

両眼視 3次元表示における”隠し味”

出澤 正徳 (理化学研究所)

Abstract: In the 3-D space perceptual function of human visual system, occlusion cue plays one of the important roles. Two types of occlusion cue in the binocular fusion were postulated and investigated by newly discovered 3-D illusion. In the first type, visibility of the occluded objects is changed at the border where they passing beyond the occluding object contour and called as contour occlusion. In the second type, visibility of the occluded object changed at where the occluded object passing through the face from the outside space to the inside space of the occluding object. These newly postulated and clarified occlusion cues can be applied for stereoscopic display of 3-D objects effectively and should be called as "Hidden Taste".

Keywords: 3-D illusion, illusory surface, illusory solid, contour occlusion, bulky occlusion, binocular fusion

1. はじめに

人間は視覚を通じて極めて多くの情報を獲得しており、視覚システムは、脳(情報処理システム)への最も重要な情報入力手段となっている。したがって、人間と人間のコミュニケーションにおいてはもちろんのこと、人間と情報システムとのコミュニケーションにおいても、視覚が際だって重要な役割を果たしている。特に、人間が3次元の環境中で柔軟に活動できるのは視覚システムの3次元知覚機能に依存するところが大きい。そして3次元空間の知覚には、両眼視差、陰影、隠蔽、テクスチャー、パースペクティブ、運動視差等を手がかりが重要な役割を果たしている[1], [2], [3]。人間に対して3次元情報を効果的に提示するにはこれ

らの手がかりをうまく利用することが必要とされる。より望ましいヒューマン・インターフェースの実現には人間の感覚システムの特性、特に視覚システムについての理解を深めることが不可欠である。

錯視現象は脳内での視覚情報処理過程のメカニズムの一端がマクロな形で表出されたものであり、そのメカニズムを探る上で極めて有力な道具となる[4], [5], [6], [7]。また、絵画や建築などにおいても、古くから、それぞれの分野におけるスペシャリストによって、ある場合には無意識的に、またある場合には意識的に、しかも巧妙に利用されている。これら錯視現象については古くから多くの報告があるが、その多くは単眼視でも知覚されるものである。最近、両眼視による錯視

"Hidden Taste" in 3-D Stereoscopic Display
IDESAWA Masanori (RIKEN: The Institute of Physical and Chemical Research)

現象についての報告も多く見受けられる[4], [5], [6]。著者は、3次元の表面に沿って部分的に与えられた両眼視差の手がかりのみから、実際には視覚的刺激が全く存在しない部分にも3次元表面(含曲面)が知覚され、それらの間での干渉も知覚されるという新しい錯視現象を発見した(図1)[8], [9]。一つの解釈として、脳の中において視覚を通じて入力された像から形成される3次元的構造の不完全性を補い、また内挿なども行って生態的に無理を生じない3次元モデルを構成しようとするメカニズムが存在し、その結果3次元の表

面およびそれらの交差などが知覚されているものと考えられる(図2)。この錯視現象を利用し、いくつかの新しい知見が得られつつある。閉じた部分空間としての立体の知覚や両眼視に特有な透明錯視現象が見いだされている[9]。そして両眼視による3次元空間の知覚においては隠蔽の手がかり(occlusion cue)が極めて重要な役割を演じていることが確認された。

そして従来からの両眼視による3次元表示においては、両眼対応のみが大切であるかのように考えられているが、部分空間としての立体の知覚においては両眼

非対応部分の存在が極めて重要であることが、また、表示したい対象物のみではなくそれに隠蔽されている対象物をも提示することが極めて重要であることが明らかにされた。まさに”両眼視3次元表示における隠し味”ともいうべきものである。

本稿では、新発見の両眼視による3次元錯視現象と2つの型の隠蔽手がかりについて紹介し、より効果的な両眼視による3次元表示法の開発に役立てたい。

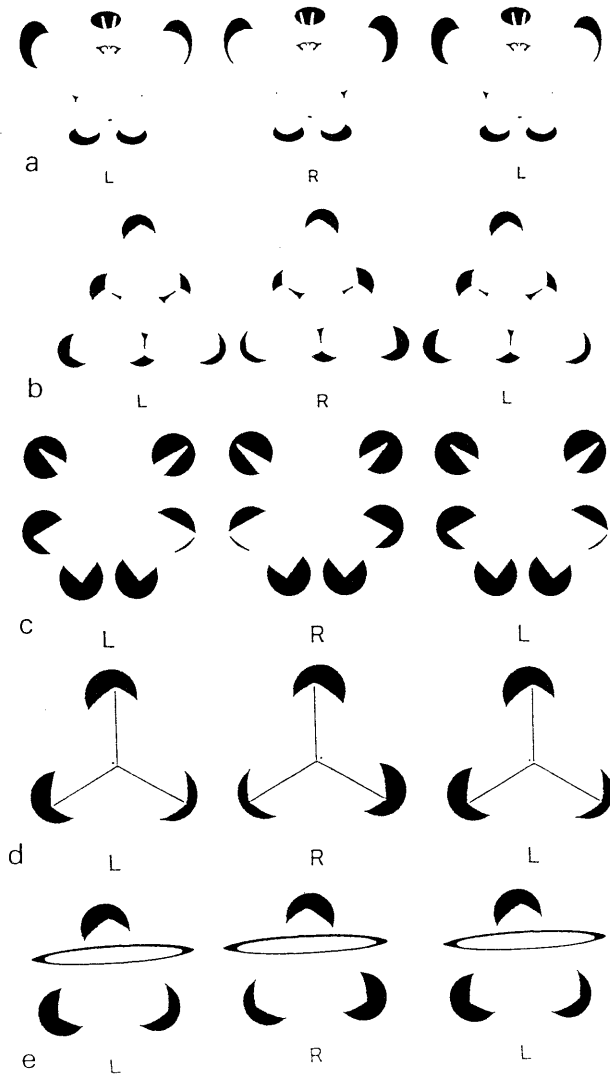


図1. 両眼融合における3次元錯視面の知覚例{(L:左眼画像、R:右眼画像:右と中央または左と中央の2つの図を寄り目にして下に示されたLとRの文字が重なり合うようにして観察すると錯視物体が浮き上がって知覚される)、(a)チョウ、(b)この顔の上にどんなツラ(面)が見える、(c)2枚の3角形状錯視面とそれらの干渉:注意深く観察すると錯視面同士の間での隠蔽関係が、さらにはそれらが交差する辺りに交線が知覚される。(d)1/8球状錯視曲面と物理的視覚刺激との干渉:線状刺激、点状刺激との干渉、(e)1/8球状錯視曲面が円環状物理的視覚刺激の環の中を通過し、円環の方が奥側となる周辺では錯視面が透明に知覚される。}

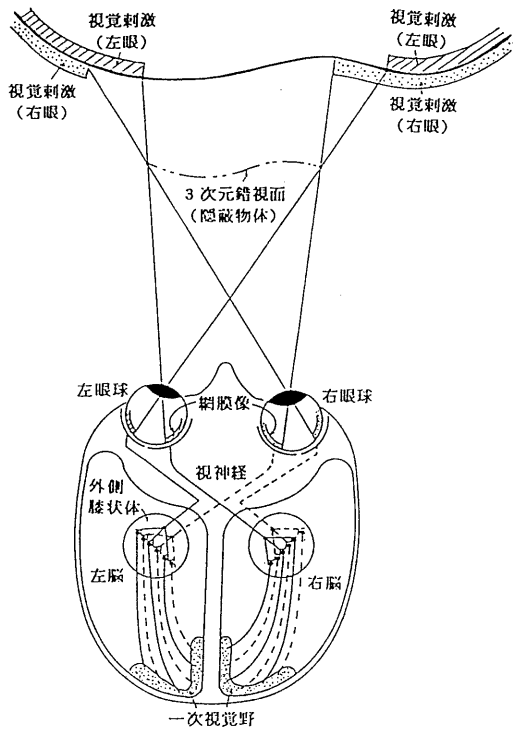


図2. 3次元錯視面知覚の概念図 {両眼にそれぞれ与える視覚的刺激的の3次元的矛盾が解消されるように視覚的的刺激が全く無い位置に錯視表面が知覚される}

2. 両眼視による3次元錯視現象[8], [9], [10]

2-1. 両眼立体視による3次元錯視面の知覚

両眼視による3次元対象の知覚については、Jueszがランダム・ドット・ステレオグラム[11]により両眼の画像の対応点を脳の中で計算していることを示し、そのデモンストレーションが余りにも見事であったためか、視覚機能の工学的実現とその応用を図ろうとするマシン・ビジョン分野の研究者の多くが「3次元対象知覚の工学的実現における課題は両眼対応がすべてである」かのように誤解をしたのは大変残念なことであった。

図1に示した新発見の3次元錯視現象では隠蔽の手がかりが重要な役目を果たしている。図2に隠蔽と3次元錯視面の知覚の概念を示した。左右両眼で観測した時に、左眼、右眼のそれぞれに視覚的的刺激が与えられると、視覚的的刺激が全く無い部分に3次元錯視面が知覚される。これは、人間の視覚システムが視覚的的刺激が欠けて部分を隠蔽する何ものかが存在していると知覚し3次元的矛盾を解消し、生態的に無理の生じない状態にしているためと考えられる。

図3は錯視立体の知覚の例であり、円錐(a)およびいくつかの円筒面、円錐面の組合せとして構成された独楽が知覚される。立体、特に曲面を有する立体の知覚においては、図4にその概念図を示してあるように物体の輪郭線が両眼で対応しない状態が生ずる。この左右対応しない領域の存在は曲面を含んだ立体(部分閉空間)の知覚に極めて重要な役割を果たしている。

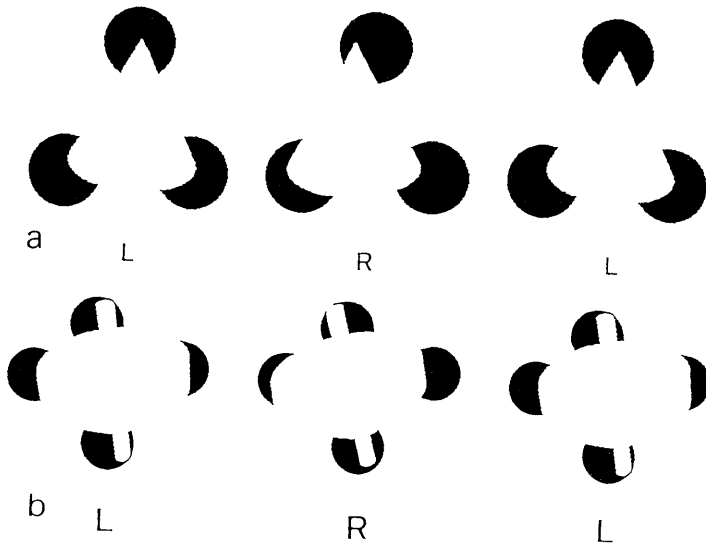


図3. 錯視立体の知覚の例 {L: 左眼、R: 右眼、(a) 円錐体の知覚、(b) 独楽、単なる厚さのない曲面ではなく、体積を有する閉じた空間が知覚される}

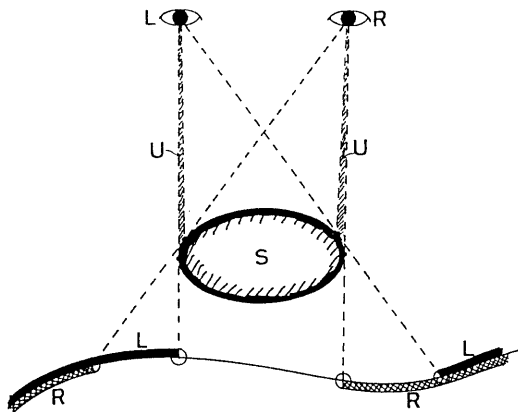


図4. 錯視立体知覚の概念図 {L: 左眼、R: 右眼、輪郭が左右対応せず、対応しない領域(U)が知覚される立体(S)表面上に存在するが特徴的}

図3に示した錯視立体の知覚現象は、我々人間の視覚システムには、この様な非対応部分の処理を行うメカニズムが存在していることを示唆している。

2-2. 3次元錯視面の干渉

上記の様に知覚される3次元錯視面は、互いに干渉し合い隠蔽や交差、さらには適当な幾何学的拘束条件を付加することにより、変形されたり、透明感が生じたりすることが見いだされた。

図1(b)に錯視面同士の隠蔽を示すステレオグラムを示した。注意深く観測すると重なり合った部分では、後方に位置する錯視面の輪郭が手前側に位置する錯視面で隠蔽され知覚されず、手前側となる錯視円板の輪郭線のみが知覚される。これは我々の視覚システムには、単に、錯視面を知覚するのみでなく3次元空間における配置構造をも知覚するメカニズムの存在を示唆している。

さらに、驚くべきことには図1(c)にその一例を示したように、3次元空間内で錯視面同士が交差すると、交差する位置に交線が知覚されるという現象が発見された。このように知覚される3次元錯視面は、3次元幾何学的拘束(物理的な視覚刺激)を与えると、錯視面の知覚が視覚過程により生態的に無理が生じない(エネルギーが少なくなくて済む?)ように、錯視面が変形して知覚されたり、錯視表面の一部が透明な状態になることが見いだされた。図1(d)では錯視面の3個の頂点より出発し、それらの中心点に向か

う線分を加え、さらに、1/8球面の中心位置に点を与えたものである。球面の中心部に与えた点を取り去ると、線分刺激によって変形された3個の円錐の片割れのような曲面が知覚されるが、1/8球面中心に与えた点の影響により、球面境界と球面中心点とを含む3個の扇状面分が交差しているように知覚される。また、図1(e)では、1/8球状面に、ちょうどそれを囲むリング状の視覚刺激を加えたものである。単眼視では錯視面の手前にリング状パターンが存在しているように知覚されるが、これを立体視すると、1/8球状錯視面はリングの中を通過しているように知覚され、さらにリング状パターンが錯視面の後方となっている部分に注目すると、その隣接領域においては、錯視表面が透明であるように知覚される。この場合、透明感はその隣接領域のみに限定され、後述する霧状透明感(translucent)に相当する。

2-3. 透明な3次元錯視面の知覚

両眼視に本質的な透明錯視現象が発見された。これらは、隠蔽される視覚的刺激的の可視性に深く関連している。我々人間の視覚システムは閉じた領域(閉じる傾向にある)に面を知覚する傾向を有し、開いた領域には面を知覚しにくい。隠蔽される視覚的刺激的の可視性を不透明な錯視表面の知覚におけるのと全く逆にして、錯視表面が知覚される側で可視性が1となり、外側で0となるように表示した場合には、クリスタル状透明(crystal transparency)と呼ぶ透明なガラス状対象が知覚される(図6)。錯視面の内外での可視性を中間的な状態にした場合には半透明(semi-transparent or diaphanous)と呼ぶクリスタル透明に比べてやや軟らかい印象の透明感が知覚される(図7)。両者とも、錯視面プロープによって透明の状態を調べてみると(図6(b), 図7(b))、いずれも全面にわたって透明であることが確認された。

前に霧状透明(translucent)と呼んだ透明感であるが、本来不透明であるべき表面の向こう側に物理的な視覚刺激が知覚され、不透明な表面が存在したのでは3次元構造に矛盾が生じるが、これを解消し生態的な無理が小さくなるように、視覚システムにおける3次元構造の知覚過程において、その視覚的刺激的の近傍の表面が透明であると知覚していると考えられる。この場合についても、同様に透明状態を錯視面プロープを用いて調べてみると、物理的な視覚刺激の近傍では透明であるが、離れるにしたがって、不透明になってゆくことが確認された。

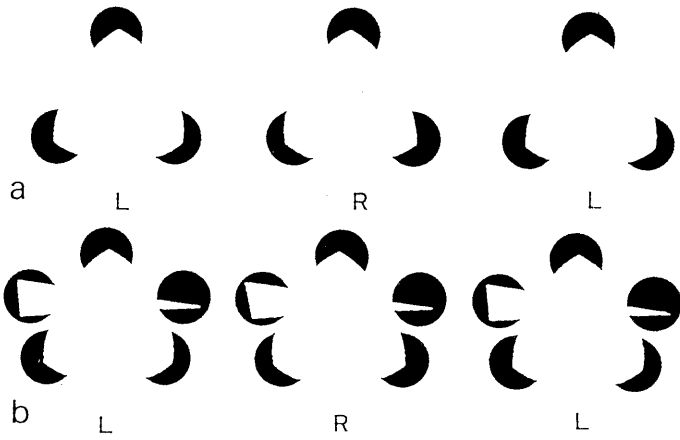


図5. 不透明錯視面と錯視面プローブによる不透明面の確認 {L: 左眼、R: 右眼、(a) 1/8 不透明錯視球面、(b) 3 角形状錯視面プローブによる不透明錯視面の確認}

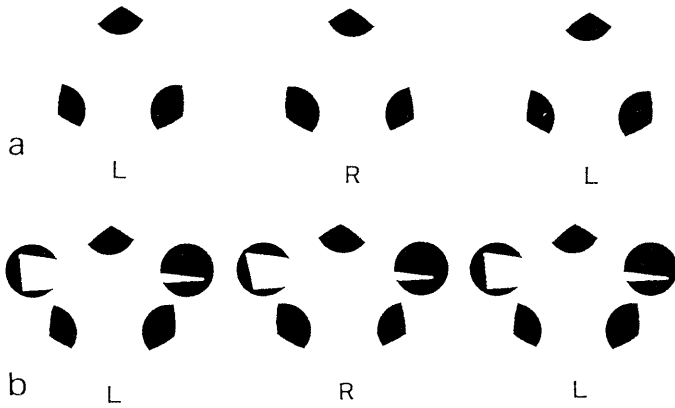


図6. クリスタル透明 (crystal transparency) 錯視面の知覚 {L: 左眼、R: 右眼、(a) 透明錯視面、(b) 不透明錯視面プローブによる透明感の確認}

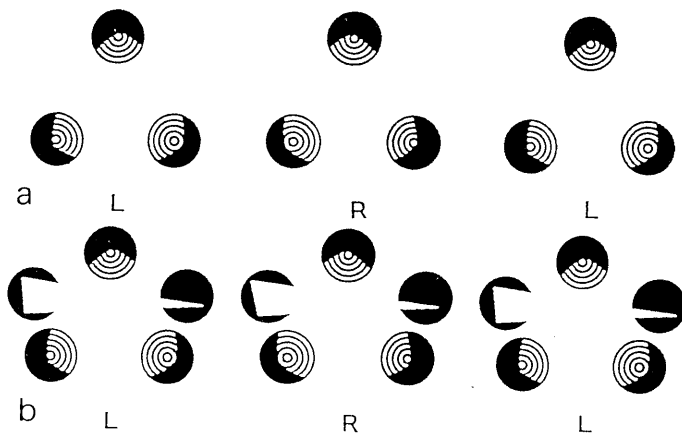


図7. 半透明 (semi-transparency or diaphanous) 錯視面の知覚 {L: 左眼、R: 右眼、(a) 半透明錯視面、(b) 不透明錯視面プローブによる透明感の確認}

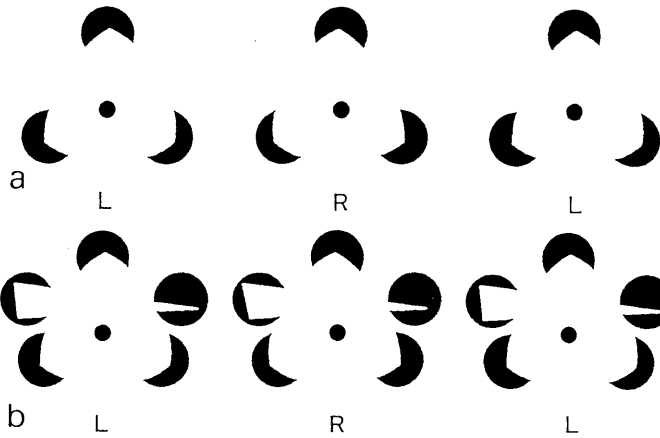


図8. 霧状透明 (translucent) 錯視面の知覚 (L: 左眼、R: 右眼、(a) 霧状透明錯視面、(b) 不透明錯視面プロープによる透明感の確認)

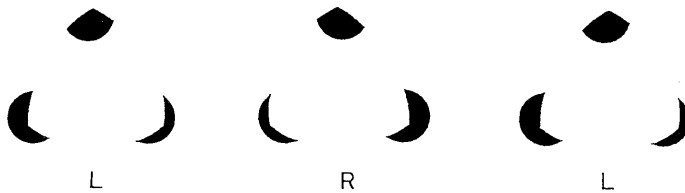


図9. 透明錯視面と不透明錯視面の混在した錯視面の知覚 (L: 左眼、R: 右眼)

図9には、隠蔽される視覚的刺激的の可視性に矛盾が存在する、すなわち、クリスタル透明になる要因と不透明になる要因の両者が同一の面に含まれたステレオグラムとなっており、上部の領域では透明感が生じるが、下部の領域では不透明な錯視表面が知覚されるようになっている。これについても錯視面プロープにより透明感を調べたところ、透明から不透明に連続的に変化しているように観測された。これより我々の視覚システムの中には、透明、不透明の性質についても内挿する機能が存在しているのではないかと推察される。

3. 空間知覚機能と2つの隠蔽現象[14]

両眼視による3次元対象物の知覚においては隠蔽の手がかりが重要な役割を演じている[12], [13]。著者によって新しく見いだされた両眼視による3次元錯視現象[8], [9]を利用した3次元知覚の心理物理学的検討の結果、この隠蔽手がかりは2つの異なった型に分類すると3次元知覚のメカニズムを考える上で都合がよくなることが確かめられた。一方の型の隠蔽現象では、隠蔽する側の物体の輪郭部分を境界として隠蔽される

側の物体の可視性が変化し、隠蔽される側の物体の表面が面的に隠蔽される。これが通常の隠蔽現象で物の影となり隠されることに相当する。輪郭を境界として可視性が変化することからここでは輪郭型隠蔽 (Contour Occlusion) と呼ぶ。他方の型隠蔽現象では、隠蔽される側の物体の可視性が隠蔽する側の物体の表面 (物体の内側と外側の境界面) を境にして変化する。すなわち、隠蔽される物体が隠蔽する側の物体にめり込み、めり込んだ部分の可視性が変化するものである。前者に倣って名付ければ、本来なら表面型隠蔽 (Surface Occlusion) とでも呼ぶべきかも知れないが、ここでは体積型隠蔽 (Bulky Occlusion) と呼ぶ。理由は可視性が面を境に不連続的に変化する場合 (この場合には表面型隠蔽と呼ぶのがふさわしい) だけでなく、連続的に変化する場合も見いだされているからである。通常の場合にはこれら2つの型の隠蔽手がかりが混在し、それらにより3次元空間が知覚されることが多い。

3-1. 輪郭型隠蔽 (Contour Occlusion) 手がかり

新発見の3次元錯視現象においては輪郭型隠蔽が3次元空間知覚の手がかりとなっている。すなわち、輪

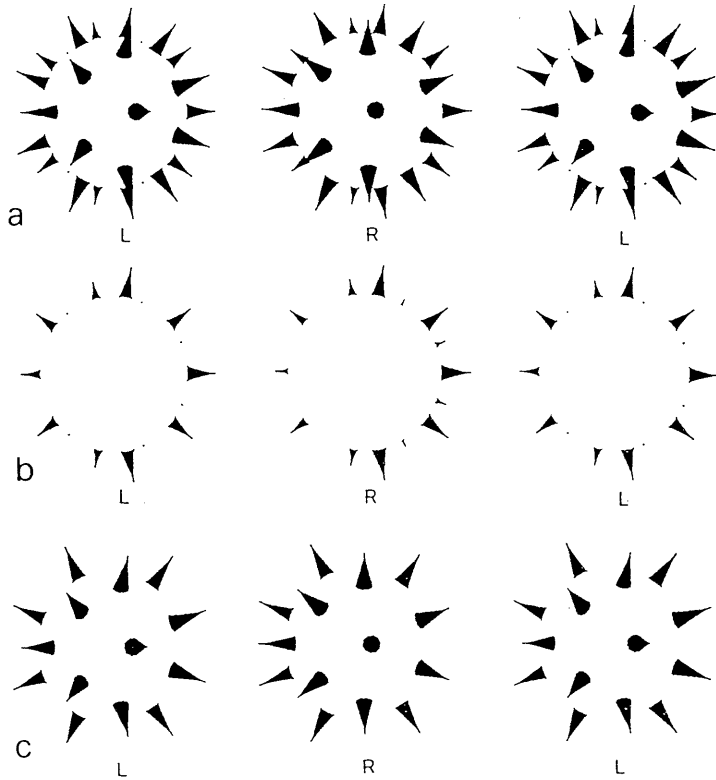


図10. 隠蔽と錯視球体、錯視球面の知覚(図1と同じ) [(a) 輪郭型隠蔽と体積型隠蔽との混合による錯視球体の知覚、(b) 輪郭型隠蔽による球体の知覚、(c) 体積型隠蔽による球状曲面の知覚]

郭型の隠蔽手がかりのみでも物理的な視覚刺激が存在しない領域に3次元対象が知覚される^{5,6)}。輪郭型隠蔽ではその影響する領域が比較的広い範囲にわたり、広い空間について錯視面が内挿される。図10(a)は輪郭型隠蔽と体積型の隠蔽が混在している錯視球体知覚の例であり、コンペイ糖のように球に円錐状の角の底面部分がめり込んだものに対応している。図10(b)には輪郭型隠蔽手がかりのみによる錯視球面知覚の例を示した。

3-2. 体積型隠蔽 (Bulky Occlusion) 手がかり

後者の体積型の隠蔽のみでも3次元錯視面が知覚される(図10(c))。前者の輪郭型の隠蔽(図10(b))では影響する領域がかなり広い範囲にわたり錯視面およびその境界も強く知覚されるのに対して、後者の体積型隠蔽ではその影響が比較的狭い範囲に限定され、また、面およびその境界の知覚も弱いことが特徴的である。そして隠蔽する対象物表面を境に可視性が1から0に変化する場合には不透明な3次元対象が知覚される。また、隠蔽する対象物内での可視性が

0でない場合には透明な錯視対象が知覚される。

3-3. ランダム・ドット・ステレオグラムと体積型隠蔽手がかり

両眼視における3次元知覚の研究においてはJuleszランダム・ドット・ステレオグラム[11]が広く使用されている[11]。ランダム・ドット・ステレオグラムでは、図12に示すように段差のある表面や曲面なども表示できる。そして、疎なランダム・ドット・ステレオグラムにおいては視差情報の無いドット間の領域においても周囲のドットとほぼ同じ深さに面が知覚される。また、Juleszの仮説[11]によれば左右で対応しないランダム・ドットは奥側の深さにある表面と同じ深さに知覚される。本報告で仮定した2つの隠蔽手がかりのうち、疎なランダム・ドット・ステレオグラムのドット間に知覚される錯視表面は体積型の隠蔽手がかりによるものと考えられる。そして、通常のランダム・ドット・ステレオグラムにおいては背景となる領域と浮き上がって知覚される領域の段差部分では輪郭型の隠蔽手がかりが機能していると考えられる。従って、

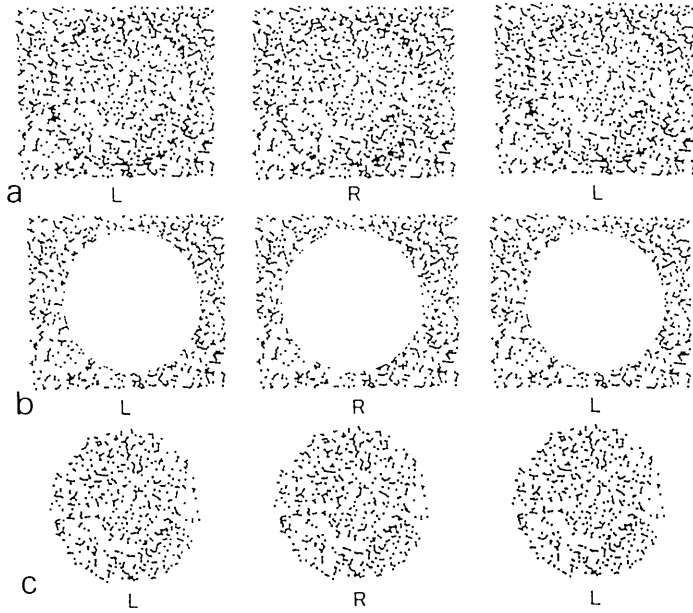


図11. ランダム・ドット・ステレオグラムにおける2つの隠蔽手があり(図1と同じ) (a) ランダム・ドット・ステレオグラム、(b) 中央部に浮き上がる領域の境界を規定する輪郭型隠蔽、(c) 中央部に浮き上がる領域内の形状を規定する体積型隠蔽の視覚刺激)

図12(b)に示すように図12(a)で浮き上がっている領域のランダム・ドット(これらは左右対応している)は除いても段差境界の知覚には本質的な変化は生じない。浮き上がる領域の内部についてはランダム・ドットの有無により知覚される深さが異なる。これは、領域内にあるランダム・ドット(左右対応している)が体積型の隠蔽手がありとして作用してランダム・ドット間に錯視表面が知覚されているためと考えることができる(図10(c))。

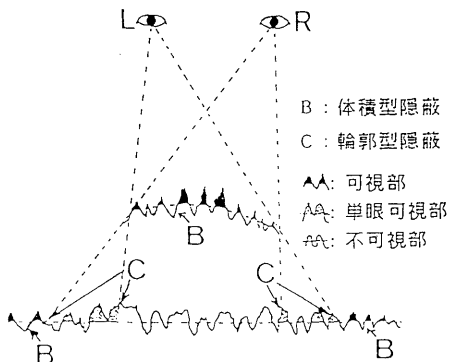


図12. ランダム・ドット・ステレオグラムと2つの隠蔽手がありの概念図

3-4. 体積型隠蔽と透明視

前に述べたように体積型の隠蔽では可視性が隠蔽物体表面を境にして内側で0となる場合には不透明な錯視物体が知覚されるが、内側での可視性が0とならない、例えば可視性が1から0.6に変化する様な場合

には、透明な錯視物体が知覚される。可視性の変化の状態によっていろいろな異なった透明感が知覚される。そして、明確な境界がなく可視性が連続的に1から0へと変化する場合には霧状透明の対象物の存在が知覚される。このような光景は自然の風景の中でも例えば飛行機で山脈地帯を飛んでいる時にしばしば経験することができる。

4. むすび

以上両眼視による3次元錯視表面の知覚現象について、著者が見いだしたいくつかの現象の例と、それらの現象を利用した視覚における3次元構造の知覚に関わる視覚のメカニズムの解明へ向けての試みについて紹介した。両眼視による視覚システムでは、単に物理的な視覚刺激からそれらの対応により奥行きを知覚するのみでなく、3次元の構造をも知覚するメカニズムが比較的低次の段階に存在しているであろうことが推察できる。また、錯視立体(特に曲面を含んだ)の知覚の例より、立体(閉じた部分空間としての)の知覚においては、両眼で対応しない部分(領域)の存在が重要な役割を果たしているものと推察される。さらに、両眼視に特有な3次元透明錯視面知覚の現象より、透明感の知覚が3次元空間構造の知覚と同じく極めて深い関連で処理されているのであろうことが窺える。

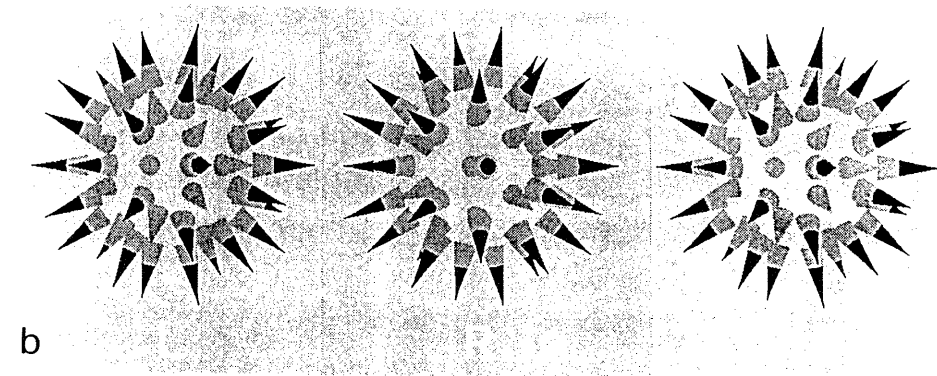
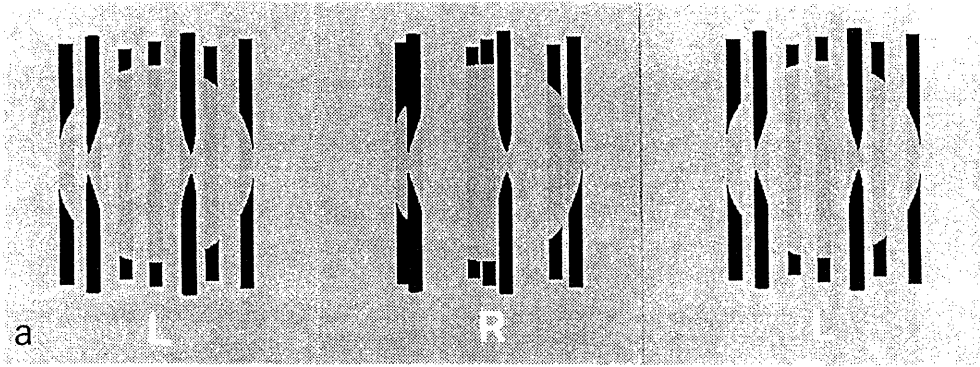


図13. 体積型隠蔽手がかりと透明対象の知覚(図1に同じ) ((a) 円筒状物体の体積型隠蔽と透明錯視対象物の知覚、(b) 輪郭型隠蔽と体積型隠蔽による透明視)

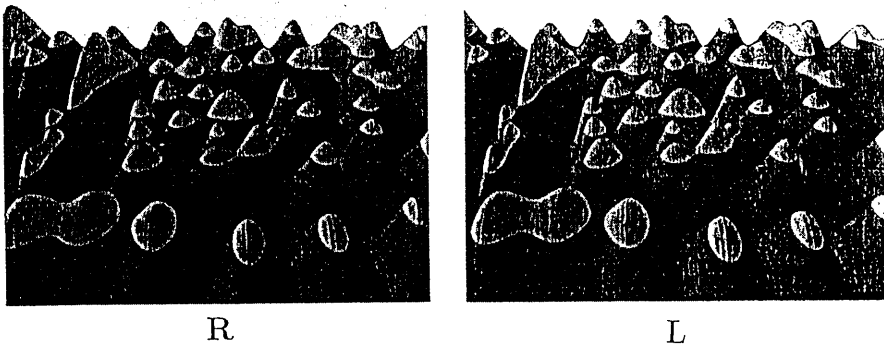


図14. 自然景観と体積型隠蔽(図1に同じ) (Mountain with snowcrown (コンピュータで生成: 両眼視すると雪の境界線の高さに対応する透明な面が知覚される))

両眼視による3次元空間の知覚において重要な役割を果たしている隠蔽手がかかりとして2つの型を仮定し、両眼視による3次元空間の知覚と隠蔽手がかかりについて検討した。一方では隠蔽される側の物体の可視性が隠蔽する側の物体の輪郭部を境として変化することで輪郭型隠蔽と呼ぶことにした。他方では隠蔽される側の物体の可視性が隠蔽する側の物体の表面(物体の内側と外側の境界面)を境にして変化することで体積型隠蔽と呼ぶことにした。通常はこれら両者の型が混在して観測されるが、後者の体積型隠蔽のみでも3次元錯視面が知覚されることが確かめられた。ただし、体積型隠蔽ではその影響が輪郭型隠蔽の場合に比べて狭い範囲に限定され、また、面およびその境界の知覚も弱いことが特徴的である。さらに可視性の変化の状態により不透明な3次元対象のみでなく透明な3次元対象が、さらには霧状の対象物の存在が知覚されることが確認された。そして、疎なランダム・ドット・ステレオグラムの中のドット間の領域に知覚される表面は体積型隠蔽手がかかりによると解釈できる。隠蔽の手がかかりは両眼視による3次元表示において極めて有効な手がかかりであり、まさに“**両眼視3次元表示における隠し味**”と呼ぶにふさわしいものである。

なお、本報告における前半の一部は、科学技術振興調整費「フェジイ・システムとその人間・自然系への適用」により、また、後半の一部は科学技術振興調整費「センサフュージョンの基盤技術の開発に関する研究」により推進されたものであることを記し、関係諸氏に感謝する。

文献

- [1] D. Marr: Vision, 1982, W. H. Freeman Company
- [2] Visual Perception of the Neurophysiological Foundation (edited by L. Spillman and J.S. Werner), 273-347(1990, Academic Press)
- [3] V. S. Ramachandran: Perception of shape from shading, Nature, Vol. 331, 14, 163-165(1987)
- [4] V. S. Ramachandran and P. Cavanagh: Subjective contour capture stereopsis, Nature, Vol. 317-10, 527-530(1985)
- [5] The perception of illusory contours (Edited by Susan Petry and Glenne Meyer), (1987, Springer-Verlag)
- [6] J. P. Harris, R. L. Gregory: Fusion and rivalry of illusory contours, Perception, 2, 235-237(1973)
- ／R. L. Gregory: Illusory contours and occluding surfaces, The perception of illusory contours (Edited by Susan Petry and Glenne Meyer), Chap. 9, 81-89(1987, Springer-Verlag)
- [7] Mather: The role of subjective contours in capture of stereopsis, Vision Research, 29-1, 143-146(1989)
- [8] 出澤正徳、程康: 視覚機能研究におけるコンピュータ・グラフィックスの利用と課題、理研シンポジウム第10回「非接触計測と画像処理」、33-39(1989-10)／出澤正徳: 視覚機能とコンピュータ・グラフィックス、光技術コンタクト、28-8、450-458(1990)
- [9] M. Idesawa: Perception of 3-D Illusory Surface with Binocular Viewing, JJAP, 30-4B, L751-L754(1991) /M. Idesawa: Perception of 3-D Transparent Illusory Surface in Binocular Fusion, JJAP, 30-7B, L1289-L1292(1991)
- [10] M. Idesawa: Depth interpolation from surface boundary perceived with binocular viewing, Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Vol. II, 521-526(June 17-20, 1990, San Diego)／出澤正徳、施工富: 両眼立体視による表面境界から3次元表面深さ知覚過程のモデル化、神経回路学会平成2年度全国大会講演論文集、27(1990-9)／出澤正徳、施工富: 両眼立体視による表面境界から表面深さ知覚過程のモデル化の一試行、理研シンポジウム第11回「非接触計測と画像処理」、10(1990-10)
- [11] B. Julesz: Foundation of Cyclopean Perception, (1971, The University of Chicago Press)
- [12] K. Nakayama, S. Shimojo, G. H. Silverman: Stereoscopic depth: its relation to image segmentation, grouping, and the recognition of occluded objects, Perception, 18, 55-68(1989)
- [13] S. Shimojo, K. Nakayama: Real world occlusion constraints and binocular rivalry, Vision Research, 30-1, 69-80(1990)
- [14] 出澤正徳、吉澤潤: 両眼視による3次元錯視現象(3次元知覚における2つの隠蔽手がかかり)、理研シンポジウム第12回「非接触計測と画像処理」、29(1991-10)