

論文

液晶レンジファインダ——液晶シャッタによる高速距離画像 計測システム——

正員 佐藤 宏介[†] 正員 井口 征士[†]

Liquid Crystal Range Finder — High Speed Range Imaging System Using Liquid Crystal Shutter —

Kosuke SATO[†] and Seiji INOKUCHI[†], Members

あらまし 構造化光 (Structured Light) 投影による距離画像 (Range Image) 計測は、対象物体のエッジの有無にかかわらず、あいまいさなく安定に対象全体のちゅう密な 3 次元データが高速に得られる利点がある。本論文では、液晶シャッタの投影系への適用により高速駆動可能な構造化光プロジェクタを実現し、これをグレーコードパターン投影空間符号化 3 次元計測法に応用することにより構築した高速な距離画像計測システム (液晶レンジファインダ) について述べる。この液晶レンジファインダに対して計測の安定化および高精度化の手法を開発した。安定化の面では、相補的な 2 枚の投影パターンを用いて物体表面のテクスチャや通常照明の影響を排除する投影パターン抽出法を開発した。高精度化の面では、グレーコードパターンの特徴を利用した液晶シャッタの半ピッチずらしによる倍精度パターン生成および、空間符号の内挿と画素濃淡値を用いた投影パターン境界の内挿によるプロジェクタ座標の高精度同定を実現した。これらの手法の有効性を実際の計測に基づき確認した。

1. まえがき

視覚センサは知能ロボットの実現にとって最も重要な要素であり、特に 3 次元環境を認識する機能はフレキシブル産業用ロボットや自律移動ロボットに必需といえる。このような 3 次元シーンの認識方法として距離画像を用いる手法が提案され、信頼性の高い認識法としてその効果が期待されている⁽¹⁾。

距離画像は対象シーンの 3 次元位置情報を画素値とするものであり、基本的に対象の 3 次元計測に基づいている。通常の濃淡画像から 3 次元情報を抽出する方法は、単眼視、多眼視、動画像、多重画像などさまざまなアプローチから試みられてきた⁽²⁾。しかし現状では、いずれの手法によっても対象全体の 3 次元データを、あいまいさなく密に抽出することは難しい。特に工業応用では、対象物体のエッジの有無やテクスチャの変化にかかわらず、信頼性高く細密な 3 次元データを得ることが必要とされる。このため、光を対象に投げか

ける能動的な計測法が、直接的に 3 次元データを得る方法として利用されている。代表的な手法として、スリット光を対象に投影し入力画像中のスリット光位置から 3 次元位置を得るものがあり、スリット光投影法と呼ばれている。しかし、距離画像を得る場合は、スリット光を対象全体に走査する必要があり、走査機構と長い計測時間を必要とする。

そこで、投影する光をスリット光から 2 次元的に広がった光へ置き換え、計測の高速化を図る研究が各方面で進められ、

- (A) 濃度変調光投影法
- (B) カラー変調光投影法
- (C) 符号化パターン光投影法
- (D) 時系列パターン光投影法

などが提案されている⁽³⁾。スリット光の投影角に応じて、(A)は照度を連続的に変化させたグレースケール状の光⁽⁴⁾、(B)は色が連続的に変化した虹状の光⁽⁵⁾を投影する。これらの方法は、濃淡分解能や色分解能の高いカメラが必要であり、またシーンに凹物体や複数の物体がある場合、間接反射光による影響で誤差が大きくなる欠点がある。(C)の方法は、スリット光の投影角の情報を光バ

† 大阪大学基礎工学部制御工学科、豊中市
Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka-shi,
560 Japan

ターンの形状で符号化したものである。ドット光の有無で“0”または“1”的1ビットを表し、隣接した6ドットでM系列符号化したもの⁽⁶⁾や、ストライプの太さで符号化したもの⁽⁷⁾がある。この方法は連続した物体表面を仮定しなければ復号化できず、輪郭付近や入り組んだ物体は計測できない。(D)は投影角を時系列的な複数の光パターンの組み合わせで符号化するものである^{(8),(9)}。1回の投影による光パターンの有無で1ビットを表し、n回の投影で投影角をnビット表現する。これは単に入力画像を2値化することで復号化できるので、安定に計測が行える利点がある。

筆者らは、この(D)の方法に属するもので、時系列グレーコードパターン光を用いてスリット光の投影角を符号化する計測法を提案している⁽¹⁰⁾。新たに液晶シャッタをグレーコードパターン光投影用に開発し、これを用いた高速な距離画像計測システム(液晶レンジファインダ)⁽¹¹⁾を実現した。本論文ではこの計測システムについて述べる。液晶シャッタによるポジ・ネガ相補的な2種のパターンを投影し、安定に光パターンを抽出する手法も新たに開発したので述べる。

高精度計測という観点では、スポット光、スリット光を投影するものの中に、投影光のセンシングの工夫によって計測精度の向上を図っているシステムがある。PSDを利用したスポット光投影システムでは、入射光の重心位置を出力するPSDの作用により輝点の位置を高精度に検出している⁽¹²⁾。ビデオカメラを入力に用了したシステムでは、ソフト処理により同じく重心位置を算出する⁽¹³⁾。スリット光投影によるシステムにおいては、重心位置算出⁽¹⁴⁾やガウス分布フィッティング⁽¹⁵⁾などから、輝線位置の高精度同定を行っている。

本論文では、グレーコードパターン投影による3次元位置計測の高精度化手法を2種類提案する。投影パターンの倍精度化と、投影パターン境界の内挿による高精度化である。

2. グレーコード時系列空間符号化法

図1にグレーコードパターン光投影による空間符号化と3次元位置検出の原理を示す。プロジェクタ内の液晶素子は、シャッタアレーのオンオフの組合せにより同図左上に示すグレーコードパターンを生成し、測定空間に投影する。CCDカメラはその測定空間を異なった位置から観測する。プロジェクタ座標系(X_p)とカメラ座標系(X_c, Y_c)は、世界座標系(X, Y, Z)とそれぞれ次のように同次座標系表現を用いて関係づけ

られている⁽¹⁶⁾。

$$\begin{bmatrix} h_c X_c \\ h_c Y_c \\ h_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} h_p X_p \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

上式はスリット光がつくる3次元平面を、下式はカメラの視線のなす3次元直線を表現している。対象の3次元位置はこの平面と直線の交点として求められる⁽¹⁷⁾。

$$Q = \begin{bmatrix} C_{11} - C_{31} X_c & C_{12} - C_{32} X_c & C_{13} - C_{33} X_c \\ C_{21} - C_{31} Y_c & C_{22} - C_{32} Y_c & C_{23} - C_{33} Y_c \\ P_{11} - P_{21} X_p & P_{12} - P_{22} X_p & P_{13} - P_{23} X_p \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} C_{34} X_c - C_{14} \\ C_{34} Y_c - C_{24} \\ P_{24} X_p - P_{14} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Q^{-1} F$$

投影光を受けた測定空間は、光パターンが照射されて明るい領域“1”と、そうでない暗い領域“0”的二つに分けられる。従って、2進符号化された光パターンをn種用いれば、測定空間を 2^n のくさび状の領域に分割可能で、それぞれの領域に符号を割り当てることができる。例えば、図1のP点はパターンAにより明領域“1”に符号化される。同様にパターンBでは“1”，Cでは“0”になる。この空間符号“110”はP点

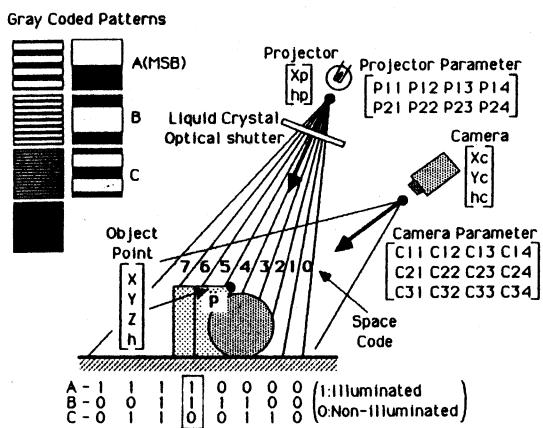


Fig. 1 時系列空間符号化の原理
Fig. 1 Principle of time sequential space encoding.

がくさび状領域4に存在していることを示しており、この領域番号がプロジェクタ座標そのものとなる。このとき、最も外の空間符号がすべて“0”になる領域は不可視領域と区別できないため、同定できる領域数は $2^n - 1$ となる。

投影する光パターンにはグレーコード(交番2進符号)パターンを用いる。グレーコードは隣接値のハミング距離が必ず1であり、光パターンの2値化の際、境界での符号化誤りを最小化できる特徴がある。

実際の計測処理の流れは、図2(a)に示すように、まず入力画像から光パターンの2値化を行う。これには後述する相補パターン比較法を用いる。これをn種のパターンについて繰り返し、深さnビットの画像を得る。グレーコード表現のこの画像を、純2進に変換し空間符号(プロジェクタ座標)画像を得る。次に、ある注目画素のカメラ座標と、その画素値すなわちプロジェクタ座標の三つのパラメータから、前記の行列演算により3次元座標を得る。

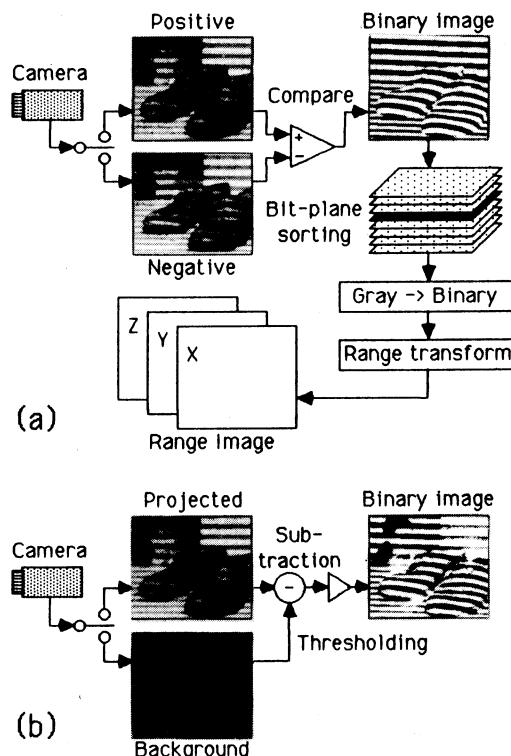


図2 (a) 相補パターン法による計測処理の流れ
(b) 背景画像除去法

Fig. 2 (a) Processing flow using complementary pattern method.
(b) Background subtraction method.

3. 液晶光学シャッタ

本計測法においてプロジェクタは幾何学ひずみのないグレーコードパターンを生成し、敏速かつ位置ずれなしにパターンを切り換えながら投影する必要がある。このため、ツイスティッドネマティック(TN)液晶による光学シャッタアレー要素をプロジェクタマスク用に開発した。透明ストライプ電極と一様電極を対向させスタティック駆動することにより、単スリット、複スリット、グレーコードパターンなどの任意のストライプパターンがコントラストよく生成できる。液晶シャッタの外観を図3に、諸元を表1に示す。液晶シャッタの温度-コントラスト特性を図4(a)に、温度-応答特性を図4(b)に示す。これらの特性はパターン光投影用の光学シャッタとして十分な性能と考えられる。

4. 相補パターン投影による2値化

実用的な応用計測においては、通常照明の下で計測が可能で物体表面の明暗(テクスチャ)に影響されないことが重要な条件である。本計測法においては、これらの条件下で投影パターンの抽出が安定に行なうことができれば問題はない。以下に液晶シャッタに向いた新

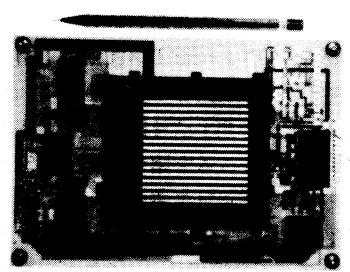


図3 液晶シャッタ
Fig. 3 Liquid crystal shutter.

表1 試作した液晶シャッタの諸元

液晶モード	ツイスティッドネマティック
液晶規格	自動車パネル向け高温用
ストライプ数	128本
電極ピッチ	450 μm
電極間ギャップ	50 μm
有効サイズ	58 mm × 58 mm
駆動方式	スタティック
駆動電圧	5 V
コントローラ	μPによるインテリジェント型 RS232C コマンド制御

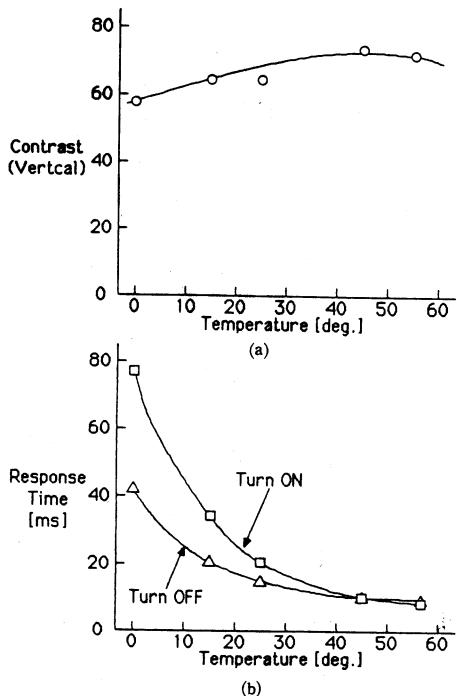


図4 (a) コントラスト特性 (b) 応答特性
Fig. 4 (a) Contrast, (b) Response.

しい抽出法を提案する。

図2(a)に光パターン抽出法の原理を示す。一種のパターンにつきポジのパターン光と、明暗反転したネガのパターン光の2種類をシーンに投影する。ポジパターン光投影画像とネガパターン光投影画像の画素値の大小の比較から2値化を行う。2値化に必要な画像演算は簡易であり、単にポジ画像からネガ画像を画素間減算し、その各画素の結果の正負より2値化すればよい。この方法を以下、相補パターン法と呼ぶ。従来は、同図(b)のように、無投影で通常照明のみのシーンを入力しパターン光投影画像からこの無投影画像を減算した後、しきい値処理する背景画像除去法を用いてきた。どちらも2値化に必要な演算量は等しく通常照明の下で計測が可能となるが、背景画像除去法ではテクスチャなど物体表面の反射率の違いによる濃淡値の変化や投影光のぼけにより、必ずしも光パターンのエッジ中心で2値化できない問題点がある。また合理的なしきい値が決定できないことも難点である。ここで提案する相補パターン法は、通常照明や物体表面特性、入力非線形性、投影光のぼけの影響を打ち消すことができ、非常に安定かつ精確に2値化を行うことができる。投影回数は倍になるが、最も優れたものと考えられる。

5. 3次元計測の高精度化

今回試作した液晶シャッタは、前述のように128本のストライプシャッタアレーから成り、7ビットのグレーコードパターンにより測定空間を128分割する。計測の高精度化は液晶シャッタのストライプ数を高めることにより容易に行える。しかし、透明電極の微細加工と結線に限界があり製作には多くの困難を伴う。そこでここでは試作した128本の素子を使って、計測精度を向上させる方法を考案した。以下では、液晶シャッタの機械的微小移動から倍の空間分解能を得る方法および内挿手法を適用し高精度化する方法について述べる。

5.1 空間符号パターンの倍精度半ピッチずらし

図5に示すように、グレーコードパターンの性質として、 $n+1$ ビット目のパターンは n ビット目のパターンの倍の細かさのストライプで構成され、そして n ビット目のストライプパターンの境界は $n+1$ ビット目のストライプの中心に位置する特徴がある。更に、 LSBビットのパターンが…00110011…と2本おきにストライプパターンを構成する特徴もある。

ここで、…01010101…とLSBパターンの倍の細かさのストライプパターンを生成し、LSBパターンの境界がこのストライプの中心を走るようにストライプピッチ幅の半分だけ液晶シャッタ自身を機械的に移動させれば、等価的にLSB+1のストライプパターンが得られ、このパターンを投影すれば倍精度の計測が可能である。今回使用した128ストライプの液晶シャッタでは空間を256分割することが可能となる。

液晶シャッタを半ピッチ移動させる機構を図6に示す。スプリングで基台の一方へ保持されている液晶シャッタを、マグネットの励磁により微小(225 μm)移動させる。

5.2 プロジェクタ座標の内挿

2.で述べたプロジェクタ座標は、スリット光の投影角を表しており、本来実数値で示されるべきものである。しかし本計測法では、投影光パターンの明暗で2進化した空間符号より求めるため、0から $2^n - 1$ までの整数に量子化された形で得られる。この空間符号には、連続面上では単調に±1ずつ変化し、不連続面ではステップ的に変化する特徴がある。逆に、空間符号の変化を調べることにより、対象とする物体面の連続性が確認できる。従って、この連続表面上では空間符号を内挿しプロジェクタ座標を連続実数値で表現すること

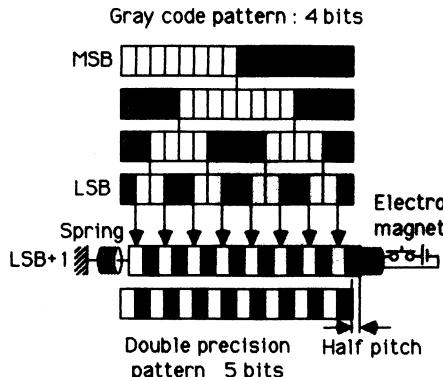


図5 半ピッチずらしによる倍精度パターン化
Fig. 5 Double precision pattern by half-pitch shift.

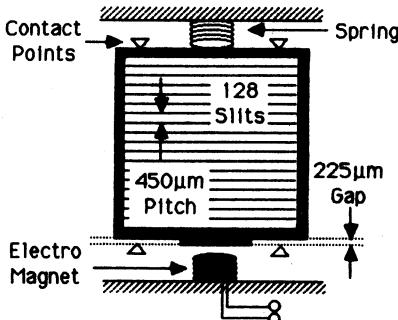


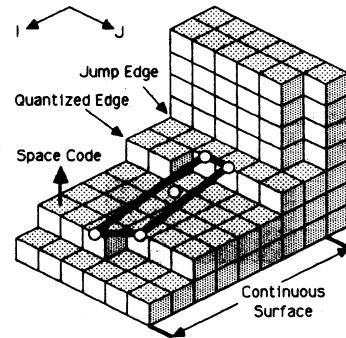
図6 半ピッチずらし機構
Fig. 6 Half-pitch shift mechanism.

ができる、プロジェクタ座標の高精度推定を行うことができる。

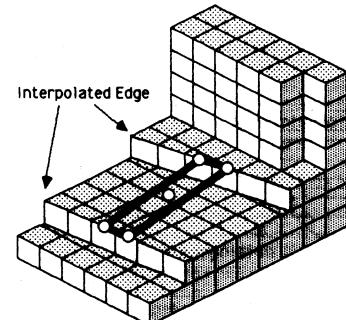
この内挿処理の概念を図7に表す。図中の*i*, *j*は画像の2次元座標を表し、高さはその画素上でのプロジェクタ座標値を示している。画像中の任意点でのプロジェクタ座標値は、空間符号が±1変化する周囲隣接4点を用いてbi-linear法より内挿する。この方法は、同一の空間符号を有するところが十分細く、その中では物体表面が平面で近似できることに基づいている。物体表面がなだらかで局所的に平面で近似できる場合、このような単純な内挿手法によっても効果は高いと考えられる。

5.3 空間符号パターン境界の内挿

グレーコードパターンが投影されている対象シーンはCCDカメラを通してデジタル画像に標本化される。サンプリング定理により、入力できる最も細いしま模様はデジタル画像の標本ピッチの倍の太さ以上でなければならない。液晶シャッタの高ストライプ数化や



(a) Without edge interpolation

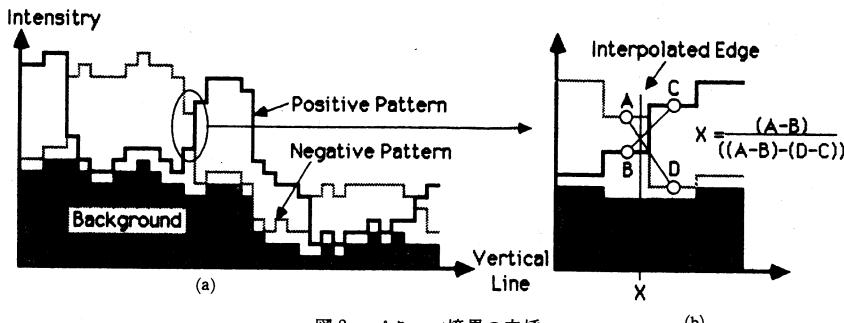


(b) With edge interpolation

図7 プロジェクタ座標の内挿
Fig. 7 Interpolation of projector coordinate.

グレーコードパターンの倍精度化などによりしま模様が細くなるにつれ標本化の限界に近づき、しま模様エッジの±1画素の標本化誤差が無視できなくなってくる。より高分解能のCCDカメラおよび画像メモリを利用すればよいが、非常に高価なシステムになるであろう。従って、内挿手法を利用ししま模様エッジ位置をサブピクセルで同定することができれば、通常の分解能の装置においても計測の高精度化を図ることができる。これは、図7(b)に示すように、空間符号の変化する位置がサブピクセルで同定され、プロジェクタ座標の内挿精度が高まるためである。以下、相補パターン画像の画素濃度値を用いてしま模様エッジ位置を内挿する手法について述べる。

図8(a)に相補パターン光投影を受けている入力画像の、ある直線上での濃淡プロファイルを示す。背景光による明暗をオフセットにして、相補パターン投影時の二つの濃淡プロファイルはお互いに交番しながら変化している。この交差点はパターンの境界に正しく位置しており、同図(b)のような濃淡値変化の交点からパターン境界位置をサブピクセルで得ることができる。

図 8 パターン境界の内挿
Fig. 8 Interpolation of pattern edge.

濃淡変化を直線で近似した場合、その交点は以下の式で算出される。

$$\text{エッジ位置} = \frac{(A-B)}{((A-B)+(D-C))}$$

この内挿計算が必要とするパターン境界上の画素は、4.で述べた投影パターンの2値化および境界抽出によって容易に抽出できる。従って、市販されている汎用の高速画像プロセッサの画像間加減算および2値画像境界抽出、ロックアップテーブル画素変換などのハードウェア処理機能により、除算演算を除いたほとんどの演算を行うことができ、この内挿処理を計測過程に付加しても、計測時間の大きな負担にはならない。

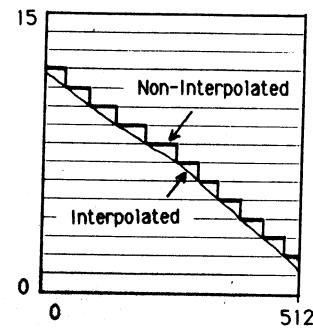
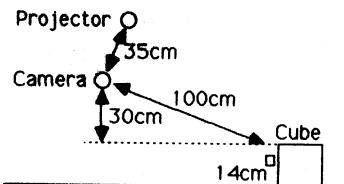
6. 計測実験

6.1 相補パターン法の効果

図2(a)および(b)に、それぞれ相補パターン法と従来法による2値化の結果を挿入している。自然シーンにストライプパターンを投影した画像であり、(a)ではテクスチャに全く影響されず安定にパターンが抽出されているが、(b)では大きく乱れており、相補パターン法の有効性が証明されている。

6.2 内挿による空間符号パターン境界の抽出

図9に5.3で示した方法によるパターン境界の内挿結果を示す。無地の平板にストライプパターンをわずかに斜めにして投影したものを試験画像として用いている。同図は、そのエッジ画像の一部を切り出し、横512、縦15画素と変形拡大して表示している。図中の太線は内挿を行わない場合のパターン境界であり、階段状の標本化誤差が現れている。斜めに走っている細線が内挿されたパターン境界である。ストライプパターンの直線性が良く保たれており、この内挿処理が十分に有效であることが確認できる。

図 9 パターン境界内挿結果
Fig. 9 Result of interpolation of pattern edge.図 10 計測配置
Fig. 10 Location of measurement system.

6.3 各手法による精度向上の効果の比較

高精度化の各手法を効果を検討するために、図10に示す構成で、立方体を試験物体に用いて3次元計測を行った。計測された立方体の上面のZ座標値を50×15画素の範囲で立体表示したものを図11に示す。同図(a)が7ビットのグレーコードパターン投影でプロジェクタ座標の内挿処理を行わない場合の結果である。整数へ離散化されたプロジェクタ座標のため、鋸歯状の量子化誤差が大きく現れている。同図(b)は同じく内挿処理を行わずに倍精度パターン(8ビット)を投影したものであるが、(a)に比較して偏差が少なく計測精度が向上していることがわかる。同図(c)は(a)の計測に、

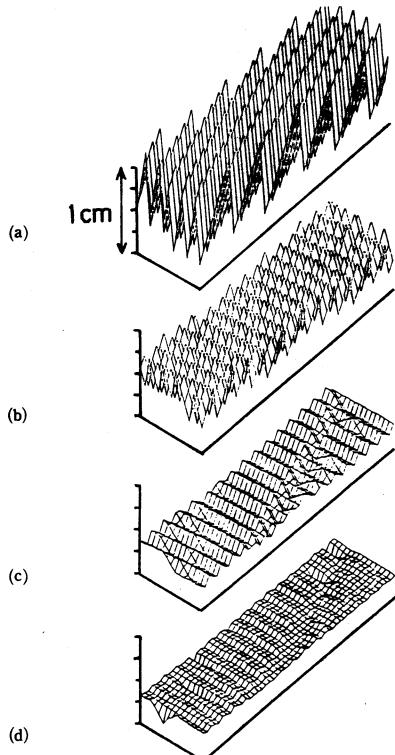
図 11 3次元計測結果(Z 座標値)Fig. 11 Result of 3-D measurement(Z coordinate).

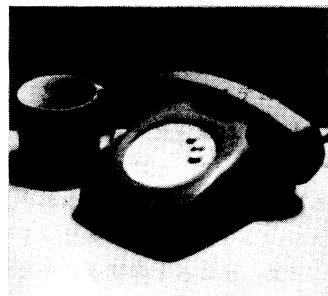
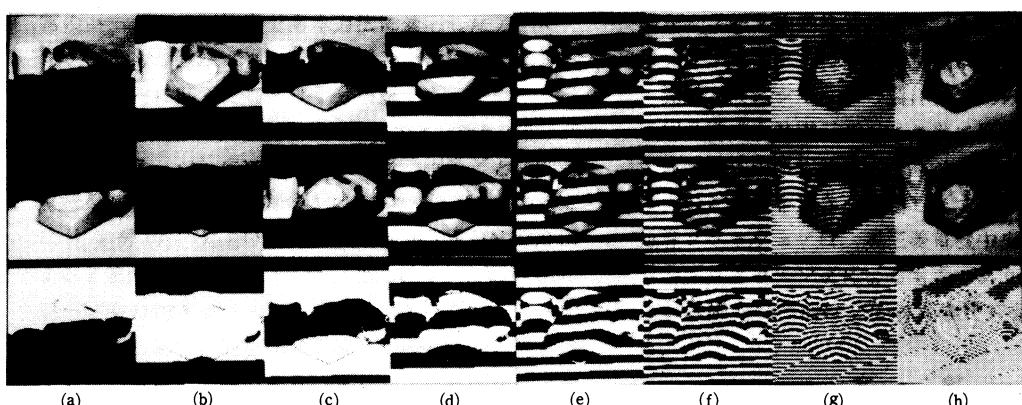
表 2 ビット数と内挿の相違による測定誤差の変化

ビット数	プロジェクタ 座標の内挿	境界位置 の内挿	誤差の標準 偏差(mm)
(a)	7	無	0.83
(b)	8	無	0.42
(c)	7	有	0.27
(d)	7	有	0.18

プロジェクタ座標の内挿処理を付加したものであり、(d)は更にパターン境界の内挿も加えてプロジェクタ座標の内挿を行った場合の結果を示している。表 2 に誤差の標準偏差を示しており、(a), (c), (d)の順に計測精度が大きく向上していることが確認でき、提案した各高精度化手法の有効性が示された。

6.4 3次元計測実験

自然シーンとして、図 12 に示す電話機とカップを対象とし計測を行ってみた。図 13(a)～(g)は MSB から順に 7 ビット目のパターンまでを投影し、同図(h)は半ピッチずらしによる倍精度パターンを投影したものである。上段は相補パターンのポジパターンを投影したときの入力画像、中段はネガパターンを投影したときの入力画像である。下段は上段のポジ画像と中段のネガ画像との間で相補パターン法により 2 値化を行った画像である。通常照明下で反射率の異なる物体面が良好に 2 値化できていることがここでも確認できる。図 14 は得られた距離画像をワイドフレームで異なる視線から立

図 12 対象シーン
Fig. 12 Original scene.図 13 (上中段)相補パターン投影画像、(下段)2値化結果
(h)は半ピッチずらしによる倍精度パターン投影Fig. 13 (Upper, Middle)Complementary pattern projection,(Lower)Binarized
(h) is double precision pattern by half-pitch shift.

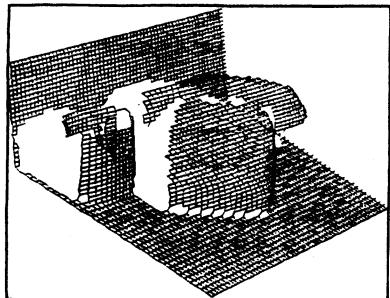


図 14 計測結果のワイヤフレーム表示
Fig. 14 Wire frame display.

体表示したものである。作画の関係で粗いメッシュで連続面のみを表示しているが、実際には 512×512 の空間分解能で 3 次元データが得られている。

6.5 計測装置および計測時間

パターンプロジェクタには、市販の 6×6 サイズのストライドプロジェクタに液晶シャッタを装着したもの用いた。このプロジェクタより相補パターンが投影されたシーンは、CCD カメラ (NEC TI-22A) より画像プロセッサ (ADS PIP-4000) に 512×512 の分解能で入力され(2回)、実時間ハードウェアで画像間減算(1回)、2 値化(1回)、2 値画像ソーティング(1回)される。この過程が各グレーコードのビットに対応して 7 回繰り返される(半ピッチずらしによる倍精度パターン投影を行うときは 8 回)。その後、グレーコード → 純 2 進変換(1回)を受け空間符号画像が生成される。現在、この一連の過程に約 3 秒を要している。これは、ビデオ信号と液晶シャッタのパターン切り換えが同期しておらずラグタイムを見込んでいることや、画像演算に 2 フレーム時間必要なためである。この計測時間は、通常のハードウェア技術でも本方法に適応したアーキテクチャをもつ画像プロセッサを組み上げることによって 1 秒以内に抑えることは十分可能である。

空間符号画像は、GPIB チャネルでエンジニアリングワークステーションに転送された後、画素ごとに同時座標系演算を受け距離画像を得る。 256×256 点の処理に約 1 分 (APOLLO DN570+DN3000+DN4000 による 3 並列処理) を要している。但し具体的な応用では、シーン中の物体セグメンテーションと局所的な 3 次元位置計測のみで目的を達する場合が多く、この場合は大幅に計算量を削減できる。また、この同時座標系演算は数十 M バイトのメモリの 3 次元ルックアップテーブルを実装すれば、実時間化を行うことも可能である。

7. むすび

液晶シャッタを用いた時系列パターン光投影法による距離画像計測システムについて報告した。現在検査工程など工業分野で実用に供されている距離画像計測装置の多くはスリット光投影法に基づくものであり、時系列パターン光投影法は用いられていない。それは高速かつ精確な光パターンの投影が困難なためであるが、本論文で述べた液晶シャッタを用いることにより容易に解決でき、高速計測の面で本投影法の実用化への見通しが明らかになった。更に、液晶シャッタによる相補パターンの利用から、照明やテキスチャに影響されない安定な計測が可能になり、計測対象物の範囲が大きく広がった。

計測精度は入力画像の分解能、液晶シャッタのストライプ数で制限を受けており、入力画像は 512×512 の分解能で NTSC ビデオ信号の限界に達しているが、プロジェクタ側では簡単な機構を付加することにより液晶シャッタ本来の分解能より倍の分解能を得ることができた。更に、エッジ境界の内挿およびプロジェクタ座標の内挿によってもよりいっそうの精度向上が図れた。これにより、本システムは計測精度の面でもスリット光、スポット光投影によるものと遜色なく、高い実用性が示された。

今後の展開としては、専用プロセッサやルックアップテーブルの実装により、いっそう実用性の高い高速システムを開発すること、また、投影回数を削減し高速化するために投影光をカラー多重化することも目指している。更に、2 枚のストライプ透明電極を直交させた液晶シャッタも試作しており、これにより発生可能な十字や 2 次元格子パターンなどを利用した柔軟なビジョンシステムの研究も可能になっている。

謝辞 液晶シャッタの製作にご協力頂いた、松下電子部品株式会社表示デバイス部に感謝します。また、大阪大学木田隆夫技官にプロジェクタの製作にあたり多大のご助力を頂き、感謝します。本システムの内挿処理ソフトウェアは、現三菱電機中央研究所明石千恵君のプログラミングによるものであり、感謝します。なお本研究の一部は文部省科学研究費 59850070 による。

文 献

- (1) A. Rosenfeld : "Techniques for 3-D Machine Perception", North-Holland (1986).
- (2) 杉原厚吉: "画像を利用した立体計測法の動向", 第 17 回画

像工学コンファレンス(昭61)。

- (3) 山本, 田宗, 田村: “距離画像の入力と処理”, 信学技報, IE86-128 (1987).
- (4) Bastuschech and Schwartz : “Experimental Implementation of a Ratio Image Depth Sensor”, Techniques for 3-D Machine Perception, North-Holland (1986).
- (5) 田島謙二: “Rainbow Range Finder による距離画像取得”, 情処学会コンピュータビジョン研究会報告, 86-CV-44-3 (昭61).
- (6) 森田, 矢島, ほか: “符号パターン投影法による曲面形状の計測”, 昭60信学全大, 6-309.
- (7) 米沢, 玉邑 : “符号化格子画像入力系と物体形状の抽出”, 信学論(D), J61-D, 6, pp. 411-418 (昭53-06).
- (8) 上田, 松本 : “時系列符号化格子法とその装置化”, 信学論(D), J64-D, 8, pp. 780-787 (昭56-08).
- (9) Posdamer and Altsuler : “Surface measurement by space-encoded projected beam system”, Computer Graphics and Image Processing, 18 (1982).
- (10) 佐藤, 井口 : “空間コード化による距離画像入力”, 信学論(D), J68-D, 3, pp. 369-375 (昭60-03).
- (11) Sato and Inokuchi : “Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask”, 1st International Conference on Computer Vision, London (1987).
- (12) Kanade and Asada : “Noncontact visual 3-D sensing devices”, Proc. SPIE, 283 (1981).
- (13) 中沢, ほか: “ファイバーグレイティングを用いた3次元形状計測システムの開発”, 第16回画像コンファレンス(昭60).
- (14) Shirae : “Recognition of polyhedra with a range finder”, Pattern Recognition, 4, 2 (1976).
- (15) Nishikawa and Inokuchi : “Range data entry techniques using a laser spot scanner and two solid-State image sensors”, IEEE Trans. Instrum. & Meas., IM-30, 4 (1980).
- (16) Ballard and Brown : “Computer Vision”, Prentice-hall, Inc. (1982).
- (17) 山本, 佐藤, 井口 : “三次元計測のためのシステムパラメータ”, 昭60信学全大, 1631.

(昭和62年9月10日受付, 12月21日再受付)

井口 征士



昭37阪大・工・電気卒。昭39阪大大学院修士課程了。現在同大基礎工学部教授。画像処理、音響信号処理、音楽情報処理の研究に従事。工博。

佐藤 宏介

昭58阪大・基礎工・制御卒。昭60阪大大学院修士課程了。現在同大基礎工学部助手。画像プロセッサ、3次元画像計測・認識の研究に従事。工博。

