

平成 16 年度
修士論文

局所的運動情報の統合に基づく
回轉變動錯視の知覚モデル

電気通信大学
大学院情報システム学研究科
情報ネットワーク学専攻

0351009 今井 政敬

指導教員

阪口 豊
出澤 正徳
中村 整

平成 17 年 1 月 31 日 提出

目次

1	序論	3
2	回転変動錯視	4
2.1	伸縮型回転変動錯視	4
2.2	偏心型回転変動錯視	5
2.2.1	順偏心型回転変動錯視	5
2.2.2	逆偏心型回転変動錯視	5
2.3	変形型回転変動錯視	6
2.4	様々な回転変動錯視	6
2.5	静止時における回転変動錯視の知覚	12
3	モデル	13
3.1	motion energy model	13
3.1.1	運動検出細胞の時空間特性をもつフィルターの作成方法	13
3.1.2	なぜmotion energy modelは運動を検出できるのか？	15
3.2	作成したモデル	17
3.2.1	局所的運動情報検出部分	17
3.2.2	運動情報統合部分	19

4	数値実験	23
4.1	数値実験環境	23
4.2	実験結果	25
4.2.1	伸縮型回転変動錯視の結果	25
4.2.2	偏心型回転変動錯視の結果	33
4.2.2.1	順偏心型回転変動錯視の結果	33
4.2.2.2	逆偏心型回転変動錯視の結果	42
4.2.3	変形型回転変動錯視の結果	51
4.2.4	回転図形の速度変化による時空間フィルターの応答	53
5	結果と考察	54
5.1	数値実験結果のまとめ	54
5.2	一部の特徴量が知覚と一致するタイプについて	56
5.2.1	3つの統合方法が独立であること	56
5.2.2	回転中心を既知であり一定であるとしていること	56
5.3	全特徴量で知覚と不一致な結果になったタイプについて	58
5.3.1	一方向の線分により構成されている正方形	59
5.3.2	釘を刺した正方形	60
	謝辞	62
	参考文献	63

1 序論

回轉變動錯視とは、回転している正多角形を、円型の窓越しに観察すると、回転する正多角形があたかも伸縮したり、偏心したり、変形したりして知覚できる錯視現象である。

本研究の目的は、脳の 1 次視覚野における神経細胞の受容野の時空間特性を考慮したモデルを基にした視覚野のモデルを作り、数値実験を行うことにより、回轉變動錯視の知覚メカニズムを探ることである。

研究手法としては、motion energy model を基にしたモデルを作成して、数値実験を行う。次に、数値実験の結果と回轉變動錯視についての人の見え方を比較する。

その結果、数値実験の結果と人の見え方が定性的にほぼ一致しているものと一致しないものがあった。この結果に基づいて、回轉變動錯視の知覚メカニズムを考察する。

2 回轉變動錯視

この章では、回轉變動錯視の現象を説明する。

回轉變動錯視とは、回転する正多角形を円状の窓をとおしてみると、あたかも拡大したり縮小したりして、知覚できる錯視現象である (Fig. 2.1)。

この錯視現象は、伸縮型、偏心型、変形型の3つのタイプに大別される。本論文では、面積をもつ正多角形が回転図形の場合を基本型と呼ぶことにする (Fig. 2.11 (a)基本型 を参照)。また、回転方向を時計回りが正となるように設定した。

まず伸縮型、偏心型、変形型における基本型、それぞれについての現象を説明する。

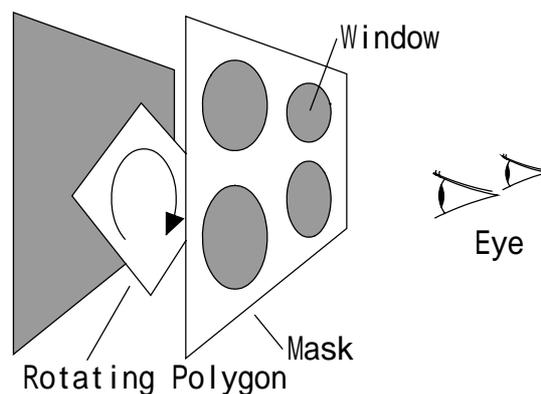


Figure 2.1 回轉變動錯視の観察方法

2.1 伸縮型回轉變動錯視

伸縮型と呼ばれる回轉變動錯視は、回転する正方形を、対称的に並んだ円形の4つの窓を通して観察した場合に、正方形があたかも拡大したり縮小したりして知覚される (Fig. 2.2)。回転する正方形の角が、円形の窓中にある場合には、正方形が拡大するように知覚される (例えば Fig. 2.2 90[deg] のとき)。逆に、回転する正方形の角が、円形の窓中にない場合には、正方形が縮小するように知覚される (例えば Fig. 2.2 45[deg] のとき)。伸縮型と同様の錯視は、他にも発見されている^[1]。

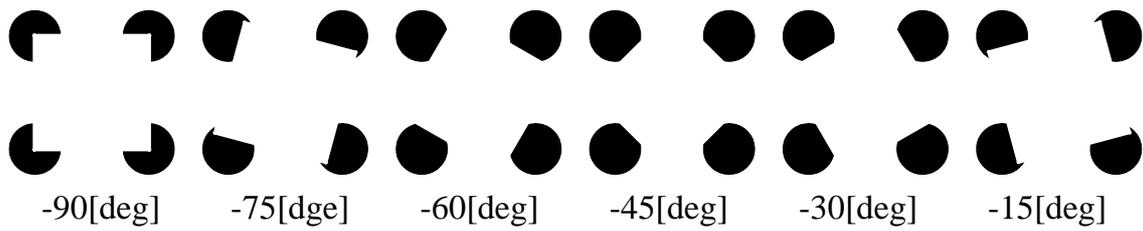


Figure 2.2 伸縮型回轉變動錯視

2.2 偏心型回轉變動錯視

2.2.1 順偏心型回轉變動錯視

順偏心型と呼ばれる回轉變動錯視では、回転図形が正方形であり、正三角形の頂点のそれぞれの位置に円形の窓が位置している遮蔽板を通して観察すると、回転方向と同じ方向に、正方形の重心が偏心しているように知覚される (Fig. 2.3)。

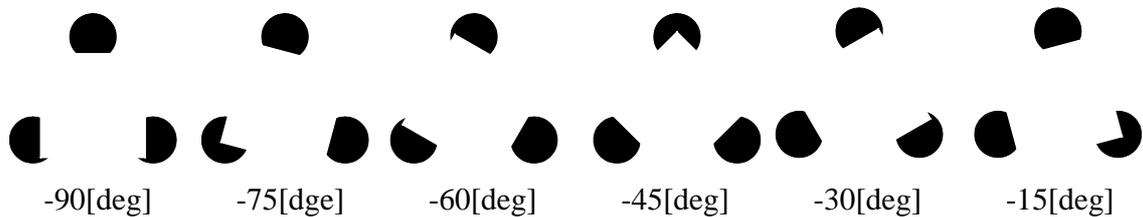


Figure 2.3 順偏心型回轉變動錯視

2.2.2 逆偏心型回轉變動錯視

逆偏心型と呼ばれる回轉變動錯視は、回転図形は正方形であり、正五角形の頂点それぞれの位置に円形の窓が配置されている遮蔽板を通して知覚される (Fig. 2.4)。知覚特性としては、回転方向と逆の方向に、正方形の重心が偏心しているように知覚される。

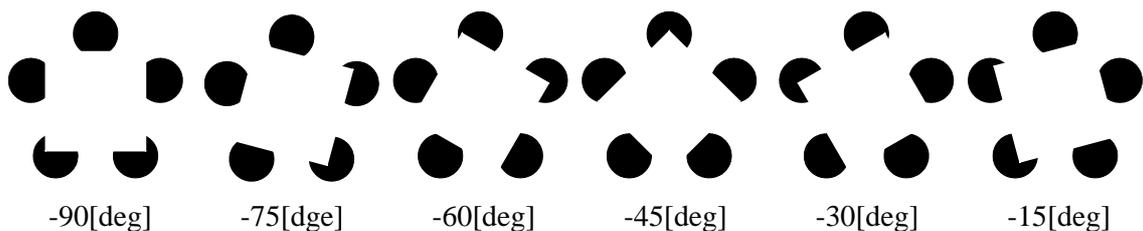


Figure 2.4 逆偏心型回轉變動錯視

2.3 変形型回轉變動錯視

変形型と呼ばれる回轉變動錯視は、回転図形が六角形であり、正方形の頂点それぞれの位置に円形の窓が配置されている遮蔽板を通して観察すると、六角形が変形して知覚される錯視現象である (Fig. 2.5(1))。

Fig. 2.5 (2)は $-60[\text{deg}]$ や $-30[\text{deg}]$ のときであるが、このときに、図中の左上から右下へ伸びる破線の矢印の方向が長く、その矢印と直交する方向が短めに感じられ、図中(a)の直線成分は感じられるが(b)の角は考えずにむしろ(c)の点線のような輪郭が存在するように知覚される。

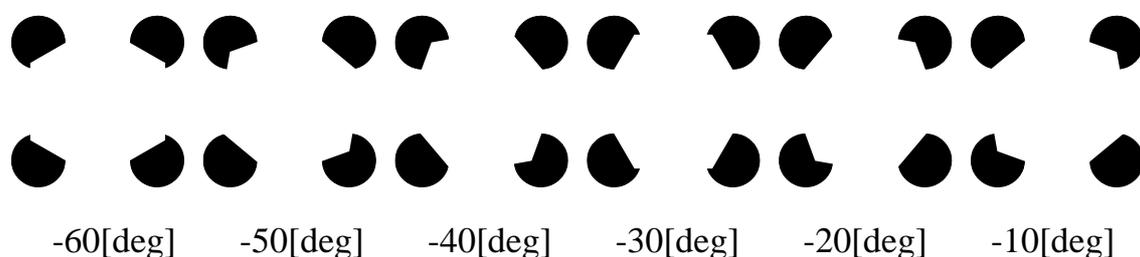


Figure 2.5 (1) 変形型回轉變動錯視

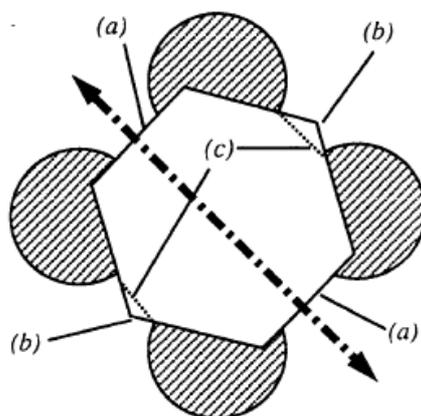


Figure 2.5 (2) 変形型回轉變動錯視の知覚

2.4 様々な回轉變動錯視

さまざまな回転図形を用いた回轉變動錯視の知覚効果は、橋本によって調べられた^[2]。ここでは文献 2 で報告されている様々な視覚刺激を紹介する。Figure 2.11 中の(1)、(2)、(7)は橋本の論文に掲載されているものであるが、(3)~(6)に関しては、橋本の論文に掲載されているものを参考にして、筆者のモデ

ルの限界を知る上での重要な手がかりになると考え、筆者が作成した。

Fig.2.11(1)～(7)に従って紹介する。

(1) 回転する正方形が枠だけの正方形の場合、伸縮型では基本型と同様の知覚効果が得られ、正方形が拡大・縮小しているように観察される。また偏心型についても基本型と同様の知覚が得られる。

(2) 角を丸めた正方形を回転図形として用いる場合、伸縮型では、基本型と同様の知覚が得られたが、拡大・縮小する程度が緩やかになった。偏心型についても、基本型と同様の知覚が得られる。

正方形の輪郭線上に目印となる釘を付加した正方形を回転図形として用いると、釘の個数が増えるに従って拡大縮小の効果が弱められる事が橋本により確かめられている。

本論文では、正方形一辺あたりに打つ釘の本数を4本と8本、また釘の長さを二通り用意して計4つの刺激を筆者が作成した(3)～(6)。

(3) 短い釘を一辺あたり四本打った正方形を回転図形として用いた場合、伸縮型、偏心型について基本型と同様の知覚効果が得られるが、その効果は弱まる。

(4) 短い針を一辺あたり八本打った正方形を回転図形として用いた場合、伸縮型、偏心型について基本型と同様の知覚効果が得られるが、その効果は(3)に比べさらに弱まる。

(5) 長い針を一辺あたり四本打った正方形を回転図形として用いた場合、伸縮型、偏心型について基本型と同様の知覚効果が得られるが、その効果は、(3)に比べさらに弱まる。

(6) 長い針を一辺あたり八本打った正方形を回転図形として用いた場合、伸縮型、偏心型について基本型と同様の知覚効果が得られるが、その効果は、(5)に比べさらに弱まる。

(7) 一方向の線分で構成された正方形を回転図形として用いた場合、偏心型については同様の知覚が得られた。

伸縮型について、橋本の論文では、Fig. 2.12(a)中の破線方向の伸縮が際

立って感じられたと記されている。かつ、回転の途中では平行線をそのまま輪郭とする辺の方がより知覚され易い為に、Fig. 2.12(b)のような平行四辺形に歪んだり、また正方形に戻ったりしながら回転しているように知覚されると記されている。しかし、心理実験を行い被験者にアンケートしたところ、橋本の論文に記されているような知覚効果は得られず、基本型と同様の知覚があることがわかった。よって、4章の数値実験では、筆者が行った心理実験の結果を元にして考察する。

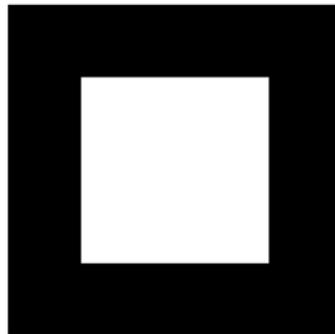


Figure 2.11 (a) 基本型

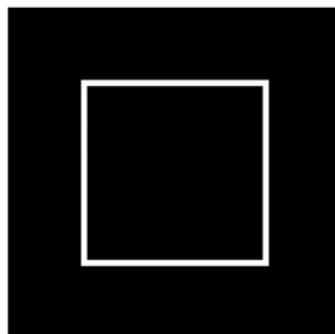


Figure 2.11 (1)



Figure 2.11 (2)



Figure 2.11 3)

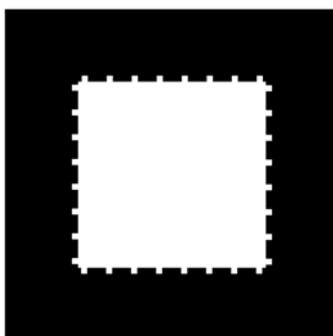


Figure 2.11 (4)

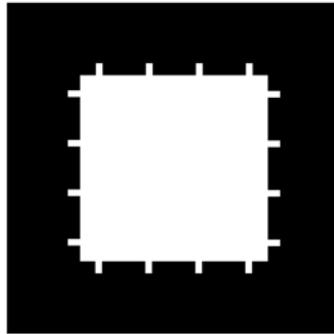


Figure 2.11 (5)

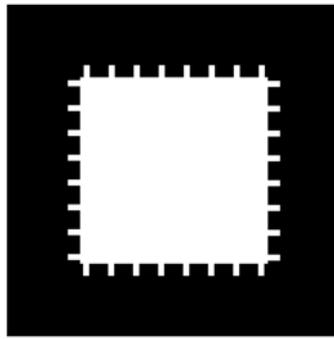


Figure 2.11 (6)

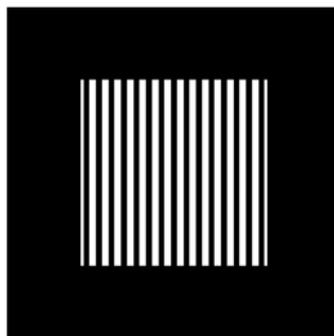


Figure 2.11 (7)

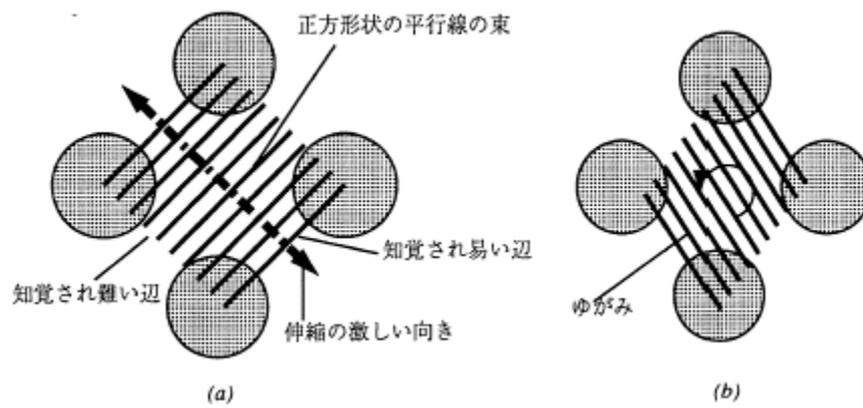


Figure 2.12 伸縮型タイプ(7)の知覚特性 (橋本 ; 1993)

2.5 静止時における回轉變動錯視の知覚

最後に、回轉變動錯視は、正多角形が回転していない場合（つまり静止している場合）にも、錯視効果があることを記述する。

例えば、伸縮型に関しては、右よりも左の方が、正方形の大きさが大きく知覚されるはずである (Fig. 2.13)。また順偏心型に関しては、左では真上に正方形の重心が偏心しているように知覚され、また中央では、右下へ偏心していることが知覚でき、右では左下へ正方形の重心が偏心しているように知覚できる (Fig. 2.14)。

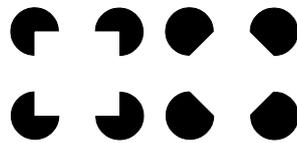


Figure 2.13 静止時における伸縮型の見え方

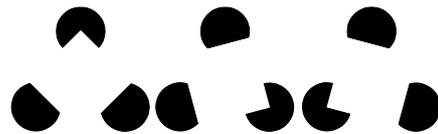


Figure 2.14 静止時における順偏心型の見え方

したがって、静止している状態でのいくつかの要因も、正多角形が動いている時と同様の結果を与える。

第三章では、これら様々な回轉變動錯視を視覚刺激としてモデルに入力した場合に、その出力が我々の知覚と似ている出力を提供することができるかどうか検討する。

3 モデル

回轉變動錯視の動的な状況においての知覚効果は、静止している状態の知覚効果に比べ顕著なので、本論文では動的な要因に焦点をあてる。従って、運動情報だけに焦点をあててモデルを作成した。

作成したモデルは二段階から構成されている。第一段階では、局所的な運動情報を運動検出細胞によって検出する。第二段階では、運動検出細胞によって検出された局所的運動情報を図形全体で統合する。

まず、3.1 節でmotion energy modelの紹介をし、筆者が作成したモデルの第一段階で用いている局所的運動情報検出メカニズムを説明する。そして3.2.2節で、伸縮、偏心、変形それぞれに着目した統合方法を記述する。

3.1 motion energy model

視覚情報は網膜から視神経を通して、視床という脳の部位にある外側膝状体と呼ばれる領域に、まず伝えられる。ここで、情報はシナプスを介し、外側膝状体のニューロンによって一度中継され、大脳の最初の視覚領域である 1 次視覚野 (V1 野) に伝えられる。V1 野は、脳の後頭部に位置する部位であり、この部位には局所的運動を検出する運動情報検出細胞と呼ばれる細胞が存在している。

この運動情報検出細胞のモデルの一つにAdelson & Bergenが提唱したmotion energy model^[3]がある。このモデルは、V1 野の心理物理学的知見を考慮した時空間特性をもつ受容野(フィルター)に時空間画像を通すことによって運動方向と強さを検出する。近年の研究によって、モデルの生理学的妥当性は、おおよそ支持されている^{[4], [5]}。

以下では、1次元空間の場合を考えて説明する。

3.1.1 運動検出細胞の時空間特性をもつフィルターの作成方法

motion energy model は、まず separable response とされる空間特性と時間特性を別々の関数で表せる時空間フィルターから構成されている。

空間的特性を表す関数には、ガウス関数の 2 回微分と 3 回微分の関数を用い

ている¹(Eq. 3.2, 3.3)。

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

$$Gdx2 = \frac{d^2G}{dx^2} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(e^{-\frac{x^2}{2}} \right) \cdot (1-x^2) \quad (3.2)$$

$$Gdx3 = \frac{d^3G}{dx^3} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(e^{-\frac{x^2}{2}} \right) \cdot x \cdot (3-x^2) \quad (3.3)$$

また、時間特性の関数には、以下の式を用いている (Eq 3.4)。

$$f(t) = (kt)^n \exp(-kt) \left[\frac{1}{n!} - \frac{(kt)^2}{(n+2)!} \right] \quad (3.4)$$

ここで、 $n=2, 3$ である²。

次に、空間特性に時間特性の関数で重みづけをして、時空間フィルターを作成する。ここで、前述したとおり、空間特性と時間特性にはそれぞれ 2 つの関数があるので、全部で 4 通りの時空間フィルターができる (Fig. 3.1)。

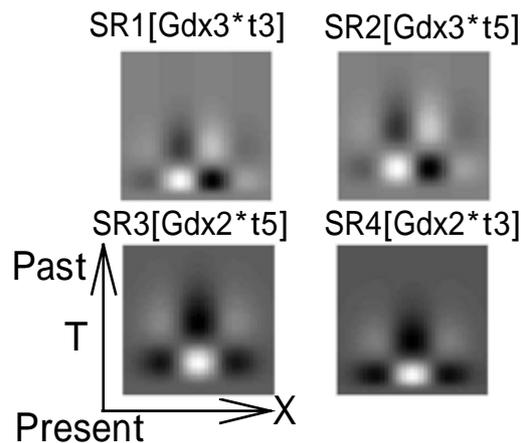


Figure 3.1 4つの時空間フィルター

¹ 本稿では、ガウス関数の 2 回微分形を Gdx2 とし、3 回微分形を Gdx3 としそれぞれを表す。ガウス関数は Eq3.1 で表せるが、本論文では、 $\sigma=1$ のときを用いている。

² 本稿では、時間特性の関数を $n=2, 3$ を基に t_2, t_3 として表す。

Fig. 3.1 について、SR1[Gdx3*t3]という表記は、ガウス関数の3回微分形を空間特性の関数として、また Eq. 3.4 の $n=3$ の場合を時間特性の関数として時空間フィルターを作成したという意味である。

また、これらの時空間フィルターを足し引きすることによって、運動検出細胞の時空間特性を考慮した受容野特性をもつフィルター(本稿ではSTとして表している³)を作ることができる(Fig. 3.5)。

これらの時空間フィルターは、

$$\begin{aligned} ST1 &= SR1 + SR3, & ST2 &= -SR2 + SR4 \\ ST3 &= -SR1 + SR3, & ST4 &= SR2 + SR4 \end{aligned} \quad (3.5)$$

と表される。

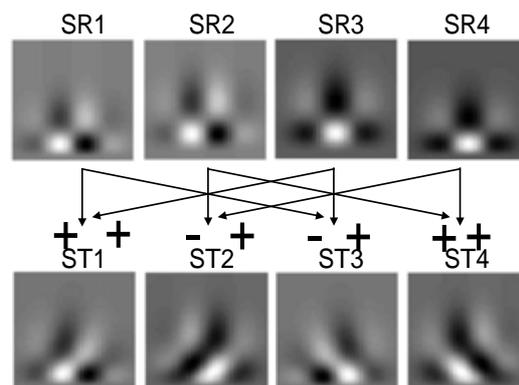


Figure 3.2 運動検出細胞の受容野特性をもつフィルター

3.1.2 なぜ motion energy model は運動を検出できるのか？

3-1-1 節で説明した、時空間フィルターと視覚刺激を畳込み積分(convolution)することによって運動を検出することができる。本節では、なぜ motion energy model が運動を検出できるのかを説明する。

3-1-1 節で説明した時空間フィルターの $ST1$, $ST2$ は左の方へ動く視覚刺激によく反応し、 $ST3$, $ST4$ は右の方へ動く視覚刺激によく反応する。

まず、 $ST1$ の受容野特性を簡略化して考えると、Fig. 3.3 の右側のようになる。この図では、時間軸(T軸)の方向を現在(Present)から過去(Past)の方向にとってある。

³ Spatio-Temporal FilterのSとTをとりSTと呼ぶことにした。

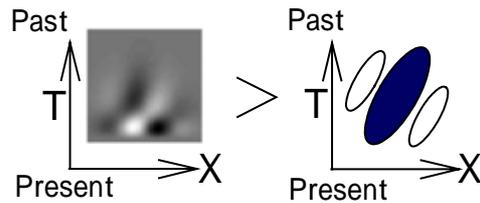


Figure 3.3 時空間フィルターの簡略化

現在から過去までの間でのある 3 つの時刻に着目すると、それぞれの時刻で最も出力値が大きい視覚刺激は以下ようになる (Fig. 3.4 の Snapshot Past1, Past2, Present)。この Snapshot をみてみると、過去に右側にあった黒い棒が移動して、現在においては左側に移っていると考えることができ、ST1 のような受容野特性をもつ運動検出細胞は右から左側へ移動する棒を視覚刺激として与えてやると出力が最も大きくなることがわかる。

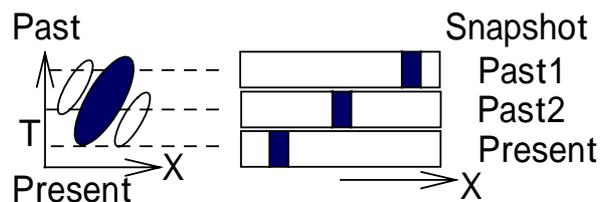


Figure 3.4 それぞれの時刻で最適な視覚刺激

また、ST2 についてだが、ST1 とおなじ左側に移動する視覚刺激を検出する受容野特性となっている。しかしながら、ST1 とは空間特性の位相が違う。

ST3, ST4 についても ST1, ST2 と同様の議論が成り立つ。

つぎに、右側へ運動する視覚刺激のエネルギー (rightward energy) と左側の運動する視覚刺激のエネルギー (leftward energy) を計算するわけであるが、それらは、右側と左側それぞれの時空間フィルターを 2 乗して足し合わせることで得られる (Eq. 3.6)。

この操作によって、時空間フィルターがもつ空間上の位相特性によらない運動を検出することができる。

$$\begin{aligned} \text{rightward energy} &= ST3^2 + ST4^2 \\ \text{leftward energy} &= ST1^2 + ST2^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

そして、右側へ運動する視覚刺激に対応するエネルギーをプラス、左側へ運

動する視覚刺激に対応するエネルギーをマイナスとし、最終的なエネルギーモデルの出力(opponent energy)を計算する。

以下に、最終的なエネルギーモデルの出力を計算する過程の概要を示した(Fig. 3.5)。

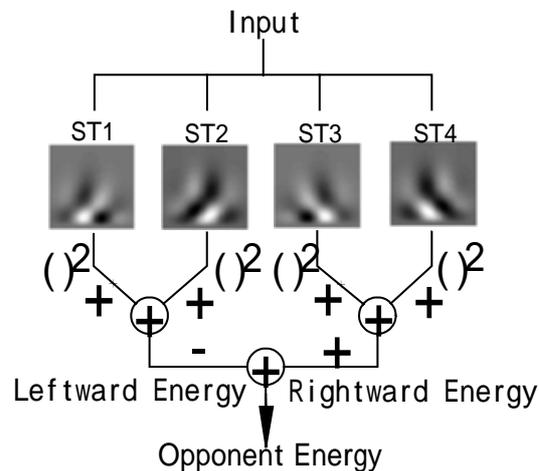


Figure 3.5 エネルギーモデルの概要

3.2 作成したモデル

ここでは、本論文の数値実験で用いたモデルを説明する。

まず、3.2.1 節では、作成したモデルの第一段階にあたる局所的運動情報を検出する部分を説明する。局所的運動検出機構については、3.1 節で説明した Adelson and Bergen のエネルギーモデルを基にして作った。そして3.2.2 節では、モデルの第二段階にあたる第一段階で出力された局所的運動情報を図形全体で統合する方法について述べる。

3.2.1 局所的運動情報検出部分

局所的な運動情報を検出する細胞の空間特性として V1 野で見られる Gabor 関数を受容野に採用した。時空間特性は、左方向、右方向のエネルギーを抽出可能なものにした。本稿で用いた 4 つの時空間フィルターを示す(Fig. 3.6)。

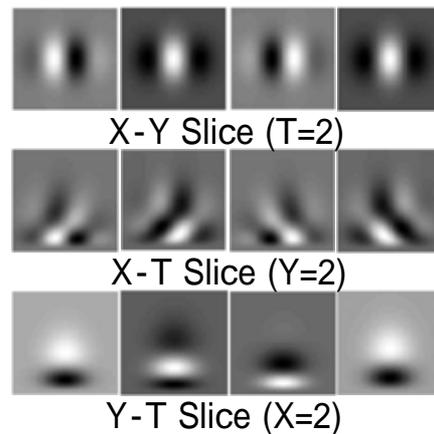


Figure 3.6 モデルで用いた運動検出細胞の受容野

また、これらの運動検出細胞の出力は以下の式で計算した。

$$R_i(x, y, t) = ST_i * I$$

$$= \iiint ST_i(\xi, \eta, \tau) I(x - \xi, y - \eta, t - \tau) d\xi d\eta d\tau \quad (3.7)$$

$$i = 1 \sim 4$$

ここで、“ ST_i ” は時空間フィルターの受容野特性であり、“ I ” は作成したモデルに入力する視覚刺激である。また、“ R ” は時空間フィルターの応答を表している。

Fig.3.6 で紹介した特性をもつ受容野は視覚刺激の垂直成分の運動を検出するものであるが、同じ特性の受容野を持つ細胞を、 $0 \sim 170[\text{deg}]$ まで $10[\text{deg}]$ ごとに18方向を用意した(例を Fig. 3.7 に示す)。

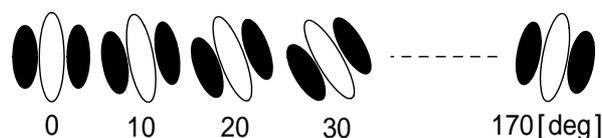


Figure 3.7 $ST_i(i=2,4)$ の受容野群

作成したモデルでは、18方向について opponent energy を求め、これらにそれぞれの運動の方位を重み付けして加算し、視野上の任意の一点(x_1, y_1)に対する一つの運動情報とした(Eq. 3.8)。同様の構造が視野上に、水平方向、垂直方向ごとに10ピクセルごとに並んでいる。

$$S(x1, y1) = \begin{pmatrix} S_x^{(x1, y1)} \\ S_y^{(x1, y1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i O_i^{(x1, y1)} \cdot \cos \theta_i \\ \sum_i O_i^{(x1, y1)} \cdot \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

ここで、“ $S(x1, y1)$ ”は視野上の点 $(x1, y1)$ において検出された局所的運動情報
を表している。また“ $O_i^{(x1, y1)}$ ”は θ_i [deg]傾いた運動を検出するフィルターから
計算された opponent energy、“ i ”はフィルターの番号($i=1\sim 18$)を表している。

3.2.2 運動情報統合部分

第二段階では、回轉變動錯視の特徴を考えて、三種類の空間的な統合方法を
用意した。作成したモデルでは、あらかじめ回転する正多角形の回転中心の位
置は既知であるとしている。

まず、図形の伸縮・回転度合いを計算するためにそれぞれの点で計算された
運動情報を、伸縮成分と回転成分に成分分解した。伸縮成分とは、回転中心を
原点とする極座標の動径方向の成分であり、図形全体の伸縮度合いを表す量と
して計算した（ここで足し合わせる A_p とは動径方向の大きさのみであり、動径
の向きは考えていない）。また、回転成分とは伸縮成分に対する直角な方向の成
分である。これらの量を視野全体で足し合わせて、 A_p と A_ϕ という量にした。

A_p が正であることは回転している多角形が拡大していることを示している。
 A_p が0であることは回転している多角形が拡大・縮小することがない状態であり、
 A_p が負であることは伸縮していることを示す。また、 A_ϕ とは多角形の回転速度
の度合いを示す量であり、半時計回りの方向を正となるように軸をとっている。

$$\begin{aligned} A_p &= \sum_{x,y} A_p^{(x1, y1)} \\ A_\phi &= \sum_{x,y} A_\phi^{(x1, y1)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

次に、回転図形の偏心率度合いを表す量を計算するために、各点で検出された
運動情報を水平成分 V_x と垂直成分 V_y に成分分解して、視野全体で足し合わせた。

$$\begin{aligned} V_x &= \sum_{x,y} V_x^{(x1,y1)} \\ V_y &= \sum_{x,y} V_y^{(x1,y1)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

最後に、変形の度合いを表す変形量の計算をした。

運動情報が検出される場所は目に見える部分、すなわち円形の窓の領域のみである。また、円形の窓が対称な並び方をしている場合には、変形や伸縮がつよく、非対称な並び方をしている場合には、変形ではなく偏心をしていると考え、円形の窓の対称性に着目した。

さらに、変形度合いは軸を仮定しないと計算できないと考えたので、4つの軸を仮定した。(Fig. 3.8 (a), (b))。

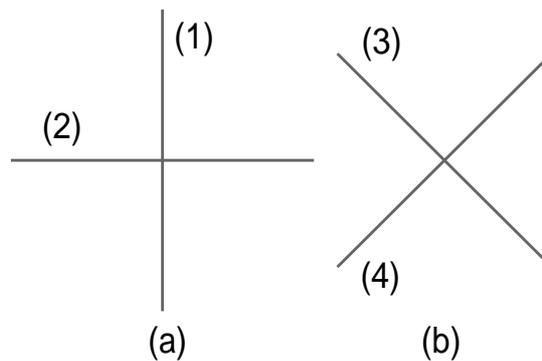


Figure 3.8 変形量を計算するために設定した軸

そして変形はこの4つの軸の伸縮度合いの比によって表されると考え、円領域ごとに $Ap(x,y)$ の総和をとり、円ごとの伸縮度合いの特徴量 Api とした。

$$\begin{pmatrix} Ap_{x,i}(xc_i, yc_i) \\ Ap_{y,i}(xc_i, yc_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i \in x,y} Ap_x(x, y) \\ \sum_{i \in x,y} Ap_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$Api = \sqrt{Ap_{x,i}(xc_i, yc_i)^2 + Ap_{y,i}(xc_i, yc_i)^2} \quad (3.12)$$

ここで、 (xc_i, yc_i) は円 i の中心の座標を表している。

次に、 Api を円 i の中心座標の偏角方向の値に対する \cos 、 \sin 関数で重み付けした。計算結果は、円の数と同数の項が出てくるが、これらを正負ごとに足し

合わせた(Eq. 3.13-14)。

$$\begin{pmatrix} C^+ \\ C^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i^+ Ap_i * \cos(2 * \phi_i) \\ \sum_i^- Ap_i * \cos(2 * \phi_i) \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{pmatrix} S^+ \\ S^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i^+ Ap_i * \sin(2 * \phi_i) \\ \sum_i^- Ap_i * \sin(2 * \phi_i) \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

ここで、 \sum^+ とはその中の項の正の値の項だけを加算するオペレータであり、 \sum^- も同様である。また、 $\phi_i = \tan(y c_i / x c_i)$ である。

三角関数を用いた理由は3つある。

1つは、設定した4つの軸から偏角方向へのずれが大きいほど変形量に影響を与える度合いが小さくなるようにFig.3.9(e)、(f)のように場を設定したかったことである。二つ目は、軸(1)と(2)の境界が偏角方向の調度半分になるようにしたかったからである。三つ目は、円の位置の動径方向は一定であるので動径方向は変化しない場にしたかったことである。結果的に \cos^2 、 \sin^2 という関数になった(は回転中心を原点とする偏角成分)。

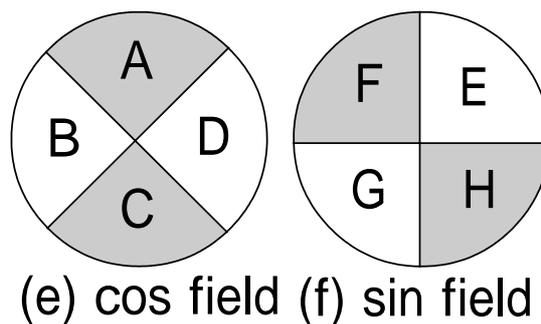


Figure 3.9 cos場とsin場

Fig. 3.9中のA,B,...Gは $C^+ = B+D$ 、 $C^- = A+C$ 、 $S^+ = E+G$ 、 $S^- = F+H$ となっている。また、灰色の部分が負の重み付けをする領域であり、白い部分が正の重み付けをする領域である。

そして以下の式により変形の度合いを示す量 dis を計算した。

$$dis = \left(\underbrace{\frac{|C^-|}{|C^+|}}_{\text{第一項}} + \underbrace{\frac{|C^+|}{|C^-|}}_{\text{第二項}} \right)^2 + \left(\underbrace{\frac{|S^-|}{|S^+|}}_{\text{第三項}} + \underbrace{\frac{|S^+|}{|S^-|}}_{\text{第四項}} \right)^2 \quad (3.15)$$

第一項は軸(2)に対する軸(1)の伸縮度合いの比であり、この項が大きいと軸(1)の方向に伸縮していることになる(Fig.3.8軸(1)~(2))。同様に第二項は軸(2)の伸縮度合いであり第三項は軸(3)の方向、第四項は軸(4)の方向の伸縮度合いである。またそれぞれを二乗して足し合わせている理由は、 \cos 、 \sin 関数は互いに位相が半周期分ずれており、これらで重み付けした量を最終的に二乗和することにより、変形度合いについてのエネルギーのような量がとりだせると考えたからである。

4 数値実験

4.1 数値実験環境

この節では、シミュレーション実験を行った時の様々のパラメータを列挙し説明する。

まず、視覚刺激について記述する。Fig. 4.1 において、円状の窓の直径は 201[*pixel*]と設定した。また回転する正方形の大きさは一辺が 301[*pixel*]にした。正方形の回転中心から円形の窓の中心までの距離は、301[*pixel*]である。また、円状の窓間の距離は 99[*pixel*]とした。正方形の大きさ、正方形の回転中心から円形の窓の中心までの距離は、伸縮型、偏心型において同じである。変形型については、伸縮型と同様の遮蔽板を通して、一辺が 303[*pixel*]の正六角形を回転させた。運動検出細胞受容野の空間における大きさは一辺が 35[*pixel*]の正方形としており、これを視野角 0.9[*deg*]と対応させた⁶。よって、正方形の一辺の長さは 7.7[*deg*]、六角形の一辺の長さは 7.8[*deg*]となる。

運動検出細胞における受容野の空間上サイズの半分(17 *pixel*)を視覚刺激の四隅に余分に設定してあるので、視覚刺激全体のサイズは正方形であり、一辺が 535[*pixel*]の大きさをもつ。

また、運動検出細胞受容野の時間方向の大きさ 48[*frame*]を、300[*ms*]としている⁴ので、1[*frame*]あたり 6.25[*ms*]に対応している。回転変動錯視の速度は、1[*frame*]あたり 0.25[*deg*]回転する視覚刺激を用いているので、3[*second*]あたりに回転図形が 120[*deg*]回転する。よって、数値実験で用いた多角形の回転速度は 40[*deg/sec*]となる。

回転変動錯視において正多角形が回転する方向は、時計回りの方向であるが、これを動径方向において正とした。以下 4.2 節の実験結果では、結果のグラフで、横軸 Time(Orientation)が -90 ~ 0[*deg*]になっているが、これは時計回りに正多角形が回転していることを示している。

以下の Table.1 に数値実験のパラメータをまとめた。

⁴ 時間フィルターが 300[*ms*]という値は、ネコを使った実験により得られた数値であるが、人間では対応するデータがないのでネコについての数値を用いた。

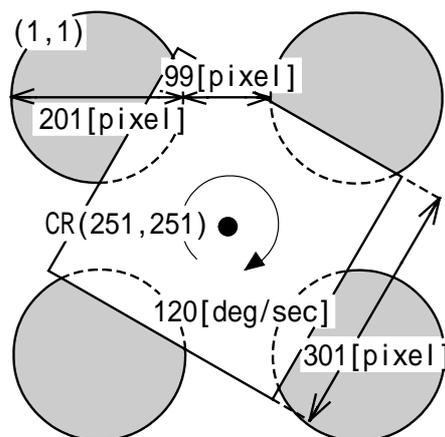


Figure 4.1 伸縮型回転変動錯視における円の配置と正方形の大きさ

Table. 1 数値実験のパラメータ

(a) 視覚刺激のパラメータ		
1.空間上のパラメータ	pixel	deg
正方形の一辺の長さ	301	7.7
正六角形の一辺の長さ	303	7.8
円形の窓の直径	201	5.2
図形全体の大きさ	535	13.7
円形の窓から回転中心までの距離	301	7.7
2. 時間方向のパラメータ	frame	deg/sec
1frame あたりの回転速度	1	0.25
正多角形の回転速度	480	40
(b) 作成したモデルのパラメータ		
運動検出細胞の空間的な大きさ	35[pixel]	0.9[deg]
運動検出細胞間の距離	10[pixel]	0.3[deg]
運動検出細胞の時間方向の大きさ	48[frame]	300[ms]
視野上の一点における運動検出細胞数	18	

4.2 実験結果

ここでは、二章で紹介した様々な回轉變動錯視を入力としてモデルに与え、その出力がヒトの知覚と定性的に一致するか否かを検討する。構成としては、伸縮型、偏心型（順偏心型、逆偏心型）、変形型にわけて、記述してある。

4.2.1 伸縮型回轉變動錯視の結果

基本型について：

モデルの出力の時間変化を Fig. 4.2.1(1)-(3)に示す。

(1)は V_x, V_y の時間変化を示している。常に0となっており、このことは、正方形が偏心しないことを意味する。このことは以下のタイプでも同様の結果が得られた。

また、(2)は A_p, A の時間変化のグラフである。この波形をみると周期的に変化している事が分かる。詳しく見ると、最大値は-24[deg]のときであり、最小値は-59[deg]の時である。ゼロ点は-85[deg]と-41[deg]の時である。-85[deg]の時には、 A_p が正から負へ、つまり拡大から縮小へ変わる時であり、正方形の大きさが最大となる。逆に、-41[deg]の時には、 A_p が負から正へ変わり、正方形の大きさが最小となることを意味している。これは、二章で述べた心理学実験の結果と一致している。

最後に、(3)は変形量の時間変化である。変形量は一定であり、正方形が変形しないことを意味している。以下のタイプでも同様に一定であった。

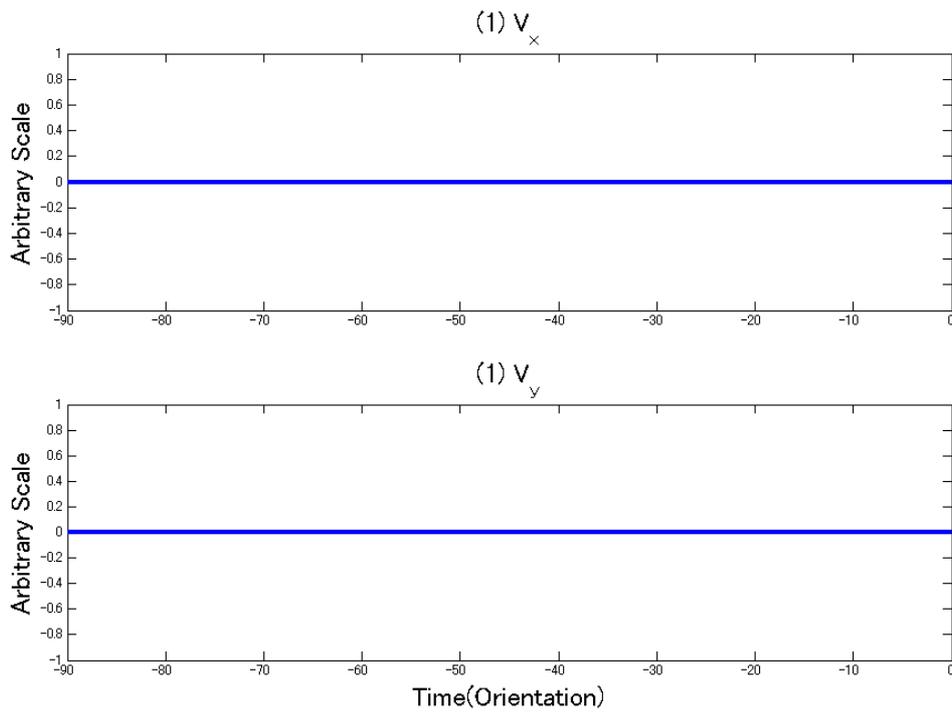


Figure 4.2.1(1) : 伸縮型回転変動錯視のシミュレーション結果(偏心率)

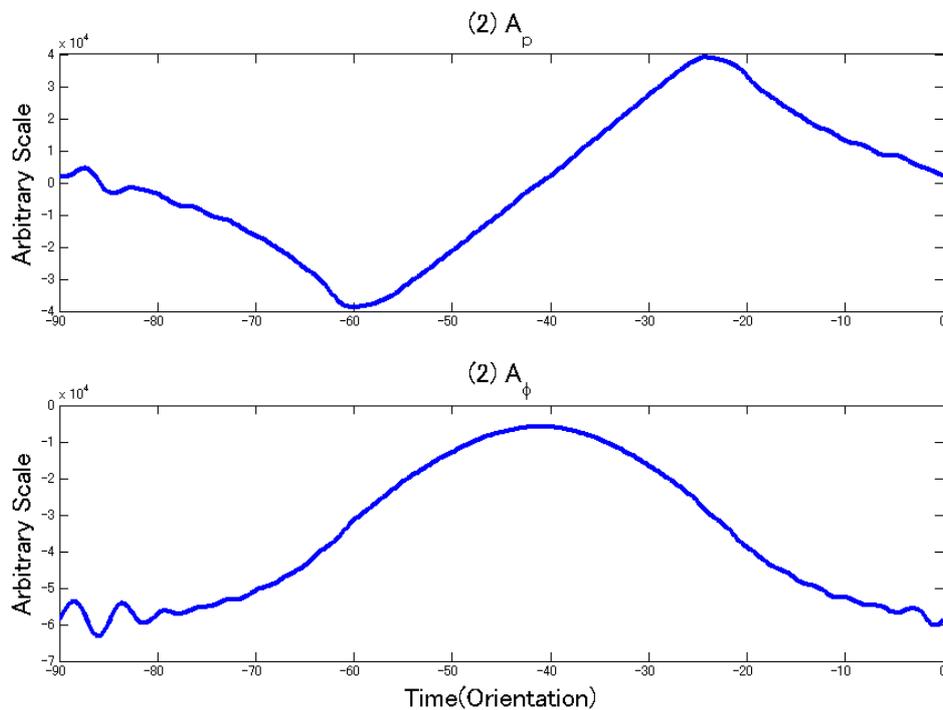


Figure 4.2.1(2) : 伸縮型回転変動錯視のシミュレーション結果(伸縮量)

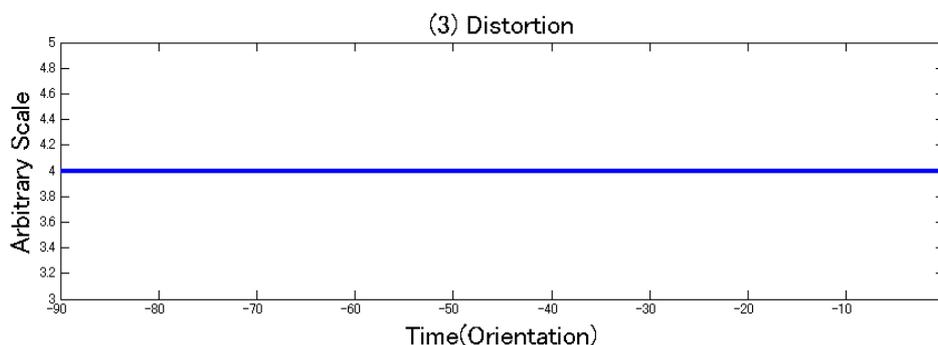


Figure 4.2.1(3) : 伸縮型回転変動錯視のシミュレーション結果(変形量)

様々な伸縮型 :

以下では、様々な正方形を用いた実験の結果を紹介するが、 V_x, V_y と変形量は基本型と変わらない結果となった。よって伸縮型の特徴を表す伸縮量 A_p の時間変化のみを載せ、これによって議論することにした。

まず、正方形を塗り潰さずに枠だけ描いたものを回転させ、実験した。結果、基本型とほぼ同じような A_p の出力が得られた。ヒトの知覚(2.4 節(1)で述べた)とも一致している結果であった(Fig. 4.2.2(1))。

次に、正方形の角を丸めて回転させた。全体的には周期性はあるが、最大値 -21.75、最小値 -58.75 付近の変化が緩やかである。これは、拡大・縮小する際の変化が緩やかであることを意味しており、ヒトの知覚(2.4 節(2)で述べた)とも一致している(Fig. 4.2.2(2))。

正方形に釘を刺して回転させた場合は、釘の長さ、正方形の一辺あたりに打つ釘の本数により、異なる結果が得られた。

最初に、短い釘を一辺あたり四本打った正方形を回転させた。結果、全体的には、基本型と同じような周期性は見られた。また、最大値付近 (-70 から -50[deg])、最小値付近 (-30 から -10[deg]) の波形が多数の小さいピークから構成されている。これは拡大・縮小する際の変化が緩やかであるとともに、そのスピードが大きくなったり小さくなったりしていることを表している (Fig. 4.2.2(3))。これは、全体的にはヒトの知覚(2.4 節(3)で述べた)と一致している

結果である。

しかし、一辺当たり八本の釘を打った正方形の場合では、全体的には基本型とは異なる波形であり、ゼロ point も複数ある (Fig. 4.2.2(4))。この場合では、知覚(2.4 節(4)で述べた)とは一致しない結果となった。

また長い釘を一辺当たり 4 本打った正方形を回転させた場合については、中央の -45[deg] 付近に三角関数のような周期的なものが見られるが、全体的に不規則であった (Fig. 4.2.2(5))。これは知覚(2.4 節(5)で述べた)の結果とは不一致である。

八本打った場合には -42.75 のゼロ point で A_p が正から負に転じており、この時刻で正方形の大きさが最大になることを意味している (Fig. 4.2.2(6))。しかし知覚(2.4 節(6)で述べた)では -42 付近では正方形の大きさは最小になることがわかっており、これはヒトの知覚とは一致しない。

まとめると、正方形に釘を打った場合には、短い針を一辺当たり四本打った場合には、心理実験とほぼ同じ結果が得られるが、一辺当たりに打つ本数を増やすと、モデルの出力と心理実験の結果が不一致になり、また打つ釘の長さを長くしても不一致になることがわかった。

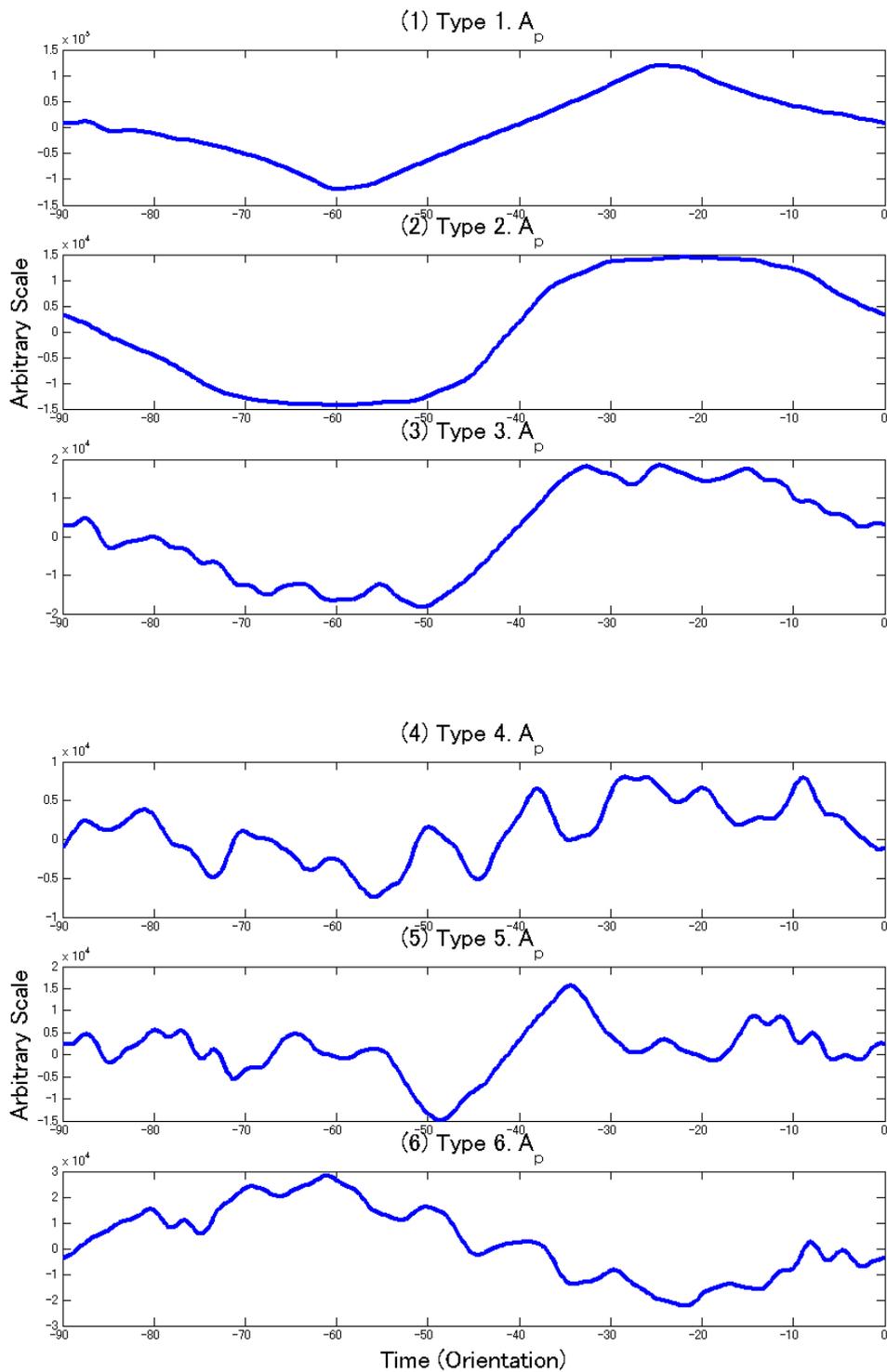


Figure 4.2.2 様々な伸縮型回転変動錯視のシミュレーション結果 (A_p の時間変化のグラフのみ掲載)

一方向の線分で構成された正方形(Fig. 2.11(7))を回転図形として用いた場合：モデルの出力結果を以下の Fig. 4.2.2.(7)-(1)～(3)に示す。ヒトの知覚に関しては、2.4節(7)で述べた。

この回転図形を用いた場合、図形全体の周期は 180[deg]である。

Fig. 4.2.2(7)-(1)は V_x 、 V_y の時間変化のグラフである。これをみると常に V_x, V_y が 0 になっている。つまり、偏心しないことを意味している。

Fig. 4.2.2(7)-(2)は A_p 、 A の時間変化のグラフである。 A_p のグラフを見ると、全体的に周期性があり、-150[deg]、-58[deg]では負から正に転じており、このとき回転する正方形の大きさが最小になることを意味している。また-98[deg]、-10[deg]では正から負に転じており、このとき回転する正方形の大きさが最大になることを意味している。

Fig. 4.2.2(7)-(3)は変形の度合いを示す量である変形量の時間変化のグラフである。このグラフを見ると、-98[deg]、-10[deg]で最大値をとっており、これらの時刻の前後で急激に変化している。これは-98[deg]、-10[deg]になるときに、著しく変形し、すぐにもとの形に戻ることを意味している。これは心理実験とは一致しない結果であった。

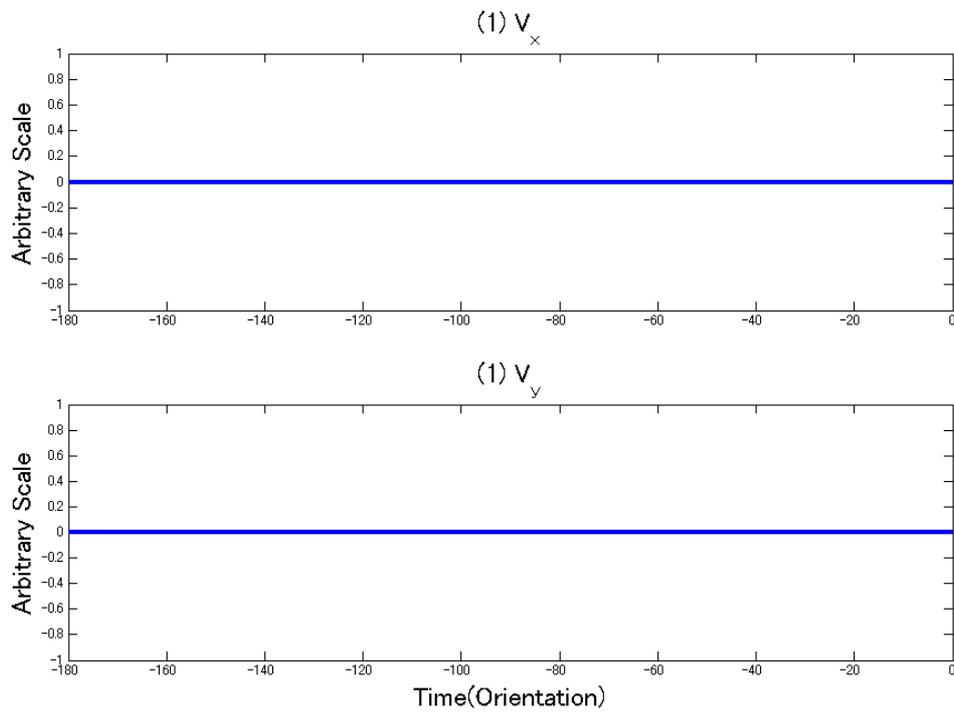


Figure 4.2.2(7)-(1) 一方向で構成された正方形を用いた伸縮型のシミュレーション結果（偏心率）

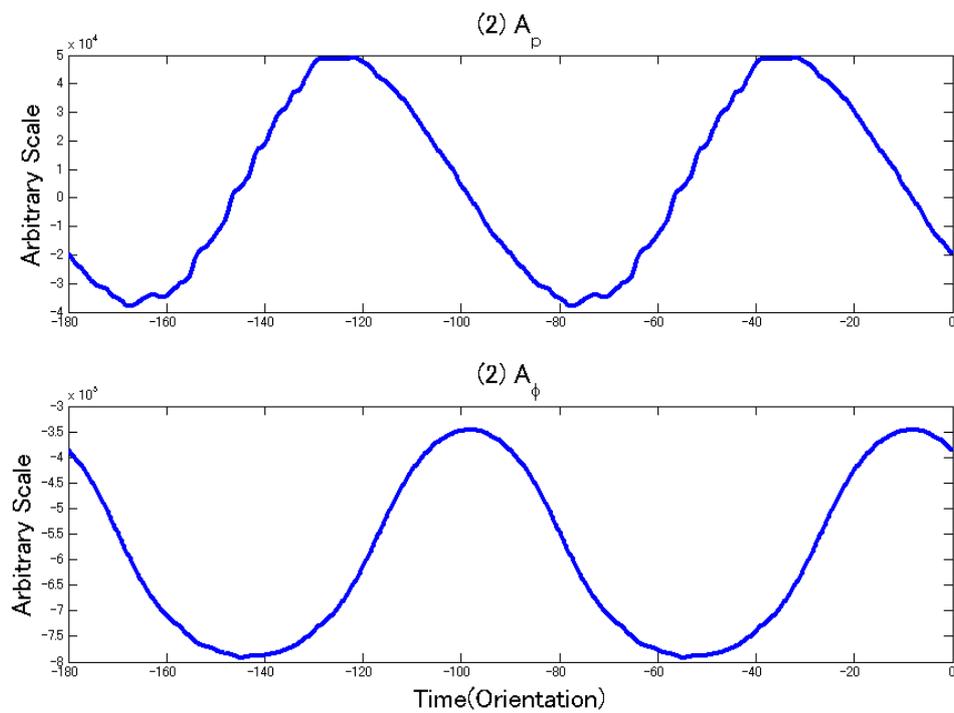


Fig. 4.2.2(7)-(2) 一方向で構成された正方形を用いた伸縮型のシミュレーション結果（伸縮量）

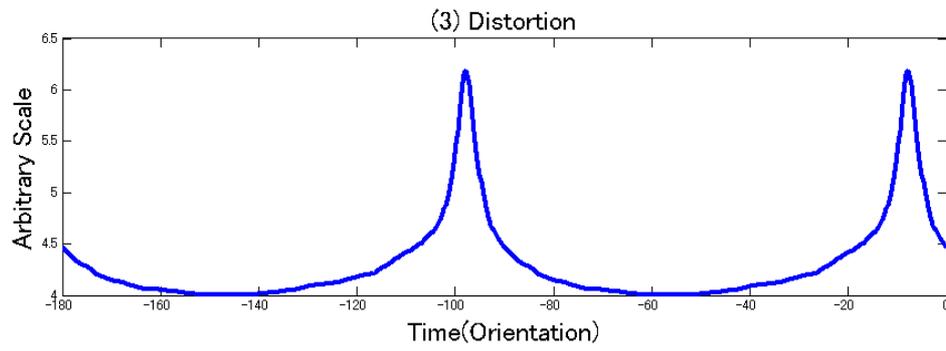


Figure 4.2.2(7)-(3) 一方向で構成された正方形を用いた伸縮型のシミュレーション結果(変形量)

4.2.2 偏心型回轉變動錯視の結果

4.2.2.1 順偏心型回轉變動錯視の結果

基本型について：

モデルの出力の時間変化を Fig. 4.2.3(1)-(3)に示す。

(1)は V_x, V_y の時間変化である。このグラフからでは偏心の仕方がわかりにくいため、それぞれ時間積分した値である $V_x I, V_y I$ をプロットしたもの(4)に示し、この軌跡が回転する正方形の重心が偏心する軌跡とした。大きい点は $-90[\text{deg}]$ を表しており、このポイントから軌跡がスタートしている。小さい点は $5[\text{deg}]$ とびの位置を表している。また小さい点の間の矢印は、その間、どちら向きに動いたかを表している。

この軌跡を見ると、時計回りになっている。時計回りに回転する正方形をシミュレーション実験の刺激として用いているので、順方向へ偏心しているといえる(Fig. 4,2,3(4))。

(2)は A_p, A_{phi} の時間変化を示したものである。全体的には周期性があり、図形全体が基に戻るまでの間隔、すなわち $-90 \sim 0[\text{deg}]$ の間に三つの周期がある (Fig. 4.2.3(2))。 A_p のグラフを詳しく見ると、 $-88[\text{deg}]$ 、 $-58[\text{deg}]$ 、 $-28[\text{deg}]$ のときに A_p は負から正へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが、最小になることを意味する。また $-72[\text{deg}]$ 、 $-42[\text{deg}]$ 、 $-12[\text{deg}]$ のときには、 A_p が正から負に転じているので、このときに回転する正方形の大きさが、最大になっていることを意味する。これはヒトの知覚(2.2.1節)とは一致しない結果である。

(3)は変形量の時間変化を示したものである(Fig. 4.2.3(3))。全体的に見ると、変形量の時間変化は不規則なものになっている。大きなピークが、 $-73[\text{deg}]$ 、 $-53[\text{deg}]$ 、 $-41[\text{deg}]$ 、 $-29[\text{deg}]$ 、 $-11[\text{deg}]$ にある。このときに、回転する正方形が著しく変形していることを意味しているが、これは心理実験(2.2.1節)とは一致しない結果である。

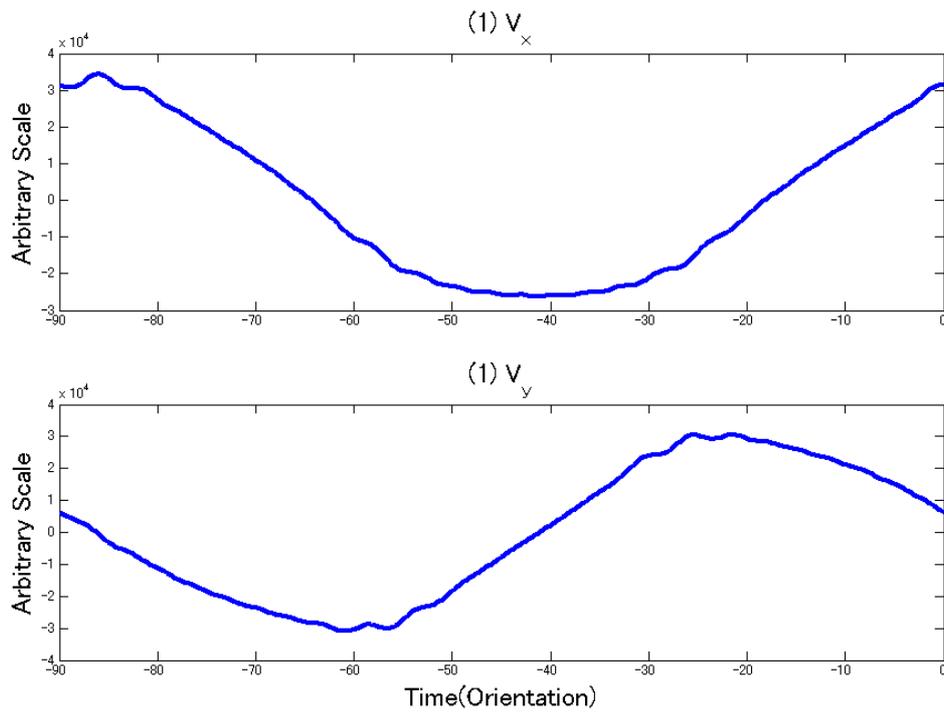


Figure 4.2.3(1) 順偏心型回転変動錯視のシミュレーション結果(偏心率)

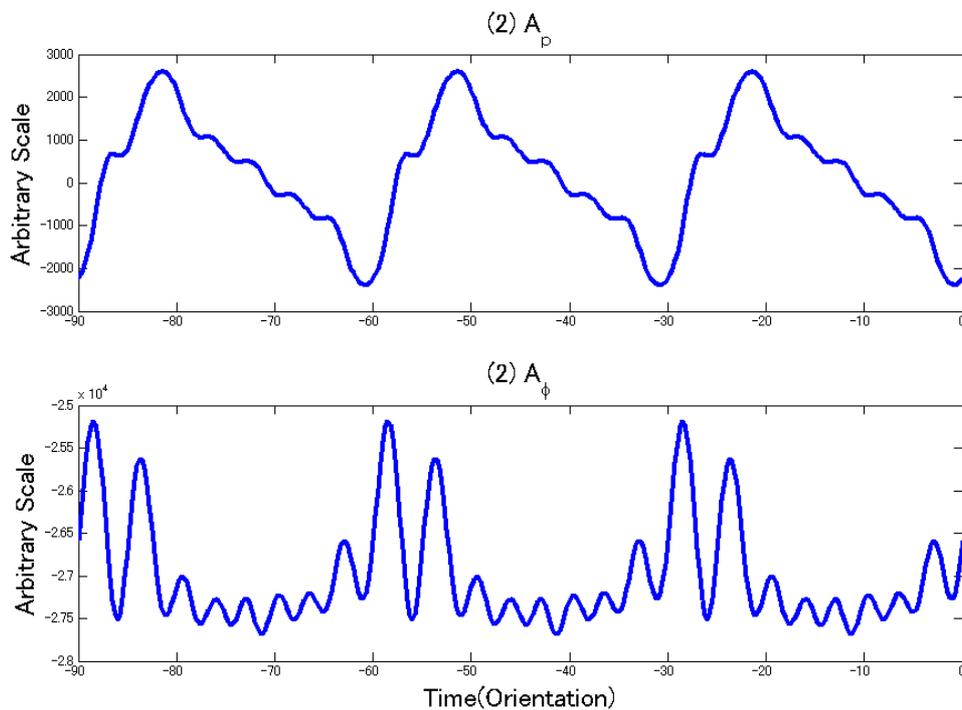


Figure 4.2.3(2) 順偏心型回転変動錯視のシミュレーション結果(伸縮量)

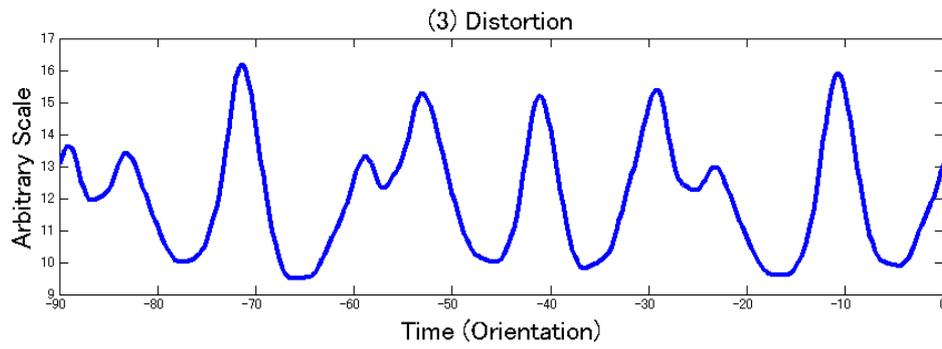


Figure 4.2.3(3) 順偏心型回転変動錯視のシミュレーション結果(変形量)

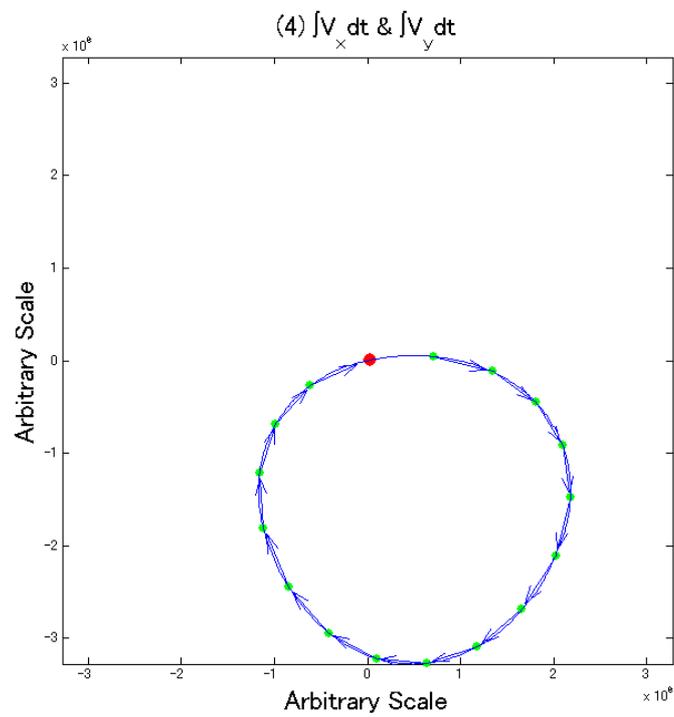


Figure 4.2.3(4) 順偏心型のシミュレーション結果(伸縮量を時間積分した軌跡)

様々な偏心率：

A_p, A_{phi} のグラフは $-90 \sim 0$ [deg] の間に三つの周期をもち、変形量も不規則な結果となっていることは基本型と同じであるので割愛した。ここでは、偏心の様子を示すグラフである $V_x I, V_y I$ の軌跡を基に議論した。

枠だけの正方形を回転させた場合の結果 (Fig. 4.2.4(1))、角を丸めた正方形を回転させた場合 (Fig. 4.2.4(2))、一辺当たり短い針を四本刺した正方形を用いた場合 (Fig. 4.2.4(3)) について、基本型とほぼ同じような偏心の軌跡となり、心理実験 (2.4 節(1) ~ (3)) とも一致している結果となった。

一辺当たり短い針を八本刺した正方形を用いた場合は、偏心の軌跡はほぼ正六角形となっており、基本型とは一致していない。ただし、時計回りに偏心しており、順方向に偏心していると言える。

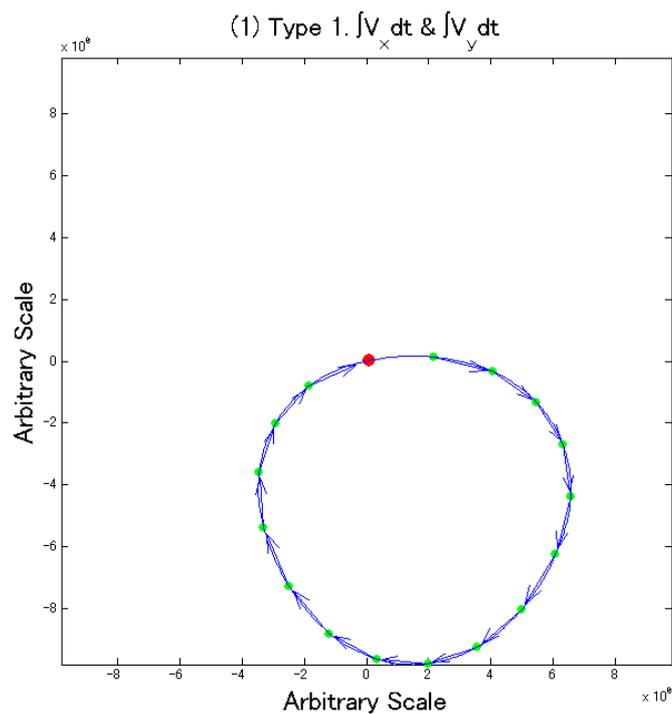


Figure 4.2.4(1) 順偏心率回転変動錯視 type. 1 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

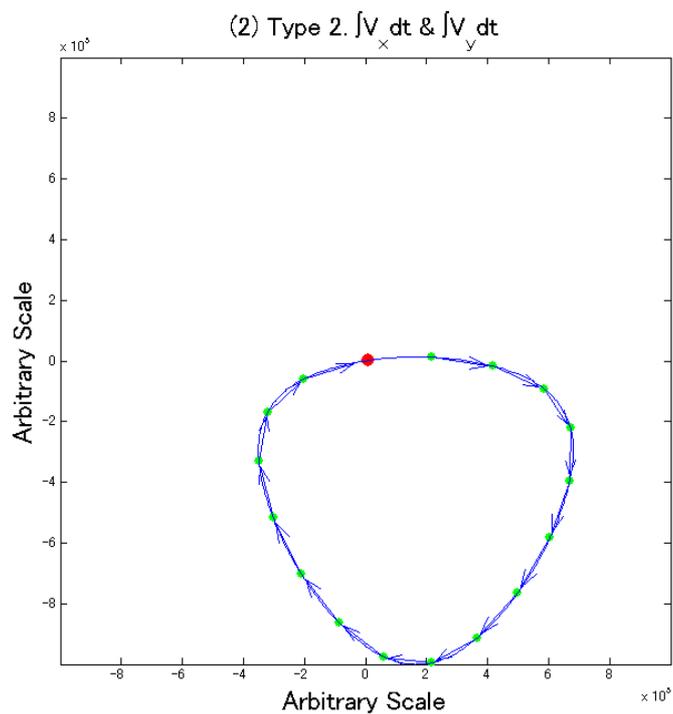


Figure 4.2.4(2) 順偏心率回転変動錯視 type. 2 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

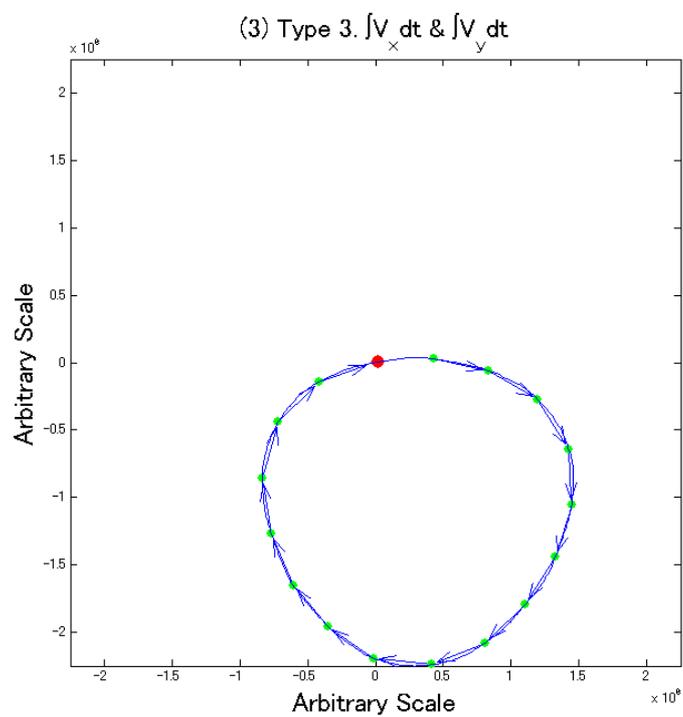


Figure 4.2.4(3) 順偏心率回転変動錯視 type. 3 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

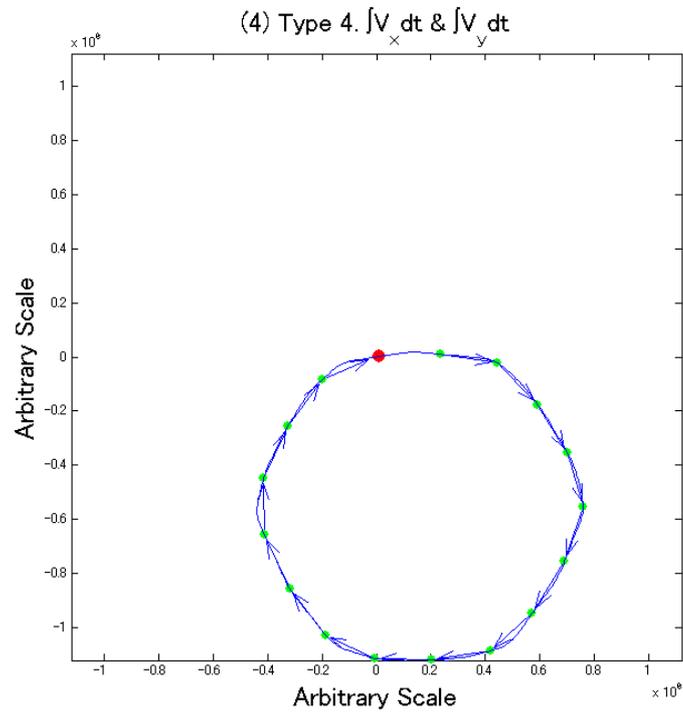


Figure 4.2.4(4) 順偏心率回転変動錯視 type. 4 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

一方向の直線で構成された正方形を回転図形として用いた場合：

モデルの出力結果を以下の Fig. 4.2.4.(5)-(1) ~ (4)に示す。

Fig. 4.2.4(5)-(1)は V_x, V_y の時間変化のグラフである。このグラフからでは偏心の仕方がわかりにくいため、それぞれ時間積分した値である $V_x I, V_y I$ をプロットしたものを Fig. 4.2.4(5)-(4)に示し、この軌跡が回転する正方形の重心が偏心する軌跡とした。大きい点は $-180[\text{deg}]$ を表しており、このポイントから軌跡がスタートしている。小さい点は $5[\text{deg}]$ とびの位置を表している。また小さい点の間の矢印は、その間、どちら向きに動いたかを表している。

この軌跡を見ると、約 $-180[\text{deg}]$ から $-120[\text{deg}]$ にかけては、右上に偏心していることがわかる。また約 $-120[\text{deg}]$ から $-60[\text{deg}]$ の間では、水平方向左に返信しており、約 $-60[\text{deg}]$ から $-0[\text{deg}]$ の間では、右下へ偏心して、 $-180[\text{deg}]$ のときの位置に戻っている。実際には、時計回りに偏心している知覚(2.4 節(7))が得られるので、この結果は不一致と言える(Fig. 4.2.4(5)-(4))。

(2)は A_p, A_{phi} の時間変化を示したものである。全体的には周期性があり、図形全体が基に戻るまでの間隔、すなわち $-180 \sim 0[\text{deg}]$ の間に三つの周期がある(Fig. 4.2.4(5)-(2))。 A_p のグラフを詳しく見ると、 $-160[\text{deg}]$ 、 $-100[\text{deg}]$ 、 $-40[\text{deg}]$ のときに A_p は負から正へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが、最小になることを意味する。また $-127[\text{deg}]$ 、 $-67[\text{deg}]$ 、 $-7[\text{deg}]$ のときには、 A_p が正から負に転じているので、このときに回転する正方形の大きさが、最大になっていることを意味する。これはヒトの知覚(2.4 節(7))とは一致しない結果である。

(3)は変形量の時間変化を示したものである(Fig. 4.2.4(5)-(3))。全体的に見ると、変形量の時間変化は不規則なものになっている。大きなピークが、 $-177[\text{deg}]$ 、 $-147[\text{deg}]$ 、 $-117[\text{deg}]$ 、 $-87[\text{deg}]$ 、 $-56[\text{deg}]$ 、 $-27[\text{deg}]$ にある。このときに、回転する正方形が著しく変形していることを意味しているが、これはヒトの知覚(2.4 節(7))とは一致しない結果である。

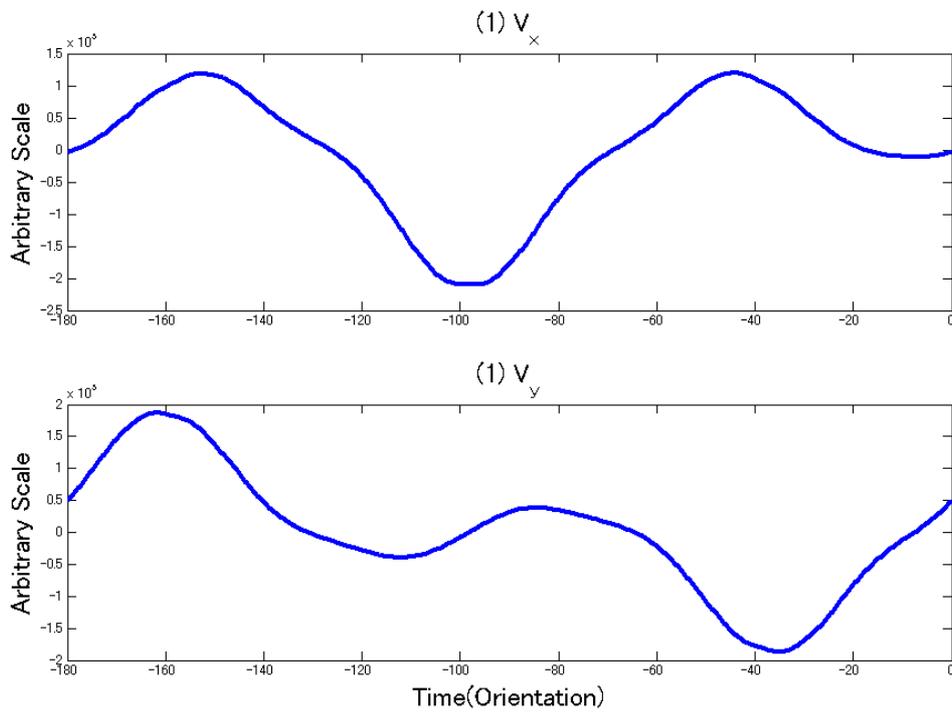


Figure 4.2.4(5)-(1) 一方向で構成された正方形を用いた順偏心型のシミュレーション結果 (偏心率)

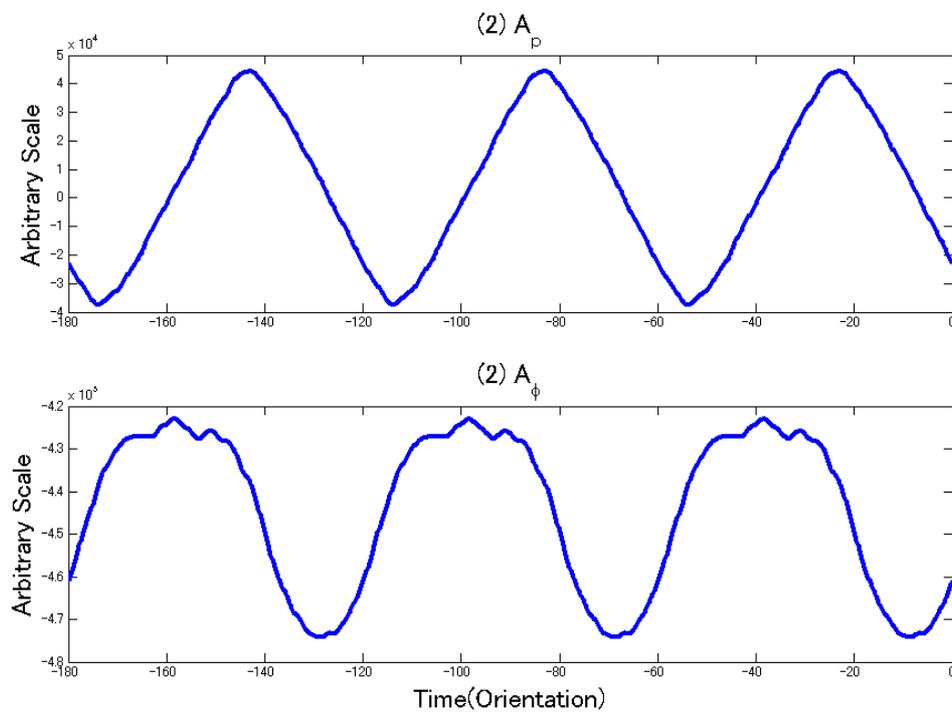


Figure 4.2.4(5)-(2) 一方向で構成された正方形を用いた順偏心型のシミュレーション結果 (伸縮量)

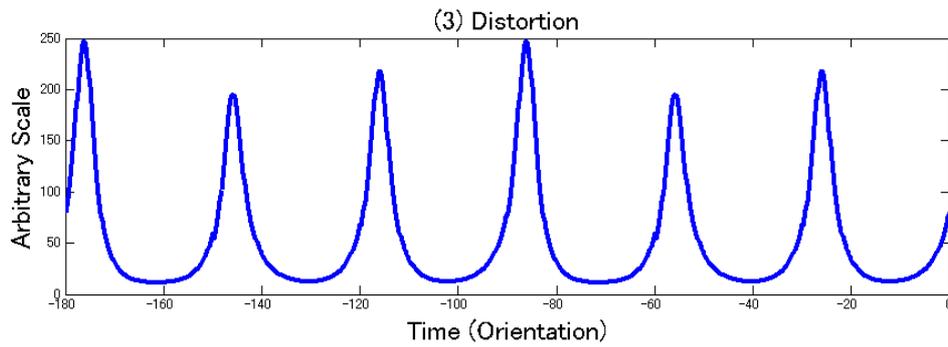


Figure 4.2.4(5)-(3) 一方向で構成された正方形を用いた順偏心型のシミュレーション結果 (変形量)

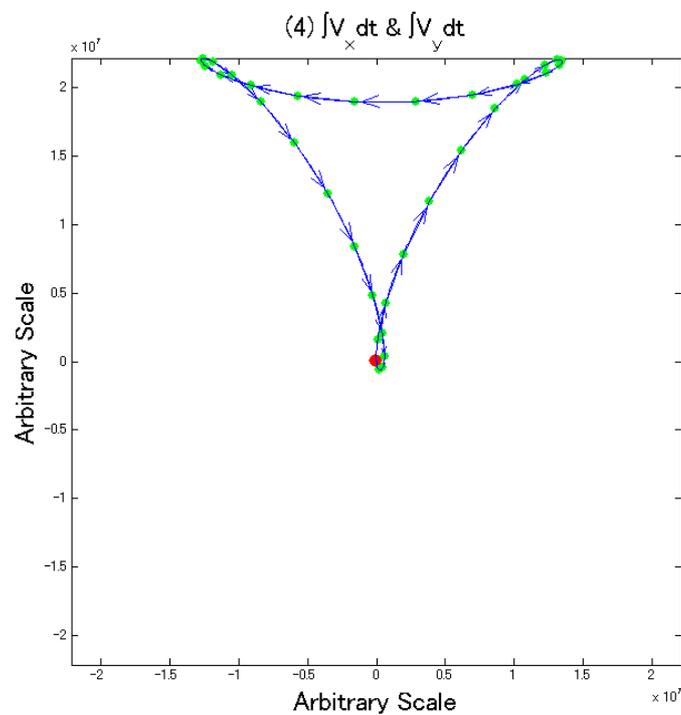


Figure 4.2.4(5)-(4) 一方向で構成された正方形を用いた順偏心型のシミュレーション結果 (伸縮量の時間積分した軌跡)

4.2.2.2 逆偏心型回轉變動錯視の結果

基本型について：

モデルの出力の時間変化を Fig. 4.2.5(1)-(3)に示す。

(1)は V_x 、 V_y の時間変化のグラフであるが、順偏心型と同様に時間積分した値をプロットしたものをを用いて議論した。偏心の軌跡は反時計回りになっている (Fig. 4.2.5(4))。

(2)は A_p 、 A_{phi} の時間変化である (Fig. 4.2.5(2))。全体的には周期性があり、図形全体が基に戻るまでの間隔、すなわち $-90 \sim 0$ [deg] の間に 5 つの周期がある (Fig. 4.2.5(2))。 A_p の時間変化について、 $-87 \sim -69$ [deg] までの 1 周期を見ると、 -86 [deg]、 -75 [deg] の時に A_p は正から負へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが最大になることを意味している。また、 -84.5 [deg]、 -71 [deg] のときには、 A_p は負から正へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが最小になることを意味している。これはヒトの知覚(2.2.2 節)とは一致しない結果であった。

(3)は変形量の時間変化である (Fig. 4.2.5(3))。このグラフを見ると、全体的には -89 [deg]、 -70 [deg]、 -52 [deg]、 -35 [deg]、 -18 [deg] に大きな値をとっており、この前後での変形量の変化は著しい。これは上述した時刻に瞬間的に大きな変形をしていることを意味しており、ヒトの知覚(2.2.2 節)とは一致しない結果である。

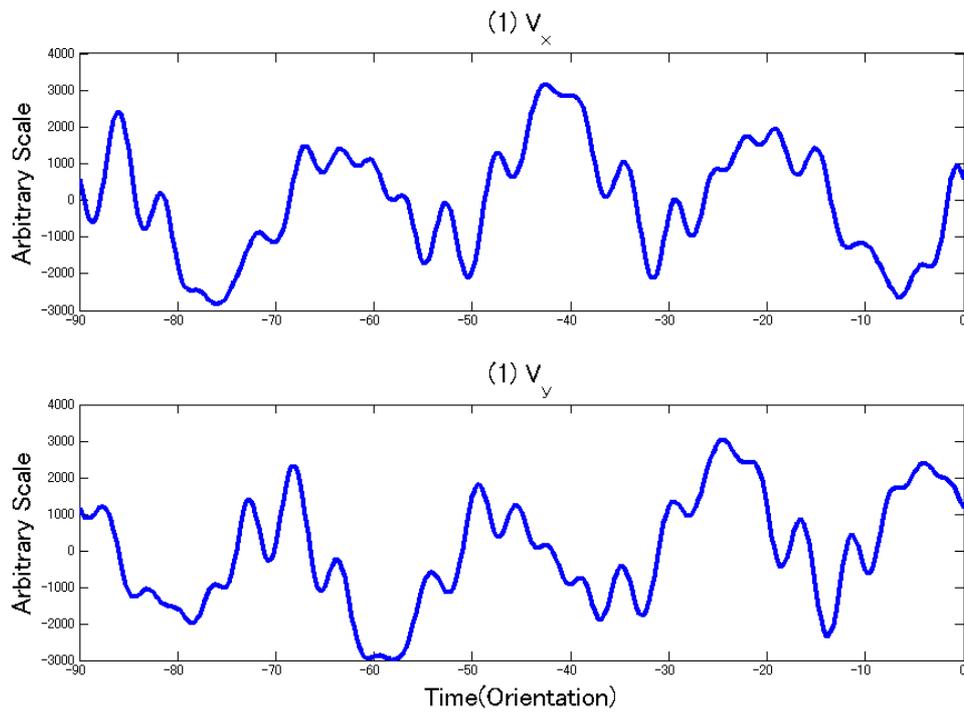


Figure 4.2.5(1) 逆偏心率回転変動錯視のシミュレーション結果(偏心率)

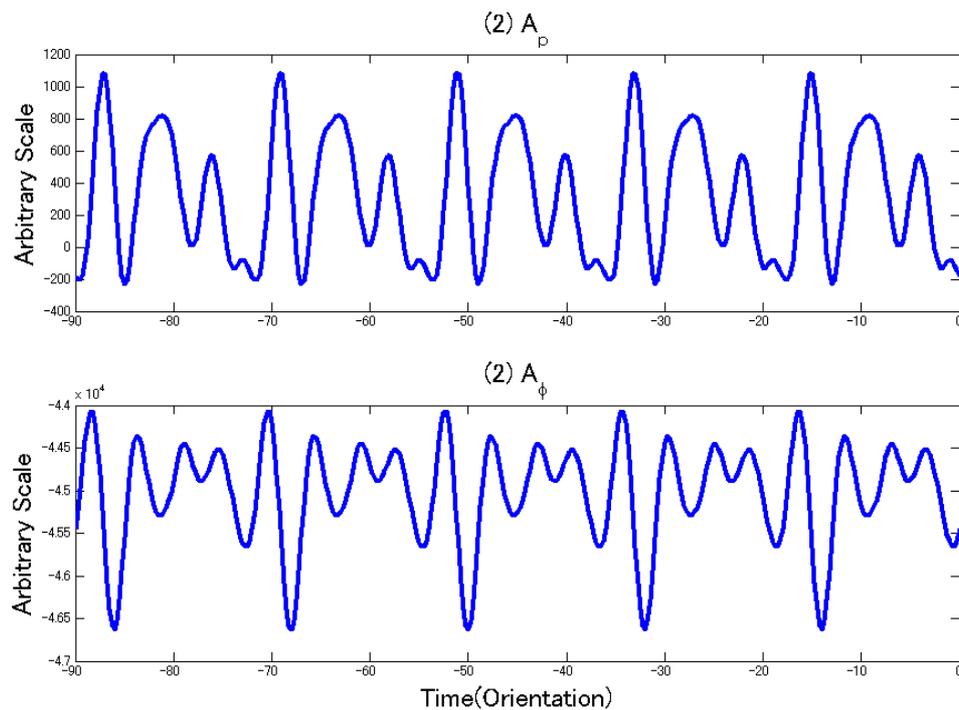


Figure 4.2.5(2) 逆偏心率回転変動錯視のシミュレーション結果(伸縮量)

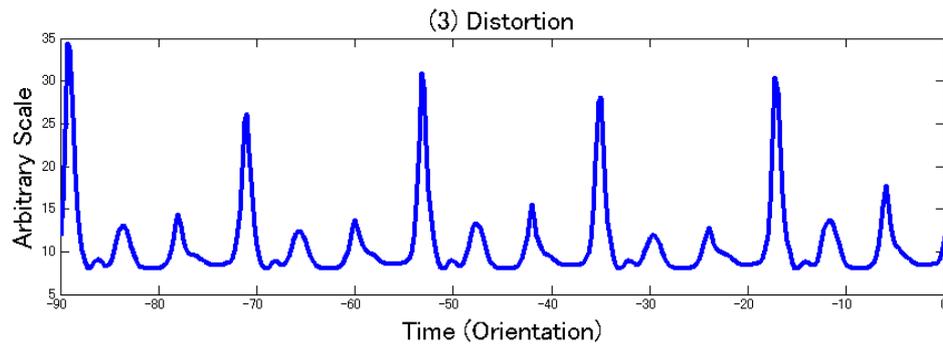


Figure 4.2.5(3) 逆偏心率回転変動錯視のシミュレーション結果(変形量)

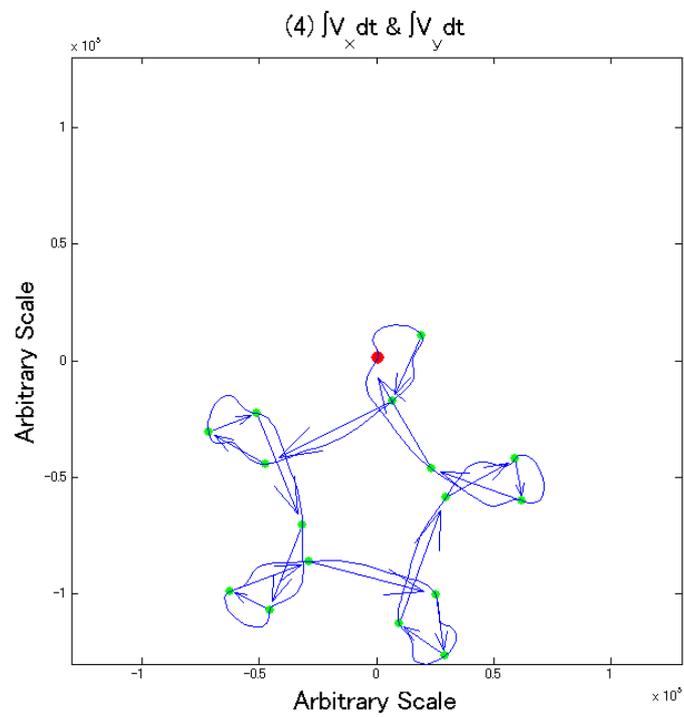


Figure 4.2.5(4) 逆偏心率のシミュレーション結果(伸縮量の時間積分した軌跡)

様々な逆偏心型：

順偏心型と同様に、偏心の様子を示すグラフである $V_x I$ 、 $V_y I$ の軌跡を基に議論した。枠だけの正方形を用いた場合 (Fig. 4.2.6(1))、角を丸めた正方形を用いた場合 (Fig. 4.2.6(2)) については反時計回りに偏心しているので知覚(2.4節(1)～(2))と一致している結果になった。しかし短い釘を一辺当たり四本打った正方形を用いた場合 (Fig. 4.2.6(3))、短い釘を一辺当たり八本打った正方形を用いた場合 (Fig. 4.2.6(4)) については、おおまかに見ると、まず $-90[\text{deg}]$ から水平方向に右に偏心する。すなわち、回転方向と同じ方向へ偏心する。その後、垂直方向に上へ偏心する。すなわち、垂直方向には回転方向と逆の方向へ偏心している。よってこれは知覚(2.4節(3)～(4))とは一致しない結果である。

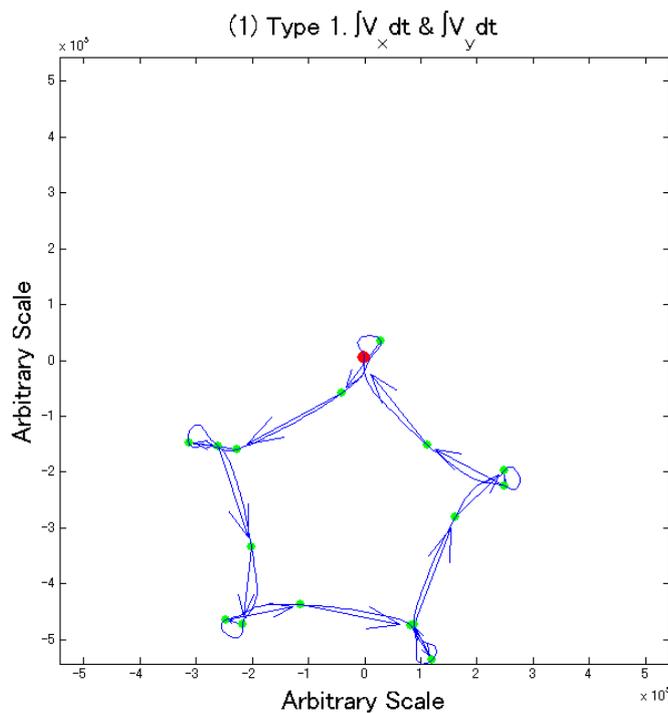


Figure 4.2.6(1) 逆偏心型回転変動錯視 type. 1 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

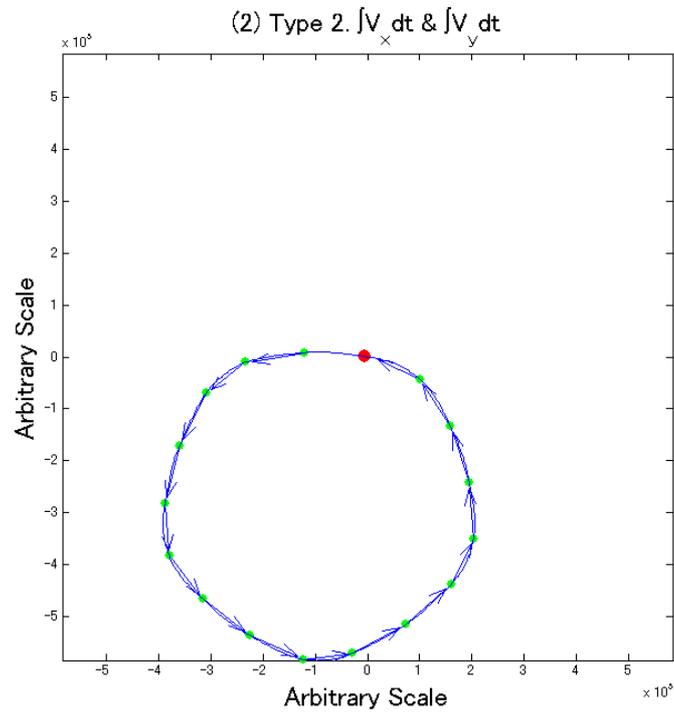


Figure 4.2.6(2) 逆偏心率回転変動錯視 type. 2 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

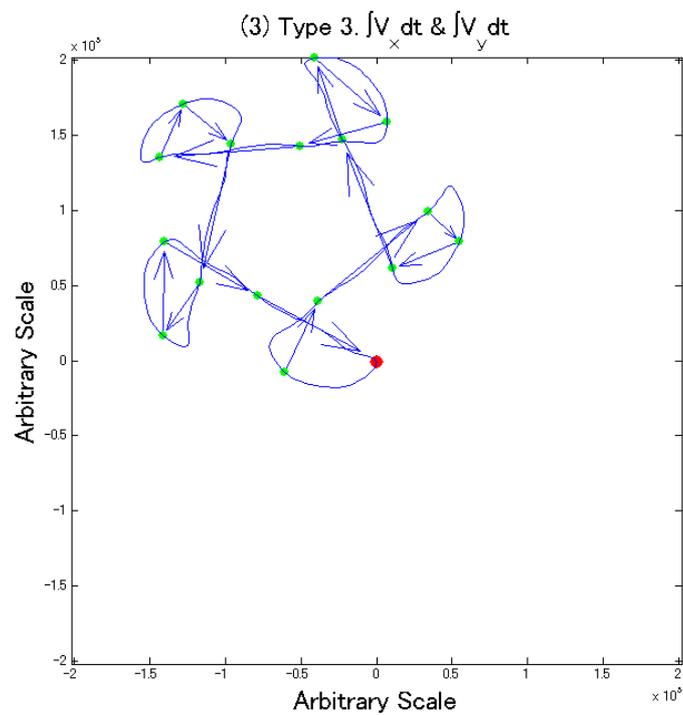


Figure 4.2.6(3) 逆偏心率回転変動錯視 type. 3 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

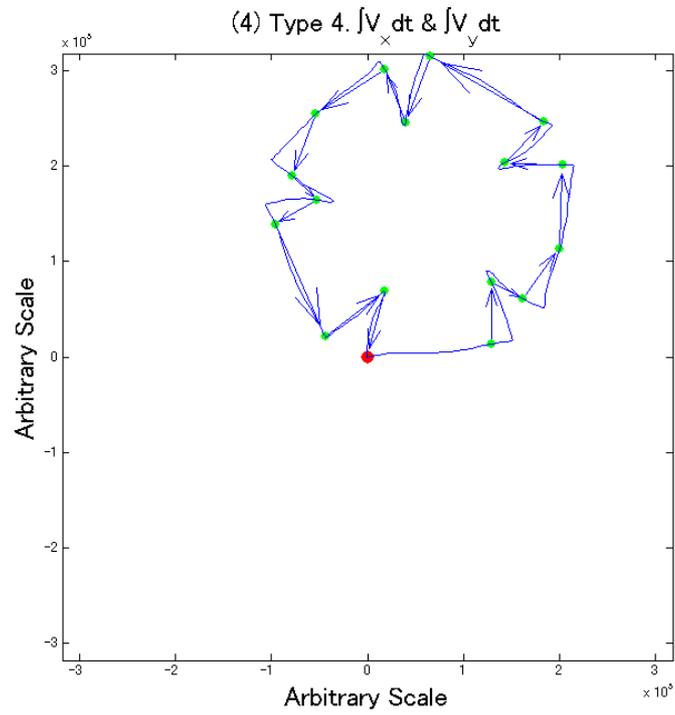


Figure 4.2.6(4) 逆偏心率回転変動錯視 type. 4 のシミュレーション結果(偏心の軌跡のみ掲載)

一方向の線分で構成された正方形を回転図形として用いた場合：

モデルの出力の時間変化を Fig. 4.2.6(5)-(1) ~ (4)に示す。

(1)は V_x 、 V_y の時間変化のグラフであるが、順偏心型と同様に時間積分した値をプロットしたものをを用いて議論した。この軌跡を見ると、図形が回転し始めた時である $-180[\text{deg}]$ から、左へ偏心し、その後、右下へ偏心し、次に、左上に偏心、左下に偏心、右上に偏心、右に偏心して元の位置に戻っている。実際には、反時計回りに偏心しているように知覚できるので、この結果は知覚(2.4節(7))と一致していない。(Fig. 4.2.6(5)-(4))。

(2)は A_p , A_{phi} の時間変化である(Fig. 4.2.6(5)-(2))。全体的には周期性があり、図形全体が基に戻るまでの間隔、すなわち $-180 \sim 0[\text{deg}]$ の間に5つの周期がある(Fig. 4.2.3(2))。 A_p の時間変化について、 $-180 \sim -144[\text{deg}]$ までの1周期を見ると、 $-170[\text{deg}]$ の時に A_p は正から負へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが最大になることを意味している。また、 $-153[\text{deg}]$ のときには、 A_p は負から正へ転じており、このときに回転する正方形の大きさが最小になることを意味している。これはヒトの知覚(2.4節(7))とは一致しない結果であった。

(3)は変形量の時間変化である(Fig. 4.2.6(5)-(3))。このグラフを見ると、全体的には $-61[\text{deg}]$ で最も大きな値をとっており、 $-134[\text{deg}]$ 、 $-96[\text{deg}]$ では、次に大きな値をとっている。また $-170[\text{deg}]$ と $-24[\text{deg}]$ では二番目に大きな値をとっており、これらの時刻の前後での変形量の変化は著しい。これは上述した時刻に瞬間的に大きな変形をしていることを意味しており、心理実験(2.4節(7))とは一致しない結果である。

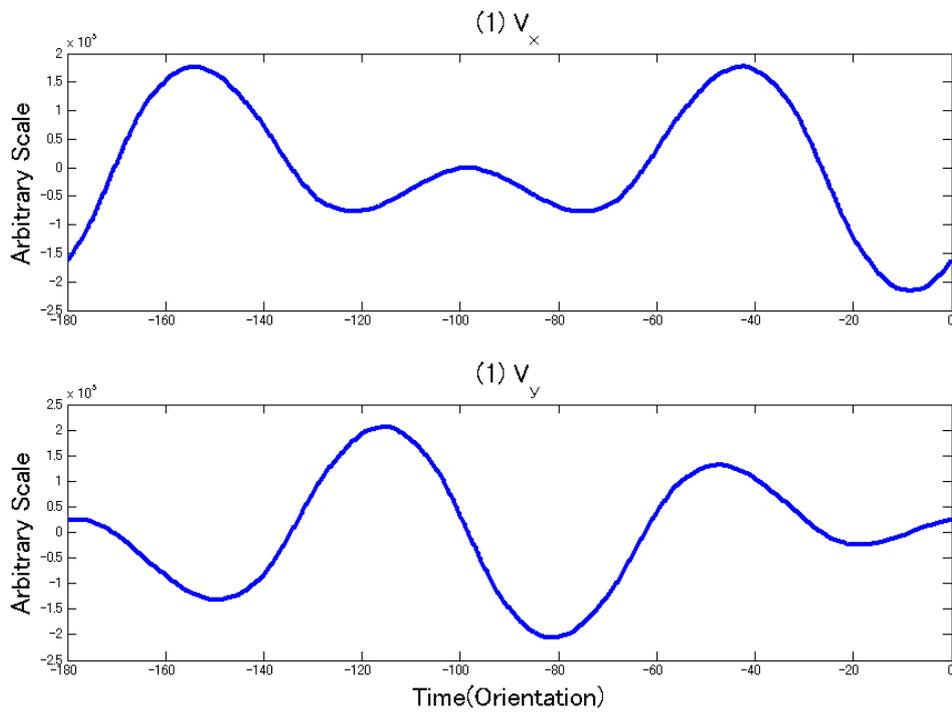


Figure 4.2.6(5)-(1) 一方向の直線で構成された正方形を用いた逆偏心率のシミュレーション結果(偏心率)

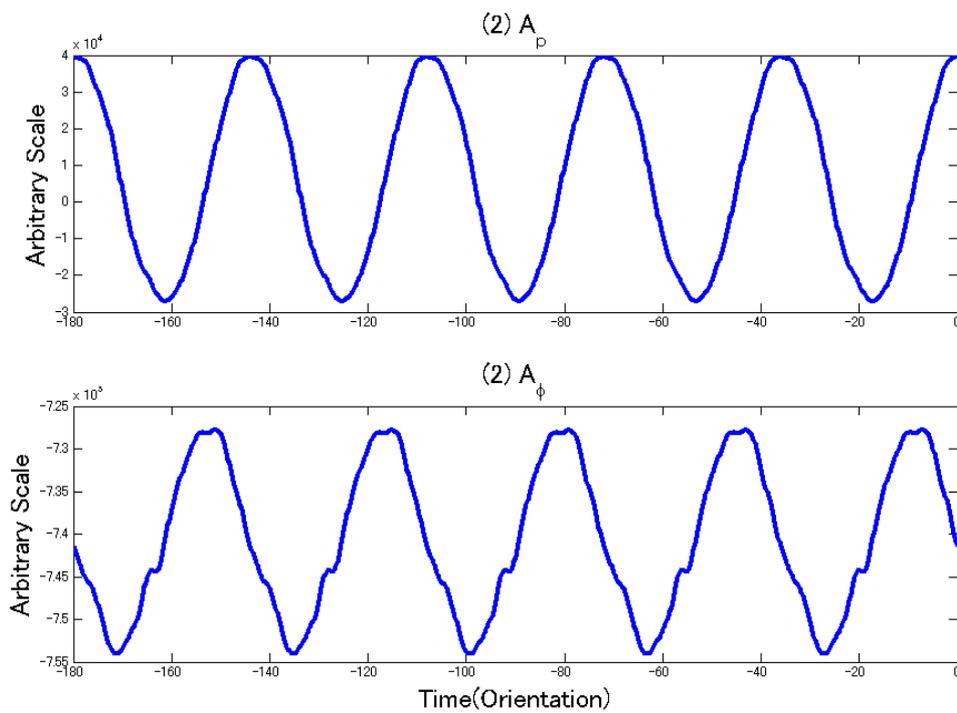


Figure 4.2.6(5)-(2) 一方向の直線で構成された正方形を用いた逆偏心率のシミュレーション結果(伸縮量)

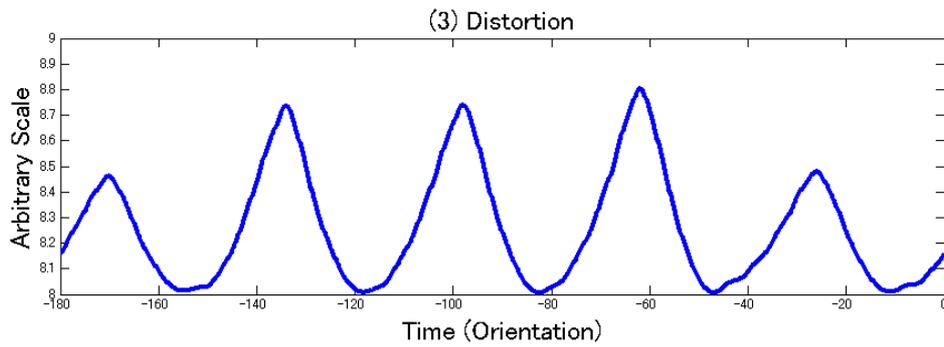


Figure 4.2.6(5)-(3) 一方向の直線で構成された正方形を用いた逆偏心型のシミュレーション結果(変形量)

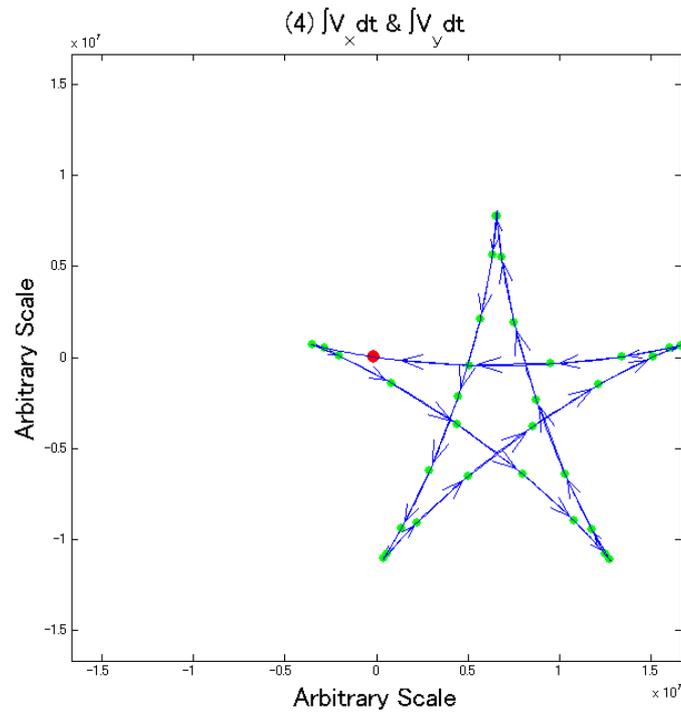


Figure 4.2.6(5)-(4) 一方向の直線で構成された正方形を用いた逆偏心型のシミュレーション結果(伸縮量の時間積分した軌跡)

4.2.3 変形型回轉變動錯視の結果

モデルの出力の時間変化を Fig. 4.2.7(1)-(3)に示す。

(1)は V_x, V_y の時間変化のグラフであり、 V_x, V_y は常に 0 になっている (Fig. 4.2.7(1))。これは偏心しないことを意味しており、心理実験とも知覚(2.3節で述べた)する結果である。

(2)は A_p, A の時間変化のグラフである (Fig. 4.2.7(2))。全体的には周期性があり、図形全体が基に戻るまでの間隔、すなわち $-60 \sim 0$ [deg] の間に 2 つの周期がある。これは知覚(2.3節で述べた)と一致していない。

(3)は変形量の時間変化のグラフである (Fig. 4.2.7(3))。 -41 [deg] と -11 [deg] の時に最も大きくなっており、このときに正六角形が最も変形していることを意味する。これは知覚(2.3節で述べた)とは一致しない結果である。

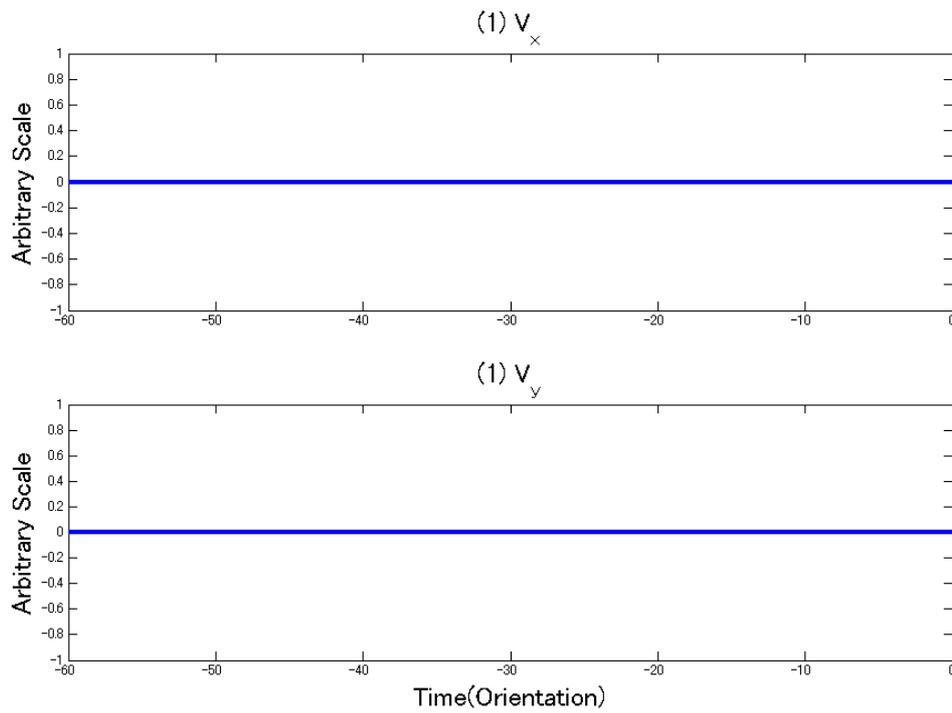


Figure 4.2.7(1) 変形型回転変動錯視のシミュレーション結果(偏心率)

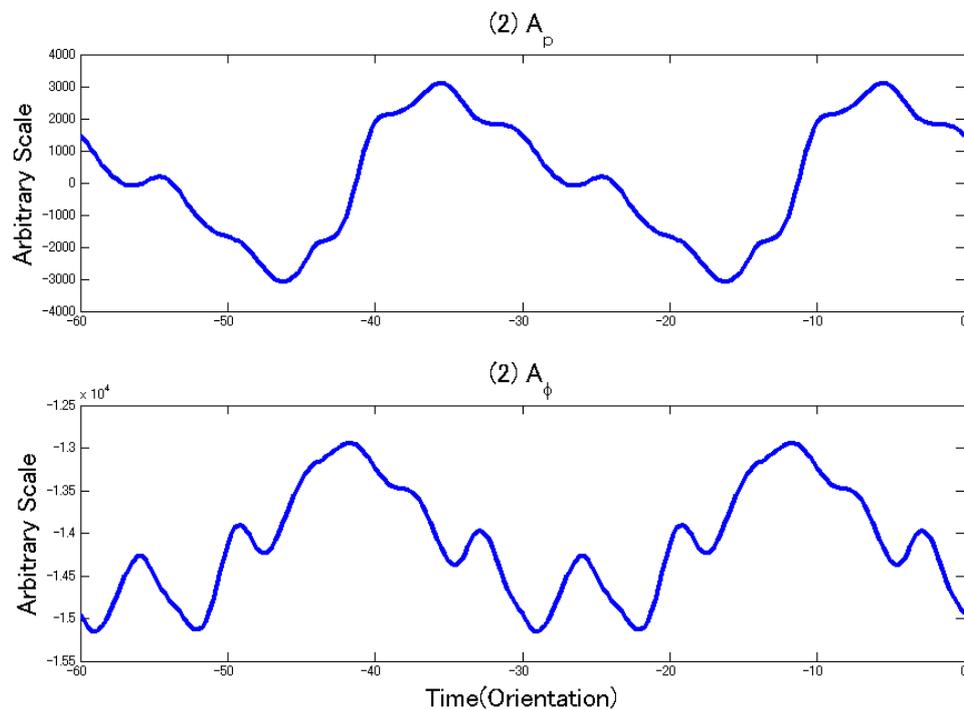


Figure 4.2.7(2) 変形型回転変動錯視のシミュレーション結果(伸縮量)

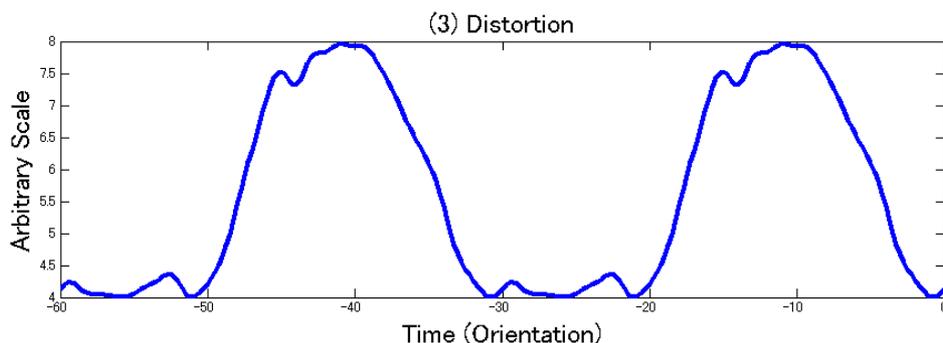


Figure 4.2.7(3) 変形型回転変動錯視のシミュレーション結果(変形量)

4.2.4 回転図形の色変化による時空間フィルターの応答

多角形の回転速度を色々に変えた場合に、モデルの出力が変化するかどうか確かめる実験を行った。

視覚刺激は、伸縮型回転変動錯視の基本型を用いた。また、縦軸は、伸縮量 A_p の最大値をとっており、横軸は、回転図形の色を示している。回転速度は、0[deg/sec]から 800[deg/sec]の範囲で 34 個の刺激を作成して、モデルに入力した結果を Fig. 4.2.8 に示す。図中ではひし形の点で示した。このグラフを見ると、90[deg/sec]付近で大きな値となっている。これは、特定の速度をもつ視覚刺激に対して、運動情報検出細胞が大きく反応することを示している。

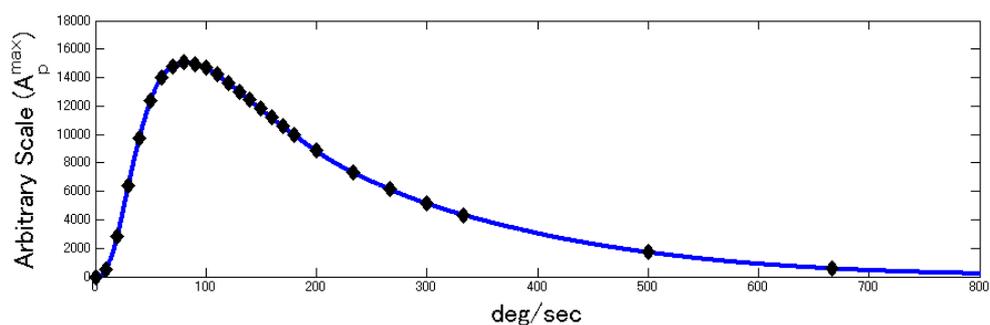


Figure 4.2.8 多角形の回転速度変化に依存するモデルの出力結果

5 結果と考察

5.1 数値実験結果のまとめ

数値実験の結果、数値実験とヒトの知覚とが一致するものと一致しないものがあった。以下に一致する場合と一致しない場合についてまとめた。

伸縮型回轉變動錯視について一致したものについては、基本形の外、枠だけの正方形を回転図形として用いた場合、角を丸めた正方形を回転図形として用いた場合、短い釘を一辺辺り四本打った正方形を回転図形として用いた場合、短い針を一辺辺り八本打った正方形を回転図形として用いた場合であった。これらの場合については、偏心量、伸縮量、変形量のすべてにおいて、ヒトの知覚と定性的に一致する結果となった。また、一方向の線分により構成された正方形を回転図形として用いた場合には、変形量についてヒトの知覚と一致しない結果となった。

順偏心型回轉變動錯視については、偏心量だけ見ると、一方向の線分により構成された正方形を回転図形として用いたタイプを除く、全てのタイプにおいてヒトの知覚と一致する結果となったが、伸縮量、変形量の波形を見ると、全てのタイプにおいて、ヒトの知覚と一致しない結果となった。一方向の線分により構成された正方形を回転図形として用いた場合には、偏心量、伸縮量、変形量すべてでヒトの知覚と一致しない結果となった。

逆偏心型回轉變動錯視については、偏心型のみヒトの知覚と一致していたものは、基本型、枠のみの正方形を回転図形として用いた場合、角を丸めた正方形を回転図形として用いた場合のみである。その他の場合については、偏心量、伸縮量、変形量すべてにおいて、ヒトの知覚と一致しない結果となった。

変形型回轉變動錯視については、偏心量のみヒトの知覚と一致している結果となった。

本論文では、脳の 1 次視覚野にある運動検出細胞により検出された運動情報を図形全体で、単純な計算方法により統合し、図形全体の特徴量を出力するモデルを用いて、数々の数値実験を行い、回轉變動錯視の現象を定性的に再現できる範囲を調べた。

数値実験の結果より、一致していない回轉變動錯視のタイプが存在すれば、それは運動情報の統合方法に要因がある、または、他の要因に問題があるということになり、回轉變動錯視の知覚メカニズムを探求する上で一歩前進したこ

とになると考える。

以下では、回轉變動錯視の全てのタイプにおいて、心理実験とモデルの出力結果が定性的に一致するには、どのような機構が今のモデルに足りないのかを考察した。

考察するにあたり、実装レベルとはかけ離れた考察をするのではなくて、現行のモデルにどんな計算を加えれば、今までよりも良い結果となるかだけを考察した。

また「自然だ」とか「自然でない」といった感覚的な判断による制約を気にしないで、純粹にモデルの出力結果がヒトの知覚とよりよい一致を見せるためにはどうすれば良いのかという議論をした。

5.2 一部の特徴量が知覚と一致するタイプについて

ここでは、心理実験と3つの統合方法から計算された特徴量の1つまたは2つが一致している結果となった回轉變動錯視のタイプにおいて、心理実験と不一致な結果となった特徴量をどのようにすれば、心理実験と一致するようになるのか？を考察した。

モデルの改善を考える上で、重要なことは、「統合方法が独立していること」、「回転中心が既知であり、常に一定であること」であると考えられる。

5.2.1 3つの統合方法が独立であること

この考察は、5-2-2節につながる背景として、考察する。

本モデルでは、偏心量、伸縮量、変形量はそれぞれ独立で計算している。おそらく、1つ1つの円形の窓に注意を向ければ、偏心型でも伸縮している箇所はあるだろう。しかし、偏心型を図形全体で観察すると、伸縮したり、変形したりしては見えないはずである。これは、局所的運動情報から図形全体へと運動情報を統合する過程において、偏心量（図形全体の秩序）が伸縮量・変形量の一部を吸収する機構があり、偏心しているようにしか観察できないのではないかと考える。よって独立した3つの統合方法を、何らかの形でお互いに影響を及ぼすようにすれば、偏心型回轉變動錯視において、心理実験と定性的に一致する伸縮量や変形量が計算できるのではないかと考える。

5.2.2 回転中心を既知であり一定であるとしていること

偏心量、変形量を計算する際には、回転中心の情報を直接的には用いていない。しかし、伸縮量を計算する場合に、本研究で作成したモデルでは、回転中心を既知であるとして各検出点における局所的運動情報を伸縮成分と回転成分に成分分解している。

偏心型回轉變動錯視についての心理実験の結果、回転中心が移動して知覚されるが、回転中心が移動するという点に対して、本モデルでは、常に回転中心が一定であることに、ヒトの知覚とモデルの計算機構との相違があると考えられる。この相違が、偏心型回轉變動錯視では、変形量、伸縮量について全てのタイプで心理実験とは不一致の結果となった一端があるかもしれないと推測している。

従って、今までどおりの統合方法を用いて計算した後、その前の段階である、局所的運動情報出力の段階までフィードバックして、特徴量を計算する機構が

必要であると考え。具体的には、偏心量を計算した後、伸縮量を、偏心量から計算される回転中心の位置から計算するという改善が考えられる。

例えば、順偏心型回轉變動錯視については、回転する正方形の角が円形の窓に現れているときに、正方形の角の方向に図形全体が偏心しているように観察される。実装レベルでは、このことを踏まえて、偏心する方向と逆方向へ伸縮成分をキャンセルするような計算機構を作れば、順偏心型、逆偏心型については、 A_p をほぼ常に 0 にすることができ、また伸縮型では、偏心量は常に 0 であるので心理実験と一致する結果が得られると考察する。では、変形型ではどうだろうか？変形型でも偏心量は常に 0 であるが、伸縮量 A_p は周期的に変化する波形となっているので具合が悪い。よって変形型回轉變動錯視については、偏心量が伸縮量を吸収することはなく、変形量が伸縮量を吸収しているのではないかと推測できると考える。

まとめると、偏心量は伸縮量、変形量を吸収し、変形量は伸縮量を吸収するという機構を加えれば、心理実験と一部の特徴量が一致するタイプにおいての不一致な特徴量を改善することができるのではないかと考える。最後にこの機構の Fig. 5.1 を以下に掲載した。図中の矢印の向きは、吸収される先を示している。

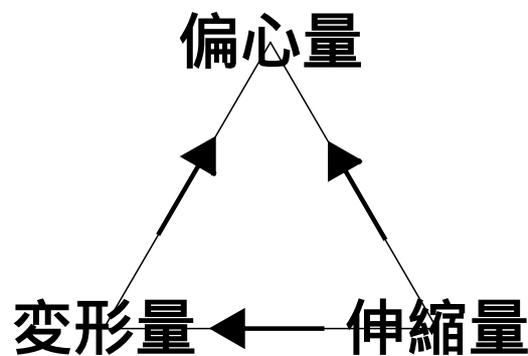


Figure 5.1 独立した統合方法の改善

5.3 全特徴量で知覚と不一致な結果になったタイプについて

ここでは、全ての特徴量について、心理実験と不一致な結果となったタイプについて、どのようにすれば一致するような数値実験結果が得られるかを考察する。

一方向の線分により構成された正方形、釘を打った正方形を回転図形として用いた場合に、全ての特徴量について知覚と不一致な結果になったものがあった(5-1節を参照)。

知覚と不一致な結果となったタイプの回転図形に共通する性質としては、図形の形状が複雑であるということである。釘を刺した正方形では、その釘が正方形の一部であるかどうかなどといったことは本論文のモデルでは区別せず、ただ単に、エッジのある箇所に生じた運動を検出している。一方向の直線により構成された正方形の場合にも、同様のことが言え、1つ1つの直線が、個別に、回転しており、その直線のエッジのある箇所に生じた運動を検出しているにすぎない。

しかしながら、ヒトは一方向の直線により構成された正方形、釘が刺さっている正方形を観察して、どう思うだろうか？おそらく大多数のヒトは、それらを一つのまとまりとして知覚できるはずである。

これが、数値実験とヒトの知覚との不一致を引き起こしている一因であると推測できる。

一方向の線分により構成された正方形や釘が打ってある正方形を一つのものとしてみる知覚過程は、心理学で知覚体制化と呼ばれている。知覚体制化とは、空間に分布したパターンを一つの「もの」としてまとめあげて知覚することである。例えば、空間的に分布した明暗のパターンを一つの「対象」として知覚したり、時間周波数方向に分布した音響パターンを一つの「音」として感じるのは、知覚体制化によるものといえる。

また、二次視覚野と呼ばれる脳の部位には、実際に線がないにもかかわらず、輪郭が見える刺激に対して反応する輪郭細胞(illusory contour cell)と呼ばれるものが脳内に存在する⁷。例として、Fig. 5.2に示した図では、斜め45°に傾いた線が存在するように知覚できる。

この細胞も、知覚体制化の一端を担っていると考えることができる。

以下では、知覚体制化と illusory contour cell を軸にして、2つの回転図形それぞれについて考察した。

従って、正方形を構成する線分の端点を結ぶ方向に輪郭が存在し、その方向にも運動情報を検出できるような機構があれば、現行のモデルよりも良い出力結果がだせると推測した。

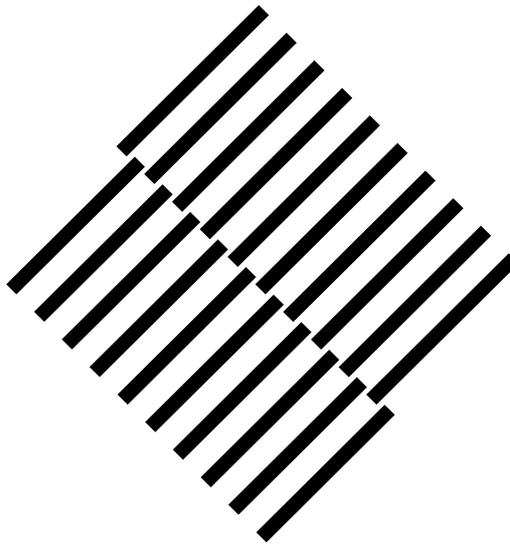


Figure 5.2 見えない線分が見える図形

5.3.1 一方向の線分により構成されている正方形

illusory contour cell の存在から、正方形を構成する線分の端点を結ぶ方向に輪郭が存在している視覚刺激(Fig. 5.3)をモデルに入力した場合に、現行のモデルよりも良い出力結果がでると考えた。

これによって、ヒトの知覚と定性的に一致するようなモデルの出力ができれば、一方向の線分により構成されている正方形を回転図形として用いた回轉變動錯視では、運動情報を統合することのほかに、illusory contour cell が知覚メカニズムの一端を担っているという推測ができると思う。

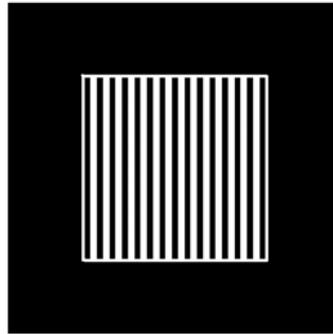


Figure 5.3 知覚体制化を考慮して作成した回転図形（一方向の線分で構成された正方形の場合）

5.3.2 釘を刺した正方形

この正方形の場合では、illusory contour cell 以外の知覚体制化の要因もあると考える。Fig.5.4 中の A の部分は、illusory contour cell の存在から、釘の端を結ぶ方向へ直線があると仮定できるが、B の部分では、その先が正方形の角になっているのか(Fig.5.4 中の(C))、丸まっている(Fig.5.4 の(D))のかは予測できない。

しかし、この正方形と釘を一つのまとまりとして知覚しているということは、釘が刺さっている正方形の外に、大きな正方形のような形状をした枠があるとして視覚刺激を作り、Fig.5.5 のような視覚刺激をモデルに入力したら、ヒトの知覚と定性的に一致するモデルの出力結果が得られると考える。

また、局所的運動情報を統合する過程において、知覚体制化により釘の部分で検出された運動情報をなんらかの形で割り引いて統合している機構があると推測される。

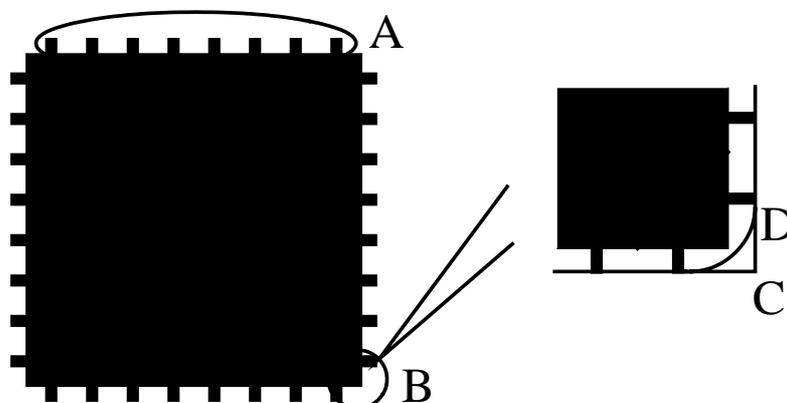


Figure 5.4 釘を打った正方形の二つの部分(色を反転させてある)

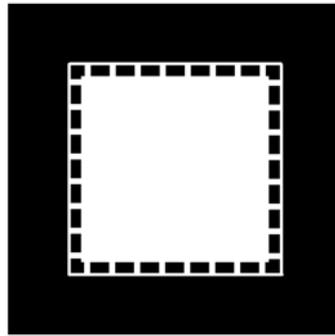


Figure 5.5 知覚体制化を考慮して作成した回転図形(釘を刺した正方形の場合)

謝辞

この論文を作成するにあたり多くの方にご助力いただきました。
直接ご指導していただいた当研究室の阪口豊助教授をはじめ、当講座の出澤正徳教授、助手の石田文彦氏と島井博行氏，SVBL 研究員の吉野大輔氏や苦楽を共にした仲間である当講座の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

-
- [1] Shiffrar, M., & Pavel, M. (1991). Percepts of rigid motion within and across apertures, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(3), pp. 749-761
- [2] Hashimoto, A. (1993). A Study on Visual Function with Computer Graphics. Dynamic Occlusion Cues and New Types of Optical Effects, 東京理科大学 学士論文
- [3] Adelson, E. H., & Bergen, J. R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion, *Journal of the Optical Society of America A*, 2(2), pp. 284-299.
- [4] De Valois, R. L., & Cottaris, N. P. (1998). Inputs to directionally selective simple cells in macaque striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 95, pp.14488-14493.
- [5] DeAngelis, G. C., Ohzawa, I., & Freeman, R. D. (1993). Spatiotemporal Organization of simple-cell receptive fields in the cat's striate cortex. I. General Characteristics and postnatal development. *Journal of Neurophysiology*, 69(4), pp.1091-1117.
- [6] Hubel, D., & Wiesel, T. (1977). Ferrier lecture:Functional architecture of the macaque monkey visual cortex. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 198, pp.1-59.
- [7] Von der Heydt, R., & Peterhans, E. (1989). Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. I. Lines of pattern discontinuity. *The journal of Neuroscience*, 9(5), pp.1731-1748.

研究発表

今井 政敬、阪口豊
局所的運動情報の統合に基づく回轉變動錯視の知覚モデル
Vision, 16, 201, 2004, (日本視覚学会夏期研究会)