

走査型ディスプレイにおいて生じる形態歪みの特性

Characteristics of Image Distortion Presented by Scanning Display

内田 貴之^{†*}, 正会員 渡邊 淳司^{†**}, 川上 直樹[†], 正会員 館 暲[†]

Takayuki Uchida^{†*}, Junji Watanabe^{†**}, Naoki Kawakami[†] and Susumu Tachi[†]

Abstract In certain types of two-dimensional visual displays, such as CRTs and PDPs, information is not simultaneously presented on the entire screen. Each line or dot on the screen is rapidly and sequentially updated, and the update timings differ depending on the position on the screen. This presentation method can cause distortion of moving images. We conducted an experiment to clarify the characteristics of this distortion and developed a method for solving the distortion problem.

キーワード: 走査型ディスプレイ LED アレイディスプレイ 傾斜現象

1. ま え が き

本研究の目的は、走査型ディスプレイの形態歪みについての機序を検証し、その歪みの改善手段を検討することである。本研究における走査型ディスプレイとは、現在広く用いられている PDP, CRT に代表される画素情報を 1 ドット (1 ライン) ずつ更新し 2 次元視覚情報を提示する方式のディスプレイを指す。図 1 はある時間に走査型ディスプレイはどのラインを提示しているのかを時間軸 *time* と *x-y* 座標で示した図である。

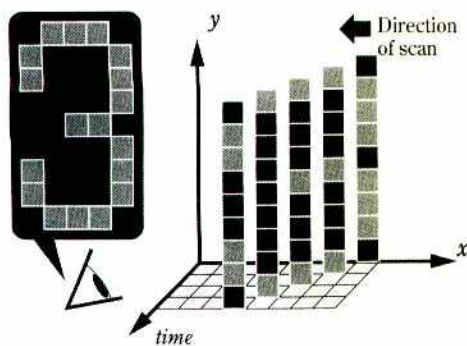


図 1 継時的に画像を提示する手法
Display method based on sequential presentation.

走査型ディスプレイでは図 1 のように 1 フレームの画面を走査線ごとに異なる時間に継時的に提示している。しかし、高速に提示されると画面全体が同時に提示されているように知覚される。しかし CG のレンダリングやカメラ撮影によって動画を作成する際には、多くの場合画面全体が同時に提示されると仮定している。そのため画素の更新タイミングと、描画したい運動の提示タイミングの不一致から提示画像に歪みが発生することがある。本研究ではこの形態歪みの機序を検証し、その性質を明らかにする実験を行った。なお、実験では物理的残光の存在しない走査型ディスプレイとして LED アレイディスプレイ: "TWISTER"¹⁾²⁾を用いることにした。TWISTER では、LED 素子を鉛直方向に並べたアレイを、物理的に水平方向に走査し 2 次元映像を提示可能である。

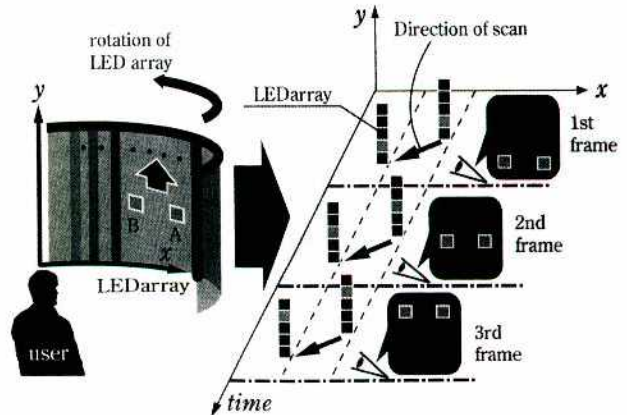


図 2 運動する点 A と B の様子
Description of two moving points in space-time coordinate.

2006 年 3 月 1 日受付, 2006 年 6 月 2 日再受付, 2006 年 6 月 26 日採録
†東京大学院情報理工学系研究科

(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部一号館, TEL 03-5841-6917)

* 現在 (株) 日立製作所 日立研究所

** 現在 (独) 科学技術振興機構 さきがけ

† Graduate School of Information Science and Technology, the Univ. of Tokyo

(Faculty of Engineering Bldg.1 University of Tokyo 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

* Hitachi, Ltd. Hitachi Research Laboratory

** PRESTO Japan Science and Technology Agency

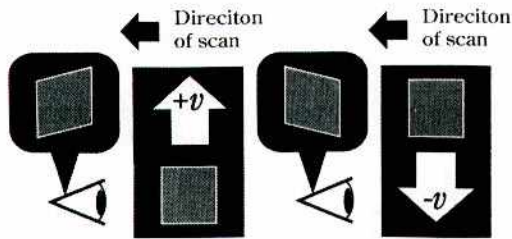


図3 歪んで知覚される動物体
Distorted perception of moving object.

図2左に、例として二つの光点AおよびBが鉛直上向きに動く動画をTWISTERで提示する様子を示した。y軸をディスプレイ面の鉛直方向、水平方向をx軸、timeを時間軸、アレイはx軸負の方向に走査しているとする。この時、点A、Bがどの時間にどの位置で点灯するかを図2右に示した。まず、アレイが点A、Bの座標を通過する各瞬間にLEDを点灯、1フレーム目の画像を提示する(図2右中の"1st frame")。その後、x軸正の方向から移動してくる隣のアレイによって2フレーム目の画像が提示される。(図2右中の"2nd frame") 3フレーム以降も1、2フレーム目と同様に画像を提示し、図2左のような2光点がy軸上向きに動く動画が提示される。次に、走査型ディスプレイにおいて生じる形態歪みについて述べる。TWISTER等の走査型ディスプレイを用いて、鉛直方向に移動する正方形の動画を提示すると、正方形が鉛直上向きに動く場合、走査するタイミングが早い箇所ほど上方向にずれ、傾いて知覚された(図3左)。また、逆に鉛直下向きに動かすと下方向に傾いて知覚された(図3右)。本稿では、今後この歪み現象を傾斜現象と呼ぶことにする。

2. 傾斜現象の機序仮説

本章では前章で紹介した傾斜現象と呼ばれる形態歪み現象の機序仮説について述べる。簡単のため、図2のように同じ高さを保ちつつ等速度でy軸上向きにA、B点が動いたとき、ユーザからはどう見えるかを議論する。本章で述べる機序仮説では、仮現運動が重要な役割を担っている。仮現運動とはアニメーションの原理であり、画像を次々適切な時間間隔で提示すると画像が滑らかに動いているように知覚される現象である。仮現運動を考慮した上で、図2右と同様の図を横軸を時間timeとして描くと図4のようになる。y軸正方向に等速運動して見えるA点と、Aより Δt 遅れて点灯するB点の仮現運動は図4中のA点同士、B点同士をつなぐ点線として示される。さて仮現運動が実際の運動のように知覚される場合、 $t = t_0$ の瞬間A、B両点を同時に見ると、仮現運動の軌道上にあたかも図4のように点A'が存在しているように知覚され、B点のy座標はA'点より Δy だけ低く認識される。なお、傾斜現象によって生じた線分A'Bの傾きの比Lはアレイの走査速度をu、A、B点の速度をvとすると以下のような式で表せる。

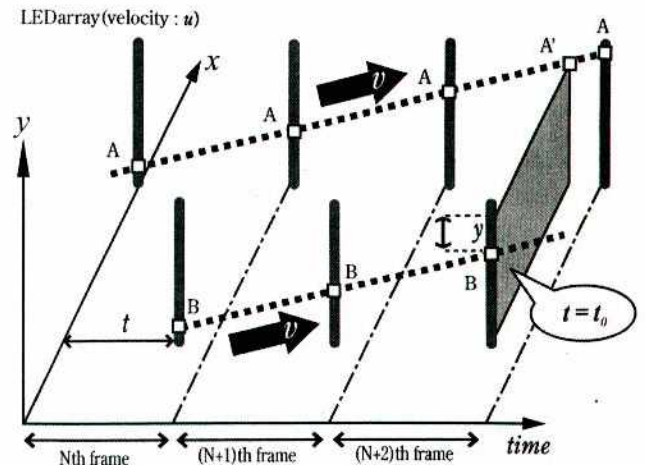


図4 A、B点が鉛直上方向に動く場合
Vertical movements of point "A" and "B".

$$L = \frac{\Delta y}{u \Delta t} = \frac{v}{u} \quad (1)$$

以上の議論は仮現運動が実際運動と同様に知覚されるという前提が成立しているならば、走査型ディスプレイにおいて傾斜現象は必然的に生じるということを示している。ただし、実際には画素が点灯していない時間の増加や、提示物体の速度上昇に伴い仮現運動と実際運動の差異は大きくなることが知られている³⁾。

3. 「傾斜現象による傾き」測定実験

我々は前章の機序仮説を定量的に検証するため、傾斜現象によって生じた傾きを測定する実験を行った。

3.1 傾き測定実験：実験条件

ディスプレイ面から1.0m離れた地点に立たせた被験者に対し、図5のように長方形が上下方向に拡大縮小する動画を刺激として提示した。刺激に拡大縮小図形を選択したのは、上下逆の方向に動く辺を同時に提示することで眼球運動の影響を除去するためである。提示された長方形は垂直角最大：3deg、最小：0degの間で拡大・縮小するようにし、中央に注視点を設けた。

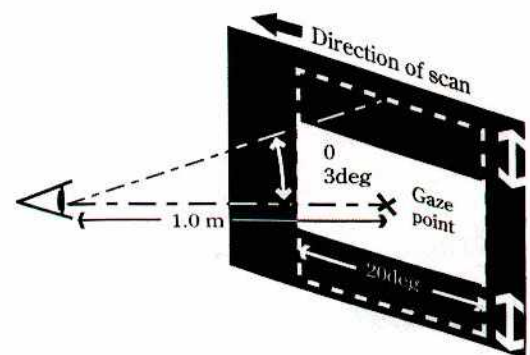


図5 傾き測定の実験条件
Experimental arrangement.

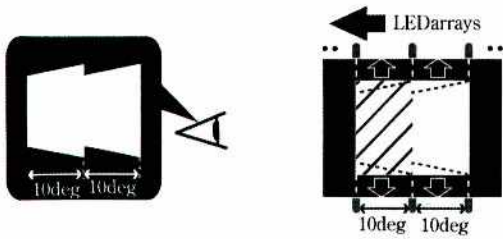


図 6 知覚されたノコギリ状の分布
Perceived saw-toothed image.

さらに、長方形の水平面角は生じる傾斜が十分に認識可能になるように 20deg とした。アレイの画面走査速度は 300deg/s、フレームレートは 30fps(10deg 間隔で設置されたアレイが 33ms 中に 10deg ずつ回転し全画面を走査するという意味) とした。以上の条件下において提示刺激の長方形は 2 分割され、領域ごとに別のアレイで走査・描画される。そのため図 6 右の斜線部のように、アレイに挟まれた長方形の領域が個別に台形に変形する。結果として本実験では図 6 のような台形が連結された、ノコギリ状の分布を被験者は知覚することになる。

3.2 傾き測定実験：実験手順

今回用いた測定手法は、予め傾きをつけておいた辺が動いた場合傾斜現象により傾きが相殺され、水平な辺になることを利用したものである。図 7 左のような水平な辺が、ノコギリ状の分布として知覚されることは前章でも述べた。したがって図 7 右上のように辺を傾け、相殺すると図 7 右下のような階段状の分布として知覚される。そこで、ノコギリ状の分布を被験者に見せながら傾きをつけてもらい、階段状の分布になるように被験者に調整させるという実験を行った。実験手順を以下に述べる。

- 1) 被験者に対し上下辺が拡大縮小する図形を提示し、分布がノコギリ状かどうか確認させる
- 2) ノコギリ状の辺が階段状に近づくよう、図 7 右上のようにキー操作で辺の傾きを変化させる

傾きが相殺され、図 7 右下のように階段状の分布のまま拡大縮小が行われるようになるまで、以上の 1) と 2) の操作を繰り返した。

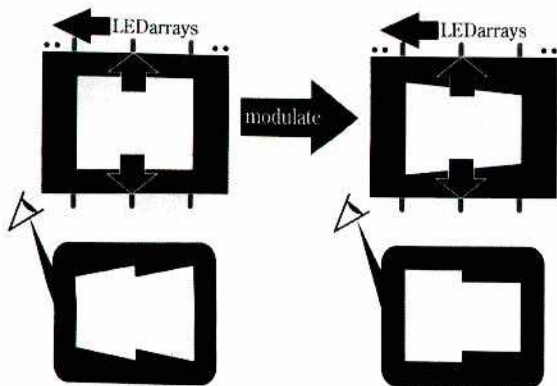


図 7 ノコギリ状の分布 (左) と調整後の階段状の分布 (右)
Distorted image(left) and corrected image(right).

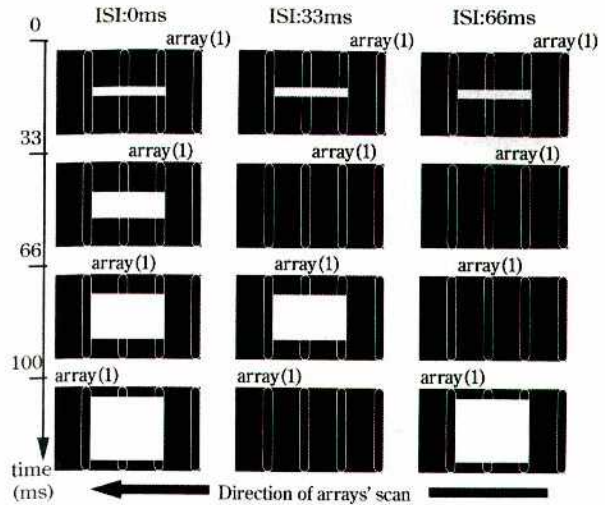


図 8 ISI を挿入した動画とアレイの走査
Presentation variation in three ISI conditions.

階段状分布になったところで、その時実際に画面上に提示している辺の傾きを傾斜現象による傾きの値として記録した。(調整回数は無制限、1 回のキー操作で傾きが上下辺が約 0.1deg 増減)

3.3 傾き測定実験：ISI の増加について

仮現運動の性質は、提示する動画フレーム間の時間間隔 ISI (Inter-Stimulus-Interval) に大きく依存する。そこで傾き測定実験を ISI を増加させた条件下でも行い、傾斜現象への影響を調べた。ISI を増加させる方法としてはアレイの走査速度を低下させる、あるいはアレイ間隔を長くする方法などがある。しかし ISI 以外の条件を変えないようにするため、図 8 のように画面を走査した後の 0, 33, 66ms の間、全 LED を消灯するという方法を用いた。なお本稿においては図 8 のように 1 フレーム走査後、全 LED を消灯させている時間を「ISI の長さ」と呼ぶことにする。図 8 は $time = 0ms$ でアレイ (1) が図 8 最上段のように右端にある場合、どのようなタイミングで動画フレームを提示するのかを示した図である。図 8 のように、アレイ (1) を含むすべてのアレイは 33ms ごとに隣接するアレイの位置に移動するようになっている。また、画面を走査している 33ms の間はフレームが切り替わることはないようになっている。以上の条件で、傾き測定実験を速度 18 段階 ISI の長さ 3 段階で 5 試行ずつ、被験者 4 人に対し行った。

3.4 傾き測定実験：結果

被験者間平均の結果を図 9 に示す。横軸が図形上下辺の視野角換算の速度 (deg/s) (正の値は拡大時、負の値は縮小時)、縦軸が被験者によって知覚された傾斜現象による傾きの角度 (deg) (水平の時 0deg とする) である。式 1 による理論値を縦軸を角度、横軸を速度にしてプロットすると、図 9 中に示されたようなほぼ直線となる。ここで図 9 で最も注目したいのはその理論値と実験値の差である。

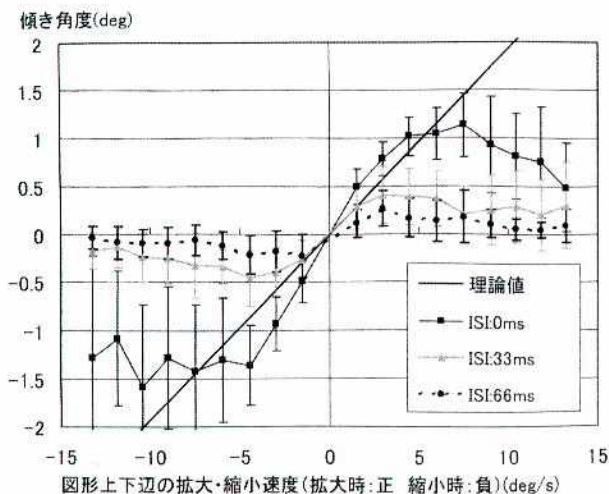


図9 ISI および速度に関する傾き測定結果
Relationship between velocity of expansion (shrink) and perceived tilt in three ISI conditions.

まず、図9中のISIの長さが0msの場合、理論値と比較的一致するのは速さが約7.5deg/s以下の低速時であり、より高速に動く場合理論値より少ない傾きを覚知する実験結果となった。またISIの長さが33ms、66msと増加するにつれ、理論値と一致する速度の範囲は狭くなる。以上より速度およびISIの増加は、傾斜現象を抑制し理論値より傾きを減少させる働きがあると考えられる。

4. 傾斜現象の測定実験と改善手法に関する考察

前章の実験結果を踏まえ、本章では傾斜現象の理論値と実験値の違い、および傾斜現象による形態歪みの対策について考察する。

4.1 傾斜現象の抑制について

2章でも説明したように、傾斜現象は仮現運動の原理から必然的に生じる形態知覚の結果である。よって仮現運動が連続的な運動として知覚されている限り傾斜現象は2章の理論式(1)に従う。しかし、前章ではISIおよび速度の増加に伴い理論式より小さい値が知覚されるという実験結果を示した。その原因としては仮現運動の滑らかさが損なわれ、連続的な運動として知覚され難くなったことが考えられる。一般にISI増加や提示物体の速度上昇は、動画の滑らかさを損なうことが良く知られている³⁾。滑らかさと同様に運動物体の正常な形態知覚もISIや速度増加によって損なわれると考えられる。逆に言えば、ISIの増加は傾斜現象による形態歪みの改善手法として用いることが可能といえる。

4.2 傾斜現象の抑制手法について

理論式1によれば、傾斜現象を抑制するにはアレイ走査速度の上昇、あるいは提示物体の速度を低下させる必要がある。しかし、TWISTERのように物理的にアレイを回転させて走査する場合、走査速度を上昇させると遠心力による機械・電子部品への負荷が無視できない問題となる。し

かしISIを挿入することにより、アレイの走査速度を上昇させることなく傾斜現象を抑制することができる可能性がある。ただし、ISIを挿入すると動画はぎこちない動きになるため、動画の滑らかさと傾斜現象による歪みの間にはトレードオフの関係がある。まとめると、部品への影響が問題にならない範囲内で走査速度を大きくし、ISIを可能な限り増加させることによって傾斜現象を効率よく抑制可能であるといえる。

5. むすび

本稿では、走査型ディスプレイにおいて発生する形態歪みの性質について検証・実験を行った。その結果、形態歪みは本来必然的に生じるはずであるが、ISIあるいは走査速度の増加に伴い抑制されることがわかった。

〔文 献〕

- 1) 田中健司, 林淳哉, 川淵一郎, 稲見昌彦, 館暲: 裸眼全周囲ステレオ動画ディスプレイ TWISTER III, 映像学誌, 58, 6, pp.819-826 (2004)
- 2) 林淳哉, 園道知博, 川上直樹, 館暲: LEDの小型化と光信号の利用による没入型裸眼立体ディスプレイの高品質化, 映像学誌, 60, 6, pp.951-957 (2006)
- 3) Andrew B. Watson, A.J. Ahumada: Window of visibility: a psychophysical theory of fidelity intime-sampled visual motion displays, Journal of the Optical Society of America, A3, pp300-307 (1986)



うちだ たかゆき
内田 貴之 2004年3月東京大学計数工学科卒業。2006年3月同大学大学院 情報理工学系研究科 修士課程修了。主に映像に関する知覚特性、三次元映像の研究に従事。2006年4月より(株)日立製作所 日立研究所に所属。



わたなべ じゅんじ
渡邊 淳司 2005年3月東京大学大学院 情報理工学系研究科 博士課程修了。博士(情報理工学)。2005年11月科学技術振興機構「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」領域 さきがけ研究員。視覚における時空間知覚メカニズムの研究、及びその情報提示・芸術表現への応用研究を行う。ArsElectronica "NextIdea" 入賞(2004)。http://www.junji.org/



かわかみ なおき
川上 直樹 1996年、東京工業大学大学院 理工学系研究科修了。1999年、東京大学大学院 工学系研究科博士課程修了。同年、同大学大学院工学系研究科助手。2002年より、同大学院講師。博士(工学)。バーチャルリアリティの研究に従事。



たち すすむ
館 暲 1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年、同大助手。1975年より通産省工技院機械技研を経て、1989年、東京大学先端科学技術研究センター助教授。1992年、同教授。1994年、同大学院工学系研究科教授。2001年より、同大学大学院情報理工学系研究科教授。博士(工学)。信号処理、盲導犬ロボット、トレイグジスタンスなどの研究に従事。正会員。