大型民間機胴体の内部構造部品組立における メカトロ・レーザー計測による治工具レス化

Development of Mechatronic Assembling Equipment
for Assembling Internal Structural Components of Large Commercial Airplane,
Using Laser Positioning System Instead of Jigs & Tools

三菱重工業株式会社
エアロストラクチャー事業部生産技術部

当社航空機事業の主力製品である大型民間機胴体パネルは，顧客 OEM のボーイング社とエアバス社との価格競争状態にあり，加えて当社の競合他社の Tire1 メーカーとの価格競争による厳しい事業環境にあるため，生産変動やコストダウンに迅速に追従できる製造・生産体制を構築する必要がある。その解決手段として，熟練作業者を中心とした多くの大型定置式治工具に依存した生産手法を見直し，生産の柔軟性を持ち省人化可能な産業用ロボットを使用した自動組立装置の開発に取り組んだ。本報では，新開発した胴体パネル内部骨格サブ組立品のロボット組立装置を紹介する。

1. ロボット組立装置の開発背景と特徴

1.1 製品の特長

当社では図1に示す民間機の後部胴体を，機体前後方向と円周方向に分割した胴体パネル形状部品として生産している。胴体パネルは，板厚が薄く剛性が低い外板に内部骨格部品を組み付け補強することで形状・強度を維持する構造となっている。図2に胴体パネル構造のモデルを示す。内部骨格部品は，形状や大きさの異なる多数，多種の部品で構成され，特に機体前後方向の強度部材は長さ 8m にもなる。この前後方向の強度部材はストリンガと呼ばれ，円周方向の強度部材であるフレームとクリップを介して組み付けられ，その組立て精度が±0.8mm 以下という厳しい要求となっている。また，ストリンガは 260 種類，クリップは 950 種類と多種な部品形状となっている。

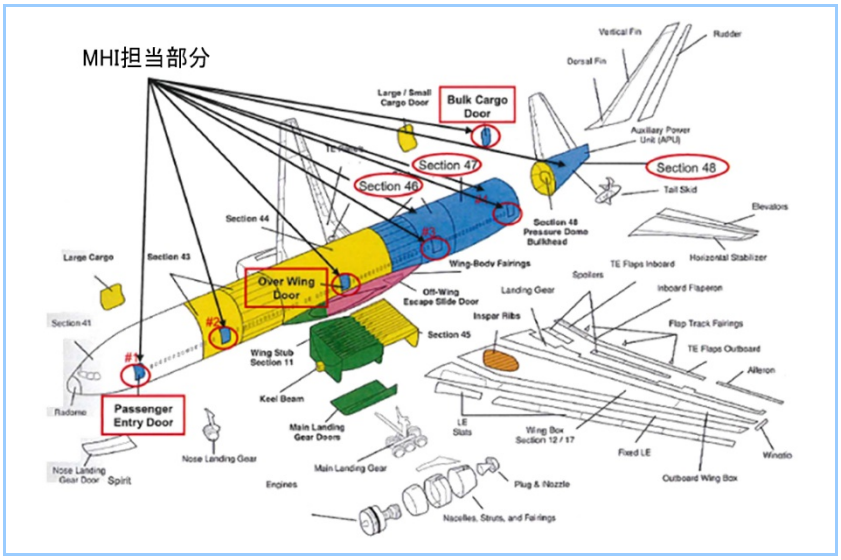

図1 MHI 担当部位

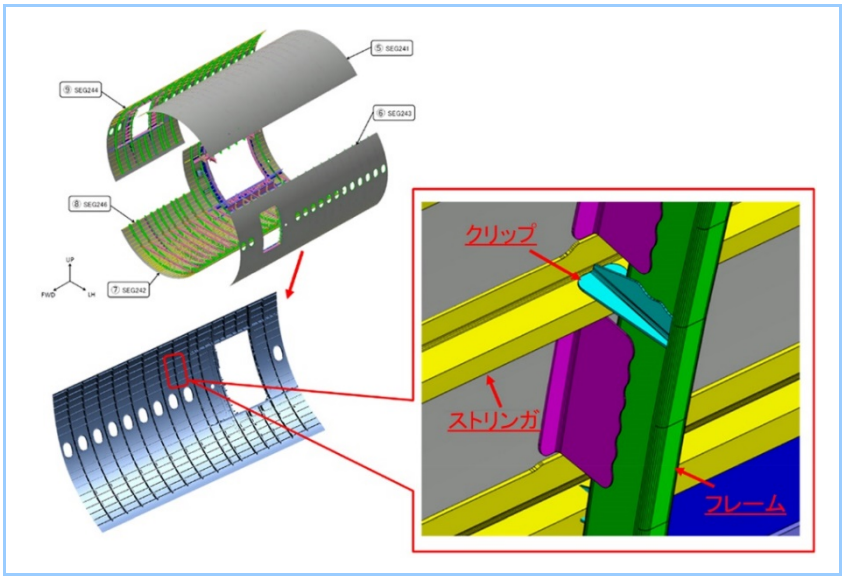

図2 胴体パネル構造

現在の生産工程では，図3に示すような大型定置式治工具に複数の小型位置決め治工具を組み合わせて，機体形状に沿った治工具を準備して組立を行っている。しかし，大型定置式治工具は汎用性が低く，設計変更の都度，治工具の改造又は，新作する必要がありコストがかかる。また，作業者の習熟度により位置決め・穴明け・打鋲による組立精度に差が生じて品質が安定しないといった問題を抱えていた。作業者による品質のバラつきを抑制する手段としてオートマチックリベッターによる穴明け，打鋲の自動化が考えられるが，これは障害物の無い外板部の穴明け・打鋲には適しているものの，内部骨格部品では部品との干渉が発生して適用することができなかった。そのため装置の小型化と多様な形状を持つ部品への対応，高精度な組付けを狙う自動機の開発に着手した。

図3 大型定置式治具による組立て

1.2 組立装置に求められる課題と対策するコンセプト

新たな組立装置の開発に当たり，熟練作業者依存からの脱却と省人化，大型定置式治工具の排除によるフレキシビリティ向上を基本方針に定めた。その結果，下記のコンセプトのロボット組立装置の開発を行った。

1) 民間機構造組立特有の長尺・低剛性部品の形状保持とハンドリング
2) クリップをストリンガへ高精度に位置決め
3) 狭隘加工部へのアプローチを可能とする小型エンドエフェクタ
4) 少量多種にわたる小型締結部品の識別システム

2. ロボット組立装置の仕様

ロボット組立装置の構成を図4に示す。また本装置のシーケンスを図5に簡単に示す。

本装置は，大きく4つの特徴がある。各特徴について以下に説明する。

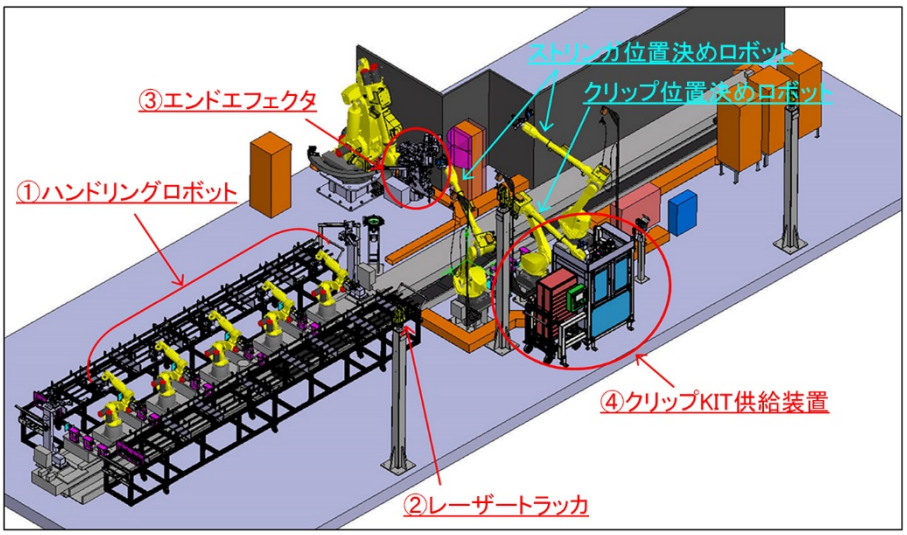

図4　ロボット組立装置概略図

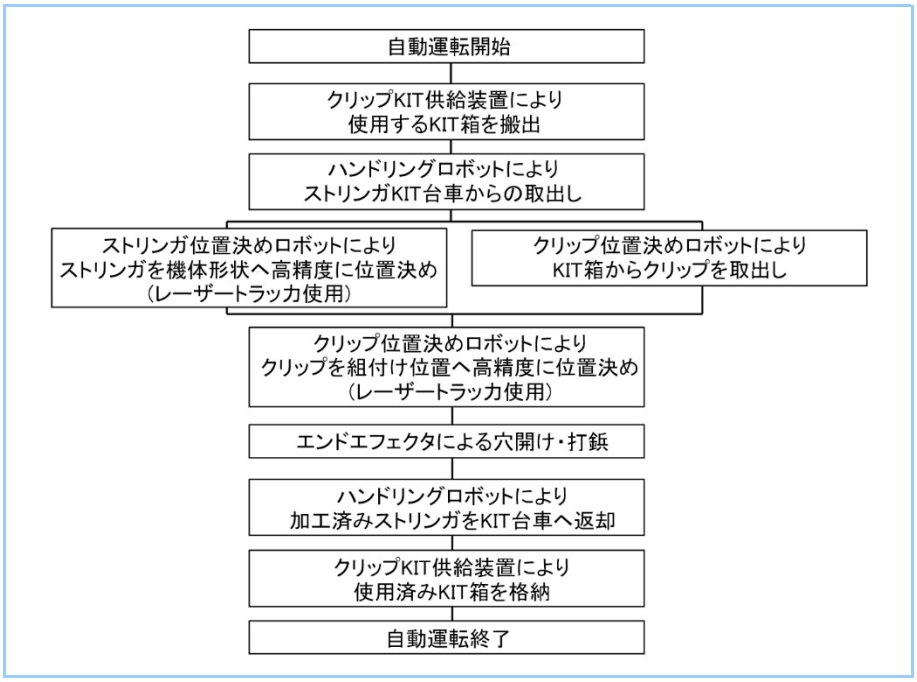

図5　ロボット組立装置の動作シーケンス

2.1　ロボットハンドリング

単曲面や複曲面を有する長尺・低剛性であるストリンガを最大5台のロボットを使用してハンドリングする。ロボットは，マスターロボット1台の動作をスレーブロボット4台がトレースするリンク動作を適用している。これにより複数のロボットを使用して長尺のストリンガをハンドリングすることが可能となる。また，マスターロボットのプログラム作成・教示作業を行うだけで良いため，プログラム作成が簡易化される。

ハンドリングするロボットは，ロボットの繰り返し位置決め精度内で動作を行う。ただし，ロボット繰り返し位置決め精度では，航空機構造の組立要求精度を満足することができない。また，ロボットが把持している近傍以外の部分では部品ごとに自重でたわみ，3D モデル上の形状とアンマッチが起きる。そこで，ストリンガのたわみを補正するためのストリンガ位置決めロボットが2台存在する。このストリンガ位置決めロボットの把持位置及びクリップ位置決めロボットの把持位置は，レー

ザートラッカ計測により監視され 3D モデルから定義された空間位置へ補正される。これによりクリップを組み付ける位置でのクリップとストリンガの相対的な位置を高精度に組み立てることを可能とした。

2.2 レーザートラッカによる補正

従来の6軸ロボットは，1度教示した位置へ動作する“繰り返し位置精度”は，高精度で行うことができる。一方で，座標指定した位置へ位置決めする“絶対位置精度”は，各軸のギアのバックラッシュやギアの摩耗による経年変化，末端負荷の変化等を受けることから精度は低い。この課題に対して本装置では，レーザートラッカを使用してロボットのエンドエフェクタ末端位置を計測し，その計測値をフィードバック制御する仕組みを開発・適用した。これにより組立精度±0.8mm 以下という厳しい要求を達成することができる装置となっている。本装置では，2.1 項で記載したストリンガ位置決めロボット2台とクリップ位置決めロボット1台の計3台を高精度に位置決めしており，装置は3台のレーザートラッカを使用している。3台のレーザートラッカは装置内で座標を共有する必要があり3台の計測結果を共有する仕組みも開発した。これによりレーザートラッカを並列して計測させることが可能となりサイクルタイム短縮に繋がっている。これらの仕組みによって，ロボット組立てでは従来の大型定置式治工具を用いた現行工法より3倍の高精度化を達成することができた。

2.3 エンドエフェクタの開発

図6に加工対象となるストリンガとクリップを示す。両部品ともに強度を保つかつ軽量化のため特殊な形状となっており，単純平面はほとんど無い。更に加工点近傍は，ハンドリングロボットや位置決めロボットが密集しているため，エンドエフェクタは狭隘加工部へアプローチが可能な形状とサイズにする必要があった。

そこで，図7に示すように狭隘加工部へアプローチすることが可能なエンドエフェクタを開発した。エンドエフェクタは機能上，必然的に重量の大きなものとなってしまうが，大型ロボットの可搬重量範囲に重量を抑え自由度を活かした移動や姿勢を可能とした。また，加工中のストリンガとクリップをクランプするプレッシャーフットの小型化や穴明けスピンドル，打鋲用アンビルも加工点までのアプローチの際には収納される機構とし，加工点に接近する部分を最小限にすることで狭隘部へのアプローチが可能となっている。また，手作業では必ず発生するバリ取りなどの航空機に求められる厳しい加工要求にも耐えられるように，バリ発生を抑制するドリル開発と加工条件の条件出しも同時に行い高品質な穴明けとともにサイクルタイム短縮も達成できた。

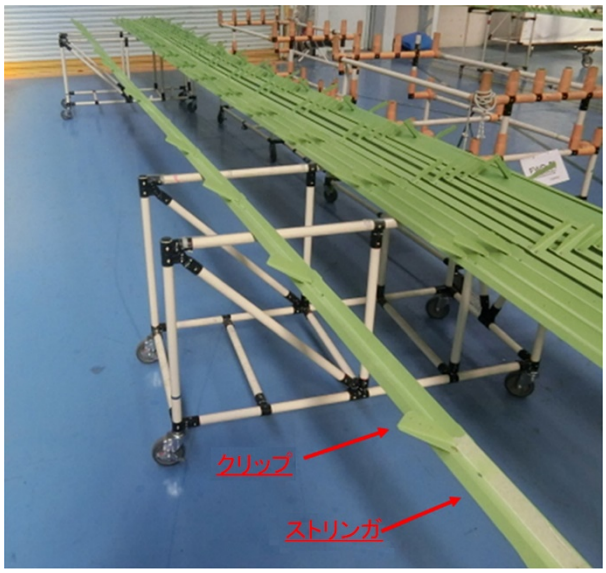

図6 加工対象部品

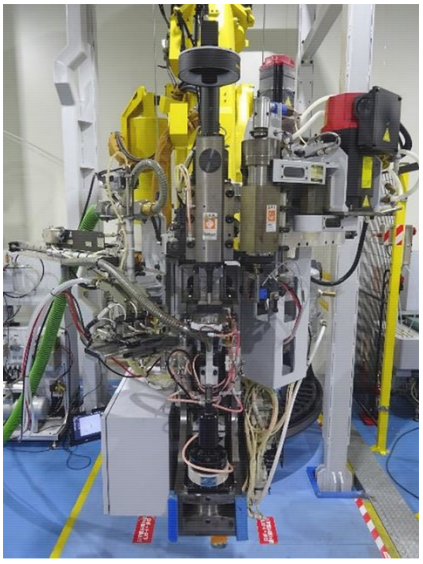

図7 新規開発したエンドエフェクタ

2.4 クリップ KIT 供給装置

本装置では，クリップを取り出す際に 950 種 3000 個にも及ぶクリップを識別し取り出す必要があるため，クリップを自動で識別・供給する装置も必要だった。

そのため，図8に示す KIT 供給装置を開発した。供給装置は，自動倉庫のように 11 段ストッカがクリップをロボット把持位置まで自動で供給する。KIT 箱は，図9のようにストリンガごとに専用の KIT プレートに入れて使用する。KIT プレートは，交換式にすることで最小限の物量管理となり占有面積を小さくした。また，作業者は KIT プレートに記載がある部品番号の箇所に部品を配置していくが，KIT プレートには運搬中の位置ズレ防止溝が施されている。さらに，供給装置はクリップ識別機能を有する。KIT されたクリップを画像処理により部品番号を読み取り照合する。照合結果の合否は，オペレータ手元の PC へ表示され間違っているクリップは自動で加工をスキップする仕様となっており，組み付け間違いの排除を可能とした。

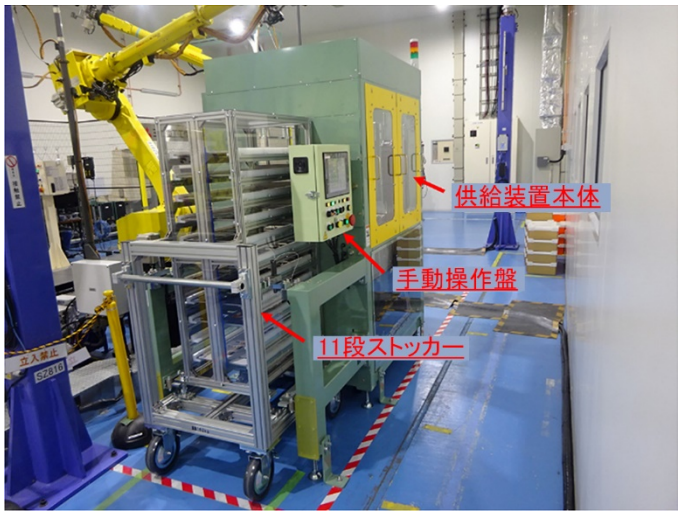

図8 クリップ KIT 供給装置

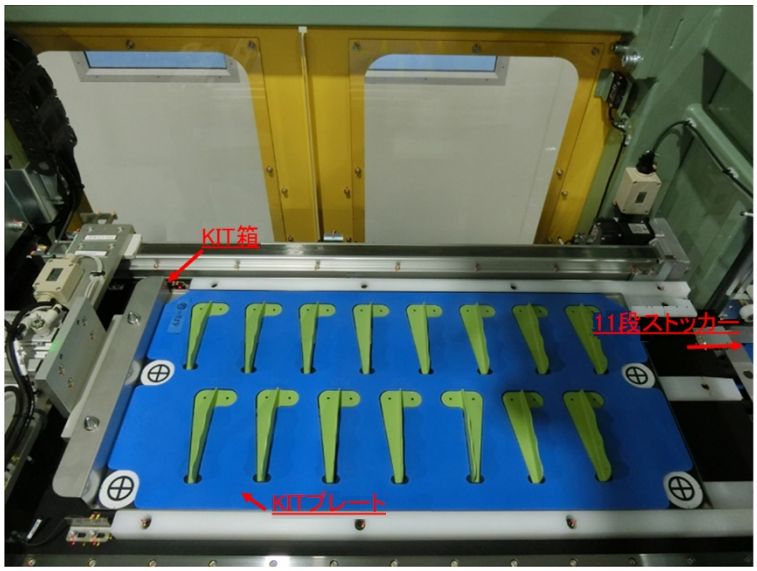

図9 クリップ KIT 箱

3. ロボット組立装置に適用した新技術

3.1 ロボットの自由度を活用した治具の排除

従来の組立工法では，基準となる大型定置式治工具に位置決め用のロケータ治工具を何度も組替えストリンガとクリップの位置決めと加工を行っていたため，加工時間以上に治工具の組み換え時間を要していた。本装置では構成するロボット全てを共通の空間座標に設定し，ロボットの持つ6軸の自由度であらゆる形状のストリンガを把持し加工する事が可能となったため，完全に治工

具を排除することができた。

また，ストリンガを把持するロボットはオフラインで作成したプログラムをレーザートラッカで自動補正しながら教示するシステムを有しており，ロボット設備導入時に発生する膨大な教示時間の短縮が可能となった。

3.2 高精度位置決めの確立とサイクルタイム削減

ストリンガ位置決めロボット2台とクリップ位置決めロボット1台の計3台を3台のレーザートラッカ補正により，厳しい組立精度要求達成を実現させている。これらのロボットは，位置補正をする際に空間上の1点の計測だけでは不充分で部品同士の結合面の傾きも補正する必要がある。そのためにはレーザートラッカでクリップ把持部の任意の3点を計測し部品の傾きも把握する必要があるが，トラッカによる3点の計測はサイクルタイム短縮の阻害要因となる。そこで本装置では，Leica製 T-MAC を使用することにより座標X，Y，Zに加えてロール，ピッチ，ヨウの6自由度を1回の計測で取得する事で高精度位置決めとサイクルタイム短縮の両立を実現した。

3.3 オフラインプログラムシステムの開発

ロボット設備で使用するプログラムは，実機を使用して動作経路を教示する必要があり，膨大な時間がかかる。そこで事前にプログラムの作成・動作シミュレーションが可能となるオフラインプログラムシステムを新たに開発した。本システムは，ダッソー・システムズの DELMIA ROBOTICS を使用してロボット動作を作成している。通常ロボットプログラムを作成する場合，ロボットの把持位置や動作順番等の大量のデータを手作業で入出力する必要があり時間がかかる。しかし，本システムでは，ロボット把持位置の座標データを自動で取得し，Excel ファイルへ出力する機能等を有するプログラム作成支援ツールを合わせて開発することで，プログラム作成時間の短縮を行った。

4. 今後の展開

2019年6月から単曲面のストリンガとクリップの組立にロボット組立装置を適用し，2021年8月時点で 90%のストリンガの加工を本装置に取り込むことができた。レーザートラッカ計測の活用により組立精度が従来工法の3倍に高精度化を達成。また，無人運転も可能となったため，50%の省人化も達成した。今後は，ストリンガの捻じれやたわみによる影響がより顕著となる複曲面のストリンガ(図 10)を対象にロボット組立装置への適用を進める。

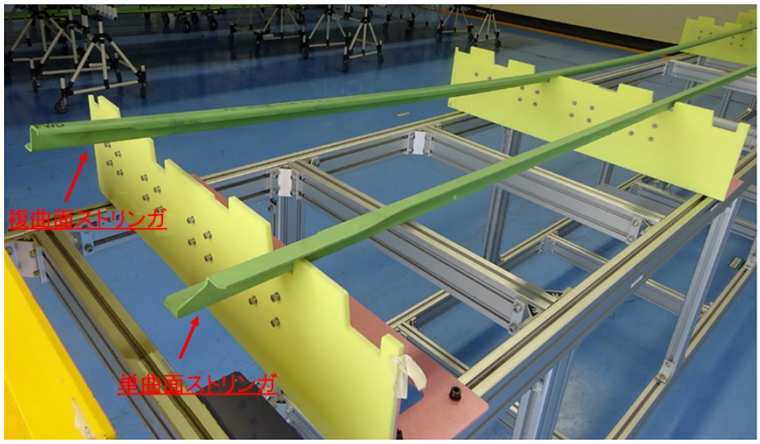

図 10 単曲面ストリンガと複曲面ストリンガ