

特集 人から学ぶステーションレス組立(ながら組立)システム*

A study of Automated “Station-less Assembly System” Learned from Human Performance

飯田 康博 藤本 英雄 陳 連怡
 Yasuhiro IIDA Hideo FUJIMOTO Lian-Yi CHEN

In today’s manufacturing industry cost competition is becoming more severe with the trend in production toward globalization. For high labor wage countries like Japan, low-cost and multifunctional automation technologies are required. This study focuses on the analysis of human dexterity in developing new automation methods, as workers often find simpler work methods by task learning, and the methods can be a clue to low-cost automation. In this study, the new “NAGARA System” in other words, “Station-less Assembly System” in which component parts are assembled directly to the base parts moving on the belt conveyor without positioning, is proposed. In this paper, firstly, the remarkable human characteristics of the manual system are extracted quantitatively. Next, based on the analysis, the new automation system, which introduces a force-changeable gripper and human assembly algorithms, is proposed. Finally, the effectiveness of this system is proven by comparing the productivity and the cost with those of the conventional one.

Key words : Automation, Task learning, Assembly, Human

1. 緒言

近年、製造業を取り巻く環境は、生産のグローバル化に伴ない、価格競争が激化している。日本のような高労働賃金国では、低賃金地域に勝る低コストな生産体制を整えることが必要であり、そのためにはより高機能で低コストな自動化技術の追求が不可欠である。この課題に对应していく一つのアプローチとして、人の巧みな作業方法の解明に基づく自動化技術の開発が提案されている^{1) 2)}。一般的に、自動車部品などの組立に従事する作業者は、作業の習熟と共に、生産性を向上しつつ、無駄のない、より簡素な作業方法を見出す傾向にある。作業を簡素化するこの工夫の解明が、シンプルでローコストな自動化の手掛かりになると考えている³⁾。この考え方に基づき、本研究では、ベルトコンベア上をラフな姿勢で移動している部品に、直接構成部品を組立てる人の巧みな作業（以下ながら組立）に着目し、その自動化を進める。

この論文では、まず2章で、ながら組立自動化の狙いと課題を整理し、次いで3章では人の作業方法の分析からその良さのポイントを抽出する。そして最後に、この分析に基づきローコストなながら組立自動化システムを提案する。

2. 現状の課題

Fig. 1に現状の代表的な自動組立ラインの外観を、

Fig. 2に手組ラインの外観を示す。自動組立ラインでは、被組立部品はパレット上で所定の姿勢に保持されながら、組立工程まで搬送され、ストップなどで位置決めされる。その後、ロボットにて組立部品が組立てられ、また次工程に搬送される。この一連のサイクルのため、組立精度を確保するだけの高精度なパレットやストップなどの付帯機器が工程ごとに必要となり⁴⁾、このことが、設備コストの上昇原因となっている。またこのシステムでは、正味組立以外のロス時間が全体の20~30%に及ぶこともあり、この削減が、生産性向上の課題の一つにもなっている。一方、Fig. 2に示すように、人はながら組立の実行により、低速ではあるが、上述の自動組立ラインが抱える問題点は見当たらないため、この良さを取り入れたながら組立システムが期待されている。

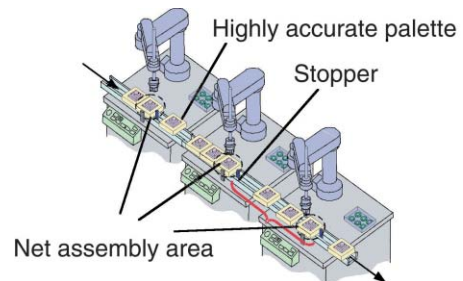


Fig. 1 Typical automated assembly line

* (社) 精密工学会の了解を得て、「精密工学会誌」Vol.70, No.1, 2004より転載

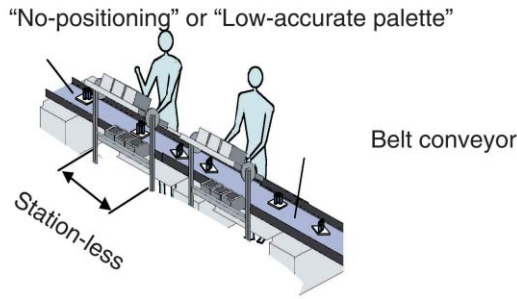


Fig. 2 Typical manual assembly line

移動部品を組立てるロボット技術研究としては、ビジュアルサーボ技術があるが⁵⁾、視覚情報のリアルタイム性の保証や設備コスト高などの課題が残されている⁶⁾。また、コンベアトラッキングの研究もあるが^{7), 8)}前者同様、複雑な制御が必要であるのに加え、本研究対象のような、姿勢がラフな状態で移動してくる部品に対応するものではない。以上のことを踏まえ、人のながら作業の特性に再度着目し、新システムを開発する。

人の技能分析については、近年、その定量化研究が、技能の伝承や複雑な作業の自動化のために様々なところで行われている⁹⁾。人の金型磨き¹⁰⁾や、バリ取り作業¹¹⁾の分析、更には、人の動作を画像認識し、これをロボットの教示データに変換するTeaching by Showing¹²⁾がこれに相当する。しかし、これらはいずれも特殊技能や生産活動以外の研究例であり、本研究の対象である生産性が求められ、かつ数秒サイクルで行われる位置決め、挿入などの組立作業を分析している例は少ない。上述の研究例に比べると、当作業は、より瞬間的かつ無意識レベルで行われることが多いため、技能のポイントが見えにくい特徴があり、その分析には、独自の取組みが必要と思われる。

更に、本研究では、既に備わった人の技能だけでなく、その技能そのものの習熟特性にも着目する。人は任意の作業を与えられた場合、最初こそ不慣れながら、最終的には、シンプルで効率的な作業方法を見出していく。この習熟特性を明らかにすることにより、技能のエッセンスがより明確に理解できると考える。更にその習熟特性そのものを機械に移植できれば、人が個々の技能を詳細に見極めなくても、機械自身でその技能を発動できるはずである。この習熟特性に着目する数少ない例としては、振り子ロボやテニスサーボロボを題材にした、人の最適化原理を究明する研究が挙げられる¹³⁾。しかし、今回の主題である、技能をローコストな自動化方法に生かす視点で分析しているものではない。以上の背景を踏まえ、次章で、ながら組立に

おける人の作業分析を進める。

3. 人のながら作業の特性分析

3.1 作業分析方法

まず当社で扱われる典型的な小物組立部品およびそのながら組立作業をモデル化し、作業実験を行う。Fig. 3に被組立部品a：(以下ベース部品と呼ぶ)と組立部品b：(以下パーツと呼ぶ)のモデルを記す。これらのモデルは共に、手のひらサイズ大以下の剛体であり、左右対称形をした一般挿入部品を示している。またFig. 4に、ながら組立作業モデルの実験システム外観を示す。このモデルは、速度240mm/sのベルトコンベア上を1.2s間隔で流れてくるベース部品に対し、サイドテーブル上に置かれたパーツを一つずつ取り出し、組立てる。そしてこの作業を15回繰り返して1サイクルとする。この作業を被験者2人に各々15サイクル実行してもらい、その時の手指の使い方および目の使い方の変化を観察する。手指の動きについてはデジタルビデオで観察し、把持力の変化については、歪ゲージでモニタリングする。

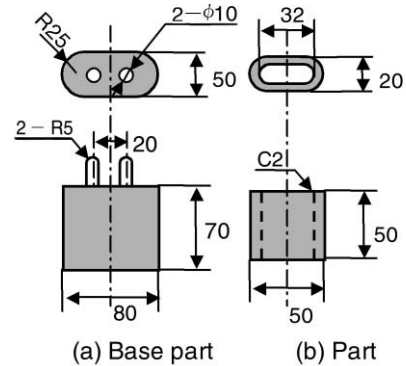


Fig. 3 Parts model

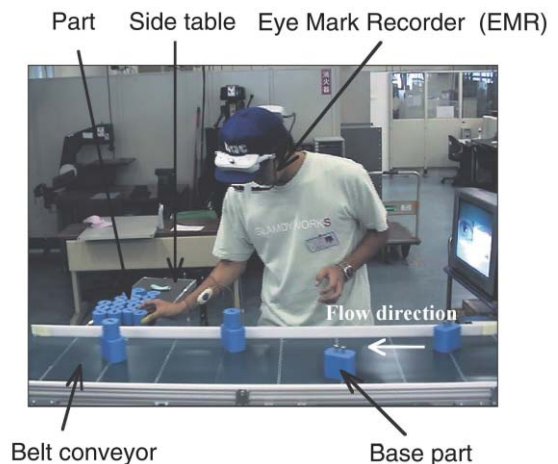


Fig. 4 Appearance of experiment system

一方、目の動きについては、眼球運動をEye Mark Recorder (以下 EMRと呼ぶ) を用いて観察する。なお、今回の被験者については、候補者8人を対象に、標準的なサンプルかどうかの視点から、作業適正の検定¹⁴⁾を行い、選出している。今回は、手、腕の動作のすばやさ正確さを評価項目とした。次に、作業実行にあたっては、習熟作用を積極的に発現させる目的から、当作業をできるだけ早く行うよう指示した。今回の作業モデルも、不慣れな状態ではついていくのが難しい作業ペースとなるよう、前述のように、コンベア速度とベース部品の投入間隔を設定している。具体的には、当社の典型的な手組ラインに比べると、この作業モデルは、コンベア速度を約3倍に、部品投入間隔を約1/5に設定している。更に、安価な単腕ロボットを活用した自動化システムに、反映しやすい作業ノウハウを抽出したい狙いから、当作業を片手で実行してもらうことにした。

以上のような制約下で作業が迅速化されるためには、一連の動作に潜む無駄が省かれ、より簡素化された作業方法が見出されるはずである。そしてこの作業方法の特徴およびこれを見出したアルゴリズムが、ローコストな自動化を実現するヒントになると考える。

3.2 実験結果

実験の結果、作業回数の増加と共に、両者共作業速度が10~15%向上した。被験者Aの組付時の手の動きを、MTM手法 (Methods Time Measurement)¹⁵⁾ に基づく5種類の基本動作、①手を伸ばす、②掴む、③運ぶ、④組立てる、⑤放す、に分割し、その各々の時間変化をFig. 5に示す。Fig. 5では、15サイクル作業を繰り返したうちの1~3サイクルを序盤、7~9サイクルを中盤、13~15サイクルを終盤と定義して、各々その平均値をプロットしている。上述の①手を伸ばす、②掴むは、Fig. 4のサイドテーブルにあるパーツに対しての動作を指し、③運ぶは、パーツをコンベア上のベース部品に接触させるまでの動作を指す。実験結果より、④組立の所要時間が最も短縮しており、逆に②の掴む時間は、増加していることが分かる。この傾向は、被験者AとBで一致していた。次に、この結果および作業速度の向上につながった三つの習熟特性を抽出できたので、以下にその概要を述べる。

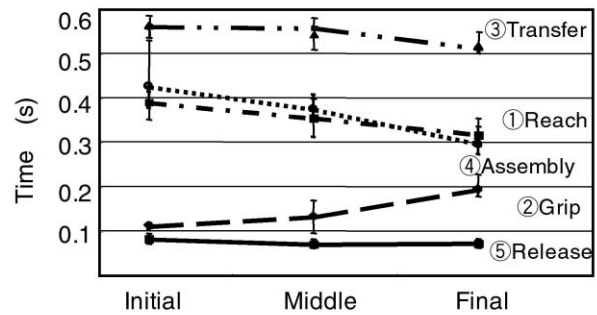


Fig. 5 Average time at each assembly element operation

a. 姿勢補正動作の分割化

人は習熟していくと、組立直前から完了までのパーツとベース部品の姿勢補正方法に変化が現れることが、ビデオ分析と両者のインタビューより確認できた。Fig. 6に、組立前後のベース部品およびパーツの座標を定義する。対象とするベース部品を被験者が最初に認識する時点をA点とし、その時のベース部品の座標を X_A, Y_A, θ_A とする。同様に、パーツの初期位置をC点、その座標を x_c, y_c, θ_c とする。また、組立直前の2部品の座標を、各々 $x_b, y_b, \theta_b, X_B, Y_B, \theta_B$ とし、組立位置をB点とする。

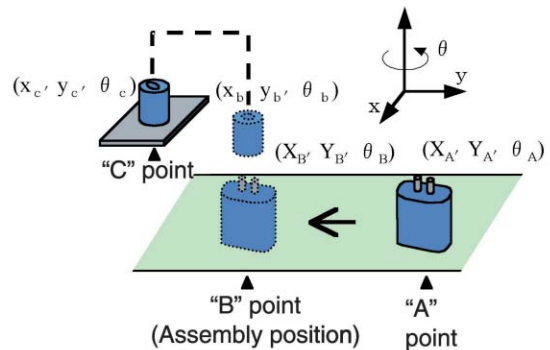


Fig. 6 Coordinates definition by each phase

次に、この定義に基づき、Fig. 7に、習熟前後の視覚認識ステップの違いを記す。作業序盤では、まず、A点でのベース部品の位置、姿勢 (X_A, Y_A, θ_A) をラフに視覚認識した後 (ステップ1)、対象パーツに視線を移し、これを把持する。次に、パーツをB地点近傍まで移動させた後 (ステップ2)、ベース部品 (X_B, Y_B, θ_B) とパーツ (x_b, y_b, θ_b) の相対位置ずれ量を把握しながら (ステップ3)、視覚フィードバック組立 (ステップ4) を行う。

一方、終盤での作業方法を見てみると、ステップ2から4において、序盤との違いが出てきている。まず、ステップ2では、ステップ1で得たベース部品の姿勢

情報 (θ_A) に注目し、パーツの初期姿勢 θ_c が、挿んだ瞬間にほぼ θ_A になるよう、パーツの把持動作が実行される。これにより、ステップ3では、X、Yの2情報のみの相対位置ずれに注目することになる。序盤の方法は、X、Y、 θ の3情報を同時に把握しながらの組立が必要のため、補正動作そのものが複雑となる。これに対し、終盤では、ステップ1で既に回転方向のずれをほぼ一致させるため、組立時は、X、Y、2軸の並進動作が主体の、簡素な補正動作となる。Fig. 5に示した「②掴む」時間の増加は、ベース部品の姿勢を考慮した掴み方に変ったためであり、「④組立てる」時間の短縮は、補正動作を簡素化できた効果である。

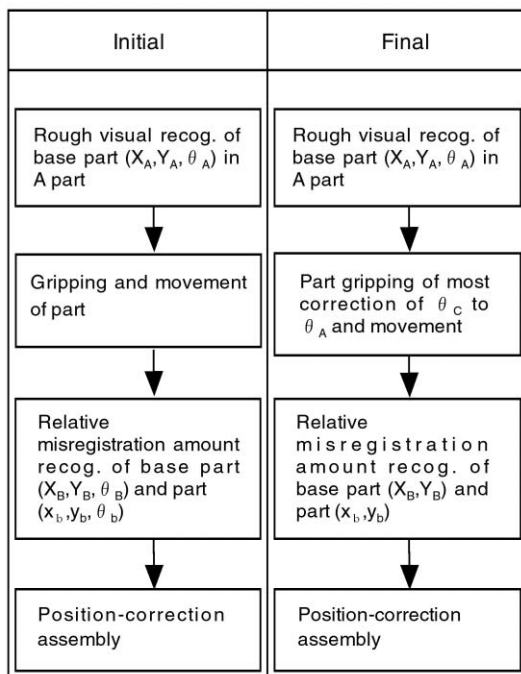


Fig. 7 Difference of posture correction step

b. 触覚を活用したハンドリング

Fig. 7のステップ4では、序盤、終盤共に補正組立が行われている。しかし、その方法をもう少し詳しく見てみると、序盤が視覚フィードバック型の組立を行うのに対し、終盤は、触覚フィードバック型の組立に移行していることが分かった。前述のEMRを用いて作業員Aの視線を分析すると、作業回数の増加と共に、ベース部品注視時間が10%以上減少していることを確認した。注視しているかどうかは、今回、「眼球運動速度が毎秒11度以下で、継続時間が165ms以上」の定義¹⁶⁾に基づいて判断した。更に、ベース部品を注視しなくなった時間は、次の組立対象となるベース部品に

視線を移していることもEMRより確認できた。

この現象は、ベース部品位置近傍までのアプローチには視覚が活用されるが、そのあとの微小な位置、姿勢ずれの補正および挿入作業には、習熟するにつれて、触覚を積極的に活用していることを意味する。本来、触覚は、複雑なセンシングをすることなく微小なエリアを探索することに適している¹⁷⁾ 更には、前述した視覚活用の習熟効果によって補正動作そのものが簡素化されたこともあり、徐々に触覚が有効活用されていったと思われる。

c. 作業フェーズに合わせた把持力の変化

両者共、組立時に効率よくパーツの位置、姿勢ずれが補正されるよう、習熟と共に、パーツの把持力を積極的に変化させるようになることが分かった。Fig. 8に被験者Aのパーツ把持後から組立完了までの典型的な把持力の変化パターンを示す。作業序盤、終盤共に、パーツ移動開始時点を時間軸のゼロ点としている。このグラフより、序盤と終盤で移動時間には差がないことが分かる。一方、組立時間は、序盤が0.4sかかっているのに対し、終盤は0.2sであることを示している。

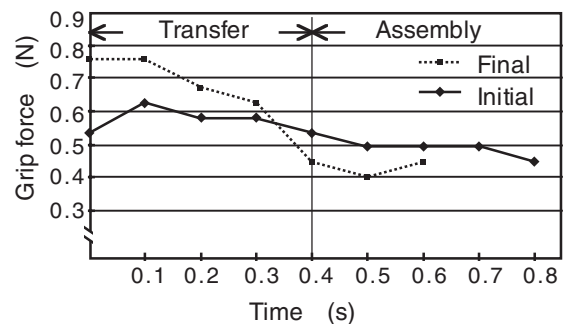


Fig. 8 Change in grip force

移動時と組立時各々の平均把持力をみると、序盤では、移動時に0.57N、組付時に0.48Nと差が約0.09Nであるのに対し、終盤では、平均値の差が0.23Nと大きくなっている。これは、習熟によって、作業フェーズに適した把持力を使い分けるようになった結果であると考えられる。つまり、パーツ移動時は、高速にパーツを移動させても位置ずれを起こさないよう安定的に把持し、反対に組付時は、触覚センシングで部品が扱いやすいよう、把持力を意図的に低下させているのである。

以上、制約を与えた状態において、人の習熟に着目することにより、a、b、cの三つの習熟特性を抽出することができた。

4. 自動化へのアプローチ

前章で得られた三つの習熟特性は、いずれも高度な機能に依存することなく、より簡易に作業を実行できる方法を作り出していくものである。人と機械の特性は異なるが、このノウハウは、機械のローコスト化にも役立つはずである。この章では、三つの習熟特性をヒントに新しい自動化システムを提案する。次いで、その有効性を、テスト機を用いて証明する。

まず三つの習熟特性から、以下に示す新たな自動化に生かすべきポイントが抽出される。

- (1) a, bの習熟特性で示したように、人は、姿勢補正作業を、パーツ把持段階、組立直前の視覚補正段階、触覚を活用した組立段階の3段階に分割している。このように、分割した補正動作を実行することにより、人は、ながら組立に必要と思われるがちな、移動部品を目で追い続ける作業の時間を削減させているのである。このことを踏まえると、ながら組立の自動化においては、視覚で移動物体を連続的に画像処理するビジュアルトラッキングをベースにしたシステムづくりに着目するよりはむしろ、機械に適した姿勢補正の分割方法を追求するほうが、シンプルな情報処理と制御に基づくシステムが実現できると思われる。
- (2) 習熟特性cで示したように、人は、組立直前での把持力の低下により、部品自体の姿勢補正作用を引き出している。結果、リアルタイムの高度な触覚センシングを駆使することなく組立時間を短縮できている。一方、触覚センシング機能を付加したロボットハンドの研究が、さまざまな所で進められているが、実用域に達している例は未だ少ない¹⁸⁾。これらのことを踏まえると、ながら組立の自動化においては、人のシンプルなハンドリング方法を取り入れるべきと考える。

以上のポイントを参考に、ローコストな自動化システムを提案する。Fig. 9に新システムのテスト機外観を示す。また、Table 1にテストの諸元を示す。このシステムは、パーツを組立てる6軸の多関節ロボット、コンベアおよび位置決めされたパーツを収容するパートトレイで構成される。ロボットハンドは、ベース部品の位置、姿勢を認識するカメラおよび、ベース部品の動きに追従するためのフローティングメカニズムを装着している。このコンベアは、Fig. 2で示した手作業ラインで活用している安価なベルトコンベアと同等のものである。それで、自動組立ラインに活用するコ

ンベアのような製作精度は期待できないため、ベース部品の動きを事前に予測した同期組立は困難なものとする。以下、Fig. 10に示す動作フローに沿って、新システムの特徴を説明する。

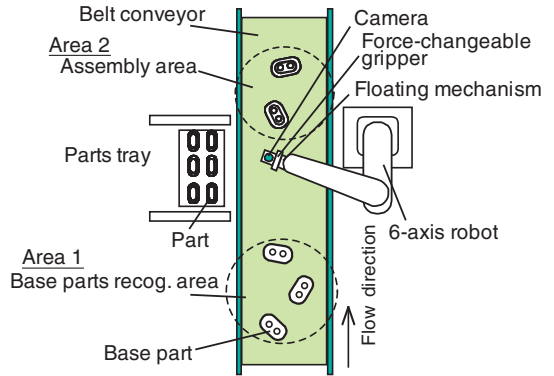


Fig. 9 Testing machine of new system

Table 1 Condition of experiment

Robot	6-axis robot Maximum speed : 7.6m/s (Made by DENSO)
Force-changeable gripper	Servo gripper Servo motor : COOL MUSCE (CMI-c-17L30)
Vision device	Binary image processing
Belt conveyor	Length : 2000mm Width : 400mm
Floating mechanism	QRA (Made by Nitta)

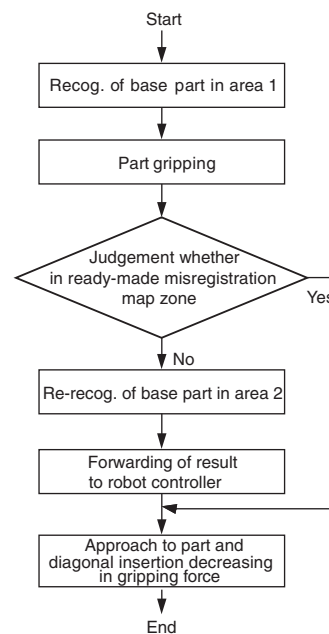


Fig. 10 Motion flow by testing machine

まず搬送されてきたベース部品の姿勢 θ を、Fig. 9の視覚認識ゾーン（Area1）で認識し、組立ロボットにそのデータを転送する。人の段階的な姿勢補正作業に学び、組立ロボットはパーツの姿勢をベース部品の姿勢 θ に合わせてながら把持し、組立ゾーンにアプローチする。この後、初期段階では、ベース部品の姿勢をArea2で再認識し、2部品の相対的な位置ずれ量を補正しながら組立を実行する。また、複数サイクルの再認識結果から、Area1を基準にしたときのArea2の各点での位置ずれ量を把握し、これをもとに相対誤差マップを生成する。この誤差は主に、コンベア自身の誤差や速度誤差に加えて、ロボット毎に異なる座標の歪から生じる。相対誤差マップはロボットコントローラ内で随時更新され、最終的にはこのマップを活用することにより、再認識しなくても組立可能になる。

次にパーツを把持したハンドは、流れてくるベース部品に対し、Fig. 11左に示す斜め挿入をする姿勢でアプローチする。斜め挿入は、人の動作の中で、習熟前後に限らず観察されたものであり、組立時のクリアランスを拡大する効果があるため¹⁹⁾、本システムでも導入した。次にパーツとベース部品が接触する直前に、人と同様、把持力を低下させ、パーツを組立反力に対して倣いやすい状態にする。把持力は、チャック時におけるフィンガーの停止端をサーボコントロールすることにより増減する。最後に、把持力を低下した状態で組立を進行させていくと、Fig. 11右に示すように、ベース部品の移動によってパーツ姿勢が倣う。そしてこれに伴って、チャックも少し開いた状態で、パーツを保持しながら、組立が更に進行する。この時、ベース部品の動きを吸収しながら部品を組立てられるよう、フローティングメカニズムも作動させる。

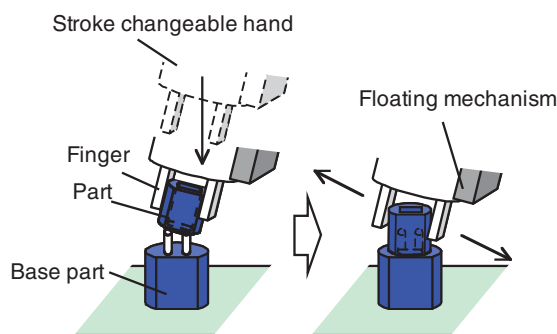


Fig. 11 Hand motion in assembling stage

以上、人のシンプルで簡素化された習熟特性に基づき構築できたこのシステムは、高度な力覚センサ、視

覚装置が不要な組立アルゴリズムによって成り立つものである。このシステムで300回組立を行ったテスト結果をTable 2に示す。初期段階では、誤差マップが作成できていないため、ベース部品を2回認識する必要があるが、平均サイクルタイムは、7.1sかかったが、組立エリア全域の誤差マップが完成した終盤では、認識回数が1回となり、結果、6.0sまで短縮された。この結果により、現状の手作業工程とほぼ同等の生産性を確保しつつ、従来システムの1/2のコストを実現する目処を立てることができた。

Table 2 Result of experiment

	Initial	Final
Average of cycle time (s)	7.1	6.0
Success rate (%)	100	100

なお、今回のテストでは組立ミスはなかったが、対象部品のクリアランスを小さくしたり、コンベア速度を高めても同等の成功率を確保するためには、更なる認識時間の短縮とハンドの移動部品に対する追従性を高めていくことが、今後の課題と思われる。

5. 結言

本研究により、ながら組立における人の習熟特性を明らかにし、新たな自動化構想を提案できた。研究結果をまとめると以下のようなになる。

ハイサイクルかつ片手作業下において、人の習熟特性を分析したことにより、以下に示す三つの作業ノウハウを抽出できた。

- (1) 組立2部品の相対的な位置ずれを、複数の組立ステップで段階的に補正することにより、個々の補正動作の簡素化を図っている。
- (2) 視覚活用中心の組立から、触覚を有効活用した組立に移行することにより、組立時間の短縮を図っている。
- (3) 組立フェーズに合わせた部品把持力のコントロールにより、部品自体の姿勢補正作用を引き出している。結果、リアルタイムの高度な触覚センシングを駆使することなく組立時間を短縮できている。

以上の分析をもとに、簡易視覚、把持力可変、フロ

ーティング機構を組み込んだ、高生産性かつローコストな、ながら組立自動化システムを考案できた。この研究により、人の習熟特性の深掘が、ローコストな自動化の構築に有効であることが立証できたので、今後は、このアプローチを当作業以外の自動化研究にも適用させていきたい。

<参考文献>

- 1) Mineo Hanai, Hideo Fujimoto and Yasuhiro Iida : “HIGH-SPEED BIN-PICKING SYSTEM BASED ON HUMAN PERFORMANCE”, 29th CIRP International Seminar on Manufacturing System, (1997), pp.383-393.
- 2) 飯田康博, 藤本英雄: “人から学ぶ自動化技術”, 機械と工具, Vol.45, No.11 (2001), pp.74-78.
- 3) Yasuhiro Iida, Hideo Fujimoto, Mineo Hanai, Lian-Yi Chen : “AN APPROACH TO AUTOMATION BASED ON HUMAN PERFORMANCE — MECHANISM ANALYSIS OF TASK LEARNING IN PARTS SUPPLYING—”, Japan-USA Symposium on Flexible Automation Hiroshima, Japan, July 14-19, II (2002), pp.843-849.
- 4) 森田裕之, 飯田康博, 藤本英雄: “人から学ぶ自動化—人のながら作業の特性研究—”, 日本機械学会 [No.02-8] 生産システム部門講演会2002講演論文集, pp.65-66.
- 5) P. Allen, A. Timceko, B. Yoshimi and P. Michelman : “Automated tracking and grasping of a moving object with robotic hand-eye system”, IEEE Trans. Robot, Automa., 9 (2) (1993), pp.152-165.
- 6) 豊田晴義, 向坂直久, 水野誠一郎, 中坊嘉宏, 石川正俊: “超高速インテリジェントビジョン: PCV (Column Parallel Vision System)”, 第6回画像センシングシンポジウム予稿集, E-4 (2000), pp.213-216.
- 7) 藤田正弘, 馬場孝夫, 丸山寿一: “力制御機能をもつコンベアトラッキングロボット”, 第3回日本ロボット学会学術講演会, (1985), pp.13-14.
- 8) 青柳誠司, 桑原一義, 神野崇治, 高野政晴: “軌道計画と軌道更新に基づくSTS制御の実現手法の提案とオープンアーキテクチャ型ロボットを用いたその有効性の実験的検証”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001), pp.131-141.
- 9) 岩田一明: “熟練技能の機械化についての現状と展望”, 計測と制御, Vol.37, No.7 (1998), pp.453-458.
- 10) 三好隆志: “熟練技能の技術化・コンピュータ化—金型自動磨き作業を例に—”, 計測と制御, Vol.37, No.7 (1998), pp.459-464.
- 11) 水川 真: “センサベースロボットにおける作業スキルの教示—バリ取り作業例—”, 計測と制御, Vol.37, No.7 (1998), pp.499-503.
- 12) 國吉康夫, 井上博允, 稲葉雅幸: “人間が実演して見せる作業の実時間視覚認識とそのロボット教示への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, (1991), pp.295-303.
- 13) 宮本弘之: “ヒト運動の最適化原理と見まねに基づくタスク学習”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.5 (2001), pp.5-6.
- 14) 日科技連官能検査委員会: 官能検査ハンドブック, 株式会社日科技連 (1973)
- 15) 甲斐章人: 現代生産管理論, 株式会社白桃書房 (1986)
- 16) 福田忠彦, 渡辺俊夫: ヒューマンスケープ, 株式会社日科技連出版社 (1996)
- 17) 赤松幹之, 高橋昭彦: センサーフュージョンの基盤技術に関する研究 (第2期) 成果報告書 平成6-7年度, (1997), pp.116-134.
- 18) 小俣 透: “器用な手”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6 (2000), pp.2-4.
- 19) 松本和男, 花井嶺郎: “[人機械協調型生産システム]の開発”, 精密工学会誌, Vol.62, No.7 (1996), pp.939-942.



<著 者>



飯田 康博
(い いだ やすひろ)
生産技術部
工学博士
生産技術部門の企画業務に従事



藤本 英雄
(ふじもと ひでお)
名古屋工業大学大学院教授
ものづくりテクノセンター長 (併任)
工学博士
生産システム、ロボットなどの知能化、バーチャルリアリティ等の研究に従事



陳 連怡
(ちん れんい)
名古屋工業大学助教授
工学博士
メカトロニクス、人工現実感の医療・福祉への応用および環境配慮型生産システムなどに従事