

自然画像における輝度分布特性と空間構造の認識が 明度知覚に与える影響

金 成 慧・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専攻 〒226-8502 横浜市緑区長津田 4259-G2-3

The Influence of the Luminance Distribution and Spatial Scene Recognition on Lightness Perception in Natural Images

Kei KANARI and Hirohiko KANEKO

Department of Information Processing, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology, 4259-G2-3 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502

It is known that perceived lightness of an object is influenced by the luminance of the adjacent area and also by the contexts of the scene. However, it is not clearly known how those factors affect the lightness perception when both of them are available such as in natural scenes. This study investigated the relationship between the perceived lightness of an object and the recognized layout of the surrounding scene. Observers responded perceived lightness of the patch presented on the natural images. The images were arranged to manipulate the degree of scene recognition with keeping the luminance and distance from the center of each pixel unchanged. Results showed that perceived lightness was influenced by the degree of the recognized image contents even though the luminance distribution of the image was the same. In addition, results showed that the standard deviation of luminance in adjacent area affected the luminance perception.

Key words: lightness perception, spatial recognition, natural images

1. はじめに

多くの自然環境において、光源レベルは空間や時間によってさまざまに変化する。このような状況下でも、視覚系は正確に面の明度を知覚しなければならない。面から眼に向かう反射光の強度は、面の反射率と面を照らす入射光の強度に依存するため、面の輝度だけからでは面の反射率はわからない。しかしながら、ヒトの視覚系はほとんどの自然環境下で面の明度を正確に見積もることができる。これを明度の恒常性とよぶ。

対象の知覚的明度とその周囲の文脈によって変化することは多くの研究によって示されており¹⁻⁶⁾、それを説明する理論も提案されている。例えば、刺激を複数の“ローカルフレームワーク”とよばれる領域に分割し、各フレームワーク内の最高輝度を白として他の部分の反射率を見積もるという anchoring 理論が提案されている⁷⁻⁹⁾。また、視覚系の初期段階における、さまざまな方位選択性と空間周波数選択性をもったフィルターを用いることで説明するモデル

(ODOG モデル)^{10,11)} や、輝度のエッジや交差を手がかりとした照明の解釈に基づいたモデル^{5,12-16)}、刺激から推測される 3D シーン特性による説明¹⁷⁻¹⁹⁾、さまざまな明度錯視 (simultaneous brightness, White's illusion, Wertheimer-Benary illusion, the intertwined cross illusion, the inverted T illusion²⁰⁾) の説明が可能とする、知覚的明度が自然環境における特定の輝度の確率分布によって決定されるという考え²¹⁾ などがある。しかし、これらの明度知覚のモデルのほとんどは明確に定義された単純な刺激に対してのみ有効であり、複雑な刺激や特定の不均一な照明下の自然シーンにおける知覚を説明することは難しい。

明度知覚においては、少なくとも、視覚系の比較的低次で起こると考えられる、対象に近接する周囲の輝度による影響と、比較的高次で起こると考えられる周囲の照明や反射率の認識による影響があると考えられる。しかし、それらの影響がそれぞれどの程度あるのか、それらの相互作用はあるのか、効果の単純な足し合わせになるのかなどの点に関して、明らかであるとはいえない。それを明確にすることが難しい理由のひとつは、自然画像を用いることによ

E-mail: kei.kanari@ip.titech.ac.jp



Fig. 1 Stimulus configuration. The left and right figures were test and comparison stimuli, respectively.

り周辺の認識による影響を調べようとする、同時に背景画像の物理的輝度統計量も異なってしまうため、それらの影響の切り分けが難しいことが大きな要因である。

そこで本研究では、画像の物理的輝度情報を一定に保ったまま、画像内容の認識の度合いを段階的に変化させることで、高次の影響と低次の輝度統計量の影響を分離し、明度知覚におけるそれぞれの影響を明確にすることを目的とした。実験1では、照明環境が大きく異なると考えられる、室内、屋外、森の3つの空間環境が明度知覚に与える影響を検討した。実験2では、画像の物理的輝度情報を一定に保ったまま、画像に加工を加えて画像内容の認識の度合いを段階的に変化させることで、高次の影響と低次の輝度統計量の影響を分離し、明度知覚におけるそれぞれの影響を検討した。また、上述したように、明度知覚における低次の刺激要素の影響を調べたこれまでの研究は、単純な一様背景領域の局所的輝度による影響を調べたものが多い。そこで、単純な対比効果のみならず、画像全体から抽出されるいくつかの大局的な物理的輝度の統計量が明度知覚に与える影響を明らかにすることを、第2の目的とした。

1. 実験 1

実験1では通常の正立した画像を用いて、空間環境の違いによる明度知覚への影響を検討した。本実験の結果には、画像内容の認識による高次の影響と画像の輝度分布特性による低次の影響が含まれると考えられる。実験では、テスト刺激であるモノクロの自然画像と、その画像の平均輝度と同じ輝度をもつ均一な背景画像をディスプレイの左右に同時に呈示した (Fig. 1)。そして、自然画像の中央に配置されたグレーの円形ターゲットパッチの知覚的明度を、均一な画像中央のターゲットパッチの輝度を調節してマッチングすることで測定した。

1.1 刺 激

照明環境が大きく異なると考えられる、室内、屋外、森の3つの環境それぞれにおいて撮影した画像を、円形 (直径 20.7 deg) に切り抜いて刺激として用いた (Fig. 2)。これらの画像はすべて大学キャンパス内で撮影したもので

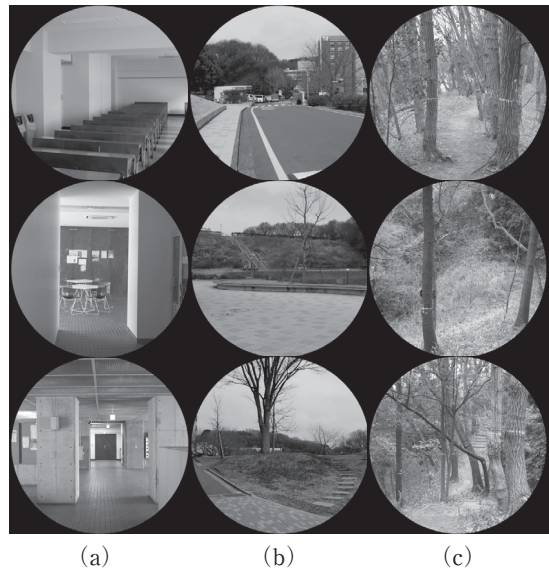


Fig. 2 Examples of pictures taken in the environments of (a) indoor, (b) outdoor open field, and (c) outdoor closed field (forest).

あった。各環境において異なる場所で撮影されたそれぞれ20枚、合計60枚の画像を用いた。そしてすべての画像の平均輝度を、 70.0 cd/m^2 に揃えた。この値は、加工前の森の画像20枚の平均輝度に近い値である。画像はデジタルカメラのオートモードで撮影したものであったため、白飛びや黒つぶれを多少含んでいるが、画像の自然さは損なわれていない。また、ディスプレイのキャリブレーションを行い、各ピクセルの値に対して輝度値が線形になるようにデータを補正して画像を呈示した。平均輝度の調整は、各ピクセルに均等に輝度を加減することで行った。この調整によって各ピクセルの輝度値が最大値・最小値を超える場合には、最大値・最小値のままとし、その他のピクセルの輝度の変化によって平均が変化した。

これらの画像の中央に円形のテストパッチ (直径 2.5 deg, 輝度 143.8 cd/m^2) を配置した。テストパッチの輝度は自然画像刺激中の最高輝度 288.0 cd/m^2 と平均輝度 70.0 cd/m^2 の中間値付近に設定した。この画像全体をテスト刺激とよぶ (Fig. 1左)。このテスト刺激と同時に呈示され、テスト刺激の周辺部分の平均輝度と等しく均一な輝度をもつグレーの円環刺激と、その中央の応答パッチからなる刺激を、比較刺激とよぶ (Fig. 1右)。それら刺激の中心間の間隔は 20.7 deg であり、 $58.7 \times 38.8 \text{ deg}$ の大きさをもつ液晶ディスプレイ (Apple Cinema HD Display, 30 インチ, 解像度 2560×1440) 上に同時に呈示された。背景輝度は 1.99 cd/m^2 であった。

実験は暗室で行った。視距離は 57 cm で、被験者の頭部は顎台によって固定された。刺激の呈示など実験の操作

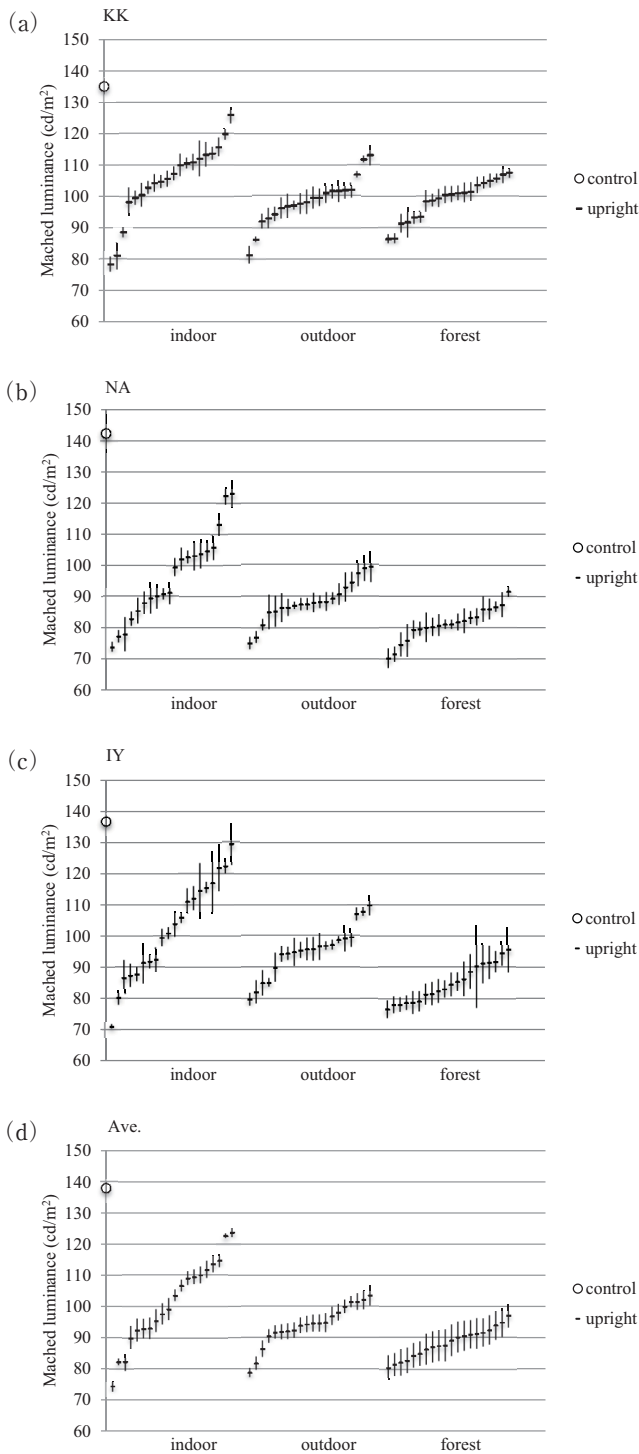


Fig. 3 Luminance of comparison patch when perceived lightness was matched to the test patch (143.8 cd/m^2). The data is arranged in ascending order of matched luminance for each stimulus. Each panel shows the results of subjects KK (a), NA (b), IY (c) and average data of all subjects (d). Error bars indicate SEM.

は、パソコン (Apple Mac Pro) および自作のソフトウェア (X-code および実験用ライブラリ Psychlops を使用して作成) を用いて行った。

1.2 手続き

被験者は、ディスプレイに呈示されたテスト刺激の中央に配置されたテストパッチに対して知覚した明度と、比較刺激の中央に配置された応答パッチの明度を、後者の輝度をテンキーで調節することでマッチングした。応答時間は無制限であったが、ほとんどの場合 10 s 以下で調節は終了した。テスト刺激と比較刺激は同時に呈示され、呈示位置はトライアルごとに左右交互に入れ替わった。比較刺激中央の応答パッチの輝度の初期値はランダムに設定された。各トライアルの間にランダムドットからなるマスク刺激が 500 ms 呈示された。

実験 1 では、21 回の試行を 1 ブロックとした。1 つのブロック内では、刺激の環境は 1 つに固定された。ブロック内の刺激は 20 画像とコントロール画像で合計 21 画像あり、ランダムな順序で呈示された。また、1 セッション内では室内、屋外、森のブロックを各 1 回行い、これを 5 セッション、合計 15 ブロックの実験を行った。

22~27 歳の大学院生の 3 名 (男性 2 名、女性 1 名) が実験に参加した。すべての被験者は正常視力 (矯正視力を含む) を有していた。うち 1 名が著者であり、残り 2 名は実験の目的を知らなかった。

2. 結果と考察

各テスト刺激において、テストパッチと知覚的明度がマッチングした際の比較刺激中央の応答パッチの輝度を Fig. 3 に示す。(a)~(c) は各被験者の結果を示し、各点は 5 回の応答の平均である。(d) は被験者 3 名の平均の結果を示す。縦軸はマッチングした応答パッチの輝度 (cd/m^2)、横軸は 60 枚の各テスト刺激画像に対応し、環境ごとに応答輝度の結果が小さい順に並べてある。一番左の+シンボルはコントロール刺激 (均一なグレー) に対する結果であり、次からの 20 点が室内、その次の 20 点が屋外、最後の 20 点が森のそれぞれの環境のテスト刺激に対応している。

各環境の違いによる効果をより明確にするため、環境ごとに応答輝度を平均した。これを Fig. 4 に示す。縦軸はマッチングした応答パッチ輝度 (cd/m^2)、横軸の各グループは各被験者と被験者平均のデータに対応し、黒バーは室内、灰色バーは屋外、白バーは森の画像の平均結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。

Fig. 3 より、まず、テストパッチ輝度 (143.8 cd/m^2) とコントロール画像 (+シンボル) に対する応答輝度の平均が被験者すべてにおいてとても近いことから、被験者はマッチングをきちんとできていたことがわかる。また、コントロール画像以外の画像におけるテスト刺激の応答輝度

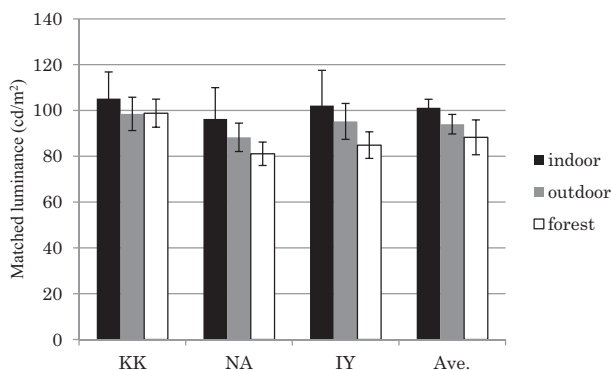


Fig. 4 Averaged luminance for each condition of environment. Error bars indicate standard deviation.

はすべて、コントロール画像の応答輝度の平均と比べて低くなっていることがわかる。

また Fig. 3, Fig. 4 の結果より、それぞれの環境によって応答の違いがみられる。室内画像においては、画像による応答のばらつきが大きく平均応答輝度が大きい。また、森の画像においては、平均応答輝度が比較的小さく、画像による応答のばらつきも小さい。屋外はその中間である。この傾向を統計的に検討するため、各被験者 (KK, NA, IY) のデータおよび被験者平均のデータにおいて、“環境”を要因とした 1 要因分散分析を行った。その結果、すべてにおいて主効果がみられた (それぞれ、 $F(2, 38) = 24.363, p < .001$; $F(2, 38) = 44.518, p < .001$; $F(2, 38) = 47.491, p < .001$; $F(2, 38) = 35.128, p < .001$)。環境による主効果に有意差があったため、“環境”要因の主効果における多重比較を行った。その結果、被験者 KK においては森と屋外に有意差がなかった ($t(38) = 0.267, p > .10$) が、その他はすべて有意差があった。

これらの結果から、室内、屋外、森の 3 つの環境において、周囲の平均輝度を等しくした場合においても、知覚される明度が異なることが明らかになった。そして、その結果には、少なくとも、高次の環境の照明や空間構造の認識による影響と、平均輝度以外の物理的な輝度の分布特性の影響のいずれか、あるいはその両者の影響が含まれると考えられる。実験 2 では、画像の物理的輝度情報を一定に保ったまま、画像内容の認識の度合いを段階的に変化させることで、輝度統計量の影響を一定に保ったまま、内容の認識の違いによる影響をさらに詳細に調べた。

3. 実験 2

3.1 刺激

実験 1 で用いた画像を、物理的な輝度情報を等しく保ったまま画像内容の認識度合いを段階的に変化させるため、

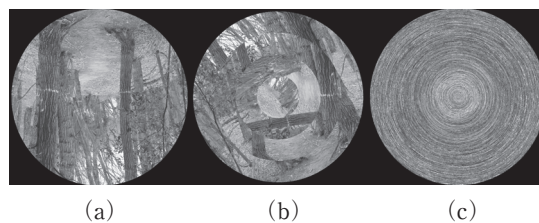


Fig. 5 Examples of pictures with the arrangements called (a) up-side-down, (b) 100 pix_Scramble and (c) 1 pix_Scramble.

それぞれ 3 種類に加工した。その方法は、上下の倒立、および画像を同心円の円環状に分割してそれらをそれぞれ異なるランダムな角度に回転させたスクランブルであった。同心円の円環の幅は 1 pixel (視角 0.03°) と 100 pixel (視角 2.6°) の 2 種類を用いたため、加工画像は全部で 3 種類となる (Fig. 5)。このような画像の改変をしても各画素の輝度値は変化しないため、物理的な各画素の中心からの距離に依存する輝度統計量は変わらない。しかし、画像内容に認識のしやすさは明らかに変化する。正立画像 (Fig. 1) は画像内容の認識が容易であるが、1 pixel 幅スクランブル画像 (Fig. 5(c)) の画像内容はまったく認識できない。倒立画像 (Fig. 5(a)) および 100 pixel 幅スクランブル画像 (Fig. 5(b)) はそれらの中間であり、ある程度画像内容が認識できる。

テスト刺激画像は、60 種類の写真画像 (20 画像 \times 3 環境) それぞれに対し、加工法が、上下倒立させたもの (upside-down), 100 pixel 幅と 1 pixel 幅のスクランブル画像 2 種類 (100 pix_Scramble, 1 pix_Scramble) の合計 3 種であり、均一のグレーであるコントロール画像を含め、全部で 181 種類であった。

3.2 手続き

実験の手続きと被験者は、実験 1 と基本的に同様であった。室内、屋外、森の画像環境 3 条件、上下倒立、100 pixel 幅のスクランブル、1 pixel 幅のスクランブルの画像加工法 3 条件それぞれについて 5 セッションずつ、合計 45 セッション (3 環境 \times 3 加工法 \times 5 セッション) の実験を行った。

実験 1 と同じ被験者 3 名が実験に参加した。

4. 結果

各テスト刺激において、テストパッチと知覚的明度がマッチングした際の比較刺激中央の応答パッチの輝度を Fig. 6 に示す。(a)~(c) は各被験者の結果を示し、各点は 5 回の応答の平均である。(d) は被験者 3 名の平均の結果を示す。縦軸はマッチングした際の応答パッチの輝度

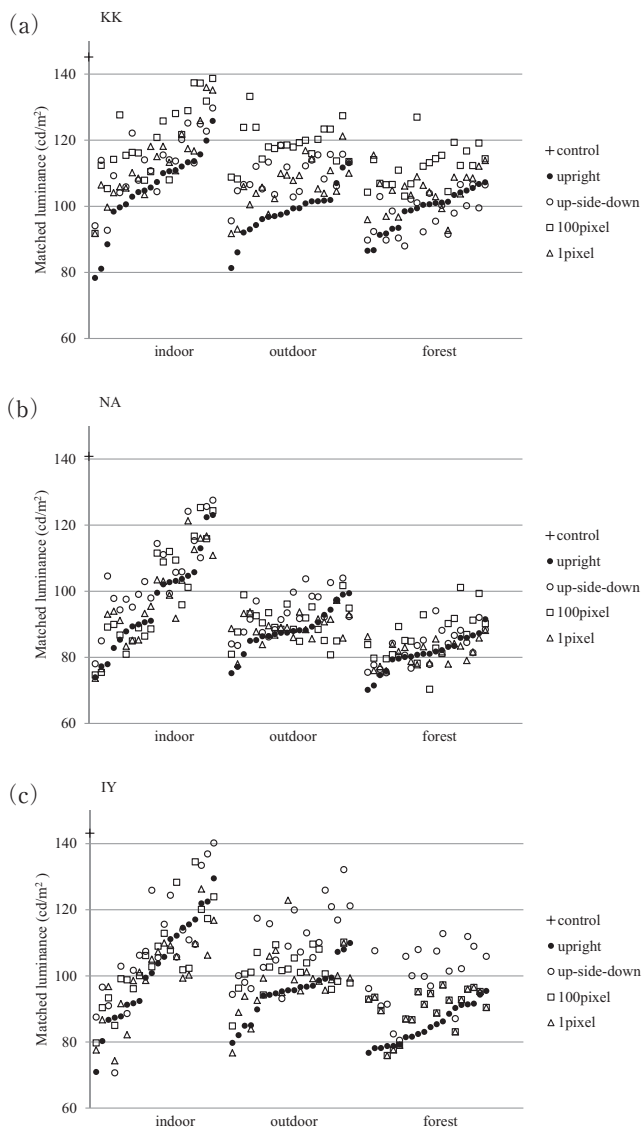


Fig. 6 Luminance of comparison patch when perceived lightness was matched to the test patch (143.8 cd/m^2). Each panel shows the results of subjects KK (a), NA (b), IY (c). The data is arranged in ascending order of matched luminance in the upright image condition for each condition of surround stimulus.

(cd/m^2), 横軸は60枚の各テスト刺激画像に対応し、実験1で得られた環境ごとの正立画像における応答輝度の結果が小さい順に並べてあり、実験1のデータも合わせてプロットしてある。一番左の+シンボルはコントロール刺激(均一なグレー)に対する結果であり、次からの20点が室内、その次の20点が屋外、最後の20点が森のそれぞれの環境のテスト刺激に対応している。シンボルの違いは画像の加工パターン条件を示し、●は正立、○は倒立、□は100 pixel幅スクランブル、△は1 pixel幅スクランブルである。

各環境、加工方法の違いによる効果をより明確にするた

め、それぞれの刺激グループごとに応答輝度を平均した。これを Fig. 7 に示す。縦軸はマッチングした応答パッチ輝度 (cd/m^2)、横軸の各グループは各環境に対応し、一番左の4つのバーは室内、次の4つのバーは屋外、次の4つのバーは森の画像に対する結果を示す。各まとまりで左から正立(黒色)、倒立(濃灰色)、100 pixel幅スクランブル(薄灰色)、1 pixel幅スクランブル(白色)の画像の平均結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。

Fig. 6より、実験1と同様に、テストパッチ輝度 (143.8 cd/m^2) とコントロール画像に対する応答輝度(+シンボル)がとても近いことから、被験者はマッチングをきちんとできていたことがわかる。また、コントロール画像以外の画像におけるテスト刺激の応答輝度はすべて、コントロール画像の応答輝度の平均と比べて低くなっていることがわかる。

次に Fig. 6, Fig. 7より、各画像に施した加工法による違いを見てみると、被験者によって多少のばらつきはみられるものの、それぞれの環境の画像グループにおいて、正立画像に対する応答輝度が最も小さくなる傾向がみられる。それに対して、倒立画像に対する応答輝度が最も大きくなる傾向がみられる。100 pixel幅スクランブル、1 pixel幅スクランブルの画像に対しては、例外も多いが、正立画像と倒立画像の中間的な値を示す場合が多い。

環境ごとの応答輝度の平均については、実験1の正立画像の場合と同様に、加工を施したパターンすべてにおいて室内、屋外、森の順に応答輝度が低くなる傾向がみられる。また、室内の場合は画像によって応答が大きく異なる。一方、森の画像の場合はばらつきが小さい。被験者ごとにみても、KKとIYは室内と屋外のパターンごとの応答がほぼ同じで、それらと比べて森が少し低く応答している傾向にある。NAは室内、屋外、森の順に低く応答しているが、一つの環境内のパターンごとの差は小さい。また、被験者NAは他2名よりテスト刺激全体において低く応答している。

同じ環境の画像における加工法による効果をみるため、各被験者(KK, NA, IY)および被験者3名の平均データにおいて、“加工パターン”を要因とした1要因反復測定分散分析を行った。その結果、室内、屋外、森の環境において、加工法による主効果にすべて有意な差があった(KK: $F(3, 57) = 29.11, p < .001$; $F(3, 57) = 22.29, p < .001$; $F(3, 57) = 20.58, p < .001$; NA: $F(3, 57) = 32.00, p < .001$; $F(3, 57) = 24.15, p < .01$; $F(3, 57) = 15.75, p < .005$; IY: $F(3, 57) = 49.22, p < .005$; $F(3, 57) = 24.15, p < .001$; $F(3, 57) = 44.21, p < .001$; 平均: $F(3, 57) = 22.08, p < .001$;

$F(3, 57) = 30.56, p < .001$; $F(3, 57) = 40.42, p < .001$). また、平均データにおける加工法による主効果に関する多重比較の結果は、室内画像では倒立と 1 pixel, 正立と 100 pixel に有意な差がなく、屋外と森の画像では倒立と 1 pixel に有意な差がなかったが、それら以外の条件の組み合わせではすべて有意であった。以上の統計分析の結果より、周囲の物理的輝度が一定であっても、画像内容の認識の変化が明度知覚に影響を与えることが明らかになったといえる。

5. 考察

本研究において、画像の物理的輝度情報を一定に保ったまま、画像内容の認識の度合いを段階的に変化させることで、高次の情報処理が関連すると思われる環境や画像内容の認識が明度知覚に与える影響を調べた。その結果、空間環境や画像内容の認識度合いの違いによると考えられる明度知覚の違いがみられた。しかし、空間環境の異なる画像による結果の違いを詳しくみると、画像内容がまったくわからない 1 pixel のスクランブル画像でも環境による違いがみられており、非常に興味深い。その原因として、すべて刺激の平均輝度を同じに揃えたとはいえ、それらの画像の輝度の他の物理的な統計値は等しくないため、それらが明度知覚に影響している可能性が考えられる。以下に、画像内容の認識による影響、輝度統計量による影響についてそれぞれ考察する。

5.1 空間環境や認識の違いによる影響

正立の原画像条件における結果と比較し、倒立、100 pixel, 1 pixel の画像では、いずれも高い応答輝度だった。これは正立画像と比べ周囲の環境の認識が十分にできず、照明が過小評価され、物理的テストパッチ輝度である 143.8 cd/m^2 に近づいたとも考えられる。この傾向は 3 環境において共通している。また、“加工パターン”を要因とした 1 要因反復測定分散分析の結果、3 つすべての環境において、加工法による主効果が有意であった。ただし、加工法による主効果における多重比較の結果は、3 つの環境すべてで、倒立と 1 pixel の加工法の違いによる有意な差がないことを示した。これは、照明の認識において、画像を倒立させる操作は、画像内容が全くわからない 1 pixel スクランブルと同様の効果があることを示すと考えられる。ヒトの顔知覚の研究においても、顔を倒立にすると表情が認識しづらくなることが知られているが²²⁾、本研究でも同様に、画像を倒立させると明度知覚を決定するための照明や空間構造などの認識が著しく損なわれることを示している。室内画像において、正立と 100 pixel スクラン

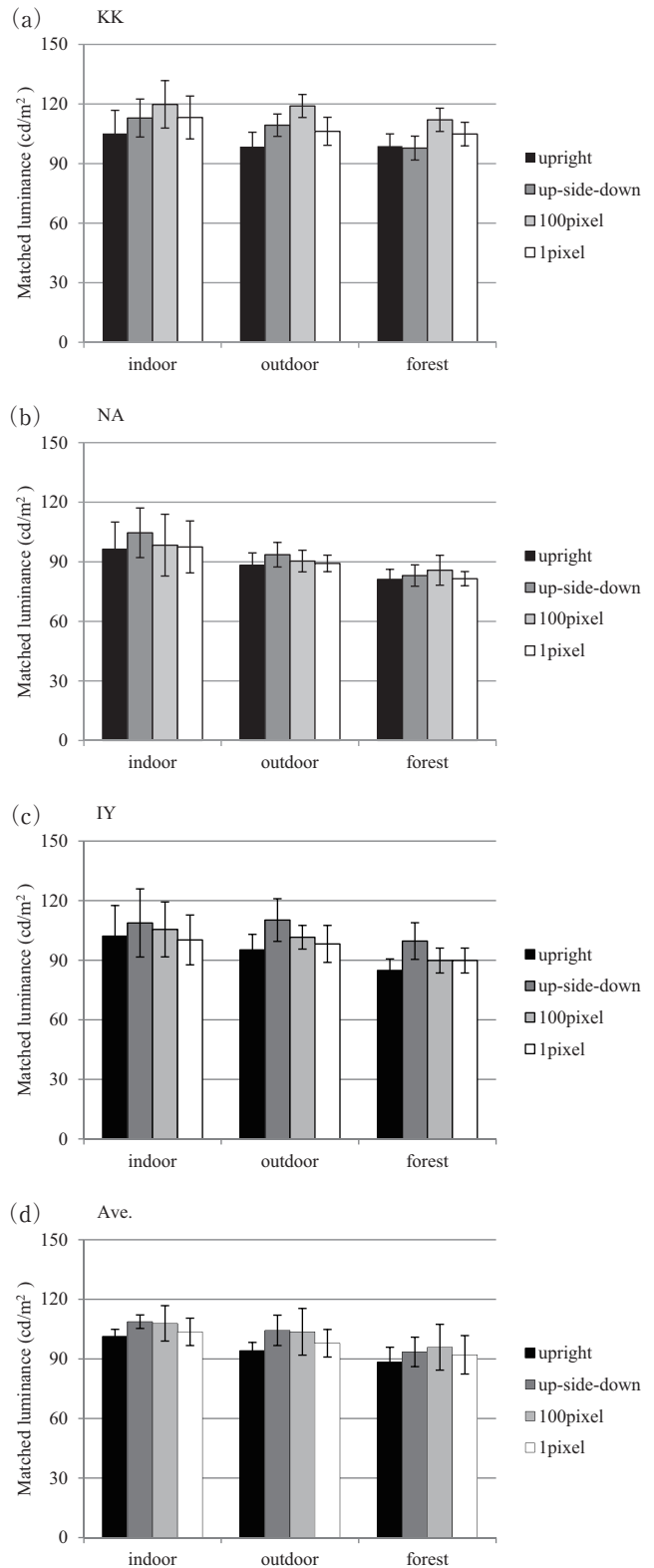


Fig. 7 Averaged luminance for each combination of environment and modification conditions of subjects KK (a), NA (b), IY (c) and average data of all subjects (d). Error bars show standard deviation.

ブル画像の間にも有意な差がみられなかった。室内画像では白い壁が中央に位置する画像が多くあったため、100



Fig. 8 Concentric circles of adjacent area used for the analysis in section 5.2.

pixel の幅でスクランブル回転させてもテストパッチの周囲の画像内容は正立画像とあまり変わらないことになる。それが、室内で正立と 100 pixel スクランブル画像に対する結果に有意な差がなかった原因のひとつと考えられる。

いずれにしても、本研究の結果は明度知覚において周囲の空間の認識が影響することを示している。これまで明度知覚において、空間構造の認識が及ぼす影響についてあまり検討されていないが、色知覚においてはいくつか報告がみられる。自然画像の彩度の知覚において、自然画像に順応したときのほうが、その画像を分割してスクランブル呈示して空間構造の情報をなくして順応した場合より、彩度の順応効果が大きいことが報告されている²³⁾。また、二次元写真に対する色恒常性は、スクランブル加工して三次元情報をなくした場合や、単に観察された場合より、三次元知覚が増加された条件においてより強く示されることも報告されている²⁴⁾。それらの研究および本研究の結果より、色処理および明処理の両方において、空間構造の認識は重要であること、そして共通の高次メカニズムが関与している可能性も考えられる。

5.2 輝度統計量による影響

実験データの分析の結果、環境による主効果に有意な差があったが、画像内容がまったくわからない 1 pixel のスクランブル画像でも環境による違いがみられた。このことから、画像内の空間環境を認識して照明を推定するというよりは、単純に対象の周囲の輝度の分布が明度に影響していると考えられる。本研究では、自然画像を用いたため、対象の周囲の背景は均一でなく、画像ごとにさまざまな複雑な分布をしている。そのため、周囲の平均輝度を一定にしたとはいえ、テストパッチに隣接する領域の輝度の他の物理的な統計値は必ずしも一定ではない。そのため、対象の直近の周囲の輝度が、対比効果を生み出していることも考えられる。

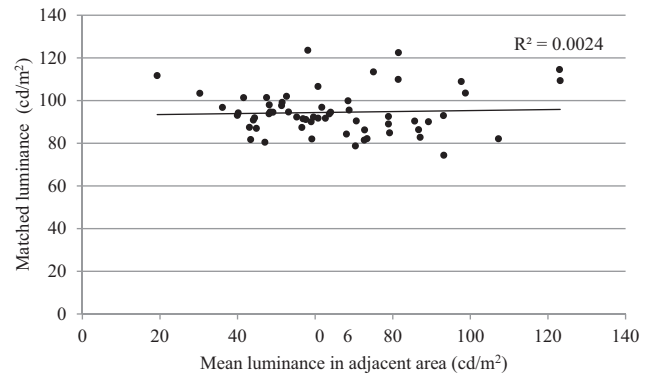


Fig. 9 An example of the analysis in section 5.2. Matched luminance for all upright pictures as a function the mean luminance in adjacent area of 30 pixel width.

そこで、まずテストパッチに近接する領域の平均輝度を計算し、その値と応答輝度との相関を分析した。分析に用いたテストパッチに近接する領域は同心円とし、Fig. 8 に示すように、テストパッチ（半径 50 pixel、視角 1.3 deg）の円周から 30, 60, 90, 180, 300 pixel（それぞれ視角 0.8, 1.6, 2.4, 4.8, 8.0 deg）までの円環状の領域であった。Fig. 9 に 30 pixel 幅の近接領域の平均輝度と正立画像での応答輝度の関係を示す。これより、Fig. 9 の横軸である近接領域の平均輝度の範囲は、やはり自然画像であるため、30 pixel の場合、19.2~123.1 cd/m^2 と画像によってさまざまな値をとっていることがわかる。しかしながら、その近接領域の平均輝度と応答値との間に相関はみられない。この傾向は他の大きさの近接領域でも同様であった。刺激中央のパッチに対する応答輝度と近接領域の平均輝度との相関は、正立、倒立、スクランブルの各画像、近接領域の 30, 60, 90, 180, 300 pixel の幅すべてにおいて、ほとんどみられなかった (Fig. 10)。また、相関係数の値は、正立画像、倒立画像と比較してスクランブル画像においてやや高い傾向があるものの、その差は小さく、同じ加工法の画像において分析した幅による変化はほぼみられなかった。

次に、環境ごとに近接領域の平均輝度と応答輝度との相関係数を算出した。これを Fig. 11 に示す。その結果、条件によって応答輝度と近接領域の平均輝度との間に相関がみられた。例えば、森のスクランブル 100 pixel と 1 pixel における広い領域（180, 300 pixel）や、屋外の正立、倒立およびスクランブル 100 pixel における狭い領域（30, 60, 90 pixel）の場合に 0.5 程度の負の相関がみられた。一方、室内においては、平均輝度との相関は、どのパターン、どの近接領域の幅にもみられなかった。このように、刺激画像全体では応答輝度と近接領域の平均輝度との相関はみられなかったが、環境ごとに分析すると、条件によって相関

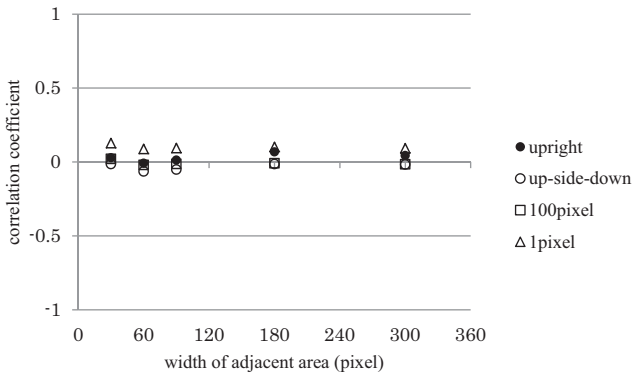


Fig. 10 The correlation coefficient between the matched luminance and the mean luminance in adjacent area.

がみられることが明らかになった。これらのことから、環境特有の空間的輝度分布によって明度知覚が変化した可能性が考えられる。

そこで次に、隣接領域の輝度特性の影響に関して、輝度分布の最も基本的な指標のひとつである輝度標準偏差を計算し、その値と応答輝度との相関を分析した。分析に用いた領域は、平均の分析の場合と同様にテストパッチの円周から 30, 60, 90, 180, 300 pixel (それぞれ視角 0.8, 1.6, 2.4, 4.8, 8.0 deg) までの円環状であった。Fig. 12 に、30 pixel 幅の近接領域の輝度標準偏差と正立画像での応答輝度の関係を示す。Fig. 12 の横軸である近接領域の輝度標準偏差を計算したところ、その範囲は 30 pixel の場合、2.4~82.0 cd/m² と平均輝度と同様にさまざまな値をとっていることがわかる (Fig. 12)。そしてここでは、輝度標準偏差の増加に対して、応答値が減少する傾向がみられた。正立、倒立、スクランブル画像における隣接輝度の輝度標準偏差と応答輝度との相関をみたところ (Fig. 13)、輝度標準偏差が増加するにしたがって、テストパッチの知覚的明度が減少するという負の相関が、30, 60, 90, 180, 300 pixel すべての近接領域の幅と正立、倒立、スクランブル画像すべてのパターンにおいてみられた。また、近接領域の幅が大きくなるにしたがって相関が小さくなることから、より局所的な領域の輝度標準偏差が影響することが示唆される。さら

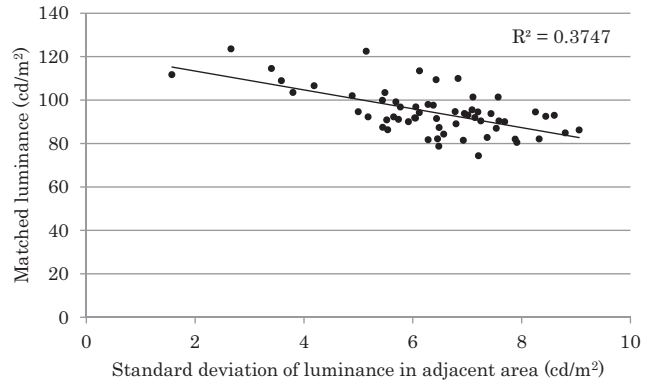


Fig. 12 An example of the analysis in section 5.2. Matched luminance for all upright pictures as a function of the standard deviation of luminance in adjacent area of 30 pixel width.

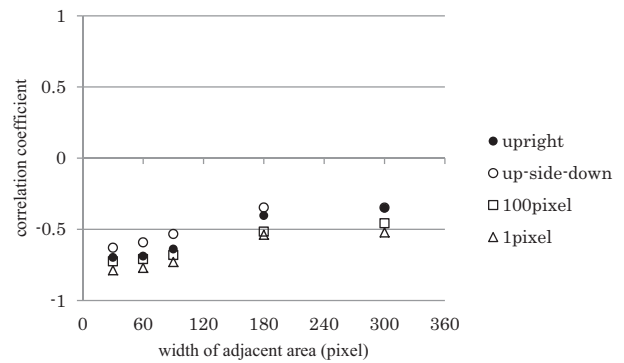


Fig. 13 The correlation coefficient between the matched luminance and the standard deviation of the luminance in adjacent area.

に、パターンの中で 1 pixel の画像における相関係数が最も高いことから、照明の認識が難しい場合に、より低次元な物理的輝度統計量 (標準偏差) を手がかりに明度を決定していることも示唆される。

平均輝度の分析と同様に、環境ごとに近接領域の輝度標準偏差と応答輝度との相関係数を分析し、その結果を Fig. 14 に示す。これより、多くの場合で相関がみられたが、みられない場合もあった。平均輝度ではほとんど相関がみられなかった室内画像では、すべての近接領域サイズに対して高い相関がみられた。屋外面像では平均輝度で相

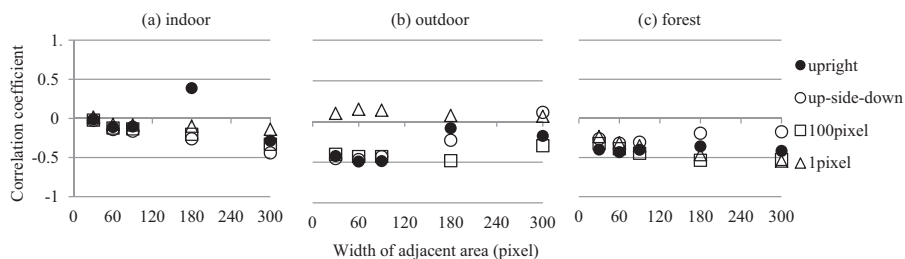


Fig. 11 The correlation coefficient between the matched luminance and the mean luminance in adjacent area. Each panel shows the results of (a) indoor, (b) outdoor, (c) forest.

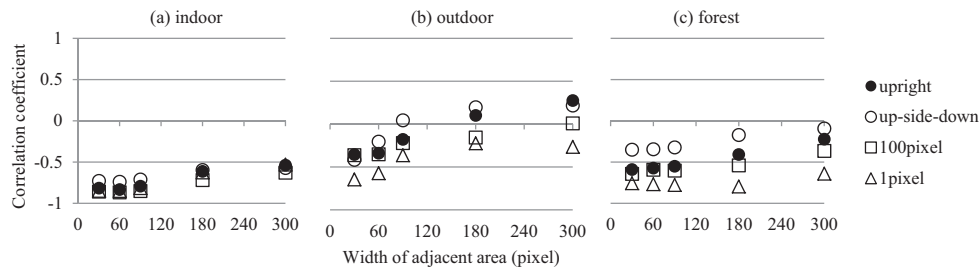


Fig. 14 The correlation coefficient between the matched luminance and the standard deviation of the luminance in adjacent area. Each panel shows the results of (a) indoor, (b) outdoor, (c) forest.

関のなかった 1 pixel スクラブル条件の狭い領域 (30, 60, 90 pixel) に対して相関がみられ, 広い近接領域の場合では相関は小さかった. また, 森画像ではスクラブル刺激, 特に 1 pixel において, 近接領域サイズにかかわらず高い相関がみられ, どのパターンでも近接領域との相関がより高かった. このように, 環境ごとに分析してみても, 照明の認識が難しい 1 pixel の画像が最も高い相関係数を示すことがわかる. また, このように平均輝度との相関がみられなかったパターンや領域のサイズにおいては輝度の標準偏差の相関が高くなるなど, 環境によって相関のみられるパターンや領域が異なることから, やはり環境特有の輝度分布が明度知覚に影響している可能性が考えられる.

実際に, 今回撮影した室内画像の場合, 壁, 天井, 床はほぼ均一な白い素材からできているため, 対象からの距離に応じて画像の平均輝度が大きく変化することはない. そのため, 輝度の標準偏差のみ相関がみられたと考えられる. 屋外や森の場合, 視野の上方に空があることが多く, その領域は高い輝度で占められる. そのため, 画像によって中央付近のほうがより輝度の分布が変化する. そのため, 室内より平均輝度との相関がより高くなったという解釈が可能である. すなわち, 視野位置と輝度の分布に関して環境ごとに特徴がある. このような分析を詳細に行うことにより, 環境による明度知覚の変化の理由が明確になる可能性があるが, 現段階では断定的な結論を導くのは難しく, 明確な知見を得るためには, さらに多くのデータを用いた詳細な解析が必要である.

輝度標準偏差が明度知覚に影響する理由として, それが照明の強度と対応していることが考えられる. 実験結果では, 輝度標準偏差が大きくなると応答輝度が低くなる傾向であった. これを照明と関連させて考えると, 画像の輝度標準偏差が大きいと, 画像内の空間の照明が高いと解釈され, 対象に当たっている照明を差し引いたより暗い明度を知覚するため, 応答輝度が低くなったと考えられる. 照明が強い空間では, 白い面はより多くの光を反射するため輝

度が高くなり, その空間の輝度分布の標準偏差は大きい値をとる. 一方, 照明が弱い空間は, 同じ反射率をもつ白い面でも反射する光の量は少なく, その輝度は照明が強い空間と比べて絶対量は低くなるため, 輝度分布の標準偏差は小さくなる. このように, 実際の空間の照明と画像の輝度標準偏差には対応関係がある. もちろん, 周囲の平均輝度についても, 照明の強度と対応していることは明らかである. そのため, 対比効果の意味がある. しかし, 今回の結果において条件によって対比効果の影響がほとんどみられなかった. その理由のひとつとして, 対象とその周辺領域の輝度の関係が考えられる. 単純な均一背景において, 対象の輝度が周辺領域の最高輝度を超える場合, 周辺領域の輝度から対象の明度に及ばず影響は非常に小さいことが示されており^{7,8)}, 実際, 今回用いた刺激は, 周辺の平均輝度 (70 cd/m²) に対してテストパッチの輝度 (143.8 cd/m²) は高くなっている. しかし, 今回用いた周辺領域の最大輝度は, 画像ごとに異なるが最大で 288.0 cd/m² であり, テストパッチの輝度は周辺領域の最大輝度を超えていない. また, 今回用いた各画像中でディスプレイ上での出力可能な高輝度値 5% に入るピクセル数と, 応答値との関係を調べた結果, 相関はみられなかったため, この考えは当てはまらない.

テストパッチの輝度は周辺領域の最高輝度ではなかったため, 光源色に見えることもなかったが, 対象が物体色モードから光源色モードに変化する色のモード境界の知覚が最高明度の影響を受けることを示す研究²⁵⁾ があることから, 明度知覚における周辺領域の最高明度による影響は検討すべき課題である. また, 画像の明るさ感など知覚との関係, 画像内に異なる照度レベルの領域が含まれている場合などについて検討することも, 今後の課題である.

以上の分析から, 複雑な自然画像を用いた背景上に置かれた対象の明度知覚に対して, 周囲の物理的輝度の標準偏差が影響することが明らかになった. また, 近接領域の輝度標準偏差と応答輝度との相関係数の値は -0.7~0.8 前後

とかなり高い値であったことから、視覚系は周囲の局所的な輝度の標準偏差からある程度対象の明度を決定していることが示唆される。自然画像の明度処理において画像統計量が影響することはこれまでもいくつか報告されており、例えば、自然シーンにおける複雑な形状をもった対象における知覚される明度や光沢は、画像のサブバンドヒストグラムの類似性によって予測できることを示す研究²⁶⁾もある。それらの知見や本研究の結果から、今回分析を行わなかった画像中の他の物理的輝度統計量、例えば、特定の空間周波数などと関連するより大局的な物理的輝度統計量など、いくつかの要因が影響して複合的に明度知覚が決定されている可能性も考えられる。いずれにしても、輝度分布は照明環境に関する情報を含んでおり、人間の視覚系も、少なくともある程度は、その情報を利用して明度知覚を決定していると考えられる。

6. ま と め

自然画像における対象の明度知覚において、対象の周囲の輝度情報を保ったまま、画像内容の認識度合いだけを変化させることで、画像内容の認識度合いが明度知覚に影響するかを検討した。その結果、認識の違いによる影響がみられた。また、周囲の物理的輝度特性も影響することがわかった。ただし、隣接領域の輝度が高ければ対象が暗く、低ければ明るく知覚されるというよく知られた対比効果のような影響ではなく、隣接領域の輝度の分散が影響することが新たに明らかになった。

ヒトの視覚系は、さまざまな視環境に適応しながら最適で効率のよい処理を行うように進化、発達してきたと考えられる。そのため、視覚系が視野中の輝度分布からそのシーンの空間の照明情報を抽出し、それをもとに、特に画像内容の認識をせずとも明度を決定するメカニズムが存在する可能性もあるだろう。ただ、その輝度分布をどのように定量化するのが適当であるのかは、現段階では不明である。そのメカニズムを解明するためには、実環境における自然シーンの輝度統計量と明度知覚の関係性を詳細に調べることが重要であると考えられる。

文 献

- 1) K. Koffka: *Principles of Gestalt Psychology* (Harcourt, Brace and World, New York, 1935).
- 2) A. L. Gilchrist: "Perceived lightness depends on spatial arrangement," *Science*, **195** (1977) 185-187.
- 3) A. L. Gilchrist: "When does perceived lightness depend on perceived spatial arrangement?" *Percept. Psychophys.*, **28** (1980) 527-538.

- 4) D. C. Knill and D. Kersten: "Apparent surface curvature affects lightness perception," *Nature*, **351** (1991) 228-230.
- 5) E. H. Adelson: "Perceptual organization and the judgment of brightness," *Science*, **262** (1993) 2042-2044.
- 6) D. M. Eagleman, J. E. Jacobson and T. J. Sejnowski: "Perceived luminance depends on temporal context," *Nature*, **428** (2004) 854-856.
- 7) A. L. Gilchrist, C. Kossyfidis, F. Bonato, T. Agostini, J. Cataliotti, X. Li, B. Spehar, V. Annan and E. Economou: "An anchoring theory of lightness perception," *Psychol. Rev.*, **106** (1999) 795-834.
- 8) E. Economou, S. Zdravković and A. L. Gilchrist: "Anchoring versus spatial filtering accounts of simultaneous lightness contrast," *J. Vision*, **7** (2007) 1-15.
- 9) A. L. Gilchrist and A. Radonjić: "Anchoring of lightness values by relative luminance and relative area," *J. Vision*, **9** (2009) 1-10.
- 10) B. Blakeslee and M. E. McCourt: "A multiscale spatial filtering account of the White effect, simultaneous brightness contrast and grating induction," *Vision Res.*, **39** (1999) 4361-4377.
- 11) W. D. Ross and L. Pessoa: "Lightness from contrast: A selective integration model," *Percept. Psychophys.*, **62** (2000) 1160-1181.
- 12) D. Todorovic: "Lightness and junctions," *Perception*, **26** (1997) 379-394.
- 13) Q. Zaidi, B. Spehar and M. Shy: "Induced effects of backgrounds and foregrounds in three-dimensional configurations: The role of T-junctions," *Perception*, **26** (1997) 395-408.
- 14) T. O. Melfi and J. A. Schrillo: "T-junctions in inhomogeneous surrounds," *Vision Res.*, **40** (2000) 3735-3741.
- 15) E. H. Adelson: "Lightness perception and lightness illusions," *The New Cognitive Neurosciences*, ed. M. S. Gazzaniga (MIT Press, Cambridge, 2000) pp. 339-351.
- 16) B. L. Anderson: "Perceptual organization and White's illusion," *Perception*, **32** (2003) 269-284.
- 17) H. G. Barrow and T. M. Tenenbaum: "Recovering Intrinsic Scene Characteristics from Images," *Computer Vision Systems*, eds. A. R. Hanson and E. M. Riseman (Academic, New York 1978) pp. 3-26.
- 18) D. C. Knill and D. Kersten: "Apparent surface curvature affects lightness perception," *Nature*, **351** (1991) 228-230.
- 19) K. A. Wishart, J. P. Frisby and D. Buckley: "The role of 3-D surface shape in a lightness/brightness effect," *Vision Res.*, **37** (1997) 467-473.
- 20) S. Palmer: *Vision Science* (MIT Press, Cambridge, 2000).
- 21) Z. Yang and D. Purves: "The statistical structure of natural light patterns determines perceived light intensity," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **101** (2004) 8745-8750.
- 22) P. Thompson: "Margaret Thatcher: A new illusion," *Perception*, **9** (1980) 483-484.
- 23) Y. Mizokami, C. Kamesaki, N. Ito, S. Sakaibara and H. Yaguchi: "Effect of spatial structure on colorfulness adaptation for natural images," *J. Opt. Soc. Am. A*, **29** (2012) A118-A127.
- 24) Y. Mizokami, M. Ikeda and H. Shinoda: "Color constancy in a photograph perceived as a three-dimensional space," *Opt. Rev.*, **11** (2004) 288-296.
- 25) H. Yamaguchi, H. Shinoda and M. Ikeda: "Brightness in natural environments evaluated using the brightness size of recognized visual space of illumination," *J. Light Visual Environ.*, **28** (2004) 50-57.
- 26) I. Motoyoshi and H. Matoba: "Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics," *Vision Res.*, **53** (2012) 30-39.