

論文・報告

小型家電製品のセル生産に最適な本質安全が組み込まれた双腕ロボットの開発

Development of the dual-arm robot for built with our intrinsic safety technology and optimal power output for production of small-scale appliance.

田邊 博史 *1
Hirofumi TANABE

藤原 忠弘*2
Tadahiro FUJIWARA

宮野 善弘*2
Yoshihiro MIYANO

嶋田 輝夫 *2
Teruo SHIMADA

平井 正之*3
Masayuki HIRAI

中畑 光明*4
Mitsuaki NAKAHATA

本研究は、2006年度から3年間、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託契約に基づく開発項目「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システム（次世代産業用ロボット分野）、コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド」に関わる、THK株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所と共に行った研究成果を含んでいる。

本双腕ロボットは、家電メーカー等のセル生産現場で活躍できるように、組立工程における省人化を図るべく、組立工程で肩を並べる作業者の一部をそっくり双腕ロボットで置き換えるために、小型家電製品セル生産に最適化した出力を持ち、本質安全が組み込まれた、安価でコンパクトな次世代産業用ロボットの基本システムを持つ。本文では、本質安全を指向した次世代型産業用ロボットの開発過程と人間協調セル生産システムの構築、運用について報告する。

キーワード：双腕ロボット、次世代産業用ロボット、セル生産、本質安全、画像処理

1. はじめに

現状のセル生産は多品種少量生産に対応する一つの手段として生み出された方式だが、組立作業工程は未だ人に依存している部分が多くを占める。この部分をロボットに置き換えることができれば高付加価値製品を高い利益率で製造することが実現し、もの造り（製造）を国内に残すことが出来る。近年、商品のライフサイクルは短くなり、市場動向に大きく影響され、結果、生産量が大きく変動している。このことにより数百名規模の作業員対応（補強・削減）が必要となり、安定した生産量と品質を確保することを目的として作業員への教育、設備開発などに相当のコストが必要となっている。従ってロボット導入の最大メリットは変動生産に対応することであり、「省人（コストダウン）」である。セル生産の作業内容は商品の組立仕様や構造によって大きく異なるが、ピック&プレース作業が作業全体の50%を占めている。これらピック&プレース作業は部品を掴み所定の位置に

置く単純な作業と、部品を掴み保持する、曲げる、持ち替えるなどの複雑な作業に大別される。ロボット導入は人間との共存環境内において前者の単純作業を人からロボットに置き換えることから始め、その後複雑な作業にも対応出来る様に展開していかなければならない。

本稿では、これらの問題を一挙に解消することを狙っ



写真1 SP-02の外観

*1 川田工業㈱ 機械システム事業部マーケティング部 係長
*2 川田工業㈱ 機械システム事業部ロボティクス部

*4 川田工業㈱ 技術研究所情報機械研究室 室長

*3 川田工業㈱ 機械システム事業部ロボティクス部 係長

た、セル生産向け双腕型ロボット「SP-02」の開発過程と人間協調セル生産システムの運用について報告する。SP-02の外観を写真1に示す。

2. 双腕ロボットのメリット

筆者らは、双腕ロボットの開発の過程で、メーカーや研究者の方から「なぜ双腕（人型）ロボットなの？スカラロボット2台じゃだめなの？」という質問を何度も受けた。その答えは、「セル生産ラインを自動化したとき、人、周辺設備、フットプリント、部品設計コストなどトータルのコストが最も安価になるから」と答えている。

表1に形態が人型であるメリット、および表2に産業

用ロボットと双腕ロボットとの比較を示す。

もちろん、スカラロボット（産業用ロボット）のような動作、つまり正確に、かつ高速にアームをコントロールする繰返し動作を双腕ロボットにさせて比較すれば、サイクルタイムやロボット単体のコストでも負けてしまう。我々は、従来の産業用ロボットとは違う

表1 形態が人型であるメリット

1	画像処理機能をオールインワン装備しているため、利便性が高い
2	人と同等のスペースでレイアウト可能
3	双腕作業による受け渡しでコンベアレス
4	ジグレスで部品の取付、ネジ締めが可能
5	出力が低いため本質的に安全

表2 産業用ロボットと双腕ロボットとの比較

比較項目		産業用ロボット	双腕ロボット
ロボットの能力	原点の必要性	要	× 不要 ○
	専用架台	要	× 不要 ○
	ティーチング	全てのポジションで入力が必要	× 部品と場所の位置に合わせ自動調整 ○
	部品自己認識	専用装置とソフトを選定	× ティーチング時に登録 ○
	汎用性	低い	× 高い ○
	1台あたりの部品対応能力	1個	× 複数 ○
	作業効率	1台で1つの目的のこしか出来ない	× 双腕同期や両腕独立した作業が可能 ○
	安全面	ロボットを覆う安全柵などのインターロックが法律で義務化	× 低出力なため法律による規制はないが、現場毎のアセスメントが必要。アセスメントの結果により、部分的に安全方策を取り入れる ○
	ペイロード	高い。5 kg以上	○ 低い。片腕2 kg以下 △
	速度	高速	○ 人並み △
実績	長年に渡り一般的に使用	○ 長年使用した実績は無い △	
工程への導入	ロボット用専用設備	要	× 不要 ○
	スペース	ロボット専用設備や専用架台要でスペース大	× 人と同等のスペース ○
	レイアウト変更	移設難で専用工程となる	× 移設容易で汎用性高い ○
	通い箱精度	高い。精度が出ていないと正規位置を掴めず、正規位置に置けず、箱コスト高	× 低い。許容範囲内でランダムに置かれても自己判断でピック&プレイス可。箱コスト低 ○
	工程間搬送	コンベアなどの自動搬送機が必要なためコスト高	× コンベアレス化により設備コスト低 ○
	仮位置決め	必要。正規位置を出す為に一旦仮決めが必要	× 不要。供給側から直接正規位置へ部品セット可 ○
部品の設計	製品側要求精度	高い。基準位置からの加工精度が要求される	× 低い ○
	製品加工コスト	高い	× 安い ○
	製品内回り止め	必要。無いと設備複雑化。製品加工費アップ	× 不要。片腕がジグに代わって部品を位置決めできるため、位置決めピンなど不要 ○
総合評価			× ○

(むしろ逆転的な) コンセプトを作り、「人が行う単純作業をロボットに置き換える」ために、必要な要素技術を盛り込むことによる差別化の提案を行った。これらの要素技術を策定するために必要なヒントは全てユーザからのニーズとし、ロボットの試作・改良・製品化を行った。

3. 双腕ロボットの開発

我々は小型家電製品のセル生産現場をターゲットとして双腕ロボットの開発を行った。そこでは従来の産業用ロボットのように重量物を高速に動作する必要はなく、軽量な物(最大でも 500 g 程度の部品)を器用にハンドリングし、人作業と同程度のサイクルタイムが必要とされる。すなわち、小型家電製品の組立現場においては、出力の小さいロボットでも双腕でムダの無いモーションコントロールを行えば十分な作業が可能であると考えた。しかも、ロボットが労働集約型で狭い作業空間で使用されることを考えると、コンパクト化や安全性も必須となる。これらの低出力化・モーションコントロール技術・コンパクト化・安全性(ここでは、本質安全化、アームの軽量化)については、我々の得意とする分野であり、顧客のニーズと我々の機能モジュールが合致した。

(1) HRP-2による取組み

初期段階は、二足歩行可能なヒューマノイドロボット HRP-2 を改造した上半身型双腕ロボットを使用して実際のセル現場作業を模擬し、各種の実験検証を行った。写真 2 に HRP-2 を使用した実験の様子を示す。

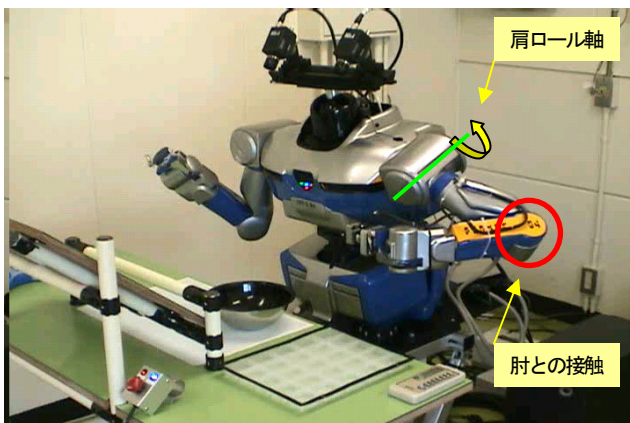


写真 2 HRP-2 を使用した実験の様子

写真 2 は、ロボット前方のテーブル上の器にランダムに人がサイコロを投げ入れ、ロボットはサイコロを拾い、サイコロの出目に従い決められた位置に整列させるといった視覚装置からの指令による動作実験である。実験の結果、ロボットハードウェアに必要ないくつかのヒントを得た。例えば、肩にロール軸があると脇が開く姿勢と

なり、ロボットの肘部と作業者が接触しやすくなることや、必要な作業領域において特異点が存在するため正しい姿勢角を作ることができる範囲が制限されることなどである。そこで、ロボットの側方から作業者が近づいても、ロボットの肘部が接触しないように、脇を開くことができる自由度を無くし、かつロボット前方の作業領域(A4 横ペーパーサイズを想定)では、特異点がなく自由な姿勢を作ることができる、多自由度のマニピュレータについて検討した。

(2) 双腕モックアップによる取組み

家電製品のセル生産現場では、女性の作業者が多く従業員数の半数以上を占めている。したがって、ロボットのサイズは、身長 157 cm 程度の平均的な日本人女性をイメージした肩幅と、腕の長さによって、写真 3 に示す木製の双腕モックアップを作成した。

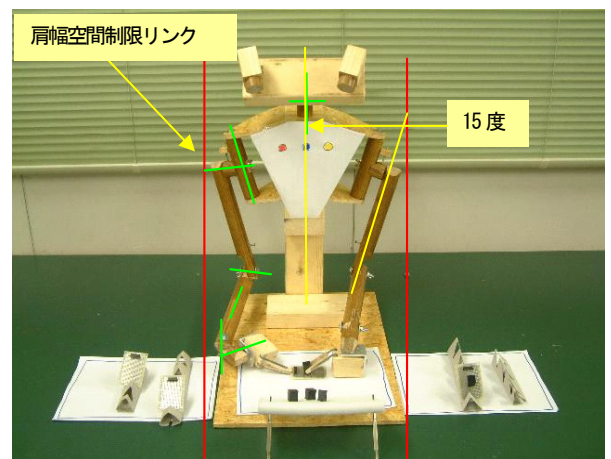


写真 3 木製の双腕モックアップ

この双腕モックアップにより、肩ロール軸を無くし、肩 2 自由度、肘 1 自由度、下腕のねじれ 1 自由度、手首 2 自由度の合計 6 自由度でロボット前方の作業領域において特異点がなく自由な姿勢を作ることができる軸配置が存在することを確認した。また、胴体に対し腕部の取付角を内側に約 15 度傾けて肘をさらに内側に入れることで、双腕モックアップ側方に作業者が近づいても、肘との接触の可能性がゼロとなる肩幅空間制限リンクを考案した。

本双腕モックアップは、実際のセル生産現場に持ち込み、動作範囲に関して顧客調査を実施した。

(3) SP-01による取組み

双腕モックアップと同じ軸構成と軸間寸法をできるだけ維持して、かつ HRP-2 の試験結果から必要な精度と剛性を求め、双腕ロボット試作機 SP-01 を試作した。SP-01 の外観を写真 4 および SP-01 の仕様を表 3 に示す。

SP-01 は当社のロボットシステムを初めて産業用途として見直したものである。実作業に対して、どのくらい

の性能（特に速度）が必要なのか、顧客とのヒアリングを重ね、生産性や安全性についての要求仕様をまとめた。

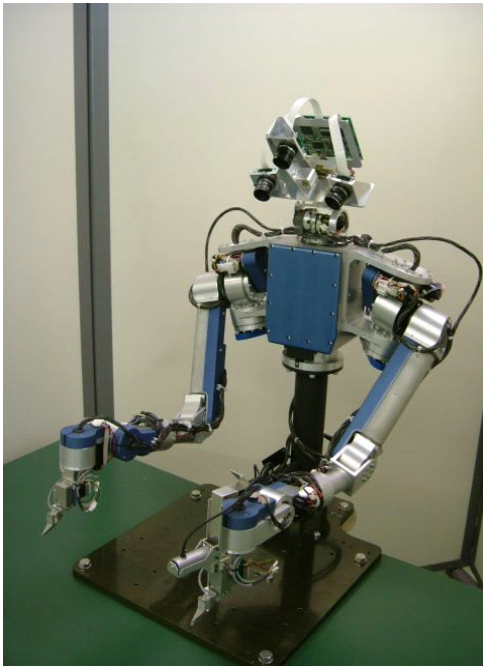


写真4 SP-01 外観

表3 SP-01仕様

寸法(mm)	身長	527
	肩幅	486
	胸板	136
	アーム長	560
本体質量(kg)		20
片腕アーム質量(kg)		3
軸仕様		合計15軸
		腰 1軸
		腕 双腕×6軸
		首 2軸
片腕可搬質量(kg)		1
繰返し位置決め精度(mm)		0.05
駆動方式	アクチュエータ	DCコアレスモータ インクリメンタルエンコーダ バックラッシュレス減速機
	ドライバ	アナログサーボドライバ

a) 性能試験

速度試験の評価方法を図1に示す。本図はA4周回動作

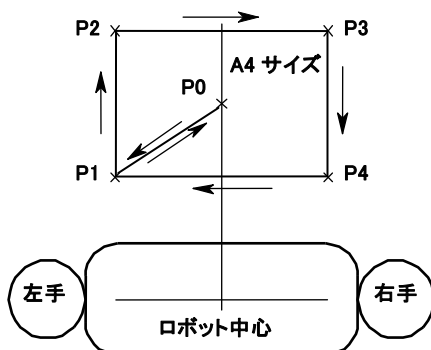


図1 A4周回動作

と呼び、双腕ロボットの動作パラメータの設定や評価に使用している。測定方法は、A4 エリア中心位置よりスタートし、四角形軌道を描いた後、再び中心位置に戻るまで(P0→P1→P2→P3→P4→P1→P0、総移動距離1 377 mm)の手先の最短移動時間を計測する。

SP-01 のモータ定格出力と A4 平均周回速度を表4に示す。SP-01 は2回に分けてモータの出力や減速比等を変更して、ロボットの動作速度について顧客調査を行い、セル生産に必要な動作速度の改良を実施した。セル生産を実施するには当初計画した 250 mm/sec 以下での動作速度では、顧客のタクトは達成できないため、A4 平均周回速度を 500 mm/sec まで上げた。

表4 SP-01の速度性能

モータ 定格出力 (W)	部位	改造前	改造後
		肩	45.8
	手先	11	16.8
A4 平均周回速度 (mm/sec)		230	500

b) 模擬実証

生産現場を模擬した環境を作り SP-01 による動作、および安全性の確認を行った。写真5に生産現場を模擬した様子、写真6にロボット手先と作業者が接触した状態を示す。

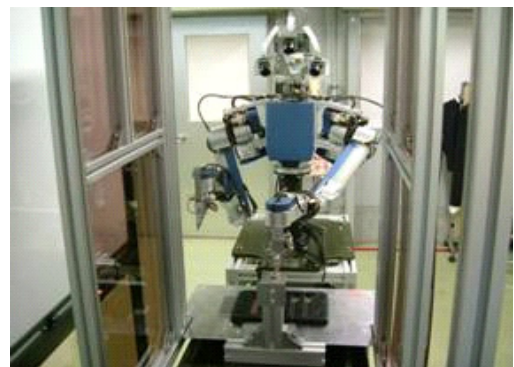


写真5 模擬生産現場



写真6 ロボット手先との接触

写真5では、ロボットの肩幅よりやや大きい実装機の中央に配置し、ロボット前方のトレーからワークをピッ

クし、実装機の指定位置にプレースする作業である。本作業により肩幅空間制限の範囲内で作業している場合は、ロボットに側方から接近しても接触は起こらないことを確認した。写真 6 では特にピンセットのような鋭利な先端を持つハンドの向きにより、例えば内側に向いているときは安全、外側に向いているときは危険といった具合に、共存時のロボットの動作生成方法についてアセスメントした。ロボットの特に危険な部位は手先であり、手先の軌道が作業者の目に近づかないように配慮しなければならず、一方で手先さえ安全が確保できればロボットとの接触では重篤な障害が起こることが無いことも確認できた。

また、機械部品組立現場に SP-01 を持ち込み、実際の作業現場にてロボットの設置から運用を模擬してアセスメントを実施した。その様子を写真 7 に示す。この場合、特にロボットの背後が通路であることから、肩ヨー軸と腰ヨー軸の動作条件を考慮して、運転する必要があった。また、共存ロボットにおいて必要と思われる親和性についてもヒアリングを行うため、ロボットに作業着を着せて実験を行った。



写真 7 機械部品組立現場のリスクアセスメントの様子

(4) SP-02による取組み

SP-02 は、共存環境におけるセル生産現場で使用されることを前提とし、SP-01 での改良点を盛り込み、設計段階で十分なリスクアセスメントを行い、挟み込みが予測される個所には適切な隙間を設け、角部は全て丸くして危険個所の低減を行い、本質安全を指向した。作業者と肩と肩とが触れ合うほど隣接した状態でも安全に作業を継続でき、肩ロール軸を有する従来型の双腕ロボット（写真 2）とは差別化された、脇を絞って肩幅から肘が飛び出さない肩幅空間制限リンクと、かつ低出力（各軸 80 W 以下）だが適度な運動性能を持つことを特長としたコンパクトな次世代型産業用ロボットである。

a) SP-02 の仕様

SP-02 に盛り込まれた生産性と安全性のための仕様を以下に述べる。

① 生産性の仕様

・各関節に絶対位置センサを装備。

起動直後の原点出し動作を不要にすることと、センサ 2 重化による機能安全化を目的として、各軸に絶対位置センサを搭載した。

・A4 平均周回速度は、500 mm/sec 以上。

生産性を評価する場合、工程間のサイクルタイムを厳守できないと工場への導入は不可能であるため、A4 平均周回速度は最も重要なパラメータである。最終的には 700 mm/sec までの速度改良を実施した。

・肘部の関節可動範囲を拡大。

肘部をオフセットさせて、可動範囲を大きく取れる設計に変更した。

・モータのブラシレス化による耐久性の向上。

ロボットが連続稼働できるように、寿命が長いインクリメンタルエンコーダ付ブラシレスモータを 15 軸搭載した。

・ロボットの製造原価を低減。

モータを 2 種類に限定することで、関節をモジュール化することが可能になり、部品の共通化の結果、製造コストを低減できた。SP-02 に使用した部品の使用状況を表 5 に示す。

表 5 SP-02 に使用した部品の使用状況

構成部品の種類	部品種類	全部品数	共通使用数
要素部品 (モータ・ギア・ベアリング)	6	45	7.5
加工部品 (鋳物・切削部品)	60	163	2.7
小部品 (ボルト他)	54	745	13.8

・簡便設置技術の導入

ロボット頭部に装備した 2 台のカメラから、テーブルやトレーに貼り付けた 3 つの特徴的なマーク（クロスマーク）を撮像し、正確な三次元位置を計算する技術を導入した。本技術は、直接物体を認識させる方法よりも、光などの外乱による誤認識が少なく、認識精度を高くすることができる。また、この 3 つのマークから成る三角形の形状で、工程毎の作業内容を予め登録することができる。これにより、例えば、トレーによってネジ締め機の種類、ネジ締め位置などを自動認識させることができる。本技術の導入により、ロボットは、マークさえ確認できれば位置や作業を特定できるので、従来のロボットに比べ、ロボットを簡単に、短時間で、専用の位置決めジグも必要とせず、現場に

設置させることができる。

② 安全性の仕様

・肩幅空間制限リンク。

作業者とロボットとが隣接作業しても、互いの肘が当たって作業の邪魔をしない肩幅空間制限リンクを採用した。

・ダイナミックブレーキを標準装備。

各関節軸の制御回路にダイナミックブレーキを入れ、サーボが切れたときに、特に肩と肘ピッチ軸の垂れ下がり速度を低減するようにした。その結果、関節速度が大きければ大きいほど、回生電流が流れ、大きな制動力を得ることができ、如何なる状態でサーボが切れてもゆっくりとアームが落下することが可能な本質的に安全なシステムとした。

・アームの軽量化と関節の低摩擦化。

関節軸にはランニングトルクの少ないギアを選定し、高速回転時のトルクを低減することで、モータを小型化、低出力化した。この結果、関節部の要素部品を小型・軽量化することができ、SP-01の腕の質量よりも1kgも軽い2kg程度となり安全性が向上した。

・狭み込みを防止。

手の平の狭み込みを想定して、ロボット胴体と脇の間隔を25mm開けた。また指先の狭み込みを想定して、肘を折りたたんだときの間隔を20mm開けた。

・手先部材の角部を無くし、丸くする。

ロボットを構成している部材をアルミ鋳物に変更し、全ての角部を無くした。

・高機能カバーの装着

ロボットのアームにネオプレンスポンジシートを巻き、衝突時の安全方策を取り入れた。また、ロボットスーツの素材は流通している収縮性の高い素材を利用し、安価にかつロボットの動作範囲を妨げることがない耐久性とスーツのカラーを作業現場の作業着に類似させることで高い親和性を得ることが出来た。最も危険な手先部には赤や黄色の警告色をデザインし安全面の配慮も行った。

b) SP-02の詳細

SP-02とコントロールボックスの外観を写真8に、仕様を表6に示す。SP-02は前項の生産性と安全性の要求事項を全て取り入れた、コンパクトで安全な次世代型産業用ロボットである。

システムは大きく4つのモジュール（ロボット、コントロールボックス、画像処理用端末、外部制御端末）から構成される。ロボット本体には、モータドライバおよび電源制御回路と共に、エンドエフェクタコントローラも納めている。

このようにすることでコントロールボックスを小型化

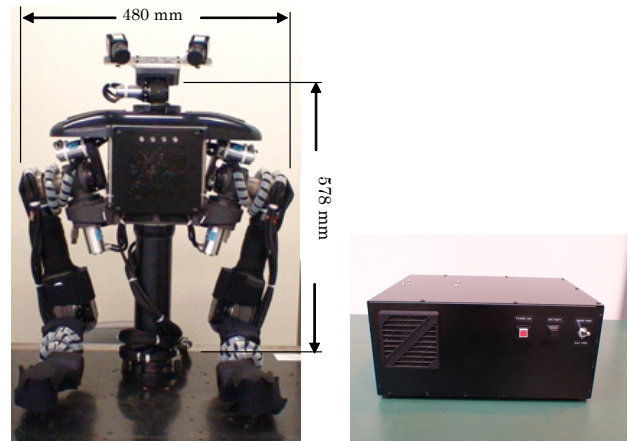


写真8 SP-02本体とコントロールボックスの外観

表6 SP-02の仕様

寸法(mm)	身長	578
	肩幅	480
	胸板	166
	アーム長	560
本体質量(kg)		15
片腕アーム質量(kg)		2
軸仕様		合計15軸
	腰	1軸
	腕	双腕×6軸
	首	2軸
片腕可搬質量(kg)		1
繰返し位置決め精度(mm)		0.05
駆動方式	アクチュエータ	ブラシレスモータ インクリメンタルエンコーダ +絶対位置センサ バックラッシュレス減速機
	ドライバ	デジタルサーボドライバ

し、工場内での装置レイアウトを容易にした。モータドライバ、エンドエフェクタコントローラとコントロールボックスに搭載されている制御用コンピュータ装置とはCAN (Control Area Network) で結び、絶対位置センサはRS485で接続される。これら通信化することでコントロールボックスとロボット間の配線を省配線化しノイズにも強い構成とした。他にも一旦停止機能（一旦停止スイッチや安全センサなどの接点信号が入力されることによりサーボロックする機能）やダイナミックブレーキなど、ユーザの利便性や安全性を意識した要素技術を導入した。また、部品コストを抑えるためにモータ動力電源系は24Vとした。

4. セル生産現場へ導入

(1) 電子部品組立メーカーへの導入

ソニーイーエムシーエス(株)東海テック幸田サイトでは、SP-02をデバイス部品生産現場に導入し、6ヶ月間(2000時間を超えて)順調に稼働させた。同社では、従来、2

交代，2人による作業が平均タクト 23 秒で行われていたのに対し，本ロボットを実導入した結果，平均タクトが 20 秒になり，2人を省人した。稼働率は 99 % 以上であった。

(2) 機械部品組立メーカへの導入

写真 9 に示すように THK(株)三重工場では，クロスローラベアリングの 3 種の型式の仮組み工程に導入し評価した。作業者が実施した場合の平均タクトは 140 秒に対し，ロボットが実施した場合，136 秒であった。

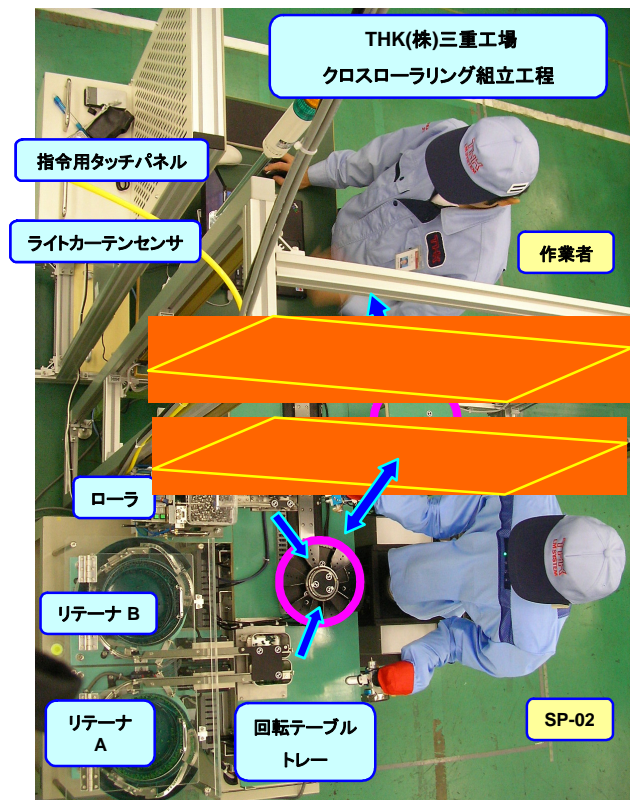


写真9 THK三重工場によるクロスローラリング仮組み工程

本工程では，ロボット手先のハンドがピンセット型をしているため，特に作業者の目を刺す危険性を排除できなかった。リスクアセスメントの結果，作業者とロボットとはライトカーテンセンサにより静的に空間を分離する安全方策をとった。この場合のシーケンスとして，両者が監視領域内に入った時には，ロボットの一旦停止機能が働き動作を停止することで，動作中のロボットに作業者が接触することなく，安全に受け渡しが行われる。作業者が 3 つのマークが貼り付けられたパートレイ上にクロスローラリングを置くと，ロボットはベアリングの型番を自動識別し，ロボット前方回転テーブルに搬送し，ローラやリテーナ（樹脂スペーサ）といった 6 mm 程度の部品を順番にセットし，全ての部品の組付けを完了後再び作業者に受け渡す。作業者はロボットにより仮組みされたクロスローラを検査・グリス塗布・カシメ・梱

包を行う。

THK(株)三重工場において双腕ロボットと作業者が隣接した環境でワークの受け渡しを行う中で，現在まで安全上の問題は発生しておらず，導入に対する安全面の障害はクリアされた。生産面でも計画されたタクトを達成することができ，順調に生産を継続している。

5. おわりに

本稿では，HRP-2 開発の経験を生かして，産業用途向けに開発および製品化を行った双腕ロボット SP-02 の概略報告を行った。SP-02 は現在「HIRO」として学術研究機関向けに販売を開始した。

本開発では，これに従事した GRX(株)，THK(株)，独立行政法人産業技術総合研究所に加え，ソニーイーエムシーエス(株)東海テック幸田サイトと(株)インテックスより多大なるご協力を頂きました。実証試験を行わせて頂いたソニーイーエムシーエス(株)東海テック幸田サイトの皆様と THK(株)三重工場の方々，さらに，さまざまな助言，ご指導をいただいた有識者の諸先生もあわせ，心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：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（次世代産業用ロボット分野）」コンパクトハンドリングシステムを備えた安全な上体ヒューマノイド，平成 18 年度～平成 20 年度成果報告書。