

# デジタル画像計測による塑性加工品の 高精度3次元形状計測システムの開発

東北大学 工学部 材料加工学科

教授 伊達和博

(平成3年度研究開発助成 AF-91012)

## 1. 研究の背景

ステレオスコープに画像相関法を組み合わせる方法は、非接触三次元形状測定法であり、原理的にステレオ像をビデオカメラで取り込むだけで、広範囲な形状測定に応用できる。これまでは主に、測定、解析のアルゴリズムについて基礎的な検討を行い、システムを開発した。<sup>1), 2), 3)</sup>

しかし、本システムを種々形状の試料に適用した結果、複雑形状物の測定においては、測定精度の低下や測定不可能領域が認められた。

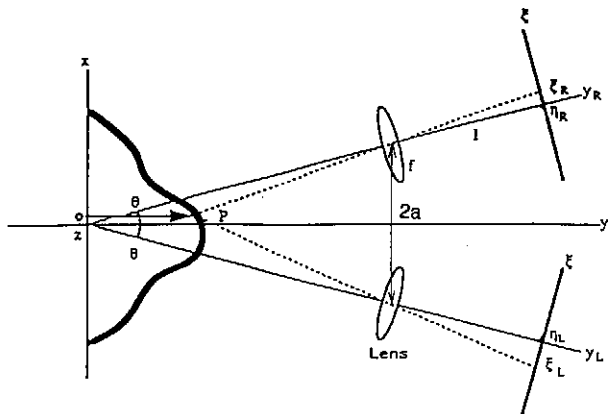
この原因を調べるため、ステレオ像の輝度分布の検討を行った。その結果、複雑形状物は広範な輝度分布を有しているため、通常のビデオカメラではその輝度を十分に表現することができず、明るい部位と暗い部位では飽和したデータとして測定され、カメラの輝度のダイナミックレンジの不足が原因であることがわかった。

本研究では、複雑形状物にも対応できるよう、照明装置とステレオ像の取り込み方法等を改良し、複雑形状を有する塑性加工品に適用して、改良したシステムの有効性を確認した。

## 2. デジタル像相関ステレオグラフィによる3次元形状測定

### 2.1 ステレオスコープによる三次元形状計測

ステレオスコープによる三次元形状測定は、三角測量に



$l, \theta, \xi_R, \eta_R, \xi_L, \eta_L \rightarrow P(x, y, z)$

図1 ステレオスコープ原理図

用いられてきた方法であり、図1に示すように、異なる視点から得られた2枚のステレオ写真上の同一点Pについて、左右の視野座標上での位置： $(\xi_R, \eta_R)$ 、 $(\xi_L, \eta_L)$ を測定することにより、式(1)を用いてP点の三次元座標を求めるものである。ここでは、同一点Pを同定し、その画像上の位置を測定するために、2枚のステレオ画像についての相関を調べた。

$$x = \frac{-al(\xi_L, \xi_R)}{g(\xi_R, \xi_L)}$$

$$y = \frac{-2a(1 \cdot \cos\theta - \xi_R \cdot \sin\theta)(1 \cdot \cos\theta + \xi_L \cdot \sin\theta)}{g(\xi_R, \xi_L)} + \frac{a}{\tan\theta}$$

$$z = \frac{-2a(1 \cdot \cos\theta - \xi_R \cdot \sin\theta)\eta_L}{g(\xi_R, \xi_L)}$$

$$= \frac{-2a(1 \cdot \cos\theta - \xi_L \cdot \sin\theta)\eta_R}{g(\xi_R, \xi_L)}$$

ここで

$$g(\xi_R, \xi_L) = (l^2 + \xi_R \xi_L) \sin 2\theta + l(\xi_R - \xi_L) \cos \theta$$

$$a = \{lf / (l-f)\} \sin \theta \quad (1)$$

2aは左右レンズ間の距離、lはレンズと結像面の距離、 $\theta$ はステレオ核を表す。

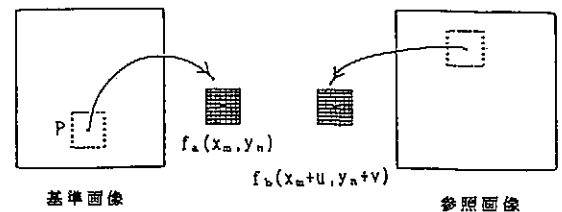


図2 相互相関法原理図

$$C(u, v) = \sum_{m,n} \{f_a(x_m, y_n) - \bar{f}_a - f_b(x_m+u, y_n+v) - \bar{f}_b\}^2 \quad (2)$$

ここで $\bar{f}_a, \bar{f}_b$ は、それぞれ、画像A、Bの平均輝度を表す。

### 2.2 画像相関法による同一点の同定

画像相関法は、図2に示すように、基準画像と参照画像の

同一点の同定に相関係数  $C(u,v)$  をパラメータとして用いる手法である。デジタル画像は固有の輝度分布を有し、基準画像上のP点の周りの輝度分布  $f_a$  と比較画像中での同一点P点の周りの輝度分布  $f_b$  には、あまり違いがないことを利用し、 $f_a$  と最も似た輝度分布を持つ領域を、輝度分布の相関を用いて比較画像中から探し出す。具体的には、 $f_a(x_m, y_n)$  と同じ寸法の領域の輝度分布  $f_b(x_m + u, y_n + v)$  を比較画像中から次々に切出して式 (2) に示す相関係数  $C(u,v)$  を計算機を用いて計算し、最も相関の高い位置を、P点の同一点とする。このときの  $(x_m, y_n, u, v)$  を用いると、 $(\xi_R, \eta_R, \xi_L, \eta_L)$  はそれぞれ  $(x_m, y_n, x_m + u, y_n + v)$  で表され、式 (1) により、P点の三次元座標が計算できる。

### 2.3 測定装置および解析方法

図3に、測定装置の模式図を示す。ステレオ像撮影のためカメラ、ズームレンズを2組備えた光学系を使用した。画像取り込み用A/D変換ボードは  $512 \times 512$  画素で8ビットの分解能を持つものを用いた。解析用計算機はHP9000シリーズ Model320 である。

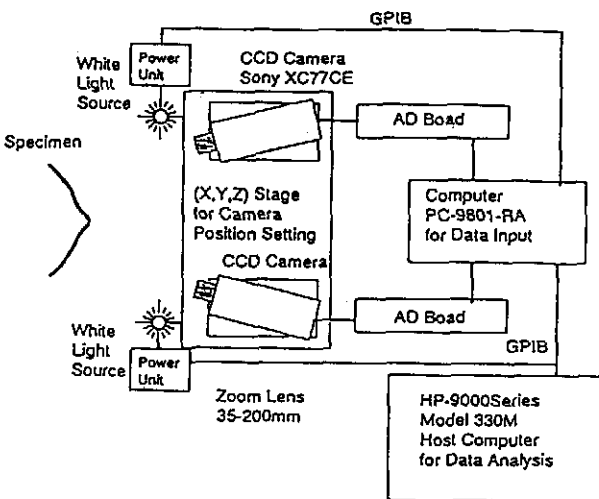


図3 測定装置概略図

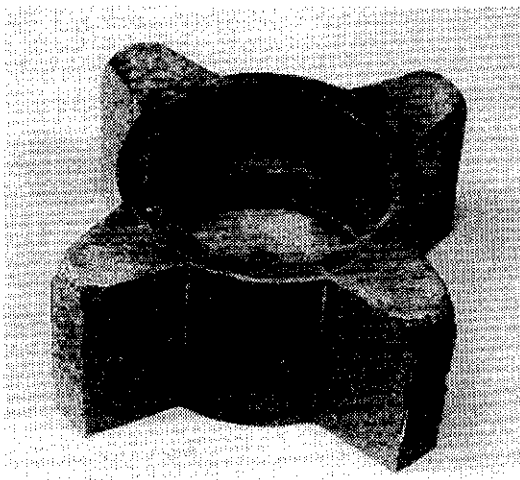


図4 アルミニウム塑性加工品

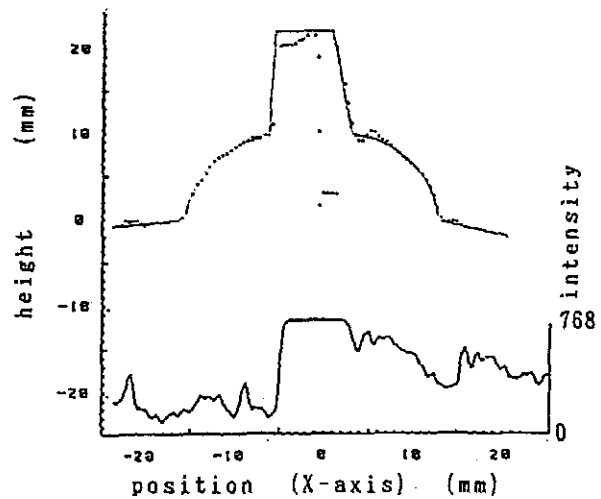
リーズ Model320 である。

照明装置は白色電球4個であり、照度を変化させることを目的として、直流電源装置に照明光量コントロール装置を取り付け、光源の光量をコンピュータ制御できる構成とした。

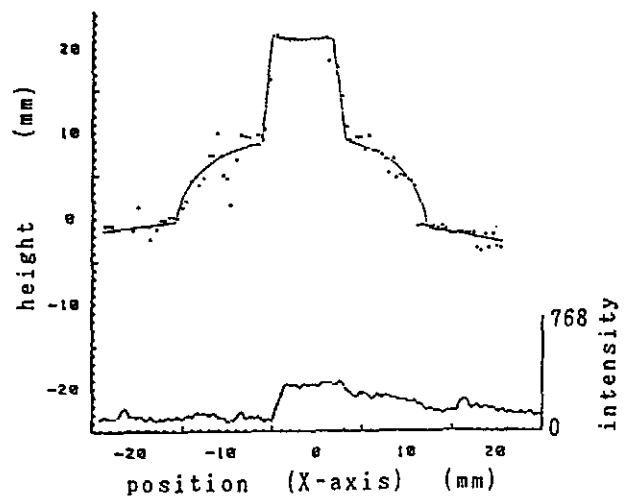
### 3. 研究成果

#### 3.1 従来法による形状測定

図4は、4個の突起（歯車の歯）を有するアルミニウムの塑性加工品であり、ここではこの突起部分の形状測定を、従来の一定照明条件のもとで試みた。その結果を図5(a)、(b)に示す。両者は、二つの照明条件約9k lux, 7k lux (1Wの電球から1mの距離にある1㎡あたりの光度を1luxとする) で測定したもので、図中、下にデジタル像の輝度分布を、上にこれより求めた形状測定結果を点で、また実線で実際の輪郭を示した。なお画像の取り込みはS/N比を向上させるため、3回の取り込みを単純加算（平均化処理）し、その値で輝度データを表している。この製品では



(a) 照明条件 9 k lux



(b) 照明条件 7 k lux

図5 塑性加工品の形状測定結果

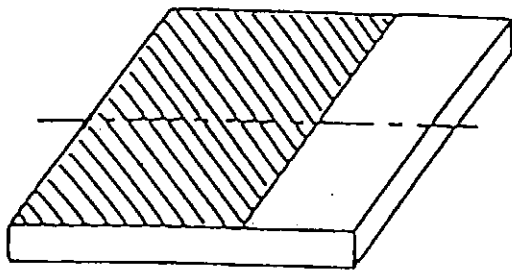


図6 平板試料

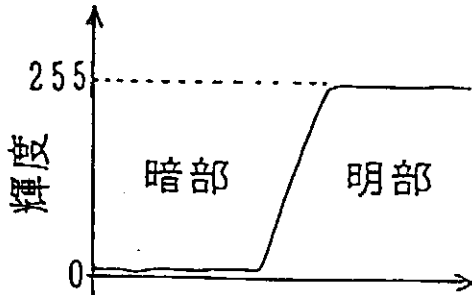


図7 図6の輝度分布

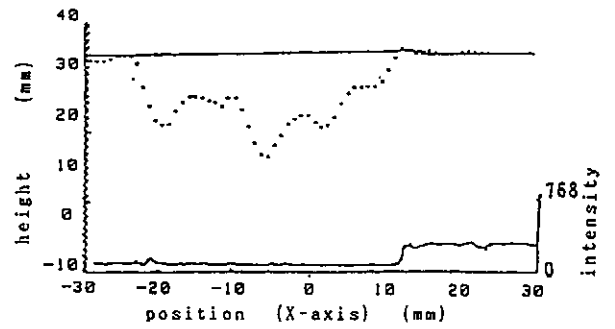
歯車上面で輝度が高く、歯車付け根部で輝度が低いため、図5 (a) のように照明が明るい歯車上面での輝度データが飽和してしまっており、その結果歯車上面の形状測定ができなくなっている。逆に図5 (b) のように照明が暗いと、歯車付け根部での輝度分布のコントラストが不足してこの部分の相関が取れず、測定精度が低下している。このように複雑形状物の形状測定を行う場合、輝度分布の変化範囲が大きく、取り込み画像のダイナミックレンジが不足していることが測定精度の著しい悪化の原因であることがわかった。

一般に、画像をデジタル化するA/D変換ボードは8ビット(256階調)の分解能を持つが、測定試料が広範な輝度分布を有する場合は256階調では上述のようにダイナミックレンジが不足してしまう。明るい部位、暗い部位ではそれぞれ255または0に飽和したデータが多数存在することになり、そのような輝度データ部分では相関が取れず、このことが測定精度の悪化をもたらすことがわかった。

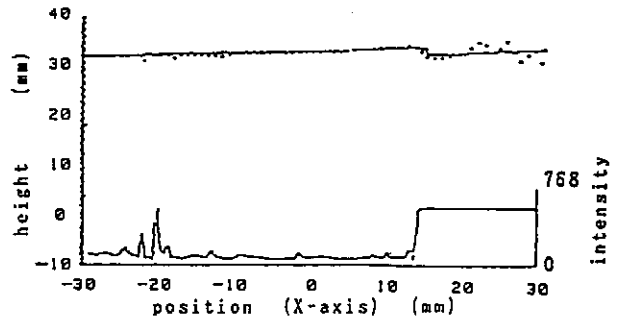
### 3.2 改良した測定法

一方、図4のような広範な輝度分布を有する試料を測定する場合、一つの照明条件下ではある部分でその輝度データが飽和してしまい形状測定ができなくなる。しかし、図5 (a) では歯車上面は測定できていないが他の部分は測定できていること、図5 (b) では歯車上面だけなら測定できていることを考慮すると、この照明条件の異なる輝度データを加算することによって、画像のダイナミックレンジを拡大することができると思われる。

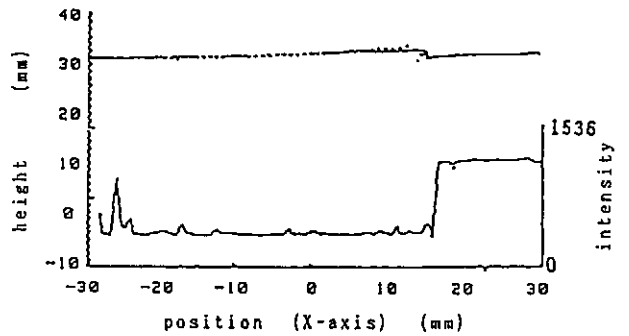
そこで、上述のようなコントラストの違いの大きいモデ



(a) 照明条件 7 k lux



(b) 照明条件 9 k lux



(c) (a)+(b)

図8 平板試料の形状測定結果

ルの試料として、図6に示す隣合う輝度分布が大きく異なる部位を持つ平板試料を作成し、これを用いて詳細な検討を行った。図7は図6の点線部で得られる輝度分布である。暗部、明部でその輝度はそれぞれほぼ0、255に飽和して、画像の相関が取れない。

この平板試料を2種の照明条件で測定した例を図8 (a)、(b) に示す。図中に測定したデジタル像の試料中央部のライン上の輝度分布と、これより求めた形状測定結果を示す。両者はそれぞれ照明条件約7k lux, 9k luxで測定したもので、7k luxの方は明るい部分の輝度データが255に飽和しないように、9k luxの方は暗い部分の輝度データが0に飽和しないようにしたものである。飽和している明部の輝度を下げるために照明を暗くすると図8 (a) に示したように、明部ではコントラストが向上し形状測定できているが、暗部ではコントラストが低下しその形状測定が不可能になっている。逆に図8 (b) のように照明を明るくすると、暗部ではコントラストが向上して形状測定できているが、明部

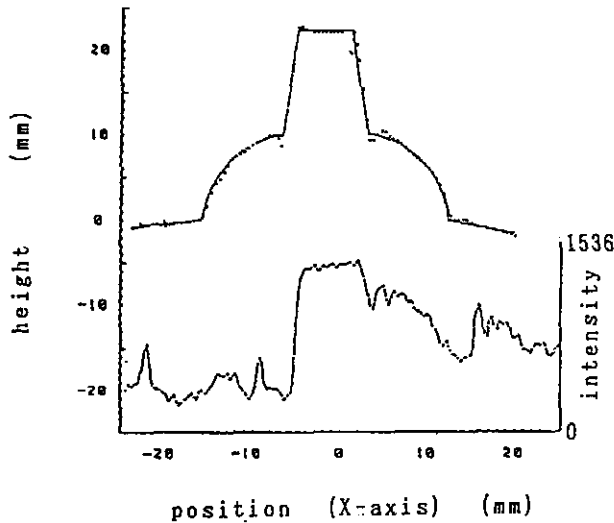


図9 塑性加工品の加算処理後の測定結果（照明変化2段階）

での輝度データは飽和してしまい形状測定ができていないというように、図5に示した結果と同じ傾向になった。

この両者の輝度データを加算したものを相関のための画像データとしてみた。これを図8(c)下に示す。全体にコントラストのある輝度分布となっていることがわかる。これより形状解析した結果を図8(c)上に示す。図8(a),(b)と比較すると、試料全面で形状測定が高精度で可能となっている。

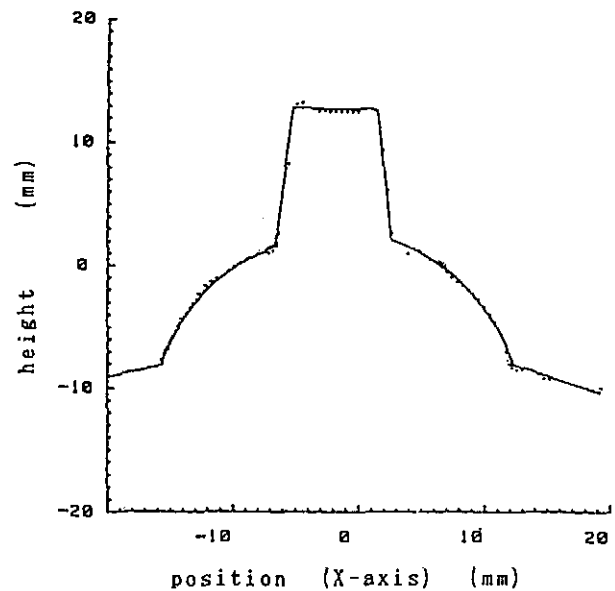
このように、照明の明るさを変化させたデジタル像を加算することにより、カメラのダイナミックレンジを疑似的に拡大できることがわかった。

複雑形状物測定における本処理の有効性を確認するため、図5(a),(b)に示した塑性加工品の輝度データを加算し、形状測定した結果を図9に示す。加算の効果により、輝度データのダイナミックレンジが拡大し、歯車上面・付け根部、両面でコントラストが向上して相関が取れるようになり、試料全面の形状測定が可能になった。このときの測定誤差は $200\mu\text{m}$ であった。照明条件を $7\text{k lux}$ から $9\text{k lux}$ までに細かく5段階に変化させて取り込んだデジタル像の輝度を加算し、形状測定を行った例を図10に示す。照明変化段階の加算に比べて、更に測定精度の向上が見られ、測定誤差 $100\mu\text{m}$ の高精度な測定ができた。

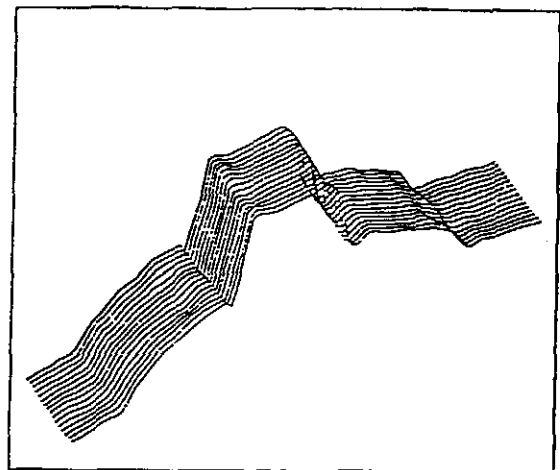
以上、本研究で用いたような照明の光量を変えたデジタル画像の加算処理は画像のダイナミックレンジを拡大し、加算処理による三次元形状測定法の精度向上に有効であるとわかった。

#### 発表論文

三原毅、住友宏之、古川敬、伊達和博、ステレオスコープに画像相関法を組み合わせた三次元非接触形状測定法 第7回画像センシング技術シンポジウム講演論文集PP.



(a) 断面二次元プロット



(b) 三次元プロット

図10 塑性加工品形状測定結果（照明変化5段階）

11 - 15 (1992)

- 2) T.Mihara, H.Sumitomo, T.Furukawa, and K.Date ; Three Dimensional Shape Measurement Using Stereoscopy and Image Correlation Method, International Symposium on Nondestructive Testing & Stress - strain Measurement Proceeding vol.2, pp.582 - 589 (1992)
- 3) 三原毅、住友宏之、吉成正敏、伊達和博、画像相関法を利用したステレオスコープ三次元形状測定法の高精度化、第8回画像センシング技術シンポジウム公演予定 (1993)