修士課程修了。2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻博士後期課程修了。同年同専攻特任研究員となり現在に至る。高速画像処理, Dynamic Compensation による高速知能ロボットシステムとそのマニピュレーションに関する研究に従事。博士 (情報理工学)。

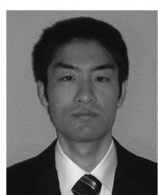
(日本ロボット学会正会員)



山川雄司 (Yuji Yamakawa)

2006 年東京大学工学部機械工学科卒業。2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2008~2011 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2011 年同専攻博士課程修了。同年同研究科創造情報学専攻特任助教。2014 年同研究科システム情報学専攻助教。柔軟物体の高速マニピュレーション, 空調制御システムの解析・制御, 電動車いす入力装置の開発と制御, 高速高精度質量計測システムの開発などの研究に従事。博士 (情報理工学)。

(日本ロボット学会正会員)



妹尾 拓 (Taku Senoo)

2003 年早稲田大学理工学部応用物理学卒業。2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2008 年同専攻博士課程修了。2005~2008 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。現在同研究科システム情報学専攻助教。ダイナミックマニピュレーション, 高速センサフィードバック制御, 脚ロボットの研究に従事。博士 (情報理工学)。

(日本ロボット学会正会員)



ベリストロム ニクラス (Niklas Bergström)

2008 年スウェーデン王立工科大学コンピュータサイエンス修士課程修了。2012 年同大学同専攻博士課程修了。2012~2014 東京大学大学院情報理工学系研究科外国人特別研究員 (日本学術振興会)。2015 年東京大学大学院情報理工学系創造情報学専攻特任助教。高速画像処理, オブジェクトトラッキング, UAV, 並列プログラミングなどの研究に従事。博士。