

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機主翼組立における
ファスナ装着状態の革新的な検査技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成26年3月

委託者 中部経済産業局

委託先 公益財団法人科学技術交流財団

目 次

第1章 研究開発の概要	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-1-1 研究開発の背景	4
1-1-2 研究目的及び目標	4
1-1-3 実施内容	5
1-2 研究体制	6
1-2-1 研究組織及び管理体制	6
1-2-2 研究者氏名	9
1-2-3 協力者	10
1-3 成果概要	10
1-4 当該研究開発の連絡窓口	13
1-4-1 事業管理機関	13
1-4-2 研究実施機関	13
第2章 本論	14
2-1 3次曲面パネルに対する高精度な位置決め課題への対応	14
2-1-1 検査工数の低減	14
2-1-2 位置決め安定	17
2-2 正確なファスナ装着状態の計測技術課題への対応	19
2-2-1 ① 3次元計測による計測精度の向上	19
2-2-1 ② 多点計測による計測精度の向上	25
2-3 信頼性の高い検査システムの確立課題への対応	27
2-3-1 検査情報の自動収集及びデータのバックアップ	27
2-4 データの評価と検証課題への対応	29
2-4-1 故障解析プロセスの確立	29
2-5 総合的なシステム化設計課題への対応	32
2-5-1 システム化設計	32
2-6 プロジェクトの管理・運営	33

第3章 全体総括 34

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

現在生産が進められているボーイング787型機は1030機以上の受注があり、今年中にも10機/月以上の生産レートが想定されている。同機の主翼には約8万本/機のアスナが装着されており、現状では、その装着状態の確認をデプスゲージによる目視検査で行っているが、以下の課題が存在する。

- ・工数の増大【1機当たり4000時間（10人×100h×4面）】
- ・人によるバラツキ【検査位置、精度、工数等】
- ・ヒューマンエラー【計測間違い、判定ミス、転記間違い等】
- ・アスナ装着状態の計測精度が低い

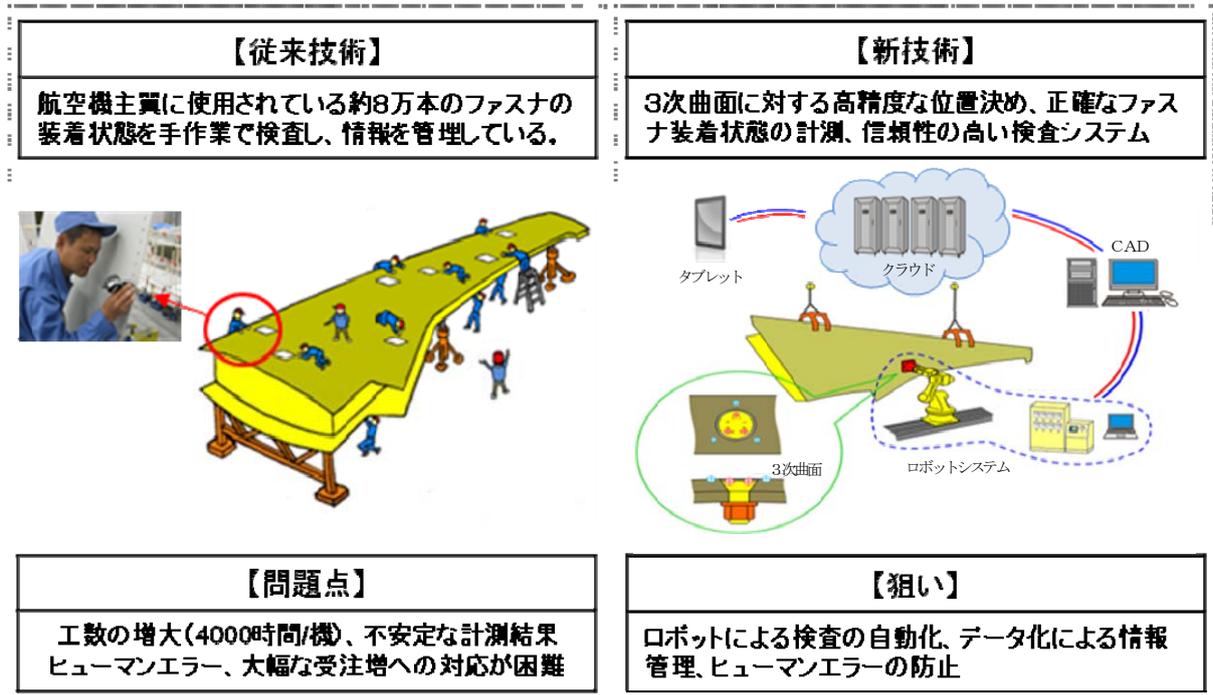
これらの課題を解決できる検査システムの開発が喫緊の課題となっており、航空機機体メーカーはCADデータを主体とした生産システムを構築し始めたが、大型成形品におけるデータと現物の整合性に問題があり、CADデータ利用のための複雑な補正プログラムの開発が必要になるなど、効率的なシステムの構築には至っていない。

他方、画像処理やレーザー等のセンサー技術は近年飛躍的な進歩を遂げ、3次元処理も可能になってきているが、この技術を活用するためには、複雑なプログラミングやシビアな機器のセッティング等の対応が必要となる。

1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発は、3次元計測及び位置決め技術の統合と最適なシステムの構築を図り、上記課題を解決する検査システムを構築するものであり、我が国の航空機産業の競争力向上に貢献することを目的とする。

近年、航空機には複合材が適用されるようになり、航空機産業は新技術への対応に迫られている。複合材主翼におけるアスナの装着状態は機体の安全性（耐雷性）に大きく影響するが、現状では何万本ものアスナを目視で検査しており、精度や信頼性の面で不安がある。また、今後想定されるレートアップに対する人手不足も懸念されている。これらの問題を解決するため、大型3次曲面パネル上のアスナ装着状態を自動で検査する技術を確立する。



1-1-3 実施内容

平成25年度は、本研究で開発しているファスナ装着状態の検査技術に対して、現在判明している下記の本研究の事業化に向けた目標にむけて、平成24年度の研究をふまえて目標に達成していない課題の解決を図る。さらに、事業化に向けた川下企業との協議を行い、現時点で考えられる事業化内容、スケジュール等を検討し、今後の実用化に向けた課題の抽出を行う。

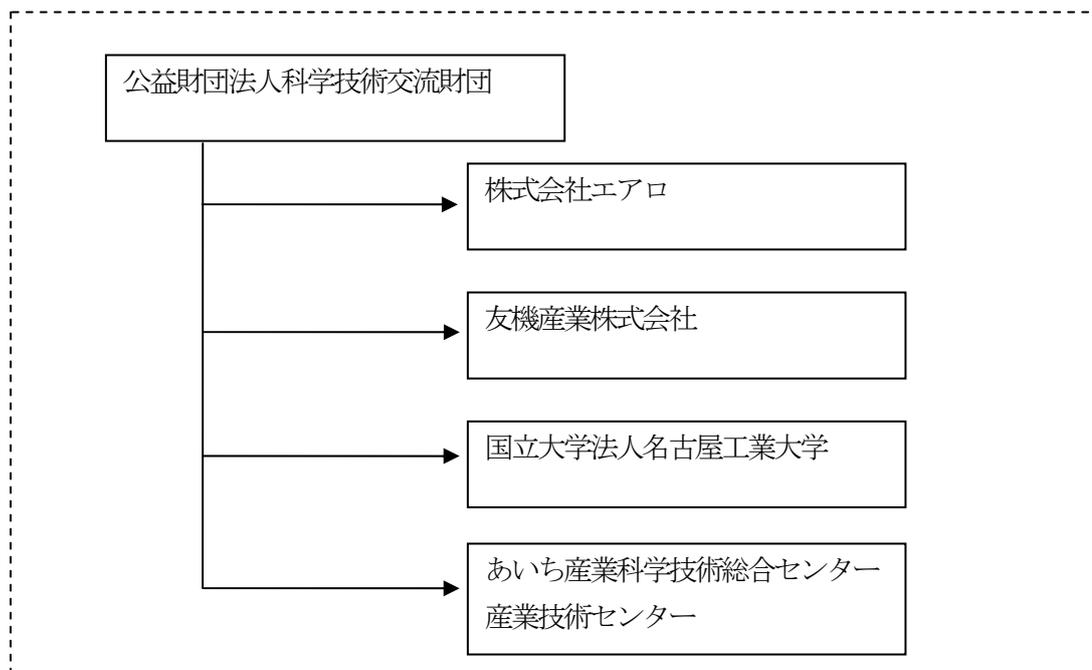
※ボーイング787主翼 ファスナ装着状態自動検査システム 目標

- ・生産性：現状 8～10機/月 → 将来 14機/月
- ・検査工程：完全無人化、検査工程には一切人が関わらないこと
上下面同時測定可能
- ・検査技術：曲面に装着されたファスナの測定/データ収集
測定スピード・精度、全ファスナサイズへの対応
測定/可動範囲の拡大
測定機構の構想

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

(1) 研究組織（全体）



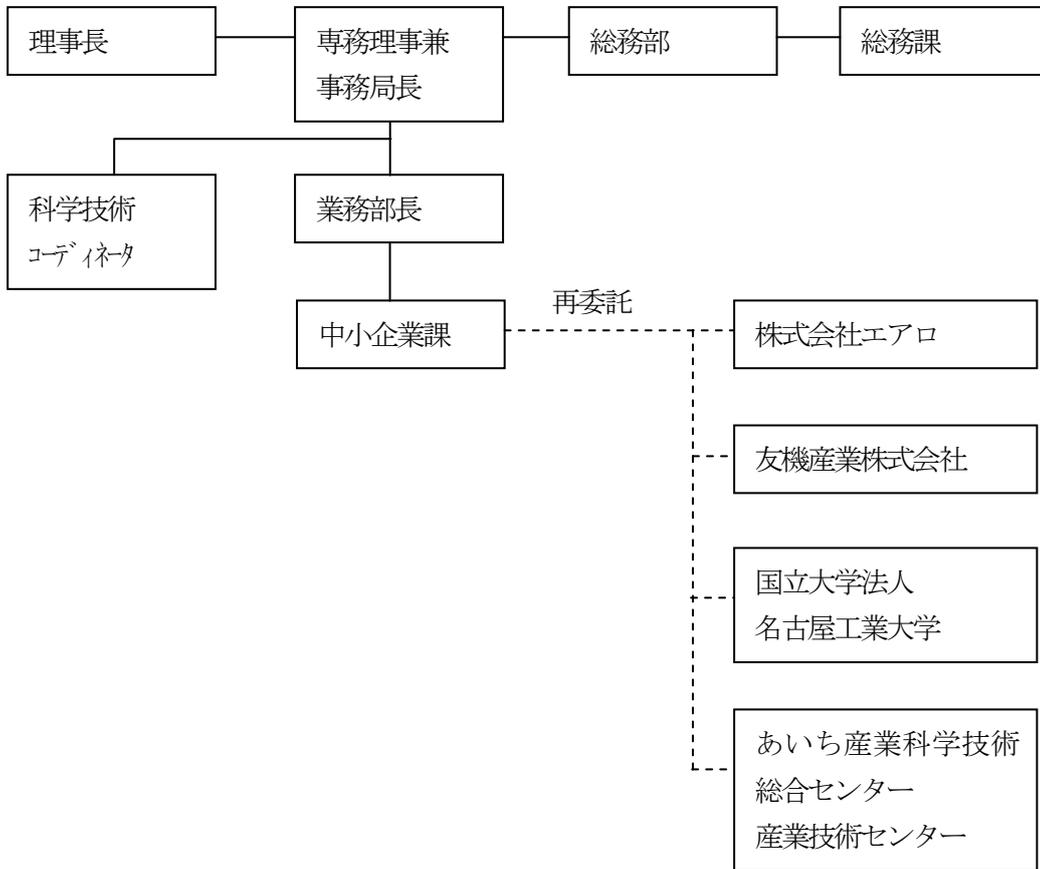
総括研究代表者（P L）
株式会社エアロ
取締役副社長
西村 憲治

副総括研究代表者（S L）
国立大学法人名古屋工業大学
産業戦略工学専攻 教授
梅崎 太造

(2) 管理体制

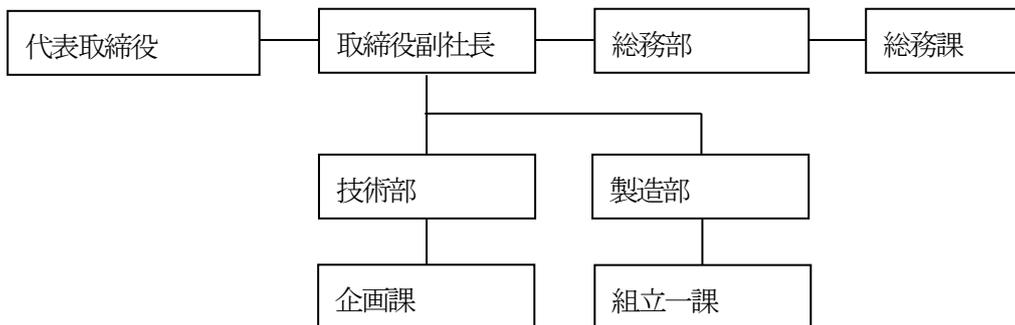
① 事業管理機関

公益財団法人 科学技術交流財団

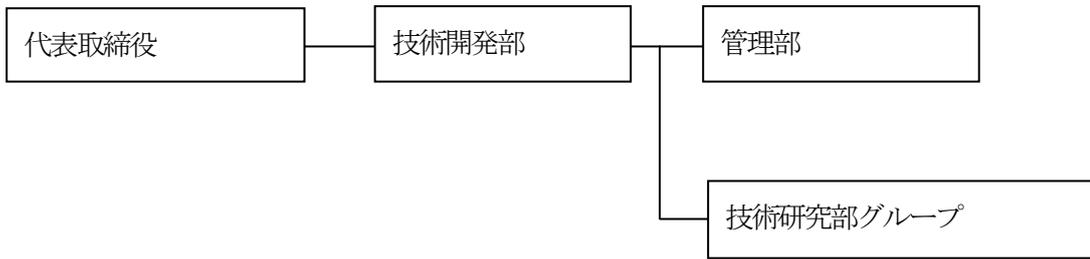


② 再委託先

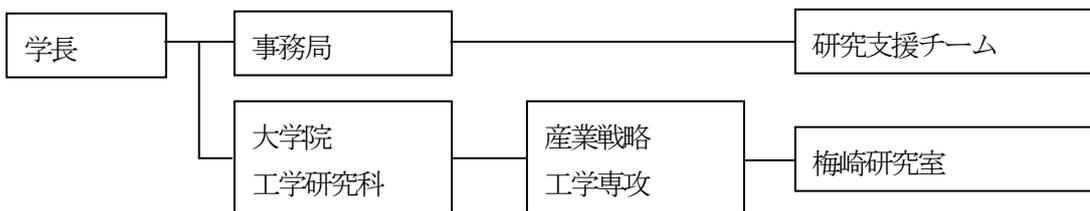
株式会社エアロ



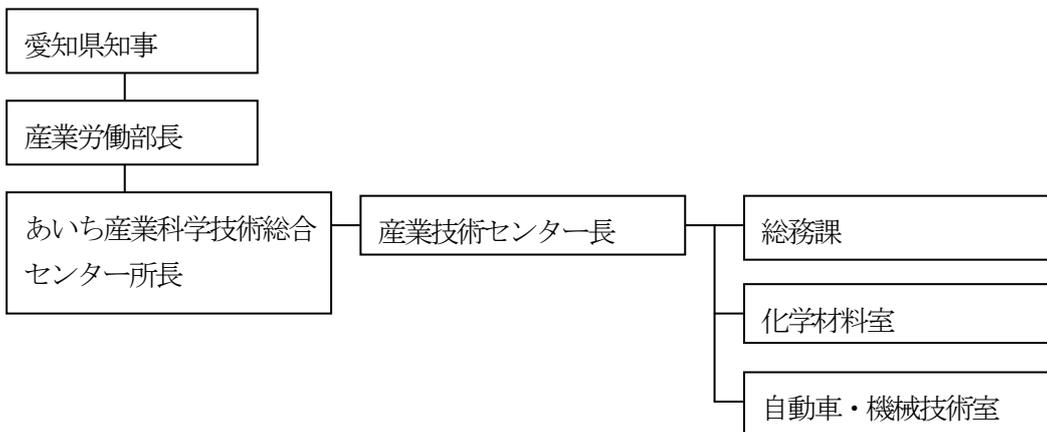
友機産業株式会社



国立大学法人名古屋工業大学



あいち産業科学技術総合センター 産業技術センター



1-2-2 研究者氏名

【事業管理機関】 公益財団法人 科学技術交流財団
管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
岩田 勇二	専務理事兼事務局長	6
出口 和光	業務部長	6
朝比奈 正	副部長兼科学技術コーディネータ	6
那須 規宏	業務部中小企業課・課長	6
田中 敦子	業務部中小企業課	6

【再委託先】

研究員

株式会社エアロ

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
西村 憲治	取締役副社長	5
京極 六十美	技術部・部長	4-1、5
西原 信一	技術部企画課・係長	4-1、5
平野 耕右	技術部企画課	1-1、1-2、3
増永 隆宏	技術部企画課	1-1、1-2、2-1②、 3、4-1、5
宮城 裕希	技術部企画課	1-1、1-2、2-1②、 4-1
小川 沙織	技術部企画課	1-1、1-2、3

友機産業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
倉谷 尚伸	代表取締役	1-1、1-2、5
鈴木 祐二	取締役	1-1、1-2

国立大学法人 名古屋工業大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
梅崎 太造	教授	2-1①、5
田口 亮	助教	2-1①、5

あいち産業科学技術総合センター 産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
山口 知宏	化学材料室・主任研究員	4-1
門川 泰子	化学材料室・主任	4-1
山本 紘司	自動車・機械技術室・主任	4-1
島津 達哉	自動車・機械技術室・技師	4-1

1-2-3 協力者

【アドバイザー】三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所

代表者：交通・輸送ドメイン 787事業部 大江西工作部 工務課 主席技師
船渡 俊行

Tel : 052-611-3193

協力内容：位置決めに関する技術開発について精度の検証を行う
事業化について川下企業としてのアドバイスをいただく

1-3 成果概要

本年度研究開発において、次の7つの課題に目標値を設定して取り組んだ。

1. 検査工数の低減（検査タクト、30秒/個 → 7秒/個（75%ダウン））
2. 位置決め安定（画像処理による位置決め精度 ±0.05mm）
3. 3次元計測による計測精度の向上（計測値精度 ±0.05mm）
4. 多点計測による計測精度の向上（計測値精度 ±0.05mm）
5. 検査情報の自動収集およびデータのバックアップ（タブレット端末による制御）
6. 故障解析プロセスの確立（異常状態のファスナ装着状態の検証）
7. 事業化の検討

それぞれの課題に対し実験・検証を行った結果は次のとおりである。

1. ロボット単体の動作（ファスナ位置情報を読み込み、その後ファスナ位置へ移動、画像処理カメラで撮像して位置微補正を行い、計測器の計測ポジションへ移動）としては、2秒/個以内というロボット移動タクトを実現できた。あとはセンサーによる検査時間を含めて7秒/個という目標の達成については、大型3次元曲面テストパネル計測において、3次元計測の検査タクトは3.6秒/個、多点計測の検査タクトは1秒以下/個が達成できたので、ロボット移動時間を含めたトータルの検査タクトとしては6秒/個となり、7秒/個の目標を達成できた。
2. 画像処理カメラによる検出精度を向上させて、最終目標である0.05mm以内のズレ量を実現させるために、センサーと画像処理カメラ用の取付け治具を開発し、照明等の調整を行うことで、より精度よく画像処理できるように研究開発を行った。その結果、ズレ量を0.05mm以内に収められるようになった。ロボットの移動スピードが100%に近づくほど精度は落ちる傾向にあるが、いずれのスピードにおいても0.05mm以内のズレ量であった。検査タクトも含めて考えると100%のスピードで運用しても問題ないと考えられた。
3. 3次元計測によるファスナ計測精度の向上および計測速度の向上を目指し、投影式3次元計測ユニットについては、「1. 計測精度向上を目指したキャリブレーション方法の改善」、

「2. 計測速度向上を目指した投光パターン数の軽減」を実施し、デジタルホログラフィ式三次元計測ユニットについては、「3. ワンショットのデジホロ計測の実現」、「4. 拡散状物体に対応したレーザ照射方法の確立」に関する研究開発および実験を実施した。投影式三次元計測ユニットについては、キャリブレーション時に使用したマーカの悪影響を軽減する手法を開発し、計測精度が向上した。また、キャリブレーション時のパターン数を減らすことにも成功し、計測速度の向上を達成した。デジタルホログラフィ式三次元計測ユニットについては、周波数解析法を用いたワンショット計測を実現したが、拡散状物体への対応については考案した手法では十分な効果が得られなかった。また、三次元計測実験用ロボットを開発・使用して、小型ロボットアームに計測ユニットを搭載した状態でファスナ計測を実施し、 $\phi 7$ ファスナ、 $\phi 10$ ファスナ共に深さ誤差が 0.03 mm 以下であることが確認でき、目標精度が達成された。

4. レーザーセンサーと画像処理カメラの取付け治具を新たに開発し、レーザーセンサーの設置位置、アルゴリズム等について検討を重ねた結果、本項目の目標値である計測精度 0.05 mm の範囲に収めることが可能となった。繰り返し精度としては、 0.002 mm 以下を達成し、真値とのズレ量としては 0.04 mm 以下を達成できた。

5. パソコン、データベース、シーケンスをローカルネットワークで接続し、パソコンのブラウザ上で動くシステムを構築することで、ファスナ位置情報、計測結果、合否判定結果、計測対象ワークのロット情報などのデータの閲覧、ファスナの検査予定の登録などをパソコン上で行えるようになった。また事業化を見据えて、実際の現場導入を想定し、タブレット端末を用いて離れた場所でも検査結果や作業の進捗状況の確認などを行えるシステムも構築した。

6. (接触式) 三次元測定機によるファスナ装着状態の検証を行い、リベット部の深さが異なるファスナ(標準・浅目・深目)の基準データを測定した。また、リベット部が傾いたファスナ($0\sim 3^\circ$)の基準データを測定した。これらを基準データ(真の値)として用いた。

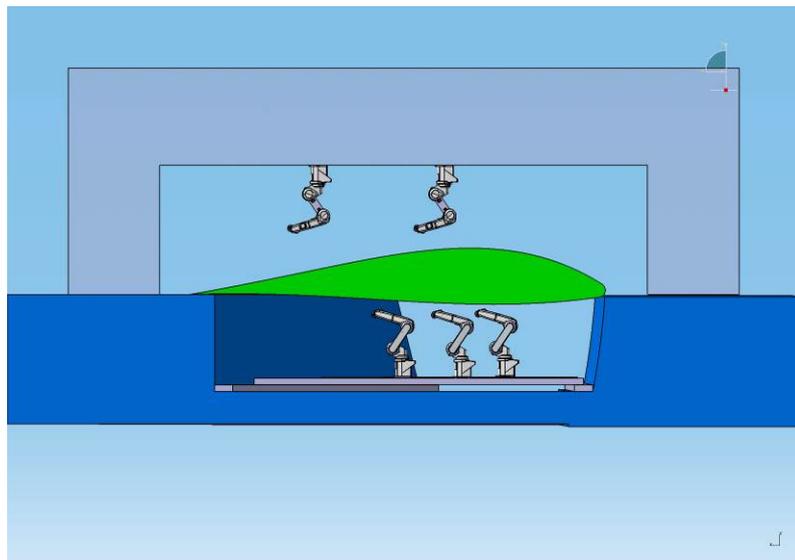
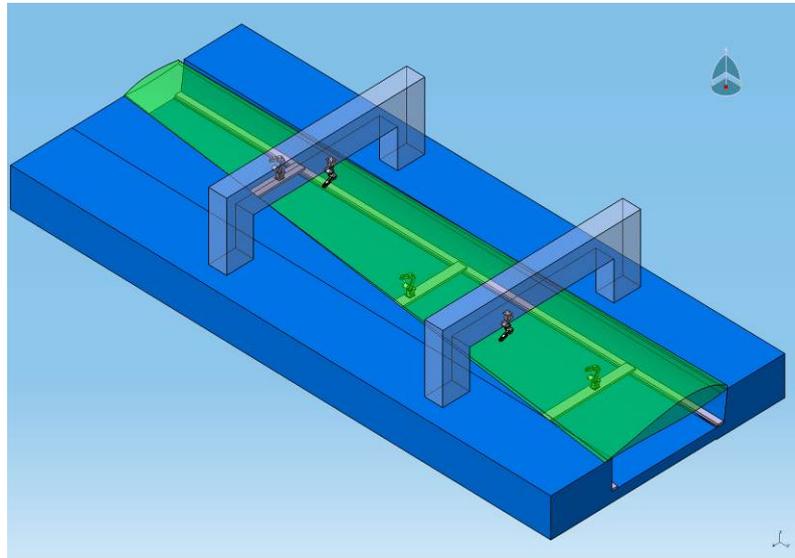
非破壊検査機器によるファスナ装着状態の検証については、超音波探傷装置により、CFRP積層板の内部欠陥(層間剝離)が検出できた。また、X線CT装置により、CFRP積層板の内部欠陥(層間剝離)が検出できた。さらに、産業用の造影剤を開発し、適用することで、より鮮明な画像が得られた。

耐候性試験前後のファスナ装着状態の検証については、サンシャインウェザーメーター試験前後のファスナ面段差の変化は、降雨を想定した噴霧水中に含まれるシリカスケールによるものと推定した。

7. 787主翼の大きさや構造、製造場所などを考慮し、本研究で開発中のシステム(ロボットを使用したファスナ装着状態検査システム)を上下面それぞれに1基もしくは複数基を搭載したトンネル型の機構が最適と判断し、そのトンネル型検査装置の設置に伴った全体シス

テムの概略仕様を算出した。これまでの研究内容を踏まえて、ファスナ自動検査装置の全体システムの構想を考え、検査ロボットおよび移動装置のサイクルタイム、検査ロボットの必要基数及び予算について検討を行い、概算予算、概略図等を作製した。

下図は、トンネル型主翼検査装置のイメージ図である。



1-4 当該研究開発の連絡窓口

1-4-1 事業管理機関

【公益財団法人 科学技術交流財団】

担当者：業務部中小企業課長・那須 規宏
Tel：0561-76-8326 Fax：0561-21-1651
E-mail：nasu@astf.or.jp

1-4-2 研究実施機関

【株式会社エアロ】

担当者：技術部長・京極 六十美
Tel：0567-66-3507 Fax：0567-68-6016
E-mail：m_kyogoku@aeross.jp

【友機産業株式会社】

担当者：代表取締役・倉谷 尚伸
Tel：0563-77-3925 Fax：0564-52-7703
E-mail：kamo118@katch.ne.jp

【国立大学法人 名古屋工業大学】

担当者：教授・梅崎 太造（工学博士）
Tel：052-735-7450 Fax：052-735-7450
E-mail：omezaki@nitech.ac.jp

【あいち産業科学技術総合センター 産業技術センター】

担当者：化学材料室 主任研究員・山口 知宏（工学博士）
Tel：0566-24-1841 Fax：0566-22-8033
E-mail：tomohiro_yamaguchi@pref.aichi.lg.jp

第2章 本論

2-1 3次曲面パネルに対する高精度な位置決め課題への対応

2-1-1 検査工数の低減

担当：株式会社エアロ・友機産業株式会社

< 当初の実施目標 >

CADデータまたは図面データを位置情報に変換し、ロボットを動作させるシステムを開発する。株式会社エアロが主体となって実施する。

具体的には、現状、約30秒/個かかっている検査作業を自動化し、検査タクトを7秒/個(約25%)を達成するために、CADデータ又は図面データを活用したロボットシステムを導入し、最も適したロボットの動作プログラムなどの研究を行い、目標値を達成できるシステムを開発する。

平成25年度は、ファスナ位置情報が記録されたCATIAデータを使用したロボット動作プログラムの見直し、ロボット制御盤と全体制御盤の統合、システム構成の簡略化を行うことで、ロボットがより最適な動作を行えるよう改造する。これにより、ロボット動作のタクトタイムを4秒以下に抑え、計測時間をより長く確保することで、精度の高い計測を行う。

(使用機械装置)

平成23年度購入 ロボットシステム一式

平成25年度改造 導入システム統合後のロボットシステム一式

< 取組内容と結果 >

本課題では、CADデータ(CATIA V5)を用いて、ロボット動作及び計測を行うことが目標であり、それを実現するために、平成23年度に導入した「ロボットシステム一式」、「ファスナ装着状態検査システム」、「ファスナ平滑度データトレーサビリティシステム」及び平成24年度に導入した「三次曲面計測システム」について、CADデータを用いて高速な位置決めによる、ロボット動作のタクトタイムの4秒以下を達成するために、システムの統合と改造を行った。

図1-1は、航空機主翼を模擬したサンプルワークである。これは平成24年度に設置したものであるが、より実機に近付けるために白く塗装を施した。



図1-1 白く塗装したサンプルワーク

検査タクトの検証を行った。具体的には、平成23年度に導入した「ロボットシステム一式」、「ファスナ装着状態検査システム」、「ファスナ平滑度データトレーサビリティシステム」及び平成24年度に導入した「三次曲面計測システム」について、システムの統合と改造を行った機器について、次の条件で動作させ、ファスナ位置情報をもとにロボットが動くかどうかの確認および装着されたファスナの検査タクトを計測した。

図1-2はロボット動作時の写真である。

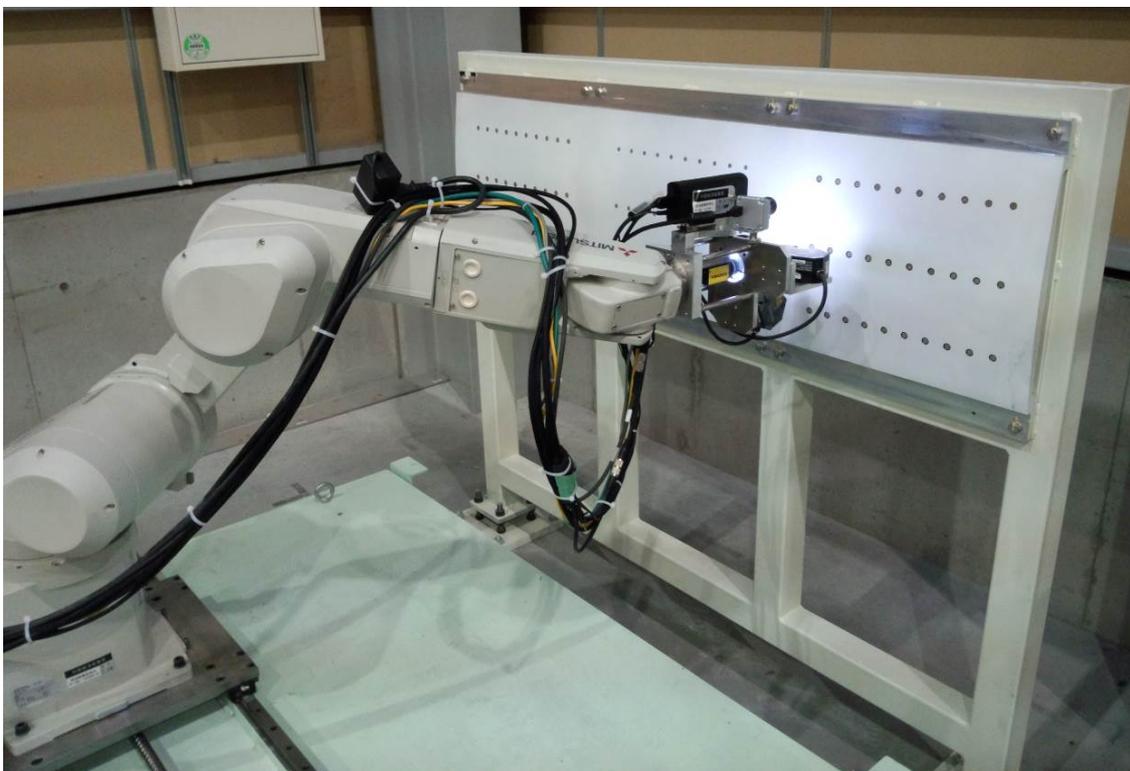


図1-2 ロボット動作時

【動作条件】

- ①動作箇所は図1-1にあるサンプルワークに装着された90点のファスナとする
- ②サンプルワークを取り付ける治具架台に装着されたサンプルワークを使用する
- ③ファスナ位置は、CADデータ（CATIA V5）のファスナ位置情報を変換したものを航空機主翼ファスナ検査システムからロボットへと送り、そのポジションへ移動する
- ④検査タクトはロボット原位置から1点目に移動してから90点目を計測し終わるまでの時間を計測する
- ⑤自動運転を行い検査タクトの計測を行う
- ⑥検査タクトに含まれる時間は、次のファスナへの移動時間、画像処理によるファスナ位置のズレ量検出、ロボット本体による位置微補正（計測時間は含まない）の合計とする

結果として、ロボット単体の動作（ファスナ位置情報を読み込み、その後ファスナ位置へ移動、画像処理カメラで撮像して位置微補正を行い、計測器の計測ポジションへ移動：図1-3）としては、目標値である4秒/個を大きく上回る2秒/個以下というロボット動作タクトを実現できた。

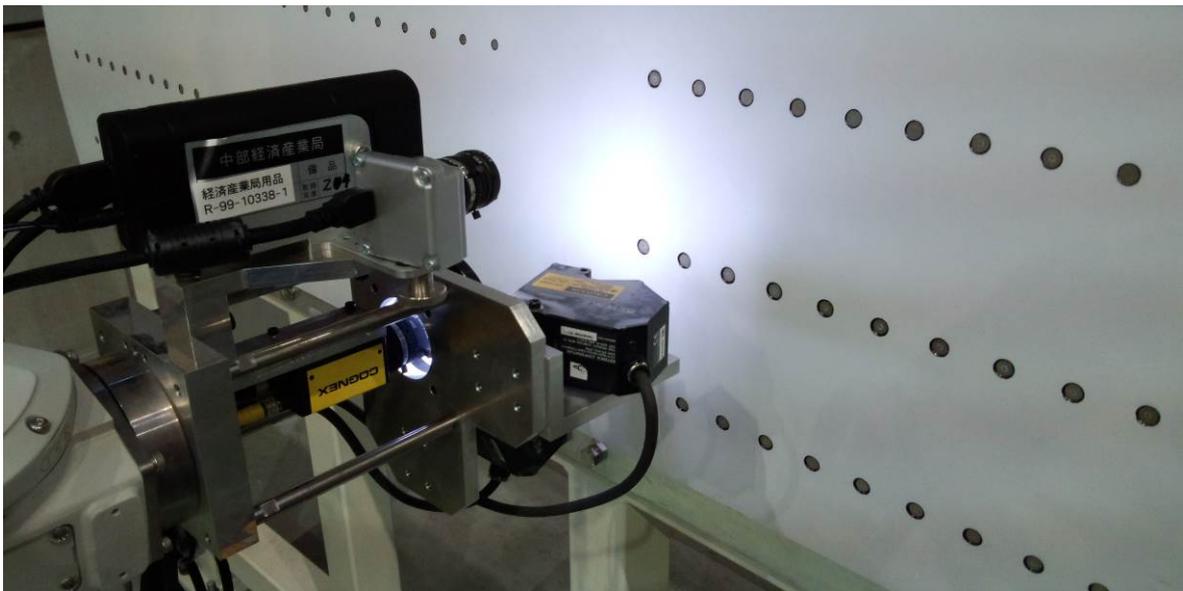


図1-3 ロボット単体の動作

2-1-2 位置決め安定

担当：株式会社エアロ・友機産業株式会社

< 当初の実施目標 >

画像処理によりロボットの位置を補正するソフトウェアを開発する。画像処理がメインとなるため、株式会社エアロが主体となって実施する。

3次曲面上にあるポイントに対するロボットの位置決めを安定させるために、ロボットの先端部分に画像処理カメラ/センサー照明を取り付け、ファスナ位置検査画像処理システムをロボットと連動させることで位置決め補正を行う。

なお、位置決め精度の目標値は±0.1mmとする。

平成25年度は、位置決め補正に要している時間を維持したまま、XYテーブルを使用していた場合と同様の精度で補正できるよう、株式会社エアロにてロボット動作プログラムを見直す。また、補正が必ず実行されるように画像処理プログラムの処理内容の見直しも行う。ロボット面からと画像処理面の両方を改善し、高精度な位置決めかつ高速な位置決め達成に向けて検証を行う。

(使用機械装置)

平成23年度購入 制御カメラ装置、ファスナ装着状態検査システム

平成24年度購入 3次曲面計測システム

平成25年度改造 導入システム統合後のロボットシステム一式

< 取組内容と結果 >

(1) カメラ、照明の位置関係及びレンズの選定、治具構成

本年度は、レーザーセンサーおよび名古屋工業大学の3次元計測器を搭載して計測実験も行うため、画像処理用カメラ、レーザーセンサーおよび3次元計測器がそれぞれ設置できる新しい治具を設計製作し、図1-4のように搭載できるようにした。



図1-4 取付け治具

(2) 画像処理カメラの撮像画像からのズレ量検出

計測器取付け治具は、ロボットインターフェースの中心と画像処理カメラの中心が同軸上になるように設計製作をされており、撮像された画像は図1-5のような画像となり、X座標、Y座標、角度の位置をピクセル値で読み取り、それをもとにロボットが処理を行い、微補正を行う。

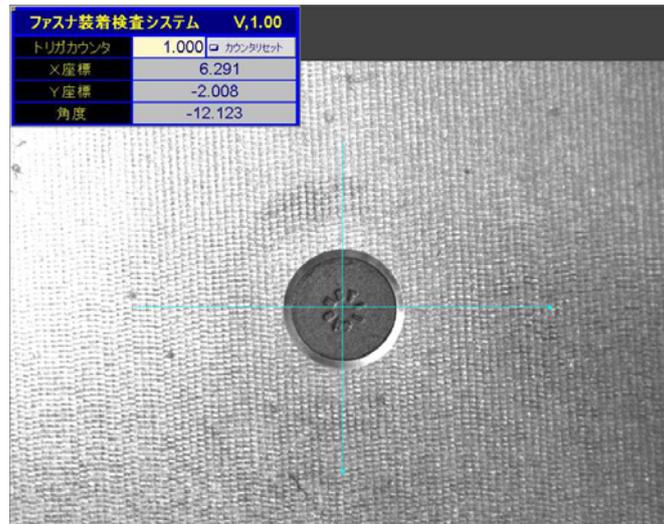


図1-5 三次曲面を再現したワークを撮像した画像

結果としては、平成23年度および平成24年度に実施した位置決めの研究と同じような傾向を示しており、Y軸方向のズレ量が少なく、X軸方向のズレ量が多い結果が出た。また、動作スピードが70%までのズレ量と70%以上のスピードの時のズレ量を比較すると、70%以上のスピードにおいて100%に近いほど、ズレ量が大きくなる傾向がみられた。しかし、いずれのスピードにおいても、目標値である0.05mmを超えるズレはなく、目標は達成できた。

目標が達成できた要因としては、3次曲面を再現したワークに対して画像処理カメラが撮像を行なっているが、平成24年度に比べてより3次曲面に対応したプログラムが組めたこと、また本年度に画像処理カメラや照明などをロボットに設置できる治具を設計製造したが、その画像処理カメラと照明の位置関係などが、現行のワークに対してうまくファスナを撮像できる状態になり、バラつきが生じなかったと考えられる。

2-2 正確なファスナ装着状態の計測技術課題への対応

< 当初の実施目標 >

ファスナの装着状態を計測する技術はどのような方法が最適か検証するため、本年度の研究開発では3次元計測による計測と多点計測による計測の計測技術を採用し、研究を行うこととした。

平成23年度は、3次元計測による計測手法（共焦点式、投影式、合焦点式）と多点計測による計測手法（レーザーセンサー式）の基礎実験が終わり、おおよそのメリット・デメリットを見出した。

平成24年度は、4種類（共焦点式、投影式、合焦点式、レーザーセンサー式）の計測技術を更に検証し、各計測技術のメリット・デメリットを明確した。その中から精度、コスト、様々な要因を検討し、事業化に向けて採用できる計測技術を選定し、投影式と新たなデジタルホログラフィ式を候補とした。そして、事業化の候補となった計測手法をもとに、ロボットに搭載できる計測器を製作した。

しかし、平成24年度の研究結果をもとに川下企業と事業化の構想を話し合った結果、検査スピードが優れているレーザーセンサー式についても計測手法の一つとして引き続き検討の依頼があったため、平成25年度は、平成24年度に検証を進めた投影式、デジタルホログラフィ式の計測技術及びレーザーセンサー式の計測技術の、それぞれの計測技術にある課題（投影式は計測精度及び測定時間、デジタルホログラフィ式は視野の範囲、レーザーセンサー式は計測精度、繰り返し精度）を引き続き検証し、事業化に向けて川下企業のニーズに最も適した計測技術を早期に見極め、確立する。

2-2-1① 3次元計測による計測精度の向上

担当：国立大学法人名古屋工業大学

< 当初の実施目標 >

ファスナの装着状態について、複数の3次元計測によって検証を行う。開発した計測機を使用して、顧客要求精度（0.05mm）を満たすファスナ検査システム開発を進め、最適な検査技術の検証を行う。

平成24年度は、実現可能性が高い投影式三次元計測ユニットとともに、新たな計測手法として、デジタルホログラフィ式のユニットを開発し、傾きのあるファスナサンプルに対する計測実験を実施した。

平成25年度は、これまでの研究課題を踏まえ、計測速度および計測精度の向上を目指し、以下の各項目について検証を進める。

(1) 投影式三次元計測ユニット

- (1-1) 計測速度向上を目指した投光パターン数の軽減
- (1-2) 計測精度向上を目指したキャリブレーション方法の改善

- (2) デジタルホログラフィ式三次元計測ユニット
 - (2-1) ワンショットのデジホロ計測の実現
 - (2-2) 拡散状物体に対応したレーザ照射方法の確立

- (3) 三次元計測実験用ロボットを用いたファスナ計測実験

(使用機械装置)

平成24年度購入 計測実験データ解析用コンピュータ、投影式三次元計測ユニット、
デジタルホログラフィ式三次元計測ユニット

平成25年度購入 三次元計測実験用ロボット

< 取組内容と結果 >

- (1) 投影式三次元計測ユニットを用いたファスナ装着状態の検査

- (1-1) 計測速度向上を目指した投光パターン数の軽減

投影式三次元計測ユニットは、位相シフト法を用いてファスナの3次元形状を計測する。平成24年度に開発した投影式三次元計測ユニットを図2-1に、位相シフト法の概要を図2-2に示す。位相シフト法は、明暗で表された正弦波画像を投影パターンとして用い、最低4枚の投影・撮影で計測が可能である。反面、位相連結と呼ばれる問題により、位相シフト法単体では大きな段差を持つ形状を計測できないという特徴がある。そのため、平成24年度のシステムでは、正弦波の波長の半分とコードの最小幅を合わせたグレイコードを用いて連結を行っていた。本年度は図2-3に示すように、1周期分の正弦波縞パターンを元に絶対位相を算出し、周期が短く分解能の高い正弦波縞パターンの位相連結を行う手法を採用した。この手法では、1周期分の正弦波縞パターン4枚と周期が短く分解能の高い正弦波縞パターン4枚の合計8枚の投影パターンから位相連結ができる。そのため空間コード符号化法と比較して、高速な形状復元を行うことが可能となった。さらに、ロボットシステムではロボットを停止した状態でパターンの投光と撮影を行い、その後、ロボットの移動中に3次元形状復元と深さ傾き算出を行うことで、目標とする検査タクト7秒/個を達成した。



図2-1 ロボット搭載用投影式三次元計測ユニットの外観

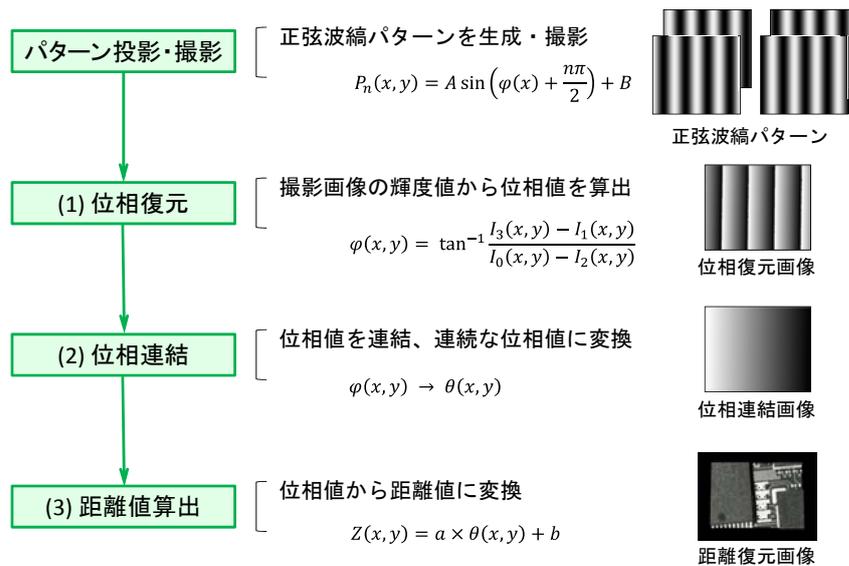


図2-2 位相シフト法の概要

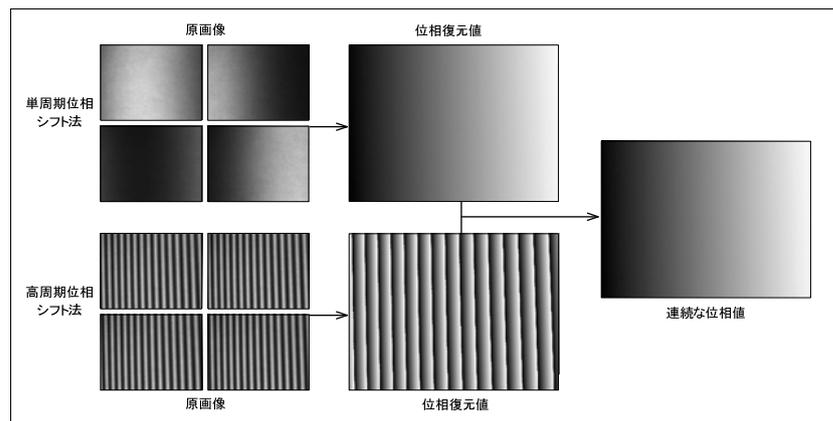
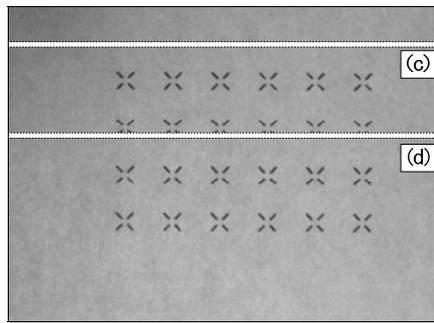


図2-3 位相シフト法のみによる位相連結例

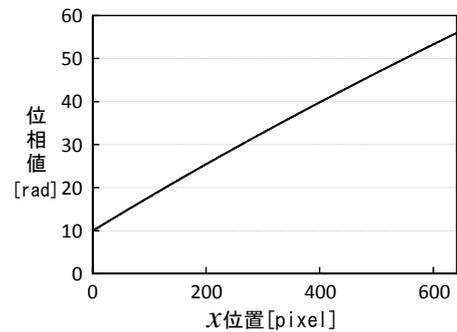
(1-2) 計測精度向上を目指した、キャリブレーション方法の改善

位相シフト法を用いた三次元計測においては、距離値と位相値の関係を算出する距離キャリブレーションが必要となる。距離キャリブレーションは計測器の計測精度に大きな影響を与える。そこで、本年度は図2-4 (a)に示すクロスマークを用いてキャリブレーションを実施した。クロスマークはバツ印の交点を抜くことで交点座標にもパターンの投影が可能であるが、マーク部分のキャリブレーション精度は低下する。そこで、キャリブレーション用のパターンを撮影した後で、マーク領域内の位相値を正しい位相値に修正する手法を開発した。キャリブレーション時における連続位相値は図2-4 (b)のようになだらかに上昇する。そこで最小二乗法を用いてキャリブレーション時の位相値を三次近似関数でモデル化した。図2-4 (c)に近似関数との誤差を示す。近似誤差が一様となることから適切なモデル化であると確認できる。

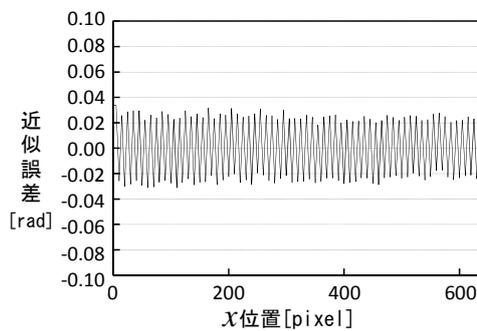
しかしマーカ部では図2-4 (d)に示すように近似誤差にノイズが発生するため、移動平均を用いて近似誤差が一様になるように修正する。これにより計測精度の向上を実現した。



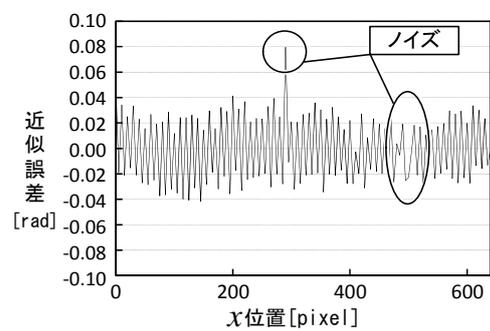
(a) クロスマーカ



(b) X方向の連続位相値



(c) マーカ外の近似誤差



(d) マーカ部の近似誤差

図2-4 X方向の位相値と三次近似関数との誤差

(2) デジタルホログラフィ式三次元計測ユニット

(2-1) ワンショットのデジホロ計測の実現

平成24年度は位相シフトデジタルホログラフィを用いた3次元計測実験を実施した。位相シフトデジタルホログラフィでは、参照光と物体光の光路差をレーザ波長の1/4倍ずつずらしながら、4枚の位相シフト干渉縞をカメラで撮影する。我々は、物体光と参照光をそれぞれ偏光面が直交した円偏光にし、偏光板を45度ずつ回転させて検波することで、90度ずつ位相の異なる4枚の位相シフト干渉縞を生成する手法を検証し、安価で小型な位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測装置を試作開発した。しかしながら、4枚の位相シフト干渉縞画像を取得するために、偏光板の回転制御およびカメラによる複数回の撮影が必要であるため、高速の三次元計測には不向きである。また、計測環境に振動がある場合には、撮影された位相シフト干渉縞画像間に誤差が生じてしまうなど、安定かつ高速の三次元計測の実現が困難であるという課題が存在した。

そこで今年度は、4枚の位相シフト干渉縞を用いずにワンショットで計測を行うことを目標に、干渉縞の周波数解析に基づいたワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測手法を開発した。開発した三次元計測装置の光学系模式図を図2-5に、試作した三次元計測装置の外観を図2-6に示す。まず、拡大されレーザ光は1/2波長板を透過して、偏光ビームスプリッタにより、偏光面の異なる2光束に分割される。一方のレーザ光は計測対象から反射

して物体光となり、もう一方のレーザ光は平面ミラーから反射して参照光となる。次に、物体光と参照光は光検波器を透過した後、CMOS センサ表面で干渉する。CMOS センサで撮影した干渉縞画像を用いて干渉縞の周波数解析法で物体光の相対位相値を算出し、畳み込み定理を利用した位相シフトデジタルホログラフィを用いて物体光の絶対位相値を算出する。最後に、位相連結処理を行い、干渉測量法で計測対象の三次元形状を復元する。提案手法は干渉縞の周波数解析を用いて、1枚の干渉縞撮影画像から物体光の相対位相値を算出するため、位相シフトの位相差誤差が存在せず、計測時の振動などが計測精度に与える影響を大幅に減らすことが可能である。ミットヨ社製の段差マスタ (Mitutoyo No. 616-498) を用いた精度評価実験では、段差計測値は段差マスタの許容誤差値 (± 200 [nm]) 以内であることを確認した。評価実験での計測視野は 7×7 [mm] であるが、拡大率2倍のテレセントリックレンズを使用することで計測可能な範囲を 14×14 [mm] まで拡大できた。しかし、提案手法でファスナサンプルを計測した結果、レーザ光が物体表面で拡散することでスペックルノイズが発生し3次元形状の復元に失敗した。

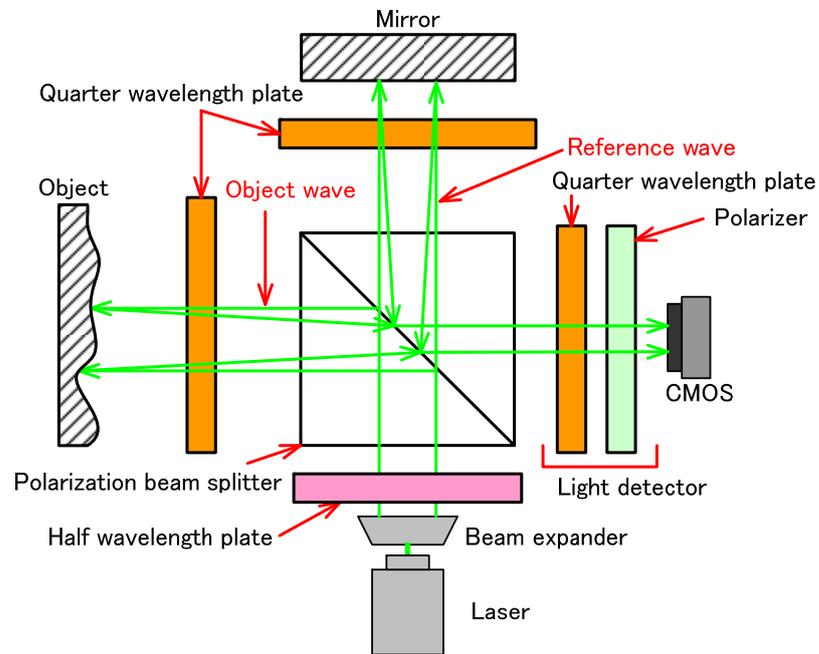


図 2-5 計測装置の光学系模式図

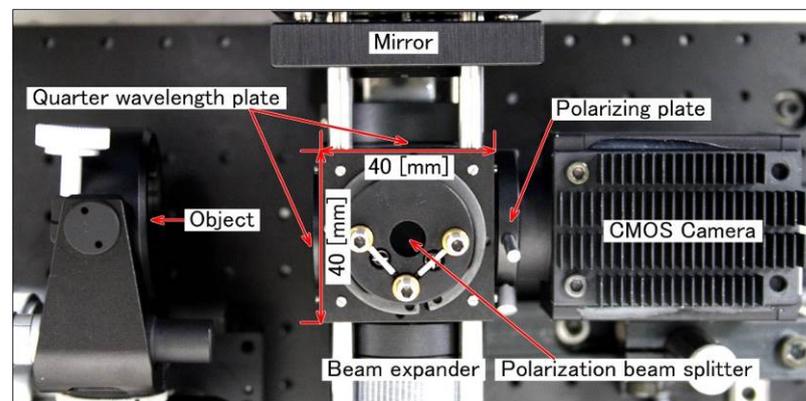


図 2-6 ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測装置の外観

(2-2) 拡散状物体に対応したレーザ照射方法の確立

位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測手法は、鏡面反射物体および透明物体は高精度に計測可能であるが、表面でレーザ光が拡散する物体の計測が困難であるという問題がある。それは、レーザが物体表面で拡散することでスペckルノイズが発生し、計測に必要な干渉縞とスペckルノイズが分離できないためである。レーザを拡散させて対象に照射することで光軸方向の光が物体光となり CCD で干渉させる方法を検討した。これにより、物体表面から反射するレーザの量が増え、スペckルノイズとの SN 比が向上し、表面でレーザ光が拡散する物体の計測が可能になると考えられる。そこで、我々はまず、ホログラムを用いてレーザを拡散させる実験を実施したが、レーザ光を精密に拡散させることが困難であった、そのため次に、拡散光での計測状況を、ホログラムを用いて擬似的に再現することを試みた。実験の結果、拡散光を用いると直接反射以外の光がホログラムに入るため、ホログラムの像がボケてしまい、期待した効果は得られなかった。デジタルホログラフィ式でファスナ検査を行うためには、まだ多くの課題が残っている。

(3) 三次元計測実験用ロボットを用いたファスナ計測実験

平成25年度に名古屋工業大学に導入した三次元計測実験用ロボットを用いてファスナ計測実験を実施した。平成24年度に導入した投影式三次元計測ユニットと同性能のプロジェクタ・カメラを用いて計測器を構築し、ロボットに取り付けた。ロボットの写真と計測の様子を図2-7に示す。このロボットを用いてファスナサンプルを計測した。計測対象は $\phi 10$ [mm] のファスナ 10 個、 $\phi 7$ [mm] のファスナ 10 個とした。計測結果から得られた3次元形状を元にファスナの深さと傾きを算出し、真値との誤差を計算した結果、深さ誤差の最大は $\phi 10$ ファスナで $22.8[\mu\text{m}]$ 、 $\phi 7$ ファスナで $27.7[\mu\text{m}]$ であった。また、傾きの誤差の最大は $\phi 10$ ファスナで $0.06[\text{deg}]$ 、 $\phi 7$ ファスナで $0.34[\text{deg}]$ であった。各ファスナの計測はロボットを停止した状態で実施しているが、サーボモータの電源は ON の状態でありロックされていない。そのため、計測時には微小な振動が発生していると考えられる。研究当初は、その振動による計測精度の低下が懸念されていたが、提案手法はロボットに搭載した状態でも、目標精度である $0.05[\text{mm}]$ が達成できることが示された。



(a) 計測器を取り付けた様子



(b) 計測実験の様子

図2-7 三次元計測実験用ロボット

2-2-1② 多点計測による計測精度の向上

担当：株式会社エアロ

< 当初の実施目標 >

センサー取付け治具にセットしたレーザーセンサーで計測を行い、顧客要求精度（0.05 mm）を満たすかの検証を行う。

平成25年度は引き続き、検査タクトを維持しつつ、レーザーセンサーの仕様である繰り返し精度5 μmに近づけるよう調整及び検証を進めていく。また、測定値の顧客要求精度（0.05 mm）を満たす精度があるのか、どこまで精度が向上するのか、使用されるファスナの全てのサイズに対応できるか等、各種の検証を進め、レーザーセンサーによる計測精度を確立し、上記2-2-1①で実証を行う3次元計測方式との比較による実現可能性を検討する。

（使用機械装置）

平成23年度購入 ファスナ平滑度データトレーサビリティシステム、レーザーセンサー、ファスナ装着状態確認アルゴリズム、センサー取り付け治具

平成25年度改造 導入システム統合後のロボットシステム一式

< 取組内容と結果 >

レーザーセンサー測定値の検証

図2-8のように画像処理カメラ、照明、レンズ、レーザーセンサーを本年度に設計製造した治具に組み込んだ。その後、平成24年度と同様にロボットに取付け、レーザーセンサーの計測を繰り返し行い、測定値の繰り返し精度の検証を行った。また、あいち産業科学技術総合センター産業技術センターに計測してもらった真値との誤差を求めることで、レーザーセンサーの精度検証を行った。

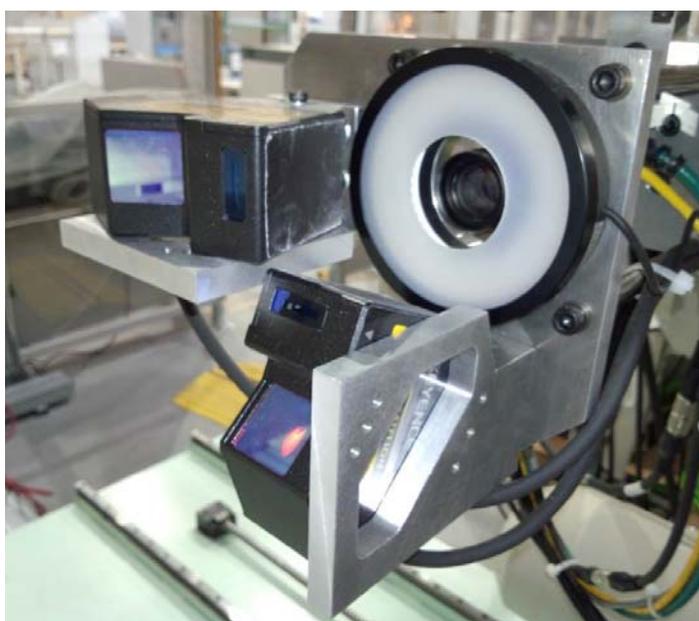


図2-8 レーザーセンサー組み込み治具

結果としては、繰り返し精度としては、0.002mmを達成し、測定精度としては0.04mmを達成したことから、顧客要求精度である0.05mmをクリアできた。

前年度の課題を踏まえて、センサーの取り付け位置の調整やレーザーセンサー機器の補正、アルゴリズムなどを変更することで、良い結果を得ることができた。

ただし、この結果が今後のすべてのサンプルや、取付け治具や取付け条件、機器に反映されるかは保証できないが、現在の仕様においては目標を達成することができた。今後もこの仕様を反映させて、設置調整、補正の検証を重ね、最適な条件を見つけ出していく必要があると考えられる。

2-3 信頼性の高い検査システムの確立課題への対応

2-3-1 検査情報の自動収集及びデータのバックアップ

担当：株式会社エアロ

< 当初の実施目標 >

航空機主翼組立のファスナ装着状態の検査を記録するために、現状約5秒/個かかっている工数を削減するために、開発したファスナ平滑度データトレーサビリティシステムをベースとして、より便利であり信頼性の高いシステムの構築を行う。

平成25年度は、本検査システムを動作させて取得した、ファスナ位置情報、計測結果、合否判定結果、計測対象ワークのロット情報などのデータのより容易な取出し、参照及び閲覧が可能なシステムの開発を行う。

また事業化を見据えて、実際の現場導入を想定し、タブレット端末を用いることで離れた場所でも検査結果や作業の進捗状況の確認などが行える、データ閲覧システムの構築も行う。

(使用機械装置)

平成25年度改造 導入システム統合後のロボットシステム一式

< 取組内容と結果 >

パソコン、データベース、シーケンスをローカルネットワークで接続し、パソコンのブラウザ上で動くシステムを構築することで、ファスナ位置情報、計測結果、合否判定結果、計測対象ワークのロット情報などのデータの閲覧、またファスナの検査予定の登録などが行えるようにする。図3-1は構築したシステムのブラウザ画面である。



図3-1 ファスナ検査予定登録画面

また事業化を見据えて、実際の現場導入を想定し、タブレット端末を用いて、離れた場所でも検査結果や作業の進捗状況の確認などが行えるシステムを構築した。データ閲覧システムが動作するシステムの構築については、タブレット端末をローカルネットワークに接続することで、同じようにブラウザを用いたシステムにて実施可能になった。以下の図3-2はタブレットでのブラウザ画面である。これにより30mある翼において、タブレット端末を持ち運ぶことで現物を確認しながら、検査結果を閲覧することが可能になる。



図3-2 タブレットにおけるファスナ検査画面

2-4 データの評価と検証課題への対応

2-4-1 故障解析プロセスの確立

航空機の組立てにおいてファスナの装着状態は非常に重要な要素であるため、高い品質が求められている。

今年度は、装着状態に異常が見られるファスナ、すなわち、リベット部の深さが異なるファスナ（標準・浅目・深目）、リベット部が傾いたファスナ（ $0\sim 3^\circ$ ）、故意に異常を発生させたファスナとして、曲げ試験機によりCFRP積層板を破壊した（層間剥離させた）ファスナ、耐候性試験機により長時間紫外線照射と水噴霧したファスナについて、a)（接触式）三次元測定機によるファスナ装着状態の計測、b) 非破壊検査機器によるファスナ装着状態の計測、c) 耐候性試験前後のファスナ装着状態の計測を実施した。

(1) (接触式) 三次元測定によるファスナ装着状態の検証

(株) エアロ、名古屋工業大学が開発した画像計測システムの精度を評価するため、あいち産業科学技術総合センター産業技術センターが所有する三次元測定機（カールツァイスUPMC550CARAT）により、ファスナ装着状態の計測を実施した。計測サンプルとしては、(株) エアロが作製した列毎にファスナの装着状態を変化させた航空機パネルサンプル（ファスナ径2種）で、リベット部の深さが異なるファスナ（標準・浅目・深目）、及びリベット部が傾いたファスナ（ $0\sim 3^\circ$ ）の基準データを測定した。航空機パネルサンプルのファスナ装着状態を図4-1に示す。

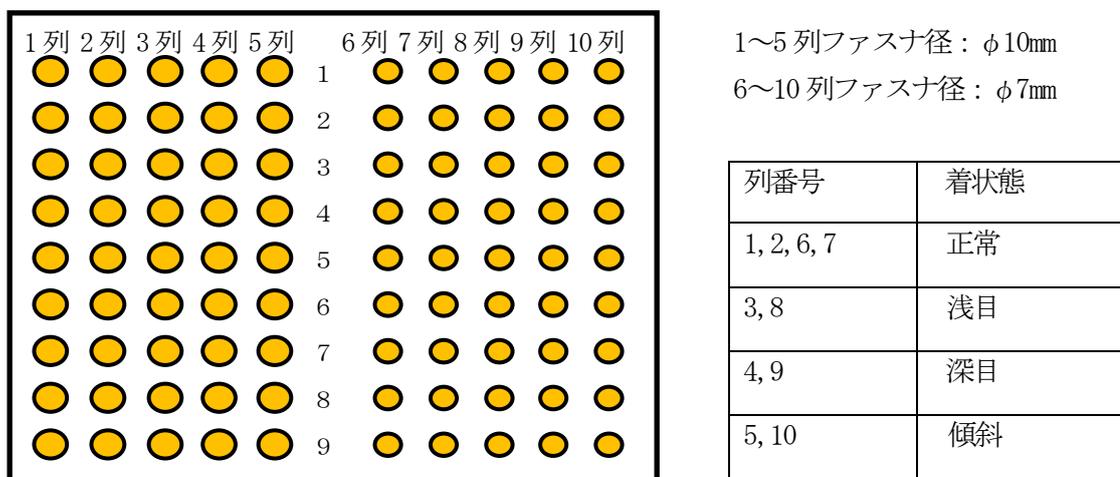


図4-1 航空機パネルサンプルのファスナ装着状態

ここで測定した値を基準データ（真の値）として用いた。

(2) 非破壊検査機器（超音波探傷装置、X線CT装置）によるファスナ装着状態の検証

将来、定期的に、航空機主翼を保守する場合を想定すると、ファスナの装着状態やその近傍の不具合を把握することは、故障対応の観点から重要である。ここでは、装着状態に異常が見られるファスナ、すなわち、故意に異常を発生させたファスナとして、曲げ試験機によりCFRP積層板を破壊した（層間剥離させた）ファスナを作製し、非破壊検査機器である超音波探傷装置、及びX線CT装置を用いて、ファスナ装着状態について、どの程度までの観察が可能かを検討した。

①非破壊検査機器によるファスナ装着状態の検証
 ・超音波探傷装置による計測

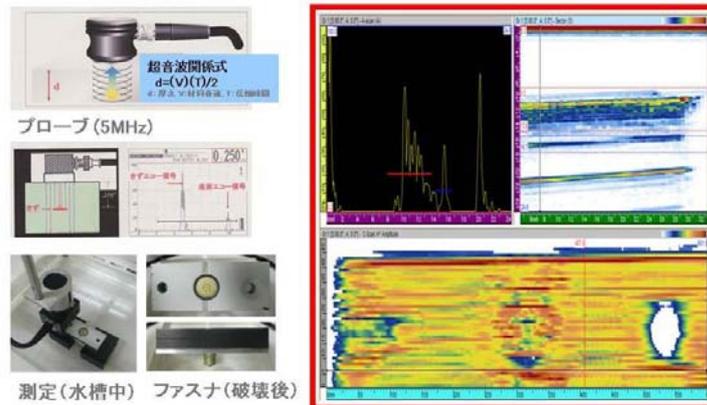


図4-3 超音波探傷装置による計測

破壊後のファスナについて、産業技術センターが保有する超音波探傷装置（オリンパス社製、OmniScanMX2-AP 型、フェーズドアレイプローブ：5MHz（64 素子））を適用した。測定結果（図4-3）より、内部欠陥によるものと思われるエコー信号が検出され、破壊した CFRP 積層板の層間剥離は、本装置により観察可能であった。

①非破壊検査機器によるファスナ装着状態の検証
 ・X線CT装置による計測

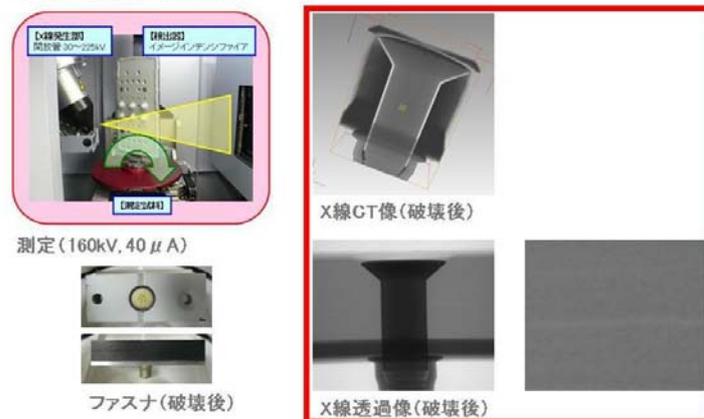


図4-4 X線CT装置による計測

昨年度に引き続き、破壊後のファスナについて、産業技術センターが保有する X 線 CT 装置（島津製作所社製、inspeXio SMX-225CT、測定条件：管電圧 160kV、管電流 40 μ A）を適用した。X 線 CT 測定では金属アーチファクトのない画像が得られるものの、試験片の内部欠陥までは検出することができなかった。また、X 線透過測定では試験片の横方向からの観察であれば、CFRP 積層板の層間剥離が観察可能であったが、得られた画像は鮮明とは言えない。

破壊した CFRP 積層板の層間剥離について、より鮮明な画像を得るために、X 線 CT 測定に用いる産業用の造影剤を検討し、これを破壊したファスナに適用したところ、X 線 CT 測定においても、CFRP 積層板の層間剥離の鮮明な画像（図4-5）が得られた。

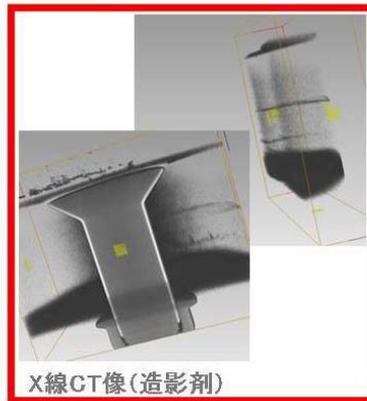


図4-5 造影剤の適用

(3) 耐候性試験後のファスナ装着状態の検証

ファスナが装着されたパネルが長期間保管された場合、どのような変化が現れるかを把握しておくことは、品質保証の観点からも重要である。ここでは、昨年に引き続き、パネルに耐候性試験を実施し、その前後でファスナの装着状態を計測して、比較した。なお、耐候性試験は、スガ試験機社製のサンシャインウェザーメーターS80型を用いて、ブラックパネル温度 $63 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、水の噴霧時間120分照射中18分の条件下で、最大5000時間まで行った。

昨年度来、指摘しているように、ファスナ面段差、各点の段差は、2000時間までに最大で $20 \mu\text{m}$ 大きくなっているが、その原因については全く分かっていない。そこで、耐候性試験後のパネルを詳細に観察したところ、表面に白色の粉体が付着していたため、この付着物について、電子顕微鏡による観察と赤外分光による分析を行った。

電子顕微鏡写真より、付着物は微細な粒子（直径 $1 \mu\text{m}$ 程度）が集まってできた直径数～数十 μm の凝集体であり、これにより、ファスナ面段差、各点の段差が $20 \mu\text{m}$ 程度増大したものと考えられた。また、赤外分光分析より、付着物の成分はシリカであることがわかり、耐候性試験で降雨を想定した噴霧水中に含まれるシリカスケールが原因と推定された。

以上、結果を総括すると、次のとおりである。

a) (接触式) 三次元測定機によるファスナ装着状態の検証

リベット部の深さが異なるファスナ（標準・浅目・深目）の基準データを測定した。また、リベット部が傾いたファスナ（ $0 \sim 3^{\circ}$ ）の基準データを測定した。これらを基準データ（真の値）として用いた。

b) 非破壊検査機器によるファスナ装着状態の検証

超音波探傷装置により、CFRP積層板の内部欠陥（層間剥離）が検出できた。また、X線CT装置により、CFRP積層板の内部欠陥（層間剥離）が検出できた。さらに、産業用の造影剤を開発し、適用することで、より鮮明な画像が得られた。

c) 耐候性試験前後のファスナ装着状態の検証

サンシャインウェザーメーター試験前後のファスナ面段差の変化は、降雨を想定した噴霧水中に含まれるシリカスケールによるものと推定した。

2-5 総合的なシステム化設計課題への対応

2-5-1 システム化設計

担当：株式会社エアロ・友機産業株式会社・国立大学法人名古屋工業大学

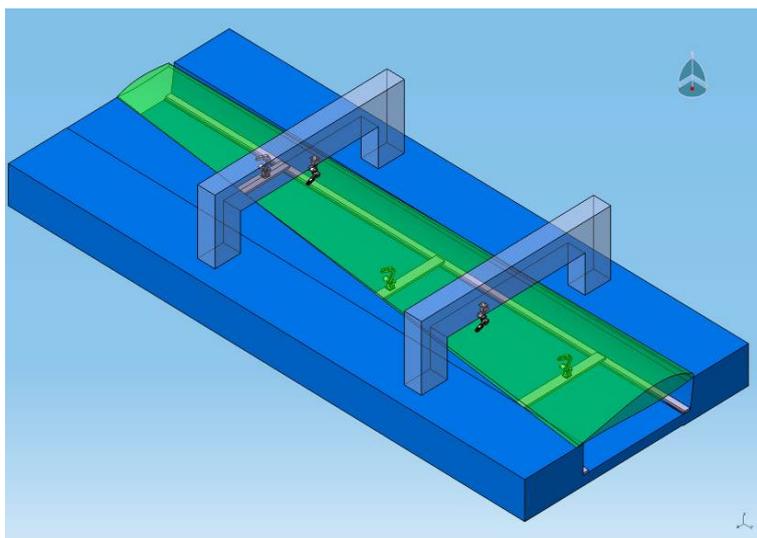
< 当初の実施目標 >

本研究終了後の事業化計画を達成するために、研究で確立した技術要素をどのように適応して実際に稼働させるか、株式会社エアロが窓口となって川下企業と検討していく。

その後、本研究で確立された技術を用いて航空機主翼を上下面同時かつ全自動で検査を行うことができるシステムを構築する。現状、本研究で開発中のシステム(ロボットを使用した全自動ファスナ装着状態検査システム)を上下面それぞれに複数搭載した門型の装置を検討しており、その装置に伴った全システムの設計を行うこととする。

< 取組内容と結果 >

これまでの研究内容を踏まえて、ファスナ自動検査装置の全体システムの構想を練り、検査ロボットおよび移動装置のサイクルタイム、検査ロボットの必要基数及び予算について検討を行った。下図は門型検査装置のイメージ図である。



ロボット移動時間や検査時間、検査対象ファスナ数などを考慮したところ、必要サイクルタイム内を達成できることから、片翼・片面にて1基のロボットがあれば検査可能であることがわかった。上面、下面にそれぞれ最低1基のロボットがあれば、サイクルタイム内にて検査することが可能であることがわかったので、上面、下面にそれぞれ1基の合計2基における概算の予算規模、またよりサイクルタイムを短縮させるために、上面、下面にそれぞれ2基の合計4基における概算予算を検討した。

2基案：3.83億円

4基案：5.46億円

2-6 プロジェクトの管理・運営

担当：公益財団法人科学技術交流財団

研究開発委員会を開催するなど研究体構成員相互の調整を図るほか、プロジェクトの進捗管理、報告書の取りまとめなど、プロジェクトの運営・管理を行った。

上記委員会の開催や定期的な進捗状況の報告の他に、機械装置の検収等に合わせてプロジェクトメンバーと随時打ち合わせを行い、研究開発の進捗状況及び再委託費の執行状況について確認するとともに、スケジュール管理及び経費の適切な執行についてアドバイスを行った。

第3章 全体総括

3年間の研究開発において、ロボットの位置決め、センサーでのファスナ深さ測定といった基盤技術の開発ができ、ロボットとセンサーを組み合わせ、目標であった検査タクトタイム7秒を上回る6秒以下の検査タクトタイムを達成することができた。その成果をもとに、事業化を目的としたシステム設計を行い、その概略はできあがった。

しかしながら、まだ課題は多く、すぐに787主翼のファスナ検査を行える状態ではない。さらに、センサーにおいても3年間の研究において新たな課題が判明した。プロジェクターを使用する3次元計測方式は、アルミニウムといった光沢のある材では光の乱反射によって測定がうまくできないといった事象が確認され、材によって得手不得手があることがわかった。

またレーザー式も川下企業の要求である0.05mm以内という目標は達成できているが、より精度を求められる検査の場合は測定条件を再度検討する必要があると考えられる。

よって、実用化へのステップとして、さまざまな検査対象、検査条件、川下企業の要求に対するセンサーの検討を行う必要があると考えられる。

実用化に当たっては、ロボット2基であっても4億円近い経費がかかるという予算上の問題や、1.5m程度のテストワークから30m超の実機になるというスケールの問題がある。このため、

次年度以降、

- ・主翼の横幅である8m程度のテストワークでの検証
- ・実機でのCATIAデータとのファスナ位置ズレの検証
- ・主翼の自動ファスナ挿入装置への展開
- ・主翼の自動穴あけ機への展開

などの課題を川下企業と協力しながら実証していき、ロボットと画像処理とを組み合わせた機器への応用を行っていく予定である。