

レーザーパターンシフトによる 距離計測分解能の向上手法

服部数幸 佐藤幸男

hattori@hilbert.elcom.nitech.ac.jp

名古屋工業大学 電気情報工学科

〒466 名古屋市昭和区御器所町

時系列空間コード化法は、高速に距離計測が可能であるが、原理的に計測距離に量子化誤差を持つ。この誤差は主に、空間を量子化する際に生じるものであるため、量子化空間そのものではなく、各空間の境界を直接検出する手法により高精度化をはかる手法を提案する。境界の検出には、レーザスキャンによるパターン生成手法を用いてパターン光そのものをシフトすることにより可能である。この手法により、従来の時系列空間コード化法と比較して高精度な距離画像が、若干の計測時間の増大で取得可能である。本稿では、提案手法の説明に加え、計算機シミュレーションによる誤差解析結果により、本手法の有効性も併せて述べる。

High Accurate Range Measurement Method using Laser Pattern Shifting

Kazuyuki Hattori and Yukio Sato

Department of Electrical and Computer Engineering

Nagoya Institute of Technology

Gokiso, Showa, Nagoya, 466 Japan

The space encoding rangefinder can achieve high speed measurement, but it has measurement error on space sampling in principle. To improve this error, we propose a method which detects the projected pattern edge accurately. To detect each pattern edge, we introduce pattern shifting into laser scanning rangefinder, by taking advantage of the charge storing characteristics of a CCD device. Using this method, we can obtain range images more accurate than normal space encoding with little increase in the measurement time. The realization of this method using the laser rangefinder and the simulated results in the computer are also described.

1. はじめに

レンジファインダの性能を評価する基準として、計測精度、計測空間分解能、計測時間は重要な要素である。これまでに提案されたレンジファインダの代表的な手法である光切断法は、最も高い精度を実現している（計測誤差0.1ミリ以下）。しかし、この手法では計測時間は空間分解能と撮像装置のフレーム時間の積として制限されるため、通常のビデオカメラを用いて高分解能の距離画像を得ようとする計測に時間がかかる（空間分解能256の場合、約10秒）。最近では、各画素が距離計測機能をもつ、距離画像計測専用のLSIチップが提案・開発されている[1]-[3]。このチップを用いると非常に高速（数十～数百フレーム/秒）で高精度（理論的には0.1ミリ以下）な計測が実現できるが、現在のところ解像度が粗く、実用の段階には至っていない。

一方、通常のビデオカメラを用いて、前述の光切断法の欠点を解決した手法に空間コード化法がある[4][5]。この手法は、幅の異なるストライプパターンを時系列的に投影し、計測対象空間を2進数でコード化されたくさび型の領域に分割することで、計測に必要なフレーム数を少なくしている（8ビットのコード化の場合、分解能256で約0.3秒）。しかし、空間を分割することによりその空間に対する投影角度が量子化誤差を含み、計測誤差は光切断法と比較して若干劣る（1ミリ以下）。この空間コード化による誤差を補正する手法として、相補パターン投影によるパターン境界の内挿処理と、空間コードの線形補完処理を組み合わせる手法が提案されている[5]。この手法では、コード化による誤差をある程度まで軽減しているが、基本的に補完を用いているため完全ではない。

そこで本稿では、レーザスキャンによる空間コード化法[6]に、パターンシフトを導入することにより、疑似的に空間コード化の解像度を向上させる手法を提案する。本手法は、従来の空間コード化法と比較して若干の計測時間の増大で光切断法と同等の計測精度を達成することが可能である。本稿では、パターンシフトによる計測原理と、計算機シミュレーションによる誤差解析結果について報告する。

2. 誤差を生じる要因

光切断法に用いられている三角測量の基本原

理を図1に示す。図1はレンジファインダのカメラ撮像面の任意の水平軸を含み、光軸に平行な平面での切断図である。図1において、Pを計測対象点、Aを光源位置、Bをカメラレンズの光学中心とすると、線分APは投影されたスリット光平面を表す。スリット光平面が撮像面の縦軸と平行であると仮定すると、スリット光投影角度は撮像面上の任意の水平断面で一定値 θ となる。このとき、計測対象点Pまでの距離 z は次式で計算できる：

$$z = \frac{f \cdot l}{x + f \tan \theta} \quad (1)$$

ただし、 f は焦点距離、 l は線分ABの長さ、 x は線分BPと撮像面との交点から撮像面と光軸の交点の間の距離である。

式(1)から、 z の精度はパラメータ f 、 l 、 x 、 θ の精度に依存することがわかる。これらのパラメータのうち、 f および l はレンジファインダの構成にしたがってあらかじめ決定すべき値である。一般に f および l はなんらかのキャリブレーション手法を用いて決定するが、ここでは三角測量の持つ原理的な誤差要因を明らかにするために、このふたつのパラメータは誤差なく推定できるものと仮定する。すると最終的な計測精度は x および θ の精度に依存する。

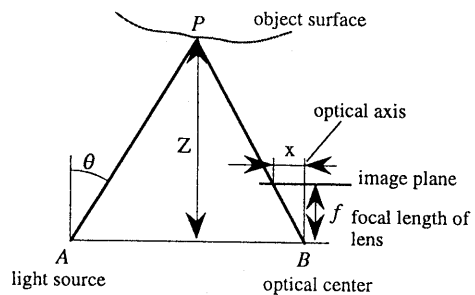


図1. 光切断法

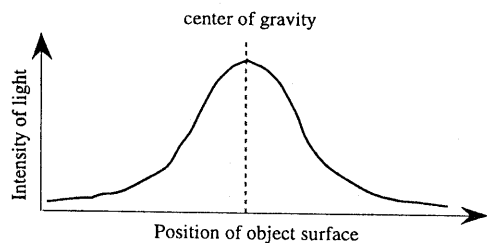


図2. スリット光の光強度分布

光切断法において対象物上に投影したスリット光は、図2に示すような形の光強度分布を持つ。この分布により、スリット光の投影角度は分布の幅に比例した誤差を持つ可能性がある。一般にこのスリット光の幅による投影角度の誤差は、スリット光の光強度分布を正規分布で近似し、その重心位置の投影角度 θ を用いることで減少させることが出来る。このことは、スリット光の撮像面上での位置 x の検出にも同様に適用でき、 x はサブピクセルのオーダーまで決定することが可能である。以上から、光切断法では計測誤差の要因となる x と θ の検出誤差を抑えることが出来るため、高精度な計測が期待できる。

一方時系列空間コード化法では、図3に示すようにストライプの幅が次第に狭くなるパターン光を順次対象空間に投影し、計測空間を2進コード化された領域に分割する。一般的にはストライプの幅がスリット光に近似できるほど薄いと仮定し、得られた領域番号を用いて各画素が対応する点への投影角度 θ を取得し、距離を算出する。ここで、

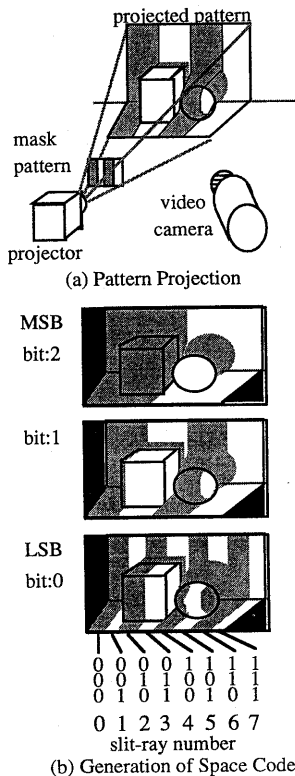


図3. 時系列空間コード化法

一般に各領域は複数の画素に渡って幅を持つ。同一領域内の画素はすべて同じ投影角度 θ をもつ点として検出されるため θ 決定に誤差を含む。これは空間をコード化することによって生じる量子化誤差である。また、逆に、各空間コード領域を撮像面で検出する際にも明暗の比較を画素単位で行うため、結果として x の決定に誤差を含む。佐藤ら[5]は、相補パターン投影法を用いて空間コードの境界位置検出をサブピクセル単位で行い、さらに同一の空間コード内に含まれる画素の投影角度 θ を線形補間することでこれらの量子化誤差をある程度除去する手法を提案している。その手法により、距離計測誤差を0.18ミリまで小さくしているが、それでも光切断法の2倍程度の誤差を有する。

我々は、この量子化による θ および x の検出誤差をさらに減少させるため、各画素のサブピクセル位置における投影角度 θ を直接検出する方法を提案する。まず、前述の画素による量子化誤差は、パターン光によって生成される各領域が持つ量子化誤差によって生じていることを既に述べた。したがって、我々は領域そのものを検出する代わりに、各パターン光の明暗の境界平面を利用することを考えた。境界平面は、理論的には空間を占有する幅がなく、これにより投影角度 θ の量子化誤差を除去できる。また、この位置を撮像面上で正確に検出できるならば撮像面上での量子化誤差も減少させることが可能である。これを実現するためにはより高解像度な撮像素子を用いることが第1に考えられるが、幅を持たない平面を検出可能なほど高解像度な撮像素子は現在のところ存在せず、現実的ではない。そこで我々は、パターンの境界が撮像面上の既知の位置、例えば各画素の中心で捉えられるように撮像素子あるいはパターンそのものを計測ごとにシフトすれば良いと考えた。

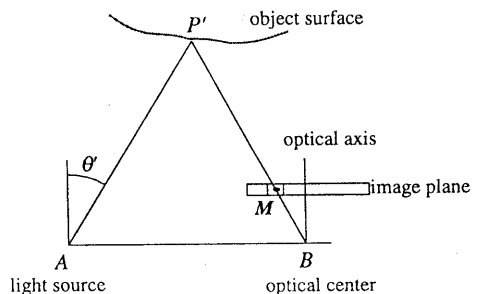


図4. 拘束条件を導入した光切断法

撮像素子をシフトすることはカメラの機構を複雑にするばかりでなく機械的なシフトによる誤差が増加する恐れがある。一方、著者らの提案したレーザスキャンによるパターン光生成手法[6]を用いると、レーザスイッチングのタイミングを変更するだけで任意のパターンのシフトが可能である。この特徴を利用して、パターンの各境界位置を各画素の中心で直接捉え、 x および θ の検出誤差を減少させる。

3. パターンシフトによる境界の検出

前章で述べたパターン光の境界検出問題を、図4を用いて具体的に再定義する。すなわち、レンズの光学中心BとCCDのある画素の中心Mを通り、物体表面に到達する直線BMと点P'で交わるパターン境界平面を求める問題として定義する。この問題を解くためにはCCD素子の光蓄積作用を利用できる。図5はパターン光の境界部分を撮影しているCCD撮像素子の1画素の拡大モデル図である。画素内の微小領域 dS 、単位面積あたりに入射する光の量を Q とする。光量 Q が画素内の任意の位置で一定であると仮定すると、この画素の出力する輝度値 I は、

$$I = C \int_S Q dS = CQS \propto S \quad (2)$$

となる。ただし、 S は画素の面積、 C は素子に依存する比例定数である。つまり、入射光量が画素内で均一であるならば、その輝度値は画素の面積に比例する。ここで、パターン光の境界が画素内に存在する状態(図5)において、明部および暗部の微小領域 dS に入射する光量をそれぞれ Q_b 、 Q_d ($Q_b > Q_d$) とすると、画素の輝度値 I' は

$$I' = C \left(\int_{S_b} Q_b dS + \int_{S_d} Q_d dS \right) = C(Q_b S_b + Q_d S_d) \quad (3)$$

となる。ただし、 S_b 、 S_d はそれぞれ明部、暗部の面積である。ここで $S = S_b + S_d$ であるので、式(3)は

$$\begin{aligned} I' &= C\{(Q_b - Q_d)S_b + Q_d(S_b + S_d)\} \\ &= C\{(Q_b - Q_d)S_b + Q_d S\} \end{aligned} \quad (4)$$

と変形できる。 $Q_d S$ は、画素が全て暗部で覆われた場合の画素の輝度値を表しており、これを I'' とおく。このとき、画素の中心にパターンの境界が存在する場合は、 $S_b = S_d = \frac{1}{2}S$ であるから、

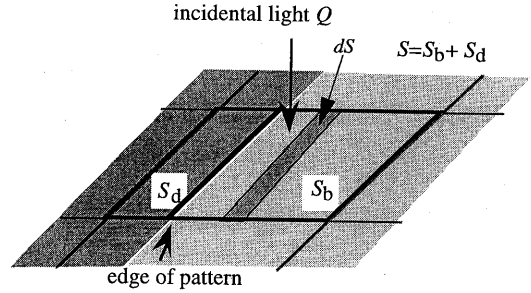


図5. パターンエッジ上の画素

式(4)から

$$I' = \frac{1}{2}C(Q_b - Q_d)S = \frac{1}{2}(I + I'') \quad (5)$$

を得る。

一般に、任意の角度で投影したパターン光の各領域の境界は画素の中心に存在しないので $S_b \neq S_d$ である。ここでパターンを微小角度 $d\theta$ ずつシフトさせ、 $S_b = S_d$ となる状態、すなわち、式(5)を満たす輝度値 I' を検出することでパターン境界を画素の中心でとらえることができる。

この手法を空間コード化の最下位ビットパターンに適用した様子を図6に示す。図において、従来の空間コード化法における最下位ビットパターンの n 、 $n+1$ 番目の境界の物体への投影点をそれぞれ、 P_n, P_{n+1} とする。この2点の撮像面上での位置は、図に示すように2画素 $i, i+1$ を挟んでおり、さらに画素の中心には存在しない。ここで、パターン全体を $d\theta$ ずつ右方向へシフトする。 k 回シフトしたときの境界 P_n の位置を $P_{n,k}$ とすると、

$$d\theta = \angle P_{n,k} A P_{n,k+1} \quad (k=1, 2, \dots, m-1) \quad (6)$$

ただし、 m は境界 $\overline{AP_n}$ がシフトして境界 $\overline{AP_{n+1}}$

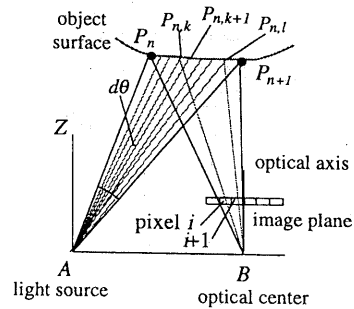


図6. パターンシフトの様子

まで移動するのに必要なシフト回数であり、

$$m = \frac{\angle P_n A P_{n+1}}{d\theta} \quad (7)$$

である。このときパターン境界が、画素 i の中心に位置すれば、この画素の輝度値は式(5)を満たす。従って、この画素に対応する投影角度を θ_i とすると、シフト回数 k を用いて

$$\begin{aligned} \theta_i &= \angle ZAP_{n,k} \\ &= \angle ZAP_n + k \cdot d\theta \quad (8) \end{aligned}$$

となる。同様にして、更にシフトを続け、1回のシフトでパターン境界が点 $P_{n,l}$ に達し、画素 $i+1$ が式(5)を満たしたときの投影角度が得られる。シフト回数が m に達すると、パターン境界 $\overline{AP_n}$ がその隣のパターン境界 $\overline{AP_{n+1}}$ まで移動する。これにより画面上の全ての画素をどれか一つのパターン境界が横切ることになり、各画素中心に対応する投影角度 θ を得ることが可能である。

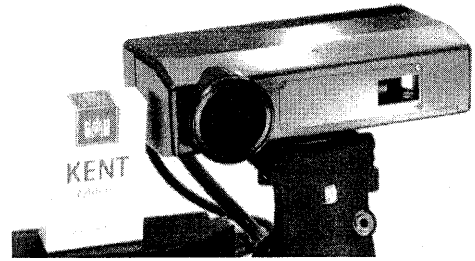
次に、本手法における計測所要時間を考察する。光切断法において、水平方向に n 本の解像度を持つ距離画像を計測する場合、 n 枚の画像撮影が必要である。一方空間コード化法では $\log_2 n$ 回の画像撮影が必要である。本手法の場合、従来の空間コード化法に必要な画像撮影枚数に加え、 $d\theta$ に依存するパターンシフト回数 m 枚の画像撮影が必要である。したがって、最終的に計測時間は $\log_2 n + m$ となる。この追加撮影枚数 m は、式(7)で決定できる。

4. レーザスキャンによるパターンシフトの実現

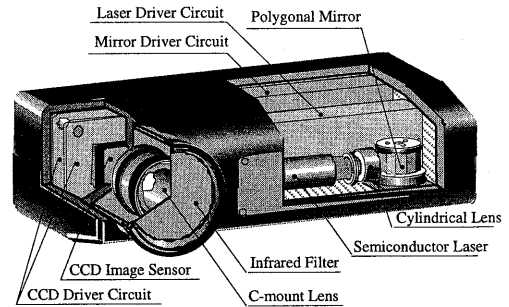
前節で述べた手法を実現するためには、パターン光を微小角度 $d\theta$ ずつ正確にシフトする装置が必要である。これには著者らが開発したレーザスキャンによるレンジファインダ Cubicscope[6]を利用すると容易に実現可能である(図7)。本レンジファインダは、レーザスリット光をビデオ信号に同期させて空間を走査し、それと同時にレーザをON/OFFすることでパターン光を生成する。レーザの走査はポリゴンミラーによる等角速度走査である。その等角速度を ω とする。レーザのスイッチングは、図8に示すようなビデオ信号に同期したクロックに基づいて行う。このクロックの1周期を τ とすると、時間 τ によって生じる微小走査角度 $d\theta$ は、

$$d\theta = \omega\tau \quad (9)$$

となる。したがって、クロックの1周期を基準



(a) rangefinder Cubicscope



(b) construction of Cubicscope

図7. レンジファインダ Cubicscope

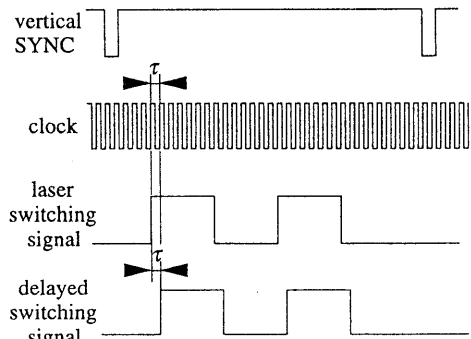


図8. レーザシフトタイミングチャート

としてパターン光生成タイミングをシフトすれば3章で述べた微小シフト角度は、式(9)の $d\theta$ として実現できる。微小シフト $d\theta$ を施したパターン光は、各画素ごとに式(5)を満たす輝度値を与えるシフト量の検出に使用する。単純に式(5)を満たす条件を探索するためには、シフトパターンごとに輝度値を比較する必要がある。今回の実験に用いたレンジファインダ Cubicscope はパターン画像を実時間で2値化するハードウェアを実装している。

そのハードウェアを用いれば、得られたシフトパターン画像を実時間で処理可能である。

5. 計算機シミュレーションと考察

3章で述べた計測手法を用いて計算機シミュレーションによる実験を行った。実験では、計算機上で理想的なレンジファインダを構築し、図9に示すような平面の計測誤差を検討した。計測する平面は、レンジファインダの光軸に対して垂直に設置し、平面とレンジファインダの距離を100ミリから1000ミリまで100ミリごとに移動させた。図10に誤差の計算結果を示す。この図において、横軸は平面までの距離、縦軸は計測誤差である。従来の空間コード化法による計測誤差を破線で示す。実線で示した4つの誤差曲線は、式(7)で定義した m をそれぞれ $m=2,5,10,20$ とした場合の誤差を示している。

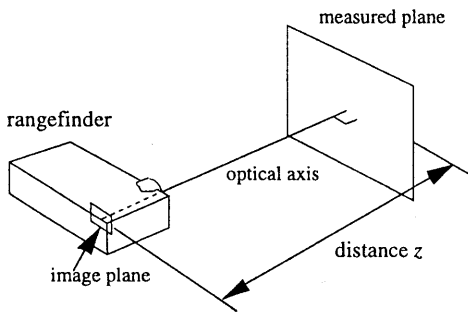


図9. 計算機シミュレーションの設定

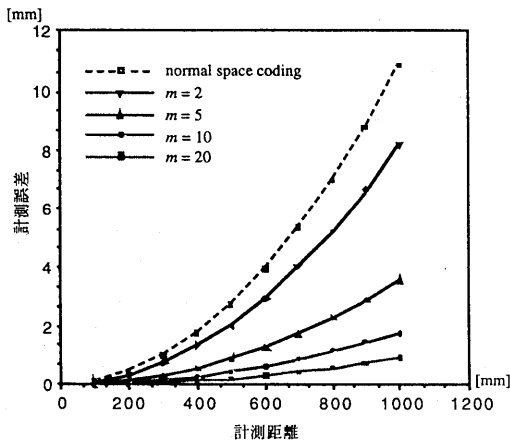


図10. 誤差解析結果

これによると、 m を大きくすることで、即ち、シフト単位角度 θ を小さくすることで計測誤差が小さくなることが確認できる。また、 θ は式(9)の τ によって決定されることから、 τ を制御することで得られるデータの誤差を制御することが可能であることもわかる。

6. まとめ

本稿では、時系列空間コード化法におけるパターン光を微小角度ずつシフトすることにより、計測時間をほとんど増大させることなく高精度な距離画像を得る手法を提案し、計算機シミュレーションを用いて、原理的な有効性を示した。実際のシステムを用いた計測およびその評価は現在進行中である。本報告においては、画素に入射する光量がパターン光の明部と暗部でそれぞれ均一であると仮定して理論を構築した。しかし、実際の計測においては計測対象の表面の状態による光量のばらつきや、撮像素子内部で生じる雑音等による誤差の影響を考慮する必要がある。実際のシステムを用いて、発生する誤差の傾向と原因を考慮し、より安定な計測手法を確立することが今後の課題である。

参考文献

- [1] K.Araki, Y.Sato, and S.Parthasarathy, "High Speed Rangefinder," SPIE, vol.850, pp.184-188, 1987
- [2] T.Kanade, A.Gruss, and L.Richard Carley, "A Very Fast VLSI Rangefinder," Proc. of 1991 IEEE ICRA, pp.1322-1329, 1991
- [3] 佐藤宏介, "シリコンレンジファインダと動距離画像処理", MIRU'92-I-335, 1992
- [4] Posdamar and Altsuler, "Surface measurement by space-encoded projected beam system," Computer Graphics and Image Processing, 18, pp.1-17 (1987)
- [5] 佐藤宏介, 井口征士, "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", 信学論 (D), J71-D, 7, pp.1249-1257, 1988
- [6] K.Hattori and Y.Sato, "Handy Rangefinder for Active Robot Vision," Proc. of 1995 IEEE ICRA, pp. 1423-1428