# 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

Picking Robots and Palletizing Robots Contributing to Labor Saving and Efficient Operation of Physical Distribution Centers

小川 昭人 OGAWA Akihito 牛山 隆文 USHIYAMA Takafumi 江原 浩二 EHARA Koji

近年、物流分野では、eコマース(電子商取引)の普及に伴って多種多様な商品が大量に取り引きされるようになり、物流センターの建設投資が拡大している。しかし、大量の物品の仕分けや箱詰めなどの多くは人手に頼っており、人手不足が顕在化していることから、ロボットによる現場作業の自動化に期待が集まっている。

東芝インフラシステムズ(株)は、物流センターの省力化・全自動化の要求に応え、荷降ろしロボットの製品化に続き、ピッキングロボット・荷積みロボットを開発した。これらのロボットは、センサー情報による状況認識、動作計画の生成、動作実行のサイクルを行うCPS (サイバーフィジカルシステム)で構成され、様々な物品が行き交う物流現場で、扱う物品や状況を自律的に判断して適切な作業を遂行できる。また、これらロボット群を、エッジコンピューティング端末として倉庫統合制御システム(TWCS: Total Warehouse Control System)につなげることで上位のCPSを構成し、物流センター全体を効率化する。

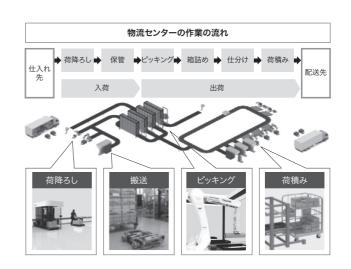
In the logistics business field, there is a strong need for investments in the construction of physical distribution centers due to the rapid expansion in sales of large volumes of various types of products worldwide through electric commerce. As most of the work at distribution sites, such as processes for sorting and packing, is still dependent on human resources, demand for the introduction of automated processes using robots has been increasing in order to solve a critical labor shortage.

To meet customers' requirements for labor-saving or totally automated physical distribution centers, Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has developed a picking robot and a palletizing robot following its previous launching of a depalletizing robot. These robots are cyberphysical systems (CPS) that can autonomously judge the on-site situation and perform appropriate work on various objects by repeating a cycle of recognizing the surrounding conditions based on sensor information, generating an operation plan, and executing the operation. Furthermore, through the connection of these robots as edge computing devices to a total warehouse control system (TWCS), this high-level CPS can be expected to realize efficient supervision of the entire site.

## 1. まえがき

eコマースの発達が、多種多様な商品の国境を越えた大量取引を実現し、世界経済の成長を牽引(けんいん)している。ものの流通を支えるため、物流インフラの中心施設である、物流センターへの建設投資も拡大している。しかし、物流センターに運ばれた大量の物品を、仕分けて箱詰めするといった現場作業の多くは、人手で行われている。労働力不足が顕在化している現在では、AI技術やロボットを活用した省力化や生産性向上が求められている。

物流センターにおける物品処理作業の概要を、**図1**に示す。物流センターでは、多方面から仕入れされた荷物が荷降ろしされ、自動倉庫に保管される。その後、注文に従って、ピッキングや箱詰めが行われ、配送先ごとに仕分けられて荷積みされ、出荷が完了する。これらの工程間のコンベヤーによる搬送や、自動倉庫による保管、ソーターによる仕



#### 図1. 物流センターでの物品処理作業の概要

搬送や、保管、仕分けは自動化が進んでいるが、荷降ろしや、ピッキング、 荷積みなどは、いまだに人手による作業が主流であり、ロボットによる自動 化を図っている。

Outline of physical distribution business operations in distribution center

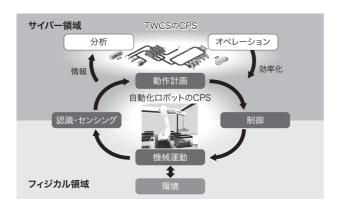
分けなどは、自動化が進んでいる。一方で、仕入れ荷物の コンベヤーへの荷降ろしや、保管箱からのピッキング、台車 への荷積みなどは、いまだに人手による作業が主流である。

東芝インフラシステムズ(株)は、これらの入出荷作業の完全自動化を目指し、それぞれの用途に適したロボットの開発を進めてきた。既に製品化された荷降ろしロボット(1)は、重量物を高速に扱えることが特長である。荷積みロボットも、同じく重量物を扱えるのに加え、荷物の大きさに合わせ、緻密で効率的な荷積みができる。ピッキングロボットは、現場ごとの多種多様な物品を、緻密に優しく扱えるという特長がある。これらのロボットは、東芝ロボットリファレンスアーキテクチャーをベースに、東芝グループの強みである認識技術や把持・制御技術を組み込んで、対象となる作業に合わせてカスタマイズされている。この結果、それぞれが独自の特長を持つロボットを、短期間で開発することが可能となった。

ここでは、自動化ロボットを具現化し、物流センターの効率化を実現する基盤となるCPSについて述べる。また、開発したピッキングロボットや荷積みロボットについて、それぞれの詳細を説明する。

# 2. 物流センターを効率化するCPS

物流センターを効率化する自動化システムには、二つの階層で構成された CPS が必要となる (図2)。第1の階層が、作業を自動化するためのロボットを構成する CPS であり、第2の階層が、複数ロボットの連携による効率的な処理を実現する TWCS (Total Warehouse Control System: 倉庫統合制御システム)を構成する CPS である。ここで、ロボットの役割は、実作業の自動化にとどまらない。 TWCS を構成



#### 図2. 物流センターを効率化するCPS

物流センターの自動化システムは、作業を自動化するためのロボットの CPS、及び複数ロボットの連携で効率的な処理を実現するTWCSのCPS、 の二つの階層で構成される。

CPS for robots and TWCS to improve efficiency of automated physical distribution businesses

するCPSにおいては、フィジカル領域の情報収集や実作業を担うエッジコンピューティング端末として機能することで、物流センター全体の効率化にも貢献する。

## 2.1 自動化ロボットを構成するCPS

現場で求められるものは、実際に人に代わって働くことができる自動化機器である。このような機器として、"はやく"、"やさしく"、"緻密に"働くロボットの実現を目指した。ここで、はやくとは、現場への導入が早いことや、処理速度が速いことを意味し、やさしくとは、ロボットの誤動作による物品や施設の破損を防ぐ優しい動きや、簡単な指示で利用できるといった易しいインターフェースなどを意味する。また、緻密にとは、大小様々な形状の物品を隙間なく箱詰めするなど、現場の高い要求に応える高度な処理機能を意味している。これらの機能がそろうことで、物流センターの経営者や、現場担当者、エンドユーザーなどの多くの関係者が満足する自動化が実現できると考える。

このようなロボットの自律的な処理機能は、図2に示すように、認識・センシング、動作計画、制御、機械運動の各要素が連動したCPSによって実現される。したがって、高い性能を実現するには、認識や制御などの各要素の性能向上だけでなく、サイバー領域とフィジカル領域の相互連携を強化する技術開発が重要となる。

例えば、動作計画の一つに把持計画がある。把持計画は、ロボットハンドを用いて、様々な物体をいかにつかむか、という把持の動作を計画する技術である。計画技術の開発では、サイバー領域における数理最適化や機械学習などの技術に注目が集まる。一方、把持計画は、実際に動くロボットの動作を決めるためのものなので、扱う物品や、ロボットハンドの特性、機械運動などのフィジカル領域の現象を理解する解析技術、物理モデリングといった技術や経験が欠かせない。3章及び4章で述べる、緻密な把持やローディングなどの計画技術は、これら両領域の融合によって実現されている。

## 2.2 ロボット統合管理システムを構成するCPS

物流現場では、ロボットは単体で機能しているわけではなく、様々な特徴を持った複数のロボットや機器が並行して動いている。したがって、物流センター全体の処理能力を向上させるには、どのロボットや機器にどの物品を処理させるのかなど、判断を迅速に下していくことが重要なポイントになる。そこで東芝グループは、東芝IoTリファレンスアーキテクチャー<sup>(2)</sup>をベースとして、複数のロボットを統合して管理するためのCPSとしてTWCSの開発に着手している。TWCSでは、図2に示すように、処理対象とする物品の形状データや、多種のロボットによる作業の結果など、フィジカル領域

の現場情報をロボットが収集する。そして、サイバー領域で の情報分析に基づいた、複数ロボットの統合的なオペレー ションによって物流センター全体の効率化を目指す。

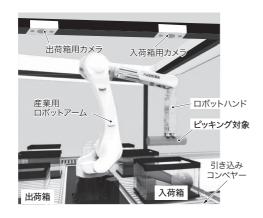
## 3. ピッキングロボット

## 3.1 ピッキングロボットの概要

開発したロボットの基本構成を、図3に示す。産業用ロ ボットアームを中心に、アームに接続されたロボットハンド、 アーム下部に引き込みコンベヤーがある。また、上方に入 荷箱と出荷箱を撮影するカメラが、それぞれ配置されてい る。ロボットとコンベヤーは、それらを制御する電装系及び コントローラーに接続されている。ピッキング作業時には、 まず、入荷箱にある物品をカメラで撮影する。次に、物体 認識と計画処理により、ロボットハンドが周囲に触れず安全 に対象を把持するための動作を計画し、対象物を把持する。 そして, 出荷箱への効率良い箱詰め動作を計画し, 箱詰め する。開発したロボットは、産業用ロボットのパワーを生か した速い動きに加え、三つの特長的な機能として、多種多 様な物品を緻密に扱う把持機能、優しく扱うための力覚制 御を用いた箱詰め機能 (この特集のp.12-15参照), ロボッ トハンド切り替え機能を備えている。

## 3.2 多種多様な物品を緻密に扱う把持機能

物流現場での多種多様な物品を扱うため、複数の吸着 パッドを備えた独自のロボットハンドと把持計画を開発した。 把持計画の特長は、パッドの切り替えやハンド関節による 姿勢の冗長性を利用し、狭小空間でもハンドが周囲にぶつ からない把持姿勢を算出可能なことである。図4に示すよう に、大きな物品は複数のパッドで、小さな物品は一つのパッ ドで、曲面のある物品に対しては曲率が小さい部分を把持



## 図3. ピッキングロボットの基本構成

産業用ロボットのパワーを生かした速い動きで、多様な物品を緻密に優しく 扱うことができる。

Basic configuration of picking robot

することで、安定した把持を実現している。

## 3.3 力覚制御を用いた箱詰め機能

物流では、箱詰めの密度が輸送効率に直結するため、よ り多くの物品を出荷箱に詰め込む必要がある。開発した箱 詰め動作計画では、出荷箱の状態と箱詰めする物品の情報





(a) 小物把持

(b) 円筒把持





(c) 大物把持

(d) 衝突回避姿勢

#### 図4. 物品の大きさや形状に合わせた把持姿勢の制御機能

複数の吸着パッドを備えたロボットハンドを巧みに制御することで、ばら積み された大小様々な物品を確実に把持できる。

Gripping posture control functions corresponding to size and shape of objects





(a) 力覚制御による押し当てなし (b) 力覚制御による押し当てあり

#### 図5. 力覚制御を用いた箱詰め機能の効果

出荷箱への箱詰めの際に、力覚制御で丁寧に物品の押し当てを行うことで、 物品同士が密着した箱詰めを効率的に実現できる。

Improvement of bin packing function using force control







重量物用ハンドモデル

(a) 切り替え機能

(b) コントローラー内の ロボットハンドモデル

### 図6. ロボットハンド切り替え機能

切り替え機能により、物流現場の多様な大きさや形状の物品に対応できる。 Robot hand changing function

から、荷崩れしにくく、かつ多くの物品を詰め込める可能性が高い箱詰め位置を算出する。そして、実際の箱詰め動作では、ロボットハンドに組み込まれた力覚センサーでロボットハンドに掛かる力を計測し、物品に許容される比較的小さな力で物品を押し当てる。この力覚制御を用いた箱詰め機能により、物品を優しく丁寧に扱いながら、物品同士を密着させた、より効率的な箱詰めが実現できる(図5)。

## 3.4 ロボットハンド切り替え機能

物流現場では、取扱物品の大きさや形状が頻繁に変化するため、1種類のロボットハンドで全ての物品を処理することは難しい。そこで、図6に示すロボットハンド切り替え機能を開発した。切り替え時には、ハードウェアであるロボットハンドだけでなく、コントローラー内のロボットハンドモデルも切り替えることで、それぞれのハンドに適した動作計画が実行される。

## 4. 荷積みロボット

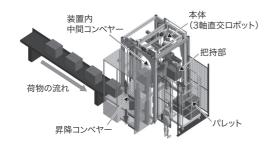
## 4.1 荷積みロボットの概要

荷積み処理の基本的な流れは、①荷物を取り込んでサイズや質量を測定し、荷積み位置と経路を計画する工程、②ハンドで把持する位置まで荷物を高速に搬送する工程、③計画に従い荷物を把持してパレットに荷積みする工程、から成る。開発した荷積みロボットは、図7に示すように、3軸直交ロボットを採用している。6軸垂直多関節ロボットに比べて現場での設置面積を小さくでき、更に、前述の三つの工程を独立に制御して並列に処理することで、高スループットを実現している。以下では、高積載率を実現するための要素技術を順に説明する。

## 4.2 荷物サイズとパレット積載状態の認識技術

荷積みロボットでは、荷物サイズ計測やパレット積載状態の取得に認識技術を用いている。

荷物サイズ計測では、コスト低減のために、カラーカメラ



### 図7. 荷積みロボットの構成

本体の3軸直交ロボットと、昇降コンベヤー、把持部の三つのモジュールで 構成されている。

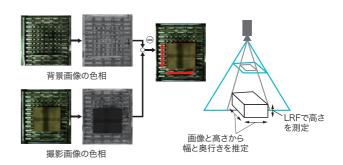
Configuration of palletizing robot

とLRF (Laser Range Finder)を用いる方式を開発した。 LRFでスキャンして測定した荷物の高さに、上面から撮影した画像データとカメラ位置を合わせ、幅と奥行きを推定する (図8)。

パレット積載状態の取得では、3D (3次元) カメラでパレットを上から撮影して距離画像や3D点群データからパレット 積載状態を取得し、図9に示すように、ボクセルデータやポリゴンデータの形式で出力する。また、スループットを向上させるため、カラー画像による簡易的な荷崩れ判定機能を試作した。図9に示すように、カラー画像の前フレームとの差分を取ることで、時間が掛かる距離画像や3D点群データの生成処理を待たずに、荷崩れのおそれがある領域を高速に判定している。

### 4.3 荷積み位置と経路の計画技術

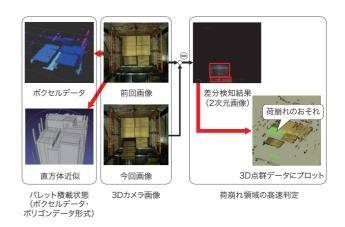
荷積みロボットにおける計画技術は、特に、対象荷物の情報(サイズや荷物群の存在比率)を考慮した箱詰め計画。



## 図8. 荷物サイズ計測処理

LRFで高さを測定し、その高さと、カラーカメラで撮影した画像データ、カメラ位置から幅と奥行きを推定することで、荷物のサイズを計測する。

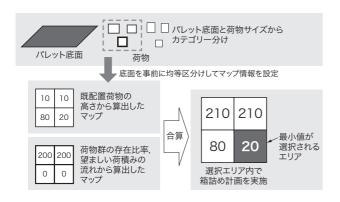
 $\label{thm:measurement} \mbox{Measurement of package size using color camera and laser range finder (LRF)}$ 



## 図9. パレット積載状態取得処理と荷崩れ判定機能

3Dカメラの撮影画像から、パレットに積まれた荷物の積載状態を推定する。 また、カラー画像の前フレームとの差分検知により荷崩れを判定する。

Package collapse judgment function using pallet loading information



#### 図10. 箱詰め計画技術

パレットの底面形状と荷物サイズの情報を比較して、パレット底面を事前にエリア分けし、最適なエリアに箱詰めを行う。

Packing plan creation technique

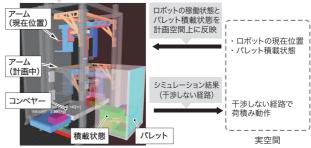
荷積み経路を算出するローディング計画,経路上の干渉を シミュレーター上で事前確認して衝突を回避する動作計画, の三つの技術に特長がある。

箱詰め計画では、図10に示すように、パレットの底面形状と対象荷物サイズを比較してパレット上に置くエリアの分割と荷物のカテゴリー分けを行い、エリアのマップ情報に基づいて配置エリアを選択するアルゴリズムを開発した。マップ情報は、"既配置荷物の高さから算出した値"、及び"荷物群の存在比率と望ましい荷積みの流れから算出した値"を合算して決定している。

ローディング計画では、荷積みする荷物のサイズとパレット積載状態を箱詰め計画に渡し、出力された荷積み位置から荷積み経路を算出する。このとき、高スループットを実現するために荷積み処理を並列化すると、前の荷物の荷積みが完了する前に次の荷物の荷積み位置と経路を計画することになる。しかしこの場合、パレット積載状態に前の荷物で計画した荷積み位置は反映されていない。そこで、パレット積載状態と前の荷物で計画した荷積み位置を一括で管理し、この情報を箱詰め計画に渡すことで、次の荷物の計画を可能にした。

ロボットの衝突回避としては、干渉物との接近をセンサーで検知する方法があるが、高速に動かすと制動距離が長くなり、干渉を検知しても止まり切れずに衝突するおそれがある。そこで、動作計画では図11に示すように、CADを基に構築したロボットモデルに加え、ロボットの稼働状態とパレット積載状態を計画空間上に反映したシミュレーション環境を構築した。この空間内で、ローディング計画から出力された荷積み経路に従いロボットモデルを動かすことで、実機を動かす前に経路上の干渉を確認することができる。この結果に基づいて、干渉がない経路で実機を動かすことで、高

#### シミュレーション環境(経路上の干渉を確認)



ロボットモデルと計画空間

#### 図11. 衝突を回避する動作計画技術

パレット積載状態を反映した計画空間上で動作をシミュレートすることで, 衝突を回避しながら物品を動かす経路を決定できる。

Motion planning technique to avoid collisions

速かつ衝突を回避する動作を実現した。

## 5. あとがき

物流現場の省力化に貢献する、自動化ロボット群とTWCS の構想について述べた。また、開発した自動化ロボットとして、ピッキングロボットと荷積みロボットについて説明した。

今後も、これらのシステムの商品化を通して、物流現場 の自動化・効率化の実現に貢献していく。

## 文 献

- (1) 小川昭人, 村上 厚. 物流施設向け 自動荷降ろしロボット技術. 東芝レビュー. 2015, **70**, 4, p.22-25.
- (2) 山本 宏. 次世代CPSの実現と東芝IoTリファレンスアーキテクチャー 〜変身する東芝・世界に挑戦する東芝〜、2018年度技術戦略説明会、 東芝、2018、20p、<a href="https://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/pr/pdf/tpr20181122\_2.pdf">https://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/pr/pdf/tpr20181122\_2.pdf</a>。(参照 2019-03-28).



小川 昭人 OGAWA Akihito 研究開発本部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー Mechanical Systems Lab.



牛山 隆文 USHIYAMA Takafumi 東芝インフラシステムズ (株) 小向事業所 SA 設計第三部 Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



江原 浩二 EHARA Koji 東芝インフラシステムズ(株) 小向事業所 Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.