

「記号過程を内包した動的適応システム設計論の新展開」特集号

解 説

組立ロボットへの作業教示の記号過程

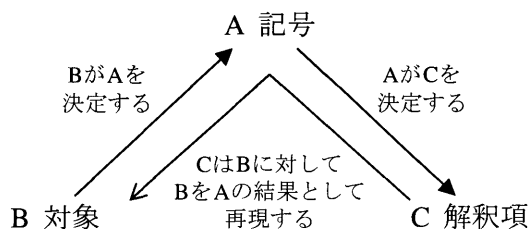
堀口由貴男*・水山 元*

1. はじめに

品種と量の両面で市場ニーズの変化に迅速に対応する変種変量生産のための生産方式としてセル生産が注目を集めているが、生産効率の向上や確保が難しくなるであろう技能工の代替を指向して、セル生産システムのロボット化が検討されている[1,2]。しかし、産業用ロボットの活用範囲をセル生産のような多様で複雑な組立作業にまで広げるには、ロボットの巧緻性や自律性の向上に加え、頻繁に発生する段取り変更などにかかる非生産時間の短縮が課題となる[3]。そして、非生産時間の主要部分を占めるのがロボットへの作業教示である。

教示作業では、ロボットの作業要素を人が現物に合わせて一つ一つロボットに教えている。ロボットの作業が複雑になればなるほど、教えるべきデータ点数が増え、プレイバック時に発生し得る状況変化も多様になるため、教示作業の手間や難度、そして作業時間が増大することになる。本稿では、ロボットへの作業教示を簡単化するための著者らの取り組みとして、現物に適合する動作点の教示作業を支援するユーザインタフェース技術の開発と、位置や姿勢の不確実性を吸収し精確な動作点教示を不要にする組立動作生成技術の開発、という二つの研究開発事例を紹介する。具体的なアプローチは異なるが、ともに、人が主体となって行っている作業について、その本質を現象のモデル化を通じて理解し、作業を合理化する規範を抽出して機械に移植する試みととらえることができる。このような見立ての基礎に「記号過程」の考え方があ

る。記号論(semiotics)[4]によれば、記号(sign)とは「それ自身とは別の何かを表すもの」であり、あらゆる事物が記号となり得る。記号としての機能は、解釈者に認識される表意体(representamen)と、それが指示する対象(object)、そして記号から生み出される観念である解釈項(interpretant)という三項関係によって表される。これは、記号とその意味が解釈者の思考作用によって結びつけられ、その関係が固定的なものではないことを意味する。記号過程(semiosis)とは、そのような解釈者が関与する、記号を認識し解釈して対象を想起するプロセ



第1図 記号がもつ三項関係

スを指す。記号の意味づけが解釈者や解釈者のおかれている状況によって変化する一方で、この記号を媒介とする活動の背後には、解釈者の経験に秩序を与える事物間(記号—対象間)の因果関係がある。この関係性が、第1図に示すように、事物の記号としての働きを成立せしめている[5]。本稿では、ロボットへの作業教示に関する二つの異なる研究事例を紹介するにあたり、作業者と環境の相互作用を記号過程として解釈し、その過程の基礎にある不変項としての法則性を抽出し活用するという観点から両取り組みを整理し説明する。

2. 教示作業における記号過程の分析と作業支援インタフェースの開発

まず最初に、現物に適合する精確な動作の生成に必要な経由点の教示作業を支援するユーザインタフェース開発の取り組みについて説明する。

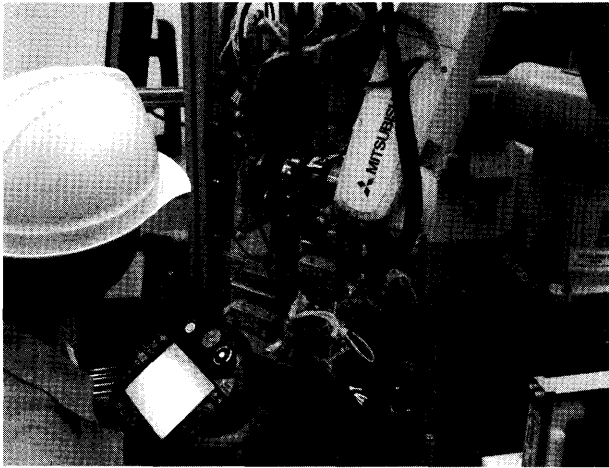
2.1 ロボットの教示作業

産業用ロボットは、動作の繰り返し精度はよいものの絶対的な位置精度があまりない。そのため、他の物体との接触をともし動作をプログラムするには、動作軌道の生成に必要な経由点(以下、動作点と表記する)を、ロボットの位置と姿勢を現物に合わせて一点一点教示する作業が必要とされる[6]。第2図に実際の教示作業の様子を示す。現在の教示作業は基本的に目視による位置誤差の判断が頼りのため、部品組付け動作のような精確な動作点の情報が要求される動作の教示ではとくに、数多くの試行錯誤をともしな

る。ロボットが固定されたワークを把持したり、把持ワークの組付けを完了する位置を「組付け点」とよぶことにする[11]。組付け点の教示は、所定の場所に据え付けられたワークを用意し、ロボットの位置と姿勢をそれに合

* 京都大学 大学院 工学研究科

Key Words: industrial robot, robot assembler, teaching, semiosis, work analysis.



第2図 ロボット教示作業の様子

わせるように調整することで実施される。この調整に必要な位置合わせ誤差の情報は、たとえばハンドを開閉させてワークの把持と解放を繰り返し、その際に発生するハンドとワークの変位の様子を通じて判断される[7]。

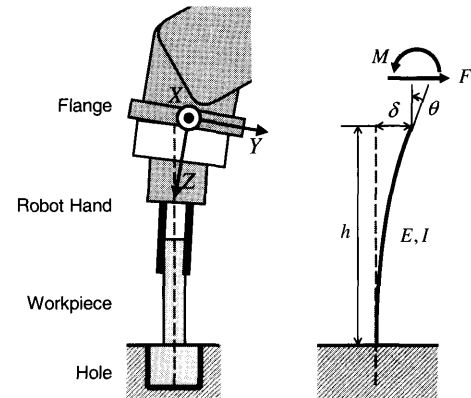
2.2 組付け点教示の記号過程分析

2.2.1 現行作業における記号解釈の構図

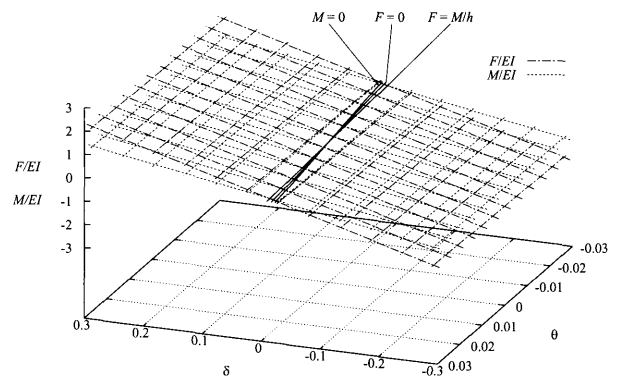
所定の場所に据え付けられたワーク現物に適合する組付け点を特定する作業における記号過程について検討する。この活動において記号といえる事物は、ハンド開閉にともない発生するハンドとワークの変位である。教示作業者はこれを手がかりとして位置合わせの善し悪しを判断している。ワークに対してハンドの位置と姿勢が精確に合わせ込まれている場合、把持状態のハンドとワークの結合体にひずみは生じない。逆にひずみが生じている場合、ハンド開閉の前後でハンドとワークの形状が変化する。そのため、ハンド開閉にともない知覚される変位を媒介として教示作業者に特定される対象とは、ハンドーワーク系に生じているひずみであり、さらに、それをもたらす位置合わせの誤差である。組付け点教示に取り組む作業者にとって彼が知覚した変位の役割は、これらの存在の表象であるという構図をそこに見ることができる。この記号過程の基礎に、系に埋め込まれている力と位置合わせ誤差を結びつける力学的関係がある。これを教示対象システムに内在し現象の意味解釈を制約する要因とみなし、モデル化を通じて詳細に分析した結果を以下で述べる。

2.2.2 教示対象システムに内在する制約構造

据え付け済みワークをハンドで把持した状態は、第3図に示すような片持ち梁としてモデル化することができる[9]。この“梁”の接地面側の端点からフランジ面を中心までの距離を h 、フランジ面中心の真値からの位置誤差を δ 、角度誤差を θ とする。このとき δ と θ は、梁のたわみ・たわみ角の公式より、自由端にかかる力 F とモーメント M によって



第3図 教示作業分析のための片持ち梁モデル



第4図 教示対象がもつ力と位置合わせ誤差の関係

$$\delta = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{3} F h^3 - \frac{1}{2} M h^2 \right) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{EI} \left(-\frac{1}{2} F h^2 + M h \right) \quad (2)$$

と表される。ここで E と I は、“梁”のヤング率と断面二次モーメントである。この2式から

$$F = 12EI \frac{\delta}{h^3} + 6EI \frac{\theta}{h^2} \quad (3)$$

$$M = 6EI \frac{\delta}{h^2} + 4EI \frac{\theta}{h} \quad (4)$$

が導かれる。(3)式は、 δ と θ と F で張られる3次元空間において原点を通る平面を表す。(4)式は、 δ - θ - M 空間において原点を通る平面を表す。そのため、 $F=0$ と $M=0$ は δ - θ 平面上で原点を通る直線となる。さらに、 $F=M/l$ (l は定数)となる状態も、(3)式と(4)式より、

$$3(2l-h)\delta + (3l-2h)\theta = 0 \quad (5)$$

という原点を通る直線を δ - θ 平面上で描く。第4図に、 $l=h$ 、 $h=1.2$ とした場合の二つの平面と三つの直線の関係を示す。

2.2.3 制約構造が示唆する探索戦略

h や E や I といった教示対象の物理的性質が未知の状況で、 δ と θ がともに0というひずみのない理想状態に確実に到達するためには、ロボットの操作によって教示

対象の状態が目標状態に近づいたことを作業者が評価できる必要がある。ハンド開閉によって発生するハンドとワークの変位のみを頼りにする現行の組付け点教示作業は、このための情報が質、量ともに不足しているために、数多くの試行錯誤を繰り返さざるを得ない。これに対して第3図のモデル化を通じて特定された力変位関係を活用すると、現在の組付け点探索の状態をうまく可視化して確実な探索を促すことができる。

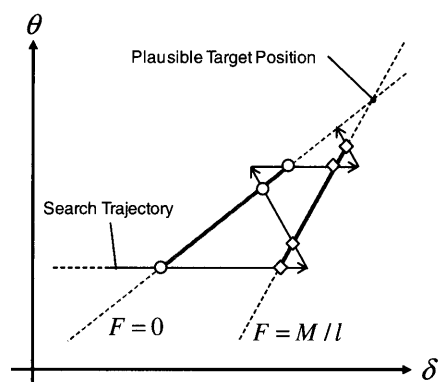
第4図に示したように、 $F=0$ 、 $M=0$ 、 $F=M/l$ という三つの直線は $(\delta, \theta)=(0,0)$ で交わるが、この関係性を利用することで組付け点の探索状態を鳥瞰することが可能である。第5図に、 $F=0$ と $F=M/l$ となる状態を手がかりとして利用する探索戦略の模式図を示す。探索軌跡の横方向への移動はハンドの並進移動（X軸またはY軸の操作）を表し、斜め方向への移動はハンドの回転（A軸またはB軸の操作）を表す。ハンドの位置と姿勢の操作中に、 $F=0$ と $F=M/l$ の条件を満足した点を残していくと、プロットされた点の並びから二つの線が描き出される。これらの仮想的な線がどこで交わるかを見ることによって、組付け点の探索が正しい方向に進んでいるのか、さらに、目標とする位置・姿勢がどの辺りに存在するのかを教示作業者は見積ることができる。

2.3 教示作業インタフェースの設計

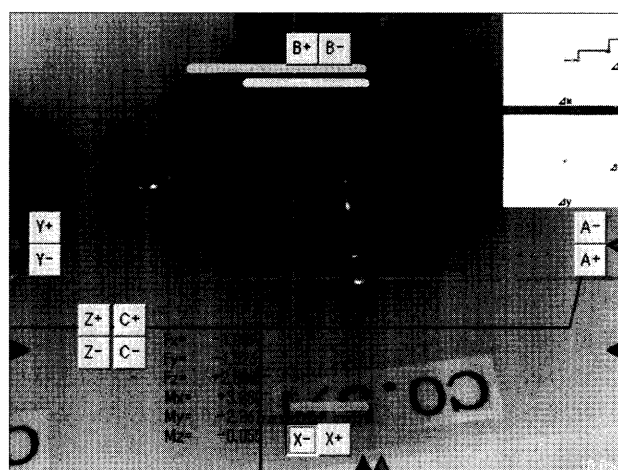
前節の分析により、“梁”の自由端にかかる力の情報をもとにプロットされた点列が組付け点の効果的な探索を促すことが明らかになった。著者らはこの知見を応用し、ロボットに対する組付け点の教示作業を支援するユーザインタフェースを開発した[9-11]。開発したインタフェースの表示画面を第6図に示す。この画面はティーチングペンダントとよばれる操作端末上にあり、ロボットの先付近を撮影したカメラ映像に重畳する形で、各種データの表示とロボットの操作ボタンが配置されている。画面右上に並ぶ二つのプロット表示部が第5図で示したものに对应する。これらにはロボットの位置と姿勢の軌跡がX-B平面とY-A平面に分けて表示され、フランジに取り付けられた6軸力センサの測定値が $F=0$ と $F=M/l$ の条件を満たしたときの状態が強調される。開発したインタフェースには、これ以外にも第5図の探索戦略を確実に実行するのに必要な情報が画面上に配置されている[11]。その結果、目視判断に頼る従来作業のパフォーマンスを大きく改善できる[8]だけでなく、力センサの測定値のみを可視化する場合に比べて探索時の誤操作を低減する効果を確認している[9]。

3. 組付け作業における記号過程の分析とロボットの適応的な組立動作生成

続いて、部品の位置や姿勢などの不確実性に対して適応的なロボットの組立動作を生成するという課題への取り組みについて、記号過程と関連づけて説明する。



第5図 探索によって描き出される2線が特定する目標状態



第6図 開発したユーザインタフェースの表示画面

3.1 人の適応的な組付け作業における記号過程

人は、たとえ視界が遮られた状況であっても、手にした部品を固定ワークの所定の位置・姿勢に容易に組み付けることができる。そのような不確実性を吸収する適応的な組立動作の本質に迫るために、人手による組付け作業を観察し、そこでの記号過程について検討した。

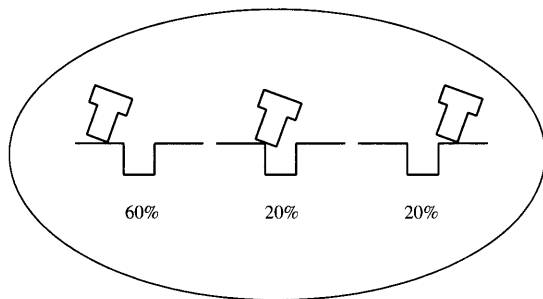
観察実験では、簡単のため、作業台の表面に固定したワークの所定の位置・姿勢に、部品を、作業台の表面を滑らせながら組み付ける、2次元の組付け作業を対象作業として用意した。作業者には、目隠しをした状態でこの作業に取り組んでもらった。目隠しをしてから作業台にアプローチするため、部品の初期位置にはかなりの不確実性がある。作業者は、部品を、そこから固定ワークに接触するまで移動させた後、接触を保ったままスライドさせる、回転させる、といった作業要素を組み合わせで対象作業を実現していった。

この組付け作業における記号とは、作業要素を実行する際に受ける力やモーメントである。作業者は、これを手がかりとして、作業要素の実行前後での部品と固定ワークの関係（接触状態）を判断している。たとえば、ある作業要素の実行中に部品と固定ワークの間の接触点（の集合）が変化すると、それによって部品の運動に対する拘束条件が変化するため、力やモーメントに不

連続な変化が生じる。また、場合によっては、当該作業要素によってそれ以上部品を動かすことが難しくなる。この際、作業要素の実行にともなって知覚される力やモーメントの変化を媒介として作業者に特定される対象とは、当該作業要素を実行することによって生じた、部品の運動に対する固定ワークからの拘束条件の変化である。ここにも、組付け点教示作業の場合と同様の記号過程の構図を読み取ることができる。この記号過程の解釈項は、現在置かれている接触状態を限定していくことに役立っている。

3.2 作業経路ツリーとその設計

以上の検討をもとに、組付け作業をモデル化してみよう。いったん、部品を固定ワークに接触させた後の組付け作業を、両者の接触を維持したままのスライド（左・右・下方向）、回転（右回転・左回転）などの作業要素を順次適用していくこととみなす。作業者は、部品と固定ワークの間の接触状態を常に一意に限定できているわけではないため、確率的に考慮される複数の接触状態をすべてまとめた集合として、第7図に示すような「概念状態」を導入する（Hsiaoら[12]は、把持作業を対象に類似の概念を導入している）。これによって、不確実性下での組付け作業は、「一連の作業要素によって概念状態を初期の状態から目的の状態まで遷移させること」と捉えることができる。



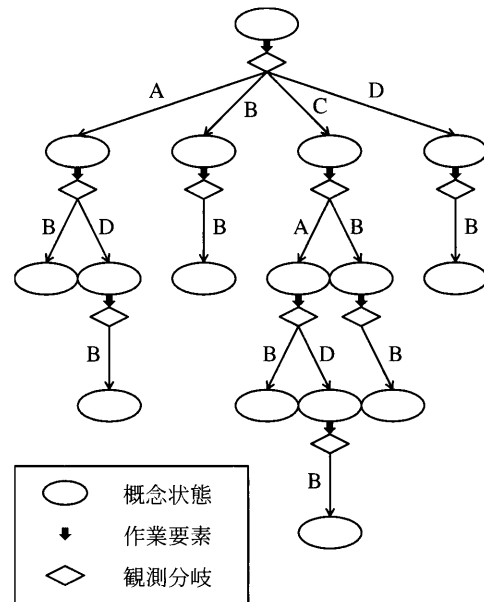
第7図 作業者の概念状態

どの作業要素を選択するかは作業者が決定できるので、この分岐を「決定分岐」とよぶことにする。また、作業要素実行の際に生起する上述の記号過程によって、作業者は事後の概念状態をいくつかに分節化できる。この分岐は、観測することしかできないので、「観測分岐」とよぶことにし、たとえば次の四つに大別する：

- A:** 部品が動いて接触状態が変化し、変化後の接触状態においても同じ作業要素で部品がさらに動く。
- B:** 部品が動いて接触状態は変化するが、変化後の接触状態では同じ作業要素で部品は動かない。
- C:** 部品は動くが、ある程度動かしても接触状態は変化しない。
- D:** 当該作業要素では部品は動かない。

観測分岐は不確実性に起因する分岐であるため、組付け作業の全体像を表現するためには、それによって生じ

得るすべての概念状態について、それぞれその先に終端（目的の概念状態）に至るまでの決定分岐の道筋が示されている必要がある。この全体像は、第8図に示すような、概念状態をそれに対して適用する作業要素に応じてツリー状に展開していった「作業経路ツリー」によって表される。



第8図 作業経路ツリー

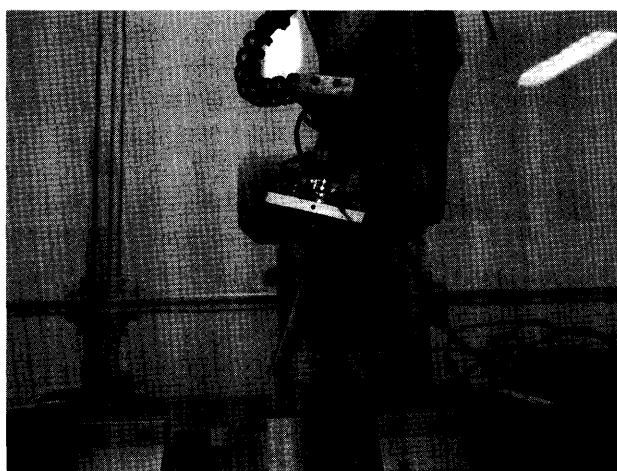
作業経路ツリーは、不確実性下での組付け作業の全体的な戦略を表しており、前述の観察実験では、それに従って実現したサンプルとしての作業経路が観察されることになる。そこで、そのようにして観察された複数の作業経路を合成し、作業経路ツリー（部分ツリー）を作成してみた。その結果、対象作業に対する習熟が進むと、作業経路ツリーが小型化・単純化されていくことが確認された[13]。続いて、決定分岐における作業要素の評価指標として、事後の観測状態の期待エントロピを考慮した指標を導入し、それをを用いた作業経路ツリーのヒューリスティックな設計法を提案した[14]。これによって、シンプルな作業経路ツリーを得ることができる。さらに、事前に設計したシンプルな作業経路ツリーを作業者に教示した場合と教示しなかった場合の比較実験を行うことによって、この教示が作業時間の平均や分散を小さくする効果をもつことを確認した[15]。

3.3 作業経路ツリーのロボットへの実装

最後に、作業経路ツリーで表された組付け作業の戦略をロボットに実装することを考える。ロボットの取り得る作業要素は、簡単のため、人手の場合と同じく、スライド（左・右・下方向）と回転（右回転・左回転）の5種類とし、まず、それらを位置制御、力制御、スティフネス制御を各軸に設定することによって実行できるようにした。続いて、任意の接触状態から各作業要素を実行した際の力覚センサのログを予備実験によって収集し、作

業要素ごとに、得られた時系列データにクラスタリングを適用することで、観測分岐先のクラスを定義した。実動作時には、簡単なクラス判別のロジックによって観測分岐を実現している。

人手の場合とは観測分岐の定義が異なるので、作業経路ツリーをそれに応じて再設計した後、それに従って実際にロボットが適応的に組付け作業を実行できるかどうかを実機によって検証した。第9図はその様子である。位置や姿勢の不確実性は、部品と固定ワークの双方にもたせている。この結果、作業経路ツリーとして教示した戦略に従うことによって、部分および固定ワークの位置や姿勢にある程度の不確実性が存在する条件下でも、ロボットがそれを吸収しながら組付け作業を達成できることを確認した[16]。



第9図 ロボットによる作業経路ツリーの実行

4. おわりに

本稿では、ロボットへの組立作業の教示を簡単化するという課題に対して、現物に適合する精確な組付け点の教示作業を支援するインタフェース開発と、不確実性下において適応的な組立動作を自動生成するためのアルゴリズム開発、という研究開発事例を紹介した。対象やアプローチの異なる二つの研究テーマを記号として、それらの記号過程としての解釈を拙いながらも試みた結果が、作業主体と環境の相互作用の基礎にある法則性の抽出と活用という共通項であった。これが未来への言及性[5]を窺える解釈項であるかについては甚だ自信がないが、人が関与する作業を読み解くうえで、わずかでもご参考になれば幸甚である。

(2010年7月26日受付)

謝 辞

本稿で紹介した研究成果の一部は、文部科学省科学研究費19GS0208(学術創成研究「記号過程を内包した動的適応システム的设计論」)、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「次世代ロボット知能

化技術開発プロジェクト」, および「自律型セル生産ロボットシステムの研究開発」に関する京都大学と三菱電機株式会社の組織連携スキームにより得られたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 田中, 野田, 奥田, 榎木, 横小路, 幸田, 堀口: 次世代のセル生産を実現するロボット知能化技術の開発; ロボット, No. 191, pp. 35-40 (2009)
- [2] A. Noda, K. Tanaka, H. Okuda, T. Nagatani, Y. Kitaaki, Y. Domae, H. Dobashi, Y. Yokokohji, K. Kurono, Y. Horiguchi, H. Nakanishi, T. Sawaragi, K. Isomura, H. Utsuno, H. Matsuhisa, S. Kazama and T. Kohda: Intelligent robot technologies for cell production system; *Proceedings of 2010 International Symposium on Flexible Automation*, JPS-2562 (2010)
- [3] 小平, 牧田: 産業用ロボットの発展経緯に見るものづくりの変遷; 第9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論文集, pp. 183-184 (2008)
- [4] C. S. パース: (内田 編訳) パース著作集2 記号学, 勁草書房 (1986)
- [5] J. ディーリー (大熊 訳): 記号学の基礎理論, 法政大学出版局 (1998)
- [6] 楠田, 八木: 図解産業用ロボット導入実践ガイド, 日刊工業新聞社 (1999)
- [7] 堀口, 黒野, 中西, 榎木, 野田: ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI の開発—タスク分析による情報要件の抽出と可視化の検討—; 第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 201-202 (2008)
- [8] 黒野, 堀口, 中西, 榎木, 野田: ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI の開発—精確な動作点教示のための力情報利用の検討—; ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集, 2A1-A14 (2009)
- [9] 黒野, 堀口, 中西, 榎木, 永谷, 野田, 田中: 産業用ロボットの組付け動作教示を支援する複合情報 GUI; 第10回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 738-741 (2009)
- [10] Y. Horiguchi, K. Kurono, H. Nakanishi, T. Sawaragi, T. Nagatani, A. Noda and K. Tanaka: Ecological interface design for teaching assembly operations to industrial robot; *Proceedings of the 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems* (2010)
- [11] 堀口, 黒野, 中西, 榎木, 永谷, 野田, 田中: 動作点探索戦略の分析に基づくロボット教示作業支援 GUI の開発; ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 2A1-F21 (2010)
- [12] K. Hsiao, L. P. Kaelbling and T. Lozano-Perez: Grasping POMDPs; *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4685-4692 (2007)
- [13] Y. Kitagawa and H. Mizuyama: Modeling and supporting the process of learning skills for a manual

assembly task; *Proceedings of the 9th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, pp. 1018–1029 (2008)

- [14] Y. Murakami and H. Mizuyama: Detailed design of a manual assembly task incorporating how to efficiently handle uncertainties; *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference* (2007)
- [15] 水山, 村上: 習熟効果の先取りを目指したマニュアル組立作業の詳細設計; 日本機械学会生産システム部門講演会 2008 講演論文集, pp. 53–54 (2008)
- [16] 坊田, 北川, 水山, 野田, 田中: 不確実性を伴う環境下でのロボット組立作業のための適応的動作戦略; 第 10 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 781–782 (2009)

著者略歴

ほりぐち ゆきお 堀口 由貴男 (正会員)



1974 年 11 月 22 日生。1999 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了, 2003 年同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻助手, 2005 年改組により機械理工学専攻助手, 2007 年同専攻助教となり, 現在に至る。その間, 2001–2003 年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。人間機械協調のためのインタラクションデザインに関する研究に従事。博士 (工学)。2010 年ヒューマンインタフェース学会論文賞受賞。計測自動制御学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE などの会員。

みづ やま はじめ 水山 元



1967 年 9 月 2 日生。1992 年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。住友金属工業 (株) 数理技術室勤務, 京都大学助手を経て, 2004 年より同講師, 現在に至る。生産システムを Goods, Service, Idea を組織的に生み出す系として広く捉え, その設計, 分析, 改善, 支援などの研究に従事。博士 (工学)。日本経営工学会, 日本設備管理学会, 精密工学会, INFORMS などの会員。