生産システムにおける人間ロボット協調系の構築*

森岡昌宏** 足立悟志*** 榎原伸介** 藤田真理奈†
Jeffrey Too Chuan TAN†† 加藤龍††† 新井民夫††††

Installation of Human-robot Cooperation in Production System

Masahiro MORIOKA, Satoshi ADACHI, Shinsuke SAKAKIBARA, Marina FUJITA,
Jeffrey Too Chuan TAN, Ryu KATO and Tamio ARAI

In the industrialized nations, higher wages for workers, a declining number of skilled workers, and other issues have led to a need for the establishment of new high-efficiency and high-reliability production systems capable of maintaining high international competitiveness. This research analyzes the problems in existing cell production systems, defines functions required of more efficient cell production systems, and proposes a production system with the operation support of a robot. The proposed production system has been installed in cable harness assembly. The implementation has resulted in an increase of productivity and a decrease of assembly error ratio.

Key words: cooperation, robot, production system, assembly, kitting

1. 緒 言

工業製品の組立作業を中心とした生産システムは、時代のニーズと共にその形態を変化させてきた。図1に生産システムの変遷を示す。

1920年代以降の少品種多量生産の時代では、人手の分業による「流れ作業方式」を経て、低コスト・品質安定を求めた専用機械での「組立自動化」が加速した。しかし、1980年代に入り、市場ニーズの多様化に伴い多品種中少量生産の時代になると、多品種に対応するために生産システムが過度に複雑化する課題に直面した。更に、1995年頃から今日に至る変種変量生産の時代では、品種変更への即時対応が求められ、新たな生産システムの導入が急務となった。この要求に対し、近年、高度な視覚・触覚機能を備える産業用ロボットによる「知能ロボット化」が本格化しつつあるが、ロボットの知能化は発展途上にあり、不定形物の把持や組立などでは、人間の高い作業対応力に頼らざるを得ない。そのため、人間の高い対応力を活かした生産形態として「セル生産」が考案され¹⁾、電子機器の組立などを中心に広く活用されている。

しかしながら、今日の先進工業国では、作業者の高賃金化と少子高齢化による熟練作業者の減少により、限られた労働力を有効活用して高い国際競争力を維持することが求められている。セル生産では、予め組立に必要な部品一式を集約して組立セルに配膳する手法がよく用いられるが、部品配膳は比較的作業難易度が低い工程にも係わらず、現状は人手にて実施されている事例がほとんどであり、自動化による省人化が求められる。また、組立作業では、1名ないしは数名の作業者が製品を組立開始から完成まで行う多能工化により、変種変量での即時の機

種切り替えを可能としたが、作業初心者には作業負担が大きく、作業工程に応じた部品供給や組立手順の提示など物理的及び情動的な作業支援が求められる。

本研究の目的は、セル生産の省人化、および、作業初心者でも高効率、高信頼性の生産の実現であり、以下の2項目について実証する。

- ・ ロボットによる部品配膳の自動化システムを構築し、従来の人手作業に対する優位性を実証する。
- ・ 人間とロボットの協調系により、組立作業における情動的な作業支援が可能な生産システムを構築し、従来の人間のみの組立作業に対する優位性を実証する。

2. セル生産の課題と先行研究

2.1 セル生産における組立工程の細分化と課題

セル生産の高度化を実現するために、これまで自動化機器や作業員への情報支援機器が導入されてきたが、セル生産に効果的に導入するには、このような物理的、情動的な作業支援を行う機器導入の長短所を正確に把握することが求められる。そこで本研究では、まず、一般的なセル生産での組立工程を細分化し、各工程に熟練者が必要かどうかを作業難易度で評価した。その結果を表1に示す。

各工程の課題を以下に記述する。

(1) 部品供給（表1の工程1,2,13）の課題

セル生産では、部品配膳の専任者が組立に必要な部品一式をキット化して集約し、各組立セルに配膳する手法、いわゆる水すましが多く用いられる。部品を部品箱から拾い集める作業は単純作業であるが、部品の種類が多数にわたり、間違いやすい作業のため、専任者を要することが多い。すなわち、その分労働力を高難易度の組立作業に集中して投入することが困難となり、結果的に作業時間の増加に繋がる。

(2) 組立作業（表1の工程3～12）の課題

組立作業では、作業者は、組立対象の製品仕様の認識(工程3)、全体の組立手順概要の認識(工程4)を経て、治具の段取り替え(工程5)を行い、部品の組付作業(工程6～11)ならびに必要

* 原稿受付 平成23年6月29日
** 正会員 ファナック株式会社 (山梨県忍野村)
*** ファナック株式会社
† 学生会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷7-3-1)
(現、(株)日立製作所; 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280)
†† 学生会員 東京大学大学院 (現、国立情報学研究所; 東京都千代田区一ツ橋2-1-2)
††† 正会員 電気通信大学大学院 (東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)
†††† 正会員 東京大学大学院

Fig.1 Transition of production systems

Table 1 Decomposition and improvement of operation process in cell production

	Procedure		Difficulty level	Previous improvement measures			Additional efficiency measures		
	No.	Operation		Examples	Required time for operation	Error ratio	Examples	Required time for operation	Error ratio
Parts feeding	1	Parts picking	Low	Indication of part boxes	↑	↑	Automation	↑	↑
	2	Parts feeding	Low	Special container	↑	↑	Automation	↑	↑
Assembly	3	Realization of product specifications	High	Indication by VTR	↓	↑			
	4	Realization of assembly procedure	High	Indication by VTR	↓	↑			
	5	Changing fixtures	Low	Mechanization	↑	↑			
	6	Confirmation of operation procedure	High	Indication by VTR	↑	↑			
	7	Taking out parts	Low	Mechanization	↑	↑			
	8	Realization of assembly target point in a part	High	~			Indication by information indicators	↑	↑
	9	Realization of assembly target point in the other part	High	~			Indication by information indicators	↑	↑
	10	Assembly	High	(Suppose manual operation)					
	11	Operation after assembly	Low	Image procession	↑	↑			
	12	Inspection	High	Image procession	↑	↑			
Carrying out	13	Carrying out	Low	Mechanization	↑	↑			

"~" means that there are no specific measures.

"↑" means improvement, that is, reduction of required time for operation or reduction of error ratio.

に応じて製品検査(工程 12)を行う。ここで、複雑な製品の組付工程においては、作業初心者では、予め作業内容を確認しても(工程 6)、組付部品内や被組付部品内の組付け場所の認識(工程 8,9)に時間を要す場合や誤認識をする場合があり、作業時間や

作業間違い率が増加する。また、治具の段取り替え(工程 5)や部品の取り出し(工程 7)作業は、作業難易度は比較的低いため、半自動化あるいは完全自動化を検討すべき対象である。しかし、作業者に近接していることから産業用ロボットの導入には安

全性の配慮が必要となる。人手で実施する場合には、作業時間の増加の要因となる工程であり、これら工程では、組付部品の使用間違いなど作業間違い率の増加も懸念される。

2.2 先行研究と残される課題

これらセル生産の課題の解決に向け、物理的または情報的側面から様々な作業支援手法がこれまでに提案されている。

工程 1, 2 の部品供給については、表 1 で示す従来の改善策の通り、人手による部品集約において必要部品の部品箱を指示することで作業時間と作業間違い率を低減することが可能である。代表的な手法として、デジタルピッキング²⁾と呼ばれる部品集約方法が提案され、生産現場にて実績を上げている。

一方、組立作業においては、工程 3, 4, 6 の製品仕様や作業手順・内容の認識を情報的に支援する手法として、関¹⁾は「デジタル屋台」と呼ばれる製造セルを開発している。このセルは、組立工程を監視し、次の組立工程に関する情報を提示するものであり、生産現場に導入され実績を上げている。Reinhart³⁾は、半透明のディスプレイを頭部に装着して作業者に情報を提供するシステムを開発している。また、部品の取扱いに関する物理的支援としては、工程 5 の治具の段取り替えでは、早川⁴⁾は組立工程にて組立部品を把持するマニピュレータを採用することで、作業者の物理的負担を軽減し、組立の正確性を向上している。工程 7 の部品取り出しでは、Vasilash⁵⁾は、「Raven Super Cell」と呼ばれる製造セルを構築した。このセルは馬の蹄型に設置された作業台と円形の可動作業台から構成されている。また、杉⁶⁾による「Attentive Work Bench」では、自律移動するトレイが作業者に部品を配膳することで、部品の使用間違いを防止している。更に、工程 11 や 12 の事後作業や検査では、画像処理による自動化⁷⁾が推進されている。

上述した先行研究は、いずれの場合も作業時間の短縮や作業間違い率の低減に有効な手法である。しかしながら、今日の先進工業国では、作業者の高賃金化と少子高齢化による熟練作業者の減少により、限られた労働力を有効活用して高い国際競争力を維持することが求められている。よって、比較的作業難易度の低い部品キット化・配膳は、自動化による省人化が望ましいが、いずれの先行研究でも実現されていない。また、先行研究では、表 1 の工程 8,9 で示した組付部品・被組付部品内の組付場所の認識を支援する手法もまた、いまだに実現されていない。更に前述の通り、作業初心者では、予め作業内容を確認しても、組付部品内および被組付部品内の組付け場所の認識に時間を要す場合や誤認識をする場合があり、作業時間や作業間違い率が増加してしまう。組付部品が複雑化すれば、より一層この工程に対する作業支援が重要となる。

以上より、セル生産のより一層の高効率化、高信頼性化を実現するためには、以下の作業支援の確立が求められている。

- ・ 部品キット化、配膳の自動化
- ・ 組付部品内や被組付部品内の組付け場所の情報提示機器による指示

3. システム構成

3.1 対象作業

柔軟物などの不定形物を取り扱う工業製品の製造では、組立作業をロボットで自動化するには、ビジョンによる柔軟物の認識やハンドリングなどにいまだ課題があり、多くの場合人手作業に頼るのが現状である。不定形物としては、各種工業製品に広く組み込まれるケーブルハーネスが代表的であり、高効率・

高信頼性の組立を実現することで生産現場への大きな波及効果が期待される。

本研究では、図 2 に示すようなケーブルハーネスの組立作業を対象とする。ケーブルハーネスの組立においては、一般的な工業製品と同様に、表 1 に示すように作業工程が分解され、コネクタや板金など使用部品のキット化・配膳に工数を要する。また、コネクタに対して多数のケーブルを挿入する必要があるため、事前にケーブルの挿入場所を把握したとしても、挿入場所の間違いが発生しやすい。よって、作業者に対する情報的な作業支援の高い導入効果が期待される。

3.2 システム構成

ケーブルハーネスの組立は、その作業性の面から卓上作業が一般的であり、作業台前に着席した作業者に対する作業支援が求められる。本研究では、ケーブルハーネスの組立作業に対して 2.2 節に示した作業支援を実施するため、図 3 に示す生産システムを構築した。本システムは、高速なロボットによる部品キット化・配膳の自動化と、ロボットと人間の協調系により、部品組付場所の指示を行う情報的な作業支援が可能である。

システムは部品配膳を行う供給ステーションと組立作業を行う組立ステーションから構成される。

セル生産の特徴である頻繁な部品変更やレイアウト変更を可能とするためには、供給ステーションにおいて、部品棚などの周辺機器を簡素に構築することが求められる。よって、部品キット化・配膳の自動化では、汎用的な棚と部品箱のみで部品棚を構成し、かつ、部品箱内に予め整列することなくランダムに配置された部品を自動的にピンピッキングする方式を採用した。一方、組立を行う作業台も頻繁にレイアウト変更を行う可

Fig.2 Cable harness production

Fig.3 System configuration

Fig.4 Mobile robot with double arms

Table 2 Specifications of the mobile robot with double arms

Double arms	Payload	5 (kg)
	Reach	704 (mm)
Mobile base	Size	600 x 900 x 550 (mm)
	Maximum speed	1.1 (m/s)
	Maximum slope of road	2/100
	Maximum bump of road	5 (mm)

能性があり、配膳先を容易に変更可能であることが求められる。

以上の要求から、本研究では、並進・回転自在な自走台車部に、ビジョン機能を搭載した6自由度の垂直多関節型のロボットアームを双腕に配置した双腕自走ロボットを開発した。ロボットの外観を図4に示す。本ロボットのアーム部は、表2に示す仕様の通り、ケーブルハーネスの組立に必要な小物部品の高速ビンピッキングに最適な人腕大のリーチを有す高速ロボットである。

3.3 システムの特徴

セル生産で求められる多種部品の取扱い・頻繁な部品変更への対応、頻繁なレイアウト変更への対応について、本ロボットシステムでは、汎用的な手段を採用することでシステムの柔軟性を保持することを念頭に、以下の通り対応した。

3.3.1 ビジョンシステムによるビンピッキング

(1) ビジョンシステムの活用

多種部品の取扱いでは、位置決め用治具による部品棚への部品の整列や部品箱内の部品の位置決めは治具費用がコスト増に繋がるため、可能な限り治具レスのシステムを構築することが求められる。治具レスシステムでは、部品箱や部品が一定の位置に配置されないため、ロボットが部品箱や部品位置を正確に認識する必要がある。そのために、ロボットハンドにCCDカメラを設置し、ビジョン検出により部品箱および部品認識を行う。ロボットは検出した位置・姿勢情報を基に部品箱を

部品棚から引き出し、部品箱内にバラバラに積まれた部品をビンピッキングする(図5)。なお、採用したビジョンシステムで位置決めができることにより、ビンピッキングにおける部品箱位置の教示など位置教示における精度要求を緩和することが可能となるなどの効果も得られている。

また、ビジョン検出によりキット化した部品トレイ内の部品の過不足を検査し、高い信頼性を確保する。

(2) ビンピッキングの手順

ビジョン検出によるビンピッキングでは、部品箱内での代表的な荷姿の部品について、部品の位置・姿勢を検出するビジョン教示、ならびに検出部品に対するロボットのピッキング動作を教示する。生産時には、ロボットが部品箱全体をビジョン検出し、予めビジョン教示した形状との合致度が最も高い部品を選定し、その位置・姿勢に合わせてピッキングを行う。部品の重なりによりピッキング出来なかった場合は、ビジョンの再検出によりリトライを行う。治具レスでのビジョン検出によるビンピッキングは、治具により整列された多数部品全てに対してピッキング動作を教示するよりも、短時間での教示が可能であり、立上げ工数が削減される。

Fig.5 Bin-picking by the mobile robot with double arms

Fig.6 Information support by a laser pointer

3.3.2 自走ロボットの導入

(1) 自走ロボットの動作

セル生産では、組立セル数を増減することで生産量の変動に対応する場合や、セル配置を変更する場合があります。その際、部品キットの配膳場所が変更となる。そこで、本研究で開発した双腕自走ロボットは、走行経路の始点・終点・交差点など要所点のみを教示し、走行時の位置・姿勢ずれは走行路面の要所に設置した路面マークをビジョンで検出して補正する。要所の教示修正と路面マークの位置変更のみで自在に走行経路が変更可能なことから、経路全体を指定する磁気テープなどの誘導方式よりも短時間で経路変更することができる。本システムでは、部品キット化を完了した後に作業台まで走行し、部品キットを作業台に配膳することにも双腕自走ロボットを使用している。

(2) 品種切り替え時の対応

生産時に新規部品を追加する場合は、システム稼動中のため、ロボットの長時間停止は許容されない。従って、オフラインシミュレーションにて、予めビジョン教示とロボット動作の教示を行い、教示プログラムを実システムに移行することで生産のダウンタイムを最小限に抑制する。実システムとシミュレーションでは設置機器の位置に誤差が生じるが、ビジョン検出により補正されるため、オフラインにて検討したロボット動作は最小限の教示修正で実システムでの稼動が可能となる。

Fig.7 Motion range of the robot and the operator

Fig.8 Multiple functional safety for human-robot cooperation

また、生産時には、頻繁な品種切り替えへの即時対応が求められる。本システムでは、部品集約が人手による組立作業に先行して行われるため、ロボットに次の生産品種を指示することで、ロボットが即時に必要な部品一式を認識し、部品のキット化と配膳を行う。

3.3.3 ロボットと作業者の協調による情報の支援

組立ステーションでは、作業者が中心となって作業台上で組立作業を行うが、本システムでは、部品を配膳した双腕自走ロボットが作業者に対する情報の支援も行う構成とした。

複雑部品の組立作業では、作業者1名分の部品一式のキット化・配膳よりも作業者による組立作業の方が所要時間が長い場合が多く、作業者1名に対して部品配膳のみを行うロボットでは、ロボットの待機時間が長くなる。本研究では、ロボットの稼働率の向上を狙い、部品を配膳したロボットが作業者の作業支援も行うシステム構成とした。勿論、所要時間が短い組立作業を行う場合や、1台のロボットが複数の作業者に対して部品配膳を行う場合は、双腕自走ロボットが部品配膳のみを繰り返し実施し、作業者の作業支援用に専用ロボットを設置するシステム構成とすることが可能である。

(1) ロボットによる情報の支援

作業者への情報の支援は、ロボットにレーザポインタを装着し、組付部品内や被組付部品内の組付け場所をロボットにより指示することで実現される(図6)。被組付部品に対して多方向から部品を組付ける場合や多種部品を取り扱う組立作業では、組付け場所の指示系には高い位置決め自由度が必要となるため、6自由度を有する垂直多関節型のロボットアームの活用が有用である。

対象作業であるケーブルハーネスの組立作業では、多数の線材をコネクタに挿入するため、コネクタ内の線材挿入穴をロボットのレーザポインタにより逐次指示することで、作業者は迷うことなく線材の挿入作業を行うことができる。作業者は作業台下部に設置されたフットスイッチにて作業完了をロボットに連絡し、ロボットが次の挿入穴をレーザポインタで指示する。このように、作業者は自分のペースで作業を実施する。なお、多数の挿入部品が重なり合う製品では、部品同士がオクルージョン原因となり、レーザポインタの指示が確認しにくくなる場合があるが、6自由度のロボットアームの特性を活かし、指示方向の最適化を図ることでその度合いを緩和する。

(2) ロボットと作業者の協調の必要性

上述の情報の支援では、ロボットがレーザポインタにより被組付部品に対して多方向から部品の組付け場所を指示するため、ロボットは被組付部品の上面や側面に回り込むなどの動作が要求される。このため、図7に示す通り、ロボットの手首部に装着されたツールを含むロボットの動作範囲が作業者の動作範囲と重なる。これは、従来の産業用ロボットのように、安全柵などで両者の作業領域を完全に分離する運用形態ではなく、ロボットと作業者が作業領域を共有する協調が必要であることを示している。

3.4 安全システムの基本的設計指針

上述の通り、本システムでは、作業者とロボットを安全柵などで分離することができず、領域を共有する協調が求められるため、従来にない新たな安全システムの確立が重要となる。

特に、本研究では、高速な部品配膳を実現するため、駆動6軸のモータの総出力が1,500Wを超える高出力のロボットアームを採用しており、人間が大きなリスクを被る可能性がある。

人間とロボットの協調のための安全対策は、これまで様々な研究が実施されているが^{8)~10)}、本質的に高出力なロボットと人間の接触を考慮した協調は実現されていない。そのため、本研究では、図8に示す位置監視、速度監視、力監視を組み合わせた新たな多重系の機能安全を構築し、十分なリスク低減を図った。

組立作業の工程毎に作業者とロボットの作業領域が予め定義可能なため、組立作業上両者の接触が不要な領域については、物体の通過を検出可能なレーザスキャナセンサなどの安全センサを用い、作業領域を部分的に分離して高出力ロボット本体と作業者の不要な接触を回避する。

一方、作業者がロボットの手首先端ツールに触りながら組立作業を行う領域では、力センサでの力監視とロボットの速度監視により、人間がロボットから受ける過大な発生力を制限する。発生力は、生理学的観点から人間の耐性を体系的にまとめたBG/BGIA risk assessment recommendations¹¹⁾を参照し、ロボットが発生する力を各身体部位が耐えられる許容値以下に制限する。具体的には、ロボットと接触頻度が高い腕・手について、衝撃力の許容値を180N、押し込み力・挟み込み力の許容値を135Nとする。更に、ロボット制御装置にてロボットの動作領域をソフトウェア的に制限する位置監視により、ロボットと作業台の間に常に120mmの隙間(ISO13854¹²⁾規定)を設け、手や腕の挟み込みを回避する。

リスクアセスメントによりこれらの安全対策の効果を検証し、作業者のリスクが十分安全なレベルに低減されることを確認している。

4. 導入効果

部品キット化・配膳の自動化と、組立作業において組付部品内や被組付部品内の組付け場所を指示する情報的支援の導入効

Fig.9 Comparison of the performance of bin-picking

果を検証するため、部品集約時間、作業所要時間及び作業間違い回数を生産性の評価指標として、従来方式との性能比較を実施した。

4.1 部品キット化・配膳

4.1.1 実験条件

部品キット化・配膳の性能評価では、図2に示すケーブルハーネスで使用するコネクタや板金など9種類の小物部品のビンピッキングを対象とする。これらはケーブルハーネスで使用される典型的な部品の一例であり、これら部品のビンピッキングの性能を評価することで、部品種類が増加した場合でも、同等の性能が得られると試算することができる。

双腕自走ロボットによる自動化作業と従来の人手作業について、部品ビンピッキングの所要時間から、一日当りの部品配膳の処理能力を比較する。本研究のシステムは、図3の通り、1台のロボットが部品配膳と作業支援を両立する構成であるが、この性能評価では、部品キット化・配膳の繰り返し作業を対象とし、自動化機器の性能比較でよく行われるように、一日の稼働時間を人間8時間に対してロボット24時間として評価する。人手作業は、各部品が収納された部品コンテナをランプで点灯し、必要部品と必要数量を明示するデジタルピッキング¹¹⁾を比較対象とした。この手法では、人間がランプの指示に従って部品のキット化を行うため、集約部品の間違いはほぼ排除される。

4.1.2 性能評価

双腕自走ロボットによる部品棚からの各部品のビンピッキングの所要時間は平均で17.5秒/部品、標準偏差は1.6秒であった。一方、人手作業のデジタルピッキングでは、所要時間の平均が6.0秒/部品、標準偏差は1.2秒であった。この結果に基づき、一日の稼働時間を人手作業8時間/日に対して、ロボットを24時間/日とした時の1日当たりの部品集約能力を図9(a)に示す。この結果、提案方式は、従来方式に比べ1日当たりの部品集約能力が3%向上した。更に処理能力を向上するためには、床面に配列された部品コンテナからビンピッキングするなど、部品コンテナの引き出し動作を削除することが効果的である。この場合、各部品のビンピッキングの所要時間は平均10.5秒/部品まで短縮され、すなわち、一日当たりの部品集約能力に換算すると、図9(b)に示す結果となり、一日当たりの部品集約能力が従来方式に比べ72%向上した。以上の議論から、開発した双腕自走ロボットを24時間連続稼働することで、従来の人手作業よりも処理能力の高い部品配膳が可能であり、物理的な作業支援としてのロボットによる部品配膳の自動化システムの優位性が実証された。

なお、構築したロボットシステムは、3.2節で記した通り、ビジョンによりキット内の部品過不足が検査されるため、人手作業のデジタルピッキングと同様に、集約部品の間違いの発生は排除される。

4.2 組立作業

4.2.1 実験条件

ケーブルハーネスの組立作業について、構築した人間ロボット協調系のセル生産(以下、協調セル)での作業と、人間のみで実施する従来のセル生産(以下、人間セル)での作業を比較評価する。

多数の線材が使用される各種工業製品のケーブルハーネスでは、コネクタへ線材を挿入する作業にて挿入場所の違いが生じやすい。本研究では、多数線材のコネクタへの挿入作業を評価対象とし、図10に示す2パターンの64本の線材から構成されるケーブルハーネスでの線材挿入を対象とする。(a)は同色

の線材が規則的に並んだ配列であり、作業を繰り返し実施することである程度の線材配列の記憶が可能な習熟しやすい作業である。一方、(b)は各色の線材がランダムに並んだ配列であり、(a)と比較して線材配列の記憶が困難なことから、難易度の高い習熟しにくい作業である。

使用する線材の順番については、協調セルではモニターによる情報提示¹³⁾の活用などでセル生産での頻繁な機種切り替えにも対応可能である。本実験では条件を揃えるために、線材を予め挿入する順番通りに並べて実験を実施した。協調セルでは、ロボットに装着されたレーザポインタでコネクタへの線材の挿入場所を次々と明示する情報の支援を実施する。一方、人間セルでは、線材の挿入場所を図面にて確認する作業方法とする。協調セルと人間セルにて、4名の作業者が(a)(b)の2つのパターンについて、それぞれ5回ずつ作業を実施し、作業の所要時間と作業間違い率を比較評価する。

4.2.2 性能評価

(a)(b)各パターンについて、作業回数に伴う作業所要時間の推移を図11に示す。縦軸の所要時間比は、各パターンにて、作業毎に、人間セルでの最短の所要時間を100%として各作業の所要時間の割合を算出し、4名の作業者の平均値をプロットしたものである。この実験結果から、以下のことが実証された。

- ・ 高生産性(従来の最大2倍)、作業熟練者にも有効

(a)(b)共に、全般的に協調セルの方が人間セルよりも作業所要時間が短い。このことから、ロボットにより部品の組付け場所を指示する情報的な作業支援が生産性の向上に寄与することを明らかにした。定量的には、5回目の作業所要時間にて、協調セルにて(a)で約20%、(b)で約50%の時間短縮となっていることから、作業熟練度が向上しても(a)で1.25倍、(b)で2倍の生産性が確保されることが示された。このことは、本システムが作業初心者だけでなく、作業熟練者にも有効であることを示している。

- ・ 生産立上げ直後から高生産性

(a)(b)共に、協調セルでは、1回目の作業から5回目の作業に至るまで作業の所要時間がほぼ一定に推移している。このことから、協調セルでは、生産立上げ直後から安定して高い生産性を確保可能であることが分かる。

- ・ 変種変量生産に有効

作業記憶が困難な(b)の方が、(a)よりも生産性の向上が顕著であったことから、難易度の高い作業の方がより大きな効果が得られたことがわかる。作業記憶が困難な作業(b)は、換言すれば、作業毎に製造機種が頻繁に切り替わることに相当し、協調セルは、変種変量生産に強い生産システムと言える。

また、作業間違いの回数については、作業者4名の作業の合計として、協調セルの1回に対して、人間セルは12回であった。よって、協調セルでは、人間セルの1/10以下まで作業間違い率を低減可能であり、高い信頼性の生産が可能であることが示された。

5. 結 言

本研究では、セル生産における部品供給ならびに組立作業での作業に対する効果的な作業支援として、新たな生産システムを提案し、その導入効果を示した。下記の3つの成果により、従来よりも、セル生産の省人化、作業初心者でも高効率、高信

(a) Regular wire alignment (b) Random wire alignment

Fig.10 Target of cable harness for the estimation

(a) Regular wire alignment

(b) Random wire alignment

Fig.11 Transition of proportion of required time every operations

頼性の生産が可能となった。

- (1) ロボットによる部品キット化・配膳の自動化システム、および、人間とロボットの協調系により作業者に部品の組付け場所を指示する新たな生産システムを構築した。
- (2) ロボットによる部品キット化・配膳では、ロボットの24時間連続稼働により、9種類の小物部品の部品キット化にて、従来のデジタルピッキングによる人手作業の1.72倍まで部品集約能力を向上可能であることが示された。
- (3) 人間ロボット協調系によるセル生産での組立作業では、ケーブルハーネスの組立を対象とし、64本の線材のコネクタ挿入作業にて、従来の人間のみの作業と比較し、生産性で最大2倍、作業間違い率で1/10以下の高効率、高信頼性の生産を実現した。

今後は、以下の項目に注力し、ロボットによる部品キット化・配膳の自動化システム、および、人間ロボット協調系によるセル生産の生産現場への導入を推進する。

- ・ 双腕自走ロボットの機構部の耐久性強化
- ・ 人間とロボットの協調のための安全対策の第3者認証機関による安全認証の取得

謝 辞

この研究は2006年度から5年間に渡り、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「人間・ロボット協調型セル生産組立システムの開発」の一環として実施された。ファナック株式会社 創業者 名誉会長 稲葉清右衛門博士ならびに支援して頂いている方々に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) S. Seki: One by One Production in the 'Digital Yatai' —Practical Use of 3D-CAD Data in the Fabrication, J. Japan Soc. Mechanical Engineering, **106**, 1013, (2003) 32.
- 2) <http://www.hello-aioi.com/en/solution/index.html>, accessed 2011.6.29.
- 3) C. Reinhart and C. Patron: Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain —Fundamentals, Benefits and Applications, Annals of the CIRP, **52**, 1, (2003) 5.
- 4) Y. Hayakawa, I. Kitagishi, and S. Sugano: Human Intention Based Physical Support Robot in Assembling Work, in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, (1998) 930.
- 5) G. Vasilash: Cell for Assembly, Automotive Manufacturing & Production, (1999).
- 6) M. Sugi, M. Nikaido, et. Al: Motion Control of Self-Moving Trays for Human Supporting Production Cell 'Attentive Workbench', in Proc. IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, (2005) 4080.
- 7) L. Gueta, R. Chiba, J. Ota, T. Arai and T. Ueyama: Design and Optimization of a Manipulator-based Automated Inspection System, The Society of Instrument and Control Engineers Transaction on Industrial Application, **6**, 6, (2007) 4.
- 8) J. Krüger, B. Nickolay, P. Heyer, G. Seliger: Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation, Annals of the CIRP, **54**, (2005) 13.
- 9) H. Murayama, N. Takesue, K. Matsumoto, H. Konosu, H. Fujimoto: Development of a Car Window Installation Assist Robot, Journal of Robotics Society of Japan, **28**, 5, (2010) 624.
- 10) Y. Akamatsu, T. Nakamira: Development of Manipulator with Flexible Joint Using Smart Fluid, Proceedings of the Japan Fluid Power System Society, 5, (2006) 25.
- 11) BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive - Design of workplaces with collaborative robots. U 001/2009e October 2009 edition.
- 12) ISO13854: 1996, "Safety of machinery —Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body".
- 13) F. Duan, M. Morioka, J. T. C. Tan, and T. Arai: Multi-modal Assembly-Support System for Cell Production, International Journal of Automation Technology (IJAT), **2**, 5, (2008) 384.