

ハンドガイドによる人と産業用ロボットの協働作業システムの提案

Proposal of Human-Robot Collaborative System Using Hand Guiding

藤井 正和 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部
 小 椋 優 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 博士（工学）
 村上 弘記 技術開発本部総合開発センター機械技術開発部 部長
 曾根原 光治 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 課長

生産現場における重量物や大型部品などの搬送・組付作業について、省人化や効率化、作業者の安全確保のため、作業の自動化が期待されている。しかし、これらの作業では、作業対象が大きい寸法誤差や品種差が大きく、対象物の位置決めにはセンシングや制御に高度な機器や技術が必要になるなど、自動化が難しい。本稿では、ハンドガイドによって人と産業用ロボットが協働する生産システムを提案する。提案システムによって、複雑な作業であっても、人が介在することで効率的かつ信頼性が高い作業が実現できる。

Task automation is currently needed in order to save labor, for higher efficiency and for worker safety, especially in tasks such as handling or assembling heavy materials or large work pieces. However, the objects worked with in such tasks are large, so dimension errors and product differences are also large. Therefore, automating such tasks is difficult because positioning such objects requires sophisticated instrumentation and sensing and control technologies. This paper introduces a human-robot collaborative production system based on “hand guiding.” By using the proposed system, even complex tasks can be efficiently and reliably performed by workers with little training.

1. 緒 言

少子高齢化に伴い労働人口が減少しており、特に製造業では熟練作業者の技能の伝承などの問題が顕在化している。このような状況でいっそうの競争力強化を行うためには、熟練作業を自動化し、省人化や効率化を進める必要がある。熟練作業の一つに重量物や大型部品の搬送・組付作業があり、この作業の多くは、重量を支えるためのクレーンや機械式マニピュレータなどの助力装置を使った人手作業に頼っているのが現状である。このような重量物・大型部品を取り扱う作業には以下のような難しさがある。

- (1) 一般に、助力装置は重量を支えるのみで、移動時の慣性の影響は補償しないため、複数の作業者が息を合わせて慣性の影響を抑えつつ、位置を合わせるなどの熟練作業が必要となる。
- (2) 重量物や大型部品を扱うことに伴う危険性が高まるため、作業者の安全確保が必要になる。

重量物や大型部品の搬送・組付の自動化には、軽量・小型の部品を取り扱うのとは異なる難しさがある。取り扱う部品が大きく重いため、以下のような理由で部品の位置を精度良く合わせることが困難であり、ジグによって環境を整えることが難しい。

- ・寸法管理が困難である。
- ・自重によるたわみやゆがみの寸法誤差が大きい。
- ・品種間・品種内の寸法のばらつきが大きい。
- ・部品が大きいため、複数の箇所を見ないと姿勢を合わせるできない。

このような課題があることから、自動で位置決めするためには、部品の位置を計測し、精度良く位置と姿勢を合わせる機構と制御が必要になる。しかし、部品が大きいため、全体を必要な精度で計測するにはセンサを各所に配置するか、非常に広い空間で高精度な計測を可能とするセンサ・認識技術が必要になる。たとえば、カメラを用いる場合、一つのカメラでは照明条件のばらつきや焦点距離とピントの制限もあり、部品全体の精妙な画像を得ることは困難なため、以下のような高度な技術や装置が必要になる。

- ・荒く画質の悪い画像、さまざまな照明条件下で取得された画像からでも高精度に部品の認識を行う高度な認識アルゴリズム
- ・高解像度かつ高感度なカメラ
- ・複数のカメラを配置し、互いの位置関係を較正した上で認識結果を統合する技術

機構と制御についても同様で、たとえば、重量物の組付作業のように、組付位置の近くまで部品を運ぶ大きな動き

と、組付を行う精密な動きの、相反する動きを両立させる高度な技術が必要になる。また、このような装置・技術を用いて自動化しても、少しの条件の差で計測や制御が失敗するなど信頼性が低下し、生産中に装置が停止するチョコ停（設備の本格的な故障ではなく、一時的なトラブルのために設備が停止する現象で、簡単な処理によって、すぐに正常復帰するものをいう。）が起こる可能性が高くなる。以上のように、自動化設備を導入したにもかかわらず結果的に稼働率が低下し、システムとして成立しなくなる可能性が高い。

このような問題の解決法として、人とロボットの協働作業が提案されている。アクチュエータによって動作する機構が部品を把持し移動させるが、部品の位置や作業状態を知覚し判断する、センシングと制御に相当する部分を作業者が行う形態である^{(1) (2)}。このような装置を本稿では知的アシスト装置と呼ぶこととする。この方法によれば、信頼性の低下とチョコ停を招く計測や位置合わせの制御の判断を人が行うため、高度なセンシングや制御が不要になり、信頼性が高くなる。作業方法は従来の助力装置と同様であるが、部品はモータなどのアクチュエータによって移動されるため、重量だけでなく慣性の影響も作業員の操作ではなく、ロボットによって補償される。これによって、作業者に求められる熟練度も低くなり、ロボットが作業者の意図を推定して動作を支援するようなことも可能になる（第1図）。

一方、人とロボットの協働作業は、作業者とロボットが密接な位置関係で作業するため、従来の作業者とロボットを隔離したロボットシステムと比べて、ロボットに起因する作業者のリスクが増大する。また、作業者の意思・判断

が正確かつ確実にロボットの動作に反映される仕組みも必要になる。

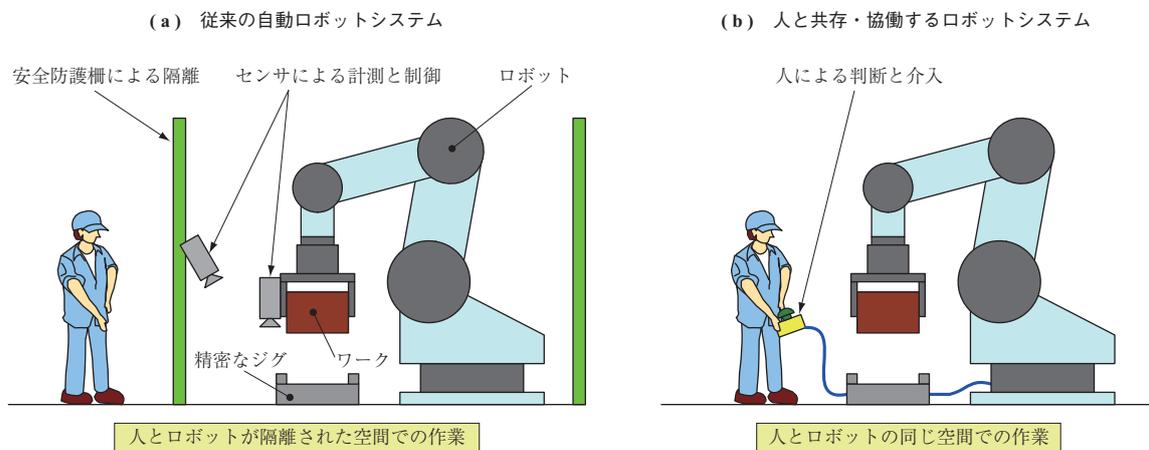
当社では、これらの人とロボットの協働作業システムの難しさを解決しながら、効率的に重量物・大型部品を取り扱う作業を実現するため、ハンドガイドと呼ばれる方式の人とロボットの協働作業システムに関する研究開発⁽³⁾を進めている。本稿では、ハンドガイドによる人とロボットの協働作業システムのコンセプトと、適用イメージについて紹介する。

2. ハンドガイドシステムの仕様とコンセプト

2.1 産業用ロボットの安全規格における人とロボットの協働作業の要求事項

現在、我が国で参照される産業用ロボットの安全に関する工業規格は、JIS B 8433-1:2007である。これは、国際規格であるISO 10218-1:2006に対応した国内規格である。このなかで、作業者とロボットの協働作業に関する要求事項が第1表のように記載されている。

第1表の要求事項は基本となるものである。規格では、これらを基本としつつ、リスクアセスメントを行い、許容できる程度までリスクを下げる方策を実施することを求めている。5.10.3項に示されたハンドガイドは、部品を把持するハンド付近に配置された操作デバイスを用いてロボットを操作するため、形態としてはクレーンや機械式マニピュレータなどの助力装置で部品を把持し、これを作業者が操作するという形態に近い。よって、助力装置を用いていた作業を置き換えるのに適した形態といえる。また、部品のそばで作業者が状態を見ながらロボットを操作するため、作業者の知覚や判断に応じたロボット動作を行わせ



第1図 従来の自動ロボットシステムおよび人とロボットの協働システム
Fig.1 Traditional automated robot system and human-robot collaborative system

第1表 協働運転要求事項 (JIS B 8433-1 (5) の 5.10 節)
Table1 Collaborative operation requirement (Section 5.10 of JIS B 8433-1)

項番	タイトル	協働運転要求事項
5.10.1 項	一般	協働運転時を示す視覚表示と、5.10.2～5.10.6 項の一つ以上の適合が必要なことを要求
5.10.2 項	停止	人間が協働作業空間内 ^{*1} にいるときのロボットの動作に対する要求
5.10.3 項	ハンドガイド	操作デバイス ^{*2} の配置や操作デバイスが備える機器・機能、ロボットの動作速度に対する要求
5.10.4 項	速度及び位置の監視	ロボットと人間の距離に対する要求
5.10.5 項	本質的設計による動力及び力の制限	本質的設計による動力や力の制限に対する要求
5.10.6 項	制御システムによる動力及び力の制限	制御機能による動力や力の制限を行うための、制御機能に対する要求

(注) 1. 協働作業空間^{*1}: 人間とロボットが同時に作業を遂行できる空間を示す。
2. 操作デバイス^{*2}: 作業員がロボットを操作するための装置。規格(5)では「ハンドガイド装置」と記載されているが、本稿ではシステムとしての「ハンドガイド」の用語との混同を避けるため、「操作デバイス」と表記する。

ることでもある。

一方、ほかの要件はロボットが出せる力を制限するため重量物作業が行えない、あるいは作業者を正確かつ確実に検出するセンサが必要となるなど、コスト・信頼性の点で実現性が低い要件となっていると考えられる。そこで、当社ではハンドガイドによる人とロボットの協働作業システムを構築するものとした。

2.2 ハンドガイドシステムのコンセプト

第2図に、本稿で提案の人とロボットの協働作業システムを示す。ハンドガイドは作業者がロボットを操作する形態となっている。操作デバイスは作業者が安全にロボットを操作するための入力装置や表示を備えている。状態表示灯は、① 協働状態 ② 運転状態 ③ 異常状態、を視覚的に作業者に知らせる。知的アシスト装置⁽¹⁾、⁽²⁾は、つねに、作業者の操作が必要な装置となっているが、当社が提案するシステムでは汎用の産業用ロボットを用いるため、作業者とロボットを隔離さえすれば、ロボット自身が出せる最大の速度と力で作業を行うことができ、また、ロボッ

ト単独で行える単純作業については作業員が不要となるため、効率化と省人化が図れる。

そこで、当社が提案するハンドガイドシステムでは、ロボットが自動で動作できる自動作業エリアと、ハンドガイドによって作業者がロボットを操作できる協働エリアに分割する。そして、ロボットが自動作業エリア内で自動動作している自動動作モードと、協働エリア内でハンドガイドとして使用されている協働モードをもつものとし、それぞれのエリア・動作モードごとに、必要な動作要件を個別に設定する。これによって、高速・高出力の自動動作と、作業者との協働作業を両立するシステムが構成できる。

2.3 安全方策と動作シーケンス

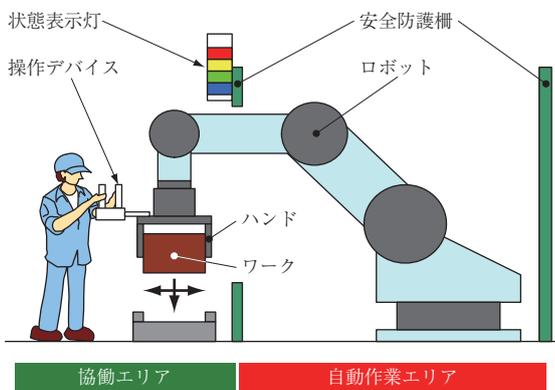
自動作業エリアでは、通常の産業用ロボットと同様の動作要件を実現させる。たとえば、以下のようなものである。

- ・人が立ち入ることができないよう安全柵で覆う。
- ・人の存在やエリア内への侵入を検知したらロボットを非常停止できるように、安全センサを開口部やドア、エリア内に配置する。
- ・操作デバイスは無効化する。

協働エリアでは、第1表で示したハンドガイドの要件が満足されるように以下の方策を採る。

- ・協働状態を示す表示灯を設ける(5.10.1 項)。
- ・ロボットの速度を減速する(5.10.3 項)。
- ・操作デバイスに非常停止スイッチとイネーブルスイッチを設ける(5.10.3 項)。

なお、二つのエリアの接する場所は、後述する作業モードごとに、それぞれのエリアでの要件が満足されるような方策を採る。



第2図 提案の人とロボットの協働作業システム
Fig.2 Proposed human-robot collaborative system

モードの遷移とそれぞれのモードにおけるロボットと作業者の動作（システム動作シーケンス）を第2表に示す。基本的に、二つのモードはそれぞれのエリアに対して採られており、作業者の意図に反してロボットが自動動作を開始すると危険であるため、協働モードから自動動作モードへの遷移は、協働エリア内に作業者がいない状態で、かつ作業者の意図的な操作によって遷移するものとする。

前述のとおり、最終的にはリスクアセスメントの結果に従って安全方策を決定する必要がある。

2.4 提案するハンドガイドシステムの特長

このように、提案するハンドガイドシステムでは従来の助力装置による人手作業、知的アシスト装置、高度なセンシング・制御によるロボット・専用機のいずれに対しても以下のような利点がある。

(1) 作業者に求められる熟練度の低減

知的アシスト装置と同様に、重力だけでなく慣性の影響も補償し、かつ移動方向や移動速度、移動範囲にソフトウェア上で制限をかけられるため、操作が行いやすくなる。このため、作業者に求められる慣れや熟練度が低くなる。

(2) 省人化、効率化

ロボットが単独動作している間、作業者はほかの作業を行うことができるため、つねに、作業者による操作が必要な助力装置や知的アシスト装置と比べて一人の作業者が行える作業量を増やせる。また、一般に組立作業では部品同士の位置と姿勢の両方を合わせる必要がある。しかし、長尺部品では一人の作業者が部品全体の精密な位置・姿勢を把握することが困難なため、複数の作業者が端部などの離れた

複数箇所の位置を合わせることで、位置と姿勢の両方を合わせる作業を行っている。本システムでは、ロボットが協働動作の初期位置への移動とともに、大まかに姿勢も合わせることで、一人の作業者が自身の見やすい箇所の位置を合わせるだけで組付作業が行え、省人化できる。さらに、カメラを用いて死角部の映像を提示することで、不要な接触を避けるなど、作業の効率化も図れる。

(3) チョコ停の低減による稼働率と信頼性の向上

高度なセンシングや制御を用いないため、環境条件の変化があっても作業者が的確に知覚してロボットの動作に反映できる。このため、チョコ停を減らし、稼働率を向上させることができる。結果として、信頼性の高いシステムとなる。

3. ハンドガイド要素試験システム

3.1 試験システム

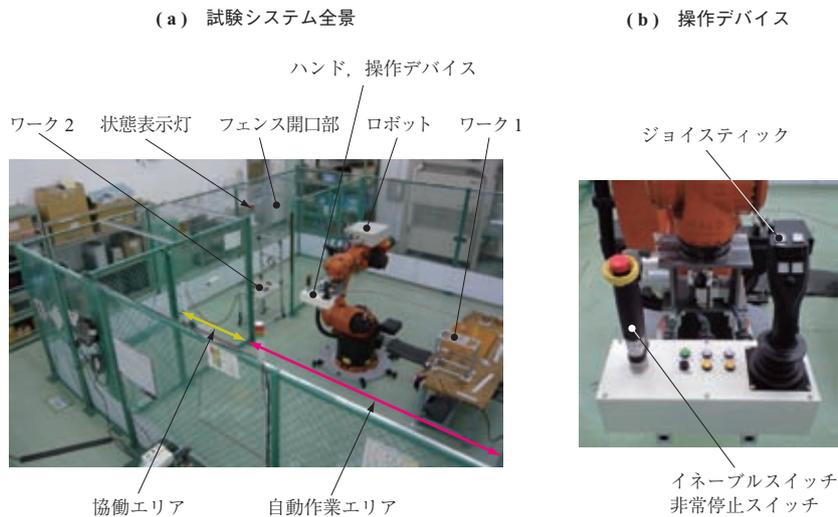
提案したハンドガイドシステムの特長を評価するため、試験システム⁽³⁾を構築した。試験システムを第3図に示す。なお、以下に記載する試験システムの仕様および安全に関する方策は本試験システム固有のものであり、ハンドガイドシステム全般に適用可能なものではないことに注意されたい。

自動作業エリアと協働エリアのフェンスには、人が自動作業エリア内のロボットに取り付けられた操作デバイスに手を伸ばして操作する、あるいはロボットを協働エリア内に移動させるための開口部を設けている。これによって、自動動作モードでは、以下のようなリスクが想定される。

(1) 開口部をとおして人が自動作業エリア内に侵入

第2表 システム動作シーケンス
Table2 System behavior sequence

動作順序	モード	ロボットの動作	人の作業
①	自動動作	自動的に動作 ・設定に従って動作 ・センサに従って動作	
②		協働エリアそばまで移動	
③	モード変更	協働モードへ変更 ・操作デバイス有効化 ・自動動作モード時のインタロック無効化 ・人の操作待ち	協働モードへの変更確認
④	協働	人の操作に従って移動	作業状態を見てロボットを操作（移動、ハンドなど）
⑤	モード変更	自動動作モードへ変更 ・モード変更が可能かの確認 ・操作デバイス無効化 ・自動動作モード時のインタロック有効化	安全を確認して、自動動作モードへの変更操作
⑥	自動動作	①へ戻り、動作を繰り返す。	



第3図 試験システム
Fig. 3 Experimental system

し、ロボットと衝突する。
 (2) ロボットが協働エリア内に侵入し、協働エリア内の人と衝突する。
 (3) ロボットが把持している部品を協働エリア内に投げ、それが協働エリア内の人と衝突する。
 (3)については、ロボットが暴走し、かつ、誤って部品を開放しても部品が投げ飛ばされないような試験用部品と把持部の形状とすることで、発生確率を下げることにした。これによって、扉やシャッターで開口部を物理的に塞ぐのではなく、開口部にライトカーテン（人の危険区域への侵入や、危険源（本稿ではロボットとそれに取り付けられたハンドなど）の危険区域外への侵入を、光の遮断という形で検知し、人に危害が及ばないように危険源を停止させるための安全センサ）を設置してロボットと人の侵入を監視し、自動動作モードで侵入を検知したときはロボットを非常停止させることで、(1)(2)の発生確率を下げるができる。よって、本試験システムでは開口部をライトカーテンで監視することにした。なお、協働モードではライトカーテンは無効化され、人が開口部から自動作業エリアに手を入れ、ロボットを協働エリアに引き出して作業することができる。

操作デバイスには、規格に従って非常停止スイッチと3ポジションイネーブルスイッチを配した。また、ロボットへ動作指令を与えるため、操作レバーの倒し角度を計測できるジョイスティックや、操作レバーを取り付けた6軸力覚センサ（力やトルクを高精度に計測するためのセンサ）を用いた。

この試験システムを用い、重量物のハンドリング作業と

大型部品の組付作業を模した試験を行った。

3.2 重量物のハンドリング作業

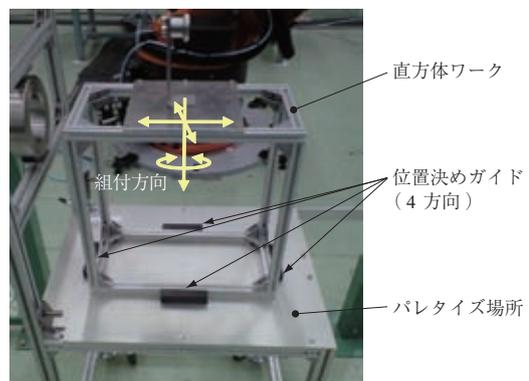
部品を指定した場所に設置する作業を想定し、アルミフレームで組まれた直方体のワークを、位置決め目標位置となるガイドの中に置く試験を行った（第4図）。

ジョイスティックの倒し角度や力覚センサで計測した力が大きいときに高速移動することにした。結果として、ジョイスティックを大きく倒す、あるいは力覚センサの操作レバーを強く押すことで高速かつ大まかに移動させ、ワークがある程度目標位置姿勢であるガイドに近づいたらジョイスティックや操作レバーを微調整して低速で位置決めを行い、ワークをガイド内に設置することができた。

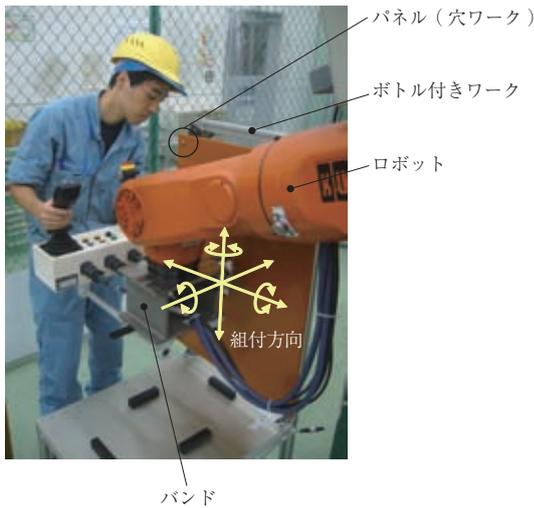
3.3 大型部品の組付作業

大きなパネルのボルト穴にボルトを通す組付作業を想定し、パネルの4隅に穴のあいたパネルを、4本のボルトが立つワークに取り付ける試験を行った（第5図）。

ハンドリング作業と同様に、大まかな操作と微小な調整



第4図 パレタイズ試験ワーク
Fig. 4 Test work of palletizing task



第 5 図 大型パネル組付試験ワーク
Fig. 5 Test work of large panel assembly task

を繰り返して組み付ける。作業者がこのような複数の組付箇所をもつワークを組み付けるとき、たとえば、穴を一つずつ順にボルトに通すような手順に従って作業を行う。ハンドガイドを用いることで、以下のように作業者の手順をロボットの動き方に反映させることができる。

(1) 部品の姿勢合わせ時

姿勢変更の回転中心を変更し、指定した穴周りで部品の姿勢を変更する。

(2) 部品の挿入時

部品の移動方向を制限し、挿入方向以外にはワークが動かないようにする。

これによって、より作業者の感覚に合った、高速な組付作業が行えることを確認した⁽⁷⁾。

4. 実作業への適用に向けた開発

ハンドガイドを用いた協働作業システムの適用例とし

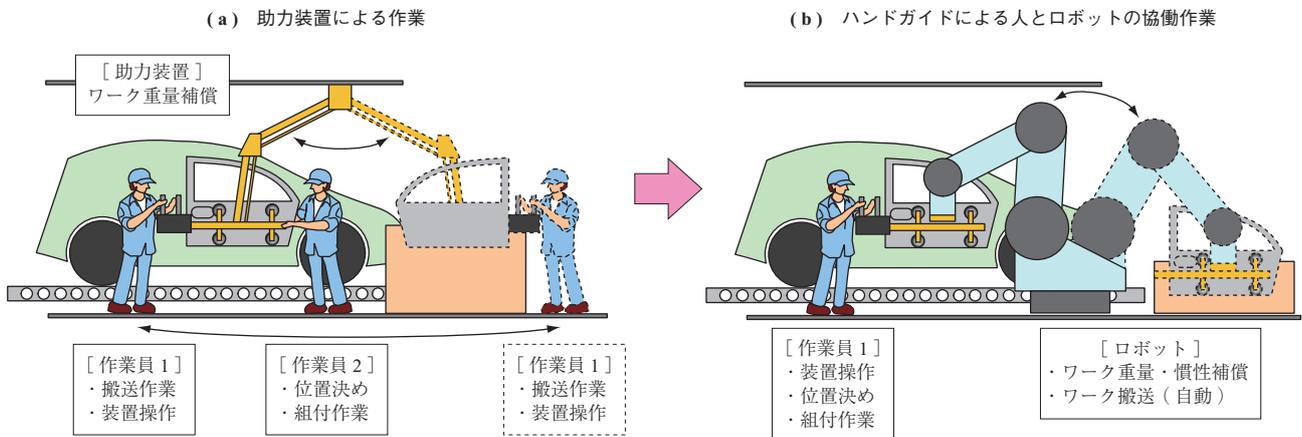
て、自動車の車体組立ラインを取り上げる。

自動車の車体組立ラインでは、無人搬送車などがラインそばへワークを供給し、作業者が部品を組み付ける場合が多い。インストルメントパネル（インパネ：自動車の前席正面に設置された、計器類などが取り付けられた部品）や窓などの重量物では、助力装置や知的アシスト装置が用いられている。自動化されていない理由は、組付対象である車体がコンベヤ上を移動するため、カメラやロボットをコンベヤと同期させる大がかりな機構や、移動物体に対して計測や部品組付を行う高度な技術が必要となることと、車体の組付位置の計測や組付完了の判断が難しいためである。

このような車体組立ラインに本システムを適用すると、より効率良く作業を行うことができると考えられる。供給装置によって供給されたワークは位置決めされているため、ロボットの自動動作で把持し車体の組付位置そばまで搬送することができる。その後、人がハンドガイドによって組付位置を見てワークを組み付け、完了状態を確認し、人が操作位置である協働エリアから退避した後にロボットは自動動作で退避して次のワークの把持に向かうことができる。第 6 図に自動車車体組立ラインの適用例を示す。

助力装置や知的アシスト装置と異なり、ワークの把持・搬送や退避などの単純作業を自動化できるため、ロボットが自動で部品の搬送を行っている間に作業者は別の工程で作業できる。この結果、作業者が担当できる工程数を増やせるため、それだけ省人化が図れ、作業効率が向上すると考える。

以上のような作業への適用を目指し、現在、操作性や安全性の向上、効率的な人とロボットの作業分担、システム構成について研究を進めている。



第 6 図 自動車車体組立ラインへの適用例
Fig. 6 Application example for vehicle body assembly line

5. 結 言

産業用ロボットを用い、自動動作と作業者による判断と操作を組み合わせた、人と産業用ロボットの協働システムを提案した。本システムを用いることで、産業用ロボットの高速・高出力な作業と作業者による知覚・判断とを組み合わせることができ、従来よりも信頼性が高く、効率的な作業の自動化が可能となった。

一方、作業者とロボットが共存するため、十分なリスクアセスメントによる安全対策が求められる。また、我が国では法令によって、現在は研究開発でのみ本システムの運用が認められている状況である。しかし、将来の実機への適用を目指して、今後は実際の生産現場を想定してさまざまな技術開発を行い、アシストシステムとしての評価・改良と、潜在するリスクの洗い出しを行っていく。

参 考 文 献

- (1) 鴻巣仁司, 荒木 勇, 山田陽滋:自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化 日本ロボット学会誌 第22巻 第4号 2004年5月 pp.508 - 514
- (2) 村山英之, 藤原弘俊, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄:人と協働する技能支援ロボットウインドウ搭載アシスト 第26回日本ロボット学会学術講演会 2008年9月 1B1-04
- (3) 藤井正和, 塩形大輔, 村上弘記, 曾根原光治:人間・産業用ロボットの協働のための安全システムの提案 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '08 2008年6月 2A1-A21
- (4) 小野一也, 林 俊寛, 藤井正和, 柴崎暢宏, 曾根原光治:産業用ロボットの新しい展開 IHI 技報 第49巻 第1号 2009年3月 pp.33 - 37
- (5) 日本規格協会, 日本ロボット工業会:JIS B 8433-1:2007 産業用ロボット-安全要求事項-第1部:ロボット 2007年12月
- (6) International Organization for Standardization:ISO 10218-1:2006 Robots for industrial environments - Safety requirements - Part 1: Robot 2006年6月
- (7) 小椋 優, 江本周平, 藤井正和, 村上弘記, 曾根原光治:ハンドガイドロボットにおける操作ガイド手法の提案 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '09 2009年6月 1A2-D15