

高精度光応用計測技術の開発 (第 1 報)

光切断法による 3 次元計測

倉本丈久, 竹保義博^{*1}, 門藤至宏, 廣川勝久

Noninvasive optical measurement for external, surface and internal structures I

Three dimensional measurement using light sectioning method

KURAMOTO Takehisa, TAKEYASU Yoshihiro, MONDO Munehiro,
and HIROKAWA Katsuhisa

Noninvasive three-dimensional measurement using the light sectioning method is suggested. We investigate and settle the problems that are caused in the measurement of the three dimensional objects using the laser light stripe triangulation, and the three dimensional digitizer. We demonstrate that a metallic mold of the object is formed from the rapid prototyping of the measurement digital data.

本報告では, 光切断法を用いた非接触による物体の 3 次元形状計測およびその利用法について述べる。光切断法によるレーザスキャン型 3 次元デジタル計測を用いて, 物体の 3 次元形状計測を行う際の問題点とその解決法について検討し, 計測精度が 1 桁向上するという結果を得た。また, 計測の結果得られた被測定物の 3 次元形状データを用いて迅速な試作品の作成 (ラピッドプロトタイピング) を行い, 得られたモデルを基に金型の作成を行ったので報告する。

キーワード: 非接触 3 次元物体形状計測, 光切断法, ラピッドプロトタイピング

1. 緒 言

近年の製造業では, 3 次元 CAD / CAM の普及などにより製品設計のデジタル化が進み, 製品の 3 次元形状を迅速かつ正確に測定することが必要とされている。また, 紙積層装置, 光造形装置などを用いて形状データから物体のモデル作成 (ラピッドプロトタイピング) を行い, 得られたモデルと設計データとの比較を行い, 改良を加えるといったリバースエンジニアリングのニーズも生まれている。

物体の 3 次元形状を精度よく測定するものとして接触式 3 次元形状測定機があるが, 多点の計測にかなりの時間を要するため, 曲面やエッジなどを多く含む意匠性の高い製品の形状計測には多大な時間が掛かることになる。

一方, 他の測定法として光切断法に代表される非接触 3 次元測定法がある¹⁾。一般的に測定精度の面で接触式には及ばないが, 利点として計測時間が接触式と比べて短いこと, 触れると形状が変化する物体の計測に向いていることなどが挙げられる。

本研究ではこれらの点を踏まえて, 非接触による 3 次元測定法での物体のデジタルデータ取得からデータの再

構成, 紙積層装置によるラピッドプロトタイピングまでの 3 次元形状データの流れを自動化する方法を検討し, あわせて測定の精度向上を図る。本報告では非接触式 3 次元形状測定器からデータを読み取り, 紙積層装置でモデルを作成する一連の作業を行う上での問題点抽出と解決法について検討を行い, 結果について述べる。

2. 測定原理

本研究では, 非接触 3 次元形状測定器としてミノルタ株式会社製のレーザスキャン型 3 次元デジタル計測器 VIVID700 を使用した。

VIVID700 では 3 次元形状を測定するため,

1. レーザ光をシリンダリカルレンズに通すことでスリット光状にし, 対象物に照射すると物体表面で反射する。
2. この反射光を CCD で受光し, 三角測量法を用いて物体までの距離を求める。
3. スリット光をガルバノミラーを用いて走査することで 3 次元の形状データを得る。

という光切断法による測定を採用している。図 1 に測定原理図を示す。

VIVID700 のカタログ値は, 測定視野域 (視野域の 1 辺) 70 ~ 1100mm, 測定奥行範囲 (Δz) は測定視野域の 1 辺 (測定距離 1500mm のとき 211mm), 分解能は測定

2002.5.31 受理 情報技術部

^{*1} 応用加工技術部

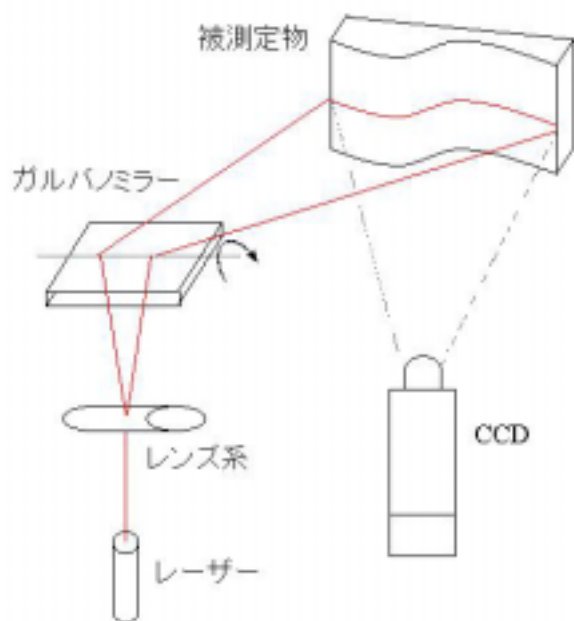


図 1 測定原理

視野域の 1/256 (測定距離 1500mm のとき 1.07mm), 測定時間は 0.6 秒である。

3. 測定とデータ処理

3.1 測定方法の考察

VIVID700 を用いて物体計測を行う際の長所として、

- ・ 一面の測定時間が 0.6 秒と短いため、人体など生物の形状を測定するのに適している。
- ・ 非接触のため、接触することで形状が変化する測定物や壊れやすい測定物の測定に適している。

などの点が挙げられる。

逆に問題となる点は、

- ・ 測定に光を利用するため、光を吸収する物体や鏡面反射する物体の計測が困難である。
- ・ レーザー入射角に対して鋭角となる部分での測定データのばらつきが生じる。
- ・ 形状境界線での分解能程度の誤差が生じる。

が考えられる。

問題点の具体例としてアルミ板上に 1.25 インチセラミックス球を取り付けて計測を行った場合の結果を写真 1 に示す。写真 1 (a) が CCD による画像、写真 1 (b) がレーザースキャンによる測定結果である。測定結果を見ると、図の上部が測定出来ていない。これは、球表面やアルミ板上でレーザーが鏡面反射を起こしているためだと考えられる。

この反射による影響を抑えるため、被測定物につや消し白塗料をスプレーにより塗布し、同様の測定を行った。結果を写真 2 に示す。写真 1 と比較すると分かるように、鏡面反射による測定結果の乱れが無くなり、また、セラ



(a) (b)

写真 1 塗装前の測定結果



(a) (b)

写真 2 塗装後の測定結果



写真 3 測定物（塗装前） 写真 4 測定物（塗装後）

ミックス球の輪郭も明確に測定できていることが分かる。

塗装膜による影響を詳しく調査するため、VIVID による計測点と接触式 3 次元形状測定機による計測点からセラミックス球の直径を計算し、どの程度測定結果が変化しているのかを調べた。写真 3 に塗料を塗布する前の被測定物の画像を、写真 4 につや消し白の塗料を塗布した後の被測定物の画像を示す。

接触式 3 次元測定機による計測では、セラミックス球上の 25 点を測定し、それらの結果から球の直径を求める作業を 10 回繰り返した。結果は塗装前で球 1, 球 2 とともに 31.751mm、塗装後では球 1 が 31.780mm、球 2 は 31.799mm であった。よって球表面の塗装膜の厚さは球 1 で 0.029mm、球 2 で 0.048mm であると想定される。球 1, 球 2 で塗装膜の厚さが異なるのは塗装時にむらが生じた

ためであると考えられる。

VIVID700 の球の直径導出は、被測定物をフォーカス深度 1000mm、レーザー強度 4 %で 3 回測定し、得られた測定点をもとに以下に示す方法で行っている。VIVID700 で測定したデータを (x_n, y_n, z_n) とする。(測定点数 n 個)

1. 球の中心の初期値として適当な点 $O(X, Y, Z)$ を設定する。
2. 各測定点から点 O までの距離 (半径) を求める。

$$R_n = \sqrt{(x_n - X)^2 + (y_n - Y)^2 + (z_n - Z)^2} \quad (1)$$

3. R_n の平均値 R_{ave} を求め、 R_n との差 M_n を求める。

$$M_n = R_n - R_{ave} \quad (2)$$

4. M_n の二乗を求め、それらの平均 M_{ave} を求める。
5. 誤差 M_n を x, y, z 成分に分解し、それらの平均 $x_{ave}, y_{ave}, z_{ave}$ を求める。

$$\begin{aligned} x \text{ 成分: } & \frac{M_n \times (x_n - X)}{R_n} \\ y \text{ 成分: } & \frac{M_n \times (y_n - Y)}{R_n} \\ z \text{ 成分: } & \frac{M_n \times (z_n - Z)}{R_n} \end{aligned} \quad (3)$$

6. $x_{ave}, y_{ave}, z_{ave}$ を成分とする誤差 M を求める。
7. M が一定値以下になるまで、 $x_{ave}, y_{ave}, z_{ave}$ を X, Y, Z に加えて 3. から繰り返す。

今回の計算では、 M の値が 0.001 以下になるまで計算を行った。結果および 3 次元測定機との差を表 1、表 2 に示す。

表 1 と表 2 の比較より、明らかにつや消し白塗料を塗布した後の結果の方が接触式の 3 次元測定器との差が少ないことが分かる。物体の大きさと測定位置、CCD の倍率などを考慮すると、今回の測定での分解能は X 方向、 Y 方向で 0.55mm 前後と推定されるので、0.05mm 程度の塗装膜の厚さは測定結果に影響を与えないと推測していたが、結果はこの推測を裏付けるものとなった。このことより、被測定物につや消し塗料等を塗布して測定することは有効であると言える。

3. 2 複数方向からの測定データの張り合わせ

VIVID700 で立体の測定物を測定する際は、複数の方向から測定したデータを統合する必要が生じる。

表 1 測定結果 (塗装前)

	3次元測定器		3次元測定器	
	球1直径(mm)	との差(mm)	球2直径(mm)	との差(mm)
1回目	32.984	1.233	33.554	1.803
2回目	33.016	1.265	33.532	1.781
3回目	32.909	1.158	33.416	1.665
平均	32.970	1.219	33.501	1.750

表 2 測定結果 (塗装後)

	3次元測定器		3次元測定器	
	球1直径(mm)	との差(mm)	球2直径(mm)	との差(mm)
1回目	32.034	0.254	31.940	0.141
2回目	31.754	-0.026	32.362	0.563
3回目	31.729	-0.051	32.238	0.439
平均	31.839	0.059	32.180	0.381

VIVID700 には測定からデータの位置合わせ、統合までを自動化するソフトが付属しているが、これだと、CCD から死角になる部分の形状が測定できない。

付属のソフトには、複数方向から測定したデータの位置合わせおよび張り合わせを手動で行う機能も付属しているため、被測定物に目印となるようなマーカーを貼り付け、それを目安に手動でデータ統合を行うことで、ある程度正確に 3 次元データを得られた。ただし、位置合わせを CCD 画像から選択して行っているため、厳密な位置合わせが行えているとはいえない。このため、複数方向から測定したデータ同士の位置合わせおよび張り合わせを自動で精度よく行えるプログラムが必要になってくると思われる。

4. 3 次元データを用いた造形

4. 1 物体の計測と造形

写真 5 に示す石膏像を VIVID700 で測定し、紙積層装置でモデル作成を行った。紙積層装置としては、(株)キラコーポレーション製 PLT-A 4 を使用した。

まず、石膏像を回転テーブルにのせ 90 度ずつ回転しながら計測し、4 方向からの計測データを取得した。測定後、VIVID700 に付属のソフトウェアで取得したデータの位置合わせを行い、最終的にすべての方向からのデータの張り合わせを行った。その結果得られた三角メッシュデータを図 2 に示す。この三角メッシュデータを紙積層装置で処理するため、STL 形式(Stereolithography Interface Format)で出力し、紙積層装置でモデルを作成した。結果を写真 6 に示す。

4. 2 測定物と造形物との比較

被測定物と測定データ、作成したモデルの比較を行った。以下に主な点を示す。

- 1) 測定データと作成したモデルの比較では、それほど形状に差はない。造形時に大きな誤差を生じる要因



写真5 石膏像



図2 VIVID700によるスキャンデータ



写真6 紙積層装置で作成したモデル
はないものと考えられる。

- 2) 被測定物と測定データ、作成したモデルとの比較では、形状があまり変化していない部分ではそれほど形状に差はない。
- 3) 被測定物の形状が大きく変化している部分(目、鼻などの顔の表面形状や首の部分など)では、作成したモデルでは形がいびつになったり、メッシュが粗



写真7 溶射モールドによる金型作成

くなったりしている。このような形状が大きく変化する部分では、造形する前に測定データに手を加える必要がある。

全体として、今回使用した測定物程度の計測には十分利用できることが確認できたが、複雑な測定物を計測する場合には、計測する方向や計測データの位置合わせ、データの張り合わせ時に生じるデータ点の微妙な食い違いなどを修正する必要がある。

4.3 溶射モールド法による鋳型作成

作成したモデルに接着剤を注入した後、溶射モールド法による金型を作成した。結果を写真7に示す。半面ずつ溶射モールドを行い、作成した型を2つ合わせて使うことで、被測定物の3次元鋳型が作成可能ことが確認できた。

5. 結 言

レーザースキャン法による3次元計測の例として、VIVID700による物体の測定方法の検討および、物体の計測からモデル作成、鋳型の製作までの一連の工程を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 測定前につや消し塗料などで被測定物を塗装することで、測定精度が1桁向上することが分かった。
- 2) 測定時に発生する誤差以外に、その誤差を含んだまま位置合わせ、張り合わせを行うことで測定データと被測定物との間に差が生じることが確認できた。
- 3) 測定したデータを基に紙積層装置でモデルを作成することで、鋳型などを作成可能であることが分かった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、溶射に関する技術提供を頂いた共和精機株式会社および有限会社澤村溶射センターの澤村正夫氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉澤 徹編: 光3次元計測, 新技術コミュニケーションズ, 1993, p28-37.