

輝度変化を伴う色光の知覚潜時

山下 由己男

製品科学研究所基礎人間工学部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1-4

(1985年6月3日受理)

Perceptual Latency of Colored Lights Presented with Luminance Transients

Yukio YAMASHITA

Human Factors Research Department, Industrial Products Research Institute,
1-1-4, Yatabe-machi Higashi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305

Using the method of simultaneity judgement of test and reference stimuli, I determined relative perceptual latencies of spectral lights presented under two kinds of luminance transient condition: equal brightness and luminance increment or decrement. The resulting data showed that there were approximately linear relations between the latencies and the logarithmic values of log luminance differences. The latency-luminance difference functions could be applied to the latencies under equal brightness condition. The wavelength effects of perceptual latencies of spectral lights seen in small luminance changes (below 0.3 log unit) were lost in large luminance changes (above 0.5 log unit). These results would be attributed to the change of the visual mechanisms detecting the stimuli: from the chromatic channels to the luminance channel.

1. はじめに

光刺激の色が突然変化するとき、その変化が知覚されるまでには時間遅れがある。この遅れ時間は知覚潜時と呼ばれ、視覚系の過渡応答特性を表わす指標の一つとなっている。光刺激の時間的变化によって生じた視覚系応答の変動が、ある閾値を超えときにその刺激変化が検出されると仮定すると、知覚潜時は視覚系応答がこの閾値に達するまでの時間を表わしている。Roufs はこのような仮定に基づいてフリッカー光、フラッシュ光およびステップ状輝度変化光といった異なる輝度変化刺激に対する時間応答特性を互いに関係づけた^{1,2)}。視覚系応答は過渡状態と定常状態とでは特性が異なるが、どちらの場合でも、応答レベルがある大きさだけ変化したときに刺激変化が検出されるとすると、この閾値は刺激の弁別閾値と密接な関連があると考えられる。筆者は先に、視覚系の色チャンネル応答に関して、白色から単色への色相置換*¹ (等輝度で色を置換する刺激提示) の知覚潜時と白色の純度弁別閾との間に波長依存性に関して単純な対応関係があることを示した³⁾。これは、色相置換の知

覚潜時の波長依存性が単色の飽和度 (saturation) 関数に類似しているという知見⁴⁾ を、知覚潜時と刺激弁別閾との関係として示したものである。

ところで、白色から単色への色相置換の際、ほとんどの波長において、明るさが増加する。明るさ (brightness) の感覚には視覚系の輝度チャンネルと色チャンネルが同時に寄与しているとされており^{5,6)}、白色光と等輝度の単色光は、色チャンネル応答が加わるため白色よりも明るく感じられる。単色光の飽和度はこの色チャンネル応答の大きさを反映しており、上に述べた知覚潜時と飽和度の関係は、知覚潜時への明るさ変化の大きさの影響を示しているとも考えられる。

本研究では、まず、明るさを一定に保ちながら、色を白色から単色へ入れ換えたときの知覚潜時を色相置換の場合と比較し、明るさの変化が潜時に及ぼす影響について調べた。明るさ一定の場合、色の変化に伴って輝度が

*1: 白色から単色への置換は色相よりむしろ彩度の置換であるが、色相置換 (hue substitution) と呼ばれている。この刺激提示は視覚系の色チャンネルのみを刺激するとされている。

変化する。そのため、この刺激変化の検出には色相置換の場合と異なり、視覚系の色チャンネルのみでなく、輝度チャンネルも関与しているであろう。そこで次に、輝度変件を伴って色光を白色から単色に入れ換え、輝度チャンネルと色チャンネルが光刺激変化の検出に同時に関与していると考えられるときの知覚潜時を測定した。そして、それらの結果から刺激変化の検出における、輝度チャンネルと色チャンネルの寄与について考察した。

2. 実験方法

刺激は、5光路マックスウェル視光学系(2 mm 直径人工瞳孔)を用いて、被験者の右眼に提示した³⁾。Fig. 1(a)に提示視野を示す。視野は視覚 2° 離して上下に配置した、直径 1° の二つの円形視野(テスト視野, A, B)が、それぞれ、直径 8° の白色半円視野(背景視野)に囲まれたものである。二つのテスト視野には最初、白色光が提示されており、実験において、一方は単色テスト光に、もう一つは参照光(629 nm 単色光)に入れ換えられた。

5分間の暗順応ののち、被験者はまず、全視野が白色等明るさになるように、テスト視野の白色光の明るさを調整した。背景上下視野は前もって明るさを等しくされた。次に、交照法(8~15 Hz)を用いて、各テスト視野のテスト光および参照光の輝度を白色光と等しくした。さらに、実験条件に従って、テスト光の輝度を次のよう

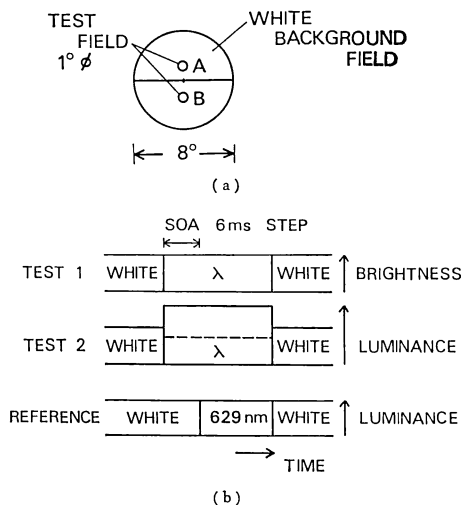


Fig. 1 Schematic illustration of stimuli. (a) Visual field, (b) Stimuli presentation procedure (λ : test wavelength). Test 1: equibrightness condition, Test 2: luminance increment or decrement condition, Reference: reference stimulus (629 nm).

に設定した。実験1では、Fig. 1(b)のテスト1のように、等明るさで色を入れ換えるため、テスト色光の明るさを白色背景視野の明るさと直接比較によって等しくした。このとき、テスト光の、等明るさに設定されたときの輝度と、等輝度に設定されたときの輝度との比の対数値は、等明るさで色を入れ換えたときの輝度変化量として、毎回記録された。実験2では、Fig. 1(b)のテスト2のように、輝度変化を与えるため、テスト光の輝度設定を行なった。なお、参照光はつねに白色光と等輝度で提示された(Fig. 1(b)の参照光)。輝度設定ののち、実験1では等輝度条件と等明るさ条件で、実験2では輝度変化条件での知覚潜時を測定した。

刺激は、Fig. 1(b)に示すように、二つのテスト視野の白色光を、ある時間差(stimulus onset asynchrony, SOA)で、それぞれテスト光と参照光に入れ換えた。この時間差 SOA は、6 ms ステップ^{*2}で変えることができ、被験者は調整法を用いて、二つのテスト視野の色の変化がまったく同時に見えるように時間差を調整した。色変化が同時に見える SOA を、上下のテスト視野でそれぞれ 10 回ずつ測定し、その平均値を参照光の知覚潜時に対するテスト光の相対知覚潜時とした。

標準の輝度は網膜照度で 100 td とした。実験に用いた白色光の CIE xy 色度座標は、テスト視野 $x=0.305$, $y=0.355$, 背景視野 $x=0.327$, $y=0.372$ であった。テストの単色光波長として、実験1では、431 nm から 655 nm までの 10 種、実験2では、484, 539, 568, 631 nm の 4 種を用いた。また、実験2では、テスト光として白色光も用いた。白色光はキセノン光源からの光を適当な色温度変換フィルターに通して作り、単色光は干渉フィルターを用いて作った。実験2における輝度対数値の変化量は、 -0.5 , -0.3 , -0.1 , 0.1 , 0.3 , 0.5 , 1.0 の 7 種であった。なお、変化量の負符号は輝度減少、正符号は輝度増加を表わしている。

被験者は、実験1では、色覚正常な男性3名(KN, SY, YY)、実験2では、実験1の被験者のうちの2名(KN, YY)であった。YYは視力を眼鏡で矯正した。

*2 恒常法を用いて得られた知覚潜時の波長による変動幅が 100 td で約 20 ms であること³⁾を考慮すると、調整法としてはこのステップ幅は大きい。恒常法で二つのテスト視野における色相置換の順序判定をいろいろな SOA で行なった結果、100% で同時と判定される SOA の範囲は、どの波長でも平均値を中心として約 20 ms であった。ステップ幅が細かすぎると同時の見えが広いステップ範囲で生じることになり、被験者が同時判定を行なうとき SOA を定めにくい。そこで、この範囲を3から4ステップでカバーするように、ステップ幅を 6 ms に設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験1 等明るさ色変化の知覚潜時

等輝度条件と等明るさ条件での相対知覚潜時を Fig. 2 の上段に示す。横軸はテスト光波長、縦軸が相対潜時である。相対潜時の符号は、テスト光の潜時が参照光のそれよりも長いとき正符号で示している。3名の被験者の結果を異なるシンボルで表わし、それらの平均値を実線で結んでいる。等輝度条件、すなわち色相置換では、色変化の検出には色チャンネルのみが関与していると考えられ、その知覚潜時は、短・長波長に比べ中波長において長く、とくに 570 nm 付近で最も長い。すでに知られているように、この波長依存性は単色の飽和度関数と対応している^{3,4)}。一方、等明るさ条件での知覚潜時の波

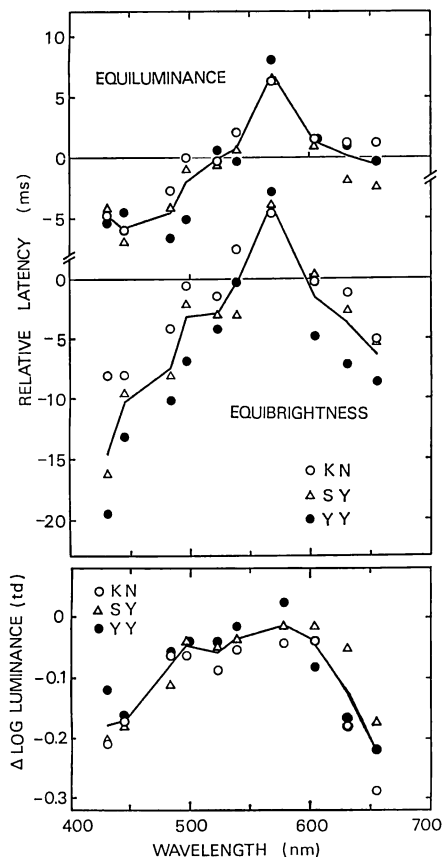


Fig. 2 Relative latencies of color change in equal luminance and equibrightness. Upper figure: relative latencies of spectral lights substituted for a white light in equal luminance and in equal brightness. Lower figure: logarithms of the ratio of test luminance under equal brightness condition to 100 td.

長依存性は、等輝度条件と同様、飽和度関数と似た傾向を示しているが、等輝度条件に比べ、波長による潜時の変動幅が大きい。すなわち、500 nm から 600 nm の中波長では、等輝度条件と等明るさ条件の知覚潜時はほぼ一致しているが、短波長や長波長では、等輝度条件に比べ等明るさ条件の潜時のほうが短くなっている。ところで、Fig. 2 の下段に、等明るさの輝度と等輝度の輝度の比の対数値を、テスト光波長に対して示しており、等明るさ条件の輝度は標準の輝度より低く、とくにスペクトル両端で大きく低下している。この輝度の低下と、知覚潜時の短縮とは対応しており、輝度の低下が大きいほど知覚潜時が短くなっている。また、各波長において、知覚潜時は明るさに変化があっても輝度に変化がない色相置換のときに最も長くなるように思われる。これは、色が変化するとき輝度の低下が大きいほど、色チャンネルに比べて過渡応答特性のよい輝度チャンネルによって知覚潜時の長さが決まるためと考えられる。

3.2 実験2 輝度変化色光の知覚潜時

Fig. 3 は、輝度変化を伴って色が白色から単色へ入れ換わるときの相対知覚潜時を示す。横軸は、白色光輝度 (100 td) に対するテスト光輝度の比の対数値をさらに対数スケールで示しており、輝度減少の場合は横軸の数値に負符号を付けている。2名の被験者の結果は異なるシンボルで表わしている。各点の棒は平均値の標準誤差である。各テスト波長光ごとに対応された図の、左側が輝度減少、右側が輝度増加の結果である。どのテスト光についても、輝度増減の変化量が増大すると知覚潜時が短くなっており、しかも、この関係はほぼ直線に近い。実線および破線は、各被験者ごとに最小二乗法による直線近似を行なった結果であり、次の式で表わされる：

$$T = a \log |\log L_t / L_w| + b \quad (1)$$

ここで、 T は相対潜時、 L_t 、 L_w はテスト光および白色光の輝度、 a 、 b は係数である。図の中に示した数字は、各被験者の結果についての係数 a の値を示している。

結果を見ると、白色テスト光の場合、近似直線の傾きは輝度の減少と増加でほとんど等しく、また、被験者間でも類似している。2名の被験者の近似直線の傾き a を平均すると、輝度減少では -10.1 ms/td、輝度増加で -9.9 ms/td と、輝度変化量の増大とともに、どちらもほぼ同じ割合で潜時が短くなっている。白色テスト光の場合、輝度変化によって輝度チャンネル応答のみが変化すると考えられるが、これまでも、輝度チャンネル応答については、フラッシュ光の接続時間と閾値強度の関係に輝度の減少と増加で有意な差がないことが示されて

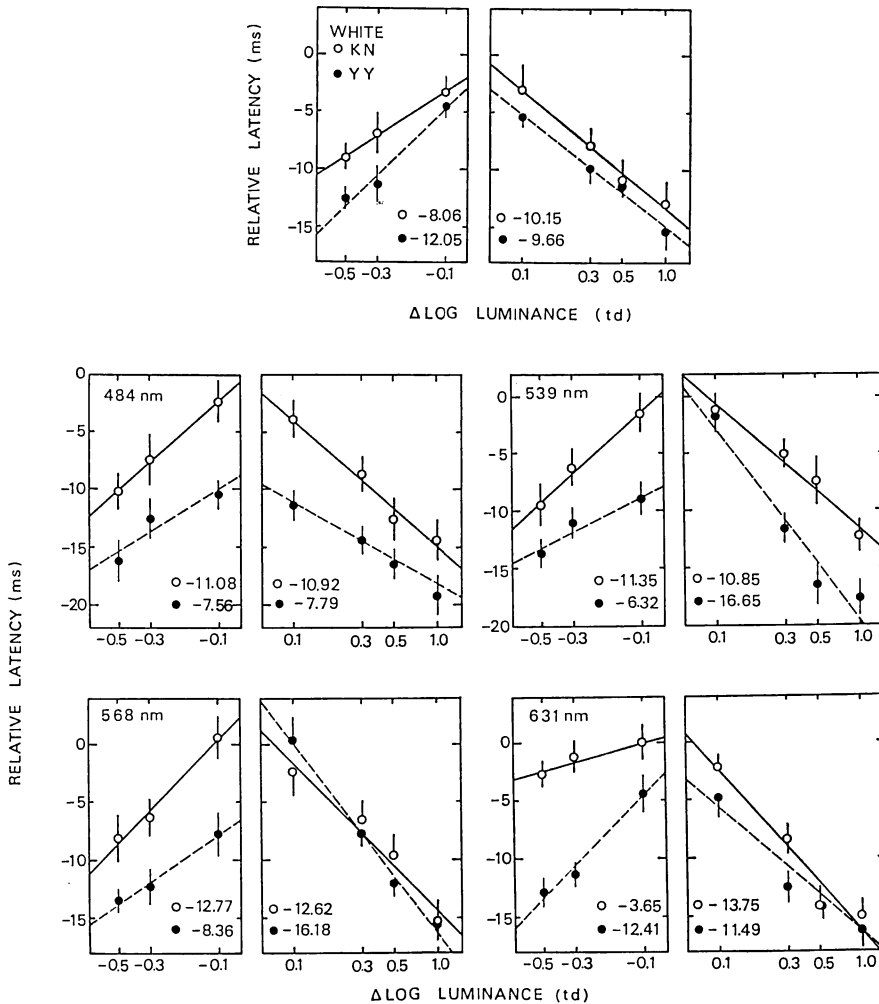


Fig. 3 Relative latencies of luminance change lights as a function of logarithms of the ratio of test luminance to 100 td. The numbers in the figure express the values of the slopes of regression lines.

おり⁷⁾, 輝度の減少と増加で時間特性が類似している **Fig. 3** の白色テスト光の結果は、これに一致している。

一方, 単色テスト光の場合, 係数 a は, テスト光波長, 輝度の増減の変化方向, あるいは被験者によって異なっている。これは, 刺激変化の検出における色チャンネル応答の寄与が異なるためと考えられる。もし, 刺激変化が輝度チャンネルのみを介して検出されるならば, その知覚潜時は波長に依存せず, 白色テスト光の潜時と同じになり, もし色チャンネルが関与するときには, 白色テスト光の場合とは異なる潜時を示し, その色チャンネルの寄与は単色テスト光と白色テスト光の知覚潜時の差として示されるであろう。 **Fig. 4** に, **Fig. 3** から求めた単色と白色のテスト光の知覚潜時の差を示す。 **Fig. 3**

と同様, 左側に輝度減少, 右側に輝度増加の場合を示している。縦軸の正の値は, 単色テスト光のほうが白色テスト光の場合よりも知覚潜時が長いことを表わす。

輝度減少の場合, 被験者 KN では輝度変化量が大きいとき ($-0.5 \log$ 単位), 631 nm テスト光の潜時は白色テスト光の潜時よりも有意に長く ($p < 0.05$), また, 484 nm や 539 nm の場合に比べても潜時が長い ($p < 0.05$). 484 nm, 539 nm や 568 nm の間ではほとんど差がない。一方, 被験者 YY では, 631 nm テスト光の潜時は白色テスト光の潜時と差がない。631 nm 以外の単色テスト光の潜時が互いに同じような傾向を示すのは KN の場合と同じであるが, KN の場合と異なり, 輝度変化量が小さいとき ($-0.1 \log$ 単位), 潜時が白色光よ

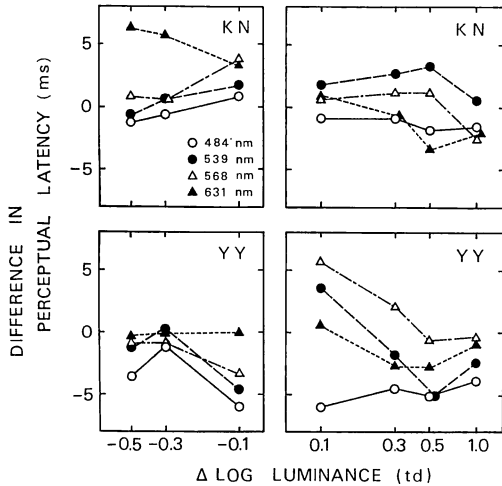


Fig. 4 Difference in relative latencies between white test lights and spectral test lights as a function of logarithms of the ratio of test luminance to 100 td.

りも短くなる (有意に差があるのは ($p < 0.05$), 484 nm のみ). このように, 輝度減少での潜時は被験者によって異なる. とくに, 白色テスト光と同様の潜時を示す単色光波長が, KN では短・中波長, YY では長波長であるといった個人差が見られる.

輝度増加の場合は, 被験者 KN については, テスト光波長間および単色テスト光と白色テスト光との間に有意な潜時の差はない ($p < 0.05$). 被験者 YY では, 輝度変化量が大きくなると (0.5 log 単位以上), 波長によって有意な潜時の差はない ($p < 0.05$) が, 輝度変化量が小さいと, 潜時に波長依存性が見られる. 輝度変化 0.01 log 単位の場合, 484 nm 光の潜時は他の波長のテスト光や白色テスト光の潜時と異なる (白色, 631 nm については $p < 0.05$, 539 nm, 568 nm については $p < 0.01$). 輝度変化 0.03 log 単位では, 484 nm 光の潜時は白色光とは差がないが, 568 nm 光とは差がある ($p < 0.05$). KN では今回用いた輝度増加は輝度チャンネルによって検出されており, YY では輝度変化の 0.3 log 単位程度まで色チャンネルが刺激変化の検出に関与していると思われる. ところで, 輝度増加が小さいとき, YY について, 短波長光では白色光よりも潜時が短く, 一方, 中波長では潜時が長くなっている. このように, 色チャンネルの関与の仕方は短波長と中波長で異なっており, 色チャンネル応答の波長依存性が見られる.

これまで, 色相置換法を用いた, 色チャンネルの応答時間特性の研究において, 輝度変化があるときの視覚系時間特性の波長依存性について調べられており, 輝

度条件は異なるが, 輝度変化量が対数単位で, $0.2^{4)}$, $\pm 0.3^{8)}$, あるいは $0.3^{9,10)}$ のときには波長依存性のないことが示されている. 本研究の結果でも, 被験者 KN で 631 nm 光の輝度減少において潜時が長くなる以外, 輝度変化量がほぼ 0.3 log 単位以上では潜時の波長依存性はほとんどなく, これまでの結果と一致する. 本研究では, 輝度変化が 0.1 log 単位のように小さい場合には, 色チャンネルの寄与に個人差があることが示された.

3.3 等明るさ色変化と輝度変化の知覚潜時

等明るさ条件での知覚潜時は輝度変化量と潜時の関係によって与えられるであろう. **Fig. 2** の下段に示した, 等明るさ条件での輝度変化量に対し, **Fig. 3** の近似直線, すなわち, 式(1)を用いて計算によって求めた等明るさ条件での潜時が **Fig. 5** の黒丸である. 白丸と三角は実際に測定された等明るさ条件と等輝度条件の知覚潜時を示している. 予想されるように, 近似直線から得た等明るさ条件の潜時は, 測定された潜時とほぼ一致している.

3.4 知覚潜時から求めた輝度変調閾値

白色テスト光が輝度変化0で提示されたとき, その輝度変化はいつまでも知覚されず, これは知覚潜時が無限大とみなせる. 同様に, **Fig. 3** の輝度変化と知覚潜時の関係を輝度変化の小さいほうへ外挿すると, 輝度変化量が小さくなるとともに知覚潜時は長くなる. しかし, 単色テスト光の場合, 輝度変化がない等輝度条件でも色チャンネルによって刺激変化が検出されるため, 潜時は等輝度条件の潜時よりは長くないであろう. そして, 近似直線と等輝度条件の知覚潜時の交点の輝度変化量は, これより小さな輝度変化では知覚潜時に輝度チャンネル応答が寄与しない輝度変化検出の閾値を表わしていると考えられる. これは輝度変調閾値に相当する.

Fig. 6 に, 式(1)を用いて求めた, その輝度変化量を示す. 左の縦軸は輝度変化量, 右の縦軸はテスト光輝度を示している. 丸は輝度減少の場合, 三角は輝度増加

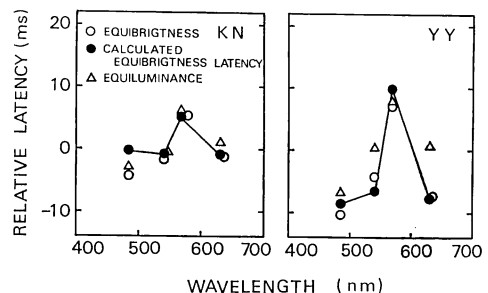


Fig. 5 Equibrightness latencies obtained with regression lines in **Fig. 3**.

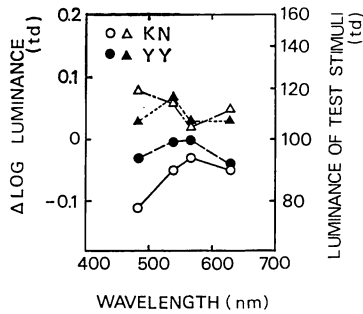


Fig. 6 Luminance modulation thresholds obtained with perceptual latencies.

の場合である。この輝度変化量の0を含む範囲の広さによって輝度変調感度が表わされる。すなわち、範囲が広いほど感度が低いと考えられる。範囲は484 nmで最も広く、2名の被験者の平均で28.2 tdあり、539 nmでは22.1 td、568 nmでは9.4 td、631 nmでは19.5 tdである。赤色や緑色に比べ青色の輝度変調閾値が高いという結果は、時間MTFで知られている変調閾値の波長依存性¹¹⁾と傾向が一致している。

4. おわりに

眼の網膜上のある位置に投射される光刺激は、視対象の動きや形・明るさの変化、あるいは眼球や身体の動きなどのため、つねに複雑な時間的変動をしている。本研

究では、光刺激の時間的変化を非常に単純化して、視野の一定位置の色の変化について、それを検出するときの視覚系時間特性を調べた。このような刺激変化に対する知覚特性を知ることは、視覚系の応答過程を明らかにするためだけでなく、視覚環境でのわれわれの知覚特性を評価したり、視覚的情報を適切に表示する方法を検討したりするうえで重要と考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり、有益な討論をしていただいた製品科学研究所基礎人間工学部感覚情報工学課の皆様深く感謝します。

文 献

- 1) J. A. J. Roufs: *Vision Res.*, **12** (1972) 279.
- 2) J. A. J. Roufs: *Vision Res.*, **14** (1974) 853.
- 3) 山下由己男: *光学*, **13** (1984) 308.
- 4) R. W. Bowen: *Vision Res.*, **21** (1981) 1457.
- 5) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1660.
- 6) S. L. Guth and H. R. Lodge: *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1977) 450.
- 7) J. A. J. Roufs: *Vision Res.*, **14** (1974) 831.
- 8) R. W. Bowen, D. T. Lindsey and V. C. Smith: *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 1501.
- 9) M. J. Nissen and J. Pokorny: *Percept. Psychophys.*, **22** (1977) 457.
- 10) J. Pokorny, R. W. Bowen, D. T. Williams and V. C. Smith: *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 103.
- 11) D. H. Kelly: *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 983.