



温度感覚のバーチャルリアリティと人間の感覚



筑波大学教授 黒田 嘉宏
東京大学特任研究員 許 佳禕

1. 温度感覚のバーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (VR:Virtual Reality) という、ゴーグルをつけて体験する技術という印象が強いかもしれませんが。一方、人間は、皮膚の温度変化から、触れた物体の材質感 (木材や金属など) や周囲の暖かさや寒さを感じ取っています。したがって、物体や環境と皮膚との間で出入りする熱を計算し、デバイスを通して再現することで、さまざまな材質に触れたときの感覚や、異なる環境にいるかのような体験を味わうことができます (図1)。また、冷えた足をお湯につけて温めると幸せな気分になるといったように、温度感覚は人間の情動にも影響を与えます。本稿では、温度感覚の VR 技術について紹介したいと思います。



図1 寒さも体感できるリアルな北極体験 VR のイメージ図

2. 人間の温度感覚の仕組み

人間の皮膚には、熱を感じ取る細胞があります。古くから暖かさを感じ取る温点と冷たさを感じ取る冷点が皮膚上にあることが知られており、20世紀前半にはどの程度の密度で存在するかについて調査されました。たとえば手の甲には、温点は1平方センチメートルあたり0.5、冷点は7.4程度存在し、冷点の方が密度が高いことが知られています。また、最近の研究では、痛

みの感覚を発生させる受容体や、温度に反応する受容体が発見され、1997年と2021年にノーベル生理学賞・医学賞が授与されました。痛みを感じる受容体は、カプサイシンという唐辛子の辛み成分や温度変化によって活性化することがわかっており、その結果、電気信号を発生し、脳で感覚が生じます (図2)。また、30度未満の低温で活性化する受容体は、メントールによっても活性化することがわかっています。このように、日常における、唐辛子の入った料理を食べたときに唇に痛みや熱さを感じる体験や、メントール入りの飴を食べたときに清涼感を感じる体験が科学的に説明することができます。少し専門的な話ですが、人間の細胞にはプラスやマイナスの電荷をもったイオンを細胞内に取り込んだり、取り込まなかったりという流れを制御するイオンチャネルという構造があり、外部からの刺激によってチャネルの開閉が制御され、その電荷の移動によって電気的な信号が発生する源になります。

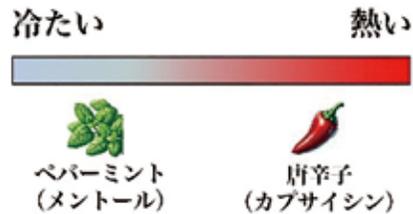


図2 温度を感じる仕組み：熱さや清涼感を与える成分と温度

3. 錯覚と VR

バラバラ漫画のように1秒間に何枚も絵を切り替えることで、物が滑らかに動くように人間は感じます。テレビの映像も同様に、1秒間に30枚の画像を切り替えて表示しています。このような現象は人間の知覚特性に依存しており、人間が感じること (物が滑らかに動くこと) は、人間が実際に受けている刺激 (バラ

パラ漫画の1枚ずつの絵)とは必ずしも一致しません。これを錯覚とも呼びます。

温度感覚に関する錯覚として有名なものをいくつか紹介します。まず、温度感覚が別の場所に移る温度の指間参照現象(サーマルリファラル)という現象があります。図3のように、たとえば、3本の指のうち、外側の2本の指が温かい物体に触れ、真ん中の指が常温の物体に触れていたとします。そうすると、不思議なことに、真ん中の指まで温かく感じます。温かい物体の代わりに冷たい物体に触れた場合は、真ん中の指も冷たく感じます。身近に試す方法としては、硬貨を氷水で冷やしてみたり、40度程度のお湯(火傷しないように適温)で温めて試したりすることができます。

他には、図4のように、温かい物体と冷たい物体を並べておいて、それに同時に触れると痛みを感じる痛み錯覚(サーマルグリル錯覚)という錯覚があります。それぞれの物体の温度単体では、痛みを感じるほど高いあるいは低い温度ではないのですが、痛みを感じる不思議な体験です。痛みは本来、身体にダメージを与

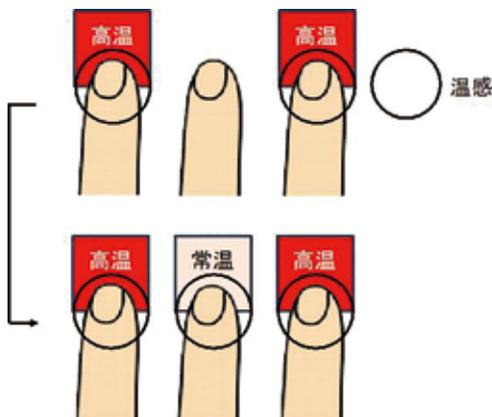


図3 温度の指間参照現象：外側の指の温感が真ん中の指に移る



図4 痛み錯覚現象
隣り合う高温・低温の物体に触れると痛みを感じる

えるような外部からの刺激によって生じますが、錯覚によって痛みを再現することで、身体にダメージを与えずに擬似体験できるため、危険な操作を行った場合の危険性などを実感するための教育訓練などに応用できると考えられています。

人間にはさまざまな錯覚が存在し、その錯覚を理解し応用することで、新たな体験を効果的に実現することも可能です。したがって、バーチャルリアリティの研究において、人間の体の仕組みを知ることも非常に重要です。どのようにして効果的に人間の感覚を騙すか、ということを考えることで、結果的に小型で高性能な装置の開発につながります。

4. 冷えていないのに冷たい温度感覚 VR

それでは、周囲の環境から感じる温度感覚について具体例を挙げて説明します。北海道の冬景色を思い浮かべてみてください。一面に広がる銀世界は、厳しさと美しさを併せ持つ自然の象徴ともいえる光景です。冷たい風が頬をかすめ、衣服の隙間に忍び込み、体温をじわじわと奪っていきます。その冷たさが足元から広がり、指先にまで達すると、思わず肩をすくめ、寒さに抗おうとしますでしょう。

こうした極端な寒冷環境では、私たちの感覚は時間の経過とともに変化します。具体的には、冷たさに対する感覚が鋭敏になる一方で、温かさを感じる能力が鈍くなるのです。たとえば、雪原から焚き火のそばに移動した場合、炎の熱を視覚では捉えられても、身体がその温かさを実感するまでには時間がかかることがあります。この現象は日常生活ではそれほど問題になることはありませんが、VRのような人工的な環境においては、没入感に影響を与える課題となり得ます。VRでは、ユーザーが短時間でまったく異なる温度環境を行き来することが珍しくありません。たとえば、北極のような氷点下の環境にいたかと思えば、次の瞬間には灼熱の砂漠に移動することがあります。このような場合、理想的にはシステムが新しい環境に即座に対応し、適切な温度フィードバックを提供する必要があります。しかし、感覚には「慣性」があるため、直前に強い寒冷刺激を受けた場合、高温のフィードバックが提供されても、身体がその温かさを実際に感じるまでに時間がかかることがあります。この感覚の慣性がユーザー仮想環境のリアリティを損ない、最終的にはユーザーの没入

感を低下させる原因となる可能性があります。

このような課題に対して、私たちの研究グループは、皮膚の実質的な温度変化を伴わない冷覚提示技術を提案しました。この技術は、人間の温度感覚の特性に着目して開発されたものです。人間は急激な温度変化には敏感である一方、緩やかな温度変化には鈍感であるという特性があります。また、人間が断続的な画像を連続した動画として認識する仕組みにも注目し、同様に断続的な冷覚が連続的な冷感として知覚される可能性があると考えました。これらの特性をもとに、急激な温度低下（冷覚を伴う）と緩やかな温度上昇（冷覚を伴わない）を周期的に切り替えることで、皮膚温度をほとんど変化させることなく冷覚を誘発できるのではないかと、という仮説（図5）を立てました。

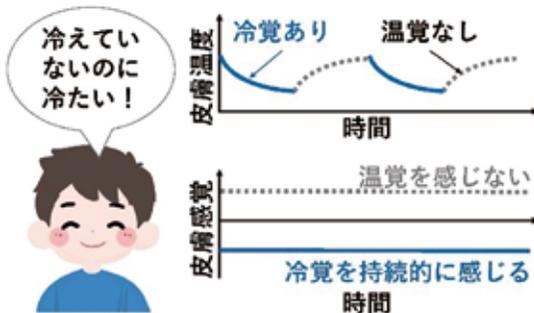


図5 「冷たくないのに冷たい感覚を生むVR」の肝となる仮説
人間は断続的な冷覚を連続した冷感として知覚する

この仮説を検証するために、冷たい気流と温かい光源を統合した非接触高速応答温度感覚提示システム（図6）を開発しました。開発したシステムを用いて、異なる温度低下速度（以下「冷却速度」と呼ぶ）と温度上昇速度（以下「加熱速度」と呼ぶ）を組み合わせた刺激パターンを設計しました。20～30代の男女（男性14名、女性1名）を対象とした実験を実施し、各刺激パターンに対する参加者の温度感覚を記録しました。その結果、実質的な皮膚温度の変化を伴わない状態でも、非接触で連続的な冷感を誘発できることが確認されました（図7）。また、冷却速度を1.5倍（秒間0.24℃の温度変化）にすることで、従来技術（秒間0.16℃の温度変化）と同程度の冷感強度を実現可能であることが示されました（図8）。これにより、皮膚温度を実際には変化させることなく、より効率的に冷感を提示する新しい手法の可能性が示唆されました。

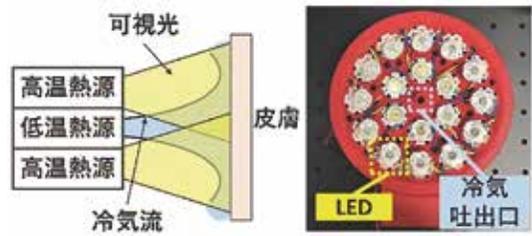


図6 冷たい気流と温かい光源を統合した非接触高速応答温度感覚提示システム

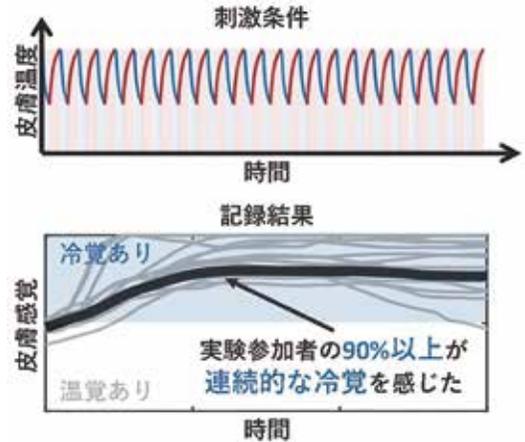


図7 刺激パターンに対する参加者の温度感覚記録の一例
提案技術は、皮膚温度の実質的な変化を伴わない状態でも、非接触で連続的な冷感を誘発できることが確認された

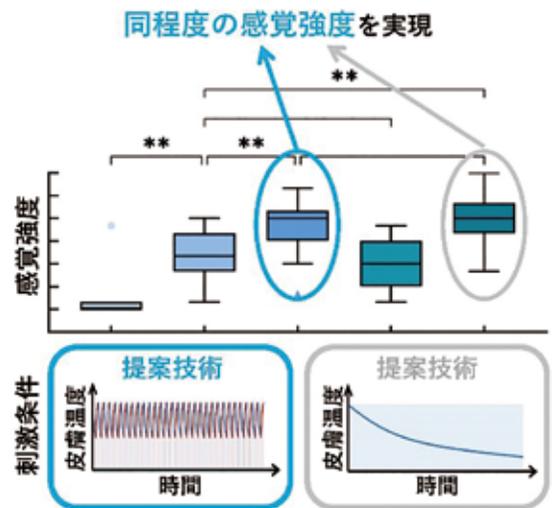


図8 提案技術と従来技術の比較
提案技術は、従来の皮膚温度を継続的に低下させる技術と同程度の冷感強度を実現できることが示された

5. 今後の展望

本技術は、身体の状態を変化させることなく、皮膚感覚を人工的に再現する新たなアプローチを提供します。この提案技術を活用することで、感覚の「慣性」を防ぎ、短時間で全く異なる温度環境をリアルに体験することが可能になります。たとえば、極寒の北極から灼熱の砂漠、さらには心地よい南国の島々まで、世界各地の気候を巡る「バーチャル世界一周旅行」を楽しめる未来が期待されます。

また、この皮膚感覚の人工再現技術は、VRの枠を超えて、日常生活や医療分野への応用も広がります。たとえば、皮膚感覚を活用して人の感情を調節し、より快適な生活や仕事環境を提供したり、簡便かつ迅速な感覚刺激テストを用いて感覚が鈍くなる糖尿病などの早期症状を発見したりすることも可能です。このように、本技術は生活の質（QOL）の向上に大きく貢献するポテンシャルを秘めています。

6. メタバースと長期体験型 VR 技術

近年、メタバースという VR 空間で人々が交流し、現実空間とは異なる社会を築いています。メタバースでは、ユーザはアバタとなって互いに交流します。アバタは現実空間の自分自身とは異なる性別や外見や声などで表現することでき、人によってはそれに心地よさや開放感を感じることができます。「VRChat」や「Cluster」などのメタバースプラットフォームがあり、そこでさまざまな交流やイベントが実施されています。ゲームの分野でも「あつまれ どうぶつの森」や「Fortnite」などオンラインでユーザが交流したり対戦したりするものがあります。「マイクラフト」というサンドボックス型のゲームでは、ブロックのような要素を使ってオリジナルの建物や街を作ることができます。メタバースプラットフォームの一部では、ブ

ロックチェーン技術を用いた仮想通貨なども扱われ、メタバースでの商業的な活動により収益をデジタル資産として得るといったことも行われています。

前節までご紹介した温度感覚の VR 技術は、メタバースにまだ導入されていませんが、今後、導入されていく場合に必要な点として、長期体験が可能であることです。たとえば、ハワイのようなリゾート環境をメタバース上に再現した場合、皮膚を加熱するとしても継続して加熱し続けると皮膚の基準温度が高くなってしまい、健康や安全性の問題が生じるという問題や、冷たい感覚を次に感じさせたいときに感覚が鈍ってしまったり遅延が生じるという問題があります。したがって、長期間体験をしても安全・安心で自由自在に感覚を操ることができるような VR 技術を開発することが必要となります。今回の記事で紹介した皮膚温度を実質的に変化させないで冷感を感じさせる技術は、そのような長期体験型温度感覚 VR 技術の先駆的な技術であるといえます。

7. おわりに

今回の記事では、温度感覚に関するバーチャルリアリティについて、人間の温度感覚の仕組みと温度感覚の VR に関する最新の研究事例を紹介しました。VR 技術は近年では、現実空間と情報空間を融合した Mixed Reality なども含め、クロスリアリティ (XR) と呼ばれることもあります。また、第2の生活空間として、さまざまな社会活動を情報空間で行うことができるメタバースに関する研究や応用事例も出てきています。これらの分野の発展には、情報技術の開発、人間の特性の調査に加えて、さらに文化人類学のような人と社会に関する研究も必要となってきます。VR の研究に関心のある方には、さまざまな分野に幅広く関心をもち、探求する心をもっていただければ幸いです。

※本稿に記載している各社の会社名、サービス名及び製品名等は、各社の登録商標または商標です。