

3次元知覚における手がかり間の相互作用

塩 入 論

千葉大学工学部

〒260 千葉市弥生町1-33

1. はじめに

視覚処理の初期においては、輝度、色、動き、両眼視差など異なる属性は、異なる処理経路で行なわれているといわれる。知覚としてひとつの整合的な視覚像を形成するためには、異なる処理経路を経た情報が再び統合される必要があることになる。

異なる経路により処理された情報の統合過程を解明するための方略のひとつとして、3次元形状の知覚にかかわる手がかりの間の相互作用の検討が考えられる。奥行きや立体形状を伝達する視覚情報として、左右網膜像の差に基づく両眼視差のほかに、陰影や輪郭線の形状など、単一画像に基づく輝度情報の処理にかかわる手がかり(画像性手がかり)があり、我々は、それらをひとつの整合的な奥行きとして知覚する。本稿では、両眼視差と他の画像性の手がかりの間の、3次元形状の知覚における相互作用の検討を目的とする。

3次元形状知覚の手がかりの間の相互作用に関する過去の研究の示すところは一定でなく、両眼視差の奥行き情報が優位となる場合^{1)、2)}、単眼のものが優位となる場合³⁾⁻⁵⁾、両者の足し合わせが見られる場合⁶⁾、さらに独立な処理がなされていると考えられる場合⁷⁾⁻⁹⁾と、多様である。

両眼視差の奥行きが知覚されない例としては、人の顔を刺激としたときには、両眼視差の情報を通常と逆転し、凹みのある面を示すようにした場合でも、そのような不自然な凹んだ顔は知覚されずに、凸の面を持つ普通の顔として知覚

される。また、他の多くの日常的なシーンについても同様といわれ、これは幾何学的な図形が両眼視差の反転に伴い奥行きも反転して知覚されるのと対照的である。親近性の強い刺激図形に対しては、両眼視差の逆転による奥行きの反転が生じにくいことから、一般に、図形理解に係わるような高次の視覚処理が両眼立体視の奥行き知覚に影響するためと説明される。

しかし、最近の報告¹⁰⁾では、画像の持つテクスチャーによる奥行きの効果を押さえることで、両眼視差を逆転することにより、顔刺激に対しても凹の面が知覚されることがわかる。これは、比較的初期のレベルにおける異なる処理過程の間の相互作用が最終的な3次元知覚に無視できない寄与を与えることを意味し、そのような相互作用の検討の重要性を示す。

2. 両眼視差と単眼性の奥行きの相互作用検出における問題点

両眼視差と陰影や輪郭線など単眼性の奥行き情報の相互作用を考えると、ひとつの問題は、単眼性の奥行き情報を持つ刺激が、それが整合的である条件とそうでない条件でともに両眼立体視に対し適切な刺激となっていなければならない点である。例えば図1は、両眼視差と遮蔽(occlusion)の奥行きが混在する刺激であるが、図1 aと bを左右眼で観察し融像すると(右側の像を右眼、左側の像を左眼で見る)、両眼視差と遮蔽の持つ奥行きは一致する。それに対し、図1 bと cの融像では両眼視差は逆転し、両眼視差と遮蔽は奥行きについて不整合的である。

整合刺激では（図1 aと図1 bの組）では鮮明な奥行きが感じられるのに対し、不整合刺激（図1 bと図1 cの組）では両眼立体視による奥行きはほとんど感じられず、遮蔽の示す奥行き

みが知覚される。これをもって、ここでは、遮蔽の奥行きが両眼立体視の奥行きに打ち勝ったと言えるだろうか。

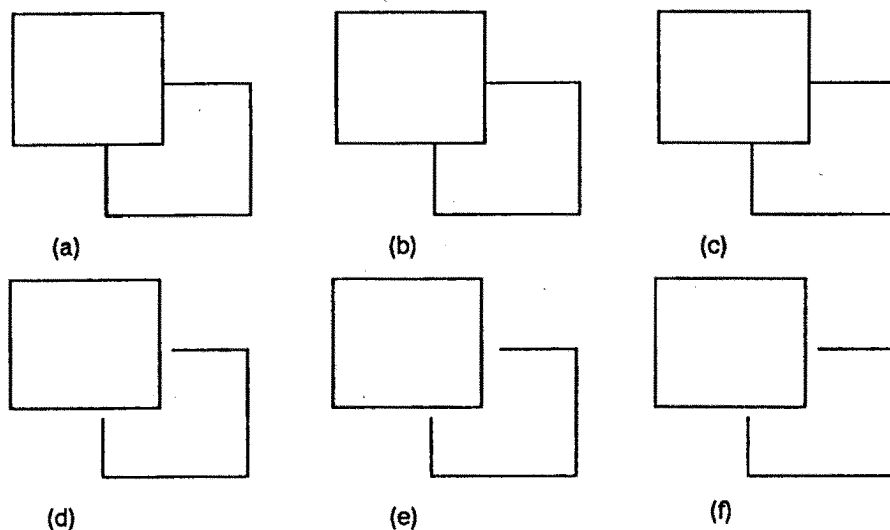


図1 両眼視差と遮蔽、整合刺激（a. 左眼 b. 右眼あるいは、d. 左眼 e. 右眼）と不整合刺激（b. 左眼 c. 右眼あるいは、e. 左眼 f. 右眼）

いま、図1 a、b、cに変わり、図1 d、e、fのような刺激を考えるとd、e（整合）、e、f（不整合）いずれの組の両眼融合においても、両眼視差による奥行きが知覚される。図1 a、b、cと図1 d、e、fの差は、T交差点での線の繋がりであり、それは遮蔽の知覚にはほとんど効果がないが、両眼立体視には大きな影響を与える。図1 b、cの不整合刺激で、両眼立体視による奥行きが知覚されにくいのは、遮蔽の持つ奥行きのためというより、両眼視差にとって不適切な刺激となっているためであるとの考えを支持する。

また、図2においては、透視図法による奥行きと、両眼視差の混在する刺激となっている。図2 a、bとb、cいずれの組でもそれほどはっ

きりした両眼立体視は見られないが、図2 a、bは、両眼視差と透視図法の奥行きが一致しており、それらの方向が逆の図2 b、cより、あるいは強い奥行きが感じられる。しかし、図2 d、e、fの様に局部的に視差が明確になるような情報を加えると、整合、不整合いずれの場合も両眼視差の奥行きが（少なくとも局部的に）知覚される。ここでも、両眼視差の奥行きが鮮明でない理由の一つとして、刺激図形の両眼立体視に対する適切さの問題がある。

全く同様に、図3に示すテクスチャー勾配と両眼視差の混在刺激でも、局部的な視差が明確になることにより、両眼立体視の奥行きが鮮明となる効果が観察される。

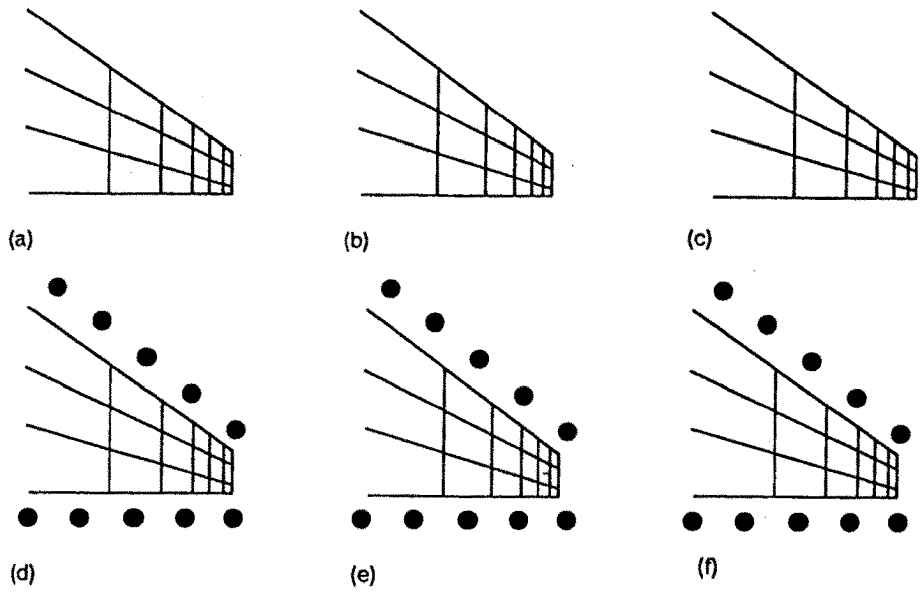


図2 両眼視差と透視図法、整合刺激 (a. 左眼 b. 右眼あるいは、d. 左眼 e. 右眼) と不整合刺激 (b. 左眼 c. 右眼あるいは、e. 左眼 f. 右眼)

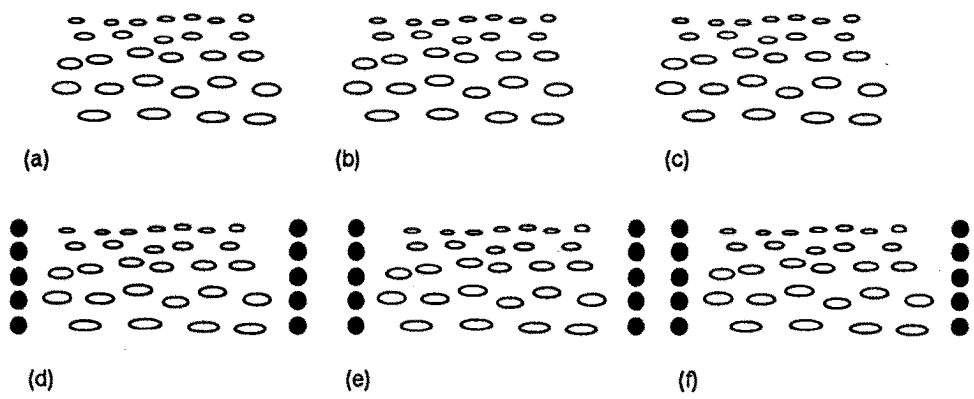


図3 両眼視差とテクスチャー勾配、整合刺激 (a. 左眼 b. 右眼あるいは、d. 左眼 e. 右眼) と不整合刺激 (b. 左眼 c. 右眼あるいは、e. 左眼 f. 右眼)

上に挙げた3例は、両眼立体視のメカニズムに適切な刺激を用いることで、単眼性の奥行き情報部の整合性に係わらず、常に両眼立体視の奥行きを観察することができることを示す。両眼視差の奥行きの鮮明さが何に依存するかは明らかではないが、これらの例の示すところは、両眼視差による奥行きが局所的な視差量の変化を捕える（つまり微分的な）メカニズムであるとの考え^{11),12)}と一致する。

両眼立体視と3次元知覚にかかわる他の手がかりとの間の相互作用を問題とするときは、刺激中の両眼視差から、常に奥行きが検出されるか、少なくとも融像していることが重要であろう。以下に述べる実験では、刺激として、両眼立体視に最も適切と考えられるランダムドットステレオグラム³⁾を用い、両眼視差を画像性の奥行き情報と独立に与えることで、上記の問題点は避けている。

3. 両眼視差と陰影

まず、単眼性の奥行き手がかりとして陰影を取り上げ、両眼視差との相互作用を検討する実

験について述べる。両眼視差と陰影の持つ奥行き情報を独立に変化させるために、陰影を与える輝度分布(陰影輝度分布)を含むランダムドットステレオグラムが、刺激として用いられた。ここでは、3次元空間で奥行き方向にサイン波状に変化する面(以下、サイン面)を仮定し、その形状をランダムドットステレオグラムにより形成した(380(水平)×200(垂直)のドットマトリックスで、視角で13.6°×6.5°、各画像の中心に円形の固視点、外側に長方形の枠がある)。

陰影輝度分布は、ステレオグラム中の白ドット輝度を滑らかに変化することで実現された。ここでは、平行光が完全拡散面に照射する場合の一次反射のみで面の輝度が決定されるとして、上述のサイン面に対する空間的な輝度変化を算出した。

図4は、実験に用いられた陰影輝度分布を示す。仮定されたサイン面に向かって奥行き方向の軸から30°左方に傾いた照射角で面が照らされた条件に対し算出された反射輝度が、各水平位置に対して示されている。

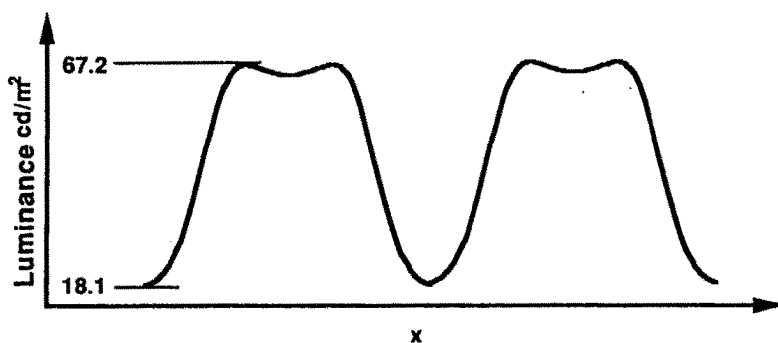


図4 陰影輝度分布

ここで得られる輝度分布は、周期関数となり、その位相を変えることは、仮定されたサイン波状の面の水平位置が移動することに対応する。この輝度分布の位相は、ドットの位置を変えず

に制御することができるので、両眼視差により伝達される奥行き情報と陰影輝度分布により伝達される奥行き情報を同一刺激の中で独立に変化させることが可能である。以下陰影輝度分布

の位相 0° は、両眼視差の持つ奥行き情報と一致した条件を差す。

図5に刺激の例を示す(画質は実際の刺激に比べ大きく劣化している)。陰影輝度分布の位

相は 90° の不整合刺激の例であり、両画像が両眼融像されたとき、手前に凸の部分に陰影輝度分布の暗い部分がくる。

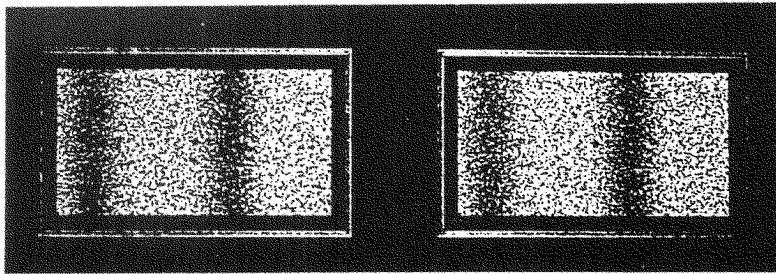


図5 陰影輝度分布を持つランダムドットステレオグラム不整合刺激の例

ここで、両眼視差の伝える奥行き情報と陰影伝える奥行き情報の相互作用を定量的に評価するために、両眼立体視の形成に要する時間に注目した実験について述べる。両眼立体視の形成時間に対応する応答時間は、以下の手順で求められた。刺激は、上述の陰影輝度分布を持つランダムドットステレオグラムであり、両眼視差に関して2種類が用意された。ひとつは、奥行き変化があるサイン面(図5)、もうひとつは、奥行きがCRT画面と同一の平面であり、被験者はいずれか一方の提示に対し、それがサイン面であるか平面であるかの判断を求められた。

判断は、マウスのボタンを押し分けることによりなされ、刺激の提示開始からボタンが押されるまでの時間が応答時間として測定された。判断には両眼立体視による3次元知覚が要求されるため、応答時間は、両眼立体視形成時間を反映することになる。したがって、陰影輝度分布の位相が整合的および不整合的な条件で応答時間を測定し、それらを比較することから、陰影の持つ3次元情報の両眼立体視形成への影響が検出される。

陰影輝度分布の位相として、 0° から 315° まで 45° おきに8の位相を選び、陰影のない条件を加えた9条件が一つのセッションで使用され

た(それぞれの条件にサイン面と平面があるので刺激の種類としては18であり、それらは各セッションで、それぞれ4回ずつ提示された)。

図6に、6名の被験者の応答時間の平均値を陰影輝度分布の位相の関数として示す。左端のNは、陰影無しの条件を表す。白丸は、サイン面に対する応答、黒丸は平面に対する応答である。各データ点は各被験者8セッション(32試行)から求められたものであるが、誤答した試行の応答時間は省かれた(誤答率は、平均でサイン面に対し2.5%、平面に対し0.7%であった)。誤差棒は被験者間の標準誤差を示す。

サイン面に対する結果は、明らかに、陰影輝度分布の立体視形成時間への影響を示している。陰影輝度分布の位相が 0° 近傍で応答時間は短く、 90° から 270° と位相差が大きいときに長くなっている。陰影の伝達する3次元形状情報と両眼視差のそれが一致する条件では、不一致の条件に比べ、立体視の形成に要する時間が短いことがわかる。

平面に対しては、陰影輝度分布の位相にかかわらずほぼ一定の応答時間が得られた。陰影の与える奥行き形状は常にサイン波状の面であるため、両眼視差が平面を示すときは、位相にかかわらず不整合的な刺激になることから、予想

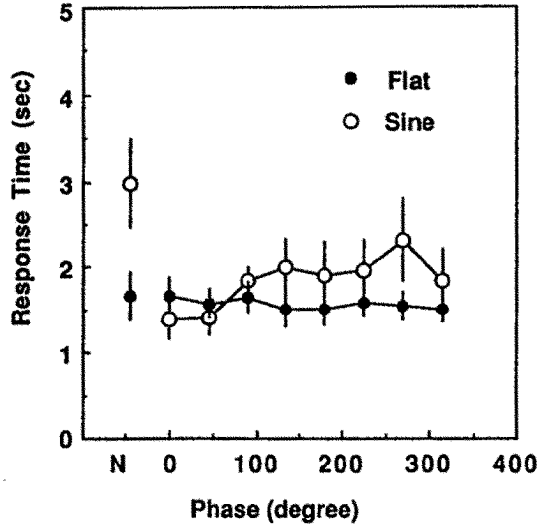


図6 陰影輝度分布の位相と両眼立体視形成時間

される結果といえる。

4. 両眼視差と輪郭線の形状

上述のように陰影は、両眼立体視の形成時間に影響を与えるが、他の単眼性の奥行き手がかりについても同様であろうか。ここでは、ふたつめの画像性手がかりとして、輪郭線の形状をとりあげ、両眼視差との相互作用を検討した。

ここでもランダムドットステレオグラムが刺激として用いられたが、陰影輝度分布は与えられず、それに代わり、各画像の上下のエッジがサイン波状の形状にされた(図7)。このエッジの形状は、サイン面(3次元空間で奥行き方向にサイン波状に波打つ長方形)を下方45°から観察したときの網膜像にほぼ対応する。

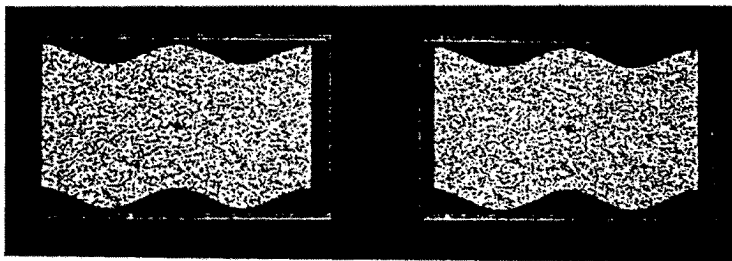


図7 輪郭線がサイン波状のを持つランダムドットステレオグラム不整合刺激の例

このエッジのサイン波(輪郭線サイン波)は、そのみで3次元的な形状の知覚をもたらしていることは、図7をみることから明らかである。

輪郭線サイン波の位相を変えることにより、両眼立体視の奥行きと独立に輪郭線の形状に基づく奥行きを変化することができる。ここでは、

両眼視差の奥行きが手前に凸の部分で、輪郭線サイン波が山となる条件を位相 0° とした。陰影輝度分布の場合と同様に、輪郭線サイン波自体の両眼視差は、ドットと同一とした。

手法は、陰影の実験と全く同様で、両眼視差の奥行きがサイン面を示すか、平面を示すかの判断に要する時間を測定した。位相条件は、 0° から 315° まで 45° おきの位相と輪郭線が直線の9条件が用いられた。

の9条件が用いられた。

図8は、各位相条件に対する、5名の被験者の応答時間の平均値を示す（各被験4セッション、16試行）。白丸がサイン波に対する応答時間、黒丸が平面に対する応答時間で、誤差棒は被験者間の標準誤差を示す。左端のNという点は、輪郭線が直線の条件を表す。

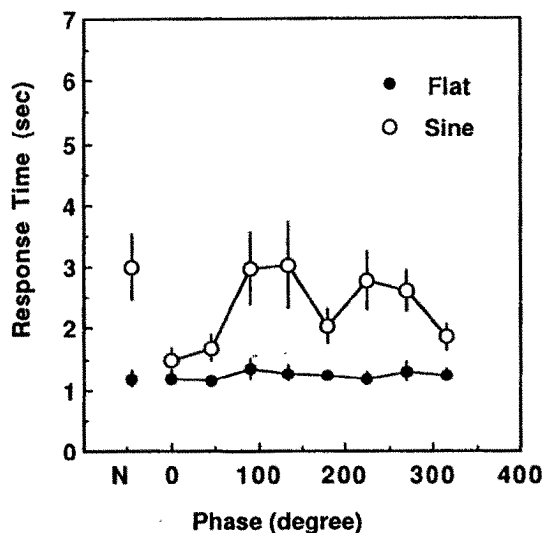


図8 輪郭線サイン波の位相と両眼立体視形成時間

図8より、輪郭線サイン波の位相が応答時間に影響を及ぼすことは明らかである。位相が 0° および 180° の条件に顕著に応答時間が短くなっているが、前者は両眼視差の奥行きが手前に凸の部分が輪郭線サイン波の山と一致する条件、後者は、逆に、輪郭線サイン波の谷と一致する条件である。この両条件ではいずれの場合も、両眼視差の奥行きと、輪郭線の伝える奥行きは整合的に観察されるとの事実と一致する。前者においては、画像の上部のエッジが下部のエッジより遠方に見え、面として上向きに知覚され、後者ではそれが逆転し、下向きの面が知覚される。

いずれにしても、輪郭線の形状の持つ奥行き情報と、両眼視差の奥行き情報が整合的である条件では、両眼立体視の形成時間が短いことが示されている。

平面に対する応答時間は、すべての位相条件に対してはほぼ一定であり、輪郭線の形状の効果は見られない。さらに、輪郭線が直線である場合も同程度の応答時間を示すことから、輪郭線の形状は平面の知覚に対してほとんど寄与していないことがわかる

5. おわりに

前述のように、ここで述べた実験ではランダムドットステレオグラムを使っており、両眼立体視の形成メカニズムに対する刺激は、他の手がかりにより影響されていないと考えられるため、この両眼立体視形成時間への陰影輝度分布や輪郭線の影響は、それらの持つ奥行き情報に起因するといえる。つまり、両眼立体視の形成に要する時間は、陰影あるいは輪郭線の形状といった他の3次元手がかりに依存することにな

る。

さらに考えを進めると、陰影や輪郭線の形状の伝える3次元情報は、両眼視差による3次元情報に先立ち処理されていることになる。初期視覚において両眼視差から3次元形状を検出する過程が、他の処理と独立であるならば、単眼性の奥行き両眼立体視形成時間への影響は、異なる3次元手がかりの統合過程を介してなされると考えられる。一つの可能性として、両眼立体視の形成のメカニズムは、陰影や、輪郭線など単眼網膜像に基づく3次元形状知覚を参照しながら、両網膜像の対応付けを行っていると考えられる。日常生活においては、両眼視差の奥行き情報が独立して存在していることはなく、他の手がかりが複雑な対応問題を解くうえで役立っていることは当然予想される。

ここで得られた所見が、ランダムドットステレオグラムのような特殊な刺激にのみ当てはまるのか、より一般的な刺激についても同様であるのかとの間に対し解答していくことは、今後の課題であろう。

文献

- 1) H. H. Bulthoff & A. Mallot: "Integration of depth modules: stereo and shading", *Journal of Optical Society of America*, **A5**, 1749-1758, 1988
- 2) P. C. Smith & O. W. Smith: "Vertical perception of cylindricality: a problem of depth discrimination and object identification", *Journal of Experimental Psychology*, **62**, 145-152, 1961
- 3) J. I. Yellott & Jr. L. Kaiwi: "Depth inversion despite stereopsis: the appearance of random-dot stereograms on surfaces seen in reverse perspective", *Perception*, **8**, 135-142, 1979
- 4) W. M. Youngs: "The influence of perspective and disparity cues on the perception of slant", *Vision Research*, **16**, 79-82, 1976
- 5) K. A. Stevens & A. Brookes: "Inregrating stereopsis with monocular interpretations of planer surfaces", *University of Oregon Technical Report*, CIS-TR-86-05, 1986
- 6) B. A. Doshier, G. Sperling & S. A. Wurst: "Tradeoffs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure", *Vision Research*, **26**, 973-990, 1986
- 7) B. Julesz: "Foundation of cyclopean perception", Chicago: University of Chicago Press, 1971
- 8) P. Cavanagh: "Reconstructing the third dimension: interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **37**, 171-195, 1987
- 9) P. Cavanagh & Y. G. Leclerc: "Shape from shadows", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15**, 145-152, 1989
- 10) A. van den Eenden & H. Spekreijse: "Binocular depth reversals despite familiarity cues", *Science*, **244**, 959-961, 1989
- 11) S. M. Anstis, I. P. Howard & B. Rogers: "A Craik-O'Brien-Cornsweet illusion for visual depth", *Vision Research*, **18**, 213-217, 1978
- 12) B. Gillam, T. Flagg & D. Finlay: "Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereopic processing", *Perception & Psychophysics*, **36**, 559-564, 1984