非接触３次元形状測定に関する技術開発

非接触３次元デジタイザVIVID9iとデジタル写真測量システムPSC-1の開発

Development of Non-Contact 3D Measurement Technology

有泉昌弘＊ Ariizumi, Masahiro
河野利夫＊ Kawano, Toshio
阿部芳久＊ Abe, Yoshihisa
原田孝仁＊ Harada, Koji

要旨

新しい３次元形状測定システム（「非接触３次元デジタイザVIVID9i」とデジタル写真測量システム「PSC−１」）を開発した。これは高精度化という工業界での要求に応えるべく、従来機種に対して数倍の精度向上を実現したものである。ハードウェアでは、誤差解析に基づいて駆動部の位置再現性や光学ブロックの剛性を改良し、加えて空間歪校正方法も変更した。ソフトウェアにおいては、ノイズ除去やデータ削減を改良した。VIVID9iとPSC−１を組み合わせることで、最終的なデータ統合時の精度が向上した。RE（Reverse Engineering）やCAT（Computer Aided Testing）で応用が進んでいる。

Abstract

The newly developed VIVID 9i 3D digitizer and the PSC-1 photogrammetry system combine to multiply several times over the accuracy of conventional systems in meeting the high demands of current industrial applications. Error analysis has allowed the system's hardware to offer improved position-repeatability of movable parts and rigidity of the system's optical block, and the calibration method has been revised as well. At the same time, software advances have refined noise removal and data reduction. Moreover, the combination of the VIVID 9i digitizer and the PSC-1 system has heightened the accuracy of integrated final data. This new overall system offers great advantages in such applications as RE (reverse engineering) and CAT (computer aided testing)

1　はじめに

コニカミノルタセンシング㈱では、1997年に非接触３次元デジタイザ「VIVID700」を発売して以来、VIVIDシリーズの開発・製品化を行ってきた。1997年当時、３次元デジタイザの用途は主に理工系、医学系、歯学系大学や文化財の研究、あるいはマルチメディア分野でのコンピュータ･グラフィック作成などであった。それが近年では、モノ作りプロセスの効率化の要求拡大により、自動車製造業等の工業分野での利用に注目が集まっている。

＊コニカミノルタセンシング㈱　開発部　開発３課

工業分野で非接触３次元デジタイザの活用が広がる最も重要なポイントは精度である。一般に非接触３次元デジタイザは、対象物を複数の方向から分割測定し、分割測定データを統合することにより最終的なデータを得る。つまり、デジタイザ単体の測定精度だけでなく、分割測定した複数のデータの統合精度も重要である。

これらの要求に対し、工業分野をターゲットにして「VIVID9i」と「ポリゴン編集ソフトVersion2.0（Polygon Editing Tool；以下PET）」を2004年８月に、「PSC−１」を９月に製品化した。VIVID9iは自社従来機に比べ、単体の測定精度が４倍以上改善されている。また、PSC−１により、多視点から計測した複数データの位置合わせ作業が容易に、かつ、高精度に行なえるようになった。その上で、他の同クラスの非接触３次元デジタイザに比べ、約1/2という低価格を実現している。本稿では、VIVID9iとPSC−１の精度向上に寄与した技術とアプリケーション例について説明する。

2　測定フロー

VIVID9iは、対象物の表面形状情報を、３次元座標をもつ離散的な点群データとして取得する装置であり、PET

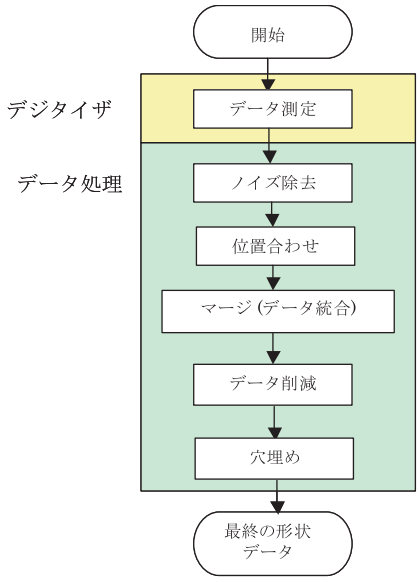

Fig.1 Data flow

とともに用いられる。PETは、①VIVIDの制御と形状データの取得、②取得された複数の形状データの処理と、目的となる最終形状データの作成、という2つの機能を持つ。データ測定から最終形状データを得るまでのフローを**Fig. 1** に示す。

取得された形状データはコンピュータ画面上に表示され、ユーザによってノイズ除去、位置合わせ、穴埋めなど、さまざまなデータ処理が行われ、最終的な形状データとなる。

3　ハードウェア技術の向上

VIVID9iの基本原理は、レーザビームを用いた光切断法である（**Fig. 2**）。半導体レーザ光源からの光束を横長の線状光（以下スリット光）として対象物に照射し、反射光を受光レンズ系でCCD上に結像させる。スリット光の投射角度とCCD上のスリット光像の位置関係から三角測距の原理に基づいて物体距離を算出し3次元データ化する。[1)]

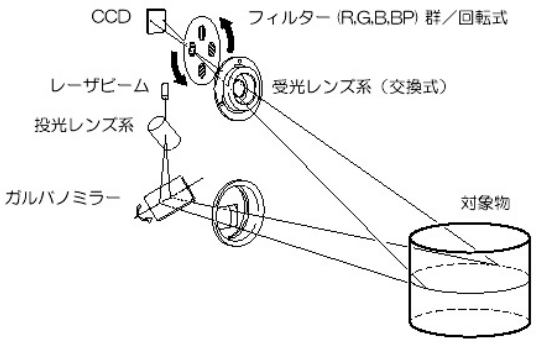

Fig.2 Measuring principle of VIVID 9i

VIVID9iの特長は、測定可能距離が可変（500㎜～2500㎜）、測定範囲が可変（93×69×26㎜～1495×1121×1750㎜）、可搬型というフレキシビリティを保ちながら、高精度化を実現していることである。従来機同様に、オートフォーカスと受光レンズの交換、これに応じたスリット光の幅と長さの最適化が必要となる。精度向上のポイントは、①投光レンズと受光レンズの精密な駆動、②光学ブロックの剛性向上、③位置再現性が高いレンズ交換機構、④校正アルゴリズムの改良による校正空間の歪みの削減である。投光系及び受光系位置が変化した場合の物体上での距離の誤差感度を**Table 1** に示す。

Table 1 Error sensitivity

レンズ	測定距離条件	方向	投光角度が0.005°変化した場合	受光位置が0.001mm変化した場合
Tele (f=25mm)	600mm	X	30μm	11μm
		Y	20μm	8μm
		Z	10μm	5μm
Wide (f=8mm)	1000mm	X	50μm	300μm
		Y	30μm	230μm
		Z	30μm	220μm

このような厳しい誤差感度に対応するためには、可動部のガタつきを可能な限り詰めることが必要であった。そこで、投光系ではバリエータレンズの直進ガイド軸の嵌合保持を、受光系では受光レンズのヘリコイドによる保持を、ともにリニアガイドによる保持に変更した。その結果、投光系のガタつきを15μmから1μm以下に、受光系のガタつきを20μmから1μm以下に抑えることが可能になった（**Fig. 3**）。さらに光学ブロックの構造解析を行い、強度の弱い部分を補強することで、姿勢変更に伴う光学ブロックの変形を従来機の約1/7に抑えた（**Fig. 4**）。

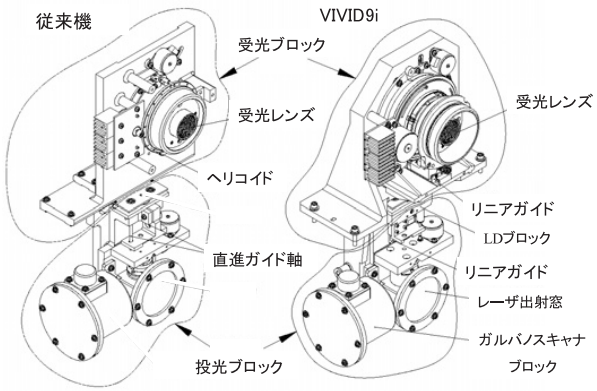

Fig.3 Comparison of optical blocks (front)

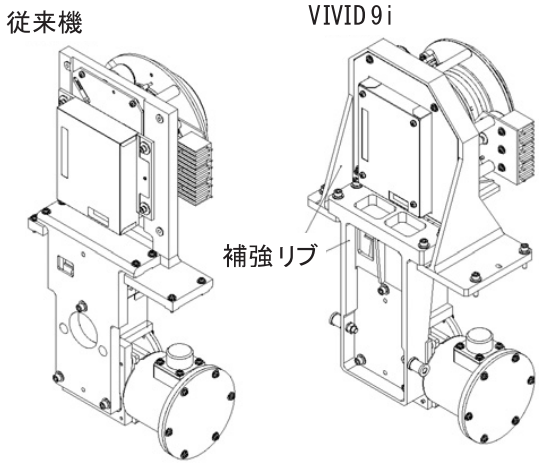

Fig.4 Comparison of optical blocks (back)

レンズ着脱機構では、レンズとレンズマウントの接触部の支持方式を変更した。ＸＹ方向と、Ｚ方向にそれぞれ3点支持方式を採用し、常に同じ位置にレンズが固定される構成とした。さらに、3点の接触部も出来るだけ面積を小さくし、埃などによるレンズ位置ズレの影響を極

限まで軽減した。それでも残り得る誤差は、レンズ交換時に現場で既知形状の物体を計測して校正するシステムを採用することで、さらに抑制した。

このようなメカニカルな改善に加え、VIVID9iでは、測定空間の歪みを補正するための校正アルゴリズムにも大幅な改良を加えた。従来、投光系の校正では位置、姿勢、スリット光の角速度を校正パラメータとして計算してきた。しかし、光学的に調整しきれなかったスリット光の湾曲や、ガルバノスキャナの非直線性などについては校正されていなかった。そこで、上記2つの誤差要因について多項式近似補正するための校正パラメータを設けた。さらに、測定領域(画角)を複数の領域に分割し、分割領域毎に校正パラメータを持たせた。その結果、測定領域の歪みをより正確に補正できるようになり、平板測定における平面度も従来機の4～6倍（自社比）まで改善している（**Fig. 5**）。

これらの結果、単体精度において従来機より4～10倍（自社比）の精度向上を達成した（**Fig. 6**）。

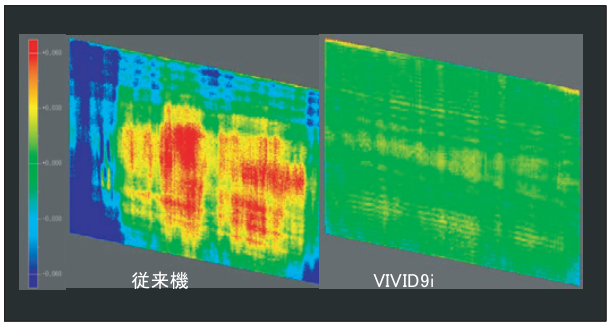

Fig.5 Results of flat measurement

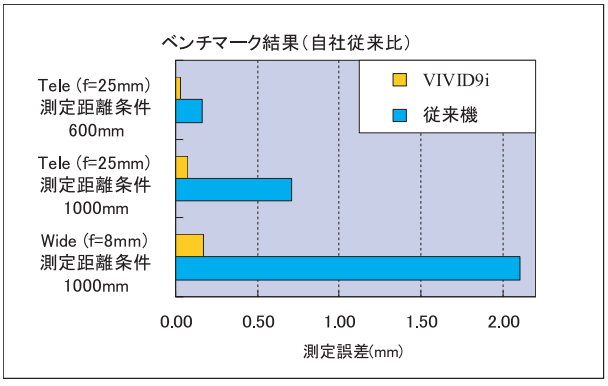

Fig.6 Results of benchmark

4 ソフトウェア技術の向上

非接触3次元デジタイザでは、反射光をCCDで捉えることにより形状を測定している。そのため、物体表面上で多重反射した迷光などがCCD上で擬似焦点を結ぶと形状データにノイズとなって現れる。形状データに残るノイズは、手作業で除去する必要があり、相当な時間と手間を必要とする。あらかじめ出来る限りノイズ削減しておくことが重要である。今回実装したアルゴリズムでは、求められた形状データのうち、原理上測定することができない位置にある点、およびCCDの出力レベルのバラツキから考えて異常と見られる点をノイズとみなし除去する。このアルゴリズムの効果を**Fig. 7** に示す。この図ではノイズ除去なし（上段）とノイズ除去あり（下段）の結果を示す。赤囲みの領域でノイズ除去の効果が大きいことがわかる。

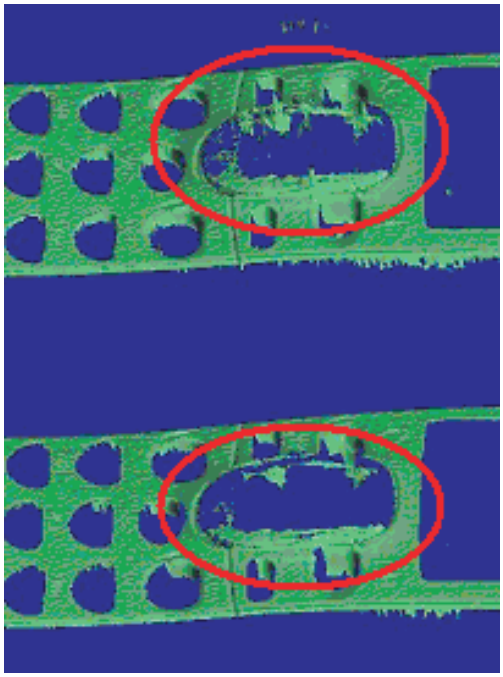

Fig.7 Effect of noise reduction

次に、測定された形状データの削減を説明する。複雑で大きな対象物を計測する場合、計測するデータ点数が増え、データ処理に莫大な時間が必要となる。この問題を解決するため、一定の誤差内で元の形状を保ちながら、データサイズを削減するアルゴリズムを開発した。従来の点群を均一に間引く手法では形状を保持できず、また逆に、単純に形状を保持しながらデータを間引く手法では平面部で点群が極端に間引かれて、特徴形状部とのデータ点の粗密差が大きいという問題があった。今回開発したアルゴリズムでは、まず、格子状に並んだ点群を一定領域ごとに分割する。領域分割後、各領域に対して、形状を保持したデータ間引きを実行する。このアルゴリズムでは平面上にあると近似できる測定点を削減するため、形状を保ったままデータサイズを小さくできる。また点の粗密差が小さくなると同時に、計算時間も

データ点数に比例するレベルに抑えることができる。

Fig. 8 で示すカメラのモックアップを測定した場合、元の形状に比べてデータ点数は約1/6となっている。元の形状とデータ削減後の形状を**Fig. 9** のように比較する。これは形状のズレを大きさと方向に従って色諧調表示（コンター表示）したものである。赤色(または青色)は削減後の形状データが元の形状に比べて、+60（または-60）μmずれていることを示す。緑色は元の形状に比べてズレがほとんどないことを示す。**Fig. 8** 、**Fig. 9** から、元の形状を維持しながら大幅にデータが削減されていることが分かる。

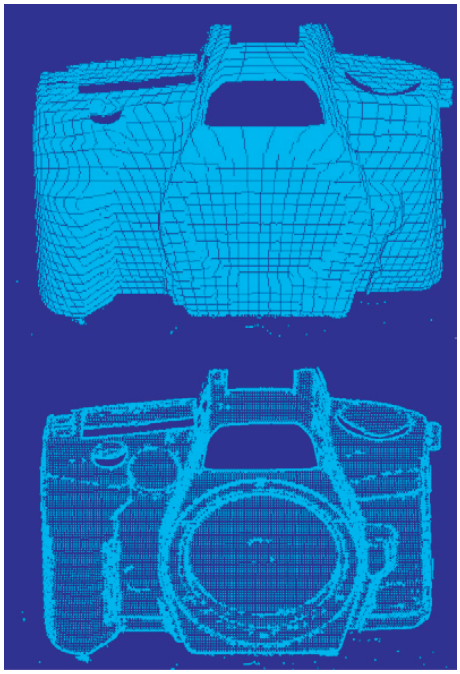

Fig.8 Example of data reduction

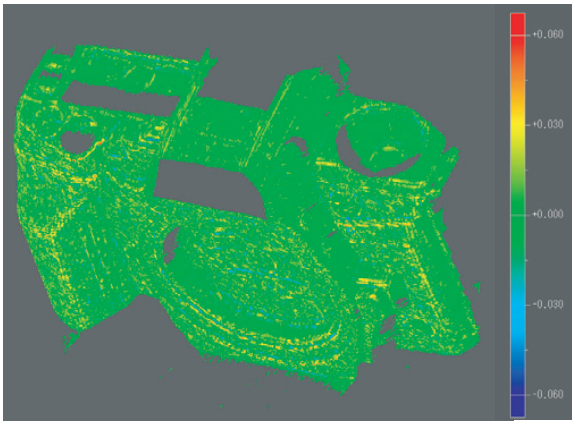

Fig.9 Comparison of 3D form

5 システム技術の向上

5．1 データ位置合わせ

測定フローで説明したように、通常は分割測定された複数のデータを位置合わせするため、位置合わせ精度も重要なポイントである。最も汎用的な位置合わせ方法は、測定データ上の形状が一致する部分をソフトウェアにより解析して行なう手法であるが、精度が対象物の形状特徴に依存する、誤差の累積が生じるなどの課題がある。これらの課題を解決する手段として、デジタル写真測量の技術を利用したPSC-1を開発・製品化した。

写真測量とは、2次元平面に写された像の形から、被写体の3次元座標を求める手法である。2次元画像はデジタルカメラで写され、被写体はレンズを通してCCDの2次元平面上に投影される。被写体、レンズ中心、CCD上の像点が一直線上にあるという幾何学的な条件を、異なる位置から撮影した複数の画像に適用することで、各直線の交点として3次元座標を求める。

PSC-1では、まず、対象物に再帰反射性のマーカを貼り付ける。対象物の周囲には、長さが既知のスケールバーを配置する。これは3次元座標系の絶対長さを補正する役目を果たす。次に、デジタルカメラで複数の方向から複数の画像を撮影する。これらの画像に上述の演算を適用することで、全マーカの3次元座標を求めておく（**Fig.10**）。

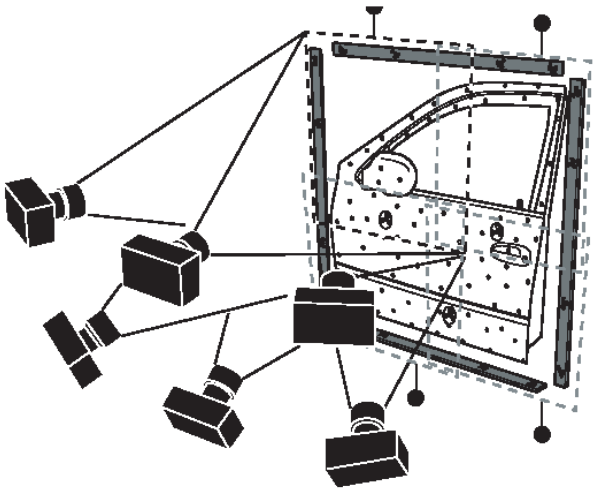

Fig.10 Taking photos with PSC-1

つぎに、同じ対象物をVIVID9iで測定し、計算されたマーカの3次元座標と写真測量によりあらかじめ求められたマーカの3次元座標が一致するようにVIVID9i測定データを座標変換する。つまり、全てのマーカの3次元座標は写真測量により求められているため、VIVID9iで測定された分割測定データを、マーカを目標に位置合わせすることで全データを得ることが出来る。位置合わせに

は、パターンマッチングの手法を用いている。つまり、測定された複数のマーカの配置と全マーカの配置を比較し、マーカの対応関係を求めている。対応付けられたマーカは最小自乗法によって位置合わせされている（**Fig.11**）。

この方法では、位置合わせ目標となる全てのマーカ位置の絶対座標があらかじめ求められているため、誤差の累積が生じることがなく、高精度の位置合わせが可能である。

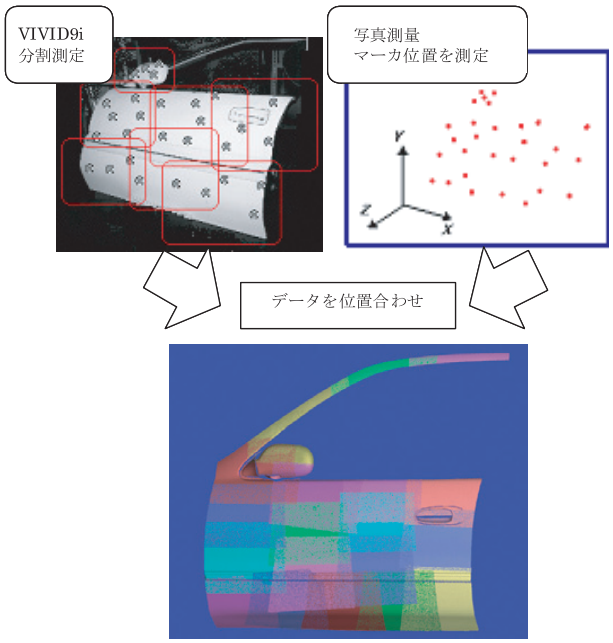

Fig.11 PSC-1 system

5．2　位置合わせ精度の検証

PSC-１によるVIVID9i測定データの位置合わせ精度の検証を行った。検証には、両端に球のついた長さ約1000㎜のバーを用いた。このバーは球の中心間距離が接触式測定機で値付けされている。検証の手順は次の通りである。①平板に複数のマーカを貼る。②写真測量によりマーカの３次元座標を求める。③平板を固定し、その前にバーを配置する。④バーの右球と左球をそれぞれVIVID9iで測定し、PSC-１を用いて位置合わせする。⑤PSC-１により位置合わせされた２つの球の中心間距離を計算する。⑥求められた中心間距離と値付けされた値を比較する。以上の①～⑥を繰り返し行って、位置合わせの精度を検証した（**Fig.12**）。

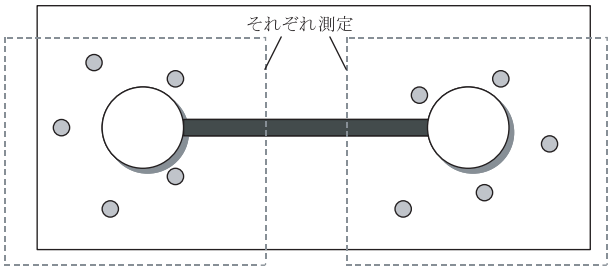

Fig.12 Measurement of ball bar

検証結果を**Fig.13**に示す。この図では横軸がVIVID9iの個体番号、縦軸が各個体の誤差である。VIVID9iの個体によらず、200μm以下の誤差で統合できていることが確認できる。なお、５．１で述べた形状による位置合わせを行った場合は、位置合わせ回数により誤差の累積の程度が変化するため、対象物に対する誤差を定量的に見積もることはできない。

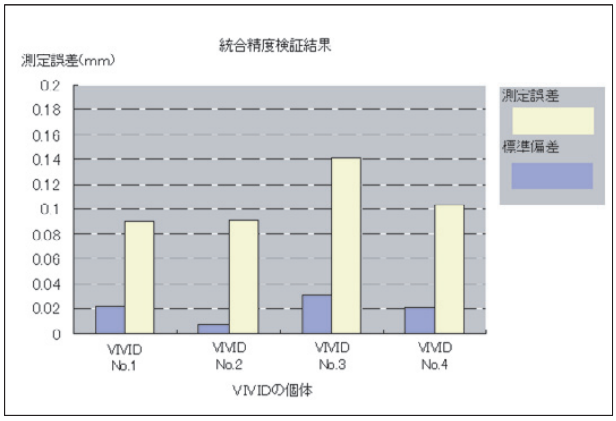

Fig.13 Results of ball bar

6　非接触３次元形状測定システムの応用

VIVID9i や PSC-１を用いたアプリケーション事例をいくつか紹介する。

自動車の構成部品であるインストルメントパネル（**Fig.14**）およびバンパ（**Fig.15**）などサイズの大きい測定物の場合、細部の形状を再現しつつ全体の形状を入力するために多くの方向から計測を繰り返す。多数のデータの統合作業は膨大な上に、位置合わせ精度が高く要求されるので、従来機では数時間かけても処理が困難であった。VIVID9iとPSC-１を使用すれば、約40ショットのデータの計測から統合までを90分程度で完成する。

意匠データを作成する場合、モックアップやクレイモデルを作成し、その実測寸法を元に3D-CADなどを用いてモデリングを行なう。この場合、自由曲面のモデリングは非常に難しく、多大な労力を要する。しかし、それらを非接触形状測定システムで測定し、特徴線抽出機能やNURBS面生成機能をもつソフトウェアと組み合わせることにより、接線連続性が非常に高いサーフェスデータが短時間で生成できる。これにより、デザイナの意図が直接反映された付加価値の高い意匠データや試作モデルの作製が可能である。[2)]

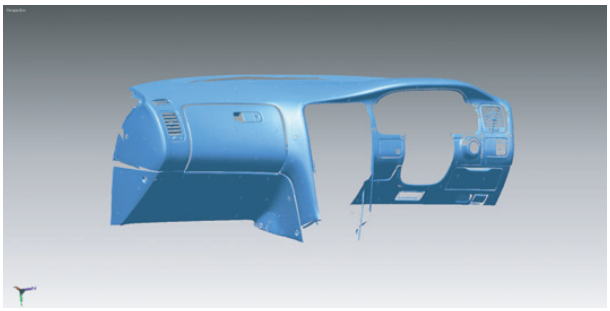

Fig.14 Instrument panel data

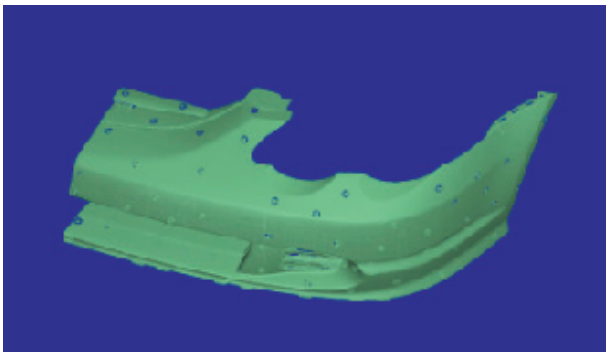

Fig.15 Bumper data

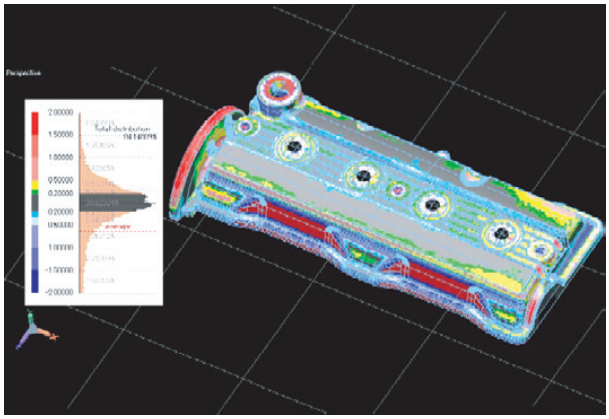

Fig.16 CAT application

Fig.16は、同様にエンジンカバーを計測したCATの事例である。CAT機能をもつソフトウェアを用いれば、3D-CAD設計データと、実際に測定した部品の3次元形状データとをコンピュータの仮想空間内で位置合わせし、お互いの形状を比較することが可能である。ズレ度合いに応じて色調を変化させるコンター表示によって実物の不良箇所を確認できる。一点一点の寸法を検査する前に、形状全体がどのように仕上がっているかを確認をしたり、局所的な寸法の異常な点をすばやく発見するのに適している。また、寸法検査機能を用いれば、形状比較検査で確認した不良箇所に対して詳細な寸法検査を行なう事も可能である。断面検査機能をもつソフトウェアもある。実物では部品切断時に応力変形が生じ、正確な断面検査を行なう事は難しいが、3Dデータを用いれば変形無く、任意の断面形状を評価する事もできる（**Fig.17**）。

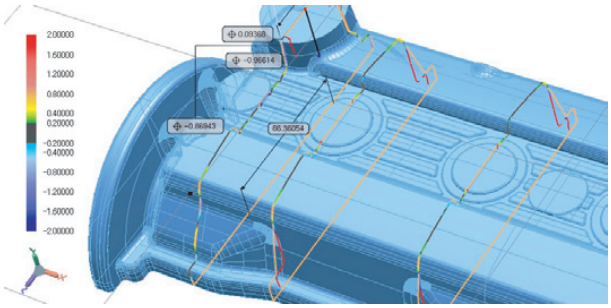

Fig.17 Evaluation of profile form

7　まとめ

新しい3次元形状測定システムの精度向上への取り組みを紹介した。自動車業界を中心に、プレス部品の金型作製や、機構面の加工誤差検査での非接触測定ニーズが増えている。長さ1mに対して100μm以下の精度実現とその保証、そして作業時間の短縮がポイントである。また、応用を広げるためには、操作性の向上、耐環境性の改善、自動化システムなどが課題である。今後も更なる技術向上を目指し、工業界への非接触3次元形状計測システムの普及に大きく貢献したいと考えている。

● 参考文献

1）清井計弥、高田直弥、有泉昌弘、福本忠士、光計測シンポジウム2001論文集、86-89（2001）
2）亀沢仁司、科学と工業、77、31-38（2003）