

疲労蓄積状態の認知と回復行動を促進する フィードバック手法の提案

山越孝平[†] 富田智晶[†] 赤津裕子[†] 片桐一浩[†]

概要：世界では多くの労働者が筋骨格系の症状を抱えており、特に製造業ではその発生件数が顕著で、企業にとって重要な課題である。先行研究では、作業者の姿勢から身体負荷を評価する手法が提案されているが、それを具体的な回復行動に結びつけるまでの取り組みは十分に進められていない。本研究では、作業者がリアルタイムで疲労蓄積状態を認知し、それに基づき休息行動を促進させるためのフィードバック手法を提案する。提案手法により、疲労蓄積状態を認知し、その状態に基づく回復行動を促進することで、労働者の軽労化に貢献できることを期待する。

1. はじめに

世界では、およそ 17 億 1000 万人が何らかの筋骨格系の症状を抱えていることが報告されている[1]。業種別に見ると、特に製造業において筋骨格系症状の発生件数が多く、大きな課題となっている[2]。このような健康被害の発生、生産性への影響、経済的損失が顕在化する中、安全で持続可能な職場環境の創出に取り組む必要がある[3][4]。

さらに、多品種少量生産の増加や少子高齢化の進展により、作業が複雑化された職場環境に多くの高齢労働者が参入することが予測される。こうした状況に対応した職場環境の整備は必要であり、作業環境や作業姿勢が身体に与える負荷を認識し、身体負荷がかかることによる筋骨格系症状の発生リスクを最小限に抑えるように設計するためには人間工学評価が重要である[4]。特に作業中の身体負荷を評価する指標が効果的だと考えられる。

上肢の作業姿勢にかかる身体負荷の要因として、動作回数の多い作業、持続的に筋力を使用する作業、強制的な姿勢を伴う作業、および一定時間の休息なしで行われる作業があることが報告されている[3]。さらに、仕事中に怪我を経験した労働者の 88%が、休息を取らずに作業を続けている現状が指摘されている[4]。このような行動は、筋骨格系症状の悪化を招く恐れがあるため是正が必要である。

「休息を取らずに作業を続ける」行為をヒューマンエラーの一種として捉えた場合、作業者の認知や判断、行動のプロセスにおいて誤りが生じている可能性がある[5]。この行為が発生した理由を考えると、作業者が自身の疲労蓄積状態を十分に認知できていないことが示唆される。さらに、疲労を認知していたとしても、知識がないため適切な回復行動をとれない、あるいはその行動を行わない可能性も指摘できる。

以上を踏まえ、疲労の蓄積が確認された時点で作業者が自身の疲労蓄積状態を認知し、その状態に基づく回復行動

を促進するフィードバック手法を提案することで、筋骨格系症状の発生件数を低減させて労働者の軽労化に貢献することを目指す。

本稿では、疲労蓄積状態を可視化する認知フィードバックと休息行動を促進する行動フィードバック手法を提案する。

2. 先行研究

2.1 身体負荷の評価方法

従来の身体負荷を評価する内容の研究では、Kinect 等の骨格推定センサーを活用し、McAtamney ら[6]によって開発された迅速上肢評価法（RULA：Rapid Upper Limb Assessment）を用いた身体負荷の評価技術が提案されている[3][4]。しかし、その中では身体負荷を評価したデータを実際の作業環境でどのように活用するかについては、十分に議論がなされていない。近年では、計測した身体情報を作業者にディスプレイ等を用いて提示するシステムが発表されている[7]。ただし、1 節で説明したように、状態を認知できても知識がないため適切な回復行動をとれない、あるいはその行動を行わない可能性が考えられる。つまり、蓄積した疲労を回復する具体的な行動を促進する手法や、その行動が実施されたかどうかを判定する手法については、十分に研究が進められていない状況である。

2.2 作業中の休息

休養は、その長さによって休憩や休息に分類される。本稿では、休憩は数十分程度であり、休息は数十秒程度の休養を示す。製造現場においては、昼休憩を除き、10 分程度の一斉休憩が設けられていることが多い。しかし、そのタイミングを個人に合わせて調整することは全体の作業に支障を及ぼす場合がある。休息については、我々が自社の製造業務関係者に対して行ったヒアリング結果によると、従業員各自の判断でとることが望ましいとされているが、実際はあまりとられていないことが多い。

[†] 沖電気工業株式会社 技術本部 研究開発センター
プラットフォーム研究開発部

休息は、静かに休む消極的休息と、軽微な運動をする積極的休息に分けることができる。先行研究では、座位姿勢の動きの少ない作業において、積極的休息をとることが疲労の回復や集中力の維持に効果的であることが報告されている[8][9]。また、積極的休息の中でも特定箇所へのほぐし運動を要素に含めることで、さらに効果が発揮されると述べられている。

以上を踏まえて、休息中に関節を動かし筋肉を伸ばすことで柔軟性の向上を図り、現在の疲労感の軽減と今後の身体負担の低減につなげることを目的に、ストレッチ行動を促すフィードバックを提示することとした。

3. 提案手法

3.1 システムの構成

本稿で紹介するシステムは、製造現場で利用されることを想定しており、作業者の身体負担をリアルタイムで評価し、その結果に基づいてタッチパネルディスプレイ（以下タッチパネル）を通じて疲労蓄積状態を提示し、その状態に基づき回復行動を促進することを目指している。このシステムは、主に3つの要素から構成されている。

- 計測プログラム

計測プログラムは、センサーから関節点のデータを取得する。このデータを基に、ベクトル内積やクォータニオンの計算を行い、関節角度と RULA スコアを算出する。データは取得フレームごとに更新する。

- 骨格センサー

骨格センサーは、計測プログラムの指示を受けて作業者の関節点を正確に計測する役割を果たす。迅速にデータを収集することで、リアルタイムで身体負担を評価することを可能にしている。

- タッチパネル

タッチパネルは、作業者に情報を視覚的に提示するインターフェースである。計測プログラムの結果に応じて、疲労蓄積状態や、ストレッチが実施されたことを表示する。このタッチパネルを通して、作業者にリアルタイムでの疲労蓄積状態の認知と、それに基づく休息行動を促進するフィードバックを提示する。

3.2 身体負担の評価方法

製造現場において作業姿勢を計測する機器に求められる条件は、機器自体が作業者に身体的負担を与えないこと、設置に多くのスペースを必要としないこと、そして誤った評価により身体負担リスクの見逃しが発生しないよう最低限の人間工学評価基準を満たしていることである。先行研究によれば、作業者の身体に直接センサーを装着してデータを収集する方法は、装置の装着が不快感を引き起こし、姿勢や行動に影響を与える可能性があることが報告されている[10]。したがって、非接触計測のほうがより適切であると考えられる。Microsoft 社の Kinect for Xbox360 は、Vicon

社の光学式のモーションキャプチャシステムである Vicon と比較しても高精度であることが示されており、職場でのモーショントラッキングと最低限の人間工学評価を満足できる精度を有していると考えられる[4]。本研究では、Azure Kinect DK (Microsoft) の後継機として設計され、仕様に大きな変更がない Femto Bolt (ORBEC 社製) を用いて作業姿勢の計測を行う[11]。

身体負担の評価指標として、2 節で紹介した先行研究を基に RULA を用いる。RULA は、生産ラインの組立作業など定常作業や機器メンテナンスといった非定常作業の評価に広く使用されている。評価手順では、上肢や体幹を部位ごとに評価し、その結果を総合スコアとして集約する。この総合スコアは、作業全体のリスク評価の基準となり、アクションレベルを判定する際に用いられる。アクションレベルは作業のリスク度合いを示す指標であり、総合スコアに応じて4段階に分類される[12]。

本研究では、製造業の組立作業を想定していることから日本の工場の作業姿勢として標準的な、立位姿勢を対象とした。また、センサーが高精度で検出でき、製造業での筋骨格系症状の発生リスクの高い部位として、首、腰(体幹)、肩(上腕)、腕(前腕)を評価対象とした。肩と肘は作業者の利き手側に設定した。これは、利き手側が非利き手側よりも作業中の使用頻度が高く窮屈な姿勢を強いられることで疲労しやすいという特性に基づいている。骨格推定技術を用いて瞬時の作業姿勢を評価することに焦点を当てているため、RULA 評価の総合スコアの算出に必要な保持姿勢や反復作業に関連する筋使用スコア、および対象物の荷重スコアは扱わない。さらに、瞬間的な身体負担の蓄積を肉体的疲労として扱うため、各評価部位の RULA スコアを累積して、部位別の疲労蓄積状態を算出している。この累積点を指標とすることにより、疲労蓄積状態を定量的に評価することを試みている。

3.3 認知フィードバック

認知フィードバックは、作業者の身体負担を視覚的に理解できるようにするためのシステムの要素である。具体的には、タッチパネル上に人型 UI (User Interface) を表示し、特定の身体部位における疲労蓄積度合いを、三段階の表示色を用いてフィードバックする手法を提案する。疲労蓄積度は、緑色、黄色、赤色の三段階の色によって示される。緑色は初期状態を、黄色は中程度の疲労を、赤色は高程度の累積疲労を示す。この色の配色は、日本産業規格 (JIS Z 9103) の JIS 安全色[13]を参考に決定し、信号灯の意味合いになぞらえたもので、緑色は安全、黄色は注意、赤色は危険を表現している。色は、RULA 評定値の累積が所定の閾値を超えた時に瞬時に切り替わる。

初期画面(図1)では、人型 UI とともに「休息開始」ボタンが表示されている。高程度の累積疲労を示す赤色となった部位が1つでも表示されている場合、アラート音と

もにタッチパネルに通知される。このアラート音は、作業者が作業に集中している状況では、視覚情報のみだと通知に気付かない場合があるため、聴覚刺激を提示することで視覚情報へ誘導する目的で導入した。アラート音による通知後、作業者が「休息開始」ボタンをタッチすることで画面が遷移し、指定された休息時間のカウントダウンが表示される。休息時間が終了し、0秒に達した際には、アラート音とともに再び作業を始めるよう指示するメッセージが表示され、システムは自動的に初期状態へと戻る。

このようなフィードバックにより、作業者が自らの疲労蓄積状態の変化を迅速に認知し、適切なタイミングでの休息行動を促すことが期待される。

3.4 行動フィードバック

行動フィードバックは、作業者が疲労蓄積状態を回復する行動をとるように促すためのものである。つまり、認知フィードバックにより身体状態を把握した作業者が、さらに具体的な回復行動をとることを期待している。

初期画面（図1）は認知フィードバックと同様であり、「休息開始」ボタンを押した際に「ストレッチ開始」ボタンが続いて表示される。この「ストレッチ開始」ボタンを押すことで、ストレッチ動画が再生される。動画は、各部位に対するストレッチ方法の一例を示すものである。

左側に疲労状態を示す人型UIを配置し、右側に各評価対象部位に対応するストレッチ動画を表示する画面デザインにしている（図2）。作業者が指示された部位に対してストレッチを実施し、指示された部位に一定の動きが確認された場合にストレッチ完了メッセージと軽やかな電子音が提示される。ストレッチを行ったことが判定されると、画面は次の部位に対応するストレッチ動画へと自動的に遷移する。全ての箇所へのストレッチが完了すると、完了メッセージと効果音が提示され、作業に戻るよう促すメッセージが表示され、初期画面へと戻る。

ストレッチ完了時に効果音を提示する理由は、作業者がストレッチ中に画面の視野から外れた場合でもストレッチの完了通知に気付けるようにするため、さらには回復行動を取ったことでの達成感を高めることにある。なお、休息中に「ストレッチ開始」ボタンが押されない場合や、ストレッチが行われない場合でも、すべての作業者が平等に休息時間を確保できるように、所定の休息時間が経過するとシステムは初期画面に戻る仕様となっている。

このように、ストレッチ動画を提示することにより、作業者が疲労蓄積箇所に対して回復行動をとるようになることを期待している。

4. システムの効果検証

今後、フィードバックシステムの効果を検証する予定である。実験計画について説明する。

実験目的は、3節で説明した認知フィードバックと行動フ

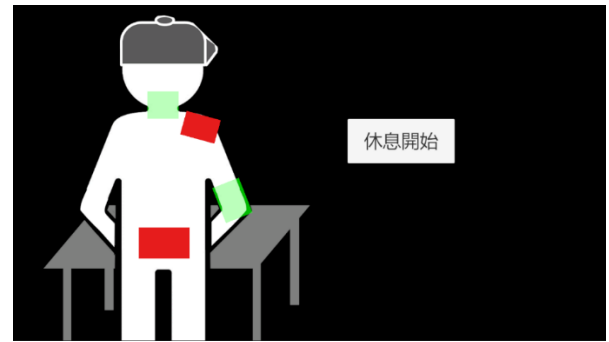


図1 認知フィードバックの初期画面

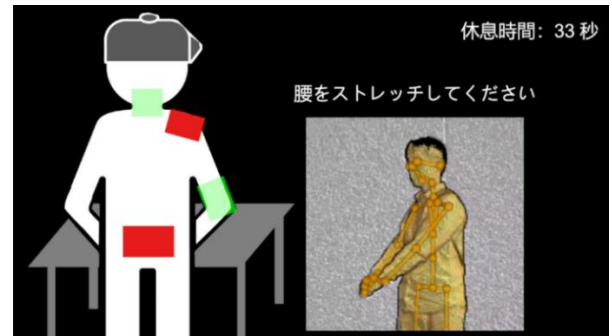


図2 行動フィードバックの画面デザイン

ィードバックが、作業者の休息行動や疲労の蓄積状態に与える影響を調査することである。

以下の3点を仮説としている。

仮説1：システムからの介入により、休息をとる回数が増加する。

仮説2：休息をとることへの理解が深まり、自主的に休息をとるようになる。

仮説3：作業前後で疲労の蓄積が抑制される。

実験タスクは著者らが事前に行った予備実験と先行研究[14]に基づき、レゴブックを用いた疲労の蓄積が大きかった非利き手側の部品箱上段からのピッキング作業と、作業面と肘高の間の距離を示す差尺[14]の大きい作業環境での押し込み作業を組み合わせた作業タスクを計画している。

5. おわりに

本稿では、作業者がリアルタイムで疲労蓄積状態を認知し、それに基づく回復行動を促進するフィードバック手法を提案した。今後は、4節で述べた効果検証を実施し、本提案手法の実際の効果の検証を行う予定である。また、今回は製造業を想定したが、オフィスワーカーのデスク作業でも筋骨格系の症状が発生していることが報告されている[15]。したがって、他の業界でも活用できる場面を模索し、汎用性のあるシステムとして発展させたいと考えている。

参考文献

- [1] “Musculoskeletal health”. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>, (参照 2024-12-12).
- [2] “業務上疾病発生状況等調査（令和5年） 第1表 業務上疾

病発生状況（業種別・疾病別）”。

https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_42739.html, (参照 2024-12-12).

- [3] Darius Nahavandi, M.. Skeleton-free RULA ergonomic assessment using Kinect sensors. Intelligent Decision Technologies, 2017, Vol. 11, pp. 275-284
- [4] H. Haggag, M.. Real Time Ergonomic Assessment for Assembly Operations Using Kinect. Proceedings of the 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim). 2013.
- [5] 石松一真. 思い込み, 勘違い, 注意不足はなぜ起こるのか? -人間の認知・行動の特性から医療安全を考える-. 日臨麻会誌, 2021, vol. 41, no. 7, pp. 656-662.
- [6] Lynn McAtamney, N.. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics, 1993, Vol.24, No.2, pp.91-99.
- [7] M. Al-Naser, T.. Quantifying Quality of Actions Using Wearable Sensor. Lecture Notes in Computer Science. 2020, pp.199-212
- [8] 中塚健太郎, 坂入洋右. 軽運動が監視作業時の覚醒水準と疲労の回復に及ぼす効果. スポーツ心理学研究, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 75-87.
- [9] 本多麻子. 積極的休息はパフォーマンスの向上と自覚疲労の回復を促進するのか. 白鷗大学教育学部論集, 2013, 7(1), pp. 215-230.
- [10] Plantard, P. Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. Applied Ergonomics, 2017, Vol. 65, pp. 562-569.
- [11] “ORBEC Femto Bolt “. <https://www.orbec.com/asia-pacific/femto-bolt-ad-japan/>, (参照 2024-12-13).
- [12] “Ergo4MFG-ものづくりのための人間工学 RULA_doc “. https://ergo4mfg.com/rula_doc, (参照 2024-12-12).
- [13] “jisc 日本産業標準調査会 JIS Z9103 図記号－安全色及び安全標識－安全色の色度座標の範囲及び測定方法 “. <https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISNumberNameSearchList?toGnrJISStandardDetailList>, (参照 2024-12-12).
- [14] 茂木伸之, 三澤哲夫, 肝村邦憲. 立位作業の作業面高に関する実験的研究. 日本人間工学会大会講演集, 2005, vol. 41, pp. 236-237.
- [15] “オフィスと健康<デスクワーク編> “. <https://www.kokuyo-furniture.co.jp/solution/mana-biz/2020/08/post-462.php>, (参照 2024-12-12).