

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 強度変調光・カラー変調光投影に基づく3次元画像計測   |
| Author(s)    | 盧, 存偉   |
| Citation     | 大阪大学, 1999, 博士論文  |
| Version Type | VoR   |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.11501/3155483">https://doi.org/10.11501/3155483</a> |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 強度変調光・カラー変調光投影 に基づく3次元画像計測

盧 存 偉

大阪大学大学院基礎工学研究科

1999年1月

## 要 約

本研究の目的は、汎用な設備を用いて、少数回（1回か2回）の投影により、3次元形状計測を実現することである。

この目的を達成するために、本研究では、まず高速性と簡易性を持っているモアレトポグラフィに注目する。従来法のモアレトポグラフィは1枚の画像から等高線パターンを求めることができるが、縞次数の決定問題が残っているため、一意的な奥行き距離の計測ができず、計測の自動化が困難であった。

それはモアレパターンに含まれる情報量が不足していることによる。この問題を解決するために、本研究では強度変調光投影手法を提案する。強度変調投影光の利用により、投影パターンを2次元から3次元に拡張し、画像に含まれる情報量を増加させる。これによりモアレパターンを2次元から3次元に拡張させ、人間を介在させず、モアレパターンの解析から物体の3次元形状を復元することができる。

投影光変調方式の決定は本研究の中心問題となる。本研究では、振幅を指数関数で変調するコサイン関数状投影光を提案する。具体的には、指数関数で投影格子の透過率と観測格子の透過率を変調することにより、縞の強度が物体の奥行きと対応関係を有する強度変調モアレパターンを生成する。その結果、モアレ縞の強度値によりその次数を決定することができ、従来法モアレの問題が解決される。

計測感度を向上させるために、本研究では、従来法の強度解析と位相解析を融合する強度・位相解析方法を提案する。まず強度変調モアレパターンの強度解析により、モアレパターンをいくつかの奥行き領域に分割する。次に、各奥行き領域において位相解析を行い、細かい奥行き値を算出する。位相解析の前に奥行き領域分割を行うので、従来位相解析法における位相値と強度値との非単値対応の問題は既に解決されている。

計測物体の表面反射特性が計測結果に与える影響を解決するために、本研究では変形格子像の補正手法を提案する。

強度変調光投影法の拡張として、本研究ではカラー変調モアレを提案する。RGB 3チャンネルの信号を別々に変調するカラー変調光の利用により、カラー変調モアレパターンを生成し、強度変調モアレと同じ役割を果たせる。

提案する変調光投影法はモアレトポグラフィにだけでなく、他のアクティブステレオ法にも応用することができる。例として、本研究では強度変調パターン光投影法と強度変調変形格子像の直接解析手法を挙げる。

# 目 次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 総論 .....                 | 1  |
| 1.1 3次元画像計測 .....            | 1  |
| 1.1.1 3次元計測と3次元画像計測 .....    | 1  |
| 1.1.2 既存の3次元画像計測方法の考査 .....  | 2  |
| 1.2 3次元画像計測の動向 .....         | 9  |
| 1.3 本研究の目的と論文の構成 .....       | 11 |
| 第2章 従来式のモアレトポグラフィ .....      | 13 |
| 2.1 基本原理 .....               | 13 |
| 2.1.1 モアレ現象とその応用 .....       | 13 |
| 2.1.2 モアレトポグラフィ .....        | 14 |
| 2.2 特徴と問題点 .....             | 19 |
| 第3章 強度変調モアレ .....            | 22 |
| 3.1 基本原理 .....               | 22 |
| 3.2 計測システムと計測結果 .....        | 25 |
| 3.3 計測精度分析 .....             | 30 |
| 3.4 考察 .....                 | 32 |
| 第4章 実計測に向けての問題解決 .....       | 33 |
| 4.1 計測レンジの拡張 .....           | 33 |
| 4.1.1 複数枚画像により合成 .....       | 34 |
| 4.1.2 指数変調投影光から線形投影光に .....  | 37 |
| 4.2 表面反射特性の良くない物体の計測 .....   | 39 |
| 4.2.1 問題の提出 .....            | 39 |
| 4.2.2 2枚画像により補正 .....        | 40 |
| 4.2.3 一枚の画像により補正 .....       | 40 |
| 4.3 考察 .....                 | 45 |
| 第5章 強度・位相解析 .....            | 48 |
| 5.1 従来の位相解析方法の問題点と解決方法 ..... | 48 |
| 5.1.1 問題点 .....              | 48 |



## 目次

---

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 5.1.2 強度変調モアレを用いた位相解析 .....           | 50 |
| 5.2 輪郭線の抽出 .....                      | 50 |
| 5.2.1 強度変調モアレパターンの輪郭線抽出の困難 .....      | 50 |
| 5.2.2 モアレパターンの強度変化方向特性の利用 .....       | 53 |
| 5.3 モアレパターンのセグメンテーションと3-D表面形状復元 ..... | 55 |
| 5.4 実物体の強度・位相解析結果と計測精度分析 .....        | 58 |
| 5.5 考察 .....                          | 58 |
| 第6章 カラー変調モアレ .....                    | 62 |
| 6.1 計測原理 .....                        | 62 |
| 6.2 計測システムと結果 .....                   | 66 |
| 6.3 考察 .....                          | 67 |
| 第7章 変調投影光による3次元計測の展開 .....            | 71 |
| 7.1 高精度CCDカメラにより計測 .....              | 71 |
| 7.2 強度変調空間パターン光投影法 .....              | 76 |
| 7.3 変調変形格子像の直接解析による3次元復元 .....        | 79 |
| 7.4 考察 .....                          | 80 |
| 第8章 結 論 .....                         | 82 |
| 参考文献 .....                            | 85 |
| 研究業績リスト .....                         | 89 |
| 著 書 .....                             | 89 |
| 論 文 .....                             | 89 |
| 学会発表 .....                            | 90 |
| 国際会議 .....                            | 90 |
| 特 許 .....                             | 91 |
| 謝 辞 .....                             | 92 |

# 第1章 総論

外部世界を3次元的に認識・理解することは我々人間の能力である。しかし人間は定量的に3次元計測することが困難である。現在生産技術及び人文社会の分野で、正確に3次元世界の様子（位置、形状、寸法など）を計測・認識・理解することが要求されている。これはマシンビジョンの課題である。

デジタル画像技術、半導体技術の発展に伴って、画像処理による3次元計測は盛んに行われている。特に近年のデジタル画像処理の発展は3次元画像計測を飛躍させたと言える。

本章では3次元計測の基本原則、既存の3次元計測諸方法の特徴及び問題点、さらに本研究の背景と意義及び本論文の構成を述べる。

## 1.1 3次元画像計測

### 1.1.1 3次元計測と3次元画像計測

3次元計測とは、物体の立体形状と3次元空間位置の計測のことで、幅広い分野で要求されている。大きな面で見ると、大地測量、橋梁・建築物の計測、航空機や船舶の監視レーダなどがある。小さな面で見ると、半導体チップの熱変形の計測やガラスなどの平坦度計測、更に細胞の生長過程の計測がある。我々の身近でも、整形や服装設計のための人体計測、生活用品の外観検査などがある。特に工業、産業分野で、大量生産を必要とする工場のオートメーション化やロボットビジョンなどではより精密性、高速性、適応性に優れている3次元計測が要求される。

物体の3次元空間位置と立体形状の計測は大別して接触式と非接触式に分けられる。

接触式はプローブの先端を物体に当ててその位置を3軸取り付けられた位置センサーの出力として読みとる方法で、製品の寸法の検査などに利用される。しかし、この方法は一回の計測で1点のデータのみ得られるので、複雑な形状計測、大きな物体の計測にはかなりの時間を要し、また接触できない物体の計測には利用できないという問題点がある。

非接触式は光や音波の伝搬を利用して物体の3次元空間位置や立体形状を計測する方法である。よく使われている非接触式3次元計測には、レーダ計測、超音波3次元計測、画像計測などがある。3次元画像計測は画像処理技術を用いて3次元空間位置や立体形状を計測す

る方法である。

ここ十数年で、デジタル画像技術の発展に伴って、3次元画像計測は実験室の研究段階から技術界、産業界に実用化された。特に最近のデジタル画像技術の発達により、3次元画像計測に新時代を迎えさせたといえる。CAD, CAM, FA, Roboticsなど現在生産・生活の中堅領域だけでなく、人工現実、インターネットなどの先端領域で、3次元画像計測は活躍している。現在3次元画像計測はマシンビジョンの重要な研究一環として注目されている。(Inokuchi 90, 95, Yachida 90, Yoshizawa 90, 96, Matsuyama 98)

### 1.1.2 既存の3次元画像計測方法の考査

3次元画像計測は受動型計測と能動型計測に大別できる。受動型計測とは、計測のために、対象物体に対して別のエネルギーを加えない方法である。能動型計測とは、信頼性が高

Tab. 1-1 3次元画像計測諸法

| 分類  | 方法         | 要素技術                  |
|-----|------------|-----------------------|
| 受動法 | レンズ焦点法     | 焦点ボケ                  |
|     | 単眼視法       | テクスチャ, 影, . . .       |
|     | ステレオ画像法    | 両眼視, 三眼視, 多眼視, カメラ移動視 |
|     | 動画像        | 時系列画像                 |
| 能動法 | 光レーダ法      | 位相差計測                 |
|     |            | 時間差計測                 |
|     | アクティブステレオ法 | スポット光投影               |
|     |            | スリット光投影               |
|     |            | コード化パターン光投影           |
|     |            | 濃度・カラー傾斜パターン光投影       |
|     | 照度差ステレオ法   | フォトメトリックステレオ          |
|     | 等高線計測法     | モアレトポグラフィ             |
|     |            | 干渉縞法                  |

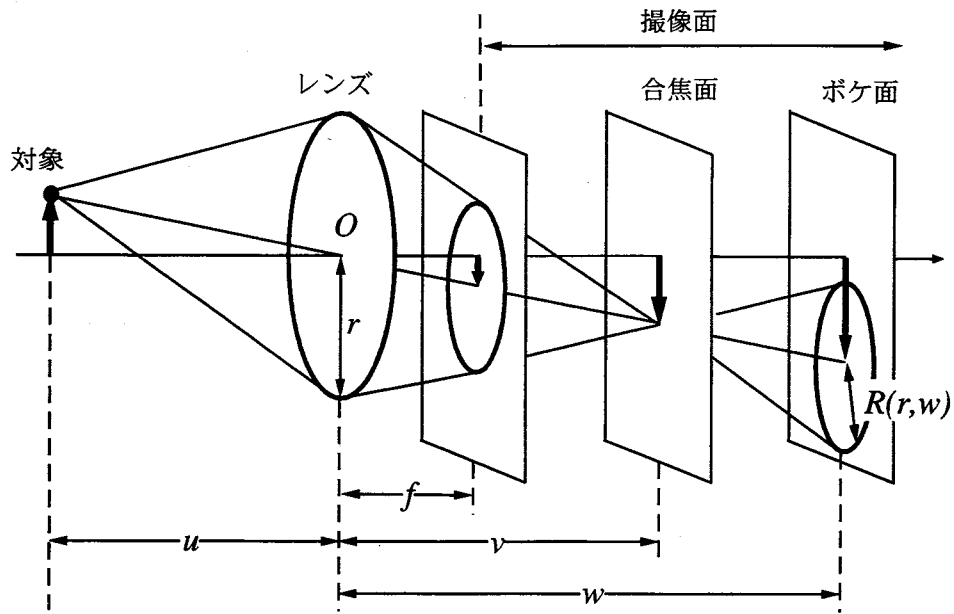


Fig.1-1 レンズボケによる計測

い3次元計測情報を計測するために、物体に投影パターンなど何らかの意味を持つエネルギー（光、電波、音波など）を照射する方法である。

Tab. 1-1は現在よく使っている3次元計測の諸法を示す。(Inokuchi 90)

### 1. レンズ焦点法

レンズ焦点法とは、カメラの焦点ボケの量から距離を求める方法である。Fig.1-1に示す薄レンズカメラモデルで、式(1-1)が成り立つ。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1-1)$$

ただし、

$f$ : レンズの焦点距離、

$u$ : レンズ面から物体までの距離、

$v$ : レンズ面から合焦撮像面までの距離。

Fig.1-1により、ボケ半径は

$$R(r, w) = \frac{r|w - v|}{v} \quad (1-2)$$

となる。

ボケ半径 $R(v, w)$ を最小となければ、 $w$ が $v$ とすると、式(1-1)から物体までの奥行き値 $u$ を算出することができる。

この手法は合焦フォーカス位置を探索する必要があるので、次のような問題点がある。

- (a) 複数枚の画像を撮る必要があり、計測時間がかかる。
- (b) 合焦画像を撮らなければならない。
- (c) 奥行き距離計測精度は、フォーカス位置測量により決まり、高精度の達成は困難である。

これらの問題を解決するために、最近多重フォーカスやフォーカスが変化するとき空間周波数領域のパワー変化をモデル化するなどの研究が進んでいる。(Asada 94, Takemura 97, Subbarao 94, Nayar 95)

## 2. 単眼視法

単眼視法とはただ一つのカメラを用いる3次元計測方法である。

人間は片目だけでも周辺の3次元情報を理解できる。これは人間が周辺物体の見かけの大きさや消失点及び影などの情報と3次元世界との関係の知識を持っていることが原因である。もしマシンに計測対象のこれらの知識を持たせれば、つまりマシンが対象のモデルを持っていれば、一枚の濃淡画像から3次元計測を行える。

例として、3次元モデルを利用する計測、対象物体の影解析による計測、表面反射特性が均一な対象物体の画像の強度変化による計測及びテクスチャ変化の解析による計測などの方法が挙げる。

しかしこれらの手法は、シーンに対する幾つかの仮定を定めており、適用範囲が制限される。

## 3. ステレオ画像法

人間の両眼のように、左右2台のカメラを使って三角測量の原理を用いた3次元計測はもっとも一般的な手法と考えられた。言い換えると、異なる視点から同一の対象を観測し、それぞれの画像上への投影位置の違いから、対象の3次元位置情報を得ようとするものである。これはステレオ画像法で、両眼視やステレオ視とも呼ばれる。(Matsuyama 98, Xu 96)

ステレオ画像法はFig.1-2のように配置して、以下の関係がある。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (1-3)$$

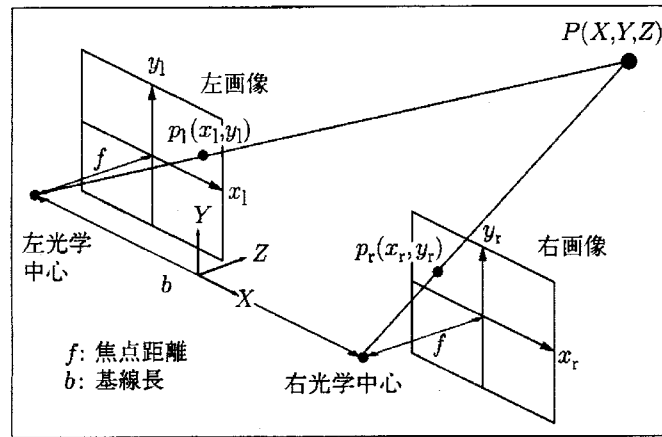


Fig.1-2 ステレオ画像法の基本配置 (Matsuyama 98 より)

$$Y = \frac{b(y_l + y_r)}{2d} \tag{1-4}$$

$$Z = \frac{bf}{d} \tag{1-5}$$

ただし、 $f$ は焦点距離で、 $b$ は基線長で、 $d$ は視差である。 $f$ と $b$ は既知数で、 $d$ は次の式を満足する。

$$d = x_l - x_r \tag{1-6}$$

一般に $y_l = y_r$ を設定する。

ステレオ画像法において、左画像上の注目点 $P_l(x_l, y_l)$ と右画像上の点 $P_r(x_r, y_r)$ との対応関係がわかれば、計測点 $P(X, Y, Z)$ の3次元座標 $(X, Y, Z)$ は求まる。これを対応付け問題という。この問題を解決するためにさまざまな方法が提案されているが、これらは特徴ベース法と領域ベース法の2種類に大別できる。

特徴ベース法は、左右両画像のエッジなどの特徴を抽出し、それらの特徴間で対応付けを行おうとする方法である。領域ベース方法は、一方の画像にある対応点を他方の画像から探す際、その点の周りの局所的なパターンを手がかりに探索しよう方法である。

しかし、具体的に次に述べだように対応付け問題は非常に難しい。

#### (1) 対応付けのあいまいさ

限定条件がない一般的なステレオ画像では、画像上のすべての点の対応を正確に求めるのはほとんど不可能である。まだ、カメラの特性の違いや、物体の表面反射特性が両カメラに対する違いや、ノイズの混入などの影響により、左右画像の対応付け点が得られなくなる。

## (2) 濃度変化のない領域

濃度変化がない領域，あるいは濃度変化が非常に少ない領域では，左右画像の対応点が求められたとしても，不確かなものとなる。

## (3) オクルージョン問題

ステレオ視は元々両カメラの視点の違いを利用して，奥行き情報を求めた。しかし，視点の違いにより，それぞれのカメラで見えている部分が異なるというオクルージョン問題がある。

ステレオ視の対応付け問題はまだ解決されなかったとも言える。近年来，ステレオ視に関する研究論文数は英論文と和論文共に増えている。特に3眼視，多眼視，カメラ移動視に関する研究は盛んである。

3眼視は2眼によるステレオ視に，もう一つ確認用のカメラを用いることで，対応点に幾何学的な拘束を与えることができ，対応付けのあいまいな問題を避けることができる。対応付けの信頼性を向上するために，多眼視やマルチベースラインステレオが提案されている。

(Okutomi 93)

## 4. 動画像による3次元計測

動画像による3次元計測とは，撮影した時系列画像から3次元空間中にある物体の形状の推定，物体の運動パラメータの推定，環境の空間構造を把握することである。手法としてはナビゲーション，移動物体解析，移動光源による解析がある。(Deguchi 96)

ナビゲーションとは，物体と光源が固定され，カメラの移動で時系列画像を撮る方法である。環境を解析しつつ移動するロボットの視覚がこれに当たる。ビルなどの建築物の外観計測もこの方法を用いて使っている。

移動物体解析とは，カメラと光源が固定され，動いている物体の写真を撮る解析方法である。名前通り，この方法は動物体の計測に使っている。

移動光源による解析とは，カメラと物体が固定され，光源の移動により時系列画像を撮る解析方法である。

時系列画像から物体を3次元に復元する一番重要な問題は対応付け問題である。

## 5. 光レーダ法

能動的な3次元計測方法として，光レーダ法 (Laser range finder) は昔から利用されている。(Tanaka 93)

Fig.1-3 に示すように，転送速度 $v$ が既知である光が物体に当たって，反射して帰ってくるまでの時間 $t$ を計測すれば，距離 $L$ は次の式で求める。

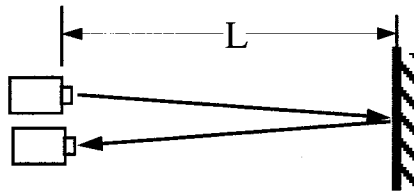


Fig.1-3 光レーダ法による距離計測

$$L = \frac{1}{2} vt \quad (1-7)$$

光レーダ法は光飛行時間測定法（Time of light range）とも呼ばれ，死角がなく，太陽光の下でも稼働できるなどの利点があるが，高精度の時間差計測システムを必要とする。地球から衛星までの距離計測は上式で簡単にできるが，普通の数メートル範囲での距離計測は $t$ が非常に短いので（ $ns$ 以下），普通の計測手法での計測は難しい。短い時間差を計測するために，位相差の計測により時間差を求める方法が提案された。

## 6. アクティブステレオ法

ステレオ法の左右画像の対応付け問題を解決するために，一方のカメラを光を発するプロジェクタに置き換えた。これはアクティブステレオ法と呼ばれ，装置が簡単・便利などの利点で，現在よく利用されている方法である。しかし，この方法は死角があり，明るい室外で動作しにくいという欠点がある。

投影パターンの形で分類すると，アクティブステレオ法はスポット光投影法，スリット光投影法，空間コード化パターン光投影法，濃度（カラー）傾斜光投影法などの方法に分類できる。

スポット光投影法は一回の投影で一点の情報しか得られないので，計測には長い時間がかかる。現在スポット光方式では，ビデオ信号を使わず，専用の光学系を使うので，リアルタイム入力が可能となる。

スリット光投影法は光切断法とも呼ばれ，一回の投影で1本のスリット光が得られ，データ入力時間が減少される。スリット光の場合では，多くのシステムでビデオに頼っているため，入力時間がかかっている。この手法は静物体の計測，特に産業界レーザ光計測にはよく使われている。

高分解能の3次元画像を得るために，スポット高投影法やスリット光投影法は多数回の投影が必要とされ，計測時間が長くなった。この問題を解決するために，2進数のようなコー



ド化空間パターンを投影することにより、少数回の投影で高精度の距離画像を入力する方法が提案されている。投影光の計測誤差を減少するためにグレイコードパターン光投影法が提案されている(Inokuchi 90)。

現在、三角測量に基づく3次元計測システムは実用された。阪大とソニーにより製作された $24 \times 24$ 画素のシリコンレンジファインダ、荒木らの $128 \times 128$ 画素のレンジファインダ、ミノルタのVivid-700 ( $200 \times 200$ 画素)など例が挙げる。(Yokoyama 96, Araki 91)

## 7. 濃度傾斜光投影法

前で述べた2値化投影パターン法に対して、強度(もしくはカラー)が連続変化する空間パターンを投影する濃度傾斜光投影法やカラー傾斜光投影法もある。(Carrhill 85)

強度(もしくはカラー)が連続変化する投影光の解析により、物体上のすべての点の計測が可能となり、計測時間も減少されたが、その距離計測精度は画像の強度計測精度により決定され、S/Nの高いカメラを必要とする。さらに表面形状の変化が大きい物体に弱いという欠点がある。

## 8. 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法とは、複数の照明光源を切り換えて写した複数枚の画像から画素の方向を求め、対象物体の傾斜を求める方法である。照度差ステレオ法は、カメラが固定されているので、通常のステレオ画像のような視差が存在せず、対応付けの問題が生じない。

この方法は、あくまで面の傾斜を求める方法なので、絶対的な3次元位置の計測はできない。

## 9. 等高線計測法

二つの光の干渉により生じた干渉パターンの解析により3次元計測は、物体の表面平坦度計測などに応用されている。今世界中で光干渉の研究会やワークショップがある。

一方、モアレ現象を利用する3次元計測は70年代から幅広く研究されている。

等高線計測方法は簡単かつ高速に3次元計測を実現することができ、現在産業、生体、医学など領域で実用されている。しかしこの方法は大きな問題がある。それは等高線は対象物体に相対的な奥行き関係しか表されず、絶対的な奥行き関係を求めることができない。言い換えると、等高線と対象物体との間に一対一の対応関係がない。これにより、等高線の解析

は常に人間の介入が必要とする。この問題について、次の1.2節と第2章で述べる。

## 1.2 3次元画像計測の動向

3次元画像計測手法は多数の提案がなされているが、確実な手法はほとんどない。これが今の3次元計測の実態である。現在3次元画像計測が実用されているが、まだ沢山の研究すべき課題が残っている。

続いて、本研究との関連が深いアクティブステレオ計測方法と等高線計測方法の研究動向について解説したい。

今まで計測できなかったシーンを3次元計測の新理論及び新技術を用いて計測できるようにしようという研究及び計測の高速化・小型化・実用化は3次元画像計測の研究動向となる。特に計測の高速化、動画像の計測などは現在3次元画像計測の話題になった。

計測の高速化は、3次元復元ため必要とする画像を撮るときの高速化と画像処理ときの高速化の両方の意味がある。

必要とする画像をできるだけ短時間で入手するには、一回の投影でできるだけ多い情報量

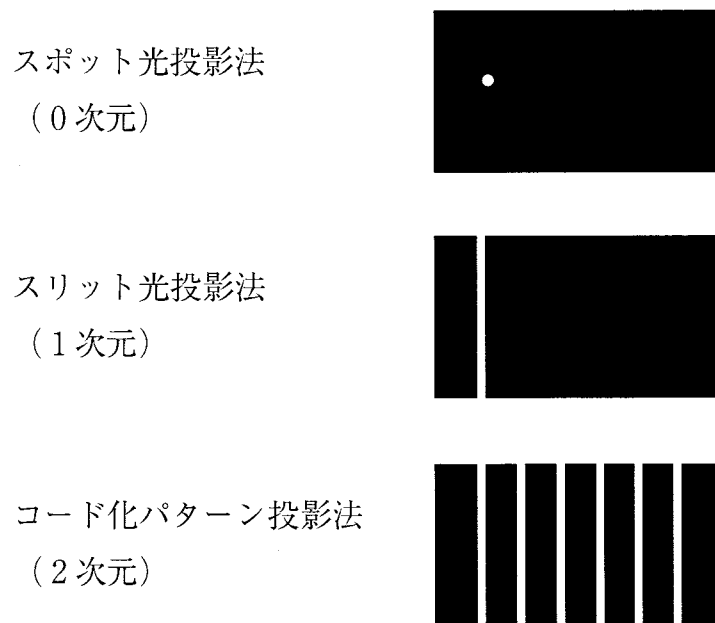


Fig.1-4 3次元画像計測における投影パターン

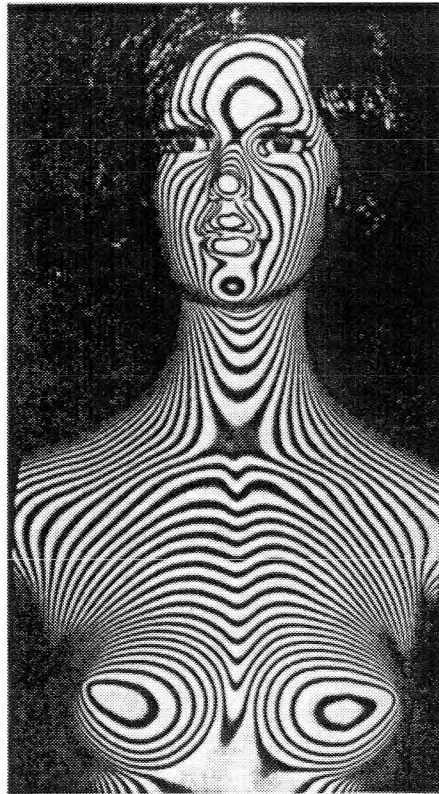


Fig.1-5 モアレパターン (Takasaki 70 により)

変調スリット光投影法  
(3次元)

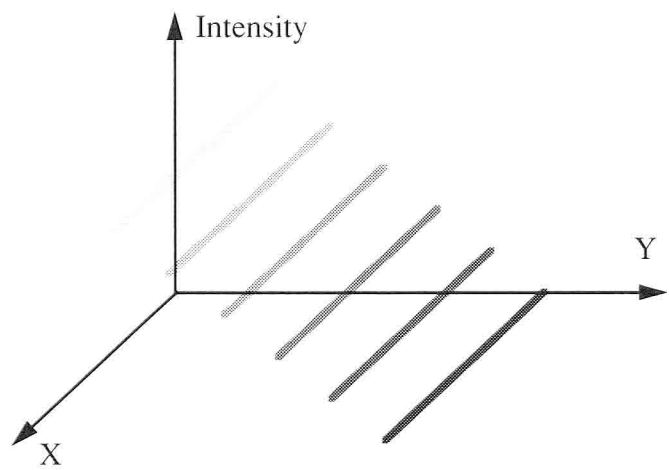
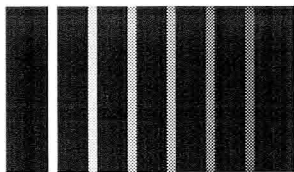


Fig.1-6 強度変調スリット光の空間強度分布

を入手しなければならない。

アクティブステレオ計測法方法におけるスポット光投影法、スリット光投影法、空間パターン光投影法では、一回の投影で得られる情報は点から線を経て面になった。情報量は0次元から、1次元、2次元に増加している。

しかし、空間パターン光投影法にでも、3次元画像を得るために、複数回の投影が必要とされる。これは一回の投影では必要とされる情報量が得られないためである。どのような手法を用いれば、一回の投影での情報量を多く得ることができるかが問題である。これは筆者がよく考えている問題である

一方、高速3次元計測方法として、モアレトポグラフィが挙げられる。Fig.1-5に示したのはモアレパターンで、二本の縞の間の奥行き距離差が4mmである(Takasaki 70)。この一枚のモアレパターンにより、人形の3次元的な様子が分かる。しかし人間の知識を介在しなければ、この人形の胸が凹であるかもしくは凸であるかのような簡単な凹凸判別もできない。これはやはりこのモアレパターンの情報量不足が原因である。

### 1.3 本研究の目的と論文の構成

高速な計測を目指し、汎用な設備を用いて、少数回（1回か2回）の投影により必要とする画像を撮り、3次元計測を実現することが本研究の目的である。

この目的を達成するために、本研究では高速性と簡易性を持っているモアレトポグラフィと空間コード化パターン光投影法に注目している。そして、従来法での画像に含まれる情報量不足の問題を解決するために、著者は投影光の強度を変調する。強度変調投影光の利用により、投影パターンを2次元から3次元に拡張し、画像に含まれる情報量を増加させる。これによりモアレパターンを2次元から3次元に拡張させ、人間が介在せず、モアレパターンの解析から物体の3次元形状を復元することができる。

即ち、Fig.1-6に示したように、従来法の2値化式の計測方法に属するモアレトポグラフィやコード化パターン光投影法に、強度が変化する変調投影光を投入し、画像にもう1次元（強度軸）の情報を追加する。この強度軸と物体の奥行きとの間に一对一の対応関係を持たせる。そうすることで、少数回の投影で、3次元計測を実現することができ、計測の速度を向上させ、自動計測の実現も可能になる。

具体的には、以下の四つのアプローチを行っている。

#### 1. 投影光の強度変調方式の提案

得られた画像の強度が物体の奥行きとの間に一对一の対応関係を持たせるために、投影光の変調方式の決定は本研究に中心となる問題である。

#### 2. 実計測問題の解決法の提案

強度変調投影光を用いる実計測の際、物体の表面反射特性の影響など解決しなければならない

ない問題がある。これらの問題を上手く解決しなければ、提案手法が実用されることは不可能である。

### 3. 計測感度を向上させる手法の提案

モアレによる3次元計測の計測感度を向上させるために、本研究では従来法の強度解析と位相解析を融合する強度・位相解析方法を提案する。

### 4. 変調投影光による3次元計測手法の拡張案を提案

提案手法の拡張として、本研究はカラー変調モアレ及び強度変調空間パターン光投影法を提案する。

本論文は8章より成り立つ。

第2章では、まず本研究のベースとしているモアレトポグラフィの原理を紹介する。続いて、モアレによる3次元計測の特徴と問題点を分析した上で、これらを解決する考え方を提案する。

第3章では、強度変調モアレを提案する。まず強度変調モアレへの発想と計測理論を述べ、続いて、計測システムと計測結果を述べる。最後には、等高線式の計測精度を論じる。本章では、本研究の中心としている投影光の強度変調方式を提案する。

第4章では、強度変調モアレによる3次元計測手法を実用する際に生じる諸問題の解決方法を提案する。具体的には、カメラの計測レンジの拡張、物体の表面反射特性が計測精度に対する影響及び解決案を論じる。

第5章では、モアレによる3次元計測の計測感度を向上する手法を提案する。これは強度・位相解析手法である。この手法の利用により、物体のすべての点が計測できるようになり、計測感度を大幅に向上することができる。

第6章では、強度変調モアレ手法の拡張として、カラー変調モアレを提案する。RGB3チャンネルの投影プロジェクタとCCDカメラを利用するにより、一枚のカラー画像を用いてカラー変調モアレを生成することができる。

第7章では、強度変調投影光法のもう一つの利用案として、強度変調空間パターン光投影法と変形格子像の直接解析方法を提案する。直接解析方法とは、変形格子像をモアレパターンに変調せず、直接解析することで、物体の3次元復元を行う手法である。

第8章では、結論として、変調投影光による3次元画像計測に関する本研究の結果を総括し、そして今後の課題について言及する。

## 第2章 従来式のモアレトポグラフィ

モアレトポグラフィは一枚の写真で物体の全面的な様子を把握できるという特徴があり、生体、産業等沢山の分野で実用化されている。しかし従来型のモアレトポグラフィはモアレ縞の次数を自動的に決定できないので、モアレ縞と物体の奥行きとの一対一の対応関係がなく、縞解析の自動化が困難である。本章では、モアレトポグラフィによる3次元計測の原理を簡単に振り返り、従来型のモアレトポグラフィの問題点と解決ルートを述べる。

### 2.1 基本原理

#### 2.1.1 モアレ現象とその応用

Fig.2-1に示したように、二枚の類似したパターンを重ね合わせる時に、元のパターンの周波数よりも小さい空間周波数のパターンを生じることがある。また、テレビの画面で、登場人物の衣装の模様が細かいとき、大きなピッチの繰り返しパターンが生じるのをよく見かけ

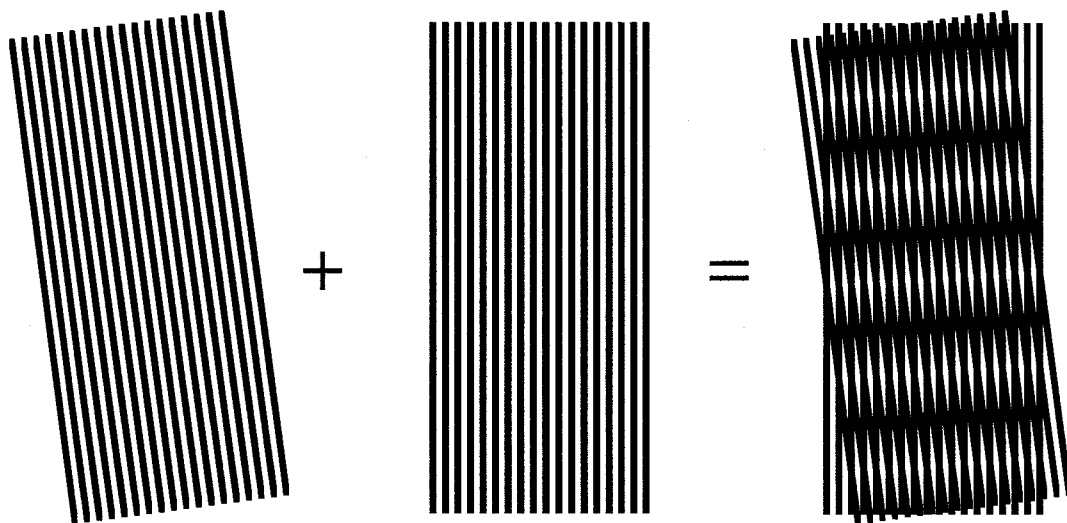


Fig.2-1 モアレ現象

る。これはモアレ現象と呼ばれ、古くから多くの人々に注不利目された。（Inokuchi 90, Yosizawa 91, 93）

場合によって、モアレ現象は有利な面もあるし、不利な面もある。不利な面では、テレビ画面の画質を悪くするなどがある。有利な面では、この現象を利用した変形，歪み，更に3次元計測ができる。

モアレ現象は古くから応用されてきたが，科学的な計測手段として盛んに利用されたのは1950年代に至ってからで，これは変位測定である（Yosizawa 91）。直線状の格子2枚を mismatch させて重ね合わせ，その一方を移動させる。そのとき次々と生じるモアレ縞を検出すれば，相対的変位量の検出が可能となる（Simitu 66）。

1970年高崎やD.M.Meadowsらによって3次元形状計測への応用が提案され，モアレトポグラフィ（Moiretopography）と言う3次元計測方法が誕生した（Meadows 70, Takasaki 70）。モアレトポグラフィは非接触で短時間に物体の3次元形状を計測できるので，生体関連分野及び産業分野で幅広く応用され，製品化された。例えば，整形外科における側彎症検診に代表される医学的な応用，口腔内及び顔貌に関する歯学での応用，車の外形計測，ガラスの平坦度計測，ICパッケージの熱変形の計測などの産業界での応用など実用例を挙げられた。

### 2.1.2 モアレトポグラフィ

モアレトポグラフィは実体格子法（Shadow Moire）と投影格子法（Projection Moire）に大

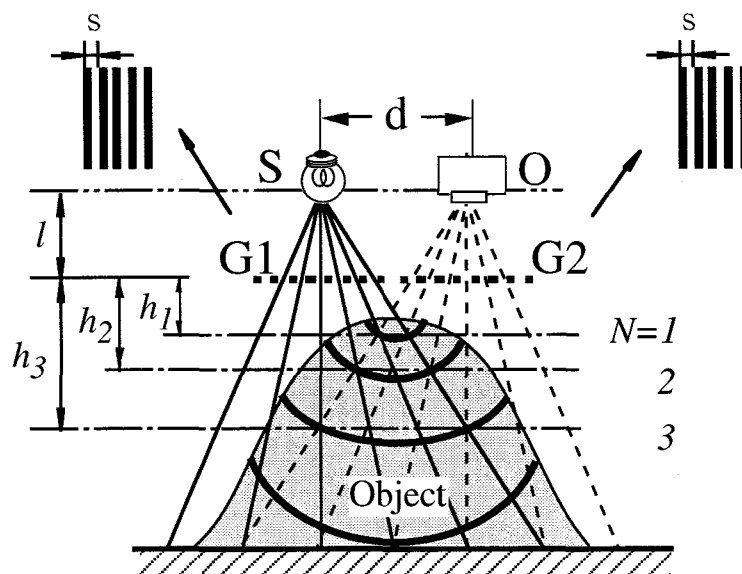


Fig.2-2 モアレトポグラフィ計測模様図

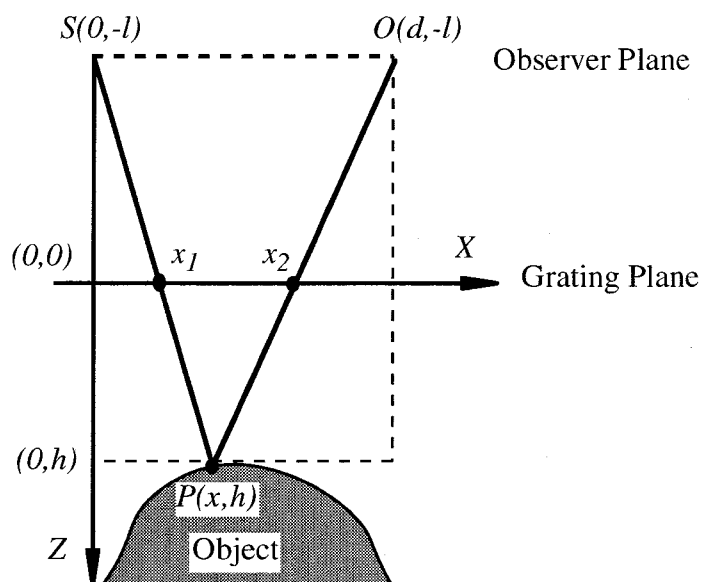


Fig.2-3 座標関係

別されるが、論述の簡単化のため、ここで実体格子法を例として述べる。

Fig.2-2 はモアレによる3次元計測の様相図で、Fig.2-3は計測システムの座標関係である。点光源  $S(0, l)$  からの投影光  $I_s(x, y)$  は投影格子  $G_l$  を経て、物体の表面  $P(x, y)$  に当たり、強度が  $I_p(x, y)$  となる。

投影格子  $G_l$  の透過率を  $T_s$  とすると、

$$T_s(x_1) = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) \quad (2-1)$$

$$I_p(x, y) = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) I_s(x_1) \quad (2-2)$$

但し、

$T_s(x_1)$  : 投影格子上の点  $x_1$  処の透過率、

$x_1$  : 投影格子での注目点の座標、

$s$  : 投影格子のピッチ、

$I_s(x_1)$  : 投影格子上の点  $x_1$  処に到達する投影光の強度、

$I_p(x, y)$  : 点  $x_1$  を経て注目点  $P(x, y)$  に到着する光の強度。

投影光の照射により、物体の表面に変形格子像  $I_p(x, y)$  を生じてる。点  $P(x, y)$  上の変形格子像強度は、



$$I_D(x, y) = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) I_S(x_1) O(x, y) \quad (2-3)$$

となる。但し、 $O(x, y)$ は物体の表面反射特性により決定される関数である。

観測格子 $G_2$ の透過率を $T_O$ とする。観測点 $O(d, l)$ で、観測格子を経て変形格子像を観測すると、像 $I_O(x_2)$ が得られる。

$$T_O(x_2) = \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s} \right) \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} I_O(x_2) &= I_D(x, y) \cdot T_O(x_2) \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) I_S(x_1) O(x, y) \cdot \frac{1}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s} \right) \\ &= \frac{1}{4} \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s} \right) \left( 1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s} \right) I_S(x_1) O(x, y) \end{aligned} \quad (2-5)$$

座標 $x, x_1, x_2$ の間には次の関係を持っている。

$$x_1 = \frac{lx}{h+l} \quad (2-6)$$

$$x_2 = \frac{dh+lx}{h+l} \quad (2-7)$$

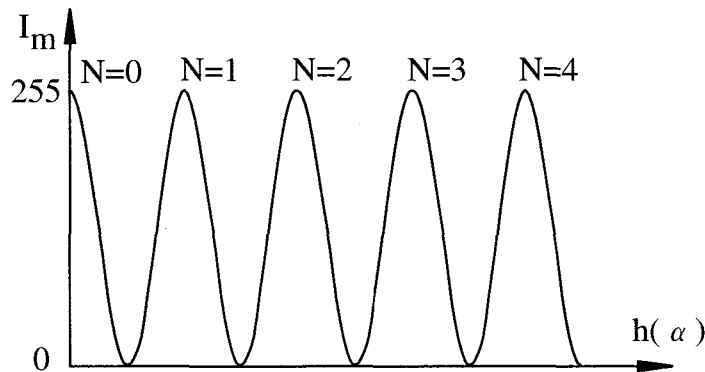


Fig.2-4 従来式マアレパータンの強度分布

式(2-6)と式(2-7)を式(2-5)に代入し、そして光源強度が均一（即ち $I_S(x_1)=1$ ）と物体が拡散反射表面（ $O(x,y)=1$ ）とすると、式(2-5)から式(2-8)が得られる。

$$I_O(x_2) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \sin \left[ \frac{2\pi l x}{s(h+l)} \right] + \frac{1}{4} \sin \left[ \frac{2\pi}{s} \left( \frac{dh+lx}{h+l} - \varepsilon \right) \right] - \frac{1}{8} \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{2lx+dx-\varepsilon(h+l)}{h+l} \right] + \frac{1}{8} \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{dh-\varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (2-8)$$

上式の第5項は低周波成分で、つまりモアレ成分である。この低周波成分を抽出すると、モアレパターンが得られる。

$$I_M(h) = A_M \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{dh-\varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (2-9)$$

式(2-8)から分かるように、モアレパターンの強度 $I_M$ は物体の $(x,y)$ 座標と投影格子の座標 $x_1$ 及び観測格子の座標 $x_2$ と関係なく、ただ物体の奥行き距離値 $h$ より決まる。言い替えると、モアレパターンより、物体の等高線分布を得られる。これはモアレパターンにより3次元計測の基本原理である。

モアレパターンの周波数を $2\pi N - \alpha_0$ とすると、式(2-9)から次式を得られる。

$$\frac{2\pi}{s} \frac{dh-\varepsilon(h+l)}{h+l} = 2\pi N - \alpha_0 \quad (2-10)$$

$$I_M(h) = A_M \cos(2\pi N - \alpha_0) \quad (2-11)$$

ただし、 $N$ はモアレ縞の次数、 $\alpha_0$ はモアレパターンの初期位相値と呼ばれる。Fig. 2-4はモアレパターンの強度分布を示した。

特定次数 $N$ 番のモアレ縞の奥行き距離値 $h_N$ を式(2-9)から求めると、

$$h_N = \frac{slN}{d-sN} \quad (2-12)$$

となる。通常、 $d \gg sN$ 。これにより、

$$h_N = \frac{sl}{d} N = kN \quad (2-13)$$

が得られる。ある特定次数のモアレ縞は格子面から一定の深さ、即ち等高線縞となる。Fig. 2-5はモアレパターンであり、もし各縞の次数が分かれば、Fig. 2-6のような3次元復元ができる。

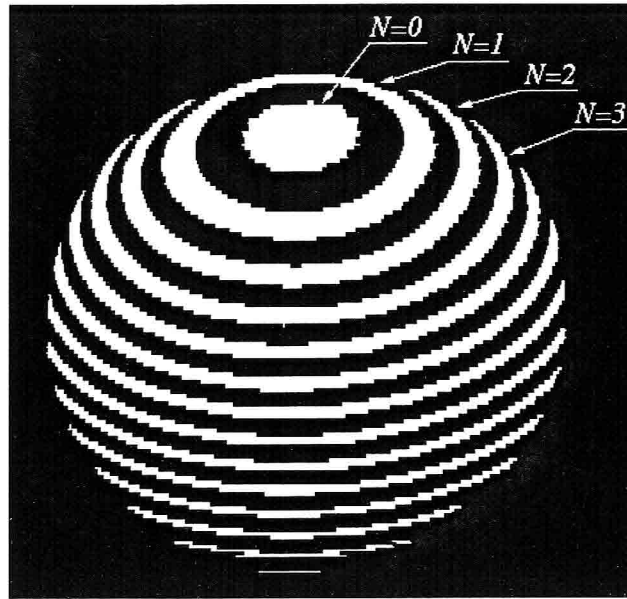


Fig. 2-5 モアレパターン

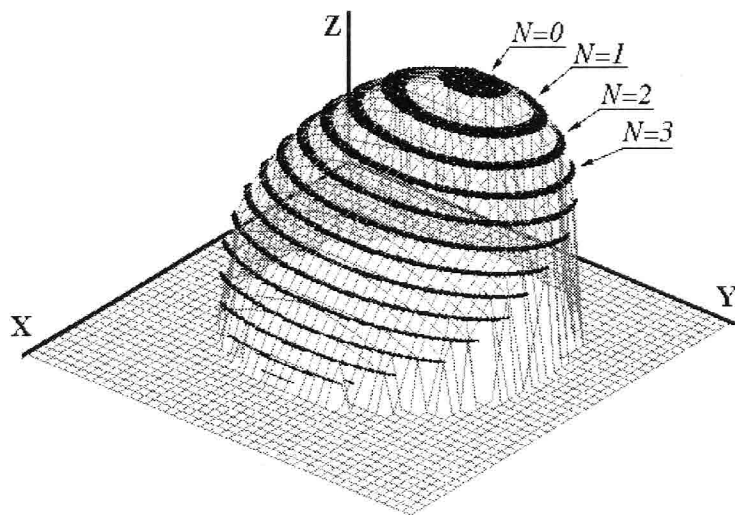


Fig. 2-6 Fig. 2-5 のモアレパターンの3次元復原

## 2.2 特徴と問題点

前小節の論述から分かるように、モアレによる3次元計測は次の特徴を持っている。

(1) 非接触計測である。

(2) 一枚の画像から物体の3次元形状を計測できるので、快速性、簡単性と実用性を持っている。動物体の計測や移動シーンの計測もできる。

(3) レーザでなく普通の照明光でも計測できるので、人体計測など分野で、レーザやレントゲンの代わりに、無公害計測が実現できる。

(4) 計測システムの設定により計測レンジと計測範囲及び計測感度は簡単に変わる。

今までのモアレ3次元計測の研究は三世代に大別できる。第一世代はD.M.Meadowsら(Meadows 70)と高崎氏(Takasaki 70)の研究に始まる1980年代前半までの研究であろう(Moire 84, 86)。この段階の研究の特徴は写真撮影によりモアレパターンを得る手法の開発と対話的解析によりモアレ縞を解析するプロセスであった。

これらの研究結果は既に実用化されているが、依然として次の問題点が残っている。(Yoshizawa 90, 96)

(1) 物体の表面形状の凹凸判別が難しい。

Fig.2-6には、Fig.2-5からボール状の物体を復元した。これは「縞の次数が分かる」と言う前提条件が必要とする。実際には、Fig.2-5の様なモアレパターンだけを解析すれば、モアレ縞の次数が分からない。即ち、一枚のモアレパターンから、少なくともFig.2-7に示したように二種類の3次元復元ができる。これはいわゆる凹凸判別問題である。

(2) 等高線方式の計測感度が低い。

従来式のモアレによる3次元計測は等高線部分だけ利用できるが、等高線間の部分が計測できず、計測感度が低い。

(3) モアレ縞の次数の自動決定ができず、縞解析の自動化が困難である。

従来式のモアレによる3次元計測は、縞の次数を決定するために、人間の介在もしくは色々な仮説条件が必要とされ、計測の自動化は困難である。

従来式のモアレトポグラフィには、ただ二つのモアレ縞の間の奥行き距離値の差しか分からない。

$$\Delta h = |h_{N+1} - h_N| = |k(N+1) - kN| = k \quad (2-14)$$

これら問題を打開する研究が、マシンビジョン技術の発展に伴って、各方面で試みられてきた。この中心は電子走査モアレとコンピュータ縞解析であり、コンピュータビジョンの新しい方法として、モアレ3次元計測に関する研究が活発になってきた。これが第二世代であ

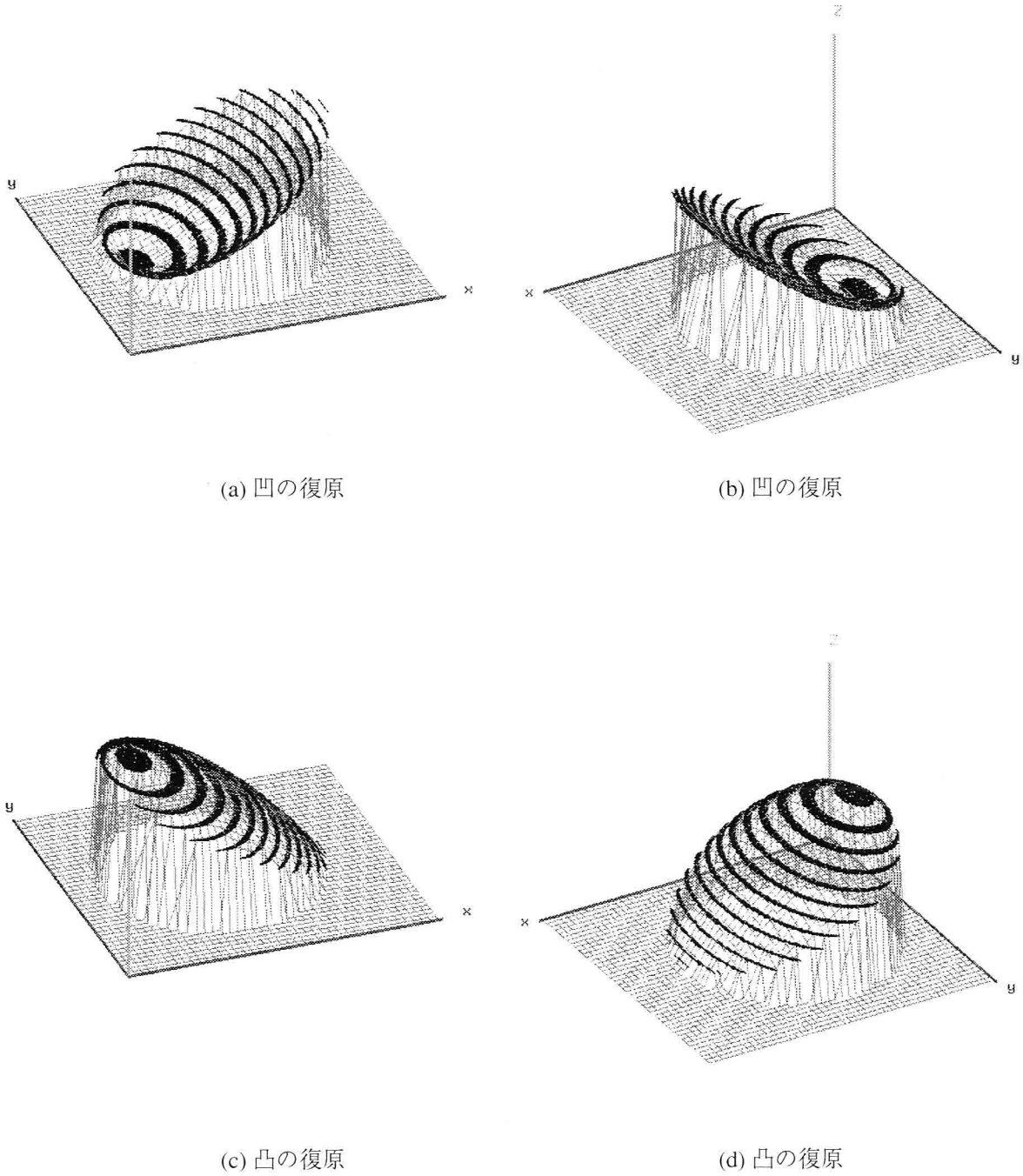


Fig.2-7 Fig.2-5の一枚モアレパターンからの二種類の3次元復原

る。

計測感度の低い問題を解決するために、D.Postらはレーザ干渉法を提案し、等高線方式で2400 line/mmの高感度を達成し、ICパッケージの熱変形の計測も実現した(Post 94)。一方、吉澤らは位相解析方法を導入し、計測感度は既に $\mu m$ 程度になっており、ガラス基板の平坦度の計測もできた(Yoshizawa 91, Fujihara 95)。これで、モアレ計測の精度が低いという問題が解決されていると言える。

凹凸判別問題も近年盛んに研究されている位相シフト等の手法の導入により解決されている(Haibo 94, Mauvoision 94)。位相シフトモアレ法は、位相の異なる複数枚のモアレパターンを用いて、位相シフト時のモアレ縞の強度あるいは色の分布の変化により、凹凸判別を可能にするもので、また第一世代の等高線だけ使う方法に対して、モアレパターンのすべての部分の情報を利用できるので、計測精度も高い。

一般的な位相シフト方法は三枚の位相が異なる変形格子像が必要とするが、加藤らは電子位相シフトモアレ方法を提案し、一枚の変形格子像により、位相シフトを実現した(Kato 91)。

しかし、モアレパターンは周期関数で、沢山の異なる周期にある点は同じ強度値を持っているので、異なる周期にある位相の確定が困難である。これで、位相解析は一つ周期内で行うのは多い(Fujihara 95)。これは位相解析方法の問題点である。この問題の解決としては、芝田らは実時間縞解析方法を提案した(Sibata 96)。これは従来法のモアレパターンに時間軸を増やし、複数枚の連続変化する時間列画像によりモアレ縞の位相変化を決定し、更に位相値を算出する方法である。この方法は複数枚の画像が必要であるという問題点がある。

一方、今までの方法はモアレ縞の次数の自動決定問題を解決できなかった。これにより、モアレパターンから一意的に奥行きを決定することができず、モアレパターンの解析には人間の介入を必要とした。これはモアレ3次元計測の応用、特に計測の自動化を阻む大きな問題点と考えられる。

モアレ縞の次数が決定できない基本原因は、各次数のモアレ縞が同じ強度分布を持っていることである。即ち、モアレ縞に含んでいる情報量が少ないことである。

もしモアレ縞にもっと多く情報を待たせれば、これらの情報により縞の次数判定が可能になると考えられる。

このような考えに基づいて、筆者は従来法の強度変調投影光を用いるモアレ3次元計測方法を提案する。これは投影光を変調し、もっと多い情報を投影光に加えた後物体に照射する。これにより、取った画像にも普段より多い情報量即ち付加情報を持っている。これらの付加情報の解析により、モアレ縞の次数を決定するということである。

実は、モアレ縞の次数自動決定問題やモアレ3次元計測の自動化問題に関する研究は今後のモアレに関する研究の課題となる。これらの研究は第三世代とも言える。日本では、カラーモアレなどの研究が挙げられる(Nakajima 97, 98, Lu 98.5)。

## 第3章 強度変調モアレ

本章では、モアレ縞の次数の自動決定問題を解決するために提案する強度変調モアレの基本原理と計測システムの構成及びを述べる。まず強度変調投影光を使って、強度が変調された変形格子像を生じる。次に、透過率が変調された観測格子を使って撮影し、縞の強度が物体の奥行きと対応関係を持っている強度変調モアレパターンを生成する。強度変調モアレパターンの縞強度解析により、縞の次数を決定する。

### 3.1 基本原理

モアレトポグラフィの特徴は、式(2-10)の中で対象物体の $X$ と $Y$ 方向の座標値を含まず、 $Z$ 座標 $h$ のみを含む点である。言い換えると、モアレパターンの位相は物体の奥行きだけで決定される。すなわち、モアレ縞の次数は物体の奥行き情報を含めている。これによって3次元計測が可能となる。しかし、式(2-10)中の縞の次数 $N$ が決定されなければ、基準面から計測点までの奥行き $h_N$ が算出できない。実は、式(2-10)とFig.2-4から分かるように、従来法のモアレパターンは、異なる次数のモアレ縞は同じ強度分布を持っている。これはモアレ縞の強度値から縞の次数を決定できない根本的な原因となる。

もし、モアレ縞の強度もその位相のように、 $Z$ 座標 $h$ の関数として変化すれば、すなわち、

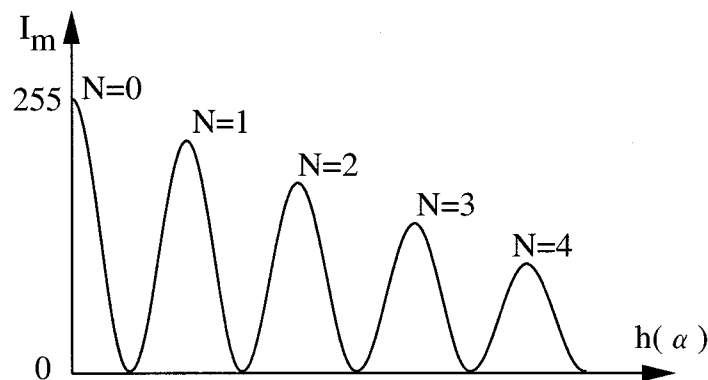


Fig. 3-1 強度変調モアレパターンの強度分布

Fig.3-1のような分布を持っていれば、縞の明暗により、縞の次数が分かる。このような考え方に基づいて、強度変調モアレトポグラフィを提案する。

問題はどのような投影光を用いて、Fig.3-1に示したように物体の奥行き座標 $h$ に伴って変化するモアレ縞を生じさせるかという点である。強度変化のモアレ縞を発生するために、まず強度変化する変形格子像を発生させなければならないと考えられる。

ここで、まず投影光に強度変調関数を加える方法を考える。

関数 $f_1(x_1)$ で投影光を変調すると、式(2-1)は式(3-1)になる。

$$T_S(x_1) = \frac{f_1(x_1)}{2} (1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}) \quad (3-1)$$

そうすると、物体の表面に照射する投影光の強度分布は

$$I_P(x, y) = \frac{f_1(x_1)}{2} (1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}) I_S(x_1) \quad (3-2)$$

となる。変形格子像の強度分布は式(3-3)になる。

$$I_D(x, y) = \frac{f_1(x_1)}{2} (1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}) I_S(x_1) O(x, y) \quad (3-3)$$

さらに関数 $f_2(x_2)$ で観測格子を変調する。式(2-4)は式(3-4)になる。

$$T_O(x_2) = \frac{f_2(x_2)}{2} (1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s}) \quad (3-4)$$

そうすると、モアレ成分は式(3-5)になる。

$$I_M(h) = \frac{f_1(x_1)f_2(x_2)}{8} \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (3-5)$$

モアレパターンの振幅を $A_m$ とすると、

$$I_M(h) = A_M \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \right] \quad (3-6)$$

ただし、

$$A_M = f_1(x_1)f_2(x_2) = f(h, l, s, x_1, x_2, \varepsilon) \quad (3-7)$$

ここでの目的は上式の中から変数 $x_1$ と $x_2$ を消し、 $A_m$ をZ座標 $h$ と計測システムのパラメータの関数で表現することである。すなわち、

$$A_M = f_1(x_1)f_2(x_2) = f(h, l, s, \varepsilon) \quad (3-8)$$

これは強度変調モアレの基本方程式である。 $f_1(x_1)$ と $f_2(x_2)$ の選択によっていろいろな方法を





構成することができる。

ここでは式(3-9)と(3-10)に示す指数関数での変調方法を提案する。

$$f_1(x_1) = a^{k_1+x_1} \quad (3-9)$$

$$f_2(x_2) = a^{k_2-x_2} \quad (3-10)$$

ここで、 $a$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ は計測システムのパラメータにより決定される定数である。

この場合、投影格子と観測格子はそれぞれ

$$T_S(x_1) = \frac{a^{k_1+x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) \quad (3-11)$$

$$T_O(x_2) = \frac{a^{k_2-x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s}\right) \quad (3-12)$$

となる。

式(3-9)、式(3-10)を式(3-8)に代入し、また  $\varepsilon=0$  とおくと、式(3-8)は式(3-13)になる。

$$A_M = \frac{1}{8} a^{k_1+x_1} a^{k_2-x_2} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{x_1-x_2} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{\frac{dh}{h+l}} = ka^{-sN} \quad (3-13)$$

ただし、 $k$ は計測システムのパラメータにより決定する定数である。このとき、モアレパターンは式(3-14)になる。

$$I_M = ka^{-sN} \cos \left[ \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \right] = ka^{-sN} \cos(2\pi N) \quad (3-14)$$

すなわち、 $N$ 番目のモアレ縞の強度は縞の次数 $N$ のみに依存する。したがって、モアレ縞の強度によって直接その次数を求めることができる。

Fig.3-2はその計測原理の模式図である。投影光を表す線の濃淡はその投影光の強度を意味し、観測視線を表す線の濃淡は観測格子の透過率を意味する。投影線と観測線の交点でモアレ縞を形成する。この交点上の二つの線の濃淡の和がモアレ縞の強度を表す。Fig.3-2に示したように、縞の番号が0から5まで変化するとき、その縞の強度は次第に小さくなる。

### 3.2 計測システムと計測結果

強度変調モアレトポグラフィを実現するために、Fig.3-3に示した実験システムを構築した。式(3-1)に示した投影光パターンは液晶プロジェクタで実現し、投影光の空間強度変化関数 $f_j(x_j)$ は液晶の回転角のコントロールにより実現する。観測格子とその透過率の変調は、ともに画像処理の際にソフトウェアで実現する。CCDカメラは512×512 pixel, 8-bitの白黒画像

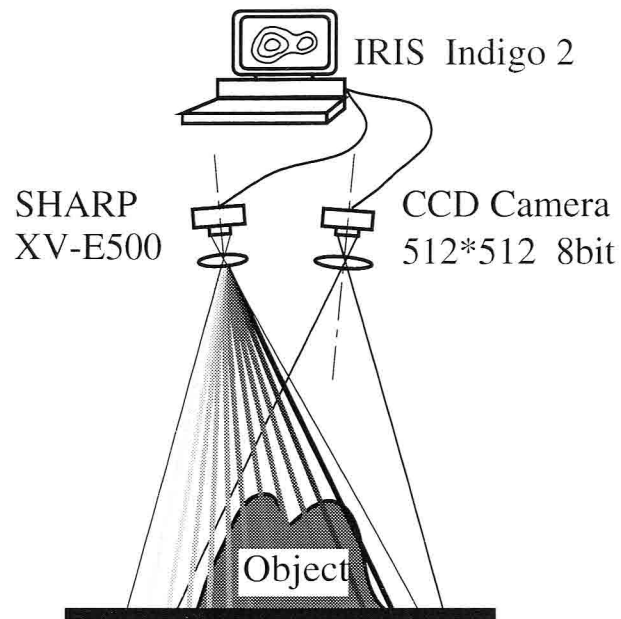


Fig.3-3 強度変調モアレの計測システム

で変形格子像を撮影する。ここで用いた液晶プロジェクターはSHARP社のXV-E500で、コンピュータはSilicon Graphics社のIRIS Indigo 2である。

Fig.3-4 は計測の流れである。点線枠内部の操作はコンピュータで行うことである。

Fig.3-5は強度変調モアレの計測結果を示した。(a)は原画像で、対象物体は白色の石膏球で、半径が12cmである。(b)は変形格子像で、上から下に縞の強度は次第に強くなった。(c)は強度変調モアレ画像である。カメラからの距離が遠くなるにしたがって、縞が次第に黒くなる。(d)は(c)の縞の間を補間し、3次元表示したものである。(e)は(c)の画像座標 $x=255$ の断面の縞の強度変化である。ここでの強度値は奥行き値と対応する。(f)は従来法のモアレトポグラフィーで、各縞の強度は同じである。この画像からは、計測された物体の表面形状の凹凸判別ができない。

上記の計測結果より、モアレパターンから物体の奥行きを一意的に決定することができ、物体の表面形状の凹凸判別や縞の不規則変化部分あるいは離れた多物体の間の奥行き関係の決定も実現できる。

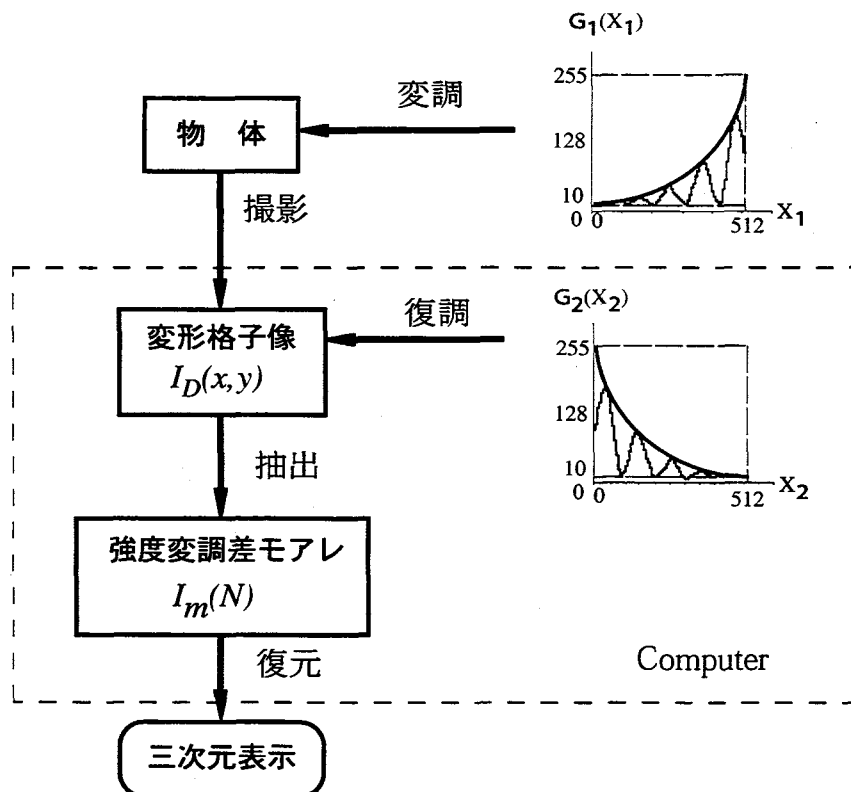
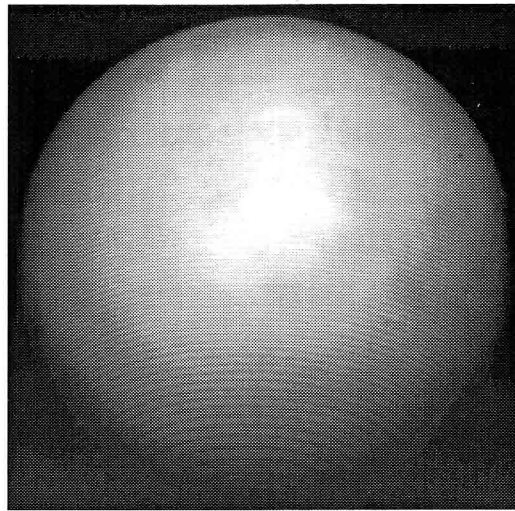
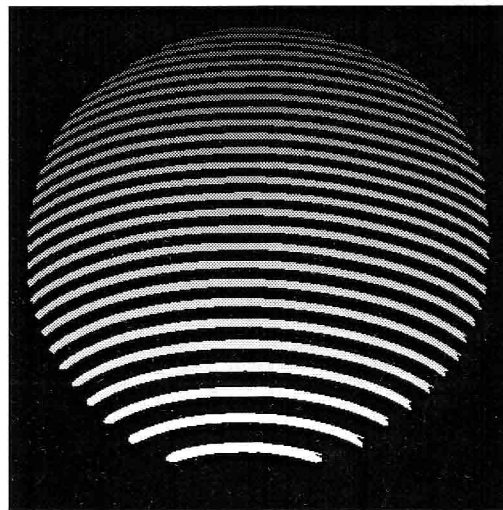


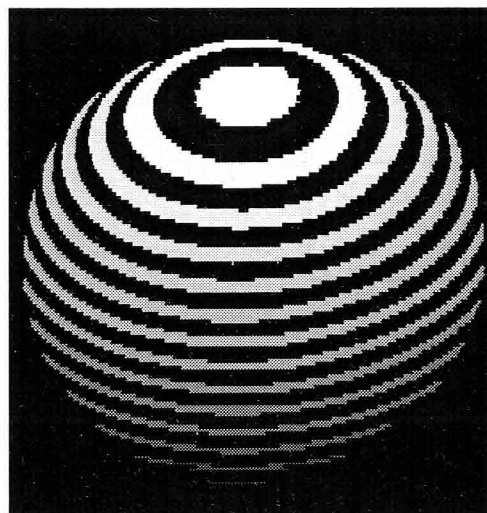
Fig.3-4 強度変調モアレの計測流れ



(a) ray image

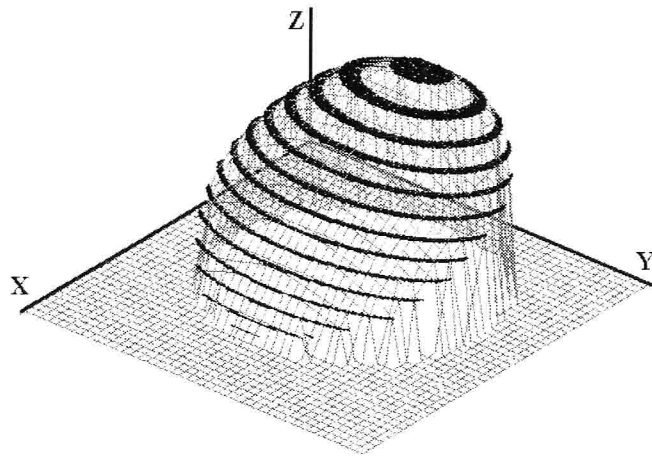


(b) deformed grating pattern

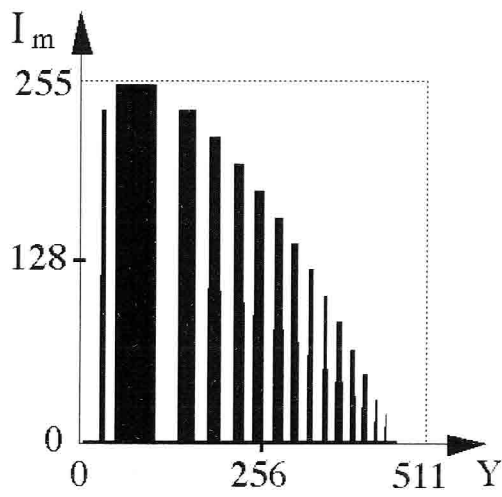


(c) intensity modulated moiré pattern

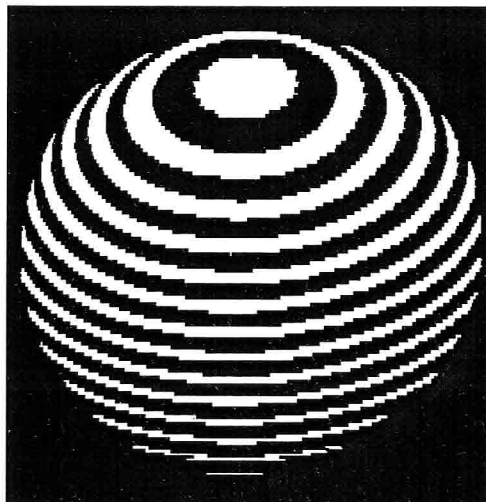
Fig.3-5 等高線方式を用いて石膏球の計測結果 (その1)



(d) 3-D representation



(e) cross section of c when  $x=255$



(f) classical moire

Fig.3-5 等高線方式を用いて石膏球の計測結果 (その2)

### 3.3 計測精度分析

強度変調モアレの計測精度は強度変調モアレ縞の次数 $N$ の計測精度に大きく依存する。 $N$ の計測精度は、投影光の強度精度と変形格子像の検出精度に分類される。

理論上の変調投影光強度と実際の投影光強度の間には誤差が存在するが、あらかじめキャリブレーションをすることによって、この誤差は $\pm 1\text{bit}$ であり、計測精度に大きな影響を及ぼさないようにできる。

その結果、 $N$ の計測精度は主に変形格子像の強度の検出精度より決定される。

画像入力装置のデジタル入力範囲を $\text{min} \sim \text{max}$ とし、ノイズのレベル即ち変形格子像の強度誤差を $\pm \delta$ とし、区別可能な変形格子の本数を $H$ とすると、

$$H = \frac{\text{max} - \text{min}}{\delta} \quad (3-15)$$

モアレ縞の本数と変形格子の本数の比率を $\lambda$ とすると、検出できる強度変化のモアレ縞の本数 $H_m$ は

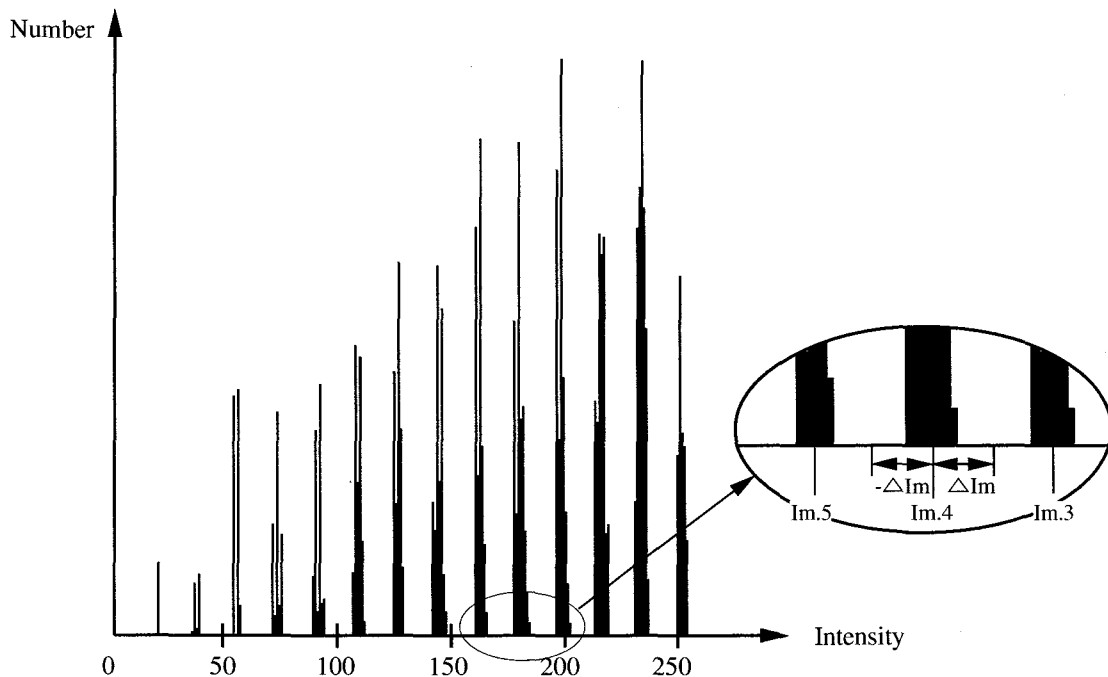


Fig.3-6 Histogram of intensity modulated moire of Fig.3-5(c)

$$H_m = \lambda H = \frac{\lambda(\max - \min)}{2\delta} \quad (3-16)$$

となり、距離計測の分解能 $e$ は

$$e = \frac{1}{H_m} = \frac{2\delta}{\lambda(\max - \min)} \quad (3-17)$$

となる。

$\lambda$ はシステムの構成により変化するが、一般性を失わない範囲で、簡単に $h \approx 5d$ ,  $l \ll h$ ,  $\epsilon \ll h$ とすると、式(2-1)と式(2-8)により、変形格子像の周期とモアレパターンの周期を比べ、

$$\lambda \approx 0.25 \quad (3-18)$$

と設定することができる。この仮定のもとで分解能 $e$ は、 $\delta=3$ とすると、8-bitの画像入力装置を使う場合には、

$$e_8 = \frac{2 \times 3}{0.25 \times 255} \approx 9.4\% \quad (3-19)$$

10bitの画像入力装置を使う場合には、

$$e_{10} = \frac{2 \times 3}{0.25 \times 1023} \approx 2.3\% \quad (3-20)$$

となる。

言い換えると、式(3-14)で示す変形格子像のノイズレベルが $\pm \delta$ 以内に含まれる場合で、 $H_m$ 本のモアレ縞を検出できる。このとき、モアレ縞の強度値の計測誤差分布は $\pm \frac{\delta}{\lambda}$ 以内におさまり、奥行き距離計測誤差は $\pm \frac{1}{H_m}$ 以内となる。

理論的には、変形格子像のノイズレベルが $\pm \delta$ より大きく、すなわち奥行き距離分解能が $\frac{1}{H_m}$ より小さい場合には、 $N$ の決定を誤る可能性がある。しかし実際に、 $N$ はモアレパターンの個別の点の強度値より決定されるのではなく、同じラベルを持つ全ての点の集合として決定される。

Fig.3-6にはFig.3-5に示した強度変調モアレ画像のヒストグラムを示す。 $H_m=14$ で、 $I_m$ の計測誤差の絶対値 $|\Delta I_m|$ が式(3-21)を満足すれば、正しい縞次数 $N$ が計算できる。

$$|\Delta I_m| < \frac{255}{2 \times 14} \approx 9.143 \quad (3-21)$$

一方、本計測システムでは、 $N$ に対するノイズの影響は、式(3-14)から分かるように、対数



圧縮を受けるため、 $I_m$ に対する影響より小さくなる。また、 $N$ の計算においては、適当な $K_0$ と $K_1$ の選択により、 $I_m$ の絶対値を必要としない。

式(3-19)による、8-bitの画像システムを用いるとき、計測誤差は9.4%とする。実際には、画像の画素値0の近く領域はCCDの感度が低く、また暗電流によりS/Nが悪いので、データとして採用しない。また、画素値255の近く領域はCCDの飽和領域に近く、感度の非線形が強いため、使用できない。これらを考慮すると、最大計測誤差は10%程度と考えることができる。

モアレ計測の感度を向上するために二つの方法が考えられる。一つはモアレ縞の数を増やし、できるだけ数多くのモアレパターンを得ること。もう一つはモアレ縞の間の部分も計測することである。

前者を実現するために、S/Nの高い画像入力装置を用いる。式(3-17)による、10-bitの画像システムを用いるとき、奥行き計測誤差は3%以下になる可能性がある。しかし、計測コストが上がるだけでなく、等高線計測方式自身の制限により、等高線の間の部分は依然として計測できない。また、計測感度は投影光の空間分解能に依存し、本研究で使っている640×480ピクセル分解能の投影プロジェクタで、高感度の計測は困難である。これについて、第7章7.1節で述べる。

普通の8-bitの画像入力装置を用いて、計測精度を向上するために、我々は強度・位相解析方式を提案する。これについて、第5章で述べる。

### 3.4 考察

本章では、強度変調モアレによる3次元計測の原理と計測システム構成及び計測結果を述べた。提案した強度変調モアレは、従来法のモアレパターンにもう1次元——強度軸を追加し、モアレパターンの各縞の強度が物体の奥行きと一対一の対応関係を持たせる。これにより、従来法モアレトポグラフィの致命的な問題——縞次数が決定できない問題を簡単に解決した。

強度変調モアレパターンを生成するために、指数関数で投影格子の透過率と観測格子の透過率を変調する手法を提案した。この変調手法は強度変調モアレのキーポイントである。

本章の最後部分では、等高線式の強度変調モアレによる3次元計測の計測精度を分析した。強度変調モアレはモアレ縞の強度差を計測しなければならないので、3次元計測の感度があまり高くない。本論分の第5章と第7章7.1節では、計測感度を向上する手法を提案する。

## 第4章 実計測に向けての問題解決

強度変調モアレの原理を使って3次元計測の際、幾つか解決しなければならない問題がある。それは主にカメラの計測レンジの問題、計測物体の表面反射特性が計測に対する影響などの問題がある。本章では、この二つの問題の解決案を述べる。

### 4.1 計測レンジの拡張

強度変調モアレは空間強度が指数変化する投影光を必要とする。実際の計測の場合、もし直接に式(2-1)のような指数的に強度変化する投影格子を用いれば、 $x_I$ の値が大きい場合(511に近いところ)、投影光の強度の変化は非常に大きく、また $x_I$ の値が小さい場合(0に近いところ)、この変化は非常にわずかである。

Fig.4-1はこの現象を示した。 $\delta x_a = \delta x_b$ が、 $\delta T_{Sa} \gg \delta T_{Sb}$ になった。これにより、8-bit精度の画像入力装置では必要なダイナミックレンジを確保できない。

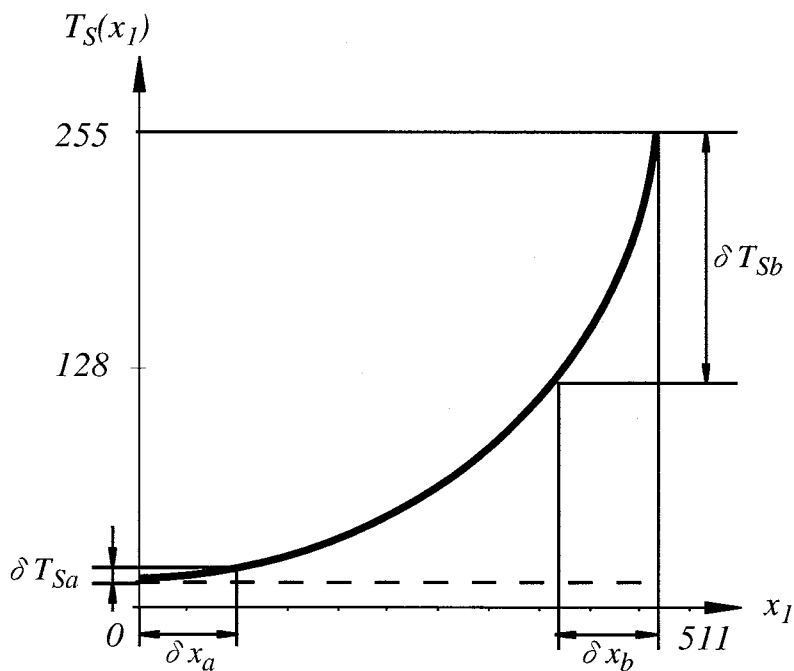


Fig.4-1 計測レンジ問題

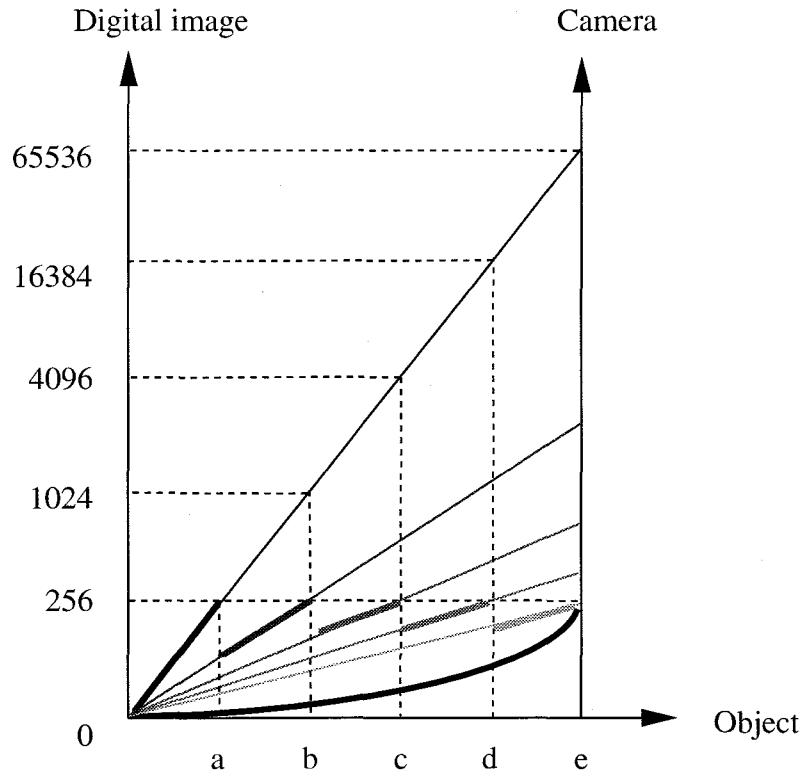


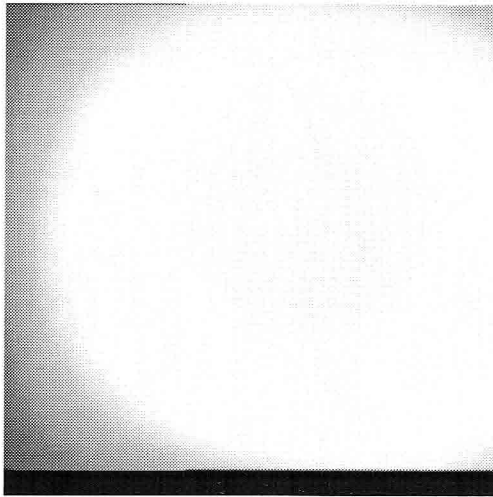
Fig.4-2 計測レンジの拡張

この問題を解決するために、複数枚画像を用いた合成方法は使えるが、本研究は指数関数の代わりに線形関数透過率変化の投影格子を使う方法つまり指数-線形変換方法を提案する。

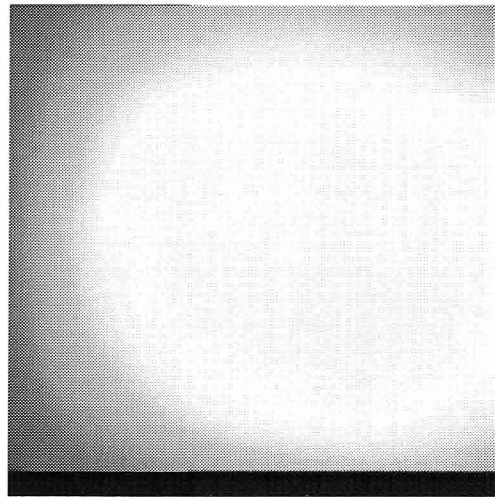
#### 4.1.1 複数枚画像により合成

カメラの計測レンジの問題を解決するために、真鍋氏は8ビットのカメラを用い、複数枚の画像を撮り、一枚の高精度画像を合成する方法を提案した。Fig.4-2はこの手法の様態を示した。8ビットのカメラ画像5枚で16ビットの画像を合成した。まずカメラの絞りを開放にして、画像1を撮る。画像1は物体の表面強度の0~aの部分を手早く撮れたが、a~eの部分が明るすぎて、上手く撮れなかった。続いて、絞りを絞って、画像2を撮る。今回は物体のa~bの部分が上手く撮れた。同じ操作で、5枚の画像により、物体の0~a, a~b, b~c, c~d, d~e, e~f各部分は全部撮ることができる。この5枚の画像を合成することによって、一枚の16ビットの高精度画像が得られる。

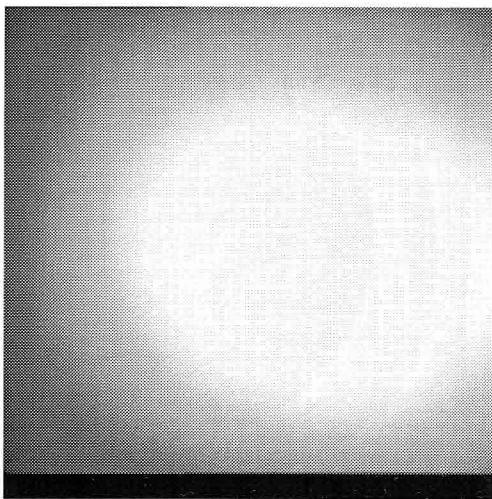
それにより、8ビットのカメラで複数回の撮影により、必要な分解能の画像が得られた。Fig.4-3は計測結果である。(a)から(f)はそれぞれ絞りを半分ずつに絞る際8ビットのカメラで



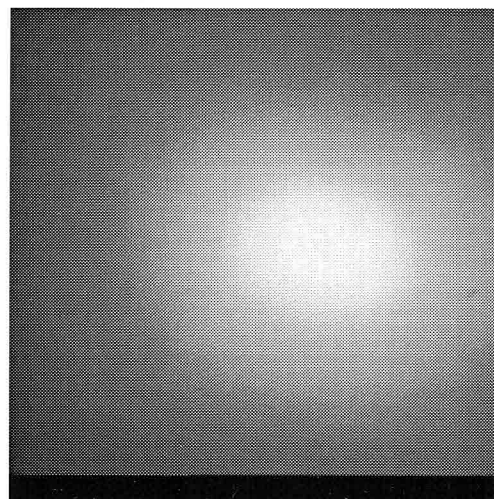
(a) 8ビット画像1



(b) 8ビット画像2

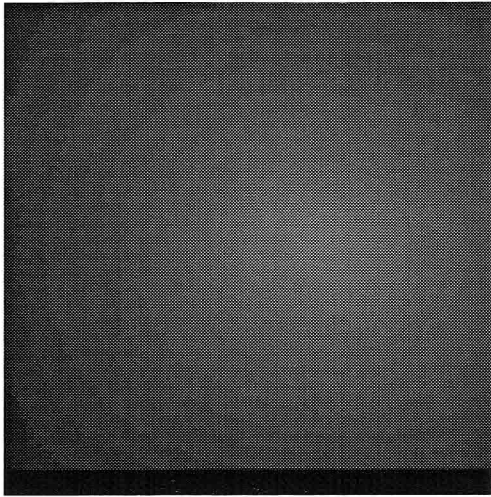


(c) 8ビット画像3

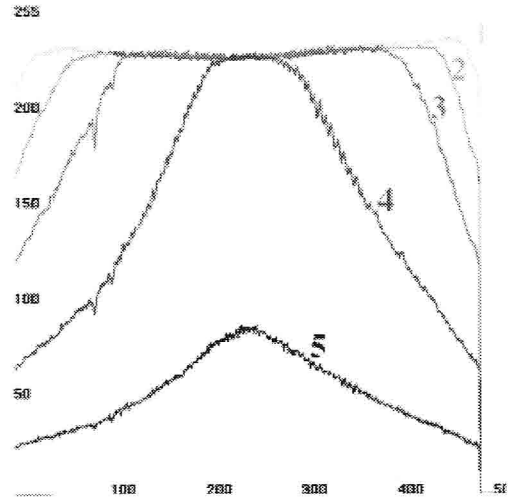


(d) 8ビット画像4

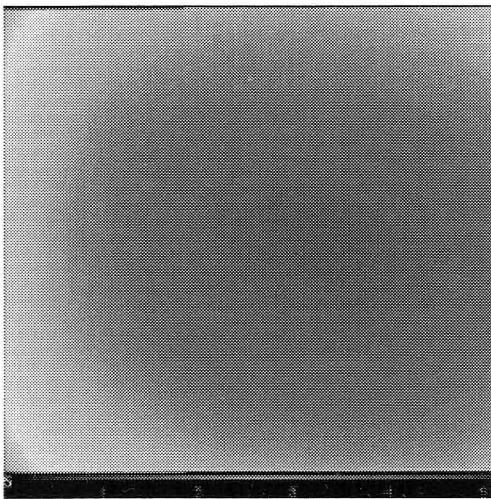
Fig.4-3 計測レンジの拡張の実験例 (その1)



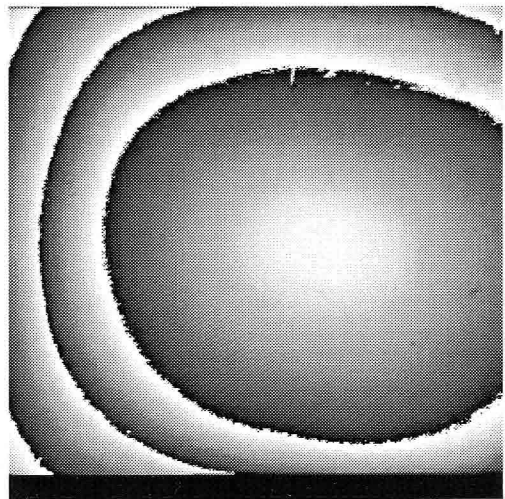
(e) 8ビット画像5



(f) 8ビット画像の強度分布



(g) 16ビット画像



(h) 16ビット画像の分段階表示

Fig.4-3 計測レンジの拡張の実験例 (その2)

取った画像で、(g)は5枚画像の強度分布である。物体の暗い部分を取れば明るい部分は飽和し、明るい部分を取れば暗い部分は見えなくなってしまうことが分かる。(h)は合成した16ビット画像である。表示のため16ビット画像はカラー表示で行い、赤成分は高位8ビット、緑成分は下位8ビットを表示する。

この手法はレーンが狭いカメラを用いて、レーンが広い画像を撮れるが、この方法では複数回の撮影が必要とされるので、特定の場合では適用できない。

一枚の画像で計測するという特徴を実現するために、私達は次の小節に述べる「指数-線形変換」という投影光変換の方法を提案する。

#### 4.1.2 指数変調投影光から線形投影光に

計測レンジを拡張する実用的な方法の一つには指数-線形変換法がある。即ち、投影光の変調関数 $f_1(x_1)$ を指数的にではなく線形的に変化させ、強度の変化範囲が小さい投影光を発生させる。この強度が線形的に変化する変形格子像を8-bit 精度の画像入力装置で撮像し、ソフト

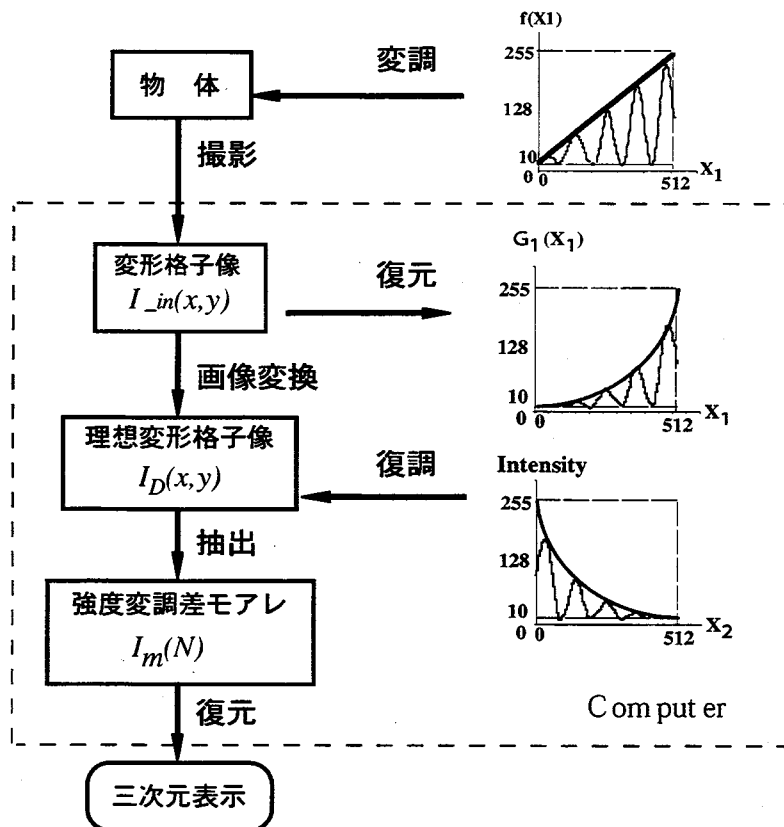


Fig.4-4 指数-線形変換方を用いる計測の流れ

的に式(3-1)のような投影パターンを持つ変形格子像に変換する方法である。

線形変調関数と指数変調関数をそれぞれ $A_l$ と $A_e$ とすると（正弦関数の振幅部分だけ分析する。以下も同じ）,

$$A_l(x_1) = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{512} x_1 + P_{\min} \quad (4-1)$$

$$A_e(x_1) = a^{k_1 + x_1} = P_{\min} a^{x_1} \quad (4-2)$$

$P_{\max}$  : 投影光強度の最大値,

$P_{\min}$  : 投影光強度の最小値,

となる。つぎに線形的な変調関数で撮られた入力画像を式(4-3)とする。

$$I_{in}(x_1, y_1) = A_l(x_1) \cdot o(x, y) \quad (4-3)$$

ここで,  $o(x, y)$ は光源の強度と対象物体の反射率などによって決まる関数である。

結局必要とされる指数的な投影光変調関数での入力画像は

$$I(x_1, y_1) = A_e(x_1) \cdot o(x, y) \quad (4-4)$$

であり,  $I(x_1, y_1)$ は $I_{in}(x_1, y_1)$ から算出できる。すなわち, 式(4-1)と式(4-3)により,

$$x_1 = \frac{511}{P_{\max} - P_{\min}} \left[ \frac{I_{in}(x_1, y_1)}{o(x, y)} - P_{\min} \right] \quad (4-5)$$

式(4-2)と式(4-5)を式(4-4)に代入すると, 必要とされる入力画像は

$$I(x_1, y_1) = P_{\min} \cdot a^{\frac{511}{P_{\max} - P_{\min}} \left[ \frac{I_{in}(x_1, y_1)}{o(x, y)} - P_{\min} \right]} \cdot o(x, y) \quad (4-6)$$

となる。 $I(x_1, y_1)$ を式(3-12)の関数で復調すると, つぎのような強度変化のモアレ画像が得られる。

$$I_M(x_2, y_2) = \begin{cases} K \cdot a^{\frac{511}{P_{\max} - P_{\min}} \left[ \frac{I_{in}(x_1, y_1)}{o(x, y)} - P_{\min} \right] - x_2} & ; o(x, y) = 1 \\ 0 & ; o(x, y) = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

ここで,  $K$ 'は定数である。しかし, この式は $o(x, y)$ に依存するので, モアレ縞の次数を算出できない。そこで,  $o(x, y)$ の影響を排除する必要がある。表面の反射特性が均一の物体に対して式(4-8)が成立する。

$$o(x, y) = \begin{cases} 1 & ; \text{対象物体に当たっている部分} \\ 0 & ; \text{対象物体に当たっていない部分} \end{cases} \quad (4-8)$$

これによりモアレパターンは

$$I_M(x_2, y_2) = \begin{cases} K' \cdot a^{\frac{511}{p_{\max} - p_{\min}} \left[ \frac{I_m(x_1, y_1)}{o(x, y)} - p_{\min} \right] - x_2} & ; o(x, y) = 1 \\ 0 & ; o(x, y) = 0 \end{cases} \quad (4-9)$$

となる。さらに  $I_m(x_2, y_2) \neq 0$  の部分を計算して、式(3-14)と式(4-7)から、

$$N = -\frac{1}{s} \frac{\log \left[ \frac{I_M(x_2, y_2)}{k} \right]}{\log(a)} = K_0 - K_1 \log[I_M(x_2, y_2)] \quad (4-10)$$

となる。ただし、 $K_0$ と $K_1$ は定数である。この結果、モアレ縞の強度 $I_m$ からその次数 $N$ が得られる。

## 4.2 表面反射特性の良くない物体の計測

### 4.2.1 問題の提出

強度変調モアレを実現するために、先ず変形格子像の縞次数を正しく検出しなければならない。これは計測物体が式(4-8)を満足する必要がある。式(4-8)は非常に厳しい条件で、実際に計測をするとき、このような厳しい条件は必要なく、式(4-8)によりモアレ縞の強度によって縞の次数 $N$ が区別できる限り、同じ番号の変形格子像の強度は近似的に同じでよい。すなわち

$$o(x, y) \approx \begin{cases} 1 & ; \text{対象物体に当たっている部分} \\ 0 & ; \text{対象物体に当たっていない部分} \end{cases} \quad (4-11)$$

このような近似は距離計測精度に悪影響を及ぼさない詳しい分析は3.3節計測制度分析に参考)。

しかし、物体の表面特性や光源の特性などによって、変形格子像の同一番号の縞の強度は不均一になる可能性が高く、特に対象物体が異なる材料の組み合わせの場合、式(4-11)も成立しない。この問題を解決するために、式(4-11)を満たすように変形格子像を補正する必要がある。

本研究には2枚の画像による補正と1枚画像の割り算による補正との2種類の補正方法を提案する。



### 4.2.2 2枚画像により補正

Fig.4-5(a)に示す表面に文字やカラの印刷パターンがある紙ボックスの変形格子像には、そのままでは、式(4-8)は成り立たない。二枚画像の割り算により補正方式のは、変形格子像のほか、もう一枚全面照明の画像を用いて、変形格子像を補正する。全面照明画像は、変形格子像を取る計測システムと同じシステム (Fig.3-3に示した) で、投影格子と投影フィルタを用いず点光源で物体を直接照射して (投影プロジェクタが白色の投影光を投影する) 撮った濃淡画像である。この全面照明画像は物体の表面反射特性と光源特性だけ含んでいる。変形格子像と全面照明画像の割り算により、物体の表面反射特性と光源特性だけが含まれなくなり、物体の表面形状と格子特性により決まる理想的な変形格子像が得られる。

具体的には、前述の強度変調した変形格子像 $I_{in}(x_1, y_1)$  (Fig. 4-5 (a)) と補正用の全面照明画像 $I_{cor}(x_1, y_1)$  (Fig. 4-5 (b)) を撮る。

$$I_{in}(x_1, y_1) = \frac{a^{k_1+x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) o(x, y) \quad (4-12)$$

$$I_{cor}(x_1, y_1) = o(x, y) \quad (4-13)$$

式(4-13)を式(4-12)で割ると、式(4-14)に示すような物体の形状と投影光だけで決まる理想の変形格子像 $I'_{in}(x_1, y_1)$  (Fig. 4-5 (c)) が得られる。

$$I'_{in}(x_1, y_1) = \frac{I_{in}(x_1, y_1)}{I_{cor}(x_1, y_1)} = \frac{a^{k_1+x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) \quad (4-14)$$

すなわち、変形格子像は物体の反射特性および光源に依存しなくなり、式(4-8)が成立する。その基本周波数成分を抽出すると、Fig.4-5(d)のような理想的な変形格子像が得られる。

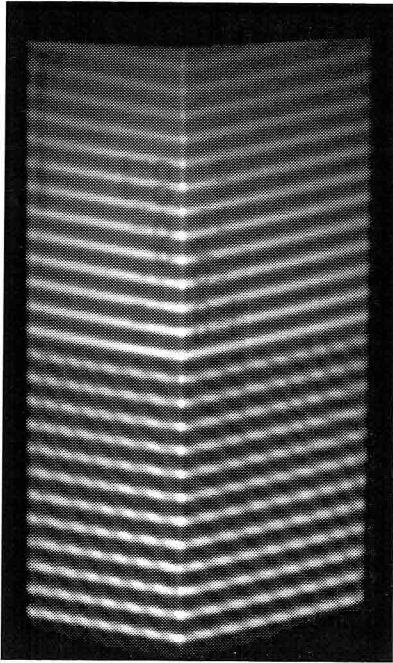
Fig.4-6はFig.4-5と対応する各画像の $x=240$ におけるの断面の強度分布である。

Fig.4-7は表面に文字や溝があるバレーボールの変形格子像の補正結果である。これにより、提案補正方法は物体の表面形状や反射特性などの影響に対しても有効であることが分かる。

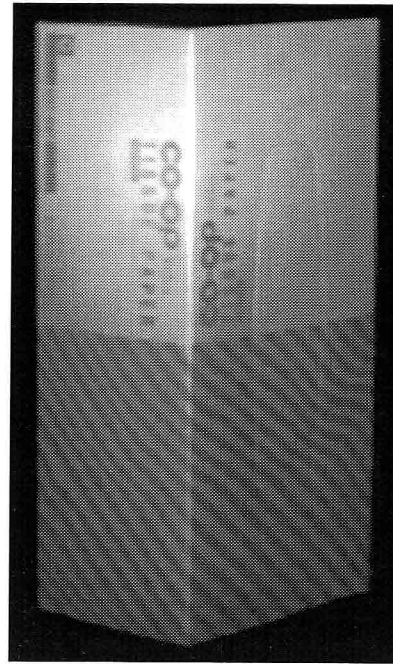
### 4.2.3 一枚の画像により補正

対象物体の表面パターン (テクスチャも含む) の空間周波数が投影格子の空間周波数との差が大きい場合で、変形格子像の特性により、変形格子像の補正ができる。

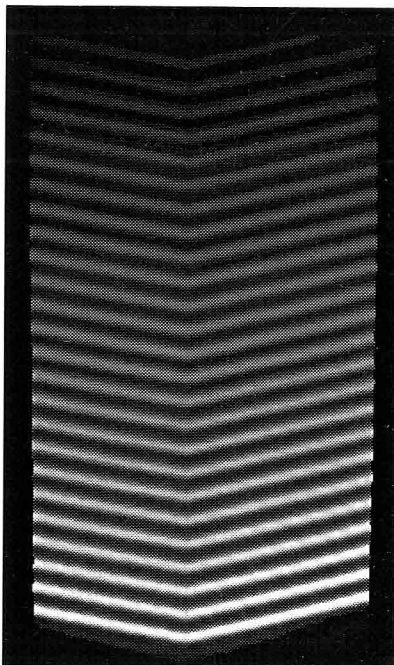
Fig.4-9とFig.4-10は一枚の画像により補正の様子を示した。



(a) 変形格子像



(b) 原画像

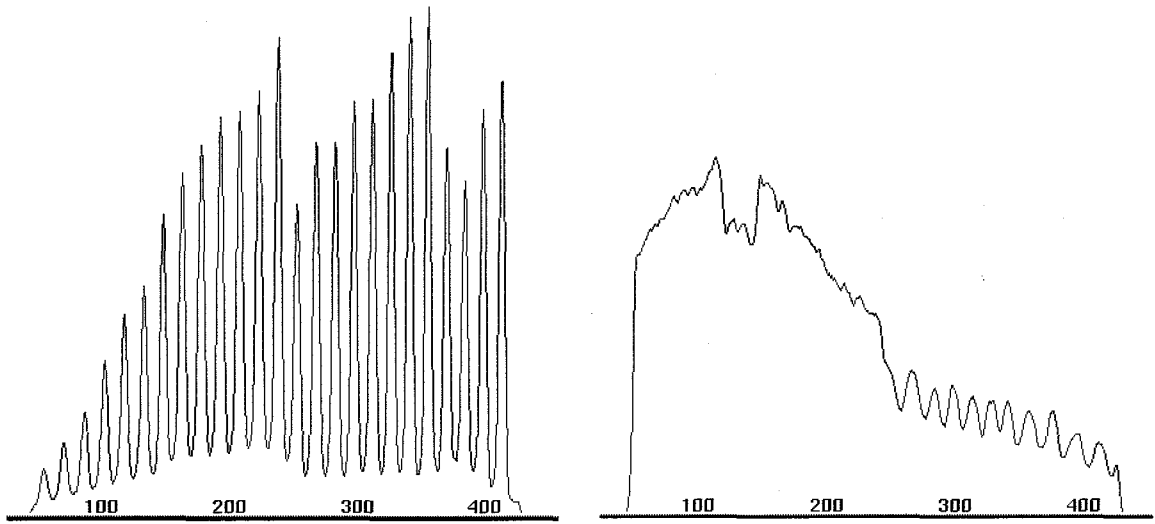


(c) 割り算補正画像



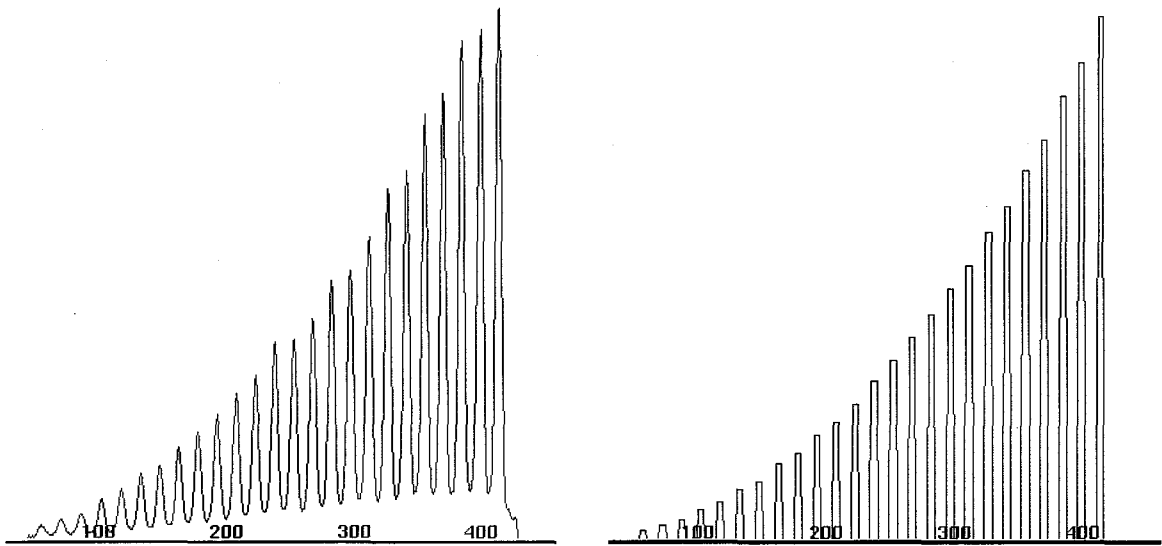
(d) 正規化した補正画像

Fig.4-5 対象物体の表面反射特性の補正



(a) 変形格子像の強度分布

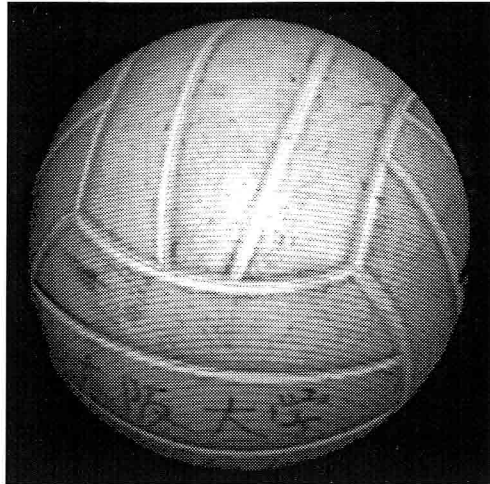
(b) 原画像の強度分布



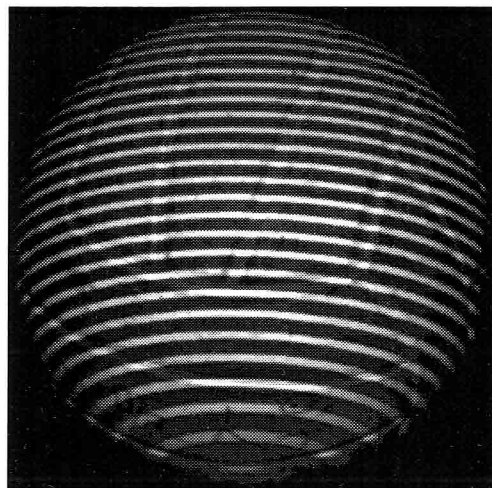
(c) 割り算補正画像の強度分布

(d) 正規化した補正画像の強度分布

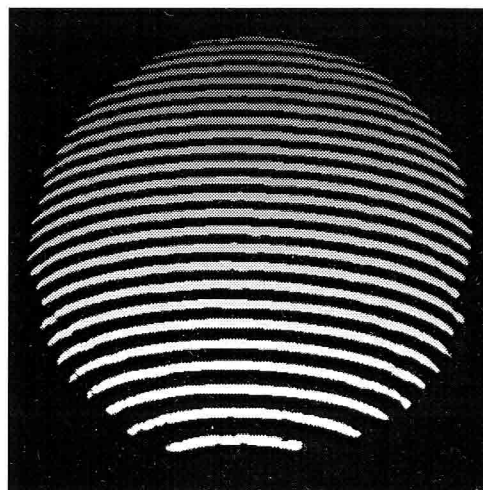
Fig.4-6 Fig.4-5の各画像の強度分布



(a) 原画像



(b) 変形格子像



(c) 補正した変形格子像

Fig.4-7 バレーボールの表面反射特性の補正

1 周波数成分により補正

式(4-12)は簡単に式(4-15)に書ける。

$$I_{in}(x_1, y_1) = g(x, y) \cdot o(x, y) \quad (4-15)$$

式(4-15)をフーリエ変換を掛けると、

$$F[I_{in}(x_1, y_1)] = G(X, Y) + O(X, Y) \quad (4-16)$$

となる。ただし、

$$G(X, Y) = F[g(x, y)] \quad (4-17)$$

$$O(X, Y) = F[o(x, y)] \quad (4-18)$$

Fig.4-8に示すように、投影格子の空間周波数と対象物体の空間周波数との差が大きい場合で、周波数領域で対象物体の表面反射特性と光源特性を含む低周波数成分 $O(X, Y)$ と投影格子特性を含む高周波数成分 $G(X, Y)$ に分離することができる。

分離した $G(X, Y)$ と $O(X, Y)$ をそれぞれ逆フーリエ変換すると、 $g(x, y)$ と $o(x, y)$ は復元できる。前節に述べた割り算の手法を用いて、変形格子像の補正は一枚の変形格子像により実現でき

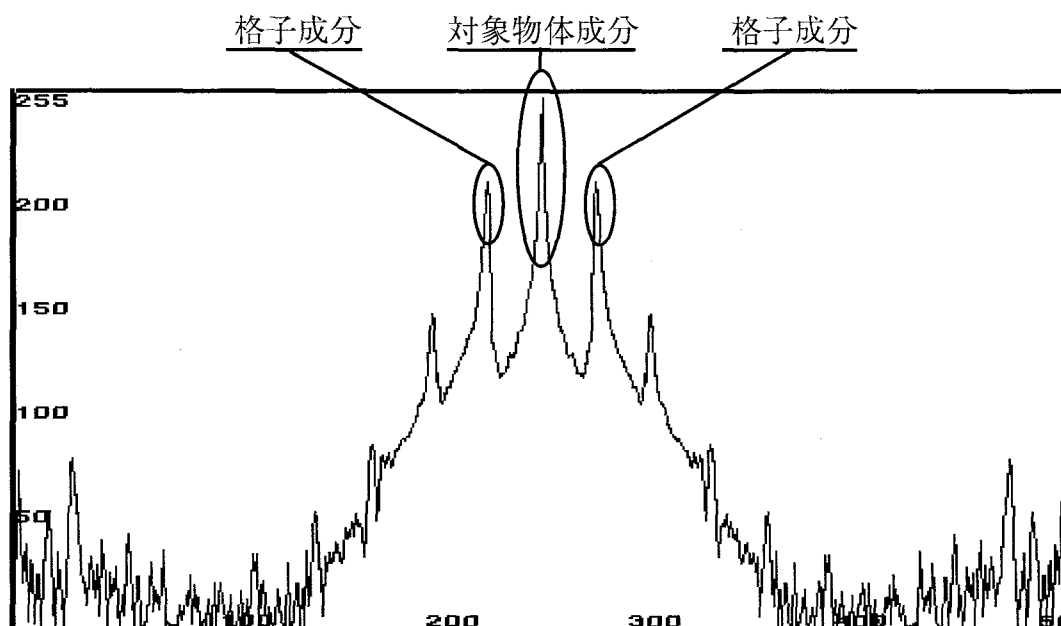


Fig.4-8 Fig.4-9(a)に示す変形格子像の空間周波数分布

る。

実は変形格子像は「同じ次数の縞の濃度が同じである」という特性を持っている。これらの特性を有効的に利用すれば、物体の表面反射特性など原因による生じた同じ次数縞の強度が不均一の問題を解決し、もっと綺麗な変形格子像が得られる。

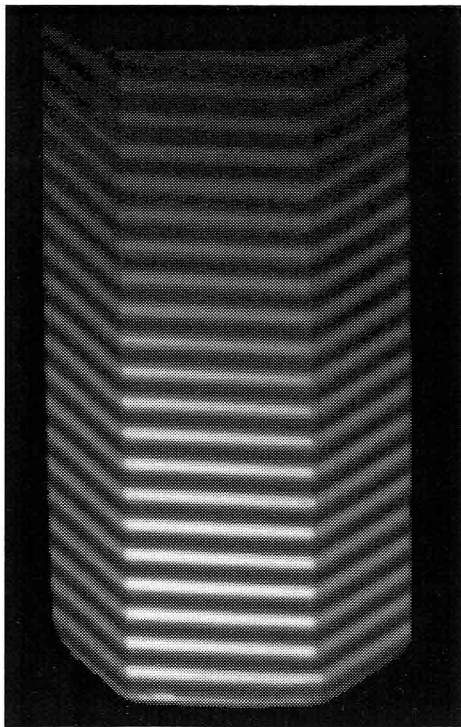
Fig.4-9はこの手法での補正結果を示す。Fig.4-10はFig.4-9の各画像と対応する強度分布である。Fig.4-9(a)は変形格子像である。投影光は線形的に変化するが、物体の表面反射特性及び光源の特性により、変形格子像の強度分布はFig.4-10(a)のようになった。Fig.4-9(b)はFig.4-9(a)から抽出した低周波数成分で、Fig.4-10(b)はその強度分布である。Fig.4-10(b)により、六角柱体の反射特性及び光源の特性（特にハイライト）が分かる。Fig.4-9(c)は変形格子像Fig.4-9(b)と抽出した原画像を意味する低周波数成分との割り算の結果である。ハイライトの部分を除いて、画像全体は近似的な線形分布を持っている。(d)は上記の変形格子像の特性を用いて(c)を修正する最終的な補正結果である。

### 4.3 考察

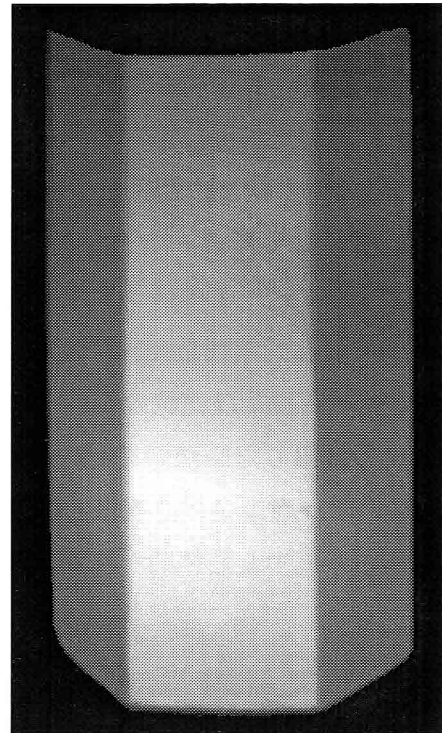
本章では強度変調モアレによる3次元計測を実現する際に解決しなければならない問題の解決方法を述べた。指数—線形変換により普通の8ビットCCDカメラを用いて強度変調モアレ計測を実現することが可能になった。一枚の画像による補正方法の提案により、一枚の画像による3次元画像計測を実現した。

しかし、一枚の画像による補正方法は対象物体の表面反射特性の空間周波数特性と投影格子の空間周波数特性とは差があるという条件が必要とする。この条件が満足できない場合では、提案した二枚の画像により補正方法が実用できる。

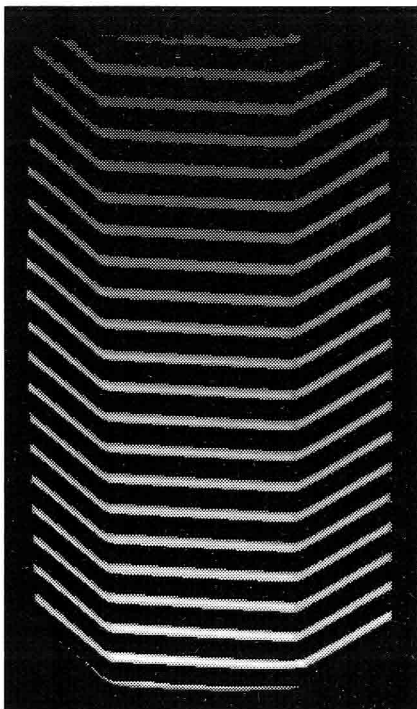
実は、強度変調モアレによる3次元計測は同じ次数の変形格子像が同じ強度値を持ったなくて良いことが分かる。変形格子像の縞次数を判別できる限り、縞の強度値はある程度の差があっても、計測に誤差を生じない。この意味で考えると、変形格子像は厳密な補正をする必要が無い。これも提案手法の特徴の一つだと思う。



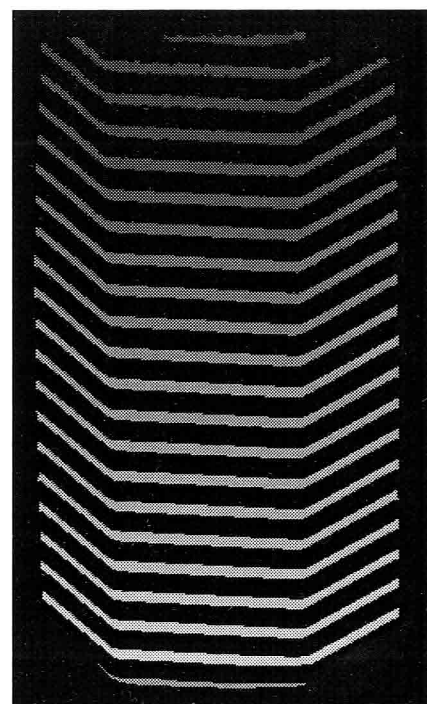
(a) 変形格子像の強度分布



(b) 原画像の直流成分

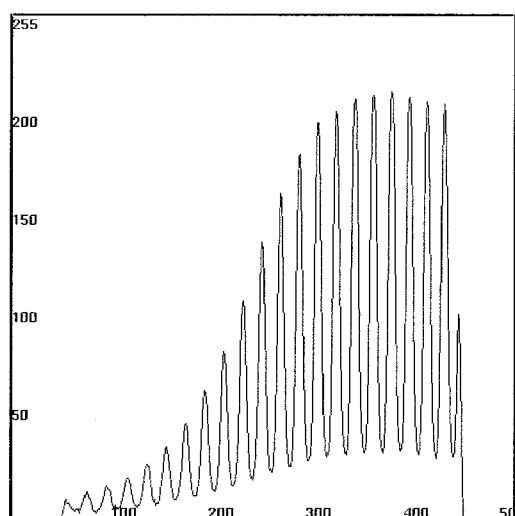


(c) 周波数補正結果

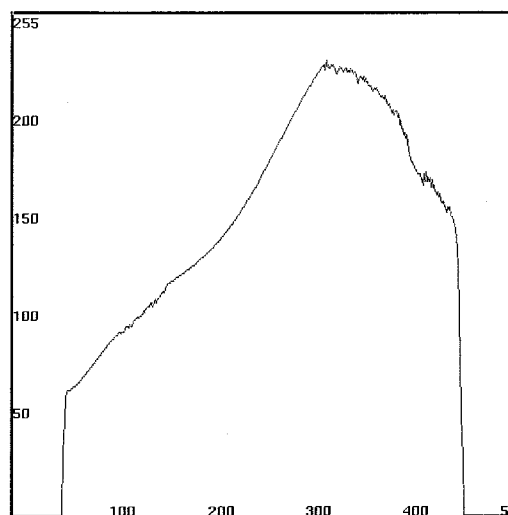


(d) モアレ縞の特性を加えて補正した結果

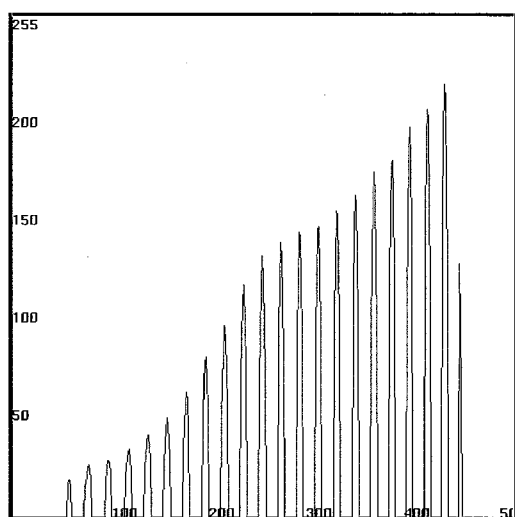
Fig.4-9 一枚の画像により補正 (その1)



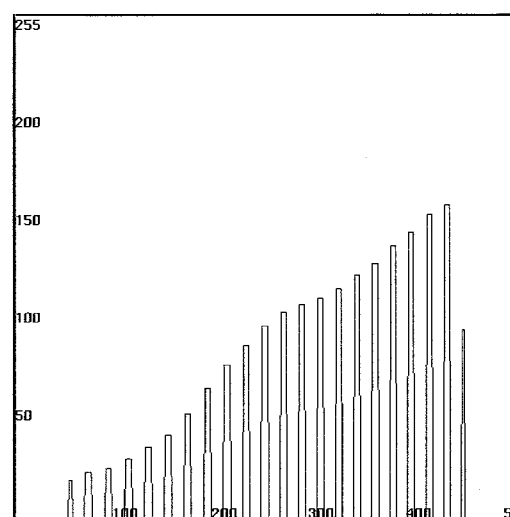
(a) 変形格子像の強度分布



(b) 原画像の直流成分の強度分布



(c) 周波数補正結果の強度分布



(d) モアレ縞の特性を加えて補正した結果の強度分布

Fig.4-10 一枚の画像により補正 (その2)



## 第5章 強度・位相解析

### ——強度変調モアレの計測精度向上

モアレ縞の解析は等高線方式と位相解析方式との二つの方法がある。位相解析はモアレパターンすべての画素の情報を使うので、計測感度が等高線式より高いと考えられる。しかし、モアレパターンはWarp状なので、各点の位相値の決定は非常に難しく、一枚のモアレパターンによるUnwarpingは不可能とさえいえる。

本章では強度変調モアレパターンを用いてUnwarping方法を述べる。本手法は従来の方法と違い、位相解析の前にまず強度解析を行い、モアレパターンを幾つかの奥行き領域を分割することで、各領域でのUnwarpingは簡単に実現する。

#### 5.1 従来の位相解析方法の問題点と解決方法

##### 5.1.1 問題点

モアレ縞の解析は等高線方式と位相解析との二つの方法に大別できる。等高線解析はモアレ縞の輪郭しか使わないので、計測の感度はあまり高くなく、輪郭線の間部分は計測できない。今までの第二世代のモアレ計測でも、計測感度を向上するために位相解析の方法が考えられた(Yoshizawa 89, Mauvoision 94, Kato 91)。

式(2-11)から奥行き $h$ と縞の強度 $I_m$ および縞の位相 $\alpha$ の関係が得られる。

$$h = \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{I_M}{A_M}\right) - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{\omega} \alpha - \frac{\omega_0}{\omega} \quad (5-1)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{I_M}{A_M}\right) \quad (5-2)$$

しかし、 $\arccos$ 関数は単値関数ではなく、Fig.5-1に示すように、ある画像強度値 $I$ に対し、 $\alpha_i$ 、 $T-\alpha_i$ 、 $T+\alpha_i$ 等複数の位相値がある。

これにより、画像強度 $I_m$ から位相 $\alpha$ を一意的に求められず、 $h$ を決定できない。これは位相解析方法の固有の問題点で、縞の次数不連続変化部分の奥行き対応関係および縞自身の不連続部分の奥行き関係の決定ができない原因である。この問題を避けるために、モアレ縞を1周期以内限定する解析方法や、時間列画像を利用する方法等の方法が提案された。これら

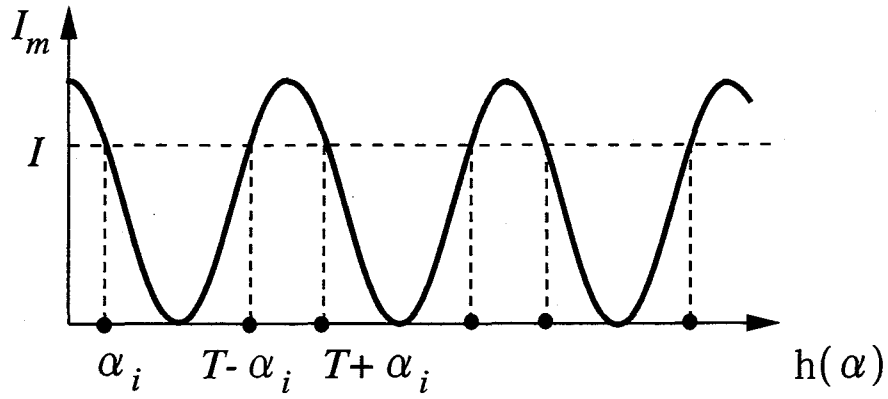


Fig.5-1 従来法のマアレパターンの強度と位相の対応関係

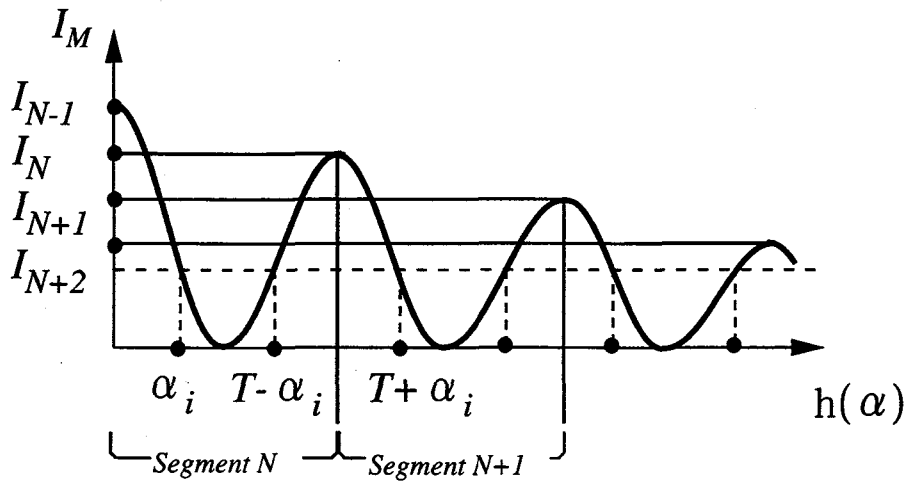


Fig.5-2 強度変調マアレパターンの強度と位相の対応関係

の方法は奥行き値 $h$ を算出できたが、位相 $\alpha$ と奥行き値 $h$ との非一意対応という問題は依然として解決されなかった。

### 5.1.2 強度変調モアレを用いた位相解析

強度変調モアレを用いることにより、上記の問題を解決する手法を提案する。Fig.5-2に示したように、まず、強度変調されたモアレ縞の強度によって、モアレパターンをいくつかの奥行き領域に分割する。但し、各領域内の位相 $\alpha$ と奥行き $h$ の変化幅が次式の範囲に収まるように領域を分割する。

$$\alpha_N \leq \alpha \leq \alpha_N + 2\pi \quad (5-3)$$

$$h_N \leq h \leq h_N + \Delta h \quad (5-4)$$

但し、 $\alpha_N$ はその領域の位相の初期値、 $h_N$ はその領域の奥行き距離の初期値である。

さらに位相が増加するときの縞の強度変化方向特性によって各領域を2分割すると、式(5-1)と式(5-2)は単値関数として使えるようになる。これにより、位相解析方法の固有的な問題は解決された。

続いて、強度・位相解析手法での輪郭線の抽出、セグメンテーション、3-D表面形状復元について述べる。

## 5.2 輪郭線の抽出

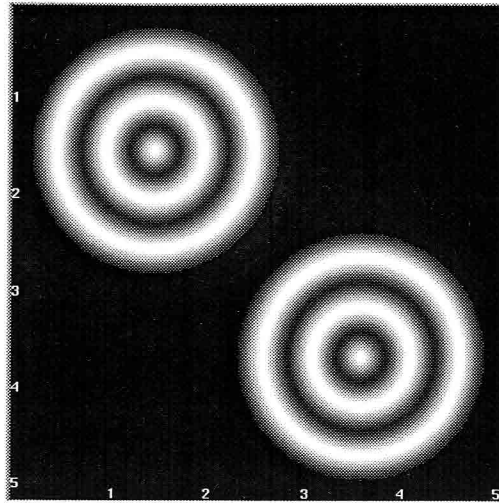
### 5.2.1 強度変調モアレパターンの輪郭線抽出の困難

領域分割のためには、各次数の縞の正確な輪郭線の位置と強度を抽出する必要がある。一般に、輪郭線の抽出は、二値化や微分に基づく方法があるが、強度変調モアレに対して、安定性が高くない。

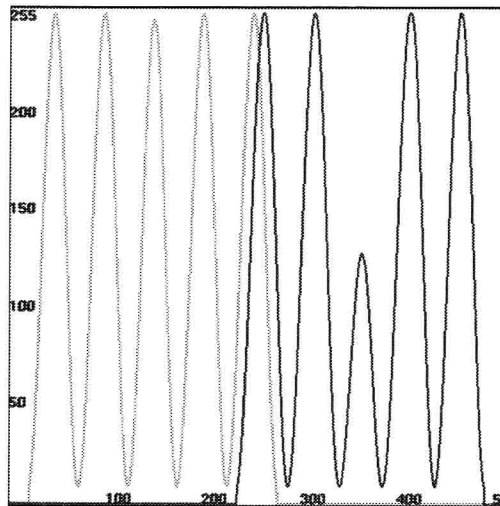
まず、モアレ縞の強度はコサイン分布なので、一般的な微分に基づく方法是对応できない。

強度変調モアレの縞濃度の変化の原因で、普通の手法でのしきい値の決定やLaplacian Gaussian手法の $\sigma$ の決定は非常に難しい。Fig.5-2はLaplacianオペレータの操作結果である。Fig.5-3(a)は普通のモアレパターンの抽出結果で、Fig.5-3(b)は強度変調モアレパターンの抽出結果である。

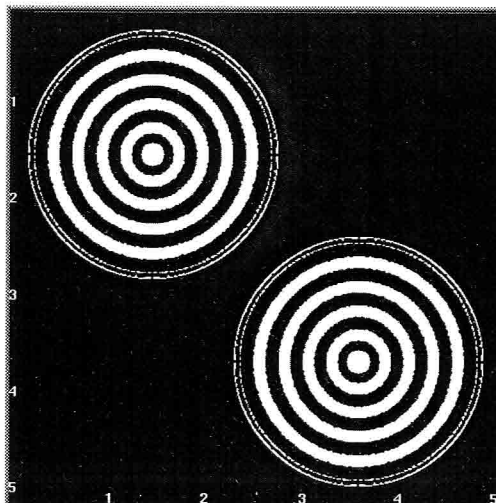
本研究では縞の強度変化方向特性を用いる方法(Hu 97)を使う。



モアレパターン



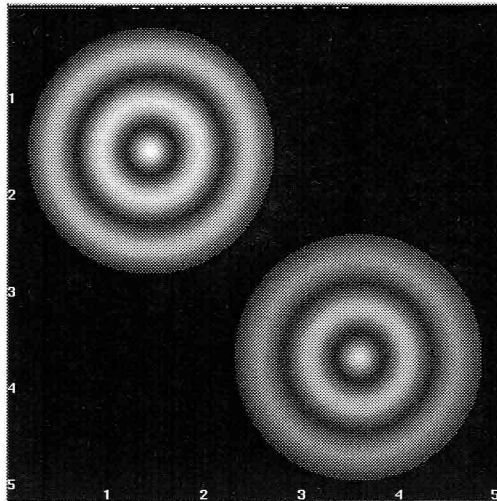
モアレパターンの強度分布



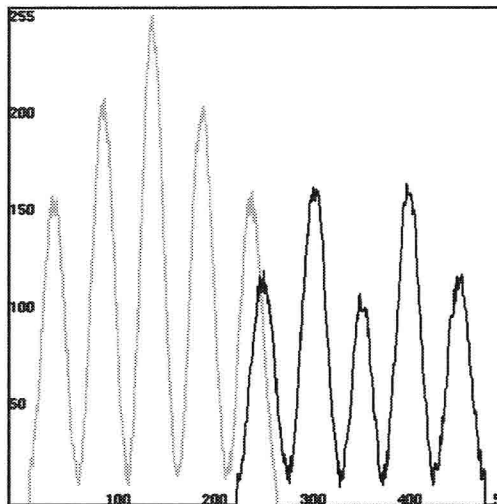
抽出したモアレパターンの輪郭線

(a) 普通のモアレパターンの輪郭抽出

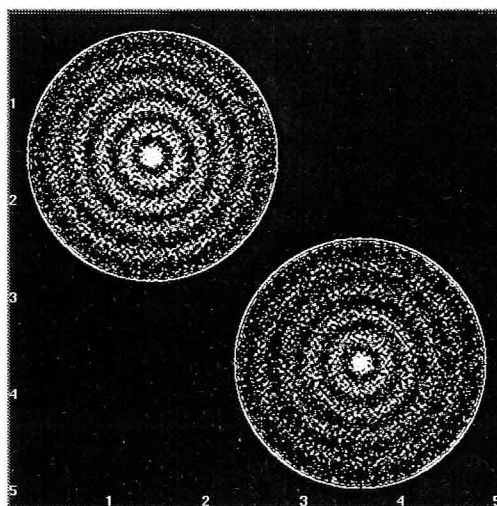
Fig.5-3 Laplacian Gaussian手法を用いるモアレパターンの輪郭抽出 (その1)



強度変調モアレパターン



強度変調モアレパターンの強度分布



抽出したモアレパターンの輪郭線

(b) 強度変調モアレパターンの輪郭抽出

Fig.5-3 Laplacian Gaussian手法を用いるモアレパターンの輪郭抽出 (その2)

## 5.2.2 モアレパターンの強度変化方向特性の利用

Fig.5-4はモアレパターンの強度分布である。モアレパターンの強度分布を解析すると、モアレ縞の輪郭は、縞の強度変化が減少から増加に変化するときに増加から減少に変化する時の縞強度変化特性が変わる際生じることが分かる。これはモアレパターンの強度変化方向特性で、この特性を利用すれば輪郭の抽出が可能となる。

## 1 方向角と方向マップの定義

注目点 $P(i,j)$ に対して、ある方向での縞の強度変化率は最大になる。この方向をこの点の方向角と定義し、画像中のすべての点の方向角を求めたデータをモアレパターンの方向マップと定義する。方向マップはモアレ縞の強度変化方向を示すデータである。

方向マップ上で、ある点の方向角に沿って探査すれば、隣接するモアレ縞の縞強度変化特性が変わるところすなわち縞のridgeとvalleyを発見できる。言い換えると、ある点の方向角に沿って探査する経路は、モアレパターンの輪郭を発見する最短経路とし、この経路に沿って探査すれば、モアレパターンの輪郭を必ず発見できる。

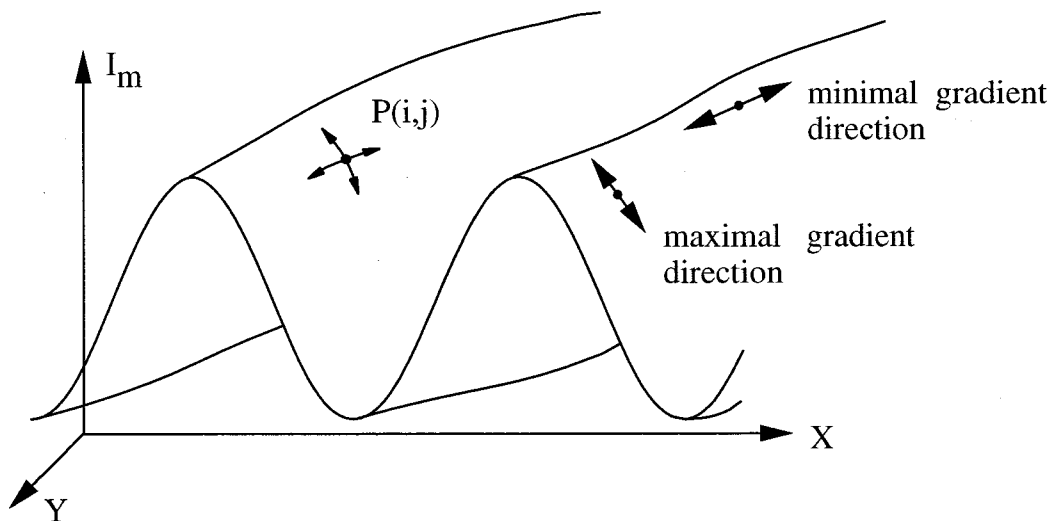


Fig.5-4 モアレパターンの空間強度分布

2 方向角の求め

まず, Fig.5-5 に示したように, 注目点 $P(i,j)$ の近辺で $R$ 半径の円形領域を選び, この領域内で次元回転フィルターを掛けて, 中心角 $\theta$ が変化するときの各線分上にある画素の平均強度 $\bar{I}(i,j,\theta)$ を求める。

$$\bar{I}(i,j,\theta) = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n I_m(i+k \cos \theta, j+k \sin \theta) \quad (5-5)$$

但し,  $n$ は $R$ のデジタル化の値である。

$n$ の値は得られたモアレパターンの周波数により決まる。 $n$ が大きければ, ノイズ除去の効果が得られるが, 処理時間がかかり, また縞の形状が変形しやすい。 $n$ が小さければ, ノイズ除去の効果は弱くなる。フィルターの周波数の決定手法には, 様々な手法があるが, 今回はシミュレーションによりフィルターの周波数を求めた。シミュレーションの結果より, 強度変調モアレに対して, フィルターの周波数はモアレパターンの5~10倍の周波数が適切であることが分かった。本章では,  $n$ を5に設定した。

続いて,  $\theta$ 方向での, 注目点 $P(i,j)$ の強度と平均強度 $\bar{I}(i,j,\theta)$ の差の合計 $D(i,j,\theta)$ を求めると, 式(5-6)になる。

$$D(i,j,\theta) = \sum_{k=-n}^n |I_m(i+k \cos \theta, j+k \sin \theta) - \bar{I}(i,j,\theta)| \quad (5-6)$$

最後に, 注目点 $P(i,j)$ の方向角 $\delta(i,j)$ を求める。

$$\delta(i,j) = \theta_{\max} \quad (5-7)$$

ただし,  $\theta_{\max}$ は次の条件を満たす $\theta$ のことである。

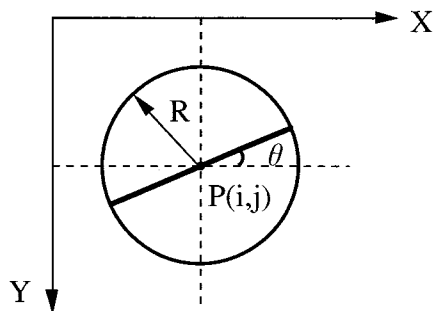


Fig.5-5 次元回転フィルター

$$D(i, j, \theta_{\max}) = \max_{\theta=0-2\pi} D(i, j, \theta) \quad (5-8)$$

Fig.5-6には強度変調モアレパターンの強度・位相解析のシミュレーション結果を示し、対象物体は二つの円錐体である。Fig.5-6(a)はシミュレーションの強度変調モアレパターンで、同(b)は同(a)の方向マップであり、表示の都合上、式(5-8)より得られた $0 \sim 2\pi$ の範囲で変化する $\delta(i, j)$ を8階調で表示している。

### 3 輪郭線の抽出

算出した $\delta(i, j)$ により、縞の方向変化マップ $B(i, j)$ を求め、Fig.5-6(c)に示す。

$$G(i, j) = \text{sgn} \left\{ \sum_{k=0}^{k=n} [I_m((i+k \cos \delta, j+k \sin \delta) - I_m(i-k \cos \delta, j-k \sin \delta))] \right\} \quad (5-9)$$

$$B(i, j) = \begin{cases} 255 & , G(i, j) > 0 \\ 0 & , G(i, j) \leq 0 \end{cases} \quad (5-10)$$

$B(i, j)$ の白黒変化のエッジはモアレパターンの輪郭である。輪郭の強度と強度変調モアレパターンの各次数の縞の振幅を合わせて、Fig.5-6(d)に示すような強度変調モアレパターンの強度付スケルトンを得た。

## 5.3 モアレパターンのセグメンテーションと3-D表面形状復元

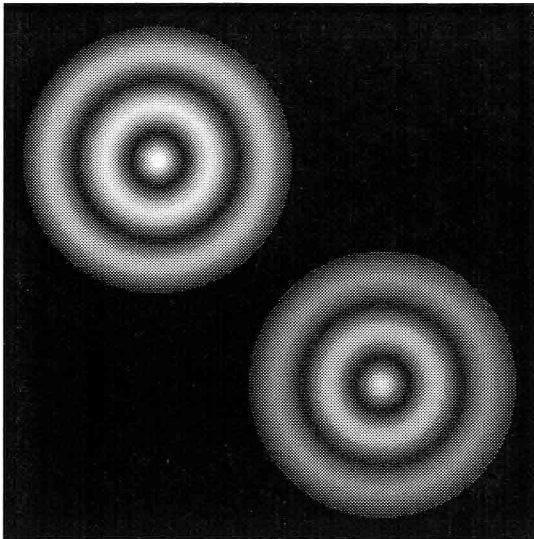
強度・位相解析には、まず強度解析を行い、モアレパターンの位置と強度情報によりモアレパターンをいくつかの奥行き領域に分割する。これはモアレパターンのセグメンテーションと言う。Fig.5-6(e)は同(a)のモアレパターンの分割の結果で、同じ輝度値を持っている部分は同じ領域に属している。

各領域で式(5-11)により、注目点の位相値 $\alpha$ を求め、式(5-12)により、ただ一つの奥行き距離値 $h$ を算出することができる。

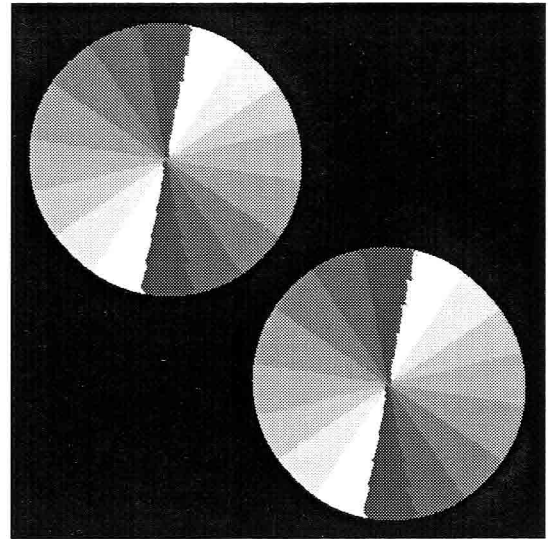
$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \arccos I'_m(i, j) & ; B(i, j) = 255 \\ 2\pi - \arccos I'_m(i, j) & ; B(i, j) = 0 \end{cases} \quad (5-11)$$

$$h(i, j) = h_N + k\alpha(i, j) \quad (5-12)$$

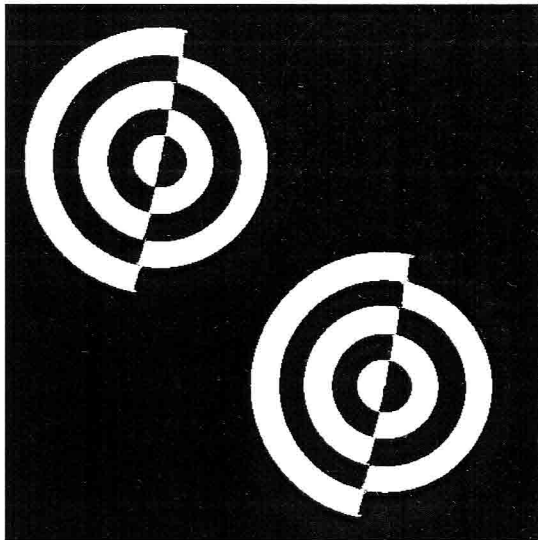




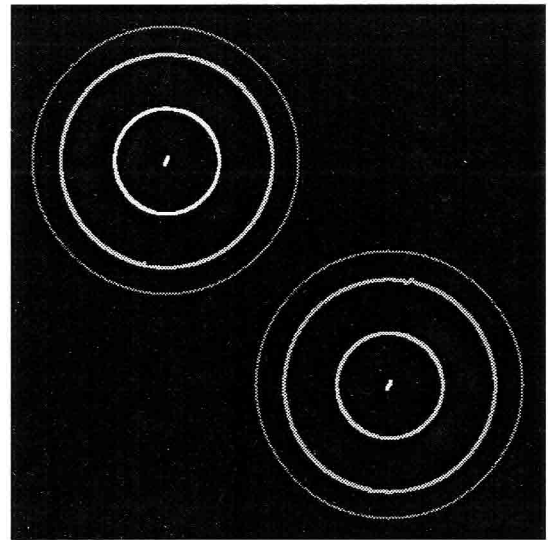
(a) moire pattern



(b) fringe-orientation map

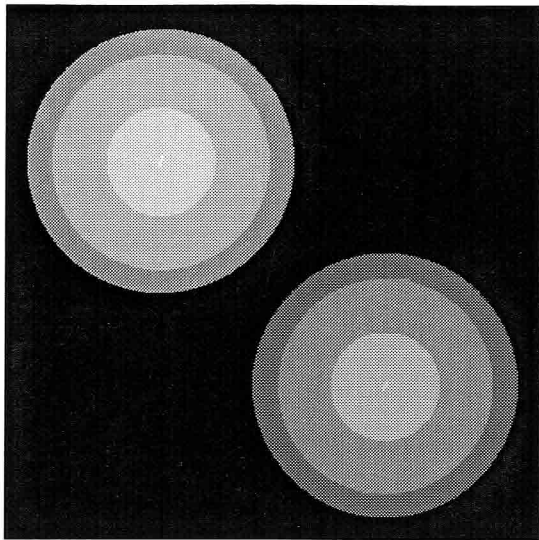


(c) binary orientation-change map

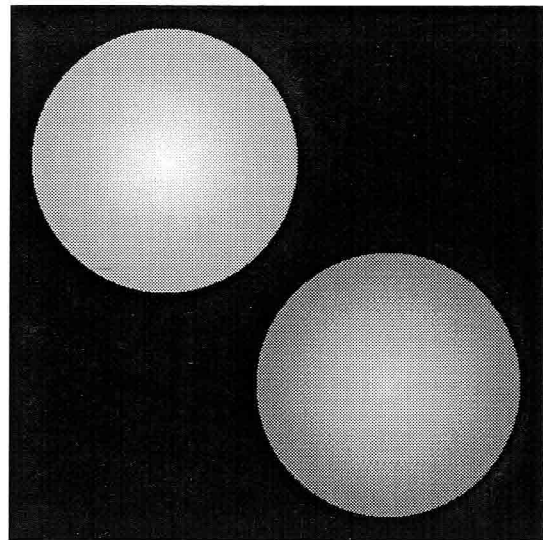


(d) Modulated skeleton

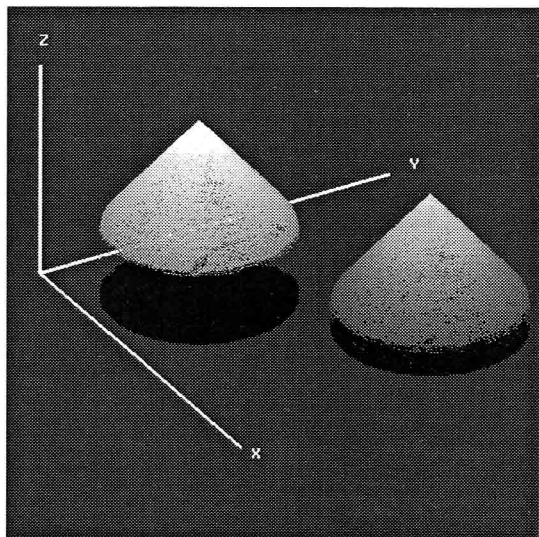
Fig.5-6 強度・位相解析方法のシミュレーション (その1)



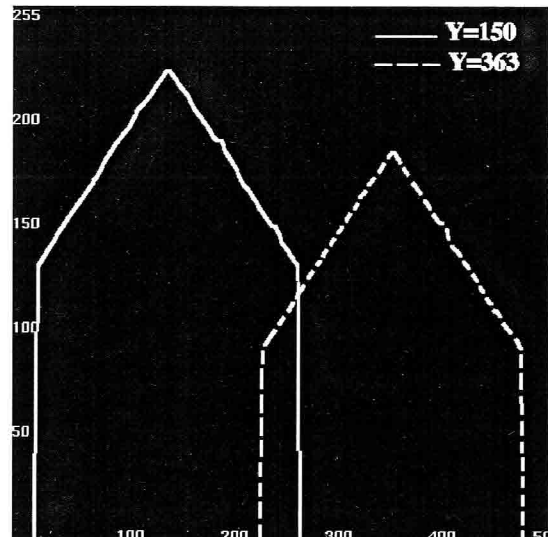
(e) segmented moiré pattern



(f) result of intensity-phase analysis



(g) 3-D shape



(h) cross section when  $x=150$  and  $x=363$

Fig.5-6 強度・位相解析方法のシミュレーション (その2)

ここで、 $I'_m(i,j)$ はノイズ除去および振幅均一化など前処理を行ったモアレパターンで、 $k$ は定数である。

これにより、モアレパターンの強度から一意的に位相値と奥行きを決定できる。

Fig.5-6(f)は強度・位相解析の結果で、輝度値は奥行きを示している。同(g)はその3次元表示である。同(h)には、実線が同(f)の画像座標 $y=150$ 断面の強度分布を、破線が $y=363$ 断面の強度分布を示している。ここで画像(f)の強度値は距離と唯一的な対応関係を持っている。

## 5.4 実物体の強度・位相解析結果と計測精度分析

Fig.5-7はFig.3-5に示した石膏球の強度・位相解析の結果である。

Fig.3-5に示したように、等高線式の強度変調モアレの解析方法では、モアレ縞がある部分しか3次元座標を測ることができる。これに対して、強度・位相解析方法では、等高線部分だけでなくモアレパターンのほとんどすべての点が計測できるので、空間解像度が向上されていることが分かる。

次に、強度・位相解析の精度を簡単に分析する。

Fig.5-7とFig.5-6と比較すると、Fig.5-7ではいくつかの点で計測誤差が出た。これは本手法がモアレパターンをココサイン分布と仮定したが、実物体の計測の場合に、電子走査により生成するモアレパターンが規則的な正弦波ではないことが原因と考えられる。

誤差のもう一つの原因は、計測対象である球の周辺では正反射成分が弱く、変形格子像の谷の部分で、誤差が生じ易いためであると考えられる。

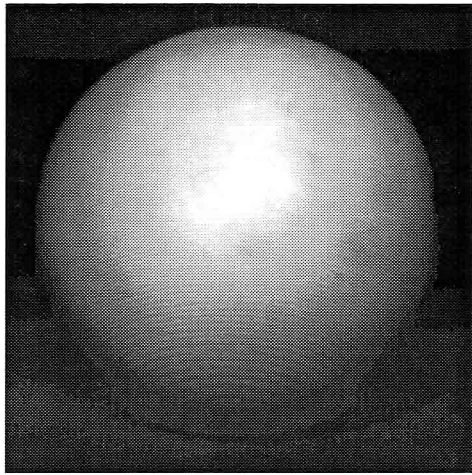
普通の位相解析の場合では、解析誤差は $0 \sim \pi$ の範囲、Full-level式の強度解析の場合で解析誤差が $0 \sim 255$ の範囲で出るのに対して、強度・位相解析手法の計測誤差は $0 \sim \Delta h$ の範囲にとどまる。即ち、奥行き計測誤差は隣接する2本のモアレ縞と対応する奥行き値より大きくないこととなる。これは位相解析する前に、すでにモアレパターンを奥行き方向に領域分割したことによるものである。

これにより、提案する強度・位相解析方法の距離計測精度は通常の位相解析および普通のFull-level解析方法より高いと言える。

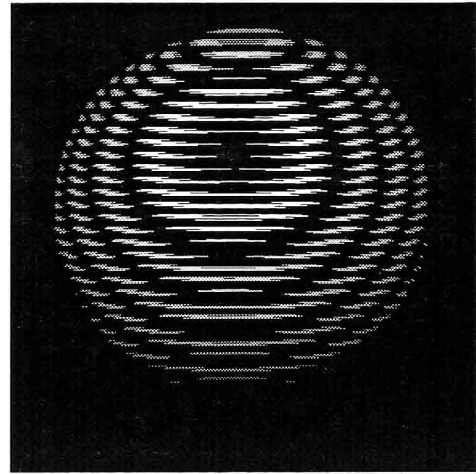
## 5.5 考察

モアレによる3次元計測の計測感度を向上させるために、本章では強度・位相解析手法を提案した。まず強度解析即ちモアレ縞の等高線強度値により、モアレパターンを幾つかの奥行き領域に分割し、物体の大体の様子を確定する。後で、各領域では、位相解析により等高線の間の細かい奥行きを算出する。

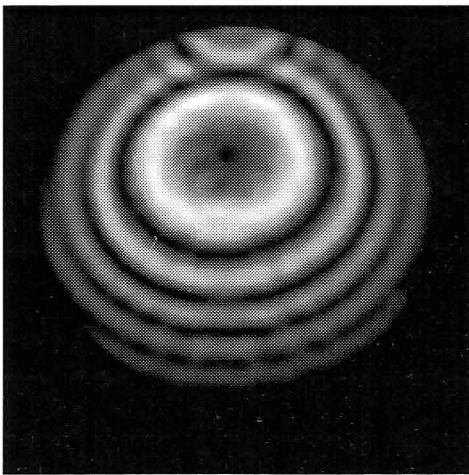
この解析手法は、物体のすべての点を測るので、計測感度を大幅に向上させることができた。また、位相解析を行う前には、先ず領域分割を行ったので、従来の位相解析法における画像強度・位相・奥行き三者の間に一対一の対応関係がないという問題も解決された。



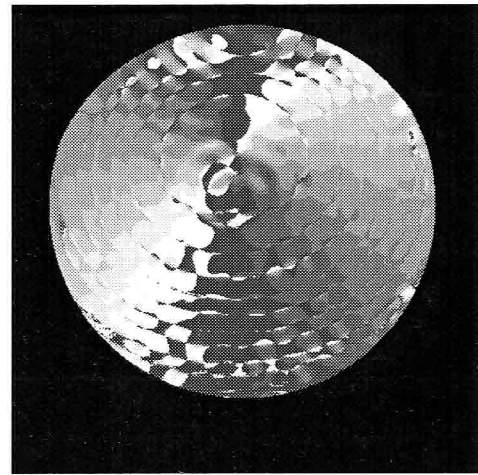
(a) ray image



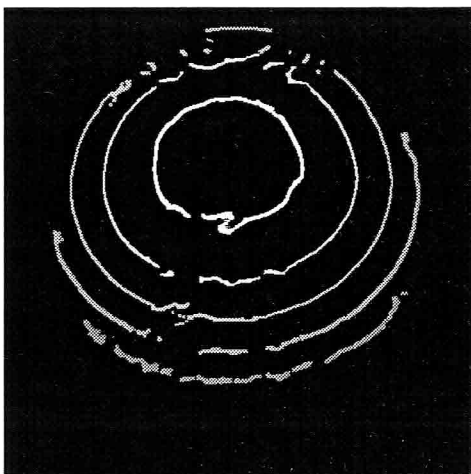
(b) intensity modulated moire



(c) moire pattern



(d) fringe-orientation map

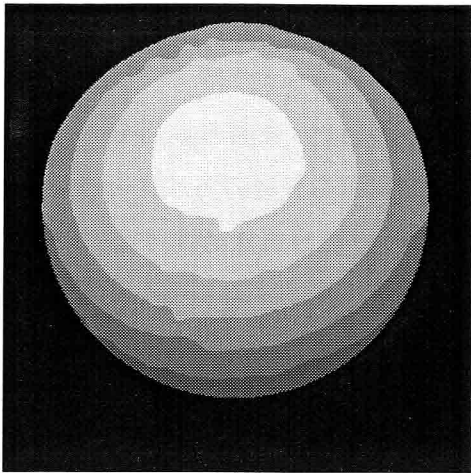


(e) binary orientation-change map

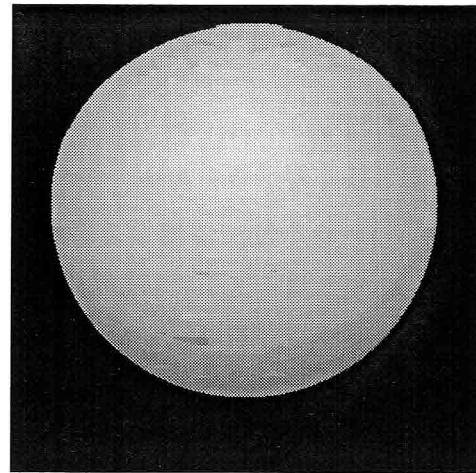


(f) modulated skeleton

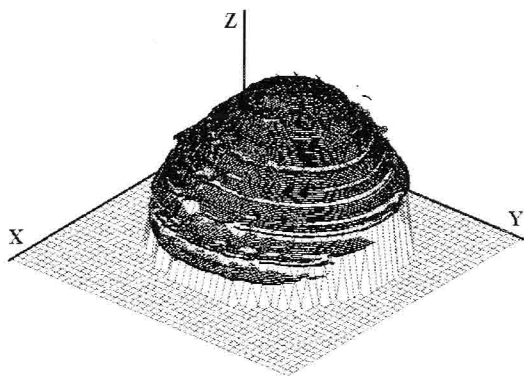
Fig.5-7 石膏球の強度・位相解析結果（その1）



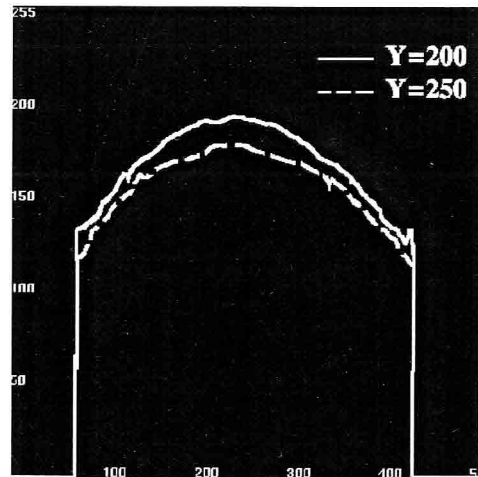
(g) segmented moiré pattern



(h) result of phase analysis



(i) 3-D shape



(j) cross section when  $x=200$  and  $x=250$

Fig.5-7 石膏球の強度・位相解析結果 (その2)

## 第6章 カラー変調モアレ

能動的な3次元計測方法として、変調投影光手法は、普通の投影光方法よりもっと多くの情報を物体に照射するので、撮った画像も普通の方法より多くの情報量いわゆる付加情報量を持っている。これらの付加情報を考慮することにより、強度変調モアレだけでなく、様々な新しい手法を提案することができる。本章ではカラー変調モアレによる3次元計測手法を提案する。

### 6.1 計測原理

従来法のモアレトポグラフィはモアレ縞の次数が決定できないので、モアレパターンと物体の奥行きとの一対一の対応関係が求められず、縞の不連続変化部分の奥行き関係を算出できず、また計測の自動化が困難である。

この問題を解決するためには、第3章から第5章までに論じた強度変調モアレ手法が有効となる。現在投影光の波長を簡単にコントロールできる液晶プロジェクタとCCDカラーカメラは商品化された。これらの技術を用いて、強度変調の代わりに、カラー変調も実現できると思われる。このような考え方に基づいて、本研究ではカラー変調モアレを提案する。

カラー画像を利用すると、*Red, Green, Blue* 3チャンネルを別々に投影することで、撮った画像の*Red, Green, Blue* 3チャンネルを別々に解析することが可能となる。

例えば、モアレ縞の*Red, Green, Blue* 3チャンネルの成分をそれぞれ変調し、Fig.6-1 (第70頁)のような分布を持たせると、縞の*Red, Green, Blue*各成分の強度値により、その次数を決定することができる。

カラー変調モアレの計測システムは3章に述べた強度変調モアレの計測システムとはほぼ同じで、投影光は強度変調投影光から*Red, Green, Blue* 3チャンネルを別々に変調するカラー変調投影光を用い、カメラはモノクロカメラからRGBカラーカメラを用いた。

3チャンネルCCDカメラのもう一つの有効な利用は、一つのチャンネルの信号を利用し他の2チャンネルの信号を補正するということがある。Fig.3-2における計測システムでは、投影格子 $G_1$ と観測格子 $G_2$ の*Red, Blue*成分の透過率 $T_{RS}, T_{BS}$ と $T_{RO}, T_{BO}$ をそれぞれ指数関数で変調する。なお、*Green*成分の透過率 $T_{GS}$ と $T_{GO}$ は補正用のため変調しない。

$$T_{RS} = \frac{a^{k_j+x_j}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) \quad (6-1)$$

$$T_{GS} = 1 \quad (6-2)$$

$$T_{BS} = \frac{a^{k_1-x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) \quad (6-3)$$

$$T_{RO} = \frac{a^{k_2-x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s}\right) \quad (6-4)$$

$$T_{GO} = 1 \quad (6-5)$$

$$T_{GO} = \frac{a^{k_2+x_2}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2 - \varepsilon}{s}\right) \quad (6-6)$$

ここで、 $x_1$ と $x_2$ はそれぞれ投影格子と観測格子の座標、 $s$ は格子のピッチ、 $\varepsilon/s$ は両格子の位相差である。

物体上の点 $P(x,y)$ に当てる投影光の分布は

$$I_R = \frac{a^{k_1+x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) O_R(x, y) \quad (6-7)$$

$$I_G = O_G(x, y) \quad (6-8)$$

$$I_B = \frac{a^{k_1-x_1}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{s}\right) O_B(x, y) \quad (6-9)$$

になる。 $O_R, O_G, O_B$ はそれぞれ物体の反射光のRed, Green, Blue成分である。 $x_1, x_2, x$ には次の関係がある。

$$x_1 = \frac{lx}{l+h} \quad (6-10)$$

$$x_2 = \frac{dh+lx}{l+h} \quad (6-11)$$

式(6-4), 式(6-5), 式(6-6)はそれぞれ式(6-7), 式(6-8), 式(6-9)と乗算し、低周波成分を抽出すると、Red, Green, Blueの3チャンネルで次のような三枚のパターンが得られる。

$$I'_{MR} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{-\frac{dh}{h+l}} \cos \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} O_R(x, y) \quad (6-12)$$



$$I_{MG} = O_G(x, y) \quad (6-13)$$

$$I_{MB} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{\frac{dh}{h+l}} \cos \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} O_B(x, y) \quad (6-14)$$

式(6-12)と式(6-14)に示すパターンはそれぞれRedとBlueチャンネルで得られたモアレパターンで、物体の表面色と反射特性に依存している。

表面色が均一な物体に対して、

$$O_R(x, y) = O_G(x, y) = O_B(x, y) \quad (6-15)$$

となる。式(6-12)と式(6-14)は式(6-13)で割ると、式(6-16)と式(6-17)に示すように、RedとBlueチャンネルで物体の表面色と反射特性に依存しないモアレパターンが得られる。

$$I_{MR} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{\frac{dh}{h+l}} \cos \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \quad (6-16)$$

$$I_{MB} = \frac{1}{8} a^{k_1+k_2} a^{\frac{dh}{h+l}} \cos \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} \quad (6-17)$$

モアレ縞の次数を $N$ を定義すると、式(6-18)となる。

$$\cos \frac{2\pi}{s} \frac{dh - \varepsilon(h+l)}{h+l} = \cos 2\pi N \quad (6-18)$$

電子走査モアレにおいて、走査線の初期位相値を調整することにより、簡単に $\varepsilon=0$ と設定できる。そうすると式(6-18)が式(6-19)で表示できる。

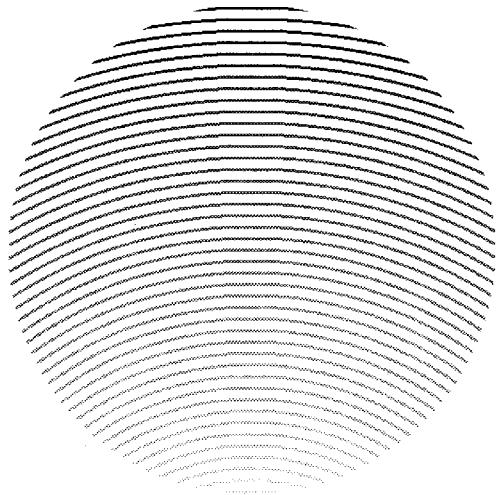
$$\frac{dh}{h+l} = sN \quad (6-19)$$

結局、式(6-16)と式(6-17)は次のように表示できる。

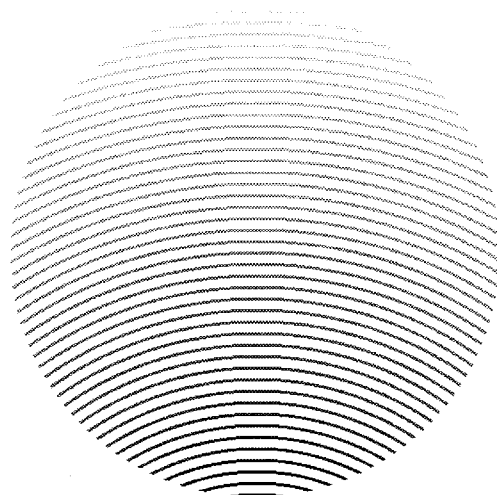
$$I_{MR} = K_1 a^{-sN} \cos 2\pi N \quad (6-20)$$

$$I_{MB} = K_2 a^{sN} \cos 2\pi N \quad (6-21)$$

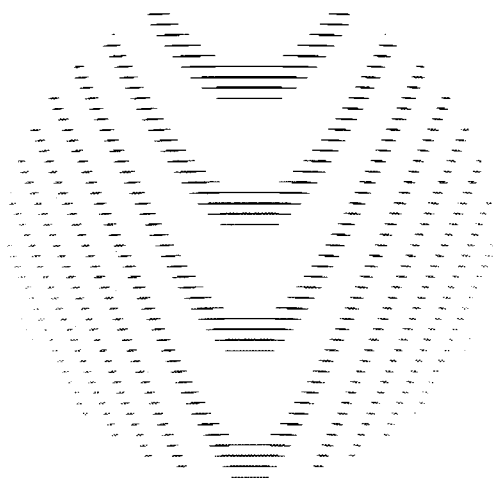
これをカラー変調モアレと呼ぶ。モアレ縞の次数が増えるに伴って、縞の色が赤から青に変化する。即ち、縞の色からその次数を簡単に決定できる。式(6-20)と式(6-21)から、式(6-22)が得られる。二枚のカラー変調モアレパターンから、モアレ縞の次数を計算できる。



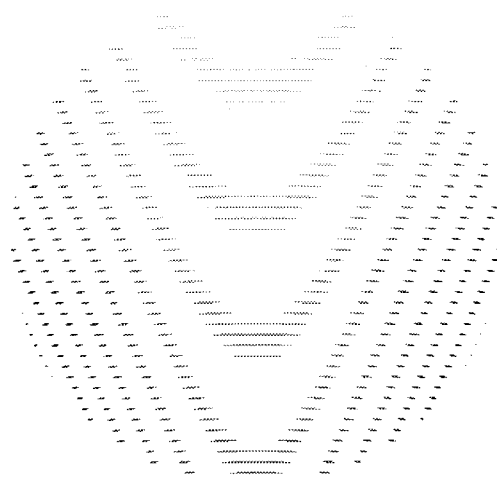
(a) 変形格子像の Red 成分



(b) 変形格子像の Blue 成分



(c) モアレパターンの Red 成分



(d) モアレパターンの Blue 成分

Fig. 6-3 変調モアレ縞のチャンネル別強度分布

$$N = \frac{\log_a(I_{MB}) - \log_a(I_{MR}) - \log_a K_2 + \log_a K}{2s} \quad (6-22)$$

Fig. 6-2 (第70頁) はシミュレーション結果である。シミュレーションの際物体の表面特性を補正する必要がないので、Green成分を0とする。Fig.6-3はFig. 6-2のカラー変形格子像とカラーモアレのRed, Blue成分をそれぞれ表示するものである。

## 6.2 計測システムと結果

カラー変調モアレの計測システム構成は前に述べた強度変調モアレの計測システム構成は全く同じものである。我々の実験システムでは、投影プロジェクタはFujitsuのFM-LCP3液晶プロジェクタを用いて、カメラはFujifilmのFUJIX DX-505Aを用いた。変形格子像を1280×1000×3のデジタル画像として撮り、コンピュータに送る。コンピュータはSilicon Graphics社のIRIS Indigo 2である。

「FUJIX DX-505A」 CCDカメラの分光感度特性はFig.6-4に示す (Fujifilm社より提供)。

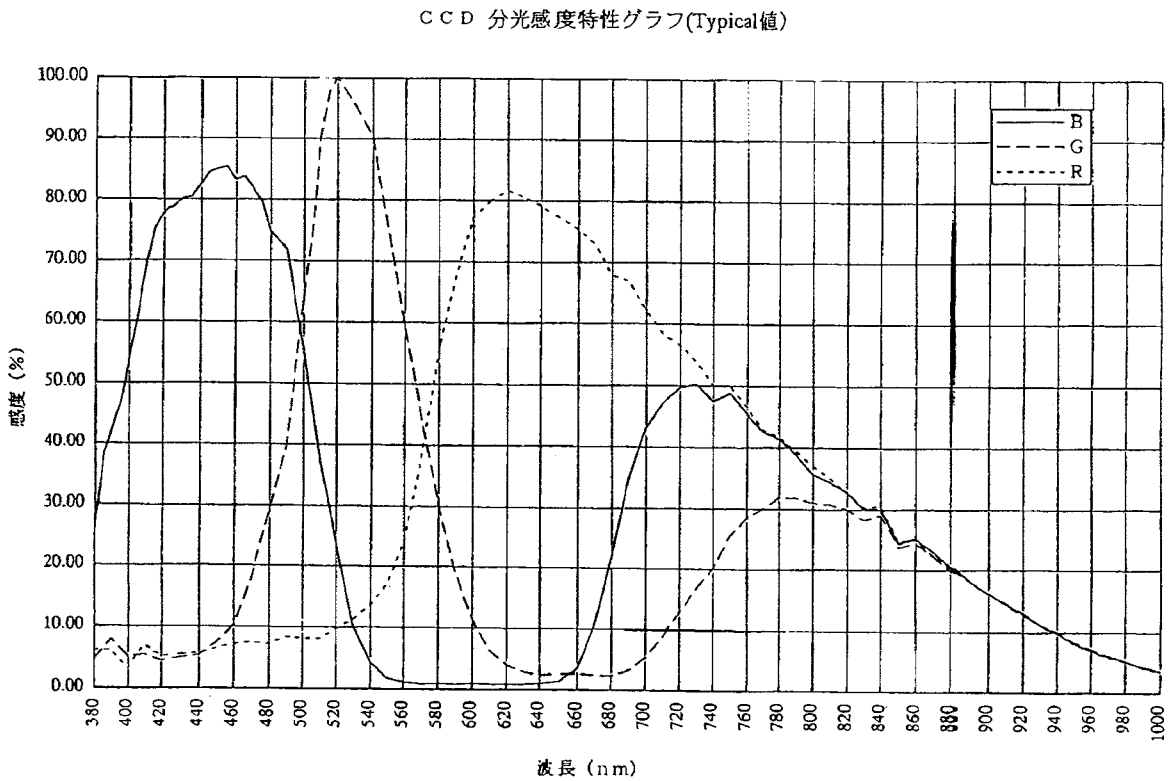


Fig.6-4 FUJIX DX-505A CCDカメラの分光感度特性

*Red, Green, Blue* 3チャンネルの分光感度特性曲線はかなり重複し、得られたRGB画像の3チャンネル信号の分離は困難なので、実計測の際、投影パターンは*Red*と*Blue*信号しか使わない。*Green*チャンネルは物体表面特性の補正として使う。

Fig.6-5 (第70頁) ~Fig. 6-10はカラー変調モアレの計測結果を示す。変形格子像からモアレパターンまでの処理過程は強度変調モアレと同じなので、ここでは省略し、変形格子像の実計測結果と解析結果のみを示す。

Fig.6-5はカラー変調変形格子像を示す。カラーパターンを表示するために、変形格子像の*Red, Green, Blue* 3チャンネルの成分をそれぞれFig. 6-6, Fig. 6-7, Fig. 6-8で表示する。

Fig.6-9は求めた変形格子像で、Fig. 6-10はその強度分布である。

Fig. 6-9により、変形格子像の縞次数は簡単に決定でき、更にカラー変調モアレパターン(もしくは強度変調モアレパターン)を簡単に求めることができる。

### 6.3 考察

本研究では指数関数で投影格子と観測格子の透過率の*Red, Green, Blue* 3チャンネルの成分をそれぞれ変調し、縞色はその次数に従って変化するモアレパターンを生成した。縞の色からその次数を簡単に決定することができる。これにより、今までのモアレにより3次元計測に最大の問題であった縞次数の決定問題を解決することができた。

提案したGチャンネル信号を用いてRとBチャンネル信号を補正する手法は、表面色が均一な物体に対して、一枚の画像により3次元計測を自動的に実現することができる。また、表面色が不均一な物体でも、第4章に提案した補正手法を用いて、二枚の画像により3次元計測を自動的に実現することができた。

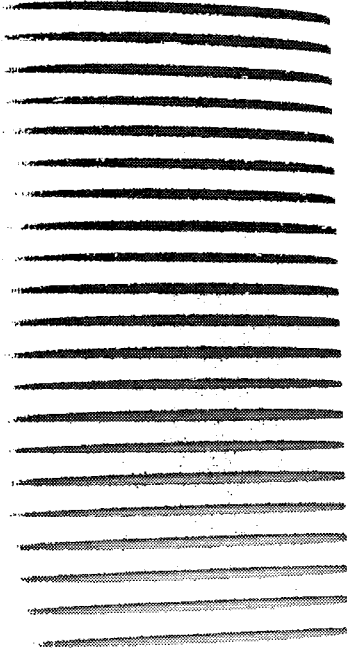


Fig.6-6 変形格子像の R 成分

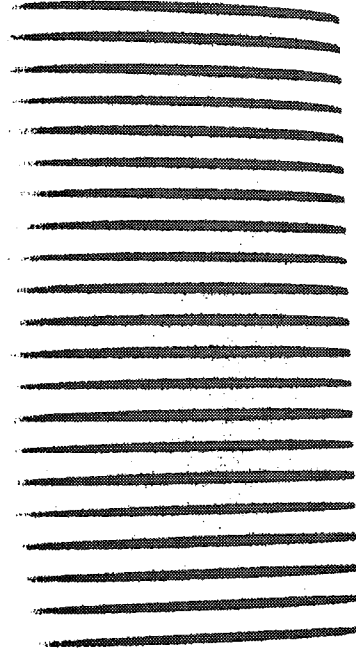


Fig.6-7 変形格子像の G 成分

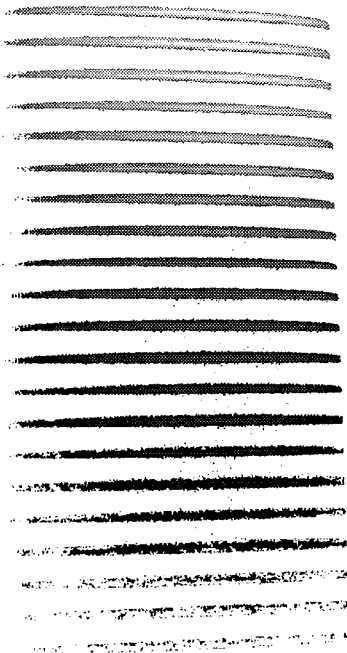


Fig.6-8 変形格子像の B 成分



Fig.6-9 強度付き変形格子像

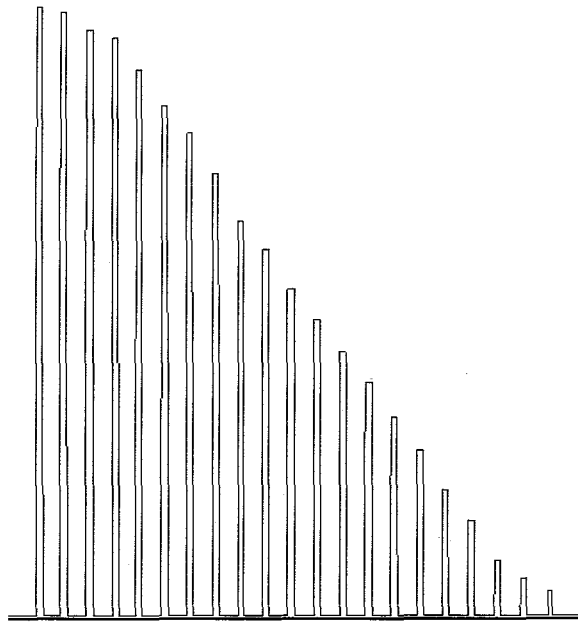


Fig.6-10 変形格子像のR成分の強度分布

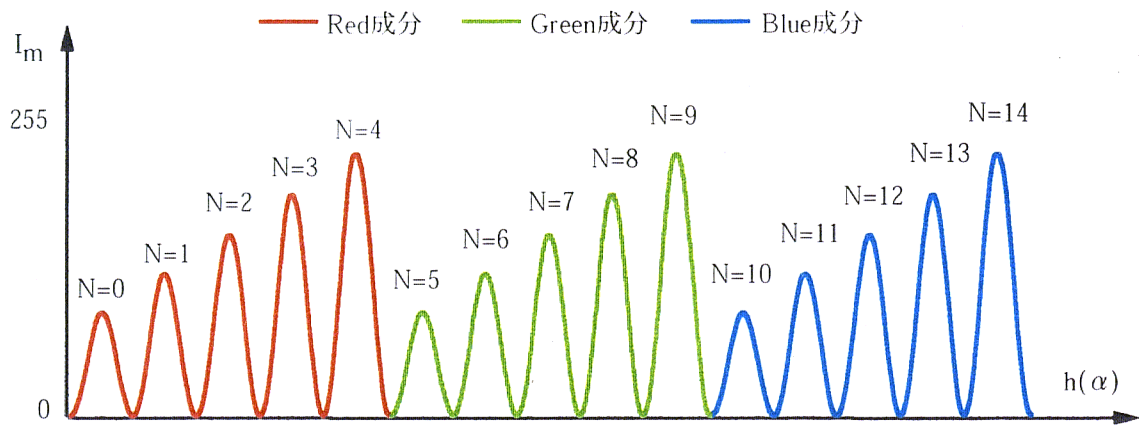
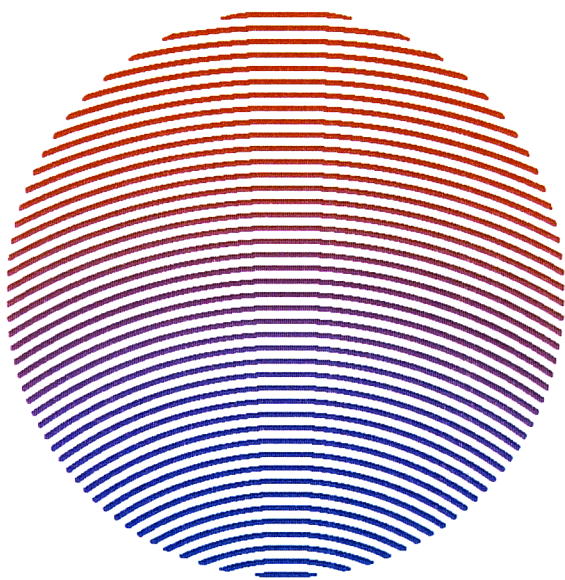


Fig.6-1 カラー変調モアレ縞の強度分布



(a) カラー変調格子像

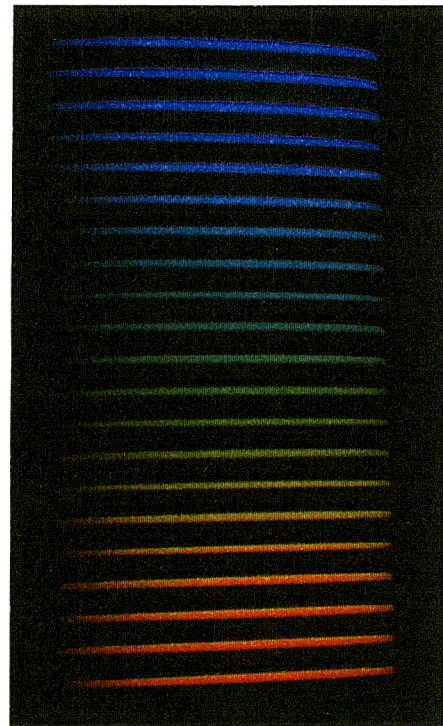
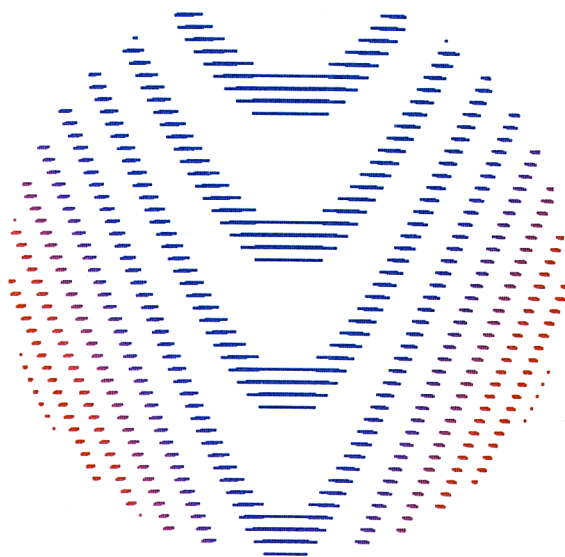


Fig.6-5 実測したカラー変調格子像



(b) カラーモアレパターン

Fig.6-2 カラー変調モアレ縞の強度分布

## 第7章 変調投影光による3次元計測の展開

最近では画素数が多く、A/Dコンバータビット数が多い高精度カメラが商品化されている。これから高分解能のカメラの利用により、計測精度は上がることが期待できる。本章ではまず1536×1024 pixel, 16-bitの高分解能CCDカメラを用いた計測結果を示す。

三角測量の原理により、モアレパターンに変調しなくても、強度変調変形格子像を直接解析することで3次元形状を求めることができる。本章では強度変調スリット光投影法を紹介する。

### 7.1 高精度CCDカメラにより計測

強度変調モアレの計測感度は、第3章3.3節で述べたように、計測できるモアレ縞の数に依存している。式(3-17)により、高分解能のCCDカメラを使うことによって、計測できるモアレ縞の数が増え、計測感度を向上させることができる。

本節ではApogee Instruments社の高精度CCDカメラAM16を用いた計測結果について述べる。

AM16の仕様は次の通りである。

イメージサイズ：最大1536×1024 pixel

デジタル出力：16-bit

レートノイズ：<25

上記のパラメータを式(3-17)に代入すると式(7-1)式が得られる。

$$e_s = \frac{4 \times 25}{2^{16}} \approx 0.15\% \quad (7-1)$$

理論的には、上記のカメラを用いて、0.15%の感度が得られるが、実際には、計測感度は投影光の精度に依存している。投影光では16ビットの感度が出ないので、上記の高精度は実現できない。

式(3-15)及び式(3-17)は縞の強度分解能に関する式である。8ビット強度分解能のCCDカメラを用いる計測システムでは、強度分解能は計測感度を左右する大きな要素であるので、強度分解能のみを考えれば問題がない。10ビット及び12ビット強度分解能のCCDカメラを用いる計測システムでは、カメラの画素数即ち空間分解能は計測感度を影響する大きな要素にな



る。この場合は、カメラの空間分解能を考えなければならない。

また、液晶プロジェクタの投影光を用いるときには、プロジェクタの空間周波数特性を考えなければならない。コサイン状の空間強度分布の投影光の最大空間周波数と最小空間周波数が制限される。この制限はシャノンの定理に基づく制限だけでなく、システムの光学特性も考えなければならない。

今使っている投影プロジェクターのパラメータは以下の通りである。

投影サイズ：640×480 pixel

感度：8-bit

実験の結果により、投影光の周期が8 pixel より小さければ、コサイン状の空間強度分布の投影光を出ないので、高精度カメラを用いても、投影光を正しく区別できなかった。

投影光の周期は8とすると、投影格子の数即ち変形格子像の縞の最大数は80本 ( $640/8=80$ ) を超えない。

Fig.7-1はAM16を用いた計測結果である。Fig.7-2(b)は変形格子像で、Fig.7-2(f)はその強度分布である。変形格子像の数は約70本ぐらいで、以前用いた8ビットのカメラから得られた変形格子像の倍以上になった。

Fig.7-2(d)は強度変調モアレで、Fig.7-2(h)はその強度分布である。モアレ縞の数は20本以上があるので、計測の誤差は5%以下になった。

強度・位相解析方法を使って、等高線の間も計測できる。その時計測の平均偏差は大幅に削減でき、最大計測誤差は5%以下である。

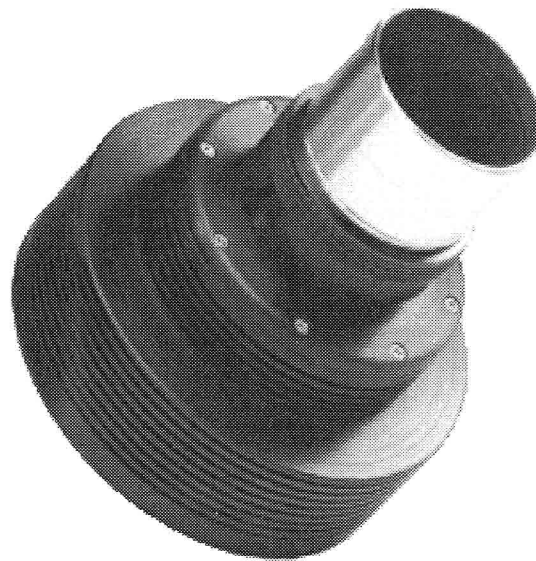
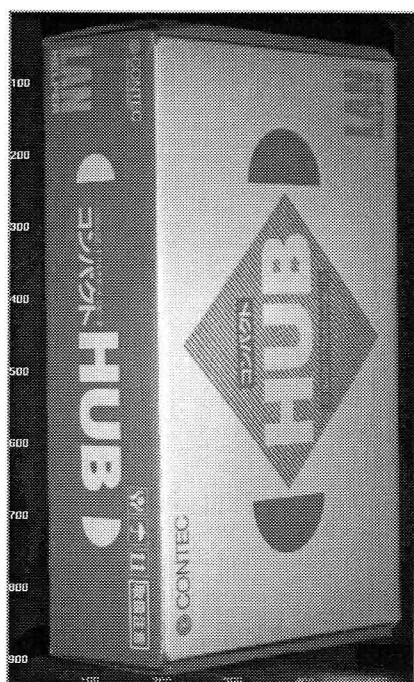
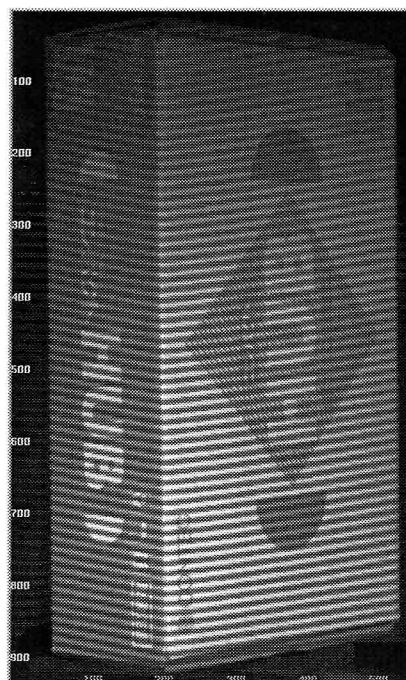


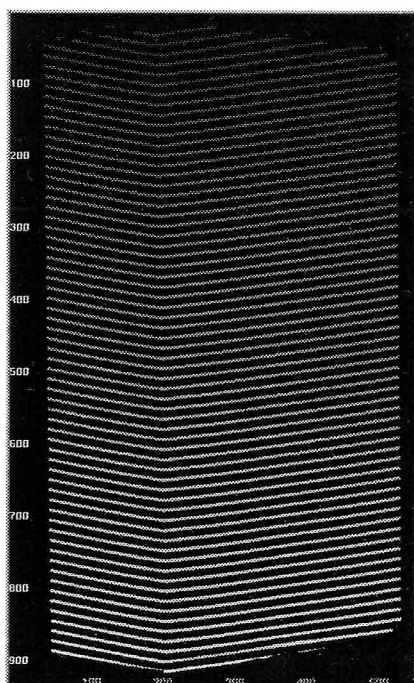
Fig.7-1 AM16 12-bit CCD Camrea



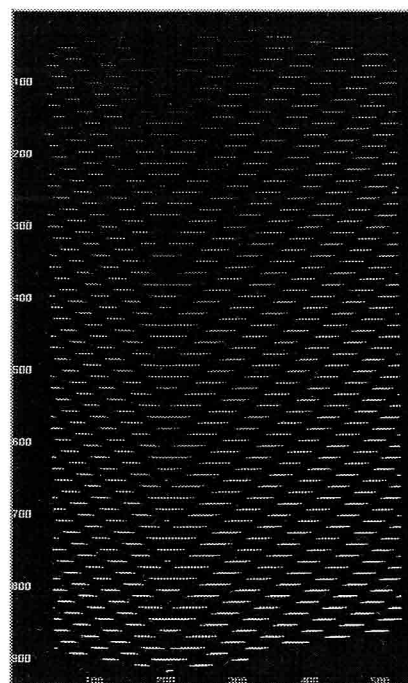
(a) 元画像



(b) 変形格子像

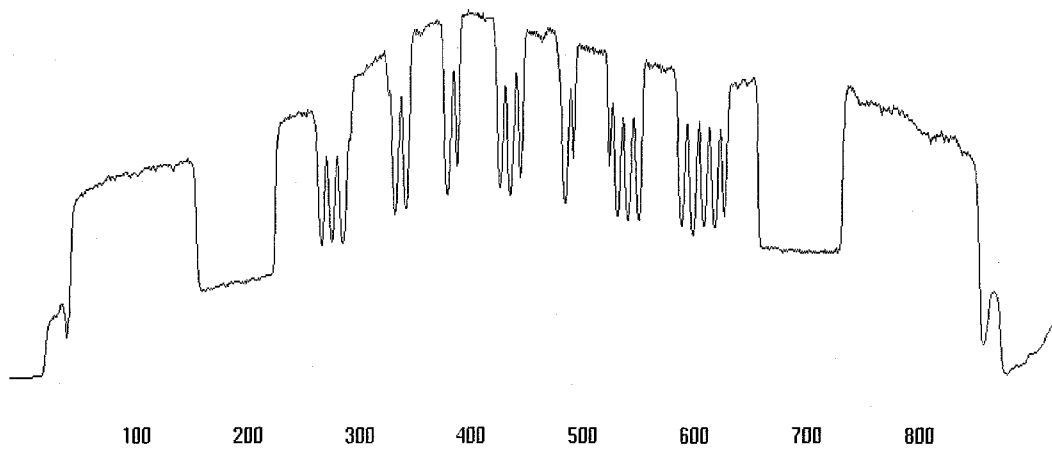


(c) 補正した変形格子像

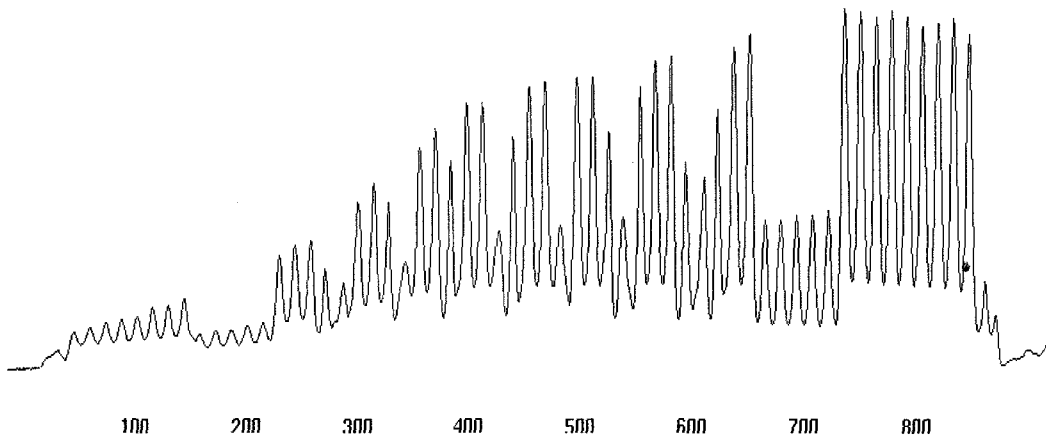


(d) 強度変調モアレ

Fig.7-2 AM16により計測した強度変調モアレパターンとその強度分布（その1）

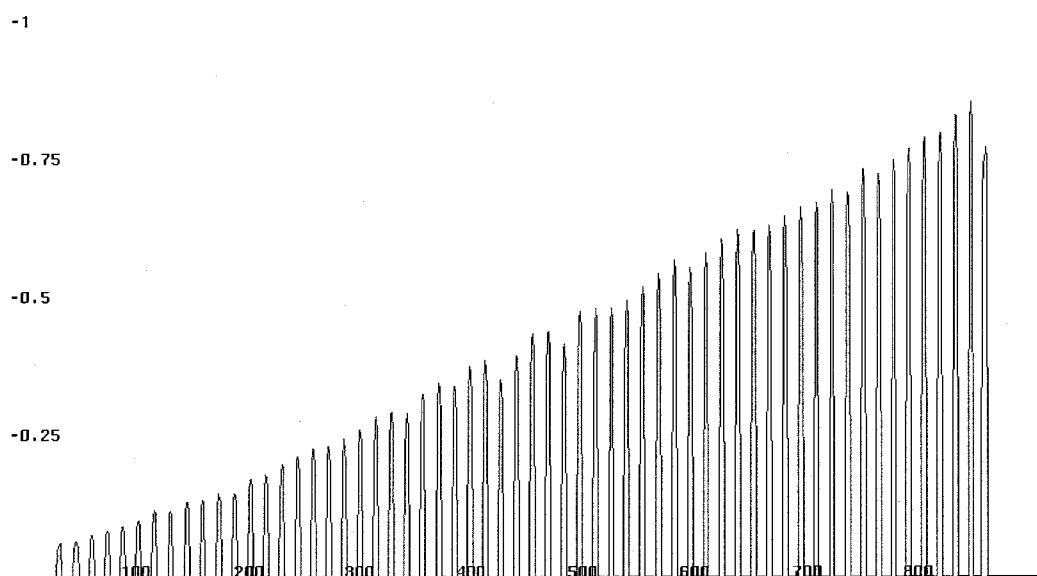


(e) 元画像の強度分布

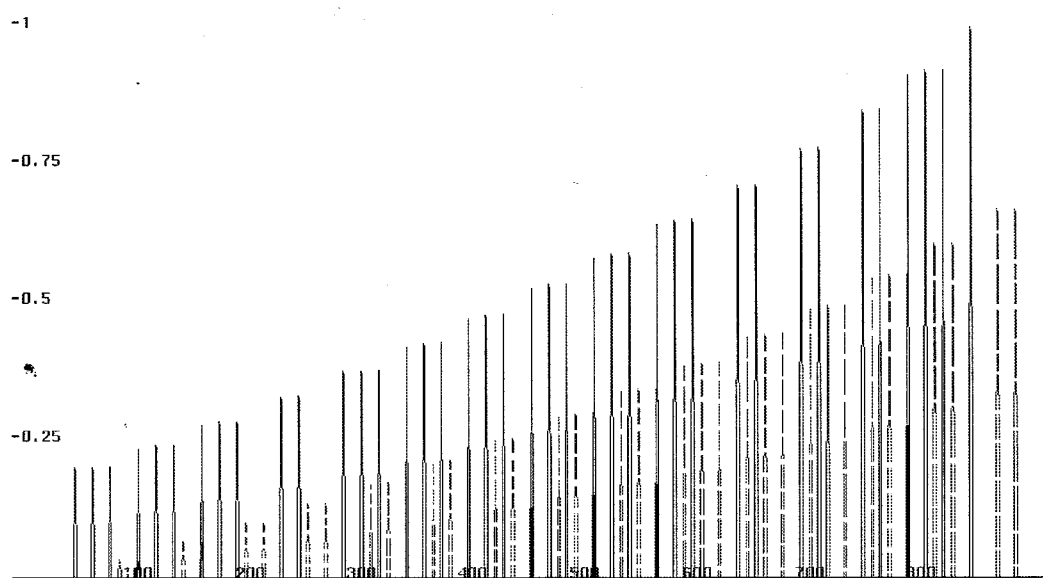


(f) 変形格子像の強度分布

Fig.7-2 AM16により計測した強度変調モアレパターンとその強度分布 (その2)



(g) 補正した変形格子像の強度分布



(h) 強度変調モアレの強度分布

Fig.7-2 AM16により計測した強度変調モアレパターンとその強度分布 (その3)

## 7.2 強度変調空間パターン光投影法

三角測量に基づく3次元計測方法には、空間パターン光投影法はよく使っている (Inokuchi 90)。従来法のカラーパターン光投影法や濃度傾斜変調パターン光投影法などの方法は物体の持つ色や表面反射特性などの影響を受け、安定性が悪く、分解能が高いレンジファインダを実現するのは困難であった。

グレイコードを用いた空間コード化パターン光投影法はコード化パターンの誤認識を避けることができ、物体の表面反射特性などに対して安定性の高い、高速な3次元計測が実現できる (Inokuchi 84, Sato 88)。

グレイコード化空間パターン光投影法などは二値画像の計測方法で、一回の計測には複数回の投影をしなければならない。例えば、伝統的なグレイコード化投影法では、 $2^N$ 本のスリット縞の次数を決定するためには、少なくとも $N$ 回投影し、 $N$ 枚の画像を撮る必要がある。グレイコード化空間パターン光投影法は伝統的なスリットパターン光投影法より、投影回数を削減し、計測のスピードを上げたが、それでも計測時間はかかった。

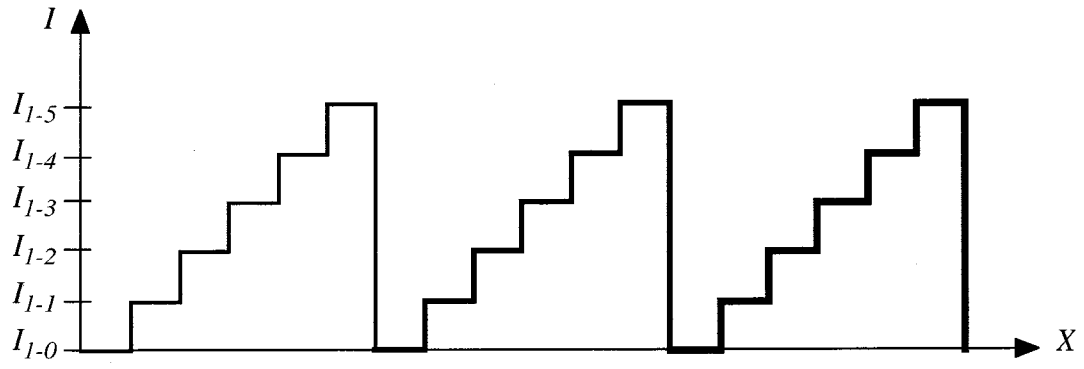
伝統的な二値画像式の空間パターン光投影法には、複数回の投影のかわりに、強度変調投影光を使うと、多値化画像が得られ、これにより計測精度あるいは速度を向上することができる。このような考え方に基づいて、私は強度変調空間パターン光投影法を提案する。

強度変調した投影光を用いると、一枚の画像により $M$ 階調の強度値を区別できれば、 $N$ 枚の画像から、 $M^N$ 本のスリット縞の次数を決定できる。表面特性が複雑な物体に対して、一枚の補正用の画像を加えて、 $N$ 枚の画像から、 $M^{N-1}$ 本のスリット縞の次数を決定できる。従来空間パターン光投影法では、 $N$ 回の投影で $2^N$ 本のスリットが得られたことと比べて、提案手法は同じ投影回数で計測精度を大幅に上げていることが分かる。

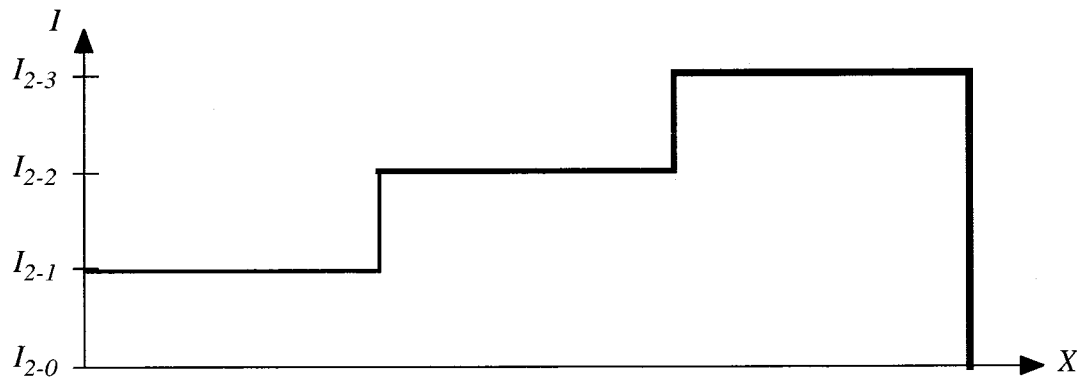
言い換えると、 $N$ 本のスリットを得るためには、従来空間パターン光投影法は $\log_2 N$ 回の投影を必要とし、強度変調空間パターン光投影法は $\log_M N$  ( $M > 2$ ) 回の投影しか必要としない。同じ計測精度ならば、計測時間を減少できることが分かる。

これは強度変調空間パターン光投影法の基本思想である。Fig.7-3は本手法の計測原理を示す。

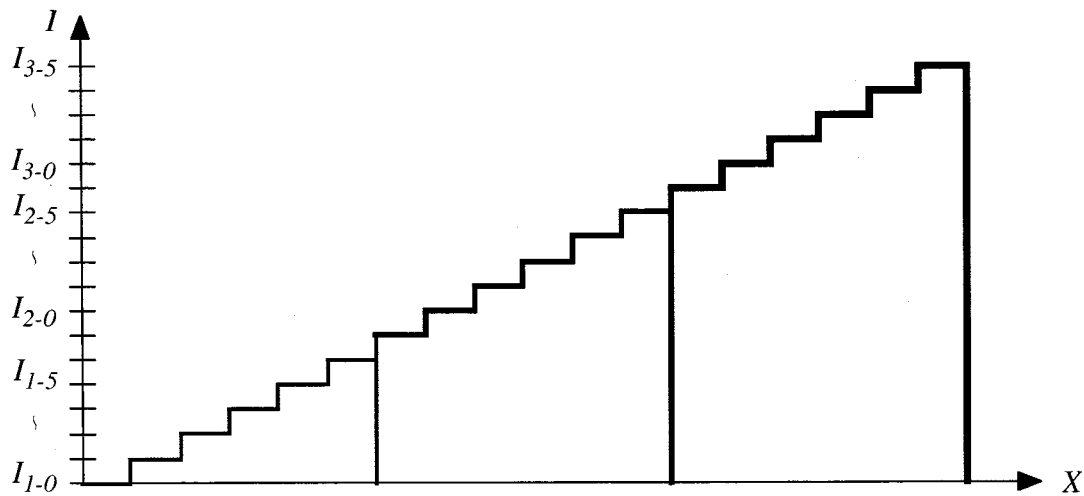
簡単な応用例として、Fig.7-4は強度変調空間パターン光投影法の計測結果を表す。物体は石膏の六角柱である。簡単にスリット光の強度変調の階調数 $M$ を5とすると、Fig.7-4(a)とFig.7-4(b)のようなパターンで二回投影し、Fig.7-4(c)とFig.7-4(d)のような画像が得られ、2回の投影で25本のスリットパターンを決定できる。



(a) 投影パターン1

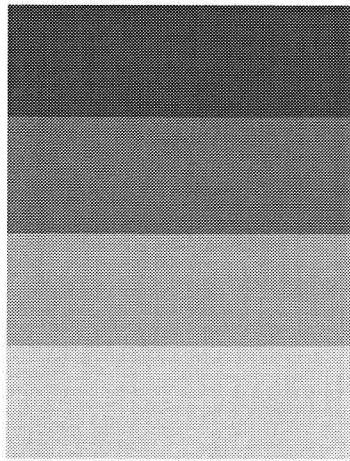


(b) 投影パターン2

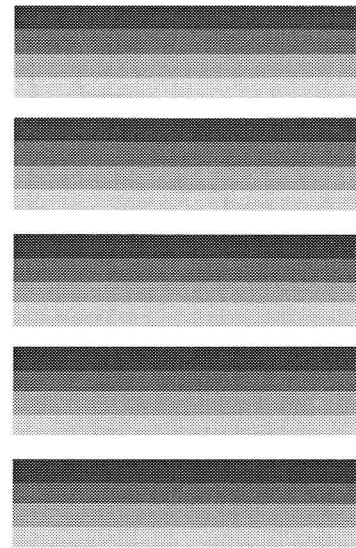


(c) 投影パターン1と投影パターン2より得たパターンの複合

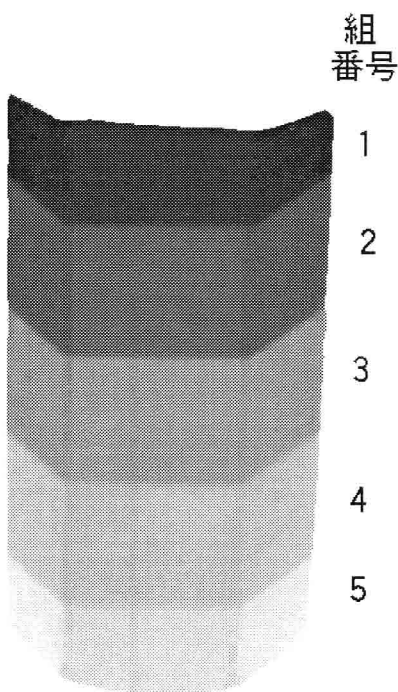
Fig.7-3 強度変調空間パターン光投影法の計測原理



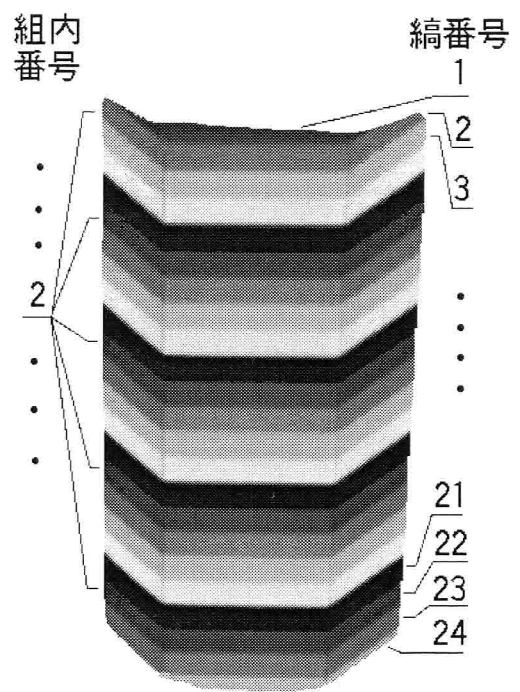
(a) projection pattern A



(b) projection pattern B



(c) moire pattern with projection pattern A



(d) moire pattern with projection pattern B

Fig.7-4 強度変調空間パターン光投影法の計測例

### 7.3 変調変形格子像の直接解析による3次元復元

第6章までの解析方法はすべてモアレパターンによる3次元復元であるが、実際に、変形格子像の次数が分かると、三角測量の原理により変形格子像から直接3次元復元することもできる。

Fig.7-5により式(7-2)が得られる。

$$\frac{h}{l} = \frac{d - (x_1 + x_2)}{x_1 + x_2} \quad (7-2)$$

この式により、式(7-3)に示したように奥行き値 $h$ を算出することができる。

$$h = l \left( \frac{d}{x_1 + x_2} - 1 \right) \quad (7-3)$$

$x_1$ と $x_2$ はそれぞれ注目点が投影格子上の座標値と得られた画像上の座標値である。このとき、 $x_2$ は得られた画像から導出できるが、 $x_1$ は直接求めることができないので、未知数となる。従来法では、画像解析から $x_1$ を求めないので、式(7-3)の実用は困難である。

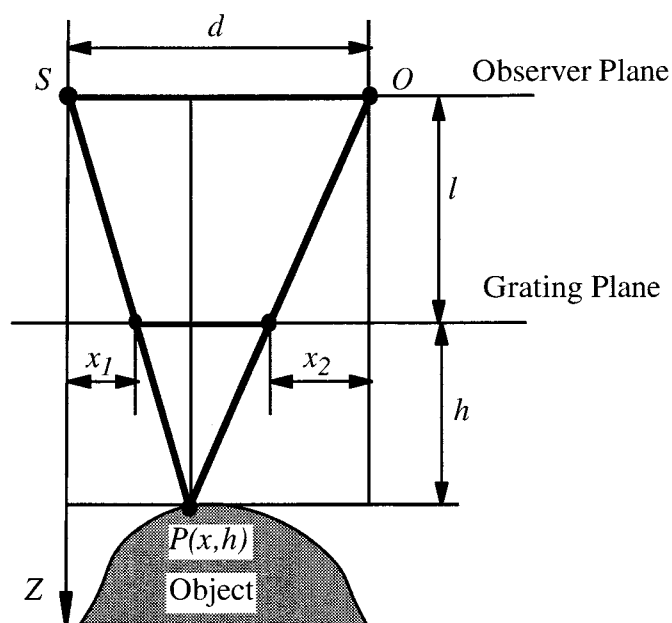


Fig.7-5 計測システム座標関係



強度変調モアレでは、式(4-5)から $x_i$ を簡単に求めることができる。これは縞の強度値から $x_i$ を求めるので、奥行き値 $h$ は簡単に算出することができる。

Fig.7-6はFig.7-2(c)に示した変形格子像から式(7-3)により直接3次元復元を行ったの結果である。

直接復元はモアレに変換する必要がないので、高速な処理を実現することができる。また、変形格子像の空間周波数はモアレパターンより高いので、直接復元手法の計測感度もモアレ法より高い。これについて、Fig.7-6とFig.7-2を比較すれば分かると思う。

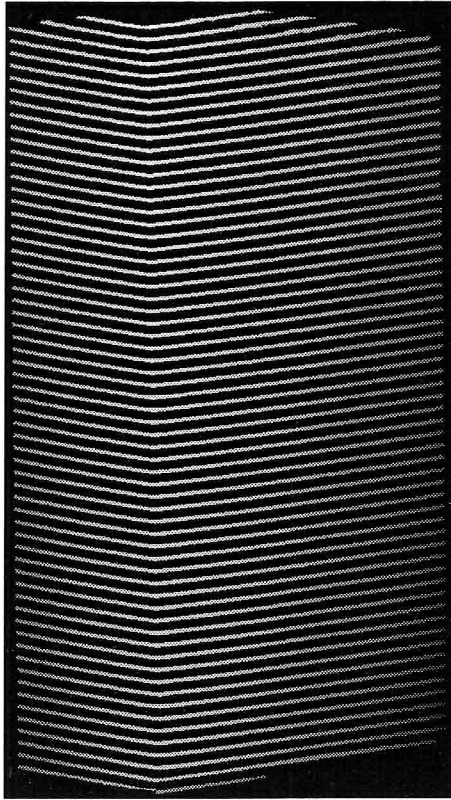
しかし直接復元手法の奥行き計測精度は直接変形格子像の強度計測精度に依存しているので、計測誤差が出やすいと考えられる。例えば、Fig.7-6(a)の一番下の縞は誤復元された。この縞が紙箱の沿いにあり、半周期未満であるので、復元するとき、撮られた部分の最大値を振幅となり、強度が弱くなった。これは誤復元の原因となる。

## 7.4 考察

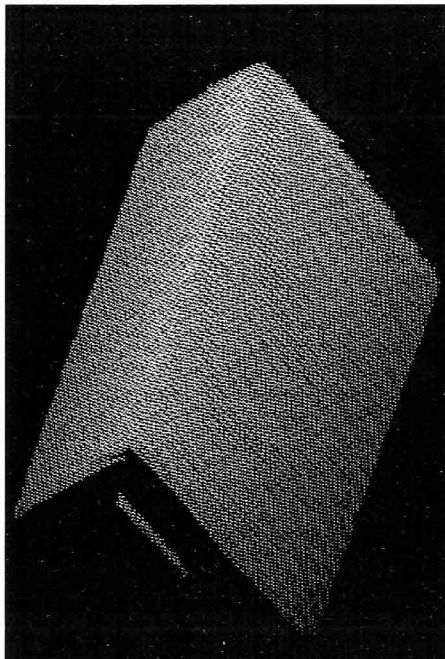
本章で示したデータにより、強度分解能及び空間分解能の高いCCDカメラを用いれば、強度変調モアレの計測感度を向上することができる。しかし、投影プロジェクタの強度分解能及び空間周波数特性を考えなければならない。

本研究では提案した変調投影光による計測方法は、強度変調モアレのみに利用できるのではなく、他の3次元計測方法でも有効となる。一つの応用例として、強度変調空間パターン光投影法を提案した。強度変調投影光の使用によって、計測精度を向上させ、計測時間を減少することができた。

変形格子像の縞次数を決定できれば、モアレパターンに変調せずに、三角測量の原理により変形格子像から直接3次元復元することができる。直接復元とモアレパターンによる復元と比べれば、前者は3次元計測の速度は向上されたが、計測誤差が生じやすい。後者は前者の3次元計測の速度よりも落ちるが、計測誤差が出にくい。



(a) Fig.7-2(c)から復元した距離画像



(b) 三次元表示

Fig.7-6 変形格子像から直接3次元復元の例

## 第8章 結 論

3次元画像計測はすでに幅広く実用されているが、高速、高精度、簡単かつ実用し易い3次元計測手法の開発は依然としてマシンビジョン、光学などの分野で大きなテーマである。

本研究目的は少数回（1回か2回）の投影で3次元計測を実現することであった。

本論文では研究背景、理論基礎、実験システムと実験結果、計測精度分析の順で提案手法を論じた。また実応用における問題の解決手法を論じた。

第1章では、本研究の背景として、3次元計測の諸方法の特徴点と問題点を述べ、現在の3次元画像計測の研究動向を分析した。これらの分析により、本研究の目的と特徴及び基本発想を論じ、最後に本論文の構成を説明した。

第2章では、本研究のベースであるモアレによる3次元計測の計測原理を紹介し、従来法のモアレトポグラフィの致命的な問題である、つまりモアレ縞の次数が決定できないために、モアレ縞と奥行きとの間に一対一の対応関係がないという問題を分析した。

これらの問題解決するために、強度変調モアレを提案した。

第3章では、まず強度変調モアレの理論基礎を述べた。強度変調モアレの基本的な考え方は、従来法のモアレパターンにもう1次元——強度軸を増やし、モアレパターンの各縞の強度が物体の奥行きと一対一の対応関係を持たせる。

強度が奥行きと一対一の対応関係が持っているモアレパターンを生成するために、指数関数で変調したコサイン状の空間強度分布の投影光と透過率が指数関数状に変化する観測格子を提案した。提案した投影光は、従来法の投影格子の透過率を指数関数で変調するにより実現した。観測格子は画像処理で実現した。

第4章では、強度変調モアレによる3次元計測手法を実用する際に生じる諸問題の解決手法を提案した。

計測レンジの拡張のために、指数・線形変換法を提案した。指数関数で強度変化する投影光の代わりに線形変化の投影光を使い、画像を撮る。撮った画像をソフトで強度が指数変化する投影光を用いた画像に戻す。そうすると、普通の8ビットのCCDカメラを用いて、必要とするレンジの画像を得られた。

物体の表面特性が計測精度に対する影響を避けるために、本研究では一枚の画像による補正手法と二枚の画像による補正手法を提案した。一枚の画像による補正手法では、物体の表面特性周波数分布と変形格子の周波数分布が重ならなければ、変形格子の周波数成分を抽出

でき、変形格子像を補正できる。一枚の画像による補正が難しい場合に、二枚の画像による補正手法を提案した。投影格子を使わなかったもう一枚の画像を用いて、変形格子像を上手く補正することができた。

上記の諸問題の解決には、提案した強度変調モアレ手法が実用できることを証明した。

第5章では、モアレによる3次元計測の計測感度を向上させる手法として強度・位相解析手法を提案した。提案手法は、まず強度解析によりモアレパターンを幾つかの奥行き領域に分割し、マクロの奥行きを確定する。後で、各領域では、位相解析により細かい奥行きを算出する。この手法の利用により、物体のすべての点は計測ができるようになり、計測感度を大幅に向上することができた。また、従来の位相解析法において画像強度・位相・奥行き三者の間に一対一の対応関係がないという問題も解決された。

第6章では、強度変調モアレ手法の拡張として、カラー変調モアレを提案した。

指数関数で投影格子と観測格子の透過率のRedとGreen及びBlue成分をそれぞれ変調し、縞色が次数に従って変化するモアレパターンを生成した。縞の色からその次数を簡単に決定できた。これにより、今までのモアレにより3次元計測で問題であった縞次数の決定問題を解決することができた。

提案したGチャンネル信号を用いてRとBチャンネル信号を補正する手法は、表面色が均一な物体に対して、一枚の画像により3次元計測を自動的に実現することができる。また、表面色が不均一な物体でも、第4章に提案した補正手法を用いて、二枚の画像により3次元計測を自動的に実現することができた。

第7章では、まず強度分解能及び空間分解能の高いCCDカメラを用いた計測結果を示した。続いて、強度変調投影光法の他の利用案として、強度変調空間パターン光投影法と変形格子像の直接解析法を提案した。

本章の解析により、以下のことが分かった。高分解能CCDカメラを用いれば、強度変調モアレの計測感度を向上することができる。しかし、投影プロジェクタの強度分解能及び空間周波数特性を考えなければならない。

強度変調投影光の使用によって、計測精度を向上し、計測時間を削減することができた。

強度変調投影光を用いて撮った変形格子像は、縞の次数が決定できたので、モアレパターンに変調せず、三角測量の原理により変形格子像から直接3次元復元することができる。

以上の論述をまとめて、以下のような結論が得られる。

1. 本研究では強度変調モアレを提案した。指数関数状に投影格子と観測格子の透過率を変調することで、縞強度がその次数に正比例するモアレパターンが得られ、モアレ縞の強度解析により、縞の次数が決定された。

これにより、従来法モアレによる3次元計測の縞次数の決定問題を解決し、モアレ縞と物体の奥行きとの間に一対一の対応関係を求め、計測の自動化も実現できた。

2. 計測感度を向上させるために、本研究では強度・位相解析法を提案した。モアレ強度解析即ち縞の振幅の大きさによって、モアレパターンがいくつかの奥行き領域に分割された。これにより物体の概略形状を決定することができる。さらに各奥行き領域で、位相解析を行うことによって、各点のより正確な奥行き値を算出することができる。これにより、モアレ計測の縞次数をモアレパターンから一意的に決定でき、モアレ縞の自動解析が可能になった。

3. 物体の表面特性などにより計測精度に対する影響を避けるために、画像強度の補正手法を提案した。提案手法を用いて、テクスチャや色の付いてる物体の計測もできることを示した。

4. 強度変調モアレ法の拡張として、カラー変調モアレと強度変調空間パターン光投影法及び変形格子像の直接解析法を提案した。これにより、普通の2値化画像に基づく方法では、強度もしくはカラー変調手法を投入すれば、計測速度を向上させるもしくは計測精度を向上させることができる。

5. 本提案諸手法では、汎用の液晶プロジェクタと市販のCCDカメラなど簡単な設備を使って、モアレ3次元計測の自動化を実現できることを示した。

本研究の特徴の一つは強度変調格子投影光の使用である。強度が均一な投影光により、強度変調投影光は付加的な情報量を持つので、このような計測が可能になった。

本研究のもう一つの特徴はモアレパターンの強度・位相解析方法を使うことである。今までのモアレパターンの解析方法は二値化画像を用いた等高線解析すなわち単純な強度解析であった。あるいは位相シフトなど単純な位相しか使っていなかった。ここで提案した強度解析と位相解析を融合する解析方法は、同じ計測システムで、計測の精度を向上させることが可能になった。

今後の課題として、次の点が挙げられる。

1. 提案手法を製品化させ、リアルタイムの強度変調投影光による3次元計測システムを構成する。提案手法の今までの研究結果では、画像計測は非常に速く、動物体の計測はできたが、画像処理プログラムはまた不十分で、リアルタイム3次元表示はまたできなかった。プログラムをもっと工夫して、リアルタイム3次元表示を実現するのは今後の課題の一つだと思う。

2. カラー変調手法の改善。RGB3チャンネル信号の総合影響の探明、3チャンネル信号を利用する物体の表面特性の補正手法などは今後更に検討する必要がある。

## 参考文献

- ( Asada 94 ) 浅田, 藤原, 松山: 多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-DII, No.6, pp.1048-1058, June, 1994.
- ( Arai 95 ) Y.Arai, S.Yokozeki.and.T.Yamada : Fringe-scanning method using a general function for shadow moire, APPLIED OPTICS, Vol.34, No.22, pp.4877-4882, 1995
- ( Araki 91 ) 荒木: 高速三次元形状計測, 画像ラブ, Vol. 2, No. 7, pp/ 20-25, 1991
- ( Carrihill 85 ) B. Carrihill, R. Hummel: Experiments with the Intensity Ratio Depth Sensor, Computer Vison, Graphcs and Image Processing, pp. 333-358, 1985
- ( Deguchi 96 ) 出口: コンピュータビジョンのための幾何学動画像の扱い, 情報処理学会誌, Vol 37, No.8, pp.759-767, 1996
- ( Fujihara 95 ) 藤原, 大谷, 吉澤: LCD用ガラス基板平坦度計測法, 第16回光波センシング技術研究会, pp.109-116, 1995
- ( Fujimoto 89 ) 藤本, 黒木, 松永, 中岡, 仲田: レーザスリット光走査による電子格子モアレ縞画像の形成と簡易凹凸判定, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp.46-57, April. 1989
- ( Haibo 94 ) Z.Haibo, W.Xiaoping : 3-D shape measurement with phase-shift and logical moire method, Guangxue Xuebao/Acta Optical Science, Vol.14, No.4, pp.408-411, 1994
- ( Hu 97 ) C. Hu, Y. Qin, "Digital color encoding and its application to moire technique," Appl. Opt., Vol.36, No.16, pp3682-3685, Jun.1997
- ( Inokuchi 84 ) S. Inokuchi, K. Sato, F. Matuda: Range-imaging in renege images, Proc. 7th ICPR, pp806-808, 1984
- ( Inokuchi 90 ) 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 182, 昭晃堂 (1990)
- ( Inokuchi 95 ) 井口: 三次元形状計測の最近の動向, 計測と制御, Vol.34, No.6, 429/434 (1995)
- ( Kato 91 ) 加藤, 石塚, 山口, 中楯: 位相シフト電子モアレ法による実時間縞画像解析, レーザ科学研究, pp160-162, No.13, 1991
- ( Lu 95 ) 盧, 山口, 井口: 濃度差モアレトポグラフィ, 第16回光波センシ

- グ技術研究会, 117/124 (1995)
- ( Lu 96.4 ) 盧, 山口, 井口, “強度変調モアレによる三次元計測,” 第35回パターン計測部会研究会資料, No.1, pp.1-6, Apr. 1996
- ( Lu 96.8 ) C. Lu, A. Yamaguchi, S. Inokuchi: 3-D Measurement using Intensity Modulated Moire Topography, 1996 International Workshop on Interferometry(IWI'96), pp.127 - 128, Wako, Japan, Aug. 1996.
- ( Lu 97.3 ) 盧, 山口, 井口: 強度変調モアレ縞の強度と位相との二重解析による高精度高速度三次元計測, 信学総大, 情報・システム2, No.D-11-154, pp.154, Mar. 1997
- ( Lu 97.6 ) 盧, 山口, 井口: 強度変調モアレに基づく高速簡易三次元計測, 第3回画像センシングシンポジウム講演論文集, No.F-2, pp.207-212, Jun. 1997
- ( Lu 98.5 ) 盧, 山口, 井口: カラー変調モアレ, 第42回システム制御情報学会研究発表会, pp.579-580, May. 1998
- ( Lu 98.7 ) 盧, 山口, 井口: 強度変調モアレによる三次元計測, 計測自動制御学会論文集, pp.692-697, Vol.34, No.7, 1998. (一位著者)
- ( Lu 98.8 ) C. Lu, A. Yamaguchi, S. Inokuchi: Intensity Modulated Moire and its Intensity-Phase Analysis, The 14th International Conference on Pattern Recognition (ICPR98), pp.1791-1793, Brisbane, Australia, Aug. 1998.
- ( Lu 98.9 ) 盧, 山口, 井口: 強度変調モアレ縞の強度・位相解析による三次元計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-A, No.9, pp.1257-1264, 1998.
- ( Matsumoto 92 ) 松本: レーザモアレ法を用いた非接触3次元形状測定技術, 応用機械工学, 153/159, No.6, 1992
- ( Matsumoto 96 ) 松本, 北川, 峯本: 干渉縞投影型モアレ法を用いた高精度三次元測定法の精度評価, 第39回自動制御連合講演会, pp.393-394, 1996.10
- ( Mauvoision 94 ) G. Mauvoision, F. Bremand and A. Lagarde: Three-dimensional shape reconstruction by phase-shifting shadow moire, Applied Optics, Vol. 33, No. 11, pp. 2163-2169, 1994
- ( Matsuyama 98 ) 松山, 久野, 井宮: コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 1998, 6
- ( Meadows 70 ) D.M.Meadows, W.O.Johnson, and J.B.Allen: Generation of Surface Contours by Moire Pattern, APPLIED OPTICS, Vol. 9, No. 4, pp. 1467-1472, 1970
- ( Moire 84 ) モアレ研究会: モアレ計測とその応用—モアレ研究会記念論文集, 474 (1984)
- ( Moire 86 ) モアレ・三次元計測研究会: モアレ・三次元計測研究会年報, No.4,

- 1986
- ( Nakajima 97 ) 中島, 大井: カラー格子モアレ法による3次元計測, 1997年電子情報通信学会総合大会, pp.153, 1997
- ( Nayar 95 ) Nayar, Watanabe, Noguchi: Real-time focus range finder, Proc. of 5th ICCV, pp. 995-1001, 1995
- ( Okutomi 93 ) Okutomi, Kanada: A multiple-baseline stereo, IEEE Trans. PAMI, Vol.15, No.4, pp.353-363, 1993
- ( Sibata 96 ) 芝田, 中村, 桑島: 実時間縞解析による形状計測システム, O plus E, pp.100-108, 1996.9
- ( Post 94 ) D. Post, B. Han and P. Ifju: High Sensitivity Moire, 444, Springer - Verlag , New York (1994).
- ( Simitu 66 ) 清水, モアレ縞の光学とその応用, 精密機械, pp.857-864, No.32, 1966
- ( Suziki 91 ) 鈴木 ほか: モアレ縞による三次元計測, 精密機械, Vol. 40, No.9, pp. 746-753, 1974
- ( Sato 88 ) 佐藤, 井口: 液晶レンジファインダー—液晶シャッタによる高速距離画像計測システム—, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-D, No.7, pp1249-1257, 1988.
- ( Subbarao 94 ) Subbarao, Surya: Depth from defocusing: A spatial domain approach, Int. J. of Computer Vision, Vol. 13, No. 3, pp. 271-294, 1994
- ( Takasaki 70 ) H.Takasaki: Moire Topography, APPLIED OPTICS, Vol. 9, No. 6, pp. 1467-1472, 1970
- ( Takasaki 71 ) 高崎: モアレトポグラフィ—, 画像技術, 1971年1月号, pp.27-41, 1971
- ( Takemura 97 ) 竹村, 松山: 多重フォーカス画像を用いた実時間計3次元距離測, 情報処理, CVIM103-5, Jan. 1997
- ( Tanaka 93 ) 田中: 光学式距離計測システムの設計, トランジスタ技術, July, pp.288-303, 1993
- ( Xu 96 ) Xu, Zhang: Epipolar Geometry in stereo, Motion and Object Recognition, A Unified Approach, Kluwer Academic Publishers, 1996
- ( Xu 98 ) 徐, 辻: 3次元ビジョン, 共立出版社, 1998.4
- ( Yachida 90 ) 谷内田: ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990
- ( Yokoyama 96 ) 横山, 佐藤, 芦ヶ原, 井口: 無調整型ホトVLSIセンサを用いた実時間距離画像計測—シリコンレンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-II, No.9, pp. 1492-1500, 1996
- ( Yoshizawa 89 ) 吉澤, 大谷: サブミクロン感度をもつモアレトポグラフィ法, 精密工学会誌, Vol.55, No.1, 1989



参考文献

---

(Yoshizawa 90) 吉澤：光三次元計測，新技術コミュニケーションズ (1993)

(Yoshizawa 91) 吉澤：最近のモアレ応用計測，光学，Vol. 20, No. 3, pp. 151-157, 1991

(Yoshizawa 96) 吉澤：最近の光3次元計測，O plus E, pp.80-87, 1996.9

## 研究業績リスト

### 著 書

1. 盧存偉, 錢捷: 計測と制御用コンピュータ原理及び応用システム設計, 河海大学出版社, 1992.10

### 論 文

1. 盧存偉: 石炭地面生産システムのワンビットコンピュータ制御, 泉城コンピュータ (中国), No.1, pp.20-23, 1986.
2. 盧存偉: MCS-51 ワンビットコンピュータを用いたフラッシュ溶接システムの適応制御, 自動化与儀表 (中国), Vol. 2, No. 3, pp.12-15, 1987.
3. 盧存偉: 可変構造制御理論の応用研究及び実用可変構造適応制御アルゴリズム, 電気自動化論文集 (中国), pp. 685-692, 1988.
4. 盧存偉: コンピュータ制御システムの実用外乱対策, 自動化与儀表 (中国), Vol.4, No. 2, pp. 36-39, 1989.
5. 盧存偉: カム型フラッシュ溶接機の技術改造, 溶接技術(中国), No. 5, pp.12-15, 1989.
6. 盧存偉: ポンプ用交流モーターの省エネ運行分析, 自動化与儀表 (中国), Vol. 9, No. 6, pp. 35-37, 1994.
7. 盧存偉: 給水システムの可変構造制御, 自動化与儀器儀表 (中国), No. 4, pp.30-32, 1995.
8. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレによる三次元計測, 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 7, pp. 692-697, 1998.
9. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレ縞の強度・位相解析による三次元計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-A, No.9, pp.1257-1264, 1998
10. Cunwei Lu, Seiji Inokuchi: Intensity-Modulated Moire Topography, Applied Optics. (投稿中)

## 学会発表

中国の学会：(省略)

日本の学会：

1. 盧存偉, 張逸芳, 加藤博一, 井口征士: 大比重の泥水で満ちた立坑形状の超音波計測, 第39回システム制御情報学会研究発表会論文集, pp.325-326, 1995.
2. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 濃度差モアレトポグラフィ, 第16回光波センシング技術研究会講演論文集, pp.117-124, 1995.
3. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレによる三次元計測, SICE第35回パターン計測部会研究会, 1996.
4. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレ縞の強度と位相との二重解析による高精度高速度三次元計測, 信学総大, 情報・システム2, no.D-11-154, pp.154, Mar. 1997.
5. 盧存偉, 山口証, 井口征士: 強度変調モアレに基づく高速簡易三次元計測, 第3回画像センシングシンポジウム講演論文集, no.F-2, pp.207-212, Jun. 1997.
6. 盧存偉, 山口証, 井口征士: カラー変調モアレ, 第42回システム制御情報学会研究発表会論文集, pp.579-580, 1998.

## 国際会議

1. Cunwei Lu, Akasi Yamaguchi, Seiji Inokuchi: 3-D Measurement by Intensity Modulation Moire Topography, 1996 International Workshop on Interferometry (IWI'96), no.P26, pp.127-128, Wako, Japan, Aug. 1996.
2. Cunwei Lu, Akasi Yamaguchi, Seiji Inokuchi: Intensity Modulated Moire and its Intensity-Phase Analysis, The 14th International Conference on Pattern Recognition (ICPR98), pp.1791-1793, Brisbane, Australia, Aug. 1998.

特 許

1. 盧存偉, 蘇学成, 徐慶辛, 他: フラッシュ溶接機の二次電圧コンピュータ制御器, No. 87201532.7, 1987.
2. 盧存偉, 錢捷: 給水システムのコンピュータ可変構造制御システム, No. 93110314.7, 1993.

## 謝 辞

本研究を行う機会を与えて下さり、日頃から研究・生活の面で細やかな御助言、御指導を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科井口征士教授に心から感謝いたします。

1994年夏中国から大阪大学に来た際、私は画像関係の音痴でした。来日当初は、客員研究員として経験を積んで帰国する予定ですが、井口先生から本学位論文へのチャレンジチャンスを賜りました。この数年間、井口先生は研究方針を始め実験方法まで幅広い面で何時も御丁寧に御指導を賜りまして、研究室の充実した研究設備を自由に使わせて頂きました。また、国際会議はじめ多くの学会や研究会への参加して国内外の優秀な研究者の方々と自由に討論できる機会を与えていただきました。井口先生がおられなければ、私はまだ画像関係の音痴で、本論文はあり得ませんでした。ここに改めて心から感謝の意を表させていただきます。

本論文をまとめるにあたって、谷内田正彦教授、西田正吾教授には、詳細御指導、御検討を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学への留学チャンスを賜りました畑田耕一前副学長（元基礎工学部学部長、現福井工業大学）、北山辰樹教授、中国山東鉱業学院大学霍万庫学長、王徳民済南分院学長、頼昌干電気工程系主任、張逸芳教授、徐慶辛教授、王心宏教授、黄復興総工程師に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、数々の貴重な御指導を頂きました和歌山大学沼田卓久教授に厚く御礼申し上げます。

辻本浩章助教授、加藤博一講師、真鍋佳嗣助手、古川久生助手には、本研究を遂行する上で、数々の有益な御討議、御鞭撻を頂いたのみならず、研究室生活の様々な面において御指導、御助言を頂きました。心から感謝致します。真鍋助手には、研究設備の整備から書類のフォーマットまで細かいところで御指導、御支援を頂き、深く感謝いたします。

特に井口研究室3次元グループの山口証助手（現神戸製鋼所）、日浦慎作氏（現京都大学）、申千雨氏（現韓国東明情報大学校助教授）、千葉雅裕氏（現シャープ）、天野敏之氏、鈴木秀行氏（現キーエンス）、三田雄志氏（現東芝）、福本広次氏（現シャープ）、高地和隆氏、井下哲夫氏、森岡義貴氏には、本研究を遂行することに欠くべからざる御検討、御協力を頂きました。山口助手には、研究方針の検討、実験システムの整備、論文のチェックなどにおいて、数々の有益な御討議、御支援を頂き、時々激しい争論の中に、良いアイデアを示唆して頂きました。日浦氏には、私の日本人学生チュータとして様々な形で御協力、御援助を頂きました。井下氏には、論文の日本語チェックなどで御協力を頂きました。

## 辞 謝

---

ここに、3次元グループメンバーの方々に、心から感謝いたします。

井口研究室の木村朝子氏、辰巳大祐氏には、日本語発音の校正や、論文の日本語チェックなどで御協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。井口研究室の社会人ドクター安藤護俊氏（富士通研究所部長）、坂口貴司氏（三菱電機）、長田典子氏（三菱電機）、中山万希志氏（神戸製鋼所）には、研究に関する貴重な御助言、御協力を頂きました。心から感謝いたします。その他ここに御名前をあげておりません井口研究室のスタッフ、学生の皆様にも、様々な形で温かく励まし、御支援、御協力頂きました。心から感謝いたします。

立命館大学徐剛助教授（元大阪大学講師）には、留学生の先輩そして画像関係の先生として、様々な形で御指導、御助言を頂きました。深く感謝いたします。シャープ中央研究所の劉翊博士（元大阪大学助手）には、来日当初から数多くの御支援を頂きました。深く感謝いたします。

最後に、このような勉学の機会を与え支えてくれた両親そして最初の恩師とも言えます盧孝行教授と劉瑞華高級教師、また私の研究を理解し、種々の協力をくれました妻の錢捷に心から感謝します。

なお、私は在学中文部省国費留学生として、毎月貴重な奨学金を頂戴いたしました。この援助によって私は研究に専心することができました。ここに在日生活と研究を支えてくださった文部省に、深く感謝申し上げます。