自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボット

村山 英之^{*1} 武居 直行^{*2} 松本 邦保^{*1}
 鴻巣 仁司^{*1} 藤本 英雄^{*3}

Development of a Car Window Installation Assist Robot

Hideyuki Murayama^{*1}, Naoyuki Takesue^{*2}, Kuniyasu Matsumoto^{*1},
 Hitoshi Konosu^{*1} and Hideo Fujimoto^{*3}

Traditionally, robots and humans work independently, isolated from each other for safety reasons. We developed a robot for use on the assembly line which works together with a human operator, assisting and augmenting the operator's skills. Because of its function, this robot is known as the "Car Window Installation Assist Robot" and is currently in use on the plant of Toyota Motor Corporation.

In this paper, we propose a method to estimate human intent as well as a skill assist control method. Moreover, we present technology that enables safe human-robot cooperation, high product quality, and the cycle time of only 48 seconds.

Key Words: Robot, Skill Assist, Human Intent, Window Installation

1. はじめに

工場では産業用ロボットによる自動化が進められている。一方、自動車の最終組立工程では、人手による作業が多く残っている。その組立工程の一つに、ウィンドウ搭載作業がある。この工程は従来、**Fig. 1**のように、ウィンドウガラスを左右から二人で把持し、コンベアで搬送されている車体に搭載していた。

10~15 [kg] 程度あるウィンドウガラスの重量による負担は、通常、空気圧アクチュエータやスプリングバランサにより軽減されているため問題となることは少ない。しかし、ウィンドウガラスには車体に掛けるためのストッパが固定されているため、決まった向きで隙間に挿入する必要がある。その挿入位置の要求精度は高い。また、リアウィンドウの場合 (**Fig. 1**) は、トランクが開いた状態で、車体とトランクの間をガラスがぶつからないように通す必要がある。そのため、ウィンドウ搭載作業は、人手作業の中でも技能と熟練が必要であり、習熟に時間を要す。また二人の相性が合わない場合は作業がスムーズに進まない。

最終組立工程の人手による作業の問題に対して、トヨタでは1980年代に無人の自動化を推進したが、生産効率が悪化し多く

Fig. 1 2-person car window installation

をとりやめた。その原因は次のように考えられる。

- (1) ワーク位置認識の精度と、信頼性の低さから来る製品の品質低下・設備の不具合多発。
- (2) 位置認識のため、ボディを止めるかすくい上げるなど工程が延び、大スペースが必要。
- (3) 設備が大型化・複雑化し高コスト。
- (4) 複雑な設備の保全に高度なスキルが必要。

こうした、人を排除した従来の自動化では、グローバル展開に求められる車種変更と生産能力増強への迅速でフレキシブルな対応が難しい [1]。そこで、我々が目指したあるべき姿は、「最終的な品質は人が確認し、機械が人と共存して作業を支援する『協働』化」である。

これを踏まえ、人と安全に共存できるロボットと技能支援技術を開発し、高価な認識機能は最小限にとどめて、シンプル・

原稿受付 2009 年 7 月 28 日

^{*1}トヨタ自動車株式会社

^{*2}公立大学法人首都大学東京

^{*3}国立大学法人名古屋工業大学

^{*1}Toyota Motor Corporation

^{*2}Tokyo Metropolitan University

^{*3}Nagoya Institute of Technology

■ 本論文は有用性で評価されました。

スリム化を図る。そして、ボディを搬送する従来どおりの工程において、人の技能を活かした片側一人でのウィンドウ搭載を実現することを開発の狙いとした。本稿ではこうして開発・実用化したウィンドウ搭載支援装置“ウィンドウ搭載アシスト”について報告する。以下に構成を示す。次の第2章で従来技術についてまとめ、本研究開発の課題について述べる。第3章では、人との安全な共存を実現するための基本方針および実現項目について示す。第4章において、手ぶれの影響を低減する進行方向ガイドを提案し、その効果を実験により確認するとともに量産ラインでの実作業について示す。第5章で本論文をまとめ、第6章で今後の展開について述べる。

2. 従来技術および本対象作業

本章では、従来技術について示すとともに、対象とするウィンドウ搭載作業の手順および課題・要求仕様について述べる。

2.1 従来のパワーアシスト技術

人とロボットが同じ作業領域や対象物などを共有し、協調作業を行う人間機械協調系の研究は近年盛んに行われている[1]~[16]。人の技能・判断能力や適応性が必要とされる作業において、ロボットによりパワーや精密さを付加することで、人の身体的・精神的負担を軽減したり、作業性能や製品の品質を向上したりすることができると期待されている。

例えば、移動軌道や到達目標点が既定されている場合には、車輪の操舵やCVTにより作業に適した仮想面を実現するcobot[5]やVirtual Fixtureと呼ばれる仮想的なガイドを設けることで作業を容易にすることができる[6]~[8]。本研究で対象とする作業では、組付位置はおおよそ決まっているため、組付位置近傍まではガイドできるが、最終位置は作業者の判断によって決まる。そのため、上記の手法をそのまま用いることはできない。

協調ロボットの研究の多くは、人の操作力を力覚センサで検出し、その力覚情報をもとにロボットの機械インピーダンスを制御[17][18]する手法を用いている。しかし、固定した慣性・粘性のインピーダンスでは操作者の操作感と作業性能の両立が難しいため、異方性を持たせたり可変にしたりすることで、操作性を向上する研究が行われている。例えば、車輪特性を制御により実現することで、長尺物の協調搬送を容易にする手法[9]や、複数台ロボットにおいてキャスターの機械特性を再現することで、人とロボット群がお互いの情報を通信することなく、協調動作を実現する手法[10]が提案されている。また、作業フェーズ、時間、操作力などによってインピーダンスを変化する手法[1][11]~[15]が提案されている。

その一部はすでに組立工場などで実用化されている[1][16]。その実用化されている技術の一つである、自動車のインストルメントパネルモジュール(インパネ)の搭載用スキルアシスト[1][14]では、力センサで計測した操作力に基づき、仮想インピーダンス特性(質量・粘性など)を持つように、アシスト力を発生させるインピーダンス制御を用いている。これにより、質量50[kg]超で慣性の大きいインパネを、軽く動かすことができる。また、可変インピーダンスにより、操作感と位置決め性能も向上している。

しかし、インパネ搭載の要求精度は左右 ± 5 [mm]、上下

Fig. 2 Schematic of window installation task

± 15 [mm]で、高精度位置決めを支援するガイド機能はない。また、ボディが搬送される前後方向には、止まるところまで押し込んで行けばよいので精度要求はない。これに対し、ウィンドウ搭載の場合には、接着剤があるためやり直しがきかない上に、ボディ搬送方向である前後方向は、動きながらの位置合わせが要求され、前後 ± 2 [mm]、左右 ± 4.5 [mm]と非常に厳しく、従来の技術ではその要求精度を満たすことが難しい。

2.2 ウィンドウ搭載作業

対象となるウィンドウ搭載作業(Fig. 2)は、以下のような作業手順(1)~(3)で進められる。また、それぞれの手順において要求される仕様を下に併記する。

- (1) 接着剤が付着しないように、離れた上空で車体の前後方向におけるガラスの位置を合わせる。
  - (a) コンベアで搬送されて動いている車体に搭載する。
  - (b) トランク-ボディ間の ± 15 [mm] の隙間にガラスをぶつけずに通す。
  - (c) 接着剤のウレタンを、外から見えて意匠上問題となる場所に付着させない。
- (2) 車体の前後方向の位置がずれないようにガラスを真下にまっすぐ降ろす。
  - (a) ガラスを位置決めするウィンドウストップを、決まった向きでボディ孔に挿入しなくてはならない。
  - (b) 挿入位置の要求精度が ± 2 [mm] と高精度である。
- (3) ウィンドウストップをボディ孔にはめ込む。
  - (a) 一度接着するとやり直せない。
  - (b) 最大 800 [N] 程度でガラスを押し付けて、車体に接着剤を密着させる。
  - (c) サイクルタイム 48 [s] のうち、許容作業時間 7 [s] 内に完了する。

ガラスをぶつけずに運んだり、接着剤が組付箇所以外に付着したりしないように、ガラスを組付位置近傍の上空まで誘導することは、従来技術でも可能である。しかし、短時間に最終挿入位置まで進路を修正しながら、ぶれずに挿入し、はめ込むためのアシスト技術が必要となる。

3. 人との安全な共存

本章では、前章の要求仕様を満たすアシスト技術とともに重要な、人と協働するロボットとしての安全性について述べる。

3.1 安全に共存する基本方針

リスクアセスメントに基づくリスク低減対策は法制化されている。機械に関しては、厚生労働省基発第 0731001 号「機械の包括的な安全基準に関する指針」で、すべての機械に適用できる包括的な安全確保の方策に関する基準が示されている [19] [20]。

この指針において、「適切なリスクの低減が達成されていないと判断した危険性又は有害性について、次に掲げる優先順位により、機械に係わる保護方策を検討し実施するものとする。」とされている。第 1 に、リスクを除去、低減する「本質的安全設計方策」、第 2 に「安全防護（隔離などを含む）による付加保護方策」、そして、それでも残る「残留リスクを労働者に伝えるための作業手順の整備、労働者教育の実施等を行う」である。

指針の別表第 2 に規定される本質的安全設計方策の一つとして、「激突されたときに、身体に被害が生じない程度に運動エネルギーを小さくすること」があげられている。これに基づき、低出力モータでの駆動技術を開発し、本質的安全設計方策を図る。その上で、リスクアセスメントに基づき、残留リスクを受け入れ可能なレベルに下げたため、衝突を検出するバンパスイッチ、最高速度制限などの付加保護方策を実施した。

3.2 低出力駆動の目標値

産業用ロボットの可動範囲内での人の操作には、労働安全衛生法や労働安全衛生規則による厳しい規定がある。しかし、次に示す、厚生労働省告示「労働安全衛生規則第三十六条第三十一号の規定に基づき厚生労働大臣が定める機械を定める告示」に規定されるように、原動機の定格出力が 80 [W] 以下であれば、危険性が少ない出力であるとして除外されている [21]。

「定格出力（駆動用原動機を二以上有するものにあつては、それぞれの定格出力のうち最大のもの）が八〇ワット以下の駆動用原動機を有する機械」

これに基づき、本質的安全設計方策として、すべての駆動軸のモータの定格出力を各軸 80 [W] 以下にすることを目標とした。

3.3 接着剤押しつぶし機能

片側一人作業では、反対側は人がガラスを押せないため、人手では接着剤のウレタンをつぶして車体に密着させられない。押しつぶしが不十分だと、雨漏れの品質不良の原因となる。

この押し込み力は、ガラスサイズや接着剤の種類（硬さ）にもよるが、約 800 [N] が必要となる。このうち、10～15 [kg] 程度あるガラスと装置手先部の重力で 500 [N] 程度は負担できるが、残り約 300 [N] は装置の推力で押す必要がある。

3.4 低出力モータによる押し込み機能の実現

これに対し、市販の 80 [W] モータ使用の垂直多関節ロボットでは、「推力不足」と「上下方向の動作範囲不足」の問題がある (Fig. 3)。推力不足の理由として、以下が考えられる。

- リンクが直列に結合されたシリアルリンク構造で、負荷を各軸で分担できない。
- 軽量部品の高速搬送・組立に特化して、高速性を重視し、駆動軸の減速比が低い。

また、動作範囲不足を解消するために、リンクを伸ばすと次の問題が生じる。

- 推力がさらに低下する。
- 手先の慣性質量が増加し加減速が遅い。

Fig. 3 Robot force comparison

Fig. 4 Mechanical structure

そこで、低出力の 80 [W] モータで高推力が出せる、次のような機構 (Fig. 4) を採用した。

- (1) 平行リンク機構により、各駆動軸に負荷トルクを分散させ、合計推力を向上させた。
- (2) 上記により、慣性質量の大きいモータをリンク根元部に集約、加減速時の負荷トルクを低減し、短時間での加減速を実現した。
- (3) 直動機構に比べ、折りたたみ時の上下方向のスペースが小さくでき、高さに余裕のない既存工場にも適用可能となり、汎用性が向上。
- (4) 機構解析により、必要な推力と作業速度を出せるよう、リンク姿勢と減速比を最適化。
- (5) ウィンドウガラスを吸着する四つのパッドのロードセルで、押し込み力を計測する。

これにより、各軸 80 [W] 以下で、サイクルタイム 48 [s] (従来の二人作業ではサイクルタイムが 60 [s] だった) と推力 300 [N] を両立することができた。そして、押し込み力のフィードバック制御により、ガラス全面に対して均一な押し込み力制御を実現し、接着剤の押しつぶし品質を確保した。

3.5 産業用ロボット ISO 規格と安全対策

産業用ロボットの ISO 規格 ISO10218-1:2006 の 5.10 節において、人とロボットが協働作業する際の要件「協働運転要求事項」が規定されている [23]。本節では、本装置のこの要件の準拠状況と安全対策について説明する。

ISO 規格の協働運転要求事項では、大きく分けて次の五つの

規定のどれかを満たすことが求められている。

- (1) 協働作業空間内で人体を検知したら停止する。
- (2) 手の位置を検知, かつ, 速度 250 [mm/s] 以下。
- (3) オペレータとの安全距離が確保できなければ保護停止, かつ, 速度 250 [mm/s] 以下。
- (4) 設計による推力もしくは動力の制限. 合計最大 150 [N] 以下, または, 合計最大 80 [W] 以下。
- (5) 制御による推力もしくは動力の制限. 合計最大 150 [N] 以下, または, 合計最大 80 [W] 以下。

現状では, 国内法規と産業用ロボットの ISO 規格が整合していない。国内法規で求められる各軸定格 80 [W] 以下の規定と, ISO で規定される速度, 推力, 動力の制限値を同時に満たそうとすると, 非常に速度が遅くなったり, ワークを持ち上げるだけの推力が出せず, 産業現場のサイクルタイムや, 接着剤押しつぶしなどに見られるような推力の必要な機能要求に応えることが物理的に困難である。

このため, 日本国内では ISO 規格は任意規格であり, 法規の遵守が優先されることを考慮し, 本装置では国内法規の遵守を優先し, ISO 規格に準拠できない項目は別の安全対策で安全を確保した。以下で各動作モードの準拠状況を説明する。

- (1) 搭載までのアシスト動作時. デッドマンスイッチを押しながら操作し, 速度 250 [mm/s]. 以下の制限をかけており, 先の (2) の ISO 規格を満たしている。
- (2) 接着剤押しつぶし ⇒ 上昇動作時. 作業者が押しつぶし動作開始のスイッチを押したあとは, 自動で押し込み ⇒ 完了 ⇒ 上昇動作が行われるため, 先の ISO 規格の (2) は準拠できない。

また, 接着剤の押しつぶしに推力が必要であるため, 合計推力 150 [N] もしくは合計動力 80 [W] の制限を満たせていない。このため, 先の ISO 規格の (4), (5) にも準拠できていないが, 設定した押しつぶし力を大きく超える異常な押し込み力を, 吸着パッドに設けたロードセルが検知した場合には停止する。また, 速度は 250 [mm/s] 以下に制限をかけている。さらに, パンパスイッチでの衝突の検知と, 非常停止スイッチを左右両側に設け, 作業者が危険を感じたら, これを押して止めることで対応している。

速度の制限については, 次のような方式をとることで, ISO13849-1:1999 で規定される安全カテゴリー 3 に準拠するシステム構成となっている [24]。

- (1) 指令速度を 250 [mm/s] 以下にソフトウェアで制限する。
- (2) サーボモータ内蔵とは別のロータリーエンコーダで速度を計測し, アシスト制御の制御機器とは別の制御機器で手先速度を演算し, 常時監視を行う 2 重系を構成している。実測速度が 250 [mm/s] を越えた場合には, サーボモータのパワーラインを遮断する回路構成としている。

4. 組付位置決め精度と操作性の両立

4.1 現状の位置合わせの課題

インパネ搭載スキルアシスト [1][14] では, 作業フェーズによって慣性と粘性を変える可変インピーダンス制御により位置決め精度と操作感の向上が図られている。本ウィンドウ搭載作

業ではインパネ搭載作業ほど長いストロークを搬送しないため, フェーズの判別が難しい場合がある。操作力依存可変ダンピング制御 [15] は, 次式のように, 操作力の大きさに応じて粘性を可変にすることで, フェーズ判別がなく, 簡便ながらも同様の効果が得られる。

$$D(F_h) = D_0 \frac{A}{|F_h| + A} \quad (1)$$

ここで, $D(F_h)$ は粘性係数, D_0 は基準粘性係数 (定数), A は粘性可変感度 (定数), F_h は操作力である。

そこで, この操作力依存可変ダンピング制御を導入し, 次式の仮想インピーダンスを実装した。

$$M\ddot{p} + D(F_h)\dot{p} + F(\dot{p}, F_h) = F_h \quad (2)$$

ここで, M は質量, p は位置, F は摩擦力である。

しかし, 上記手法は, 位置決めや操作性の向上に有効ではあるが, ± 2 [mm] の精度でストッパを車体の孔に挿入するには不十分である。従来のアシスト制御では, 基本的に操作力の向きにガラスが進むように制御しているため, 人の手ぶれによりまっすぐに進まずずれてしまう。そうすると, ボディのルーフ部にガラスが接触して (Fig. 2 の右下枠を参照), 接着剤が付着し意匠上の問題が発生するほか, 接着剤の一部が欠き取られて雨漏れの原因になる。

挿入位置上空において, まっすぐ降ろしたいのであれば, 真下向きにしか動かないようにガイド制御で拘束すればよい。しかし, 挿入位置を調節する際, 前後に動かしにくく位置合わせがしにくくなる。このため, ガイド制御のあり・なしの切り替えが必要になる。人がスイッチで切り替えるとわずらわしく操作性が低下し, またサイクルタイム 48 [s] のうち許される搭載作業時間 7 [s] 間での完了が難しいため, この方法は作業者に受け入れられない。

4.2 操作力方向による進行方向ガイド制御による技能支援

そこで, 2.2 節の作業手順 (1) と (2) の人の操作意図を判別して, ガイド制御の有無を自動的に切り替えることを考える。

Fig. 5 に人がまっすぐ動かそうとしたときの位置ずれと操作力の向き (目標の方向を 0 [deg] とする) の計測結果を示す。なお, 仮想インピーダンス特性の設定は, 質量 $M = 20$ [kg], 基準粘性係数 $D_0 = 80$ [N/(m/s)], 粘性可変感度 $A = 5$ [N], 摩擦

Fig. 5 Force direction & position error of guide OFF

5. 結 論

本論文では、最終的な品質は人が確認し、機械が人と共存して作業を支援する協働化という立場から開発・実用化したウィンドウ搭載アシストについて報告した。

- (1) 定格出力 80 [W] 以下の低出力モータで高推力を出せる機構により、人との共存、接着剤押しつぶし品質、サイクルタイム 48 秒を両立させた。
- (2) 挿入位置の要求精度 ± 2 [mm] を達成するために、人の手ぶれによる位置ズレを低減する、進行方向ガイド制御を開発し、人が意識せずに人の技能を支援する技術を実用化した。
- (3) 以上により、量産ラインにおいて、従来の二人作業から片側一人作業を可能とするウィンドウ搭載アシストを実用化した。

2007 年 8 月より、トヨタ自動車の量産ラインにて 2 台が稼働を開始し、昼夜 2 直体制で 2 年間稼働を続けている。

6. 今後の展開

人と協働するロボットの今後の展開としては、大きく分けて次の三つの方向性が考えられる。

第一に認識機能を発達させる方向性である。認識・センサ技術の発展により位置決めを自動化する、また、ワークを作業者の手元まで自動搬送することで、人の作業時間をさらに短縮する。これらのグローバル展開には、特に欧州で求められる ISO 規格に準拠することが求められる。

ISO 規格の準拠には、PL (Performance Level) [22] [24] の安全認証を取得した人体検出センサや力・トルクセンサ、モータと、これらを監視・演算する制御機器が必須であり、各メーカーに協力を求めたい。また、先に 3.4 節で述べたように、国内法規と ISO 規格が整合していないため、両方を満たそうとすると産業現場での実用性に乏しい。二つを整合させる上では、産業現場の実情を考慮した上での規格と法律の策定が望まれる。

第二にシンプル化・コストダウンの方向性である。省エネ、低騒音化のため、圧縮エアなしでの低出力駆動技術と、高価な力センサ、レーザセンサが不要なセンサレス制御を開発する。

第三は技能支援技術を発展させる方向性である。開発した技能支援技術を、ウィンドウの接着剤塗布などの軌跡精度が必要な作業のダイレクトティーチングに応用する。そして、将来は、固定型の設備から身につけるタイプのウェアラブルアシストにも展開する。これにより、車種変更などへ迅速に対応できる、メンテナンスの少ないフレキシブルな生産ラインを目指す。

謝 辞 実用機を製作いただいた(株)アラキ製作所の高柳課長、鈴木主任、柴田主任、そして、ライン導入に御尽力いただいた、藤原主幹をはじめとするトヨタ自動車組立生技部の皆様と、高岡工場組立部第 12 組立課の現場作業者の皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 鴻巣仁司, 荒木勇, 山田陽滋: “自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.508–514, 2004.
- [2] H. Kazerooni: “Human robot interaction via the transfer of power and information signals,” IEEE Trans. on SMC, vol.20, no.2, pp.450–463, 1990.
- [3] 福田敏男, 藤澤佳生, 新井史人, 室英治, 星野春夫, 宮崎貴志, 大坪和彦, 上原和雄: “マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究 (第 1 報, マン・ロボット協調マニピュレータの機構と制御)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.57, no.541, pp.2944–2952, 1991.
- [4] 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男: “仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.60, no.572, pp.1337–1343, 1993.
- [5] M.A. Peshkin and J.E. Colgate: “Cobots,” Industrial Robot, vol.26, no.5, pp.335–341, 1999.
- [6] A. Bettini, P. Marayong, S. Lang, A.M. Okamura and G.D. Hager: “Vision-Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures,” IEEE Trans. on Robotics, vol.20, no.6, pp.953–966, 2004.
- [7] N. Takesue, R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “Tracking Assist System Using Virtual Friction Field,” Proc. of IEEE/RSJ IROS’05, pp.2134–2139, 2005.
- [8] R. Kikuuwe, N. Takesue and H. Fujimoto: “A Control Framework to Generate Nonenergy-Storing Virtual Fixtures: Use of Simulated Plasticity,” IEEE Transactions on Robotics, vol.24, no.4, pp.781–793, 2008.
- [9] T. Takubo, H. Arai, Y. Hayashibara and K. Tanie: “Human–Robot Cooperative Manipulation Using a Virtual Nonholonomic Constraint,” International Journal of Robotics Research, vol.21, no.5, pp.541–553, 2002.
- [10] Y. Hirata, Y. Kume, T. Sawada, Z.D. Wang and K. Kosuge: “Handling of an Object by Multiple Mobile Manipulators in Coordination based on Caster-like Dynamics,” Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.807–812, 2004.
- [11] O.M. Al-Jarrah and Y.F. Zheng: “Arm–Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control,” Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.895–900, 1997.
- [12] R. Ikeura, A. Morita and K. Mizutani: “Variable damping characteristics in carrying an object by two humans,” Proc. of 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.130–134, 1997.
- [13] M.M. Rahman, R. Ikeura and K. Mizutani: “Investigating the Impedance Characteristics of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Human Operators,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, Tokyo, II, pp.676–681, 1999.
- [14] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono and Y. Umetani: “Proposal of Skill-Assist: A System of Assisting Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, IV, pp.11–16, 1999.
- [15] 武居直行, 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 澤田英明, 藤本英雄: “位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.2, pp.306–313, 2007.
- [16] 中村久, 本田朋寛: “産業用パワーアシストシステム”, 計測と制御, vol.45, no.5, pp.445–448, 2006.
- [17] N. Hogan: “Impedance Control Part 1 — Part 3,” Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1–24, 1985.
- [18] K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: “Mechanical Impedance Control of a Robot Arm by Virtual Internal Model Following Controller,” Proc. of IFAC 10th World Congress on Autonomous Control, vol.4, pp.250–255, 1987.
- [19] 厚生労働省: リスクアセスメント等関連資料・教材一覧, 厚生労働省労働基準情報ウェブサイト, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei14/>
- [20] 向殿, 安全技術応用研究会: 国際化時代の機械システム安全技術, pp.82–89, 日刊工業新聞社, 2000.
- [21] 中央労働災害防止協会: オンライン安全衛生情報 法令・通達告示・指針

一覧, 安全衛生情報センターウェブサイト, <http://www.jaish.gr.jp/user/anzen/hor/horei01.html>

[22] 向殿, 井上, 川池, 平尾, 逢原: 安全の国際規格 第3巻制御システ

ムの安全, pp.121-158, 日本規格協会, 2007.

[23] ISO10218-1:2006

[24] ISO13849-1:1999

村山英之 (Hideyuki Murayama)

1997 年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。1997 年より三菱電機(株)生産技術センターにて、半導体と冷熱機器の組立・検査技術開発に従事。2003 年よりトヨタ自動車(株)生技開発部, 2005 年よりパートナーロボット部にて, パワーアシスト技術, 人の技能支援技術と人と協働する組立作業支援ロボットの開発・実用化を行っている。

松本邦保 (Kuniyasu Matsumoto)

1992 年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1992 年よりファナック(株)にて産業用ロボットの開発に従事。2004 年よりトヨタ自動車(株)生技開発部, 2005 年よりパートナーロボット部にて, ヒューマノイドロボット, 介護支援ロボットの開発・実用化を行っている。

藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授。医学工学, 生産システム, ロボットなどの知能化, バーチャルリアリティ・感性の工学に興味を持つ。JUFAS 最優秀論文賞, グッドデザイン賞など多数受賞。名古屋工業大学ものづくりテクノセンター長, スケジュール学会会長, 文部科学省科学技術・学術審議会文化資源委員会委員など歴任。現在, 愛知県ものづくり人材育成協議会座長, 日本機械学会フェロー・評議員, 工学博士。
(日本ロボット学会正会員)

武居直行 (Naoyuki Takesue)

2000 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。2000 年大阪大学助手。2003 年名古屋工業大学寄附講座講師。その後, 准教授を経て, 2008 年首都大学東京准教授。博士(工学)。ロボットの運動制御, 触覚テクノロジー, 人間・機械系などの研究に従事。2004 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 精密工学会, IEEE の会員。
(日本ロボット学会正会員)

鴻巣仁司 (Hitoshi Konosu)

1986 年トヨタ自動車株式会社入社。1999 年豊田工業大学大学院修士課程修了。現在, トヨタ自動車パートナーロボット部に勤務。パワーアシストロボットの開発に従事。2002 年日本ロボット学会第7回実用化技術賞受賞。
(日本ロボット学会正会員)