

錯視図形の認識における眼球運動

Eye movement in recognition of illusion figures

河村 圭[†], 小堀 聡[‡]
Kei Kawamura, Satoshi Kobori

[†] 龍谷大学大学院理工学研究科電子情報学専攻, [‡] 龍谷大学理工学部電子情報学科
[†] Division of Electronics and Informatics, Ryukoku University,
[‡] Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University
[†] t10m018@mail.ryukoku.ac.jp, [‡] kobori@rins.ryukoku.ac.jp

Abstract

We have measured magnitude of illusion and eye movement data in recognition of visual illusion and investigated the relation between eye movement and illusion. The results suggest that eye movement affects the magnitude of illusion and that eye movement is caused corresponding to the illusion.

Keywords — Eye movement, visual illusion, magnitude of illusion

1. はじめに

われわれの見る物の形や大きさは、外界の実際の物の形や大きさと必ずしも一致しないことがあり、そうした現象のことを錯視と呼ぶ。錯視にはさまざまな種類があるが、本研究では幾何学的錯視を取り扱う。幾何学的錯視というのは、平面図形における大きさ、長さ、方向、角度、曲率、形などの幾何学的性質が、刺激の客観的關係より組織的にかつ相当量異なって知覚される現象である[1]。

しかしながら、錯視は何ら特別な現象でも異常な現象でもなく、知覚の歪みは通常の視知覚において一般的に生じていることであり、錯視図形でそのような歪みが特に顕著に現れるにすぎない[2]。ただ、錯視においては比較的簡単な刺激布置の割に顕著な歪みが生じることから、2次元知覚の機制を解く手がかりとしての役割が期待されているのである[1]。

幾何学的錯視に関する研究は19世紀半ば以降、数多くなされてきた。1890年代には研究が特に活発であって、今日知られている多くの錯視図形は、ほとんど19世紀末までに多くの学者たちによって案出された。それらの学者の中には、生理学者、

心理学者、物理学者、天文学者などさまざまな領域の学者がいる。多くの錯視図形は、考案した学者の名をつけて誰々の錯視と呼ばれている。その後も幾何学的錯視に関する研究がなされており、特にわが国で盛んである[2]。

錯視についての研究においては、錯視図形の幾何学的条件や提示条件によって錯視量がどのように変化するかが調べられるとともに、錯視の生じる理由が検討され、いくつもの学説が提案された。

たとえば、ミュラー・リヤー錯視は、多くの錯視のなかでもきわめて有名であり、研究例も多く、この錯視が紹介されて以来、数多くの学説が提出されている。そうした錯視の学説の一つに眼球運動説がある。古典的眼球運動説は、眼球運動は外向図形では頂点を越えて長く、内向図形では逆に短くなるという、誤った眼球運動が錯視の原因であるとするものであるが、瞬間提示や静止網膜像という眼球運動の機会がない観察事態でも錯視が生じるので、この説は支持されないことになる[3]。

しかしながら、眼球運動が錯視の原因でないことは示されたとしても、眼球運動が錯視図形の認識に与える影響についてはまだ十分に検討されているとはいえない。

そこで、本研究では、錯視図形の認識における眼球運動を測定し、眼球運動と錯視がどのように関係しているかについて検討することを目的とする。

本研究では、ミュラー・リヤー錯視を対象とするが、その理由は、錯視量が大きく、提示条件に伴う変化が測定しやすいこと、また、比較可能な先行研究が数多くあることによる。

認識実験としては錯視図形の判定実験と操作実験を行う。判定実験では7段階の提示時間を設定し、標準図形と比較図形とを比べてどちらの主線が長く見えるかを判定させることで錯視量を測定するとともに、眼球運動測定装置（アイカメラ）を用いて視線データを測定し、眼球運動の有無を確認する。一方、操作実験では標準図形と比較図形の主線の長さを見比べて長さが同じに見えるように比較図形の主線の長さを調整させることで錯視量を測定するとともに、視線データを測定し、視線移動距離を算出する。このように錯視図形を操作・認識する過程において即時的に眼球運動を測定した例は見られない。

本研究では、錯視図形の判定実験および操作実験をコンピュータ画面上で行える実験システムを作成し、錯視図形についての予備知識のない者を対象として実験を行い、錯視量と視線データを測定し、錯視図形の認識と眼球運動との関係を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 実験システム

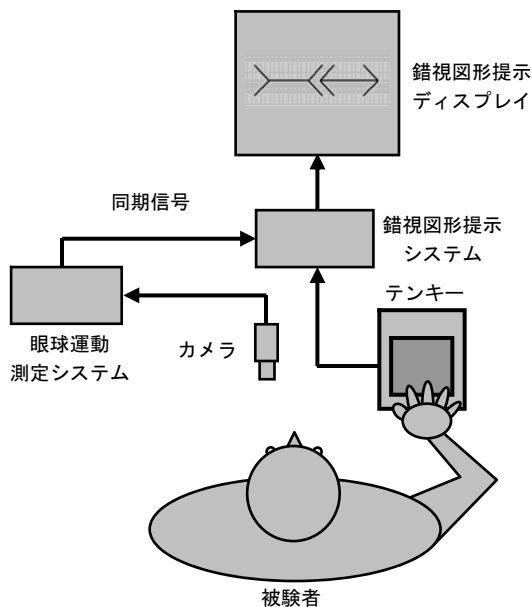


図1 実験システムの構成

実験システムは、図1に示したように錯視図形提示システムと眼球運動測定システムから構成されている。錯視図形提示システムから送信される

信号により、眼球運動測定システムでの測定との同期が取られる。

2.1.1 錯視図形提示システム

錯視図形提示システムは、市販のパーソナル・コンピュータと周辺機器を中心に以下のもので構成されている。

コンピュータ：Optiplex GX150（デル）、
PentiumIII 1GHz, 512MB, 40GB, Windows XP
Professional

ディスプレイ：15型 TFT 液晶ディスプレイ
LCV-15MAT（エプソン）、1024×768画素

デジタル入出力ボード：PIO-16/16T(PCI)
（コンテック）

テンキーパッド：NT-9USV（サンワサプライ）

2.1.2 眼球運動測定システム

眼球運動測定システムは、ナックイメーজテクノロジーの眼球運動測定装置 EMR-8BNL を中心に以下のもので構成されている。特に記載のないものは同社の製品である。

コンピュータ：Dimension 8400（デル）、
Pentium4 2.8GHz, 1GB, 160GB, Windows XP
Home

ディスプレイ：15型 TFT 液晶ディスプレイ
1503FP（デル）、1024×768画素

データプロセスボード

画像入力表示ボード：MSG1105HR（日立超 LSI
システムズ）

コントローラ

LED電源ボックス

ビデオコンバーター：VABOX2（アイ・オー・
データ機器）

ビデオモニタ：AS4312U（イーヤマ）

ビデオデッキ：GV-D1000（ソニー）

信号変換ボックス

眼球撮影カメラ

あご台

眼球データ解析ソフトウェア

キャリブレーションソフトウェア

これらのうち、眼球データ解析ソフトウェアには、眼球データを実時間でコンピュータに取り込

む機能が含まれており，視線データとして錯視図形提示用ディスプレイの座標値（x軸方向およびy軸方向，単位は画素数）がサンプリング周波数60Hzで得られる．視距離は66cmである．

2.2 実験課題

実験に用いる図形は次の3種類(図2)である．

H型図形：主線と斜線の角度 90°

内向図形：主線と斜線の角度 45°

外向図形：主線と斜線の角度 135°

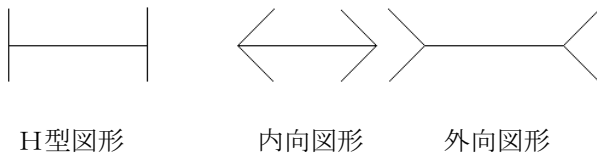


図2 実験に用いる図形

2.2.1 判定実験

被験者の課題は，左右に表示される標準刺激と比較刺激の図形を見比べて，主線の長さの長短を答えることである．

(a) 錯視課題

目印の提示：画面の中心点に一辺 20 画素の十字を 1 sec 表示，その後 200msec は無表示

図形の提示時間：50msec, 100msec, 200msec, 500msec, 1 sec, 2 sec, 5 sec の 7 段階

標準刺激：内向図形（主線の長さ 100 画素，斜線の長さ 35 画素）

比較刺激：外向図形（主線の長さ 51~83 画素，斜線の長さ 35 画素）

刺激間の間隔：20 画素

SOA：200msec

マス킹時間：200msec

マス킹パターン：横 300×縦 99 画素の範囲に 3×3 画素の白または黒のドットをランダムに表示

(b) 対照課題

図形の提示時間：500msec

標準刺激：H型図形（主線の長さ 100 画素，斜線の長さ 35 画素）

比較刺激：H型図形（主線の長さ 88~112 画素，斜線の長さ 35 画素）

目印の提示，マス킹については錯視課題と同じである．

比較刺激の表示位置（左または右）と主線の長さ（錯視課題では4画素刻み，対照課題では3画素刻み）はランダムに設定される．各図形に対する長短の判定と判定時間が記録される．

2.2.2 操作実験

被験者の課題は，左右に表示される標準刺激と比較刺激の図形を見比べて，主線の長さが同じに見えるように調整することである．

標準刺激：H型図形（主線の長さ 150 画素，斜線の長さ 38 画素）

比較刺激：内向図形（主線の長さは 149~155 画素または 189~195 画素，斜線の長さ 53 画素）あるいは外向図形（主線の長さは 103~109 画素または 143~149 画素，斜線の長さ 53 画素）

比較刺激の配置として右側配置と左側配置があり，また，比較刺激の主線の長さを調整させる向きとして上昇系列と下降系列がある．

比較刺激の主線の長さ（1画素刻み）はランダムに設定される．被験者は主線の長さが同じに見えるようになった時点で確定させるが，それまでの操作量と操作中の視線データが記録される．

以下の図3と図4がそれぞれ実際の実験で用いる標準刺激と比較刺激の2種類の組み合わせとなる．

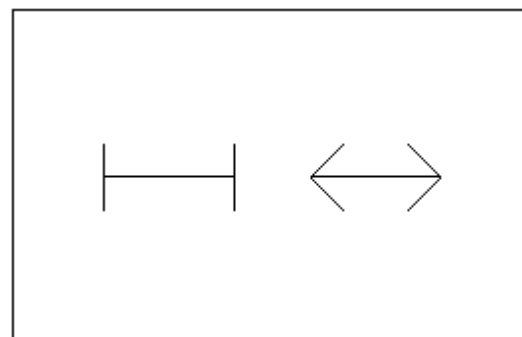


図3 標準刺激と比較刺激（内向図形）

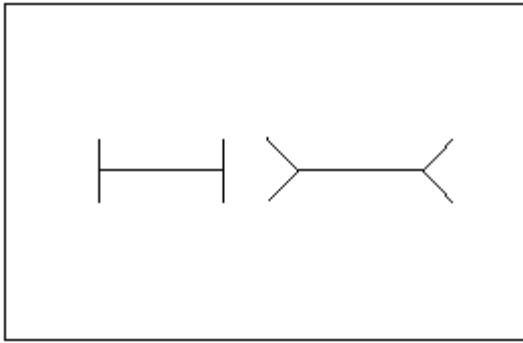


図4 標準刺激と比較刺激（外向図形）

2.3 被験者

錯視図形について予備知識のない18歳から23歳までの健常な大学生28名（男性19名，女性9名）を被験者とした。すべての被験者について，裸眼もしくは眼鏡・コンタクトレンズの使用により，本実験を行うのに十分な視力（両眼で0.7以上）を有していること確認した。

2.4 実験条件

判定実験では，7段階の図形の提示時間の順序を被験者によって変えることで順序効果を相殺する。

操作実験では，比較刺激の配置と系列の4つの組み合わせの出現順序を被験者によって変えることで順序効果を相殺する。

2.5 実験手順

実験に先立ち，被験者には，文書により実験の概要と手順を理解させたうえで，実験への参加の同意書と視力や利き手などに関する調査票に記入させる。

測定に入る前に，まず，実験課題を確認し，実験機器などに慣れさせるため，どちらの実験においても，練習試行を行い，次に，眼球運動測定装置の個人別較正を行う。以上の準備ができれば，実験条件に従って実験を行う。

判定実験では，錯視課題の前に対照課題を実施する。

操作実験では，操作課題の前と後にプレテストおよびポストテストとして，主線の長さが等しい

標準刺激と比較刺激を20sec提示し，被験者に左右の図形の主線の長さを見比べさせ，視線データを記録する。

3. 解析方法

判定実験においては，被験者の各図形に対する長短の判定を-1，0，1のいずれかとする評価値とし，その評価値について以下の式に示した距離の重み付き総和の絶対値を算出し，比較図形の主線の長さの関数として表す。

$$s(n) = \left| \sum_{m=-k}^k x(n-m) |m| \right|$$

この関数の最小値を与える長さを錯視の主観的等価点とする。

一方，操作実験においては，確定時の比較図形の主線の長さを主観的等価点（以下，等価点）とする。

そして，等価点をもとに錯視量および錯視率を以下のように定義し，算出する。

錯視量 = |等価点 - 標準図形の主線の長さ|
（単位は画素数）

錯視率 = (錯視量 / 標準図形の主線の長さ) × 100
（単位は%）

判定実験においては，各提示時間についての，すべての被験者の評価値を合計して錯視量を算出するとともに，被験者別の錯視量も求める。そして提示時間と錯視量についての関係をグラフで表し，被験者ごとに算出した等価点について分散分析を行う。

一方，操作実験においては，等価点について，試行に伴う変化，右側配置・左側配置の別，上昇系列・下降系列の別に，平均値を示したグラフを作成するとともに，分散分析を行う。

また，判定実験の視線データからは，各提示時間での眼球運動の有無を調べる。操作実験の視線データからは，標準図形あるいは比較図形に対応する停留点間距離を以下の手順により算出する。

(1) 実験で得られた視線データから余分な部分を切り取る。

- (2) 前処理として、まばたきなどによるエラーの区間に対して線形補間を施す。
- (3) 同様に、錯視図形の提示領域から外れたデータも異常値として除去して線形補間を施す。
- (4) 修正された視線データから、一定の空間的および時間的条件に当てはまるデータを停留点とする。
- (5) 停留点が標準図形あるいは比較図形の端点に対応しているかどうか推定する。
- (6) 停留点が標準図形あるいは比較図形の端点から端点へと移動している場合は、それぞれに対応する停留点間距離（図形の両端同士の視線移動距離）を算出する。

4. 結果と考察

4.1 眼球運動の有無

判定実験では、すべての試行の視線データにおいて、7段階の提示時間のうち200msec以下では眼球運動は生じず、500msec以上において眼球運動の発生が確認できた。これはサッケードの潜時特性[4]を考慮すれば妥当な結果であると言える。また、提示時間が長くなるにつれ、視線移動距離も増加していった。

4.2 提示時間と錯視量

判定実験では、眼球運動が生じない提示時間50msecなどにおいても錯視が観測された。また、提示時間が最も短い50msecでは41画素（図5）、最も長い5secでは28画素（図6）の錯視量が観測され、提示時間と錯視量の関係（図7）については、提示時間が長ければ有意に錯視量が小さくなるということが確認できた ($F(6, 162) = 30.582, p < 0.001$)。

このことにより眼球運動により錯視が生じるとする古典的眼球運動説は支持されなかった。しかし、提示時間が長くて短くても錯視量が変わらないとする従来の報告[5]とは異なる。

さらに、200msec～1secに錯視量の大きな変化が見られた。これは眼球運動の有無と対応している。このことより、眼球運動によって図形の物理

的な情報をより正確に獲得することで、より実際の物理量に近い認識になるように修正されると推察される。

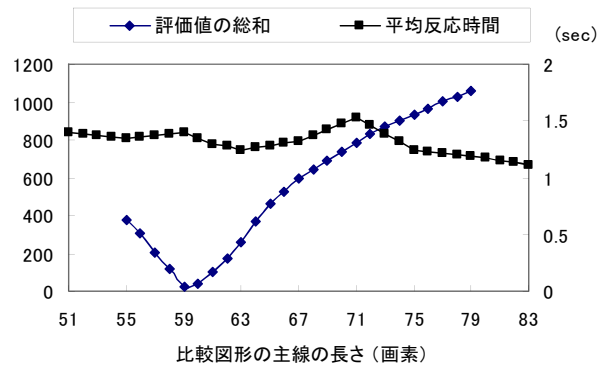


図5 提示時間50msecの評価値の総和と平均反応時間（等価点59）

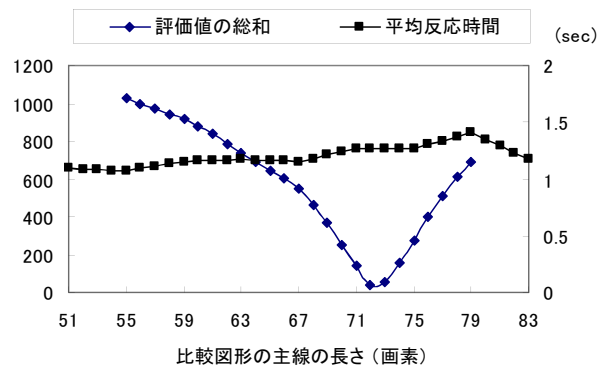


図6 提示時間5secの評価値の総和と平均反応時間（等価点72）

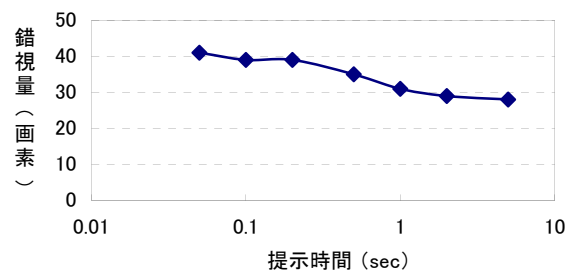


図7 提示時間と錯視量の関係

4.3 試行順序や提示時間による影響

判定実験における試行順序や提示時間による影響を調べるため、主観的等価点について分散分析を行った結果、試行順序についての有意な主効果は認められなかった ($p = 0.830$)。

つまり、試行順序と錯視量の関係はなく、判定実験において錯視量に影響を及ぼすのは提示時間のみであるということが確認できた。

4.4 内向図形・外向図形に対する錯視量

操作実験（図8，9）において、すべての被験者のすべての試行の平均による錯視量を測定した結果、比較刺激が内向図形の場合は18画素（錯視率12%）、外向図形の場合は23画素（錯視率15%）であった。また、標準刺激を内向図形、比較刺激を外向図形とした先行研究では、錯視量が37画素（錯視率25%）であったが、この値は今回の実験での内向図形の錯視量と外向図形の錯視量の和に近いと言える。すなわち、通常のリャー錯視は、内向図形に対する過小視と外向図形に対する過大視の効果の和によるものであること、また、相対的には内向図形よりも外向図形に対する錯視量の方が大きいことが推察される。

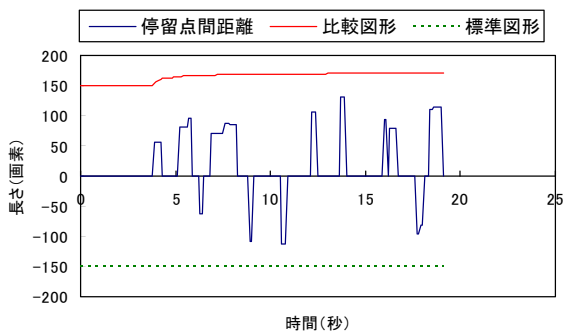


図8 比較図形（内向図形）の操作量と停留点間距離の時系列データ

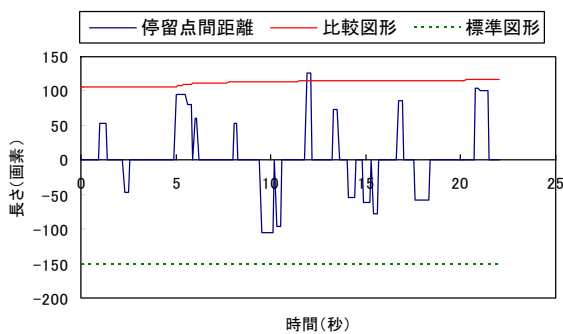


図9 比較図形（外向図形）の操作量と停留点間距離の時系列データ

4.5 試行に伴う変化

操作実験の主観的等価点について、試行回数を要因とした分散分析を行った結果、試行回数についての有意な主効果は内向図形、外向図形のどちらにおいても認められなかった（内向図形： $p = 0.917$ ，外向図形： $p = 0.246$ ）。すなわち、錯視量は試行に伴い増減することなく、練習効果はないことが示された。

4.6 標準図形と比較図形に対する停留点間距離

操作実験での停留点間距離は実際の主線の長さに対して短い、標準図形と比較図形に対する値はほぼ等しく、また、ある程度の相関が認められた（相関係数は、比較刺激が内向図形の場合0.43、外向図形の場合0.46）。プレテストおよびポストテストにおいても同様に一定の相関が見られた。このことは、被験者は標準図形と比較図形の長さが同じと判断したとおりに、視線を動かしていると考えられる。

しかし、いずれの場合も標準図形（H型図形）に対する停留点間距離にかなりばらつきがあることから、被験者によって図形のとらえ方は個人差があると考えられる（図10，11）。

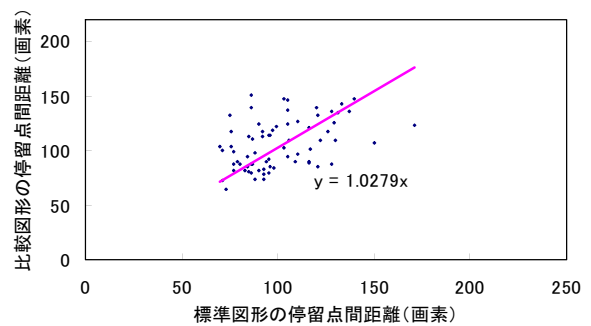


図10 標準図形と比較図形（内向図形）の停留点間距離の相関関係

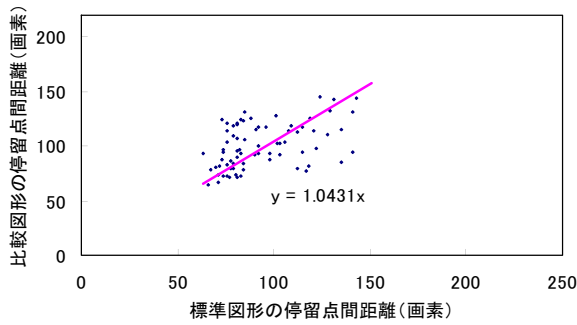


図 11 標準図形と比較図形（外向図形）の停留点間距離の相関関係

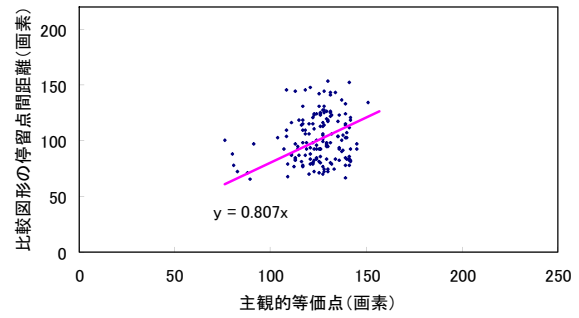


図 13 主観的等価点と停留点間距離の相関関係（外向図形）

4.7 主観的等価点と停留点間距離

操作実験の各試行における主観的等価点と対応する停留点間距離の相関係数を求めたところ、この両者にはほとんど相関が見られないことが分かった（相関係数は、比較刺激が内向図形の場合 0.13, 外向図形の場合 0.18）。しかし、主観的等価点は比較図形の物理的な長さであり、その長さに対して被験者がどのぐらいの長さで判断したかを示しているのではない。よって、被験者によって主観的等価点が大きく異なるのだから、被験者が判断した長さと同程度ある停留点間距離との相関が低いのは当然と言える（図 12, 13）。

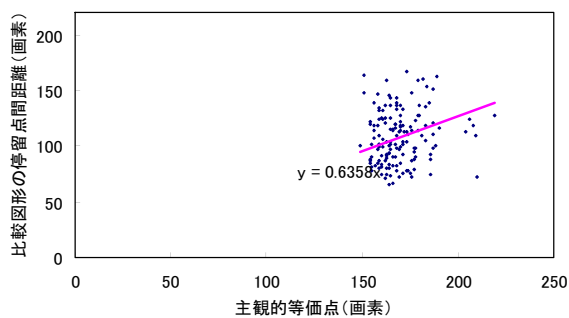


図 12 主観的等価点と停留点間距離の相関関係（内向図形）

5. まとめ

本研究では、錯視図形の認識における眼球運動を測定し、眼球運動と錯視がどのように関係しているかについて検討することを目的とした。ミュラー・リヤー図形を対象とし、錯視図形の判定実験および操作実験を行い、錯視量と眼球運動を測定した。その結果、判定実験からは、眼球運動の有無が錯視量に影響を与えていることが推察された。操作実験からは、錯視に対応した眼球運動が生じていることが推察された。

参考文献

- [1] 田中 平八：幾何学的錯視と残効，大山 正，今井 省吾，和気 典二（編）：新編 感覚・知覚心理学ハンドブック，誠信書房，681-736（1994）。
- [2] 大山 正：視覚心理学への招待，サイエンス社，117-146（2000）。
- [3] 後藤 倬男，田中 平八：錯視の科学ハンドブック，東京大学出版会，14-135（2005）。
- [4] 淀川 英司，東倉 洋一，中根 一成：視聴覚の認知科学，電子情報通信学会，45-50（1998）。
- [5] Oyama, T. and Moriyama, K.: Temporal Development of Optical Illusions, McGaugh, J. L. (Ed): Contemporary Psychology: Biological Processes and Theoretical Issues, 385-393（1985）。