

# 福岡工業大学 学術機関リポジトリ

平板状物体の溝はめ込み動作の計画 — 製造業における組立作業の自動化に関する一手法 —

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-12-20 キーワード (Ja): キーワード (En): Robotic assembly, Task planning, Manufacturing 作成者: 榎田, 諭, 藤木, 克彦 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11478/00001744">http://hdl.handle.net/11478/00001744</a>

# 平板状物体の溝はめ込み動作の計画 — 製造業における組立作業の自動化に関する一手法 —

榎田 諭 (工学部知能機械工学科)

藤木 克彦 (工学研究科知能機械工学専攻)

## Planning to Insert a Board-like Object into the Frame — An Approach for Assembly Automation in Mass Production —

MAKITA Satoshi (Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

FUJIKI Katsuhiko (Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering)

### Abstract

This paper studies robotic insertion planning for board-like objects as an assembly primitive motion. Assembly of industrial parts in mass production is a bottleneck for factory automation because such a complicated and combined task requires robots to handle various parts, including deformable objects. In addition, synthesizing these primitive motions for assembly and other supplemental equipment is essential, for example, parts feeding and work transfer. This paper briefly summarizes the trend of robotic assembly research and competitions. It also introduces our perception and planning method for the insertion task by a robotic manipulator and a depth camera.

**Keywords** : Robotic assembly, Task planning, Manufacturing

## 1. はじめに

**1.1 研究背景** 近年の生産技術の高度化ならびに労働人口の減少に伴い、製造業におけるロボット導入によるオートメーション化は今後も拡大することが予想される<sup>(1,2)</sup>. 特に製造形態が従来の少品種大量生産を前提とするライン生産方式から、多品種少量生産、変種変量生産に対応するセル生産方式の導入が進んでいる<sup>(3)</sup>. このようなセル生産方式においては、製品の組立に関してもライン生産のような簡単な作業を分担する方法ではなく、単一のセル内で複数の組み立て作業を遂行することが多くなる. 産業用ロボットによる組立作業の自動化では動作教示が煩雑になることが予想されるため、組立作業計画の実現が重要となる. 本稿では組立作業の要素技術およびその作業計画手法に注目して、その動向を分析する. さらに、著者らの研究グループによる平板上物体のはめ込み作業への取り組みを紹介する.

**1.2 関連研究** 組立作業に関する研究課題として大きく分けて、ロボットによる組立作業の動作自体を確立する要素技術と、組立作業遂行のための動作計画とが考えられる. なお、作業計画においては、ロボットと人間が協働するセル生産システムも研究されているが<sup>(4)</sup>, 本稿ではロボットのみによる作業計画を対象に分析する.

組立作業の要素技術として古くから取り組まれているものの一つに「Peg-in-hole (ペグインホール)」が挙げられる<sup>(5)</sup>. 図1のように棒状物体を穴に挿入する作業を指し、多くの製品組立においても見られる動作である. 棒状物体の穴への挿入としては、一般的なボルトに対するキリ穴のように比較的余裕の大きいものから、寸法公差の厳しいものまで多種多様である. 特に後者についてはロボットや機械による挿入においては、高精度な位置制御だけでは不十分である. Whitney はロボットの柔軟な手首によって位置決め誤差を自動的に吸収できる機構である「Remote center compliance」を提案している<sup>(6)</sup>. 濱屋らはその手首の柔軟性による非接触時の制御安定性の問題を指摘し、柔剛切り替え可能な手首<sup>(7)</sup>を用いた組立作業の学習手法を提案している<sup>(8)</sup>. さらに、ペグインホール作業に適したロボットハンドも提案されている<sup>(9,10)</sup>. また、これらのハードウェアの改良だけでなく、適切な力制御によってタスクを実行する手法も広く研究されている<sup>(11,12)</sup>.

ペグインホールタスクに類似する組立作業として、ゴムホース成型時の挿入作業<sup>(13)</sup>や、ワイヤーハーネスの取り付け<sup>(14,15)</sup>なども挙げられる. ワイヤーやケーブルは一般に柔軟物として扱われ、その可変形性ゆえに操りが難しい対象物であるが、先端部に硬いコネクタ等が接続されることでペグインホールと同等の問題に帰着できる場合がある.

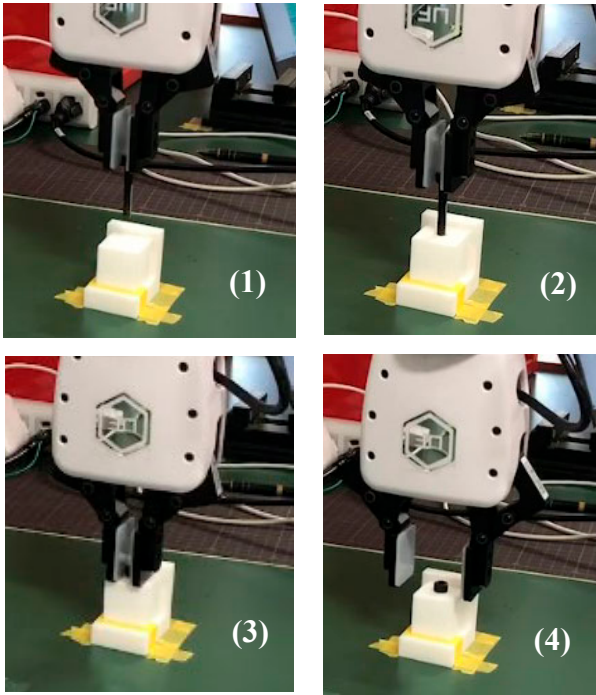


図 1: ペグインホールの一例。ロボットグリッパで把持したボルトを、挿入穴の位置を揃えた 2 つの部品に対して同時に挿入する。

- (1) ボルトを穴近傍に移動させる。
- (2) ボルト先端を穴の位置に合わせて接触させる。
- (3) 穴の軸方向に平行移動してボルトを挿入する。
- (4) グリッパからボルトをリリースする。

Fig. 1: A peg-in-hole task. The robotic gripper inserts a bolt into the aligned holes of two parts simultaneously.

- (1) The robot gripper brings the bolt near the hole.
- (2) The endpoint of the bolt contacts with the hole aligning each position.
- (3) The gripper inserts the bolt in parallel to the central axis of the hole.
- (4) The gripper releases the bolt.

別の組立要素技術として「Snap assembly」がある<sup>(16,17)</sup>。Snap (スナップ) とはプラスチックのような弾性をもつ材料で構築される、弾性変形する部品を指す。部品の弾性変形を利用して穴部に挿入し、突起部を引っかけるようにして固定する組立手法である (図 2)。ボルトとナットのような別の固定具なしに部品同士を結合する手法として、テレビのリモコンの裏蓋などに採用されている部品である。

著者らのグループは窓枠などに代表されるようなサッシのはめ込み動作の要素技術に取り組んでいる<sup>(18,19)</sup>。ペグインホールと同様の挿入作業ではあるが、対象物が平板などの長尺物であることと、挿入先である直線状の溝と、挿入対象物であるサッシの一辺が平行でなければならないなどの拘束条件があることなどが組立動作として異なる。これについては 2.1 節で紹介する。類似の要素技術として、

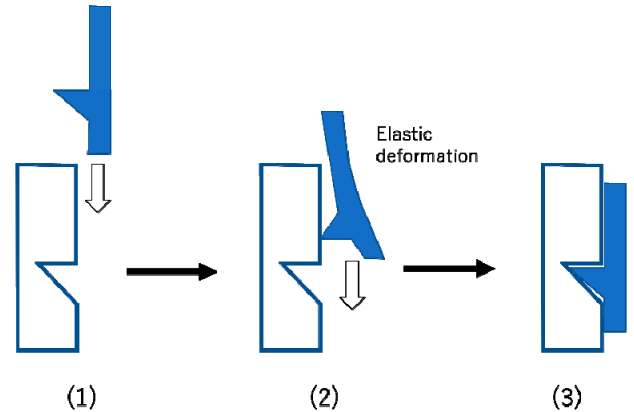


図 2: Snap assembly. 挿入物の弾性変形を利用して、突起部を引っかけるような組立方法  
(1) 部品を挿入部に沿って移動させる。  
(2) 部品は材料の弾性により変形し、突起部が壁面にならったまま挿入される。  
(3) 突起部がくぼみに収納され、部品の挿入が完了する。

Fig. 2 Snap Assembly. The elastic deformation of the inserted object facilitates to place the convex parts into the hall.

- (1) The object is inserted along the body of another part.
- (2) The elasticity of the object causes deformation of the object while insertion. The protrusion slides along the wall.
- (3) The protrusion gets into the corresponding dimple.

Almeida らは板状物体を双腕ロボットで滑らせながら挿入する「Folding assembly」を提案している<sup>(20)</sup>。

研究背景で述べたような組立作業の自動化研究の活性化を受けて、2017年のIEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (知能ロボットとシステムに関する国際会議、通称 IROS) において、Robotic Grasping and Manipulation Competition: Manufacturing Track が開催された<sup>(21)</sup>。ロボットによる作業内容としては、Task Board と呼ばれる、挿入穴やネジ穴の空いた板 (ボード) に各種のペグやボルトを組み付ける作業と、その発展となるギヤユニットの組立が実施された。この競技会はその後、2018年に開催される World Robot Summit (WRS)内の、ものづくりカテゴリー競技「製品組立チャレンジ」のプレ大会に位置付けられたものである。

2018年の製品組立チャレンジには、日本国内での組み立て作業に関する競技会として国内外の多くの研究機関、民間企業が参加した。競技開催の経緯および競技ルール等については文献<sup>(22-24)</sup>が詳しい。2018年の大会ではベルトドライブユニットの組立が設定され、2017年開催の競技会と比較してさらに難易度が引き上げられた。ベルトという柔軟物の取り扱いに加えて、競技会当日に発表されるサプライズ部品による仕様変更への迅速な対応など、より実

実践的なルール設定となった。競技はいくつかのタスクに分割され、「タスクボード」、「キッティング」、「組立」についてそれぞれ達成度等が評価された。キッティングとは組立作業の対象となる必要な部品をパーツボックスから取り出して並べる作業である<sup>(25)</sup>。このとき、多くの部品はそれぞれトレイなどに乱雑に収納されているので、そこから必要な個数を掴み上げるためのピンピッキング<sup>(26,27)</sup>の技術が不可欠となる。ビジョンセンサ等による把持対象物の認識技術はもちろん、対象物をどのようなハンドでどのように把持するかという把持計画もまた研究・開発対象である<sup>(28,29)</sup>。

本競技会で導入されたサプライズ部品は、ロボットの生産システムをいかにして短時間で立ち上げるかという点で、いわゆるアジャイル開発に近い側面を持つ。競技会の背景<sup>(22-24)</sup>や本稿の研究背景でも述べた文献<sup>(9)</sup>にもあるように、今後は多様な製造ニーズに対応できるシステムセットアップが重要になると想定される<sup>(30-32)</sup>。その点で、ロボットに作業動作をプログラムする「教示」の省力化・高速化も今後、ますます期待されるものと考えられる<sup>(33-35)</sup>。

実際の組立工程においては、個々の要素技術の達成や、全体の組立作業計画だけでなく、その周辺のサポート技術についても考慮すべきである。例えば、現在のロボットモジュールや作業ツールの多くは電源・通信ケーブルによって接続されることが多いが、これらは作業中のロボットに絡まる可能性がある。Sanchez らはこのケーブルの動きを考慮した物体操作計画手法を提案している<sup>(36)</sup>。加えて、部品供給機構<sup>(37,38)</sup>やワーク輸送のための AGV (Automated Guided Vehicle)<sup>(39,40)</sup>などを含めた統合的な作業計画の立案が組立作業の自動化のために必要であると考えられる。

## 2. 平板物体の溝はめ込みにおける動作の計画

著者らの研究グループは組立作業の要素技術の一つとして、サッシ等の平板上物体の溝はめ込み動作の計画に取り組んできた。窓枠等のサッシは一般に直方体の平板に近似できるとして、平板の高さ(図3中 A の寸法)に対して、挿入枠の溝内の幅(図3中の B の寸法)が大きく、挿入枠の前面入口の高さ(図3中の C の寸法)が小さい設計となっている。そのため、単純に溝の位置を揃えて挿入する動作では不十分で、挿入枠との干渉を回避しながら平板を操作する必要がある。加えて、この挿入作業に伴う平板の経路はその位置と姿勢の 6 次元コンフィギュレーション空間内での探索となり、計画が容易でない場合もある。

これらの課題に対して鉢峰らは、平板上部の辺(図3中 D)と挿入枠の上部の辺(図3中 E)が平行であるという拘束条件を与えて、平板の経路計画を行った<sup>(18)</sup>。これによって、平板の挿入動作は 3 次元コンフィギュレーション空間の問題に帰着でき、A\*アルゴリズム<sup>(41)</sup>を用いて最適経路を探索した。さらに、マニピュレータに装着した電動グリッ

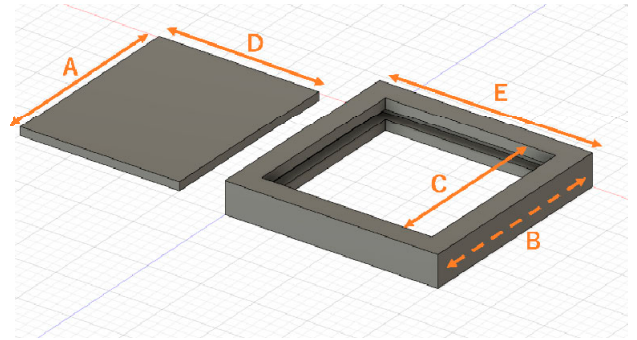


図 3 : サッシとその挿入枠の模式図  
Fig. 3: A sash and a frame

パによって平板を把持し、その相対的な把持姿勢が変化しないものと仮定する。これによって、把持されたサッシが上記で求めた最適経路を通るような、マニピュレータの経路を逆運動学に基づいて求めることができる。鉢峰らは逆運動学の解法に汎用的な経路計画手法である Rapidly-exploring Random Trees (RRT)<sup>(42)</sup>を用いた<sup>(18)</sup>。ここで得られた挿入動作のための経路を実機のロボットで再現し、挿入動作の実現を検証した。

さらに藤木らは三次元点群を用いて、挿入枠の位置・姿勢を推定し、サッシの挿入動作計画を行う手法を提案した<sup>(19)</sup>。三次元点群はデプスカメラ (RGB-D カメラ) によって取得できる、空間中の物体表面の 3 次元空間の座標情報である。この 3 次元点群から挿入枠前面の平面を検出し、その平面の中心位置と傾きを算出する。得られた挿入枠の位置・姿勢に対して、鉢峰らの手法<sup>(18)</sup>に基づくサッシの挿入計画を行い、実機のマニピュレータでその動作を検証した。

ここでは藤木らによる、挿入枠の位置・姿勢推定手法<sup>(19)</sup>の概要を説明する。図3右の挿入枠の前面の点群からまず、Random Sample Consensus<sup>(43)</sup>を用いて挿入枠の前面の平面を推定し、平面方程式  $(ax + by + cz + d = 0)$  を求める。ここで、 $a, b, c, d$  は定数である。その平面を構成する点群の中でカメラ画像の水平軸方向、垂直軸方向の最大値・最小値をとる点、 $x_{max}, x_{min}, y_{max}, y_{min}$  から、カメラ座標系での平面の中心位置  $(x_c, y_c) = \left( \frac{(x_{max} + x_{min})}{2}, \frac{(y_{max} + y_{min})}{2} \right)$  を推定できる。さらに平面方程式にその中心位置  $x_c, y_c$  を代入することで、カメラ光軸方向の中心位置までの距離を  $(z_c = -\frac{ax_c + by_c + d}{c})$  と算出できる。

挿入枠の姿勢についてはまず、平面方程式からその法線ベクトル  $(\mathbf{z}_m = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} [a \ b \ c]^T)$  が得られる。さらに挿入枠の前面の端点から適当な距離にある側辺上の点を求め、その 2 点間の側辺に沿うベクトル  $\mathbf{y}_m$  を求める。法線ベクトル  $\mathbf{z}_m$  とベクトル  $\mathbf{y}_m$  の外積  $\mathbf{x}_m$  を計算することで、挿入枠の姿勢を表す 3 つの座標軸が求まる。

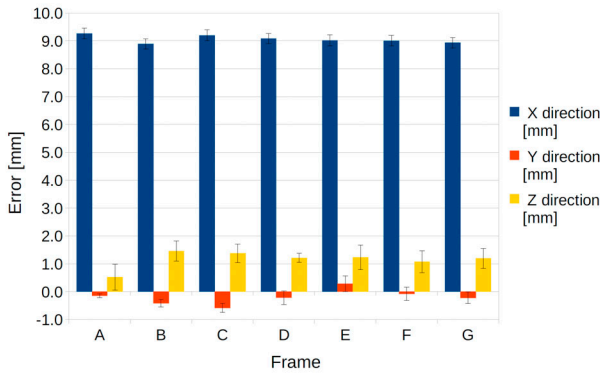


図 4：挿入枠の位置推定の誤差。デプスカメラの原点位置のオフセットにより X 軸方向に約 9 [mm] の誤差が見られる。

Fig. 4: Each position estimation error between the ground truth value and the corresponding estimated position for each axis. The offset of 9 [mm] along the X axis appears.

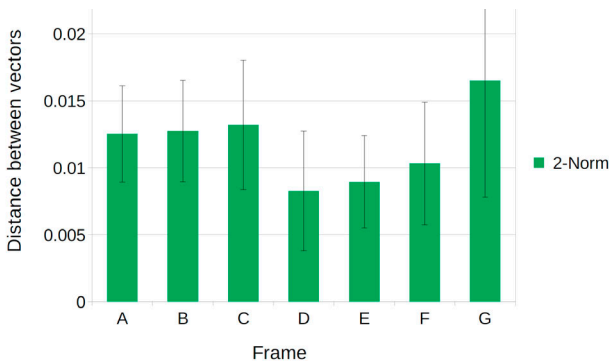


図 5：挿入枠の姿勢推定の誤差。姿勢を表すクォータニオンベクトル間の 2 ノルムを計算。  
Fig. 5: Each error of quaternion between the ground truth vector and the corresponding estimated vector.

本研究では Intel 社製デプスカメラ・RealSense L515 を用いて、図 3 のようなサッシを模した平板を溝付き枠に挿入する作業を計画した。長方形平板の寸法は、辺 A が 163 [mm]、辺 D が 60 [mm]、挿入枠の寸法は辺 B が 172 [mm]、辺 C が 160 [mm]、辺 E が 180 [mm]、溝の深さは 6 [mm]、枠の幅は 20 [mm] である。

挿入枠の位置・姿勢を変化させた 7 パターンについてデプスカメラで点群を取得し、挿入枠の位置・姿勢を推定した結果を図 4 に示す。カメラ X 軸方向の推定誤差がいずれの場合でも約 9 [mm] がある。これはカメラのオフセットに起因するものと考えられるため、動作計画においてはこれを考慮する。また、姿勢の推定誤差は姿勢のクォータニオンの真値ベクトルと推定ベクトルとの間の 2 ノルムで表した (図 5)。

この挿入枠の位置・姿勢推定に基づいてロボットマニピュレータによるサッシの挿入動作を計画した。マニピュ

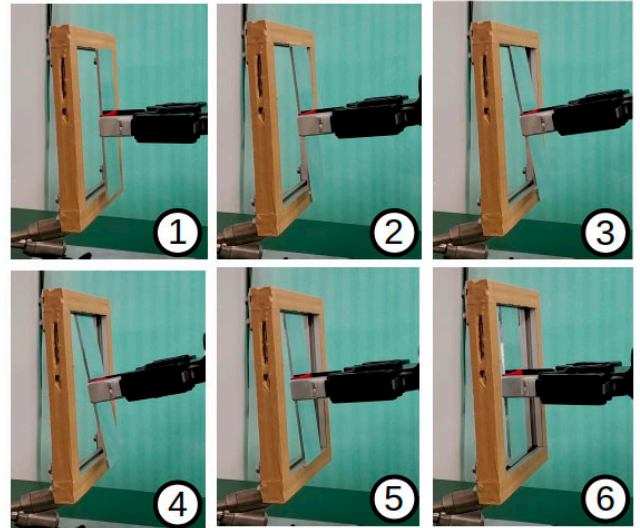


図 6：計画された挿入動作

- (1) 挿入枠の近傍にサッシを運ぶ
- (2)-(4) サッシを回転させて上部を挿入枠の上部の溝に近づく
- (5)-(6) サッシの上部を溝に差し込み、サッシを回転させて挿入枠下部の溝に近づく。

Fig. 6: Planned motion for sash insertion

- (1) The robot brings the sash near the frame.
- (2)-(4) The robot rotates the sash so that the upper part of the sash approaches the frame's groove.
- (5)-(6): The robot inserts the sash into the groove and rotates it so that the bottom part of the sash approaches the bottom track of the frame.

ータはユニバーサルロボット社製 UR3、ロボットハンドは Robotiq 製 2F-85 Adaptive Gripper を用いて、対象物はあらかじめグリッパに把持された状態を初期条件とした。ロボットに対して挿入枠が正対した状態で、その姿勢を変化させた 3 パターンについて挿入実験を行い、いずれも 70% 以上の成功率を得た。失敗するケースとして、サッシの挿入時に溝に入らない場合、上部挿入後の回転動作時にサッシ下部が挿入枠に干渉する場合が確認された。

なお、一般的な戸棚や窓枠においては、本動作計画したようなサッシと挿入枠との間には十分なクリアランスが確保されていることが多い。そのため、両方が干渉しない経路が生成でき、本挿入動作はマニピュレータの位置制御だけで実行可能であった。今後は、位置・姿勢推定誤差によって対象物同士が干渉する場合に柔軟に対応するための力制御を含めた挿入作業計画が期待される。

### 3. おわりに

本稿では、ロボットによる組立作業の自動化に注目し、その実用化のために必要な組立作業の要素技術およびその作業計画手法の研究動向を概観した。要素技術として以前から取り組まれてきたペグインホールに加えて、snap assembly や、著者らが取り組む平板状部品のはめ込み動

作などを紹介した。さらに作業計画の高度化を目指す研究の動向から活発化した、組立作業に関する競技会について言及した。この競技会を通じて多くの知見が発表され、組立作業の自動化は今後ますますの発展が期待できる領域である。一方で、基本的な物体操作の高度化に加えて、部品供給や搬送、さらに実働上の懸念事項など、多くの研究課題が残されている。要素技術の確立だけでなく、より俯瞰的な観点からの補助技術の確立も期待される。

## 謝辞

本研究は福岡工業大学総合研究機構 2021 年度若手卓越研究支援制度の助成を受けたものです。

## 文 献

- (1) 野田：「ものづくりにおける産業用ロボットの展開と今後の課題」、システム／制御／情報, Vol. 65, No. 3, pp. 78-84 (2021)
- (2) 小平：「製造業向けロボット技術イノベーションのために何を行うべきか?」、日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 5, pp. 348-352 (2015)
- (3) 原田：「産業用ロボットによる組み立て作業の自動化に関する研究動向」、精密工学会誌, Vol. 84, No. 4, pp. 299-302 (2018)
- (4) P. Tsarouchi, A.-S. Mattheiakakis, S. Makris and G. Chryssolouris: "On a human-robot collaboration in an assembly cell," Int. J. of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 30, No. 6, pp. 580-589 (2017)
- (5) H. Park, J. Park, D. Lee, J. Park, M. Baeg and J. Bae: "Compliance-Based Robotic Peg-in-Hole Assembly Strategy Without Force Feedback," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 64, No. 8, pp. 6299-6309 (2017)
- (6) D. E. Whitney: "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts Geometric," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, pp. 65-77 (1982)
- (7) F. von Drigalski, K. Tanaka, M. Hamaya1, R. Lee1, C. Nakashima, Y. Shibata and Y. Ijiri: "A Compact, Cable-driven, Activatable Soft Wrist with Six Degrees of Freedom for Assembly Tasks, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 8752-8757 (2020)
- (8) 濱屋, 田中, フェリクス, 井尻：「工場現場の組立応用に向けたソフトロボット運動学習」、日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 7, pp. 609-612 (2021)
- (9) J. C. Triyonoputro1, W. Wan and K. Harada: "A Double Jaw Hand Designed for Multi-Object Assembly," Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 403-408 (2018)
- (10) K. Nie, W. Wan and K. Harada: "An Adaptive Robotic Gripper with L-shape Fingers for Peg-in-hole Tasks," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 4022-4028 (2018)
- (11) M. Oikawa, T. Kusakabe, K. Kutsuzawa, S. Sakaino and T. Tsuji: "Reinforcement Learning for Robotic Assembly Using Non-Diagonal Stiffness Matrix," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 6, Issue 2, pp. 2737-2744 (2021)
- (12) 山野辺：「マニピュレーションにおける力制御の研究動向」、計測と制御, Vol. 56, No. 10, pp. 741-746 (2017)
- (13) 武居, 田中, 栄, 吉田, 藤本：「ロボットによるゴムホース成形における挿入作業」、日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 901, p. 21-00164 (2021)
- (14) X. Jiang, K. M. Koo, K. Kikuchi, A. Konno and M. Uchiyama: "Robotized assembly of a wire harness in a car production line," Advanced Robotics, Vol. 25, Issue 3-4, pp. 473-489 (2011)
- (15) 鷺見：「柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発」、日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 1082-1085 (2009)
- (16) J. Rojas, K. Harada, H. Onda, N. Yamanobe, E. Yoshida, K. Nagata and Y. Kawai: "Towards snap sensing," Int. J. Mechatronics and Automation, Vol. 3, No. 2, pp. 69-93, (2013)
- (17) Peihao Shi, Kensuke Harada, Weiwei Wan, Ixchel G. Ramirez: "Optimizing the Motion for Robotic Snap Assembly Using FEM," J. of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 5, No. 2, pp. 105-109, (2018)
- (18) 鉢峰, 横田：「サッシの溝はめ込み動作の計画」、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-R06 (2019)
- (19) 藤木, 鉢峰, 横田：「サッシの溝はめ込みの動作計画における挿入枠の位置・姿勢推定」、第 27 回ロボティクスシンポジウム, pp. 164-167 (2022)
- (20) D. Almeida and Y. Karayiannidis: "Folding assembly by means of dual-arm robotic manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3987-3993 (2016)
- (21) Robotic Grasping and Manipulation Competition: Manufacturing Track: "https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/robotic-grasping-and-manipulation-competition-manufacturing," (閲覧日: 2022 年 6 月 23 日)
- (22) 横小路, 横井：「World Robot Summit 製品組立チャレンジ」、計測と制御, Vol. 56, No. 10, pp. 798-804 (2017)
- (23) 横小路, 河井, 柴田, 相山, 琴坂, 植村, 野田, 土橋, 阪口, 横井：「World Robot Summit 2018 ものづくりカテゴリー競技「製品組立チャレンジ」の概要」、日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 3, pp. 208-217 (2019)
- (24) Y. Yokokohji, Y. Kawai, M. Shibata, Y. Aiyama, S. Kotosaka, W. Uemura, A. Noda, H. Dobashi, T. Sakaguchi and K. Yokoi: "Assembly Challenge: a robot competition of the Industrial Robotics Category, World Robot Summit - summary of the pre-competition in 2018", Advanced Robotics, Vol. 33, Issue 17, pp. 876-899 (2019)
- (25) F. von Drigalski, C. Nakashima, Y. Shibata, Y. Konishi, J. C. Triyonoputro, K. Nie, D. Petit, T. Ueshiba, R. Takase, Y. Domae, T. Yoshioka, Y. Ijiri, I. G. Ramirez-Alpizar, W. Wan and K. Harada: "Team O2AS at the world robot summit 2018: an approach to robotic kitting and assembly tasks using general purpose grippers and tools," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 514-530 (2020)
- (26) S. Tajima, S. Wakamatsu, T. Abe, M. Tennomi, K. Morita, H. Ubata, A. Okamura, Y. Hirai, K. Morino, Y. Suzuki, T. Tsuji, K. Yamazaki and T. Watanabe: "Robust bin-picking system using tactile sensor," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 439-453 (2020)
- (27) M. Fujita, Y. Domae, A. Noda, G. A. Garcia Ricardez, T. Nagatani, A. Zeng, S. Song, A. Rodriguez, A. Causo, I. M. Chen and T. Ogasawara: "What are the important technologies for bin picking? Technology analysis of robots in competitions based on a set of performance metrics," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 560-574 (2020)
- (28) 荒井：「ビンピッキング&キッティングのためのロボットシステム」、日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 10, pp. 938-942 (2019)
- (29) 小野, 小川, 前田, 中谷, 永安, 清水, 大内：「ステレオビジョンを用いた巻ばねの認識とビンピッキング」、日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 804, pp. 2769-2779 (2013)
- (30) C. Schlette, A. G. Buch, F. Hagelskjær, I. Iturrate, D. Kraft, A. Kramberger, A. P. Lindvig, S. Mathiesen, H. G. Petersen, M. H. Rasmussen, T. R. Savarimuthu, C. Sloth, L. C. Sørensen and T. N. Thulesen: "Towards robot cell matrices for agile production -SDU Robotics' assembly cell at the WRC 2018," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 422-438 (2020)
- (31) M. Tennomi, A. Okamura, Y. Nakamura, T. Abe, S. Wakamatsu, S. Tajima, T. Nishimura, Y. Hirai, T. Sawada, N. Ichikawa, T. Tsuji, K. Yamazaki, Y. Suzuki and T. Watanabe: "Development of assembly system with quick and low-cost installation," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 531-545 (2020)
- (32) C. Sloth, A. Kramberger and I. Iturrate: "Towards easy setup of robotic assembly tasks," Advanced Robotics, Vol. 34, Issue 7-8, pp. 499-513 (2020)
- (33) 津坂, 岡崎, 小松, 横小路：「人からの手づたえ教示によるロボッ

- トアームのその場動作修正法の開発」, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 791, pp. 2450-2461 (2012)
- (34) 堀口, 水山: 「組立ロボットへの作業教示の記号過程」, システム/制御/情報, Vol. 54, No. 11, pp. 405-410 (2010)
- (35) 槇田, 浦川: 「ロボットのオフライン・ティーチングにおける直接教示手法」, 福岡工業大学総合研究機構研究所報, Vol. 4, pp. 41—45 (2021)
- (36) D. Sánchez, W. Wan and K. Harada: “Arm Manipulation Planning of Tethered Tools with the Help of a Tool Balancer.” In: Uhl, T. (eds) *Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC 2019, Mechanisms and Machine Science, Vol 73*, pp. 2567-2576 (2019)
- (37) 若林, 衣川, 上岡, 小菅: 「棚搬送ロボットと受動型連結機構による複数棚の同時搬送システム」, 日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 902, 21-00123 (2021)
- (38) M. E. A. Boudella, E. Sahin and y. Dallery: “A mathematical model to assess the performance of a robotic kitting system in an assembly plant,” 11th Int. Conf. on Modeling, Optimization and Simulation, hal-01728555 (2016)
- (39) J. J. Enright and P. R. Wurman: “Optimization and coordinated autonomy in mobile fulfillment systems,” Proc. of the AAAI Conf. on Automated Action Planning for Autonomous Mobile Robots, pp. 33-38 (2011)
- (40) I. Draganjac, D. Miklič, Z. Kovačić, G. Vasiljević and S. Bogdan: “Decentralized Control of Multi-AGV Systems in Autonomous Warehousing Applications,” in *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 1433-1447 (2016)
- (41) E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael: “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100-107 (1968)
- (42) S. M. LaValle: “Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning,” *The Annual Research Report, Dept. of Computer Science, Iowa University* (1998)
- (43) M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395 (1981)