

3. 各テーマの成果詳細

3. 1次世代産業用ロボット分野

3. 1. 1 柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステム

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、柔軟物も取扱える生産用ロボットシステム(次世代産業用ロボット分野)、FA 機器組立ロボットシステムの研究開発」

Ⅲ. 研究開発成果について

公開版

2. 研究開発項目毎の成果

(1) 研究概要

本研究開発は、従来困難であったロボットによる柔軟物の高速かつ確実な組み付けを実現し、また、低コストで簡単、迅速に立ち上げ可能なロボットシステムを開発し、電機電子製造業に提供することを目的とした。開発したロボットシステムは、柔軟物であるケーブルを部品とするFA機器を組立対象としている。FA機器は、ケーブルの他、基板、ねじ、カバーなど、他の多くの電機電子製品に用いられる部品から構成されており、開発した技術及びロボットシステムは広く活用が可能である。

本研究開発では、上記目標を達成するにあたって開発が必要と考えられる技術を次の三つに大別し、それぞれに関して開発内容と目標を設定して研究開発を進めた。

- 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発
 - ①作業エラーからの自動復旧技術
- 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術(ビジョンシステム、力制御、力センサ)の開発
 - ② 3次元センシングシステム
 - a. 柔軟物の3次元センシング技術
 - b. 剛体物の3次元センシング技術
 - ③ 組み付け制御技術
 - a. 高速組み付け制御技術
 - b. 低コスト力覚センサの設計試作
- 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発
 - ④柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術
 - a. 柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発
 - b. 柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

また、これらの技術を統合し、実際の FA 製品の組立において技術検証を行う為、柔軟物を含む製品である FA 制御機器を対象として、組立試験装置を開発した。

⑤FA 機器組立実証システム

次に、各開発技術について詳細を説明する。

(2) 成果詳細

① 作業エラーからの自動復旧方式の開発

①-1 コネクタ挿入における自動復旧技術 (名古屋大学)

本研究では、コネクタ挿入時のエラーリカバリについて研究をおこなってきた。ここで取り上げるのはサーボアンプ上部における基板コネクタの挿入作業である。エラーリカバリは、エラーの検出、エラーの分類、対応するリカバリ手法の選定の 3 段階から構成されている。我々は、それらに対する様々な解決アルゴリズムを提案した。

①-1.1 エラーリカバリシステム

本研究で用いているシステムは、ロボットマニピュレータ、コントローラ、6 軸力センサ、カメラセンサ、コンピュータで構成されている(図 1)。本システムにおいて発生すると予想できるエラーは、コネクタ側の位置がずれるエラーとしてマニピュレータによるコネクタ把持エラー、ソケット側の位置がずれるエラーとしてソケットとベース位置エラーの 2 つを考えることができる。これらのエラーはコネクタマッチングにおける接近ステージにおいて、通常通りのマッチングが出来なかった場合について力センサで検出する。具体的なエラー検出とエラー分類に関しては、組付け作業成功時と組付け作業が“挿入不可能状態”になった場合の両方の状態を区分化された線形モデル(PWA: static piecewise affine force model)を用いて表現する。

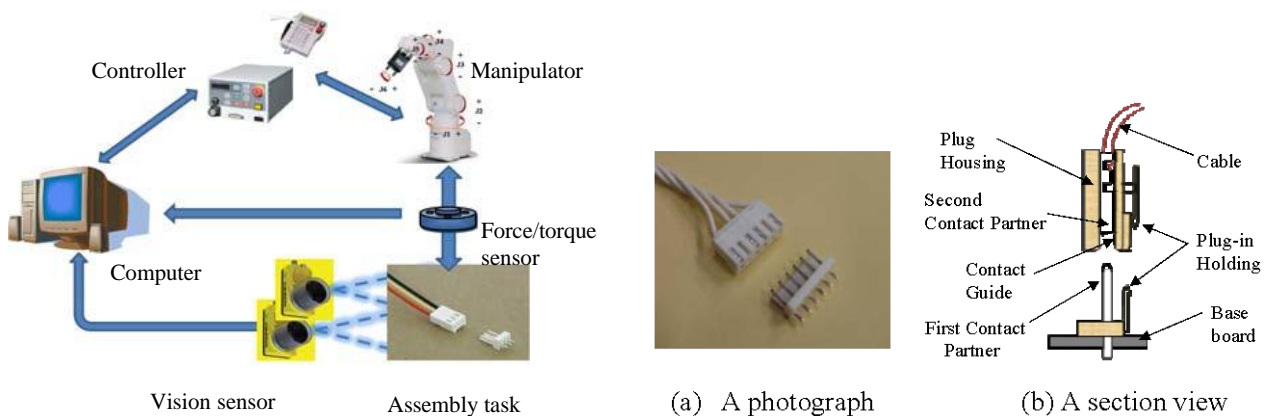


図 1 (左) エラーリカバリシステムの構成

図 2 (右) 対象としたピンコネクタの構成

本研究ではエラーリカバリ手法として、カメラセンサを用いた手法と力センサを用いた手法を用いており、システムのロバスト性を高めている。

①-1.2 カセンサを用いたエラーリカバリ

本研究では、様々なコネクタでの挿入エラーに対応するため、カセンサからの情報を用いたエラーリカバリアルゴリズムとして、以下の 4 種の方法を開発した。それぞれのアルゴリズムの探索について図 3～図 6に示す。

- スパイラルサーチ：手先座標系の Z 軸周りに微小な回転動作を付加する。ピッチパラメータと軌道の関係を図 3 に示す。
- プロービングサーチ：IGBT コネクタの様にピンヘッダーがハウジングで固定されておらず、曲げ変形が起りやすいコネクタに対して、マニピュレータが把持しているコネクタをプローブとして、ピンヘッダーの正しい位置を同定する、接触探索(probing algorithm)である。
- バイナリサーチ I：特にソケットピンがソケット壁よりも高い場合を対象とするリカバリアルゴリズムであり、コネクタを斜めに傾けてソケットピンと接触させることで、接触高さから正しいコネクタ位置への方向を計算する手法。
- バイナリサーチ II：特にソケットピンがソケット壁よりも低い場合を対象とするリカバリアルゴリズムであり、コネクタを斜めに傾けてソケットピンと接触させ、接触を保ったまま一定方向へ滑らせて、z 方向の力の抜けから修正位置を計算する手法。

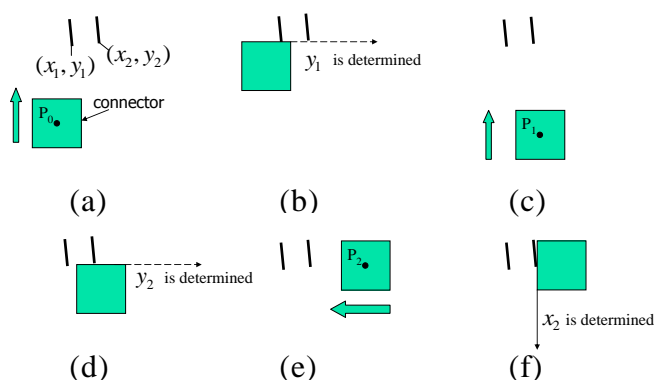
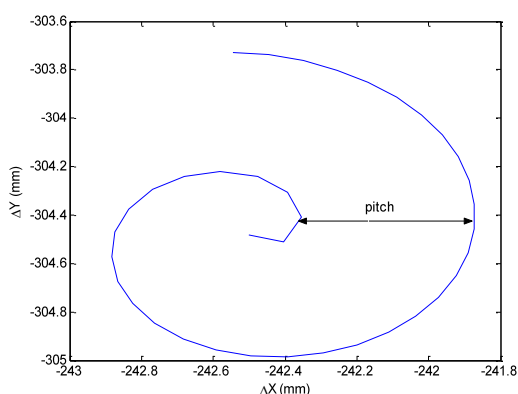


図 3 (左) スパイラルサーチでの探索軌道

図 4 (右) プロービングサーチでの探索

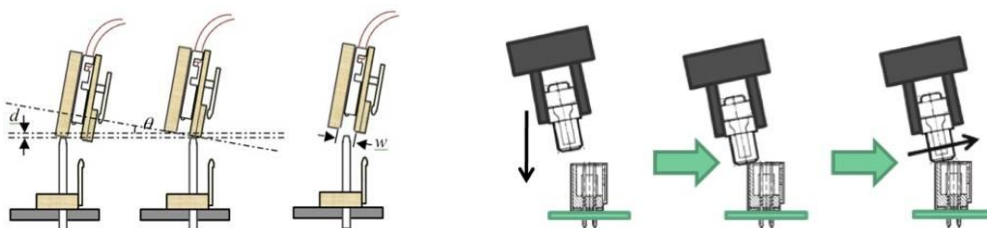


図 5 (左) バイナリサーチ I での探索

図 6 (右) バイナリサーチ II での探索

これらのアルゴリズムの有効性を検証するために、基板上のコネクタに対してランダムに位置ずれを発生させた状態でエラーリカバリ実験をおこなう試験を実施した。この結果、目標 80%を超える 98%以上確率でエラーリカバリが実施できることを確認した。

①-1.3 カメラを用いたリカバリ手法

本研究では受け入れ側エラーのリカバリとしてハンドカメラを、挿入側エラーのリカバリとして環境固定カメラを利用した、テンプレートマッチングで行っている。本手法の特徴としては、光学条件が固定されればほぼ 100%の確率でほとんど全てのコネクタに発生するエラーをリカバリする事が可能である。

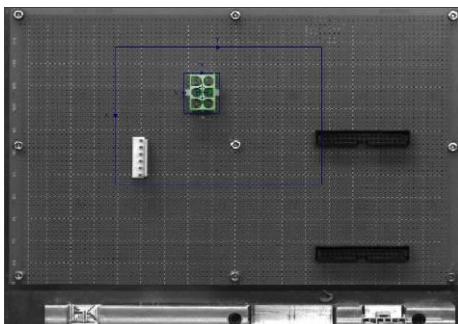



図 7 PCB 基板上的ソケット位置修正

環境固定カメラを用いてコネクタ把持エラーのリカバリを行う場合、コネクタは 3 次元のエラーを含む可能性があるため、把持したコネクタの底面、側面、正面からそれぞれ位置修正を行っている。カメラを用いたエラーリカバリの有用性を検証するために、エラーリカバリ実験を行ったが、ほぼ 100%の確率で位置修正をする事ができた。

①-1.4 様々なコネクタに対するエラーリカバリ

以上のリカバリ手法を用い、挿入時のエラー修正についての評価を行った。実際に用いられるコネクタとしては様々な種類があり、それら全てに対応可能なアルゴリズムは存在しない。そこでコネクタやソケットの特徴に合わせてリカバリ手法を選択する必要がある。実験により、この 5 分類されたコネクタに関してそれぞれのアルゴリズムを用いてリカバリを行い、全てのコネクタのエラーをリカバリできる事を確認した。この分類によって、80%以上のコネクタをカバーできている。5 分類に関しては力覚センサだけでも対応可能なことが分かったため、カメラセンサを組み合わせることにより、現存するほとんど全てのコネクタに対応出来ると考える。

表 1 コネクタの分類と対応するリカバリアルゴリズム

	Probin g I	Probin g II	Spiral search	Binary search I	Binary search II	Hand- eye ca mera	Base- ground camera
 爪無段無 単列底平	○	○	△ Based on shap e of hol ding	△ Based on shap e of hol ding	×	△ Based on shap e of hol ding	○



 爪有段有 単列底平	△ Based on shap e of wall	△ Based on shap e of wall	○	○	×	○	○
 爪無段無 複列底平	△ Based on shap e of wall	○	○	×	○	○	○
 爪有段有複列底平	△ Based on shap e of wall	△ Based on shap e of wall	○	×	×	○	○
 爪無段無単列底段	△ Based on shap e of wall	○	×	×	×	○	○

表 1 はコネクタの種類を 5 つに分類し、それぞれのアルゴリズムが有用であるかを○△×で表した表である。ここで Probing II は、ソケットが壁で囲まれている物に対するアルゴリズムで、Probing I の接触回数を 2 回に省略したアルゴリズムである。ここで、爪とはコネクタとソケットを固定するロック、段とはコネクタ周りの突起、底段とは底面にオフセットのあるコネクタを意味している。

様々なコネクタの挿入作業におけるエラーリカバリ手法として、4 種類の接触探索アルゴリズムと 2 種類のカメラを用いたリカバリ手法を提案した。これらの手法を組み合わせることにより、ほとんど全てのコネクタに発生するエラーをカバーする事ができた。さらに提案したアルゴリズムは実証システムに実装され、エラーリカバリを行う事に成功した

①-2 ネジ締め作業における自動復旧技術の開発 (富山県立大学)

ネジ締め作業における自動復旧技術の開発では、自動ネジ締め作業において、異常状態の判別に機械学習を用いる。判別の方法を提案し有効性を検証した。対象とする作業状態を図 8 に示す。図 8 の左から(a)正常完了状態 (b) ネジ喪失(empty)：ネジの獲得の失敗や、ネジの獲得後に目標のネジ穴に移動する際にネジが落下し、ロボットがネジの無い状態でネジ締め動作を行う。(c) 穴の不一致(failed)：ネジ締めの目標位置とネジ穴がずれていることによりネジが全く挿入されない状態。(d) ネジつまり(jammed)：ネジ穴に埃が詰まるなどネジ先の異物が原因で、ネジが完全に挿入されず、浮いた状態となる。

異常検出、異常診断、自動復旧の方法を図に示す。まず、ネジ締め作業終了後、ロボットの手先

軌道と手首に取り付けられた力センサのデータから特徴量を抽出する。次に、それらを特徴量空間にプロットし、事前の教師データから作成した線形サポートベクターマシン(線形判別機)により2組状態判別を行なう。2組の線形判別を繰り返して全て正常と認識された場合は正常完了状態と認識し、それ以外の場合はエラー状態同士の状態判別を実行し、エラー状態を特定する。

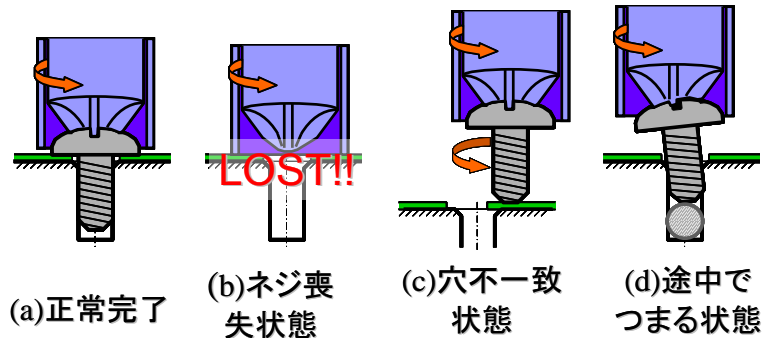


図 8 ネジの状態

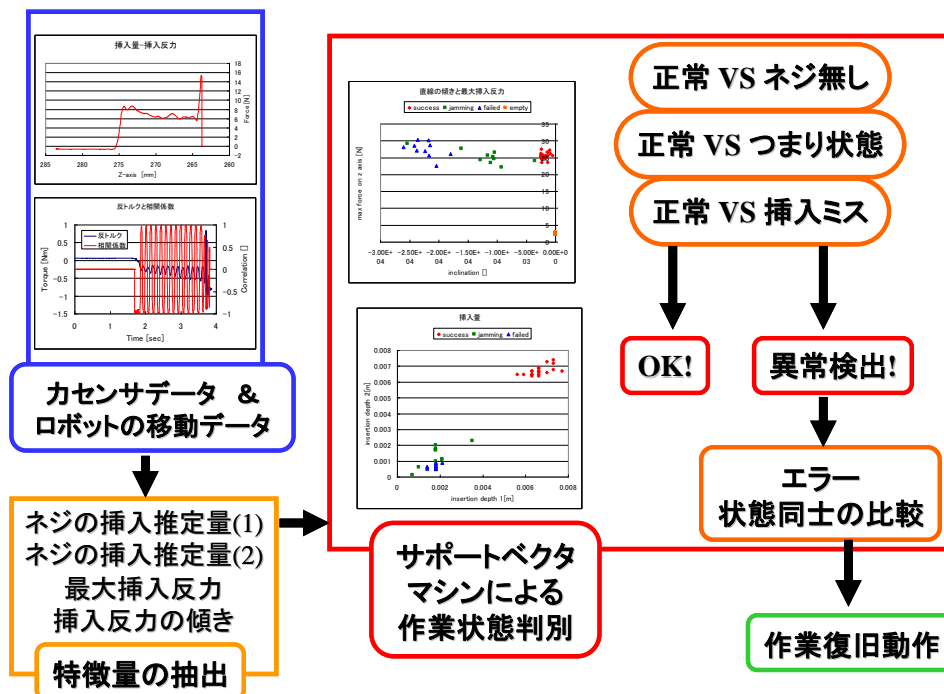


図 9 異常検出, 異常診断, 自動復旧の手順

力センサを介してロボット手先に取り付けられているネジ締め機を用いて検証を行った。ロボットはコンプライアンス制御を実行しながら、ネジ締めドライバの回転速度に追いつく速度で鉛直下方向に移動する。動作終了条件は反力が 50[N]以上になった場合か、設定した終了位置に到達した場合である。実験では各状態を故意に作り、それぞれ 40 回データを取得しそのうち無作為に選んだ 20 組のデータからサポートベクターを作成し、残りの 20 組のデータを用いて認識結果を評価した。認識においては 80 個のデータの内、76 個のデータを正常に認識できたため認識率は 95% となった。

以上の結果を以下にまとめる。ネジ締め作業における、異常検出, 異常診断, 自動復旧技術の構築および評価を行い、目標である .90% を超えることができた。認識技術においてはロボットによるネジ締め動作時のネジの挙動に注目し、振動から挿入量を推定する技術を構築した。また、サポートベクターマシンによる作業状態判別の技術を構築した。

② 3次元センシングシステムの開発

②-1 概要

ターゲットとするコネクタ付きケーブル組立作業自動化には、1) 柔軟物(ケーブル)の姿勢不定性を解消し、そのうえで2) 剛体物(コネクタ)の高精度な操作をおこなうという方法が、タクトタイムを考慮すると現実的である。実現には次の課題があり、ターゲットとする電気・電子部品組立を基準に目標を設定した。

1) 柔軟物の姿勢不定性の解消

- a) 大きな姿勢不定性をカバーできる広い視野を持つセンシング

目標：位置精度 $\pm 2\text{mm}$ ，処理時間 2 秒/視点

- b) 多品種ケーブルの形状・状態の理解

目標：実証システムにおけるバラ積みケーブル取出し，エラーリカバリ作業の実現

2) 剛体物の高精度な操作

- c) 小型・汎用・高精度なセンシング

目標：サイズ約 300cc，通常カメラの 4 倍のダイナミックレンジ機能

- d) 多品種コネクタの形状の理解

目標：位置精度 $\pm 1\text{mm}$ ，処理時間 1.5 秒以内

課題に対し次の技術を開発し，目標を達成した。

1) 柔軟物の 3次元センシング技術

- a) 単眼で広い視野を実現するモーションステレオ方式

位置精度： $\pm 1.5\text{mm}$ 以内，処理時間 2 秒/視点以下(目標達成)

- b) バラ積み状態のケーブル把持優先候補付け，ケーブル姿勢認識アルゴリズム

実証システム上でバラ積み取出し，落下したケーブル復旧動作を実現(目標達成)

2) 剛体物の 3次元センシング技術

- c) ワイドダイナミックレンジ機能を持つ小型 3次元センサヘッドユニット

サイズ：300cc 以下，WDR 性能：4 倍以上(目標達成)

- d) 立方体モデルの組合せによるコネクタモデルマッチングアルゴリズム

位置精度： $\pm 0.9\text{mm}$ 以内，処理時間 1.3 秒以下(目標達成)

②-2 柔軟物の 3次元センシング技術 (北海道大学)

①-1.5 単眼で広い視野を実現するモーションステレオ方式の開発

カメラ 1 台をロボットの手先に搭載し，ロボットを移動させ視点を変えながら撮影をおこなうモーションステレオ方式と，ロボットの運動モデルに基づくノイズ除去方式により広い視野でノイズの少ないセンシングを実現した。図 10 左は一般的なステレオ方式，右が開発方式での円筒面の計測結果であり，高い計測性能が確認できる。評価試験では，単眼カメラ(VGA, 15fps, $f=6\text{mm}$, レンズ歪み補正済み), モーションステレオ(W.D. 70mm \sim 330mm, 基線長 47mm \sim 72mm)で, S/N が-2.11dB から 12.02dB に大幅改善した。また，ケーブル形状認識試験では，100 回の計測で誤差 $\pm 1.5\text{mm}$ 以内に 97.64%の計測データが存在することを確認し，処理時間はロボット動作を含めて 1.673 秒であった。目標値である精度 $\pm 2\text{mm}$ 以内，処理時間 2 秒以内を達成した。

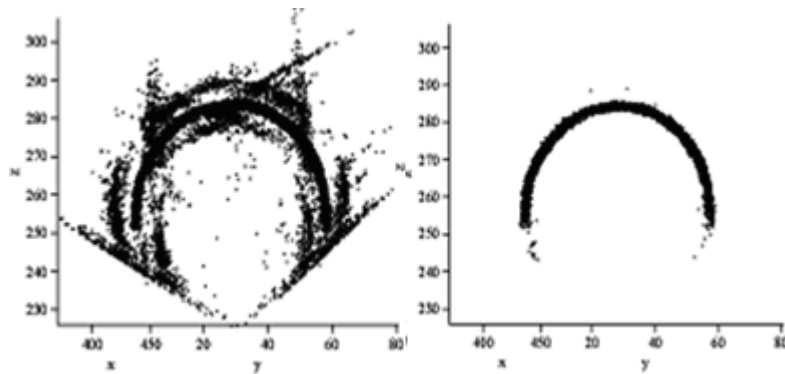


図 10 一般的手法(左)と提案手法(右)による円筒面の計測結果

①-1.6 バラ積み状態のケーブル把持優先候補付け, ケーブル姿勢認識アルゴリズムの開発

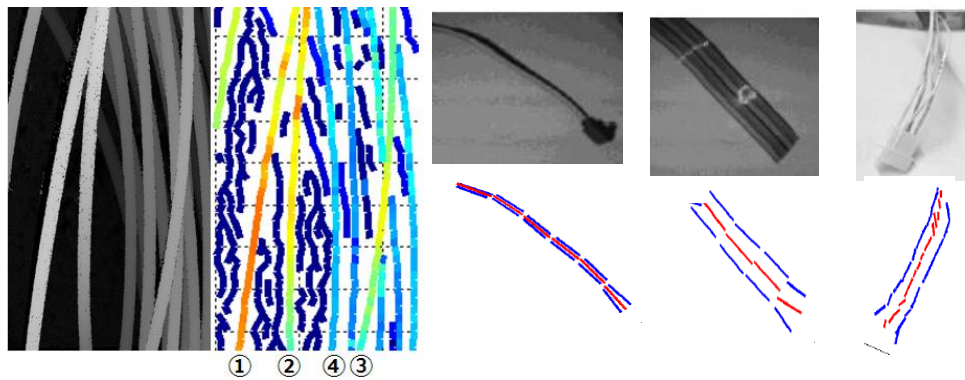


図 11 把持優先候補付け結果(左)と多品種のケーブル姿勢認識結果(右)

バラ積みされたケーブルを高い成功率で取り出すために、バラ積みされたケーブルの掴みやすい位置姿勢を優先付けするアルゴリズム(図 11 左)を開発した。手法はバラ積みの上の方に存在し、ロボットが進出しやすく、周辺に干渉するものがないケーブルほどスコアが高くなる。また、作業中に落下したケーブルを把持し、次の適切な作業を選択するための、多品種のケーブル姿勢認識アルゴリズム(図 11 右)を開発した。手法は計測した 3 次元データから、ケーブルの主方向を推定し、主方向ごとに断面分割化をおこない、各断面にケーブル中心のベクトルと、ケーブルの両縁部分からベクトルを示す。この集合でケーブルをモデル化する。ベクトルの流れが不均一であったり、途切れたりする場合、ねじれや重なりが発生していると判断し適切な作業方法に変更できる。

性能評価として、バラ積みケーブルの取出し作業(VGA, 30fps, f=12mm, レンズ歪み補正済み, W.D. 270mm, 基線長 120mm, 試行回数 100 回)を実施した。結果、開発手法によるバラ積み取出し成功率が 86%, 比較として最も高い位置のケーブル位置を認識して取り出す方式で 49%となり、大幅に性能が向上した。成功時の平均作業時間は 2sec であった。次に落下したケーブルの姿勢認識方法の性能評価として、組み付けジグ上でケーブルを落下させ、それを姿勢認識してコネクタ挿入作業に移行する作業をおこなった。結果、無造作に落下したケーブルでも 91%の状態で作業復帰できた。処理時間は 2.24sec, 最大把持位置誤差は 1.145mm であった。目標であるバラ積みケーブル取出し, エラーリカバリ作業を実した。

②-3 剛体物の 3次元センシング技術 (三菱電機株式会社)

①-1.7 ワイドダイナミックレンジ機能を持つ小型 3次元センサヘッドユニットの開発

開発した小型 3次元センサはヘッドユニット部とヘッドユニット制御部から構成されている。ヘッドユニット部は、図 12 に示すように主に、半導体レーザー(LD: Laser Diode)と MEMS ミラー(MEMS: Micro Electro Mechanical System)のスキヤニングシステムによって対象物に対して格子パターンを投光するパターン投光部と、ゲインの異なる二種類の画像を同一フレーム内に重ね合わせることで通常のカメラよりも広いダイナミックレンジ(WDR: Wide Dynamic Range)を実現するカメラヘッド部によって構成されている。また、ミラー振れ角の両端に二分割フォトダイオード(PD: Photo Diode)を配置することにより、二点の通過時間を測定することでミラーの振幅速度を測定し、その振幅速度を元に MEMS ミラーのフィードバック制御することで、振幅速度のジッター抑制を実現している。ヘッドユニット制御部では、PC からの信号によってカメラを制御するためのカメラ制御部と、PC からの投光パターン指令によってパターン投光部の制御を行う投光部制御部によって構成されており、投光部制御部では、カメラ制御部からのタイミング信号を元に、測定平面上に縦縞スリットパターン光の投影を行う。尚、ヘッドユニット部の容積は、光学系及び回路基板配置の最適化によって 300cc となっており、目標の 300cc 以下を実現している。

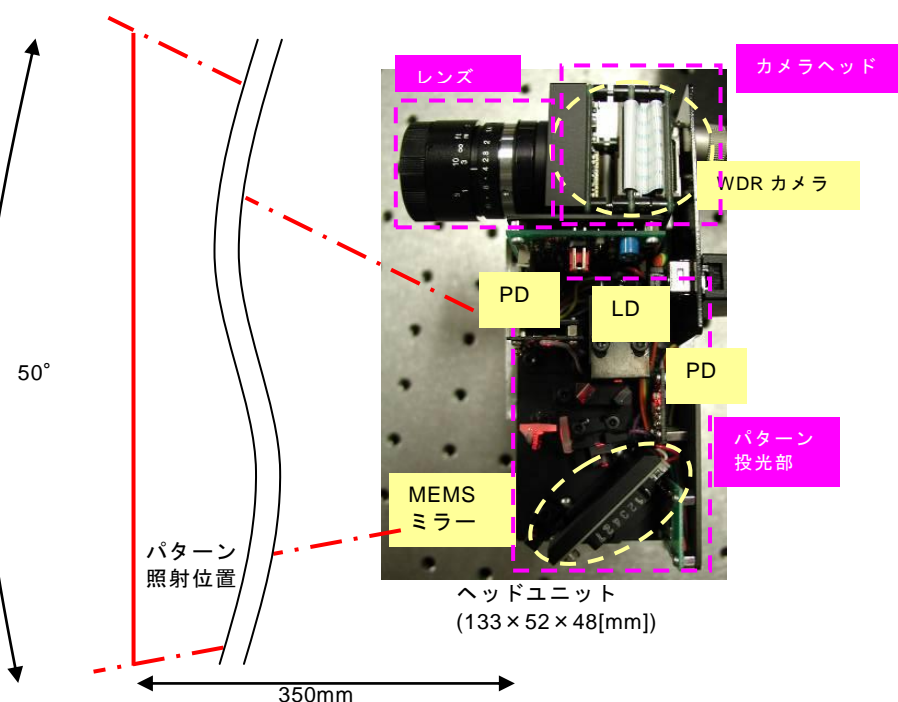


図 12 3次元センサシステムにおけるヘッドユニット

図 13 はダイナミックレンジ補正原理を示す概要図である。横軸がセンサ入射光量、縦軸が A/D のデジタル出力である。図 13(a) は AFE-TG(Analog-Front-End-Timing Generator)を 1 個用いた従来の特性図であり、10bit データの場合、高輝度部を撮像して、出力信号レベルが 1023 に達すると輝度が飽和(白飛び)する。図 13(b) は本方式の特長である、AFE-TG を 2 個用いた場合の特性であり、センサから出力された映像信号は、分岐後 AFE-TG1, AFE-TG2 に同時に入力される。このとき、AFE-TG1 と AFE-TG2 では異なるアナログゲイン値を適用することにより、明画像と暗画像が得られ、最終的にこれらの画像を FPGA 内でリアルタイム加算することによってパターン照射時におけるダイナミックレンジ拡大を実現している。この場合、明画像とは図 13 (b)

の「AFE-TG1」出力画像を指しており、高輝度部は白飛びしているが、低輝度部の階調が保持された画像を意味する。暗画像とは図 13(b) の「AFE-TG2」出力画像を指しており、低輝度部は黒潰れしているが、高輝度部は階調が保持された画像のことを意味する。また、これらの画像は同時に露光開始されているため、本方式のように時間的に変化して走査されるパターン照射方式であっても問題なく露光が行われるという利点がある。

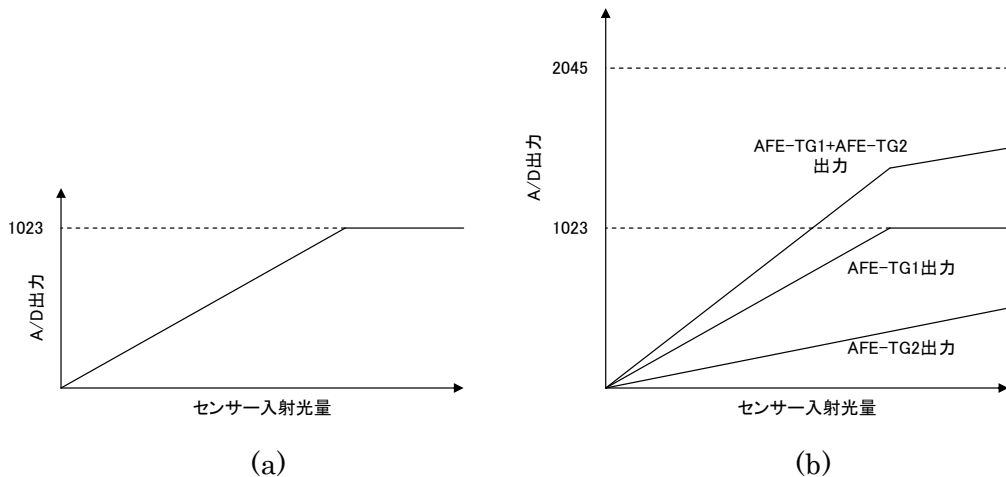


図 13 WDR 補正原理図 ((a) : 通常, (b) : WDR 補正処理)

開発した小型 3 次元センサにて従来距離計測が困難な黒ケーブルを対象物とした場合の評価を実施した。図 14 はダイナミックレンジ拡大+階調補正効果について検証した画像を示しており、階調補正効果が確認できる部分を橙色で囲んでいる。図 14(b)「WDR 補正あり」では、黒ケーブルの階調が再現されていることを確認した。

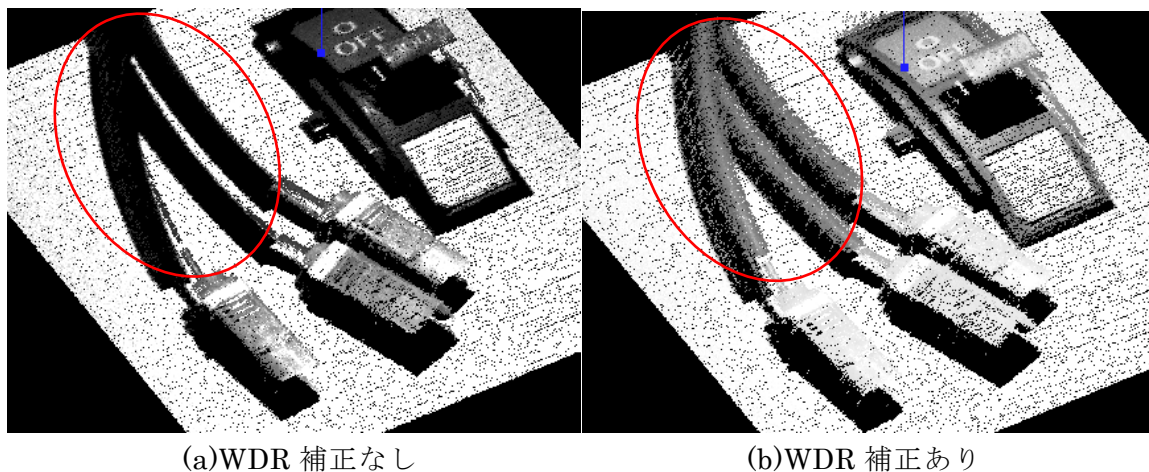


図 14 ダイナミックレンジ+階調補正効果比較

①-1.8 立方体モデルの組合せによるコネクタモデルマッチングアルゴリズムの開発

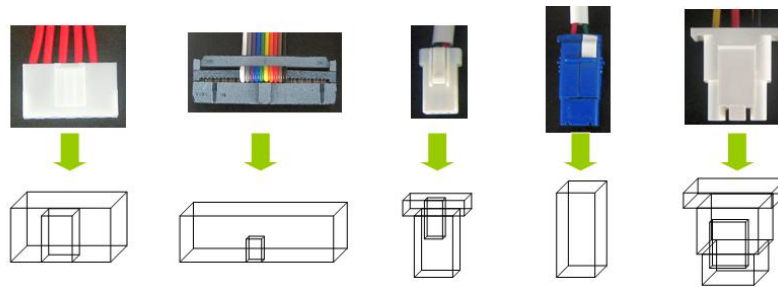


図 15 コネクタの立方体モデル化

コネクタの姿勢認識は図 15 に示すように、作業者がコネクタの実寸法をもとに立方体を組合せたモデルを定義し、このモデルと 3 次元データとのマッチング処理(図 16, ただしわかりやすいように 2 次元画像上にモデルの射影を表示している)により位置姿勢を計算する。

コネクタの姿勢を変えた場合の認識結果を示すことでコネクタ部認識処理が有効に機能していることを示す。図 16 に白コネクタ及び赤コネクタの認識結果例を示す。いずれもコネクタの回転に合わせて正しく位置姿勢が認識されていることが確認できる。この際の認識精度は $\pm 0.9\text{mm}$ (目標 $\pm 1\text{mm}$)であり、処理時間は 1.3 秒以内(目標 2 秒以内)であることを確認している。

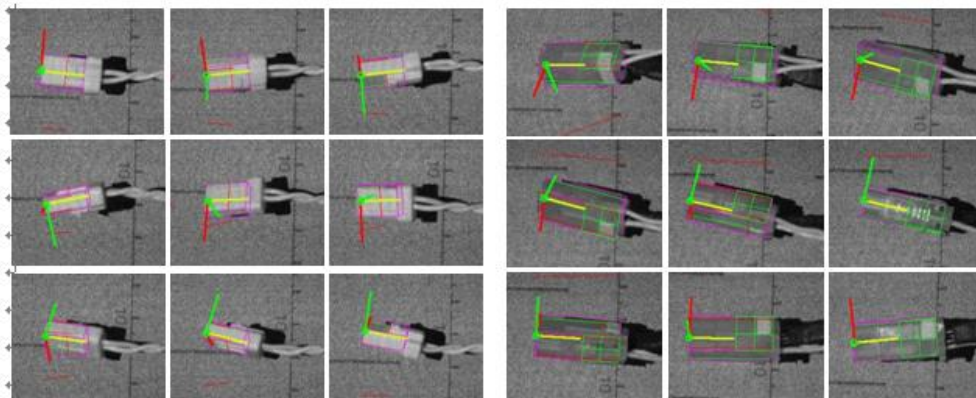


図 16 コネクタ姿勢認識評価の様子

③ 組み付け制御技術の開発

③-1 高速組み付け制御技術の開発

力制御を用いる場合の動作の高速化と、位置ずれにより過大な力が作用したことを検知して停止することにより、人とほぼ同等の作業時間で FA 機器に用いられているコネクタの挿入作業を実現した。

- 力制御系と接触中の対象物の動特性をリアルタイムで同定する手法を組み合わせた適応力制御方式を検討し、シミュレーションを実施し効果を確認した。
- コネクタ挿入作業に適用する実験を実施した。
- 規定以上の力が作用する場合に、力制御を中断し状態変数を書き換えることにより、接触検知・リトライを可能とする方式の検討、実機評価を実施した(図 17)。
- 力制御パラメータのリアルタイム変更により、位置ずれ時の安全な停止と高速な挿入作業(挿入時間は約 0.7 秒で人とほぼ同等)の両立を実際の FA 機器コネクタの挿入実験で実証した。

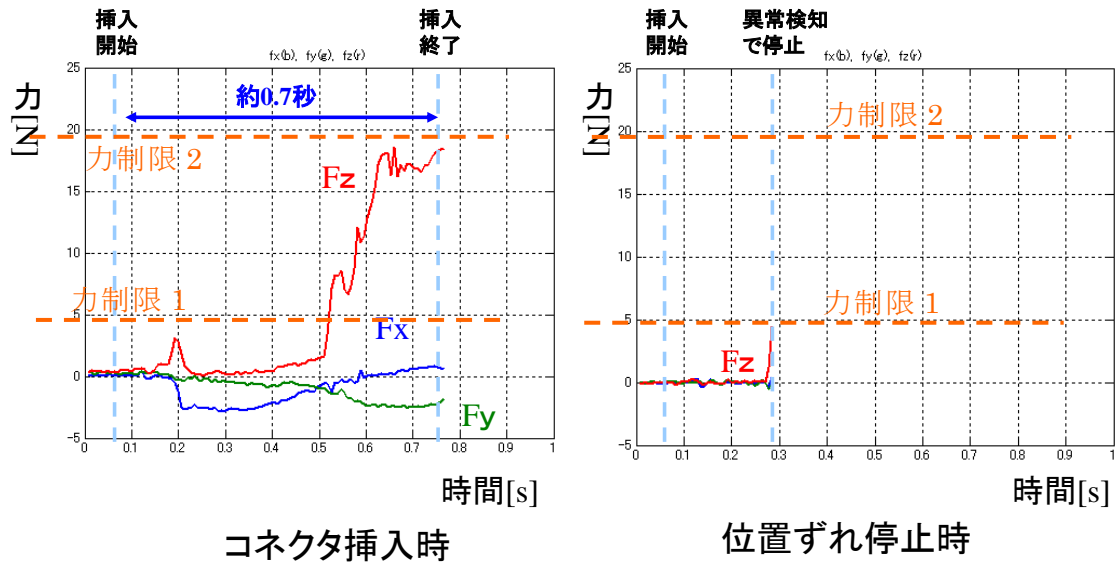


図 17 コネクタ挿入実験時の力覚センサーデータ(成功時, 位置ずれ停止時)

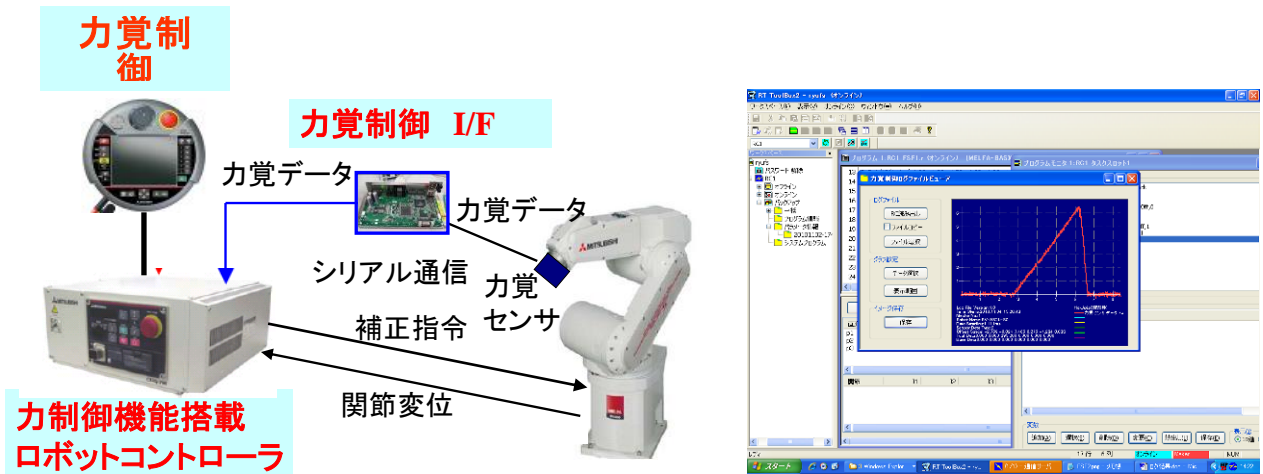


図 18 制御機能のロボットコントローラ搭載と力情報の確認機能

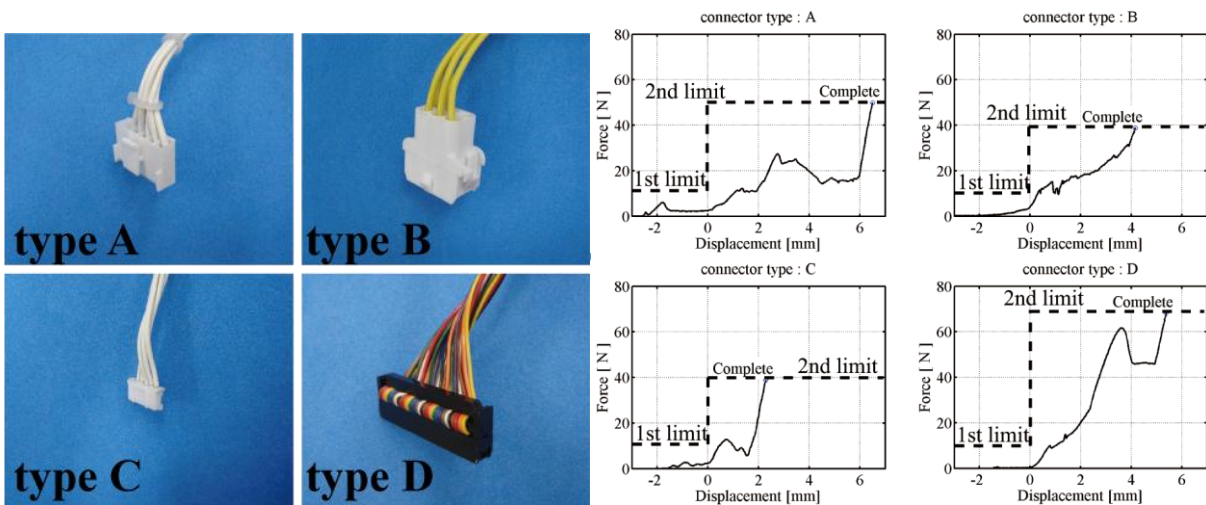


図 19 多品種コネクタでの検証

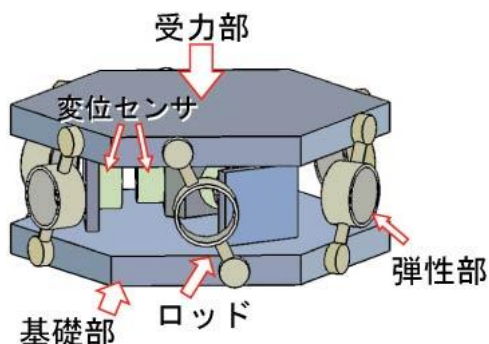
さらに、開発した力制御機能をロボットコントローラへ実装することで、通信による動作遅延の排除や操作者手元での力情報の確認機能を実現し、使い勝手を向上させた(図 18)。

また、開発した制御機能の汎用性を確認するため、様々なコネクタの中から典型的な形状をもつものを数種類選定し、これらについて挿入試験を実施した。それぞれのコネクタに対する挿入反力を図に示す。Limit で示してる力覚制御パラメータを切り替えることにより、いずれのコネクタに対しても挿入作業と衝突時の安全性の確保を両立することができた(図 19)。

③-2 低コスト力覚センサの設計試作

コネクタ挿入・作業確認を低コストで実施するために低コスト力覚センサの設計、試作を行った。本研究開発では、構造体として上下 2 枚の板状部材間を 6 本のロッドで結合したスチュアータプラットフォームを模した構造を用いることで、力の干渉によって生じる非線形的な変形を低減し、また、変形を測定するセンサとして 2 次元変位を測定可能な光センサを用いることで組立易さを向上させている。

図 20 (a) に開発した力覚センサの基本的な構成を示す。本センサは、センサの受力部と基礎部となる 2 枚のプレートと、それらをつなぐ 6 本のロッド、そして受力部と基礎部との間の相対変位を測定するための 3 組の光学式変位センサから構成されている。ロッド部は中間に弾性部を持ち、所定の剛性を持つよう設計されている。変位センサはスポット光源となる LED と 4 分割 PhotoDiode (PD) とで構成されており、それぞれが受力部と基礎部に向かい合って固定されている。4 分割 PD 上でのスポット光の 2 次元変位を知ることができる。3 組の変位センサから得られた変位 $D \in R^6$ と、既知の受力部への力 F との関係性を予め調べておくことにより、未知の力を検知することが可能になる。



(a) 力覚センサ構成



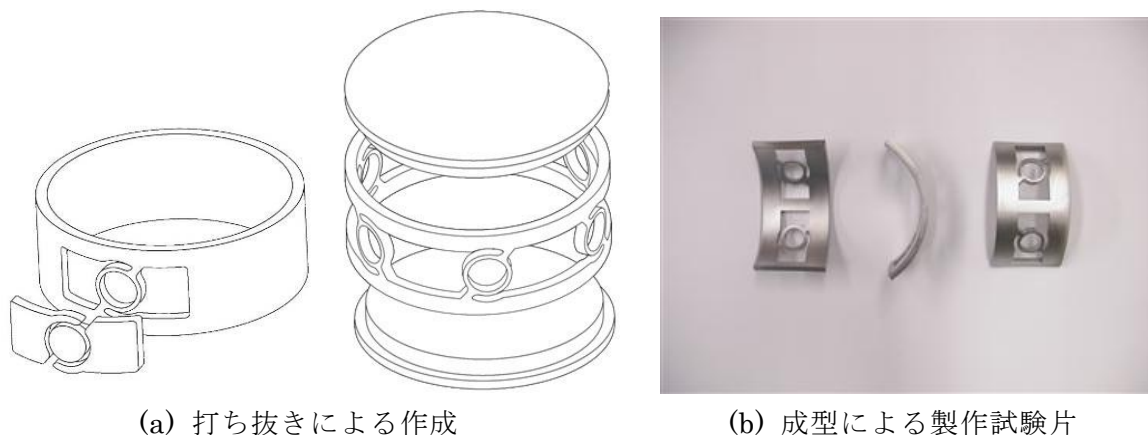
(b) 試作力覚センサ構造体

図 20 開発力覚センサ構成概要

試作した力覚センサの外観と、内部の構造体を図 9 (b) に示す。試作した力覚センサの定格は $F_x, F_y = 60 \text{ N}$, $F_z = 120 \text{ N}$, $M_x, M_y, M_z = 5 \text{ Nm}$ に設定した。外形 $\phi 73\text{mm}$, 高さ 29mm である。また、ロボットなどへの取り付けの際に、取り付け方によっては出力にオフセットが生じる場合があったため、構造に修正おこないオフセットが出にくくしたものは、高さが 39mm となった。力覚センサ内部には変位演算基板が搭載されており、PC 等へ RS485 を利用したシリアル通信で、サンプリング 1ks/s でデータを送信する事が可能である。

製作コストについては、一般的な市販力覚センサ価格約の半分を従来品製作コストとして仮定してこれを $1/3$ にすることを目標に低コスト化の開発を行った、開発した力覚センサはひずみ検知方式ではなく変位検知方式であるため図 21 に示す様な打ち抜きや成形といった制作方法でも出力に影響を受けにくいという特徴をもつ。このことから構造体の制作方法としてこれらの

量産性に優れた加工方法や、光学変位センサによる組立性向上の効果を、量産時の製作価格推定に反映させることで目標を達成できるという結論を得た。



(a) 打ち抜きによる作成

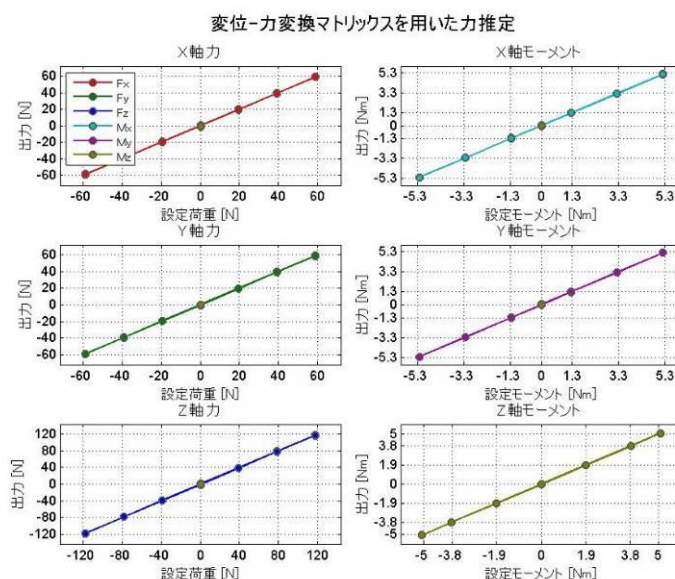
(b) 成型による製作試験片

図 21 量産対応加工の検討

試作した力覚センサの性能を検証するため、図 22(a)に示す。測定治具を用い計測実験を行った。計測実験によって得られた負荷とセンサ出力の関係から力変換行列を導き、この力変換行列を用いてセンサに加えられた力を推定した結果を図 22(b) に示す。各軸に対して定格荷重を3回繰り返して与えた際の結果であるが、加えられた荷重に対して線形的な出力を得られていることが分かる。



(a) 検証試験装置



(b) 力出力

図 22 力覚センサ精度測定

また、得られた結果について非線形性と分解能を評価したところ、非線形性については、単に受変力部変位に対して剛性行列を作用させた場合では、最大 5% となった。これに補正を実施した場合、非線形性は 1.1% 程度となった。分解能については内蔵回路の最適化と取得データのフィルタ処理を用いることで、0.2% 以下という結果を得られた。

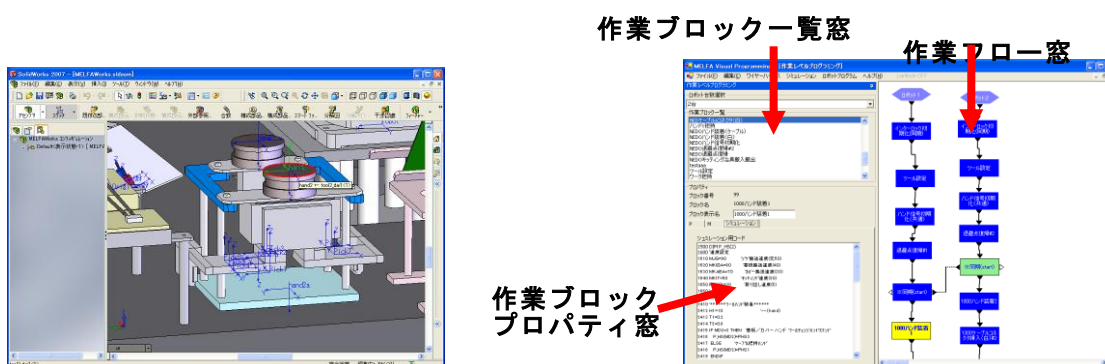
さらに、試作した力覚センサをロボットへ装着し、組み付け制御を行いながらコネクタ挿入試験を実施した。実験の結果、コネクタ挿入時の力制御を問題なく実施できたことから、開発した力覚センサは実用上問題ないという結論を得た。

④ 柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術の開発

④-1 柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

ロボットに組立作業を行わせる場合、ロボットの動作はロボット言語で記述し、作業位置は実際にその位置にロボットを移動させ、記憶させるオンライン教示方式が一般的である。オンライン教示方式において作業が複雑である場合、ロボットを動作させるロボットプログラムが複雑かつ大きくなり、教示位置の数も膨大となるため、プログラムの作成と教示に大変な労力と時間を要する。また、ロボットと周辺環境の干渉に注意する必要もある。そこで、本開発では、短時間で容易にロボットによる組立システムの構築が可能となるオフライン作業レベルプログラム生成システムの実現を進めた。

まず、組立対象製品である FA 機器の組立作業の分析を実施し、柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムに必要な機能の抽出など構想設計した。その後、柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの設計製作を実施した。その結果、本システムは、組立て対象となる部品を登録するためのデータベース機能、データベースに登録された部品エントリーに対し、把持や組み付けの座標値をオフライン設定するオフライン教示ガイダンス機能(図 23(a))、登録された情報を援用する作業レベルプログラミング機能(図 23(b))、ロボットプログラム生成機能、シミュレーション機能(図 24)、から構成することにした。



(a) オフライン教示ガイダンス機能

(b) 作業レベルプログラミング機能

図 23 開発機能



図 24 シミュレーション機能

図 23(b) において、特徴的な機能を説明する。まず、ある程度のロボット動作の塊を作業ブロックとして登録出来る。作業ブロックのプロパティ(中身)には、ロボット言語を書き込む。作業ブロックはコピー&ペーストで使い回せるので、過去の例を連符レートにして、プログラミング時間を短縮しうる。登録された作業ブロックを一覧から選んで作業フロー窓内に羅列することで一連のロボット作業シーケンスを記述できるので、直感的な操作を繰り返すことで、プログラミング時間の短縮が期待できる。さらに、作業ブロックはマウス操作で順序を入れ替えられる。すなわち、例えばロボット手待ち時間を減らすような調整作業の試行時間が短縮される効果が期待される。

以上のように、本システムを用いて、作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成、シミュレーションによる動作確認が可能となったので、今回の検証システムを例題にして、コネクタ把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程を対象にプログラム作成を行い、その効果を評価した。

従来方式では、ロボット言語プログラムは、オペレータが記述して 820 行程度の規模であり、初期の開発に 3 日間程度、その後の調整には 4 日間程度の、合計 1 週間程度が必要であった。これに対し、本システムでは、初期開発 1 日間、調整に半日で合計 1 日半程度と見積もれる。結局、プログラミング・調整時間の比は、1/5 である。

④-2 柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

柔軟物であるケーブルを高速で搬送しようとする時、ケーブルが振動し、経路途中の周辺物に接触したり、停止時の振動が収まる待つために作業時間が長くなるなどの問題がある。そこで、ケーブルの特性を考慮して振動抑制を行う軌道生成方式を開発した。

実証システムと同様の環境下において、ケーブルの搬送時に回転を伴う動作に対して、ケーブルの振動を抑制する軌道を生成するアルゴリズムを提案した。振動抑制アルゴリズムにおいては、移動終点付近で滑らかで、ケーブルの重心の移動量を抑制するような軌道を生成することを目的とした。関節空間におけるマニピュレータの 1,2,3 軸の経由点を操作量とし、降下法を用いて最適なマニピュレータの軌道を生成した。また、柔軟物体の挙動を再現するシミュレーションプログラムを作成し、生成された軌道の効果を確認でき、ユーザーが経由点を指定した場合の挙動も再現できる GUI を開発した。

最適化前と最適化後のケーブル先端の振動を比較すると、シミュレーションにおいて 70% の減少効果があり、検証システムにおける実機実験において 50% の減少効果があることが確認できた。

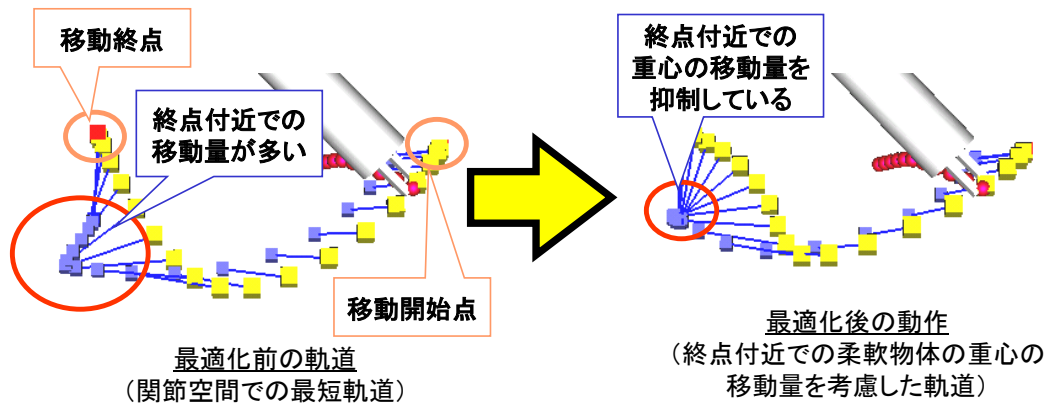
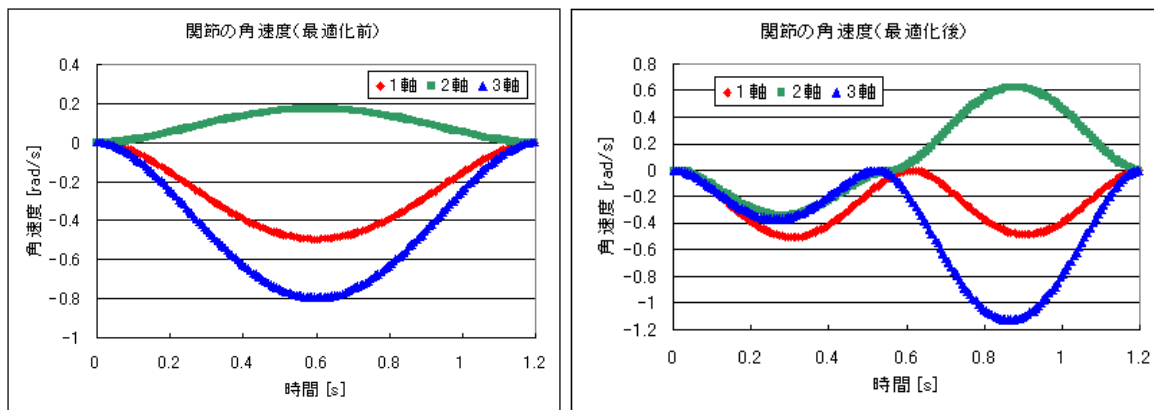


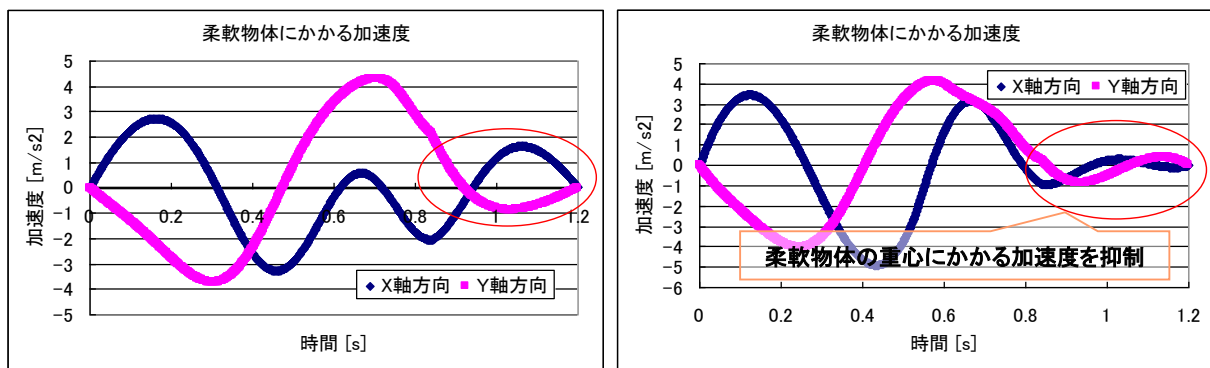
図 25 ケーブル重心の変化を抑制する軌道生成方法



(a) 最適化前

(b) 最適化後

図 26 生成された 1,2,3 軸の関節軌道



(a)最適化前

(b)最適化後

図 27 ケーブル重心にかかる加速度

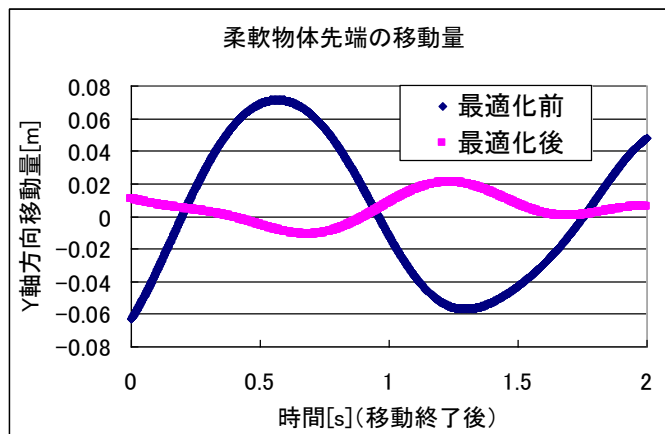


図 28 ケーブル先端の移動量

⑤ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

開発した要素技術の有効性を確認し、柔軟物を含む FA 機器を実際に組み立てられることを確認するために実証システムを構築し、評価を実施した。実証システムの目的は次の通りである。

- 開発した要素技術を生産システムに適用し、技術の安定性や汎用性を評価する
- 開発した要素技術を適用した生産システムの生産性を人間と比較して評価する

⑤-1 組立作業

評価対象となる FA 機器の構成はベース部分、カバー部分、基板、ケーブル付きコネクタ、ネジによって構成されている。作業としては一般的な組み付け作業として、ネジ締め作業による基板取り付けカバー取り付けを含み、さらに柔軟物としてコネクタ付きケーブルを含む構成となっている。コネクタ付きケーブルは、ケーブルの両端にタイプの違うコネクタが取り付けられており、二股に分かれたタイプと分かれていないタイプから構成されている。

表 2 組み立て対象 FA 機器の組立工程

工程	組み立て工程内容
1.	コネクタ付きケーブルの色つきコネクタ(極性あり)をベース部に 6 個挿入する
2.	基板をベース部の位置決め部材のある位置に組みつけ、3 点ネジ止めする。
3.	白色コネクタ(ヘッダ側にハウジングあり)を 4 個挿入する。
4.	カバーを設置し、4 点ネジ止めを実施する。

上記 5 つの部品を組み付け実施を、人間の組み付けと同等の生産性で組み立てが可能なシステムを構築することを目標とした。表 2 に組み立て工程を次に示す。組立作業での人間の各要素作業を実際の工場作業者の作業映像から抽出し、積算した値を組み立て時間として算出した結果、確認作業を含めおよそ 5 分という結果になった。

⑤-2 システム概要

この FA 機器組立作業をロボットシステムを用いて実現するために、実証システムを構築した。

トAは、部品搬送と整列作業を主に担当し、部品供給スペースから必要な部品を組み立てスペースに搬送しロボットBと協働しながら組み付けを実施する。ロボットBは、組み立て作業を担当し、ロボットAが整列したコネクタ付きケーブルを使った組み立て作業とネジ締め作業を担当した。なお、ロボットAはビジョンセンサ、ロボットBは力センサを備えておりそれぞれ組み付けに利用した。

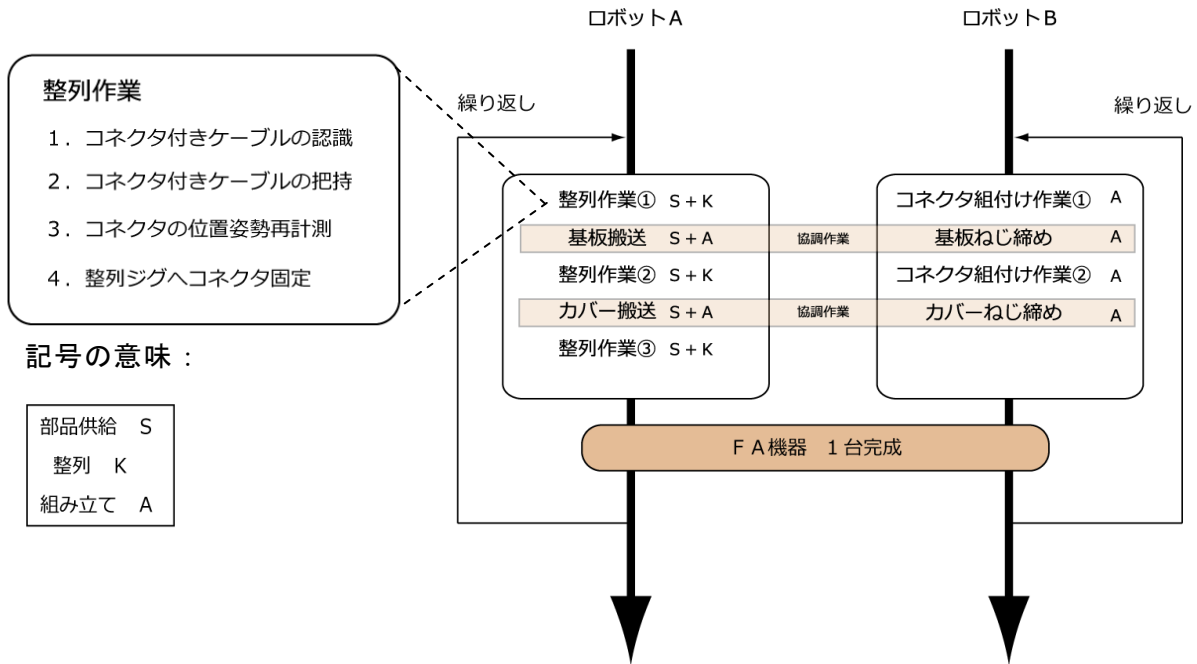


図 31 ロボット 2 台の組み立て作業フロー

⑤-3 整列工程の導入

実証システムでは単純に人間の作業を置き換えただけではなくロボット作業特有の仕組みとして整列(キッティング)の工程を設けている。整列工程無しで直接作業する方式であると、1本のケーブルにつき2個のコネクタが付いている場合に、ロボットAが次の組み付けまで待ち続けることになり非効率である。一方で、ロボットBがベース部材にワークを挿入した後に再びコネクタ端部を認識してつかみ出すことが困難であるという結果になった。

これに対し、解決策として我々は「整列作業」を追加することで解決を図った。整列作業とはコネクタを整列ジグに整列する作業である。ロボットを使った生産システムにおいて、作業工程にワーク整列工程を追加することによる効果は表3 ワーク整列工程の効果 に示す3つである。

表 3 ワーク整列工程の効果

ワーク整列工程の効果	
1.	コネクタ両端の位置決めを待ち時間無く効率的に行える
2.	ビジョンセンサの認識限界精度を組み付け時の要求精度のミスマッチを防止する
3.	各作業で作業遅れが発生しても全体タクトの遅れを最小限にする

特に、本システムでは3次元認識技術と自動復旧技術という作業時間が不定である要素を含むため、タクトタイムが不定であり、2台とも同じワークへ組み立て作業を実施すると、待ち時間が発生する危険性がある。「組み立て工程」と「整列工程」は時間的にも空間的にも完全に分離されており「整列スペース」で整列された位置決め精度が後工程の「組み立てスペース」でも保持されるようにジグで位置決めすることで、ロボットの待ち状態を解消しつつ必要な精度を保持することが出来た。

⑤-4 システムの中の要素技術適用とロボット作業分担

実証システムを立ち上げる中で、オフラインプログラミング技術、3次元ビジョンセンサ/3次元認識技術、力センサ/力制御技術および自動復旧技術について適用して評価を行っている。適用内容については、次に説明するとおりである。

①-1.9 オフラインプログラミング

本システムのように自由度が高く、最適なシーケンスを検討するために工程の入れ替えを頻繁に行うシステムでは、作業単位のプログラム入れ替えを簡易に実施できることが望まれる。このニーズに対して、オフラインプログラミングを適用し作業入れ替えを実施した。

①-1.10 3次元ビジョンセンシング技術

ロボットAの作業で、柔軟物がバラ積み供給された状態から整列されるまでの工程の中でコネクタおよびケーブルの認識を実施している。最終的にコネクタ先端が整列ジグに挿入できるように、ロボットAが柔軟物を把持した後のコネクタ先端の位置姿勢を開発したセンサを用いて計測し、開発したアルゴリズムを用いて3次元認識した。

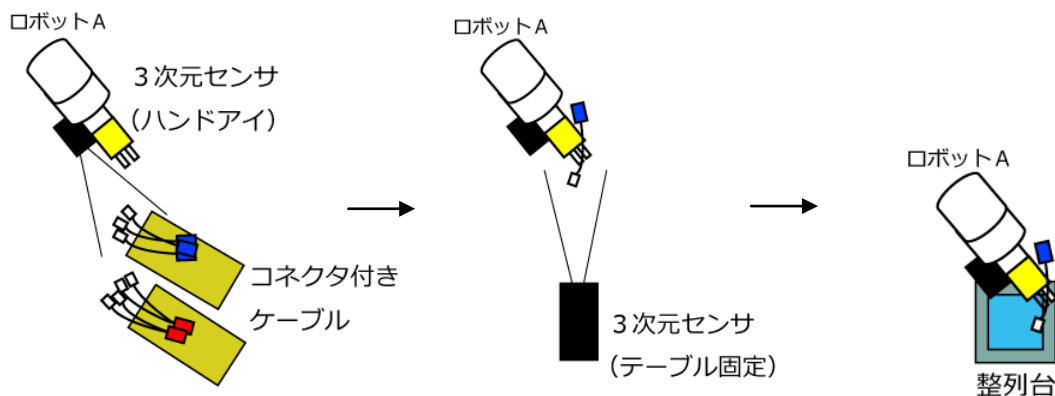


図 32 3次元認識と整列作業フロー

①-1.11 組み付け制御技術

ロボットBの作業で、コネクタを挿入する場合に高速で挿入するために早急にエラーを検出するために開発した力センサによるロボットの手先にかかる力の計測、開発アルゴリズムによる早期異常状態検出を実施した。ここで、異常状態とは部品の微小な位置ずれによる引っかかりや異物混入により過大な負荷がかかっている状態であるが、早期に異常状態検出が可能であるため、惰走による過大な負荷を回避できるため挿入速度を上げることができ、高速化が可能となった。

①-1.12 自動復旧技術

作業エラーの検出について、開発技術を「コネクタ組み付け時の挿入」と「ネジ締め工程」に適用した。コネクタ挿入については、要素技術で説明した挿入時の4つの状態を定義するためのパラメータを数回の学習によって獲得し挿入後のエラー検出を実施した。また、ネジ締めについては、要素技術で説明した通りに、「正常組み付け」、「ネジ詰り」、「ネジ挿入ミス」、「ネジ空打ち」の4つのモードを分類して状態空間を分離するためのパラメータをそれぞれ数回ずつ学習データを与えて獲得しネジ締めエラー検出を実施した。また、自動復旧技術については、コネクタ組み付け挿入およびコネクタ付きケーブル整列動作について自動復旧動作を適用し、前記エラー検出で異常であると検出された場合に自動復旧動作を実行させる。コネクタ挿入時には、白色の基板に組み付けるコネクタについてはスパイラルサーチアルゴリズム、色付きコネクタについてはプロービングサーチアルゴリズムを適用した。適用した自動復旧技術の選定は、図 33 に示す様に自動復旧に利用可能な周囲領域とコネクタ形状から選定した。選定方法詳細は自動復旧技術の部分で説明した通りである。

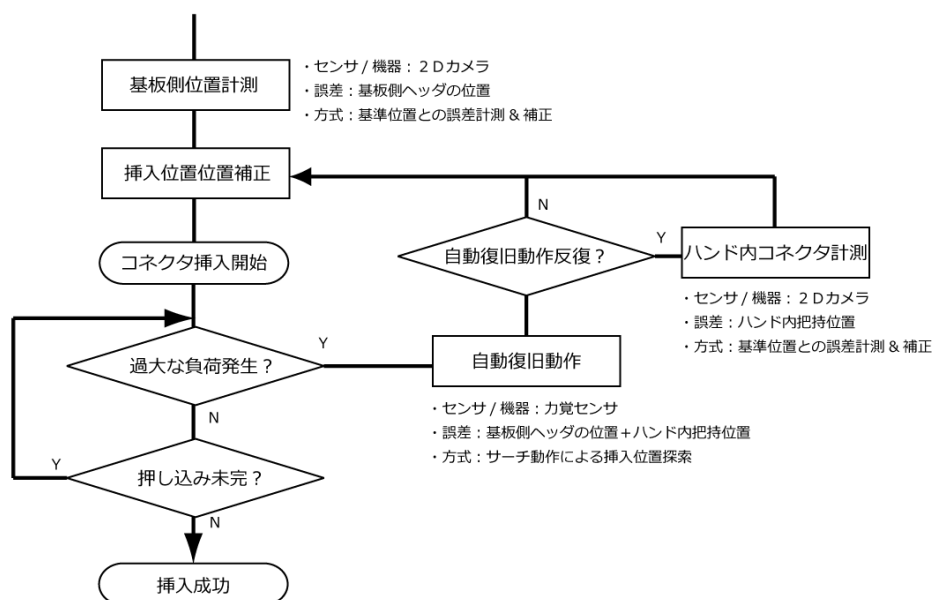


図 33 コネクタ挿入時の自動復旧アルゴリズム

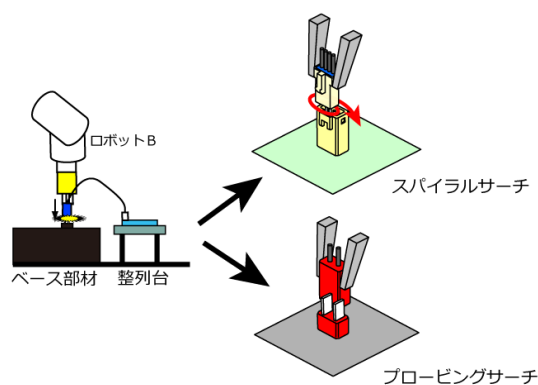


図 34 コネクタ挿入時の自動復旧動作

コネクタ付きケーブル整列動作に関する自動復旧動作については、3次元ビジョンセンサ利用の認識処理を行った際、誤認識や計測結果から動作範囲の観点で作業困難な場合が発生した場合について停止や危険動作をすることなく動作をする枠組みを構築した。把持状態や計測データのばらつき具合によってコネクタとして認識しない場合には、複数視点で確認動作を行い、コネクタとして認識が出来なければ把持エラーとしてワークを除去する。また、コネクタを挿入した後でコネクタが整列ジグから外れるような場合、状態を認識して、作業フローを必要なシーケンスから繰り返すような作業フローを構築した。なお、今回は状態の認識としては整列状態を光電センサ(光遮蔽のON/OFF)で管理した。また、作業途中で両方のコネクタ端が抜けたり、コネクタ付きケーブルを2本からまりあったまま搬送した場合などは、落ちているワークを認識し、除去する枠組みも追加した。これにより、システム内は常に正しいシーケンスを遂行し続けようとしつつも、不要なワークは除去していく安定稼動が可能なシステムとなった。

⑤-5 評価方法と評価結果

実証システムの評価方法としては、生産効率と安定性の評価を行った。生産性については人間の組み立て時間を基準にして1機組み立てる時間の比較を行った。結果として、プロジェクトの3年目から評価を開始して、3年目で人間の1.5倍を達成し、最終年度では人間の1倍を達成した。また、コネクタ付きケーブルについてコネクタケーブルの向きや配置について平面に整列した供給方式では、さらに1台あたり20%ほど高速に作業が可能であった。供給方法については、各生産システムの制約(システム設置面積、タクトタイム、コスト)に応じて設計されるべきであるが、おおむね人間と同等の生産性が発揮できることを確認した。

安定性については、実証システムによるFA機器の組み立てを繰り返し試行してその成功率で評価した。一度も人間が介入すること無く自動的に組み立てが完了する場合を成功として評価を行った。これについては現状では1割強の失敗が発生する結果となった。これは各要素技術については成功率が9割以上であったとしても、それぞれの成功率の積が全体の成功率となるためである。また、今回導入した自動復旧動作で対象としている箇所以外にもエラーが発生する可能性があることも影響している。今後成功率を高めて行くには、要素技術の信頼性を高める事と平行して、発生頻度が低いエラーに対してもリカバリー動作を準備することが必要となる。このことから、今後の生産システムとしての実用性を高めていくためには次のような対応が必要であると考え

表 4 今後の課題

1	各要素技術の精度向上とアルゴリズムのブラッシュアップ
2	「誤判定」はあるものとして、後工程でそれを検出する技術
3	想定外の「異常状態」の排除

表4の1つ目の項目はさらにエラーを低減させるために継続的に続けていく各要素技術の目標である。2つ目の項目は各要素技術の限界を容認し、自動復旧をシステムの枠組みの中で完全なものにしていく設計論が必要であるということである。本開発においても自動復旧の枠組みとして特に3次元センシング後の自動復旧フローはこの設計論を適用している。3つ目の項目としては、2つ目の項目で掲げた設計論をより完成されたものに仕上げていく上で、正常状態をより正確に規定する必要性を示している。人間が見れば「正常状態とは違っている。これが原因で後工程が

うまくいかない」という状態でもロボットは指定されていないエラー状況以外は全て正常とみなしてしまう。これらの課題を解決するためにハンドアイや固定センサを利用して組み立て状態をより詳細に評価し、力制御技術を利用して組み立て完了を確認する工程を追加していくアプローチが次のステップとして必要である。

⑤-6 まとめ

開発した要素技術を統合し、その有効性を検証すると共に、柔軟物を含む FA 製品の組立作業をロボットで実現するために実証システムを製作し、検証を行った。検証の結果、これまではロボットで扱うことが出来なかったコネクタ付ケーブルを含む製品の組立を、人とほぼ同等の速度で組み立てられることを確認した。

(3) 成果の意義

本研究開発では三つの技術開発項目 - 1.柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発, 2.柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術の開発, 3.短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発, に対応する複数の開発課題を設定して開発に取り組んできた. 具体的には, 1 に対しては①作業エラーからの自動復旧技術, 2 に対しては②3次元センシングシステム, ③組み付け制御技術, 3 に対しては④柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術の各開発項目を設定している. さらに各開発技術の実用性を検証する為の⑤FA 機器組立実証システムを加えた開発にも取り組んできた. 以下にそれぞれの成果の意義について述べる.

①作業エラーからの自動復旧方式

様々な形状のコネクタに対し高い確率で挿入エラー状態を検知することができ, 自動的に作業を復旧させることが可能なエラーリカバリアルゴリズムを開発した. ねじ締めエラーに対してもエラー検知機能を開発した. これらの開発によって, ロボットが作業成否の判断や修正の手段を備えたことにより検査・保守要員の削減が可能になり, 省力化だけでなく, 夜間連続運転などの生産性の向上に寄与する. また, 作業の成否状況を監視して問題点の改善に反映させることで品質向上にも貢献することができる.

②. 3次元センシングシステム

小型, 広ダイナミックレンジ, 高精度, 短処理時間の3次元センシングシステムと, 柔軟性を有するために形状の定まらないケーブルの認識を高精度, 短処理時間で行うことの出来るセンシング技術を開発した. センサの小型化と認識可能対象の拡大は, ロボットや検査システムが取り扱う事のできる部品を大幅に増加させ, 適用可能分野を拡大することに貢献する. また, 処理時間短縮によるタクトタイム削減は, 組立や検査作業に対するコストパフォーマンスを増加させ, 導入の容易化や, ロボットの知能化推進に貢献することができる.

③.組み付け制御技術

制御のパラメータを挿入動作中にリアルタイムで変更する組み付け制御方式により, コネクタ挿入作業が人とほぼ同等の速度で実現した. また, 高価格が導入時の障壁であった力覚センサのコストを大幅に低減させた. 人間が行うしかなかった嵌め合いなどの高度な作業をロボットで行うことを可能にし, 生産システムの省力化や品質の安定に貢献できる. また, 力センサの低コスト化により力制御機能のコストパフォーマンスを大きく向上させることにつながるため, 力制御機能の導入が拡大し, 高機能なロボットを一般化させ, 高度な生産システムの導入拡大に貢献できる,

④短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

コネクタの把持, 挿入作業など実証システムの一部の作業工程対象に, 作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成, シミュレーションによる動作確認が可能となった. また, ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成することで, 移動終了点においてケーブル振れを抑制することが可能な技術を開発した. さらに, 作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を生成することも可能となった. これらの成果により, 複雑なシステムにおいて従来の教

示方法を用いた場合の立ち上げの際の膨大な労力を大幅に軽減することが可能になる。また、迅速なシステム立ち上げが可能になる為、多品種少量生産や機種切替の早いシステムに対して自動生産システムの導入が促進され、さまざまな産業における生産性の向上に貢献することができる。

⑤ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

これまでロボットでは行えなかった柔軟部品を含む製品の組立を実現させたことで、開発技術の有効性を実証することができた。ほとんどの製品中にケーブル配線が含まれる電機電子分野では、これまで製品組立作業は人の手で行うしかなかった。本開発でのロボットによる組立作業の実現は、戦記電子分野における生産力向上、品質安定に向けた一つの解になりうる。また、本システムで組み立てた製品はほんの 1 例でしかないが、開発内容を知ったユーザに自らが抱えている課題について自動化の可能性を認識させ、ロボット適用に対する検討を始める契機となったのではないかと思われる。

表 5 成果の意義

研究項目	成果の意義
柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発	様々なコネクタに対し高い確率で挿入エラー状態を検知し、復旧可能なエラーリカバリアルゴリズムを開発。ねじ締めエラーに対してもエラー検知機能を開発。ロボットが作業成否の判断や修正の手段を備えたことにより、検査・保守要員の削減が可能になり、省力化だけでなく、夜間連続運転などの生産性の向上に寄与。また、品質向上にも貢献。
柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術(ビジョンシステム、力制御、力センサ)の開発	<p>・小型、広ダイナミックレンジ、高精度、短処理時間の 3 次元センシングシステムと、柔軟性を有するために形状の定まらないケーブルの認識を高精度、短処理時間で行うことの出来るセンシング技術を開発。小型化と認識対象の拡大は、ロボットや検査システムが取り扱う事のできる部品を大幅に増加させ、ロボット適用可能分野を拡大することに貢献。処理時間短縮によるタクトタイム削減は、組立や検査作業に対するコストパフォーマンスを増加させ、導入容易化に貢献。</p> <p>・力制御のパラメータを挿入動作中にリアルタイムで変更する組み付け制御方式により、コネクタ挿入作業が人とほぼ同等の速度で実現。高価格が導入時の障壁であった力覚センサのコストを大幅に低減。人間が行うしかなかった嵌め合いなどの高度な作業をロボットで行うことを可能にし、生産システムの省力化や品質の安定に貢献。</p> <p>また、力センサ低コスト化により力制御機能のコストパフォーマンスを大きく向上させることで、高機能なロボットを一般化し、高度な生産システムの導入拡大に貢献。</p>
短時間で簡便に作業を提示	コネクタの把持、挿入作業など実証システムの一部の作業工程が

できる次世代教示機能の開発	作業単位のブロックを並べるだけで容易にプログラム作成，シミュレーションによる動作確認可能になることを実現．ケーブルの重心移動を抑制した軌道を自動生成することで，移動終了点におけるケーブル振れの抑制と，作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を生成する事が可能．システム立ち上げに要する多くの労力，時間を大幅に削減する事が可能になり，生産性の向上，立ち上げコストの低減，少量多品種生産や機種切替の多いシステムの自動化などに貢献可能．
FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作	これまでロボットでは行えなかった柔軟部品を含む製品の組立を実現させたことで，開発技術の有効性を実証．本システムで組み立てた製品はほんの 1 例でしかないが，開発内容を知ったユーザに自らが抱えている課題について自動化の可能性を認識させ，ロボット適用に対する検討を始めさせる契機となった．

(4) 特許の取得

開発した技術に対して事業を確保する為に，国内 13 件の特許出願を行った．

なお，海外への特許出願については，今後の事業における展開に応じて出願していく予定である．

表 6 特許の取得状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
3次元形状計測装置のキャリブレーション方法および3次元形状計測方法	通常計測動作を用いた簡易なキャリブレーション手段を提供することにより，計測対象に合わせた精度のよい計測を簡易に実施できる．
3次元形状検出装置	パターン投影による人工的な特徴点付加，追跡安定度評価，信頼性評価手段を含むことにより，対象物体の形状計測を安定して行なえる．
形状計測装置	可動ミラーからの走査ビームの一部を受光素子に導き，その信号タイミングに基づき走査時間を制御することで，安定したスリットパターンを得ることができる．
形状計測装置	上記特許に関連して，走査ビームが1往復する間に1つの受光素子から得られる2つの信号タイミングの平均をとることで，さらに安定したスリットパターンを得ることができる．
多軸力覚センサおよびその製造方法	力覚センサの低コスト化が可能な構造および製作方法について，通常力覚センサには適用されない製作方法を採用した．
三次元形状計測装置及び計測方法	パターン投影による人工的な特徴点付加，追跡安定度評価，信頼性評価手段を含むことにより，対象物体の形状計測を安定して行なえる．
プログラム作成教示装置及び方法	ロボットプログラムから教示点を自動抽出し，組み立て手順に従って効率良く教示できるようにする．

力制御装置	ロボット言語コマンドでパラメータを切替えることで、位置ずれ時の作用力を低減しながら高速な組み付け動作を実現する。
作業動作最適化装置及び方法	エラー頻度とタクトタイムを同時に最小化するよう、修正すべき作業工程を自動選択することで、大規模な教示・修正作業を必要とする工程修正の手間を減らす。
力制御装置	速度上限値を自動設定する速度最適化手段を備え、エラー時の作用力を抑えながら動作時間を短縮できる。
形状計測装置	測定平面上の位置固有のパターンを照射するための投光装置と、撮像装置からの画像によって測定平面上の撮像装置視野内の範囲を設定するための手段を設けることで、照射範囲を自動で設定することができる。
ロボットのねじ締め作業異常検知方法	ロボット手首に取り付けた力覚センサの情報に基づいてねじ締め作業の異常の判別を行い、判別した異常の種類に応じた復旧動作を選択する。
ロボットプログラミング装置および方法	エラー復帰処理、立ち上げ時の動作確認などで、ロボットに特定の工程動作のみ行わせる際に、各工程の実行条件から前処理と後処理を判断して自動的に実行する。

(5) 成果の普及

表 7 プレス向け発表後のメディア掲載一覧

メディア		番組 見出し タイトル	放映・掲載日/号
TV	NHK 大阪	おはよう日本	2011/03/07
新聞	日本経済新聞	三菱電機 ケーブル配線できるロボ	2011/03/04 朝刊
新聞	読売新聞	三菱電機 セル生産対応ロボ 1 体で あれこれ作業	2011/03/04 朝刊
新聞	朝日新聞	三菱電機 次世代ロボ やわらかくても つかみは OK	2011/03/04 朝刊
新聞	神戸新聞	三菱電機 世界初の技術 曲がったケーブル 取り付け OK 手作業並み 新型ロボ 電子製品生産 応用に期待	2011/03/04 朝刊
新聞	毎日新聞	世界初・三菱電機が開発 軟らかいものもつかむロボット	2011/03/04 朝刊
新聞	産経新聞	三菱電機、新型産業ロボ ケーブルも優しくつかむ	2011/03/04 朝刊
新聞	日刊工業新聞	三菱電機がロボ公開 柔らかケーブル上手に組み付け	2011/03/04 朝刊
新聞	フジサンケイ ビジネスアイ	三菱電機、柔軟物 OK の新ロボット	2011/03/04 朝刊
新聞	電波新聞	三菱電機が研究成果を発表 柔軟物が扱える生産用ロボット	2011/03/04 朝刊
新聞	化学工業日報	三菱電機 次世代ロボ生産システムを開発	2011/03/04 朝刊

新聞	中部経済新聞	三菱電 電線取り付け可能 新型ロボット開発	2011/03/04 朝刊
新聞	中日新聞	三菱電, 名大など ケーブルも対応 産業機械を開発	2011/03/04 朝刊
新聞	北日本新聞	三菱電・県立大など ケーブル取り付け OK 産業ロボット開発	2011/03/04 朝刊
新聞	宮崎日日新聞	菱電機, 大学と開発 “柔もの” 取り付けも自動化 「世界初」産業用ロボ	2011/03/04 朝刊
新聞	日経産業新聞	三菱電機 ケーブル配線ロボ アームに3次元センサー	2011/03/07 朝刊
新聞	中国新聞	ケーブル取り付け可能 三菱電などロボット開発	2011/03/15 夕刊
新聞	機械新聞	三菱電機 ケーブル配線も OK 「人セル」を「ロボセル」で FA 機器組立ロボット	2011/03/17
WEB	日経 Tech On!	三菱電機など, ケーブルのような柔軟物を組み立てられるロボットでセル生産	2011/03/03
WEB	robonable	三菱電機, 柔軟なケーブルも扱えるロボットセル公開, 要素技術から実用化	2011/03/03
WEB	asahicom	ぐにゃぐにゃ配線もOK 次世代家電組み立てロボ	2011/03/03
WEB	神戸新聞	軟らかいケーブルを自在に 三菱電機が新ロボット	2011/03/04
WEB	産経新聞	柔らかケーブルつかめるロボ 三菱電機	2011/03/04
WEB	JST Science News	柔軟物も扱える生産用ロボットシステム	2011/03/28
雑誌	日経ものづくり	三菱電機, ロボットの組立能力を拡大 クネクネと曲がるケーブルも扱える	2011年4月号
雑誌	ロボコンマガジン	未定	2011年5月号(予定)

2009年11月に開催された2009国際ロボット展において、開発成果の一部である組み付け制御の紹介を実施した。また、2011年03月には、プレス向け公開を実施し、多くのメディアに対して開発成果の紹介を行い、表7に示す様に多くの反響を頂いた。公開時の様子を図35に示す。また、表8 論文発表・成果の普及表8に示す件数の学会発表を行い、成果の普及に努めた。

さらに、開発成果を実システムに搭載する際の立ち上げ時間を短縮することや、既存の機器との統合の際の柔軟性を高めることで、開発成果の広く一般的な普及を促すため、RobotTechnology技術の共通プラットフォームとして提唱されているRT-Middlewareを利用して、センサや自動復旧アルゴリズムの搭載といったソフトウェア開発を行った。



図 35 プレス向け公開での様子

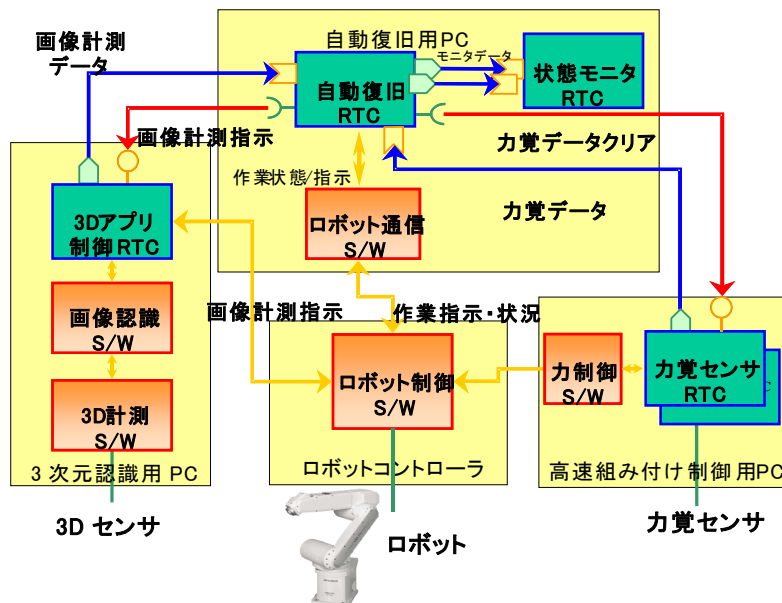


図 36 RT コンポーネント構成

開発した各 RT コンポーネントの構成は次のようなものである。

- ・ 3次元センサ RTC：3次元センサ RTC は、画像認識 S/W と通信をおこない、画像計測結果を取得し、その結果をロボットコントローラのロボット制御 S/W や自動復旧 RTC 送信する RT コンポーネントである。また、3次元センサ RTC は、3D アプリ作業指示サービスを提供するサービスポートを有しており、画像計測の開始や終了、画像の表示などの作業指示を受け付けることが可能となっている。
- ・ 力覚センサ RTC：力覚センサ RTC は、力制御 S/W から力覚センサのロボット計測データを取得し、出力ポートを通じてそのロボット計測データを、自動復旧 RTC に送信する。また、力覚センサを制御するためのサービスポートを有しており、力覚センサのオフセットをリセットすることが可能となっている。
- ・ 自動復旧 RTC：自動復旧 RTC は、3次元センサ RTC、力覚センサ RTC の出力データを収集し、状態モニタ RTC にデータを送信するコンポーネントである。また、収集したデータをもとに、ロボットの状態を監視し、異常を検知した場合は、ロボットの停止、復旧処理をおこない、状態モニタ

タ RTC に異常を通知する。

・ 状態モニタ RTC：状態モニタ RTC は、自動復旧 RTC からモニタリングデータを受信し、ユーザがシステムの状態を監視するために、画面上にモニタリングデータの描画をおこなう RT コンポーネントである。

上記のように各センサや復旧機能などを RTC 化したことで、センサの接続、立ち上げが容易になると共に、これまで他で開発された RTC を用いたソフトウェアと共に用いることも容易であるため、成果の普及に対して効果的であると考えられる。

表 8 論文発表・成果の普及

論文等紙上発表(論文誌, 学会誌, 国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞, 雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
2	2	16	14	13	0	26

表 目標と達成度のまとめ 「I. 次世代産業用ロボット分野

①柔軟物も取扱える生産用ロボットシステム」

研究項目	目的	本開発の目標	成果	達成度
柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発	(1) 自動復旧技術の開発により、作業エラーによる停止から自動的に再開し、作業を継続する。	(1) ミッション実行時に想定される作業エラーからの自動復旧率 80% の実現	(1) 多品種コネクタで 80% 以上の自動復旧率を確認 ・ねじ締めエラー状態認識成功率 95%	(1) 目標達成

柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術(ビジョンシステム, 力制御, 力センサ)の開発	(1) モーションステレオ計測と3次元ケーブル形状認識技術を開発しケーブルのような柔軟物を認識する	(1) 計測時間 : 2 秒 / 視点以下, ワイヤハーネス計測精度: ± 2mm	(1) 計測時間 2 秒 / 視点以下, ワイヤハーネス計測精度 ± 2mm	(1) 目標達成
	(2) 小型アクティブ3次元センサユニット, 2次元・3次元情報統合認識技術を開発し, ケーブル先端のコネクタのような位置姿勢の自由度の高い剛体物を高速, 確実に認識する	(2) サイズ: 300cc 以下, ダイナミックレンジ: 従来比 400% 向上, コネクタ位置誤差: ± 1mm, 計測時間: 2 秒以下	(2) ヘッドサイズ 300cc (ヘッド分離型) ダイナミックレンジ従来比 400% 向上 計測時間 1 秒以下, 距離比分解能 0.1% 以下, コネクタ位置誤差 ± 1mm, 認識時間 1.5 秒	(2) 目標達成
	(3) 高速組み付け制御技術を開発し高速にコネクタの挿入作業を実現する	(3) コネクタ挿入作業時間: 人作業の 1 倍以内	(3) コネクタ挿入作業を人の 1 倍の時間 (0.7s) で実現	(3) 目標達成
	(4) 低コスト力覚センサの開発により力覚制御機能の導入コストの削減	(4) コスト: 従来比 1/3 以下, 分解能 0.2%, 直線性 1%	(4) 分解能 0.2%, 直線性 1.1%, コスト 従来比 1/3 以下	(4) ほぼ目標達成

<p>短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発</p>	<p>(1) 作業レベルプログラム生成システムの開発により、短時間でシステム立ち上げと品種追加を可能とする</p> <p>(2) 動作最適化技術の開発により、作業を高速化し、生産性を向上する</p>	<p>(1) 頻度の高い作業に対するオフライン教示ガイダンス機能を開発、作業レベルプログラム生成システムの機能追加</p> <p>(2) 組み立て部品のワイヤーの障害物の回避と動作の最適化を同時に実現するようなマニピュレータ手先の軌道および加速度パターンを生成.</p>	<p>(1) 実証システムの作業工程を対象にプログラム作成、シミュレータによる動作確認時間を評価し、従来の 1/5 の時間でプログラムが作成できることを確認.</p> <p>(2) ケーブル重心移動抑制軌道を自動生成し、従来の軌道より約 50% の振幅減少を確認. 作業床面にケーブルが接触することを回避する手先軌道を獲得.</p>	<p>(1) 目標達成</p> <p>(2) 目標達成</p>
<p>FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作</p>	<p>開発技術の有効性と、柔軟物組み付けの実証</p>	<p>・開発技術を統合し、ケーブル取り出し、コネクタ組み付け、基板、カバー組み付け作業を実現する実証システム開発</p>	<p>要素技術を統合し人の作業時間と同等の作業時間で柔軟物組み付けを実現. 安定した自動復旧確認</p>	<p>目標達成</p>

IV. 実用化, 事業化の見通しについて

成果の実用化可能性

①柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術の開発
作業エラーからの自動復旧方式の開発

本開発では、無数のコネクタの中から抽出した代表的形状のコネクタについて、挿入時のエラー検知手法とエラーからの自動復旧技術を開発した。また、ねじ締め時のつまり、空うちなどのエラーを検知する技術を開発した。

通常、ロボットにおける生産システムでは、一旦エラーが発生するとシステム全体が停止し、人による復旧作業が必要となるが、今回開発したような自動復旧手法を備えることで、異常状態

からロボットが自動的に復旧し、作業を継続することが可能となる。このため生産システムの稼働率や生産性の向上に大きく寄与することが出来き、期待も非常に大きい。ねじ締めについてはエラーの検知のみであるが、その場で復旧が出来なくとも、エラー発生を記録することで後工程での不具合品の排除や、エラー発生状況の分析による改善への貢献など、これについても大きなニーズがある。

これらの機能は、ロボットに搭載するオプション機能としての製品化を検討している。これらの機能をロボットと共に提供することで、ユーザはロボットを用いた生産システムの信頼性を高めることが可能になる。実用化、事業化に向けた課題としては、今回の開発で多種のコネクタ挿入に対応できる大枠の確認は出来たものの、実際にユーザが使用するコネクタにおける作業をどうやって保証するのかというものがある。この課題を解決するには、確実に対応できる種類について確認を行うと共に、ユーザが簡単に調整を行える調整方法、インターフェースなどを整備する必要がある。また、自動復旧できるエラーの種類のリインナップも拡充していくことが求められると考えている。

②柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術の開発

a.柔軟物の 3次元センシング技術の開発

b.剛体物の 3次元センシング技術の開発

今回の開発成果により、実際の製品に使用されているコネクタやケーブルを十分な精度と短い処理時間で認識することが可能な、小型 3次元ビジョンセンサと、その認識アルゴリズムを実現することが出来た。開発を通し、本開発成果は機能的に十分な実用性を備えていることが確認できた。また、ビジョンセンサで認識することの出来る対象範囲を拡大することが出来た。本開発成果をロボットと共に用いることでロボットの機能を大きく拡張できることはもちろんのこと、それ単体でも検査用途などに活用することが期待できる。このため、本開発成果については、まず単体での展開を前提に、センサに対して更に対応範囲、耐環境性、信頼性などの検証や調整用 I/F の改良を進めた上で、製品として販売していくことを考えている。

c.高速組み付け制御技術の開発

d.低コスト力覚センサの設計試作

開発成果により、寸法誤差が大きかったり公差がきつい様な部品を取り扱ったとしても、衝突などの問題から部品やロボットを破損から防ぎつつ、人間の様に柔軟な作業をロボットで行うことが可能になった。デリケートな作業が要求される分野に対してロボットを適用していくには、本開発成果のような力制御システムが必須のものであり、ロボットの高機能化の為のコンポーネントとしてロボットに搭載していく予定である。また、これまでは上記のような機能を必要としても力覚センサの高価格故に導入を見送る事例が多々あったと思われ、今回の力覚センサ低コスト化の成果はそのようなユーザに広く受け入れられると思われる。このことから、力覚センサについても制御技術とともにロボットの高機能化の為のコンポーネントとして事業化をおこなっていく予定である。

③短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能の開発

a.柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

b.柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

少量多品種生産などシステムの立ち上げや切替を迅速に行う必要のあるシステム、複数のロボットが協調したり様々なセンサを用いて構成される複雑なシステムに対しては、従来のテキストベースのプログラミングとティーチングプレイバックのみによるロボットシステム立ち上げは限界があると考えられるため、今回開発した簡易なプログラミング機能、オフラインでのガイダンス機能やシミュレーション機能は今後必須の開発環境になっていく。また、柔軟物を取り扱う際には、剛体物と異なりその姿勢、形状が定まらない為、実際のシステムを稼働させたり、ロボット動作を変化させたりした際に思わぬ影響を及ぼす可能性があが、動作最適化の様な、実際にやってみなければ分からなかった様な影響を予め評価し、抑制する技術もまた、今後必須のものとなっていくことが予想される。これらの機能についてロボットシステムを支えるための重要な開発環境として開発を続け、製品化を行っていく予定である。

④ FA 機器組立実証システムの仕様検討・設計・試作

広報活動などから得た、ロボットでは行えなかった柔軟部品を含む製品の組立を実現させたことに対する反響から、柔軟物取り扱いなどの高度な生産システムに対するニーズは大きいと推測される。しかし、ユーザが抱えている生産システムへの自動化要求は千差万別であることと、三菱電機(株)で検討している事業形態が、コンポーネントをシステムインテグレータに提供し、システムインテグレータがシステム構築を行う形態であることから、本システムそのものが即製品化、実製品ラインへ導入されるものではない。今後は、上記の個々の要素技術の事業化を進めつつ、ユーザの要求に応じた要素技術の組合せによって、様々な高度生産システムが構築されていくものと思われる。

事業化までのシナリオ

開発を行った成果を搭載した製品について、以下の計画に則り事業化を進めている。

事業化製品

- ・ 開発機能搭載ロボット(高速組み付け制御技術、自動復旧技術)
- ・ 3次元センシングシステム(3次元センシング技術)
- ・ 力覚センサ(低コスト力覚センサ)
- ・ 組立作業用オフラインプログラミングシステム(柔軟物組み付け作業オフラインプログラミング技術、動作最適化技術)

※()は搭載技術

高速組み付け制御技術や自動復旧技術は、ロボットコントローラのライブラリとして搭載し、この開発機能搭載ロボットのオプションとして、3次元センシングシステム、力覚センサ、組立作業用オフラインプログラミングシステムを販売していく。これらのオプションは開発機能搭載ロボットの購入者にロボット購入時にセットで、もしくは購入後に追加オプションとして販売する。

今後は、これまで開発してきた技術について、継続した研究開発による高機能化を行いつつ、耐久性や信頼性の向上やユーザの使い勝手面での改良による実用化開発を進め製品化を目指す。本開発成果に対する事業体制は次の様になる。

- 三菱電機(株)： ロボット、センサなどのコンポーネント製造し、ロボットシステムインテグレータ(ロボット SIER)に販売
- ロボットシステムインテグレータ(ロボット SIER)： システム構築しエンドユーザに販売，メンテナンスも実施。

更に、三菱電機(株)はエンドユーザからユーザニーズを入手し、これを製品開発にフィードバックすることで新たな製品開発へとつなげるサイクルを構築する。

波及効果

本開発成果はロボット産業における市場拡大，新市場の開拓につながるだけでなく，ロボット以外の幅広い分野に対しても様々な形での活用が見込まれる為，我が国の産業の発展に対して多大な寄与をすることが可能である。

添付資料 1

国内出願

番号	出願日	出願番号	名称	発明者
1	2007/03/12	特願 2007-061844	3次元形状計測装置のキャリブレーション方法および3次元形状計測方法	三菱電機株式会社
2	2007/09/10	特願 2007-234115	3次元形状検出装置	三菱電機株式会社 北海道大学
3	2008/03/19	特願 2008-071830	形状計測装置	三菱電機株式会社
4	2009/03/11	特願 2009 - 057799	形状計測装置	三菱電機株式会社
5	2009/03/12	特願 2009-059221	多軸力覚センサおよびその製造方法	三菱電機株式会社
6	2009/04/28	特願 2009-109119	三次元形状計測装置及び計測方法	三菱電機株式会社 北海道大学
7	2009/09/07	特願 2009-206277	プログラム作成教示装置及び方法	三菱電機株式会社
8	2009/11/19	特願 2009-263975	力制御装置	三菱電機株式会社
9	2010/4/23	特願 2010-099435	作業動作最適化装置及び方法	三菱電機株式会社
10	2010/5/13	特願 2010-110917	力制御装置	三菱電機株式会社
11	2010/5/18	特願 2010-113924	形状計測装置	三菱電機株式会社
12	2011/2/33	特願 2011-03752	ロボットのねじ締め作業異常検知方法	三菱電機株式会社 富山県立大学
13	2011/3/22	特願 2011-062702	ロボットプログラミング装置および方法	三菱電機株式会社

国外出願

該当無し

添付資料 2

学会発表

番号	発表日	発表先	題名	発表代表者
1	2006/12/7	精密工学会 ビジョン技術の実利用ワークショップ(VIEW2006)	画像特徴トラッキングのためのひも状柔軟物の特徴抽出	堂前幸康,金子俊一,田中孝之,奥田晴久,橋本学
2	2006/12/15	第7回計測自動制御学会(SICE)システムインテグレーション部門講演会(SI2006)	ひも状柔軟物の構造復元	堂前幸康,金子俊一,田中孝之,奥田晴久,橋本学
3	2007/09/18	SICE Annual Conference 2007(SICE2007)	3D Measurement of Flexible Objects by Robust Motion Stereo	Y.Domae,H.Takauji,S.Kaneko,T.Tanaka, H.Okuda and M.Hashimoto
4	2007/10/10	International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT) 2007	3-Dimensional Measurement of Cable Configuration being based on Feature Tracking Motion Stereo	Y.Domae, H.Takauji,S.Kaneko, T.Tanaka and H.Okuda
5	2007/11	The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)	Modeling process of electric connectors in robotic wiring harness assembly systems	Jian Huang, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
6	2007/11	The International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science	Model-based robust online fault detection for mating process of electric connectors in robotic wiring harness assembly systems	Jian Huang, Pei Di, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
7	2007/11/27	Image Electronics and Visual Computing Workshop(IEVC) 2007	3D Cable Shape Sensing using Robust Motion Stereo	Y.Domae, H.Okuda, H.Takauji, S.Kaneko and T.Tanaka
8	2007/06/07	画像センシングシンポジウム(SSII2007)	方向符号テクスチャ解析を利用したひも状柔軟物の特徴追跡と構造復元	堂前幸康,奥田晴久,橋本学,高氏秀則,金子俊一,田中孝之

9	2007/07/30	画像認識・理解シンポジウム(MIRU2007)	直方体ブロックを用いたレンジファインダのワンショットキャリブレーション	川戸慎二郎, 奥田晴久, 北明靖雄
10	2007/09	第26回 日本ロボット学会 学術講演会	Piecewise linear model of mating electric connectors in robotic wiring harness assembly systems	Jian Huang, Pei Di, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
11	2007/12/07	ViEW2007 ビジョン技術の実利用ワークショップ	細線形状を持つケーブルに対するロバストモーシヨンステレオ	堂前幸康, 奥田晴久, 高氏秀則, 木村雄太, 金子俊一, 田中孝之
12	2008/01	The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing	Fault-tolerant Mating Process of Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems	Jian Huang, Pei Di, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
13	2008/07/11	17th IFAC World Congress	3D Cable Shape Sensing Using Robust Motion Stereo	Y.Domae, H.Okuda, H.Takauji, Y.Kimura, S.Kaneko and T.Tanaka
14	2008/7/26	the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation	Fault-tolerant Mating Process of Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems	Jian Huang, Pei Di, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
15	2008/08/08	2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)	Dynamic Modeling and Simulation of Manipulating Deformable Linear Objects	Jian Huang, Pei Di, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
16	2008/09/06	2008 年度精密工学会北海道支部学術講演会	ファジークラスタリングを用いたケーブルの3次元構造復元	木村優太, 高氏秀則, 奥田晴久, 金子俊一
17	2008/09/08	第13回 知能メカトロニクスワークショップ	クラスタリングを用いた柔軟物の3次元形状復元	木村優太, 高氏秀則, 奥田晴久, 堂前幸康, 金子俊一
18	2008/12/04	ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2008)	クラスタリングによる柔軟物の3次元構造復元	木村優太, 高氏秀則, 奥田晴久, 堂前幸康, 金子俊一

19	2008/11/29	電気学会一般産業研究会	単眼 Eye-in-Hand システムにおける連続画像ステレオのためのノイズ除去法	堂前幸康, 奥田晴久, 高氏秀則, 金子俊一, 鷺見和彦
20	2009/03/15	日本ロボット学会 北海道ロボット技術専門委員会 (RSJ-HRT) 学術講演会	クラスタリングによる線状柔軟物の 3 次元構造復元	木村優太, 高氏秀則, 奥田晴久, 堂前幸康, 金子俊一
21	2009/11/8	MHS2009	Hybrid Vision-Force Guided Fault Tolerant Robotic Assembly for Electric Connectors	Pei Di, Jian Huang, Fei Chen, Hironobu Sasaki, Toshio Fukuda
22	2009/11/23	ARSO 2009 - 2009 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts	Development of Production Robot System that can Handle Flexible Goods ” Project for Strategic Development of Advanced Robot Element Technologies / Robot Assembly System for FA Equipment ”	Kazuhiko Sumi
23	2010/02/05	Sixteenth Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV2010)	Industrial Robot System utilizing 3-D Vision Sensing for Flexible Cable Handling	Haruhisa Okuda, Yukiyasu Domae, Yasuo Kitaaki, Kazuhiko Sumi, Yuta Kimura, Hidenori Takauji and Shun'ichi Kaneko

24	2010/06/1 1	第15回 画像センシング シンポジウム(SSII2009)	産業用ロボットによる柔 軟物ハンドリングのため の3次元センシングシス テム	奥田 晴久,堂前 幸康, 北明 靖雄,木村 優太, 高氏 秀則,鷺見 和彦, 金子 俊一
25	2010/6/13	ROBOMECH2010	Robotic Assembly System for Electric Connectors Mating Basing on Vision and Force/Torque Sensors	孫, 邱, 黄, 陳, 佐々木, 福田
26	2010/09/2 2	ARSU2010(アジアロボ ット学会連合 国際シン ポジウム「日本の生産分 野でのロボット技術の最 先端」)	Flexible Cable Handling Robot utilizing 3-D Vision Sensing	Haruhisa OKUDA, Yukiyasu DOMAE, Yasuo KITAAKI, Kaz uhiko SUMI, Yuta KIMURA, Hiden ori TAKAUJI and Shun'ichi KANEK O
27	2010/11/7	MHS2010	Robotic Fault-tolerant A ssembly system for Elect ric COnectors Mating Basing on Vision and Force/Torque Sensor s	Baiqing Sun, Pei Di, Fei Chen, Jian Huang, Hironobu Sas aki, Toshio Fukuda
28	2010/12/2 3	第11回 計測自動制御学 会 システムインテグレ ーション部門講演 会 SI2919	バラ積みされたコネクタ 付ケーブルのビンピック ング	北明 靖雄,奥田 晴久, 堂前 幸康, 鹿毛 裕史, 鷺見 和彦
29	2010/12/2 3	第11回 計測自動制御学 会 システムインテグレ ーション部門講演 会 SI2919	柔軟物も取扱える生産用 ロボットシステムの開発	原口 林太郎,金子 俊 一, 福田 敏男, ,松野 隆幸
30	2010/12/2 3	第11回 計測自動制御学 会 システムインテグレ ーション部門講 演 SI2010	視覚と力覚センサーを用 いた電子コネクタ組み立 てシステムのエラーリカ バリ	佐々木, 孫, 黄, 松野, 福田

論文

番号	発表日	発表先	題名	発表代表者
1	2008/02	IEEE Trans on Mechatronics, vol. 13, no. 1	Model-based Intelligent Fault Detection and Diagnosis for Mating Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems	Jian Huang, Toshio Fukuda and Takayuki Matsuno
2	2009/12	日本ロボット学会誌 Vol.27 No.10 pp.1082-1085	柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発	鷺見 和彦
3	2010/01	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol 22, No. 1, pp.100-111	3-D Sensing for Flexible Linear Object Alignment in Robot Cell Production System	Yukiyasu Domae, Haruhisa Okuda, Yasuo Kitaaki, Yuta Kimura, Hidenori Takauji, Kazuhiko Sumi and Shun'ichi Kaneko
4	2011/01	精密工学会誌, Vol.77, No.1, pp.90-96	カメラ撮影とロボットの位置取得の同期がとれた2視点間を運動中の非同期連続画像における追跡安定度を考慮した単眼モーションステレオ	堂前幸康, 奥田晴久, 高氏秀則, 金子俊一, 鷺見和彦

プレス発表等

番号	発表日	発表先	発表代表者
1	2009/11/25～ 2009/11/28	2009 国際ロボット展	三菱電機
2	2011/03/03	三菱電機(株) 先端技術総合研究所	三菱電機

事業原簿（公開版）

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）

（先進工業国対応型セル生産組立システムの開発）

平成 23 年 3 月

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

（委託先）ファナック株式会社

（再委託先） 東京大学

3. 1. 2 人間・ロボット協調型セル生産組立システム

はじめに

本成果報告書は、平成18年度から平成22年度の5か年に渡り、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より委託された「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）、（先進工業国対応型セル生産組立システムの開発）」の開発成果を記すものである。

本プロジェクトでは、日本のように、高賃金、人口減少による熟練作業者の減少などの課題に直面する国においても製造業の高い国際競争力を維持できるよう、ロボットおよび作業情報提示技術による作業支援により、作業初心者でも高効率、高信頼性の生産が可能な人間・ロボット協調型セル生産組立システムを実現した。以下に開発成果を示す。

(1) 作業支援技術

人腕大の双腕ロボットアームと全方向移動型の自走台車から構成される移動配膳協調ロボットを開発した。ロボットにより部品棚に並んだ多数の部品箱から必要部品をピンピッキングしてキット化し、作業者の組立作業台まで部品キットを配膳する自動化システムを世界で初めて実現した。RFIDを組み込んだ知能化部品トレイにより、多品種混流生産での頻繁な機種切り替えにも即時対応可能である。また、組立作業では、ロボットが作業者と協調しながら、作業者に対して物理的、情動的支援を行うことで、従来の人間のみセル生産組立方式よりも高効率、高信頼性の組立作業を実現した。

(2) 安全管理技術

作業者が本質的に高速、高出力なロボットに触りながら協調作業を実施可能とするため、位置監視、速度監視、力監視を組み合わせた多重系の機能安全を開発した。リスクアセスメントにより171項目の危険源に対する作業者のリスク低減を図り、開発した機能安全により作業者の安全が確保されることを実証した。

(3) 作業情報提示技術

作業者位置姿勢測定、心的負荷測定、作業教示支援、作業情報支援からなる組立支援システムを開発した。作業熟練者から抽出した作業技能をデータベース化し、組立支援情報としてマルチメディアにより作業初心者にも理解しやすい形で提示するソフトウェアシステムを開発し、作業順序の入替えなど作業方法の変更にも短時間で対応可能とした。液晶TV組込の作業台を開発し、作業者にとって作業しやすい環境を実現した。また、作業者位置姿勢測定や心的負担測定により、作業者の作業状態を把握し、適切な作業進行を支援する。この組立支援システムにより作業初心者でも高効率、高信頼性の生産が可能となった。

(4) 性能評価

移動配膳協調ロボットによる部品キット化の自動化、ロボットと作業情報提示での作業支援による組立作業について、人間のみの従来方法と性能比較を行った。部品キット化では、ロボットの24時間連続稼働により、人手作業の1.7倍の生産性を実現した。一方、組立作業では、ケーブルハーネスの組立作業にて、従来の最大2倍の生産性、1/10以下の作業間違い率を実現した。以上の通り、開発した人間・ロボット協調型セル生産組立システムにより、高効率、高信頼性の組立作業が可能であることが実証された。

目次

1 研究概要	5
1.1 開発の背景	5
1.2 開発の目的・目標	6
1.2.1 開発の目的	6
1.2.2 開発の目標	7
1.3 開発システムの概要	7
1.4 性能評価	10
1.4.1 移動配膳協調ロボットによる部品キット化.....	10
1.4.2 ロボットと人間の協調による組立作業.....	11
1.5 開発目標に対する達成度	13
2 成果詳細	15
2.1 作業者とロボットとが協働できるための「安全管理技術」	15
2.1.1 ロボット移動時安全対策	15
2.1.2 作業者協調時安全対策	16
2.1.3 安全管理技術統合化	22
2.2 必要な時に必要な量の部品を整列して供給する「作業支援技術」	25
2.2.1 移動配膳協調ロボット	25
2.2.2 部品ピッキングハンドとビジョンシステム.....	28
2.2.3 知能化部品トレイ	28
2.3 作業者が習熟しやすい「作業情報提示技術」	30
2.3.1 組立支援システム概要	30
2.3.2 作業者位置姿勢測定系	31
2.3.3 心的負担測定系	32
2.3.4 作業教示支援システム (MASTER)	34
2.3.5 作業情報支援システム (MAISER)	37
2.3.6 作業手順管理システム (MASHOR)	42
2.4 「統合化技術」	44
2.4.1 システム統合とモジュール化.....	44
2.4.2 システム性能評価	47
3 開発達成度と成果の意義	52
3.1 開発達成度	52
3.1.1 要素技術について	52
3.1.2 統合システムについて	56
3.2 開発成果の意義	57
4 総括および結論	59

おわりに	60
添付資料	61
研究発表・講演	61
特許	64
参考文献リスト	65

対応力が必要とされている。

そのため、変種変量の組立現場では、人間の高い対応力を生かした「セル生産」方式が広く採用されている[1]。セル生産方式では、一人ないしは数名の作業者が製造工程の最初から最後までを担当することで、変種変量に即座に対応可能な柔軟な組立システムが構築されている。しかし、セル生産では、作業者が複数の作業工程を担当する必要があるため、多能工化が求められる。そのため、作業熟練に多くの時間を要することが課題となっている。特に、日本のような先進工業国では、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、労働力が確保しにくくなっており、十分な国際競争力を維持するための新たな組立システムの確立が求められている。

1.2 開発の目的・目標

1.2.1 開発の目的

前述の課題に対し、本研究開発では、人間と産業用知能ロボットが協調して組立作業を実施する「人間・ロボット協調型セル生産組立システム」を提案する。システムのイメージを図2に示す。

我が国のような先進工業国においては人件費が相対的に高いため、人間は人間でなければできない高付加価値作業に専念し、それ以外の付帯的な作業はロボットなどにより自動化することが望ましい。現状のセル生産方式をみると、自動化できる作業を人間が行っている例は非常に多い。セル生産方式においては、一般に、作業者が組み立てるために必要な部品一式を部品キットとして部品トレイに事前に準備し、作業者は部品トレイ上の部品を取り出しながら組立作業を行うのが効率的である。組立作業そのものは、自動化が難しく人間でなければできない作業であっても、その作業に必要な部品をあらかじめ部品トレイ上に並べて準備する作業も、特殊な例を除いては自動化されていないケースがほとんどであった。本提案により、部品トレイに事前に部品を準備するという付帯的な作業(部品キット化)が自動化され、人間は人間でなければできない付加価値の高い組立作業に専念することが可能と

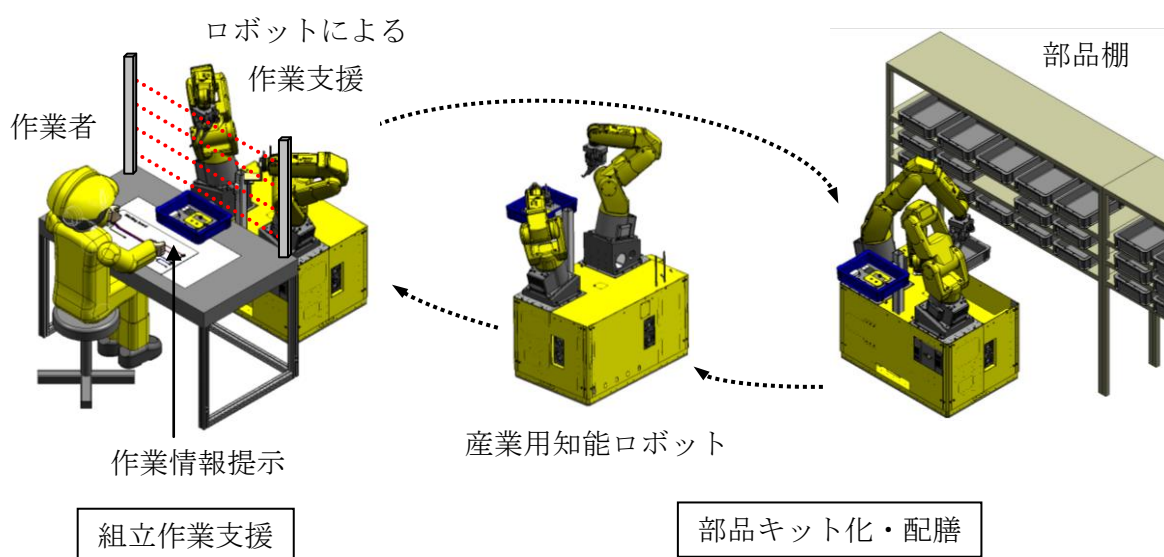


図2 人間・ロボット協調型セル生産組立システムのイメージ

なる。さらに、部品キット化により部品の組み付け忘れのような品質劣化要因が排除され、製品の品質向上が期待できる。

また、変種変量の組立作業では、頻繁に作業内容の変更が生じるが、我が国のような少子高齢化社会においては、熟練作業員数の増加は期待できず、作業初心者でも頻繁に変更される作業内容に短時間で習熟でき、信頼性の高い作業を行うことができる作業支援技術の確立が望まれる。作業支援では、作業工程に応じて、ロボットが物理的・情動的に人間を支援すると共に、人間に対して作業手順などの作業情報を理解しやすい形で提示することで、作業初心者でも熟練作業員並みの高効率、高信頼性の生産を可能とする。

本システムでは、部品キットの組立作業場への配膳や組立作業において、必然的に人間とロボットが共通の作業領域で作業をするケースが発生する。従来は、このような場合の安全管理技術が確立されていないため、実用化が難しかった。本研究開発により、人間とロボットが協働作業を行う場合の安全管理技術を確立し、ロボットの適用範囲の大幅な拡大を目指す。

以上を踏まえ、本研究開発では、以下の 3 つの要素技術を開発し、作業初心者でも高効率・高信頼性の生産が可能な新たな組立システムの確立を目標とした。

- ① 作業員とロボットとが協働できるための安全管理技術
- ② 必要な時に必要な量の部品を整列して供給する作業支援技術
- ③ 作業員が習熟しやすい作業情報提示技術

1.2.2 開発の目標

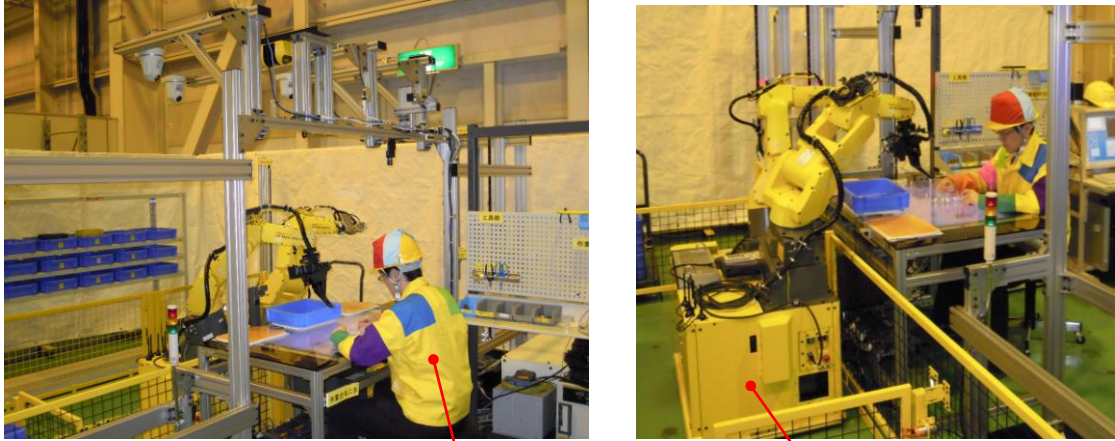
本プロジェクトの基本計画に基づき、以下を開発の達成目標とした。

- [1] 開発したシステムで作業員が組立を行い、(a)作業手順の改善、(b)機種切り替え、(c)生産量の変動、に対するの対応能力を示す。
- [2] 組立作業員をロボット技術が安全を確保しつつ、物理的・情動的に支援する有効性を実証する。
- [3] 特に、(A)生産性、(B)機種切り替え時間については、既存セル生産システムに比較して以下の性能を実現する。
 - (A) 生産性：作業員とロボットを合わせた時間単価をベースとした労働生産性において既存セル（人間中心セル）から 2 割向上。
 - (B) 機種切り替え時間：既存セル生産システムの 1/2。
 - (C) 機種切り替え時間：既存セル生産システムの 1/2。

1.3 開発システムの概要

図 3 で示す通り、①～③の各技術を組込んだ人間・ロボット協調型セル生産組立実証システムを構築した。

- ① 作業者とロボットとが協働できるための安全管理技術
- ② 必要な時に必要な量の部品を整列して供給する作業支援技術
- ③ 作業者が習熟しやすい作業情報提示技術



作業者

移動配膳協調ロボット

図3 統合システム外観

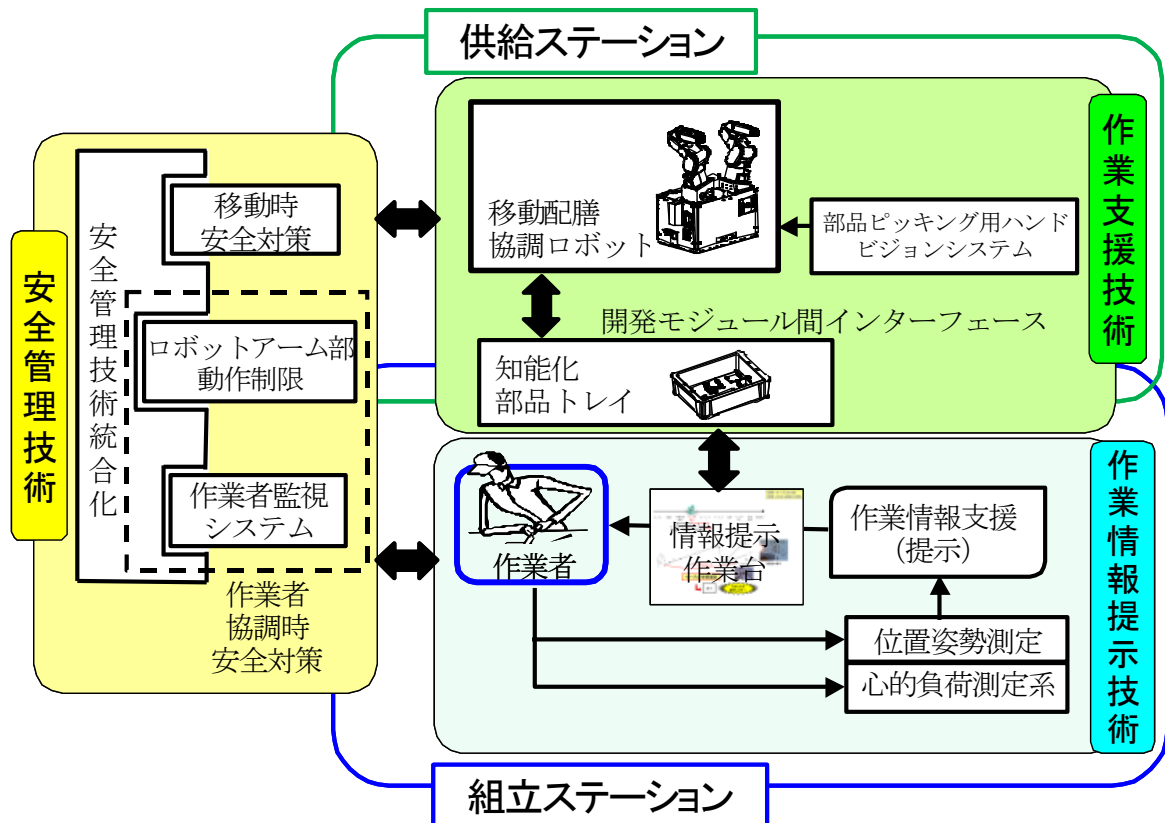


図4 統合システム概要

図 4 にて統合システム概要を示す。システムはハード構成上、供給ステーションと組立ステーションから構成される。

供給ステーション

移動配膳協調ロボット、部品ピッキングハンドとビジョンシステム、ならびに智能化部品トレイからなり、必要な時に必要な量の部品を整列して供給する「作業支援技術」により構成される。

新規に開発した移動配膳協調ロボットには、部品ピッキングハンドとビジョンシステムが搭載されており、ロボットが組立に必要な部品一式を高速ビンピッキングし、部品キットとして智能化部品トレイに必要な部品を準備する。更に、組立作業場である組立ステーションに部品キットを配膳する。

智能化部品トレイは、供給と組立の両ステーションを接続するインターフェースとして機能するものであり、キット化部品を配膳するコンテナと RFID からなり、作業員に対する物理的・情動的バッファの役割を担う。作業員への部品キット供給だけでなく、部品箱に添付された RFID（無線 ID : Radio Frequency Identification）により製品仕様を獲得し、多品種混流生産での機種切り替えに対する即時対応を行う。また、作業員が提示する RFID により、作業熟練度に応じた最適な作業支援を可能とする。これらを統合して、高効率、高信頼性の組立作業を実現する。

移動配膳協調ロボットにより、部品棚から部品コンテナを引き出し、ビジョンシステムで部品を識別して高速ビンピッキングし、必要部品をキット化し、作業員の組立作業台まで部品キットを配膳するシステムは、世界初の部品キット配膳の完全自動化システムである。

組立ステーション

液晶 TV を透明な板の下に組み込んだ作業テーブル、レーザポインタ、IP カメラなどからなり、作業員位置姿勢測定、心的負荷測定、作業教示支援、作業情報支援からなる「作業情報提示技術」を中心に構成される。

作業員は移動配膳協調ロボットにより配膳された部品一式を使用して組立作業を行う。この際、作業情報支援により、作業工程に応じた適切な作業情報が作業員に提示され、作業初心者でも効率よく間違いのない組立作業が可能である。同時に、移動配膳協調ロボットによる物理的、情動的な作業支援も実施され、部品の使用間違いや組付け間違いが排除される。また、作業員位置姿勢測定や心的負荷測定により、作業員の誤作業や作業進行に伴う疲労度や精神的負担など、組立作業における作業員状態を把握することが可能である。特に、ロボットと協調作業する際、作業員が受ける心的負荷を世界で初めて測定し、基準制定の基礎を作った。

これらの作業情報提示およびロボットによる作業支援により、作業初心者でも高効率、高信頼性の組立作業を実現した。

安全管理技術

本システムでは、ロボットと作業員が協調作業を行うため、「安全管理技術」が重要である。

ロボットの設備費を短期間で償却するためには、ロボットの稼働率の向上が重要であることを鑑み、本システムの移動配膳協調ロボットは、供給ステーションでの高速な部品キット化・配膳だけ

でなく、組立ステーションでの作業者との協調による作業支援も実施可能とした。よって、移動配膳協調ロボットは本質的に高速・高出力なロボットであり、作業者との協調作業では様々なリスクが想定されるため、本システムには十分な安全対策が組み込まれている。

リスクアセスメントに基づき、ロボット移動時安全対策と作業者協調時の安全対策（ロボットアーム部動作制限と作業者監視システム）を開発した。これにより、作業者に作用するリスクが安全レベルまで低減される。特に、作業者協調時の安全対策では、位置監視、速度監視、力監視の組合せによる多重系の機能安全により、本質的に高速・高出力なロボットに人間が触りながらの安全な協調作業を実現した。

1.4 性能評価

構築した人間・ロボット協調型セル生産組立の実証システムの有効性を示すため、移動配膳協調ロボットによる部品キット化、ロボットと人間の協調による組立作業の性能評価を実施した。詳細については、2.4.2 項のシステム性能評価に示す。

部品キット化、組立作業共に、人間のみによる従来方式よりも高い生産性を実現した。また、組立作業においては、従来方式よりも作業間違い率が大幅に低減され、高信頼性の組立作業を実現した。

1.4.1 移動配膳協調ロボットによる部品キット化

コネクタなど小物部品のキット化を対象とし、図 5 に示す移動配膳協調ロボットによる自動化と、人間によるデジタルピッキング(点灯ランプによるピッキング部品指示)の生産性(部品集約能力)の比較を行った。ロボットを 24 時間稼働とすることにより、以下の通り、人間作業よりも大幅に生産性を向上可能であることを実証した。

生産性 _____ : 1.7 倍



図 5 移動配膳協調ロボットによる部品キット化・配膳



図6 簡易ケーブルハーネス

1.4.2 ロボットと人間の協調による組立作業

セル生産組立のモデルケースとして位置付けたケーブルハーネス製造を対象とし、2つの性能評価実験を行った。紙媒体の作業指示書による人間のみのセル生産組立システム（「人間セル」と呼ぶ）と構築した人間・ロボット協調型セル生産組立の実証システム（「協調セル」と呼ぶ）の比較検証を行った。

実験 1（簡易ケーブルハーネスの 5 品種混流生産）

図 6 で示す簡易ケーブルハーネスの 5 品種混流生産を実施し、人間セルと協調セルとの比較検証を行った。以下の通り、多品種混流生産での高生産性・高信頼性の組立作業を実現した。

生産性 : 9%向上
作業間違い率 : 約 1/5 に削減

実験 2（ケーブル多点挿入）

実験 1 よりも複雑な組立作業の一例として、図 7 で示すケーブルの多点挿入作業(指定した 64 箇所 の穴に銅線各 1 本を挿入する作業)を実施し、従来の人間のみの組立作業と性能比較を行った。

図 8 は、人間セルの作業所要時間の最小値を 100%とし、人間セルと協調セルでの作業所要時間について、作業 4 名の平均値をグラフ化したものである。図 8 に示す通り、人間セルと比較し、構築した協調セルでは作業所要時間が約 50%に短縮された。つまり、約 2 倍の生産性を実現しており、実験 1 と比較して、より複雑な組立作業にて高い導入効果が得られることを実証した。また、作業回数の増加時に作業所要時間の短縮率が約 50%で収束していることから、作業熟練者でも従来の約 2 倍の高い生産性を確保可能であることが実証された。

生産性 : 最大約 2 倍に向上



図7 ケーブル多点挿入

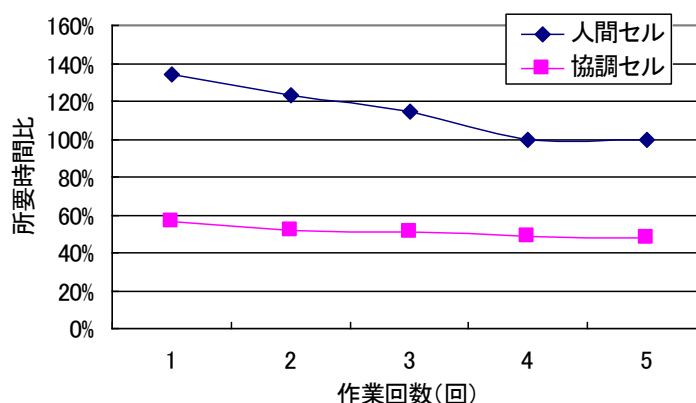


図8 ケーブル多点挿入作業の所要時間比

ロボットに装着したレーザポインタにてケーブル挿入場所を順次指示する情報の支援により、作業間違い率が人間セルの 1/10 以下に低減された。実験 1 と比較して、実験 2 のように、より複雑な組立作業にて高い導入効果が得られることを実証した。

作業間違い率 : 1/10 以下に削減

実験 2 のケーブル多点挿入は、ケーブルの挿入場所の記憶が困難なことから、換言すれば、製造機種が頻繁に切り替わることに相当する。このことから、実験 2 では、作業中の手順理解に要する時間を機種切り替え時間として取り扱うことができ、人間セルと協調セルそれぞれの実験からこの時間を抽出した。その結果、複雑作業の多品種混流生産においては、協調セルでは人間セルの 1/3 以下の時間での機種切り替えが可能であることが示された。

機種切り替え時間 : 1/3 以下に短縮

1.5 開発目標に対する達成度

1.2.2 項にて設定した開発目標に対する達成度は以下の通りである。各項目共にほぼ開発目標を達成し、従来方式よりも高効率、高信頼性の生産が可能な人間・ロボット協調型セル生産組立システムを実現した。

- [1] 開発したシステムで作業者が組立を行い、(a)作業手順の改善、(b)機種切り替え、(c)生産量の変動、に対するの対応能力を示す。

- ・ 部品キット化・配膳、組立作業における(a)～(c)に対する対応力を表1に示す。
 - 部品キット化・配膳では、従来の人間によるデジタルピッキングと同様に、部品の使用間違いなど、生産時の作業間違いが排除される。(a) 作業手順の改善や(b) 機種切り替えの対応能力については、ロボットの教示時間が作業者の習熟より時間がかかることが短所となる。(c) 生産量の変動に対しては、設備増設が段階的なため、ロボットのエネルギー増加が生じる。
 - 組立作業では、作業間違いが無くなり、生産時の信頼性が大幅に向上した。(a) 作業手順の改善や(b) 機種切り替えについては、作業者に対する指示情報が支援ソフトウェアにより容易に修正が出来るため、対応力が高まった。しかし、部品キット化と同様に、立上げ時のロボット教示、提示情報変更などのソフトウェア組み直しのための時間増加や、増設ロボットのエネルギー増加が生じる。

表1 部品キット化、組立作業における各種対応能力

	(a) 作業手順の改善	(b) 機種切り替え	(c) 生産量の変動
部品キット化	○生産時の作業間違い排除 ×ロボットの教示時間増加	○生産時の作業間違い排除 ×ロボットの教示時間増加	○稼働率の調整で 生産量の変動に対応 ×増設ロボットの エネルギー増加
組立作業	○生産時の作業間違い低減 ×ロボット教示・作業情報 提示追加の時間増加	○生産時の作業間違い低減 ×ロボット教示・作業情報 提示追加の時間増加	※シミュレーションに よる最適化で低減

- [2] 組立作業者をロボット技術が安全を確保しつつ、物理的・情動的に支援する有効性を実証すること。

- ・ 171 項目の危険事象について、ISO のリスクアセスメントを実施し、本質的に高速・高出力なロボットと人間が触りながらの安全な協調作業を実現した。
- ・ 特に、協調作業におけるロボットアームと腕・手の過度な接触、ロボットアームと周辺機器との間の挟み込みについて、リスク指数を4から1に低減し、安全を確保できた。これによって、安全な人間・ロボット協調システムを実現した。

[3] 特に(A)生産性、(B)機種切り替え時間については、既存セル生産システムに比較して以下の性能を実現する。

(A) 生産性：作業者とロボットを合わせた時間単価をベースとした労働生産性において
既存セル（人間中心セル）から2割向上。

(B) 機種切り替え時間：既存セル生産システムの1/2。

- ・ 部品キット化、組立作業における(A)、(B)について、人間セルに対する協調セルの性能比較を表2に示す。また、合わせて、作業間違い率についても、追加の評価項目として記載する。
 - (A)生産性について、部品キット化、組立作業共に目標の2割向上を超える生産性向上を達成した。
 - (B)機種切り替え時間について、部品キット化では、従来の人間のみの作業と同等で即時の機種切り替えが可能である。一方、組立作業では目標の1/2を下回る機種切り替え時間の短縮を達成した。
 - 追加評価である作業間違い率について、組立作業にて、従来の1/10以下への低減を実現した。

表2 人間セルに対する協調セルの性能比較

	(A) 生産性 目標：1.2倍	(B) 機種切り替え時間 目標：1/2	作業間違い率 (追加項目)
部品キット化	1.7倍	同等	同等
組立作業	最大2倍	1/3以下	1/10以下

2 成果詳細

以下に開発した各要素技術の詳細を示す。

2.1 作業者とロボットとが協働できるための「安全管理技術」

(注) 既存の産業用ロボットの安全規格が改定されないことを考慮し、現行規格をほぼ遵守する形で達成することが求められる（基本計画より）。

全ての危険源を考慮した安全対策として、ロボット走行時安全対策、作業者協調時安全対策を開発し、性能評価実験やリスクアセスメントによってその有効性を検証した。その結果、本質的に高速・高出力なロボットに人間が触りながら実施する協調作業が可能となった。これにより、人間とロボットとが共存する生産システムの安全管理システムの構築方法を明らかにした。

2.1.1 ロボット移動時安全対策

2.1.3 項の安全管理技術統合化で述べるリスクアセスメントに基づき、ロボット移動時の安全対策として下記項目を実装し、ロボット移動時の安全を確保した。

(a) 低重心本質安全設計による移動時転倒防止

図 9 に示す通り、移動配膳協調ロボットの移動走行時の転倒を防止するために、ロボット重心位置を可能な限り低くする本質安全設計を行った。

(b) 安全柵・光カーテンによるロボット走行エリアと作業者エリア分離

図 10 に示す通り、本システムでは、走行する移動配膳協調ロボットと作業者の衝突を避けるため、ロボット走行エリアと作業者エリアを分離した。図 11 の通り、自走機構部については安全柵にて作業者エリアと分離し、ロボットアーム部については作業者との協調作業を考慮し光カーテンによる分離とし、光カーテンの有効・無効状態を切り替えられるようにした。

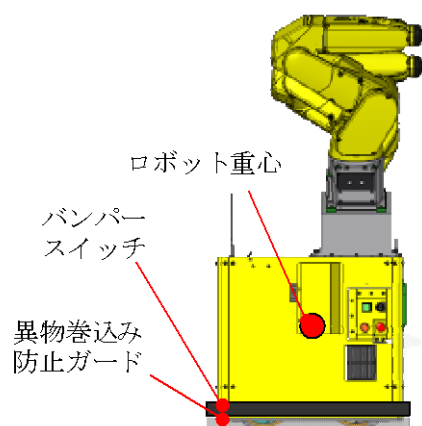


図9 移動配膳協調ロボットの安全対策

(c) 安全機器での安全多重化

リスクアセスメントに基づき、移動配膳協調ロボットに下記を実装し、走行時の安全対策を多重化した。

- 接触検知バンパースイッチ(図 9)
- 路面異物巻込み防止ガード(図 9)
- 光電センサによる安全多重化(図 10)

2.1.2 作業者協調時安全対策

(a) 本プロジェクトで対象とする協調作業

2.2 節の作業支援技術にて述べる通り、作業初心者でも迷うことなく組立作業が可能な高効率・高信頼性の生産システムを構築するためには、作業内容に応じてロボットが自動運転にて作業支援を行い、人間が自動運転ロボットに触りながら協調作業を行うことが効果的である。また、ロボットのより効率的な活用を考慮すると、部品キット化・配膳などのロボットのみによる高速作業と組立作業での人間に対する作業支援を同一ロボットにて切り替えて運用とすることで、生産量の変動など生産状況に応じてロボットの運用方法を適宜変更でき、ロボットの稼働率を向上することができる。

以上を踏まえ、本プロジェクトでは、高効率・高信頼性の生産システムを構築するために下記の協調形態の実現を目標とした。

- 本質的に高速・高出力ロボットによる人間との協調
- 人間が自動運転ロボットに触りながら実施する協調

(b) 作業者とロボットの作業領域の切り替え

本プロジェクトで開発した移動配膳協調ロボットは、本質的に高速・高出力なロボットであ

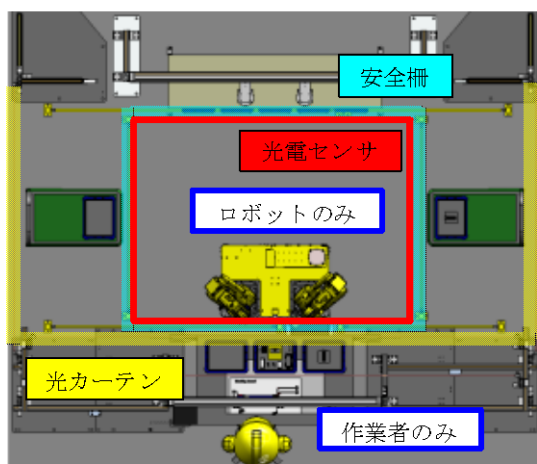


図 10 移動配膳協調ロボットの移動時安全対策(平面図)

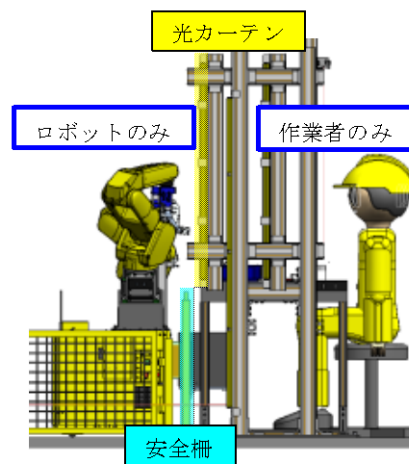


図 11 移動配膳協調ロボットの移動時安全対策(側面図)

り、部品キット化・配膳などのロボットのみによる高速作業と組立作業での人間に対する作業支援を切り替えて運用する。よって、作業者の安全を確保するために、作業毎に、ロボットと作業者の作業領域・位置関係に応じて、適切な安全対策へ切り替える安全システムを開発した。詳細を表3、図12に示す。

作業者が作業台上で小物部品の組立作業を行う生産システムでは、ロボットが作業者に対して部品を供給する、ロボットが治具となり、ロボットが把持した部品に対して人間が組立作業を行うなどの作業支援が効果的である。従って、本プロジェクトでは、図3に示すように、作業台を挟んで作業者とロボットが向き合う配置とし、ロボットは、作業台を挟んで作業者と反対側の領域ではロボットのみ的高速動作を実施し、作業台上では人間と接触して協調作業を実施するシステム構成とした。本構成とすることで、ロボットは人間作業に必要な部品準備など段取り作業を高速に実施すると共に、作業台上の協調領域ではロボットが部品を把持して人間に差し出すなどの作業支援が可能である。

まず、ロボットによる高速な部品キット化、作業者への部品キットの配膳、作業者への部品の供給準備など、ロボットのみが動作する局面においては、作業者とロボットが別々の作業領域にて作業を行うため、確実に安全を確保できるよう光カーテンにより両者の領域を分離する。図12左側の「分離可能時」に示すように、作業者とロボットの作業内容によりそれぞれの作業領域を変更する場合は、2つの光カーテンにより領域境界を移動することが可能である。

表3 作業者とロボットの作業領域による安全対策

作業者とロボットの作業領域	適用する安全対策
分離可能時	2つの光カーテンによる作業者・ロボットの作業領域分離
協調作業時	位置監視
	速度監視
	力監視

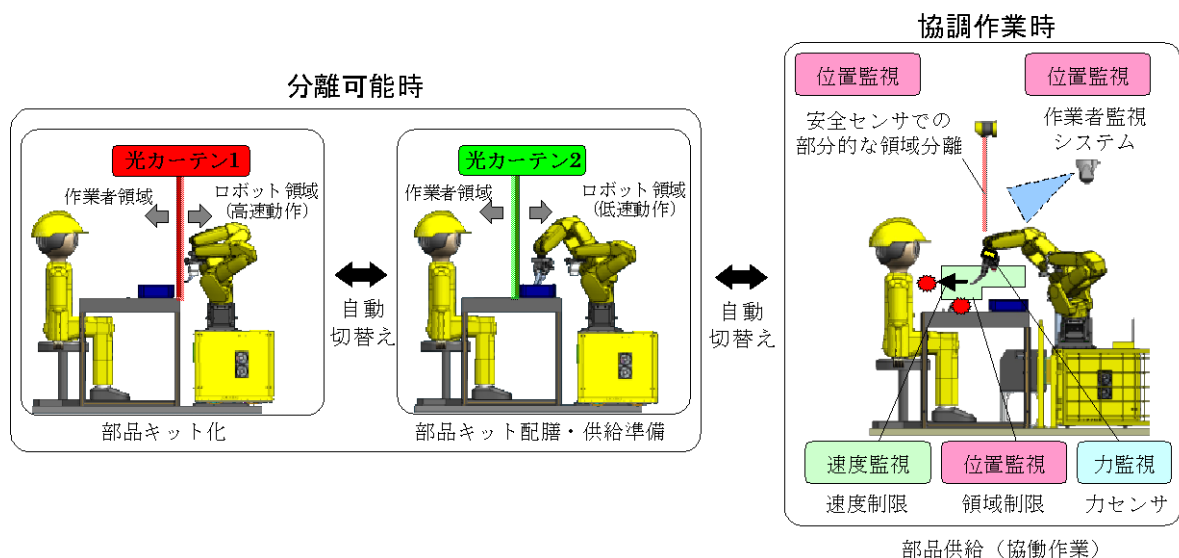


図12 安全対策の切り替え

すなわち、光カーテン1を光カーテン2へ移動することで、ロボットは部品配膳・供給の領域まで入ることができる。作業者が部品を取り出す場合には、光カーテン1を使用し、部品配膳・供給の領域まで手を伸ばすことができる。これらの動作は常に光カーテンでロボットと作業者を分離する方法である。

一方、ロボットが作業者に部品を差し出し、作業者がロボットと協調して組立作業を実施するなど、作業領域を同時に共有する局面では、作業者が本質的に高速・高出力なロボットに触りながら協調作業を実施する。本質的に高速・高出力なロボットとの協調作業では、ロボットとの接触により作業者が損傷する危険性が高いが、多くの協調作業では、作業者はロボットが手首先端ツールで把持した部品に対して作業を進めるため、作業者は手首先端ツールのみに触ることができれば良い。手首先端ツールよりも根元側のロボット本体については、協調作業を行う上で作業者が触る必要性は少なく、予め作業者とロボット本体との不要な接触を回避可能なシステム構成としても実用上問題はないと考えられる。

そのため、本プロジェクトでは、位置監視により作業者がロボット本体とは接触できないように制限を設けた上で、作業者が手首先端ツールに触りながら安全に協調作業できるよう、位置監視、速度監視、力監視の組合せにて作業者の安全を確保する多重系の機能安全を開発した。

(c) 人間協調ロボットの安全対策の開発方針について

産業用ロボットにおいて、人間がロボットに触りながら協調作業を実施する際の安全については、下記の規定が定められている。

- 労働安全衛生規則（国内法規制）：ロボット各軸モータ出力が 80W 以下
- ISO10218-1（国際安全規格）[2]：ロボットメカニカルインターフェース又は TCP において最大動力 80W 以下、又は最大静的力 150N 以下

今後、人間協調ロボットの市場規模を拡大するためには、国内だけではなく、欧米・アジアなど海外市場への展開も重要である。よって、本開発では、国際基準の ISO10218-1 への準拠を考慮した安全対策を開発することとした。

ただし、ISO10218-1 は 2010 年現在改訂作業中であり、最終的な改訂内容は流動的な状況である。そのため、現行の ISO10218-1 に加え、物理的接触に対する人間耐性から人間協調ロボットに要求される動作性能を規定した「BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive」[3]を参照し、ロボットとの物理的接触においては、ロボットの発生力と発生圧力を一定の基準値以内に制限することで人間の安全を確保する方針とした。

この方針のもと、ISO/TR14121-2 [4]、ISO13849-1[5]に規定されたリスクアセスメント手法に基づき、全ての危険事象のリスク指数 RI（1～6）を見積もり、その安全対策に要求される信頼性指標パフォーマンスレベル PLr（a～e）を同定した。その上で、許容可能なリスク指数を超える危険事象について、必要な安全対策を開発・検証し、最終的なリスク低減を確認した。

(d) 作業員協調時の安全対策

作業員がロボットに触りながら協調作業を行う場合の主な危険源は、ロボットとの過度な接触による衝撃、押し込み、挟み込みであり、作業台を挟んで人間とロボットが向き合う本システム

構成においては、これら危険源に曝される身体部位は上半身に限定される。

ここで、後述のリスクアセスメントに基づき、頭と顔については、保護ヘルメットと保護めがねを装着することで危険を回避し、胴体については、作業台によりロボットと一定の距離が保たれることから想定される危険が小さいと判断した。よって、保護対象の中心となる身体部位は腕と手となる。

図 13 に開発した機能安全の監視要素を示す。前述の通り、協調作業上、接触が不要なロボット本体からの衝撃と押し込みを回避するため、安全センサでの位置監視により手首先端ツール以外のロボット本体と作業者の動作領域を分離し、作業者が触れることが出来るロボット部位を手首先端ツールに限定する。協調作業中、作業者は頻繁に手首先端ツールに触りながら作業を行うが、ロボットから過度な衝撃と押し込みを受けないよう、ソフトウェア制限でのロボットの速度監視と力センサでの手首先端ツールの力監視により、衝撃力と押し込み力を腕・手に対する許容値以下に制限する。一方、ロボットと作業台などの周辺機器との間に腕・手が挟まれる危険については、ロボットの発生力を小さく制限しても、周辺機器の形状によっては作業者に作用する力や圧力が増幅され、許容値を超える挟み込み力が発生する可能性がある。よって、ソフトウェア制限でのロボットの位置監視により、常にロボットと周辺機器の間に所定の隙間が保たれるようにし、腕・手の挟み込みを完全に回避する。

また、作業者が常に正常な状態で作業を実施し続ける保証はなく、居眠りなどにより作業台に伏せてしまうなどの異常状態も想定される。そのため、付加的な位置監視として、IP カメラによる作業監視システムにより作業者の状態を常時モニタリングする。

これら位置監視、速度監視、力監視を組み合わせた機能安全により、腕・手への衝撃、押し込み、挟み込みが許容可能なリスクまで低減した。リスクアセスメントにより、安全対策導入前の想定されるリスクは、腕・手への衝撃、押し込み、挟み込みはいずれもリスク指数 $RI=4$ と見積もられ、安全対策によるリスク低減が必要であった。また、要求される信頼性指標パフォーマンスレベルは $PLr=d$ であり、高信頼性の安全対策が要求された。以下に、安全対策を詳述する。

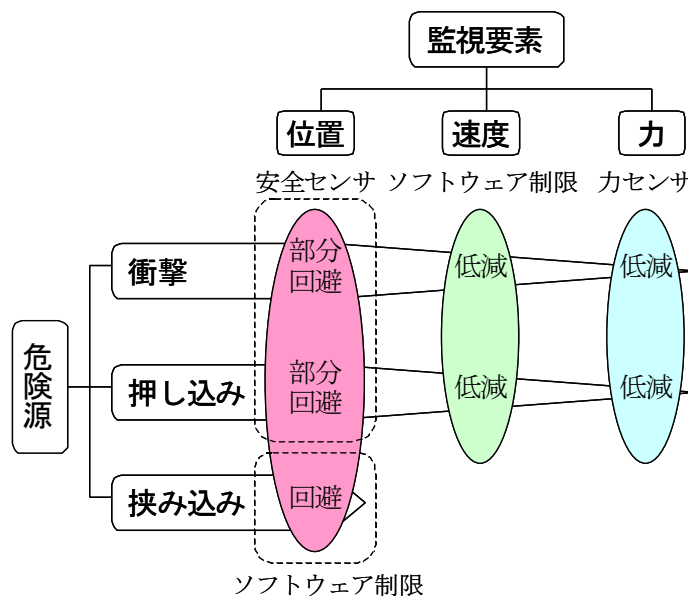


図13 機能安全での監視要素

① 位置監視

□ 安全センサでの部分的な領域分離

図 14 に示すように、進入検出を部分的に無効とする設定が可能な安全センサ（レーザスキャナセンサ）により、組立作業上、接触不要なロボット本体と作業者の接触が回避される。本センサはレーザ光を走査して設定領域への物体の進入を検出するものであり、図 14 の左図の通り、部分的に検出無効領域を設定することが可能である。よって、作業者とロボットの手首先端ツールとの接触は検出無効領域を介してのみ許容され、高出力なロボット本体と人間の不要な接触を回避することができる。本センサは、検出無効領域を複数設定することができるため、協調作業の内容に応じて、作業者がロボットと協調作業を実施する場所を自在に変更可能である。本センサは、要求パフォーマンスレベル $PLr=d$ を満たす安全機器であり、高信頼性の位置監視が可能である。

□ ソフトウェアでのロボット動作領域制限

図 15 に示す通り、CPU 二重監視の制御装置およびソフトウェアによる高信頼性のロボットの動作領域制限により、ロボットと作業台の最小隙間を 120mm (ISO13854[6]準拠) に設定した。この結果、ロボットと作業台の間の腕・手の挟み込みが完全に排除される。このロボット動作領域制限は、要求パフォーマンスレベル $PLr=d$ を満たしており、高信頼性の位置監視が可能である。

□ 作業者監視システム

図 16 に示す通り、3 台の IP カメラによる作業者監視システムを開発し、安全対策として実証システムに実装した。居眠りによる作業台上でのうつ伏せ状態など作業者の異常状

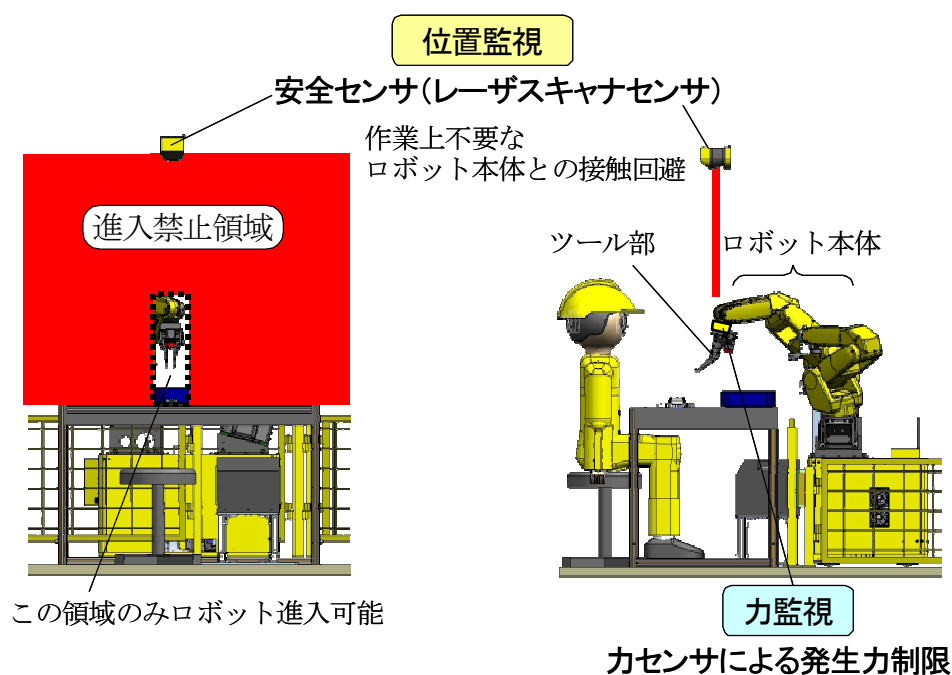


図14 位置監視と力監視の組合せ

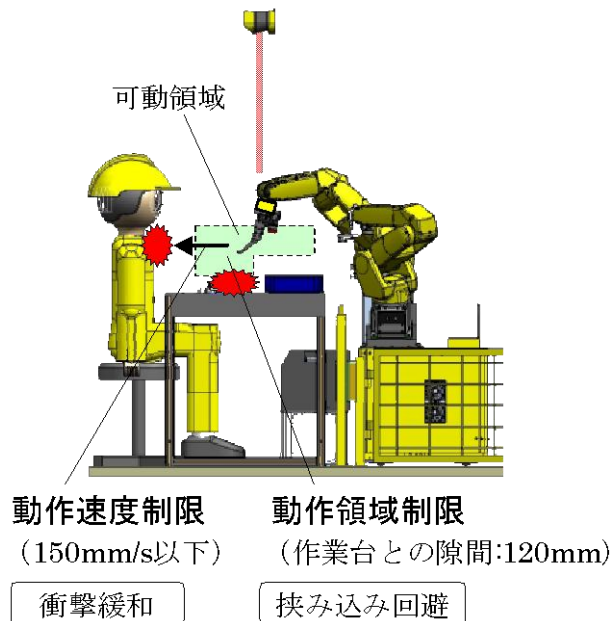


図15 ロボット動作速度・領域制限

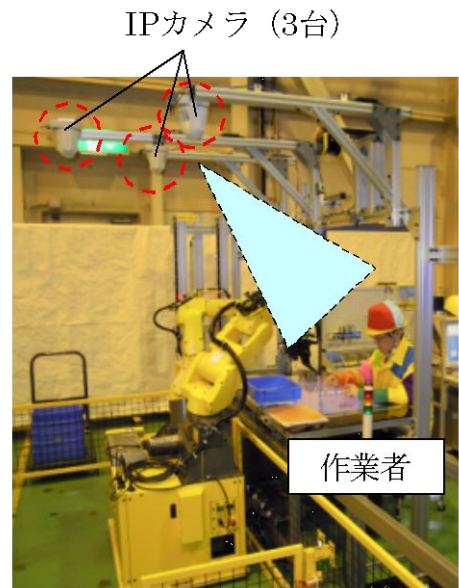


図16 作業者監視システム

態を作業者監視システムにて検出し、ロボットを非常停止とする。ロボットからの頭・目に対する過度な衝撃、ロボットと作業台の間での頭の過度な挟み込みなどの危険状態を回避するための付加的な安全対策として有用である。

作業者監視システムの検出性能などの詳細は 2.3 節の作業情報提示技術にて後述する。

② 速度監視

□ ソフトウェアでのロボット動作速度制限

ISO10218-1 では、減速制御下の運転にてロボットの TCP (ツールセンタポイント) の速度を 250mm/s 以下とする義務規定が定められているが、人間が組立作業に集中している場合は更に減速することが望ましい。本プロジェクトでは、作業者の退避動作の容易さとロボットとの協調作業による心的負担を考慮し、ロボット動作速度制限を 150mm/s 以下とした。

位置監視と同様に、CPU 二重監視の制御装置およびソフトウェアによる高信頼性のロボット動作速度制限によりロボットの動作速度を制限した。後述の力センサでの発生力制限との組合せにより、ロボットとの接触による過大な衝撃と押し込みが低減される。このロボット動作領域制限は、要求パフォーマンスレベル PLr=d を満たしており、高信頼性の速度監視が可能である。

③ 力監視

□ 力センサによる発生力制限

図 17 に示す通り、ロボット本体とツール部の間に力センサを設置し、組立作業上、人間が触る必要があるロボット手首先端ツール部との過度な接触による発生力を制限した。こ



図17 ロボットへの力センサの実装

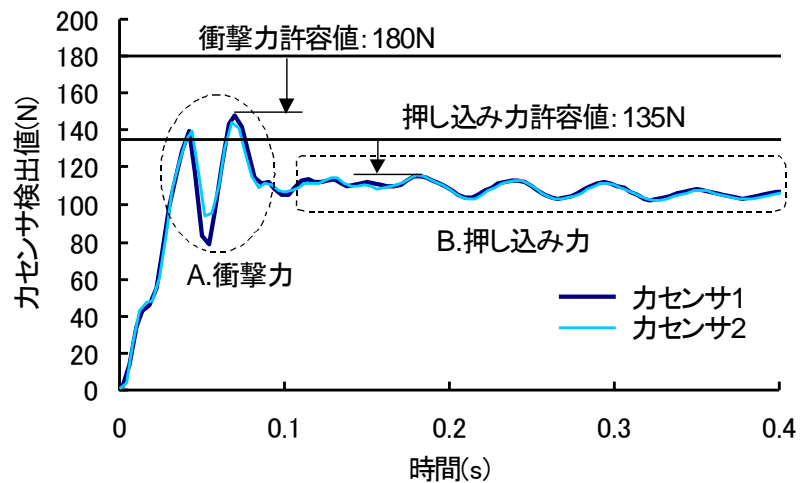


図18 衝突時の力センサ検出値の時間推移

の力センサによる力監視と前述のロボット動作速度制限の組合せにより、「BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive」[3]で定められた腕・手に対する発生力・圧力の許容値（衝撃力：180N、押し込み力：135N、圧力：50N/cm²）以下に発生力が制限されることを実験にて実証した。衝突実験での力センサ検出値の時間推移の一例を図18に示す。A部の衝撃力、B部の押し込み力共に、許容値以下に制限されており、作業者の安全が確保されることが示された。また、2つの力センサを組み込むことで、検出系の二重化による高信頼性が可能なことも実証した。

2.1.3 安全管理技術統合化

前述の安全対策を含め、開発した人間・ロボット協調型セル生産組立システムの全ての危険源に対する安全対策について、ISO14121-1[4]に基づいたリスクアセスメントにて、その有効性を検証した。

合理的に予見可能な誤使用も考慮し、システムの全ライフサイクル(輸送、立上げ・設定、運転、清

掃・保守、故障発見・トラブルシューティング)に対して危険源の同定を行い、171 項目の危険源を抽出した。その一例として、前述の(c)作業者協調での主な危険源を表 4 に示す。

表 5 に示す通り、抽出した 171 項目の危険源全てに対してリスク見積りを実施した結果、リスク低減が必要なリスク指数「3」以上の危険事象が 110 項目同定された。これらに対して、本質安全対策・安全防護および付加保護・使用上の情報提供の「3 ステップメソッド」によるリスク低減を検討し、前述の安全対策を含み、必要となる安全対策を開発・実装した。

検討した安全対策によって、全ての危険源について許容可能なリスクレベル「2」以下にリスクが低減されることを確認した。一例として、表 4 で示した危険源に対するリスク低減効果を表 6 に示す。参照番号 1・2 については、前述の位置監視、速度監視、力監視を組み合わせた機能安全にて、参照番号 3 については、安全ヘルメットと保護メガネの装着により、それぞれ安全なリスク指数「2」以下までリスクレベルが低減されている。

また、安全対策のパフォーマンスレベルについて、前述の安全対策の性能を表 7 に示す。力監視以外の安全対策については、いずれも要求パフォーマンスレベル PLr=d を満たしている。力監視については、前述の通り、2 つの力センサでの二重監視により PLr=d に準拠する性能を有することは実証済みである。今後の事業化において、第 3 者認証機関による PLr=d の取得を目指す。なお、作業者監視システムは付加的な安全対策であるため、パフォーマンスレベルを定義していない。

表4 危険源の同定の一例

参照番号	事故シナリオ		
	危険源	危険状態	危険事象
1	可動部による腕・手への衝撃・押し込み	組立ステーションでの作業 (ロボットと協調して組立)	部品差出し中のロボットアーム進行方向に腕・手を伸ばしたことによる接触
2	可動部の固定部への接近による腕・手の挟み込み		部品差出し中のロボットアームと部品トレイや作業台など周辺機器との間に腕・手を伸ばしたことによる挟み込み
3	可動部による頭・目への衝撃		居眠りなどで作用台上に頭を伏せ、部品差出し中のロボットアーム進行方向に頭・目を向けたことによる接触

表5 リスク見積もり

ライフサイクル	リスク指数(RI)の分布						合計
	1	2	3	4	5	6	
輸送	2	6	1	0	0	0	9
立上げ・設定	4	9	7	0	0	0	20
運転	13	22	21	45	2	7	110
清掃・保守	2	0	22	0	0	0	24
故障発見・ トラブルシューティング	0	3	4	1	0	0	8
合計	21	40	55	46	2	7	171

リスク低減が必要な危険事象：110項目

表6 リスク低減効果

参照 番号	リスク見積り (初期リスク)						判定
	S	F	O	A	RI	PLr	
1	2	2	2	1	4	d	→ ○
2	2	2	2	1	4	d	→ ○
3	2	1	2	2	3	d	→ ○

S 損傷の酷さ 1: 軽度、2: 重度
 F 暴露頻度 1: まれ、2: 頻繁
 O 危険事象の発生確率 1: 非常に低い、2: 可能、3: 高い
 A 回避の可能性 1: 可能、2: 不可能
 RI リスク指数 1: 低い~6: 高い
 PLr 要求パフォーマンスレベル a: 低信頼性~e: 高信頼性

表7 パフォーマンスレベルの達成度

		パフォーマンスレベル		
		要求 PLr	性能 PL	判定
領域分離	光カーテン	d	e	○
位置監視	安全センサでの 部分的な領域分離		d	○
	ソフトウェアでの ロボット動作領域制限		d	○
速度監視	ソフトウェアでの ロボット動作速度制限		d	○
力監視	力センサによる発生力制限		d準拠	△

2.2 必要な時に必要な量の部品を整理して供給する 「作業支援技術」

作業支援技術として、移動配膳協調ロボット、部品ピッキングハンドと部品認識ビジョンシステム、知能化部品トレイを開発した。その結果、ロボットにより部品棚から必要部品をキット化し、作業者の組立作業台まで部品キットを配膳する自動化システムを世界で初めて実現した。また、多品種混流生産での頻繁な機種切り替えにも即時対応可能な組立支援が可能となり、高効率・高信頼性の組立生産を実現した。

2.2.1 移動配膳協調ロボット

人腕大の双腕ロボットアームと全方向移動型自走台車から構成される移動配膳協調ロボットを開発した。図 19 に外観を、表 8 に主な仕様を示す。構成の概略は下記の通りである。

- 自走台車
駆動 2 輪・従動 2 輪を配置した 4 輪構成。駆動 2 輪はそれぞれ操舵軸も有し、駆動輪・操舵輪の独立制御により、全方向移動・スピントーンが可能。
- ロボットアーム
本質的に高速・高出力な 6 軸垂直多関節型ロボットを双腕に配置。



図 19 移動配膳協調ロボット外観

本ロボットの特徴を以下に示す。

- 人腕大の双腕ロボットアーム搭載による高い作業対応力

表 8 移動配膳協調ロボットの主な仕様

ロボットアーム	可搬質量	5 (kg)
	リーチ	704 (mm)
	台数	2 (台)
自走台車	外形	600×900×550 (mm)
	最高走行速度	1.1 (m/s)
	最大路面傾斜	2/100
	最大路面段差	5 (mm)

図 20 に示すように、部品コンテナ引き出し動作と部品ピッキング動作を双腕ロボットアームそれぞれに分担させることで、単腕式よりもタクト短縮が可能である。部品コンテナのスライド機構などが不要であり、人間によるデジタルピッキング(点灯ランプによるピッキング部品指示)と比較しても、部品棚への細工が不要で簡素な周辺機器とすることが可能である。

- ビジョン検出による高精度な位置・姿勢補正
 - ビジョンにて自走機構の位置・姿勢を補正する手法を開発し、その有効性を実証した。
- 路面うねりへの柔軟な対応力
 - サスペンション機構搭載により、うねりのある路面でもロボットが滑らない構造とした。
- バッテリによる駆動、充電ステーションドッキングによるバッテリー充電
 - 新規に駆動用バッテリーを開発し、図 21 の通り、ロボットアーム部が部品キット配膳など



図 20 双腕ロボットアームによる部品ピッキング

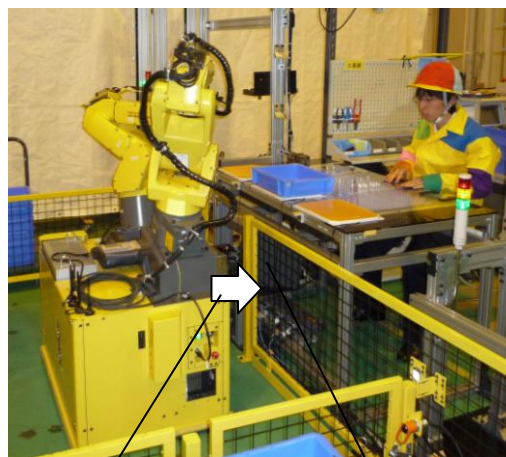


図 21 バッテリ充電ドッキング

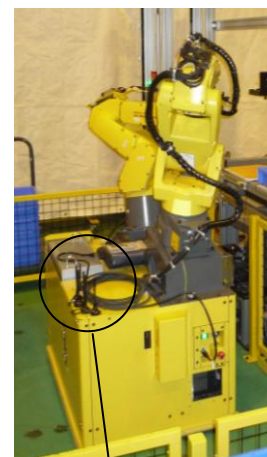


図 22 無線通信機器

のために自走機構が停止している間に充電ステーションにドッキングし、バッテリーを短時間で充電する方式とした。小刻みなバッテリー充電を可能とすることで、容量を抑えた小型軽量バッテリーとなり、移動配膳協調ロボットの小型軽量化を実現した。

- 無線通信により周辺機器との連動が容易

図 22 に示す通り、周辺機器との通信手段として、無線デジタル I/O 通信ならびに無線 LAN 通信機器を搭載し、容易に周辺機器と連動可能なインターフェースを設けた。

- ロボットによる組立作業の物理的支援・情動的支援

前述の作業者協調時の安全対策により、作業者はロボットに触りながら安全に協調作業を実施することが可能である。組立作業において、ロボットが効率的に物理的・情動的な作業支援を実施することが可能となり、高生産性、高信頼性の組立作業を実現した。

ー 物理的支援

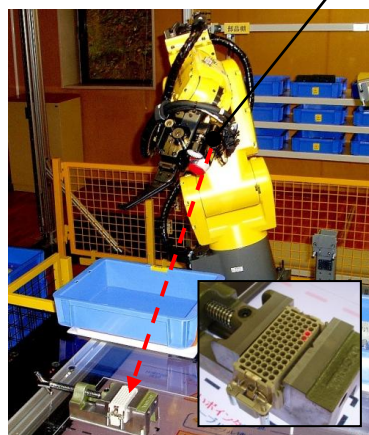
図 23 に示す通り、組立工程に沿って、ロボットが作業者に必要部品を差し出し、組立作業中も部品を把持することで、部品の使用間違いや治具への部品固定など作業者の段取り作業を排除することが可能となった。

使用部品

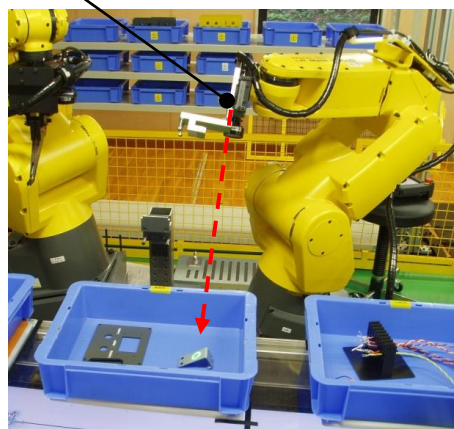


図23 ロボットによる物理的支援

レーザポインタ



レーザポインタによる
組付場所の指示



レーザポインタによる
使用部品の指示

図 24 レーザポインタによる情動的支援

- 情動的支援

ロボットに装着されたレーザポインタによる部品の組付場所や必要部品の明示（図 24）や、ロボットが差し出した部品を移動させながら周辺に設置したレーザポインタと協働して作業箇所を指示することで、部品の組付場所の間違いが排除されると共に、作業者は迅速に次の作業に移行することが可能となった。

2.2.2 部品ピッキングハンドとビジョンシステム

複数段から構成される簡易的な部品棚の各段に部品コンテナ(一般的に使われる部品通い箱)を適当に配置し、移動配膳協調ロボットが部品コンテナに収納されたバラ積み部品をビジョン検出にて認識してピッキングし、部品をキット化する自動化システムを実現した。実証システムでは、異なる 9 種類の部品ピッキング、5 種類の部品キット化を実施すると共に、部品キット化後にロボット搭載ビジョンにて部品キットに過不足がないことを検査する機能も組み込み（図 25）、高信頼性の部品キット化を実現した。

図 26 に示す通り、部品ピッキング用ハンドは 2 指ハンドとし、小型サーボモータにて 2 指を駆動する構造とした。サーボモータ駆動のハンドとすることで、ハンドの把持力を自在に制御することが可能のため、様々な形状・硬さの部品を把持することが可能である。

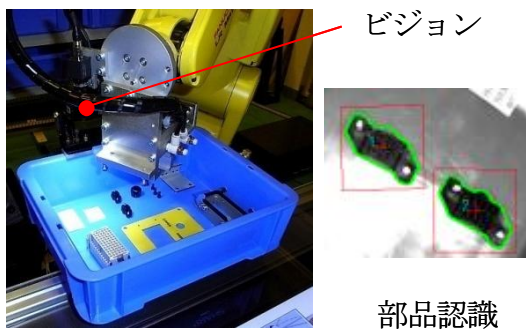


図25 ビジョンによる部品キット検査

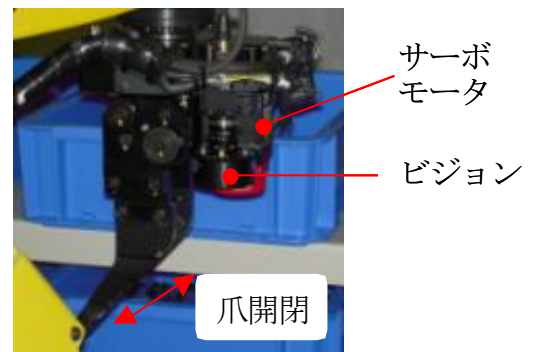


図26 サーボモータ駆動ハンド

2.2.3 知能化部品トレイ

ロボットによる部品キット配膳を実施する供給ステーションと作業者を中心として組立作業を実施する組立ステーションの間は、物理的な部品キットの受け渡しだけではなく、組立機種の変更や作業履歴など情動的にも連携する必要がある。換言すれば、ロボットが中心的に働く供給ステーションと作業者中心の組立ステーションとを別々に運転する、あるいはそれぞれを開発強化するためには 2 つのステーション間のインターフェース部分を明確に設計する必要がある。そのため、情動的・情動的バッファの役割として知能化部品トレイを開発し、頻繁な機種切り替えに対しても即座に対応可能な対応力の高い生産システムを実現した。図 27 に知能化部品トレイの概要を示す。

□ 物理的バッファ

移動配膳協調ロボットにより、供給ステーションから部品キットが知能化部品トレイを介して組立ステーションの作業者に配膳される。部品キットは、ロボット搭載のビジョンシステムにて部品有無が検査されており、高信頼性の部品キット配膳が可能である。また、組立ステーションにて組立完成品が知能化部品トレイに収納され、ロボットにより搬出される。

□ 情報のバッファ

知能化部品トレイには製品情報管理用の「製品 RFID」が組み込まれている。

次の機種の製造開始時、製品 RFID に製品仕様が書き込まれ、ロボットは製品 RFID の情報をもとに必要部品のキット化を実施し、組立ステーションに配膳する。その後、組立ステーションでは、作業者を中心に組み立てられた組立完成品が知能化部品トレイに収納され、組立履歴、作業履歴、また、組立完成品の製品性能などが製品 RFID に書き込まれる。ロボットは、組立完成品と共に製品情報を知能化部品トレイとして搬出する。

また、本システムでは、作業者の作業熟練度に応じた作業支援を実施することを目的とし、作業者情報管理用の「作業者管理 RFID」を導入した。作業者個々に作業者管理 RFID が与えられ、システムは組立作業開始時にこの RFID により作業者の熟練度を認識する。組立ステーションでは、作業台モニタから作業者に対して個々の熟練度に応じた作業支援が実施され、作業初心者から熟練者に至るまで幅広く最適な作業支援を受けることが可能である（2.3 節「作業情報提示技術」にて詳述）。また、組立機種毎の作業熟練度が作業者管理 RFID に更新されるため、作業者は、熟練度の向上に応じて常に最適な作業支援を受けることができる。

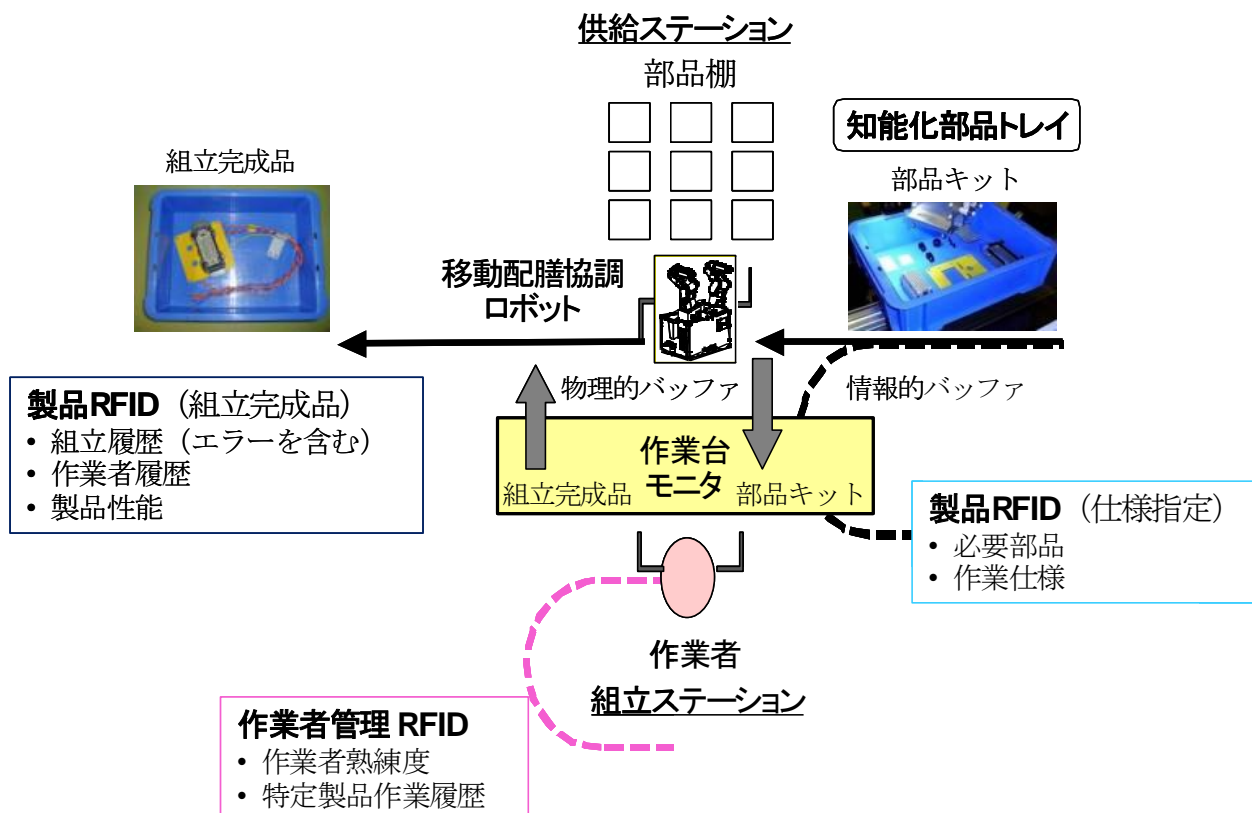


図27 知能化部品トレイによる物理的・情報の連携

2.3 作業者が習熟しやすい「作業情報提示技術」

2.3.1 組立支援システム概要

作業者の組立作業に対して情報支援を行う全体システムを組立支援システム MASS (Multi-modal Assembly Support System) と呼称し、その開発の中心をソフトウェア開発とした。その全体構成を図 28 に示す。

本システムは、次の 4 つのサブシステムから構成される。

(1) 作業教示支援 MASTER (Multi-modal Assembly Skill TransFER) : 作業熟練者から作業者位置姿勢測定系と心的負担測定系により作業者の状態計測(姿勢・位置や生体反応)を行い、測定データに基づいて熟練者の作業のやり方を抽出する教示データを生成する。

(2) 作業情報支援 MAISER(Multi-modal Assembly Information SupportER) : 組立作業をモデル化し、人間とロボットとの協調作業を円滑な遂行を実現するための作業情報の設計とマルチメディアを用いてより分かりやすい形で作業情報を作業者へ提示する。

(3) 作業手順管理 MASHOR (Multi-purpose Assembly Sequence editor with Human operatOR) : 機種切り替え時の作業手順の変更を容易に実現する。

以上により、組立作業に必要な情報に加え、熟練者の組立作業におけるカンやコツなどを作業初心者にも容易に継承することが可能となり、間違いの少ない、機種変更に強いセル生産システムの構築が可能となる。さらに、液晶ディスプレイ作業台や作業者監視用 IP カメラなどのインターフェース群からなる組立作業支援空間を、作業支援する「里親」を意味して、

(4) 作業支援空間構築 MAFOSTER(Multi-modal Assembly FOSTER) と呼称する。作業者とロボットとの協調には、作業者側の行動計測が必須となる。そのためにこのような空間の概念を提案している。

以下、新たに開発した要素を説明する。

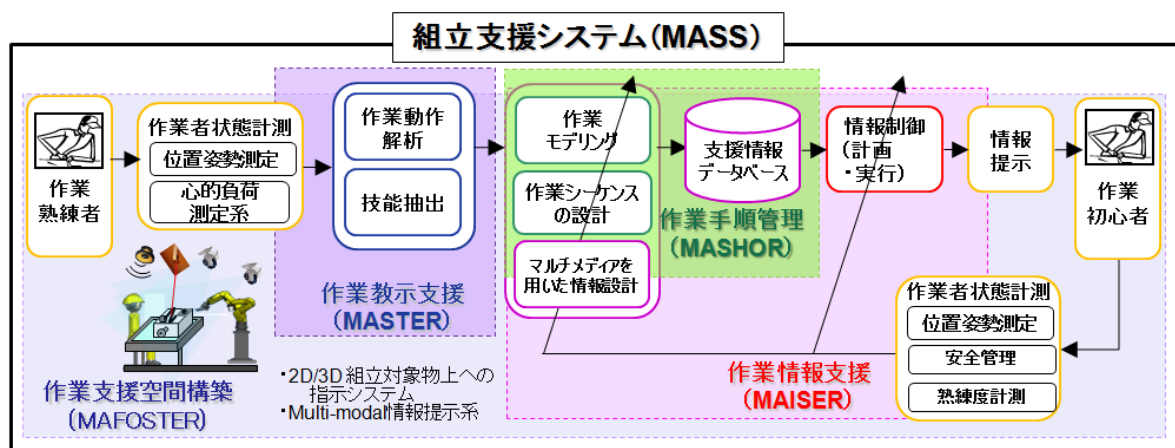


図 28 組立支援システム MASS の概要

2.3.2 作業員位置姿勢測定系

作業員位置姿勢測定系は、MAFOSTER の一要素として機能し、その出力情報は MASTER で使用される。

作業員の位置・姿勢を測定し、作業熟練者の作業のやり方の抽出や作業員の危険状態をモニタリングするための作業員位置姿勢測定系を開発した。システム構成を図 29(a)に示す。組立作業では、左右腕が交差する、部品や製品で身体部位が隠れる、ロボットが画像中を動くなどから、作業員状態を監視するにはオクルージョンが大きな問題となる。

本システムは、作業員の身体 8 か所(頭前 1、頭後 1、肩 2、肘 2、手首 2) に色マーカーを配置した作業服・ヘルメットを着用し、作業員の前上方に設置された 3 台の汎用 IP カメラにより解像度 320×240 で撮影する。撮影された 3 枚の画像データに対して、それぞれパーティクルフィルタを用いて色マーカーの位置座標を同定し、3 枚中 2 枚の画像上の 8 種のマーカー位置座標からステレオ視により 8 種の身体部位の 3 次元位置情報に変換し、その画像 3 枚分の組み合わせ 3 通り取得する。すなわち、3 方向からのステレオビジョンシステムである。

最終的に、この 3 通りの身体部位座標から、人体モデルで表現される身体拘束条件に基づく色マーカーの順序制約とパーティクルの尤度などを考慮し、1 つの身体部位座標に決定し、作業員の位置・姿勢を得る。

このパーティクルフィルタ利用と人体モデルを考慮した 3 方向ステレオ視により、一般的な 2 台システムと比較してオクルージョンに対するロバスト性が向上し、確実な測定を可能にした。また、測定周期 10Hz、測定標準偏差 69.0mm を実現し、組立作業の実システムとして十分使用可能な性能であることを示した。

この測定された作業員の位置・姿勢は、後述の作業教示支援 MASTER へ利用や、また、作業員の正常姿勢であると判断される作業許容空間を設定し、計測データが空間外となった場合、それを異常姿勢として判断する前述の作業員監視システムのデータとしても利用され工場内での実用性に配慮した低コスト作業員監視システムの実現を可能にした。その様子を図 29(b)に示す。



図29 作業員位置姿勢測定システム

2.3.3 心的負担測定系

心的負担測定系は MAFOSTER に一要素として機能するが、本システムでは MASTER に接続して実時間での使用を意図せず、システム利用の準備段階でロボット協調作業によって生じる心的負担測定系を確立することを行った。この出力は、将来、MASTER に接続されることを想定しており、作業状態の監視に用いられる。

作業者が被る心的負担が少ない人間・ロボット協調型作業システムの設計基準を策定するための、心的負担測定に基づく作業システムの評価手法を構築した。一般的に、作業者が被る精神的影響とそれを引き起こす外的要因について、ISO で以下の用語が定義されている。これら 3 つの関係性を図 30 に示す。

- 精神的負荷：外部から人間に対して及ぼし、かつ精神的に効果を与える評価可能な影響の全体
- 精神的負担：精神的負荷によって個人の内部に直ちに起こる影響であって、各人の対処様式を含み、個人の習慣及びそのときの条件に依存するもの
- 減退的效果：精神的負担により引き起こされる作業者が被る悪い影響

人間・ロボット協調型組立作業システムに内在する精神的負荷・精神的負担・減退的效果については、先行研究の知見を踏まえ、並べあげと構造化を行った。構造化された関係性を踏まえ、提案手法では、人間・ロボット協調型組立作業システムに内在する各精神的負荷がそれぞれの減退的效果に与える影響の度合い(精神的負荷の評価値)を算出する。評価値算出の方法を図 31 に示す。

まず、実際に作業を行い、作業中の作業者の生体反応、各精神的負担をどの程度感じたかの主観的なアンケートを測定する。測定する生体反応としては、生理指標の信頼性・測定の簡便性の観点から、自律神経系(情動)の変化を捉える唾液アミラーゼ濃度、皮膚電位反射 SPR、中枢神経系(脳の認知機能)の変化を捉えるフリッカー値を採用し(図 32 にそれぞれの測定イメージを示す)、それぞれの生理指標により各減退的效果の程度を[弱]0-3[強]の 4 段階で推定する。

次に、減退的效果の推定値から、各減退的效果を生じさせる精神的負担の程度の推定値を算出する。この時、ある減退的效果は、複数の精神的負担の影響により生じるため、その減退的效果に各精神的負担がどの程度寄与しているか(寄与率： α)を踏まえる必要があるが、これを主観的アンケート結果から算出する。

最後に、各精神的負荷の評価値を、その負荷が影響する精神的負担の推定値の和として算出する。ある精神的負荷での評価値が高いということは、その負荷により作業者が被る心的負担が強いことを意味する。そのため、この評価値は、各精神的負荷となりうるシステム挙動の設計基準として用いることができ、これにより作業者が被る心的負担が少ない人間・ロボット協調型作業システムの構築が可能となる。

本研究では、実際のロボット協調型組立作業システムで作業を行った際の精神的負荷を提案手法に基づき測定した。ロボットの協調作業時に作業車が被る精神的な影響の包括的な測定は、先行研究が見当たらず、極めて新規性の高い成果といえる。また、その結果に基づき、以下の設計指針を得た。

- 作業者に恐怖や驚きといった精神性の動揺の低減のための設計指針

- ロボットアームの動作軌道は、作業者に向かって直線的に接近する軌道は避ける。円弧軌道の場合も視覚的にわかりやすく設計し、作業者に接近を知覚し易くすべき。
- ロボットアームの接近動作の速度は、500mm/s 以下が望ましい。
- 作業者の精神的な疲労感の低減のための設計指針
 - ロボットの作業ペースに関し、人間の作業ペースより早いペースを避けることで、焦ることによる精神的な疲労感が抑制される。
 - 作業者が理解しやすいような情動的支援の設計が必要であり、負担は少なく生産性を高く保つためには、ディスプレイ上に一度に提示する作業工程の数は、3 個以下が望ましい。

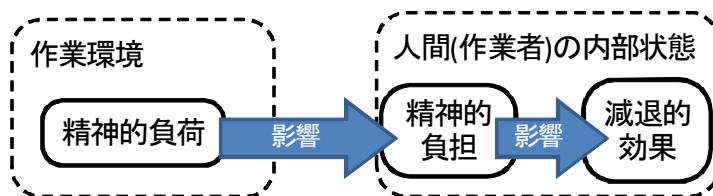


図30 精神的負荷・精神的負担・減退的効果の関係(ISOの定義に準拠)

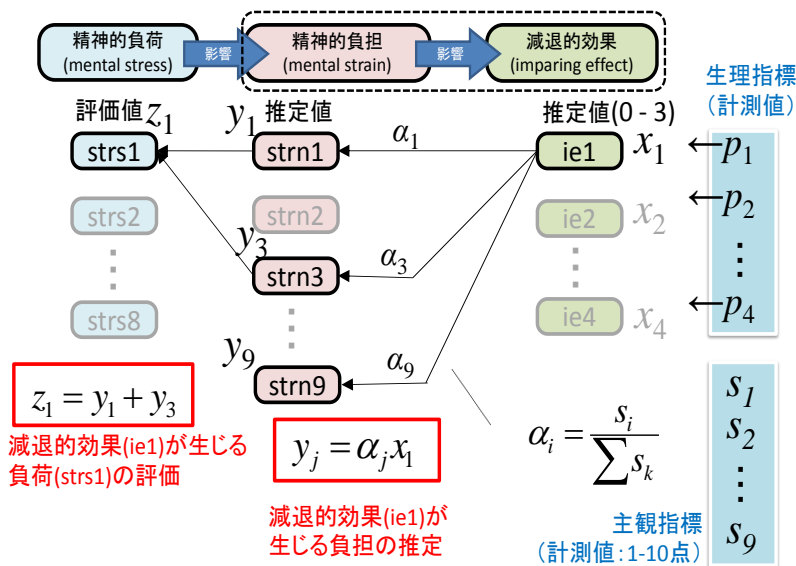


図 31 精神的負荷の評価値の算出方法



図32 多種の生理指標計測

2.3.4 作業教示支援システム (MASTER)

作業熟練者が作業を遂行する際の認知行為（作業のやり方）を解析し、作業効率の向上につながる認知行為を抽出、初心者へ分かりやすい形で教示を行う作業教示支援システム MASTER を開発した。

実世界で実行される作業は、図 33 に示すように、作業対象を観測し、状態を認識し、その状態に従って取るべき行動を判断し、実世界に対して実際に働きかけを行う手順から構成されていると仮定する。この行動決定モデルはロボット学の分野で広く受け入れられている。しかし、セル生産組立では、ある組立状況において作業者が取るべき行動は、組立プロセスとして設計者によって丁寧に定められており、作業者が自身で取るべき行動を判断する必要はほとんどないと考えられる。すなわち、図 33 の行動決定モデルで、「判断」に関する技能をあまり必要としない。それゆえ、新米の作業者が投入されても、指先の細かな動作といった行動生成の技能があるなら、全体として滞りなく作業できるように作業の分解、あるいは部品設計が準備されていると理解することが出来る。組立作業は、長年の経験の蓄積が設計に反映されており、長時間の鍛錬が必要な難しい作業を排除し、短時間に習熟可能な動作が大多数を占めるように設計されてきている。

そのため、組立プロセスによって定められた作業（行動決定モデルにおける認知から運動生成迄の全体）を早く正確に遂行するためには、「作業中に注目すべき対象とそれに対して行う認知行為」が重要となる。これは多くの場合、作業注目点として理解される。すなわち、作業効率を向上させる作業注目点を初心者に伝達すれば、初心者でも高い作業効率で組立作業が可能であるといえる。

そこで MASTER では、このような作業注目点を体系的に抽出する方法論を採用した。初心者に伝達すべき作業注目点とは、「作業成績の高い熟練作業者は重要視しているが、作業成績が低い作業初心者は重要視していない作業注目点」と仮定した。表 9 にその関係を示す。

初心者に伝達すべき作業注目点の抽出方法を以下に示す。

1. 熟練者に作業中の注目点を聞き、適切な動詞を用いて対象とする作業における作業注目点を列挙する（ただし、自然言語で記述可能技能に限定）。
2. 初心者・熟練者の双方の作業成績及び、各作業注目点に対する主観的な重要度を測定する。
3. 各作業注目点について、作業成績(作業にかかる時間・ミス回数)と重要度(重要なほど高得点)との相関をとり、相関係数が負で絶対値が大きい作業注目点を伝達すべき作業注目点として抽出する。

この方法は自然言語で記述可能な技能の抽出に限定している。技能の典型であるシナジー（複数の筋肉を同時に調和的に動かすことで、筋肉単体の和以上の能力を示すこと。相乗効果）は扱わない。ここで、3 に関し、作業成績と主観的な重要度との相関が負に高いということは、作業成績の高い熟練作業者は重要視しているが、作業成績が低い作業初心者は重要視していないということを意味する。

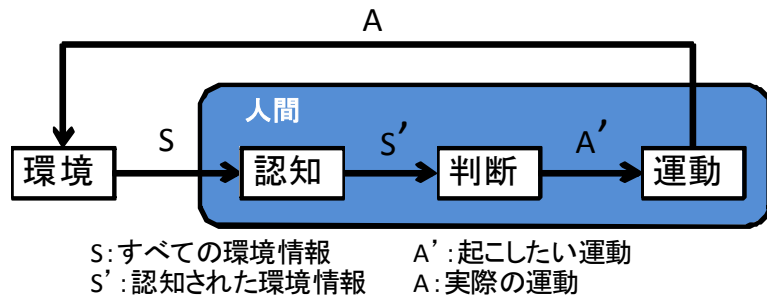


図33 ある組立環境下での行動決定モデル

表9 初心者に伝達すべき作業注目点

		熟練者 (作業時間が短く、ミス回数が少ない)	
		重要視	軽視
初心者 (作業時間が長く、 ミス回数が多い)	重要視	伝達不要の作業注目点 (相関係数≒0)	使用を禁止すべき技能 (相関係数が正で かつ1に近い)
	軽視	伝達すべき作業注目点 (相関係数が負で かつ-1に近い)	伝達不要の作業注目点 (相関係数≒0)

表10 ケーブルハーネス作業の作業注目点伝達ありとなしとでのミス回数の比較

間違い箇所	初心者の合計ミス回数	
	伝達なし	伝達あり
ケーブルの結束並び	1	0
クランプ板金の向き	1	0
クランプ板金の結束位置	3	1
板金の表裏	4	0

また、本提案手法の有効性を検証するために、特に認知行為が必要とされるようなネジ締め作業に対し提案手法を適用し、抽出した作業注目点を作業初心者に伝達した場合と伝達しなかった場合での初心者の作業時間を比較した。その結果、作業注目点を伝達した場合に作業時間が短いことが示された。これにより、提案手法の有用性が確認された。

さらに、実際の組立作業の例としてケーブルハーネスの組立作業に対し、提案手法を適用し、初心者のミス回数を減少させるような作業注目点の抽出ができたことを確認した(表 10)。すなわち、提案

手法が実組立作業で、作業成績を向上させるために初心者に教示すべき内容を抽出可能な手法である。

また、MASTER では、仮想空間上に構成された作業者モデルに熟練者の技能となる部分の運動を再現し、初心者に提示を行う。さらに、情報ディスプレイ上にコツになる部分をテキスト・静止画・動画等で提示する手法も可能であり、直感的に理解しやすくかつ汎用性・再現性高く教示できるのが特徴である。

2.3.5 作業情報支援システム (MAISER)

組立作業の作業情報と作業熟練者から取得した作業解析データ(作業のやり方)を人間の分かりやすい形で作業分析・表現を行い、作業情報データベースに格納し、かつマルチメディアを用いてその作業情報を分かりやすい形で作業者へ提示する作業情報支援システム MAISER(Multi-modal Assembly Information SupportER)を開発した。MAISER の機能要素は、「作業のモデリング」と「情報提示」に大別される(図 34)。

□ 作業のモデリング

組立図は製品を構成する部品間の構造として定義されているが、最終組立状態である部品間の関係を作り上げる作業者の行動に変換することが求められる。本研究では、階層的タスク分析法 (Hierarchical Task Analysis, HTA) を導入して、組立のタスク分析を行うことで、人間が実施する作業から作業情報を抽出する方法を提案する。提案手法では、全ての組立工程をより単純なサブタスクに分割し、更に、それらのタスク間の関係をゴールとサブゴールがからなる階層構造で記述する。この展開によって、組立作業全体は容易なタスク単位であるオペレーションに分解される。即ち簡単な人間あるいはロボットが出来る作業 (オペレーション) の並びにとして定義される。それぞれのオペレーションは、操作、部品、組立場所などからなる情報とタスク構造 (タスク間の関係、オペレーション間の関係) 等の先行関係に関する情報から成立つ。図 34 はタスク分解の構造を示しており、最上位の組立レベルにおける組立タスクは、製品と部品 (あるいは、サブアセンブリ) の関係を示している。中位にあるオペレーションレベルでは、タスクを行う人間操作を表現している。作業者の動きに連動するロボットの動きは、最下位に置かれたロボット動作レ

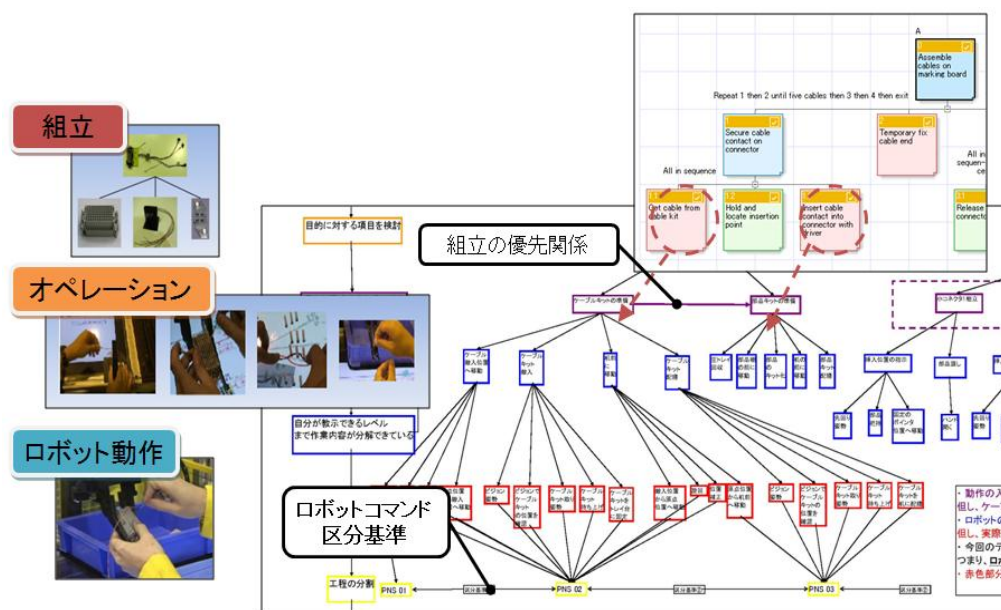


図34 タスクレベルからロボット協調動作レベルへの分解法の確立

ベルにおけるロボットタスクとして、表現される。ここでは、人間作業に対応する協調関係を決めている。

このグラフは組立タスクレベルからトップダウンに描かれていく。製品はそれを構成する部品、またはサブアセンブリに分解されることができる。サブアセンブリは、更にそれぞれのパーツまたサブアセンブリに分解するという形で再帰的に分解することが出来る。そのような分解プロセスは 2 個の最も単純な部品による組立作業にまで続く。以上で、部品展開が終わると、次に、作業によるオペレーションの分解を始め、動作の基本単位にまで分解する。以上がタスク解析である。

タスク解析と共に、協調作業解析を進める。開発した組立システムでは、人間—ロボットが協調して組立動作を実現しなければならない。そこで、作業者の動作を補完する形で、ロボット動作を記述し、ロボット動作と作業者動作との関係を定めることで、協調を定義する。製品を分解し、作業者動作、ロボット動作に分解したのち、再度、作業者とロボットシステムが持つ機能に基づいて、動作を適切なエージェント（作業者あるいはロボット、あるいは固定的な自動機器）に再び割り当てる。この際、情報支援技術適用に必要な人間・ロボット協調作業時の安全管理のために、リスク評価を行う。作業パフォーマンス、安全対策などの情報は、拡張情報（組立に直接は関係しない情報）として、作業効率や信頼性を向上させるために利用し、かつ、情報支援の内容として使うこともできる。

MAISER は様々なメディアにおける表現形態である情報を作業情報にリンクさせ、作業支援情報として表示するためのソフトウェアシステムとして開発した。作業情報は、タスクならびにサブタスクであるオペレーションという単位に分割され、それぞれの属性として、静止画像、動画、文字情報、音声情報等マルチモーダル情報が結び付けられる。システムは JAVA で記述され、それぞれのタスクノードに情報属性を付けることで組立作業の内容、並びにそのメディア上での表現を関係づけている。

MAISER のソフトウェアシステムは、図 35 に示すように、ファイル管理システム、エディタ、属性管理システムなどのサブシステムで構成される。MAISER は、上述のように、タスクモデリングのための統合開発システムでもある。タスク分析によって、人間ロボット協調作業に必要な支援情報が抽出可能となっている。作業時間の測定、間違い例の測定がされることで、継続的な改善のためのフィードバックが容易になっている。このシステムにより、後述する水平作業台に組み込んだ液晶画面に提示する作業指示情報を編集できるようになった。

なお、MAISER で使用したタスク表現は、前述の MASTER あるいは後述する MASHOR などタスクの手順管理においても使用される。

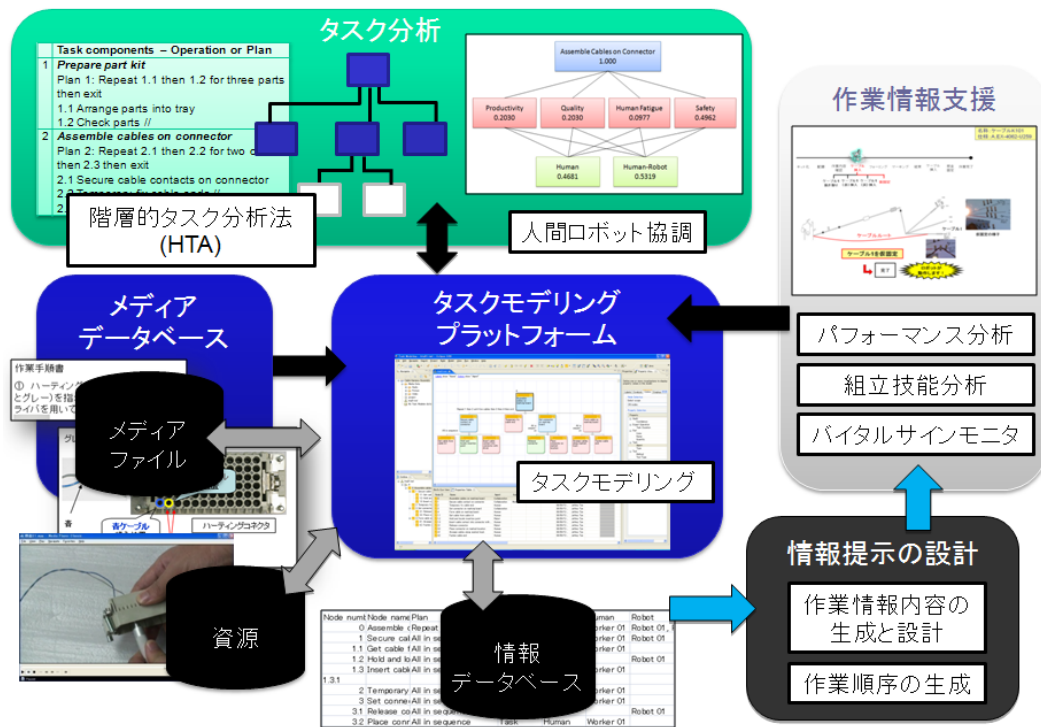


図35 作業情報データベースと提示システムの統合

□ 情報提示

従来の作業マニュアルでは、テキスト情報に静止画が添付される形で表現されていたため、熟練者には十分でも、初心者には組立動作まで理解するには困難を伴った。本システムでは、テキスト情報、静止画に加えて、動画、音声などのマルチモーダルな情報を用いることで、情報の多様な表現を可能にした。かつ、それらマルチモーダルな情報を、心理学研究から導出された設計原理(Mayerのマルチメディア原理など)に基づき、支援情報を生成する基準を準備した。これによって、提示された情報は作業者にも直感的に理解しやすく、作業効率の向上が期待される。図 36 上右部に見られる液晶パネルに表示される指示情報は、図 36 下部に示すような画面構成になり、動画、画像、テキスト等からなっている。さらに、音声、レーザポインタなどが画面以外からの情報提示に使われる。作業者は指示された内容に基づいて作業を行うことで、効果的に作業を習熟することが可能である。

マルチモーダルな情報を作業者に提示するために、本システムでは、作業台組込液晶パネル、スピーカ、レーザポインタ等を組み合わせて使用する。

- 液晶パネル組込水平作業台：水平に設置された透明の板の下に、大型液晶ディスプレイを組み込んだディスプレイ付き作業台を開発した(図 36 上右部)。情報提示モニタを作業台と一体化することで、プロジェクタなど外部からの作業情報提示方法よりも省スペース化が実現できる。また、作業者は作業から目を離すことなく作業情報を取得可能であるため、組み付け間違いの発生率の低下、作業のポカ防止への効果が得られる。

上記の効果を検証するために、作業台ディスプレイ、縦置きディスプレイ、作業マニユ

アルという異なる作業提示方法による作業効率への影響を実験的に検証した。その結果、作業情報を作業者の作業エリアに提示することで、提示視線移動回数及び主観的な心的負担が統計的に有意に減少し、作業効率が向上することを実証した。

- マトリックス・レーザ・ポインタ：作業注視点の提示、あるいは多数の類似作業対象の中から指定対象の選択には、実物に対してレーザポインタで輝点を照射することが分かりやすい。本システムでは、固定したレーザポインタに対して、部品をロボットが動かす方式、レーザポインタを 2 軸回転雲台で振る方式を実験して有効性を検証した。また、作業台ディスプレイのみでは指示できない空間的な情報支援を実現するため、可動型 5×5 点のマトリックス・レーザ・ポインタを開発した(図 37)。これにより、作業者への使用部品、工具および組付箇所を指示が可能となり、より間違いの少ない確実な組立作業が可能となった。

コンピュータ支援による作業指示システムはすでいくつかの研究例があり、また、商用システムも販売されているが、統一的な方法でタスク分解しているシステムは少ない。また、マルチモーダルな情報を後述するような情報提示設計基準をもとに構成しているシステムもほとんど無い。MAISER は人間の作業表現、ロボットとの協調表現まで考慮して、タスク記述ができ、よって、人間とロボットとの協調作業を表現できるシステムとして、世界で初めて開発された。

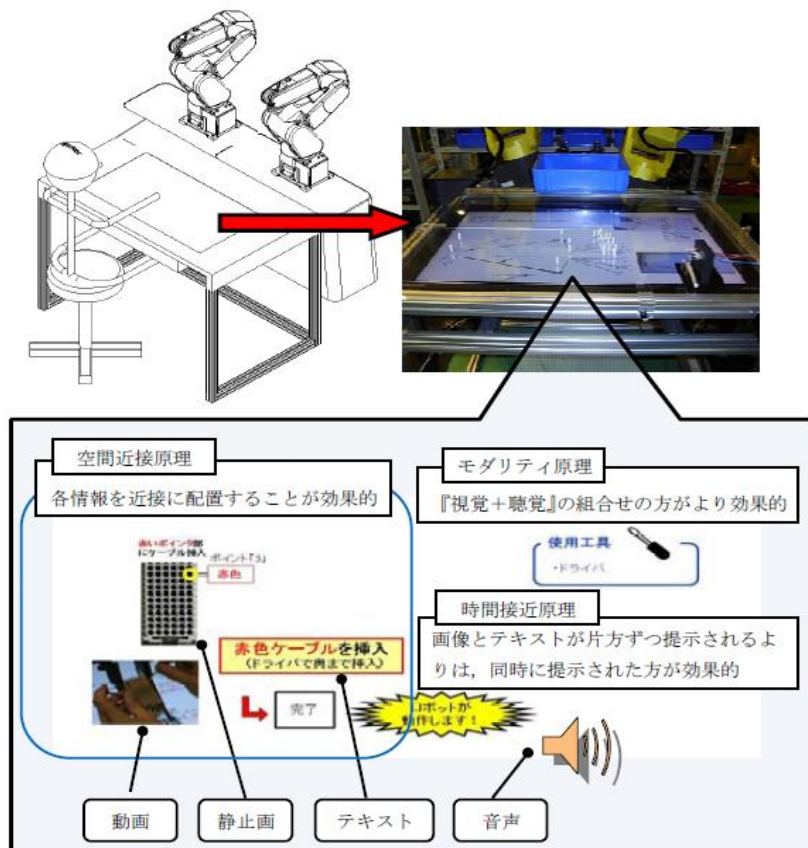


図 36 水平 LCD ディスプレイ作業台とマルチメディアによる情報提示

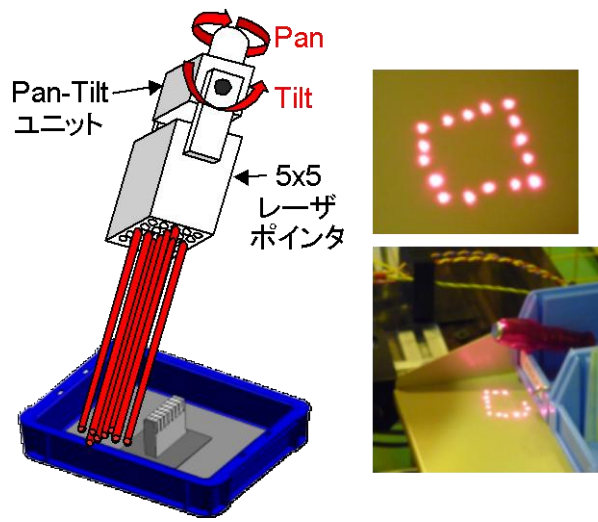


図37 可動型5x5点光ポインタ

2.3.6 作業手順管理システム (MASHOR)

機種切り替え時の作業手順の変更に伴う支援情報の容易な変更と管理を実現する作業手順管理システム MASHOR (Multi-purpose Assembly Sequence editor with Human operatOR) を MASS のサブシステムとして開発した。

MASHOR は、MAISER で用いた作業支援情報のための提示情報編集機能と連動した作業手順編集システム、並びにその手順変更を外部へ指示する機能から構成される(図 38)。組立作業を作業員動作とロボット動作とに MAISER 内で分解することで、タスクはグラフ表現される。これが図 38 のタスクモデリングからの出力である。この手順のどれかを変更する要求が出た場合、あるいは、作業方法や協調方法を変更する要求が出た場合には、その変更が、元々の先行関係の条件を壊すことがないか、あるいは、安全管理が抜け落ちることが無いかを調べる。そして、新たに定義されたタスク構造を作成し、そこに含まれる支援情報に紐付けて、情報データベースを構築する(図 38 「2.情報データベースの生成」参照)。組立順序の先行関係を調整し、ロボットの動作、作業指示、安全管理条件を調整する。それぞれの動作指示を行う支援情報の生成プロセスでは、組立指示情報を人間に理解し易い構造に再配置し、それを対応するマルチメディア情報(画像、ビデオ及び音声)に編集する。最終的に提示スライドになる。設計者は情報指示のガイドラインに基づいて基本的な支援情報を更にわかりやすくなるよう調整する。

改善(KAISEN)を継続的に進めていくことは生産性の向上のためにも、作業員のレベルアップのためにも極めて重要であることは良く知られている。しかし、自動組立システムは、一度、完成してしまうとたとえ改善すべき事柄が明らかになっても、コストがかかることから手をつけにくい。それに対して、セル生産方式では、「午前中に指摘された改善提案を昼休みに対応する」と言われるくらい即応性を実現できるシステムと言われる。これは作業台などの作業環境が廉価で単純である、機械設計に依存する部分が少ないなどのセル生産システムの特長による。本システムではこのセル生産システムの特長を生かすために、工程入れ替えが容易にできるように MASHOR を準備した。MASHOR のグラフィカルユーザインタフェース上では、図 39 に示すように作業の順序が表示される。作業順序を入れ替えると、MASHOR は工程入れ替え基準(組立の先行関係、ロボットコマンドの区分基準、安全制限、生産性など)に基づいて、工程入れ替えの調整を行う(図 39(a))。これらにより機種切り替え時の情報提示を即座に変更可能にした。

また、作業員の技能レベルが異なる場合の提示情報の詳細度合いの調整も MASHOR が行う。この場合、階層的タスク構造の特性であるタスク分解のレベルごとに詳細化度合いが異なることを用いて、作業初心者には詳細に分解した支援情報を、熟練作業員には分解前の支援情報を提供することができる(図 39(b))。

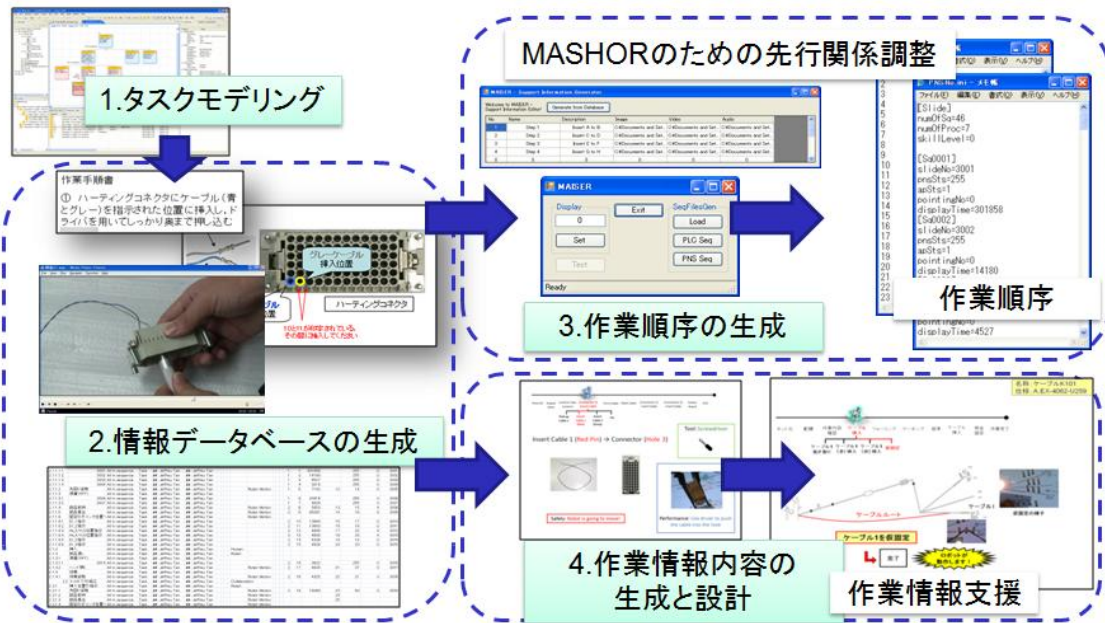


図 38 提示情報編集システムと作業順序編集システム

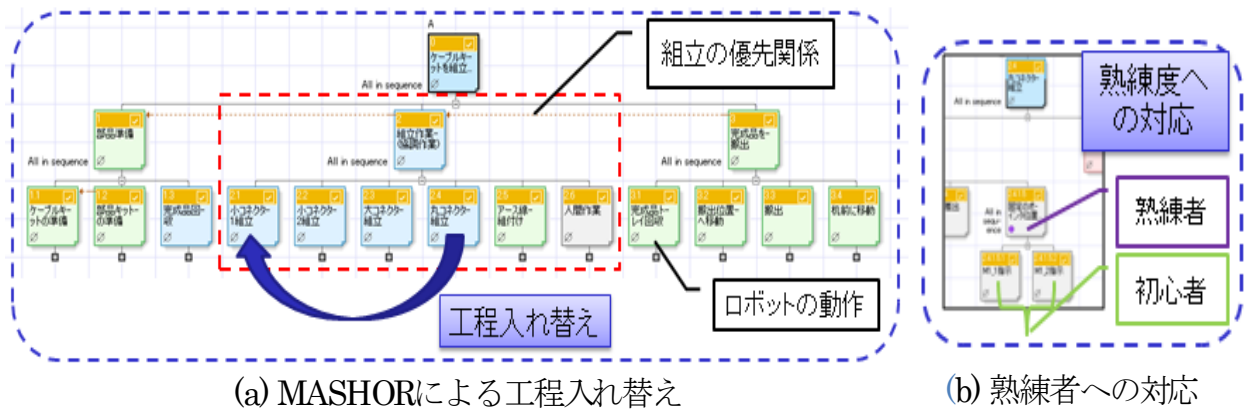


図39 作業手順の管理

2.4 「統合化技術」

各要素技術を組み込んだ統合システムを構築し、部品キット化、組立作業について性能評価を実施した。その結果、人間のみで実施する従来方式と比較し、高効率・高信頼性の生産が可能であることが示された。

2.4.1 システム統合とモジュール化

本開発対象となる組立工程は生産システムの最終工程として、商品販売動向の直接の影響を受ける。この開発目標の一つは機種変更への迅速な対応であり、組立システム自体の組み直し、あるいは部分的な強化が可能となる分離性の良いシステム構成が求められる。加えて、システムの事業化の場合には、システムの部分的導入ができることが強く求められる。これらの点を考慮して、本システムは、供給ステーションと組立ステーション、並びにそれらを接続する知能化部品トレイからハードウェアを構成し、それぞれ独立に更新できるようにしてある。一方、安全管理統合システムはロボットが作業者と接近あるいは接触する場合に必要とされ、供給ステーションと組立ステーションとが結合された場合を想定して開発されている。

これらのハードウェアシステムを動かすソフトウェアシステムも部分的なシステム導入の際でも利用できるように構成を取っており、既に述べたように、安全管理技術、作業支援技術、作業情報提示技術として開発し、それらをモジュール化したソフトウェアとして開発した。

統合システムフロー図を図 40 に示す。製品の製造指令が外部から知能化部品トレイに組み込まれた製品 RFID として与えられる。これがトリガーとなり、移動配膳協調ロボットおよび組立支援システム(MASS)に、作業工程の実行を指令する。その際、実行する作業工程の順序は、作業手順管理(MASHOR)により構築された作業手順により決定される。

実行指令により、安全対策システムが、実行する作業工程に適した状態へと光カーテン等の安全管理機器を切り替える。その後、移動配膳協調ロボットは、供給ステーションから必要部品をピックアップし、作業者を中心とした組立ステーションに部品キットを配膳すると共に、作業工程に応じて、作業者に対して適切な物理的支援および情動的支援を行う。

一方、組立支援システム(MASS)は、実行指令を受け、MASHOR により構築された作業手順により、作業者に対して作業情報提示など作業支援を行う。その際、MASS は作業者管理 RFID にて作業者の作業熟練度を認識し、作業者の熟練度に応じた作業支援を行う。

組立ステーションの作業者は、上述の通り、ロボットおよび MASS から作業工程毎に適切な作業支援を受けながら組立作業を実施する。完成した製品は、作業者により知能化部品トレイに収納され、ロボットが搬出を行う。

統合システムでは、各要素技術が連動したシーケンス制御を可能とするため、統合システム制御機器として PLC(プログラマブルロジックコントローラ)を使用した。必ずしも各開発技術を PLC にて統合・制御する必要はなく、MASS 用の制御用 PC、あるいはロボットのシーケンス機能を活用することも可能である。また、図 41 に示す通り、ハードウェア的に分離しての設置可能なように、ソフトウ

エアもまた、開発した要素技術毎に独立したモジュールとしての活用が可能であり、次に述べるような単位で使用できる。

- 作業支援技術
 - 移動配膳協調ロボット (ロボット単体設置可能)
 - ロボットハンド (ロボットに直接組込)
 - 知能化部品トレイ (システム単体で設置可能)
- 作業情報提示技術
 - 作業情報支援+情報提示作業台 (システム単体で設置可能)
- 安全管理技術
 - 協調系構築に必須の安全対策 (ロボットに直接接続・組込可能)
 - 作業監視システム (システム単体で設置可能)

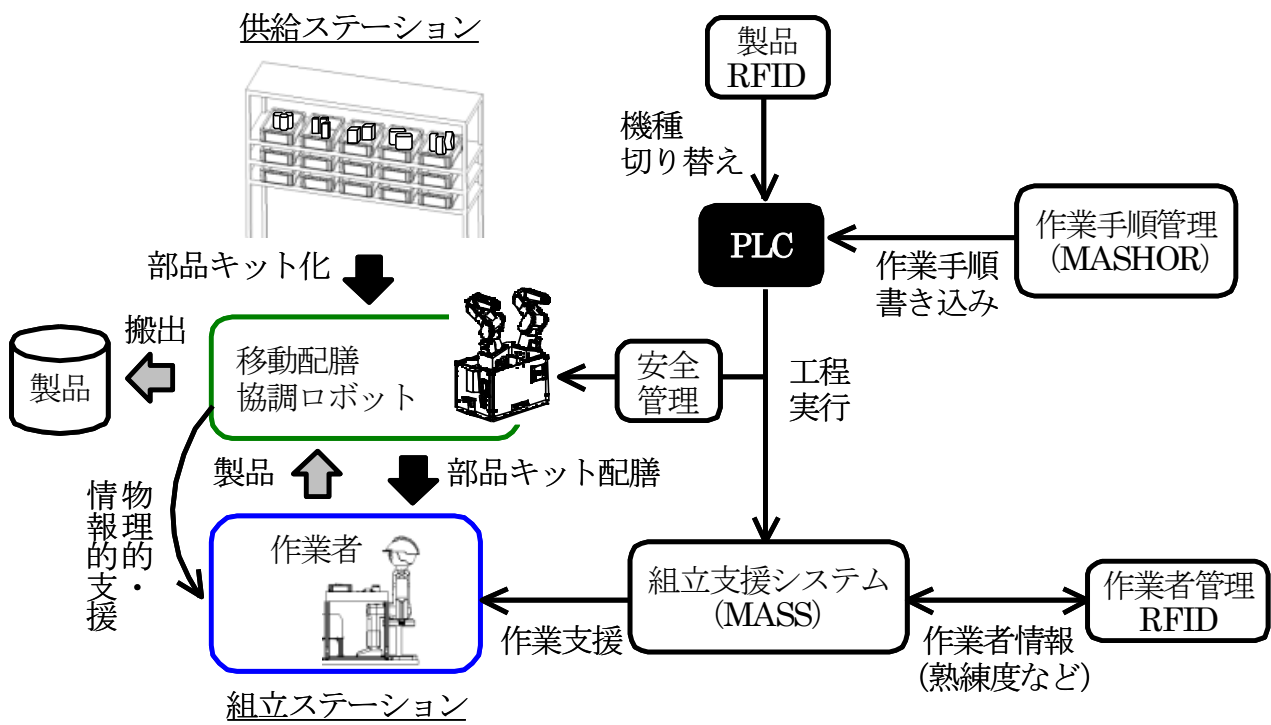


図40 統合システムフロー図

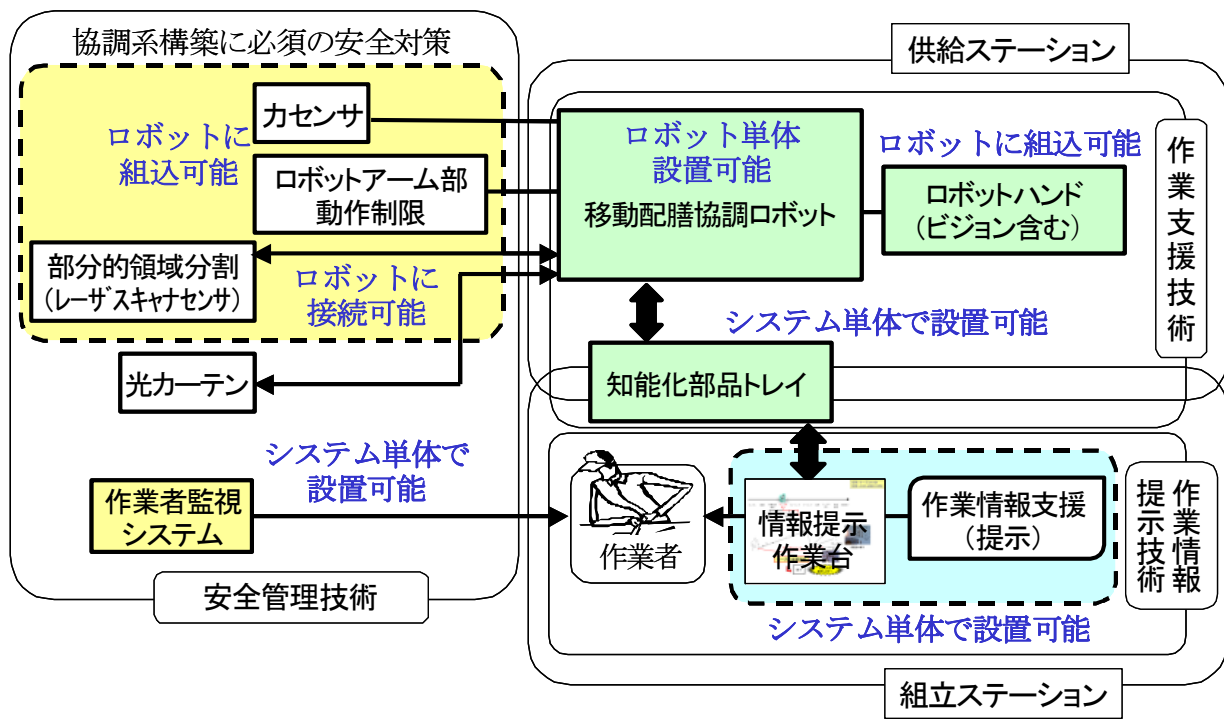


図41 要素技術のモジュール化

2.4.2 システム性能評価

構築した統合システムにて、移動配膳協調ロボットによる部品キット化、ロボットと人間の協調による組立作業の性能評価を実施し、人間・ロボット協調型セル生産組立システムの有効性を実証した。

(a) 移動配膳協調ロボットによる部品キット化の性能評価

コネクタなど小物部品のキット化を対象に、移動配膳協調ロボットによる部品キット化と人間によるデジタルピッキング(点灯ランプによるピッキング部品明示、表 11 中の図参照)の性能比較を行った。表 11 に結果を示す。

移動配膳協調ロボットの部品キット化では、9種類の小物部品のピッキングを実施し、平均で約 17.5 秒/部品のピッキング所要時間であった。この実測値から、床面に平積みされた部品群からのピッキングでは、部品コンテナの引き出し動作の削除により、所要時間を約 10.5 秒/部品まで短縮可能である。従って、ロボットを 24 時間連続稼働させることで、従来の人間によるデジタルピッキングの約 1.7 倍の生産性を実現可能である。

一方、機種切り替え時間については、人間によるデジタルピッキングと同等であり、即時の切り替えが可能である。

表11 部品キット化の性能比較



ランプで必要な部品と数量を明示

	移動配膳協調ロボットによる 部品キット化	人間による デジタルピッキング
所要時間	約17.5秒/部品 (実測値) → 約10.5秒/部品 (見込み) ¹⁾	約6秒/部品 (導入事例の実測値)
生産性	1.72 ²⁾	1
機種切替え時間	1	1

1) 部品コンテナ引き出し動作の削除にて時間短縮

2) 稼働時間を人間8時間/日・ロボット24時間/日とし、一日当たりの生産量で比較

(b) ロボットと人間の協調による組立作業の性能評価

人間・ロボット協調型セル生産組立のモデルケースとして、本プロジェクトでは、図 42 に示すようなケーブルハーネス組立を対象とした。本対象の組立作業について、従来方式の人間のみのセル生産方式(以下、「人間セル」と表記)と生産性、機種切り替え時間、作業間違い率を比較することで開発システム(以下、「協調セル」)の有効性を実証した。比較対象の人間セルとしては、紙媒体の作業指示書を確認しながら実施するセル生産システムを構築した。

多品種混流生産および作業難易度の高い複雑なケーブルハーネスの組立作業における性能評価を実施するため、以下の 2 つの評価実験を実施した。

□ 実験 1 (簡易ケーブルハーネスの 5 品種混流生産)

人間セル、協調セルの各セルにて、図 43 に示す 5 品種の類似する簡易ケーブルハーネスの混流生産を実施し、以下の実験条件にて性能評価を行った。表 12 に実験より得られた性能比較を示す。

- 実験条件

- ・ 被験者 6 名 (初心者 3 名、熟練者 3 名)
- ・ 実験回数 各セルにつき、作業員 1 名あたり 15 製品 (毎回品種切り替え)

- 実験結果

表 12 に示す通り、被験者 6 名の作業所要時間の平均から算出した生産性は、従来の人間セルから 9% 向上し、作業間違い率が約 1/5 に低減された。構築した協調セルでは、人間セルよりも生産性が向上し、かつ、信頼性を大幅に向上可能なことが実証された。

機種切り替え時間については、組立対象の簡易ケーブルハーネスでは、機種切り替え時の段取り替え作業が少なく、人間セルとほぼ同等の機種切り替え時間となった。



図42 簡易ケーブルハーネス



ケーブル1

ケーブル2

ケーブル3

ケーブル4

ケーブル5

図43 5品種の簡易ケーブルハーネス

表12 簡易ケーブルハーネスの5品種混流生産での性能比較

	協調セル	人間セル
生産性	1.09	1
機種切替え時間	1	1
作業間違い率	約1/5	1

□ 実験2（ケーブル多点挿入）

実験1での簡易ケーブルハーネスよりも難易度の高い作業での導入効果を実証するため、図44に示すような2パターンのケーブルの多点挿入作業を対象に、以下の実験条件にて性能評価を行った。図45に作業所要時間の推移の比較を、表13に実験より得られた性能比較を示す。

－ 実験条件

- ・ 被験者 4名
- ・ 実験作業 パターンA（規則的なケーブル配列）のケーブル挿入（64箇所）
パターンB（ランダムなケーブル配列）のケーブル挿入（64箇所）
- ・ 実験回数 各セル、各パターンにつき、作業員1名あたり5回（連続作業）

－ 実験結果

パターンAの規則的なケーブル配列では、繰り返し作業を実施することにより、ある程度のケーブル配列の記憶が可能であったことから、比較的習熟しやすい作業と言える。一方、パターンBのランダムなケーブル配列では、繰り返し作業を実施してもケーブル配列を記憶するには至らなかったことから、習熟しにくい高難易度の組立作業と言える。

以下に、生産性、作業間違い率、機種切り替え時間の性能比較を記す。いずれも人間セルと比較して向上しており、本システムの有効性が実証された。

・ 生産性：最大約2倍に向上

表13は、それぞれのパターン毎に、人間セルの作業所要時間の最小値を100%とし、人間セルと協調セルでの作業所要時間の推移を作業員4名の平均値にてグラフ化したものである。5回目の作業での作業所要時間について、パターンAで



パターンA
(規則的なケーブル配列)



パターンB
(ランダムなケーブル配列)

図44 作業対象のケーブル多点挿入

は、協調セルの方が人間セルよりも約 20%短縮され、パターン B では約 50%短縮された。よって、表 13 に示す通り、パターン B のような高難易度作業では、最大約 2 倍の生産性を実現可能である。

また、実験 1 の生産性向上率(約 9%)やパターン A での生産性向上率(約 25%)と比較し、パターン B の方が生産性の向上率が高いことから、より複雑な組立作業にて高い導入効果が得られることが実証された。

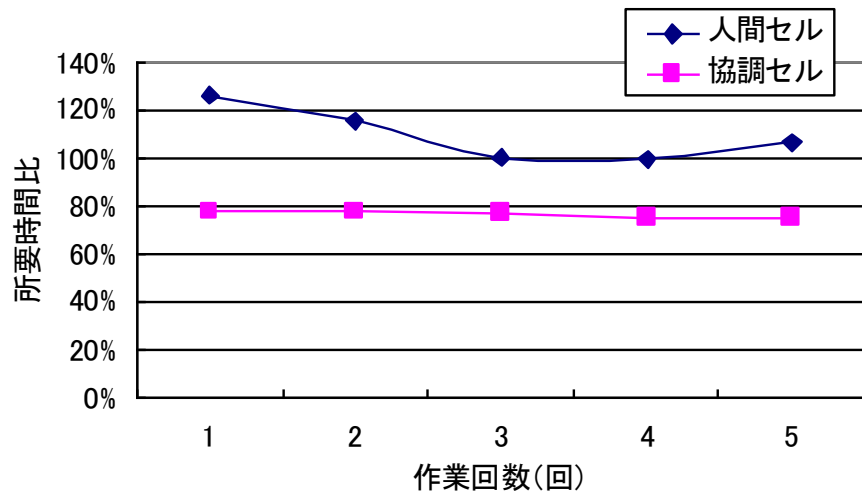
また、パターン A、B 共に、作業回数の増加時に作業所要時間の短縮率が収束していることから、本システムは作業熟練者でも継続的に生産性を向上することが可能であることが示された。

- 作業間違い率：1/10 以下に低減

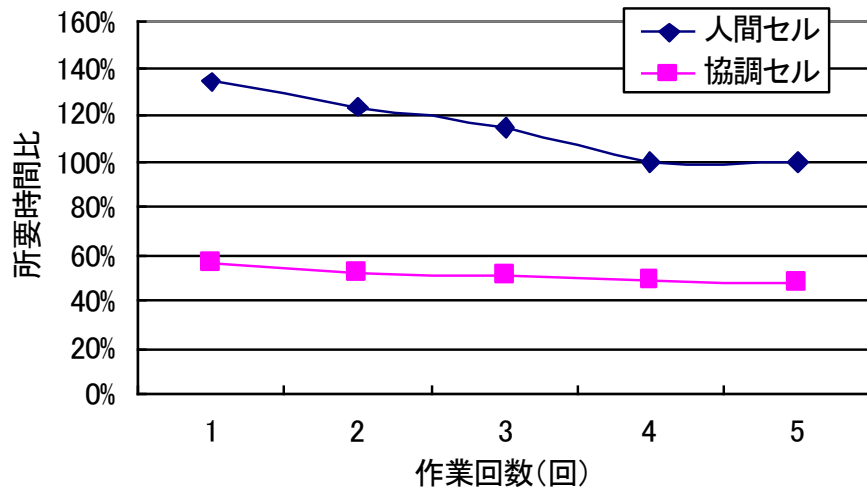
ロボットのレーザポインタにてケーブル挿入場所を順次指示する情報的支援により、パターン B にて作業間違い率が人間セルの 1/10 以下に低減された。実験 1 と比較し、より複雑な組立作業にて高い導入効果が得られることが実証された。

- 機種切り替え時間：1/3 以下に短縮

ケーブル多点挿入作業は、特に、パターン B のようなランダムなケーブル配列において、ケーブルの挿入場所の記憶が困難なことから、換言すれば、製造機種が頻繁に切り替わることに相当する。このことから、実験 2 では、作業中の手順理解に要する時間を機種切り替え時間として取り扱うことができ、人間セルと協調セルそれぞれの実験からこの時間を抽出した。その結果、複雑作業の多品種混流生産においては、協調セルでは人間セルの 1/3 以下の時間での機種切り替えが可能であることが示された。



パターンA (規則的なケーブル配列)



パターンB (ランダムなケーブル配列)

図45 ケーブル多点挿入作業の所要時間の比較

表13 ケーブル多点挿入作業での性能比較

	協調セル	人間セル
生産性	2.04	1
機種切替え時間	1/3以下	1
作業間違い率	1/10以下	1

3 開発達成度と成果の意義

3.1 開発達成度

開発した要素技術毎および統合システムについて、開発目標に対する成果と達成度をまとめる。

3.1.1 要素技術について

開発した要素技術毎の開発目標に対する成果と達成度を表 14～表 16 に示す。いずれの項目も開発目標をほぼ達成した。

① 作業者とロボットとが協働できるための安全管理技術

(注) 既存の産業用ロボットの安全規格が改定されないことを考慮し、現行規格をほぼ遵守する形で達成することが求められる（基本計画より）。

表 14 安全管理技術の開発目標に対する成果と達成度

目的	本開発の目標 (実施計画書より)	成果	達成度
(1) ロボット移動時 安全対策の確立	ロボットの工場環境移動時において作業者の安全を確保すること。	ロボット転倒防止のための低重心本質安全設計、ロボットと作業者の動作エリアを安全センサにて分離する多重系安全対策を構築し、作業者の安全確保を実証した。	移動時の転倒なきこと、作業者がロボット移動エリア侵入した際の確実なロボット停止を実証し、目標を達成した。
(2) 作業者協調時 安全対策の確立	ロボットと作業者の協調作業時において作業者の安全を確保すること。	位置監視、速度監視、力監視を組み合わせた機能安全により、本質的に高速・高出力なロボットに触りながらの安全な協調作業を実現した。	各技術の性能を実証し、目標をほぼ達成した。事業化では、2つの力センサによる二重監視のPL(パフォーマンスレベル)の認証取得を推進する。
(3) 安全管理技術 統合化手法の確立	リスクアセスメントを実施し、合理的に予見可能な誤使用においても作業者の安全を確保すること。	171項目の危険源を同定し、リスク低減の安全対策を開発・実装した。	力センサのPL取得を除き、全ての安全対策を実装・検証し、目標をほぼ達成した。

これにより、本質的に高速・高出力であるロボットを用いて、高生産性を確保しながら、作業者と協調して組立作業を実現する方法論を実現した。このように実用的なシステムの構築は世界で初めてと言える。

② 必要な時に必要な量の部品を整理して供給する作業支援技術

表 15 作業支援技術の開発目標に対する成果と達成度

目的	本開発の目標 (実施計画書より)	成果	達成度
(1) 移動配膳協調 ロボットの開発	工場路面を走行して作業者に部品を配膳し、かつ部品供給などの作業支援が可能なこと。	開発した移動配膳協調ロボットでの安定した走行性能、部品配膳、作業支援機能を実証した。	双腕移動ロボットによる部品キット化・配膳の自動化システムを世界で初めて実現し、目標を達成した。
(2) 部品ピッキング ハンドとビジョン システムの開発	多品種部品に対応可能な汎用性の高いハンドにて高速部品ピンピッキングを実現すること。	設計したハンドにて部品棚に収納されたバラ積み状態の9種類の部品ピッキングを実証した。	ロボットの24時間連続稼働により従来の人間作業の約1.7倍の生産性を実現し、目標を達成した。
(3) 知能化部品トレイ の開発	RFIDにてトレイ内部品を表現し、かつ画像認識にてトレイ内部品が認識可能であること。	ビジョン検査により部品間違いのない高信頼性の部品キット配膳を実現した。製品RFID、作業管理RFIDを導入し、頻繁な機種切り替え、作業者の熟練度に応じた作業支援を実証した。	RFIDの導入により、頻繁な機種切り替えへの即時対応、異なる熟練度の作業員への的確な作業支援を実現し、目標を達成した。

これにより、双腕移動ロボットと画像処理によるピンピッキングシステムの組合せによる高効率部品キット化技術を世界で初めて開発した。

③ 作業者が習熟しやすい作業情報提示技術

表 16 作業情報提示技術の開発目標に対する成果と達成度 (1/2)

目的	本開発の目標 (実施計画書より)	成果	達成度
(1) 作業位置姿勢測定システムの開発	安価なカメラシステムを用いて、作業者の位置姿勢を検知し、作業安全の確保と熟練者の作業のやり方の抽出が可能であること。	作業者の身体 8 部位の 3 次元座標を取得し、人体モデルとパーティクルフィルタを用いた作業者の姿勢の推定を実用レベルでの位置精度・検出速度で実現した。	開発したシステムは測定周期 10Hz、測定標準偏差 69.0mm を実現した。
(2) 心的負担測定系の開発	作業者の心的負担を定量的な評価を可能にする生理指標の決定とシステムの改善基準の導出を可能にすること。	多種の生理指標の中から、心的負担に関連の強い 3 種の生理指標を採用し、情報支援及びロボットによる協調作業時の心的負担の評価から設計基準・安全基準を導出した。	ロボットの協調作業時に作業者が被る精神的な影響の包括的な測定が可能となり、従来の主観評価のみに比べて安全と情報設計に関する客観的なデータの取得を確認した。
(3) 作業教示支援システムの開発	熟練作業者の作業のやり方を記録し、それを作業初心者へ伝達することで作業効率を向上させるシステムを構築すること。	熟練者が重要視し、初心者が軽視する作業初心者に伝達すべき作業注目点を作業成績との相関から抽出する方法論を確立した。	提示用情報の絞り込みと作業間違い原因の推定に効果を確認した。

表 16 作業情報提示技術の開発目標に対する成果と達成度 (2/2)

目的	本開発の目標 (実施計画書より)	成果	達成度
(4) 作業情報支援 システムの開発	機種切り替え対応、作業者の作業負担が小さくかつ作業効率を向上させるような作業者に分かりやすい情報支援を実現すること。	組立作業に必要な情報を的確に作業者に支援するソフトウェア・ハードウェアの開発を行い、実験的にその有効性を検証した。機種切り替え時の情報提示を即座に変更可能となる。また、これら作業モデル編集環境や情報提示ソフトウェアを開発し、作業手順変更を容易化した。開発したシステムはロボット動作と作業者手順指示との連動を管理し、作業者熟練度に応じた支援情報を提示する。	機種切り替えと作業者熟練度に対応のケーブルハーネスの組立作業に、本システムを適用した結果、作業初心者において生産立ち上げ時から作業中級者と同程度の作業効率での作業が実現した。

これにより、作業者の技能レベルに合わせた作業支援による高効率・高信頼性の組立作業を実現した。また、ロボットの協調作業時に作業者が被る精神的な影響の包括的な測定法、ならびに設計基準の構築は世界的にも新規性に富む研究成果と言える。

3.1.2 統合システムについて

開発した要素技術毎を組み込んだ統合システムについて、開発目標に対する達成度を表 17 に示す。いずれの項目も開発目標をほぼ達成した。

表 17 統合システムの開発目標に対する達成度

基本計画における 最終目標	達成度
<p>[1] 開発したシステムで作業者が組立を行い、 (a)作業手順の改善 (b)機種切り替え (c)生産量の変動 に対しての対応能力を示す。</p>	<p>部品キット化・配膳について (a) 作業手順の改善や(b) 機種切り替えでは立上げ時のロボット教示の時間ロスが、(c) 生産量の変動では増設ロボットのエネルギーロスが生じるものの、生産時の信頼性が向上することから、各指標に対して対応能力を有すと言える。</p> <p>組立作業について 上記と同様に、立上げ時のロボット教示・提示情報変更などの時間ロスや増設ロボットのエネルギーロスが生じるものの、生産時の信頼性が向上することから、各指標に対して対応能力を有すと言える。</p>
<p>[2] 組立作業者をロボット技術が安全を確保しつつ、物理的・情動的に支援する有効性を実証すること。</p>	<p>171 項目の危険事象のリスクアセスメントを実施し、リスク低減を図った。 特に、協調作業におけるロボットアームと腕・手の過度な接触、ロボットアームと周辺機器との間の挟み込みについて、位置監視、速度監視、力監視の組合せによる多重系の機能安全により、十分安全なレベルまでリスクが低減され、作業者の安全が確保された。</p>
<p>[3] 特に(A)生産性、(B)機種切り替え時間については、既存セル生産システムに比較して以下の性能を実現する。 (A)生産性：作業者とロボットを合わせた時間単価をベースとした労働生産性において既存セル（人間中心セル）から 2 割向上。 (B)機種切り替え時間：既存セル生産システムの 1/2。</p>	<p>(A)生産性 部品キット化で従来の 1.7 倍、組立作業で従来の最大 2 倍の生産性を実現し、共に目標の 2 割向上を超える生産性向上を達成した。</p> <p>(B)機種切り替え時間 部品キット化では、従来の人間のみの作業と同等で即時の機種切り替えが可能である。組立作業では目標の 1/2 を下回る機種切り替え時間の短縮を達成した。</p> <p>作業間違い率（追加評価） 組立作業にて、従来の 1/10 以下の低減を実現した。</p>

3.2 開発成果の意義

各要素技術の開発成果の意義を表 18 に示す。いずれも、従来よりも高効率、高信頼性の生産システムの構築に寄与する技術であり、市場への大きな波及効果が期待される。

表 18 各要素技術の開発成果の意義 (1/2)

要素技術	開発成果の意義
ロボット移動時安全対策	作業者とロボットの作業エリアを分離し、両者の衝突回避のための多重化安全対策を施したことで、高生産性・高信頼性・低コストの自走ロボットによる高速部品キット化・配膳を実現した。安全性の高いロボットを容易に生産現場へ導入可能な点で、組立・加工・物流など様々な市場での部品搬送・供給用途への広がりが期待でき、成果意義は大きい。
作業者協調時安全対策	人間が高出力ロボットに触りながら安全な協調作業を実施するための、位置監視、速度監視、力監視の組合せによる多重系機能安全は新規性の高い手法であり、様々な市場への広がりが期待できる。事業化に向け、人間ロボット協調型生産システムのモデルケースとして、第三者認証機関による安全認証の取得を推進することで、組立・加工・物流市場への広がりが期待でき、成果意義は大きい。
安全管理技術統合化	本プロジェクトで実施した合理的に予見可能な誤使用も含めたリスクアセスメントにより極めて信頼性・安全性の高い人間ロボット協調型生産システムの構築が可能となる。本リスクアセスメント手法をユーザに提供することで人間ロボット協調型生産システム導入への不安・懸念を払拭でき、市場拡大が期待できる点で成果意義は大きい。
移動配膳協調ロボット	自走機構に双腕ロボットアームを搭載したロボットにより、部品棚から必要部品をキット化し、作業者の組立作業台まで部品キットを配膳する自動化システムを世界で初めて実現した。以下の特徴により、各分野への導入、従来方式の置き換え需要が期待される。 <ul style="list-style-type: none"> ・人間による部品配膳よりも高い作業信頼性・生産コスト低減 ・従来のレール式走行軸ロボットよりもレイアウト自由度向上 ・無人搬送車には出来ない部品のロード・アンロードも兼務可能 また、ロボットによる物理的・情動的支援により、従来の人間のみでの生産作業よりも作業間違いを大幅に削減でき、作業品質が向上する。本ロボットは、組立・加工・物流・検査など様々な市場への導入が可能であり、市場への波及効果は極めて高く、成果意義は大きい。

表 18 各要素技術の開発成果の意義 (2/2)

要素技術	開発成果の意義
部品ピッキングハンドとビジョンシステム	<p>双腕ロボットアームとビジョンによるバラ積み取り出し機能により、高い動作自由度を実現し、部品棚などの周辺機器を極めて汎用的な設備とすることができる。人間によるデジタルピッキングで必要となる部品棚への点灯ランプ設置などが不要で、取扱部品品種の追加時の設備改修が不要である。これらの点で成果意義は大きい。</p>
知能化部品トレイ	<p>製品 RFID および作業管理 RFID の導入により、頻繁な機種切り替えの対応力に優れ、作業者の作業熟練度に応じた作業支援による高生産性、高信頼性の生産システムの構築が可能となった。作業初心者から熟練者まで幅広く活用可能な生産システムは、日本の製造業が抱える高賃金、熟練作業者の減少などの課題を解決する手法として期待され、成果意義は大きい。</p>
作業位置姿勢測定系	<p>汎用的な IP カメラによる作業者の作業間違い検出や居眠りなどの検出による安全管理が可能であり、高品質・高信頼性・低コストの生産システムの構築が可能となる。また、画像処理系をモジュール化した構成で再利用性に富む。これらの点で成果意義は大きい。</p>
心的負担測定系	<p>ロボットの協調作業時に作業者が被る精神的な影響の包括的な測定法、ならびに設計基準の構築は世界的にも新規性に富む研究成果と評価されている。</p> <p>今後、普及が見込まれるロボット・作業共存システムにおいて、ロボット利用の指針を示す研究成果であり、基準制定の基礎を作った。これは生産システムの妥当性を評価する上で有用な技術であり、成果意義は大きい。</p>
作業教示支援システム	<p>作業熟練者の十人十色の作業のやり方の中から、熟練者が重要視しかつ初心者が軽視する作業注目点のみを統計的な裏付けの下に抽出可能であり、かつ初心者への伝達に際し自然言語の形で作業工程毎に作業情報データベース上に表現できるため、人間の理解しやすい作業マニュアルの半自動生成を支援することが可能となった点で、その成果意義は大きい。</p>
作業情報支援システム	<p>水平作業台に組込んだ廉価な市販液晶パネルによりマルチモーダル（動画・静止画・音声・テキスト）データでの作業指示を行い、作業をしながら視線を大きく動かさずに理解可能とした作業情報提示手法は新規性が高い。</p> <p>作業者の技能レベルに合わせた情報提示により、作業間違いの発生率低下・製品の組立品質の改善が見込まれ、組立に限定することなくあらゆる用途への転用が可能である点で、成果意義は大きい。</p>

4 総括および結論

本プロジェクトでは、作業初心者でも高効率・高信頼性の生産が可能な新たな組立システムの確立を目標とし、人間と産業用知能ロボットが協調して組立作業を実施する「人間・ロボット協調型セル生産組立システム」を提案し、以下の要素技術の開発および統合システムでの性能評価を実施した。

- ① 作業者とロボットとが協働できるための安全管理技術
- ② 必要な時に必要な量の部品を整列して供給する作業支援技術
- ③ 作業者が習熟しやすい作業情報提示技術

①の安全管理技術では、ロボット走行時安全対策、作業者協調時安全対策を開発し、性能評価実験や171項目の危険源に対するリスクアセスメントによって、その有効性を検証した。作業者協調時安全対策では、位置監視、速度監視、力監視の組合せによる多重系の機能安全により、人間が本質的に高速・高出力なロボットに触りながら実施する協調作業を実現した。

②の作業支援技術では、移動配膳協調ロボット、部品ピッキングハンドとビジョンシステム、知能化部品トレイを開発した。移動配膳協調ロボットにより、部品棚から必要部品をキット化し、作業者の組立作業台まで部品キットを配膳するシステムは、世界初の部品キット配膳の完全自動化システムである。組立作業では、ロボットが作業者と協調しながら、作業者に対して物理的、情動的支援を行うことで、従来の人間のみのセル生産組立方式よりも高効率、高信頼性の組立作業が可能となった。これらの作業支援では、RFIDを組み込んだ知能化部品トレイの導入により、多品種混流生産での頻繁な機種切り替えにも即時対応が可能である。

③の作業情報提示技術では、作業者位置姿勢測定、心的負荷測定、作業教示支援、作業情報支援を開発した。組立作業において、作業工程に応じた適切な作業情報が作業者に提示され、作業初心者でも効率よく間違いのない組立作業が可能となった。また、作業者位置姿勢測定や心的負荷測定により、作業者の誤作業や作業進行に伴う疲労度や精神的負担など、組立作業における作業者状態を把握することができる。

上記要素技術を組み込んだ統合システムでの性能評価では、人間のみで実施する従来方式の生産システムと比較し、部品キット化・配膳にて1.7倍の生産性、組立作業にて最大2倍の生産性、1/3以下の機種切り替え時間、1/10以下の作業間違い率を実現し、開発目標を達成した。

以上の通り、本プロジェクトでは、作業初心者でも高効率・高信頼性の生産が可能な人間・ロボット協調型セル生産組立システムを実現した。

我が国の製造業では、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、今後より一層深刻な労働力不足が懸念される。製造業の十分な国際競争力の維持に貢献するため、今後は、本プロジェクトの開発成果を早期に市場へ浸透させるべく、開発成果の事業化を推進する。

おわりに

冒頭に記した通り、本プロジェクトは、平成 18 年度から平成 22 年度の 5 カ年に渡り、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より委託された「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)、(先進工業国対応型セル生産組立システムの開発)」として実施されたものである。

実施にあたり、厚く支援頂いた新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、ならびにプロジェクトリーダー 平井成興 千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター副所長、サブプロジェクトリーダー 水川真 芝浦工業大学教授をはじめとする推進委員に深く感謝する。

添付資料

研究発表・講演

プロジェクト開発成果について、表 19 に示す通り、学術誌、国内外の学会での論文発表など 58 件の外部発表を行い、積極的に開発成果の普及に努めている。

表 19 研究発表・講演状況(1/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007/9/13	第25回 日本ロボット学会 学術講演会	Analysis of Skills in Assembly using a Motion Simulator	東京大学 段峰
2	2007/12/15	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)	Analyze Assembly Skills using a Motion Simulator	東京大学 段峰
3	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Assembly Information System for Operational Support in Cell Production	東京大学 タジエフリートウチュアン
4	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Multimedia based Assembly Supporting System for Cell Production	東京大学 段峰
5	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	A Study of Design Factors for Information Supporting System in Cell Production	東京大学 張治
6	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Evaluating Assembly Instruction Methods in Cell Production System by Physiological Parameters and Subjective Indices	東京大学 N. Pongthanya
7	2008/7/17	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Multi-modal Assembly-Support System for Cell Production	東京大学 段峰
8	2008/8/1	The IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE 2008)	Analyzing Human Skill through Control Trajectories and Motion Capture Data	東京大学 段峰
9	2008/9/1	The IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics (ICAL 2008)	Task Decomposition of Cell Production Assembly Operation for Man-Machine Collaboration by HTA	東京大学 タジエフリートウチュアン
10	2008/9/1	The IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics (ICAL 2008)	Construct State-Action Map through Human Control Trajectories and Computation	東京大学 段峰
11	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Safety Strategy Design in Operation Control System for Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 タジエフリートウチュアン
12	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Image-based Operator Monitoring System	東京大学 段峰
13	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産における作業情報提示方法の検討	東京大学 張治
14	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける作業者の精神的負荷評価	東京大学 渡邊圭
15	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産システムにおける作業情報提示による精神的負荷の評価	東京大学 藤田真理奈
16	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Application of Task Analysis Strategy for Man-Machine Collaboration Modeling in Cell Production	東京大学 タジエフリートウチュアン
17	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Predict Worker's Intention through Template-based Gesture Recognition Method	東京大学 段峰
18	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける精神的負荷の生理的指標による評価	東京大学 渡邊圭

表 19 研究発表・講演状況(2/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
19	2009/2/21	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)	Extending Task Analysis in HTA to Model Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 タジエリートリチュアン
20	2009/2/21	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)	Using Motion Capture Data to Regenerate Operator's Motions in a Simulator at Real Time	東京大学 段峰
21	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Assembly information development in task modeling to support man-machine collaboration in cellproduction	東京大学 タジエリートリチュアン
22	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムの開発	東京大学 加藤龍
23	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Analisis of operator's skill level based on assembly task in cell production	東京大学 高洋
24	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおけるマルチメディア情報を用いた作業情報支援	東京大学 張冶
25	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける協調作業を行うロボットによる精神的負荷の評価	東京大学 渡邊圭
26	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおける作業情報の提示量が精神的負荷に及ぼす影響	東京大学 藤田真理奈
27	2009/4/7	東京大学 工学部 精密工学科 「精密の日」 学科紹介 講演会	協調ロボットと情報支援を用いた高効率セル生産組立システム	東京大学 新井民夫
28	2009/5/14	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2009)	Task Modeling Approach to Enhance Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 タジエリートリチュアン
29	2009/8/25	The IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2009)	Safety Design and Development of Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing	東京大学 タジエリートリチュアン
30	2009/8/27	STC-Assembly, Life-cycle (59th CIRP General Assembly)	A cell assembly system using a two-arm mobile robot - introduction of robot projects in Japan	東京大学 新井民夫
31	2009/8/28	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Man-Machine Interface for Human-Robot Collaborative Cellular Manufacturing System	東京大学 タジエリートリチュアン
32	2009/9/1	Advanced Robotics	Operator Monitoring System for Cell Production	東京大学 段峰
33	2009/9/5	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Assessment of Mental Stress on Human Operators Induced by the Assembly Support in a Robot-Assisted "Cellular Manufacturing" Assembly System	東京大学 加藤龍
34	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	ロボット支援型セル生産組立システムでの作業支援から被る作業者の精神的負荷の評価	東京大学 加藤龍
35	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	組立作業者の認知戦略が情報支援の効果に与える影響	東京大学 藤田真理奈
36	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	セル生産システムにおける熟練技能の抽出方法の検討	東京大学 森亮介
37	2009/9/15	日本ロボット学会学術講演会	ロボット支援を伴うセル生産組立での作業支援が作業者に与える精神的負荷の生理評価	東京大学 加藤龍
38	2009/9/25	福祉工学シンポジウム	組立作業の情報支援が作業者の精神的負担に与える影響	東京大学 藤田真理奈
39	2009/9/29	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)	Human Factors Studies in Information Support Development for Human-Robot Collaborative Cellular Manufacturing System	東京大学 タジエリートリチュアン
40	2009/10/12	The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)	Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing: Design and Development	東京大学 タジエリートリチュアン

表 19 研究発表・講演状況(3/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
41	2009/11/11	The Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2009)	Evaluation of Mental Stress Induced by Human-Robot Collaboration in a Cell Production System	電気通信大学 加藤龍
42	2009/11/12	The Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2009)	The effective information density of information support in cell production	東京大学 藤田真理奈
43	2009/11/17	The IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2009)	A New Cell Production Assembly System with Twin Manipulators on Mobile Base	東京大学 新井民夫
44	2009/11/17	The IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2009)	Operators' mental strain induced by information support for cell production	東京大学 藤田真理奈
45	2009/12/15	日本ロボット学会誌解説記事	A new cell production assembly system with human-robot cooperation	ファナック(株) 森岡昌宏
46	2010/3/16	精密工学会第17回 学生会員卒業研究発表講演会	セル生産における熟練者の作業注目点を考慮した技能抽出手法の検討	東京大学 森亮介
47	2010/4/1	Advanced Robotics	Safety Strategy for Human-Robot Collaboration: Design and Development in Cellular Manufacturing	東京大学 タンジェフリートウチュアン
48	2010/4	Advances in Robot Manipulators, InTech	Collaboration Planning by Task Analysis in Human-Robot Collaborative Manufacturing System	東京大学 タンジェフリートウチュアン
49	2010/6/13	ロボメック 2010	NEDOプロジェクト ポスター展示	ファナック(株)
50	2010/7/7	The IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2010)	Analytic Evaluation of Human-Robot System for Collaboration in Cellular Manufacturing System	東京大学 タンジェフリートウチュアン
51	2010/8/23	CIRP Annals - Manufacturing Technology	Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly	東京大学 新井民夫
52	2010/8/23	CIRP Annals - Manufacturing Technology	A new cell production assembly system with human-robot cooperation	ファナック(株) 榎原伸介
53	2010/9/14	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Development of Advanced Cellular Manufacturing System with Human-Robot Collaboration - Assessment of Mental Strain on Human Operators Induced by the Assembly Support	電気通信大学 加藤龍
54	2010/9/14	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Assessment of Operators' Mental Strain Induced by Hand-Over Motion of Industrial Robot Manipulator	東京大学 藤田真理奈
55	2010/9/15	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Information Support Development with Human-Centered Approach for Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing	東京大学 タンジェフリートウチュアン
56	2010/9/27	精密工学会秋季学術講演会	Triple Stereo Vision System for Safety Monitoring in Human-Robot Collaboration	東京大学 タンジェフリートウチュアン
57	2010/9/28	精密工学会秋季学術講演会	人間・ロボット協調作業時に被るストレス計測—ロボット動作が作業者に与える精神的影響—	東京大学 藤田真理奈
58	2011	Operations Management Research and Cellular Manufacturing: Innovative Methods and Approaches	Multi-Modal Assembly-Support System for Cellular Manufacturing	東京大学 段峰

特許

本プロジェクトにおいて新たに発生した発明について、表 20 の特許出願状況に示すように、10 件(国内 8 件、外国 2 件)の特許出願を行い、権利化を推進している。

表 20 特許出願状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
作業分担機能を備えた生産システム (特願 2008-020425)	実作業を行う作業者と作業者の実作業の準備又は段取りを行うロボットが混在して配置された生産システム。
自走ロボット制御システム (特願 2008-187627)	自走ロボットと人間の位置関係によりロボット停止命令のための有線接続の切り替えを行うシステム。
自走式ロボットの位置および姿勢の補正方法(特願2009-005893)	自走ロボットの走行部とロボットアーム部の動作誤差を所定場所で補正する方法。
給電調整装置を備えたロボットシステム (特願 2009-011293)	自走ロボットと人間の位置関係により、ロボット制御装置の動作モードの切り替えを行うロボットシステム。
人間とロボットとの協調動作領域を有する生産システム(特願 2010-012494) (優先権：特願 2009-014672) (米国出願)12/694201 (ドイツ出願) 10 2010 005 708.8	人間とロボットが協調動作領域を有する際、ロボットに動作制限を設けることで安全を確保する生産システム。
部品キットを用いた生産システム (特願 2009-034142)	ロボット搭載の撮像手段を用いて部品キットの内容物を検査する生産システム。
シミュレーション方法 (特願 2009-059678)	人間とロボットの協調作業を最適化するシミュレーション方法。
人間協調ロボットシステム (特願 2010-182314)	部分的領域分割と力センサでの発生力制限により安全を確保する人間協調ロボット。

参考文献リスト

- [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, vol.106, no.1013, pp. 32-36, 2003.
- [2] ISO10218-1: 2006, “Robots for industrial environments –Safety requirements- Part 1:Robot”
- [3] BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive - Design of workplaces with collaborative robots. U 001/2009e October 2009 edition
- [4] ISO/TR14121-2: 2007, “Safety of machinery –Risk assessment- Part 2: Practical guidance and examples of methods”
- [5] ISO13849-1: 2006, “Safety of machinery –Safety-related parts of control systems- Part 1: General principles for design”
- [6] ISO13854: 1996, “Safety of machinery –Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body”

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）
 （先進工業国対応型セル生産組立システムの開発） 【ファナック株式会社】

添付資料 1 (出願特許)

表 1 特許出願状況

項目	出願日	出願番号	出願に係る特許等の表題	出願人
1	2008/1/31	特願2008-20425	作業分担機能を備えた生産システム	ファナック(株)
2	2008/7/18	特願2008-187627	自走ロボット制御システム	ファナック(株)
3	2009/1/14	特願2009-005893	自走式ロボットの位置および姿勢の補正方法	ファナック(株)
4	2009/1/21	特願2009-011293	給電調整装置を備えたロボットシステム	ファナック(株)
5	2010/1/22	特願2010-012494 (優先権:特願2009-014672)	人間とロボットとの協調動作領域を有する 生産システム	ファナック(株)
6	2010/1/26	12/694201 (米)	Production system having cooperating process area between human and robot	ファナック(株)
7	2010/1/26	10 2010 005 708.8 (独)		
8	2009/2/7	特願2009-034142	部品キットを用いた生産システム	ファナック(株)
9	2009/3/12	特願2009-059678	シミュレーション方法	ファナック(株)
10	2010/8/17	特願2010-0182314	人間協調ロボットシステム	ファナック(株)

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）
 （先進工業国対応型セル生産組立システムの開発） 【ファナック株式会社】

添付資料 2 (学会発表、論文、展示会、プレス発表等)

表 2 研究発表・講演状況(1/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007/9/13	第25回 日本ロボット学会 学術講演会	Analysis of Skills in Assembly using a Motion Simulator	東京大学 段峰
2	2007/12/15	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)	Analyze Assembly Skills using a Motion Simulator	東京大学 段峰
3	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Assembly Information System for Operational Support in Cell Production	東京大学 タンジェフリートウチュアン
4	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Multimedia based Assembly Supporting System for Cell Production	東京大学 段峰
5	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	A Study of Design Factors for Information Supporting System in Cell Production	東京大学 張治
6	2008/5/26	The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP MS)	Evaluating Assembly Instruction Methods in Cell Production System by Physiological Parameters and Subjective Indices	東京大学 N. Pongthanya
7	2008/7/17	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Multi-modal Assembly-Support System for Cell Production	東京大学 段峰
8	2008/8/1	The IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE 2008)	Analyzing Human Skill through Control Trajectories and Motion Capture Data	東京大学 段峰
9	2008/9/1	The IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics (ICAL 2008)	Task Decomposition of Cell Production Assembly Operation for Man-Machine Collaboration by HTA	東京大学 タンジェフリートウチュアン
10	2008/9/1	The IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics (ICAL 2008)	Construct State-Action Map through Human Control Trajectories and Computation	東京大学 段峰
11	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Safety Strategy Design in Operation Control System for Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 タンジェフリートウチュアン
12	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	Image-based Operator Monitoring System	東京大学 段峰
13	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産における作業情報提示方法の検討	東京大学 張治
14	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける作業者の精神的負荷評価	東京大学 渡邊圭
15	2008/9/9	2008年日本ロボット学会学術講演会	セル生産システムにおける作業情報提示による精神的負荷の評価	東京大学 藤田真理奈
16	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Application of Task Analysis Strategy for Man-Machine Collaboration Modeling in Cell Production	東京大学 タンジェフリートウチュアン
17	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	Predict Worker's Intention through Template-based Gesture Recognition Method	東京大学 段峰
18	2008/9/17	2008年度精密工学会秋季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける精神的負荷の生理的指標による評価	東京大学 渡邊圭

表 2 研究発表・講演状況(2/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
19	2009/2/21	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)	Extending Task Analysis in HTA to Model Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 カンジェリートリチュアン
20	2009/2/21	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)	Using Motion Capture Data to Regenerate Operator's Motions in a Simulator at Real Time	東京大学 段峰
21	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Assembly information development in task modeling to support man-machine collaboration in cellproduction	東京大学 カンジェリートリチュアン
22	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムの開発	東京大学 加藤龍
23	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	Analisis of operator's skill level based on assembly task in cell production	東京大学 高洋
24	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおけるマルチメディア情報を用いた作業情報支援	東京大学 張治
25	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	人間・ロボット協調型セル生産組立システムにおける協調作業を行うロボットによる精神的負荷の評価	東京大学 渡邊圭
26	2009/3/13	2009年度精密工学会春季大会	セル生産システムにおける作業情報の提示量が精神的負荷に及ぼす影響	東京大学 藤田真理奈
27	2009/4/7	東京大学 工学部 精密工学科 「精密の日」学科紹介 講演会	協調ロボットと情報支援を用いた高効率セル生産組立システム	東京大学 新井民夫
28	2009/5/14	The IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2009)	Task Modeling Approach to Enhance Man-Machine Collaboration in Cell Production	東京大学 カンジェリートリチュアン
29	2009/8/25	The IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2009)	Safety Design and Development of Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing	東京大学 カンジェリートリチュアン
30	2009/8/27	STC-Assembly, Life-cycle (59th CIRP General Assembly)	A cell assembly system using a two-arm mobile robot - introduction of robot projects in Japan	東京大学 新井民夫
31	2009/8/28	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Man-Machine Interface for Human-Robot Collaborative Cellular Manufacturing System	東京大学 カンジェリートリチュアン
32	2009/9/1	Advanced Robotics	Operator Monitoring System for Cell Production	東京大学 段峰
33	2009/9/5	International Journal of Automation Technology (IJAT)	Assessment of Mental Stress on Human Operators Induced by the Assembly Support in a Robot-Assisted "Cellular Manufacturing" Assembly System	東京大学 加藤龍
34	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	ロボット支援型セル生産組立システムでの作業支援から被る作業者の精神的負荷の評価	東京大学 加藤龍
35	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	組立作業者の認知戦略が情報支援の効果に与える影響	東京大学 藤田真理奈
36	2009/9/10	精密工学会秋季学術講演会	セル生産システムにおける熟練技能の抽出方法の検討	東京大学 森亮介
37	2009/9/15	日本ロボット学会学術講演会	ロボット支援を伴うセル生産組立での作業支援が作業者に与える精神的負荷の生理評価	東京大学 加藤龍
38	2009/9/25	福祉工学シンポジウム	組立作業の情報支援が作業者の精神的負担に与える影響	東京大学 藤田真理奈
39	2009/9/29	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)	Human Factors Studies in Information Support Development for Human-Robot Collaborative Cellular Manufacturing System	東京大学 カンジェリートリチュアン
40	2009/10/12	The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)	Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing: Design and Development	東京大学 カンジェリートリチュアン

表 2 研究発表・講演状況(3/3)

項目	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
41	2009/11/11	The Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2009)	Evaluation of Mental Stress Induced by Human-Robot Collaboration in a Cell Production System	電気通信大学 加藤龍
42	2009/11/12	The Int. Conf. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2009)	The effective information density of information support in cell production	東京大学 藤田真理奈
43	2009/11/17	The IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2009)	A New Cell Production Assembly System with Twin Manipulators on Mobile Base	東京大学 新井氏夫
44	2009/11/17	The IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2009)	Operators' mental strain induced by information support for cell production	東京大学 藤田真理奈
45	2009/12/15	日本ロボット学会誌解説記事	A new cell production assembly system with human-robot cooperation	ファナック(株) 森岡昌宏
46	2010/3/16	精密工学会第17回 学生会員卒業研究発表講演会	セル生産における熟練者の作業注目点を考慮した技能抽出手法の検討	東京大学 森亮介
47	2010/4/1	Advanced Robotics	Safety Strategy for Human-Robot Collaboration: Design and Development in Cellular Manufacturing	東京大学 タンジェフリートウチュアン
48	2010/4	Advances in Robot Manipulators, InTech	Collaboration Planning by Task Analysis in Human-Robot Collaborative Manufacturing System	東京大学 タンジェフリートウチュアン
49	2010/6/13	ロボメック 2010	NEDOプロジェクト ポスター展示	ファナック(株)
50	2010/7/7	The IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2010)	Analytic Evaluation of Human-Robot System for Collaboration in Cellular Manufacturing System	東京大学 タンジェフリートウチュアン
51	2010/8/23	CIRP Annals - Manufacturing Technology	Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly	東京大学 新井氏夫
52	2010/8/23	CIRP Annals - Manufacturing Technology	A new cell production assembly system with human-robot cooperation	ファナック(株) 榎原伸介
53	2010/9/14	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Development of Advanced Cellular Manufacturing System with Human-Robot Collaboration - Assessment of Mental Strain on Human Operators Induced by the Assembly Support	電気通信大学 加藤龍
54	2010/9/14	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Assessment of Operators' Mental Strain Induced by Hand-Over Motion of Industrial Robot Manipulator	東京大学 藤田真理奈
55	2010/9/15	The IEEE Int. Symposium in Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2010)	Information Support Development with Human-Centered Approach for Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing	東京大学 タンジェフリートウチュアン
56	2010/9/27	精密工学会秋季学術講演会	Triple Stereo Vision System for Safety Monitoring in Human-Robot Collaboration	東京大学 タンジェフリートウチュアン
57	2010/9/28	精密工学会秋季学術講演会	人間・ロボット協調作業時に被るストレス計測—ロボット動作が作業者に与える精神的影響—	東京大学 藤田真理奈
58	2011	Operations Management Research and Cellular Manufacturing: Innovative Methods and Approaches	Multi-Modal Assembly-Support System for Cellular Manufacturing	東京大学 段峰