

自動車金型補修のための形状計測*

長谷川 辰雄**、和合 健**

自動車のドアやボンネットを成型するための大型プレス金型は、新しい金型を導入する場合、設計値と適合させるために多くの時間がかかっている。また、繰り返しのプレスによって発生する摩耗箇所の補修にも時間がかかっている。この金型の修正や補修は、熟練技能者の知識と経験によって行われるが、現在、これによってできた完成品の金型の3次元形状測定は行われていない。熟練技能者が初期の金型をどのように修正・補修したのかを数値で判断できることは、修正・補修の時間短縮へつながり、また技能を学ぶ上で重要である。そこで、本研究は金型の形状を数値で把握できるように、カメラ画像を使って簡単に非接触3次元測定する方法を開発した。

キーワード：自動車、3次元計測、金型

The 3D Measurement for the mold of Automobile

HASEGAWA Tatsuo and WAGO Ken

When the new stamping die will be brought into the product line of car, the production of the large stamping die to make the door or hood of the car takes much time to adapt it with the design value. The repair of the abrasion point that occurs by the press takes time, too. The specialist who has the knowledge and experience does the modification or repair of the die. But, the three-dimensional measurement of the die isn't being done currently. It is important to understand how the specialist repaired the die to the modification by the numerical value. The easy three-dimensional measurement with the high precision can reduce the time of the repair. This research developed the method of the simple non-contact three-dimensional measurement to be able to grasp the shape of the die.

key words : automobile, 3D measurement, die

1 緒 言

自動車業界の激しい競争により、自動車金型メーカは高精度、短納期、コスト低減が求められている。最近の傾向では、ボディの軽量化ニーズによる材料の高強度化や、軽合金によるスプリングバック、割れ等の問題が大きく、対策に多くの時間を費やしている。この対策には、金型メーカ独自の高度技能や、これまでの経験によるノウハウの蓄積によるところが大きい。そこで、これらのノウハウを数値化し、金型設計へフィードバックできれば、設計段階で問題が解決できるため効率化が図れる。しかし、これらのノウハウは様々な要素が複雑に組み合わさり、簡単には数値化が出来ていない。

本研究は、金型製作における様々な要素のなかで、3次元測定に焦点を絞り、金型を簡単に非接触で3次元測定が可能な方法を開発した。例えばドアやボンネットなどの大型の金型は、組み立てラインのプレス機に設置され、新しい金型を導入するには何度も調整が必要となる。調整のための3次元測定は、3次元測定器のある場所に移動する必要があるため、搬送や測定準備に時間を要している。そこで、本研究では、組み立てライン上にある

金型を移動せずにそのまま測定できるように、2台のカメラによる画像計測の基礎実験を行った。

3次元画像計測は過去に多く提案されており、レーザー光を使った製品が普及しているが、装置が大掛かりで高価であるため、導入が困難となっている。これに対し、開発した方法は、カメラ2台とキャリブレーション用具及びPCのみで簡単に構成できる特徴がある。これによって、組み立てラインにある金型を測定する場合、その周囲にカメラを三脚で固定するだけで、その場での測定が可能となる。本報告では、画像計測を行うためのカメラキャリブレーションの手法と、サンプルの金型を画像計測し、その誤差精度について検討したものである。

2 実験方法

2台のカメラ画像から対象物の3次元測定を行うには、それぞれのカメラの内部・外部パラメータを求める必要がある。これは、中心座標、焦点距離、座標軸の傾きで構成される内部パラメータと、対象物が存在するワールド座標系とカメラ座標系との座標変換行列で構成される外部パラメータがある。このカメラパラメータを求める

* 基盤的先導的研究推進事業

** 電子機械技術部

ことをキャリブレーションと呼び、過去に多くの方法が提案^{1), 2), 3)}されているが、今回の実験では平面板を使用した。測定の流れは、はじめに既知寸法のチェス模様が印刷された平面板を撮影する方法でキャリブレーションを行い、3次元計測に必要な射影行列を求めた。次に2台のカメラの対応点（同一点）を決定した。この対応点座標を自動で求めることをステレオマッチングと呼び、多くの提案がされているが、未だに正確に求めることは出来ていない。本実験では、誤差精度の基礎的なデータを得ることを目標とし、マニュアル操作によって対応点座標を決定した。図1に実験の手順を示す。

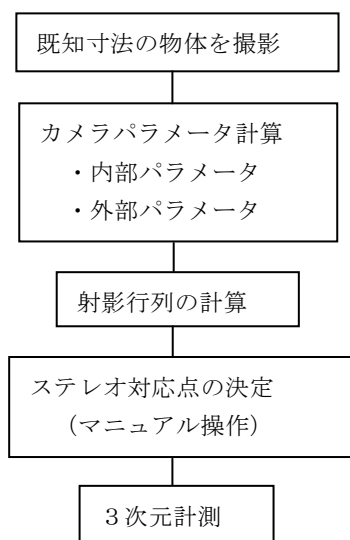


図1 実験の手順

2-1 キャリブレーション手法

画像計測で用いるカメラモデルはピンホールカメラであり、3次元点とカメラに撮像した点の関係は非線形となるため、計算式などの取り扱いが困難となる。そこで、以下の式に示すように、取り扱う次元を1つ増やして線形化を行った。

$$\tilde{m} = [u, v, 1]^T \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、式(1)はカメラ画像上の座標、式(2)は3次元空間上の座標を表す。3次元空間の座標がカメラ画像に投影される関係は式(3)で表される。

$$S\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M} \quad \dots \text{式(3)}$$

ここで、 S はスケール、 A は内部パラメータ、 $[R \ t]$ は外部パラメータである。

キャリブレーションは、既知寸法の物体を撮影し、 m 及び M の座標値を式1に代入し、線形方程式を解いて A 及び $[R \ t]$ を求める。従来、既知寸法の物体は、寸法線を格子状に書き込んだ立方体が主体であったが、スパー

スを占領するなど、作業時間がかかっていた。これに対し、Zhangの手法によれば、平面板によってキャリブレーションが可能となるため、省スペースとなり作業時間を短縮できる。この手法は、式2に示すように、平面をワールド座標系の $Z=0$ として式1を解くことで行う。ここで、外部パラメータの $[R \ t]$ の X 軸周りの回転行列を $r1$ 、 Y 軸周りの回転行列を $r2$ 、 Z 軸周りの回転行列を $r3$ とする。

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= A \begin{bmatrix} r1 & r2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \text{式(4)}$$

$$S\tilde{m} = A[r1 \ r2 \ t]\tilde{M} \quad \dots \text{式(5)}$$

$$\begin{bmatrix} h1 & h2 & h3 \end{bmatrix} = \lambda A[r1 \ r2 \ t] \quad \dots \text{式(6)}$$

詳細な計算方法は省略するが、平面上の座標値を式3に代入し、同次座標系を用いて線形方程式を解くと、内部パラメータ A が求められ、外部パラメータは次の式(7)のように計算できる。

$$r1 = \lambda A^{-1}h1, \quad r2 = \lambda A^{-1}h2,$$

$$r3 = r1 \times r2, \quad t = \lambda A^{-1}h3 \quad \dots \text{式(7)}$$

2-2 キャリブレーション・プログラム

キャリブレーション撮影用の平面板は、23mm角の正方形を 7×10 個のチェス模様に配置し、A4版で印刷した用紙をアクリル板に貼り付けたものを使用した（図2）。キャリブレーションを実行するプログラムは、隣り合う四角形の交点座標を、画像の縮退処理と直線近似処理によって、サブピクセル（1画素以下の単位）で求めた。この座標点を式3に代入し計算することでキャリブレーションを行った。このプログラムは、OpenCVのFindChessboardCorners関数を使用している。

OpenCV (Intel Open Source Computer Vision library) はオープンソースとして公開されているコンピュータビジョン用のプログラム・ライブラリである。

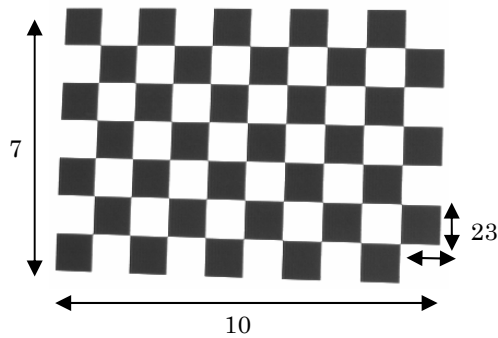


図2 チェス模様のサイズ

2-2 キャリブレーション・プログラム

2次元画像をもとに3次元計測するには、画像の対応点（同一点）を決定しなければならない。本実験では、誤差精度の基礎的なデータを得ることが目標であるため、マニュアル操作によって対応点座標を入力し、2点間の距離を計算するプログラムを作成した。図3は左右に配置したカメラの画像を取り込んだ画面であり、図4は左右画像の対応点座標の入力と射影行列を読み込み、2点間の距離を計算するプログラムである。開発環境はWindowsXP、Microsoft Visual C++ V6.0である。

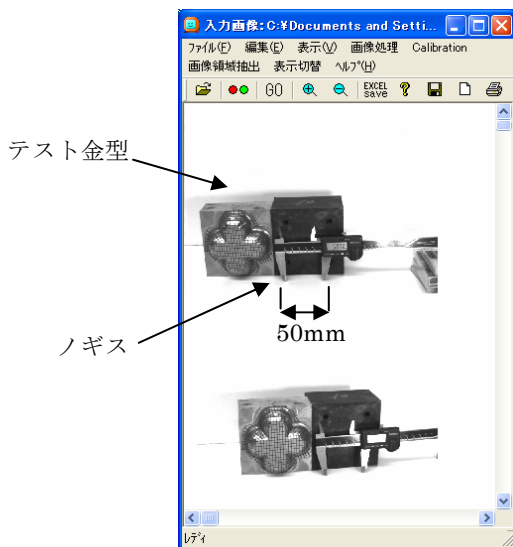


図3 画像取り込み画面（上：右カメラ、下：左カメラ）

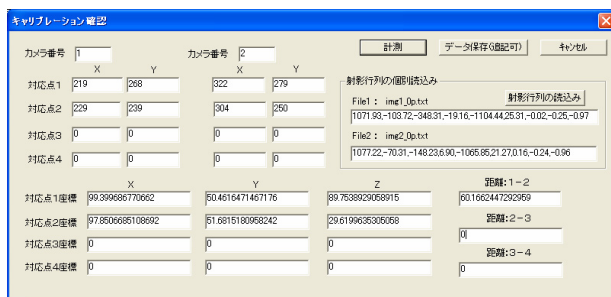


図4 対応点座標入力と2点間距離計算画面

3 実験結果

3-1 キャリブレーション

本実験では、同期撮影が可能な2台のカメラ（640×480画素）を用いてキャリブレーションを行った。撮影はカメラを固定し、チェス模様の平面板の角度を、手動により任意に変化させながら、カメラ1台ごとに10枚撮影した。図5はチェス模様の交点座標を自動認識した結果であり、丸印で表されている。この結果、それぞれのカメラの内部及び外部パラメータを求めることができた。ただし、外部パラメータの値は撮影方向ごとに異なるため、測定値も異なってしまう。つまり、撮影した10方向ごとに測定値が異なってしまう。そこで、外部パラメータがどの程度、測定値に影響するかを調べた。図6は10方向の外部パラメータごとの誤差を昇順で示している。測定した対象物は、50.00mm幅に設定したノギスであり、画像計測で実測した値との差を誤差とした。この結果、最小誤差が0.004mm、最大誤差が0.04mmであり、誤差の平均は0.02mm、標準偏差は0.015mmであった。仮に、誤差精度の目標を0.1mmとした場合、そのバラツキは目標値を下回るため、撮影方向の違いによる影響は無くなる。

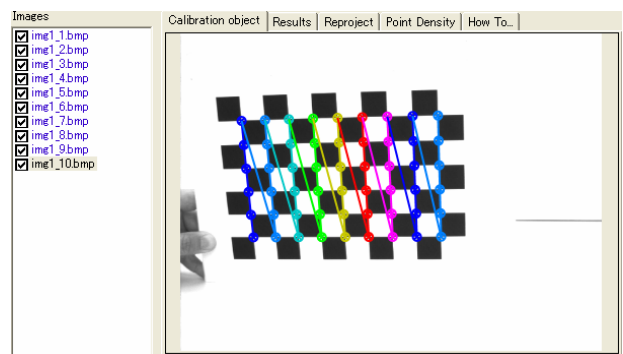


図5 チェス模様の交点の自動認識

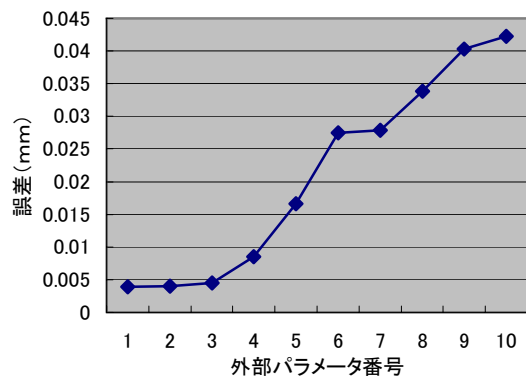


図6 撮影方向の違いによる測定誤差

3-2 繰り返し測定による測定誤差微

繰り返し測定による誤差精度を求めるため、図1の手順を17回繰り返して測定を行った。実測箇所は、図7に示すように、カメラに対して水平に設置したノギスの幅Xと、テスト金型の垂直方向Y及び奥行き方向Zとし

た。はじめに3次元計測の基礎的な精度を測るため、前述と同様に50.00mmに設定したノギスを計測した。その結果を、誤差を昇順で表した図8に示す。誤差の平均は0.21mm、標準偏差0.13mm、最小誤差0.023mm、最大誤差0.44mmとなった。誤差精度を最大誤差以下とすると、誤差は0.5mmとなる。

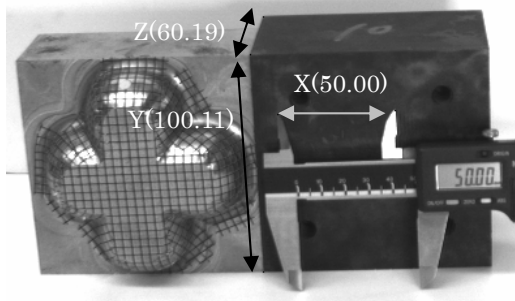


図7 繰り返し測定の対象物と測定箇所

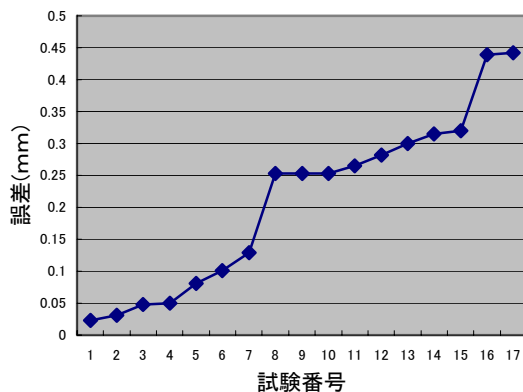


図8 水平方向の繰り返し誤差（ノギス）

次に異なる方向の精度を検証するため、同様にテスト金型の垂直方向 Y(100.11mm)と奥行き方向 Z(60.19mm)についての誤差測定を行った。その結果を、誤差昇順で表した図9に示す。奥行き方向 Z については、誤差の平均が0.38mm、標準偏差が0.25mm、最小誤差が0.005mm、最大誤差が0.68mmとなった。

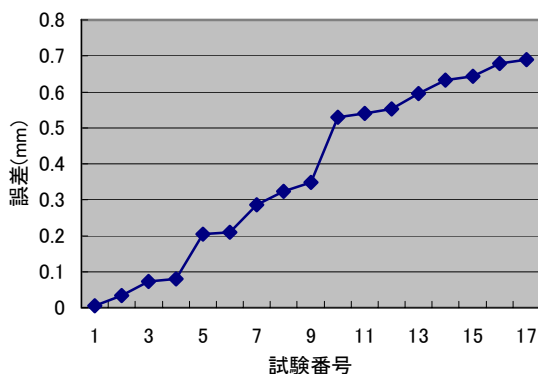


図9 奥行き方向 Z の繰り返し誤差（テスト金型）

一方、垂直方向については図10に示すとおり、誤差の平均が0.14mm、標準偏差が0.12mm、最小誤差が0.005mm、最大誤差が0.45mmとなった。同様に誤差精度を最大誤差以下とすると、奥行き方向の誤差は0.7mm、垂直方向の誤差は0.5mmとなった。

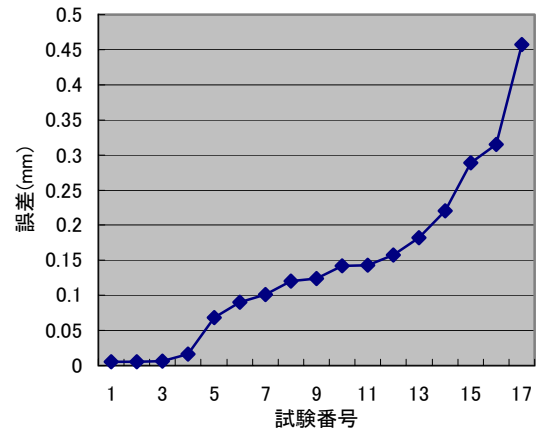


図10 垂直方向 Y の繰り返し誤差（テスト金型）

4 結 言

今回の実験では、平面板によるキャリブレーションを用いた3次元画像計測の誤差精度を検証することができた。誤差は水平及び垂直方向で0.5mm、奥行き方向で0.7mmとなった。方向などの条件によっては、誤差の平均が0.02mm以下と精度が1桁向上した。奥行き方向の精度が水平垂直よりも劣る理由は、3次元空間の座標がカメラ画像に投影される関係が非線形となっていることに起因する。この非線形モデルを計算で解くことは大変困難であるため、線形的に近似して計算していることが誤差精度に影響している。また、最も誤差精度に影響を与える因子は、対応点（同一点）の求め方である。今回の実験では手作業によって対応点を決めたが、その取り方によって精度が異なった。特に、対象物が同一色の場合、正確な対応点は求め難くなる。最近の傾向では、プロジェクタを使って目印となるような模様を対象物に投影する方法が使われているが、反射率の高い金属には、上手く投影できないなどの問題がある。これらの問題を解決するため、今後は、高精度の対応点の自動的な決定手法と最適な測定条件について取り組む予定である。

文 献

- 1) 佐藤 淳：コンピュータビジョン，pp.81-96，コロナ社（1999）
- 2) 田村 秀行：コンピュータ画像処理，pp.138-140，オーム社（2002）
- 3) R.Hartley: In defense of the eight-point algorithm, IEEE Trans. PAMI, pp.580-593（1997）