

# 英語論文輪講

Ahumada et al., "Reduction of Display Artifacts by Random Sampling,"  
Proceedings of SPIE-The International Soc. for Optical Engineering, vol. 432, 8-83, pp. 216-221, 1983.

岩淵 勇樹

2007年7月17日

## Abstract

ディスプレイで用いられる、離散的な順次走査方式（または逐次サンプリング方式）には、ちらつき・モアレ・矛盾した動きなどのアーティファクトが問題点としてつきまとう。視細胞は、格子よりもバラバラに分布しているためにモアレは生じず、従来型のエイリアシングも避けることができる。ただしノイズは発生する。ランダムサンプリングはノイズの大半をナイキスト周波数に追いやり、サンプリングの前処理のLPFで簡単に除去できる。ディスプレイとしてこれは、サンプリング時のアーティファクトをノイズに変換したうえ、そのノイズを人間の目に付きにくい時空間周波数帯に置き換えることを意味している。我々は、水平走査線のある種のランダムな並びにすることによって、動きに関するアーティファクトが減ったことについて報告する。なお、走査線は通常の列・一通りのランダム列の繰り返し・一巡毎に異なるランダム列の3通りを用いて比較した。その結果、一通りのランダム列ではちらつきを最も抑えることができ、一巡毎に異なるランダム列と同程度に、水平方向へ動く縦線の表示における動きのアーティファクトを最小化することができた。

## イントロダクション

### 順次走査によるアーティファクト

テレビのような順次走査方式のディスプレイには、余計なアーティファクトが数多く存在する。例えば、最も単純なプログレッシブ走査においては画面を上から下へと更新するが、眼は80Hzの時間分解能をもつため、画面のちらつきがアーティファクトとなる。また、時

間のアーティファクトは空間のアーティファクトに変換されるため、画像または画面を見る側が動く場合にアーティファクトが生じ、更新レートが一定のディスプレイはアーティファクトをなくすには不十分である。

### 可視窓

Watsonらは、時空間周波数領域における"可視窓"という概念を用いて、ディスプレイ上の動物体における時間と空間の解像度の兼ね合いを説明しようとした[1,2,3]。ここでいう"窓"とは、空間分解能の上限(視力) $S[\text{cycle/degree}]$ と時間分解能の上限(点滅を感知する限界値) $T[\text{Hz}]$ によって切り取られる矩形領域のことである。観察者は、窓の外に該当するような信号には鈍感ということである。

視角での速度 $V[\text{deg/s}]$ で直線上を移動する光の点について考える。Figure 1の左は時間に対する変位を示しており、この関数の傾きがちょうど $V$ に該当する。一方、右はそのグラフのフーリエ変換にあたり、この関数は左の直線に対して垂直である。(なお、実際は光の輝度も考慮して3次元のグラフと考えられる。)動く点を $R[\text{Hz}]$ のサンプリングレートでサンプリングした場合、それぞれの領域でのグラフはFigure 2のようになる。通常のサンプリング同様、 $R[\text{Hz}]$ 毎に折り返しが生じる。

折り返し部分が可視窓の外にあれば、見え方はサンプリングされていない状態と同じになり、アーティファクトは現れない。それを満たす更新レートの最小値 $R_{\min}$ は式(1)によって求められる。

## ランダムサンプリング

通常のサンプリング手法では、サンプリングの前に LPF を通すことによって更新レートを上げずにアーティファクトを抑えられる。また、テレビカメラのようなデバイスはそれ自体に LPF のような特性があるためアーティファクトの殆どをなくすることができる。しかしながら、通常の時空間解像度は視覚よりは劣る。また、後述する線の傾き（シミュレーション節の残像のこと？）のようなアーティファクトは抑えられず、また CG でのアンチエイリアスもコストがかかっている困る。

通常のサンプリングでは、予め LPF が通されていない限り、ナイキスト周波数を中心に高周波成分が低周波域に折り返されてしまう。その一方、完全にランダムな（ポアソン分布の）サンプリングを用いると、広域のランダムノイズが加えられていない限り全域通過となり [4]、殆どのノイズは、通常のサンプリングにおいてあらかじめ LPF を通してカットされる高周波領域に飛ばされる [5]。

## 網膜におけるランダムサンプリング

網膜の視細胞の分布はランダムであり、それによってサンプリングした際のノイズは LPF によって簡単に除去できる。

## 各走査線のシミュレーション

垂直方向に 128 点の点列を 130Hz の更新レートで、以下に挙げる”SEQ”・”SRAN”・”NRAN”の方法で表示した。

- SEQ: 上から下への走査 (Figure 3)
- SRAN: 一回りのランダム列の繰り返し (Figure 4)
- NRAN: 一巡毎に新たな順序のランダム列 (Figure 5)

## 静止した線

ちらつきの効果を観測するため、128 点による全長 57mm の線分の静止画を HP1345A (ディスプレイ)に

表示させ、1m の距離をおいて観察した。なお、室内の明るさはディスプレイの背景色と同程度、点の描画はディスプレイにおける最大輝度、といったコントラストを設定した。

ちらつきが目立つかどうかという粗い評価値として「フリッカー弁別閾」を定義する。3つの方式についてその評価値を用いて観測した結果、フリッカー弁別閾は SRAN で 25Hz、SEQ で 35Hz、NRAN で 130Hz 以上となった。NRAN では他のケースとは質が大きく異なり、60Hz の時点でちらつきが非常に気になり (?)、ディスプレイの限界である 130Hz でも幽かながらちらつきが確認された。見た目については、SEQ では下向きのちらつき、SRAN と NRAN では上下に揺れるちらつきが確認された。

1 点につき 1 回のリフレッシュという状況下では、SEQ と SRAN が同程度で、特に SRAN がより良好であった。ここで NRAN が劣っていたのは、1 点におけるリフレッシュ間隔が、リフレッシュレートの 2 倍未満の範囲でバラバラだったからである。

## 運動する線

垂直線を水平方向へスウィープさせて観察するため、Tektronix 2215 (オシロスコープ)を用いた。Figure 3,4,5 の横軸をそのまま水平方向の変位としたようなかたちで、線分がディスプレイ上を 50cm/s で動くようにスウィープさせた。すると、SEQ では線分が斜め線に分断されたような見え方になり、一方 SRAN と NRAN ではドットが雲状に散らばった。SEQ では分割された斜め線の角度のコサイン成分が速度に比例するような見え方をした。一方 SRAN ではもやもやが SEQ と同じ周期性を持っていたが目には付きにくく、NRAN ではもやもやに構造的は感じられなかった。素早い動きに関しては、NRAN は線分が生成するようなノイズなぶれを生成しており、明らかに優れていた。そして、SRAN は SEQ と違って斜線ではなく雲状のぶれを成すため、ここでもやはり SEQ より良好であった。

## まとめ

以上より、ランダム走査方式は実用面での利点が充分にあると結論づけられる。具体的に次のような利点

が考えられる。

- 動画像の歪みを抑えられる
- 動画像のフレームレートを下げられる
- 時空間周波数領域における LPF を通す必要がない
- 'ping-ponging' (表示画像とレンダリング用バッファを交互に入れ替える描画法) のような処理に関わるコストから避けられる

そしてこの方式によって、コックピットで用いる、赤外線カメラによるフライトシミュレータ用高品質ディスプレイなどへの応用が考えられる。

理論的には、時空間周波数の一定の領域にサンプリングノイズを加えたときに関する枠組みについて、実証的には、視覚が処理するノイズの「隠しどころ」を導き出し、モデルを改善すること、がそれぞれ興味深い問題点として挙げられる。そして、我々はこれらの方式をハードウェアに実装していきたい。