三次元視覚センサによる自動車パネル寸法検査システム

正員 樋口 和 則 (豊田中研)

正員 小 関 修 (豊田中研)

正員 山 本 新 (豊田中研)

Inspection System for Automotive Body Panel Dimensions using
a 3-D Vision SensorKazunori Higuchi, Member, Osamu Ozeki, Member, Shin Yamamoto, Member (Toyota
Central Res. & Develop. Labs., Inc.)

An algorithm for inspecting the dimensions of automotive body panels using a three-dimensional (3-D) vision sensor has been developed, together with an inspecting system based on this algorithm. The slit light of the 3-D vision sensor is projected onto the body panel and the reference block which gives reference coordinates. In order to measure the gap and flushness between the panel and the block, this algorithm estimates the edge of the bent panel by fitting a circle on the image from the sensor. Further the image is improved by controlling both the projection angle and brightness of the slit light, when the disconnected slit light image is obtained.

The system measured the gap and flushness with accuracy to $\pm 0.15\text{mm}$ in the experiments and proved effective for the inspection of panel dimensions.

キーワード：三次元視覚センサ，寸法検査，光切断法，自動車パネル

1. ま え が き

自動車の高級化指向に伴って，自動車ボディの仕上り品質向上への要求がますます大きくなっている。自動車ボディの仕上り寸法品質は，自動車の塗装品質と並んで重要な仕上り品質の一つである。

自動車ボディは，ボディを構成する各部のパネルを組合せてボディきょう体とし，それに種々の部品を取付け，塗装を施した後，完成車となる。そのため，自動車ボディの検査は，ボディを構成する各部のパネルでの検査，塗装する前のボディきょう体での検査，および完成車両での最終検査に分けられ，各工程で非常に綿密な検査が行われる。

ボディきょう体での検査には，各パネルを組付けたボディの諸元の寸法計測，各パネルの組付け寸法の検査，および窓ガラスを装着するための位置の検出と検査などがある。このうち，ボディ諸元の寸法計測で

は，検査するボディの両側に設置した6軸ロボットの先端にスポット光センサを装着し，ロボットを動かしてきょう体の諸元を計測した報告がある⁽¹⁾。また，ロボットを用いず固定治具に多くのセンサを取付けて検査するシステム⁽²⁾⁽³⁾が報告されているが，これらはいずれもスポット光センサによる検査で，計測部位も単純な形状をしたものに限られている。

完成車両の最終検査については，検査員による綿密な検査が行われていて，検査の自動化の強い要望があるが，これまでに検査システム開発の報告はない。

パネル検査は，端部に丸みをもつパネルの仕上り寸法を検査するもので，これらについても開発報告例は見あたらない。

自動車ボディではなく各種の部品や素材の寸法や形状の検査については，スポット光とPSD（半導体位置検出器）を組合せた形状検査システム⁽⁴⁾⁽⁵⁾や，スポット光を一次元走査して得た二次元同期走査型セン

サ⁽⁶⁾を用いた形状計測システムや、スリット光を用いた船舶用プロペラの形状検査システムの報告⁽⁷⁾もあるが、いずれも端部形状が複雑でなく、寸法や形状検査のための新しい工夫はなされていない。また、著者らによる十字スリット光形三次元視覚センサを用いたエンジン用自動車部品の寸法検査システムの報告⁽⁸⁾がある。これは、十字スリット光により突起や穴の寸法や非対称性を検査するために開発されたもので、自動車パネルのように曲がりのある端部の寸法検査への適用は考えられていない。更に、自動車パネルのように表面に光沢が生じやすく、そのため反射光画像に途切れが生じやすい対象物への適用は難しい。

著者らは、端部が規定の曲率で曲げられた自動車パネルの寸法を、光切断法による三次元視覚センサを用いて検査する方法と、この方法による自動車パネル寸法検査システムを開発した。

この検査方法は、精密に製作された基準となる治具(以下、基準ブロックと呼ぶ)に沿わせて検査すべきパネルを位置決めし、それらにスリット光を投射し、その反射光画像からパネルと基準ブロック間の幅(以下、すき間と呼ぶ)と高さの差(以下、段差と呼ぶ)を得るもので、パネル端部の形状がある曲率で曲げられているにもかかわらず、安定してすき間と段差を計測・検査するものである。更に、端部に光沢などが発生して反射光画像に途切れが生じても、投射するスリット光の角度制御と投射強度制御によって反射光画像の質を良くして検査できるようにしている。

この方式を用いた自動車パネル寸法検査システムは、上記の方式をロボットとマイクロコンピュータなどで制御し、これまで人手などによって行われていた検査を自動化することにより、検査品質の向上と大幅な省人化が達成された。

本論文では、第2章で検査方法を、第3章で三次元視覚センサを含む検査システムの構成を、第4章で検査システムを用いてこの検査方法の有効性とシステムの性能について述べる。

2. 検査方法

〈2・1〉 検査対象 自動車ボディは、ドア部パネル、エンジンフード部パネル、トランクフード部パネル、フェンダ部パネル、などの各部のパネルで構成されている。検査すべき対象は、これら各部のパネルで、これらのパネルには防錆鋼板が用いられている。

図1はフェンダ部パネルを示したものである。パネルの端部は、多くのものが規定の曲率で曲げられている。検査は製作されたパネルが設計値どおりに作られ

図1 自動車パネル
Fig. 1. The automotive body panel.

図2 代表的なパネル端部の形状
Fig. 2. Shapes in the edge of typical panels.

図3 パネル端部の計測と光沢による
反射光画像の途切れ

Fig. 3. Measurement of the panel edge and disconnected slit light image by the gloss in the edge.

ているかをみるもので、精密に製作された基準ブロックを標準として、検査すべきパネルと基準ブロックとの間のすき間や段差を計測することによって行われる。

自動車の各部のパネルの端部はそれぞれ異なった形状をしている。図2はその代表的な端部形状を示したもので、その形状は図のように、(1)パネル端部が切断されている場合、(2)パネルが内側に曲げられている場合、(3)パネルが直角に曲げられている場合、および(4)パネルが鈍角に折曲げられている場合の四つに分けられる。すき間と段差は、各場合について図の

ように定義されているので、それぞれの定義された点を検出するのが課題となる。また、(2)～(4)の場合には、鋼板をプレス曲げ加工することにより、その一部分が伸びて、その端部の表面に光沢などが発生することがある。

上述の端部形状をしたパネルを高速に検査するためには、光学的手法が有効と考えられ、その具体的な方法として、スリット光を投射してその反射光をTVカメラで撮像する方法がある。この方法を用いる場合、図3に示すようにスリット光をパネルと基準ブロックの間に投射すると、プレス曲げ加工によって発生する光沢などのために、TVカメラの反射光画像に途切れが生ずる。このように、途切れの発生などのために正確な画像が得られないと、図2に示した各種のパネル端部形状に対し正しい検査が行えなくなる。正確な検査のためには、途切れのない画像を得ることが必要となる。

〈2・2〉 基本検査方式 考案した検査方式は、検査すべきパネルと基準ブロック間にスリット光を投射して、その反射光画像に最適な円をあてはめ、その円弧の端点（以下、寸法定義点という）を推定算出し、曲率が種々変わる端部形状のパネルについても、正確なすき間と段差を計測する方式である。更に、曲げ加工によって生ずる光沢のために反射光画像に途切れが発生したときには、スリット光の投射角度制御と、投射強度制御を併用し、途切れのない画質の良い反射光画像に改善して検査する。

図4は反射したスリット光画像から寸法定義点を求める方法を示した図である。検査部位にスリット光を投射して得られる反射光画像から三次元座標を検出

し、パネル端部の曲げの部分（以下、円弧部と呼ぶ）に円をあてはめて算出された円の中心と半径から寸法定義点を決定する。ここで、円弧部は、図4に示すようにパネル断面の三次元座標値の二次微分、すなわち曲率を計算し、曲率が許容値以上の長さにわたりしきい値を超える領域として検出する。また、図2(1)のように円弧部がない場合には、画像上の端点を寸法定義点とする。

図5は、反射光画像の途切れを改善するための投射スリット光の投射角度制御と投射光強度制御の方法を示したものである。同図は、円弧部のプレスによる光沢などのために、スリット光画像の反射光量が低下し、結果として(a)図に示すように三次元座標値に途切れが発生する。投射角度と、投射光強度の制御を行うために、まず着目すべきパネル端部の円弧部を抽出

図4 円弧近似による寸法定義点の決定
Fig.4. Determination of the dimensional characteristic point by fitting circle.

図5 スリット光の投射角度と投射強度の制御

Fig.5. Algorithm of controlling the slit light angle and brightness to be projected.

次に、円弧部において三次元座標値から途切れの長さを検出し、途切れがあった場合には、センサの姿勢を制御して、スリット光を投射する角度を微小位置だけ移動させる。このとき、センサの移動方向は、投射スリット光平面内で、パネル端部をのぞき込む方向の角度を制御する。この状態で、同様にスリット光を投射し、途切れの長さを検出する。ここでスリット光の途切れが小さくなれば、前回移動した方向と同じ方向に更に移動させ、逆にスリット光の途切れが大きくなる場合には、前回の移動の逆方向に移動させる。この投射角度制御により、途切れのない品質の良いスリット光画像を得ることができる。

次に、円弧部のスリット光の線幅を検出し、これが適正な範囲にあるかどうかにより投射光強度制御を行う。すなわち、円弧部のスリット光の線幅が小さすぎる場合には、投射光強度を上げ、逆に線幅が大きすぎる場合には、投射光強度を下げる。ここで、直線部のスリット光の線幅も同時に検出し、これが許容範囲を超えない範囲で投射光強度を制御する。直線部のデータは円弧部の検出と段差の計測のために用いられる。直線部では、すき間の計測のようにスリット光の端を検出する場合に比較して、スリット光の線幅の影響は小さくなるため線幅の許容範囲を広く設定できる。従って、投射光強度の制御では、スリット光の線幅の適正な範囲を直線部と円弧部で別々に設定できるため、実用上の問題はない。

このように、投射角度と投射光強度を制御することで、途切れの少ない均一な画像を得ることができる。

〈2・3〉 検査アルゴリズム 図6は検査の処理の流れを示したものである。まず、センサを計測すべき

図6 検査の処理の流れ
Fig. 6. Flow chart of dimension inspection.

部位に位置決めし、スリット光を投射する。このとき、途切れのないスリット光画像を得るために、前述したパネル端部に着目した投射角度と投射光強度を制御する。次に、三次元座標を検出し、端部形状に応じて、すき間と段差を決定する寸法定義点を決定して、すき間と段差を計算する。ここで、寸法定義点は、パネルの設計上、図2(1)では、すき間・段差ともパネルの先端、図2(2)(3)では、すき間は円弧部の先端、段差は円弧開始点、図2(4)では、すき間は円弧終了点、段差は円弧開始点と決められている。

3. 検査システム

〈3・1〉 三次元視覚センサ パネル寸法検査のために三次元視覚センサを新しく開発した。図7に、この視覚センサの構成を示す。この視覚センサは、光切断法を用いた三角測量により三次元座標を検出する。この視覚センサは、撮像ヘッドと実時間の座標測定を行うための座標演算ボードで構成されている。

撮像ヘッドは、スリット光源とTVカメラからなる。スリット光は、半導体レーザのスポット光を円筒レンズで変換して得ている。レーザの波長は、一般の照明の影響を受けないように近赤外の830nmに選んでいる。TVカメラは、384(水平)×484(垂直)画素の小形CCDカメラを用いている。

座標演算ボードは、TVカメラの撮像素子上のスリット光画像の位置を検出するスリット光中心位置検出回路、この位置を三次元座標値に変換するためのルックアップテーブル、および対象物の表面性状の影響を低減するための投射光強度制御を行うスリット光反射強度検出回路とスリット光投射強度設定回路からなる。これら回路は、実時間の座標測定を行うために、すべて専用ハードウェアで構成されている。

図8にこの三次元視覚センサの外観を示す。

表1はこの三次元視覚センサの性能である。測定範囲は、センサの先端から70mmの位置で30mm(Y)

図7 三次元視覚センサの構成
Fig. 7. Block diagram of 3-D vision sensor.

図 8 三次元視覚センサの外観
Fig. 8. Photograph of 3-D vision sensor.

表 1 三次元視覚センサの性能
Table 1. Performance of 3-D vision sensor.

動作距離	70 mm
計測範囲	30 (Y) × ±10 (Z) mm
計測点数	484 点
計測精度	±0.06 mm
計測時間	33.3 ms/484 点

図 9 パネル取付け台の構成
Fig. 9. Schematic diagram of panel attachment table.

×±10 mm(Z), 測定精度は ±0.06 mm(Y, Z)である。測定点数はスリット光に沿って 484 点, 測定時間は実時間座標測定により 484 点につき 33.3 ms である。撮像ヘッドの重量は 700 g で, ロボットに容易に装着できる。

〈3・2〉 システムの構成 開発した検査システムにおいては, パネルはパネル取付け台に取付けられて検査される。図 9 にパネル取付け台の構成を示す。この取付け台には, 対象パネルに対応した基準ブロックが固定されており, パネルは, この取付け台に磁石を用いた専用の取付け治具で取付けられる。また, この取付け台の側面と底面には, パネルを検査システムへ正しく位置決めするための基準面が設けられている。この取付け台は, 各種パネルを検査システムに簡便かつ正しく位置決めするために, パネルの種類によらず共通の仕様で作られている。

図 10 に開発したパネル寸法検査システムの構成を示す。このシステムは, 三次元座標を検出するための

図 10 検査システムの構成
Fig. 10. Schematic diagram of the inspection.

三次元視覚センサ, 三次元視覚センサを計測部位へ移動・位置決めするための 6 軸ロボット。6 軸ロボットを制御するためのロボットコントローラ, 三次元視覚センサの出力の処理ほかを行うための処理部, および 6 軸ロボットとパネル取付け台を固定するための定盤からなる。定盤上にはパネル取付け台上のパネルをロボット座標系に正しく位置決めするための位置決め治具が設けられている。また処理部は, 三次元視覚センサの出力を処理し寸法を計算するためのパソコン, 後述する検査ファイルの作成のための外部記憶装置とイメージスキャナなどからなる。

図 11 は, この検査システムによる検査の処理の流れを示している。まず, パネル取付け台の基準面を, 定盤上の位置決め治具にあてがってパネルを固定する。次に, 検査対象のパネルについての検査ファイルを外部記憶装置から読み込む。読み込んだ検査ファイルで指示される計測部位に, 三次元視覚センサを 6 軸ロボットで移動・位置決めする。位置決め後, パネルと基準ブロックにスリット光を投射する。得られた反射光画像に途切れがある場合には, 途切れのない反射光画像が得られるように, 6 軸ロボットにより三次元視覚センサの姿勢を変え, スリット光の投射角度の制御を行う。角度制御により途切れのない反射光画像を得た後, 投射スリット光の強度制御を行って, 反射光画像の線幅を適正な値にする。

このようにして, 良好な反射光画像を得た後, パネルと基準ブロックについての三次元座標を検出し, これより寸法定義点を決定する。なお, 上述の角度制御を, 検査時間で制限される所定の回数まで繰返し行っても画像の途切れがなくならない場合は, 図 4 で示した円のあてはめにより途切れ部分の三次元座標を推定した後, 定義点を決定する。次に, 決定した定義点の

図 11 検査システムの処理の流れ
Fig. 11. Flowchart of the inspection procedure using developed system.

三次元座標からすき間・段差を計算する。すき間・段差の計測結果の出力はグラフ表示と統計量表示により行う。グラフ表示は、計測結果の正寸値とのずれをパネル外形に沿って表示する。また、統計量として、正寸値からのずれについての平均値や偏差を出力する。

図 12 は検査ファイルの作成の手順を示す。検査ファイルは、パネル検査に必要な情報が登録された表で、各パネルごとにあらかじめ作成される。これには計測結果の表示のためのパネル外形図、パネルの複数の計測部位についての測定の順番、それぞれの計測部位の端部形状のタイプとすき間・段差の正寸値、そして、三次元視覚センサを計測部位に位置決めするためのロボットの位置情報が登録される。

パネル外形図はイメージスキャナから入力する。また、ロボットの位置情報の登録は、基準ブロック上に記された計測部位に三次元視覚センサのスリット光が正しく投射されるようにロボットを位置決めし、このときのロボットの位置を外部記憶装置に記憶させて行う。

4. 評価実験

〈4・1〉 方法 途切れのない反射光画像を得るための投射スリット光制御の有効性の検証と、投射スリット光制御を行ったときの寸法計測精度の評価を行うため、開発したシステムを用いて実験を行った。

投射スリット光制御の有効性の検証は、パネル端部に光沢のある実パネルを対象に、投射スリット光制御

図 12 検査ファイルの作成の手順
Fig. 12. Flowchart of preparing the inspection table.

を行わない場合と行った場合のそれぞれについて、三次元視覚センサにより検出された反射光画像を比較することで行う。

寸法計測精度の評価は、実パネルを対象に行う。寸法計測部位は、図 2 に示される 4 種類の端部形状のそれぞれについて 20 点とし、図 2 の (2)～(4) の端部形状については、パネル端部に光沢が発生している部位とする。評価は、この計測部位のすき間と段差について、その真値と本システムによって投射スリット光制御を行って得た測定値とを比較することで行う。すき間と段差の真値は、本システムによる測定後、パネルに樹脂を流し込んで製作したレプリカの断面を万能投影機で観測して求める。

〈4・2〉 結果 図 13 は投射スリット光制御の有効性の検証実験結果である。(a)図は、図 2 (4) の端部形状のパネルに、投射スリット光制御を行わないで、あらかじめ設定した一定角度で一定強度のスリット光を投射したときの反射光画像の例を示している。この図より、パネルの光沢のため端部に途切れが発生していることがわかる。更にこの画像では、途切れていない部分についても、線幅は適正な幅よりも細く撮像されている。

図 13 (b) は、同じパネルについて途切れがなくなるように投射スリット光の角度制御を行い、更に、強度制御を行った後の反射光画像を示している。これらの制御により、画像の途切れがなくなっていることと、画像の線幅が制御前に比べ広く撮像されているこ

(a) 端部に途切れのある反射光画像

(b) 投射スリット光制御後の反射光画像

図 13 投射スリット光制御の有効性
Fig. 13. Validity of controlling slit light projection angle and brightness.

とがわかる。

以上の実験結果から、投射スリット光制御がパネルの光沢による反射光画像の途切れなどの改善に有効であることが確認された。

図 14 に計測精度の実験結果を示す。(a)図がすき間、(b)図が段差の結果である。横軸はレプリカから求めた真値、縦軸は本システムによる測定誤差である。ここで、測定誤差は測定値から真値を引いた値である。端部形状の違いは□、△印などにより示されている。この実験結果より、すき間と段差とも、端部形状の違いによる有意差はなく、1)~4)の全端部形状についての測定精度は $\pm 2\sigma$ で表して、それぞれ ± 0.15 mm, ± 0.1 mmであることがわかる。パネルを製作するときに許容されている寸法誤差(以下、許容誤差という)は、パネルと基準ブロックとのすき間・段差で表して、いずれも ± 0.5 mmであり、その寸法を測定するうえでの目標精度は許容誤差の1/3以下である ± 0.17 mmに決められている。

上述の測定精度結果は、この目標精度を満たしており、これより開発した検査方式と検査システムの有効性が確認された。

表 2 に検査システムの性能をまとめて示す。検査対象は自動車用のドアパネルなど30種類である。すき間と段差の計測範囲は、すき間が1~8 mm, 段差が

(a) すき間

(b) 段差

図 14 計測精度

Fig. 14. Accuracy of dimension inspection.

表 2 検査システムの性能

Table 2. Performance of the inspection.

パネル種類	ドアパネルなど30種類
計測範囲	すき間: 1~8 mm, 段差: -4~4 mm
計測精度	すき間: ± 0.15 mm, 段差: ± 0.10 mm
計測時間	6 秒/1 測定点 (位置決め: 4 秒, 測定: 2 秒)

-4~4 mmであり、計測精度は、すき間が ± 0.15 mm, すき間が ± 0.10 mmである。このシステムによる1部位の計測時間は6秒で、このうち、ロボットによる三次元視覚センサの位置決めと姿勢制御が4秒、三次元視覚センサによる測定が2秒である。この1部位あたりの計測時間は、従来、人手によって行われていた場合を約1/5に短縮しており、検査の大幅な高速化が達成されている。

5. ま と め

自動車パネルの仕上り寸法を検査するために、三次元視覚センサを用いた検査方法と、同法による自動車パネル寸法検査システムを開発した。

考案した検査方法は、検査すべきパネルと基準ブロック間に三次元視覚センサのスリット光を投射して、

その反射光画像に円をあてはめ、その円弧端点を算出し、これから種々の曲率をもつパネルについて正確に隙間と段差を計測し検査する方式である。更に、曲げ加工などで生ずるパネルの光沢のため反射スリット光画像に途切れが生じたときには、スリット光の投射角度と投射強度の制御によって良質な画像に改善して、上記の方法に基づいて検査する。

この方法を用いた検査システムは、三次元視覚センサを計測部位にロボットにより位置決めし、パネルと基準ブロック間のすき間と段差を計測する。このシステムは、30種類の自動車パネルの寸法を、1部位あたり6秒の時間で、精度 ± 0.15 mm以内で計測することができる。

三次元視覚センサとこの検査方式を用いた自動車パネル寸法検査システムは、実際の工程で活用され、車の高品質化に貢献している。

(平成3年8月28日受付)

文 献

- (1) Y. Sakamoto & K. Yamamoto: "Development of a Car Body Inspection System", Proc. of SAE/ESD International Computer Graphics Conference, p. 101 (1987)
- (2) G. Seliger, W. Felsing, K. D. Lennartz & H. Trilk: "Laser scanning for flexibilization of robotic assembly cells", Proc. of Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, p. 307 (1988)
- (3) W. S. Wilson: "The Role of Vision in a Dimensional Control Strategy", Proc. of Vision '85, p. 7 (1985)
- (4) 高木・小島・高草木・栗根・吉岡: 「レーザー応用形状計測装置」, 日立評論, 68, 73 (昭61-3)
- (5) 服部・久保・坂本・渡辺: 「自由曲面における非接触型三次元計測」, 三菱電機技報, 62, 73 (昭63-4)
- (6) M. Rioux: "Laser Range Finder based on snchronized Scanner", Appl. Opt., 23, 3837 (1984)
- (7) R. F. Livingston, A. F. Tulal & M. R. Thomas: "Application of 3-D Vision to the Measurement of Marince Propellers", Proc. of Vision '87, p. 10 (1987-06)
- (8) 小関・樋口・山本: 「三次元視覚センサを用いた自動車部品の寸法検査システム」, 電学論 C, 111, 249 (平3-6)

樋 口 和 則 (正員)

昭和61年名古屋大学大学院修士課程修了。同年(株)豊田中央研究所入社。以来、画像処理を用いた三次元計測・認識の研究と開発に従事。現在、同研究8部所属。電子情報通信学会、精密工学会会員。

小 関 修 (正員)

昭和56年名古屋工業大学大学院修士課程修了。41年(株)豊田中央研究所入社。以来、自動車用マイクロ波レーダ、自動車用電子機器の電磁障害、画像処理を用いた三次元計測・認識の研究と開発に従事。現在、同研究8部研究員。電子情報通信学会、計測自動制御学会、精密工学会会員。

山 本 新 (正員)

昭和40年岐阜大学工学部電気工学科卒業。同年(株)豊田中央研究所入社。以来、電気自動車の制御、自動車用電子機器の電磁障害、画像処理を用いた三次元計測・認識および無人搬送システムの視覚に関する研究と開発に従事。59年IEEE-VTS Paper Award受賞。現在、同研究8部主席研究員。工学博士。情報処理学会、日本ロボット学会、精密工学会自動車技術会会員。