

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	3次元画像計測における投影光のしま強度配列の最適化ーモンテカルロシミュレーションの最適化
Author(s)	加藤友彦
Citation	福岡工業大学研究論集 第39巻第1号 P55-P60
Issue Date	2006-9
URI	http://hdl.handle.net/11478/840
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

Fukuoka Institute of Technology

3次元画像計測における投影光のしま強度配列の最適化

— モンテカルロシミュレーションの適用 —

加 藤 友 彦 (電子情報工学科)

藤 田 慎 一 (電子情報工学科)

Optimization of Stripe Strength Arrangement of Projection Light for 3-D Image Measurement — Application of Monte Carlo Simulation —

Tomohiko KATO (Department of Information Electronics)

Shinichi FUJITA (Department of Information Electronics)

Abstract

The pattern projection technique is one of the powerful methods in the 3-D image measurement. It is demanded that differences of the intensities between adjacent addresses should be large in order to assign the addresses correctly. In this paper the arrangement of the stripe strength in each address is optimized by two methods of the Monte-Carlo simulation; one is the Metropolis method and the other the multi-canonical method. We study not only the case of the monochromatic light but also the case of the color that ensures more precise identification of the addresses. For the both cases, much better results than the former treatment are obtained by the Metropolis method within shorter computation times. Furthermore, the simulation by the multi-canonical method gives even better results though the calculation time becomes about twenty times longer. It is considered that the latter results are almost the optimized solutions.

Key Words: *3-D image measurement, pattern projection technique, stripe strength arrangement, Monte-Carlo simulation, Metropolis method, multi-canonical method*

1. 序

3次元画像計測のひとつの有力な方法として、適切なしま強度配列を持ったパターンを投影する方法、パターン光投影法がある^{1,2,3)}。この方法では計測時間を短縮し計測精度を上げるために、1回の投影でできる

だけ多くの投影しまを投影することが望ましい。しかし多本数のしまが投影された場合、隣同士のしま強度の差が小さいと投影しまのアドレスの判定ミスが生じやすくなる。そこで最適化を行い、隣同士のしま強度の差を大きくすることが要請される。

本研究ではこの問題を最適化問題として定式化し、最適解を求めることを目的とする。評価関数として下記の関数を設定する。

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^3 a_p |n_i - n_{i+p}|$$

ここで、 N はしまの本数、 n_i は i 番目のしまの強度であり、 a_p は近傍のしまの強度差が大きくなるようにする重み係数である。この研究では、第3隣接までを考慮することとし、

$$a_1 = 7, a_2 = 3, a_3 = 1$$

とした。この評価関数 E (以下エネルギーと呼ぶ。ただし、物理系と符号が逆であることに注意) の値を最大にする強度の配列 $\{n_i\}$ をもとめることがこの問題の最適化となる。

最適化の方法として、仮想的なボルツマン統計を仮定し、統計力学分野の研究でよく利用されるモンテカルロシミュレーションの方法を用いる。モンテカルロ法にもいろいろな特徴を持つ方法があるが、この研究では、メトロポリス法とマルチカノニカル法の2つの方法により結果を求めた。

従来は単色光の場合のみが検討されてきたが、単色光の場合はアドレスの同定に誤差を生じやすい問題点を持っているので、その可能性の少ないカラー (3次元) の場合についても最適化を行った。

2. 計算方法の概要

本研究ではしまの総本数 N を100とする。100本での全組み合わせ総数は $(100-1)!$ 通りになり、計算量が膨大なため、直接的な計算で最適な配列を見いだすことは事実上不可能である。そこで最適解の探索に有効なモンテカルロシミュレーションを用いる。

モンテカルロシミュレーションとは、乱数を用いるシミュレーションの総称である。統計力学の問題では、多数の状態を確率分布に基づきサンプリングし、その状態での物理量の平均値を求めることが多いが、ここでは最高値を求める問題である。この研究で用いたモンテカルロシミュレーションの方法であるメトロポリス法とマルチカノニカル法の概略を説明する。

(1) メトロポリス法

この方法は、アルゴリズムが簡単であり、最も一般的に利用されるものである。この方法は、ある系に対して温度 T が一定の熱平衡状態分布 (カノニカル分布) を実現させるものである。この研究において T はエネルギー E が局所的最大値に閉じ込められないようにする便宜的パラメータ (仮想温度) である。

温度 T に保たれた系においてエネルギー E を持つ状態が得られる実現確率 $P_B(T, E)$ は、ボルツマン因子 $W_B(E)$ と状態密度 $D(E)$ の積に比例する。

$$P_B(T, E) \propto D(E) \times W_B(E)$$

$$W_B(E) = \exp\left(-\frac{E}{T}\right)$$

具体的に現在の最適化問題では、初めに適当な初期配列を設定し、任意に選んだ2つのサイトの強度を入れ替えるかどうかを交換確率 P と $[0, 1]$ 一様乱数 r との比較で判定する。そのときの交換確率 P は、上記のボルツマンの確率に基づき

$$P = \frac{1}{\exp(-\Delta E/T) + 1}$$

で与えられる。ここで、 ΔE は交換後と交換前とのエネルギーの差である。

この操作を多数回繰り返す、エネルギーのより高い状態を探索する。

(2) マルチカノニカル法

メトロポリス法がカノニカル分布に従って状態を発生させるのに対して、マルチカノニカル法によるモンテカルロシミュレーションでは、どのエネルギー状態に対しても同じ重みで発生させ、エネルギー空間上の1次元ランダムウォークを実現する方法である。すなわち、どんなエネルギー障壁も乗り越えて、極大値に留まってしまおうのを避けることができる。生物物理におけるアミノ酸の構造や磁性物理におけるスピングラスのように局所的安定状態が多数存在する問題に対して有効であることが分かっている。マルチカノニカル法では、どのエネルギー状態も同じ確率で実現するように新しい確率関数を下記のように定義する。

$$\begin{aligned} P_{mu}(T, E) &\propto P_B(T, E) \exp\{-F(E)\} \\ &= \exp\left(-\frac{E}{T}\right) D(E) \exp\{-F(E)\} \\ &= const. \end{aligned}$$

ここで、 $F(E)$ は確率を一定にする調整のための関数である。あらかじめ $D(E)$ が分かっている場合に $F(E)$ を求めることは簡単だが、ほとんどの場合 $D(E)$ を求めることは簡単ではない。よって逐次近似によって下記の手順で $F(E)$ を求めることになる。

第一段階

適当な仮想温度 T を設定し、メトロポリス法でシミュレーションを行い実現確率 $P_B(T, E)$ を求める。

$F_1(E) = \log\{P_B(T, E)\}$ を次の段階のために用意する。

第二段階

メトロポリス法におけるボルツマン因子の代わりに、 $F(E) = F_1(E)$ として

$\exp\left\{\frac{E}{T} - F(E)\right\}$ を用いてシミュレーションを行う。

これより得られた $P_1(T, E)$ から、 $F_2(E) = \log\{P_1(T, E)\}$ を用意する。

第三段階

第二段階における $F(E)$ の代わりに

$F(E) = F_1(E) + F_2(E)$ を用いて同様のことを行う。

⋮

第n段階

$F(E) = F_1(E) + F_2(E) + \dots + F_n(E)$

この操作を最大値が変わらなくなるまで行う。

仮想温度 T の設定については、効率以外に決定原理はない。今回の研究では $T=100\sim 3000$ の間で最も良い結果が得られた T の値を設定した。

このシミュレーションにおいて、初期設定は下記の図のようにとった。

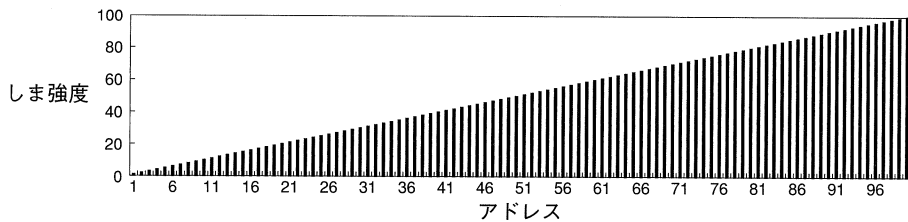


図1 しま強度配列の初期配置

すなわち、100個のサイトに1~100 (1:黒~100:白)までの強度を重複なく配列させる。そして、1から順番に配置する。このときのエネルギーは、 $E=1572$ である。

3. 計算結果 I (単色光 (1次元) の場合)

メトロポリス法とマルチカノニカル法でのシミュレーション結果を示す。

(1) メトロポリス法

仮想温度 T の設定については、予備計算で最も良い結果を与えた $T=2970$ とした。またシミュレーションの繰り返し回数モンテカルロステップMCSは 10^6 とした。その結果、

最大エネルギーは42590となった。

(2) マルチカノニカル法

次にマルチカノニカル法での結果を示す。図2のグラフは各逐次計算における実現度数のヒストグラムである。横軸はエネルギー、縦軸は度数の対数である、度数はエネルギーの幅100毎にまとめているので、横軸は $E/100$ としている。

シミュレーション回数を増すごとにエネルギーの幅が広がりフラットになっていくのが分かる。特に最大

エネルギーが逐次計算の回数と共に増大していることが分かる。18回目のとき

最大エネルギー $E=47203$ となり、

以後回数を増やしてもこの値は増えなかった。従って、この値を最適値とした。

ここで、メトロポリス法とマルチカノニカル法のしま強度の配列をそれぞれ図3、図4に示す。

目で見る範囲でもメトロポリス法よりマルチカノニカル法の方が隣同士のしま強度の差が大きくなっている。この差を数値で見ると、隣同士のしま強度の差の平均を計算したところ、

メトロポリス法: 42.3

マルチカノニカル法: 50.2

となり、マルチカノニカル法の方が大幅に最適化を果たしていることが分かる。

従来、実用に供された配列³⁾($N=60$)では、この平均値は26.2となっており、メトロポリス法においても相当に良い改良になっていることが分かる。

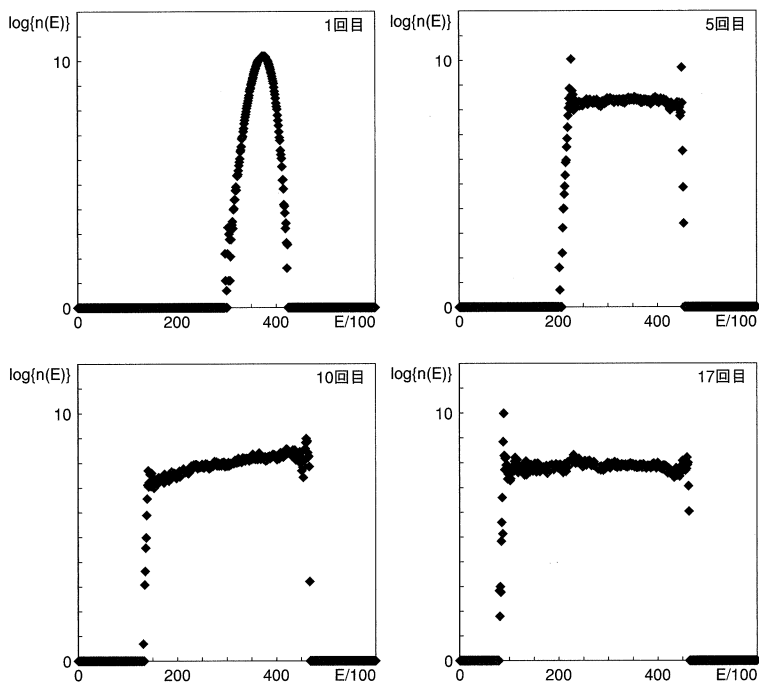


図2 マルチカノニカル法における各段階における実現度数のヒストグラム

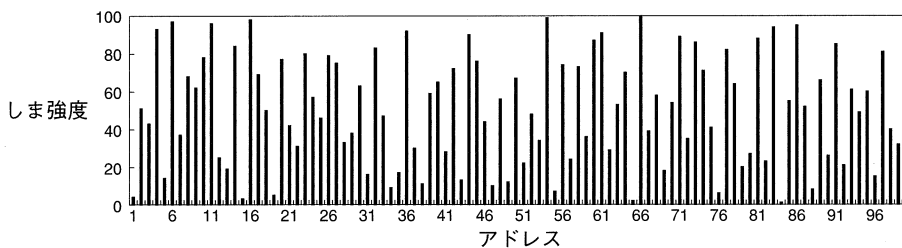


図3 メトロポリス法による最適強度配列 (単色光)

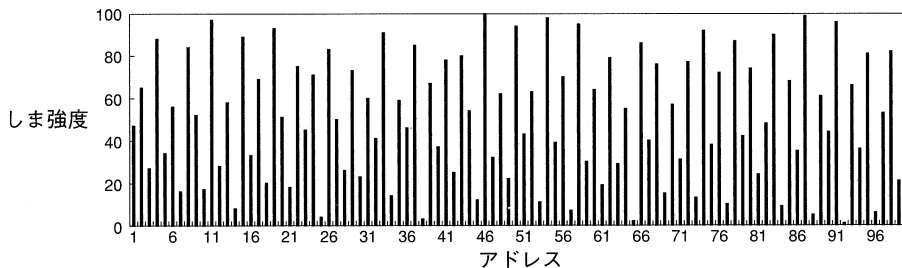


図4 マルチカノニカル法による最適強度配列 (単色光)

4. 計算結果Ⅱ (カラー (3次元) の場合)

3次元では、図1のしま強度配列の一つのアドレスに赤(r), 緑(g), 青(b)の強度を対応させる。評価関数Eとしては、隣接するアドレスの同じ色同士の差を大きくする項に、同一アドレス内の他の色との強度差も大きくする項を付け加えて、下記の式を定義した。

$$E = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{100} \sum_{p=1}^3 a_p |n_{ji} - n_{ji+p}| + \sum_{j \neq j' i=1}^{100} |n_{ji} - n_{j'i}|$$

ここで、 n_{ji} はアドレス*i*における色*j* (r, g, b)の強度を表す。

以後、単色光の時と同様にメトロポリス法、マルチカノニカル法によるシミュレーションを行い、以下の結果を得た。

メトロポリス法での最大エネルギー：

$$T=3000 \text{ の時, } E=131704$$

マルチカノニカル法での最大エネルギー：

$$\text{シミュレーション回数24回目の時, } E=149363$$

最適解の、しま強度配列を図5、図6に示す。

図5、図6の差は視覚的にははっきりしないので、隣接するアドレスの各色の強度の差の平均を計算して比較した。

メトロポリス法： 38.7

マルチカノニカル法： 47.7

この結果より、カラー (3次元) の場合でもマルチカノニカル法がより最適解に近い結果を与えることが分かった。

5. ま と め

3次元画像計測のひとつの有力な方法であるパターン光投影法に用いる投影光のしま強度配列の最適化をモンテカルロシミュレーションによって行った。

単色光 (1次元) の場合とカラー (3次元) の場合について“最適”な配列を求めた。シミュレーションの方法として、メトロポリス法とマルチカノニカル法を用いた。

メトロポリス法では比較的短時間 (Pentium 4のパソコンで60秒程度) で相当に良い結果を得ることができる。マルチカノニカル法ではそれより20倍程度の計算時間を必要とするが、さらに最適解に近い結果を得ることができる。

この結果が最適解かどうか、あるいは最適解とどの

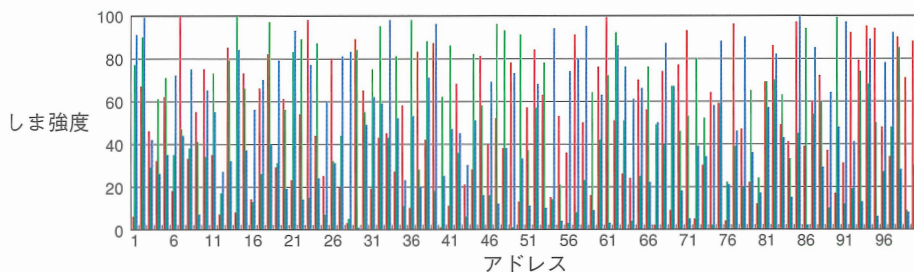


図5 メトロポリス法による最適強度配列 (カラー)

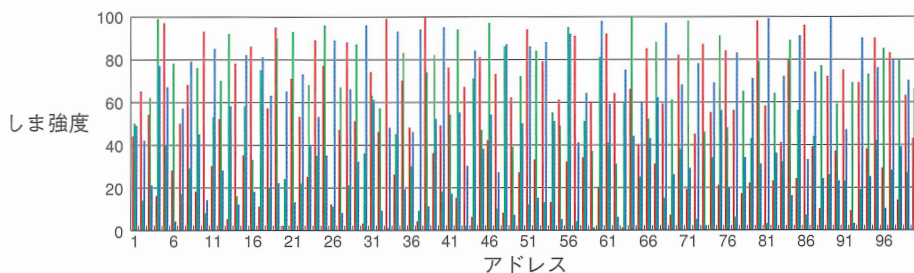


図6 マルチカノニカル法による最適強度配列 (カラー)

程度近いかは明らかにできないが、マルチカノニカル法における逐次計算の回数をさらに増やしても結果が変わらなかったことから實際上、最適解とみなして良いと判断される。

謝 辞

本論文のテーマをご教示くださり、結果について有益な議論をいただいた電子情報工学科の盧教授に厚く感謝します。

参 考 文 献

- (1) C. Lu and L. Xiang: *Applied Optics-IP*, **42** (2003) 4649.
- (2) 盧, 相, 井口, 電子情報通信学会論文誌D-II : **J88-D-II** (2005) 325.
- (3) 長: 博士論文“パターン光投影に基づく3次元画像計測の実用化研究”: 福岡工業大学, 平成18年3月.
- (4) N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, A. H. Teller and E. Teller: *J.Chem. Phys.*, **21** (1953) 211.
- (5) B. A. Berg and T. Neuhaus: *Phys. Letters*, **B267** (1991) 249.