

## 論文・報告

# ロボットを駆動部とした 軽作業パッケージシステムの試作

Trial Development of Lightweight Work Package System using Robot

星野 由紀子 \*1  
HOSHINO Yukiko

齊藤 壘 \*2  
SAITO Tsutomu

吉田 啓睦 \*3  
YOSHIDA Hiromu

チャンドラ ハディ \*4  
TJANDRA Hadi

川端 健太郎 \*5  
KAWABATA Kentaro

立山 義祐 \*6  
TATEYAMA Yoshisuke

労働力不足の中小事業所への導入を目指して、ロボットを駆動部とした軽作業パッケージシステムを試作し、その生産速度からコストを試算した。

中小事業所は多品種少量生産が多く、労働単価を上げることで人手を確保しているのが現状である。多品種少量生産に対応できる作業システムとして、ロボットを利用したシステムの導入は、ロボットの価格が障壁となっている。現状のロボットが、多品種少量生産の対象作業に対して、過剰に高性能であり、必要十分な性能に抑えても作業は実施可能という仮説を我々は立てた。

提供する軽作業として今回は、飲料缶のギフト箱詰め作業を対象とすることにした。駆動部としてのロボットは、軽作業が実施できるよう想定・設計した小型軽量な双腕ロボットを試作した。当該ロボットを駆動部とする飲料缶箱詰め作業パッケージシステムを試作し、目的の作業が達成できることを確認した。また、その生産速度を計測し、人件費に換算すると2年間で約430万円相当の作業を提供できると試算した。

キーワード：ロボットの実応用、作業ロボット、双腕ロボット、軽作業

## 1. はじめに

少子高齢化に伴う労働力不足という喫緊の課題の解決策の一つとして、ロボットの活用が有望だと考えられる。しかし現在の日本においては、特に人手が不足している中小事業所での、ロボットの導入が進んでいないのが現状である<sup>1),2),3)</sup>。一般にビジネスで作業ロボットを導入するためには、①必要な作業性を持つこと、②費用を極力抑えられること、の2点が非常に重要になる。

本研究開発で解決したい課題は、日本の中小事業所で問題となっている人手不足の解消である。そのため、中小事業所で導入できる、ロボットを駆動部とした軽作業パッケージシステムの実現を目指した。本研究開発において試作した軽作業パッケージの全景を写真1に、駆動部である小型軽量双腕ロボット単体の全景を写真2に示す。

### (1) 専用生産機械と多品種少量生産の不整合

物理的な作業を提供するシステムを作業システムと呼ぶことにする。作業システムの典型的な例は大量生産システムで、とある品種の製品を高速かつ大量に生産する専用機械である。少品種の製品を大量に販売するビジネスで採用するならば、生産効率も高いので、導入コストを

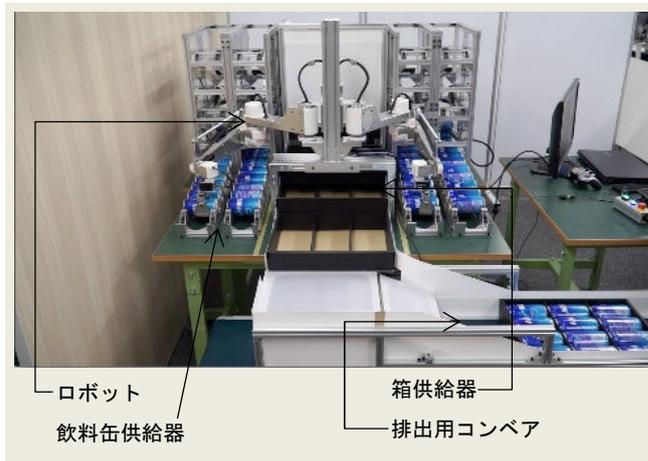


写真1 試作したロボット軽作業パッケージシステムの全景



写真2 試作した小型軽量双腕ロボット単体の全景

\*1 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 主幹

\*2 カワダロボティクス㈱ 技師

\*3 カワダロボティクス㈱ 技師補

\*4 川田テクノロジーズ㈱基盤技術研究室

\*5 カワダロボティクス㈱営業部営業課

\*6 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 主幹

回収できる。しかし専用生産機械は、他の種類の製品を生産するようシステムを変更・再利用することは難しい。一方で、中小事業所で取り扱う生産は、多品種を少量生産する案件が多く、海外生産ではコストが見合わない、専用生産システムでは導入コストの回収が困難、結局、労働単価を上げることで人手を集め、国内で生産することになっているのが現状である。

## (2) ロボットを駆動部とした作業システム

作業システムの中心的な駆動部としてロボットを採用し、その当該ロボットを共通部品として、他の複数種類の作業システムにも活用することができれば、個々の対象作業に対して専用作業機械を個別に実現していくよりも、作業システムメーカーの開発費・開発期間が抑えられ、結果的に中小事業所の導入コストも抑えられると考えられる。

しかし現状の作業ロボットは高価である。それらは高性能であり、1本の腕に駆動自由度を6以上持たせ、位置決め精度も1mm以下であるのが普通である。対象となる軽作業は、もう少し性能を抑えても、十分実施できるのではないかと考えた。ただ、ある程度の種類の作業を実施できる設計にはしたい。

中小事業所向け作業システムの需要と、ロボットとしての実現可能性の間のマッチングは未知であり、トライアンドエラーを繰り返して、需要自体の掘り起こしと共にロボットの仕様を煮詰めていく必要がある。

我々としては、まずは軽作業ができるロボットの仕様を策定してから、需要のある軽作業が実施できることを実証していくことを考えた。

今回試作した軽作業ロボットの仕様としては、2本の腕を持たせ、駆動自由度を必要最小限とし、数cmという比較的粗い位置決め精度を許容することで、原価と設置面積を抑えることとした。ロボット本体に加え周辺機器や動作データまで含めたオールインワンで提供できる形で、導入コストも作業に見合うようなロボットパッケージシステムを試作した。

## 2. ロボットパッケージシステム

現存する産業用ロボットは、汎用性を高めるためにロボット本体が高い自由度・高い精度を持ち、中小事業所が必要とする作業性(①)を十分に確保している。

ロボット導入の際にかかるコスト(②)は、(I)ロボット本体コスト、(II)ハンドや周辺機器の設計・製作コスト、(III)ロボットの動作作成(以下、ティーチング)コストからなる。ロボット本体の他に、作業に適したハンドと周辺機器が必要であり、これらの設計と製作が必要になる。そしてそれらを用いて作業を行うためにロボットのティーチングが必要になる。

一般的にロボット技術者がいない企業では、ロボット導入時に外部のシステムインテグレータに依頼することになるためロボット本体以外の(II)と(III)のコストが大きくなる。

現在、市場にあるロボットシステムを分析してみると、導入コストが大きいものがほとんどであり、「導入したい作業に対して作業性と導入コストが見合うロボットが存在しない」ことがわかる。

ここで、(I)のロボット本体コストに注目すると、近年、売価の安い高性能ロボットアームを中国企業等が販売しており、これらは単腕6軸のものが多く、汎用性を持つように設計されている。しかし、これらを使って作業を行うためには、先の(II)と(III)のコストが必要となるため、中小事業所ではロボット単体の売価は安くてもシステムインテグレータへのコストが加算されてトータルでは高い値段になることが多い。

以上のように、①作業性と②導入コストのバランスを満たすロボットはなかなか存在しない。そこで、今回、中小事業所もロボットを導入できるように、ロボットの導入目的を限定した「ロボットパッケージシステム」を検討することにした。

「ロボットパッケージシステム」とは、ロボット本体、ハンド、周辺機器および作業の動作データを一つにしたものである。

中小事業所が必要とする作業に対応した、ロボットパッケージシステムを構築することで、ロボット本体も最適化しコストを下げるのが可能と考えた。

## 3. ターゲットとする軽作業

中小事業所における作業のうち、特に飲料缶のギフト箱詰め作業を最初の軽作業として設定した。この作業を目標とした理由として、(i)飲料缶のギフト箱詰め作業は多品種少量生産であること、(ii)主なワークである飲料缶は大きさ・形・重さが統一されていること、また(iii)箱詰め作業の動作が他の作業にも対応し易いことがあげられる。

(i)のギフトの箱詰めなどは、トップシーズンには短期間にたくさんの労力を必要とするため、昨今の人手不足の課題に適している。(ii)のように取り扱うワークの大きさが規格化されていることで、関節アクチュエータの出力と軸構成を最適化し、ハンドの設計やワークの供給機構・排出機構を固定できるため、コストダウンを検討し易い。そして(iii)の様にティーチング作業の転用を考慮して、最初の検証には飲料缶の箱詰め作業が適していると考えた。

具体的には、350mlの飲料缶を12本、4本の缶を3段につめるギフトセットの箱詰め作業を目標作業とする。

ロボットが扱うワークである 350ml の飲料缶のサイズは直径 66.0mm 高さ 122.2mm の円柱であり、ギフトセットのバリエーションを考慮して 500ml の飲料缶(高さ 167mm)まで持てるようにペイロード等は設定を行う。

箱詰め作業は、(1)箱を箱詰め作業領域にセットする、(2)中に入れる飲料缶を供給元からとり、箱に入れる、(3)飲料缶を詰め終わった箱をコンベアに排出する、の 3 点からなる。

飲料缶の箱詰め作業に対する目標コストは、その作業を実施する際の人件費を目安としつつ、1人と1パッケージシステムを比するのではなく、ライン全体のロボットと人手の合計を計算した際にロボットにかけることが可能な導入コストをその作業に対する適切なコストとして設定した。本作業はパートタイマーが行うことが多いため、その作業に対する価値としては、パートタイマーの人件費と比べることが妥当である。そこで今回は、目標導入コストがパートタイマーの人件費 2 年分程度の価格帯になるところにおいた。

この具体的な作業に対して、箱詰め作業の動作実現方法も考慮した上で、本体と周辺機器を試作し、実証実験により仮説が成り立つかを検証した。

#### 4. 軽作業向けロボットの設計方針

本節では軽作業向けロボットの具体的な設計方針について述べる。

今回、ロボットパッケージシステムを設計するにあたり、作業者の置き換えと、ある程度の箱詰めバリエーションに対応することを想定して、双腕ロボットをプラットフォームとした。ただし、双腕ロボットは、対象作業カテゴリを飲料缶箱詰め作業に限定することで、ロボットが実現すべき動作や性能を必要十分なスペックに抑え小型軽量化を目指した。

今回製作したロボットの作業性の設定として、TCP (Tool Center Point)での位置決め精度を 2cm 程度、作業領域は A3 紙サイズ (297×420mm) 程度、ペイロードは 550g 程度とした。

一般にロボット設計時の設定として、位置決め精度を高く、ペイロード・TCP の移動速度・作業領域を大きくすると、ロボットとしては、線形ではなく指数関数的にサイズが大きくなり、重量も重くなり、結果的にコストも高くなってしまふ。TCP 位置決め精度を高くしようとすると、リンクフレームの剛性を上げる必要が生じ、リンクフレーム自体の重量が重くなり、慣性モーメントも大きくなる。リンクの慣性モーメントが大きくなれば、関節アクチュエータの出力も大きくせざるを得ず、アクチュエータと減速機も重くならざるを得なくなる。そして出力の大きなアクチュエータを制御する電気系統も大がかりなもの

となり、それらを納めるボックスも大きなものとなる。また、このような高出力アクチュエータを持つロボットの安全対策は、低出力アクチュエータで構成されるロボットに比べると、飛躍的に難しいものとなりがちである。よって、コストと作業性のバランスがとれたロボットの実現には設計時の設定が非常に重要となる。今回製作したロボットの設定を以下に詳述する。

通常のハンドの TCP での負荷時繰返し位置決め精度は、組立作業等でサブミリメートル級の精度が要求される。しかし、今回の飲料缶の箱詰め作業においては、飲料缶を箱に入れる際に、外箱に当てながら入れることで、位置決め精度を 2cm 程度とした。

ここでの位置決め精度とは、目的のペイロード質量(ここでは 550g 程度)以下のワークを TCP で把持した状態での繰返し位置決め精度と定義した。関節での角度決め精度としては、 $1.0 \times 10^{-6}$  (rad) 程度の性能を持たせるが、リンクフレームのたわみを許容することで、TCP での位置決め精度が 2cm 程度となっている。

システムインテグレーション後に実行される作業では、各動作においてワーク・重量・速度パターンは毎回一定になるとみなすことができ、そのペイロード・加速度を固定した場合の繰返し位置決め精度は理論上  $1 \mu\text{m}$  以下となり、目標とする作業は実現できると仮定した。

人との置換えを想定した場合、設置場所の広さが限られるため、できる限りサイズの・重量的にコンパクトなロボットの方がよい。

さらに、飲料缶の箱詰め作業に必要なロボットの動作を、周辺装置と併せて検討することで、ロボットの軸構成も最低限の自由度に下げることを目指した。

このように、ロボットパッケージシステムとして、作業台にコンパクトにセットして使えるようなロボットを目指すことで、各軸を小型でシンプルなコントローラで制御するようにシステムを設計した。

#### 5. 小型軽量双腕ロボットの設計・試作

4 節であげた方針に基づき、小型軽量双腕ロボットを設計・試作した。

##### (1) 全体設計

写真 3 に試作したロボット本体<sup>4)</sup>を示す。双腕を持ち、全長 530mm (机上の高さ)、重さ約 14kg である。自由度数は左右のアームをあわせて 8 である。その先に開閉自由度を持つハンド<sup>5)</sup>がつく。

全体的にコントローラも含めてコンパクトになることに重点を置いた。モータ等もターゲットとする 500ml の缶やペットボトルに見合うもので、大きすぎない適切な出力のモータを選定した。これにより、電源もコンパクト

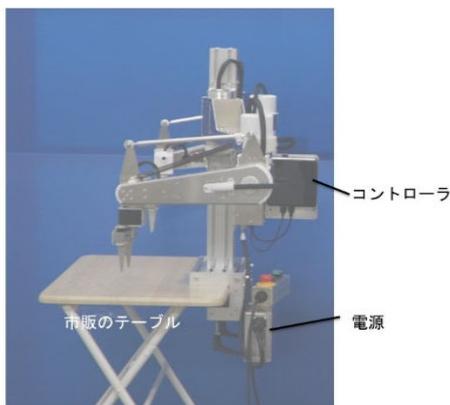
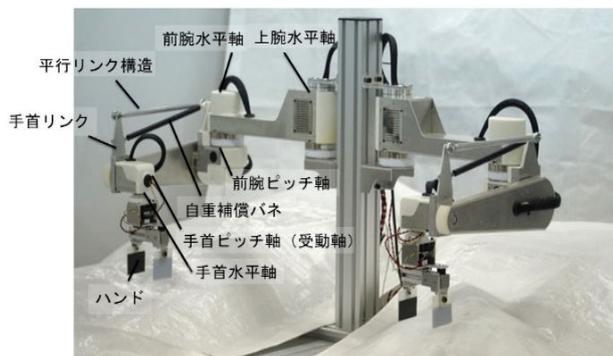


写真3 小型双腕ロボット全体構成

トにすることができた。

フレームやリンク機構を設計する際に、井上<sup>6)</sup>の設計方針を参考にした。この論文にある、「板金加工を用いること」、「平行リンクを利用すること」を取り入れ、さらに動力ユニット、手先の機構、自由度構成等は独自に開発し、小型軽量化と作業性を併せ持つロボットにした。

またロボットの制御コントローラは、ソフトウェアも併せて過度な汎用性は排除して必要最小限とし、省電力小型コンピュータで処理できる構成にしている。電源もコントローラも小型化しており、通常の産業用ロボット等で必要となる大きなコントローラや台座が必要ないため、コンパクトで設置場所を選ばない形状になっている。

さらに、ロボットのリンク構成にバリエーションを作りやすいようにアクチュエータと駆動回路、減速機を一体化した関節モジュールとリンクフレームの組み合わせでアームを構成した。これにより、アームの各リンクの長さや自由度構成を自由に決めることができ、部品の共通化でコストを下げる事が可能となった。

**(2) コストダウンと作業性を両立するための工夫**

**a) アクチュエータ出力の抑制と部品共通化**

図1にロボットアームの模式図を示す。この図に示すようにばねとリンク機構を持ち、自重補償できるような仕組みにしている。自重補償を行うことで、ロボットアーム自体の重さのある程度支えることができ、先端にある

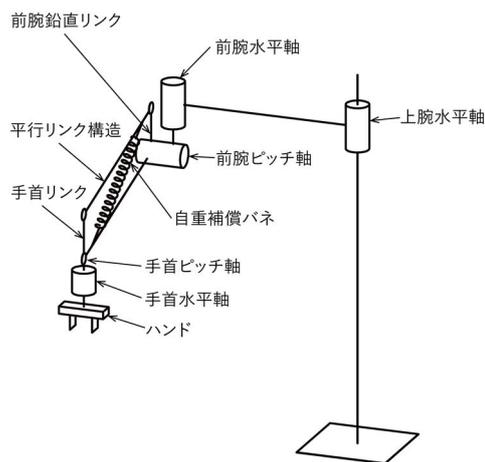


図1 自重補償機構を持つアーム模式

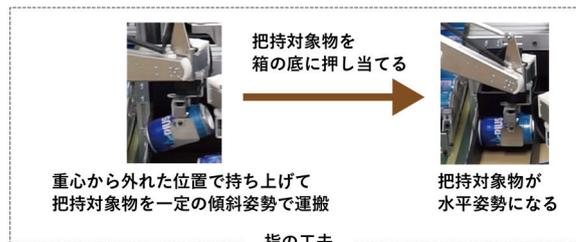
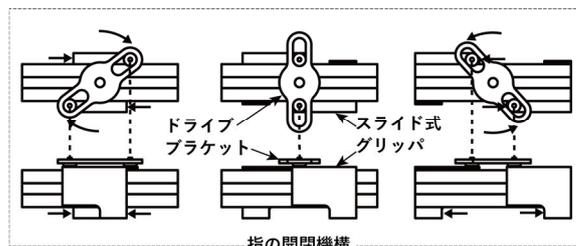
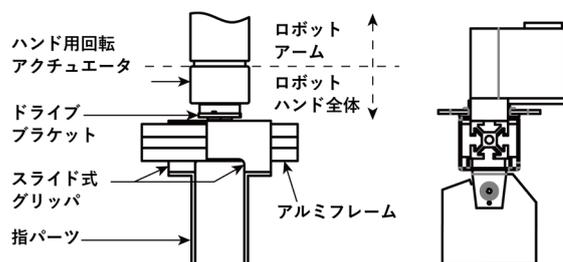


図2 コンパクトな軽量ハンド

ハンドで持てる重さを増やすことが可能になる。また、細かい振動等を止める作用もあり、作業中の動作が安定する効果もある。

この機構により前腕ピッチ軸のアクチュエータ出力を抑えることが可能になり、結果として、前腕水平軸・上腕水平軸と同じ出力にできた。これにより、関節モジュールを共通化でき、コストダウンを行うことができた。

**b) 自由度数の削減**

飲料缶の箱詰め作業では、ハンドは常に下向きが良いことが動作検証でわかっている。図1に示すように、前腕部リンクに平行リンク構造を使うことで、物理的に常にハンドを下向きに維持することが可能となった。手首

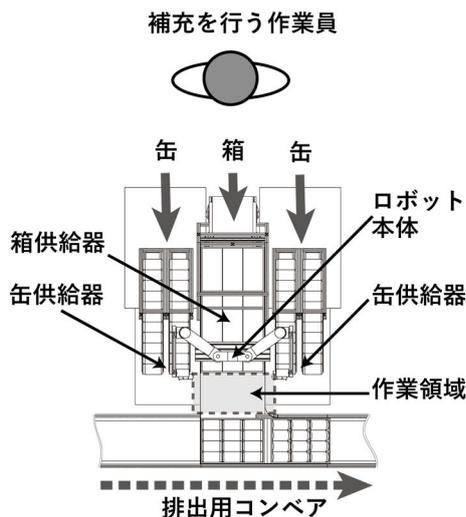


図3 上部からみた箱詰めシステムの配置図

ピッチの自由度数を減らす、すなわちアクチュエータを削減したことで、要素部品や配線などの重量や、消費電力などのコストを下げる事ができた。

また、図2に今回試作したハンドを示す。根元にモータがあり、その回転を直線に直すための簡単なリンク機構を持ち、回転運動を手の開閉運動に変換している。これにより、手先を軽くしサイズも小さくしつつ、十分な開閉ストロークを確保できるようにした。

さらに、指パーツにも工夫を行った。狭い隙間にも入るように、薄い板でできた指パーツとし、ハンドとの結合部をヒンジ軸とする自由回転機構とした。これにより、飲料缶の重心から少し外れた位置を把持することで、缶が傾いた状態となる。斜め状態の缶の角部を箱のふちにあてながら下降させることで、位置を合わせながらスムーズに缶を箱に入れることができる。図2内の写真にこの様子を示す。この工夫で、ロボット手先の自由度を増やすことなく、安定した缶入れ動作を実現することができた。

**c) 位置決め精度の許容**

ある程度の剛性と軽さ、そして加工のコストの安さを両立するために、リンクフレームをアルミ板の板金加工で箱型に構成した。これにより必要な剛性のリンクを軽量・低コストで実現することができた。また、剛性を必要以上に確保しすぎないようにした。剛性が低くても、箱詰め作業動作をする際に缶を箱にあてながら入れることで位置合わせを行い、作業性を確保することができる。

これにより、2 cmの位置決め精度であっても、箱詰めを行う能力が得られた。

**d) コンパクトな周辺機器構成**

周辺機器には可能な限り動力を使わず、双腕をうまく利用して作業にかかる時間を短縮するようにした。ロボットの両側に缶の供給器を、ロボットの後方に箱の供

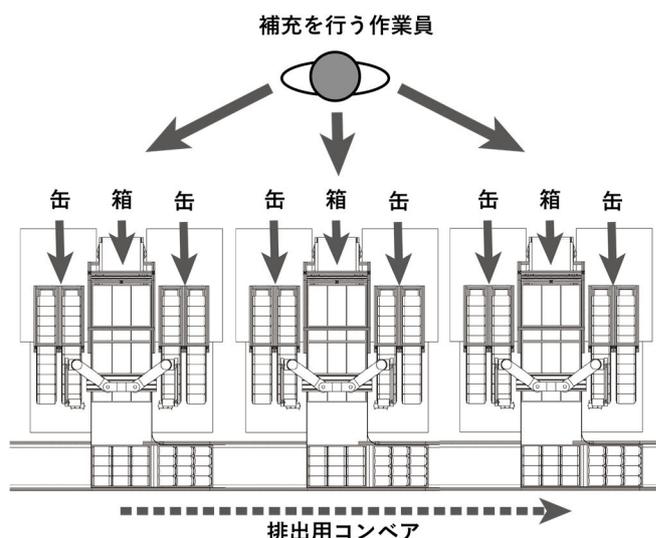


図4 複数台の箱詰めシステム配置図

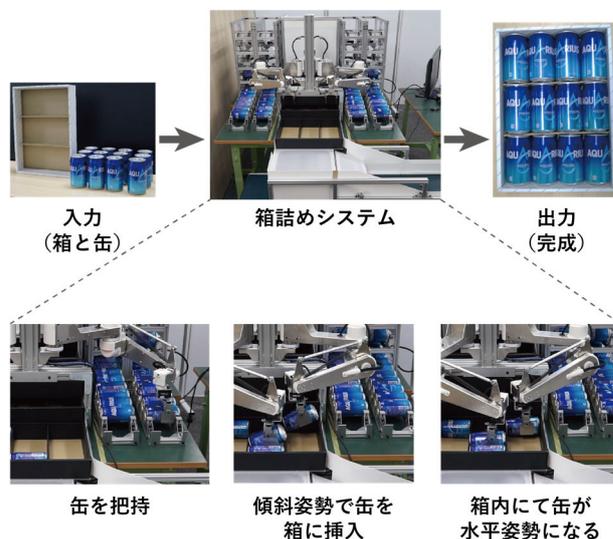


写真4 ロボットパッケージシステム

給器を配置した。

この周辺機器の配置は、缶や箱の供給の動線を考慮している。図3に示すように缶と箱の供給器を直線状に並べることができ、1人の作業員で3か所の供給をすることが可能になった。箱供給については、ロボット本体の下を通して作業エリアに箱を供給することで、省スペースかつ供給しやすい配置になっているようにしている。

このコンパクトな配置によって、ロボットを複数台導入する際にも、図4に示すように場所をとらずに並べることができ、供給も少ない人数でまかなうことができる配置になった。複数台のロボットが排出する完成箱を1本の排出用コンベアでまとめて排出することができる。コンベア本数を増やすことなく、導入台数によって箱詰めの生産量を変えることが可能になる。例えば、お中元やお歳暮などの繁忙期に、複数台並べて生産量を上げることが想定される。

## 6. 飲料缶の箱詰め作業による実証実験

前節で述べた小型双腕ロボット、ハンド、箱供給装置および缶供給装置で構成した飲料缶箱詰め用の「ロボットパッケージシステム」を写真4に示す。飲料缶箱詰め作業の流れは、以下ようになる。

(i) 組立済みの空の箱が多数保持された箱供給器から箱供給用コンベアを使ってロボット本体方向に箱が供給される。ロボット本体の下部から供給された箱を両手で作業エリアに引き出してセットする。

(ii) 左右の腕で左右の缶供給器から缶を把持して取り出し、作業領域に固定された空箱の所定の位置へ缶を入れていく。各ロボットの左右の手がぶつからないように場所やタイミングは調整済みである。

(iii) 12本の缶すべてを入れ終わったら、完成した箱を排出用コンベアまで両手で押し、排出用コンベアを使って完成品を排出する。

ロボットパッケージシステムでは、約29秒で1箱を入れることができた。また、連続して40箱の箱詰め作業に成功することも確認した。

次に、導入コストに関する検証として、一箱当たりの労働単価について、人間と同じだと仮定して、飲料缶ギフト箱詰めロボットパッケージシステムが提供できる価値の試算を行う。

1回の作業時間(タクトタイム)を、コンベアから空箱を受け取り、12缶を詰めた箱をコンベアに流すまでの時間と定義する。

本作業を人間で行わせた場合のタクトタイムを計測すると約25秒であり、時給を1,200円とすると、一箱約8.3円という労働単価だと計算できる。

ロボットパッケージシステムが29秒で一箱生産していくと、1日8時間の稼働で993箱、年間260日の稼働で258,180箱生産することになる。一箱8.3円の人件費をかけられるならば、1年間の稼働で214万円、2年間の稼働で428万円相当の作業が提供できるという見方ができる。

本論文で述べた軽作業用ロボットは研究開発の試作機であり、製品として世に出すまでの課題は山積している状態ではあるが、2年間稼働で約430万円分の価値の提供という試算は、今後の作業システム開発において、一つの指標になりうると我々は考える。

## 7. まとめ

本研究では、中小事業所の箱詰めという流通加工での軽作業のうち、飲料缶のギフト箱詰めに想定したロボットパッケージシステムを試作した。その中でコストダウンした小型軽量双腕ロボットを試作し、実際に箱詰め作業を実現することで、生産性が見合うことを確認した。

今回は、350mlを12本入れるギフト箱詰めのロボットパッケージシステムを試作したが、実際のギフト箱詰めでは、飲料缶のサイズや本数が違うバリエーションが多々存在する。飲料缶のサイズが350mlだけではなく500mlもあり、それらを混ぜてギフト箱詰めを行うこともあり得る。まずは、違う組合せの箱詰めができるかの検証をする必要がある。

そして、その複数のギフト箱詰めに中小事業所の社員が選択して使うことができる仕組みも必要となる。周辺機器の共通化やシステム化にも取り組む必要がある。

## 8. おわりに

人手で行う様々な作業は、基本的に「物の移動」を中心に行っている。今回提案した、ロボットパッケージシステムを用いて、異なる作業カテゴリにも対応できるのではないかと想定している。

本研究のような作業成果の価値に見合うコストと作業性を有するロボットは、人手不足で困っているにも関わらずロボット導入が進んでいない中小事業所への導入のきっかけになり、世の中の人手不足解消の一助になるのではないかと考えている。

なお本原稿は、第38回日本ロボット学会学術講演会にて2020年10月10日に講演した「軽作業のための小型軽量双腕ロボットの開発」の内容を川田技報向けに整理しなおしたものである。

## 謝辞

本研究開発の遂行にあたり、齋藤元氏、茶木亮氏、カヤオ・クリスチャン・デウス氏の尽力に感謝します。

また、井上博允東京大学名誉教授の多大なる御指導に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 「人手不足に効く協働ロボット・自動化システム」特集. 日本ロボット学会学会誌, vol.37, no.10, 2019.
- 2) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省: 「2019年版ものづくり白書」, [https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2019/honbun\\_pdf/index.html](https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2019/honbun_pdf/index.html), 2019. (2020/8/9 閲覧).
- 3) 「人手不足を解決する協働ロボット」 [https://iiot.jp/iiot\\_specials/is-0022/](https://iiot.jp/iiot_specials/is-0022/), 2019 (2020/8/9 閲覧).
- 4) 川田テクノロジーズ: 作業ロボット, 日本国特許第6944008号, 2021.
- 5) 川田テクノロジーズ: 作業ロボット用ハンド, 日本国特許第6858901号, 2021.
- 6) 井上博允: 論理機械によって制御される人工の手, 計測と制御, vol. 7, no. 12, pp. 3-8, 1968.