

物流倉庫内作業を自動化する智能化ロボットの制御システム

Intelligent Robot Control System Automating Logistics Warehouse Picking Tasks

澤 和秀 SAWA Kazuhide 岡 佳史 OKA Yoshifumi 古茂田 和馬 KOMODA Kazuma

近年、物流分野では、eコマース(電子商取引)の利用拡大に伴う業務の複雑化への対応や人手不足による労働者の負担増大の軽減が課題となっている。ピッキング作業についても自動化のニーズが高まっているが、高速性に加えて、扱う物品の多様な変化に対応することも要求され、自動化の普及を妨げている。

東芝グループは、倉庫内の機器を管理・制御する上位のITシステムである倉庫運用管理システム(WES: Warehouse Execution System)と智能化ピッキングロボットを連携させることでピッキング作業を自動化する、智能化ロボット制御システムを開発した。ロボットや周辺機器への指示を高速性と複雑な処理の必要性に応じて階層化した制御ループに振り分けることで、多種多様な物品のピッキング作業での高いスループットや長時間連続運用が実現できることを実験で確認した。

In recent years, the logistics sector has faced ever more complex challenges in line with growing use of e-commerce (electronic commerce) and dealing with lightening the increasing workload of laborers due to manpower shortages. Despite the growing need for automated picking tasks, several factors hinder widespread adoption in this regard, such as demand for greater speed and the need for systems to be able to handle a wide range of changing items.

The Toshiba Group has developed an intelligent robot control system that automates picking tasks by linking to the warehouse execution system (WES), a high-level information technology (IT) system that manages and controls devices in the warehouse. In a test, we confirmed that the system was able to assign instructions to robots and peripheral devices into hierarchical control loops depending on the necessity for speed and complex processing to achieve high throughput and long-term continuous operation for picking a wide variety of items.

1. まえがき

eコマースの利用拡大に伴う物流業務の複雑化や人手不足に伴う労働者の負担増大が問題となっており、物流倉庫内作業の自動化に対するニーズが高まっている。近年、入庫から出荷までの物流倉庫内作業のうち、物品の搬送や保管については移動ロボットや自動倉庫、仕分けについてはソーターによって自動化が進んでいる。一方、保管場所から必要な物品を取り出すピッキング作業は、物流倉庫運用コストの約55%を占める⁽¹⁾といわれているが、ロボットによる自動化が十分に普及していない。この原因は主に二つある。その一つは、単位時間当たりに処理できる物品の個数であるスループットを上げるためには、高速な処理が必要なことである。もう一つは、物流倉庫では、商品入れ替えやパッケージ変更などが頻繁に発生するため、多様でかつ変更されていく物品を扱う必要があることである。スループットの向上のためには処理の高速性が、変化の多い環境で長時間の連続運用を実現するためには、高い複雑性に対応して複合的な判断による制御を行う性能(以下、複雑処理性と略記)がそれぞれ必要であるが、両者はトレードオフ関係にある。

これに対し、東芝グループは、倉庫内の機器を管理・制御する上位のITシステムである倉庫運用管理システム(WES: Warehouse Execution System)と智能化ピッキングロボット(以下、ピッキングロボットと略記)⁽²⁾を連携させて、ピッキング作業を自動化する智能化ロボット制御システム(以下、ピッキングシステムと略記)を開発した。このシステムでは、処理の高速性と複雑処理性を両立させるために、ピッキングロボットや周辺機器への指示を階層化する複数の制御ループを構成した。これにより、多種多様な物品のピッキング作業において、現場で要求される高いスループットや長時間の連続運用が実現できる。

ここでは、このように物流倉庫内のピッキング作業の自動化を実現するピッキングシステムの詳細について述べる。2章ではその概要について、3章では高速性と複雑処理性の両立を実現するためのサイバーフィジカルシステム(CPS: Cyber Physical Systems)を構成する3層の制御ループについて、4章では各制御層の技術の詳細について述べる。

2. ピッキングシステムの概要

開発したピッキングシステム(図1(a))は、WESのピッキン

業務管理、倉庫制御システム(WCS: Warehouse Control System)、及びピッキングステーションで構成される。

WESの機能の一つであるピッキング業務管理は、物流倉庫のピッキング作業において、ピッキングする物品と数量を指定する明細実行指示の中から、ピッキングロボットが処理可能と判断するものを振り分ける処理を行う。WCSは、WESからの明細実行指示を受けてピッキングステーションを制御し、実行結果をWESに通知する。ピッキングステーションは、ピッキングロボットと検品ユニットで構成され、物品の数量を確認して取り出して置くという作業員一人による一連の作業に相当する処理を自動化する。

ピッキングステーションの詳細な基本構成を図1(b)に示す。ピッキングロボットは、産業用の6軸垂直多関節型ロボットアームの先端に、対象物品に合わせて真空吸着と挟み込みの把持方式の切り替えが可能なハイブリッドハンドを搭載している。保管箱に入っている物品は、ロボットアーム上方に設置されたカラーカメラ及び3次元カメラで認識される。保管箱は、保管箱搬送コンベヤーで搬入・搬出される。保管箱に入っている物品は一つずつ取り出すごとに検品ユニットで重量検品した後、ピッキング済み物品搬送コンベヤーで搬出される。

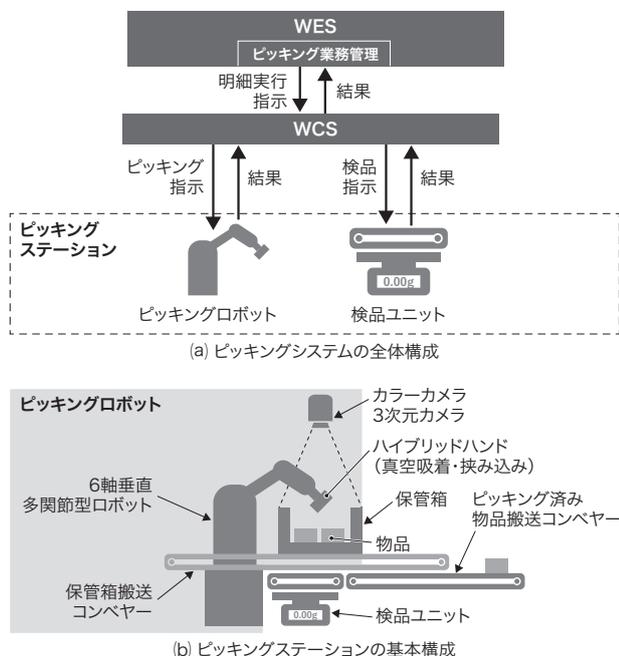


図1. ピッキングシステムの全体構成とピッキングステーションの基本構成

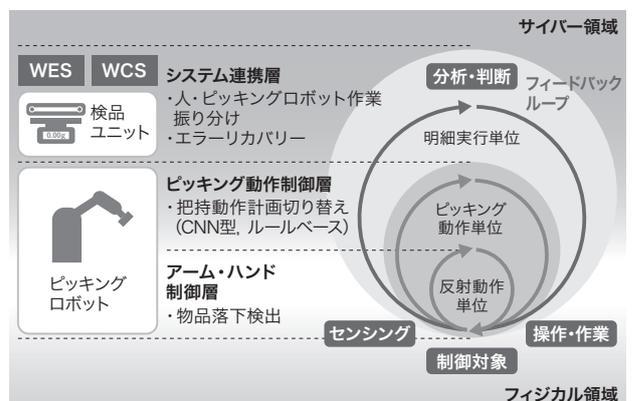
上位システムであるWES及びWCSからの指示に基づいて、ピッキングステーションでは、作業員一人に相当する一連の処理が自動実行される。

Overall picking system configuration and basic picking station configuration

3. CPSを構成する3層の制御ループ

ピッキングシステムにおけるCPSは、スループットの向上と長時間連続運用を実現するため、制御システム全体として、制御対象をセンシングし、分析や判断を実施して、対象の操作や作業を実行するフィードバックループを構成している(図2)。制御システムの構成においては、対象の操作や作業における制御の速さと処理の複雑さに基づき、制御機能を割り当てた。例えば、人が実施するピッキング作業を分析すると、はじめに、誰がどの物品を何個ピッキングするかを指示される。次に、人は保管箱を見て取り出す物品を選択し、取り出す順番や方法を考える。最後に実際の取り出し動作では、手先の感覚を利用して物品を丁寧につかみ、取り出す。これらの動作は、大きく分けて三つに分類される。一つ目は、物品を落としそうになったことを感じてとっさに手の動きを止めるといった、単純ではあるが、センサー入力から動作までを短時間で処理する必要が求められる動作である。二つ目は、物品の形状や置かれ方によってどのような順番で取り出すかを判断するといった、物品を取り出す動作ごとにその場での判断が求められる動作である。三つ目は、作業の進捗や人の熟練度によって、どの物品のピッキング作業を誰に指示するかを判断するように、時間的な制約は緩いが、作業進捗や熟練度の情報を複合的に判断するなど処理が複雑な動作である。

開発したピッキングシステムでは、これら三つの動作をアーム・ハンド制御層、ピッキング動作制御層、システム連携層の3層の制御ループで実行する。アーム・ハンド制



CNN: Convolutional Neural Network

図2. ピッキングシステムのCPSを構成する制御ループ

CPSを構成する制御システム全体を、三つの制御層に分類し、高速性と複雑処理性を層ごとに最適化した制御ループでピッキング処理を実行した。

Control loop that comprises the picking system cyber physical systems (CPS)

御層は直接物品を扱うハイブリッドハンドやロボットアームを制御する。物品の把持失敗や落下の検出に必要なセンシングと、それに基づいた高速な操作を行うため、高速性優先の制御ループを構成する。ピッキング動作制御層は、ハンドでの物のつかみ方など、どのようにハンドやアームを動作させるべきかを動作前に計画しており、ピッキング動作における、保管箱から物品を取り出して置くまでの制御を行う。複雑な計画処理が必要で計算に時間が掛かることから、短時間化するために、高速性と複雑処理性をバランスした制御ループを構成する。システム連携層は、ピッキングの明細実行単位で、人とピッキングロボットの作業振り分けやエラーリカバリーを行い、長時間連続運用が可能なシステムを実現する。時間制約が緩い一方、人とピッキングロボットの作業進捗とスループットや対応範囲を考慮した複合的で複雑な判断が必要であるため、複雑処理性を優先した制御ループを構成する。

このような階層構造を意識した制御システムの構成により、各制御層に最適な処理の高速性や複雑処理性を追求することで、ピッキングロボットの各モジュールがピッキングシステム全体のスループットの向上と長時間連続運用を実現できる。

4. 各制御層における技術の詳細

4.1 高速性優先のアーム・ハンド制御層

アーム・ハンド制御層では、物品の把持失敗や落下を短時間に検出して把持動作を再実行できるように、高速性優先の制御ループを構築した。落下の検出が遅いと、その間に手先が大きく移動してしまうため、把持動作の再実行に掛かる時間が長くなり、反射動作ができない。落下を短時間で検出することで、把持動作の再実行によるピッキング成功の可能性が高まる。それでもピッキング動作が継続できない場合には上位の制御層に状況を通知して、落下などのエラーに対処する。この仕組みを実現するため、ハイブリッドハンドに搭載したハンド専用のコントローラーが、ハンドに搭載したセンサー情報を基に落下を検出する技術を開発した⁽³⁾。図3に示すように、真空吸着方式のハンドでは吸着パッド内に搭載した負圧センサーで圧力を監視し、しきい値を下回れば物品の落下を検出する。挟み込み方式ではハンドを閉じる方向に把持力を発生させておき、ハンド幅がしきい値を下回れば物品の落下を検出する。ハンド幅の条件だけでは薄い物品を把持した場合に落下の誤検出が発生するため、ハンドに搭載した透過センサーが物体を検出していれば落下していないとみなす。この技術により、コントローラーの制御周期である10 ms単位での落下検出が可能であ

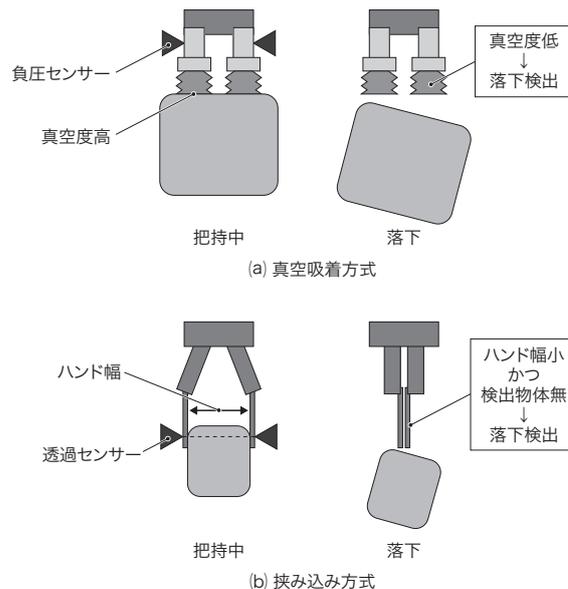


図3. ハイブリッドハンドにおける落下検出のメカニズム

対象物品に合わせた把持方式の選択を可能とするために、真空吸着と挟み込みの2方式において物品の落下を検出する技術を開発した。

Hybrid hand drop detection mechanism

る。例えば把持した直後に落下させた場合には、手先の引き上げ動作中に落下を検出し、把持動作を再実行できる。

開発した技術の検出精度を示す例として、箱形状や円筒形など形状の異なる16種類の物品に対して把持実験を行った。その結果、落下発生数120回に対し、検出率99.2%で落下の検出ができることを確認した。

4.2 高速性と複雑処理性をバランスさせたピッキング動作制御層

ピッキング動作制御層では、多種多様な物品を素早くピッキングする動作が求められることから、高速性と複雑処理性をバランスする制御ループを構築した。この制御を実現するために、認識情報を基にハイブリッドハンドの位置と姿勢（以下、把持点と略記）を短時間で算出し、把持の成功率を高くする把持動作の計画技術を開発した^{(4), (5)}。

この技術は図4に示すように、深層学習(CNN: Convolutional Neural Network)型把持動作計画及びルールベース把持動作計画と呼ばれる2種類のエンジンで構成される。CNN型把持動作計画は、ピッキング時の保管箱内画像における把持点の特徴を学習し、特徴を予測の手掛かりにすることで高速な把持点推論が可能となる。ルールベース把持動作計画は、多種多様な物品のピッキングの仕方を専門家が事前にルール化することで、複雑な状況であっても把持点を計算でき、スループット500個/h相当⁽⁶⁾を確認している。開発した把持動作計画技術は、物品に応じて判

定器が、計画処理に高速性のあるCNN型把持動作計画と、複雑性のある状況に対応したルールベース把持動作計画を切り替えることで、高速性と複雑処理性のバランスを実現したものであり、ハイブリッドAI把持動作計画技術と呼んでいる。

開発したこの技術によるスループットと把持成功率を示す例として、形状の異なる6種類の物品に対して合計30回のピッキング実験を行った。その結果、4種類をCNN型把持動作計画に、残りの2種類をルールベース把持動作計画に切り替えることで、スループット702個/h、把持成功率100%であることを確認した。

4.3 複雑処理性優先のシステム連携層

システム連携層は、ピッキング業務全体を制御し、長時間連続運用を可能にする。そのために、人とピッキングロ

ボットの作業振り分けや、連続運用の妨げとなる、物品の落下や数量による誤りを検知してエラーリカバリーを行う。

アーム・ハンド制御層で物品の落下などのエラーが発生した場合、人が物品を回収するまで一時的に業務が停止してしまい、長時間連続運用による自動化を実現できない。また、取り出したと把握している数量と実際の数量に差異が発生した場合、出荷数や在庫情報の誤りの原因となり修正に追加の作業が発生する。開発したピッキングシステムでは、ピッキング作業振り分け機能と、アーム・ハンド制御層とピッキング動作制御層のエラーに対処するエラーリカバリー機能によって長時間連続運用を実現する。

ピッキングシステムにおける、ピッキングと検品の流れを図5に示す。人とピッキングロボットの作業振り分けは、複合的で複雑な判断に基づいており、WESのピッキング業務管理が作業進捗、スループット、事前登録された物品属性情報(物品のサイズ、重量、変形しやすさなど、物品ごとに設定される情報)を用いて、ピッキング業務全体のスループットや対応範囲を考慮して作業振り分けを行う。ピッキングロボットの作業中に物品の落下などエラーが検知された場合や、検品ユニットで、数量違いなどが検出された場合、WCSはピッキング失敗リストを生成し、WESに通知するとともに、ピッキングロボットに次の作業指示を送る。WESでは、ピッキング失敗リストを以降の作業振り分けに利用し、ピッキングロボットの対応範囲を超えないように判断を見直しながら作業振り分けが行えるようにする。これにより、ピッキングシステムはピッキング作業を止めることなく長時間の連続運用を行うことができる。

開発したエラーリカバリー機能の効果を示す例として、模擬的にエラーを発生させた場合のリカバリー動作を確認する

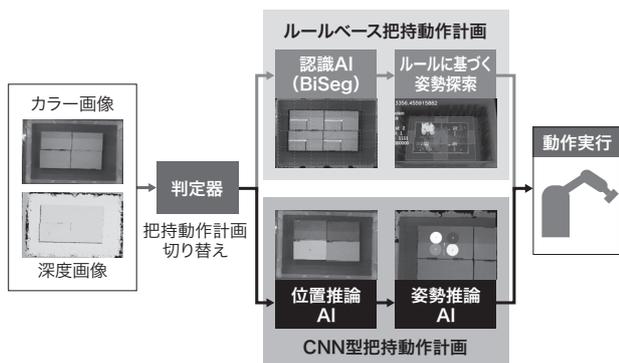


図4. ハイブリッドAI把持動作計画技術の概要

物品に応じて判定器が二つの把持動作計画を切り替えることで、高速性と複雑処理性のバランスを実現した。

Hybrid AI grasp operation planning

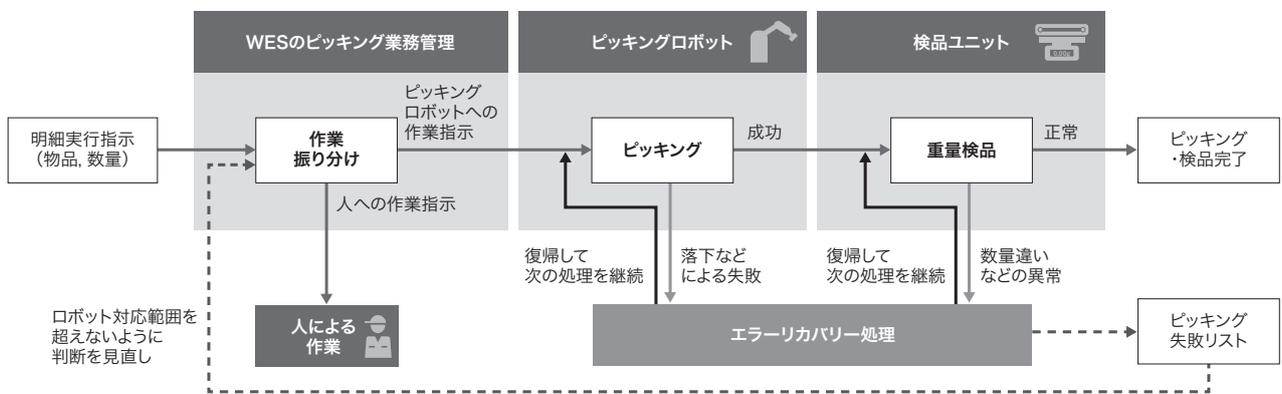


図5. ピッキング作業と検品作業の流れ

ピッキング失敗リストは、WESへ通知され、以降の作業振り分けでピッキングロボットの対応範囲を超えないように判断を見直すことに利用される。

Picking and inspection process

実験を行った。ロボットの対応範囲を超えたものを含む5種類の物品を用いて模擬的にエラーを90回発生させたところ、成功率100%を確認した。

5. あとがき

ピッキングシステムのCPSを構成する三つの制御層において、高速性を優先した落下検出技術、高速性と複雑処理性をバランスさせたハイブリッドAI把持動作計画技術、複雑処理性を優先した作業振り分け技術とエラーリカバリー技術を開発し、ピッキングシステムのスループットの向上と長時間連続運用を可能にした。今後は、製品化に向けて完成度を高め、物流倉庫の自動化に貢献していく。

文 献

- (1) Bartholdi III, J. J.; Hackman, S. T. WAREHOUSE & DISTRIBUTION SCIENCE Release 0.98.1 Warehouse Science. 2019, 337p. <<https://www.warehouse-science.com/book/editions/wh-sci-0.98.1.pdf>>, (accessed 2023-09-01).
- (2) 小川昭人, ほか. 物流現場の省力化や効率化に貢献するピッキングロボット・荷積みロボット. 東芝レビュー. 2019, **74**, 4, p.20-24. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/04/74_04pdf/a06.pdf>, (参照 2023-09-01).
- (3) 岡 佳史. 状況変化に応じた動作で多様な物品のピッキングを実現するロボット計画制御技術. 東芝レビュー. 2023, **78**, 4, p.54-55. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2023/04/r01.pdf>>, (参照 2023-09-01).
- (4) 古茂田和馬, ほか. “規則ベースおよびCNN型学習に基づくハイブリッドAI把持計画の開発”. 第23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. 千葉, 2022-12, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門. 2022, 2A2-A10.
- (5) Jiang, P. et al. “Development of a Two-Stage Neural Network to Infer 6-D Graspable Pose for a Multiple-suction-cup Gripper”. 第41回 日本ロボット学会学術講演会. 仙台, 2023-09, 日本ロボット学会. 2023, 1F3-04.
- (6) 小川昭人, ほか. 多様な物品の処理で物流現場の自動化に貢献する知能化ピッキングロボット. 東芝レビュー. 2021, **76**, 6, p.51-54. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2021/06/f06.pdf>>, (参照 2023-09-01).



澤 和秀 SAWA Kazuhide
生産技術センター 業務プロセス変革推進領域
ロボット・自動化技術研究部
日本ロボット学会会員
Robot and Automation Technology Research Dept.



岡 佳史 OKA Yoshifumi
生産技術センター 業務プロセス変革推進領域
ロボット・自動化技術研究部
日本機械学会・日本ロボット学会会員
Robot and Automation Technology Research Dept.



古茂田 和馬 KOMODA Kazuma, Ph.D.
生産技術センター 業務プロセス変革推進領域 ロボット・自動化技術研究部
博士(工学) IEEE・日本ロボット学会・日本機械学会・計測自動
制御学会・人工知能学会会員
Robot and Automation Technology Research Dept.