

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6876407号
(P6876407)

(45) 発行日 令和3年5月26日(2021.5.26)

(24) 登録日 令和3年4月28日(2021.4.28)

(51) Int.Cl.

F 1

GO 1 N 25/72	(2006.01)	GO 1 N 25/72	K
GO 1 N 29/06	(2006.01)	GO 1 N 29/06	
GO 1 N 29/44	(2006.01)	GO 1 N 29/44	
GO 1 N 29/265	(2006.01)	GO 1 N 29/265	

請求項の数 20 外国語出願 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2016-210424 (P2016-210424)
(22) 出願日	平成28年10月27日 (2016.10.27)
(65) 公開番号	特開2017-129560 (P2017-129560A)
(43) 公開日	平成29年7月27日 (2017.7.27)
審査請求日	令和1年10月25日 (2019.10.25)
(31) 優先権主張番号	15/004,119
(32) 優先日	平成28年1月22日 (2016.1.22)
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国(US)

(73) 特許権者	500520743 ザ・ボーイング・カンパニー The Boeing Company アメリカ合衆国、60606-2016 イリノイ州、シカゴ、ノース・リバーサイド・プラザ、100
(74) 代理人	100108453 弁理士 村山 靖彦
(74) 代理人	100133400 弁理士 阿部 達彦
(74) 代理人	100163522 弁理士 黒田 晋平
(74) 代理人	100154922 弁理士 崔 允辰

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】複合構造物におけるリンクル特徴付けのための赤外線サーモグラフィ方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複合構造物を検査するための方法であって、

(a) 赤外線カメラを、前記赤外線カメラの視野が前記複合構造物の表面上の検査領域を包含する位置に移動させるステップと、

(b) 少なくとも 1 つの閃光灯を起動して、前記検査領域の少なくとも一部を照らす光を出力するステップと、

(c) 前記赤外線カメラを起動して、前記赤外線カメラの前記視野が少なくとも前記検査領域を包含する間に赤外線撮像データを取得するステップと、

(d) 前記赤外線撮像データを処理して熱痕跡を生成するステップと、

(e) 前記熱痕跡が、指定された閾値内で、基準データベースに格納された多数の基準熱痕跡の何れか 1 つに類似するか否かを判定するステップであって、前記基準熱痕跡はリンクルの存在を示す 1 つまたは複数の特性を有し、前記リンクルは前記複合構造物内の波状の内部欠陥である、ステップと、

を含む、方法。

【請求項 2】

ステップ (d) は、時間に関する前記赤外線撮像データの一次導関数を計算するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

ステップ (d) は、時間に関する前記赤外線撮像データの二次導関数を計算するステッ

10

20

プを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記熱痕跡が指定された閾値内で前記基準熱痕跡の何れか 1 つと類似しない場合、前記複合構造物を受理するステップをさらに含む、請求項 1、2、または 3 に記載の方法。

【請求項 5】

(f) 前記検査領域の表面下のリンクルの存在を示す赤外線撮像データを用いてリンクルの波長を測定するステップと、

(g) 前記指定された閾値内において、ステップ (d) で生成された前記熱痕跡に類似する基準熱痕跡に対応する前記基準データベースから伝達関数を取り出すステップと、

(h) 前記取り出した伝達関数を前記測定された波長に適用して、前記リンクルの実際の波長を推定するステップと、

をさらに含み、

ステップ (f) から (h) は、前記熱痕跡が指定された閾値内で前記基準熱痕跡の何れか 1 つに類似する場合に実施される、

請求項 1 から 4 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

(i) 超音波配列振動子を、前記超音波配列振動子が前記複合構造物の前記表面上の前記検査領域をスキャンできる位置に移動させるステップと、

(j) 前記超音波配列振動子を起動して、超音波を前記検査領域内の前記複合構造物に送信するステップと、

(k) 前記検査領域から返された超音波エコーを表す超音波撮像データを取得するステップと、

(l) 前記リンクルの実際の振幅を前記超音波撮像データに基づいて推定するステップと、

(m) リンクルの波長振幅比を、前記推定された実際の波長および前記リンクルの推定された実際の振幅を用いて計算するステップと、

(n) ステップ (m) で計算した前記リンクルの波長振幅比が許容可能範囲外にあるか否かを判定するステップと、

をさらに含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記リンクルの波長振幅比が前記許容可能範囲外にない場合、前記複合構造物を受理するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

前記リンクルの波長振幅比が前記許容可能範囲外にある場合、前記複合構造物を拒絶するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 9】

前記リンクルの波長振幅比を、方位情報とともに、応力モデルに入力して、前記複合構造物の性能に及ぼす前記リンクルの影響をモデル化するステップをさらに含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 10】

複合構造物を検査するための方法であって、

(a) 赤外線撮像データを、前記複合構造物の表面上の検査領域から、赤外線カメラを用いて取得するステップであって、前記赤外線撮像データは前記検査領域の表面下のリンクルの存在を示し、前記リンクルは前記複合構造物内の波状の内部欠陥である、ステップと、

(b) 前記赤外線撮像データを処理して、前記検査領域内の前記複合構造物の表面下の前記リンクルの第 1 のリンクル次元パラメータの値を処理するステップと、

(c) ステップ (a) に続いて、超音波撮像データを、前記複合構造物の前記表面上の前記検査領域から、超音波配列振動子を用いて取得するステップと、

(d) 前記超音波撮像データを処理して、前記検査領域内の前記複合構造物の表面下のリ

10

20

30

40

50

ンクルの第2のリンクル次元パラメータの値を推定するステップと、
 (e) 前記第1のリンクル次元パラメータおよび第2のリンクル次元パラメータの関数であるリンクル・パラメータの値を計算するステップと、
 (f) ステップ(e)で計算された前記リンクル・パラメータの前記値が値の許容可能範囲の内部または外部にあるかどうかに応じて、前記複合構造物のステータスを決定するステップと、
 を含む、方法。

【請求項11】

ステップ(c)は、時間に関する前記赤外線撮像データの一次導関数を計算するステップを含む、請求項10に記載の方法。 10

【請求項12】

ステップ(c)は、時間に関する前記赤外線撮像データの二次導関数を計算するステップを含む、請求項10に記載の方法。

【請求項13】

前記第1のリンクル次元パラメータはリンクル波長である、請求項10から12の何れか1項に記載の方法。

【請求項14】

前記第2のリンクル次元パラメータはリンクル振幅である、請求項13に記載の方法。

【請求項15】

前記リンクル・パラメータは前記リンクル波長と前記リンクル振幅の比である、請求項14に記載の方法。 20

【請求項16】

赤外線サーモグラフィ時間-温度曲線から導出した前記リンクル波長と前記リンクル振幅の比を、方位情報とともに、応力モデルに入力して、前記複合構造物の性能に及ぼす前記リンクルの影響をモデル化するステップ、をさらに含む、請求項15に記載の方法。

【請求項17】

複合材料から作製され厚みを有する複合構造物内の特徴を測定するための方法であって、

(a) 検査すべき前記複合構造物と同一の複合材料から作製され同一の厚みを有する多数の参考基準で測定されたリンクル波長に真のリンクル波長を関連付ける伝達関数を含む基準データベースを確立するステップであって、前記基準データベースはさらに、伝達関数ごとに、前記多数の参考基準におけるリンクルの少なくとも既知の深度、振幅および波長を表す関連付けられたリンクル次元データを含み、前記リンクルは前記複合構造物内の波状の内部欠陥である、ステップと、 30

(b) 少なくとも1つの閃光灯を起動して、前記複合構造物の表面上の領域を照らす光を出力するステップと、

(c) 赤外線カメラを起動して、ステップ(b)で照らされた前記領域の少なくとも一部における、前記複合構造物の前記表面の温度を表す赤外線撮像データを取得するステップと、

(d) 前記赤外線撮像データを処理して、前記照らされた領域の少なくとも一部の下方にある前記複合構造物の一部におけるリンクルの存在を特定するステップと、 40

(e) 前記複合構造物のリンクル部分および周囲の非リンクル部分の間で最大コントラストを得るのに必要な時間を測定するステップと、

(f) 前記赤外線撮像データにより画像化されたリンクルの波長を測定するステップと、
 (g) ステップ(e)で測定した時間に基づいて前記リンクル部分の深度を推定するステップと、

(h) 前記推定された深度および前記測定された波長を用いて、伝達関数を前記基準データベースから取り出すステップと、

(i) 前記取り出した伝達関数を前記測定された波長に適用して、前記複合構造物の前記リンクル部分における前記リンクルの実際の波長を推定するステップと、 50

を含む、方法。

【請求項 18】

ステップ(d)は、時間に関する前記赤外線撮像データの一次導関数を計算するステップを含む、請求項17に記載の方法。

【請求項 19】

ステップ(d)は、時間に関する前記赤外線撮像データの二次導関数を計算するステップを含む、請求項17に記載の方法。

【請求項 20】

(j)超音波配列振動子を起動して超音波を前記複合構造物の前記リンクル部分に送信するステップと、

10

(k)前記複合構造物の前記一部から返された超音波エコーを表す超音波撮像データを取得するステップと、

(l)前記リンクルの実際の振幅を前記超音波撮像データに基づいて推定するステップと、

(m)リンクルの波長振幅比を、前記推定された実際の波長および前記リンクルの推定された実際の振幅を用いて計算するステップと、

(n)ステップ(m)で計算した前記リンクルの波長振幅比が許容可能範囲外にあるか否かを判定するステップと、

をさらに含む、請求項17から19の何れか1項に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

本開示は一般に構造または部分の非破壊検査に関し、より具体的には、複合構造物または同様な構造のような積層構造内のリンクルのような異常を特徴付けるかまたは評価するためのシステムおよび方法に関する。

【背景技術】

【0002】

新たな、軽量複合材料および設計は、商用航空機および他の航空宇宙車両に関する航空宇宙業界ならびに他の業界でより広く利用されつつある。これらの複合材料を用いた構造は、軽量で高強度の構造を形成するために積層できるファイバ強化プラスチック材料の複数のプライまたは層を用いて形成しうる。航空宇宙アプリケーション向けの複合積層材構造の製造は、リンクルのサイズに基づいて当該構造の性能に影響しうるプライの不要な面外のリンクリングをもたらしうる。航空機業界のような業界における生産部品に対する品質保証および認証は、当該部品が特定の設計標準および仕様を満たすように構築されることを要求する。幾つかの部品に対して、リンクルのサイズに基づく標準的な許容基準がありうる。したがって、構造または部品内の任意のリンクルのサイズを正確に検出し測定できることが望ましい。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】米国特許第7,186,981号明細書

40

【特許文献2】米国特許出願第14/049,974号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

幾つかのリンクルは表面から視覚的に特定することができる。しかし、それらは視覚的に定量化できず、したがって、十分な注意があれば、(しばしば、長さLを高さDで除した)リンクルのサイズを測定するための手段を提供できない限り、最悪のケースを想定しうる。また、当該構造内深くのリンクルは表面から全く視覚的に見ることができない。リンクルを特定し定量化するための超音波方法が開発されている。しかし、超音波方法の主

50

な欠点は、当該方法はリンクルの下を「見る」ことができず（当該構造の背面側にはアクセスできない）、したがって、「良好な」材料の量が未知であるという点である。したがって、その最大ピークから背面へのリンクルの最大厚みを仮定しなければならないかもしれない。この結果、過度に控えめな強度予測のノックダウン、および、不要で高価な修理となりうる。当該超音波方法の別の欠点は一般に、データを収集するのに長時間かかるということである。別の検査方法を通じて当該プロセスを高速化し、依然としてリンクルのサイズを特定および／または定量化するための手段が利用可能であるならば、これは有利であるはずである。特に、機体および機体部を製造するためのプロセスは、リンクルを検出し定量化するための広範囲の方法から利益を得ることができよう。

【課題を解決するための手段】

10

【0005】

本明細書で開示する発明特定事項は赤外線撮像データを処理することによって複合構造物内のリンクルを特定し定量化するための方法に関する。赤外線カメラの視野内の全ての画素に対する温度対時間のプロフィールが計算され、熱痕跡の生成を可能とする。試験中の部分の熱痕跡を既知のサイズと形状のリンクルを有する類似部分を表す参照基準の熱痕跡と比較することによって、リンクルの存在を検出することができる。当該リンクルの波長を、赤外線画像を測定し伝達関数を適用することによって決定することができる。赤外線サーモグラフィを用いて取得された形状情報が（品質予測のための）特定の品質因子に到達しないかまたは不完全である場合、リンクル定量化ソフトウェアを実行する超音波配列振動子プローブをリンクル領域上の位置に回転しスキャンすることができる。超音波撮像データを赤外線撮像データと組み合わせて、リンクル形状の改善された定量化を可能とすることができる。

20

【0006】

赤外線カメラにより取得した赤外線撮像データを処理して、複合構造物内の内部欠陥、特にリンクルを検出することができる。コンピュータ・システムを、少なくとも当該赤外線撮像データに基づいてこれらのタイプの異常を特定し定量化するするようにプログラムすることができる。当該システムは、当該複合構造物の広い表面領域にわたってリンクルを高速に検出し、特定された当該リンクルの次元パラメータを定量化するための検査データを収集することができる。

30

【0007】

以下で詳細に開示するシステムおよび方法はフラッシュ・サーモグラフィ機器およびソフトウェアを定義された方法で適用して、リンクルを特定し測定する。赤外線カメラは、印加された熱パルスが部品の表面に拡散した際に、表面温度を記録する。当該画像取得時間は、試験中の材料の厚みおよび熱特性にマッチするように調節される。視野内の全ての画素に対する温度対時間のプロフィールが計算され、熱痕跡の生成を可能とする。当該部品の熱痕跡を既知のサイズと形状のリンクルを有する類似部分を表す基準の熱痕跡と比較することによって、リンクルの存在を検出することができる。例えば、熱痕跡が、温度対時間の対数の一次導関数（即ち、 $d [\ln (T)] / d [\ln (t)]$ ）に基づいてもよい。幾つかの実施形態によれば、熱画像は、二次導関数（即ち、 $d^2 [\ln (T)] / d^2 [\ln (t)]$ ）に関連する強度により生成された画像を参照し、ハイパス・フィルタを当該画像に適用することによって強化される。

40

【0008】

リンクルの波長を、赤外線画像を測定し補正因子（以降、「伝達関数」と称する）を適用することにより決定することができる。赤外線サーモグラフィを用いて取得された形状情報が（品質予測のための）特定の品質因子に到達しないかまたは不完全である場合、リンクル定量化ソフトウェアを実行する超音波配列振動子プローブをリンクル領域上の位置に回転しスキャンすることができる。超音波撮像データを赤外線撮像データと組み合わせて、リンクル形状の改善された定量化を可能とすることができる（赤外線撮像データは、超音波撮像データが提供できないリンクルの下では良好な材料の量に関する情報を提供できないかもしれない）。当該情報を、方位情報とともに、標準規格を用いた有限要素ベ

50

スの応力モデル向けプラグインに、または、応力分析者に送信して、検査されたワークピースまたは部品の性能に及ぼすリンクルの影響を決定することができる。

【0009】

一旦、領域が応力モデルへの入力に対して完全に特徴付けられると、赤外線サーモグラフィ・システムを、検査すべき次の領域に移動させることができる。当該プロセスにおけるステップを、複合構造物全体が検査されるまで、または、適切な範囲内の厚みを有する構造が検査されるまで、領域ごとに繰り返すことができる。

【0010】

以下で詳細に開示する発明特定事項の1態様は、複合構造物を検査するための方法であって、(a)赤外線カメラを、当該赤外線カメラの視野が当該複合構造物の表面上の検査領域を包含する位置に移動させるステップと、(b)少なくとも1つの閃光灯を起動して、当該検査領域の少なくとも一部を照らす光を出力するステップと、(c)当該赤外線カメラを起動して、当該赤外線カメラの視野が少なくとも当該検査領域を包含する間に赤外線撮像データを取得するステップと、(d)当該赤外線撮像データを処理して熱痕跡を生成するステップと、(e)熱痕跡が、指定された閾値内で、基準データベースに格納された多数の基準熱痕跡の何れか1つに類似するか否かを判定するステップであって、当該基準熱痕跡はリンクルの存在を示す1つまたは複数の特性を有する、ステップとを含む、方法である。ステップ(d)が、時間にわたる当該赤外線撮像データの一次導関数または二次導関数を計算するステップを含んでもよい。当該複合構造物は、熱痕跡が指定された閾値内で当該基準熱痕跡の何れか1つと類似しない場合に、受理される。

10

【0011】

先行する段落で説明した方法が、(f)当該検査領域の表面下のリンクルの存在を示す赤外線撮像データを用いてリンクルの波長を測定するステップと、(g)当該指定された閾値内において、ステップ(d)で生成された熱痕跡に類似する基準熱痕跡に対応する基準データベースから伝達関数を取り出すステップと、(h)当該取り出した伝達関数を当該測定された波長に適用して、当該リンクルの実際の波長を推定するステップであって、ステップ(f)乃至(h)は、熱痕跡が指定された閾値内で当該基準熱痕跡の何れか1つに類似する場合に実施される、ステップとをさらに含んでもよい。当該方法が、(i)超音波配列振動子を、当該超音波配列振動子が当該複合構造物の表面上の当該検査領域をスキヤンできる位置に移動させるステップと、(j)当該超音波配列振動子を起動して、超音波を当該検査領域内の複合構造物に送信するステップと、(k)当該検査領域から返された超音波エコーを表す超音波撮像データを取得するステップと、(l)当該リンクルの実際の振幅を当該超音波撮像データに基づいて推定するステップと、(m)リンクルの波長振幅比を、当該リンクルの当該推定された実際の波長および推定された実際の振幅を用いて計算するステップと、(n)ステップ(m)で計算した当該リンクル波長振幅比が許容可能範囲外にあるか否かを判定するステップとをさらに含んでもよい。この場合、当該複合構造物は当該リンクル波長振幅比が当該許容可能範囲外にない場合に受理され、当該リンクル波長振幅比が当該許容可能範囲外にある場合には拒絶される。当該リンクル波長振幅比を、方位情報とともに、応力モデルに入力して、当該複合構造物の性能に及ぼす当該リンクルの影響をモデル化することができる。

20

30

【0012】

以下で詳細に開示する発明特定事項の別の態様は、複合構造物を検査するための方法であって、(a)赤外線撮像データを、当該複合構造物の表面上の検査された領域から、赤外線カメラを用いて取得するステップであって、当該赤外線撮像データは当該検査領域の表面下のリンクルの存在を示す、ステップと、(b)当該赤外線撮像データを処理して、当該検査領域内の当該複合構造物の表面下の当該リンクルの第1のリンクル次元パラメータの値を処理するステップと、(c)ステップ(a)に続いて、超音波撮像データを、当該複合構造物の表面上の当該検査領域から、超音波配列振動子を用いて取得するステップと、(d)当該超音波撮像データを処理して、当該検査領域内の当該複合構造物の表面下のリンクルの第2のリンクル次元パラメータの値を推定するステップと、(e)当該第1

40

50

のリンクル次元パラメータおよび第2のリンクル次元パラメータの関数であるリンクル・パラメータの値を計算するステップと、(f)ステップ(e)で計算された当該リンクル・パラメータの値が値の許容可能範囲の内部または外部にあるかどうかに応じて、当該複合構造物のステータスを決定するステップとを含む、方法である。幾つかの実施形態では、当該第1のリンクル次元パラメータはリンクル波長であり、当該第2のリンクル次元パラメータはリンクル振幅であり、当該リンクル・パラメータはリンクル波長とリンクル振幅の比である。

【0013】

以下で詳細に開示する発明特定事項のさらなる態様は、複合材料から作製され厚みを有する複合構造物内の特徴を測定するための方法であって、(a)検査すべき当該複合構造物と同一の複合材料から作製され同一の厚みを有する多数の参照基準で測定されたリンクル波長に真のリンクル波長を関連付ける伝達関数を含む基準データベースを確立するステップであって、当該基準データベースはさらに、伝達関数ごとに、当該多数の参照基準におけるリンクルの少なくとも既知の深度、振幅および波長を表す関連付けられたリンクル次元データを含む、ステップと、(b)少なくとも1つの閃光灯を起動して、当該複合構造物の表面上の領域を照らす光を出力するステップと、(c)赤外線カメラを起動して、ステップ(b)で照らされた当該領域の少なくとも一部における、当該複合構造物の表面の温度を表す赤外線撮像データを取得するステップと、(d)当該赤外線撮像データを処理して、当該照らされた領域の少なくとも一部の下方にある当該複合構造物の一部におけるリンクルの存在を特定するステップと、(e)当該複合構造物のリンクル部分および周囲の非リンクル部分の間で最大コントラストを得るのに必要な時間を測定するステップと、(f)当該赤外線撮像データにより画像化されたリンクルの波長を測定するステップと、(g)ステップ(e)で測定した時間に基づいて当該リンクル部分の深度を推定するステップと、(h)当該推定された深度および当該測定された波長を用いて、伝達関数を当該基準データベースから取り出すステップと、(i)当該取り出した伝達関数を当該測定された波長に適用して、当該複合構造物の当該リンクル部分におけるリンクルの実際の波長を推定するステップとを含む、方法である。この方法が、(j)超音波配列振動子を起動して超音波を当該複合構造物の当該リンクル部分に送信するステップと、(k)当該複合構造物の一部から返された超音波エコーを表す超音波撮像データを取得するステップと、(l)当該リンクルの実際の振幅を当該超音波撮像データに基づいて推定するステップと、(m)リンクルの波長振幅比を、当該リンクルの当該推定された実際の波長および推定された実際の振幅を用いて計算するステップと、(n)ステップ(m)で計算した当該リンクル波長振幅比が許容可能範囲外にあるか否かを判定するステップとをさらに含んでよい。

【0014】

本明細書で開示する赤外線サーモグラフィ(IRT)技術が提供する利点の幾つかには、非常に高速な(配列ベースの超音波検査よりも高速な)検査、リンクルの下方を見て「良好な」材料を定量化し、それによりノックダウン因子を減らしより多くの材料を購入する能力が含まれ、IRTを使用して、部品の厚みがIRT有効範囲内(1/4程度まで)にある幾つかのケースにおいて超音波試験を置き換えることができる。さらに、IRTおよび超音波検査は、(リンクルおよび他の複合欠陥を特定する)非常に高速なベースライン・スキャンを提供するためのタンデム-IRT、およびリンクル領域のフォローアップの、より低速な、より詳細なスキャンのための局所超音波スキャンで動作することができる。

【0015】

赤外線サーモグラフィを使用して複合構造物内のリンクルを特徴付けるためのシステムおよび方法の他の態様を以下で説明する。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】機体部の熱画像のためのシステムの幾つかの構成要素を特定するためのプロック

10

20

30

40

50

図である。

【図2】1実施形態に従う複数のロボットを有する赤外線サーモグラフィ検査システムにより検査されているフルバレルの機体部の等角図を表す図である。レーザ追跡器は、当該機体部と当該ロボット・ベースに取り付けられた光学ターゲットを用いて、当該機体部に対する当該ロボットの位置を決定する。

【図3】熱パルスへの露出の後の、2つの複合パネルに対する強度（即ち、表面温度）と（対数スケールを用いた）時間のグラフを示す図である。

【図3A】熱パルスへの露出の後の、典型的な複合パネルの表面温度の対数と当該時間の対数のグラフを示す図である。

【図3B】図3Aで提供した当該表面温度の対数の当該一次導関数と当該時間の対数のグラフを示す図である。 10

【図3C】図3Aで提供した当該表面温度の対数の当該二次導関数と当該時間の対数のグラフを示す図である。

【図4A】リンクル複合試料の生の赤外線画像を示す図である。

【図4B】図4Aに示す当該生の赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す図である。

【図4C】図4Aに示す当該生の赤外線画像が一次導関数処理を受けたときの結果を示す図である。

【図4D】図4Cに示す当該一次導関数赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す図である。 20

【図4E】図4Cに示す当該一次導関数赤外線画像が二次導関数処理を受けたときの結果を示す図である。

【図4F】図4Eに示す当該二次導関数赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す図である。

【図5A】図4Aに示す当該生の赤外線画像が二次導関数処理およびハイパス・フィルタを受けたときの結果を示す図である。

【図5B】図4Aに示す当該生の赤外線画像を有する同一のリンクル複合試料の超音波画像を示す図である。

【図6】図5Aに示す当該赤外線画像および図5Bに示す当該超音波画像からの個々のクーポンのインタリープ型の組合せを示す図である。当該個々のクーポンは、それぞれを他方の上にして、直接比較される。 30

【図7A】当該リンクルフリーの領域に対応する全ての画素に対する複合パネルのリンクルフリーの領域内の表面温度の当該一次導関数と（対数スケールを用いた）時間のグラフの表示を含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットの図である。当該結果を「無リンクル・シグネチャ」と称する。（図7A - 7Cからは明らかではないが、実際にはかかるシグネチャを色で表示してもよい。）

【図7B】リンクル領域に対応する全ての画素に対する同一の複合パネルのリンクル領域内の表面温度の当該一次導関数と（対数スケールを用いた）時間のグラフを含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットを示す図である。当該結果を本明細書では「リンクル・シグネチャ」と称する。 40

【図7C】当該リンクルおよびリンクルフリーのシグネチャが自動欠陥認識のために重ね合されるときの（対数スケールを用いた）当該表面温度の当該一次導関数対時間のグラフを含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットを示す図である。

【図8】幾つかの実施形態に従う赤外線サーモグラフィ検査のための方法のステップを示す流れ図である。

【図9】幾つかの実施形態に従う大規模複合構造物の非破壊検査のためのシステムの幾つかの構成要素を示すブロック図である。

【図10】航空機生産およびサービス方法の流れ図である。

【図11】航空機のシステムを示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】 50

【 0 0 1 7 】

以下では図面を参照する。図面においては、異なる図面における同様な要素が同一の参考番号をもつ。

【 0 0 1 8 】

例示の目的のため、複合構造物内のリンクルの非常に高速な識別および定量化を可能とするソフトウェア・ツールを用いた、複合材料から作製された構造（例えば、ファイバ強化プラスチックから作製された複合積層材）のアクティブな（即ち、パルス化された）赤外線サーモグラフィ検査および収集されたサーモグラフィック・データの分析のためのシステムおよび方法を詳細に説明する。かかるシステムおよび方法は、大規模複合構造物（例えば、複合材料から作製された曲がった円筒形風のワークピース）の高速な赤外線サーモグラフィ検査を実現することができる。例示の目的のため、複合材料から作製されたバレル形の（例えば、ハーフまたはフルバレルの）機体部の赤外線サーモグラフィ検査のためのシステムおよび方法を以下で詳細に開示する。しかし、本明細書で開示する装置を機体部以外の大規模複合構造物の赤外線サーモグラフィ検査で使用できることは理解されるべきである。

【 0 0 1 9 】

以下で詳細に開示する実施形態によれば、検査装置は閃光灯および赤外線カメラを備える。これらは、非接触、非伝達方式で大規模複合構造物をサーモグラフィカルに検査するために使用される。当該閃光灯および赤外線カメラを、トラックに沿って移動する1つまたは複数のロボットにより支持してもよい。本明細書で使用する際、「トラック」という用語はレール、グローブ、ガイド面、およびそれらの均等物を包含する。トラックが、直線（即ち、線形）または曲線であってもよい。代替手段では、当該閃光灯および赤外線カメラを、移動ガントリ（即ち、複合構造物に跨り並列なトラックに沿って走るプラットフォーム）に搭載することができる。この方式では、サーモグラフィック・ハードウェア（閃光灯および赤外線カメラ）を、複合構造物の表面に沿って移動させて、部品全体の検査に対するアクセスを保証することができる。

【 0 0 2 0 】

赤外線サーモグラフィの方法および装置は、材料の非破壊検査を実施して、欠陥、当該材料の特性の変動、または当該材料のコーティングまたは層の厚みの差異を検出することを可能とすることができます。赤外線撮像は、当該材料の表面上またはその下方の熱拡散性または熱伝導性の局所変動を検出することができます。

【 0 0 2 1 】

アクティブなサーモグラフィは、サブサーフェス欠陥に関するサンプルを非破壊的に評価するために使用される。内部結合不連続性、層間剥離、空隙、インクルージョン、および当該サンプルの視覚的検査により検出可能な他の構造的欠陥を暴露するのに有用である。一般に、アクティブなサーモグラフィは、当該サンプルの温度および周辺温度の間の差異を生成するために当該サンプルを加熱または冷却し、次いで、当該サンプルの温度が周辺温度に戻ったときに当該サンプルから発せられる赤外線熱画像を観察することを含む。赤外線カメラは、冷却拳動における何らかの異常を検出できるので利用される。当該異常は、当該サンプルの表面から当該サンプルの内部への熱の拡散を防止するサブサーフェス欠陥によりもたらされる。より具体的には、これらの欠陥は、当該欠陥の直上の表面を、周囲の無欠陥領域と異なる割合で冷却させる。当該サンプルが冷却すると、赤外線カメラは、表面温度を示す画像時間シーケンスを監視し記録し、それにより時間にわたる当該表面温度の変化の記録を作成する。

【 0 0 2 2 】

一般的に、材料の表面は、閃光灯を用いて加熱され、固定期間の後、熱画像が加熱された材料の表面で取得される。サーモグラフィック加熱のためのシステムは一般的にサンプル励起のためにキセノン・フラッシュチューブおよび既製品フォトグラフィック電源を使用する。赤外線カメラは赤外線放射輝度を材料の表面から画像化する。当該赤外線放射輝度は、材料の表面の温度を表す。材料の表面の温度の差異は、当該材料の異なる熱特性を

10

20

30

40

50

示す。当該材料の熱特性におけるこれらの変動は、材料欠陥があり得ること、または、外部の材料を含むことを示す。

【0023】

赤外線シグネチャ処理に必要な構造的厚みおよび積層形状は、機体部表面の赤外線カメラの視野の正確な位置を知ることで得られる。

【0024】

図1は、機体部2の熱画像のためのシステムの幾つかの構成要素を特定するためのプロック図である。この赤外線サーモグラフィ検査システムは、フード12内のカメラレンズ開口部5を通じて指向されるレンズを有するデジタル赤外線カメラ4を備える。フード12は、検査されている表面に隣接するフード付きエンクロージャを形成するように設計される。1組の閃光灯6aおよび6bが、フード12内部に固定された空間関係で配置される。閃光灯6aおよび6bは、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8からのトリガ信号に応答して光の閃光を生成する。赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8はまた、赤外線カメラ4の動作を制御する。本明細書で開示した実施形態の少なくとも幾つかとともに使用するのに適した赤外線カメラ4のタイプの1例には、スペクトル放射計として動作するように構成された焦点面配列装置が含まれる。赤外線カメラを含むタイプの閃光灯部品に含まれ得る他の構成要素に関するさらなる詳細については、1組の閃光灯およびフードを例えれば特許文献1に見出すことができる。

10

【0025】

サーモグラフィック検査の1方法によれば、第1の閃光灯6aおよび6bは、機体部2の複合材料に熱を伝達するようにトリガされる。好適には、複合材料の冷却の間に、赤外線カメラ4は、機体部2の加熱された一部の可変放射輝度の連続するデジタル画像を取得するように定期的にトリガされる。好適には、サンプルがその周囲との熱平衡に到達するまで、励起起源が除去された後に、検査されている複合材料の熱的に励起(加熱)された領域は単調に冷却される。加熱直後の時間間隔の間に複合材料の表面上の任意の点の熱応答は、無欠陥サンプルの温度時間応答の自然対数が、サンプルが冷却されたとき、直線により近似できる関数であるように劣化する。

20

【0026】

赤外線カメラ4により捕捉されたデジタル赤外線撮像データは、処理するために赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8により受信される。赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8は、赤外線撮像データを処理して材料の異常を検出し特定するようにプログラムされる。当該赤外線撮像データを、ディスプレイ・モニタ(図1では図示せず)に表示してもよい。当該ディスプレイ・モニタを、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8に統合してもよく、または、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8から分離してもよい。

30

【0027】

図1に示す実施形態によれば、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8が、赤外線撮像データを赤外線カメラ4から、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8により分析して数学的に操作できるフォーマットに変換するためのデジタル画像取得能力を有してもよい。オプションのデータ取得モジュール10を、赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8に組み込むか、または、(図1に示すように)赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8から分離してもよい。赤外線カメラ4が複数の空間的に異なる画像を取得して複合構造物の表面の完全なモザイク画像を生成する場合、後者も単一の画像フレームに適合させるには大きすぎるとき、データ取得モジュール10を使用してもよい。赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8をさらに、赤外線カメラ4により取得された赤外線撮像データを分析するようにプログラムしてもよい。特に、機体部2の表面温度応答の時間履歴を、それが室温に戻ったとき、分析して複合材料内の欠陥の存在を検出することができる。

40

【0028】

機体部を検査する特定のアプリケーションの文脈において、非破壊検査システムが、当該機体部の外部の観点から機体部の表面をスキャンするための手段と、当該機体部の内部に取り付けたスティッフナのような部分構造をスキャンするための手段とを備えてよい

50

。機体部の内部にあるスティッフナをスキャンするための手段を、当該機体部の外部をスキャンする手段とともに連携して並列に動作させることができる。代替手段では、外部および内部のスキャンを異なる時点および／または異なる場所で実施することができる。当該機体部を、スティッフナが取り付けられる前または後に外部的にスキャンすることができる。以下で開示する実施形態では、当該内部スキャン手段は超音波配列振動子を含み、当該外部スキャン手段は赤外線カメラを含む。

【0029】

図2は、フルバ렐の機体部50が、1実施形態に従う赤外線サーモグラフィ・アセンブリを具備した複数のロボット64を備える非破壊検査システムにより検査されることを示す。各ロボット64は、可動のロボット・ベース66とロボット・ベース66に接続される近位端を有する連結式ロボット・アーム68とを備える。各ロボット・ベース66を、可動ホロノミック・キャタピラ自動車に搭載するか、または、線形トラック(図2では図示せず)に接続してもよい。夫々の赤外線サーモグラフィ部品は各ロボット・アーム68の遠位端に接続される。各赤外線サーモグラフィ部品は、フード12内部に取り付けられた赤外線カメラ4および2つ以上の閃光灯6を備える。各フード12のサイズを、機体部50の外面52上の夫々の平方領域56をカバーするように決めてよい。隣接する平方領域56から取得した赤外線撮像データを、レーザ追跡器24を用いたロボット・ベース66の夫々の位置の測定およびロボット64に組み込んだエンコーダを用いたロボット・アーム68の夫々の動きに基づいて、繋げることができる。スティッチング60プロセスをリアルタイムに実施するか、または、後に実施してもよい。

10

【0030】

1実施形態によれば、レーザ追跡器24は、機体部50に対するロボット・ベース66の位置を決定するために使用される。これは、ロボット・ベース66に取り付けた光学ターゲット75および機体部50に取り付けた光学ターゲット76を用いて実現される。光学ターゲット76を逆反射体に球状に搭載してもよく、これを後に詳細に説明する。光学ターゲット76を、機体部50の外面52に関する所定の位置に形成した穴に挿入してもよい。機体部50内の穴が、決定部品座標システムのような部分参照システムの構成要素であってもよく、部品が、(当該部品が部品ツールに参照されるのではなく)互いに参照される。当該部品参照システムは穴の各々の位置を3次元で適切にインデックス化する。

20

【0031】

図2に示すシステムを使用して、複合材料の内部構造の特性を表す赤外線撮像データを取得することができる。当該取得された赤外線撮像データを以下の式

30

【0032】

【数1】

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}$$

$$e = \sqrt{k\rho C}$$

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e\sqrt{\pi}}\right) - 0.5\ln(t)$$

40

【0033】

を用いて異なる方式で処理することができる。Tは表面温度であり、tは時間であり、eは熱流に対する熱浸透率または抵抗であり、Qは入力エネルギーであり、kは熱伝導性であり、ρは密度であり、Cは熱容量である。低い熱浸透率は熱が材料(例えば、金属)を迅速に拡散し、その結果、当該材料の厚みにわたる温度変化が小さいことを意味し、高い熱浸透率は、熱が当該材料(例えば、複合材)を低速に拡散し、その結果、当該材料の厚

50

みにわたる温度変化が大きいことを意味する。

【0034】

図3は、熱パルスへの露出の後の2つの複合パネル・サンプルに対する強度（即ち、表面温度）と（対数スケールを用いた）時間のグラフである。-0.5の勾配からの途切れは熱の拡散が界面に到達したことを示す。当該材料の厚みLを、その途切れが生ずる時間t*に基づいて以下の式

【0035】

【数2】

10

$$t^* = \frac{L^2}{\pi\alpha}$$

【0036】

を用いて計算することができる。は熱拡散性または熱流速である（= k / C）。

【0037】

図3Aは、熱パルスへの露出の後の典型的な複合パネルの表面温度の対数と時間の対数のグラフである。図3Bは図3Aで提供した表面温度の対数の一次導関数と時間の対数のグラフである。図3Cは図3Aで提供した表面温度の対数の二次導関数と時間の対数のグラフである。これらの曲線は、赤外線サーモグラフィ中に熱パルスに露出された表面領域の下方にある複合材料がリンクルを含むときに広がる。

20

【0038】

図4A乃至4Fは、リンクル複合試料から取得された赤外線撮像データを表す。データは、Thermal Wave Imaging社（ミシガン州ファーンデール）から利用可能な赤外線カメラのような赤外線撮像カメラで収集されたものである。Thermal Wave Imaging赤外線カメラにより収集されたデータが、既知のサーモグラフィック信号再構築（TSR「登録商標」）方法を用いて処理してもよい。図4A乃至4Fに示す画像は、赤外線サーモグラフィを用いてリンクルを非常に高速に検出可能であることを示す。図4Aは、リンクル複合試料の生の赤外線画像である。図4Bは、図4Aに示す生の赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す。図4Cは、図4Aに示す生の赤外線画像が一次導関数処理を受けたときの結果を示す。図4Dは、図4Cに示す一次導関数の赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す。図4Eは、図4Cに示す一次導関数の赤外線画像が二次導関数処理を受けるときの結果を示す。図4Fは、図4Eに示す二次導関数の赤外線画像がハイパス・フィルタされたときの結果を示す。

30

【0039】

図5Aおよび5Bは、ハイパス・フィルタを用いて取得した赤外線画像が超音波画像と比較可能であることを示す。図5Aは、図4Aに示す生の赤外線画像が二次導関数処理されハイパス・フィルタされたときの結果を示す。図5Bは、同一のリンクル複合試料の超音波画像である。したがって、高速な赤外線サーモグラフィ検査技術を使用して、リンクルが見つかった場合のみ、より低速な超音波検査技術を用いた局所フォローアップとともに、リンクルを特定することができる。

40

【0040】

図6はまた、ハイパス・フィルタを用いて取得された赤外線画像が超音波画像と比較可能であることを示す。図6は、図5Aに示す赤外線画像および図5Bに示す超音波画像からの個々のクーポンのインタリープ型の組合せである。当該個々のクーポンは、それぞれを他方の上にして、直接比較される。

【0041】

リンクルを複合部分の両側（OMLおよびIML）から画像化することができる。一方

50

の側の高い強度は反対側の低い強度に対応する。リンクル・ピークにはより低温の温度測定値があり、リンクル・ピークではより高いファイバ／樹脂比率があり、リンクルの谷にはより高温の温度測定値があり、リンクルの谷にはより低いファイバ／樹脂比率がある。

【0042】

既製品ソフトウェアを修正して、赤外線画像内のリンクル兆候の存在を高速かつ自動的に示すために使用できる熱痕跡を生成することでリンクルを発見し、次いで、当該取得された熱痕跡を基準データベースに格納された基準熱痕跡と比較することによってこれらのリンクルを発見し定量化するためのプロセスを開始するための検索ルーチンを実施することができる。当該基準データベースが存在するハードウェアは非一時的な有形のコンピュータ可読媒体である。

10

【0043】

図7Aは、リンクルフリーの領域に対応する全ての画素に対する複合パネルのリンクルフリーの領域内の表面温度の一次導関数と（対数スケールを用いた）フレーム数のグラフの表示を含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットであり、当該結果を本明細書では「無リンクル・シグネチャ」と称する（図7A乃至7Cからは明らかではないが、実際にはかかるシグネチャを色で表示してもよい）。

【0044】

図7Bは、リンクル領域に対応する全ての画素に対する同一の複合パネルのリンクル領域内の表面温度の一次導関数と（対数スケールを用いた）フレーム数のグラフを含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットであり、当該結果を本明細書では「リンクル・シグネチャ」と称する。

20

【0045】

図7Cは、リンクルおよびリンクルフリーのシグネチャが自動欠陥認識のために重ね合されるときの表面温度の一次導関数と（対数スケールを用いた）フレーム数のグラフを含むディスプレイ・モニタからのスクリーンショットである。

【0046】

図7A乃至7Cの各々において、水平軸は、閃光灯を起動した後に取得された画像フレームの数である。フレームを、カメラのフレーム・レートを分割することにより時間に変換することができる。典型的なフレーム・レートは60または120Hzであるが、長い試験時間を許可する必要がある場合には変更することができる。図7Cに示すリンクル／無リンクル・シグネチャの重ね合せは、これらの2つの関心領域が結合されるときに生ずる。自動欠陥認識の目的のため、無リンクル・シグネチャを見ることを期待するであろう。当該リンクル・シグネチャが発生した場合、試験下の複合部品内のリンクルが存在することは明らかである。

30

【0047】

複合材料内のリンクルを検出し特徴付ける1つの方法は、赤外線サーモグラフィ検査および超音波検査の組合せを使用する。先ず、赤外線サーモグラフィを使用して、熱痕跡を用いてリンクルの存在を特定することができる。当該リンクルの波長を、赤外線画像処理を用いて測定することができる。サーモグラフィは、波長を測定できるが、振幅を測定することはできない。したがって、高速なサーモグラフィ検出を行う場合、より時間を消費する特殊超音波スキャンを実施して振幅を評価することができる。より具体的には、赤外線サーモグラフィを用いて一旦リンクルを有する領域が特定され、当該リンクルの波長が推定されると、超音波配列振動子を使用して、特定された関心領域をスキャンして当該リンクルの振幅を含む超音波撮像データを取得することができる。

40

【0048】

赤外線カメラにより取得した赤外線撮像データを処理して、複合構造物内の内部欠陥、特にリンクルを検出することができる。コンピュータ・システムを、少なくとも当該赤外線撮像データに基づいてこれらのタイプの異常を特定し定量化するするようにプログラムすることができる。当該システムは、当該複合構造物の広い表面領域にわたってリンクルを高速に検出し、特定された当該リンクルの次元パラメータを定量化するための、赤外線

50

撮像データを収集することができる。

【0049】

以下で詳細に開示するシステムおよび方法では、フラッシュ・サーモグラフィ機器およびソフトウェア（例えば、ミシガン州ファーンデールの Thermal Wave Imaging 社から入手可能なソフトウェア）を様々な方法で適用して、リンクルを特定し測定する。赤外線カメラは、印加された熱パルスが部品の表面に拡散した際に表面温度を記録する。画像の取得時間は、試験中の材料の厚みおよび熱特性にマッチするように調節される。視野内の全ての画素に対する温度対時間のプロフィールが計算され、熱痕跡の生成を可能とする。試験中の部分の熱痕跡を、リンクルを有する同様な部分を表す基準の熱痕跡と比較することによって、リンクルの存在を検出することができる。例えば、熱痕跡が、当該部品の表面上の選択された領域内の画素ごとの温度対時間の対数の一次導関数（即ち、 $d [\ln (T)] / d [\ln (t)]$ ）に基づいてもよい。幾つかの実施形態によれば、熱画像は、二次導関数（即ち、 $d^2 [\ln (T)] / d^2 [\ln (t)]$ ）に関連する強度により生成された画像を参照し、ハイパス・フィルタを当該画像に適用することによって適用することによって強化される。10

【0050】

リンクル波長を、赤外線画像を測定し、（より厚い複合部品内の熱データの熱損失または不鮮明化のような）測定されている複合部分の構成の任意の効果を説明する補正因子（以後、「伝達関数」と称する）を適用するにより決定することができる。赤外線サーモグラフィを用いて取得された形状情報が（品質予測のための）特定の品質因子に到達しないかまたは不完全である場合またはさらに定量化する必要がある場合、リンクル定量化ソフトウェアを実行する超音波配列振動子プローブをリンクル領域上の位置に回転スキャンすることができる。当該超音波撮像データを赤外線撮像データと組み合わせて、リンクル形状の改善された定量化を可能とすることができます。（赤外線撮像データは、超音波撮像データが提供できないリンクルのもとで良好な材料の量に関する情報を提供できないかもしれない）。より具体的には、超音波検査を使用して、赤外線サーモグラフィを用いて以前に決定されたリンクルの3Dモデルを表すデジタル・データを生成することができる。当該リンクルの振幅Dを、当該3Dモデルに基づいて決定することができる。次いで、リンクル線に沿った比率L/Dを推定することができる。当該情報を、方位情報とともに、標準規格を用いた有限要素ベースの応力モデル向けプラグインに、または、応力分析者に送信して、検査されたワークピースまたは部品の性能に及ぼすリンクルの影響を決定することができる。20

【0051】

リンクルの振幅（即ち、高さ）を推定するために使用できる所謂「熱Bスキャン」画像を生成することも可能である。当該熱Bスキャンを、リンクルの下方に「良好な」材料があることの指示を自動的にチェックすることができる。この情報を用いて、リンクルの振幅Dおよびリンクルの厚みT（即ち、方向がずれた複合積層材のプライの数）を推定することができてもよい。30

【0052】

一旦、領域が応力モデルへの入力に対して完全に特徴付けられると、赤外線サーモグラフィ・システムを、検査すべき次の領域に移動させることができる。当該プロセスにおけるステップを、複合構造物全体が検査されるまで、または、適切な範囲内の厚みを有する構造が検査されるまで、領域ごとに繰り返すことができる。40

【0053】

幾つかの実施形態によれば、IRTリンクル波長測定プロセスは、既知のサイズと形状のリンクルを有する異なる既知の厚みの複合材料から取得された夫々の組の標準熱痕跡を備える標準熱痕跡データベースを使用する。好適には、既知の寸法（即ち、既知の波長、振幅、厚み、および深度）の人工リンクルを有する複合材料の参照基準を製造することができる。代替手段では、リンクルの範囲を生産から収集することができる。

【0054】

図8は、幾つかの実施形態に従う赤外線サーモグラフィ検査に対する方法100のステップを特定する流れ図である。検査を開始する前に、例えば、プログラムされた（即ち、既知の）振幅および波長のリンクルを有する参照基準を製造することによって、または、生産サンプルを収集することによって、或る範囲の振幅、波長および深度のリンクルを有する多数の参照基準を準備する（ステップ102）。代替手段では、リンクル標準がない場合に、リンクルを有する検鏡試片部分を使用することができる。

【0055】

次いで、各参照基準を熱パルスで励起する（ステップ104）。各参照基準への熱の後続の熱拡散を、赤外線画像を取得することによって監視する（ステップ106）。リンクルは熱流を混乱させる。材料の厚みは一定でありうるが、ファイバおよび局所化された樹脂の内容の方位は、当該流れを異なる方法で混乱させる。ファイバの面外の歪みが赤外線カメラにより監視される表面に最も近い位置では表面は冷たい。（リンクルに起因する）樹脂プールが表面に最も近い位置では表面は熱い。生の赤外線画像が取得された後、当該画像は基準データベースに格納される。多くの場合、当該生の赤外線撮像データが一次導関数処理のような方法で処理されることが推奨される。さらに、一次導関数撮像データを、二次導関数処理を用いて処理することができる。この撮像データの全てが基準データベースに格納される。

【0056】

尚図8を参照すると、一次導関数撮像データまたは二次導関数撮像データの何れかを用いて、各参照基準内のリンクルの波長を、画像処理ツールを用いて測定し、当該測定を周知な方式で行う（ステップ108）。（好適には波長は、当該リンクル内の或る正のピークから別の正のピークに測定する）。リンクル試料の利用可能な範囲を使用して、最小検出可能リンクル振幅および波長を定義することができる。面外の歪みは表面温度変動を生じさせるには小さすぎるので、検出できない最小振幅がある。この振幅は検出可能な振幅を設定する。最小振幅が検出閾値の上にある限り、必要なリンクルを検出し、残りを無視することができる。ハイパス・フィルタを使用して、測定の間の波の細部を強化することができる。

【0057】

測定データに基づいて、夫々の伝達関数を生成して、真の（即ち、既知の）リンクル波長を参照基準ごとの測定された波長に関連付けることができる（ステップ110）。水平熱伝達は（例えば、CFRPファイバ方向の）部品の平面内に優先的に生ずるので、当該伝達関数は表面からリンクルへの距離（即ち、リンクル深度）に依存する可能性が高い。全ての伝達関数は基準データベースに格納される（ステップ112）。

【0058】

当該基準データベースが確立された後、ワークピースおよび複合材料から作製された部品のIRT検査中に参照することができる。例示の目的のため、複合材料から作製されたパネルのIRT検査を説明する。当該参照基準を用いて収集した較正情報を使用してリンクルを変位させ、当該リンクルが許容可能な限界を超えるかまたは超音波トランスデューサによるさらなる検査を保証するかを評価するのを除いて、当該パネルの検査は参照基準に関する同一の手続きに従う。

【0059】

図8を再度参照すると、検査されるパネルを、閃光灯を起動することによって熱パルスで励起する（ステップ114）。試験下のパネルへの熱拡散を次いで、時間にわたる連続する赤外線画像を取得することによって監視する（ステップ116）。これらの生の赤外線画像を、参照基準から取得された生の赤外線画像が、例えば、一次導関数処理および二次導関数処理を用いて処理された同一の方式で処理することができる。一次導関数撮像データまたは二次導関数撮像データの何れかを用いて、各参照基準内のリンクルの波長を、画像処理ツールを用いて測定し、当該測定を周知な方式で行う（ステップ118）。次いで、伝達関数が試験下のパネルに適用されるかを判定する（ステップ120）。

【0060】

10

20

30

40

50

深度が増大するとともに波長信号がファジーになることが期待される。リンクル領域および周囲の非リンクル領域の間の最大コントラストを得るのに必要な時間を測定することで、当該リンクルの深度を推定することができる。当該深度情報により、どの伝達関数を使用するかを、例えば、リンクル波長およびリンクル深度を、伝達関数をリンクル深度、振幅および波長と相關付けるルックアップテーブルに入力することによって、判定することができる。

【0061】

パネル内のリンクルの測定された波長および推定された深度および選択された伝達関数を用いて、当該パネル内の実際の（即ち、真の）リンクル波長を計算することができる。所与のリンクル波長に対して、測定された波長は、表面からの距離を増大させる（即ち、深度が増大させる）可能性が高い。例えば、当該パネル上のリンクル領域が高解像度超音波検査を受けるべきか否かに關らず、実際のリンクル波長を使用して、試験下のパネルの変位を決定することができる（ステップ122）。幾つかの場合では、赤外線サーモグラフィを用いて決定された実際のリンクル波長が、超音波検査の必要性なしに部品の変位を決定するのに十分かもしれない。

10

【0062】

IRT検査を定量的機能なしに使用する場合であっても、IRTシステムがリンクルのパネルをスクリーニングする速度は、別々の高解像度超音波スキャンがリンクルの量化を支援するために実施される場合でも、それを有利にする（かかる高解像度超音波スキャンは現在実施されず、従来の超音波スキャンはリンクルを検出できない）。現在利用可能なIRT機器は、16乃至36平方フィートの視野を有し、取得時間は、検査すべきパネルの最大厚みに依存し、検査時間は30秒未満のオーダである。

20

【0063】

判定が行われた場合、パネルがリンクルを有する領域内の高解像度超音波検査を受けるべきというIRT検査の結果に基づいて、超音波配列振動子を使用して、特定された関心領域をスキャンし、超音波撮像データを取得することができる。超音波撮像データを処理して、3次元モデリング技術を用いたリンクルの振幅を決定することができる。背景の例は特許文献2に見られうる。

【0064】

IRT検査、高解像度超音波検査、またはその両方の結果を用いて、パネルが許容可能な値を超えるリンクル寸法を有するかどうかを判定することができる。リンクルに対する許容可能な値がある。当該値は、部品のタイプに依存して変化する。典型的な許容可能値はL/D（即ち、波長/振幅）の点で記述される。許容可能範囲外にある、L/D比率により特徴付けられるリンクルを有するパネルを拒絶してもよい。

30

【0065】

閾値リンクル深度およびリンクル振幅は最大検出可能深度で最小検出可能波長に対する閾値値を提供するので、振幅の直接測定がなくても、有用なデータを取得することができる。検出可能波長は、当該リンクル深度が減るとともに減る可能性が高い。

【0066】

図9は、或るアーキテクチャに従う大規模複合構造物の非破壊検査に対するシステムの幾つかの構成要素を特定するブロック図である。（赤外線カメラ4a、4bおよび閃光灯6が搭載される）ロボット64の動きは、ロボット制御コンピュータ70により制御される。レーザ追跡器24の動きおよび発射はレーザ追跡コンピュータ48により制御される。レーザ追跡コンピュータ48はまた、レーザ追跡データをレーザ追跡器24から受信する。閃光灯6の起動および赤外線カメラ4aおよび4bの起動は赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8により制御される。赤外線サーモグラフィ・コンピュータ8はまた、赤外線撮像データを赤外線カメラ4aおよび4bから受信する。超音波配列振動子34の起動は超音波検査制御コンピュータ30により制御される。

40

【0067】

当該コンピュータの全ては、エキスパート・ワークステーション80にあるマスター・コ

50

ンピュータと有線または無線通信することができる。エキスパート・ワークステーション 80 にある当該マスタ・コンピュータを、赤外線撮像データをレーザ追跡データと相関付け、超音波撮像データと相関付けるようにプログラムしてもよい。当該マスタ・コンピュータをさらに、3D モデルデータを 3D モデル・データベース・サーバ 84 に要求するようにプログラムしてもよい。サーモグラフィック・リンクル特徴付けの場合、エキスパート・ワークステーション 80 にある当該マスタ・コンピュータをまた、基準熱痕跡データを基準熱痕跡データベース・サーバ 82 に要求するようにプログラムしてもよい。

【 0068 】

レーザ追跡コンピュータ 48 は、複合構造物の 3D 座標システム内の赤外線カメラ 4a および 4b に対する位置データを取得する。バレル形の機体部の場合には、赤外線撮像データを、機体部の 3D モデルに直接マップすることができる。赤外線撮像データを 3D モデルデータに重ね合せることにより、改善されたデータ分析と潜在的な自動データ分析も可能となる。例えば、特徴 / 異常の指示を、赤外線撮像データを 3D モデルに直接重ね合せることによって、機体構造に直接相関付けることができる。さらに、当該モデルへの直接的なデータ重ね合わせを使用して、局所領域の厚みまたは空間点を決定することができる。1 実施形態では、当該プロセスは、1 つまたは複数のコンピュータ・グラフィックスのテクスチャマップとしての赤外線撮像データストリップの適用を含む。当該テクスチャマップは、エキスパート・ワークステーション 80 のモニタまたはコンピュータスクリーンに表示された仮想環境内の 3D モデル表面に投影される。

【 0069 】

図 9 に示す実施形態では、超音波検査は超音波配列振動子 34 を用いて実施される。超音波配列振動子 34 を、ロボット 64 と同様なロボットの連結アームの端に設置することができる。当該超音波検査システムはさらに、超音波配列振動子 34 および符号化手段(図示せず)に動作可能に接続された超音波パルサ / 受信ユニット 32 を備える。超音波パルサ / 受信ユニット 32 は、以下の動作、即ち、制御信号を当該超音波配列振動子 34 に送信するステップと、スキャンデータ信号を超音波配列振動子 34 から受信するステップと、X - Y 位置データ信号を当該符号化手段から受信するステップと、当該スキャンデータを当該 X - Y 位置データと相関付けるステップとを実施するようにプログラムされる。

【 0070 】

当該超音波検査制御コンピュータ 30 が、非破壊検査(NDI)スキャンアプリケーションソフトウェアでプログラムされた汎用目的コンピュータを備えてもよい。当該超音波パルサ / 受信ユニット 32 は、当該エンコーダパルスを当該 NDI スキャンソフトウェアアプリケーションに送信する。当該アプリケーションは、当該エンコーダパルスを X - および Y - エンコーダ値として解釈し、当該値は、当該スキャンデータを当該超音波配列 34 から正しい位置で発見するために使用される。当該超音波検査制御コンピュータ 30 は超音波撮像データを当該エキスパート・ワークステーション 80 に送信することができる。当該ディスプレイが、1 つまたは複数のコンピュータグラフィックステクスチャマップとして超音波撮像データストリップの適用を含んでもよい。当該テクスチャマップは、当該エキスパート・ワークステーション 80 のモニタまたはコンピュータスクリーンに表示された仮想環境内の 3D モデル表面に投影される。

【 0071 】

上述のシステムと方法を、図 11 に示す航空機 152 の部品を検査するための、図 10 に示す航空機の製造およびサービスの方法 150 で使用してもよい。事前生産中に、例示的な方法 150 が、航空機 150 の仕様および設計 154 および材料調達 156 を備えてよい。生産中に、航空機 152 のコンポーネントおよび組立部品製造 158 およびシステム統合 160 が行われる。その後、航空機 152 が、サービス 164 に置かれるために認証および配送 162 を受けてもよい。顧客によるサービスにおいて、航空機 152 が(修正、再構成、改修等を含みうる)ルーチン保守およびサービス 166 に関してスケジュールされる。

【 0072 】

10

20

30

40

50

方法 150 のプロセスの各々を、システム・インテグレータ、サード・パーティ、および／またはオペレータ（例えば、顧客）により実施または実行してもよい。この説明の目的のため、システム・インテグレータが、限定ではなく、任意数の航空機製造業者および主要システム下請けを含んでもよく、サード・パーティが、例えば、限定ではなく、任意数のベンダ、下請け、および供給者を含んでもよく、オペレータが航空会社、リース会社、軍事機関、サービス組織等であってもよい。

【0073】

図 11 に示すように、例示的な方法 150 により生産された航空機 152 が複数のシステム 170 および内部 172 を有する機体 168（例えば、機体、フレーム、スティッフナ、ウイング・ボックス等）を備えてよい。高レベル・システム 170 の例は、推進システム 174、電気システム 176、油圧システム 178、および環境システム 180 のうち 1 つまたは複数を含む。航空宇宙の例を示したが、本発明の原理を自動車業界のような他の産業に適用してもよい。

10

【0074】

本明細書で具体化した装置および方法を航空機の製造およびサービスの方法 150 の段階の任意の 1 つまたは複数において使用してもよい。例えば、生産プロセス 158 において製造または組み立てられたコンポーネントまたは組立部品を、本明細書で開示した赤外線サーモグラフィ検査システムを用いて検査してもよい。また、1 つまたは複数の装置実施形態、方法実施形態、またはそれらの組合せを、実質的に航空機 152 の非破壊検査を促進し航空機 152 のコストを削減することによって生産段階 158 および 160 の間に利用してもよい。同様に、装置の実施形態、方法の実施形態、またはそれらの組合せのうち 1 つまたは複数を、航空機 152 がサービス中、例えば限定ではなく保守サービス 166 中に利用してもよい。

20

【0075】

以降で説明する方法のクレームは、そこに記載されたステップがアルファベット順（請求項内のアルファベット順は、以前に記載されたステップを参照する目的のために使用されている）またはそれらが記載された順序に実施されると解釈または要求すべきではない。また、それらは、並列に実施されている 2 つ以上のステップまたはその一部を排除するか、または、交互に実施されている 2 つ以上のステップの任意の一部を排除するとは解釈されるべきでもない。

30

【符号の説明】

【0076】

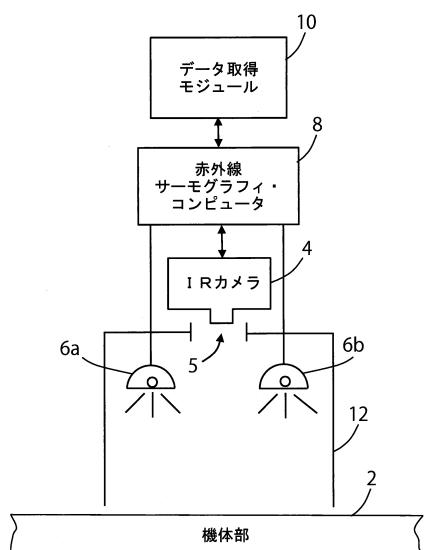
2 機体部

4 I R カメラ

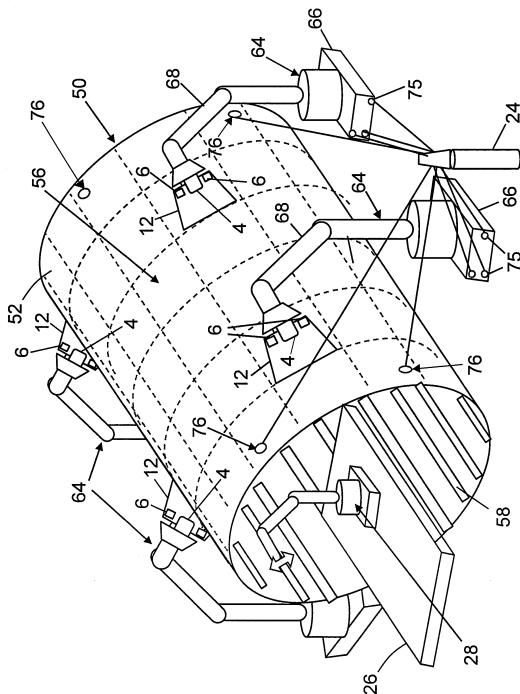
8 赤外線サーモグラフィ・コンピュータ

10 データ取得モジュール

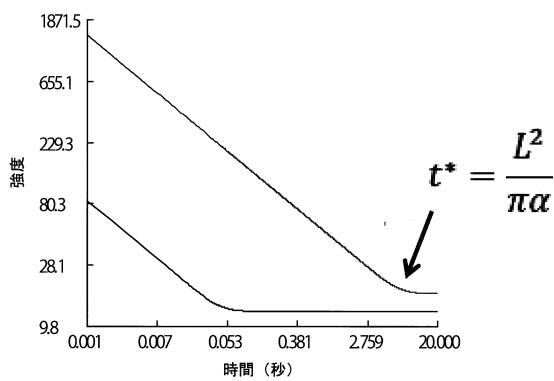
【 図 1 】



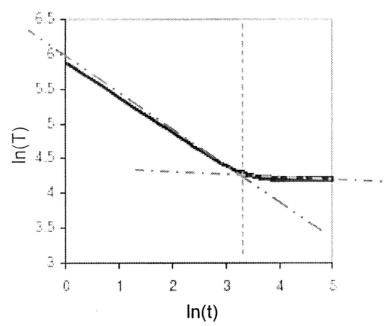
【 図 2 】



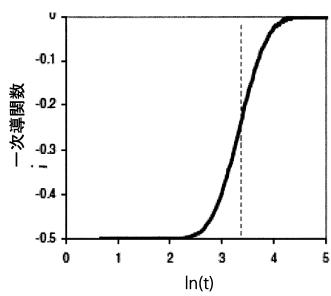
【図3】



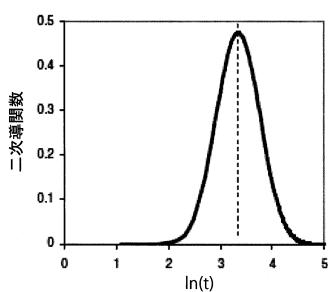
【図3A】



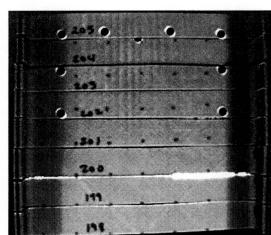
【図3B】



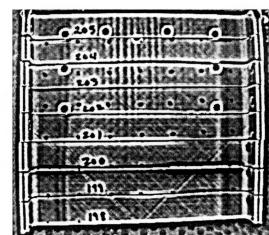
【図3C】



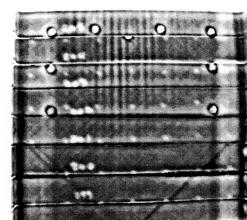
【図4A】



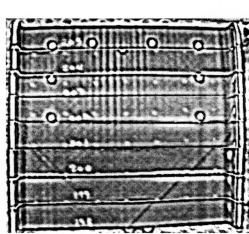
【図4B】



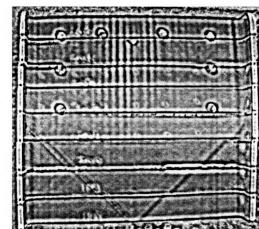
【図4C】



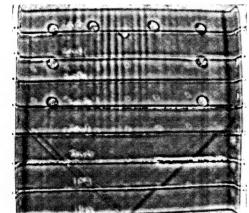
【図4D】



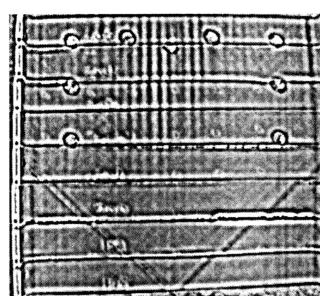
【図4F】



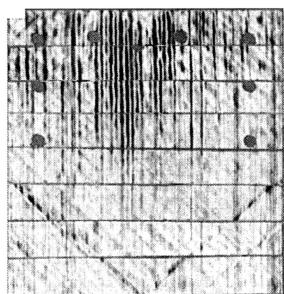
【図4E】



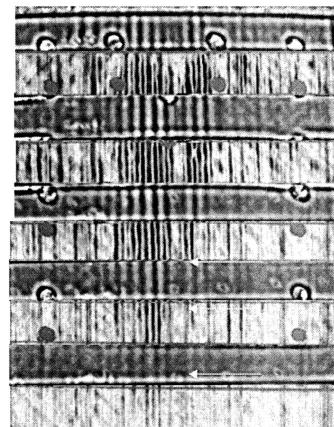
【図5A】



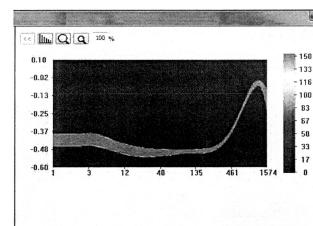
【図5B】



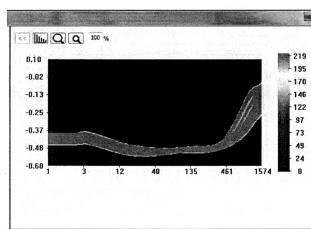
【図6】



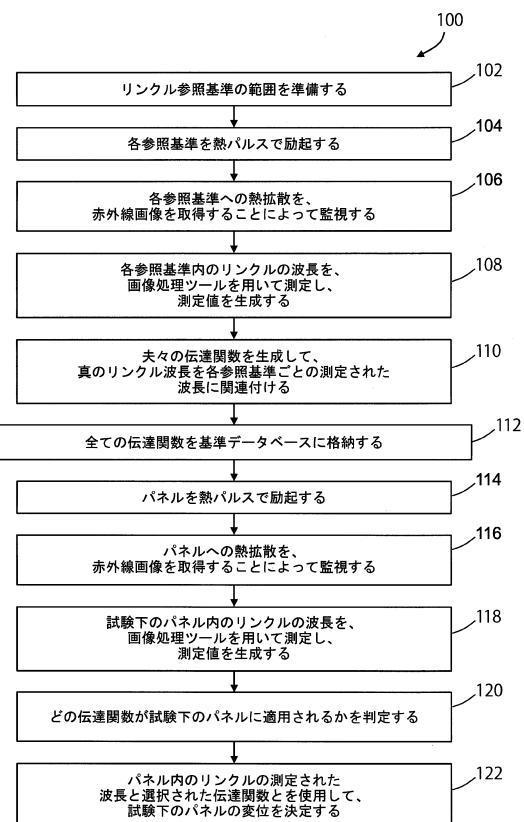
【図7A】



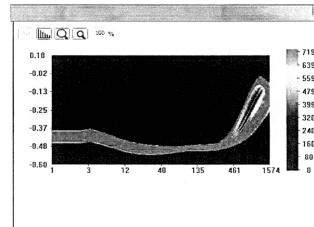
【図7B】



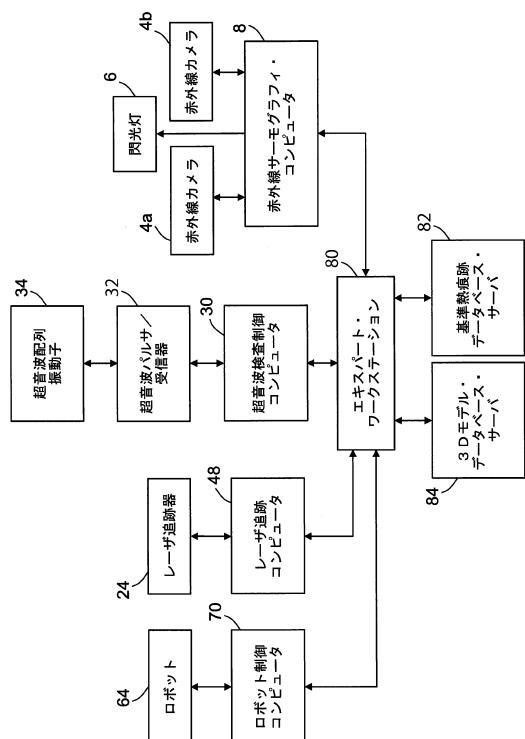
【図8】



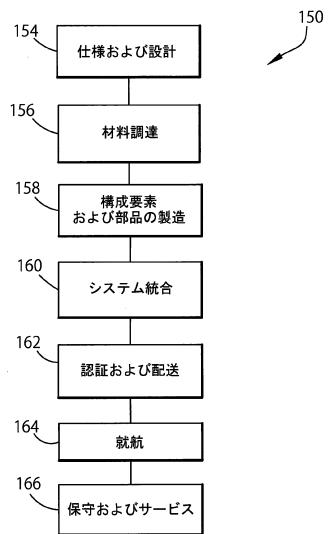
【図7C】



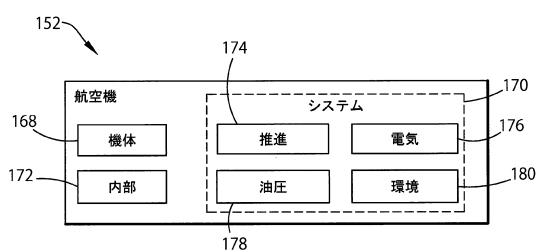
【図9】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 ジェフリー・ジー・トンプソン
アメリカ合衆国・イリノイ・60606・シカゴ・ノース・リヴァーサイド・プラザ・100
(72)発明者 ゲイリー・イー・ジョージソン
アメリカ合衆国・イリノイ・60606・シカゴ・ノース・リヴァーサイド・プラザ・100
(72)発明者 タイラー・エム・ホームズ
アメリカ合衆国・イリノイ・60606・シカゴ・ノース・リヴァーサイド・プラザ・100
(72)発明者 ホン・フェ・タット
アメリカ合衆国・イリノイ・60606・シカゴ・ノース・リヴァーサイド・プラザ・100

審査官 野田 華代

(56)参考文献 特開2002-189008(JP, A)
特表2004-530309(JP, A)
特開2006-170684(JP, A)
特開2015-010944(JP, A)
特開平10-142179(JP, A)
米国特許出願公開第2015/0161777(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G01N 25/00 - 25/72
G01N 29/06
G01N 29/44
G01N 29/265