

最適強度組合せパターン光投影に基づく 非均一色物体の3次元画像計測

福田 琢磨[†], 長 元気[†], 盧 存偉[†]

[†] 福岡工業大学大学院工学研究科

パターン光投影に基づく3次元画像計測方法は、非接触で物体の形状や位置を計測することができる。この中で二値化式のパターン光投影手法は、多数回の投影が必要なため計測に時間がかかる。一方、非二値化式のパターン光投影計測手法は原理的には少数回の投影で計測が可能であるが、物体の表面反射率が未知の場合、理想的なしま強度分布を持つ観測パターン画像を得られない問題がある。筆者らは一回の投影でより多くのしま本数を投影し、観測パターン画像よりロバストにしまアドレスを検出するために、投影パターンのしま強度分布を最適化する最適強度組合せパターン光投影手法と、全照明画像を用いて観測パターン画像のしま強度分布を補正する手法を提案した。本研究では、上記のしま強度分布補正手法を拡張し、観測パターン画像のカラー解析に基づく強度補正を用い、非均一色物体の計測を行う。

3-D Image Measurement of Non-uniformity color Object Based on Optimal Intensity Modulated Projection

Takuma FUKUDA[†], Genki CHO[†] and Cunwei LU[†]

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology

3-D image measurement methods based on the pattern projection can measure shape and the position of the object by noncontact. As for the pattern projection of the binarization type in this, because a lot of projection of times is necessary, the measurement time is long. The pattern projection measurement technique of non-binarization type is image with an ideal intensity distribution is not obtained. Because, surface reflectivity of the object is an unknown. In this research, we present a new technique, which combines the method of the optimal pattern and the method of the image intensity correction based on color-analysis of observation pattern, to solve above problems.

1 はじめに

パターン光投影計測方法は計測物体に特徴情報を与えることができるので、計測環境への依存性が低く、信頼性の高い3次元形状計測が可能である。図1は典型的なパターン光投影計測システムの構成例である。コンピュータより出力された投影パターンはプロジェクタより計測物体に投影され、カメラは計測物体に反射された投影パターンを観測パターン画像として撮影し、コンピュータに入力する。次に、入力された観測パターン画像より投影パターンのしまの方向情報を検出し、三角測量の原理に基づいて物体の3次元形状を復元する。パターン光投影計測方法は、二値化式のパターン光投影計測手法と非二値化式のパターン光投影計測手法に大別することができる。二値化式の計測手法はスリット光投影法や空間コードパターン光

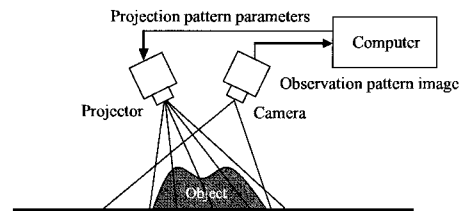


Fig. 1 パターン光投影計測システムの典型的な構成例

投影法などがあり、二値化の投影パターンと二値化画像を用いるので投影パターンと観測パターン画像の対応関係の検出が容易であり、計測の信頼性が高いが、高感度計測を実現するためには多くの投影・撮影回数を必要とするため計測時間が長

い^{1, 2)}。

非二値化式の計測手法は強度変調パターン光投影法やカラーパターン光投影法、濃度傾斜パターン光投影法などがある。非二値化式の手法は、非二値化の白黒若しくはカラーの投影パターン及び画像を用いるため、一回の投影で二値化式パターン光投影計測手法より多くの情報を得ることができ、原理的には短時間で高感度な3次元計測を行うことができる^{3, 4, 5)}。しかし、色強度情報より多数のパターン方向情報を検出しようとする、計測物体の表面反射特性の影響などにより誤検出してしまふ問題がある。筆者らはこの問題解決のために、最適強度組合せパターン光投影計測手法^{6, 7)}及び二枚画像による割り算式の画像強度補正手法⁸⁾を提案した。本論では計測物体が非均一色の場合においてもよりロバスト性の高い計測を行うために、上記手法を拡張し、観測パターン画像にカラー解析方法を用いることで、表面色分布のある計測物体に対しても多数本のしまの方向情報即ちしまアドレスを精度良く検出する。

2 最適強度組合せパターン光投影計測手法及び割り算補正手法

精度の良い3次元計測を行うためには、観測パターン画像から多数本のしまアドレスを検出する必要がある。最適強度組合せパターン光投影計測手法とは、一回の投影で精度良く多数本のしまアドレスを検出するために、投影パターンのしま強度の空間分布を最適化し、隣接しま間の強度差を最大化することにより、しまアドレスの検出精度を向上させる手法である⁵⁾。

N 個のしまをもつ投影パターンに対し、式(1)の評価関数 $d(I_1, I_2, \dots, I_N)$ を最大にするしま強度の組合せ (I_1, I_2, \dots, I_N) を最適組合せとし、この組合せを持つパターンを最適投影パターンとする。

$$d(I_1, I_2, \dots, I_N) = \sum_{i=M+1}^N \sum_{j=1}^M k_j |I_i - I_{i-j}| \quad (1)$$

このとき、 k_j は重み係数、 M は評価関数をかけるフィルタの幅である。図2(a)は式(1)より生成された投影パターンの生成例であり、(b)は投影パターンの評価ライン $A-A'$ のしま強度分布である。観測パターン画像から各しまのアドレスを求めするために、観測パターン画像と強度均一の投影光強

度をもったパターンを投影した際に観測された全照明画像を用いて、観測パターン画像の強度を補正する⁴⁾。観測パターン画像座標 (x, y) にある画素の強度値を $\bar{I}(x, y)$ 、全照明画像の画素強度値を $\bar{I}_o(x, y)$ とした時、補正は次式のようになる。

$$\bar{I}'(x, y) = D_1 \frac{\bar{I}(x, y)}{\bar{I}_o(x, y)} = D_1 \frac{I_i R(x, y)}{P_o R(x, y)} = D_2 I_i \quad (2)$$

D_1 と D_2 は定数、 I_i は投影されたパターンの強度変調関数、 P_o は全照明光強度、 $R(x, y)$ は計測物体の表面 (x, y) における反射成分である。これにより、計測物体の表面反射成分を軽減し、理想的な計測用画像を得ることができる。図3は人体(顔)に対して、図2の投影パターンを投影し、式(2)に基づき観測パターン画像の強度補正を行った例である。図3(a)は全照明画像、(b)は観測パターン画像、(c)は補正後の観測パターン画像、(d)は(c)の評価ライン $A-A'$ の強度分布である。計測物体の表面反射成分は軽減されており、投影しま強度の変化の規則性が保たれていることが分かる。

補正後の観測パターン画像における n 本 ($n \leq N$) のしま強度分布を $(\bar{I}_1, \bar{I}_2, \dots, \bar{I}_n)$ とすると、 i 番目の注目しまのアドレスが k である確率 $L_i(k)$ は次式より計算され、この $L_i(k)$ を最大とする k を、しまアドレスとする。

$$L_i(k) = 1 - w_1 \frac{|\bar{I}_i - I_k|}{S} - w_2 \sum_{j=1}^{N_1} \frac{|\bar{I}_{i-j} - I_{k-j}|}{S} - w_3 \sum_{j=1}^{N_2} \frac{|\bar{I}_{i+j} - I_{k+j}|}{S} \quad (3)$$

ここで、 w_1, w_2, w_3 は定数、 S は投影光の最大強度と最小強度の差であり、 $N_1 \leq M, N_2 \leq M$ である。

しかし、計測物体の表面が人体のような均一性を持たない非均一色物体である場合、計測物体の表面色分布は強度レンジの不足により精度良い強度補正が行えず、しまアドレスの検出の精度が低下する場合がある。画像の強度レンジの拡張のためにはシャッタースピードや絞りを変化させながら複数回撮影した画像を合成する方法^{10, 11)}などが考えられるが、これらの方法は撮影回数が増加し、計測時間が長くなる。一方最近ではダイナミックレンジの広いカメラが実用され始めているが、これらのカメラは高価である場合や濃淡表現しか出

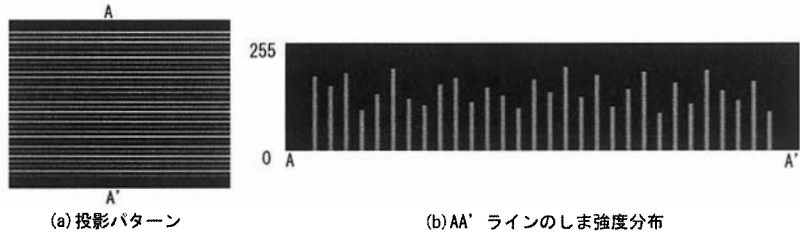


Fig. 2 最適強度組合せ投影パターンとその強度分布

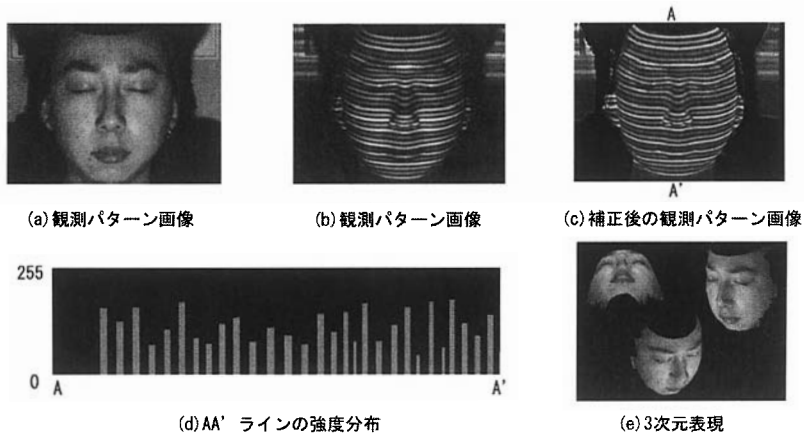


Fig. 3 人体の顔の計測結果例

来ない場合、専用のグラバーボードなどが必要な場合が殆どであり、3次元計測技術のエンターテイメントなどの利用普及を目的とした場合不向きである。本論では廉価なカラーカメラの強度レンジを拡張し、精度よい3次元計測を実現するために、撮影された8ビットカラー画像を色チャンネルごとにカラー解析し、強度レンジの広い計測用画像を合成する方法を用い、計測アルゴリズムを構築する。

3 計測アルゴリズム

図4は計測のアルゴリズムである。下記にその具体的な内容を示す。

Step 1: 全照明パターンを計測シーンに投影する。全照明投影パターンは白黒系の強度均一な投影パターンであり、強度 P_0 は投影光強度範囲の中間値とする。

Step 2: 画像を撮影し、全照明観測パターン画像とする。

Step 3: 全照明観測パターン画像を式(4)に基づいて色強度解析し、画素毎に最も強度分布範囲が広い色チャンネルを選択する¹²⁾。ここで選択された色チャンネルの画素強度値を用いて計測用画像を合成する。

$$\bar{I}(x, y) = \max\{\bar{I}_R(x, y), \bar{I}_G(x, y), \bar{I}_B(x, y)\} \quad (4)$$

このとき、 $\bar{I}(x, y)$ は計測用画像における画素強度値であり、 $\bar{I}_R(x, y)$, $\bar{I}_G(x, y)$, $\bar{I}_B(x, y)$ はそれぞれ全照明観測パターン画像のR,G,Bチャンネルの画素強度値である。このようにして画素ごとに最も強度分布範囲の広い色チャンネルを選択し、計測に用いることで、観測パターン画像のしま強度レンジを確保し、精度よいしま強度補正を行う。

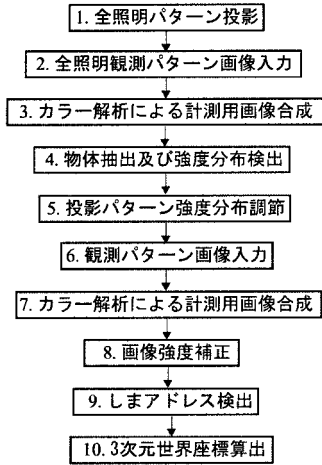


Fig. 4 計測アルゴリズム

Step 4: 背景差分法や閾値抽出法などを用いて計測用画像から計測物体を抽出し、その強度分布を検出する。

Step 5: 検出された物体の強度分布に基づき、強度レンジ広い観測パターン画像を得るために、提案システムでは式 (5) のような比例制御成分を基本とする段階式強度制御技術¹³⁾を用いて投影光のしま強度分布を調節する。即ち、1 回目、2 回目及び 3 回目以降の調節はそれぞれ異なる戦略で行う。

$$\begin{aligned}
 P_n = & P_{n-1} + \left(k_1 \frac{S - S_{n-1}}{S_{n-1}} + k_2 \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right) P_{n-1} \delta(n-1) \\
 & + k_3 \frac{S - S_{n-1}}{S_{n-1}} P_{n-1} \delta(n-2) \\
 & + k_4 \frac{S - S_{n-1}}{S_{n-1} - S_{n-2}} (P_{n-1} - P_{n-2}) u(n-3), \\
 & n = 1, 2, 3, \dots
 \end{aligned} \tag{5}$$

このとき、 P_n は n 回目に投影される投影パターン光の強度の最大値、 S は観測パターン画像のしま強度分布上限値の目標値、 S_n は n 回目のパターン光投影により撮影された観測パターン画像のしま強度分布上限値、 V_n は n 回目の撮影用のシャッタースピード、 δ はインパルス関数、 u は単位ステップ関数、 $k_1 \sim k_4$ は定数である。

Step 6: 強度分布の調節された投影パターンを投影し、観測パターン画像を撮影する。



Fig. 6 3次元表現例

Step 7: Step 3 で選択された画素ごとの計測用色チャンネルに基づいて計測用画像を合成する。

Step 8: 式 (2) に基づき計測用画像の画素強度値に含まれる計測物体の表面反射率の影響を補正する。

Step 9: 計測用画像より各しまの強度値を検出し、式 (3) の方法に基づきしまアドレスを検出する。

Step 10: 検出されたしまアドレスに基づき、3次元空間世界座標を計算する。

4 実験結果

実験に用いたカメラは CCD カラーカメラ (IEEE1394 接続)、投影機は液晶プロジェクターであり空間解像度はそれぞれ 1024×768 、強度解像度はそれぞれ 8bit である。図 5 は表面不均一色分布を持つ物体の計測結果例である。図 5(a) は全照明画像、(b) は観測パターン画像、(c) は補正後の観測パターン画像、(d) は (c) の評価ライン $A-A'$ の強度分布であり、図 2(b) の理想的なしま強度分布と比較しても規則性が保たれていることが分かる。図 6 はしま強度補正後の観測パターン画像よりしまアドレスの検出を行い、算出された奥行き値から 3DCG 表現したものもある。3DCG から正確なしまアドレスの検出が行われ、3次元形状計測が行えていることが分かる。

図 7 は様々な色分布、テクスチャ、材質及び形状を持つ物体の計測実験結果であり、いずれの実験でも 100% のしまアドレスの検出精度が得られた。

5 まとめ

本論では、非均一色物体の 3次元画像計測のために、最適強度組合せパターン光投影計測手法と割り算強度補正手法及びカラー解析手法を融合し、表面色分布にロバストな 3次元計測システムを構

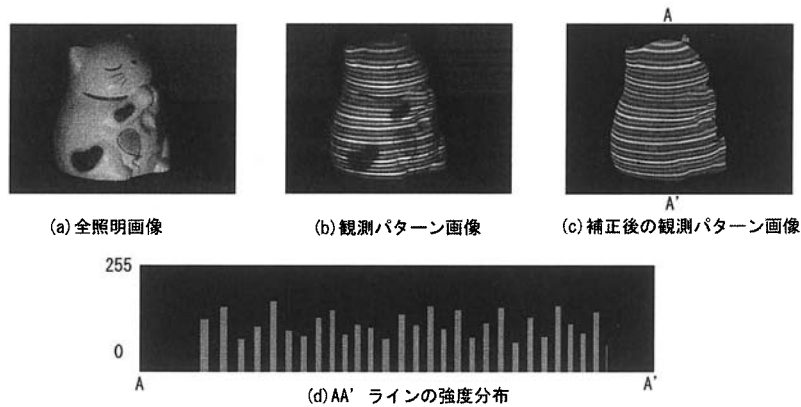


Fig. 5 表面に不均一色分布のある物体の計測結果例

築した。最適強度組合せパターン光投影計測手法により投影パターンのしき強度分布を最適化し、全照明画像と観測パターン画像をカラー解析することで、広い強度レンジにおいて表面色分布が不均一な物体の3次元形状計測ができた。様々な色分布やテクスチャ、材質及び形状を持つ物体の計測実験結果は提案システムの有効性を実証した。提案システムは3Dコンテンツを利用するエンターテイメントや人体の計測を必要とする医療分野、産業分野の品質管理の形状計測などの一環として、実用性が期待できる。物体の運動への対応が今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介, "三次元画像計測," 昭晃堂, (1990).
- 2) J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi, "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey," *Pattern Recognition*, Vol.31, No.7, pp.963-982, (1998)
- 3) B. Carrhill and R. Hummel, "Experiments with the intensity ratio depth sensor," *Comput. Vision Graphics Image Process.*32, pp.337-358, (1985)
- 4) 田島謙二, 岩川正人, "Rainbow Range Finderによる距離画像取得," *電子情報通信学会論文誌 (D-)*, Vol. J37, No.3, pp.374-382, (1990)
- 5) Z. Jason Gend, "Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision system," *Opt. Eng.* 35(2), pp.376-383, (1996)
- 6) C. Lu and L. Xiang, "Optimal Intensity-Modulation Projection Technique for Three-Dimensional Shape Measurement," *Applied Optics-IP*, Vol.42, No.23, pp.4649-4657, (2003)
- 7) 盧存偉, 相利民, 井口征士, "三次元画像計測のための投影パターンの最適化及び準最適組合せ生成アルゴリズム," *信学論D- ,* Vol. J88-D- , No.2, pp.325-333, (2005)
- 8) 盧存偉, 山口, 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," *信学論 (A)* vol. J80-A, No.9, pp.1257-1264, (1998)
- 9) 佐藤宏介, 井口征士, "空間コード化による距離画像入力," *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J68-D, No.3, pp.369-375, (1985)
- 10) 浅田, 松山, 望月, "多重絞リカラー画像の解析," *情報学会論文誌*, Vol.32, No.10, pp.1338-1348, (1991)
- 11) 森村, 吾妻, 魚森, "広ダイナミックレンジ画像合成処理技術," *映像情報メディア学会論文誌*, Vol.51, No.2, pp.228-234, (1997)

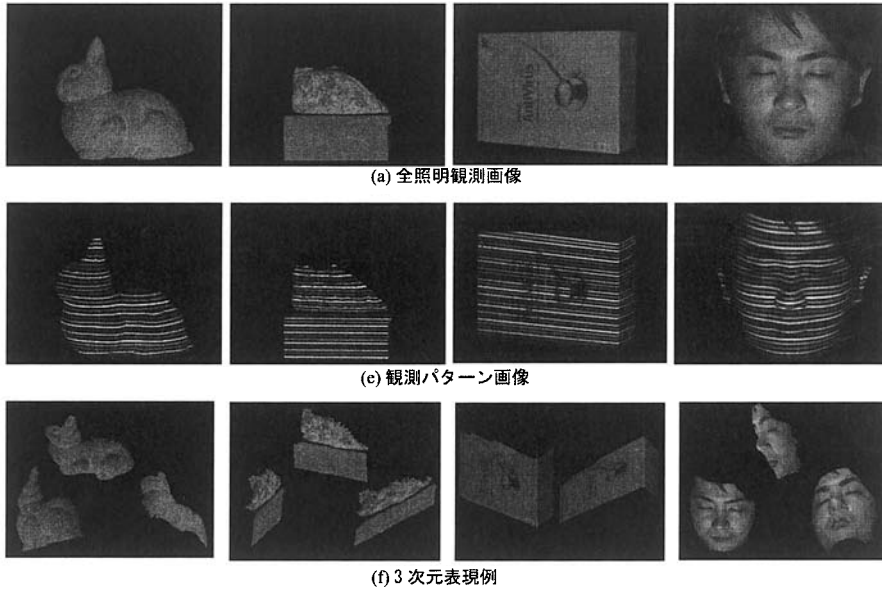


Fig. 7 様々な表面色分布物体の計測結果例

- 12) 盧存偉, 長元気: 「3-D Image Measurement by Combination of Monochrome-Projection Color-Analysis and OIMP Technique」, システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.6, pp.233-240, (2006)
- 13) C. Lu and G. Cho: Projection pattern intensity control technique for 3-D optical measurement, Optics Express, Vol.13, No.1, pp 106-114,(2005)