

時空間コード化パターン投影による3次元形状計測

春田 具範 濱 裕光

大阪市立大学 大学院工学研究科
情報工学専攻 情報システム工学分野

概要

対象物の情報を3次元のデータとしてとらえ活用してゆくことは非常に有用であるといえる。これまで産業応用などにおいて種々の3次元形状計測の手法が提案されてきたが、そのような手法は専用の装置を使用する機会が多く、高価なシステムとなる。本論文では、特別な装置を必要とせず誰もが簡単に3次元形状を取得できるように、汎用のプロジェクタとデジタルカメラを用いた安価・簡便なシステムを提案する。

3-Dimensional Shape Measurement From Projection of Time-space Coded Pattern

Tomonori Haruta and Hiromitsu Hama

Information System Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University

Abstract

It is very useful that we obtain object information about 3D shape. Many techniques of 3D shape measurement have been proposed for such as industrial application. But these systems were generally expensive, because they used special instrument, for example laser beam. In this paper, we propose an inexpensive and convenient system that uses a common used projector and a digital camera for anyone to measure 3D shape easily.

1. はじめに

3次元形状計測は大きく受動型と能動型の2つに分かれる。受動型がカメラのみを用いて計測を行うのに対し、能動型は何らかのエネルギー（光波、電波、音波など）を対象物に照射し、その反射波を観測して計測を行う。一般的に能動型の方が受動型に比べ信頼性が高く、産業応用ではこちらが多く用いられている。

受動型であれ能動型であれ3次元形状計測で最も問題となるのは対応問題である[1]。通

常、3次元形状計測は三角測量の原理を用いて行われる。2台以上のカメラ（またはカメラと照射装置）の距離と向きが既知で各画像上の座標の対応関係がわかれば、三角測量の原理を用いて対象までの距離が簡単に算出できる。しかし、この対応関係を自動的に得る事が難しく様々な手法が試みられてきた[2]。能動型では対象物に対応の印を付けるために、レーザースリットや格子柄、縞模様などが投影される。

本論文では、対応付けのために高価な専用

装置などを用いず、市販のプロジェクタでパターン光を投影し対応関係を得る手法を提案する。本手法の特徴は、

- ・カラーを用いた時空間コード化パターンの投影
 - ・パターンスリット境界面を用いた特徴点の抽出と対応付け
 - ・計測対象の直線成分の抽出と特徴点の対応付け
- である。

2. カラー投影パターン

パターン光を投影して空間の分割を行うときの基本的なバイナリパターンを図1に示す。これは、白黒の投影パターンを時間的に変化させてゆき計測空間をサブ空間に分割してゆく方法である。この方法だと計測空間を n 回の投影で 2^n 個のサブ空間に分割し、コード化を行うことができる。また投影パターンに改良を加え、グレイレベルなどを用いて投影回数を減らす手法も提案されている [3]。本論文では、更に投影回数を減らす為にカラー情報を用いた投影パターンを提案する。

カラーを用いる利点としては以下の2点がある。1つ目は、色の数を増やせば1回のパターン投影で空間をより多くのサブ空間に分割することが出来るという点である。もう1つは、観測者があらかじめ投影する色を知っており色の判別を行うことができるので、グレイレベルなどでは必要となる投影光のレベルを検出するための参照パターンの投影が不

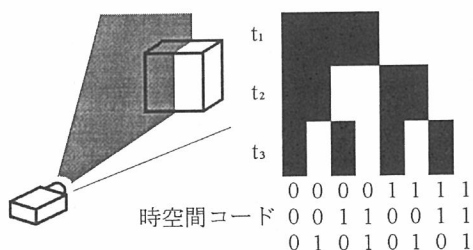


図1 バイナリパターン投影

要であるという点である。本手法では以上の点より投影パターンにカラー情報を用いるが、投影パターンの生成には以下の制約を設けている。

- ・パターン内のある色とその両隣の色の並び方はパターン全体で1つしかない。
 - ・パターン内のすべての隣り合う色の RGB 成分の内、異なる成分は1つのみである。
- 以下、投影パターンに用いた色とこれらの制約について述べる。

2.1 投影パターンに用いる色について

投影パターンに用いる色は、成分的に対極にあり後の検出処理において色分けするのに適する赤、緑、青とそれらのうち2つの要素を持つシアン、マゼンタ、イエローとする。表1にプロジェクタで投影を行うパターン画像の各色の RGB 成分値を示す。投影色の検出は、カメラで通常の画像と投影画像を撮影し、それらの画像の差分をとり、RGB 成分と IHS (Intensity-Hue-Saturation) 成分の情報を基に色分けして行う。まず、投影光によって変化した RGB 成分の増分を調べ候補となる色を選ぶ。次に、IHS 成分を用いて候補の中から求める色を色分けする。IHS 成分は RGB 成分に比べ人間の知覚に近く、RGB 成分で色分けしきれない色を識別することに利用できる。HIS 成分は RGB 成分から以下の式により求める。

表1 投影光の成分とコード

	R	G	B	色コード
黒	0	0	0	0
赤	255	0	0	1
緑	0	255	0	2
イエロー	255	255	0	3
青	0	0	255	4
マゼンタ	255	0	255	5
シアン	0	255	255	6
白	255	255	255	7

$$I = \frac{(R+G+B)}{3},$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right\}, \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)]$$

2.2 空間コード化のための配色

パターンの投影によって空間を複数のサブ空間に分割してコード化を行う。投影パターンは上で述べた6色をスリット状に並べて生成する。6色で6個以上のサブ空間を作り出すために投影パターンには同じ色が複数出現する。そこで、検出処理において同じ色が検出されてもどの部分のスリットかを判別できるようにするため、投影パターンを生成するときある制約に従って色を並べてゆく。すなわち、パターン内のある色とその両隣の色の並び方がパターン全体で1つしかないように制約を設けて並べてゆく。これによって、例えば同じ赤が検出されても青赤青と並んだ赤、青赤緑と並んだ赤といったように判別が可能となる。この色の並び方を表1の色コードを用い、自分自身と両隣分の3桁のコードに対応させて各スリット色に割り当ててゆく。このコードを用いてサブ空間をコード化してゆく。

2.3 プロジェクタの性能について

本手法ではパターン投影にプロジェクタを用いる。プロジェクタは本来平面であるスクリーンに像を投影する事を前提に作られているため、3次元の形状物など奥行きを持った対象物にパターンを投影した場合すべての表面上にピントを合わせることが難しい。そのため一部のスリット境界面にピントのずれによるにじみが発生し、実際の投影とは異なる色が生じ誤検出の原因となる。図2は実験における誤検出の例を示す。図2ではシアンと

マゼンタの境界面で青が誤検出されている。この様にピントのずれにより隣り合う色のRGB成分の内、2つの成分が緩やかに入れ替わる場合に違う色が生じる。この現象を避けるため、2.2節の制約に加え、パターン内のすべての隣り合う色のRGB成分の内、異なる成分は1つのみであるという制約を設ける。これにより緩やかに成分が変化する場合でも異なる色が生み出されることがなくなる。以上の制約によって生成された投影パターンの例を図3に示す。

このパターンを投影し撮影を行い、RGB成分とIHS成分情報を用いて対象物上の投影光の色を検出した後、各スリット色に割り当てられたコードでサブ空間のコード化を行う。この空間コードを用いて各カメラ間の特徴点の対応関係を得る。

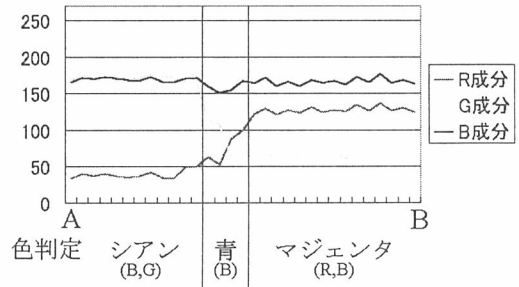


図2 にじみ部分の成分変化

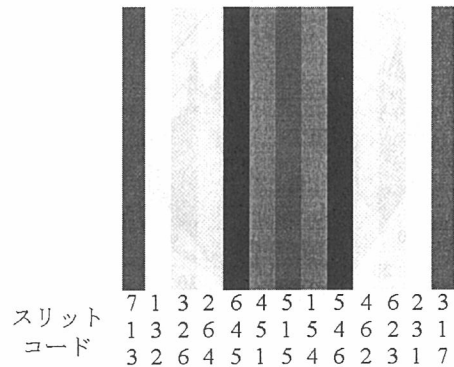


図3 投影パターン例

3. 特徴抽出と対応付け

撮影された画像から特徴点を探し出し、コード化されたサブ空間との関係から対応関係を求める。投影パターンは図3に示されるが、図の状態と90度回転させた状態とで2回投影を行う。これはサブ空間を更に細かく分割するためと、特徴点を生成するために行う。

3.1 スリット境界面の利用

投影パターンを対象物上に投影した時、対象の表面上にはスリット状に並んだ色が現れる。このスリット色の境界面では画像の濃度値が大きく変化し特徴が現れる。投影は縦方向と横方向の2回行うので格子状の境界面情報が得られ、この格子点を特徴点として抽出する。図4に、ある対象物表面上の縦方向の境界面情報と横方向の境界面情報を加えた様子を示す。図4に示されるように格子点部分に明らかな特徴が見られる。そこで部分的に極大となる点を格子点として抽出しコード化を行う。各スリット色は先に述べたように固有のコード値を持っており、それらのスリット色とスリット色の境界面もパターン全体で1つしかない事になる。従って、ある縦の境界面とある横の境界面が交差する格子点もス

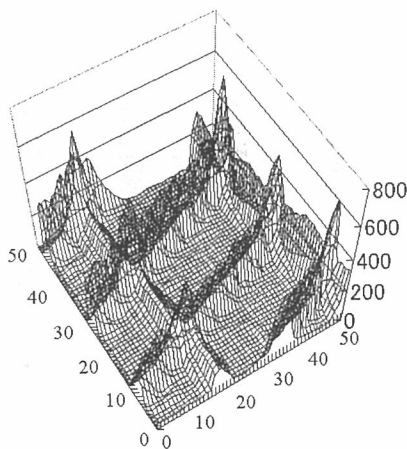


図4 格子状の境界面情報

リット色のコードを利用して固有のコード化を行うことができる。

3.2 直線成分の抽出と最適化

精度の向上に向けて、より多くの情報を得るために対象物そのものの特徴も利用する。対象物の画像から特徴点を探し出す手法は多数提案されているが、対象物が直線からなる形状の場合、ハフ変換による直線抽出が有効であると考えられる。通常ハフ変換では、撮影画像に微分処理などを施し対象物の輪郭線などを抽出し、何らかのしきい値で2値化し、ハフ変換・投票を行い直線を抽出する。しかし、性能の低いデジタルカメラなどで撮影を行った場合画素が粗い事もあり、2値化による情報の欠損が激しく、抽出直線も精度の低いものとなる。そこで、2値化を行う前のグレイレベルの情報を利用して抽出直線を輪郭線などの心線に近づける処理を行う。

図5に示される様に、抽出された直線に対し輪郭線付近の領域 G 内にある画素 (x_i, y_i) に対して式(2)で与えられる直線回りの慣性モーメント $m(a, b)$ を求める。

$$m(a, b) = \sum_{(x_i, y_i) \in G} r(a, b, x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i), \quad (2)$$

ここで、 $r(a, b, x_i, y_i)$ は抽出直線 $y=ax+b$ と画素 (x_i, y_i) の距離、 $f(x_i, y_i)$ は画素 (x_i, y_i) のグレイレベルを重みとしたものとする。この慣性モーメント $m(a, b)$ を最小にする a と b を抽出直線の新しい傾きと切片として置き換える。この処

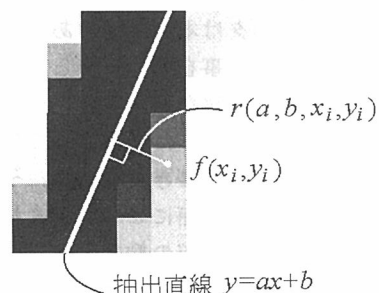


図5 慣性モーメント

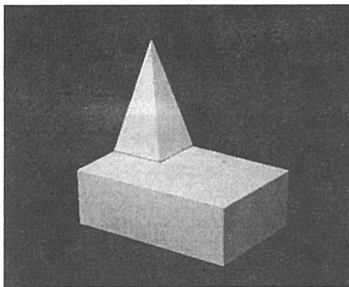
理によって求めた直線に対し交点などを特徴点として抽出する。抽出された特徴点はその特徴点が存在するサブ空間のコードを用いてコード化が行われ、誤対応のない対応関係が導かれることになる。

4. 実験

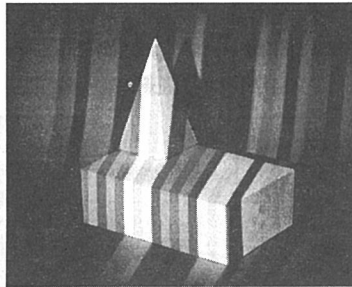
簡単化のため直方体の上に四角錐を乗せた白い表面の対象物を用いて実験を行う。3次元形状の復元には市販のソフトウェア(3Dexpres)を用いた。このソフトは異なる角度から撮影した2枚の画像と各画像上の対象物の特徴点とその対応関係を入力すれば3次元形状を復元するソフトである。入力には異なる角度から撮影したパターンを投影していない通常画像2枚と、パターン投影画像か

ら得られた対応座標リストとなる。

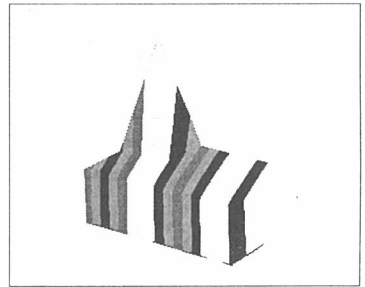
図 6(a)(b)にソフトウェアへの入力となる、異なる角度から撮影した2枚の画像を示す。図 7(a)(b)に、それぞれ縦方向の投影パターンと横方向の投影パターンを投影し、図 6(a)の角度から撮影した画像を示す。パターンを投影した画像は図 6(b)の角度からも同様に撮影を行い、計6枚の画像を撮影することになる。図 8 にそれぞれ図 7 からスリット色を検出した結果を示す。図 7(b)にも同様の処理を行いそれらの結果を基にサブ空間のコード化を行う。図 9(a)に図 7(a)(b)からスリット境界面を利用して抽出した特徴点を示し、図 9(b)に図 6 から抽出し慣性モーメント処理を施した直線を示す。



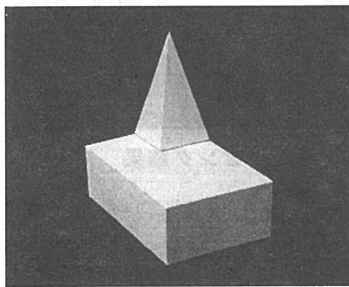
(a) 左側からの撮影画像



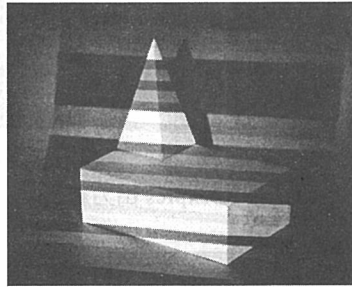
(a) 縦方向パターン投影画像



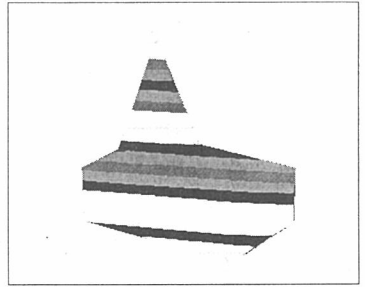
(a) 縦方向検出結果



(b) 右側からの撮影画像
図 6 通常画像



(b) 横方向パターン投影画像
図 7 パターン投影画像

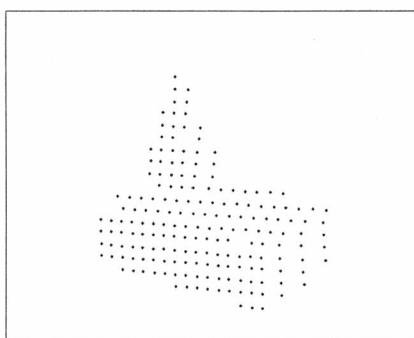


(b) 横方向検出結果
図 8 スリット色検出結果

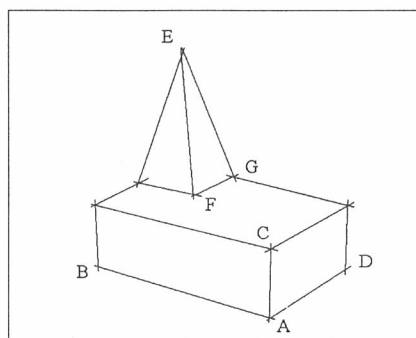
図 10(a)に以上の処理から得られた情報を利用し、3次元形状を計算した結果をワイヤーフレームで示す。対象物の表面上に現れている四角形または三角形は境界面の格子点から得た特徴点を基に計上された部分で、直方体と四角錐の頂点部分は抽出直線から得られた特徴点を基に計上されている。また計上した形状に面の情報を与えることにより表面へのテクスチャマッピングを行った出力結果を

図 10(b)に示す。

撮影は約1メートルの距離から行い、対象の直方体部分は高さ5cm 縦10cm 横15cmである。境界面情報による特徴点の計測平均誤差はx軸方向に-0.12mm、y軸方向に0.36mm、z軸方向に0.94mmとなっている。また、表2に、図9(b)に示す直線から得られた特徴点間の実際の長さとして計測結果の比較を示す。

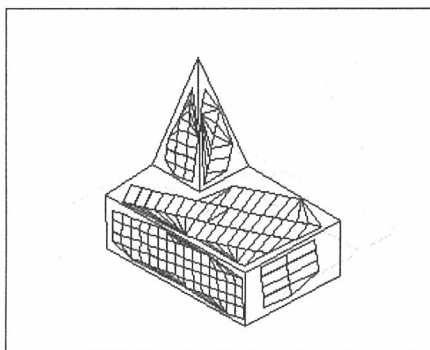


(a) 境界面情報による格子点抽出

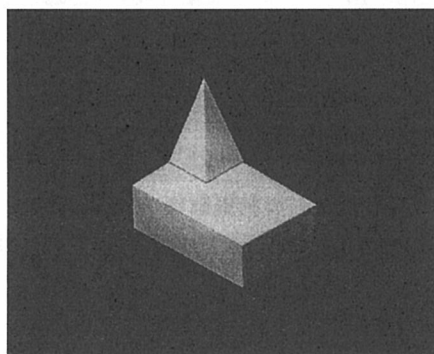


(b) 慣性モーメント処理後の直線

図9 格子点と直線の抽出結果



(a) 計測結果のワイヤーフレーム



(b) テクスチャマッピング結果

図10 3Dexpress 出力結果

表2 計測誤差

	AB	AC	AD	EF	FG
対象物	150	50	100	103	50
計測結果	150.56	48.99	99.96	103.15	50.57
誤差	0.56	1.01	0.04	0.15	0.57

(mm)

5. まとめ

本論文では汎用のプロジェクタとデジタルカメラを用いて3次元形状計測を行うために、カラーパターンを使用した時空間コード化パターン投影による手法を提案した。直線や平面からなる単純な対象物に対しては比較的簡単に計測を行うことができる。また、曲面についても境界面情報を用いた特徴抽出により計測を行うことが出来る。今回の実験では平面を対象としたが、比較的誤差も少なく、曲面にも十分応用可能と思われる。しかし、実際の環境では曲線の輪郭や複雑な曲面を持った対象物を計測する事が多い。そのような対象物の場合、凹面によって投影パターン光が隠れコード化に不備が生じたり、また輪郭特徴点をどのように自動的に抽出するのかといった問題もある。さらに、対象物の表面はカラーやテクスチャを持つものも多く、カラーパターンを検出する際に影響を与えとも考えられる。今後の課題としては計測対象の形状、表面の材質などを限定しない、上記の影響などを考慮に入れた汎用的なシステム構築を行うことが上げられる。

[参考文献]

- [1]松山隆司、久野義徳、井宮淳編：“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
- [2]井口征士、佐藤宏介：“三次元画像計測”、昭晃堂、1990
- [3] R.Furutani, H.Asano, K.Takamasu, S.Ozono, 3D Profile measurement using a multi-gray scale compared with reference projections, Measurement, Vol.20, No.2, pp.129-134, 1977