

最先端研究

計算を用いたフットステップ錯視アートの創作と その実用化に向けて

友枝 明保*

Computational Creation of Footsteps Illusion Art and its Practical Applications

Akiyasu Tomoeda*

Key words: Computational Illusion, Visual Illusion, Footsteps Illusion, Illusionary Art

1. はじめに

目の錯覚である「錯視」に関する研究は古く、かつ新しい。どういうことかと言うと、誰もが目にしているのであろうミュラー＝リヤー錯視(図1)¹⁾やデルブーフ錯視(図2)²⁾と言った幾何学的錯視に関する研究は、19世紀中後半から主に心理学の分野を中心として発展していた。しかし、20世紀の終わりから爆発的に普及したコンピューター、インターネットのおかげ

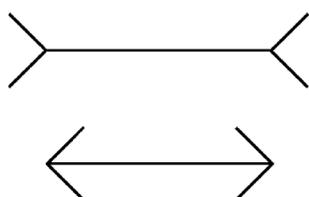


図1 ミュラー＝リヤー錯視。線分の両端に外向きに矢羽を付けると長く見え(上)、内向きに矢羽を付けると短く見える(下)。

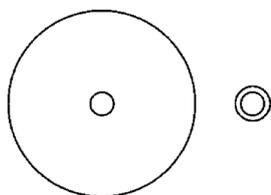


図2 デルブーフ錯視
リングの中の円は同じ大きさであるが右の方が左よりも大きく見える。

で、様々な図形や塗りデザインを容易に描くことが可能となり、また、その情報を容易に取得することができるようになったため、近年の錯視研究は、コンピューターグラフィックスや情報処理を中心とした工学分野にまで、大きく広がってきている³⁾。特にごく最近では、JST CREST「数学」領域において、「計算錯覚学の構築」プロジェクトが採択されるなど、錯視現象に対する数理的アプローチも期待され、新しいアプローチが盛んに試みられている。錯視現象を数理的に扱うことの一番のメリットは、錯視現象を数量化することで、数理モデルとして表現できるようになることであり、これが成功すると、例えば、あるパラメーターを変化させた際に、錯視量がどのように変化するか、ということを予測し、制御することが可能となる点にある。パラメーターを変化させて錯視の効果を最小化することができれば、例えば、交通シーンでは、交通事故の防止や交通渋滞を緩和するといった安全かつ快適な道路環境を作る指針を示すことができ。一方で、錯視の効果を最大化することができれば、錯視現象を積極的に利用していくことが可能となり、宣伝広告における利用やエンターテインメントの新しい一つの表現方法として利用できる可能性もある。今までは偶発的に、あるいは経験的な知見に基づいて錯視現象が発見・創作されていたが、数理モデルを用いることで、「誰もが」・「意図的に」錯視現象と関わることができようになる。このように錯視現象に対する数理的アプローチは大変新しい研究スタイルであり、まさに始まったばかりの新しい研究分野と言える。

* 武蔵野大学/JST, CREST/MIMS
Musashino University/JST, CREST/Meiji Institute for
Advanced Study of Mathematical Sciences

フットステップ錯視とは？

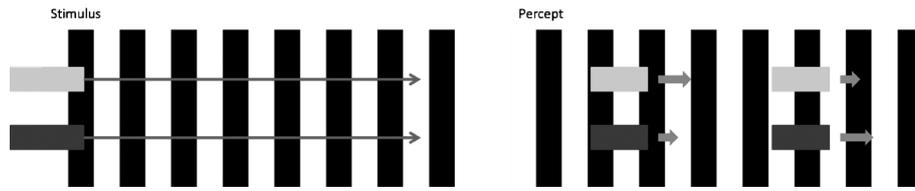


図3 フットステップ錯視の刺激(左)と知覚(右)。(左)明るい灰色と暗い灰色のオブジェクトの運動方向を矢印で示しており、等速で並進していることを表す。(右)明るい灰色と暗い灰色のオブジェクトのそれぞれの位置に対して、知覚したスピードを太い矢印で示し、オブジェクトの位置によって知覚するスピードが変わることを意味している。

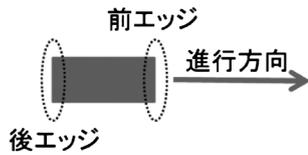


図4 オブジェクトの進行方向に対する「前エッジ」と「後エッジ」の定義

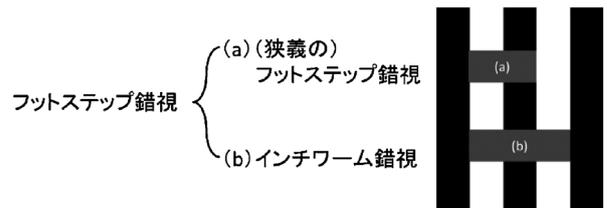


図5 フットステップ錯視の二種類の動きを見せるオブジェクトと背景の大きさの関係

本稿では、錯視現象への数理的アプローチの一つとして、フットステップ錯視と呼ばれる錯視現象をアートに応用した研究成果について紹介する。

2. フットステップ錯視とは？

フットステップ錯視とは、2001年にS.Anstis氏が報告した錯視現象⁴⁾であり、図3に示すように黒と白の縞模様の背景の上を、明るい灰色と暗い灰色の二つの長方形(オブジェクトと呼ぶ)が同時に等速運動しているとき(図3左)、二つのオブジェクトがあたかも交互に動いているように見えてしまう錯視現象である(図3右)。このフットステップ錯視のカラクリは、動くオブジェクトと背景のストライプとのコントラスト差にあると報告されている⁴⁻⁶⁾。つまり、暗い灰色のオブジェクトは、コントラスト差が小さくなる黒いストライプ上では速度が遅くなるように見え、一方、明るい灰色のオブジェクトは、コントラスト差が小さくなる白いストライプ上で速度が遅くなるように見えるというわけである。

特に、進行方向に対してオブジェクトの前エッジ、後エッジを図4のように定義すると、オブジェクトの前と後ろのエッジが同じタイミングでストライプにかかる場合は、あたかも止まっているように見え(狭義の)フットステップ錯視)、オブジェクトの前と後のエッジが逆相でストライプにかかった場合は、オブジェクトが伸び縮みし、長さが変わっているように見える(インチワーム錯視)(図5)。

このフットステップ錯視については、上のコントラスト差が要因であるという仮説に対する視覚心理実験⁷⁾やFitzHugh-Nagumo方程式を用いた数理モデル研究も行われている⁸⁾。さらに、中心視野よりも周辺視野で知覚した方が錯視の効果が大きくなるといったことも報告されている⁵⁾。本稿では、フットステップ錯視のキーはコントラスト差であるということを前提として、オブジェクトの色及び背景のストライプの色は白と黒に統一して話を進めていくことにする。

3. フットステップ錯視の度合いの数値化

前章でも述べたように、フットステップ錯視はオブジェクトの前・後のエッジがストライプにかかった際のコントラスト差によって生じている錯視現象であった。本章では、オブジェクトの幅とストライプの幅の関係性を計算することにより、フットステップ錯視の度合いを数値化し、最も錯視が効果的に観察できる条件を求めてゆく。

まず、図6のように、オブジェクトの幅 x 、ストライプの幅 ω と設定する。さらに、 x を変数とした無次元量 $T(x)$ を、ストライプ1周期分にかかる時間 $(\alpha 2\omega)$ に対して両端が黒いストライプに乗っている時間 $(\alpha x - \omega)$ と定義する。つまり、 $\omega \leq x \leq 2\omega$ の範囲では、

$$T(x) = \frac{x - \omega}{2\omega}, \quad (\omega \leq x \leq 2\omega) \tag{1.1}$$

と定義する。すると、無次元量 $T(x)$ が最大になると

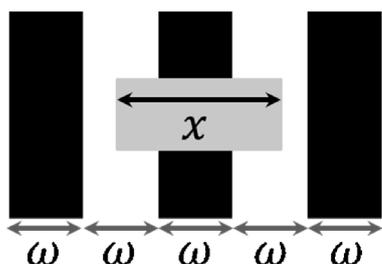


図6 オブジェクトの幅 x とストライプの幅 ω の設定

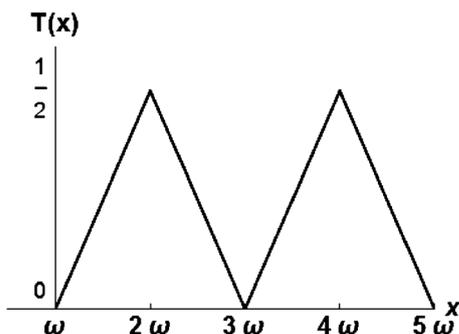


図7 $T(x)$ のグラフ.

きは、(狭義の)フットステップ錯視の効果が最も大きく観察される時で、無次元量 $T(x)$ が最小となるときは、インチワーム錯視の効果が最も大きく観察される時であることがわかる。以上のことから、 $x = 2\omega$ のときに $T = 1/2$ が最大値となり、 $x = \omega$ のときに $T = 0$ が最小値となることがわかる。同様に $2\omega \leq x \leq 3\omega$ の範囲では、

$$T(x) = \frac{3\omega - x}{2\omega}, \quad (2\omega \leq x \leq 3\omega) \quad (1.2)$$

と定義し、各条件を求めると、 $x = 2\omega$ のときに $T = 1/2$ で最大となり、 $x = 3\omega$ のときに $T = 0$ で最小となる。繰り返し考えていくと、オブジェクトの幅 x に対して、図7のようなグラフが得られる。すなわち、 $k = 1, 2, 3, \dots$ に対して、

(i) $x = 2k\omega$ のとき

⇨オブジェクトの幅がストライプ幅の偶数倍のとき
→(狭義の)フットステップ錯視の効果が最も大きい

(ii) $x = (2k - 1)\omega$ のとき

⇨オブジェクトの幅がストライプ幅の奇数倍のとき
→インチワーム錯視の効果が最も大きい

という条件が得られる⁹⁾。

このように、無次元量 $T(x)$ を導入することにより、(狭義の)フットステップ錯視とインチワーム錯視、それぞれの効果が最も大きくなる条件を求めることができた。さて、ここまでは単一のオブジェクトの幅についての計算であったので、次は二つのオブジェクトが

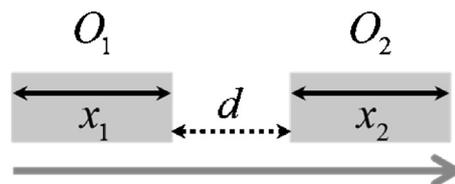


図8 二つのオブジェクトがあるときの設定. 画像下部の矢印は進行方向を表す.

表1 二つのオブジェクト x_1, x_2 及びそれらの間隔 d に関する分類と、見かけの動きのパターン.

pattern	Width			Apparent motion		
	x_1	x_2	d	O_1	O_2	Timing
1	Even	Even	Even	Footsteps	Footsteps	Synchronously
2	Even	Even	Odd	Footsteps	Footsteps	Alternately
3	Odd	Odd	Even	Inchworm	Inchworm	Alternately
4	Odd	Odd	Odd	Inchworm	Inchworm	Synchronously
5	Even	Odd	Even	Footsteps	Inchworm	Synchronously
6	Even	Odd	Odd	Footsteps	Inchworm	Alternately
7	Odd	Even	Even	Inchworm	Footsteps	Alternately
8	Odd	Even	Odd	Inchworm	Footsteps	Synchronously

ある場合について考えてみることにしよう。

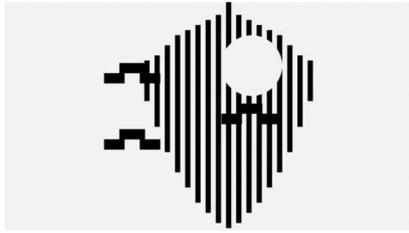
二つのオブジェクトを考えるときは、図8に示すように、二つのオブジェクト O_1, O_2 の幅をそれぞれ x_1, x_2 とし、その両者の間隔を d と設定する。二つのオブジェクトが重なる場合は、重なり合っている部分を d と定義する。オブジェクトの幅 x_1, x_2 がストライプ幅の偶数倍(Even)か奇数倍(Odd)かで二つのオブジェクト O_1, O_2 の見かけの動きが決まり、その両者の間隔 d により、動くタイミングを決めることができる。これらを分類すると、 x_1, x_2, d についてそれぞれ偶数倍か奇数倍かの2パターンがあり、それらの組み合わせを考えることで、見かけの動きは表1のような8パターンに分類することができる。ここでは二つのオブジェクトについてだけを分類したが、三つ以上のオブジェクトの場合も同じように全ての組み合わせを考えれば、その見かけの動きを予測することができる。これらの基本的なみかけの動きを組み合わせることで、フットステップ錯視アートを創作することが可能となる。

4. フットステップ錯視アート

ここでは、いくつかの代表的なフットステップ錯視アート作品について紹介する。アートデザインと共に、youtube 動画へのリンク情報を持つ二次元バーコードも載せておくので、興味のある読者はアクセスして是非とも動画でご覧いただきたい。

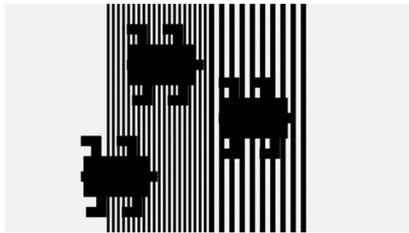
作品 1. 「幼虫」

幼虫が伸び縮みして葉っぱの上を動く作品である¹⁰⁾.



作品 2 「海と陸」

背景のストライプパターンを変化させることで、場所によってカメの動きが変わり、カメが海から陸へ上がる様子を描いた作品である¹¹⁾.



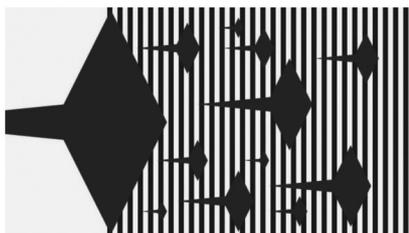
作品 3. 「満月のこうもり」

背景のストライプを二次元格子へと拡張し、コウモリが羽ばたいて飛んでいく様子を表現した作品である¹²⁾.



作品 4. 「家族」

オブジェクトのエッジを斜めにするにより、エイが泳ぐ様子を表現した作品である¹³⁾.



作品 5. 「ドライブ」

伸び縮みして見えるタイミングをずらすことにより、平行移動だけで回転運動を表現した作品である¹⁴⁾。この作品を含む平行移動を用いて回転運動を表現する作品群「Rotation Generated by Translation」は、Best Illusion of The Year Contest 2013 (Vision Science Society (VSS) の年次総会の併設イベント) において、First Prize を受賞した¹⁵⁾。



5. フットステップ錯視アートの実用化に向けて

フットステップ錯視アートは、回転運動するオブジェクトについてもデザインを創作することができる。例えば、図 9 のように、秒針をオブジェクトと考えれば、背景のストライプの中心角に対して、秒針の中心角を偶数倍に設定すれば、フットステップ錯視の効果が最も大きくなり、奇数倍のとき、インチワーム錯視の効果が最も大きくなるのが容易に想像でき、不思議な動きをする錯視時計¹を作ることもできる¹⁶⁾。本デザインを採用していただける企業がおられたら是非ともご一報いただきたい。

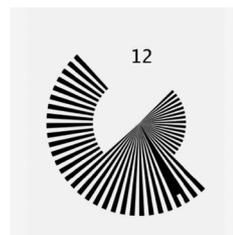


図 9 錯視時計のデザイン

6. さいごに

本稿では、小野隼氏、杉原厚吉氏との共同研究¹⁷⁾に基づいて、数理的に創作したフットステップ錯視アートについて解説した。フットステップ錯視は、オブジェクトと背景のストライプのコントラスト差によって生じているという特徴を理解したうえで、錯視の度合いについて、無次元量 $T(x)$ を指標として導入

¹ 特願 2012-173418, 特願 2013-110085

することにより、(狭義の)フットステップ錯視の効果が最も大きく観察される条件、及び、インチワーム錯視が最も大きく観察される条件を数理的に導いた。さらに、オブジェクトと背景のストライプの組み合わせにより、二つのオブジェクトの場合は、動きを8パターンに分類することに成功し、その組み合わせを用いて狙った振る舞いを表現し、様々なフットステップ錯視アートを創作した。本稿では、その一部の作品を紹介したが、Youtube上では、他の作品も掲載されているので、是非ともその見え方を楽しんでいただきたい。

最後に、これらのアート作品の動画を創作するにあたり、杉原陽子氏にバックミュージックを提供していただきましたこと、心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Müller-Lyer, F. C., *Optische Utreilstäuschungen*, *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung*, 2, 263-270, (1889).
- 2) Delboeuf, M. J., Note sur certains illusions d'optique: Essai d'une théorie psychophysique de la manière dont l'oeuil apprécie les distances et les angles, *Bulletin de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, II Série*, 19, 195-216, (1865)
- 3) 数学セミナー vol.50, no.3(2011年3月号), 日本評論社, p.8
- 4) S. Anstis, Footsteps and inchworms, *Perception*, 30, 785-794 (2001).
- 5) S. Anstis, Moving objects appear to slow down at low contrasts, *Neural Networks*, 16, 933-938(2003).
- 6) S. Anstis, Factors affecting footsteps : contrast can change the apparent speed, amplitude and direction of motion, *Vision Research* 44, 2171 - 2178(2004).
- 7) P. D. L. Howe, P. G. Thompson, S. M. Anstis, H. Sagreiya, and M. S. Livingstone, Explaining the footsteps, belly dancer, Wencleslas, and kickback illusions, *Journal of Vision*, 6, 12, 1396-1405 (2006).
- 8) K. Miura, A. Osa, and H. Miike, A simulation of the footsteps illusion using a reaction diffusion model, *電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌)*, 129, 1156-1161(2009).
- 9) Ono jun, youtube 動画「フットステップ錯視の説明」:
<https://www.youtube.com/watch?v=puWYJqFPLM>
- 10) Ono jun, youtube 動画「幼虫」:
<https://www.youtube.com/watch?v=L9mu5gpPYQo>
- 11) Ono jun, youtube 動画「海と陸」:
<https://www.youtube.com/watch?v=DUIEzEvXI6Y>
- 12) Ono jun, youtube 動画「満月のこうもり」:
https://www.youtube.com/watch?v=4Bh_b1kTsc0
- 13) Ono jun, youtube 動画「家族」:
<https://www.youtube.com/watch?v=JOsFGdWqHgA>
- 14) Ono jun, youtube 動画「ドライブ」:
<https://www.youtube.com/watch?v=eoJA16IXmcc>
- 15) Best Illusion of The Year Contest (2013)
<http://illusionoftheyear.com/cat/top-10-finalists/2013/>
- 16) Ono jun, youtube 動画「錯視時計」:
<https://www.youtube.com/watch?v=6nNrl4XWtBE>
- 17) 小野 隼, 友枝明保, 杉原厚吉, “フットステップ錯視アートの設計法”, *和文論文誌「日本応用数理学会論文誌」*, 23巻3号(2013), pp.585-600.