

変調投影光の時空間処理による三次元計測

余田 茂 佐藤 宏介 千原 國宏
奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

三次元画像計測では、構造化された光を対象物に投影する計測法が多用されている。スリット光を対象物に投影し、対象物の形状に応じて歪んだスリット像を別の角度にあるテレビカメラで観測する手法である。本報告では、従来のスリット光投影法が投影光の位置検出を一枚の画像中で行なうのに対し、スキャンニングされている投影光の時間変化に着目し、その検出を時系列画像中の時間軸上の処理により行なう新しい計測原理を提案する。従来法では、画像中で数画素しか出現しない細いスリット光を投影するのに対し、提案する方法では全フレームに信号が存在するように空間的にパターンが広がった変調光を用いることができるので、耐雑音性に優れるとともに、高精度に計測が行なえる。実際に時系列処理による計測システムを構築し、高精度計測であることを確認した。また、シミュレーションによっても本手法が耐ノイズ性に優れることを確認した。

Range Imaging Based on Spacio-Temporal Processing with Pattern-Modulated Light Projection

Shigeru YODA Kosuke SATO Kunihiro CHIHARA
Graduate School of Information Science
Nara Institute of Science and Technology

Range image measurement using structured light has been widely utilized in industrial fields. Slit light projection method is realized by projecting slit light on objects, and by observing the bended light stripe image along the outline of the objects. This report proposes a new method for a precise measurement by time series signal processing, in contrast with conventional methods that process the measurement in an image. Spacio-temporal data processing is superior in precise measurement and robustness against noise, because this method can utilize all of the frame data in comparison with the slit light projection method that can use only a few pixel data. In this report, an experimental measurement system utilizing time series data processing is constructed and the precise measurement is demonstrated. Furthermore, excellent characteristics of the time series data processing against noise is confirmed by simulation.

1. はじめに

ロボットビジョンやCAD立体形状入力のための距離画像計測、いわゆるレンジファインダでは、構造化された光を対象に投影する計測法が多用されている[1]。これは、その投影パターンを工夫することにより、計測の分解能や信頼性を向上させることができ、実用性が高いためである。

構造化された光としてスリット光を投影する方法光切断法とも呼ばれる方法は、スリット光を対象物に照射し、別の角度からカメラで捉えるという三角測距の原理に基づく、最も基本的な方法である[2][3]。レーザー光は、走査の各シーンにおいて対象物上で一つの輝線となり、その像はカメラから入力される。計測点の座標は、走査ミラーの角度とカメラ入力画像上の画素座標から決定できる。入力画像中での上下方向の画素位置は走査線番号から求め、水平方向の画素座標は一本の走査線上の明るさ分布を得て、明るさが最大となる画素を求めればよい。

このことは、横方向の画素数が計測精度を決める要因となることを示している。高精度化するには、カメラの画素分解能以上の精度で輝線位置を求めることが必要となる。そのための手法として、関数フィッティングや重心位置算出によるサブピクセル化が提案されている。例えば、走査線上の画素の輝度値に対してガウス分布フィッティングを行ない、その近似曲線の中心を画素座標とする。これにより、ノイズの影響を軽減し、かつ画素分解能以上の精度でスリット光の輝度中心を求めることができる。これらは、スリット光の輝線の幅が画素の幅に比べて広いことを利用して、明るさが最大になる画素だけでなく、近傍の画素（通常、10画素以内）の情報を統合して画素幅以上の精度で輝線位置を求める手法といえる。

一方、対象全体の距離画像を得るためには、レーザー光の照射方向を偏向ミラーにより走査しつつ、この画像ごとの手続きを繰り返す。走査の各瞬間において、その瞬間の画像フレームごとに処理が完結しており、画像フレーム間で関連づけた処理は行っていない。

スリット光投影法を $\log_2 n$ のオーダーで高速化する

るグレイコードパターン光投影法では、スリット光投影法におけるスリット光の走査に代わり、数数のグレイコードパターンを時系列的に投影し、各投影で得られた数枚（通常、10枚以内）の画像フレームを関連づけることで、三角測量を行っている[4]。

そこで本報告では、これら従来法が投影光の位置検出を一枚の画像中から行っているのに対して、投影光の位置検出を時空間画像中の時間軸上の処理より行う、高精度な計測原理を新しく提案する。

ここで、本報告で以降用いる用語「空間的处理」と「時系列処理」を明確にする。光投影法による三次元画像計測では、一般に、投影光の走査に応じて連続して画像を入力し、各フレームごとに単独で処理を行なう。ここでは、このような各フレーム内で完結した処理を空間的处理と呼び、フレーム間にまたがった処理を時系列処理と呼ぶものとする。

2. 距離画像計測の原理

2.1 空間的处理と時系列処理

図1は、空間的处理について、スリット光を水平方向に走査する状況を示している。時刻 t において、光源の光を $\theta(t)$ の方向に照射して対象物を照らし、スリット像は入力画像上では画素の水平方向の座標 $x(t)$ に見えるものとする。このとき、光源とカメラの位置関係が既知で、 $\theta(t)$ と $x(t)$ が求まれば、計測三角形すなわち計測点の位置を一意に決定できる。各時刻、 t_1, \dots, t_n において、入力

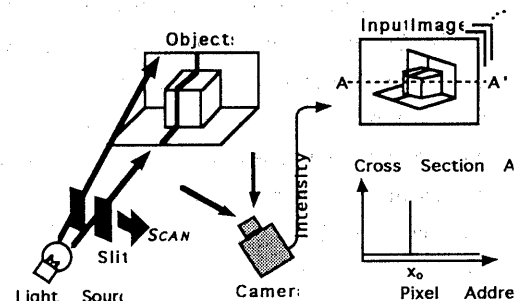


図1 スリット光投影法における空間的处理による投影光位置の検出

画像上でのスリットの座標 $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_n)$ を求めることが距離画像計測することに相当する。

ここで、サブピクセル化を考えると、測定の間隔も画素座標もそれぞれ離散的であるが、このうち時刻 t_0, t_1, \dots, t_n を一定間隔に固定して、輝線が見える画素の座標 x を離散座標間隔以上に高精度に求めることを意味する。

一方、時系列処理では、逆に画素座標 x を一定間隔に固定して、時刻 t のどこに輝度のピークがあるかを検出する。図2に時系列処理の説明図を示す。光源、カメラ、対象物の位置関係はさきほどと同様であるが、時間基準ではなく画素基準で考える。たとえば、画素 x だけに着目して明るさの分布を時系列で見ると、同図右のようにスポット光の走査に伴い、必ず明るさが最大になる時刻 t_0 が存在する。このとき、入力画像上での座標 x とスポット光の照射方向 $\theta(t_0)$ が決まるので、計測点の座標が一意に求まる。フレーム時刻は離散的であるが、サブピクセル化と同様に、サブフレーム化により高精度化できる。よって、時系列処理でも空間的処理同様に三角測距の原理で対象物の位置形状を計測することができる。

2.2 時系列フィルタリング

時系列処理は空間的処理と結果として同じであり、別種の手法ではあるが同じ処理をする限りにおいて新しい利点はない。しかし、時系列処理を行なうことによって投影パターンの工夫が可能になり、それに伴って新しい利点が生まれる。これを以下に述べる。

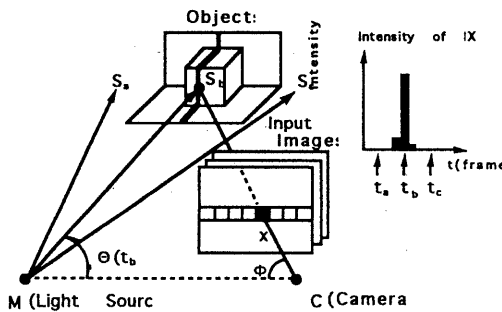


図2 スリット光投影法における時系列処理による投影光位置の検出

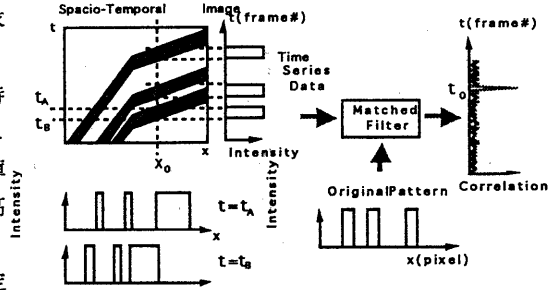


図3 時空間画像の時間軸フィルタリングによる投影光の高精度検出

図3に空間的処理と時系列処理の比較を示す。スリット光を立方体に当て、別の角度からカメラで観測する。入力画像列を時空間画像立体にとらえ、それを $x-t$ 平面でスライスし、その明るさ分布を見ると、同図左上ようになる。この図で、 x 軸方向の処理が空間的処理に、 t 軸方向の処理が時系列処理に対応する。

時系列処理では、スリット光の走査速度を一定にすると、時間軸方向ではどの断面で見ても一定幅にすることができる。従って、すべての画素について、時間軸上で投影パターンの長さおよび形状を同一にできる。そのため、同図右に示すように、フィルタリング(マッチドフィルタ)によって投影パターンを検出することができる。時間軸方向に広がった自己相関の強い信号を用いれば、投影光の位置検出が極めて高精度に検出できる。同時に、測定点が増加するのでフィルタリングにより、耐ノイズ性を高めることができる点が期待できる。

一方、投影パターンの中心を空間的処理により求めることは、図3において x 軸方向の断面でパターンの位置を求めることに相当する。しかし、この方法では対象物の面の傾きによってはパターンの間隔が変わってくる。さらに、ジャンプエッジによってパターンの形状自体がまったく変わってしまう。よって、空間的にリニアに広がった自己相関の強い投影パターンを用いることは不可能である。

2. 3 計測環境

高精度化の他にも、時系列処理は空間的処理に優れている点がある。各画素が見る対象物の位置は、測定中において全く変化しないので、同一画素を時系列で見たとき、各種の条件は時間軸上で一定となる。すなわち、環境光や物体表面のテクスチャにまったく影響を受けたり利点がある。

これに対して、スリット輝線の曲線フィッティングなどの空間的処理では、テクスチャにより輝線に位置ずれを生じてしまう。

時系列処理は、以上のように大きな利点が期待できる能動型計測の新たな手法と言える。以降では、この原理に基づき実際に計測装置を試作し、動作を確認したので、これについて報告する。

3. 時系列投影パターン

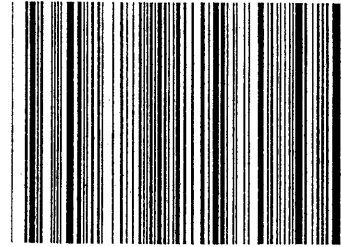
時系列処理の特長を最大限に発揮させるには、自己相関の強いパターンが有効である。このようなパターンとして、M系列符号とChirp信号があげられる。投影プロジェクタと入力カメラを同じ水平面内に配置するので、画像は横軸（水平）方向に走査させる。従って、横軸方向には信号によって輝度が変調されたパターンを持つが、縦軸方向にはパターンを持たない二次元変調投影光となる。

3. 1 M系列符号

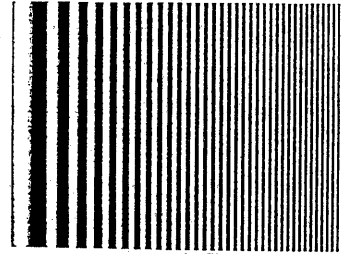
M系列符号は、デジタルの疑似ランダム符号で、自己相関が強いことで知られている。各画素の階調はM系列の1、0に対応して、それぞれ白、黒の二値で与える（図4(a)）。

3. 2 Chirp信号

M系列符号が、自己相関の強いデジタル信号であるのに対し、Chirp信号は自己相関の強いアナログ信号である。Chirp信号は、主に連続波レーダに用いられている波形で、レーダの場合には、時間とともに正弦波の周波数をリニアに変化させるが、ここでは、一枚の投影画像において、その水平方向の位置とともに明暗の空間周波数をリニアに変化させている（図4(b)）。使用したChirp



(a) M系列符号



(b) Chirp信号

図4 変調パターン

信号は以下の式で与えられるものである。但し、 i は水平方向の画素の座標を、 M は横画素数を示す。

$$\text{Chirp}(i) = \sin 2\pi \left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{2M} i + f_{\min} \right) i$$

3. 3 マッチドフィルタ

自己相関の強い基準信号により投影光の輝度を変調し二次元パターンを得る。それを走査することで時空間画像が生成される。このとき任意の画素に着目すると、その画素明度の時系列のパターンは基準信号と一致するが、開始点がずれており、このずれが投影位置となる。

$$SC(s) = \sum_{t=0}^{639} (B(t) - AV) \times M(t+s)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B(t): \text{入力画像の明度} \\ M(t): \text{M系列符号の値} \\ AV: \text{入力画像の明度平均} \\ t: \text{フレーム番号} \\ s: \text{シフト量} \\ 0 \leq t, s \leq 639 \\ 0 \leq B(t) \leq 255 \\ M(t) = \{1, -1\} \\ M(t) = M(t+640) \end{array} \right.$$

この開始点を画素明度時系列と基準信号とのマッチドフィルタで検出する。具体的には、基準信号を巡回させつつ、明度時系列との相関値を計算し、ピーク点を発見する。相関値は前式の相互相関演算にて行う。

4. 実験

4.1 投影系

前述の時系列処理を実現するためには、計測領域のすべての点で投影パターンの走査速度が等しい投影系が必要である。そこで、計算機により投影パターンを発生させ、液晶プロジェクタでそのパターンを投影される構成を取る。投影パターンは、時間とともに対象物を一方向に走査していく必要があるが、これは生成する投影パターンを徐々に変化させることで実現する。この方法の特徴は、明るさ、色、走査方向などを含め、自由なパターンを容易に作りだすことができることである。

投影パターンの計算機上での画像サイズは横640画素×縦480画素である。M系列符号パターンでは、実験に用いた液晶プロジェクタが横方向で640画素の解像度を持たないため、最小線幅を3画素とした。すなわち、M系列の1ビットを3画素に対応させている。今回用いた符号は符号長255ビットのもので、実際の投影パターンでは、画素の制約により、255ビットのうち213ビットを使用した。

Chirp信号パターンでは、概略で周期100画素から周期10画素まで変化させている。

また、従来法との比較においては、同じ条件による比較が望ましいので、スリット光に対応する投影パターンを用いた実験も行なった。

4.2 入力画像

図5に、オリジナルシーンと対象物にM系列符号投影パターンを射てたときの入力画像を示す。図6は、投影パターンを徐々に走査して入力した画像列のx-t平面での強度分布を示し、同図でx軸方向の処理が空間的処理に、t軸方向の処理が時系列処理に対応する。x軸方向では、スライス位置によってその強度分布の形が変わるが、t軸方

向ではどのスライス位置でも強度分布の形が変わらないため容易に相関演算が可能となる。ある画素について相関演算を行なった結果を図7に示す。特定のフレームで相関のピークを示すことから、時系列処理による計測が可能であることを示している。この演算を全画素で行ない、形状データとしたものを図8に示す。対象物はテキスチャを持つが、得られた結果はその影響を受けず、時系列処理が対象物のテキスチャに対してロバストな手法であることを示している。

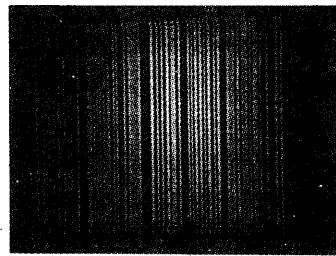


図5 M系列符号による変調投影光が照射された計測対象

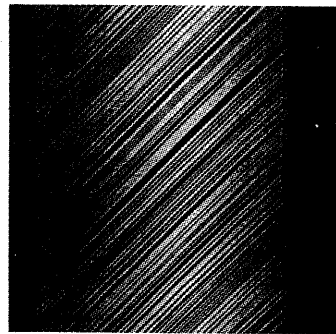


図6 時空間画像のt-x断層画像

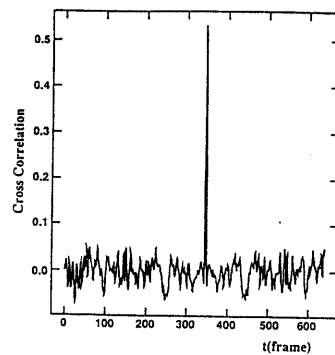


図7 巡回させた相互相関値の変化

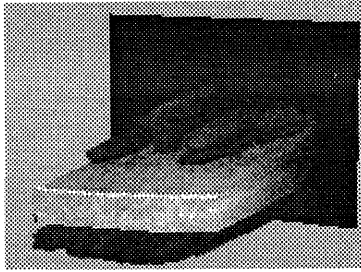


図8 三次元再構成された計測対象

4. 3 計測精度

空間的処理と時系列処理では、独立変数と従属変数の関係が入れ替わっているため、直接に精度を比較するのは難しい。そこで、白色平面の対象に対して画面上で一画素になるように画角と投影パターンの走査単位を設定し、時空間画像の時間t、縦軸を画素xが45度になるようにした。

また計測精度を確認するため同時に数値シミュレーションを行なった。投影光の原波形に、レンズはけのインパルス応答（分散が2画素の正規分布）をコンボリューションし、得られた波形に白色ノイズ（分散が5階調の正規分布）を加えて疑似的な入力画像信号をつくる。これらの結果を合わせて、各方法の誤差の標準偏差を表1に示す

表1 シミュレーションと計測実験
(誤差の標準偏差)

投影パターン	シミュレーション	実験結果
スリット光	0.110画素	0.091画素
M系列符号	0.010フレーム	0.071フレーム
Chirp信号	0.008フレーム	0.024フレーム

測定点の数は、スリット光の場合、空間的に約6画素の広がりがあるため6点であると考えられることができる。M系列符号の場合は、測定点はフレーム数に等しく640点であるが、相互相関演算に有効なのは、符号の切替り部分だけで、今回のM系列では108点である。Chirp信号では640点すべてが有効と考えられる。これより、M系列符号

で期待される計測精度は、スリット光での計測精度、すなわち誤差の標準偏差を1としたとき、 $1/\sqrt{108/6}=0.24$ になるが、実際は0.77にとどまっている。同様に、Chirp信号では0.10に対して実際は0.25となっており、シミュレーションの方が実験よりよい結果となった。このことは、時系列処理が、明暗ノイズに対しては非常に強い計測方法であることと、実験では別種の計測精度を落す要因が明暗ノイズ以外に存在することを示している。これは、液晶プロジェクタのジッタ雑音によるものと思われる。

5. まとめ

スリット光を中心とする構造化光の投影による距離画像計測に、時空間画像処理と信号処理の二つの新しい考え方を導入した。M系列符号やChirp信号などの自己相関の強い信号で輝度変調した二次元パターン光を走査させつつ計測対象に投影し、その時空間画像の信号処理に基づいて三次元計測する新しい原理を提案した。マッチドフィルタによる多数のデータ点を用いた信号処理に基づいているため、高い耐雑音性等の優れた特長を有している。

Chirp信号を投影パターンに用いた場合、従来のスリット光による計測に比較して、4倍の精度向上を実現した。さらに、シミュレーション実験により、時系列処理がノイズに対して従来法より一桁以上の高精度化が可能であることを示した。

本法では、投影光の位置検出に種々の信号処理アルゴリズムが適用できるため、投影パターン、パターン位置検出、ノイズ除去などに対して広範な改良が容易に考えられる。このように優れた可能性を秘めている本法の充実と展開を目指す。

参考文献

- [1] 井口, 佐藤: "三次元画像計測", 昭晃堂, 1990
- [2] Faugeras, O.D. and Pauchon, E.: "Measuring the shape of 3-D objects", Proc. CVPR, pp.2-7, 1983
- [3] Shirai, Y.: "Recognition of polyhedra with range finder", Pattern Recognition, 4, 2, 1976
- [4] 佐藤, 井口: "液晶シャッタによる高速距離画像計測システム", 信学論(D), J71-D, 7, pp.1249-1257, 1988