

Range-Finding Projectors: センサを用いない距離情報の可視化

Range-Finding Projectors: Visualizing Range Information without Sensors

鏡 慎吾

Shingo Kagami

東北大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード : 3次元計測 (three-dimensional measurement), レンジセンサ (range sensor), ステレオ視覚 (stereo vision), モアレトポグラフィ (moire topography), 補色 (complementary color)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 大学院情報科学研究科
鏡慎吾, Tel.: (022)795-7020, Fax.: (022)795-7020, E-mail: swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

工業計測, 科学計測, ロボティクスから映像メディア, 美容, 服飾, 医療に至るまで, 3次元形状計測はさまざまな分野で必須の技術である^{1, 2)}. 計測された結果の利用方法もさまざまであるが, 計測結果を人が見てわかりやすいように可視化することが必要な場合がある.

特に, 紙面やコンピュータディスプレイなどの2次元のメディアに表示する場合には表現方法に工夫が必要であり, 例えば奥行きによって色を使い分けたり, 等高線を表示するなどの手段がしばしば取られる. このような表現が有用なのは2次元のメディアの場合のみに限られるわけではなく, 例えば実物体の形状をより直感的に把握するために着色したり, あるいはプロジェクタによる重畳投影でこれらの表現を行う場合もある. 後者の例として有名なものとしてMITの Illuminating Clay³⁾ が挙げられる.

これらのいずれの場合でも, 3次元計測自体は可視化とは独立して行われ, 計測結果が得られた後に可視化のための処理と表示が行われる. これらを融合して, 計測と可視化を渾然一体のものとして実現しようというのが本研究の試みである.

2. 2眼ステレオ法に基づく3次元計測

本稿では2眼ステレオ法に基づく計測を考察の対象とする. 最も基本的な構成は, 2台のカメラによるステレオ計測である. 一方のカメラが得た画像の各点と対応する点を他方の画像から同定し, 三角測量の原理によってその点の3次元位置を算出する.

もう一つの重要な構成は, 両眼のうち一方を, プロジェクタやレーザスキャナなど光線を発する装置に置き換えたものである. 計測対象に対

して能動的に光を照射するため，アクティブステレオなどと呼ばれる場合がある．

一般に，カメラ 2 台によるステレオ計測では対応点を正確に精度良く求めるのが難しい．これに対してアクティブステレオでは，スリット光や格子パターン，正弦波パターンなどを投影し，それを撮像することで，両眼の座標間での対応づけを正確に高精度で行うことができる．工業計測のように精度と再現性が要求される場合に選択される傾向がある．

これらに対して本稿では，両眼ともプロジェクタに置き換えた構成について議論する．カメラは使用しない．以下，3. ではモアレ法に基づく方法を，4. では補色投影に基づく方法を検討する．

3. モアレ法による距離情報の可視化

モアレ計測法またはモアレトポグラフィは，格子を通して物体上に照射された光を，やはり格子を通して撮像することによって生じるモアレ縞により距離計測を行う方法である．格子投影型と呼ばれる手法では，投影光学系により格子パターンを物体上に投影し，撮像面上に格子を配置したカメラによりそれを観測する．投影側と撮影側が平行ステレオの条件を満たす場合，すなわち，両者の光学系や格子のパラメータが同一で，光軸も格子も平行の場合は，モアレ縞は等高線を構成する．

ここでカメラも格子投影光学系に置き換えることを考える．すなわち，全く同一の格子投影光学系を平行して配置する．この場合，格子を通して観測したときのような，格子によって視界を遮る効果は得られない．それでも両格子が重なる部分は光強度が加算されるため，明瞭さの点では劣るものの知覚可能な等高線が得られると期待できる．

4. 補色投影による距離情報の可視化

第 2 の方法として，2 つのプロジェクタから投影された 2 色の混合により，奥行きを色として表現することを考える．すなわち，物体表面上のある一点の輝度が，ある基準面からその点までの距離（奥行き）によって一意に定まるようにしたい．以下では色を R, G, B の各成分の明るさを並べたベクトルとして表現する．

簡単のため以下の仮定をおく．2 つのプロジェクタからの光が重畳して投影され，物体表面のある一点で反射された際に，その点の色は，それぞれのプロジェクタの対応画素から照射される色の和として表されるとする．すなわち，物体表面は白色の完全拡散面であり，背景光の影響は無視でき，さらに，光源からの距離によって生じる明るさの違いも無視できることを仮定している．

2 つのプロジェクタの配置として平行ステレオを仮定すると，奥行きは視差（3 次元空間中の同一の点と対応する，両眼の画素の水平座標の差）によって一意に定まる．

このとき，奥行きによって色を一意に定めるということは，視差 d によって一意に定まる色表現関数（カラーマップ） $f(d)$ を定めることである．両プロジェクタの水平方向の画素位置 x から発せられる色をそれぞれ $a(x), b(x)$ と書くと，上記の仮定より

$$a(x+d) + b(x) = f(d) \quad (1)$$

が任意の x と d について成り立たなくてはならない．

式 (1) に $x = 0$ と $d = 0$ をそれぞれ代入することにより直ちに

$$a(d) = f(d) - b(0), \forall d \quad (2)$$

$$\begin{aligned} b(x) &= f(0) - a(x) \\ &= -f(x) + f(0) + b(0), \forall x \end{aligned} \quad (3)$$

を得る．すなわち関数 $a(\cdot)$ は色表現関数 $f(\cdot)$ に定数オフセットを加えたものでなくてはならず，また関数 $b(\cdot)$ は定数オフセットから $f(\cdot)$ を差し引いたものでなくてはならないことがわかる．

ここでさらに，式 (1) が任意の x と d について成り立たなくてはならないことに注意しながら式 (2) と式 (3) を代入すると

$$f(x+d) - f(x) = f(d) - f(0) \quad (4)$$

が得られる．これは，色表現関数 $f(d)$ が視差に対して線形に変化する関数でなくてはならないことを示している．

以上の議論でわかったことは，以下のようにまとめられる．本手法で採用することのできる色表現関数は，視差に対して R, G, B 各成分が線形に変化するものに限られる．一方のプロジェクタがその色表現関数に相似な色分布を投影し，他方のプロジェクタがそれと補色の関係にある色分布を投影することで，色による距離情報の可視化が可能となる．この条件の範囲内で色表現関数は自由に設計できるが，投影する色分布の R, G, B 成分はいずれも負の値を取れないことには注意する必要がある．

2つのプロジェクタから補色の関係にあるパターンを投影するというアイデアを応用した先行例としては，床面に映るユーザの影を映像提示領域にする研究⁴⁾が挙げられる．本節の手法は同様のアイデアの距離情報可視化への応用であるが，視差によって一意に定まる色表現関数を実現するところに独自の工夫がある．

5. 実験

以上の2種類の可視化手法について実験を行った．セイコーエプソン製液晶プロジェクタ EB-X6 を2台横に並べ，1024 × 768 画素の静止画像をそれぞれ投影した．ただし，平行ステレオとしての条件を満たす配置とはなっていない．



Fig. 1 モアレ法による可視化の結果

い．その前方およそ 500 ~ 1000 mm の空間に可視化対象を配置した．

Fig. 1 にモアレ法による可視化の例を示す．1024 × 768 画素の黒画像に，幅 1 画素の白い縦線を 128 本均等間隔で描画したものを投影した．格子そのものが知覚されてしまい若干の見ずらさは感じるものの，等高線もはっきりと視認できる．背面にはほぼ完全な平面であるはずのホワイトボードが置かれているが，表示されている等高線は平面性を示していない．これはプロジェクタの配置が平行ステレオ条件を満たしていないためである．

Fig. 1 に補色投影法による可視化の例を示す．一方のプロジェクタの投影画像として，投影画像の左端を $(R, G, B) = (0.0, 0.0, 1.0)$ ，右端を $(R, G, B) = (1.0, 0.0, 0.0)$ とし，その間を R, G, B の各成分について直線的に補間したものを用いた．他方の投影画像はその左右を逆転したものとした．視差 0 の位置で紫色となり，それよりプロジェクタ側では赤色に，プロジェクタから離れる側では青色になる．なお，平行ステレオでは視差 0 は無限遠に相当するが，この実験では可視化対象空間の中央付近が視差 0 となるように両プロジェクタの向きを調整した．

図より，期待通りの色表現で奥行きが表現されていることがわかる．ただし，陰影により輝度の高低が発生したり，一方のプロジェクタからの光が遮られ青または赤の影が見えてしまったりすることにより，奥行きを正確に知覚しにくくなっている部分も存在する．特にキーボードのような複雑な形状の物体で顕著に発生している．

Fig. 3 に，モアレ法と補色投影法を併用した



Fig. 2 補色投影法による可視化の結果



Fig. 3 モアレ法と補色投影法の併用による可視化の結果

場合の可視化結果の例を示す．補色投影法で用いたパターンの上に，モアレ法で用いた 128 本の白線パターンを上書きしたものをを用いた．色による奥行き表示と等高線表示が両立できていることがわかる．

6. おわりに

本稿では，3次元計測とその可視化処理を融合して，センサを用いずに距離情報を可視化する手法について検討した．無論「センサを用いずに」というのはレトリックに過ぎず，実際には可視化結果の観察者，すなわちヒトの目なり，実験結果を撮影するカメラなりがセンサとして機能している．

可視化手法として，モアレ法に基づく等高線表示法と，補色パターンの投影に基づく奥行き色表示法を議論した．いずれも 2 つのプロジェ

クタからの静止画像投影により行われる．モアレ法に基づく方法では，両眼を格子投影光学系とした場合でも，視認性は落ちるものの等高線の知覚は可能であることがわかった．補色投影による方法については，実現可能な色表現関数（カラーマップ）が満たすべき条件を明らかにした．

本稿で述べた方法は，距離情報を正確に知るのには不向きであるものの，2枚の静止画投影のみで実現できるため手軽で低コストであること，計測・可視化の更新レートは文字通り「光速」であり，遅れ時間が全く存在しないこと等の利点がある．メディアアートやエンタテインメントの分野への応用が有望と考えられる．

謝辞

日頃からご討論頂く東北大学 橋本 浩一 教授に感謝する．

参考文献

- 1) 吉澤 徹 (編著): 最新光三次元計測, 朝倉書店 (2006)
- 2) 谷田貝 豊彦: 第二版 応用光学 — 光計測入門, 丸善 (2005)
- 3) Ben Piper, Carlo Ratti and Hiroshi Ishii: Illuminating Clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis, Proc. SIGCHI conference on Human factors in Computing Systems (CHI'02), 355/362 (2002)
- 4) Yugo Minomo, Yasuaki Kakehi, Makoto Iida and Takeshi Naemura: Transforming Your Shadow into Colorful Visual Media: Multiprojection of Complementary Colors, ACM Computers in Entertainment, 4-3, Article No. 10 (2006)