



# 疑似運動感覚と疑似身体感覚が疲労感に及ぼす影響の 基礎検証

坂中真貴<sup>1)</sup>, 山田祐輔<sup>1)</sup>, 櫻井翔<sup>1)</sup>, 野嶋琢也<sup>2)</sup>, 広田光一<sup>1)</sup>

Masaki SAKANAKA, Yusuke YAMDA, Sho SAKURAI, Takuya NOJIMA, and Koichi HIROTA

1, 2) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

(〒113-0033 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {masaki\_s, yamada\_yusuke, sho, hirota}@vogue.is.uec.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

**概要:** 実際の運動を伴わずに運動感覚を生成するバーチャルリアリティ (VR) では, 疲労を知覚させることで運動感覚のリアリティを向上できる可能性がある. 本稿では, 末梢性/中枢性疲労と生理反応の変化を統合して知覚される感覚を疲労感と定義し, 五感刺激を用いて生成した疑似的な運動感覚と生理的变化から疲労感を知覚させられるか検証した. 実験を通じ, 視覚的な運動感覚, 呼吸音, 擬似心拍はそれぞれ疲労感に作用することを示した.

**キーワード:** 疲労感, 疑似運動感覚, 疑似身体感覚, 身体性認知科学

## 1. はじめに

ユーザが実際に身体を動かすことなく運動している感覚を提示するバーチャルリアリティ (VR) 技術 (以下, 静止型 VR) では, 実際の運動時に生じる疲労が伴わない. 静止型 VR の体験中に疲労を知覚させることができれば, 運動感覚のリアリティをより向上できる可能性がある.

疲労には, 主に筋肉や臓器等を機能させる物質およびエネルギーの枯渇に起因する身体的な疲労である末梢性疲労と, 視神経や脳の緊張に起因する精神的な疲労である中枢性疲労がある. これらの疲労は, 双方とも, 身体のバランスを維持する自律神経を酷使することにより, 神経細胞が活性酸素による酸化ストレスで破壊されることで生じる [1]. すなわち, 末梢性疲労も中枢性疲労も原理的には同じ過程を経て生じる. 運動時には両方の疲労が発生しており [2], 人はこれらの疲労を完全に区別して知覚しているわけではない.

一方, 多くの運動には, 筋疲労に加えて呼吸, 心拍, 体温等の生理的变化が伴う. これらは主に自律神経の働きによってコントロールされる. ストレスや緊張等によって交感神経が活発になると, 筋緊張, 血圧や心拍の上昇, 呼吸が浅くなる等の影響が見られる. 逆にリラックスしている時は副交感神経が活発になり, 筋緊張や血圧・心拍は穏やかになる. このメカニズムを踏まえると, 運動時の末梢性疲労および中枢性疲労と生理的变化は, 双方とも運動に起因する自律神経系の乱れから引き起こされると説明できる.

人工的に疲労を知覚させる手法の実現を目指す上で, 著

者らは, 情動二要因理論に基づく情動インタフェースのアプローチに着目した. 情動二要因理論は, 知覚した自己の生理的变化とその生理的变化の理由 (原因帰属) の認知が自覚される情動を決定すると説明している [3]. また, 実際に生理的变化が生じる必要はなく, 生理的变化を錯覚した場合でも情動が変化することが明らかになっている [4]. 情動インタフェースに関する先行研究では, 情動二要因理論を基盤として, 呼吸や心拍等の生理的变化を模した五感刺激 (疑似身体感覚) を提示し, それを自己の生理的变化として知覚させ, 情動を惹起するアプローチにより, 情動を中心とする認知が変化することが報告されている [5].

著者らは, 静止型 VR において擬似身体感覚を提示した時, 自律神経系の働きによる生理的变化が自己に生じたとき錯覚させることができれば, 同じく自律神経系の働きから生じる疲労を知覚させることもできると考えた. しかし, 疑似身体感覚が疲労の知覚に及ぼす影響に関する知見はほぼ示されていない. 疲労や生理的变化が運動時以外にも生じることを考慮すると, 疲労を知覚させるために疑似身体感覚によって生理的变化が錯覚された時, その変化の原因が運動と認知される必要があるのかも不明である.

以上を踏まえ, 本稿では, 末梢性疲労, 中枢性疲労, 生理反応の変化等を統合して知覚される感覚を疲労感と定義する. そして本研究では, 疑似的に表現された運動と生理的变化が疲労感に及ぼす影響の基礎検証を目的として設定する.

## 2. 疑似運動感覚と疑似身体感覚が疲労感に及ぼす影響の検証実験

上記目的を達成する上で、本稿では、VR 環境において疑似運動感覚と疑似身体感覚を提示するシステムを構築した。また、本システムを用いて、疑似運動感覚と疑似身体感覚の提示の有無に基づいて疲労感に生じる違いを検証する実験を実施した。

### 2.1 実験システム

上記システムにおいて、疑似運動感覚は、HMD (Oculus rift) を通じて提示される VR 環境で、アバタの一人称視点で VR 空間の道路上を走る運動を想定した視界移動により疑似運動感覚の生起を図った。システムから提示される刺激以外の影響をできるだけ減らすため、Oculus rift のコントローラのジョイスティック操作による視界の前後移動により VR 空間の走動作を表現し、被験者の実際の運動がほぼ発生しない設計を行った。左コントローラは移動の操作に割り当て、スティックを前後に倒すと VR 空間内を前後に移動できた。スティックを最大限倒すと、一般的なランニングの速度である時速 8~9km となるように設定した。スティックを斜めに倒した場合には前後方向に倒れた量のみに対応する移動速度で前後に移動し、斜め方向への移動はできないように設定した。右コントローラは方向の操作に割り当て、スティックを左右に倒すと身体の向きを変更できた。左右ともスティックの倒す量により移動や回転の速さを調整できた。走動作中に被験者が頭部の向きを変えた場合は、進行方向とは別の方向を見ながら走ることができた。酔いを避けるため、走動作に伴う視点の上下移動は行わなかった。

走動作時は前後に腕を振る動作をアバタに付加した。また、アバタの足が地面に着地したタイミングで足音を提示した。足音の不自然さや冗長さを減らすため、足音の高さや大きさはランダムに変化させて再生した。身体の外見的特徴によって被験者の運動感覚や身体感覚の評価にできるだけ差が生じないよう、中性的で特徴が少ない外見のアバタを利用した。

疑似身体感覚は、呼吸音と触覚刺激を用いた疑似心拍を提示した。呼吸と心拍は、運動時に生じる生理的変化として多くの人が想像可能であり、かつ情動インタフェースに関する先行研究において情動への影響が確認されている生理的変化である[5]ことから、本実験で採用した。

呼吸音は、実験者である 20 代男性が息が上がった状態の呼吸を実演した時の音声を録音し、音量制御により呼吸の激しさの違いを表現した。疑似心拍に関しては、3名の被験者が参加した予備実験を通じ、聴覚刺激(心音)よりも触覚刺激(振動刺激)を用いて表現した疑似心拍がより疲労感に作用することが予想された。そのため本実験では、スピーカ (Vibro-Tranceducer Vp604) を通じて胸部に提示した振動刺激のテンポ制御により心拍変化を表現する方法を用いた。胸部への疑似心拍提示は、スピーカを入れたポーチを被験者の首にかけてもらい、その高さが胸の位置



図 1: 疑似心拍提示に用いるスピーカを装着した様子

に来よう調節することで実現した(図 1)。また刺激提示の確実性を担保するため、ポーチの紐を身体に回して留めてもらい、スピーカが胸の位置に密着するようにした。呼吸音と疑似心拍の刺激パラメータ設計は次節で後述する。

### 2.2 実験設計

本実験では、着座状態で HMD を装着した被験者にアバタの一人称視点で 2.1 で述べたシステムを体験するタスクを行わせた。タスクの条件は、視覚条件 (R0: 非運動映像, R1: 走動作映像)、呼吸音条件 (B0: 提示なし, B1: 提示あり)、心拍条件 (H0: 提示なし, H1: 提示あり) のそれぞれ 2 種類の組合せ計 8 条件とした。R0 条件では VR 環境内の視界もアバタも動かない非運動状態が提示され、R1 条件では、被験者にコントローラ操作によるバーチャルな走動作を行わせた。B0 および B1 条件では、それぞれ呼吸音と疑似心拍は提示されなかった。B1 および H1 条件では、呼吸音と疑似心拍のそれぞれを提示し、いずれも走る速度ではなく時間的推移に応じて刺激パラメータを線形に変化させた。呼吸音は音量ゼロから開始し、最終的に実験者自身が不快感を感じないと判断した音量まで上昇させた。疑似心拍は 70[bpm] から開始し、最終的に 120[bpm] まで変化させた。タスクは一試行につき 4 分間実施した。

表 1: 疲労感と身体・運動の感覚に関するアンケート

No.	質問項目	評価対象
Q1	運動時のような疲労感を感じた	疲労感
Q2	自分の呼吸が乱れているように感じた	呼吸知覚
Q3	自分の心拍が上昇しているように感じた	心拍知覚
Q4	体温が上昇したように感じた	体温知覚
Q5	自分が実際に走っているように感じた	運動感覚
Q6	自分の身体が前に進んでいるように感じた	前進感覚
Q7	運動時のような身体活動の変化があったかのように感じた	身体感覚
Q8	自分の身体感覚が視覚情報と一致していた	身体感覚の一致性

一試行ごとに、アンケート（表 1）と実験者の実際の呼吸および心拍数の計測を併用し、疲労感と身体・運動感覚に生じる影響を評価した。アンケートは、7段階リッカート尺度（1：全く～ない、4：どちらでもない、7：非常に～である）を用いて被験者に評価させた。また、アバタを自己の身体と感じられるかどうかや、酔いも疲労感に影響すると予想し、先行研究で使用された指標を用いて、身体所有感[6]、運動主体感[6]、酔い[7]についても評価させた。呼吸と心拍数は、PZT 呼吸センサと ECG 心電位センサ（いずれも biosignalsplux, 株式会社クレアクト）を用いて計測した。PZT 呼吸センサは呼吸によって腹囲が変化することを利用し、腹部から受ける圧力の違いによって呼吸サイクルを計測する。ECG センサは心電図の波形を計測するものであり、本実験ではこの波形から心拍数を抽出した。

### 2.3 実験手順

まず、被験者にスピーカと生体センサを装着してもらい、コントローラの操作練習をしてもらった後、上述の実験システムを用いたタスクを実行してもらった（図 2）。各タスク後は、表 1 のアンケートに回答してもらった。タスクは一試行につき先述の 8 条件のうちいずれかを適用し、各試行の間は最低 2 分間の休憩インターバルを挟んだ。順序効果を相殺するため、適用する条件順はランダムに設定した。全条件終了後は、実験の感想について自由記述アンケートに回答してもらった。

本実験は被験者内計画で実施し、男性 15 人（22～26 歳）が被験者として参加した。

### 2.4 結果

本稿では、分量上、疲労感（Q1）と運動感覚（Q5）に生じた影響の議論を通じて提示した疑似運動感覚および疑似身体感覚が疲労感に及ぼす効果を主な議論対象とし、結果についてもこれらの 2 項目についてのみ記載する。

被験者 15 人中データ不備が生じた 1 名を除く 14 名のデータをもとに、視覚条件、呼吸音条件、疑似心拍条件を要因として、疲労感（Q1）の評価値に対する 3 要因分散分析を実施したところ、3 要因全ての主効果が有意であった（視覚条件： $F(1, 13) = 9.69, p < .01$ 。呼吸音： $F(1, 13) = 11.0, p < .01$ 。心拍刺激： $F(1, 13) = 42.8, p < .001$ ）。各要因間の一次交互作用、二次交互作用はともに非有意であった。



図 2: 実験の様子および被験者の一人称視点

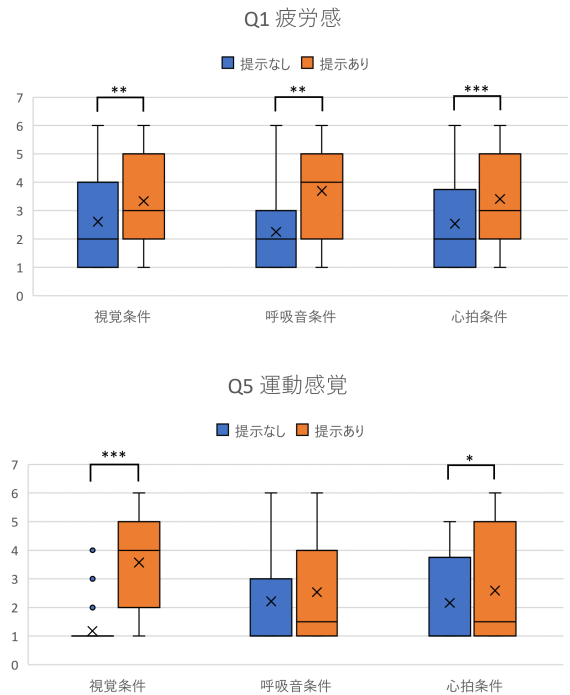


図 3: 要因ごとのアンケート評価結果

（上：疲労感（Q1），下：運動感覚（Q5））

ノッチあり箱ひげ図は、箱の仕切り線が中央値、箱の上下が第一四分位点と第三四分位点、上下線が最小・最大値、×印が平均値を示す。

運動感覚（Q5）の評価に対しては、同様の三要因分散分析を行ったところ、視覚条件（ $F(1, 13) = 60.1, p < .001$ ）と疑似心拍条件（ $F(1, 13) = 5.20, p < .05$ ）の主効果が有意であった。一次交互作用は全要因の組合せ間で非有意であったが、二次交互作用が有意であり、単純主効果検定の結果、視覚条件あり呼吸音提示なし条件（R1B0）において心拍提示（ $F(1, 13) = 13.2, p < .01$ ）の単純主効果が有意であった。

疲労感と運動感覚の要因ごとの評価結果を図 3 に示す。3 要因 2 水準の分散分析のため、各要因の主効果の有意性は各要因の 2 水準間の評価値の差の有意性を意味する。

### 2.5 考察

疲労感（Q1）の評価に対し、視覚条件、呼吸音条件、疑似心拍条件の全要因が有意であったことは、疑似運動感覚と疑似身体感覚の双方が疲労感に作用したことを示す。しかし、全要因間に交互作用が認められなかったことから、各要因はそれぞれ独立して疲労感に作用していたことが分かる。視覚情報、呼吸音、疑似心拍は、それぞれ提示しない条件より提示する条件で評価値が有意に高くなった。したがって、疑似運動感覚と疑似身体感覚はいずれも疲労感を知覚させる効果を有していたと言える。自由記述アンケートにおいても、H1 条件下で 3 名の被験者が疲労感を感じたと回答し、うち 1 名は呼吸音、他の 1 名は疑似心拍によってより疲労感を感じたと回答していた。

一方、運動感覚（Q5）の評価に対しては、視覚条件、呼吸音条件、疑似心拍条件の全ての要因間に二次交互作用が

認められ、疑似運動感覚と疑似身体感覚は運動感覚に対して相互に作用したことが示された、図3下より、中央値の値を見ると視界の変化が運動感覚に最も寄与したと考えられるが、運動時のような視界だけでなく疑似身体感覚を提示することで運動感覚が相乗的に向上する可能性を示す。ただし、主効果が認められたのは視覚条件と疑似心拍条件のみであり、いずれも提示しない条件に比べて提示する条件で評価値が高くなった。呼吸音を提示せず疑似心拍を提示したRIB0水準下で視覚条件の単純主効果が有意であったことから、呼吸音は運動感覚を知覚させる上で視覚と疑似心拍の作用を阻害する要因となった恐れがある。

疲労感と運動感覚の評価結果を統合すると、静止型VRにおいて疑似身体感覚を提示した場合、運動感覚を向上するとともに疲労感を知覚させられる可能性が示された。しかしながら、提示された疑似身体感覚によって疲労感と運動感覚のそれぞれはあくまでも個別に変化し、運動感覚の変化に起因して疲労感が増したわけではないと推察される。疲労感に対する各要因の影響に関して、自由記述アンケートでは、1名の被験者から運動し終わった後のような疲労感を感じたと回答があったが、2名の被験者は運動の疲労感ではないような疲労感を感じたと回答した。以上の結果と被験者の回答から、本実験では疑似身体感覚によって錯覚された生理的变化の原因がVR空間での走動作あるいは走動作の感覚（運動感覚）に帰属された結果として疲労感が増したとは考えにくい。

著者らは、知覚された疲労感が決して強くない点と併せて、疲労感を伴うような運動を行った感覚が弱かったことに起因して、疲労感と運動感覚に関連がないと判断されたのではないかと予想している。要因ごとの評価（図3）において、疲労感と運動感覚のいずれも中央値は5以下であり、高い値とは言いがたい。この評価の理由として、疑似運動感覚と疑似身体感覚の刺激パラメータおよび提示方法が挙げられる。

疑似運動感覚については、本実験では簡易的に視覚情報のみを用いて走動作を表現したが、例えばより速い速度での走動作を知覚させるように視覚情報を変化させたり、触力覚等を利用して運動感覚を生成する手法を用いた場合は疲労感への影響が異なることも予想される。疑似身体感覚については、先に述べたように、呼吸音が運動感覚に対する視覚情報および疑似心拍の効果を阻害した恐れがある。また、自由記述アンケートでは、始めのうちは少し違和感があったと2名の被験者が回答した他、呼吸音や心拍刺激が自分のものとして認識されなかったという回答があった。全体として呼吸音と心拍刺激が提示された場合であっても、疲労感にはつながらなかったと回答した被験者も1名いた。B1およびH1条件では、タスク開始時の呼吸音と疑似心拍のテンポは実験者が設定した。そのため必ずしも被験者の実際の呼吸や心拍と一致せず、違和感が引き起こされたことで生理的变化を錯覚させる効果が弱化した可能性がある。この点については、タスク

開始時は被験者の実際の呼吸の強さや心拍に合わせて呼吸音や疑似心拍のテンポを調節し、徐々に運動時に近いテンポに変化させる等の刺激パラメータの再検討により、解決を図れると考えている。

### 3. おわりに

本稿では、視覚情報を用いて提示した疑似運動感覚と、疑似身体感覚（呼吸音および振動刺激を用いて生成した疑似心拍）が疲労感に及ぼす影響を検証した。被験者実験を通じ、疑似運動感覚、呼吸音、疑似心拍はいずれも独立で疲労感に作用することを示した。また、疑似運動感覚と疑似身体感覚は相互に運動感覚に作用することが示された、ただし、本実験で用いた呼吸音は運動感覚を生起する上で視覚と疑似心拍の作用を阻害した恐れがあることが確認された。また、疑似運動感覚と疑似身体感覚はそれぞれ疲労感と疑似身体感覚によって錯覚された生理的变化が運動感覚に帰属されて疲労感が知覚された訳ではない可能性も示された。

運動感覚と関連してより強い疲労感を知覚させる上で、提示刺激がユーザ自身の生理的变化であると知覚されやすくなるように疑似身体感覚の提示方法を改善する必要も示された。今後は、疑似身体感覚の刺激パラメータおよび提示方法の再検討に加え、今回採用した疑似身体感覚以外にも疲労感を知覚させる新たなアプローチを検討し、その効果を検証していく。

### 参考文献

- [1] 渡辺恭良: 疲労の科学・脳科学と抗疲労製品の開発, Japanese Journal of Biological Psychiatry, Vol.24, No.4, pp.200-210, 2013.
- [2] Pérez, I. M., et al.: Central and Peripheral Fatigue in Recreational Trail Runners: A Pilot Study. International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol.20, No.1, p.402, 2022.
- [3] Schachter, S. and Singer, J.: Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state, Psychological Review, Vol.69, No.5, pp.379-399, 1962.
- [4] Valins, S. Cognitive effects of false heart-rate feedback. Journal of Personality and Social Psychology, Vol.4, No.4, pp.400-408, 1966.
- [5] 櫻井翔: クロスモーダル知覚を応用した情動インタフェース, 映像情報メディア学会誌, Vol.72, No.1, pp.17-21, 2018年.
- [6] Roth, D. and Latoschik, M. E.: Construction of the Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ), In IEEE TVCG, Vol.26, No.12, pp.3546-3556, 2020.
- [7] Kennedy, R. S., et al.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. The International Journal of Aviation Psychology. Vol.3, No.3, pp.203-220, 1993.