

視野闘争の強さの心理物理的測定に基づく融合理論の検討

鬘櫛一夫 高瀬慎二 行松慎二

中京大学心理学部 〒466-8666 愛知県名古屋市中昭和区八事本町 101-2

E-mail: bingushi@lets.chukyo-u.ac.jp b10602d@cnc.chukyo-u.ac.jp eyes@gem.hi-ho.ne.jp

あらまし 両眼対応が二重像の基礎を抑制することにより融合が達成されるという両眼抑制モデルを提出し、視野闘争実験によりモデルの妥当性を検討した。両眼では異なる方向に運動する正弦波縞刺激を両眼に呈示した結果、同じ方位の縞刺激が反対眼に呈示されたときに最も知覚時間が短かった。反対眼刺激の大きさを3段階変化させて呈示したときは、同じ大きさの刺激の時に最も知覚時間が短かった。この結果は両眼対応が強い条件で視野闘争の抑制が最も強くなることを示唆していることから、両眼抑制モデルは支持された。

キーワード 融合, 視野闘争, 両眼抑制モデル

A study of the fusion theory by measuring the strength of binocular rivalry

Kazuo BINGUSHI Shinji TAKASE and Shinji YUKUMATSU

Department of Psychology, Chukyo University, 101-2, Yagoto honmachi, Showa-ku, Nagoya, Aichi, 466-8666, Japan

Abstract: In this study, we proposed a model (binocular inhibition model) to account for the process of binocular fusion and examined its validity by means of binocular rivalry experiments. The model assumes that binocular fusion is achieved by the inhibitory effect of a binocular unit on monocular units which are the bases of double images. In the experiment, a vertical sinusoidal grating (test stimulus) was presented to the left eye and a grating, which had various sizes and orientations, was presented to the right eye and cumulative dominance durations of the test stimulus were measured. The left and the right eye's gratings were moving to the different directions. As the result, the cumulative dominance durations were shorter when the test stimulus was similar to the opposite eye's stimuli in size and orientation than when those were dissimilar. These results support our proposed model.

Keyword: binocular fusion, binocular rivalry, binocular inhibition model

1. はじめに

両眼視では外界の1つの対象に対して2つの情報を得る。両眼網膜像は、異なる距離にある2対象間で非対応・視差 (disparity) を生じていることはかなり以前から知られていた。Wheatstone(1838)は視差により立体視が可能なことをステレオグラムにより実験的に明らかにした。このときわずかな網膜像の違いは知覚としては二重像にはならないで単一視されることが示された。

両眼視差があっても対象は1つに知覚されることもあるが、視差が大きくなると二重像が知覚される。

事実は単純であっても単一視が成立する過程はいまだ問題として残されている。本研究では両眼単一視がどのようにして達成されるかについて1つのモデルを提出し、そのモデルの妥当性を心理物理実験で検討した。

伝統的には両眼単一視の説明には抑制理論と融合理論がある。抑制理論は左右の眼は互いに他を抑制し、一時には左右眼の何れか一方だけが機能していると考えすることで両眼単一視を説明しようとする。その証拠として、左右の眼に異なる色フィルターを通して外界を見るとき、あるいはステレオグラムで両眼に異なる刺激を呈示したとき、色あるいは文字

が継時的に交替して見えるという視野闘争現象が挙げられてきた。

融合理論では両眼視差をもつ2つの像は1つに融合されて知覚されると主張する。視差により立体視が成立すると同時に、対象が1つに見えるということも説明できるので理論的には抑制理論より優れていると考えられている。しかし両眼像が異なると視野闘争が生じ、両眼視差が一定量を超えると二重像が知覚される。これらを考慮すると、従来のどちらかの理論で両眼単一視の成立過程を説明することは困難である。本研究では、従来の2つの理論を統合することで、二重像や視野闘争の現象の生起を統合的に説明できる両眼抑制モデルを提案し、その検証実験を行った。

既知事実の分析をすると、視差が小さいときは融合し、視差が大きいときは二重像となる。二重像であっても立体視として奥行きが知覚できる範囲は相当にあることから (Ogle, 1962)、二重像の範囲であっても両眼系の処理は十分になされているだろう。どうして視差が小さい範囲 (融合域) だけで単一視が成立するのだろうか。融合と二重像は1つか2つかという質的な知覚の差異である。はたしてこの見えの差異は質的に異なる処理によるのだろうか、それとも視差処理の量的差異で説明できるのだろうか。本研究は量的差異に基づいて見えの差異を説明しようとする。

視差と立体視の関係を考慮すると、視差量に対応する立体視奥行き量は単調な比例関係にある。生理学的には視差5分を検出する視差検出細胞は、視差50分を検出する細胞とは異なる (Nikara, Bishop, & Pettigrew, 1968)。このように視差量の違いによる奥行き感の違いは神経系の質的な差異によると見なせる。視差量に特異的に反応する視差検出細胞がなくては奥行きの差異は知覚できないはずだから、この質的差異は奥行き量を決定するのに重要な要因と考えられる。

しかし視差が5分と50分では、単に知覚される奥行き量が違うだけだろうか。これ以外に立体視の重要な違いがある。すなわち持続的に凝視観察したときに立体視は一時的に消失するが、この立体視消失に対する抵抗が違う。この抵抗を立体視の安定度と見なせば、立体視は視差が小さいときほど安定度が高いと言える。視差量の違いは立体視の奥行き量の差だけではなく、立体視の安定度あるいは崩壊のしやすさという量的な差異とも関係があることを示唆している。本研究ではこの視差量に依存した立体

視安定度という量的な差異を、融合か二重像かという単一視の問題と関連づけてみる。

最初に、両眼対応ネットワークを仮定する。視差量と視差検出強度ないしは対応強度を反比例的に考える。視差ゼロ、すなわち両眼対応点で対応強度が最高になり、視差量の増加に伴って対応強度は減少する。これと融合を結びつけて考えると、視差についての対応強度が高いときは融合可能であり、対応強度が低くなると二重像になる、という単純な図式ができる。

この図式を言葉だけでなく、両眼対応ネットワークに再現するためには両眼対応だけの従来のネットワークでは不十分である。単眼刺激による知覚を成立させるための生理的基礎を仮定し、それを両眼ネットワークに導入する必要がある。こうしてできたのが図1のネットワークである。ここでは単眼刺激による知覚に対応するように左右の網膜像をゼロ視差を示す水平線上に2つのML・MRとして表現する (これを単眼基礎と呼ぶことにする)。左右網膜からの2つの斜線が交差するところが両眼対応Bである。融合とはBによる両眼像が1つ知覚される状態を仮定し、二重像とは2つのMによる単眼像がそれぞれ知覚される状態と仮定する。融合か二重像かが二者択一的であることから、両眼対応Bと2つの単眼基礎は相互抑制的であるはずである。そのためにはネットワーク線上で可能な連絡を仮定する必要がある。それが図1である。

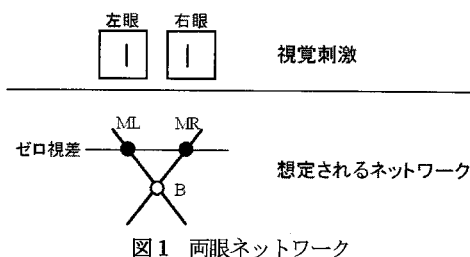


図1 両眼ネットワーク

視差量が小さいときに融合が可能なのは、十分な強度を持った対応Bが2つの単眼基礎Mを完全に抑制しているからである。このとき知覚される単一像はBに基づく両眼像である。一方、視差量が大きいときは対応Bが弱くなっているため、2つの単眼基礎Mを抑制できず、その結果として2つの単眼像すなわち二重像が知覚される。すなわち、ここで提案するのは、両眼系と単眼系との相互抑制で融合か二重像が決まるという単純なモデルである。

以上はこれまでに知られている視差量が小さいときだけ単一視され、視差量が増大すると二重像になるという事実に基づいて1つの仮定を設定し、両眼単一視の成立を説明しようとするモデルである。次の問題はこれを検証する具体的な方法である。

単眼像がどれだけの抑制を受けているかを知覚実験で示すことを考えればよい。すなわち両眼対応の強いときほど単眼像は消失しやすいと仮定する。実験では両眼像の類似性を操作し、検査刺激となる単眼像の累積知覚時間あるいは累積消失時間を測定することにする。両眼対応が強くなる両眼像が類似しているときほど、単眼像の消失時間が長くなることを示せば、両眼抑制モデルは支持され、もしそうならない例が出てくれば、このモデルは否定される。

このように考えると、必然的に両眼で融合が生じない視野闘争の刺激事態が必要になる。ここで問題にするのは、視野交替ではなく、単一の検査刺激の消失時間の長さである。消失時間が長いということは抑制を強く受けていると見なすことができる。

本研究では左右眼に正弦波縞を呈示し、縞の方位を独立変数とし、方位の差異が小さい刺激を視差検出強度が高いと仮定し、方位の差異が大きくなるにつれて、対応強度が減少すると仮定する。両眼方位視差 (binocular orientation disparity) を 0° から 90° まで変化させる。もう1つの要因として、両眼刺激の大きさの差異 (binocular size disparity) を独立変数とする。左右眼の刺激が等しい大きさのときに対応強度は高く、大きさが2倍、あるいは2分の1と異なるほど対応強度は減少すると仮定する。これら方位と大きさという2要因を組み合わせて、一眼の縞刺激を一定に保ち、それを検査刺激として、その刺激の累積知覚時間を測定した。消失時間を指標とすることも可能だが、検査刺激が消失している時間が相対的に長かったため、一時的に知覚される側を反応指標として採用することにした。

2. 実験 1

目的

方位および大きさの差異 (disparity) が両眼対応強度と対応していると仮定し、その強度に比例して単眼刺激の知覚が抑制されるかを累積知覚時間の測定を通じて検討する。

方法

被験者 著者の内、2名が刺激を観察した。被験

者は正常な視力 (矯正視力を含む) を有し、立体視についても正常であった。

刺激装置 視覚刺激の作成、呈示の制御、および累積知覚時間の計測には VSG2/5 (Cambridge Research Systems, co. ltd.) を搭載した PC (Hewlett-Packard 社製) を用いた。左右眼の視覚刺激はガンマ補正された1つの CRT ディスプレイ (EIZO FlexScan T761) 上に左右に分けて呈示し、それらを反射式ステレオ・スコープを用いて 57 cm の距離から観察した。CRT ディスプレイのリフレッシュ・レートは 100 Hz であった。実験は明室で行った。これらの刺激装置はすべての実験で同じものを用いた。

刺激 実験1で用いた刺激の模式図を図2に示した。左眼に検査刺激として、 0.67 deg/sec の速度で右方向に運動する垂直方位の正弦波縞刺激 (直径: 1.0° ; 空間周波数: 3.0 cpd; コントラスト: 20%) を呈示した。右眼には4段階の方位 (垂直から時計回りに $0, 30, 60, 90^\circ$) のいずれかを持つ正弦波縞刺激 (空間周波数: 3.0 cpd; コントラスト: 50%) を呈示した。これら右眼刺激は、方位が $0-90^\circ$ と変化すると、それに対応して運動方向が左から上へと変化した。運動速度は 0.67 deg/sec であった。方位差 0° で同じ方位の場合も運動方向が逆であるので、両眼視するとこれらは視野闘争が生じる (Paffen, Tadin, te Pas, Blake, & Verstraten, 2006)。各方位につき3段階の大きさ (直径 0.5, 1.0, 2.0°) を設定した。すなわち、検査刺激と比べ、2分の1, 1, 2倍の反対眼刺激を呈示した。

被験者の凝視を安定させるため、左右眼刺激の中心から右下に $43.0'$ の場所に十字形の凝視点を呈示し、刺激の周囲には直径 3.0° の融合円を呈示した。

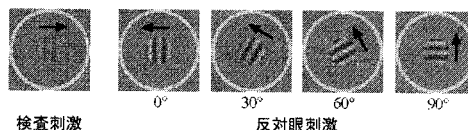


図2 実験1で用いた刺激の模式図

矢印は正弦波縞刺激の運動方向を示し、反対眼刺激下部の数値は検査刺激との方位差を示す。ここでは反対眼刺激の大きさが検査刺激と等しい (直径 1.0°) ものだけを示した。

手続き 被験者は凝視点を凝視し、ボタン押しにより試行を開始した後、左眼の検査刺激、すなわち右方向に縞刺激が動いて知覚されているときに、もう1つのボタンを押し続けた。これにより、観察時

間 30 秒中の検査刺激の累積知覚時間を測定した。全部で 12 の刺激 (方位: $0 - 90^\circ$; 大きさ: $0.5 - 2.0^\circ$) について 4 回繰り返し観察し, 観察の順序はランダムとした。

結果と考察

図 3 に各検査刺激と反対眼刺激との方位差について, 反対眼刺激の大きさごとに検査刺激の累積知覚時間の平均値を示した。反対眼刺激の大きさに関係なく, 方位差が大きくなるにつれて, 検査刺激の知覚時間は長くなる傾向を示していた。これは, 方位差が小さいときには反対眼刺激が検査刺激の知覚を抑制する効果が強く, 方位差が大きくなるほど, その抑制効果が弱くなることを示唆する。検査刺激と反対眼刺激との大きさの差異については, 検査刺激との大きさが異なるほど, 検査刺激の知覚時間が長くなった。これは, 検査刺激と反対眼刺激との大きさが等しいほど, 反対眼刺激が検査刺激の知覚を抑制することを示唆する。反対眼刺激の大きさと, 検査刺激と反対眼刺激との方位差を要因とする 2 要因の分散分析を行ったところ, 両要因に主効果が認められた (大きさ: $F_{(2,2)} = 62.83, p < .05$; 方位差: $F_{(3,3)} = 16.84, p < .05$) が, 交互作用は認められなかった。

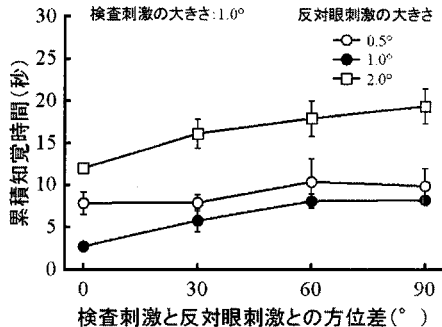


図 3 検査刺激と反対眼刺激との方位差に対する検査刺激の累積知覚時間

垂直の誤差棒は平均 $\pm$ SEM ($n=2$) を示す。

この結果は, 両眼抑制モデルについて肯定的であると言える。そこで次の段階の問題設定に意味が与えてくる。すなわち, この実験 1 で方位の同じあるいは異なる正弦波縞刺激を両眼に呈示して, 現象的には視野闘争を生じさせている場合においても, われわれは両眼対応を仮定した。このような考え方はまったくと言っていいほど, 特殊なものである。はた

して視野闘争を生じさせる両眼刺激に対して, 通常で立体視で仮定するのが常識であるところの両眼対応を, 同じように仮定できるのかという問題が出てくる。

3. 実験 2

目的

持続的凝視観察をすると立体視は視差が大きいほど累積消失時間が増加する。このことは両眼対応強度を直接反映していると考えてもよいだろう。そこで, 実験 2 では, 両眼不一致刺激間で両眼対応を仮定し, その強度を直接的に推定するために, 不一致刺激間で成立する立体視について累積消失時間を指標とした知覚実験を行う。

方法

被験者 著者 3 名が刺激を観察した。

刺激 実験 2 で用いた刺激の模式図を図 4 に示した。左眼に水平から時計回りに 30° の方位を持つ正弦波縞刺激 (直径: 1.0° ; 空間周波数: 3.0 cpd ; コントラスト: 50%) を呈示し, 右眼に水平方位の正弦波縞刺激 (直径: 1.0° ; 空間周波数: 3.0 cpd ; コントラスト: 50%) を呈示した。これら左右眼刺激は $16'$ の交差視差を持ち, 方位が異なるので視野闘争的な見えでありながらも手前に見えるという立体視が生じる。さらに付加刺激として, 右眼に左眼刺激と同方位でゼロ視差になる正弦波縞刺激 (直径: 1.0° ; 空間周波数: 3.0 cpd) を呈示した。左眼 1 刺激に対し, 右眼 2 刺激が重複するもので, Panum's limiting case の変形のひとつとみなすことができる。すなわち左眼刺激は右眼刺激 2 つと対応していると見なす。この右眼刺激のコントラストは $0 - 50\%$ のいずれかであった。 0% のときは左右眼 1 対 1 の立体視刺激である。

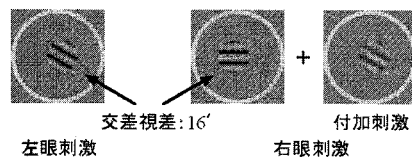


図 4 実験 2 で用いた刺激の模式図

手続き 被験者は凝視点を凝視し, ボタン押しにより試行を開始した後, 立体視が消失している間, 別のボタンを押し続けた。これにより, 観察時間 30

秒中の立体視の累積消失時間を測定した。各刺激条件について6回ずつ、ランダムな順序で観察した。

結果と考察

図5に各付加刺激のコントラストに対する立体視の累積消失時間の平均値を示した。付加刺激のコントラストが高くなるにつれて、立体視の累積消失時間が長くなった。すなわち、付加刺激のコントラスト上昇によって対応強度が弱くなったと考えられる。付加刺激のコントラストを要因とする1要因の分散分析を行ったところ、有意差が認められた ($F_{3,6} = 15.54, p < .005$)。

ここでは検査刺激の視差量が一定であったので、立体視の消失における凝視による視差検出系の順応は一定であると仮定できる。それにもかかわらず、付加刺激が存在するとき、そのコントラストの増加に従って立体視は長く消失していた。これは左眼刺激と右眼の付加刺激が対応することで、左眼刺激と水平方位の右眼刺激との立体視を抑制していることを意味する。線画刺激における Panum's limiting case の立体視の消失においても同様の結果が得られていることから、このような多重奥行き立体視では視差量の異なる奥行き面が相互抑制的であることと共通のメカニズムを想定することは可能である。

この事実から両眼方位視差を有し、しかも両眼水平視差を有する刺激においても、両眼ネットワーク上で両眼対応が成立すると仮定してよいだろう。その対応が通常のもうひとつの立体視を成立させる両眼対応から抑制を受けていると仮定することもできるだろう。

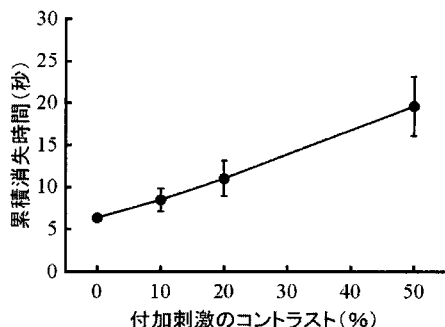


図5 付加刺激のコントラストに対する立体視の累積消失時間

垂直の誤差棒は平均±SEM ($n=3$)を示す。

4. 総合考察

実験1は視野闘争研究では代表的な正弦波縞刺激による左右眼の類似度を独立変数とした単眼像の消失実験である。静止状態では融合が生じる方位差 0° という刺激を反対方向に運動させることで、その他の方位差 $30, 60, 90^\circ$ 条件と比較することができた。その結果を両眼対応強度と関係づけて考える。

実験2では正弦波縞刺激の方位が両眼で不一致である場合にも立体視が可能であることを利用し、Panum's limiting case になるように、一方の眼の刺激を他方の眼の2つの縞刺激と多重対応させた。方位不一致刺激でも対応して立体視ができ、他の奥行の対応強度がコントラストにより増加すると、より強い抑制を受けることになり、立体視の累積消失時間が増加するという結果を得た。このことから、実験1の両眼の正弦波縞刺激が両眼対応するという仮定は根拠のあるものと見なすことができる。線画の Panum's limiting case で両眼対応強度を間接的に減少させると単眼像の累積消失時間が減少するという結果と本質的には一致する (Bingushi & Yukumatsu, 2005)。

視野闘争研究を全体的に考えてみると、歴史的には抑制理論は両眼単一視の説明を目指した理論であったが、Fox & Check (1966) によるブローブ検出の反応時間の研究から、両眼一致刺激においては単眼の優位時と同等となることから、抑制理論は支持されないこととなった。

一方、Julesz (1971) の random-dot stereogram による全体的立体視の研究から、両眼対応でも最終的に知覚される顕在対応と、知覚されない潜在対応が存在し、全体的立体視では視覚系が対応問題をどう解決するかが研究の重要な焦点となってきた。顕在対応による潜在対応への抑制が生じているという可能性もある。

このような流れから、融合理論は両眼視の2つの主要なテーマである、立体視と単一視で優位な理論である。しかし、単一視と二重像をどう説明するかでは不完全と言わざるを得ない。本研究は融合理論を基礎としネットワーク中に両眼対応と単眼基礎を置くという、両眼視の構造を仮定し、それらの間に抑制的相互作用という機能を仮定することで単一視を説明することを提案した。そして実験1の視野闘争と実験2の立体視における検討実験において、このモデルが支持される結果を得た。

知覚実験では本質的には理論を正しいと証明する

ことはできない。理論をテストする過程で、従来にはなかった刺激条件を設定することで、通常では融合と視野闘争という二者択一的、相互排他的な現象を関係づける可能性を示すことができると考えている。

この研究の意味を両眼視研究全体から考えてみたい。両眼視の問題はひとつには立体視である。これについては比較的良好に理解されてきたと言える。もうひとつが両眼単一視であり、本研究は従来の融合理論を延長した形で、両眼抑制モデルを提出した。このモデルは融合を説明するモデルであると同時に、視野闘争の強度についても説明できるモデルとなれる。両眼刺激がある限り、視野間で何らかの抑制が生じる。一眼に何か刺激があり、他眼に何も刺激がない条件では、凝視によりわずかに刺激の知覚が消失する。この現象は Troxler 効果と呼ばれる。このとき両眼対応はできないので、単眼基礎 M への抑制はない。反対眼にもっと両眼対応ができやすい刺激が呈示されたときに、視野闘争は起こる。この考え方を究極まで押しすすめると、両眼不一致刺激よりも両眼一致刺激、すなわち両眼立体視され、融合される刺激で最も強い抑制が生じていることと考えるのが自然である。

そもそも視野闘争が生じるのはなぜかという、もっと単純で本質的な問題に対する答えを両眼抑制モデルは提供することができる。両眼対応が何らかの形でできると両眼系には単眼像を抑制する作用が生じる。両眼対応に融合が可能なほどの対応強度があれば、融合する両眼像を成立させるが、そこまでに至らない程度の両眼対応の場合は、両眼像が知覚されず、二重像あるいは視野闘争を引き起こす出力として視野交替メカニズムを起動させるのだろう。

知覚されるのは右眼か左眼かという視野交替の実験は、意識研究の関連から盛んに行われている。累積消失時間から推測される抑制の強度と知覚交替のタイミング制御は関係があるだろうが、未解決の分野である。視野闘争研究ではこれらが主流のテーマとなっている現在、本研究のように累積消失時間という指標を用いた研究は少ない。かつて Kaufman(1963)は、一方の眼に水平線分を 1 本呈示し、他方の眼に垂直線分 2 本を呈示し、両眼の交差点付近の視野抑制の局所的な広がりについて検討した。その結果、抑制は方位の異なる線分刺激の交差点で最大で、距離の増加とともに減少することが示された。しかし本研究のように 1 つの刺激が全体として受ける抑制の強さを検討したものではない。一

定の検査刺激が反対眼の刺激との類似度によりどれだけの抑制を受けるかという強度に焦点をあてた研究は、融合のモデルを検証しようという目的にかなっている。

本研究では両眼単一視という歴史的な問題に取り組んだ。それに対する理論的な説明を試みる過程で、両眼像の類似度に依存した両眼対応強度によって視野闘争は規定されるという新しい考え方を示した。

5. 引用文献

- Bingushi, K., & Yukumatsu, S. (2005). Disappearance of a monocular image in Panum's limiting case. *Japanese Psychological Research*, 47, 223-229.
- Fox, R., & Check, R. (1966). Binocular fusion: A test of the suppression theory. *Perception & Psychophysics*, 1, 331-334.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. University of Chicago Press.
- Kaufman, L. (1963). On the spread of suppression and binocular rivalry. *Vision Research*, 3, 401-415.
- Nikara, T., Bishop, P., & Pettigrew, J.D. (1968). Analysis of binocular correspondence by studying receptive fields of binocular single units in cat striate cortex. *Experimental Brain Research*, 6, 353-372.
- Ogle, K. N. (1962). The optical space sense. In H. Davson (Ed.) *The eye*. Vol. 4. New York: Academic Press. 211-432.
- Paffen, C. L., Tadin, D., te Pas, S. F., Blake, R., & Verstraten, F. A. (2006). Adaptive center-surround interactions in human vision revealed during binocular rivalry. *Vision Research*, 46, 599-604.
- Wheatstone, C. (1838). On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision, Part the first. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 128, 271-394.