三次元計測を用いた航空機用ファスナの自動外観検査システム*

鷺見 典克** 田口 亮*** 服部 公央亮† 保黒 政大† 梅崎 太造††

Automatic Visual Inspection System of Fasteners for Aircraft using 3D Measuring

Norikatsu SUMI, Ryo TAGUCHI, Koosuke HATTORI, Masahiro HOGURO and Taizo UMEZAKI

In this paper, we will propose an automatic inspection system for fasteners using 3D measurement. 80,000 fasteners are mounted on an airplane. Inspection for fasteners is currently operated by manual labor and takes about 4,000 hours for main wings of an airplane (in the case of Boeing 787). In the proposed system, fasteners on main wings are automatically scanned by a robot arm mounted a 3D measurement device, and inspected their depth and angles. We developed an algorithm to inspect the depth and angles of fasteners by using an image and a 3D shape. In the experimentation, the proposed system could inspect fasteners within 5.6 [sec]. The error range of measured depth is 8.47 [μm] and the error range of angles is 0.054 [deg].

Key words: Image processing, 3D measurement, Automatic inspection

1. 緒 言

近年、国内旅客機の就航に向けて国内航空機産業における機体製造の効率化が進んでいる。その取り組みの一つとして、航空機主翼組立におけるファスナ装着状態検査の自動化が望まれている。ファスナとはボルトやリベットの一種であり、機体を構成するアルミやCFRPパネルを接合するために利用される。一般的にファスナは金属導体でできており、接合する構造体がCFRPのような非金属体である場合、金属同士の接合と比べて接触抵抗が大きくなる。ファスナヘッドやその周辺に被雷した場合、電流の一部がファスナに流れ込むことで接触抵抗の大きい接合部で放電が発生する可能性がある。航空機主翼内部には燃料タンクが兼ね備えられており、ファスナの装着状態は機体の安全性に大きく影響する²⁾。そのため、ファスナ装着後の検査が必要不可欠であり、現在は全てのファスナに対して接触式測定器であるデプスゲージを用いた人手による検査が実施されている。しかし、人手による検査は非効率的であり、例えばボーイング787の主翼に装着されるファスナは8万本にも及ぶため、1機あたり4千時間の工数を要する。さらに、航空機業界では製造工程のトレーサビリティが重要視されており、検査記録を残す必要がある³⁾。しかし、現在は検査員が検査結果を手書きで記録しているため、非効率的である。

そこで本研究では、三次元計測を用いたファスナ装着状態の自動検査システムを提案する。現在のファスナ装着状態検査では、パネル面からのリベット面の深さが規定範囲内であるかを良否判定基準として用いられている。本研究においてもその基準に基づき、ファスナとその周囲の翼面パネル部分の三次元計

測結果を用いて自動検査を行う。ファスナ全体が規定範囲内であるかのみでなく、パネル面に対するファスナ重心の深さとファスナ面の傾きを算出することで、ファスナ装着状態の記録データ軽量化するとともに、データの確認を容易にする。さらに、ノイズに対してロバストな深さ・重心算出を行うことで、計測データにノイズが含まれる場合においても、ファスナの状態を正しく検査することが可能となる。提案法は検査の自動化とともに、ファスナ装着状態の画像や三次元形状・翼面パネルに対するファスナの傾き・中心の深さを定量データとして記録可能であり、トレーサビリティの向上が見込める。

現在、画像処理技術を用いた航空機主翼の外観検査に関する研究が進んでいる^{4)~6)}。これらの外観検査のうち、ファスナの検査に関する研究としては、ファスナ周辺にできる亀裂を検査する研究が行われている。Melらは小型遠隔制御ロボットを用いた主翼表面上の亀裂に対する検査手法を提案している⁷⁾。ロボットを滑走させて撮影した画像からエッジ特徴によりファスナ穴を検出して、ファスナ穴付近の亀裂をニューラルネットワークにより検出している。Yimingらは光磁気を用いて機体表面と表面下の様子を撮影し、ファスナ付近にある亀裂を検出するシステムを提案している⁸⁾。撮影した光磁気画像を閾値で二値化するとファスナが斜めに取り付けられたものは二値化ラベルの形状が変化するため、その特徴を用いて亀裂を検出しており、実験では誤検出率8.3%で検出可能と示されている。しかし、これらの研究ではファスナの装着状態については検討されていない。特に光磁気を用いた手法では推定したファスナの傾きを推定することで亀裂を検出しているが、ファスナに取り付け深さの異常を検出することは不可能である。

本研究ではプロジェクタとカメラを用いて、ロボットアームに搭載可能な小型三次元計測器を構築し、ロボットアームと組み合わせた自動検査システムを提案する。ロボットアームにより計測器をファスナが計測可能な位置へ移動させた後に、プロジェクタからパターン光を投影して、それをカメラで撮影することで三次元計測を行う。計測時の撮影画像と復元した三次元

* 原稿受付 平成 27 年 5 月 7 日

掲載決定 平成 27 年 9 月 4 日

** 学生会員 名古屋工業大学大学院 (愛知県名古屋市御所町)

*** 名古屋工業大学大学院

† 中部大学工学部(愛知県春日井市松本町)

†† 正 会 員 名古屋工業大学大学院

形状からファスナ装着状態の良否判定に必要なファスナの傾きと深さを算出する。システム自動化のため、Snakesを用いたファスナ部の検出・切り出し手法、RANSACを用いた傾きと深さの測定手法を提案する。さらに実用化に向けて、接触式測定器による測定結果と比較してシステムの検査精度を評価し、検査に要する時間を評価した。2章ではシステムの概要について述べ、3章では検査手法を説明する。4章では接触式測定器で測定したファスナサンプルの計測・評価実験を通して、システムの有効性を評価する。

2. システム概要

2.1 検査対象

本研究ではCFRP製の主翼に装着されたファスナの検査を目標とする。検査対象のファスナの直径は12[mm]と10[mm]である。翼面パネルを模して作成した実験用サンプルを図1に示す。またファスナの拡大図を図2に示す。10[mm]と12[mm]のファスナではパネル表面の塗装、ファスナの材質が異なる。12[mm]のサンプルはCFRPにファスナを装着したものである。10[mm]のサンプルはアルミの平板にファスナを装着したものであり、外観をCFRPに似せるため、パネルを白、パネルとファスナの境界部を黒に塗装してある。またファスナにはそれぞれ文字が打刻されており、ファスナに打刻される文字列や箇所にはばらつきがある。本研究では、画像上に撮影された翼面パネルとファスナの領域をそれぞれパネル部・ファスナ部、翼面パネルとファスナの間に存在する領域を境界部と呼称する。

Fig.1 Samples of fasteners

Fig.2 Enlarged view of fasteners

2.2 検査装置・フロー

検査装置は、カメラとプロジェクタを用いて構築した小型三次元計測器と、それを搭載したロボットアームで構成される。三次元計測器には、ロボットアームに搭載可能な小型計測器を構築した。計測器の外観を図3(a)に示す。三次元計測器はカメラとプロジェクタで構成されており、カメラにはPointGrey社製のモノクロカメラFlea3（使用解像度2448×2048）、プロジェクタには3M社製のLCOS方式プロジェクタMP180（解像度1280×768[pixel]）を使用した。図3(b)に計測器の上面図を示すように、視差は130[mm]、輻輳角は30[deg]、重量は1.0[kg]になるように設計した。図4にシステム全体の検査フローを示す。まず航空機のCADデータに基づいて、ロボットアームを各ファスナが計測可能な位置に移動する。ロボットアームの移動後に三次元計測を行い、取得した画像と三次元形状から深さと傾きを算出することで、装着状態を検査する。計測方法と自動検査アルゴリズムについては3章で述べる。

Fig.3 3D measurement device

Fig.4 Flow chart of inspection method

3. 検査手法

3.1 計測手法

計測手法にはパターン投影法の1つである位相シフト法を用いる⁹⁾。位相を $\pi/2$ ずつシフトした4枚の正弦波パターンを投影して、撮影画像から位相を復元する。プロジェクタを基準とした絶対位相を求めるために、図5に示すように周期の異なる正弦波パターンを用いて大域位相と局所位相を復元する。そして大域位相を基に局所位相を位相連結することで空間分解能の高い絶対位相を得る手法を用いる¹⁰⁾。この計測手法では撮影画像8（大域位相4+局所位相4）枚のみで三次元計測でき、高速かつ高精度に三次元形状が得られる（図6）。

(a) Global phase (b) Local phase

Fig.5 Captured images of fringe pattern

Fig.6 Result of 3D Measurement and cross sections

3.2 ファスナ部・パネル部の検出

ファスナの深さと傾きを算出する前処理として、画像からフ

ファスナ部とパネル部の検出を行う。計測時間短縮のため投影枚数を増やすことなく、計測時に撮影する正弦波パターンの画像のみからテクスチャ画像を生成する。局所位相を求めるために投影した4枚の正弦波パターン画像を平均化することで、図7(a)に示すようなファスナ・パネルのテクスチャ画像が得られる。画像中にはパネル面とプロジェクタの傾きに伴う、シェーディングが存在する。そのため画像の輝度に対して近似平面を行い、テクスチャ画像との差を求めることでシェーディングの除去された画像（図7(b)）を得る。

Fig.7 Result of shading correction

シェーディング除去されたファスナのテクスチャ画像を用いて、ファスナ部の検出を行う。まず、大まかなファスナ位置を検出するため、画像に対して輝度で二値化することでファスナの位置を検出する。二値化画像に対するラベリング処理により決定したラベルを基にファスナを含む領域を切り出す。ファスナ部の切り出しには輪郭抽出法の一つである Snakes を用いる¹¹⁾。Snakes では、式(1)で定義されるエネルギー E_{snakes} を最小化することで、輪郭点集合 $U = \{v_i\}$, ($i=1 \sim N$, $v_i = (x_i, y_i)$) を求める。ただし、式(1)に用いる各エネルギー関数の係数 α, β, γ には、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ の制約式を用いる。式(1)において一般的に用いられる各エネルギー関数は、式(2)~(4)のように定義される。このとき、 $\bar{d}$ は隣接する輪郭点 v_i 間のユークリッド距離の平均値、 ∇I は輪郭点を中心としたウィンドウ内の各画素における XY 方向の微分値をそれぞれ合計した2次元の勾配ベクトルである。各エネルギー関数 $E_{cont}, E_{curv}, E_{image}$ は、それぞれ全輪郭点間の平均距離に対する輪郭点間の距離の差、輪郭線の曲率、輪郭点周辺のエッジに関するエネルギーを表す。

$$E_{snakes} = \sum_{i=1}^N \{ \alpha E_{cont}(v_i) + \beta E_{curv}(v_i) + \gamma E_{image}(v_i) \} \quad (1)$$

$$E_{cont}(v_i) = | \bar{d} - |v_{i+1} - v_i| | \quad (2)$$

$$E_{curv}(v_i) = |v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}|^2 \quad (3)$$

$$E_{image}(v_i) = -|\nabla I|^2 \quad (4)$$

$$E_{image}(v_i) = -|\nabla I|^2 \cos \theta = -|\nabla I|^2 \frac{\vec{c} \cdot \nabla I}{|\vec{c}| |\nabla I|} \quad (5)$$

$$seg.err. = \sum_{p \in P} \delta(L_p - B_p) + \sum_{p \in P} \delta(L_p - O_p) \quad (6)$$

式(4)で定義されるエネルギー関数を用いた Snakes は、エッジ強度のみを用いているため、輪郭が隣接して複数存在する場合に収束する場所が不確定となる。本研究ではファスナの輪郭のみを検出するために、ファスナ中心からの輝度変化に注目した。ファスナ部から境界部への輪郭は輝度が小さくなり、境界部からパネル部への輪郭は輝度が大きくなる。この輝度変化にあわせて、Snakes における内部エネルギーの関数を式(5)のよう

に定義し、図8(b)に式(5)のエネルギー算出方法の模式図を示す。ただし、全輪郭点の重心座標と v_i 間のベクトルを $\vec{c}$, ∇I と $\vec{c}$ のなす角を θ とすると、輪郭点の初期位置はファスナラベルの重心座標から円周状に等間隔で配置する。図8(a)の二値化画像に赤点で示した重心座標を初期位置としたとき、算出されるエネルギーの分布を図8(c)に示す。ファスナの輪郭においてエネルギーが低くなることが確認できる。Snakes のエッジに関するエネルギー関数に式(4)を用いた手法を従来法、式(6)を用いた手法を提案法として比較した。提案法で使用するパラメータは予備実験により $\alpha = 0.10, \beta = 0.65, \gamma = 0.25$ を用いることとした。両手法によるファスナ部の輪郭検出結果を図8(d)に示す。提案法を評価するため、ファスナ領域を手動でマスクしたデータを正解データとして、それに対して誤検出した画素数を評価する。画像全体の画素の集合を P とすると、ファスナ領域の正解ラベルを $F = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}$, それ以外の正解ラベルを $B = \{b_1, b_2, \dots, b_p\}$, 得られた切り出し結果を $L = \{l_1, l_2, \dots, l_p\}$ とする。このときファスナ領域を領域外と誤検出したものと、領域外をファスナ領域と誤検出したものの和を segmentation error として式(6)により評価する。評価結果（図9）に示すように、提案法によりファスナ部の誤検出した画素数が低下しており、切り出し精度の向上を確認した。

Fig.8 Result of segmentation by Snakes

Fig.9 Segmentation error of detection by Snakes

3.3 平面・円推定処理

ファスナ部には文字が打刻されており、文字領域はファスナ面より凹んでいる。打刻される文字の種類や打刻箇所はファスナごとに異なるため、文字領域を動的に除外してファスナの平面を推定する必要がある。これに対して、ファスナとパネルの各面に対する平面推定方法として Random Sample Consen-

sus(RANSAC)を用いたロバスト推定法を適用する¹²⁾。Snakesにより検出された輪郭内部をファスナ領域として、ファスナ領域全体の点群を使用して RANSAC により平面推定を行う。このとき、RANSAC で推定した最適な仮説平面の inlier 点群のみを用いて、さらに最小二乗法で平面を推定した平面を検査に使用するファスナ面とする。ファスナ面には打刻された文字が含まれるため、主に文字領域が outlier として除外したい領域に当たる。さらに、ファスナ面・パネル面は金属物体でできているため、鏡面反射に起因するノイズも平面推定の outlier として取り扱う必要がある。12[mm]、10[mm]ファスナに対して推定平面からの許容誤差をそれぞれ ± 0.1 [mm]、 ± 0.05 [mm]としたときの処理結果を図 10 に示す。左が撮影画像、中央が深度画像、右が RANSAC により選択された inlier ピクセルを白・outlier ピクセルを黒として表した画像である。処理結果からは、深度の安定したファスナ面を inlier、ファスナ上の計測ノイズと思われる点群と文字領域が outlier として判定されていることが確認できる。このことより、文字領域を除外したロバストな平面推定が行われていると言える。文字領域の判定精度を評価するため、12[mm]、10[mm]ファスナの各 3 サンプルについて、文字領域を outlier としたマスクデータを作成した上で、判定精度を確認した結果、12[mm]ファスナでは outlier に対しては 49.0%、inlier に対しては 88.3%が正しく判定されていることを確認している。最終的に平面推定に使用される点群中の文字領域の平均点数は 80,147 点中 5,951 点から 68,555 点中 3,046 点(7.4 → 4.4%)に減少している。同様に 10[mm]ファスナでは outlier に対しては 49.0%、inlier に対しては 88.3%が正しく判定されており、平面推定に使用される点群中の文字領域の平均点数は 43,294 点中 3,130 点から 38,718 点中 2,616 点(7.2 → 4.5%)に削減されている。文字領域中の点数が顕著に削減されていることから、文字領域に多く含まれるノイズ成分を効果的に削減できていると推測できる。RANSAC によるロバスト推定が最終的な検査結果に与える影響については、4 章の評価実験に最小二乗法を用いた結果と比較をして示す。

続いて深さを算出するため、推定したファスナ面を基にファスナ部の三次元座標の中心を算出する。ファスナ部が円形であることから、Snakes により切り出したファスナ部の輪郭の点群を用いて、推定したファスナ平面上で円推定を行う。輪郭上の三次元点群を推定したファスナ平面に射影することで、平面上で最小二乗法による円推定を行い、ファスナ部の三次元座標上の中心を求める。検査するファスナの径は検査時には既知であるため、推定されたファスナ部の中心座標を用いてパネル面の

Fig.10 Result of estimating a flat of the fastener by RANSAC

推定を行う。具体的には、今回対象としている直径 10 もしくは 12[mm]ファスナの場合、ファスナの中心座標より半径 10[mm]から ± 0.2 [mm]の範囲にある点群をパネル領域として、ファスナ面と同様に RANSAC により平面推定を行う。

3.4 ファスナの傾き・深さ算出手法

前節で述べた処理により求められたファスナの中心座標から一定距離をパネル部、Snakes により切り出された領域をファスナ部として計測した三次元点群を用いて、それぞれの近似平面を求めることで、図 11 に示すように傾き θ ・深さ D を算出する。ファスナ部とパネル部から求められた近似平面における法線ベクトルをそれぞれ $\vec{F}$ 、 $\vec{P}$ とし、式(7)により傾きを算出する。三次元座標を XYZ 座標系とした場合、推定したファスナ面から算出されるファスナ部の中心座標を (C_X, C_Y, C_Z) 、推定したパネル面の近似平面の方程式を $aX + bY + cZ + d = 0$ とすると、パネル面からのファスナ中心の深さは式(8)に示すように算出できる。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\vec{F} \cdot \vec{P}}{\|\vec{F}\| \|\vec{P}\|} \quad (7)$$

$$D = \frac{|aC_X + bC_Y + cC_Z + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (8)$$

Fig.11 Conceptual diagram of calculation angle and depth cross section

4. 評価実験

4.1 実験条件

図 1 に示したファスナサンプルを用いて評価実験を行う。精度の比較対象として、カールツァイス社製の接触式測定器 UPMC550CARAT を用いて計測した結果を真値として扱う。真値の測定箇所として、パネル部はファスナ中心から半径 10[mm]の位置、ファスナ部は 12, 10[mm]ファスナではそれぞれ半径 5, 3.5[mm]の位置を測定した(図 12)。

Fig.12 Measurement points

Fig.13 Experiment environment

Fig.14 Experiment robot arm and top view of wing panel

測定時はファスナ中心から円周状に測定子を走査して得られた測定結果からファスナの深さ・傾きを算出した。本研究が提案する検査アルゴリズムの精度を評価するため、三菱電機社製のロボットアーム RV-4FL に三次元計測器を搭載した状態で計測したデータを用いる。またロボットアームで指定ファスナの位置へ計測器を移動させた後に、ロボット内のサーボモータを駆動させた状態で計測した。これによりモータによる振動を考慮した、実利用に近い環境での検査精度が検証可能となる。図 13 に実験環境を示す。サンプル数は、12[mm] ファスナ 7 個、10[mm]ファスナ 10 個であり、1 個のファスナに対して 6 回繰り返し計測した。実際に検査を行う際と同様にロボットアームを各ファスナの正面へ自動で移動させて、カメラに対してパネル平面がほぼ正対するという条件のもとで撮影されるように制御した上で、実験用データを撮影した。

4.2 評価結果・考察

真値との誤差を基に母標準偏差を推定するため、カイ二乗分布を用いて上側検定(信頼区間 95%)した結果を表 1, 2 に示す。RANSAC を用いた平面推定法の有効性を確認するために、最小二乗法を用いた場合の実験結果を併記する。最小二乗法を用いた手法では、ファスナ・パネル上の三次元点群全てを用いた。RANSAC を用いた結果では、打刻された文字やパネル表面のノイズに対してロバストな深さ・傾きの推定できるため、より高精度に算出可能であることを確認できる。提案システムの精度評価にあたり、航空機 1 機につきファスナは 8 万本であるため、8 万本の中から信頼区間から外れるファスナが 1 本未満となるように、信頼区間を 5σ として評価する。母標準偏差から信頼区間 5σ でシステムの計測誤差を評価すると、12[mm]ファスナでは深さ 42.8[μm]、傾き 0.269[deg]、10[mm]ファスナでは深さ 42.3[μm]、傾き 0.185[deg]以内の計測誤差に収まる。

続いてシステムが検査に要する時間を評価するため、図 14 に示す実験環境と翼面パネルを用いた。ロボットアームを水平方向へも移動させるため、長さ 1000[mm]のスライドレールに乗せた状態で、翼面パネルに装着された 90 個のファスナすべてを検査し終わるまでの時間を計測した。実験において、ファスナ一つ当たりにより要した各工程の平均所要時間と合計検査時間を表 3、計算処理に使用したコンピュータの仕様を表 4 に示す。三次元計測後に行うファスナの傾き・深さの算出に関しては、ロボットアームの移動中・計測中にも実行可能であるため、本シ

ステムによる検査時間は 5.6[秒/個]となる。

航空機の検査基準では、ファスナは設計値から $\pm 200[\mu\text{m}]$ 以内で検査される必要があると定められている。そのためシステムの計測誤差を考慮すると、システムが設計値から $\pm 150[\mu\text{m}]$ 以内の測定値を示したファスナには異常がなく、 $\pm 250[\mu\text{m}]$ 以上を示すファスナには異常があると判定できる。しかし、設計値から $\pm 150 \sim 250[\mu\text{m}]$ の測定値を示したファスナは、システムの判定が保証できない。そのため、システムの判定が保証できないファスナに対しては人が手動で再検査を行うことで、本検査システムを利用した検査が運用可能である。

Table 1 Standard deviation in depth

Diameter of fasteners [mm]	Standard deviation [μm]	
	Proposed (RANSAC)	Least squares method
12	8.58	93.2
10	8.47	11.4

Table 2 Standard deviation in angle

Diameter of fasteners [mm]	Standard deviation [deg]	
	Proposed (RANSAC)	Least squares method
12	0.054	0.725
10	0.037	0.136

Table 3 Average of cycle times

Item	Time [sec]
Movement of robot arm	1.9
Capturing time	3.7
Computational time	4.8
Total time	5.6

Table 4 Specification of computer

CPU	Intel Core i7 2.3 [GHz]
RAM	8 [GB]

5. 結 言

本研究では、小型三次元計測器とロボットアームを組み合わせた航空機用ファスナの自動非接触検査システムを開発した。三次元計測時に撮影した正弦波パターン画像のみから、Snakesを用いてファスナの輪郭特徴を基にファスナ部を高精度に切り出す手法を開発した。実利用を想定してロボットアームの移動を含めた計測実験を行い、ファスナの装着状態として翼面パネルに対するファスナの傾き、中心の深さをロバストに算出できることを確認した。接触式測定器の測定結果と比較して求めた誤差を評価した結果、 5σ の余裕を考慮した場合においても12[mm]ファスナでは深さ42.8[μm]・傾き0.269[deg]、10[mm]ファスナでは深さ42.3[μm]・傾き0.185[deg]以内の誤差で検査可能であることを確認した。さらに検査時間5.6[秒/個]を達成し、従来の人手による検査よりも検査時間の短縮が見込める。

従来の人手による検査と比較して、検査品質の安定化、作業員の安全性の向上、検査時間の短縮という観点から、提案システムは有用である。さらに、検査データを保存することで、トレーサビリティが保証される。今後、実際に検査システムへの導入を想定した実地運用試験を通して、要求される三次元計測の安定性・計測環境の構築を明らかにし、実用化へとつなげていきたい。また、航空機には実験で使用したファスナよりも小さな物も使用されることがあるため、小型ファスナへの対応も進めたい。

謝 辞

本研究の一部は、経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機主翼組み立てにおけるファスナ装着状態の革新的な検査技術の開発」の補助金助成を受けたものであり、(株)エアロ、あいち産業科学技術総合センターをはじめとする関係諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 山本匡毅：日本における航空機産業の動向と新規参入に向けた展開—地域レベルでの動きを中心として—, 機械経済研究, **42**, 43 (2011).
- 2) 山本和男：航空機における複合材利用と新たな雷害対策技術, 電気学会論文誌 B, 電力・エネルギー部門誌 **133**, 5 (2013).
- 3) 海上泰生：航空機産業にみられる部品供給構造の特異性—極めて高い安全性要求が生み出す特徴的な規律と参入障壁—, 日本政策金融公庫論集, **11**, 21 (2011).
- 4) Rafia Mumtaz, Mustafa Mumtaz, Atif Bin Mansoor and Hassan Masood: Computer Aided Visual Inspection of Aircraft Surfaces, IJIP, **6**, 1 (2012).
- 5) I. Jandjsek, J. Jakubek, M. Jakubek, P. Prucha, F. Krejci, P. Soukup, D. Turecek, D. Vavrik and J. Zemlicka: X-ray inspection of composite materials for aircraft structures using detectors of Medipix type, JINST, **9** (2014).
- 6) Mustafa Mumtaz, Atif Bin Masoor and Hassan Masood: A New Approach to Aircraft Surface Inspection Based on Directional Energies of Texture, ICPR, (2010).
- 7) Mel Siegel and Priyan Gunatilake: Remote Enhanced Visual Inspection of Aircraft by a Mobile Robot, IEEE ETIMVIS, **3029**, 2 (1998).
- 8) Yiming Deng, Xin Liu, Yuan Fan, Zhiwei Zeng, Lalita Udpa, and William Shih: Characterization of Magneto-Optic Imaging Data for Aircraft Inspection, IEEE Transactions on magnetism, **42**, 10 (2006).
- 9) 森本吉春, 松井徹, 藤垣元治：光干渉縞や投影格子の波形の位相を用いた三次元形状・変位計測, 情報処理学会誌論文誌, **47**, 10 (2006).
- 10) 傳田壮志, 大橋健, 江崎俊郎：位相シフト法を用いた高速な3次元計測手法の提案, 電子情報通信学会研究報告, PRMU, **99**, 5 (1991).
- 11) A.W.Michael Kass, D. Terzopoulos: Snakes: Active contour models, Int. J. Computer Vision, **1**, 4 (1998).
- 12) Martin A. Fischler, Robert C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communication of the ACM, **24**, 6 (1981).