



疑似的な残像提示による VR での 眩しい感覚・体験のリアリティ向上

Enhancing Dazzling Sensation and Reality of Experience by Presenting Afterimage in VR

伊藤孝紘¹, 細井十楽¹, 伴 祐樹¹, 割澤伸一¹

Takahiro ITO, Juro HOSOI, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, itotakahiro@lelab.u-tokyo.ac.jp, hosoijuro@lelab.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 人間は幅広い輝度を知覚する能力を持つため、没入感が求められる Virtual Reality (VR) においては、眩しさの表現が重要となる。本研究では、眩しい光を見たときに生じる視覚効果である残像・眩目反射・瞬き時の補色残像を VR において疑似的に提示することにより、眩しい感覚・体験のリアリティを向上させる新たな手法を提案する。実験により、グレア効果のみの場合に比べ、グレア効果に残像を加えた場合の方が眩しい感覚を高めることが示唆された。

キーワード: 残像, 眩目反射, 視線情報, バーチャルリアリティ

1. はじめに

人間の視覚は、ほとんどゼロに近い輝度の光から太陽光のような眩しい光まで、幅広い輝度を知覚することができる [1]。そのため、コンピュータグラフィックスを用いた体験のリアリティを向上させるには、眩しさの表現が必要不可欠であり、高い没入感や臨場感が求められる Virtual Reality (VR) では、特に重要となる。

VR 分野では、眩しさをより効果的に提示するために、ハードウェア、ソフトウェアの両面から様々な手法が提案されている。ハードウェアを活用した例としては、人間の視覚系が知覚できる輝度に対応するため、幅広い輝度を提示可能な Head-Mounted Display (HMD) がある [2]。しかし、物理的に高輝度を再現することは、放熱やディスプレイの大きさ、目へのリスクなどの問題が生じる可能性がある。ソフトウェアを活用した例としては、人間が眩しい光を知覚する際の視覚効果に着目し、HMD に搭載されたアイトラッキングに基づいてグレア効果をシミュレーションする手法がある [3]。しかし、高輝度下での視覚効果で重要である残像については、標準的な 2D ディスプレイでの提示にとどまっておき [4]、VR における提示の例はまだない。また、先行研究のアプローチでは、太陽光のように直接見ると眩目反射が生じるほどの眩しい光を知覚する感覚のシミュレーションはまだ達成されていない。

そこで我々は、VR における眩しい感覚・眩しい光を浴びた際の体験のリアリティを向上させるために、従来のグレア効果に加えて、眩しい光を浴びた後の生体反応である残像・眩目反射を疑似的に提示する手法を提案している [5]。人間が知覚する残像は、背景の色や輝度変化に影響を受ける [6, 7]。また、瞬き時には補色の関係になることが示唆さ

れている [8]。さらに、人間の瞬き時には視覚抑制が働き、瞬きによって視界が遮蔽されていることに気づかないため、瞬きによる残像の色変化のみを知覚すると考えられる [9]。そこで、本稿では新たに、グレア効果・残像・眩目反射の提示に加え、瞬き時に知覚される補色残像をユーザの瞬き後に疑似的に提示する手法を提案し、その効果を検証した。

2. 提案手法

本研究では、グレア効果に加えて、眩しい光を浴びた後の生体反応である残像・眩目反射・瞬き時の補色残像の提示によって眩しい感覚・眩しい光を浴びた際の体験のリアリティを向上させる手法を提案する。

2.1 残像提示

残像は人が眩しい光を見たときに網膜上の特定の領域に生じるため、視線に追従する。また、残像の色と強度は眩しい光を見たときからの時間経過により変化し、徐々に消えていく。本研究では、2D ディスプレイで既に実装されている視線情報を用いた残像の色と位置の変化 [4] を、左右の目それぞれに個別に適用することで VR に拡張した (図 1(b), (d))。

さらに、人が眩しい光を見た後に生じる残像は、瞬き時に補色になるとされており [8]、人は瞬き時に、瞬きによる遮蔽を知覚しない視覚抑制が瞬き開始時から 100–200 ms 間発生するため、網膜上に生じている残像のみを知覚すると考えられる。本研究では、ユーザの瞬き開始時から 200ms 間、提示する残像を補色に変化させることで、体験のリアリティをより高める (図 1(e))。

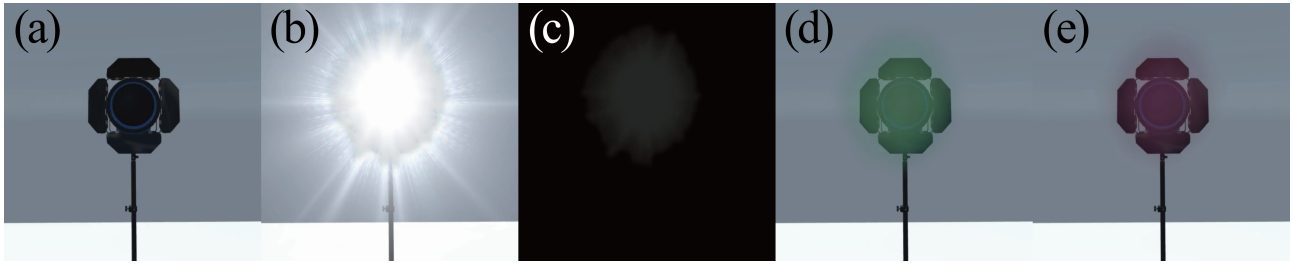


図 1: 提案手法による残像・眩目反射・瞬き時の補色残像提示の例。(a)VR シーンでの光源, (b) グレア効果・残像提示, (c) 暗転による疑似的な瞬き・残像提示, (d) 残像提示, (e) 瞬き時の補色残像提示

2.2 疑似的な瞬き提示

人は眩しい光を見ると、反射的に瞬きをしてしまう。眩しい感覚を生起させるために、映像の暗転によって疑似的な瞬きを提示する(図 2(c))。眩目反射によって瞬きをする際、瞬き開始から瞬きが完全に閉じるまでには 45 ms、瞬き閉じた状態から瞬きが完全に開くまでには 125 ms の時間がかかる [10]。よって、疑似的な瞬きの提示開始から 45 ms をかけて画面を上から徐々に暗転し、125 ms をかけて画面を下から徐々に明転するよう実装した。また、疑似的な瞬きにおいても、暗転している部分には補色の残像を、背景が見えている部分には通常の色残像を提示する。

3. 実験

本実験では、従来のグレア効果に加えて、眩しい光を浴びた後の生体反応である残像提示、暗転による疑似的な瞬き提示、さらに瞬き時の補色残像提示によって、眩しい感覚および眩しい光を浴びたときの体験のリアリティが向上するかどうかを検証した。

実験参加者は 12 名(男性 10 名, 女性 2 名, 平均年齢 23.7 ± 1.1SE)であった。

3.1 実験条件

視覚提示条件として、以下の 4 つの条件を設定した。

1. “グレアのみ”: グレア効果のみを提示
2. “グレア+残像”: グレア効果・残像を提示
3. “グレア+残像+暗転”: グレア効果・残像・暗転による疑似的な瞬きを提示
4. “グレア+残像+暗転+補色”: グレア効果・残像・暗転による疑似的な瞬き・瞬き後の補色残像を提示

これらの条件は眩しい光を見た後に生じる残像を模した提示による効果、眩目反射を再現することによる効果、そして瞬きに残像が補色に変化するシミュレートの効果それぞれを検証するために設定された。

3.2 実験システム

実験には視線・表情計測可能な HMD (Meta Quest Pro) を用いた。VR シーンは Unity で実装し、視線の計測には OVR Eyegaze、瞬きの取得には OVR Face Expressions を用いた。瞬きの判定は OVR Face Expressions 内の Face-Expression.EyesClosedL の値 (0: 目が開いている-1: 目が

閉じている) を使用し、その値が 0.2 より大きいときに瞬きをしているとした。VR 環境内では、光源をユーザのカメラから 2 m 先に配置し、ユーザのアバターは表示しなかった。

3.3 評価方法

眩しい感覚と体験のリアリティの主観評価を問うために質問を行った。眩しい感覚を評価するため、「ライトはどの程度眩しく感じましたか?」という質問に対して、10 点リッカート尺度 (1: 全く眩しくない-10: とても眩しい) で回答させた。また、眩しい光を浴びたときの体験のリアリティを評価するため、「体験のリアリティはどの程度でしたか?」という質問に対して、10 点リッカート尺度 (1: リアリティが低い-10: リアリティが高い) で回答させた。

3.4 実験手順

参加者はまず属性を問うアンケート (性別, 年齢, VR 経験の程度) に回答した。その後、主観評価の質問内容について口頭で説明された。そのため、参加者は実験タスク前に主観評価の内容を事前に把握していた。次に、HMD を装着し、実験実施者によって HMD の Eye-Tracking の動作が確認された。実験タスクでは、参加者はライトの光を 20 秒ごとに 1 回体験し、計 3 回体験した後に、主観評価を問うアンケートに口頭で回答した。実験タスクは各条件 1 試行ずつ実施し、参加者は全ての条件を体験した。参加者間で順序効果を打ち消すため、条件の提示順序はラテン方格法によって作成した。全条件体験後、参加者は実験中に感じたことについて自由に回答した。

3.5 結果

実験結果として、眩しい感覚と体験のリアリティの主観評価結果を図 2,3 に示す。眩しい感覚・体験のリアリティについて、各条件での評価値を比較するために Friedman 検定を実施した。体験のリアリティについては、Friedman 検定で有意差が認められなかった ($\chi^2(3) = 1.22, p = 0.75$)。一方、眩しい感覚については有意差が確認された ($\chi^2(3) = 12.33, p = 0.0063$) ため、下位検定として BH(Benjamini / Hochberg) 法補正の下 Wilcoxon の符号順位検定を実施した。その結果、“グレアのみ”と“グレア+残像”で間でのみ有意差が確認された ($p = 0.016, r = 0.61$) が、他の条件間では有意差は確認されなかった。

また、VR 経験の程度が月に数回以上の参加者 (n=6) を VR 経験者、それ未満の参加者 (n=6) を VR 未経験者とし

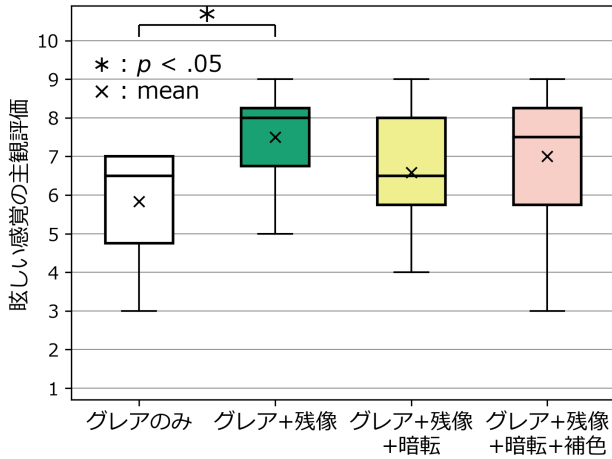


図 2: 眩しい感覚の主観評価

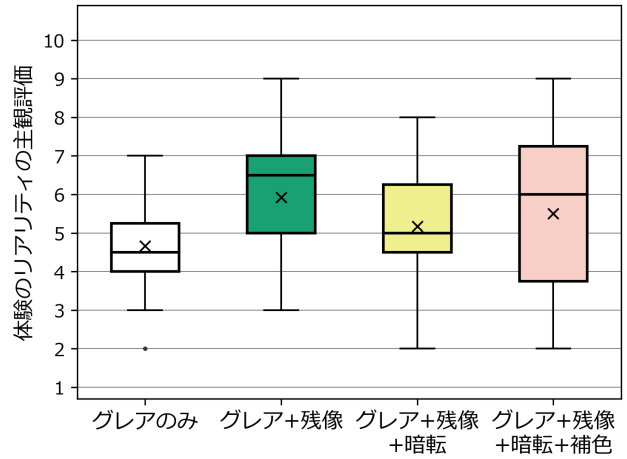


図 3: 体験のリアリティの主観評価

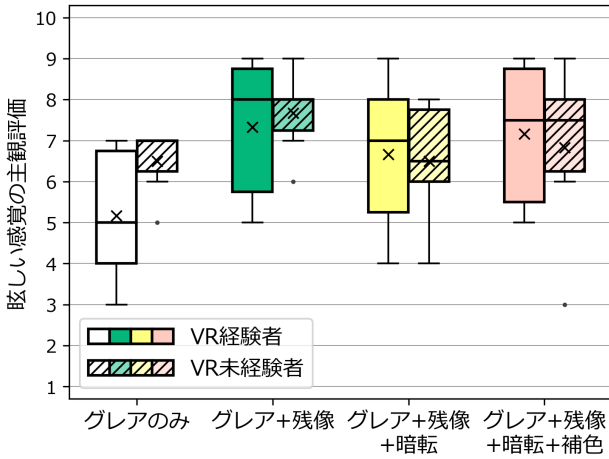


図 4: VR 経験の有無による眩しい感覚の主観評価

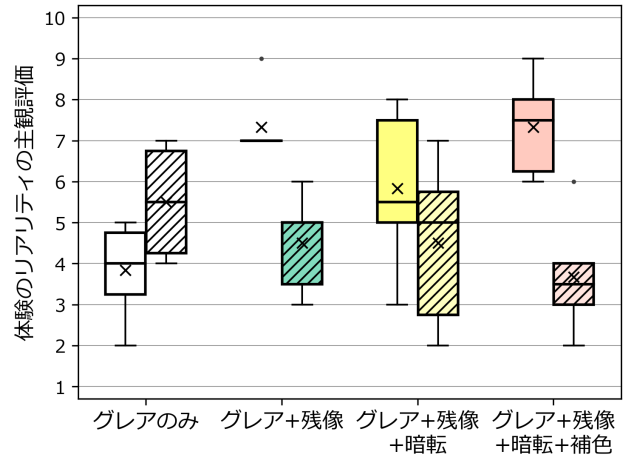


図 5: VR 経験の有無による体験のリアリティの主観評価

て分類し、それぞれの眩しい感覚と体験のリアリティの主観評価結果を図 4,5 に示す。VR 経験者、VR 未経験者それぞれにおいて、眩しい感覚・体験のリアリティの各条件の評価値を比較するために Friedman 検定を実施した。VR 経験者では、眩しい感覚 ($\chi^2 (3) = 8.22, p = 0.042$)、体験のリアリティ ($\chi^2 (3) = 11.69, p = 0.0085$) のどちらも有意差が認められた。下位検定として BH 法補正の下 Wilcoxon の符号順位検定を実施したところ、眩しい感覚・体験のリアリティのどちらも、どの条件間にも有意差は見られなかった。VR 未経験者では、眩しい感覚 ($\chi^2 (3) = 7.74, p = 0.052$) においては有意差が確認されなかったが、体験のリアリティ ($\chi^2 (3) = 10.36, p = 0.016$) においては有意差が確認された。下位検定として BH 法補正の下 Wilcoxon の符号順位検定を実施したところ、どの条件間にも有意差は見られなかった。

3.6 考察

図 2 より、グレア効果のみの提示に比べ、グレア効果と残像を組み合わせた提示により眩しい感覚が向上することが示唆された。参加者の自由回答からは「実験環境のような

シチュエーションでライトの光を浴びたら残像が生じるだろう」とコメントがあった。しかし、今回新たに提案したグレア効果・残像・眩目反射に瞬き時の補色残像を加えた提示では、他の提示手法に比べて眩しい感覚が向上することが確認されなかった。また、眩しい光を見たときの体験のリアリティについては、どの条件間でも有意差が認められなかった。参加者の自由回答からは「暗転は実際に瞼が動いていないので瞬きと認識できなかった」「勝手に暗くなる映像を見ている感覚があり、リアリティが減っている気がする」という内容の回答が多くみられた。そのため、疑似的な瞬きを提示するための暗転が体験全体のリアリティを低下させ、補色残像提示による効果を打ち消していた可能性がある。今後、暗転提示のない補色残像提示や、瞼への触覚刺激など他の感覚提示を用いていくことが必要である。

VR 経験の有無による分類では、VR 経験者に比べて VR 未経験者はグレア効果のみでも眩しい感覚が生起する傾向にあることが示唆された (図 4)。VR 経験が浅い人がゲームなどの映像表現に慣れていないとは一概には言えないが、VR 経験が深い人は既にグレア効果の視覚効果に慣れ親し

んでおり、グレア効果のみの提示では眩しい感覚に影響を及ぼさなかった可能性がある。また、VR 経験者はグレア効果のみの提示に比べ、グレア効果と残像を提示する条件や、グレア効果・残像・暗転・瞬き時の補色残像を提示する条件が体験のリアリティを高める傾向にあるのに対し、VR 未経験者は同条件が体験のリアリティを下げる傾向にある。VR 経験が浅い人にとっては疑似的に提示している暗転や残像が自身の視覚の生体反応と解釈できず、ただ単に映像として認識している可能性がある。今後、VR 経験の有無による違いを検証するため、より詳細なインタビューなどを行うことが必要である。

4. おわりに

本研究では、グレア効果に加えて、眩しい光を浴びた後の生体反応である残像・眩目反射・瞬き時の補色残像提示によって、眩しい感覚・眩しい光を見たときの体験のリアリティを向上させる手法を提案した。実験の結果、グレア効果のみに比べ、残像提示を追加することによって眩しい感覚が向上させられることが示唆された。また、VR 経験者は残像・眩目反射・瞬き時の補色残像提示によって体験のリアリティが向上する傾向にある一方、VR 未経験者はこれらの提示によって体験のリアリティが低下する傾向にあることが示された。今回の実験では、眩目反射に追加する形で瞬き時の補色残像を提示したが、参加者の自由回答から眩目反射がリアリティを下げていることが示唆されたため、今後の研究では眩目反射がない状態での瞬き時の補色残像提示や、触覚刺激などを用いて眩目反射自体のリアリティを高める手法の検討、検証が必要となる。また、VR 経験の有無による違いについても、今後の研究でさらに詳しく調査していきたい。

参考文献

- [1] Timo Kunkel and Erik Reinhard. A reassessment of the simultaneous dynamic range of the human visual system. In *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, APGV '10, p. 17–24, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [2] Nathan Matsuda, Alex Chapiro, Yang Zhao, Clinton Smith, Romain Bachy, and Douglas Lanman. Realistic luminance in vr. In *SIGGRAPH Asia 2022 Conference Papers*, SA '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [3] Laura R. Luidolt, Michael Wimmer, and Katharina Krösl. Gaze-dependent simulation of light perception in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3557–3567, Dec 2020.
- [4] David E. Jacobs, Orazio Gallo, Emily A. Cooper, Kari Pulli, and Marc Levoy. Simulating the visual experience of very bright and very dark scenes. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 3, may 2015.
- [5] Juro Hosoi, Takahiro Ito, Yuki Ban, and Shin'Ichi Warisawa. Dazzlevr: Enhancement of brightness by presenting afterimage and dazzle reflex sensation in virtual reality. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [6] Georgina Powell, Petroc Sumner, and Aline Bompas. The effect of eye movements and blinks on afterimage appearance and duration. *Journal of Vision*, Vol. 15, No. 3, pp. 20–20, 03 2015.
- [7] Riccardo Manzotti. A perception-based model of complementary afterimages. *Sage Open*, Vol. 7, No. 1, p. 2158244016682478, 2017.
- [8] William Berry. The flight of colors in the after image of a bright light. *Psychological Bulletin*, Vol. 19, No. 6, p. 307, 1922.
- [9] Frances C. Volkman. Human visual suppression. *Vision Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 1401–1416, 1986. Twenty-Fifth Anniversary Issue of Vision Research.
- [10] C Evinger, K A Manning, and P A Sibony. Eyelid movements. Mechanisms and normal data. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 387–400, 02 1991.