非接触 3-D デジタル化システム の開発研究*

三好隆志** 近藤 司** 斎藤勝政** 神谷征男*** 岡田宏司†

Development of Non-Contact 3-D Digitizing System

Takashi MIYOSHI, Tsukasa KONDO, Katsumasa SAITO,
Yukio KAMIYA and Hiroshi OKADA

The purpose of this paper is to develop a non-contact 3-D digitizing system using an NC machine tool which can measure and free-form surfaces such as 3-D model shapes for injection molds speedily and accurately. The proposed 3-D digitizing sensor has a major advantage in that the location of a light spot obtained by passing laser light scattered from a target surface through a unique lens system is linearly proportional to the displacement of the surface in optical axis. This sensor, with a measuring range of 20 mm and resolution of 11 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, can measure the displacement of a target surface within an accuracy of $\pm 50 \mu\text{m}$ for a steep inclined surface up to ± 75 degrees without causing a dead angle called the shadow effect. The 3-D digitizing system which can measure 3-D model shapes at high measuring speed of more than 4 m/min is developed, in which the sensor is automatically moved up and down by servo-mechanism as the light spot to be detected exists always within the measuring range of sensor during the traversing of the NC machine tool. Moreover, the profiles of a 3-D model shape can be observed in real time.

Key words : 3-D digitizing, laser measurement, 3-D profile, optical sensor, measuring system, 3-D model, injection mold, free-form surface

1. 緒 言

本研究は3次元自由曲面からなる複雑な形状、すなわち代表例として金型製作用マスタモデルの高速・高精度な非接触3次元形状測定が可能な3-D デジタル化システムの開発を目的としたものである。

計算機内部に製品形状をモデル化し、そのモデル形状からNC加工データを作成する金型3次元曲面用CAD/CAMシステム¹⁾²⁾はこれまでも数多く開発され、すでにその幾つかは実用化されているのが現状である³⁾⁴⁾。一方、自動車のボディや家庭電化製品・OA機器の外装のように意匠性の高い製品の金型製作の場合、クレイモデルや木型などの型模型として製品形状を与え、これらの模型形状を測定することによって金

型加工用NCデータを作成するのが一般的である。このような場合、重要な役割を担うのが3次元自由曲面の形状を高速・高精度に自動測定することができ、しかもNC加工データへの変換が容易な3-D デジタル化システムの開発である。

しかし、現在のところ、接触式プローブをセンサとした3次元測定機と同等な機能を持つ3-D デジタル化システム⁵⁾⁶⁾はあるが、上述したような高性能な3-D デジタル化システムとは言い難く、測定時間、測定精度、取扱いの容易さ、データ処理などにまだ多くの問題が残されている。

そこで、筆者らは、独自に開発した3-D デジタル化レーザセンサを用いることにより①金型模型に傷を付けたり、変形を与えることなく高精度な形状測定が可能である、②接触プローブ方式では平均測定速度が2 m/minが限界と考えられるが、4 m/min以上の高速測定が可能になる、③プローブ形状(プローブ径)を持たないため、測定精度の範囲内で形状面そのものを表しており、補正の必要はない、④測定条件(走査方向、測定間隔、測定速度など)とは

* 原稿受付 平成元年12月25日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月3日)にて発表

** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正 会 員 工学社エンジニアリング(株)(札幌市北区北6条西6丁目)

† 岡田鋼機(株)(静岡市国吉田540)

Fig. 1 Digitizing method of 3-D object shapes

無関係に NC 加工データを得ることができる（従来の削き加工とは一線を描く）などの特徴を持つ NC 工作機械をベースとした非接触 3-D デジタイジングシステムの開発を行ったので報告する。

2. 測定原理

3次元曲面形状のデジタイジング方法の基本的な考え方は図1に示す通りである。すなわち X, Y, Z 軸 NC 工作機械のテーブルに置かれた被測定物に対し、その主軸に取り付けられた 3-D デジタイジングセンサが X 方向に連続走行する。その際、センサは Z 方向について常に許容測定範囲 d_0 に入るように制御され、適当なサンプリング間隔 ΔX で基準面からの距離 $(Z + \Delta Z)$ を読み取る。X 方向に対し 1 断面の測定が終わったら次に Y 方向に微小量 ΔY 送り、同様な操作を繰り返す方式である。ここで ΔZ はセンサが読み取る被測定面の変位で $0 < \Delta Z < d_0$ の範囲にある。したがってセンサの許容測定範囲 d_0 が 20 mm であれば、最大変位 20 mm の被測定物に対してはセンサを上下する必要はなく、高さ 1 m の 3次元曲面形状に対しても 100 回程度センサを上下することによって測定が可能になる。そこで、以上のような測定方式を考慮して、表面状態の影響や死角を生じることなく、NC 工作機械の主軸に容易に取付け可能で、しかも高速・高精度 3-D デジタイジングが可能なセンサの開発を試みた。

図2に提案した 3-D デジタイジングレーザセンサの測定原理を示す。対物レンズ L_1 の焦点距離 f_1 から Z_1 離れた位置にある被測定物にレーザビームが照射されたとする。照射点 P で反射した光は、レンズ L_1 およびその後方 l で光軸より a シフトした位置にある集光レンズ L_2 を通り、 L_2 の焦点距離 f_2 にある検出器で、その光点位置 d が読み取られる。このと

Fig. 2 Measurement principle of 3-D digitizing laser sensor

き、変位 Z_1 と光点位置 d の間の関係式は次のような手順で導出することができる。

ニュートンの結像公式により

$$f_1^2 = Z_1 \cdot Z_2 \quad (1)$$

$\triangle P_1RQ$ と $\triangle SCQ$ の相似関係より

$$\frac{d}{f_2} = \frac{a-d}{f_1-f_2+Z_2-l} \quad (2)$$

式 (1), (2) より

$$d = a \cdot f_2 \cdot \frac{Z_1}{f_1 \cdot Z_1 + f_1^2 - l \cdot Z_1} \quad (3)$$

いま、 $l = f_1$ であれば式 (3) は

$$d = \left(a \cdot \frac{f_2}{f_1^2} \right) Z_1 \quad (4)$$

となり、被測定物の変位 Z_1 と光点位置 d の関係は、レンズ L_2 の焦点距離 f_2 とその光軸位置 a 、そしてレンズ L_1 の焦点距離 f_1 によって決まる比例定数を持つ直線関係で簡単に表すことができる。

3. 3-D デジタイジングレーザセンサの基本特性

図3は測定原理に基づいて提案したセンサの基本構成図である。光軸から $a=20$ mm 離れた位置に 120° の等間隔で3個のスリット（幅 0.5 mm $\times$ 長さ 10

Fig. 3 Schematic diagram of 3-D digitizing laser sensor

Fig. 4 Relations between displacements and peak positions of reflection light beams detected in three CCD line sensors

mm) 付き集光レンズ ($f_2=150$ mm, 外形 10 mm) と、それに対応する 3 個の CCD ラインセンサ ($7 \mu\text{m} \times 2560$ ピクセル) が置かれている。このように 3 個の検出器を用いたのは後述するように高精度な測定を可能にするためであり、またスリットは式 (4) の関係を厳密に満足させるためと鋭いピークを得るために用いている。使用した対物レンズは焦点距離 $f_1=70$ mm で外径 54 mm の非球面レンズである。このような設計値において、式 (4) より、センサの測定範囲 d_0 は約 20 mm, また感度は $d/Z_1=0.614$ となり、CCD ラインセンサの解像度が $\Delta d=7 \mu\text{m}$ であるので、分解能は $k=\Delta d/|Z_1/d|=11.4 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ になる。

測定手順は次の通りである。まず He-Ne レーザビーム (1 mW, $\phi 0.6$ mm) は対物レンズの中心を通り、被測定面に照射される。反射光は再び対物レンズおよびスリット開口と集光レンズを通り、CCD ラインセンサ上で鋭いピークの光点となる。この光点の強度分布を 8 ビット A/D コンバータを介してパソコン (PC 9801 UV) のメモリーに格納し、処理することによってピーク位置 d を求めた。

図 4 は 3 個の CCD ラインセンサによって得られたそれぞれの変位 Z_1 と光点ピーク位置 d (あるいはピクセル数) の関係である。いずれの検出器においても、変位と光点ピーク位置は直線関係にあり、その傾きすなわち分解能は $k_1=11.3$, $k_2=11.4$, $k_3=12.1 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ で平均分解能は $11.6 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ となり、解析結果の $k=11.4 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ と良く一致している。図 5 は石膏平面の同一測定点からの反射光

Fig. 5 Different intensity distributions of reflection light beams in three CCD line sensors

を 3 個の CCD ラインセンサによって検出した光点の強度分布の一例である。被測定面が完全拡散反射面に近ければ、光点はいずれも同じような強度分布を示すはずであるが、光点のピーク位置、強度、広がりなどに違いが見られ、特に CCD-3 の場合、強度が低くピーク位置を正確に求めることは難しい。このように同一点からの反射光分布は必ずしも一様ではなく、さらに曲面になるとこの傾向は顕著になるものと考えられ測定誤差の大きな原因となる。したがって、より高精度な測定をするためにはより多くの検出器を用いて光点を測定し最も正しいと思われる強度分布のピーク位置を探す必要がある。そこで筆者らは 3 個の CCD ラインセンサから得られた光点の強度分布の最大強度が設定したスライスレベル (1/3 フルスケール) より大きければ信頼性の高い強度分布とみなし、これら光点のピーク位置の平均値から変位 Z_1 を求めることにした。

図 6 は、このような測定方式を用いて被測定面 (石膏平面) の傾き角 θ が測定精度にどのような影響を与えるかをみたものである。平面 ($\theta=0^\circ$) における測定値を基準にして傾斜角と誤差の関係をプロットすると $\theta=\pm 75^\circ$ までは $\pm 50 \mu\text{m}$ の誤差範囲内で平面の場合と同様に測定が可能である。なお、傾きの方向と 3 個の CCD ラインセンサの位置関係は図中に示した通りであり、 $\theta=\pm 85^\circ$ までは CCD ラインセンサで光点を検出することができ、誤差は大きくなるが測定は可能である。したがって以上のような実験結果から提案した測定法は 3 次元自由曲面の形状測定に十分適用できるものと考えられる。

Fig. 6 Relation between inclination angle of surface and measuring error

4. 非接触 3-D デジタイジングシステム

4.1 センサの試作

図7は図3の基本構成図を基にして設計した3-D デジタイジングレーザセンサの構成図である。直径25 mmで長さ100 mmの小型 He-Ne レーザチューブおよびその電源を本体内部に組み込み、レーザビームが対物レンズの中心を直接通るようにし、センサのコンパクト化と光軸合わせの容易さを考慮した。その他の光学部品および CCD ラインセンサの配置は図に示

Fig. 7 Structural drawing of a non-contact 3-D digitizing sensor

す通りで、一部省略しているが120°おきに3個のCCDラインセンサが入射光軸に対し直角方向に取り付けられている。また設計仕様は図3と同じで対物レンズ $f_1=70$ mm, 集光レンズ $f_2=150$ mm, CCDラインセンサ $7\mu\text{m} \times 2560$ ピクセル, スリット $0.5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ であり, 測定範囲は20 mm, 分解能は11.4 $\mu\text{m}/\text{ピクセル}$ である。センサの主要寸法は先端部直径56 mm, 高さ

185 mm で作業距離は対物レンズの焦点距離に相当する70 mmを中心に ± 10 mmの範囲である。図8にNC工作機械の主軸に取り付けた3-D デジタイジングレーザセンサ本体の外観写真を示す。

4.2 システムの機器構成

図9に本測定システムの機器構成を示す。3-D デジタイジングレーザセンサはモデルマスタと呼ばれるNC工作機械に取り付けられている。NC工作機械を駆動制御し, 測定距離, 測定間隔, 測定速度などの測定条件の設定および測定データの処理を行うパーソナルコンピュータ (FC 9801 X), 3個のCCDラインセンサが検出する光点のピーク位置 d から変位 ΔZ を高速に読み取る変位検出ユニット, 測定中にNC工作機械の停止・復帰およびZ軸移動制御を可能にするコントロールユニットなどから構成されている。これはパソコン, 変位検出ユニット, コントロールユニットの信号はNCインタフェースユニットを介してNC装置へ伝送される。

Fig. 8 A view of a 3-D digitizing laser sensor

Fig. 9 Construction of non-contact 3-D digitizing system

Fig. 11 Three calibration curves on CRT display

れ、そのときの座標値 (X, Y, Z) がパソコンに読み込まれる。それと同時に、変位検出ユニットへもラッチ信号が送られ、そのサンプリング位置における光点のピーク位置が検出され、ただちに変位 (ΔZ) データが求められパソコンに読み込まれる。さらにこの変位 (ΔZ) データは直接 Z 軸移動量指定カウンタに送られセンサの許容測定範囲にあるかどうかをチェックされ、もし許容範囲の下限 (0 mm) もしくは上限 (20 mm) 近傍にあるときは Z 軸を上もしくは下に移動するためのパルス信号が NC 装置に送られる。これら一連の運動制御は NC 工作機械の送り速度 5 m/min に対して十分追従できるものである。

4.3 モデルのデジタイジング実験

一例として、ミニチュアカーのモデル形状のデジタイジング実験を実行する前に図 11 に示すような横軸がピクセル数、縦軸が変位の校正曲線を取り、CRT 画面上で 3 個のセンサについて 16 mm の測定範囲における、分解能、

直線性をチェックした。CCD ラインセンサの微妙な取付位置の違いにより 0 点に対応するピクセル数は異なっているが、いずれも直線性を示しており、分解能はそれぞれ CCD-1 で $11.0 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ 、CCD-2 で $11.4 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ 、CCD-3 で $10.9 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$ とほぼ同じ値となり、その平均値は $11.1 \mu\text{m}$ であるから解析結果 ($11.4 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$) と良く一致している。なお、本測定法は 3 個の CCD ラインセンサそれぞれに対して校正曲線を持っているので 0 点に相当するピクセル数の違いはなんら測定に影響を与えることは無い。

図 12 の (a) は測定実験に用いたミニチュアカーで縦 $200 \times$ 横 $100 \times$ 高さ 50 mm の 3 次元自由曲面からなっている。(b) は代表的な断面形状の一例であり、

Fig. 10 Block diagram of non-contact 3-D digitizing using NC machine tool

本測定システムは、高速化を図るために連続走行中にセンサが許容測定範囲から外れそうになると自動的に Z 軸が上下し必ず許容範囲内で形状測定する機能を持っている。このような運動制御するための測定システムのブロックダイアグラムを図 10 に示す。まず NC 工作機械の主軸に取り付けられたセンサは、あらかじめ設定された測定速度 (NC 工作機械の送り速度) で X 軸方向へ連続的に送られる。一方 NC 工作機械のサーボモータから送られる X, Y, Z のフィードバックパルス信号はパルスディストリビュータを介して座標値カウンタで検出され、測定間隔チェックカウンタに送られる。いまパソコンであらかじめ指定したサンプリング位置にセンサが来ると測定間隔チェックカウンタから座標値カウンタにラッチ信号が送ら

(a) A view of miniature car

(b) Typical cross-section profiles on display

(c) 3-D profiles of a miniature car

Fig. 12 3-D profiles of a model obtained by non-contact 3-D digitizing system

この断面形状は測定中に CRT 画面上で実時間で観測することができる。(c) はミニチュアカーの測定結果を 3 次元的に CRT 画面上に表示したものをプリント出力した図であり、写真 (a) と比較すると微妙な曲面形状を良くとらえていることが分かる。実験条件は測定速度 4 m/min, 測定間隔 1 mm で測定点数は X 軸方向 150 × Y 軸方向 80 の計 12 000 点であり、約 6 分で高速に測定することができた。

なお、本測定システムは当研究室で開発した CAM システム⁷⁾につながっており、これらのディジタイ

ングデータから任意の工具形状に対してオフセット面を自動的に発生することができ、また与えられた加工モード、ピックフィードに対応した NC 加工データを直接作成することができる。

5. 結 論

3 次元自由曲面形状を高速・高精度に自動測定することを目的として、次のような特徴を持つ非接触 3-D デジタイジングシステムを開発した。

- (1) 光軸上の物体変位と検出された光点のピーク位置が直線関係にあり、しかも死角のない 3-D デジタイジングレーザセンサを提案し、その測定原理を明らかにした。
- (2) 3 個の CCD 検出器を持つ 3-D デジタイジングレーザセンサは、11 μm /ピクセルの分解能で 20 mm の測定範囲を持ち、 $\pm 50 \mu\text{m}$ の誤差範囲内で $\pm 75^\circ$ の急斜面まで平面同様に測定することができる。
- (3) 3-D デジタイジングレーザセンサ、パソコン (FC 9801 X)、変位検出ユニット、コントロールユニット、NC インタフェースユニットからなる NC 工作機械をベースとした非接触 3-D デジタイジングシステムを開発した。
- (4) 本測定システムは、NC 工作機械の連続走行中にセンサが絶えず許容測定範囲に入るように Z 軸制御が行われ、4 m/min 以上の高速でも形状測定が可能である。また断面形状を CRT 画面上で実時間で観測することができる。
- (5) 本測定システムによって、縦 200 × 横 100 × 高さ 50 mm の 3 次元自由曲面からなるミニチュアカーを測定速度 4 m/min, 測定間隔 1 mm で測定点数 12 000 点を約 6 分で測定することができた。

参 考 文 献

- 1) T. Kishinami et al.: Development of Interactive Mold Cavity CAD/CAM System, Ann. CIRP, **32**, 1, (1983) 345.
- 2) 鈴木 裕ほか: 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第 2 報), 精密工学会誌, **53**, 12 (1987) 1952.
- 3) 水島直樹: FRES DAM 自由形状設計加工システム, 型技術者会議 '88 講演論文集, (1988) 82.
- 4) 村重英治: 3 次元金型のトータル加工システムの展開, 機械と工具 (1987.3) 86.
- 5) 長谷辺孝男ほか: IDMS/DP (ディジタイズデータ処理システム) と金型加工システム, 機械と工具, (1986.12) 34.
- 6) 徳永尚彦: マイクロ DMS と金型加工システム, 機械と工具, (1986.12) 80.
- 7) 近藤 司ほか: 逆オフセット法を基にした形状加工処理, 精密工学会誌, **54**, 5 (1988) 971.