

両眼立体視空間における表面の奥行きが色の見えにおよぼす影響 — 速報 —

内川恵二*・加藤憲史郎**・横井健司*・金子寛彦**

* 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物理情報システム創造専攻

** 東京工業大学 大学院理工学研究科 像情報工学研究施設

〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

(受付：2003年7月5日；受理：2003年9月10日)

Influence of Depth of Surface in Stereoscopic Space on Color Appearance — A Preliminary Report —

Keiji UCHIKWA*, Kenshirou KATO**, Kenji YOKOI* and Hirohiko KANEKO**

* Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

** Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502

(Received 5 July 2003; Accepted 10 September 2003)

It was previously mentioned that a surface viewed by a stereoscope with binocular disparity might appear differently in color than when it was originally observed in two dimensions. In the present research we investigated whether brightness and/or chromaticness of a surface changed when it appeared with depth in a stereoscopic space. Test and matching stimuli were presented side by side on a CRT screen. These stimuli appeared in the surface-color mode except the yellow stimulus. The test stimulus was presented with front, back and 0 disparity from the standard plane, whereas the matching stimulus always appeared with 0 disparity. The observer adjusted luminance and chromaticities of the matching stimulus in order to obtain color-matching between the test and the matching stimuli. The results show that when the test stimulus appeared in front it looked brighter than at the standard position, and that when it appeared at back it looked almost the same. We proposed a color constancy hypothesis to explain the present results.

1. はじめに

両眼視差を付けた2枚の画像を観察者の左右の眼に呈示すると、観察者の眼前に一種の立体視空間が形成される。このような両眼立体視の現象は古くから知られている¹⁾。ある画像を両眼立体視により観察する場合には、眼前の3次元視空間内で見える物体表面の色や明るさが、同じ物体を元の画像の状態で見たと時の色や明るさとは異なって見えることがある。

物理的には全く等しい分光放射特性を持った

面を、両眼立体視をして奥行きを持った状態で見ると、平面で見た場合と比べて、その明るさや色が異なるという現象はこれまでもいくつか報告されている²⁻⁵⁾。これらの報告では両眼立体視による面間の見えの奥行きの違いが明暗や色コントラスト知覚に影響し、その結果、色の見えが変化するとしてこの現象を説明している。また、平面画像でも面が奥行きを持って知覚されると色の見えが異なることが報告され、画像中の面間の相互作用が変化すると解釈されている^{6,7)}。

一方、3次元実空間中の表面が、その実際の位置が変化しないにも関わらず、どの奥行きで知覚されるかによって、見えの明度が大きく異なることが報告されている⁸⁾。これは表面が視空間中の異なった位置にあるように見えると、その表面を照明している照明条件も異なると視覚系が解釈し、その結果、表面の明度が異なって見えるという、明度の恒常性から説明されている。物理的には全く等しい分光特性を持った表面でも、知覚される色は視覚系が推定した視空間の照明条件により決まるということである。刺激の見えの立体構造や視空間の見えの3次元構造が色恒常性に影響することは他の研究でも示されている^{9,10)}。

表面の色の見えは表面からの反射光の物理特性のみで決まるわけではなく、表面の周囲条件や観察条件によって大きく影響されることは良く知られている¹¹⁾。奥行き知覚も色見えを変化させる要因の一つと考えられるが、奥行き知覚がどのようにして色見えに影響するのかといったメカニズムについては、ほとんど明らかとなっていない。そこで、本論文では、背景刺激を用いず、また照明光の手がかりも与えず、単に表面の見えの奥行きだけを変化させることが色見えにどの程度影響するかを調べることを目的とした。CRTモニター上の刺激により両眼立体視空間を作成し、表面の色を等色法により測定した。今後の研究にとって興味深い結果が得られたので、ここでは速報として報告したい。

2. 実験方法

2.1 装置

刺激呈示にはCRT(NANA O Flex Scan T-766)を用いた。被験者の左右眼に呈示される刺激は、それぞれCRT面の左右半画面上に呈示され、ミラーによって被験者の左右の眼に入射される。CRT画面までの視距離は56 cmである。被験者の頭は顎台により固定される。

2.2 刺激

図1に呈示刺激を示す。刺激はテスト刺激、マッチング刺激、固視点からなる。固視点には左

右眼の刺激が適切に融合しているかを確認するためにノニアラインが付いている。固視点に対して視差の付いている方の刺激をテスト刺激、視差の付いていない方の刺激をマッチング刺激とする。

左右それぞれの刺激は一辺視角3.0 degの正方形の周辺刺激の中央に一辺1.0 degの正方形の刺激が付いている構成をしている。周辺刺激を付けたのは中央の刺激が表面色モードで見えるようにするためである。刺激はすべてOSA色票を模擬し、周辺刺激として灰色色票、中央刺激として白(W)、赤(R)、緑(G)、青(B)、黄(Y)の5色票を用いた。表1に周辺刺激と中央刺激のOSA色度(L, j, g)および輝度L(cd/m²)と(x, y)色度を示す。

テスト刺激の視差は固視点に対して-0.5, 0, 0.5 degの3条件とした。これらの視差は視距離56 cmでは、眼間距離6.0 cmでそれぞれ手前4.2, 0 cm, 奥5.0 cmの奥行き量に相当する。テスト刺激もマッチング刺激もそれぞれの周辺部

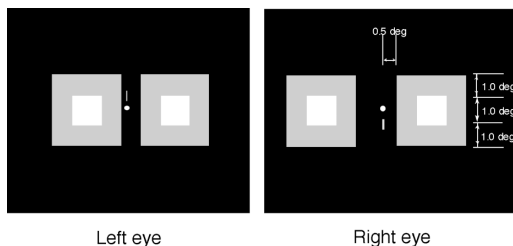


図1 呈示刺激。左の画面が左眼に、右の画面が右眼に呈示される。各画面内には、テスト刺激、マッチング刺激、固視点が表示される。固視点の上下の線はノニアラインである。視差の付いている方の刺激がテスト刺激で、この図では左側がテスト刺激、右側がマッチング刺激となる。

表1 刺激のOSA表示(L, j, g)および輝度Lと(x, y)色度。

刺激	L	j	g	L (cd/m ²)	x	y
周辺刺激	-2	0	0	20	0.313	0.330
中央刺激						
白(W)	4	0	0	60.1	0.313	0.330
赤(R)	-4	4	8	10.1	0.584	0.346
緑(G)	-5	3	3	7.95	0.284	0.475
青(B)	-4	-4	2	8.52	0.214	0.219
黄(Y)	4	10	-2	64.5	0.439	0.444

と中央部は常に同一平面として呈示される。

2.3 手続き

被験者はセッション開始時に、暗黒背景上の固視点を見て、3分間順応する。その後試行が開始される。被験者は固視点を固視して、呈示された刺激を両眼融合する。キーボードによりマッチング刺激の中央の色票の輝度と色度を調節して、テスト刺激の色票と見えが同じになるように等色する。刺激は定常呈示で、等色にかかる時間は特に制限されていない。等色が終了したらキーを押して、次の試行に移る。

視野の左右位置に対する被験者の色の見えのバイアスやCRT画面の左右にわずかな非一様性があることも考えられるので、それらをキャンセルするために、テスト刺激とマッチング刺激のCRT面上の左右位置を試行毎あるいはセッション毎に入れ替えて等色するようにした。

実験はテスト刺激の色の5条件、奥行き3条件の計15通りの条件から成る。各条件で計20回の測定を行った。1セッションは60試行からなり、計5セッションで実験が終了する。1セッションに要する時間は20～30分であった。

2.4 被験者

本実験で用いた被験者はKK(23歳, 男)とKY(31歳, 男)の2名である。両被験者とも色覚正常および両眼立体視正常である。裸眼視力は両眼とも1.5(KK), 1.0(KY)である。実験は裸眼で行った。両被験者とも本論文の著者である。

3. 結果と考察

図2(a), (b)にそれぞれ被験者KKとKYのマッチング刺激の平均輝度値を示す。図2中の各パネルはテスト色票の色条件に対応している。テスト刺激がマッチング刺激よりも手前に見える条件を手前(F), 奥に見える条件を奥(B), 固視点およびマッチング刺激と同じ平面上に見える条件を基準(C)と表す。図3に手前条件と奥条件の輝度値から基準条件の輝度値を引いた値を色条件毎に示す。ANOVA(有意水準5%)により基準条件と有意差があった手前と奥条件は、被験者KKでは白(手前), 緑(手前), 青(手前,

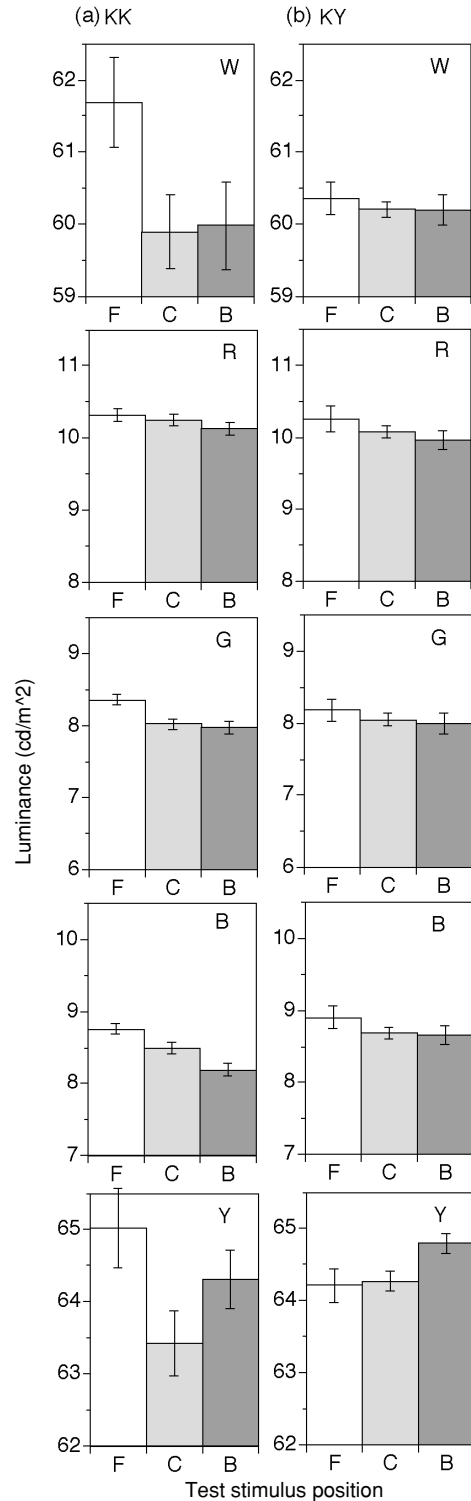


図2 マッチング刺激の平均輝度値。被験者 (a): KK, (b): KY. 各パネルはテスト色票の色を示す。横軸はテスト刺激の奥行き条件を表し, F:手前, C:基準, B:奥である。誤差棒は標準誤差を示す。

奥), 黄(手前), 被験者 KY では黄(奥)となった。

まず, 手前条件の結果をみる。被験者 KK ではマッチング輝度値は, 色条件により程度の違いはあるものの, 基準条件よりも大きくなっている。これは物理的に等輝度の表面でも, 基準位置

よりも手前に見えると明るく知覚されることを表している。被験者 KY の結果では, 統計的な有意差は得られなかったが, 白, 赤, 緑, 青色で手前のテスト刺激が明るく見える傾向はわずかに現れている。

次に, 奥条件の結果をみる。被験者 KK では, マッチング輝度値は青色以外では基準条件と統計的な有意差が得られなかった。しかし, 黄色を除いた赤, 緑, 青色ではマッチング輝度値は小さく, 黄色では逆に大きくなっている。被験者 KY では, 黄色以外では有意差がないが, 黄色では被験者 KK と同様に, マッチング輝度値が基準条件よりも大きくなっている。

黄色のテスト刺激は, 表 1 にあるように, 輝度値が周辺刺激よりもかなり高く, また, 輝いて見えるという被験者の内観報告もあった。したがって, 黄色のテスト刺激は完全な表面色モードには見えず, 開口色モードとして見えていたか, あるいは少なくとも開口色モードの見えが混在していたと考えられる。もし奥にあるテスト刺激がより強く開口色モードで見え, 基準面よりも手前にあるテスト刺激は表面色モードの見えの方が強いとすると, 同じ輝度の刺激でも開口色モードの方が明るく見えるため¹²⁾, この結果が説明できる。ただし, なぜ奥にある刺激がより強く開口色モードの見えになったかという理由はここでは不明である。

図 4 (a), (b) に, それぞれ被験者 KK と KY のマッチング刺激の平均 (x, y) 色度値を示す。図 4 から分かるように, テスト刺激の色度値は手前, 奥条件ともに基準条件とほとんど差がなかった。したがって, 両眼立体視空間内で表面の見えの奥行きが変化しても表面の色みの変化は本実験条件では観察されなかったといえる。

本実験から, 被験者 KK では, 両眼立体視をすると基準面よりも手前に見える表面が明るく見え, 奥に見える表面は暗く見える傾向があることが示された。一方, 被験者 KY では, 手前条件でも奥条件でもこの傾向を支持できなかったが, 被験者 KK と矛盾する結果ではなかった。被験者 KY にとっては本実験の奥行き条件が明るさ

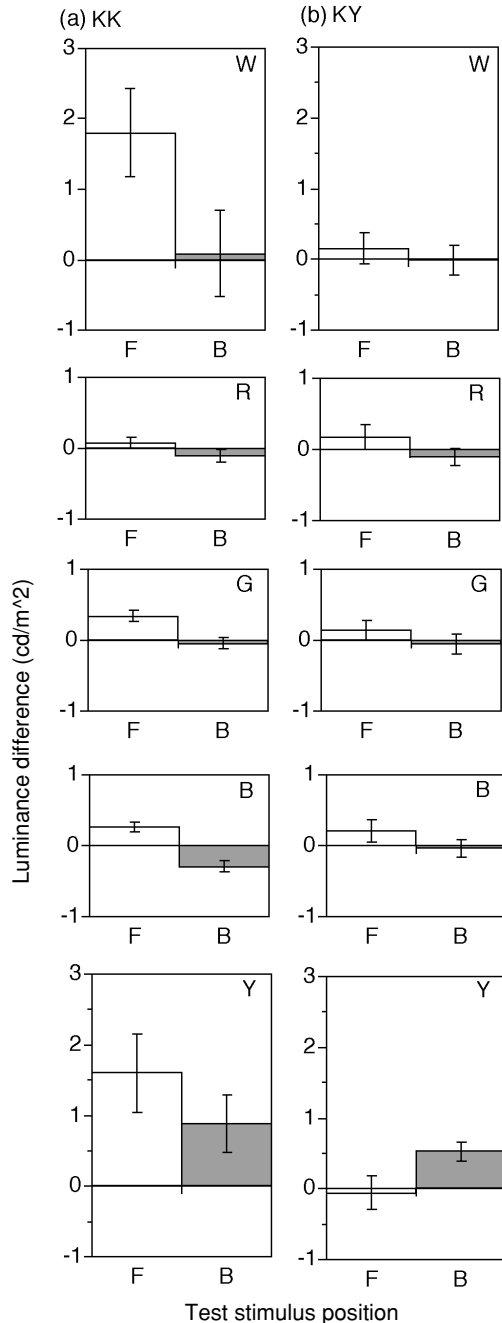


図3 手前条件から基準条件(F), 奥条件から基準条件(B)の輝度値を引いた差の値を示す。各パネルはテスト色票の色を示す。誤差棒は標準誤差を示す。

の違いを生むには小さすぎたのかもしれない。いずれにしてもこの個人差を明らかにすることは今後の課題である。

ここでは、両眼立体視空間で表面が手前に見えるとなぜ明るく見えるかを説明してみよう。そのために両眼立体視空間内で照明光が推定されるという一種の色恒常性仮説を考える。この仮説では、視覚系は眼前に奥行きのある視空間

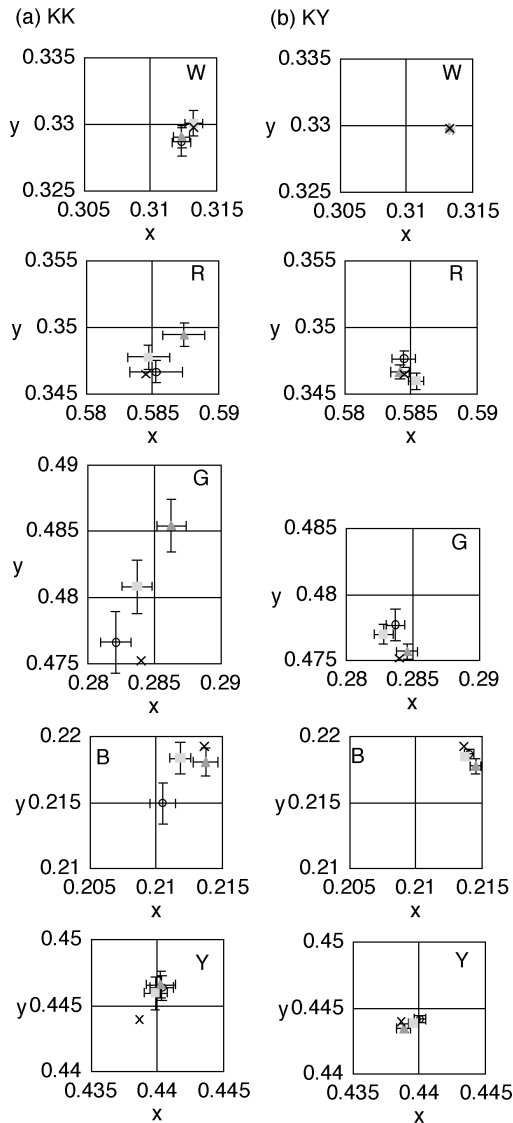


図4 マッチング刺激の平均 (x,y) 色度値。被験者 (a) : KK, (b) : KY. 各パネルはテスト色票の色を示す。各シンボルは奥行き条件 (白丸: 基準, 灰四角: 手前, 黒三角: 奥) およびテスト刺激 (×) を示す。誤差棒は標準誤差を示す。

が構築され、その中に反射表面があれば、必ず照明光を視空間内のどこかに仮定すると考える。本実験では照明光の手がかりは何も明示的には与えていないので、視覚系はいわば自動的に照明光を仮定し、その位置が基準面付近であったと考えれば結果の説明ができる。以下にその説明を述べる。

視空間内で基準面の上部に照明光があると仮定しよう。そうすると基準面よりも手前の位置に表面を垂直方向に置くと、観察者側の面は陰になるために暗くなる。したがって、基準位置と手前位置に置かれた二つの表面の輝度が物理的に等しい場合には、明度の恒常性から手前の表面はそれだけ反射率が高い、すなわち明度が高くなければならない。これが本実験で手前の表面が高明度で知覚された理由である。また、奥の位置に置かれた表面は陰にはならないのでさほど暗く照明されない。そのため奥の表面の明るさには変化がなかったと考えられる。

なぜ視覚系は基準面付近に照明光があると仮定してしまうのか。刺激は奥、基準、手前の面に呈示され、視空間はこの3種の奥行きのある面から構成される。したがって、その中央の基準面上に照明光があると仮定した可能性がある。あるいは、被験者は実験中、基準面に呈示されるマッチング刺激を調節して等色をしなければならない。したがって、基準面は詳細に見なければならない面である。通常は詳細に見なければならない所に照明を当てるので、そのため本実験でも基準面が強く照明光されると視覚系が仮定した可能性もある。

色恒常性仮説以外にも、本実験結果を説明できる可能性もある。たとえば、主観的輪郭に囲まれた面は手前に見え、さらに明るく見えることが知られている¹³⁾。このような表面とその周辺との相互作用により、本実験結果を説明する試みもあろう。しかし、本実験ではテスト刺激とマッチング刺激以外には周辺を呈示しなかったため、相互作用による説明には多くの仮定を入れなければならない。

今後の研究として、被験者数、刺激条件、奥行

き条件などの実験条件を増やして，本実験結果の一般性を確かめることがまず必要である．また，ここで提案した色恒常性仮説を確かめるためには，照明光の位置の手がかりを両眼視空間中に与えることで，表面の明るさが変化するかどうかを調べることも興味深い．これらは今後の課題としたい．

文 献

- 1) I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular Vision and Stereopsis. Oxford University Press, Oxford, 1995.
- 2) D. H. Mershon: Relative contributions of depth and directional adjacency to simultaneous whiteness contrast. *Vision Research*, **12**, 969-979, 1972.
- 3) J. Schirillo and S. K. Shevell: Lightness and brightness judgements of coplanar retinally noncontiguous surfaces. *Journal of the Optical Society of America A*, **10**, 2442-2452, 1993.
- 4) S. K. Shevell and P. R. Mille: Color perception with test and adapting lights perceived in different depth planes. *Vision Research*, **36**, 949-954, 1996.
- 5) S. K. Shevell and J. Wei: A central mechanism of chromatic contrast. *Vision Research*, **40**, 3173-3180, 2000.
- 6) Y. Tsukada and K. Uchikawa: Luminance and chromaticity conditions of a bichromatic cross pattern for chromatically-uniform transparency. *Optical Review*, **7**, 177-185, 2000.
- 7) F. Bonato, J. Cataliotti, M. Manente and K. Delnero: T-junctions, apparent depth, and perceived lightness contrast. *Perception and Psychophysics*, **65**, 20-30, 2003.
- 8) A. L. Gilchrist: Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement. *Science*, **195**, 185-187, 1977.
- 9) M. G. Bioj, D. Kerstem and A. C. Hurlbert: Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination. *Nature*, **402**, 877-879, 1999.
- 10) J. N. Yang and S. K. Shevell: Stereo disparity improves color constancy. *Vision Research*, **42**, 1979-1989, 2002.
- 11) 内川恵二：色覚のメカニズム．朝倉書店，1998.
- 12) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: Influence of achromatic surrounds on categorical color perception of surface colors. *Vision Research*, **29**, 881-890, 1989.
- 13) 日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック．朝倉書店，2000.