

ドットパターン生成技術と光学系

○井手剛，平洋一

IBM 東京基礎研究所

E-mail: goodidea@jp.ibm.com

1. はじめに

かつては高級品であった液晶ディスプレイ (LCD) も、今や多くの人々が日常的に使用している。ノート PC に使われる表示装置はほぼ全て LCD である。その構造は、エッジライト式のバックライトにより液晶セルを背後から照明する方式になっているものがほとんどである。図 1(a) にバックライトの典型的構造を示す。この中で中心的役割を担うのが導光板 (light guide, LG) である。図 1(b) に示すように、蛍光管 (cold cathode fluorescent lamp, CCFL) から出た光は、導光板の下面での散乱と上面での全反射を繰り返し、全反射条件が破れたところで導光板から射出される。散乱ないし拡散反射を引き起こすために、導光板の下面には TiO₂ などの白色顔料で格子状にドットパターンが印刷される。蛍光管側で疎に、遠ざかるにつれて密になるようにドット径を変化させるのが通例である。

バックライトはノート PC で最も電力を消費する箇所である。その光利用効率の向上は最重要の技術的課題であり、今まで多くの研究がなされてきた。エッジライト式の導光板から出た光は比較的良好に集光されているという特徴がある。その集光された光束を分光することでカラーフィルター不要型の LCD を実現し、光利用効率を劇的に上げる試みがある [1]。一方、集光度をある程度保ったまま液晶セルに光を導き、光損失を抑えるという方向の改良も提案されている。たとえば Oki [2] は、プリズムシートを統合した導光板 (後述) を用いた集光バックライトを提案している。また、Kälantär [3] らは、従来の白インクの代わりにある微小構造を導光板下面に配列することで、射出光の分布を改善できたと報告している。

微小構造体パターンを備えたプリズムシート一体型の導光板は、正面輝度向上に大変有効である。しかし、損失が少ない分、バックライトはある意味で「透明」であり、微小構造体パターンと液晶セルとの干渉パターンが目視されるという問題があった。すなわち、微小構造体 (以後ドットと総称する) 個々の形状にはさまざまな最適化の試みがあったが、全体としてドットをいかに配列すればよいかはよくわかっていなかった。本解説では以後、最近の高輝度型のバックライトに好適な不規則ドットパターンの理論的生成手法について述べる [4,5]。

2. ドットパターン生成方法の現状

液晶セルのデータ線・ゲート線の規則的パターンと、導光板のドットの干渉を避けるもっとも有効な方法は、ドットパターンを不規則に配

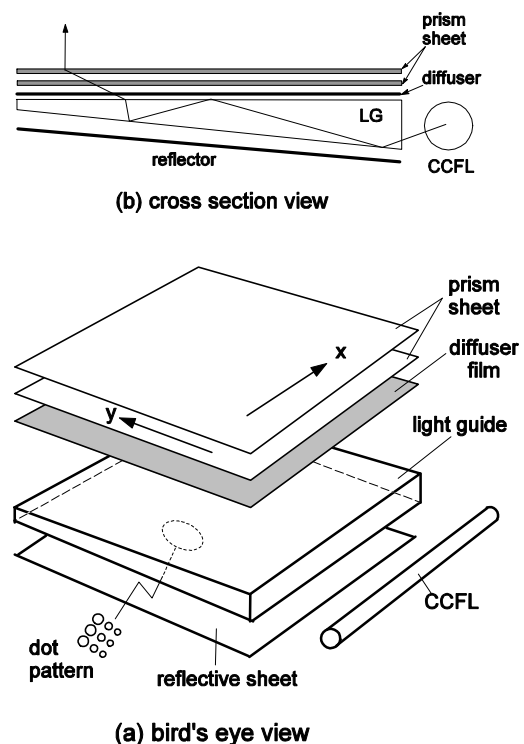


図 1 エッジライト式バックライトの典型的構造

置することである。しかし単に不規則であるだけでは不十分で、たとえばドット間に重なりがあると、その部分が輝点ないし暗点として目視されてしまう。また、ドットパターンの充填率分布に非一様性があると、それがムラとして知覚される。導光板に適用するには、ドットの充填率分布を制御することもまた要求される。すなわち、ここで考える望ましいドットパターンとは、液晶セルとの間でモアレ縞を出さない程度に十分不規則であること、ムラが目視されない程度に十分一様であること、任意の連続的充填率分布に柔軟に対応できること、という3つの条件を満たすものである。

これらの条件は、濃淡画像の2値化問題において課せられる条件[6]と類似している。濃淡画像の2値化理論の分野では、これらの条件を満たすべくさまざまな不規則ドットパターン生成手法が提案されてきた。青色ノイズマスク法およびその改良が代表的なものである[6-8]。しかしこれらの方法は多かれ少なかれ疑似模様が存在するという弱点がある。とりわけ、現実的な導光板のスケールでは、満足すべき品質のパターンを得られないことがわかっている。

一方、われわれの知る限り、LCDの分野で知られているドットパターン生成手法はもっぱら疑似乱数に基づくものである。現時点で最善の方法は、まず規則格子点にドットを配置し、そこから疑似乱数に従って摂動を与えるという方法である[9]。ドットに重なりが生じた場合は、再び疑似乱数により摂動を与え直す。便宜上この方法を疑似乱数摂動法と呼んでおく。しかしこの方法は、充填率が高い領域でドット間の重なりを避けられないこと、疑似乱数特有の荒れが避けられないこと[6]、充填率が連続的に変化する場合に規則格子を生成するのが簡単ではないこと、などから、最近の高輝度型のバックライトには不適であると考えられる。

3. 超一様分布列の理論

疑似乱数に伴う大きな揺らぎを排除するため、われわれは超一様分布列 (low-discrepancy

sequences, LDS) と呼ばれる数列に着目した。超一様分布列とは、その分布列に属する最初の N 点について、ディスクレパンシー (discrepancy) D_N という量が、

$$D_N(\text{LDS}) \leq C \frac{(\log N)^2}{N} \quad (1)$$

という条件を満たすものである。ここで C はドット数 N に依存しないある定数で、 D_N は、 $0 < x, y \leq 1$ で定義された矩形領域について、以下のように定義される[10]。

$$D_N = \sup_{(x,y) \in [0,1]^2} \left| \frac{\#E(x,y)}{N} - xy \right| \quad (2)$$

ここで $\#E(x,y)$ は、線分 $(0,0)-(x,y)$ を対角線とする矩形領域に入る点の数で、 N は全体の点の個数である。絶対値記号の中身は、点の数の割合から、面積の割合を差し引いたものであり、点集合が稠密かつ一様に分布している場合ゼロになる。それゆえ直感的にも、これが点集合の分布の偏りを表す量となっていることが了解される。従って、超一様点集合とは、非一様性の小ささ (一様性の大きさ) が保証された点集合だと言うことができる。従来、濃淡画像の2値化理論では、動径分布関数を用いてドットの分布を評価する方法が使われてきたが[6-8]、動径分布関数から偏りの上限を直接定めることは不可能であった。それゆえ超一様分布列は実際上極めて有用な性質を持っていると言える。

ディスクレパンシーの観点から、超一様点集合と疑似乱数を比べてみよう。疑似乱数のディスクレパンシーは

$$D_N(\text{random}) = O\left(\sqrt{\frac{\log \log N}{N}}\right) \quad (3)$$

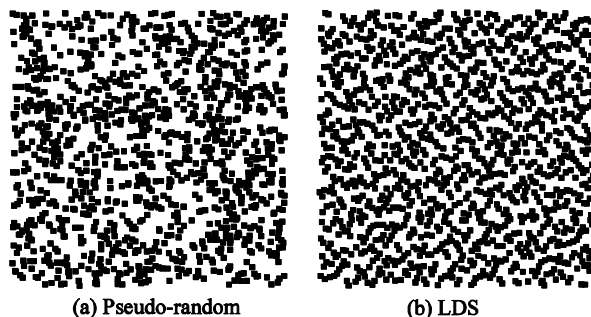


図.2 超一様点集合と疑似乱数の比較

のように評価されることが知られている [10]。
(1)式と**(3)式**を比べると、 N が大きくなるに従い、超一様点集合に対する擬似乱数のディסקレパンシーの比が \sqrt{N} のように発散することがわかる。

超一様点集合の定義には不規則性が直接含まれているわけではないが、適当な数学的操作で見かけ上不規則性を導入する手法が存在し、モンテカルロ計算に利用されている [11]。

Niederreiter 数列をもとに不規則化された超一様点集合と、擬似乱数の一様性の違いを図 2 に示す。図から、超一様点集合が、擬似乱数に比べ一様性に勝つことは明らかであろう。超一様点集合の計算法の例については、文献 [12] を参照されたい。

4. 斥力緩和法

さて、超一様点集合により生成したドットパターンは高い一様性を持っているが、ドットの径が有限であるためドット間に重なりが見られ、そのままでは光学的な用途に耐えない。

ドット間隔を適正に保つため、ドットの集合を斥力的に相互作用する粒子系と見なし、動力学的にパターンを最適化することを考える [5]。われわれの模型を模式的に図 3 に示す。数式的に言えば、 i ドットと j ドットの間に、ある斥力 f_{ij} を考え、LDS で生成された初期位置を初期条件として、運動方程式を解くことに対応する。 i ドットに対して、運動方程式は、 m, c をある定数として

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + c \frac{d \mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{f}_{ij}$$

のように書ける。 t_0 を初期時刻と考えると、その一般解は、 $t > t_0$ に対し、

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{r}_i(t_0) + \frac{1}{c} \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}_i(t') \left[1 - \exp\left(-\frac{c(t-t')}{m}\right) \right]$$

と表せる。この積分方程式の解は一般に、相互作用力の無限次の項まで含むが、ここでは c/m を無限大に飛ばし、相互作用の 1 次の項まで考える。この近似の下では、粒子の位置は、

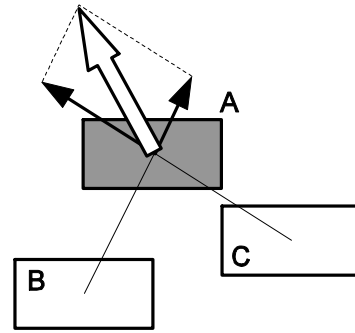


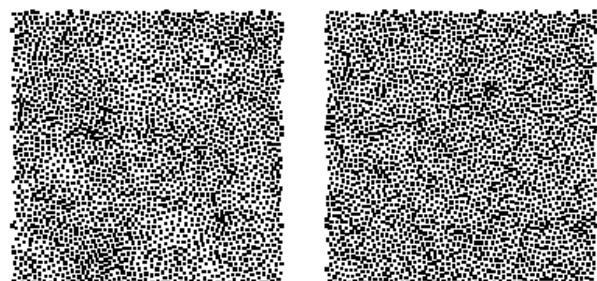
図 3 斥力緩和法の模式図

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) - \mathbf{r}_i(t) = \frac{1}{c} \Delta t \mathbf{F}_i(t)$$

なる差分方程式で記述できることになる。

この力学的模型の特徴のひとつは、任意の 2 ドットの入れ替えに対して不変であることである。この対称性は濃淡画像の 2 値化アルゴリズムの多くで失われているが、われわれはこれが、超高品質の不規則ドットパターンを生成するための不可欠な条件のひとつであると考えている [5]。なお、2 値化理論では通常、画像のエッジ部を明確に表現することに大きな努力が払われるが [13]、LCD におけるドットパターンでは、そのような制約はないことを指摘しておく。

この手法で生成したドットパターンを図 4 に示す。初期位置を擬似乱数で生成したものと LDS で生成したものを同じ緩和模型・緩和時間について比較してある。斥力の関数形は、最近接ドット間の平均距離 D のオーダーで一定、その外では指数関数的に減衰するようなものを採用した。図からわかるように、(a) では擬似乱



(a) pseudo-random number

(b) LDS

図 4. 斥力緩和法における初期配置の影響

数特有のムラが観察されるのに対し、LDSによるパターンは極めて均質である。擬似乱数で初期位置を設定した場合、緩和によりムラは軽減される傾向にあるが、非常に長く緩和過程を実

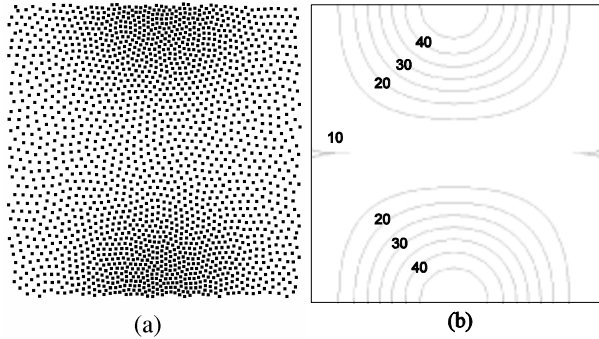


図5 大きい充填率勾配を持つ場合のドットパターン例。(a)ドットパターン、(b) 充填率。

行しても、十分広い領域にわたりムラを消すのは容易ではない。したがって初期状態において高い一様性を実現できる超一様点集合は実用的にきわめて高い価値を持つ。われわれのドットパターン生成手法を以下では DLDS (dynamical LDS) 法と呼ぶ。

連続的な充填率変化に対応するためには、初期配置を所与の充填率分布を再現するように与えると同時に、緩和過程を充填率に矛盾しないように実行しなければならない。まず初期位置については、ドットパターンを生成する領域を適当な小区画に分割し(全部で M 個とする)、小区画に対し、生成するドットの個数だけ下記の過程を繰り返すことで実現できる。すなわち、まず $(0,1)$ に規格化された3次元の超一様点集合を生成しておく。次に、区画 i の充填率を d_i とした時、方程式

$$\sum_{i=1}^k d_i = U \sum_{j=1}^M d_j$$

からある区画 k を選ぶ。ただし、 U は超一様点集合のある桁を表す。そしてその区画において、残りの超一様点集合の桁を用いて位置を選択する。

そうして生成された初期位置を緩和させるに当たり、斥力の到達範囲 D も、充填率 α に応じて、

$$D \propto \alpha^{-b}$$

のようにスケールリングする。指数 b は、ドット1個に割り当てられる面積と α の関係からおおむね推測できる。

Ulichney [6]によれば、ドットパターンの分布関数が望ましい周波数特性を持つためには、ドット間隔の分布が“principal length”近傍にピークを持たねばならない。上のスケールリング則はこの事実に対応しており、Ulichney の意味で望ましいドットパターンを生成するアルゴリズムになっていることを指摘しておく。

大きな充填率を持つドットパターンの例を図5に示す。一様性と不規則性を保ったまま、与えられた充填率分布をよく再現していることがわかる。

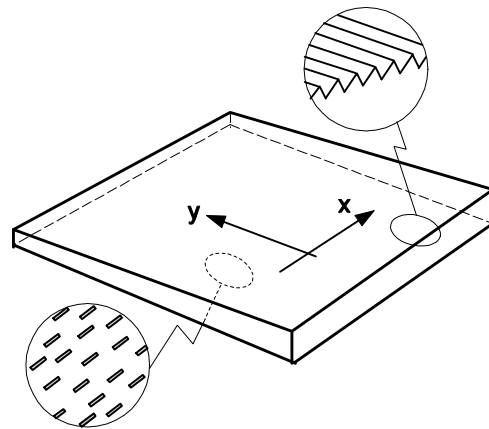
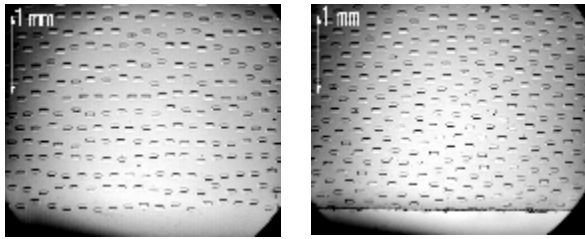


図6 プリズムシート一体型導光板

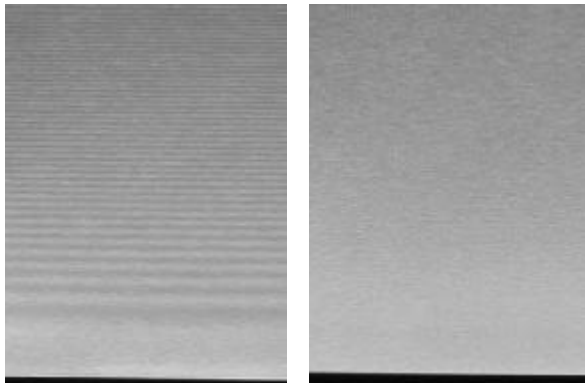
5. LCD への適用

DLDS 法を、図6に示すようなプリズムシート一体型のアクリル製導光板に適用した[4]。この導光板は、いわゆる IPS (in-plane switching) LCD をノート PC に搭載する目的で設計されたもので、その上部にプリズム構造を直接成型してある。下面の散乱体は寸法 0.1×0.03 mm の矩形の窪みであり、所与の充填率分布をもとに DLDS 法で生成された座標データから、フォトリソグラフィーにより生成した。

図7にこの窪みの分布を、擬似乱数を用いた従来技術としての擬似乱数摂動法との比較で



(a) 擬似乱数摂動法 (b) DLDS 法
図 7. 導光板下面のドットパターンの比較



(a) 擬似乱数摂動法 (b) DLDS 法

図 8 液晶セル表面の写真

示す[4]。図に示すように、従来手法ではドット間隔に不揃いが見られる。また、充填率が高くなるにつれドットが整列する傾向にあり、モアレ防止の観点から好ましくない。一方、DLDS法によるパターンでは、ドット間隔がほぼ同様であるにもかかわらずその配置には十分な不規則性があり、視覚的に好ましい結果が得られている。

導光板下面のドットパターンは、バックライトの輝度一様性に直接関係するために、ムラやドット間の異常接近に極めて敏感である。図 8 は、図 7 に示した導光板の両者に 15 インチ UXGA の液晶セルを載せた時のスナップショットである。従来手法では、出発点とした規則格子の配列が長距離秩序として残存しがちであるため、それと液晶セルの画素ピッチが干渉してモアレが生じているが、DLDS法ではそのような問題がなく、高い輝度一様性が達成されていることがわかる。

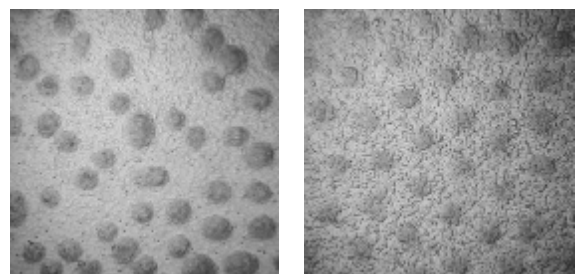
DLDS法は、導光板以外にも LCD の輝度一様性向上のために用いることができる。最近著

者らは[14]、本手法を LCD の拡散板（図 1 参照）に遮光印刷として適用する試みを報告した。結果を図 9 に引用する。それによれば、擬似乱数に基づいてデザインしたパターンに比べ、DLDS法では、充填率の高低によらず、一様かつ不規則なドットパターンが得られていることがわかる。DLDS法による遮光印刷を、適切な充填率分布に対して行うことにより、拡散板自体の拡散度を低く抑えることが可能である。このことにより、輝度上昇および輝度一様性に寄与することができる。

6. むすび

ディスクレпанシーという新しい非一様性の指標に注目し、古典力学的多体相関モデルに基づく不規則ドットパターンの生成方法について解説した。本手法は、不規則性と一様性の両立を極めて高い水準で達成している。本手法を、LCD に対して適用し、モアレ防止および輝度一様性向上に、明瞭な効果があることを実験的に確認した。

われわれの手法は、与えられた充填率分布に対応する不規則ドットパターンを生成する手段を与えるが、充填率分布自体を最適化するものではない。現在のところ、あるドットパターンから実際のバックライトの輝度分布を精度良く算出するのは難しい。これは第 1 に、LCD のムラの原因の多くが LCD の縁の部分での複雑な反射・吸収によるものであるため、本質的な条件を失わず現象を単純化することが難しいこと、第 2 に、仮に忠実に LCD 周辺部での幾何学的・光学的条件をモデル化したとしても、ドットの数が非常に多いため(100 万個以上)、通常の光線追跡計算が事実上不可能であるこ



(a) 擬似乱数 (b) DLDS 法

図 9 散乱板の遮光印刷のドットパターン

と、による。

LCD の光学シミュレーション技術にはこの他にも解決すべき問題は多い。導光板設計の基礎となる LCD の輝度ムラ評価の定量化・自動化自体、実用レベルで成功したのは比較的最近のことだと思われる [15-17]。このような評価技術の進歩と、本手法のような個々の計算技術を足がかりに、LCD の光学設計の理論化・自動化を推進してゆくことが望まれる。

謝辞

本解説は、インターナショナルディスプレイテクノロジー(株)の鈴木優、野口通一、勝義浩の各氏との共同研究に基づいている。ここに謝意を表する。

文献

- [1] Y. Taira, D. Nakano, H. Numata, A. Nishikai, S. Ono, F. Yamada, M. Suzuki, M. Noguchi, R. Singh, and E. G. Colgan: "Low-power LCD using a Novel Optical System," *Digest of Technical Papers* (Society for Information Display, 2002), pp.1313-1315.
- [2] Y. Oki: "Novel backlight with high luminance and low power consumption by prism-on-light-pipe technology," *Digest of Technical Papers* (Society for Information Display, 1998), pp.157-160.
- [3] K. Kälantär, S. Matsumoto, T. Onishi, and K. Takizawa: "Optical micro deflector based functional light-guide plate for backlight unit," *Digest of Technical Papers* (Society for Information Display, 2000), pp. 1029-1031.
- [4] T. Idé, H. Numata, H. Mizuta, Y. Taira, M. Suzuki, M. Noguchi, and Y. Katsu: "Moiré-Free Collimating Light Guide with Low-Discrepancy Dot Patterns," *Digest of Technical Papers* (Society for Information Display, 2002), pp.1232-1235.
- [5] T. Idé, H. Mizuta, H. Numata, Y. Taira, M. Suzuki, M. Noguchi, and Y. Katsu: "Dot pattern generation technique using molecular dynamics," *J. Opt. Soc. Am, A*, in press.
- [6] R. A. Ulichney: "Dithering with blue noise," *Proc. IEEE*, **76** (1988) 56.
- [7] T. Mitsa and K. J. Parker: "Digital halftoning technique using blue-noise mask", *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1920.
- [8] D. L. Lau, G. R. Arce, and N. C. Gallaghe: "Digital halftoning via green noise masks," *Proc. IEEE*, **86** (1998) 2424.
- [9] 谷口齊, 日良康夫, 森祐二: 日本国特許, 特開平 10-153779.
- [10] S. Tezuka: "*Uniform Random Numbers: Theory and Practice*"(Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995).
- [11] S. Ninomiya and S. Tezuka: "Toward real-time pricing of complex financial derivatives," *Applied Mathematical finance*, **3** (1996) 1-20.
- [12] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery: *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing* (2nd. ed., Cambridge University Press, 1992), Chap. 7.
- [13] C. B. Atkins, J. P. Allebach, and C. A. Bouman: "*Halftone postprocessing for improved highlight rendition*," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Image Processing, Santa Barbara, CA, 26-29 October, 1997, Vol. 1, pp.791-794.
- [14] 沼田英俊, 勝義浩, 井手剛, 水田秀行, 平洋一, 鈴木優, 野口通一: "ドットパターン技術による液晶表示装置の輝度一様化", 2002年秋季応用物理学会学術講演会, 27a-ZA-10.
- [15] Y. Mori, K. Tanahashi, and S. Tsuji: "Extraction and evaluation of mura images in liquid crystal displays," in *Algorithm and Systems for Optical Information Processing V*, B. Javidi and D. Psaltis, eds., *Proc. SPIE* **4471**, 299-306 (2001), and references therein.
- [16] 森由美, 棚橋高成, 辻智: "液晶ディスプレイのムラの定量的評価法の検討," *映像情報メディア学会誌*, **55** (2001) 553-558.
- [17] 棚橋高成: "LCD輝度ムラ自動測定器の開発," *映像情報インダストリアル*, 2001年12月号.