

氏 名 佐野 祐士

学位の種類 博士 (人間情報学)

学位記番号 博甲 第 9616 号

学位授与年月 令和2年3月25日

学位授与の要件 学位規則 第4条第1項該当 (昭和28年4月1日文部省令第9号)

審査組織 グローバル教育院

学位論文題目 温熱快適性向上と視覚刺激を用いる作業負荷の低減による
運動時パフォーマンス向上に関する研究

	(大学名 職名)	(学位)	(氏名)
主査	筑波大学 教授	工学博士	水谷 孝一
副査	筑波大学 准教授	博士 (工 学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 助 教	博士 (工 学)	善 甫 啓 一
副査	筑波大学 教 授	博士 (心理学)	綾 部 早 穂
副査	筑波大学 教 授	博士 (感性科学)	山 中 敏 正

論文の要旨

本論文は、スポーツやトレーニング等の運動において、実施者のモチベーション向上を目指し、温熱快適性の向上と視覚・触覚刺激提示による知覚拡張の両面によるアプローチから、運動時パフォーマンス向上システムを提案している。当該システムの実現のため、温熱快適性の計測技術および視覚・触覚刺激システムの開発と実用性評価を実施しており、生体計測分野とスポーツ分野を始めとする人間情報学に関する分野において有効な成果と言える。

【第1章】では、人とスポーツとの関わり等研究の背景を概説するとともに、運動時パフォーマンスに与える温熱快適性と作業負荷の影響等、研究の必要性が示されている。また、本論文で提案する運動時パフォーマンス向上システムの実現において、温熱快適性の計測技術および作業負荷の低減手法が課題であることが示されている。あわせて、先行研究の参照により、研究における課題も簡潔に示されている。

【第2章】では、温熱環境に起因する身体的作業負荷が運動時パフォーマンスを低下させる点に着目し、温熱環境を適切にコントロールすることで運動時パフォーマンスを向上させるシステムが提案されている。まず、個人別に快適性評価が可能である温熱指標 **Predicted Mean Vote (PMV)** の算出方法が示されており、身体的作業負荷を軽減するために **PMV** を利用した温熱環境管理システムが提案されている。本システムの実現においては、**PMV** のパラメータである着衣量と代謝量の計測手法において、運動時に適用可能な手法がない点が課題であり、低拘束な生体計測手法の確立が必要である。従って、本章では、着衣量計測においてサーモグラフィを用いる着衣下体表面温度手法を、代謝量計測においてベルト型胸囲変化計測デバイスを用いる肺気量推定手法をそれぞれ提案するとともに、実験を通じてその実現可能性を明らかにしている。

着衣量計測においては、従来手法の課題となっていた自己申告制による非即時性と主観評価によ

る誤差を解決するため、客観的な計測手法の一つとしてサーモグラフィーによる熱画像を利用し、着衣下体表面温度推定から着衣量を導出する手法が提案されている。サーモグラフィーから得られる熱画像には着衣量の定義である熱抵抗値の情報は含まれていないため、衣服表面温度および着衣下体表面温度から熱抵抗値を求める必要があり、これに対し本論文では、サーモグラフィーで得られた露出体表面温度と着衣下の体表面温度の相関を仮定し、非接触な着衣量推定手法の一例を実現している。実験では、前述の仮定を検証するために、15人の実験協力者に対して頭部・頸部・腕部・手部の露出体表面4点、腹部・胸部の着衣下体表面2点の合計6点について、それぞれサーモグラフィとIC温度センサーを用いて計測している。その結果、頸部と胸部、腕部と腹部の表面温度にそれぞれ相関が存在し、計測データから得られた着衣下体表面温度推定直線の平均誤差が0.4℃未満であり、提案法により十分な精度が得られるとの結論が得られている。また、胸部と腹部にも内部相関が見られ、露出体表面が少ない場合でも推定できることが示された。

代謝量計測においては、運動種目別既定値の利用による計測誤差、もしくは呼気計測マスクを利用する拘束感の強い計測であることが課題となっており、これを解決するためにベルト型胸囲変化計測デバイスが提案されている。本論文で提案されているデバイスは、一定運動強度以下において代謝量の計算元となる酸素消費量と肺気量が比例することに着目し、低拘束に肺気量を計測するためにマスク型ではなくベルト型デバイスとして開発されたものである。実験では、10人の実験協力者に対して胸式呼吸時の肺気量と胸囲変化を3回の呼吸に渡って計測した。呼吸開始点・呼吸終了点・中間点の3点において、肺気量と胸囲変化は実験協力者内で1次線形近似によく当てはまることが示され、その推定平均誤差は6.5%である。本実験においては少数回の呼吸を計測対象としたため、急激な変化が少ない代謝量においては持続的な計測により計測誤差をさらに減少させることができ、提案法により十分な代謝量推定精度が得られるとしている。従って、一定運動強度以下においては、低拘束な肺気量計測から代謝量を推定する技術を確認したと結論付けている。

以上の結果から、温熱環境に起因する身体的作業負荷を軽減させ、運動時パフォーマンスを向上させる温熱環境管理システムの実現に必要な技術である、着衣量・代謝量計測技術を確認したと結論付けている。

【第3章】では、視覚・触覚刺激提示による知覚拡張の側面から課題解決を図っている。著者は、初心者のパフォーマンスの低さが、スポーツへの参加に対する心理的障壁になっていると考え、参加のモチベーションを向上させるために、作業負荷の低減によるスポーツにおける一時的なパフォーマンス向上を実現するシステムを開発している。上級者のような、ボールの弾道予測や背後のプレイヤーの位置予測が可能となるよう、視覚刺激による知覚拡張システムが実装されている。提案システムは、筑波大学の「エンパワースタジオ」という実験施設内のLargeSpace（体育館程度の大きさ）に実装され、22個のモーションキャプチャと4個のプロジェクターを利用した大規模ARスポーツ環境を実現している。モーションキャプチャによる位置計測からプロジェクターへの表示までのレイテンシはおよそ50msである。

まず、弾道予測線の視覚的表示によるパフォーマンス向上について検証されている。弾道予測線はモーションキャプチャから得られたボールの位置と速度から計算されており、速度に比例して予測線が伸びるなど、視覚的に複数の情報を提示可能となっている。サッカーのパスを模した実験において、8名の実験協力者の左右にボールを蹴り出した際の反応速度を1条件当たり20回計測し、弾道予測線の有無と、正面・注視方向外からのパスの計4条件で80回計測を実施した。注視方向外からのパスをするにあたっては、実験者3名が予備実験を実施し、十分に視認しづらい条件が設定されている。その結果、弾道予測線により反応速度が平均で88msが短縮され、注視方向外においても同様に反応速度が短縮することが明らかにされた。反応時間を最初に一步踏み出すまでの時間と定義しており、初心者のパスに対する反応時間のうち、ボールの方向を認識してから身体が一步踏み出すまでの運動系の反応時間には影響を与えないが、ボールの方向の認識にかかる時間が短縮され、88msの反応時間短縮につながったと考察している。以上より、ボールのパスにおける反応速度のパフォーマンスが向上したと結論付けている。

次に、視覚刺激提示に加えて触覚刺激提示が可能なベルト型振動デバイスを実装し、視野外の位置情報提示における有効性が検証されている。視覚刺激提示は相手プレイヤー2名を繋ぐように線をフロアに投影することで、視覚刺激提示は後方相手プレイヤーの位置を3方向の分解能でベルトに装着されたバイブレーターの振動により、それぞれ視野外の相手プレイヤーの位置を提示している。実験では、18名の実験協力者を3人1組に振り分け、パスをしあう2名とパスカットをする1名の役割をローテーションさせながら、視覚・触覚刺激のそれぞれの有無について4条件を各20回実施した。その結果、視覚・触覚刺激提示はともにパスカットにおけるパフォーマンスを向上させ、作業負荷を低減させたが、情報が重複した刺激提示は作業負荷を逆に向上させる可能性があるとの結論付けている。

以上の知覚拡張によるパフォーマンス向上についての検討から、提案された視覚・触覚刺激提示により、ボールのパスにおける反応速度のパフォーマンスと、パスカットにおけるパフォーマンスの向上が認められたと結論付けている。

【第4章】では、本研究の総括がなされており、第2章で論じられた温熱環境管理システムと、第3章で論じられた視触覚刺激システムの統合により、これまでパフォーマンスとモチベーションの低下を招いていた熱ストレスをコントロールする事によって、初心者でも、上級者のような知覚拡張を得てさらなるパフォーマンスを発揮できることを通じて、モチベーション向上できる環境を実現できると結論付けている。

審査の要旨

【批評】

本論文は、運動時パフォーマンスに対する作業負荷の影響において、温熱環境と知覚拡張の両側面に着目し、温熱指標を利用した快適性向上と視触覚刺激提示による作業負荷低減により運動時パフォーマンスを向上させる試みに関するものである。

まず、温熱環境に起因する身体的作業負荷の軽減を目的として、個人ごとの快適性評価が可能であるPMVの利用する温熱環境コントロールシステムを提案している。PMVの利用に必要なパラメータである着衣量と代謝量の計測手法において、従来手法では運動時の温熱環境管理に適していないことを指摘し、新たにサーモグラフィを用いる非接触な着衣量推定手法と、ベルト型肺気量推定デバイスを用いる代謝量推定手法が提案されている。これまで両パラメータは、拘束感が強く即時性に乏しい計測手法で運用されていたなか、本論文ではサーモグラフィによる非接触計測や、ベルト型計測デバイスの開発による低拘束な計測を実現している点で独創的であり、また目的としている温熱環境管理システムにおけるリアルタイム計測が可能であり、実用的で有効である。本論文では、まず着衣量計測についての検討として、サーモグラフィを用いる着衣量推定手法の実現可能性について検証実験を行い、露出体表面温度と着衣下体表面温度に相関があることを明らかにし、着衣量が十分な精度で推定可能であることを示している。次に代謝量計測については、ベルト型デバイスによる胸囲変化計測実験から、低拘束に肺気量が計測可能であることを明らかにした。これらの新しく提案された計測手法により、これまで建築設計における事前評価などでの利用に限られていたPMVが、本論文で扱う運動時パフォーマンス向上へと応用された点は評価に値する。さらに、オフィスでの快適性向上や介護における見守り技術にも応用可能としており、関連分野への波及も期待される。

次に、知覚拡張による作業負荷の低減とパフォーマンス向上の実現においては、上級者プレイヤーの知覚を初心者プレイヤーに知覚させるという独創的な視点から、視覚・触覚刺激提示システムが提案され、大規模ARスポーツ環境として構築された。球技におけるボールの弾道予測線提示システムでは、サッカーにおけるパスを受けるシチュエーションを模した実験において反応速度が短縮されることを明らかにした。さらに視野外においても、同様の反応速度短縮効果が見られることを明らかにしており、多様な場面で提案システムが有効であることを示した。ベルト型振動提示デバイスを複合させた視触覚刺激提示システムでは、サッカーにおけるパスカットを模した実験において、パフォーマンスと作業負荷の2要素から評価を行い、視触覚刺激提示のパフォーマンス向上効果を明らかにした。また、NASA-TLXの6項目の評価から、視触覚刺激提示システムが作業負荷に与える影響を明らかにしており、視触覚刺激提示のシステムデザインに貢献している。この結果は、本論文で扱ったサッカーにおける貢献のみにとどまらず、様々な分野のスポーツに適用できる可能性を示している。以上の結果から、提案された視触覚刺激システムがパスやパスカットといったシーンにおいてパフォーマンスを向上させ、作業負荷を軽減させる要因を明らかにしており、超人スポーツやスポーツ心理学などの分野にも影響力のある結果であると言える。

本論文では、運動時パフォーマンスに対する作業負荷の影響において、温熱環境の計測・管理と知覚拡張という複合的なアプローチがなされている。これは、エンパワーメント情報学プログラムの柱の一つである「分野横断的な研究成果」であるとともに、同プログラムで扱う3要素の一つである「人と協調するシステム」に関する研究成果であり、エンパワーメント情報学プログラムの教育・研究理念を満たしており、評価できる。

【最終試験の結果】

令和2年1月28日、専門委員会において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（人間情報学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。