

画像映像情報の立体可視化技法に関する研究Ⅱ —物体の三次元形状計測における測定精度の向上—

A Study of Precision Improvement in Case of Three-Dimensional Shape Measurement

辻岡勝美*1, 古橋秀夫*2, 秦野和郎*3, 比嘉俊太郎*4,
内田悦行*2, 與語照明*5, 劉京南*6, V. T. Chitnis*7

Katsumi TSUJIOKA, Hideo FURUHASHI, Kazuo HATANNO, Shuntaro HIGA,
Yoshiyuki UCHIDA, Teruaki YOGO, Jing-Nan LIU, Vijay T. CHITNIS

We have continued research on the three-dimensional shapes measurement system using a spatial modulator. This system is composed of a projector, an optical spatial modulator, a CCD camera, and a computer. A liquid crystal is used as the optical spatial modulator. The grating patterns that are projected on the surface of the object are controlled by the computer connected with the optical spatial modulator. The projected patterns are captured by the CCD camera. The data are transferred to the computer. After a transformation into line data, the data are analyzed to obtain the coordinate of the surface of the object. The advantages of this system are non-contact, non-invasive, and short time measurement. We proposed a method using differentiation to expand the measurable area and improve the accuracy of measurement. Additionally, we proposed to eliminate the influence of marking on target object surfaces. It was a very practical and effective method.

In this paper, we report the techniques of precision improvement in case of the three-dimensional measurement. (1) Construction of the high precision three-dimensional shape measuring system. (2) Reduction of the error from the three-dimensional measurement. (3) Subtraction technique to reduce the influence of the marks on the object.

1. はじめに

近年の情報処理技術の進歩は目覚ましい。特に画像映像情報技術は飛躍的な進歩を果たし、多くの分野で有効に活用されている。この画像映像情報技術の中でも三次元計測および三次元表示の技術は、ここ数年で著しい進歩があり、注目を浴びている技術

といえる。特に三次元計測の分野では、短時間、高精度、そして人体に関わる場合、非侵襲が重要な要素となる。また三次元表示の分野では、リアルタイム性、再現性が重要となる。これらの三次元技術の進歩により、バーチャルディスプレイなどが一般的なものとなり、情報社会は新しい展開を見せるものと期待される。この場合においても、情報収集にお

*1 愛知工業大学大学院 電気・材料工学専攻 (豊田市)

*2 愛知工業大学 情報通信工学科 (豊田市)

*3 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

*4 愛知工業大学 建築学科 (豊田市)

*5 ㈱オプトン (瀬戸市)

*6 東南大学 自動制御系 (中国, 南京市)

*7 Length Standard Section, National Physical Laboratory
(New Delhi, India)

ける精度維持, 短時間性, 表示技術における再現性が重要な要素であることは変わらない。本研究のねらいは, 対象とする物体の三次元形状計測技術, 三次元表示技術を通して, 次世代の画像映像情報の立体可視化技術を構築することにある。

本研究で行うべき研究範囲は広く, 多くの専門分野からの研究者の協力が必要である。今回, 基礎分野から応用分野まで, また, 海外からの参加者を加えた研究グループの構成により, 新たな創造的発想を生み出すことをねらった。

2. 格子パターン投影法による三次元形状計測

三次元形状情報を得る方法として, 表1に示す種々の方法がある。我々は, 短時間, 非侵襲の特性に着目し, 格子パターン投影による光学的三次元形状計測法について研究を進めている。また, 本手法に

表1 各種三次元形状計測法

接触式	
点計測	: タッチプローブ方式
面計測	: スライディングゲージ法
	: リボン式包絡線法
非接触式	
点計測	
光プローブ方式	: オートフォーカス式プローブ
	: 三角測量方式プローブ
	: 画像計測式プローブ
超音波方式	
磁気方式	
面計測	
断面計測方式	: シルエット法
	: 光切断法
	: レーザー光切断法
	: レーザー光走査法
	: 光包絡線法
等高線計測法	: モアレトポグラフィー法
	: 干渉縞法
	: ホログラフィ法
ステレオ写真法	
パターン投影法	: スライド法
	: 空間光変調法

おける格子パターン作成では, 従来のフィルム上に格子パターンの模様が固定されたものではなく, 透過液晶の電氣的制御による空間光変調方式(液晶式ビデオプロジェクタ)を採用した。

格子パターン投影法では, 図1に示すシステムで計測が行われる。測定物に対してプロジェクタから水平な直線状格子パターンが投影される。投影された格子パターンは測定物表面に映りこむ。このときプロジェクタの上方に配置したCCDカメラによって測定物を観測すれば, 測定物の表面形状に応じて変形した格子パターンを得ることができる。この変形格子パターンをコンピュータに取り込み, 演算処理を行った後に測定物の三次元表面座標を求める。

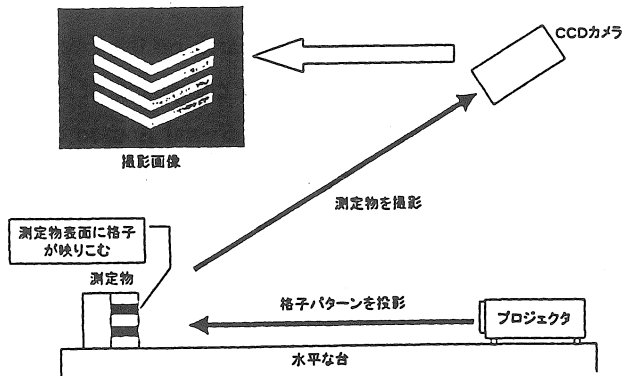


図1 格子パターン投影法による三次元形状計測

ここでは, 物体空間座標系と観測座標系について述べる。図2, 図3にプロジェクタ, 測定物, CCDカメラの配置図を示す。

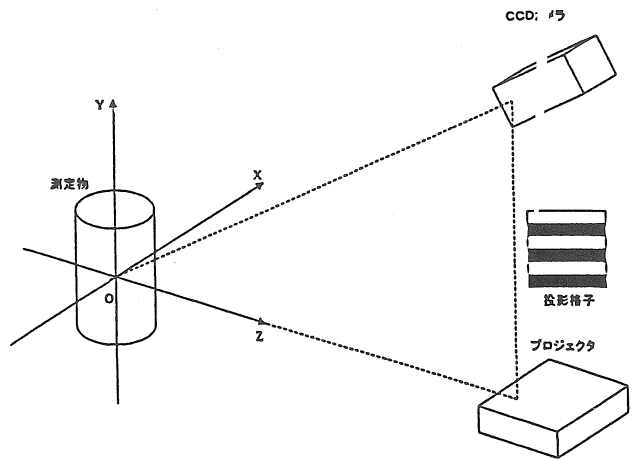


図2 三次元計測システム図

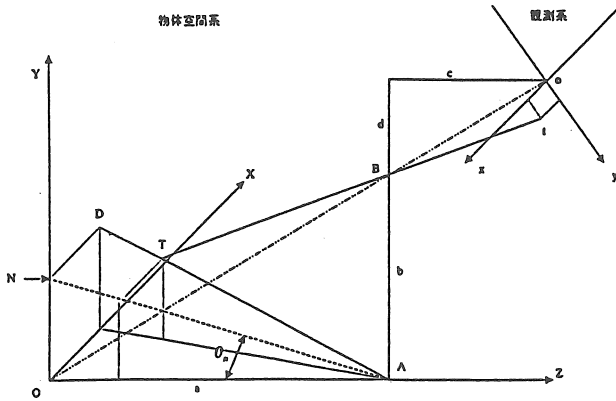


図3 三次元計測の幾何学的関係

物体空間座標系を原点O(0, 0, 0)としたX-Y-Z直角三次元座標系, CCDカメラによる観測座標をx-y直角二次元座標系とする。プロジェクタレンズの光軸をZ軸に合わせ, 主点をA(0, 0, a)に置く。またCCDカメラレンズの主点をY-Z平面内の点B(0, b, a)に置き, レンズの光軸が原点Oを通るように配置する。観測座標系の中心をo(0, b+d, a+c)に置き, X軸と平行になるようにx軸をとる。プロジェクタから射出されるn番目の格子線とZ軸とのなす角度を θ_n とする。このようにすると, 物体に投影された物体空間座標系の座標値(X, Y, Z)と, それに対応する観測座標系の座標値(x, y)の間には, 式(1)の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} X &= -b\sqrt{a^2 + b^2}x/H \\ Y &= (mab\sqrt{a^2 + b^2} - b^2y)\tan\theta_n/H \\ Z &= ((-ma^2\sqrt{a^2 + b^2} - aby)\tan\theta_n - a^2y - b^2y)/H \\ H &= (ma\sqrt{a^2 + b^2} - by)\tan\theta_n + mb\sqrt{a^2 + b^2} + ay \\ m &= c/a = d/b \end{aligned}$$

(1)

観測座標系におけるn番目の格子点の二次元座標値t(x, y)を知ることにより, 式(1)より物体空間座標系の三次元座標値T(X, Y, Z)を知ることができる。

3. 三次元形状計測システムの構築

図4に我々の構築した空間光変調パターン投影による三次元形状計測システムの構成を示す。格子状

パターンの投影には液晶式ビデオプロジェクタを用いた。格子パターンの投影に縞状パターンのフィルムを用いる方式に比べて, パターンの間隔や位置を変化させる場合, 機械的な操作が不要となり, 精度が向上する。液晶式ビデオプロジェクタを用いることにより, これらの機械的操作が電氣的に行える。また, 液晶式ビデオプロジェクタでは制御に要する時間を短くすることが可能である。

物体に投影された格子パターンの観察にはCCDカメラを用いた。CCDカメラにより撮影された変形格子画像は, ビデオ信号としてパーソナルコンピュータ内の画像ボードに取り込まれる。取り込まれたビデオ信号は画像処理の後, 式(1)により物体空間座標の三次元座標値に変換される。

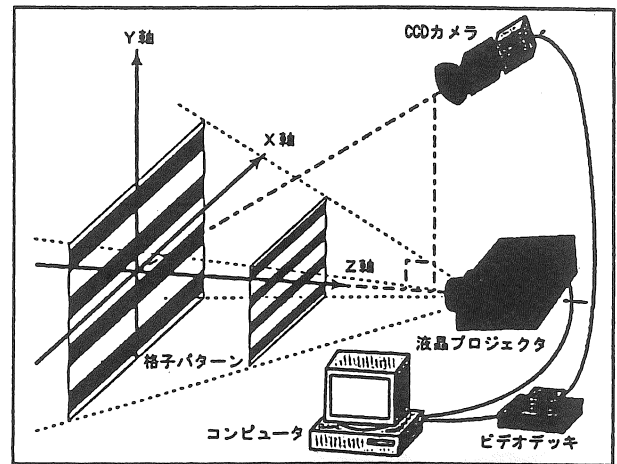


図4 三次元形状計測システムの構成

次に, 画像処理の手順について述べる。走査のほとんどはパーソナルコンピュータにより実行される。フローチャートおよびその内容を図5に示す。

4. 三次元形状計測システムにおける画像処理

三次元形状計測システムの精度は, 画像処理の技法で決まる。

4.1 変形格子パターン画像の取得

CCDカメラにより物体の表面形状により変形した格子パターン画像を取得する。この画像情報はコンピュータのビデオキャプチャーボードにより取り込まれる。図6に取り込まれた変形格子パターン画像を示す。

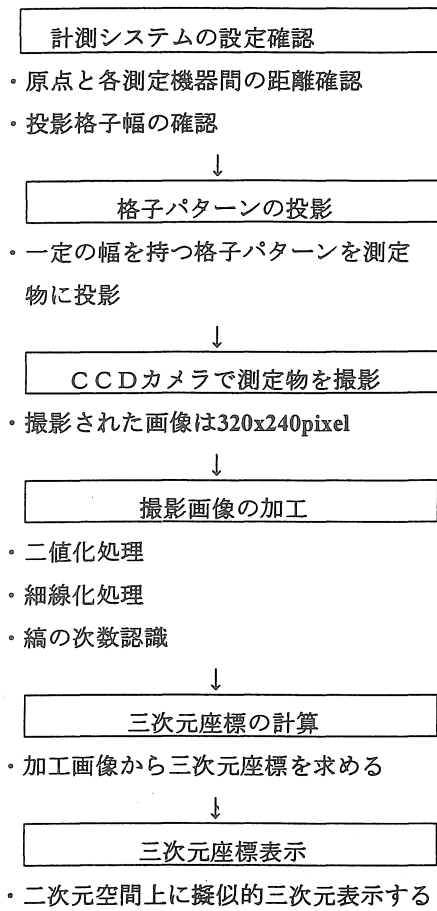


図5 計測手順のフローチャート

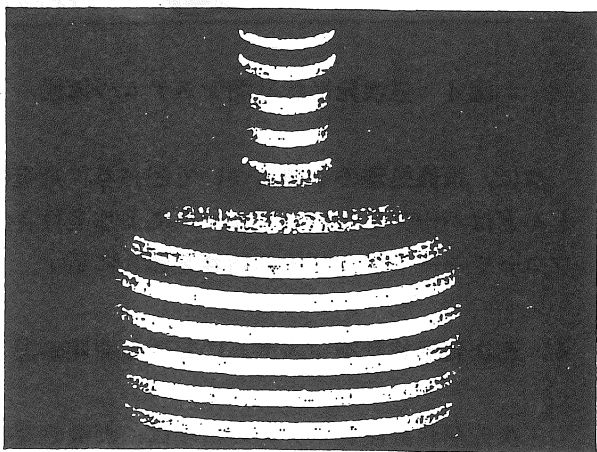


図6 変形格子パターン画像

4.2 二値化処理

本研究で用いる画像は0から255までの256階調の濃度情報をもった画像である。二値化とは256階調の輝度値をしきい値により0か255に振り分ける処理である。画素の輝度値が設定されたしきい値より

小さければ輝度値は0に、画素の輝度値が設定されたしきい値より大きければ輝度値は255に変換される。設定しきい値を128としたときの二値化の例を図7に示す。左に示された画素の輝度値は210で128よりも大きい値なので画素の輝度値は255に変換される。右に示された画素の輝度値は40であり128よりも小さいので輝度値は0に変換される。このような二値化の処理がCCDにより取り込まれた画像の画素すべてについて行われる。図8に実際に二値化処理が行われた画像を示す。

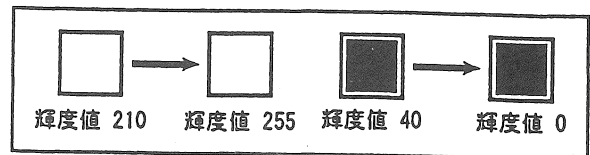


図7 設定しきい値128での二値化処理例

4.3 細線化処理

三次元座標値を計算するために必要なものは変形した格子パターンの形状とその画像座標である。細線化には、変形した格子パターン画像からそれぞれの格子パターン座標を抽出すること、その格子パターンの次数を識別する作業が含まれる。

格子パターンの次数を抽出するには2種類の抽出法がある。

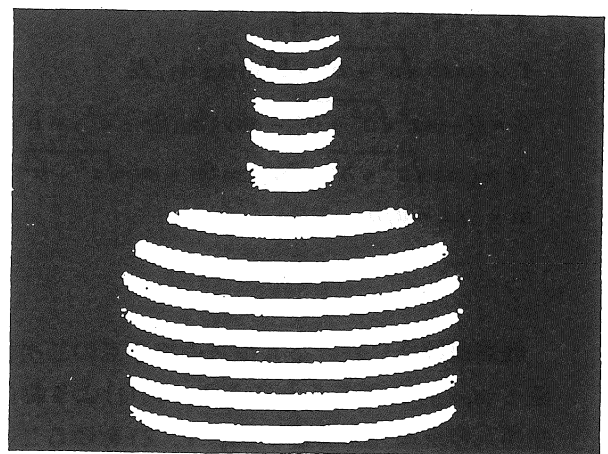


図8 設定しきい値128の二値化画像

4.3.1 エッジ法による細線化

エッジ法は、格子パターンの境界を画素単位で抽出する方法である。二値化された画像の必要な領域

を縞に垂直なy軸方向に沿って走査し、輝度の変わり目に相当する境界の画素を抽出する。その座標を格子パターンの座標値とする。

4.3.2 中点法による細線化

中点法は、格子パターンの幅の中央を画素単位で抽出する方法である。二値化画像をy軸方向に沿って走査し、同じ輝度の中央を抽出し、その座標を格子パターンの座標値とする。図9に細線化処理の概略を示す。

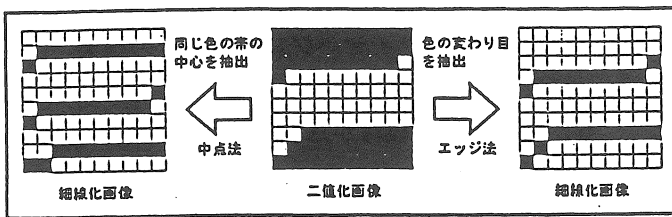


図9 細線化の手法（エッジ法と中点法）

4.3.3 細線化における問題点

ここでは二つの細線化の手法について問題点を挙げる。本計測法では光の投影角度特性、物体表面の光散乱特性などにより格子パターンの輝度が一定とはならない。その際、二値化後に格子パターンの幅が均等でなければ、エッジ法では格子パターンの輪郭が抽出されるので、図10に示すように格子パターンの幅が均等とならず、正しい座標が得られない。これに対して、中点法では格子パターンの幅の中央を抽出することから格子パターンの幅に影響を受けることなく、正しい格子パターンの位置を得ることができる。図10に格子パターンの幅が変化したときのエッジ法と中点法との比較を示す。図11、図12にそれぞれエッジ法による細線化画像と中点法による細線化画像を示す。

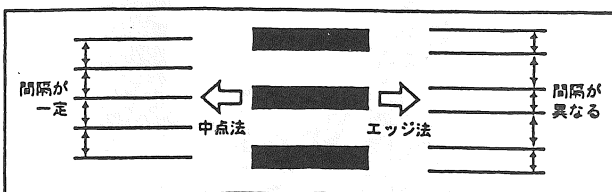


図10 格子パターン幅の変化における細線化の比較

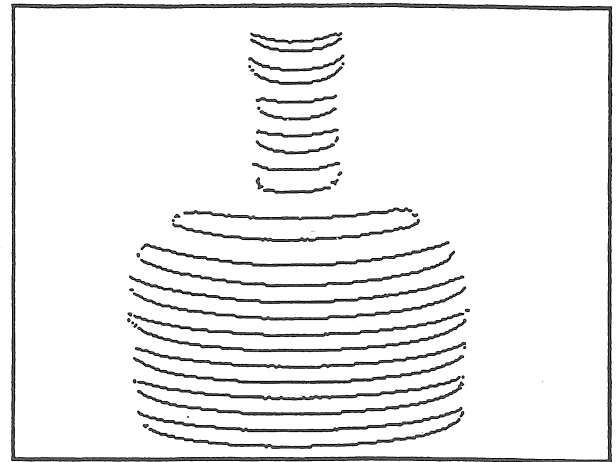


図11 エッジ法による細線化画像

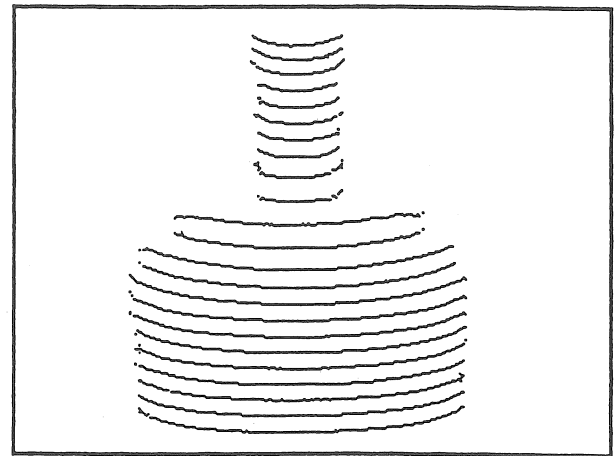


図12 中点法による細線化画像

4.4 格子パターンの認識と次数の識別

細線化した格子パターンは連続した画素の集まりである。これを1つの帯として認識し、同時にその次数も識別する必要がある。作業では図13に示すように、周囲8画素にある点は同じ帯を構成する点として認識する。そして、仮の次数を割り当て、原点を通る次数を用いて図14に示すように真の次数を得る。

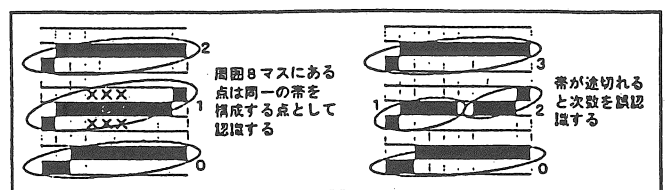


図13 格子パターンの認識

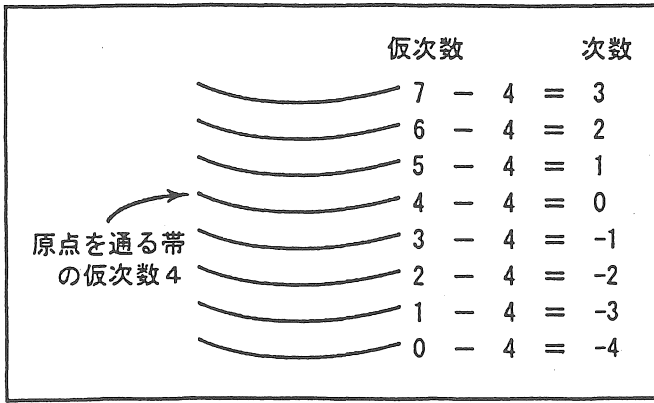


図14 次数の認識

4.5 三次元座標変換

格子パターンを認識し, その次数を識別した後に, 三次元座標変換が行われる。CCDカメラの二次元画像座標値から式(1)により三次元座標値への座標変換を行う。設定した定数を示す。

$$a = 170.0 \text{ (cm)}$$

$$b = 80.0 \text{ (cm)}$$

$$c = 20.0 \text{ (cm)}$$

$$d = 9.41 \text{ (cm)}$$

4.6 三次元座標表示

計測結果を視覚的に表すために計測値の三次元座標表示を行う。計測結果の一例として, 図15にドット表示結果を, 図16にワイヤーステート表示結果を示す。

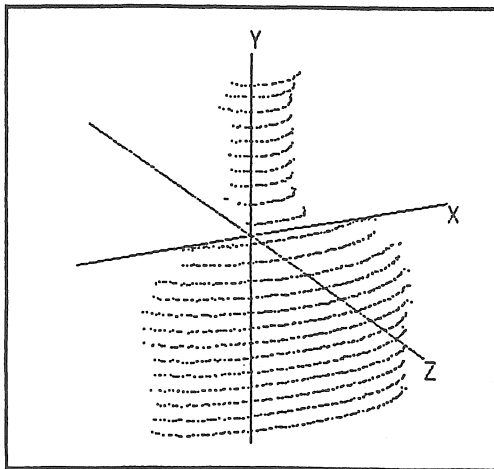


図15 ドット表示の結果

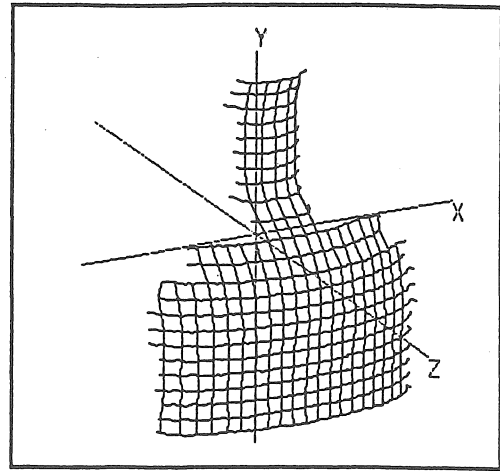


図16 ワイヤーステート表示の結果

5. 物体表面の模様が三次元計測に及ぼす影響

空間光変調パターン投影による三次元形状計測は, 電氣的に制御された縞状のパターン光を測定物に投影して, 物体の三次元座標値を得る方法である。しかし, 被写体表面に印刷等の模様が存在した場合, CCDカメラに取り込まれるデータが形状によるものか, 模様によるものかを区別できない。そのため正確な形状測定が困難となる。この問題を解決する方法について述べる。

5.1 画像差分による物体表面模様の影響除去法

画像差分による物体表面の模様の影響を除去する方法について述べる。縞パターンの有無について2回のデータ収集を行ない, それらの画像差分後のデータについて二値化, 細線化を行ない, その後, 三次元座標変換を行なった。被写体として表面に印刷が施された円筒状容器を用いた。図17と図18はCC

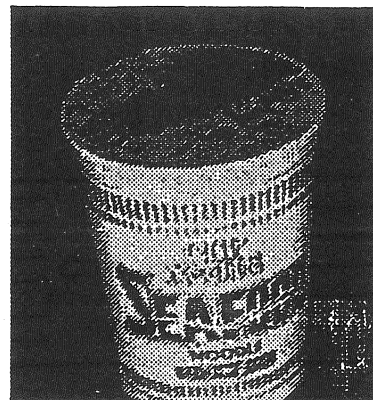


図17 縞パターンのない投影

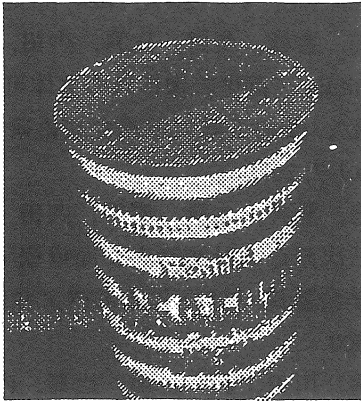


図18 縞パターンの投影

Dカメラの取り込みデータで、それぞれ縞パターンが投影されなかった時と投影された時を示す。図18のデータだけを用いる従来の方法では、図19のように、印刷された模様が残り、正確な形状計測が困難となる。図17と図18のデータを用いて画像差分の計測をした後、二値化処理を実行すると図20の結果が得られる。被写体表面の印刷模様が除かれ、二値化データには物体の表面形状のみの情報が示されるこ

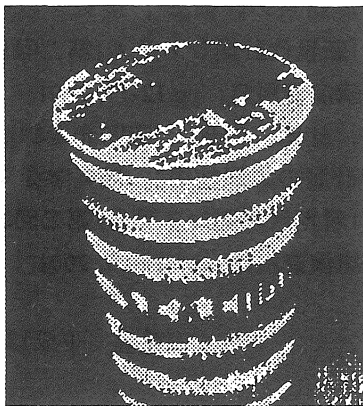


図19 画像差分処理をしていない二値化画像

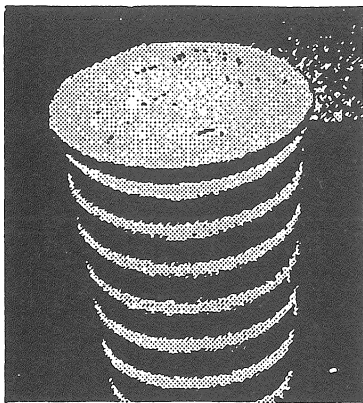


図20 画像差分後の二値化画像

とになる。

5.2 画像差分による物体表面模様の除去効果

三次元形状計測の実用化のためには、物体表面の模様の影響は重要な問題である。今回、投影される縞パターンの有無について2回の投影を行い、それぞれについて画像差分をすることにより、この問題を解決することができた。本法には、縞パターンの有無について2回の投影、そして画像の取り込みをしなければならないという時間的デメリットがある。しかし、縞パターンの発生を電氣的に制御できること、そしてシステムの自動化が可能であることから、本法は実用上有効な手段であるものといえる。

6. おわりに

本報告では、空間光変調パターン投影による三次元形状計測システムの構築、画像処理の手法について述べた。また、本システムの実用技術の一つとして画像差分による物体表面模様の影響の除去法について述べた。

本研究は、次世代の三次元形状計測システム、三次元画像表示システムを構築しようとするものである。そのためには従来技術にも増して精度、短時間性を高める必要がある。研究では、基礎技術から広い範囲の応用技術までの取り組みが必要であり、平成12年度卒研究生川田晋嗣君、岡本憲二君ら関連分野の研究者の参加によりこれを実現できた。

本報告は、本学総合技術研究所平成10年度～平成12年度プロジェクト研究の一部をまとめた第2報である。

文献

- 1) 井口, 佐藤: "三次元画像計測", 昭光堂, 1990
- 2) 吉沢: "光三次元計測", 新技術コミュニケーションズ, 1993
- 3) 吉沢, 鈴木: "格子パターン投影による三次元形状の自動計測", 精密工学会誌, Vol.53, No.3, pp.422-426, 1987
- 4) 小松原, 吉沢: "縞走査を導入した格子パターン投影法", 精密工学会誌, Vol.55, No.10, pp.1817-1822, 1989

- 5) 鳥脇: "画像理解のためのデジタル画像処理", 昭光堂, 1987
- 6) 辻岡, 周, 山野, 比嘉, 内田: "光学式形状計測システムにおける画像処理速度", 平成10年度第31回照明学会全国大会講演論文集, p.259, 1998
- 7) 辻岡, 山野, 古橋, 比嘉, 内田: "画像差分による光学式三次元形状計測の精度向上", 平成11年度第32回照明学会全国大会講演論文集, p.137, 1999
- 8) C-Y. Chen, J-N. Liu, L-L. Yu and Y. Uchida, "Three-Dimensional Surface Estimation by Grating Projection", Journal of Application Research of Computers, Vol.16, No.7, pp.78-79, 1999 (in Chinese)
- 9) K. Tsujioka, J-N. Liu, H. Furuhashi, K. Hatano and Y. Uchida, "Expanding the Measurable Area in Three-Dimensional Shape Measurement System using an Optical Modulator", Proceedings of the 4th Asian/Pacific International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, (Beijing, China), pp.64-67, 1999
- 10) K. Tsujioka, H. Furuhashi, K. Hatano, S. Higa and Y. Uchida, "Acquiring Even Striped Patterns Intensity in Three-Dimensional Shape Measurement System Using an Optical Modulator" Proceedings of SPIE, Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection V, (Boston, Massachusetts, USA), Vol.3835, pp.215-222, 1999
- 11) 辻岡, 古橋, 秦野, 内田: "空間光変調パターン投影を用いた三次元形状計測システムにおける測定範囲拡大と精度の向上", 電気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, Vol.120-A, No.4, pp.439-444, 2000
- 12) 辻岡, 古橋, 秦野, 比嘉, 内田, 與語, 劉, V. T. Chitnis: "画像映像情報の立体可視化技法に関する研究", 愛知工業大学総合技術研究所研究報告, Vol.2, pp.1-7, 2000
- 13) 辻岡, 藤井, 古橋, 秦野, 内田: "画像差分による光三次元形状計測時の表面模様除去", 平成12年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集, p.379, 2000
- 14) 辻岡, 川田, 劉, 古橋, 比嘉, 内田: "空間光変調法を用いた三次元形状計測の技法", 平成12年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, p.235, 2000
- 15) K. Tsujioka, H. Furuhashi and Y. Uchida, "Three-Dimensional Shapes Measurement System Using an Optical Modulator", Proceedings of the 16th World Congress of International Measurement Confederation, Measurements Enable Technology & Science, XVI IMEKO World Congress, (Vienna, Austria), Vol.2, pp.307-310, 2000
- 16) 川田, 辻岡, 劉, 古橋, 内田: "光三次元形状計測と計測結果の評価法", 電気学会東海支部若手セミナー「新世代計測システム」第二回若手研究者研究発表会講演資料集, pp.12-13, 2001
- 17) 藤井, 辻岡, 内田: "空間光変調法を用いた三次元形状計測の応用技術", 電気学会東海支部若手セミナー「新世代計測システム」第二回若手研究者研究発表会講演資料集, pp.14-15, 2001

(受理 平成13年3月19日)