

可逆な自動化

Reversible Automation

西田 健
Takeshi Nishida
北九州市立大学国際環境工学部情報システム工学科
Department of Information Systems Engineering, Faculty of Environmental Engineering,
The University of Kitakyushu.
t-nishida@kitakyu-u.ac.jp

Keywords: smart factory, reversible automation, collaborative robot, AI

1. はじめに

現在、我々は世界中のありとあらゆる商品の性能や評価を瞬時にインターネットで入手し比較することができる。一方で、生産者はニーズの変化に迅速に 대응するために、製品の新規開発や品種の増加を競っている。そして、それを陰で支え、多品種生産を担っているのは多数の中小企業である。

多品種生産に 대응する生産現場では、受注ごとに編成される生産計画に従って、従業員が様々な工作機械や自動機を巧みに組み合わせながら「複数製品の混流製造」に取り組んでいる。特殊な機械の部品から日用品まで様々な物品がその対象であり、材料投入から製品出荷までの工程が流動的に変化しながら機能している。

中小企業におけるこのような生産方式は、製造量や品種の変更に対して高い適応能力を持つ一方で、少数の熟練作業員が出勤できないだけでも、その生産能力が大きく低下するという側面を持つ。近年の働き方改革やコロナ禍で、事業継続に対するぜい弱性が多くの生産現場で顕在化した。また、日本国内では製造業従事者数の減少が進行しており[METI 21, 中小企業庁 21], 作業員への依存度を下げる生産方式への転換や、中長期にわたる事業継続性の確保が喫緊の課題となっている[METI 21]。これらの課題に対して幅広い業種で自動化の検討が数多くなされているが、さまざまな困難が自動化を阻んでいる。

1.1. 多品種製造の自動化の壁

§ 導入検討と運用

自動機の導入のために、まず、対象工程の自動化の実現可能性や採算性について事前検討が実施される。品種や量の変更が頻繁に発生する生産工程では、採算性が低い・運用コストが高い・操作人員の不足、などが事前検討で露見し、それらの対策が計画できず、自動化が見送

られるケースが多い。また、産業用ロボットは周囲を安全柵で囲う必要があり、人間よりも広い領域を占有するため、人手で生産を実施している狭小な工場への自動機の導入が困難であることが露見するケースも多い。

自動機導入後の運用でも多くの課題が存在する。多品種変量生産工程では、サプライチェーンやエンジニアリングチェーンと連動して、生産品種変更や作業変更に合わせた自動機の再調整が頻繁に必要である。したがって、それらの再調整作業を短時間に実施する技能者の雇用と教育が必要になる。すなわち、従来の自動化方策は、大量生産の現場作業の工数を削減できたが、多品種製造では自動機のメンテナンス人材をより多く確保しなければならないことから、自動化によって省人化が達成されず、総合的に増員が必要になるケースが多い。

§ 費用

一般に、自動化には数年分の人件費に相当する高額な初期投資が必要である[METI 18a]。自動機のコモディティ化により、例えば協働ロボットの低価格化は急激に進んでいる[矢野経済研究所 21]。しかし、その導入のための初期費用において、設計費・製造組立費・搬送設置費・調整費などの技能費が全体の 30%~50% を占めるため[METI 18b]、自動機の低価格化だけでは導入費を圧縮できない。また、システムインテグレータも不足していることから、前述の技能費比率は増加傾向にある[METI 18c]。さらに、前述のように、自動機のランニングコストとして高度技能者の雇用や教育費用が必要になる。

§ 自動化の不可逆性

頻繁な作業変更を想定しない従来の自動化の導入では、生産工程のバランス、導入・運用コスト、運用人材の育成、経営戦略などに照らした中長期の検討を実施する。すなわち、従来の自動化は、製造利益が黒字化するまでの計画を立案し継続するという、大量生産を志向し

た不可逆な設備導入を伴うのが一般的である。それゆえ、予期せぬ生産変更への柔軟な対応が必要な中小企業では、自動化への取り組みの難易度が高い。

1.2. スマートファクトリー

ドイツ政府が 2011 年から推進している技術政策 Industrie 4.0 において、スマートファクトリーは多品種変量生産を大量生産の生産効率で実現する、目指すべき生産方式とされている [ITU 15]。これは、例えば固定的な生産ラインではなく、動的かつ有機的に再構成されるセル生産工程の集合で実現され、その目的は多品種生産と省人化を目指す中小企業の自動化の取り組みと合致する。その実現のための技術や規格が数多く提案されているが、前述のように、現在の中小企業の多品種生産方式とは大きな乖離がある[IAU 18]。したがって、究極と現状の中間にどのようなマイルストーンを設定するか、という問いに対する議論が必要である。

2. 頻繁な工程変更の自動化方策

中小企業の生産現場の自動化には、初期導入費だけでなく、自動機の動力費・消耗品の交換・調整などのメンテナンス費、操作者の人件費と教育費などが必要である。さらに、多品種生産工程では、生産品種変更のための工程変更の生産停止期間と調整工数への配慮が必要である。これらの状況を鑑みると、多品種製造工程の自動化には、工程変更にかかる費用と工数の圧縮が重要であることが見いだされる。また、中長期的には、人手による作業から自動化へのシームレスな移行が望まれる。そこで、工程に応じて作業者と自動機の速やかな置換が可能な可逆性のある自動化、リバーシブル・オートメーション (RA: reversible automation) を提案する (図 1)。

RA では、配置変更後に速やかに再調整を実施する機能や環境変化に適応する機能を有するロボットの利用を想定する*1。また、そのロボットには安全柵を必要としない安全性が求められる。他にも、コンパクトであること、異常停止から迅速に再起動できること、可能な限りケーブルが少ないことなどが重要な要素となる。

RA の移設容易性は、事前検討も容易にすることから、初期導入工数と費用の低減につながる。また、従業員の業務形態や従業員の変動に合わせた自動機の配置換えが可能であることから、事業継続性の向上にも貢献する。さらに、サプライチェーンやエンジニアリングチェーンとの連携の柔軟性も向上する。そして、RA に関する技術の洗練は、自動機の導入期間短縮など、大量生産や省人化などの他の自動化方策にも有用である。

一方でその実現のためには、RA の視点から新規に開

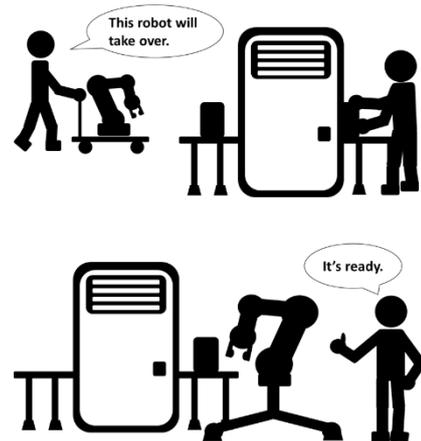


図 1 作業者とロボットが速やかに置換できる自動化、リバーシブル・オートメーションのイメージ。配置変更後の速やかな再調整機能や環境変化への適応機能を有するロボットの利用を想定する。工程変更や作業者不在への対応を可能とするだけでなく、現状の生産を継続しながら、将来的なスマートファクトリー移行への足掛かりを与える。

発しなければならない技術要素がいくつかある。そこで以下の 3 節では、特に重要な七つの技術要素、すなわち、協働ロボット、グリッパ、ケーブル籐装、三次元計測、動作計画、リスクアセスメント、無線通信に焦点を当てて現在の技術動向を概観し、今後開発が望まれる機能について述べる。さらに 4 節では、RA の運用に必要な機能のモジュール化や作業のパッケージ化について述べる。

3. RA に必要な技術

RA の実現のために新たに開発が必要になると考えられる技術要素を以下に列挙する。

3.1. 協働ロボット

協働ロボットは、汎用性のある作業能力、再プログラミングのための UI、作業者との協働が可能な安全性を有していることから、RA の実現に適していると考えられる。それらの運用のための要件は日本産業規格[JIS 15-1, JIS 15-2]に規定されており、あらかじめ決めたタスクに利用が限定されることや、作動中に必要な保護方策が実施可能でなければならないなどの制約がある。したがって、頻繁な移設や短時間での作業開始が求められる RA に協働ロボットを利用するためには、複数の作業に対する初期設定の簡便さや、複数の登録作業の切り替えや融合を行う機能[Tsuji 20]、移設に伴う位置ずれや環境変化に対する自動調整機能の搭載が重要である。また、RA 導

工程間搬送のための自律移動ロボットも RA の対象である。

*1 本論文では、部材のピックアンドブレースや加工機への材料の投入・回収、組立などの作業をするロボットを想定するが、

入後に作業者による生産性を維持するために、さらなる動作速度の向上と、それを実現するための安全性能の向上が望まれる。

3.2. グリッパ

RAによる多品種生産において、対象物（ワーク）を把持・搬送・設置するグリッパと呼ばれるエンドエフェクタの機能は非常に重要である。特に、ワークの形状や重量の変化に対する適応性能や、狭小領域に差し入れることができるようなコンパクトさへの要望は強く、数多くの研究がなされている[Watanabe 21]。また、製造工程における運用では、把持精度に加えて耐久性・メンテナンス性・価格に配慮が必要であることから、ワーク形状に適応する柔軟性と耐久性を併せ持つ樹脂を利用する安価なグリッパ[西田 19]の検討や、柔軟グリッパの把持状況をリアルタイムで推論手法の開発が重要である。

さらに、環境、ワーク、グリッパの関係性を理解し、倒す・押す・滑らせる・回転させる・掴むなどの様々な操作を組み合わせて実行するAIの開発が重要である。例えば、同一形状のワークであっても、それが納められた箱の中央部と隅では、同一の方策で把持できない場合がある。また、複数のグリッパの協調作業が必要な作業も多く存在する。これらの状況に対応するためのAIの研究として、例えば文献[Zhang 21]などがあるが、まだ多くはない。

3.3. ケーブル艦装

RAのロボットは、様々な場所で様々な作業を担当する可能性があるため、従来の産業用ロボットよりも各関節の可動域が広い協働ロボットの利用が適している。一方で、エンドエフェクタやケーブルが、その可動域に制限を課すことが無いよう配慮が必要である。いくつかのロボットは、可動域に影響を与えないように筐体内部に配線が可能であるが、製造時に筐体内部にケーブルを埋入するため、運用に伴う増減はできない。また、通信もしくは通電容量に制限があるため、ハンドアイカメラの信号や高出力のエンドエフェクタの動力を伝達するには、専用ケーブルを筐体外部に沿わせるケーブル艦装が必要になる。このとき、垂直多関節ロボットの動作は複雑であるため、ケーブルの屈曲や張力に配慮しながら、ロボット本体や環境と干渉しないように一定の弛みを持たせるケーブル艦装が必要である。一般に、ケーブル艦装の作業はロボットの動作テストと並行した試行錯誤の調整を必要とする。不適切な艦装は、ケーブル断線による生産ライン停止に繋がるため、その重要度が非常に高い一方で、様々な作業で用いられるロボットのあらゆる動作を妨げないような艦装の一般化や最適化は非常に困難である。現在まで、ケーブル艦装の自動化や支援技術はほとんど研究されていない。また、パスプランのためのAI手法は多く研究されているが、ケーブルの屈曲や張力を

評価関数で考慮できるアルゴリズムは見当たらない。これらの技術に関する研究開発の進捗が今後期待される。

3.4. 三次元計測

§ センサの配置

三次元計測センサは、ロボット周囲の状況の計測や対象物の認識、操作箇所計測、障害物回避などに重要な役割を果たす。

従来、三次元計測センサの配置には、図2に示すように、ハンドアイ方式、ロボットへの固定方式、環境への固定方式、動作が可能な環境への固定方式、センサとロボットが有線接続されている移動方式、独立した移動方式、などの選択肢がある。いずれの方式にも一長一短があり、例えばハンドアイ方式は、ロボットの移設に伴うセンサの校正（キャリブレーション）は不要であるが、センサのケーブル艦装が必要であること、計測の視野角が比較的狭いこと、ロボットの動作と計測が並列実行できないため作業が遅いこと、振動や汚染でセンサが頻繁に故障するなど、多くの課題を抱える。他の方策においても、特定の箇所に発生する計測の死角や、計測領域・空間分解能・センササイズ・価格などのバランスに対する配慮が必要であるなどの課題がある。したがって、様々な状況でのロボットの利用が考えられるRAでは、複合的なセンサシステムを構成する必要がある。

解決策の一つとして、作業に応じて複数のセンサを適切な場所に設置し、それらの計測を統合して利用するセンサレイシステムが考えられる(図3)。複数のセンサを任意に配置して統合することで、広い領域を計測する大型センサよりも、現場の状況に合わせて死角を低減する計測が可能になる。また、比較的安価にコンパクトなサイズの自動化システムを構成することができる。一方で、複数のセンサとロボットの位置関係を相互に自動的かつリアルタイムに共有する機能が必要になる。

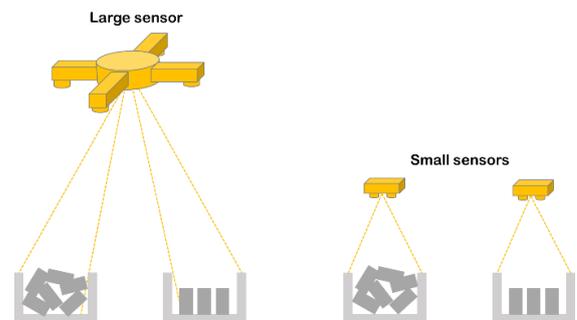


図3 広範な空間を高い分解能で計測する大型センサは、死角を低減するために対象から離れた箇所に設置しなければならず、全体のシステム構成が大型化する。また広い領域に対して高い空間分解能を実現するために高価になる。小型のセンサを複数配置できれば、死角を低減できると同時に、対象から近距離で計測できるため空間分解能を比較的高くすることができ、価格も安価に構成できる。

§ センサのキャリブレーション

RA では、環境・ロボット・センサの配置が頻繁に変化するため、それらの位置関係を十分な精度で速やかにキャリブレーションする機能が必要である。

生産現場でのセンサキャリブレーションは、内部キャリブレーション、外部キャリブレーションおよび環境キャリブレーションの三種類に大別できる。内部キャリブレーションではセンサの内部パラメータ、外部キャリブレーションでは参照座標系におけるセンサの姿勢を特定する。環境キャリブレーションでは、参照座標系に対する障害物や作業領域を登録する。

従来内部および外部キャリブレーションは、チェッカーボードや三次元反射マーカなどの特殊マーカの利用が一般的であるが、RA ではロボットの移設先の様々な作業環境へそれらを配置する必要が生ずる。しかし、マーカの隠れに対する配慮や位置ずれに対する再調整が運用の問題になることが容易に想像される。したがって、RA の実現のために、様々な対象の三次元姿勢を推論する AI 技術の活用や、ロボットと生産現場のデジタルツインを利用するマーカレスなキャリブレーション手法の開発が必要である[Ninomiya 18]。また、ロボットの動作範囲内にあつて移動しない設備や稼働する機械、作業ごとに入れ替わる箱、進入禁止領域など、多様な属性の対象が存在するため、環境キャリブレーションでは、生産に関わる多様な知識と組み合わせ、環境に存在する物体の属性の速やかな推論を実施する技術の開発が重要である。

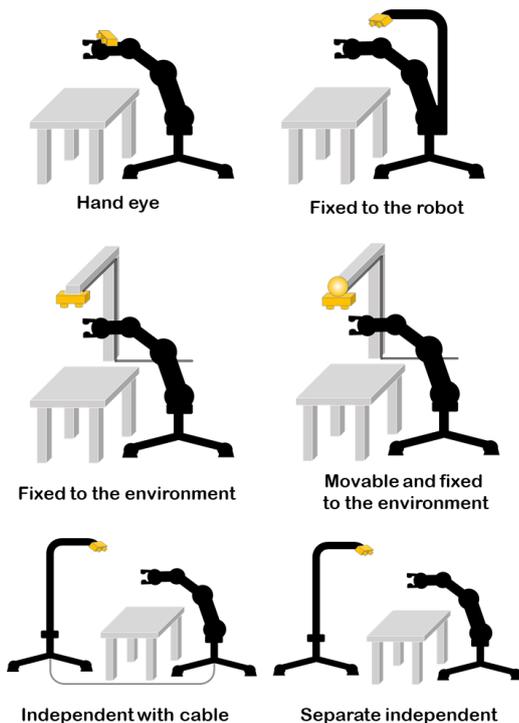


図2 センサとロボットの配置の組み合わせの例

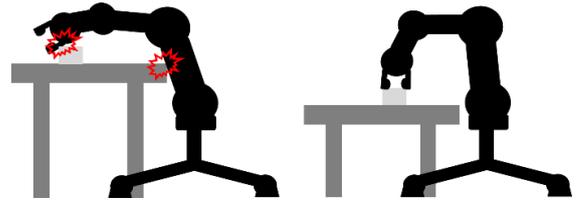


図4 垂直多関節ロボットは設置位置によって、作業平面に対する作業可能領域が変化する。

§ 三次元地図の構成

三次元地図は、障害物の回避、対象との相対距離の計測、操作対象の検査、作業の成否の確認、作業精度の計測、周囲の人の作業内容の認識など、ロボットの種々の機能において重要である。

様々な三次元地図の構成方法があるが、生産現場には更新の頻度や属性が異なる三次元空間情報が多数存在することから、自動運転の研究領域で利用されるダイナミックマップ（例えば[今井 18]）の応用が有効であると考えられる。これは四種類のレイヤーから構成され、変化の頻度が最も低い静的情報は通路や構造物、数時間で変化する準静的情報は交通規制、数分単位で変化する準動的情報は事故や渋滞情報、数秒以内に変化する動的情報は対向車や歩行者を表現する。対象の更新頻度や属性に応じて三次元地図の構成を区別できるため、ロボットの記憶容量や計算量を大幅に節約できる。一方で、ロボットは自動車とは異なり、対象と接触して操作するため、対象物を表現するレイヤーをさらに追加して管理する必要がある。

さらに、ダイナミックマップを RA で利用するためには、レイヤーごとの環境の情報の検出や、所与の三次元地図との差分検出機能、対象の属性の推論機能などが必要である。さらに、オクルージョン領域の予測、透明物体、光沢物体、漆黒物体などの素材の認識機能、ケーブルの三次元計測も重要である。様々な状況が発生しうる生産現場でのこれらの機能の運用のためには、汎化性能の高い AI 技術の応用が重要であると考えられる。

3.5. 動作計画

従来、設備設計の段階でロボットの作業領域が定められるが、移設可能な RA のロボットには、移設後の状況における所与の作業の達成可能の判定機能が必要である。例えば図4に示すように、垂直多関節ロボットは、設置位置によって作業可能な領域が変化する。環境の三次元地図があれば、エンドエフェクタのアプローチ姿勢などの制約を付加したパスプランニングによって、作業可能な領域を求めることができる。しかし、作業領域を探索するパスプランは一般的に計算コストが高いため、RA の運用では、過去の作業環境や作業内容を記録する機能や、現在の状況と照合して類似する作業内容を検索して

利用する機能の開発が求められる。これまでも、パスプランの保存[Barbić 18]や深層学習による高速化の試み[Barbić 19]があり、AIを用いたさらなる技術開発が待たれる。

一方で、すべての作業に共通して利用できるパスプランを構築することは難しく、また、作業に合わせて適切にアルゴリズムを選択し変更することは容易ではない。そこで、協働ロボットに搭載されたダイレクトティーチング機能などとも連携し、パスプランの調整の自由度と最適化をバランスさせる機能の開発が重要である。また同時に、ユーザにパスプランを表示し、その修正や承認作業を容易に実施できる GUI も非常に重要である。その他にも、作業工程に沿った状態遷移グラフの自動生成機能、操作物体の姿勢変化や落下が生じた場合の瞬時のパス変更手法、作業達成の確認機能、作業失敗時のリカバリー動作の自動生成機能、異常停止から初期状態への自動復帰機能、要求される安全性に応じた動作の自動調整機能など、多数の新しい機能の開発が期待される。

3.6. リスクアセスメント

RA では、ロボットの移設後に速やかに作業を開始するために、短時間でリスクアセスメントを実施する必要がある。また、製造ラインは様々な要因で停止することがあるため、非常停止状態からの安全な復旧を短時間で実施する機能も重要である。例えば、自律的な機能を有するロボットのエンドエフェクタと把持対象物の周囲環境への接触などのリスクアセスメントには、前述の三次元地図と動作計画手法が応用できる。また、それらの作業において、ユーザによる操作や安全確認を支援する GUI の開発が重要である。

3.7. 無線通信

RA のためのロボットが移設後に他の機器と速やかに連動するためには、各設備の制御機器や PLC、クラウドシステムと通信する機能が必要になる。ロボットの頻繁な配置換えが発生する RA では、準備時間が短い無線による通信が望ましい[ITU 15]。ここでは、RA の視点から特に注目される無線通信技術について概観する。

§ 第 5 世代移動通信システム

近年、高速大容量・高信頼低遅延・同時多接続が要件として定義されている第 5 世代移動通信システム (5G) の産業応用に期待が寄せられている。すでに、自動車部品製造工場での産業用ロボットシステムの遠隔操作に対する 5G の有用性が示されており[横田 20]、現在では、さらに広いロボット技術への展開が数多く検討されている[FFPA 21]。また、5G の産業応用規格の拡張は現在も進行しており、その利用によって従来とは異なる自動化方策の実現が可能になると予想されている[5GIA 21]。各ロボットにおけるエッジコンピューティングを想定する場

合にも、前述のように、RA では三次元地図や動作計画など大量の情報通信が必要になることが見込まれることから、中央制御コンピュータとの 5G 通信の重要性は高い。一方で、生産ラインでの安定した運用のためには、5G 通信による確実な非常停止方式、通信遮断時の自動停止・復旧機能などの開発が必要である。

§ デジタルツインの活用

大量かつ低遅延の情報通信が実現すると、シミュレータにおける生産工程のリアルタイム再現、すなわちデジタルツインの利用が可能になる。適切にモデル化された工程では、センサで直接計測できない領域や物理量の推定が可能になる。さらに、事前・事後の動作シミュレーションや、操作者に対する GUI の提供、安全管理など、各種の重要な機能を構築できる。RA のロボットに搭載されるであろう AI も、デジタルツイン内での事前学習が可能になる[Honda 20]。これらより、生産現場のデジタルツインの構築は RA のために重要である。

4. RA 技術の展開

§ 機能のモジュール化

RA のために今後開発が必要になると見込まれる各種機能は、環境への迅速な適応のための機能と、それらを安定して運用するための機能に大別できる。柔軟なグリッパやセンサのキャリブレーションと環境計測、ケーブルの最適構築、通信の無線化などは前者のための機能である。また、動作パターンの生成・照合・連結やリスクアセスメントの迅速化などは、後者のための機能である。

最終的には、これらの機能のすべてが自動化されることが望まれるが、それらの実現や洗練を待たずに導入を可能にするのが RA の狙いである。したがって、上述した新しく開発される各種機能は、単独での利用が可能であると同時に、他の機能と組み合わせて利用できるようにモジュール化されることが望まれる。さらに、それらに対して、単体テストやアップデートが実施できること、組み合わせに自由度があること、各モジュールが相補的であることなども重要である。各メーカーで互換性があることや規格化されることも、それらの普及に重要である。

§ 作業のパッケージ化

協働ロボットの利用には事前のリスクアセスメントが必要であることから、RA では、従事する可能性のある作業に対して、ロボットの動作を事前登録する必要がある。ここで、事前登録するロボットの一連の動作を作業パッケージと呼ぶことにする。ロボットの移設後は、適切な作業パッケージを読み出し、環境に適応させて所望の作業を速やかに実施することになる。複数のロボットで RA を実施する場合には、各種の作業パッケージを一元管理し、ロボット間で共有するシステムが必要になる。

このような機能の実現のためには、各種作業のパッケージのテンプレート化やデータベース化の手法の開発が必要である。また、作業パッケージの接続機能を充実させることで、複数の作業の接続や繰り返しなど、より複雑で工数の多い作業の自動化が容易になると考えられる。さらに、それらのパッケージがメーカーやユーザを超えて共有されれば、RAの導入をさらに簡易化できる。

5. おわりに

次世代工場「スマートファクトリー」の実現を志向する可逆な自動化、リバーシブル・オートメーション(RA)を提案した。また、従来の自動機や産業用ロボットは特定の作業での利用を想定するが、RAでは、それらの利用目的を迅速かつ柔軟に変化させることが前提となり、その実現のために、新しく開発が必要な技術要素があることを述べた。

多種多様の生産工程に共通するRAの構築は困難であるため、今後は、状況に応じてモジュール化された機能が順次追加され、それらがユーザやメーカーを超えて共有される展開が望まれる。また、利益に直接的な影響が薄い作業、例えばスピードが遅くてもよい夜間作業や、バックヤード作業から運用を開始し、RAの運用のノウハウが蓄積されるのが望ましい。その際には、工場内物流のための搬送用ロボットとの連携も重要になる。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [5GIA 21] The 5G Infrastructure Public Private Partnership: *The European 5G Annual Journal 2021* (2021)
- [Barbié 18] Barbié, T., Kabutan, R., Tanaka, R., Nishida, T.: Gaussian Mixture Spline Trajectory: Learning from a Dataset, Generating Trajectories Without One, *Advanced Robotics*, Vol. 32, Issue 10, pp. 547-558 (2018)
- [Barbié 19] Barbié, T., Nishio, T., Nishida, T.: Trajectory Prediction with a Conditional Variational Autoencoder, *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 31, No. 3, pp. 493-499 (2019)
- [中小企業庁 21] 中小企業庁, 令和2年度中小企業白書, 第1部 第1章, p.1-49 (2021)
- [FFPA 21] Flexible Factory Partner Alliance : 5Gによる無線通信の進化がもたらす未来の工場〜ニューノーマル時代における製造現場のデジタル化とAI, IoTへの期待〜, *ゴジションペーパー* (2021)
- [Hermann 16] Hermann, M., Pentek, T., Otto B.,: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, *Proc. of 49th Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 3928-3937, doi: 10.1109/HICSS.2016.488 (2016)
- [Honda 20] Honda, S., Nishida, T.: Six Degree-of-Freedom Object Recognition Using Point Cloud with 3D-CNN Learning in Cyberspace, *Proc. of 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 469-473 (2020)
- [Hornung 13] Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W.: OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees, *Auton Robot*, Vol. 34, pp. 189-206 (2013)
- [IAU 18] インダストリアル・グローバルユニオン日本加盟組織協議会 : インダストリー4.0への挑戦 新たな対策を求めて, *コンポーズ・ユニ* (2018)
- [今井 18] 今井 龍一, 谷口 寿俊, 山田 実典: 自動運転用地図・ダイナミックマップ及び道路基盤地図情報の相互変換手法に関する研究, *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, 74 巻, 2号, p. I_90-I_101 (2018)
- [ITU 15] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015) IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, *Electronic Publication*, Geneva (2015)
- [JIS 15-1] JIS B 8433-1:2015 (2015)
- [JIS 15-2] JIS B 8433-2:2015 (2015)
- [METI 18a] 経済産業省, 日本ロボット工業会: ロボット導入実証事業 事例紹介ハンドブック 2018 (2018)
- [METI 18b] 経済産業省, 日本ロボット工業会: ここが知りたい! ロボットの基礎知識 はじめてのロボット導入にまつわる疑問に答えるパンフレット (2018)
- [METI 18c] 経済産業省, 日本ロボット工業会: ロボット導入促進のためのシステムインテグレータ育成事業 事例紹介ハンドブック 2018 (2018)
- [METI 21] 経済産業省, ものづくり白書 (2021)
- [Ninomiya 18] Ninomiya, T., Arita, Y., Tanaka, R., Nishida, T., Giannoccaro, N. I.: Automatic Calibration of Industrial Robot and 3D Sensors using Real-Time Simulator, *Proc. of ICT-ROBOT*, TA2.3, Sep. 6-89 (2018)
- [西田 19] 西田 健: 産業用ロボットのためのソフトグリッパ, *日本ロボット学会誌*, pp.42-45, Vol.37, No.1 (2019)
- [Tsuji 20] Tsuji, T., Yamanobe, N., Ikeda, K., Harada, K.: User Interface and Motion Planner for Task Database, *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, vol. 6, no. 4, pp. 258-261 (2020)
- [Watanabe 21] Watanabe, T., Morino, K., Aasama, Y., Nishitani, S., Toshima, R.: Variable-Grasping-Mode Gripper with Different Finger Structures for Grasping Small-Sized Items, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 5673-5680 (2021)
- [矢野経済研究所 21] 矢野経済研究所: 2021年版 協働ロボット市場の現状と将来展望 (2021)
- [横田 20] 横田, 本田, 山福, 西田, 池永, 森, 松永, 丸山, 吉田, 長田: 産業用ロボット制御への第5世代移動通信システムの適用, *電気学会論文誌D*, Vol. 140, No. 4 (2020)
- [Zhang 21] Zhang, A., Koyama, K., Wan, W., Harada, K.: Manipulation Planning for Large Objects through Pivoting, Tumbling and Regrasping, *Applied Sciences Special Issue on Advanced in Industrial Robotics and Intelligent Systems*, 11(19), 9103 (2021)

著 者 紹 介



西田 健 (非会員)

2002年九州工業大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年より九州工業大学工学部機械知能工学科助手。2013年より九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学科研究系准教授。2018年LORIA研究所客員研究員, サレント大学客員研究員。2019年KiQ Robotics(株)取締役。2020年九州工業大学オープンイノベーション推進機構特任教授。2021年Nishida Lab代表。2022年北九州市立大学国際環境工学部情報システム工学科教授。ロボットハンド, 確率システム制御, ニューラルネットワーク, 屋外自律移動ロボット, 三次元計測などに関する研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, ロボット学会の会員。主な著書に「実用ロボット開発のためのROSプログラミング」(森北出版, 2018年)など。