

人間の周辺視野の視覚特性を考慮した広角視覚像に関する研究

理学専攻 情報科学コース 上野 真実 (指導教員：河村哲也 教授 (, 齋藤 豪 准教授))

1 はじめに

広く視野を覆う HMD や大型ディスプレイなどの表示環境では、描画速度の向上や広告、UI などの提示設計のために周辺視野の特性を考慮することが考えられる。

Guenter ら [1] によって提案された注視点の動きにあわせて周辺部分の解像度を下げる Foveated Rendering では、注視点からの視角距離で解像度の領域をいくつかに分け、人が周辺部分の感度低下によって解像度の低下に気づきにくくなることを利用して周辺部分の解像度を下げることで描画の高速化を行っている。しかし、解像度の下げ方には輝度で測定される無彩色の視力のみが用いられることや、注視点からの距離によって同心円状やブロックの形で領域の分割が行われることが多く、周辺視界の視覚刺激は過剰に失われている。Patney ら [2] は、周辺視野での視力低下にあわせて単純に解像度を下げた画像ではトンネル視覚効果が生じてしまうが、周辺のコントラストを上げることで大きく解像度を下げてもその視覚効果が発生しにくいことを述べている。しかし彼らの提案法は対症的解決法であり、より人間の視覚特性に基づいた周辺視野の知覚能力につらあう広角視覚像の生成法が望まれる。

本論文では、周辺視野の知覚低下を、画像の各画素のコントラストとコントラスト感度特性との比較を用いて局所的な通過帯域制限を行うことで再現する広角視覚像を作成する手法を提案する。

2 周辺視野の視覚特性

コントラストと知覚の限界閾値を表す人間の視覚特性にコントラスト感度特性 (Contrast Sensitivity Function, CSF) がある。視角が大きくなるにつれ生じるコントラスト感度の低下は刺激の空間周波数により異なる。また、輝度、赤緑、青黄のコントラスト感度の低下の仕方も異なる。そこで、以下の方法で3つのCSFを用意する。

輝度のCSFの中心視から周辺視への変化は視覚皮質の広さと視角の関係を表す皮質拡大係数 (Cortical Magnification Factor : CMF) を用いたスケールングで表すことができる [3]。また、ある視角で最大のコントラストを視認できる最大の周波数はその視角での視力であることから、注視点からの視角 \mathbf{E} 、空間周波数 f [cpd] での輝度の $CSF_I(\mathbf{E}, f)$ には、以下の式 (1) を用いる。

$$CSF_I(\mathbf{E}, f) = \frac{CMF(\mathbf{E})}{CMF(0)} CSF_{I0}(scale_I(\mathbf{E})f) \quad (1)$$

$CMF(\mathbf{E})$ には、式 (2) の Cowey と Rolls のモデル [4] を用いる。 $A(\mathbf{E})$ は視力の関数であり、視角 0° で1をとるような近似曲線で式 (3) のように表す。スケールング関数 $scale_I(\mathbf{E})$ は、周辺視野での視力を考慮して私は式 (4) で定義する。本研究では、視角 0° 、中心視での輝度のCSFに Mannos と Sakrison らのモデル [5]

を用い、周辺輝度と観測者ごとに異なる感度の値を係数 d_I でスケールングすることで式 (5) で表す。

$$CMF(\mathbf{E}) = (-0.035 + 0.101A(\mathbf{E})^{-1})^{-1}, \quad (2)$$

$$A(\mathbf{E}) = A(\theta_x, \theta_y) = \left(\sqrt{a_I \theta_x^2 + b_I \theta_y^2} + 1 \right)^{-1}, \quad (3)$$

$$scale_I(\mathbf{E}) = c_I \left(\sqrt{a_I \theta_x^2 + b_I \theta_y^2} \right) + 1, \quad (4)$$

$$CSF_{I0}(f) = d_I (0.04992 + 0.2964f) e^{-0.114f^{1.1}}, \quad (5)$$

ここで $\mathbf{E} = (\theta_x, \theta_y)$ であり、 a_I, b_I, c_I は定数である。

赤緑の反対色のCSFである $CSF_{RG}(\mathbf{E}, f)$ は、まず中心視のCSFを定義し、それに係数 a_{RG}, b_{RG}, c_{RG} によるスケールングを施して周辺視野でのCSFへ拡張することで定義する。

$$CSF_{RG}(\mathbf{E}, f) = scale_{RG}(\mathbf{E}) CSF_{RG0}(f) \quad (6)$$

中心視の色CSFはMullenらの実験データ [6] から、赤緑で作られたコントラストによるCSFを $CSF_{RG}(f)$ として式 (7) で定義する。周辺視野への拡張には、Mullen らの周辺視野での実験結果 [7] に基づき各スケール関数を $scale_{RG}(\mathbf{E})$ として、周辺視野での色の $CSF_{RG}(\mathbf{E}, f)$ を式 (8) で定義する。

$$CSF_{RG0}(f) = 10^{a_{RG} - b_{RG} f} \quad (7)$$

$$scale_{RG}(\mathbf{E}) = 10^{-c_{RG} \mathbf{E}} \quad (8)$$

青黄の反対色のCSFである $CSF_{BY}(\mathbf{E}, f)$ についても同様に定義した。それぞれのCSFのスケールング係数は計測値から求める。

3 画像生成

入力画像を輝度、赤緑、青黄の色空間で特定の周波数成分を持つ画像に分解し、視角に応じた空間周波数毎のCSFを用いて画素毎に帯域通過処理を施し、それらを合成することで注視点に即した広角視覚像を作成する。

入力画像 $I(\mathbf{p})$ の各帯域通過画像 $I_{\{I, RG, BY\}_i}(\mathbf{p}) (i = 0, \dots, n)$ を DoG 関数を畳み込むことで $(n+1)$ 個用意し、分解した周波数成分の閾値判定は、 $I_{\{I, RG, BY\}_i}(\mathbf{p})$ の各点 \mathbf{p} を中心とした局所コントラストの値と、Sankeralli ら [8] の錐体コントラスト空間に対する3次元のコントラスト検出閾値を表した超楕円体の表面 (式 (9)) を比較することで行う。コントラスト $C_{\{I, RG, BY\}_i}(\mathbf{p})$ は局所的な Michelson コントラストにより計算する。

$$\left(\left| \frac{x}{\alpha_x} \right|^{\beta_2} + \left| \frac{y}{\alpha_y} \right|^{\beta_2} \right)^{\frac{\beta_1}{\beta_2}} + \left| \frac{z}{\alpha_z} \right|^{\beta_1} = 1 \quad (9)$$

超楕円体の輝度、赤緑、青黄の軸の長軸 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ に注視点から各点 \mathbf{p} までの視角距離 \mathbf{E} および畳み込み

に用いた DoG 関数の最も通過する周波数 f_i によって決定される周辺視野の CSF から得られる知覚閾値 $CSF_{\{I, RG, BY\}_i}(\mathbf{E}, f_i)^{-1}$ を用いる。 β_1, β_2 には文献 [8] の被験者実験の平均値を定数として用いる。超楕円体の知覚閾値表面を表す式 (9) の左辺を $Ell(x, y, z)$ として、画像の局所コントラスト $C_i(\mathbf{p})$ から式 (10) によって重み W_k が求まり、式 (11) により画像を再構成し広角視覚像 $I'(\mathbf{p})$ とする。

$$W_i = \begin{cases} 1 & (Ell(C_{Ii}(\mathbf{p}), C_{RGi}(\mathbf{p}), C_{BYi}(\mathbf{p})) > 1) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (10)$$

$$I'(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^n W_k(\mathbf{p}) I_k(\mathbf{p}) + I_0(\mathbf{p}) \quad (11)$$

図 1 上は入力画像、同下は横 121cm, 縦 68cm, 視距離 82cm で画像中央に注視点がある場合を想定し作成された広角視覚像である。



図 1: 原画像と生成された広角視覚像

4 生成画像の評価

視線追跡装置付きヘッドマウントディスプレイ (HMD) 「FOVE」を用いて被験者実験を行うことで生成画像を評価する。実験は片目で 2 枚の自然画像を順番に見て同じ画像であったか視点に合わせて変化した画像かを答えるものである。異なる画像が提示されたときに異なる画像であると判断した確率を感知率 (異なる画像が提示され異なると回答したデータ数/異なる画像が提示されたデータ数) として計算した。

広角視覚像生成の閾値処理に既存研究 [1, 2] で用いられる輝度の感度特性のみを用いる手法と、被験者全員に既存研究による計測値から作成された同じ CSF を用いる手法の 2 つを行い、比較した結果を表 1 に示す。輝度のみを考慮した手法では、色の考慮が行われていないため、周辺で過剰にコントラストが削減され

ており感知率が高く、提案手法による CSF を用いた手法では色やコントラストの強さが考慮されているため、感知率が低くなった。

表 1: データ全体の感知率

	提案手法	従来法
感知率	0.32	0.48

5 まとめ

本論文では、周辺視野での 3 つの CSF を用いた通過帯域制限処理を行って、注視点に従った周辺視野特性を考慮した人間の視覚像を作成する手法を提案した。そして、提案手法が人間の色を含めた CSF に沿った帯域通過フィルタリングを行っており、また不自然な色や輪郭の発生も抑えられることを確認した。さらに、提案手法による広角視覚像に対して被験者実験を実施し手法の評価を行い、既存の輝度の感度特性のみを考慮した手法より人間の知覚感度にあった手法であることを示した。周波数空間の分割数の最適化、コントラスト評価のための局所選択の窓の大きさの評価が検討課題である。

参考文献

- [1] Brian Guenter, Mark Finch, Steven Drucker, Desney Tan, and John Snyder. Foveated 3d graphics. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, pp. 164:1–164:10, November 2012.
- [2] Anjul Patney, Marco Salvi, JooHwan Kim, Anton Kaplanyan, Chris Wyman, Nir Benty, David Luebke, and Aaron Lefohn. Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 6, pp. 179:1–179:12, November 2016.
- [3] Rovamo Jyrki, Virsu Veijo, and Nasanen Risto. Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision. *Nature*, Vol. 271, pp. 54–56, 1 1978.
- [4] A. Cowey and E.T.Rolls. Human cortical magnification factor and its relation to visual acuity. *Experimental Brain Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 447–454, 1974.
- [5] James L. Mannos and David J. Sakrison. The effects of a visual fidelity criterion of the encoding of images. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 20, No. 4, pp. 525–536, Jul 1974.
- [6] Mullen KT. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *The Journal of Physiology*, Vol. 359, pp. 381–400, 1985.
- [7] Mullen K.T. and Kingdom F.A.A. Differential distributions of redgreen and blueyellow cone opponency across the visual field. Vol. 19(1), , 2002.
- [8] Marcel J. Sankeralli and Kathy T. Mullen. Estimation of the l-, m-, and s-cone weights of the postreceptoral detection mechanisms. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 13, No. 5, pp. 906–915, May 1996.