



光ファイバレイを用いた非接触の可視光空間温覚提示

西澤昌宏¹⁾, 原澤賢充¹⁾, 半田拓也¹⁾, 小峯一晃¹⁾

Masahiro NISHIZAWA, Masamitsu HARASAWA, Takuya HANDA, and Kazuteru KOMINE

1) 日本放送協会 放送技術研究所 (〒 157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11, s09309-nishizawa.m@nhk.or.jp)

概要: VR に温覚を導入することで臨場感が高まることが期待されている。しかし、空間的にバーチャル熱源を自由に配置でき、その方向まで含めて提示できる温覚ディスプレイはこれまで知られていない。本報告では、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に装着された光ファイバレイを用いて顔面に空間的な熱分布を提示する、非接触型の可視光温覚ディスプレイを提案する。ユーザが自発的に頭を動かすことで、提示方向の制約なく方向性のあるバーチャル熱源を VR 環境で体験できる。評価実験として、バーチャル熱源の方向を回答させる実験を実施し、頭部運動の有無によるパフォーマンス変化を比較した。

キーワード: 温覚ディスプレイ, 可視光温覚提示, 光ファイバ, 非接触

1. はじめに

これまでの VR 技術は、主に視覚、聴覚、振動触覚を用いて利用者を仮想空間に没入させるという新たな体験を可能にした。臨場感のさらなる向上を目指し、最近では他の感覚モダリティも取り入れる研究が数多く進められている。

特に温覚は、ヒトが環境を理解する上で重要な役割を果たしている。日差しが暑い、火が熱いといった感覚は、我々が自身の身を守るための基本的な反応とも関連している。このような感覚を取り入れることで、ユーザの情動をより深く刺激し、没入感の高い VR 体験を提供できる可能性が高まる。しかし従来の温覚提示技術は、主に身体に接触する装置を用いており [1, 2], 接触を伴わない熱現象を表現するのに適さない。非接触な手段 [3] も考案されているが、装置が大型であるため設置場所が限られるうえ、温覚の提示方向の空間的制約が大きという問題がある。

そこで本研究では、提示方向の空間的制約が少なく、方向性のある温覚を提示できる新たな非接触型の温覚ディスプレイを提案する。本手法は、強い可視光を照射することで体表面を加熱する手法 [4] を用いており、照度によって熱の強度を高速に操作することができる。高輝度 LED から発せられる可視光は、光ファイバによって体表面の任意の位置に向けて照射できる。これを HMD に複数台マウントし、顎の周囲に等間隔かつ水平に並べる。ここで、HMD から取得された頭部の位置姿勢情報と、バーチャル空間上の熱源との位置関係をもとに顔面の照度分布を更新すると、バーチャル空間上のある一点に熱源が存在するかのような熱的表現が可能となる。このとき、ユーザが自発的に頭を動かすことで、それに連動して、現実の熱源の前で頭を振った時と同様に顔面上の熱分布が変化するため、空間上のある位置・方向に熱源が存在することを温覚的に知覚することが期待される。本稿では、このような知覚を空間温覚と呼称する。

本研究では、非接触型の可視光空間温覚ディスプレイの

設計と実装について述べるとともに、本ディスプレイを用いた温覚による方向提示能力の評価結果を報告する。

2. 可視光空間温覚提示装置

暖炉や太陽など、非接触で温覚を提示する熱源の多くは特定の方向から熱を与える。しかし、バーチャル熱源を表現するためには、必ずしもその方向に熱源が物理的に存在する必要はなく、動的に提示される空間温覚が身体の方角と整合していれば充分である。また、非接触熱源を感じさせる部位として、顔面は常に皮膚が露出している点で適している。そこで我々は、HMD による没入的な視覚体験と同様に、自発的な運動によって変化する頭部方向と常に空間的な整合性を保つように、仮現運動によって動的な温覚を顔面に提示する手法を着想した。これにより、装置の配置の制約を超えてバーチャル熱源を任意の空間位置に定位させられるのではないかと考えた。

このコンセプトを実現するために、我々は可視光温覚提示 [4] に着目した。これは、通常は加熱用途に使われない可視光であっても皮膚をわずかに加熱できることを利用し、高輝度可視光を皮膚に照射することで非接触に温覚を提示する手法である。頭部運動とリアルタイムに連動した温覚を提示するためには所望の出力強度へと高速に制御できる温覚提示装置が必要であるが、これは高輝度 LED の輝度制御で容易に実現できる。さらに、一般に LED はハロゲンランプより小型であるため、多数の LED を並べることで照射面に熱の分布を提示できる可能性がある。

しかしながら、可視光 LED による温覚提示には 2 つの問題点がある。一つは、可視光を用いるため温覚を提示する際に非常に眩しい光を伴う点である。こちらは、十分に遮光された HMD を用いる限りはほとんど問題にならない。もう一つの問題は、温覚が提示できるほどの高輝度 LED では LED モジュール自体が激しく発熱するため、冷却装置が

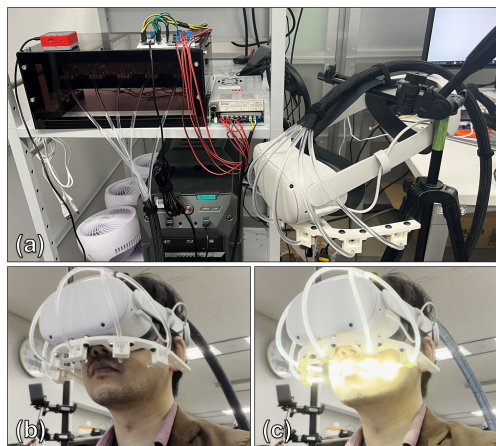


図 1: 温覚提示装置

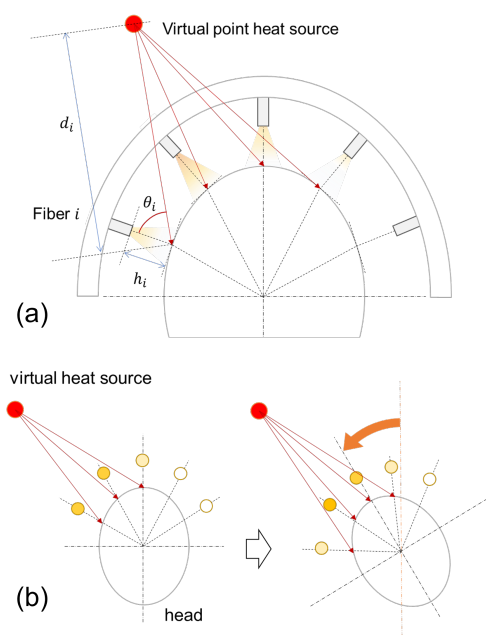


図 2: 光ファイバの配置と制御方法

必要になる点である。高輝度 LED を HMD へ多数搭載することを想定した場合、冷却装置が大型化し HMD 全体が重くなる問題が生じる。そこで我々は、高輝度 LED を HMD と分離して外部に設置し、光ファイバで HMD 下部に高輝度可視光を伝送する手法を採用した。

2.1 実装

装置のプロトタイプを図 1 に示す。装置は、PC、マイコン (M5Stack Fire)、定電圧電源、LED ドライバ回路、高輝度 LED、光ファイバ、HMD (Meta Quest2) で構成された。発光部には 110 lm/W の発光効率をもつ 70 W の高輝度 LED を用いた。LED に、内側に白色塗料を塗布したカバーを被せ、フレネルレンズを用いて直径 6 mm の照明用光ファイバに集光した。これを複数台並列に配置して LED アレイを構成した。LED ドライバ回路は、マルチチャンネル PWM ドライバ (PCA9685) と PWM 増幅モジュールで構成され、マイコンで制御された。光ファイバアレイは、HMD に固定された楕円形のマウントに光ファイバの終端を

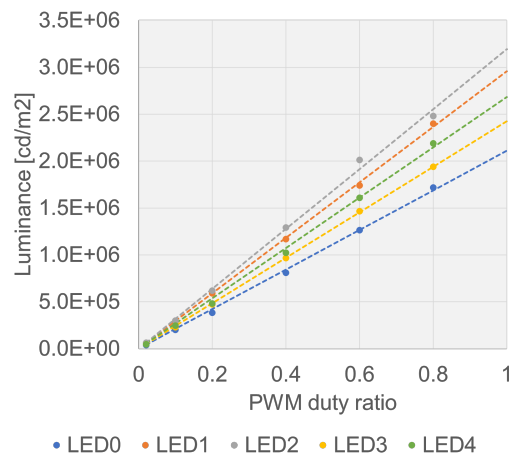


図 3: 温覚提示装置の輝度特性

水平に並べて固定することで構成した (図 2a)。具体的には、ヒトの頭部形状 [5] を近似する楕円の法線方向に 30° 間隔で並べられた。また、鼻先と HMD の隙間部分から光が漏れないように、シリコンラバー製のノーズパッドを HMD に装着した。

本装置は HMD のヘッドトラッキング機能と組み合わせることで、VR 空間上にバーチャル熱源を知覚させることを意図して設計された。各照射点の強度は、HMD から取得される現在の頭部方向と、バーチャル熱源の強度及び位置を入力として、光源計算と同様の式に従って決定される。バーチャル熱源を提示したときの各光ファイバの幾何学的関係を図 2a に示す。このとき、点光源の照度計算式、および円盤状の光源の照度計算式に準じて各光ファイバ照射点での輝度 L_i が計算される。

$$E_i = \frac{I}{d_i^2} \max(0, \cos \theta_i), \quad L_i = \frac{h_i^2 + r^2}{\pi r^2} E_i$$

ここで、 I はバーチャル点熱源の強さ (光度 [cd] 単位で指定)、 E_i は照射点 i での照度 [lx]、 d_i は照射点 i から点熱源までの距離 [m]、 θ_i は照射点 i の法線方向と熱源方向とのなす角 [rad]、 r は光ファイバの半径 [m]、 h_i は照射点 i から光ファイバ i の終端までの距離 [m] である。本研究では照射点は 5 箇所、光ファイバ終端と皮膚表面との距離は $h_i = 20$ mm とした。照射点 i の法線方向は楕円筒形で近似して計算された。

図 2b は頭部運動時の出力輝度の変化イメージで、出力輝度の強さを色の濃さで表している。頭部を回転させると、バーチャル熱源の相対的な移動に合わせて各光ファイバの出力輝度が変化する。そのため、顔面の各照射点での離散的な温覚情報が統合され、一つのバーチャル点熱源からの熱分布として感じられるようになることが期待される。

2.2 性能評価

本装置の基本特性として、光ファイバ終端での輝度を輝度計 (BM-7, TOPCON) で計測した。図 3 に輝度特性を示す。識別番号 i は、装着者から見て右端を 0 とし番号が割り振られている。輝度計が 2.5×10^6 cd/m² 以上の輝

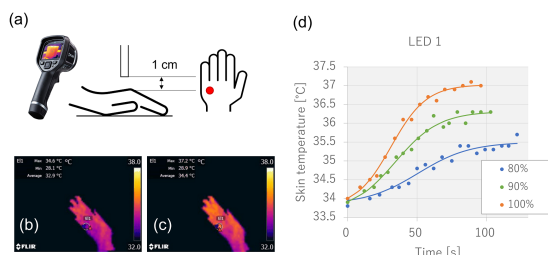


図 4: 皮膚表面温度の計測結果

度を計測できないため、duty 比 80%までを計測した。結果、光ファイバ出力輝度は PWM の duty 比に対して線形であった。その後の追加実験で、減光フィルタを用いて duty 比 100%まで計測した場合も同様に線形なことを確認した。最大輝度は個々の LED で異なるが、およそ $2.1 \sim 3.2 \times 10^6$ cd/m^2 であった。

さて、界ら [4] は高輝度 LED を直接皮膚に向けて照射したが、本研究では LED 光を光ファイバで伝送して照射している点で異なる。高輝度 LED は光だけでなく LED 自体の発熱も伴うため、界らの方法では LED の発熱も温覚に大きく寄与していた可能性がある。そのため、可視光エネルギーのみによって皮膚が加熱されるかは確かめられておらず、光ファイバ越しに可視光のみを照射する本装置でも皮膚を加熱できるかは明らかでない。そこで、光ファイバ末端から LED 光を皮膚表面に照射し、その温度変化を計測した。

図 4a に皮膚表面温度の計測実験の様子を示す。手の甲表面から 20mm 離れた位置に光ファイバの終端を固定し、図 3 の LED1 を使用して光を約 2 分間照射し続けた。そのときの照射部の温度変化をサーモグラフィ (FLIR E5) で計測したところ、照射前は図 4b、照射後は図 4c のようになった。図 4a 右側の手に描かれた赤丸部分に照射し、その近辺での最大温度を時系列的に計測した。光の強度は PWM の duty 比で 100%, 90%, 80% を使用した。

計測結果を図 4d に示す。ここでは照射前の皮膚の平均温度からの差分をプロットした。各点はサーモグラフィでの実測値で、曲線は実測値をシグモイド関数で近似したものである。グラフから、可視光照射によって皮膚の表面温度が上昇していることが確認できた。また、出力が大きいほど温度上昇量と上昇率が大きくなることが確認できた。

以上の実験から、光ファイバによつて伝送された可視光でも皮膚を加熱でき、輝度制御で温度の上昇量および上昇率を変化させられることが示された。したがって、光ファイバを用いた可視光温覚提示は、高速に強度を調整する必要がある非接触温覚ディスプレイに適した手法といえる。

3. バーチャル熱源定位実験

提案手法の特徴は、複数の熱源 (光ファイバアレイ) で熱分布を提示し、その分布を頭部方向に連動して変調することで、方向性のある一つのバーチャル熱源を表現することである。提案手法の有効性を検証するため、本研究では

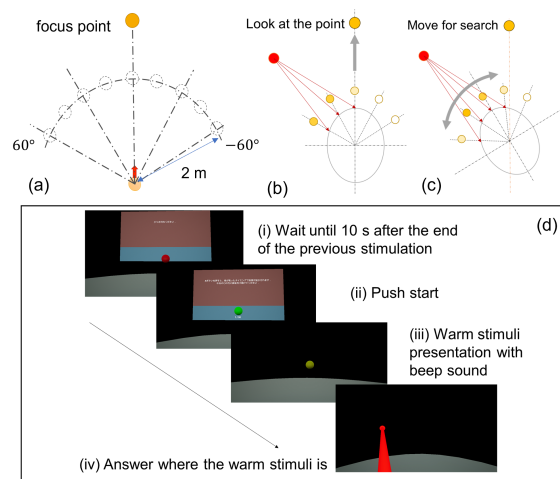


図 5: 熱源定位実験の手続き

バーチャル熱源の方向を推定する課題を実施し、その推定精度が頭部運動の有無で変化するかを調べた。

3.1 刺激

2.1 節のバーチャル点熱源の提示手法によって温覚刺激を提示した。刺激の配置イメージを図 5a に示す。バーチャル熱源は参加者を中心とした 2m の円周上に、正面を中心として 15° 刻みの 9 方向の位置のいずれかに配置された。このとき、温覚ディスプレイは顔正面、左右 30° および 60° の計 5 方向から光を照射した。バーチャル熱源の強度は、顔面での最大照度が 1.78×10^5 lx となるように設定した。これは、デバイス出力輝度が 2.57×10^6 cd/m^2 となる設定であった。バーチャル熱源は視覚的に表示されなかったが、正面方向を表す黄色の球が表示された。

頭部運動は 2 条件で、顔を正面に固定したまま動かさないように努める固定条件 (図 5b) と、頭を動かしてバーチャル熱源の方向を探索させる運動条件 (図 5c) であった。固定条件では顔正面を黄色の球の方向に向け続けるように指示したが、物理的には固定されなかった。

3.2 手続き

第一著者を含む 20 ~ 60 代の男性 5 名が実験に参加した。実験開始前に、温覚ディスプレイの光が HMD 内に漏れなくなるように参加者自身に HMD の装着状態を調整させた。

1 試行の手続きを図 5d に示す。(i) まず準備完了の合図が出るまで待機し、(ii) メッセージと共に正面の球が緑に変わる合図が出た後に参加者がボタンを押すことで試行が開始された。試行が開始されると、(iii) メッセージウィンドウが消失し黄色の球が表示された。試行開始の 0.5 秒後に、ピープ音と共にバーチャル点熱源が 5 秒間だけ提示された。点熱源の位置は試行ごとにランダムであった。熱源の提示が終了したあと、(iv) 参加者を原点とした矢印が表示された。参加者はコントローラ操作により、熱源があると考えられる方向に矢印を向けるように指示された。次の試行の準備完了の合図は、現試行での熱源提示終了から 8 秒以上経過してから表示された。

以上を 1 試行として、各方向 10 試行ずつ、計 90 試行を

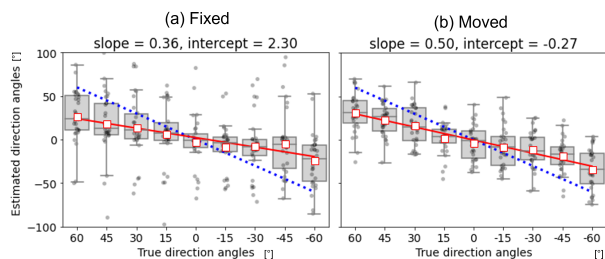


図 6: 熱源定位実験の結果

実施した。頭部の固定条件と運動条件は、参加者間計画によって参加者ごとに無作為に割り当てた。ただし、1名の参加者は例外的に両方の条件に参加した。

3.3 結果

各条件の実験結果を図 6 に示す。a が固定条件、b が運動条件の結果である。横軸がバーチャル点熱源の配置方向、縦軸が回答方向で、各点と箱ひげ図で参加者の回答の分布を表している。赤実線が回答方向の平均値（赤四角点）の近似直線であり、青点線が真値を示す傾き 1 の直線である。参加者が平均的に正確に回答できていれば赤線が青点線に一致する。なお、図 6 の角度の値は顔正面を 0 として左周りを正としているため、図表も左側が正になるように横軸を反転させている。

傾きは固定条件で 0.36、運動条件で 0.50 であり、運動条件の方が有意に大きかった ($p=0.029$)。回答のばらつきを指標として、推定値の近似直線を中心とした標準偏差を比較すると、固定条件で 4.38° 、運動条件で 3.16° であった。

4. 考察

本研究では、頭部運動に連動した多点への可視光照射による空間温覚ディスプレイを用いて、VR 空間にバーチャル熱源を配置し、その方向を回答させる実験を実施した。その結果、バーチャル熱源の設定方向と回答方向が有意に関連していた。この結果は、本手法によって提示された異なる位置のバーチャル熱源の方向を区別できたことを示唆する。

さらに、近似直線の傾きが 1 より有意に小さかったことから、方向の過小評価が発生していたといえる。この理由として、本研究の光ファイバアレイが顔の側面をカバーしていないことが考えられる。これにより、斜め前方のバーチャル熱源で顔側面の熱分布を正しく表現できず、顔の中心側に偏って知覚されてしまった可能性が考えられる。他の理由として、顔の温覚感度が部位ごとに異なることも挙げられる。ヒトの温覚弁別能は部位によって大きく異なることが知られており、特に口周辺は頬よりも温覚閾値が小さい [6]。このことから、斜め前方にバーチャル熱源を配置した場合に唇側でより強く温覚を感じてしまい、物理的に正しい位置よりも唇側に偏ってバーチャル熱源を定位してしまった可能性がある。

また、固定条件と運動条件を比較すると、運動条件の方でより傾きが大きく、推定値の分散がより小さかった。これ

は、運動条件でより正確に熱源の方向を知覚できていたことを示唆する。その理由として、唇付近の温覚閾値が小さい [6] ことが挙げられる。運動条件では、空間温覚の手がかりとして感度の高い唇付近での温覚の時間変化を積極的に使えるため、ごく弱い強度の熱源方向を探索するのに顔を動かす戦略が有利であった可能性がある。

5. むすび

本研究では、空間的な熱源を VR で再現することを目標として、光ファイバアレイを用いて顔面に高輝度可視光を照射し、頭部の位置姿勢に合わせてその強度分布を変調可能な、HMD 装着型の非接触可視光空間温覚ディスプレイを提案した。また、点光源の物理に基づき、バーチャル熱源の位置とユーザの頭部位置姿勢との関係から計算された顔面での照度分布を光ファイバアレイで再現することで顔面での熱分布を生成し、バーチャル熱源の方向と強度を顔面で感じさせる手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を評価するため、バーチャル熱源の方向弁別課題を実施した。その結果、方向の過小評価が発生したものの、本装置で提示されたバーチャル熱源の方向を区別できること、頭部運動を伴う提示で方向をより正確に推定できることを実験的に示した。

また本研究は、装置の配置の制約を超えて熱源を自由に空間に配置するために、頭部運動に連動した温覚提示という新しいコンセプトを提案した。これにより、炎や太陽光、暖炉のような非接触で熱を伝えるオブジェクトの空間的な熱的表現が可能になるため、VR 環境のリアリティが増し、臨場感が高まることが期待できる。これはエンターテインメント分野はもとより、災害体験や極地環境の体験などの教育分野においても有用と思われる。

参考文献

- [1] Murakami, T. et al.: Altered touch: miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics; In ACM SIGGRAPH 2017 Posters, 1-2, 2017.
- [2] Peiris, R. L. et al.: Thermovr: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays; In Proc. 2017 CHI Conf. Hum. Factors Comput., 5452-5456, 2017.
- [3] Iwai, D. et al.: Non-contact thermo-visual augmentation by IR-RGB projection; IEEE Trans Vis Comput Graph., 25(4), 1707-1716, 2018.
- [4] 界瑛宏ら：HMDVR のための可視光 LED による手への非接触型温覚提示; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(1), 83-92, 2019.
- [5] 河内まき子・持丸正明：日本人頭部寸法データベース 2001; 産業技術総合研究所 H16PRO-212, 2008.
- [6] Stevens, J. C., & Choo, K. K.: Temperature sensitivity of the body surface over the life span; Somatosens Mot Res., 15(1), 13-28, 1998.