



# 頬への触覚提示を利用した VR 空間における方向誘導手法

Cheek Haptic Stimulation-based Spatial Directional Guidance in a Virtual Environment

中村文彦<sup>1)</sup>, Adrien Verhulst<sup>2)</sup>, 櫻田国治<sup>1)</sup>, 福岡正彬<sup>1)</sup>, 杉本麻樹<sup>1)</sup>  
Fumihiko NAKAMURA, Adrien VERHULST, Kuniharu SAKURADA,  
Masaaki FUKUOKA, and Maki SUGIMOTO

1) 慶應義塾大学 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13)

**概要:** 本論文では、頭部装着型ディスプレイに取り付けられた小型のロボットアームを用いて空間情報に対応した刺激を頬に提示することで、方向誘導を行う手法を提案する。実験では、ターゲット探索タスクにおいて、視覚情報だけ提示した条件と視覚情報と頬への触覚提示を行う条件でタスク完了時間とユーザビリティとワークロードを比較し、本手法がどの程度有効であるか検証した。

**キーワード:** 空間誘導, 顔面触覚, ロボットアーム, ヘッドマウントディスプレイ, 反射型光センサ

## 1. はじめに

VR (Virtual Reality) 環境におけるユーザの空間誘導は重要である。方向や距離といった空間情報は、ほとんどの場合、視覚的に提示される。しかし、過剰な視覚的な情報はユーザの疲労を招き得る。そこで、視覚情報の代替として空間情報を音に変換して用いられる。しかしながら、音による空間情報の提示では、対象の方向を向く必要がある。対象を視認せずに位置・方向を提示できる手法として、触覚が用いられる。

触覚刺激による空間誘導では、刺激の種類だけでなく、刺激位置も重要である。触覚刺激の位置の特定に関する先行研究において、頭部が自由に動かせる場合には、触覚刺激の位置は視線を中心とした参照フレームにコード化されて実際の位置からずれて知覚されやすいことが示されている [1]。また、超音波刺激を用いた触覚刺激においては、頬に与えられた刺激の位置を高い精度で認識できることが報告されている [2]。そのため、HMD を装着した VR ユーザの顔面に対して触覚による空間の手掛かりを提示する手法が提案されている [3]。

市場に廉価な HMD (Head-Mounted Display) の現れてから、様々な VR 触覚デバイスも市場に供給されるようになった。ほとんどの触覚デバイスの刺激する位置は手や身体であるが、その一方で、顔面に対して触覚刺激を提示するデバイスは少ない。

そこで、本研究では、空間情報に対応した触覚刺激を頬に提示することで空間誘導を行うシステムを提案する (図 1)。本システムでは、2本のロボットアームを HMD 底部に取り付けたデバイスを用いて頬を刺激した (図 2)。各ロボットアームのエンドエフェクタには、距離センサとして反射型光センサを 4 個配置した。実験では、頬への刺激を

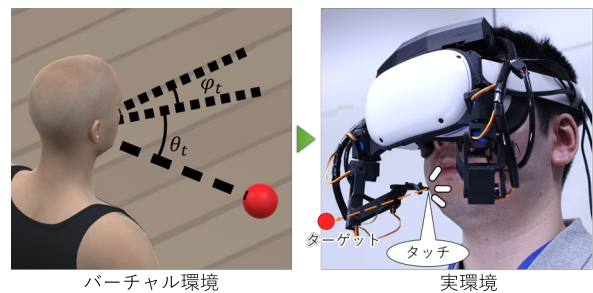


図 1: ターゲットの方向に対応した触覚刺激の頬への提示

用いた VR 空間での空間誘導のパフォーマンスを評価した。

## 2. 関連研究

触覚提示技術は VR においてよく利用されている。五感の中でも、視覚・聴覚・嗅覚・味覚は頭部の特定の位置 (目・耳・鼻・舌) に感知される一方で、触覚は身体全体の様々な部位で感知できる。そのため、多くの研究で身体の様々な部位に触覚刺激を提示する試みが行われてきた。しかし、触覚刺激の知覚における先行研究において、頭部を自由に動かせる場合に、身体への触覚刺激は視線方向にシフトすることが報告されている [1]。そのため、VR アプリケーションのようにユーザが頭部を自由に動かせる場合には、ユーザが刺激位置を正確に近くするためには頭部への触覚刺激が有効だと考えられる。

VR ユーザへの頭部への触覚提示は、HMD に対してアクチュエータを取り付けることで行われている。Oliveira らは、HMD のフェイシャルインタフェースに複数の振動モータを組み込んで顔面に空間方向に対応した振動刺激を提示した [4]。このシステムでは方位角方向の成分を振動の位置に、仰角方向の成分を振動周波数に変換してユーザに提示した。顔面に対して触覚情報を提示することで、VR 体験に

おける質の向上を行ったり、ユーザに空間情報を伝えることが可能であり、空間インタラクションにおいて顔面への触覚提示が有効であると考えられる。

頬は触覚に対して敏感である顔の部位の一つであり、触覚刺激に対する特性の検証やインタラクションへの利用が試みられている。先行研究においては、頬に超音波による触覚刺激が与えられたときに、額や眉と同程度の正確さで頬上の刺激された位置を特定できると示されている [2]。Wilberzらは、HMDに取り付けられたロボットアームを用いて触覚フィードバックを提示するシステムを提案した [3]。この研究では、ロボットアームの先端に取り付けたファンから風の手掛かりによってユーザが方向情報を知覚できると示した。上記で示したように、頬は触覚刺激が提示された位置を正確に検出できることが示されている。しかし、先行研究では方向情報を風 [3] や超音波 [2] といった間接的な刺激に変換して提示しており、また、変換している方向情報は水平方向だけである。そこで、本研究では、直接的な接触によって触覚情報を頬に提示することで水平方向と垂直方向を含めた空間誘導する手法を提案する。頬に対して接触による触覚刺激をするにあたって、我々はHMDにロボットアームを取り付けて用いた。空間情報を触覚刺激に変換する時には、方向情報の仰角の成分は刺激位置の高さに変換することで、高さ方向にも空間誘導できるかを検証する。

### 3. システム

HMD ユーザに方向情報を提示するにあたって頬を用いた。顔面は機械的刺激に対して敏感であり、特に頬を含む口周辺は刺激位置を正確に認識できる。しかし、口唇は皮膚が薄く傷つきやすいので、本研究では口唇を避けて頬に直接的な接触によって触覚刺激を提示した。頬への刺激には、HMDに装着したリンク機構によるロボットアームを用いた(図2)。また、HMDにはロボットアームを制御するためのマイクロコンピュータを含む回路を取り付けた。ロボットアームは5自由度で設計され、3個のTower Pro MG92Bサーボモータと2個のPowerHD DSM44サーボモータによって構成された。ロボットアームの先端は頬を傷つけないように丸くした。ロボットアームの位置は逆運動学によって制御した。左右それぞれにロボットアームを一本ずつ取り付けすることで、口唇への刺激を避けながらも両側の頬に直接タッチすることで刺激した。

アームを用いて頬にタッチするには、頬表面の形状が必要である。そこで、フォトリフレクタをロボットアームの先端に取り付けて、ロボットアームと頬表面の距離を計測した。フォトリフレクタは、発光部と受光部から構成され、発光部からの光が物体から反射した光の強度を受光部で検出することで距離を計測する。フォトリフレクタはロボットアームの先端の周囲(上下左右)に装着され、アームの先端の周囲の頬表面上の点の位置を検出した。検出した点の位置にロボットアームが移動することで頬表面上をなぞり、そのアームの軌跡を頬表面上の点として収集する。この時、

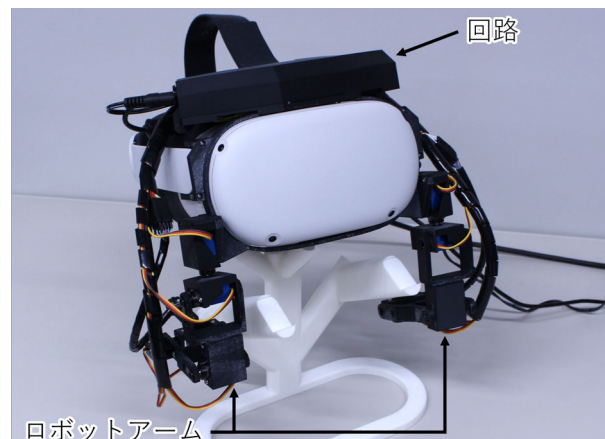


図2: 触覚提示デバイス

ロボットアームが一定の角度(水平方向:60度,垂直方向:地面に水平)になるようにロボットアームの先端に姿勢を制御した。収集した点群に二次曲面をフィッティングすることで頬表面を二次曲面として推定した。

ターゲットの方向情報に対応した触覚刺激の提示では、方向情報を頬表面上の対応する位置を計算し、その位置にロボットアームでタッチした(図3)。まず、バーチャル環境にあるターゲットの位置 $(x_t, y_t, z_t)$ を球面座標系へと変換することで方位角 $\varphi_t$ と仰角 $\theta_t$ を計算した。そして、方位角と仰角を直線へと変換した。この時、仰角 $\theta_t$ は正弦を刺激する領域の高さと比例するように計算することで直線の高さ成分 $z_{offset}$ へと変換し、方位角 $\varphi_t$ は正接を直線の傾きへと変換することで、式 $(x, y, z) = t(\tan \varphi_t, 1, 0) + (0, 0, z_{offset})$ で表される直線に変換する。この方位角と仰角から求められた直線と頬表面の二次曲面との交点 $(x_s, y_s, z_s)$ を計算し、その交点を刺激位置として決定し、方向情報と頬上の位置を対応付けた。刺激を提示する際には、刺激位置にロボットアームを動かしてタッチした。しかし、本研究では口唇への刺激の提示を避けたため、ターゲットが正面の方向にある時には、2本のロボットアームで両頬を刺激した。上記のようにして、VR空間にあるターゲットの方向情報と対応した実空間での頬表面上の位置を計算し、その点をロボットアームを用いて刺激することで、ユーザにターゲットの方向を提示した。

### 4. 実験: VR空間における空間誘導

VR空間において、頬への方向情報に対応した触覚提示による空間誘導によってどの程度有効か検証した。本実験では、実験参加者はVR空間でターゲットを探してタッチするタスクを行った。タスクはVisual条件、Visual+Audio条件、Visual+Haptic条件の3条件で行った。Visual条件では色の情報だけでターゲットを探し、Visual+Audio条件では色と音の情報を用いてターゲットを探し、Visual+Haptic条件では、色と頬に提示された触覚の情報でターゲットを探した。Visual+Audio条件では、ターゲットの方位角方向を音の左右の音圧に変換し、仰角方向を音の周波数に変換した。仰角方向の音への変換では、音の基本的な周波数は

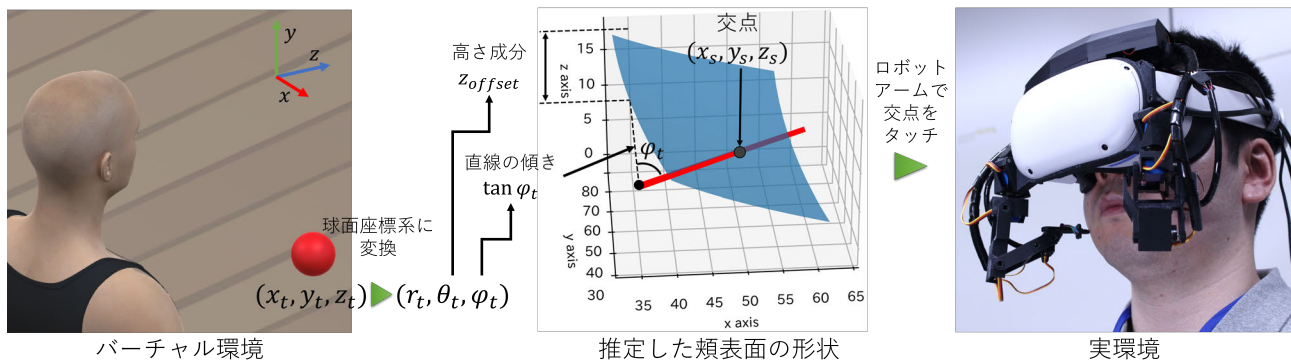


図 3: ターゲットの方向情報に対応した頬表面上の位置への触覚刺激の提示の流れ

440Hz であり、仰角方向の差が大きくなると周波数が低くなるようにした。各条件で、タスク完了時間とユーザビリティとワークロードを評価した。ユーザビリティとワークロードを評価するために、それぞれ SUS (System Usability Scale) と NASA-TLX を用いた。実験参加者は 9 名 (男性: 9 名, 平均年齢: 24.67, 標準偏差: 2.98) であった。

実験参加者は 50 個の球の中から 1 個のターゲットを探してタッチする試行を行った。各試行が始まる時に、球は  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$  の部屋の中に出現した。ターゲットの出現位置は事前にランダムに決定した 80 点の位置に各試行毎に現れた。80 点の位置を決定した時には、位置のカウンターバランスをとるために、まずランダムに 40 点の位置を生成し、その XYZ の座標をランダムに並べ替えて 40 箇所の点を生成して、合計 80 点の位置のセットを生成した。各試行の最初に、ターゲットを含めた全ての球は各球が重ならないランダムな位置に出現し、色も各球の色間の HSV 空間における距離が 0.25 以上離れたランダムな色に設定した。実験参加者が試行を行っている間、ロボットアームはターゲットの位置を頬の触覚提示した。VR 環境には、実験参加者の頭部の位置・姿勢と手の位置を反映させた。手の位置は手に持ったコントローラを白い球として VR 空間内に表示した。

実験の流れとして、実験参加者はリハーサルセッションと本番セッションを順に行った。まず、リハーサルセッションを行い、実験参加者はターゲットを探す試行を 20 回行い、その後本番セッションで 80 試行を行った。本番セッションでは、20 試行毎に休憩をはさんだ。実験参加者がターゲットをタッチした時には、効果音を聞かせて次の試行に進んだ。各試行の間には 5 秒間のインターバルを設定し、その間はロボットアームによる頬への触覚刺激の提示を停止して、実験参加者には正面方向にある指示のテキストを見るように指示した。

実験を始める前に実験参加者に実験の手順を説明した。試行を始める時には、まず、実験参加者に VR 空間の部屋の中央に移動するように指示した。実験参加者が部屋の中央に移動すると、ターゲットを部屋の正面に表示した。次に、50 個の球を部屋の中に配置して、実験参加者はその球の中から各条件の手掛かりを頼りに正しいターゲットを探した。実験参加者がターゲットにタッチすると、5 秒間のインター

バルの後に次の試行へと進んだ。比較する三条件 (Visual 条件, Visual+Audio 条件, Visual+Haptic 条件) は各被験者によってランダムに設定した。

## 5. 実験結果・考察

実験参加者全体でのタスク完了時間の結果を図 4 左に、SUS スコアの結果を図 4 中央に、NASA-TLX のスコアを図 4 右に示す。タスク完了時間は、Visual 条件では平均で 6.68 秒、標準偏差は 3.45 秒となり、Visual+Audio 条件では平均で 6.20 秒、標準偏差は 3.30 秒となり、Visual+Haptic 条件では平均で 4.22 秒で、標準偏差は 2.05 秒となった。フリードマン検定より条件間のタスク完了時間には統計的有意差があることが示された ( $p=0.0011$ )。ボンフェローニ補正を用いた多重比較検定の結果から、統計的有意差が Visual 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0003$ ) と Visual+Audio 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0040$ ) にあることが示された。SUS スコアは、Visual 条件では平均で 44.17、標準偏差は 21.83 となり、Visual+Audio 条件では平均で 44.44、標準偏差は 23.24 となり、Visual+Haptic 条件では平均で 86.11 で、標準偏差は 8.76 となった。フリードマン検定より条件間のタスク完了時間には統計的有意差があることが示された ( $p=0.0048$ )。ボンフェローニ補正を用いた多重比較検定の結果から、統計的有意差が Visual 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0002$ ) と Visual+Audio 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0004$ ) にあることが示された。NASA-TLX スコアは、Visual 条件では平均で 75.22、標準偏差は 22.93 となり、Visual+Audio 条件では平均で 71.03、標準偏差は 12.13 となり、Visual+Haptic 条件では平均で 35.00 で、標準偏差は 17.16 となった。フリードマン検定より条件間のタスク完了時間には統計的有意差があることが示された ( $p=0.0045$ )。ボンフェローニ補正を用いた多重比較検定の結果から、統計的有意差が Visual 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0020$ ) と Visual+Audio 条件と Visual+Haptic 条件の間 ( $p=0.0003$ ) にあることが示された。

実験中の実験参加者の行動を見たところ、Visual+Haptic 条件においてターゲットが足元や頭より上にある時には見つかるまでに時間がかかる傾向があった。Visual+Haptic 条件では、実験参加者はターゲットをまず水平方向から探すよ



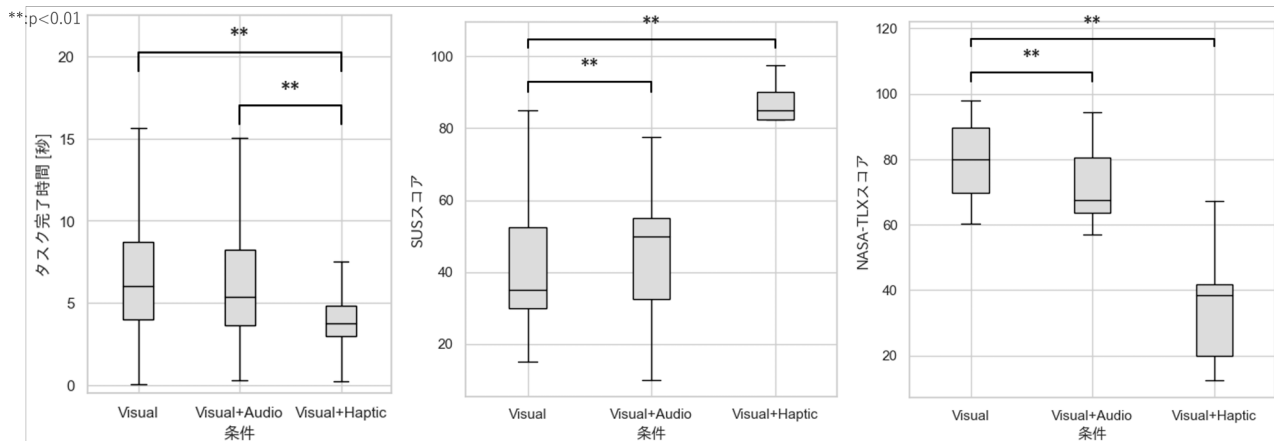


図 4: 実験結果. (左) タスク完了時間. (中央) SUS スコア. (右) NASA-TLX スコア

うに行動したため、足元や頭よりも上の位置にあるターゲットを見つけるまでに時間がかかったと考えられる。しかし、Visual 条件や Visual+Audio 条件の場合には実験参加者は左右だけでなく上下も含めて全体を見回すように行動する傾向があったので、目線と高さが違う高さにあるターゲットでも見つけれられた。そのため、提案した頬への方向提示では方位角方向の情報は認識が容易であったため、Visual + Haptic 条件では行動に差が生じたと考えられる。また、全条件でターゲットが他の球の後ろにある場合に実験参加者は戸惑う様子が見られた。これは、提案した手法では距離情報を提示していないので、オクリュージョンが起こると、視覚情報と触覚・聴覚の情報の間で齟齬が発生したためだと考えられる。

実験後の内観報告で、実験参加者のほとんどが、Visual 条件ではターゲットの色を確実に記憶するようにしたが、Visual+Haptic 条件ではターゲットの色をあいまいに覚えるように行動を変えたことが分かった。これは、実験参加者が頬への方向情報の触覚提示によって直感的に方向を理解しやすかったためだと考えられる。

## 6. 結論

本論文では、HMD に装着したロボットアームを用いて方向情報に対応した触覚刺激を頬に提示する手法を提案した。HMD の底部の左右に装着したロボットアームによって左右の頬を刺激した。フォトリフレクタをロボットアームの先端に取り付けて頬の形状を計測することで、その表面形状を二次曲面として取得した。方位角方向と仰角方向に対応した取得した頬の表面上の位置を算出し、その位置をロボットアームによって刺激し、方向情報を提示した。

実験では、頬への触覚による方向提示手法を用いた VR 空間上でのユーザの誘導におけるタスクパフォーマンスを評価した。ターゲットの探索タスクにおいて、Visual 条件と Visual+Audio 条件と Visual+Haptic 条件の三条件でのタスク完了時間と SUS スコアと NASA-TLX スコアを比較した。平均タスク完了時間は、Visual 条件では 6.68 秒、Visual+Audio 条件では 6.20 秒、Visual+Haptic 条件では 4.22 秒となった。平均 SUS スコアは、Visual 条件で 44.17、

Visual+Audio 条件では 44.44、Visual+Haptic 条件では 86.11 となった。平均 NASA-TLX スコアは、Visual 条件では 75.22、Visual+Audio 条件では 71.03、Visual+Haptic 条件では 35.00 となった。統計検定の結果より、Visual 条件と Visual+Haptic 条件の間と、Visual+Audio 条件と Visual+Haptic 条件の間のタスク完了時間と SUS スコアと NASA-TLX スコアの間に統計的有意差があることが示された。

**謝辞** 本研究は、JST ERATO (JPMJER1701)、JSPS 科学研究費 (16H05870, 21J13664) の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Lisa M. Pritchett, Michael J. Carnevale, Laurence R. Harris : Reference frames for coding touch location depend on the task, *Experimental brain research*, Vol. 222, No. 4, pp. 437–445, 2012.
- [2] Hyunjae Gil, Hyungki Son, Jin Ryong Kim, Ian Oakley : Whiskers: Exploring the Use of Ultrasonic Haptic Cues on the Face *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2018.
- [3] Alexander Wilberz, Dominik Leschtschow, Christina Trepkowski, Jens Maiero, Ernst Kruijff, Bernhard Riecke : FaceHaptics: Robot Arm Based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 2020.
- [4] Victor Adriel de Jesus Oliveira, Luca Brayda, Luciana Nedel, Anderson Maciel : Designing a Vibrotactile Head-Mounted Display for Spatial Awareness in 3D Spaces, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1409–1417, 2017.