

姿勢悪化状態の認知と休息行動を促進する AR 情報提示の提案

中澤尚哉[†] 山越孝平[†] 福島寛之[†] 赤津裕子[†] 片桐一浩[†]

概要：腰痛は世界的に深刻な健康問題であり、製造業においても多くの労働者が腰痛の症状を抱えており、企業は職場環境の整備が必要である。先行研究では、タブレット端末を用いた筋骨格系の疲労蓄積状態を可視化する情報提示方法が提案されているが、これはタブレット端末を設置する作業スペース確保やタブレット端末からの情報提示を見逃す恐れがある。本研究では、作業者が HMD を装着することで、身体情報を現実の作業空間と重ねて確認できる AR 情報提示を提案する。これにより視界の前方に身体情報が付加され、腰痛の発件数を低減または予防に貢献することが期待できる。

1. はじめに

腰痛は世界的に深刻な健康問題であり、2020 年には世界で 6 億 1,900 万人が患い、この人数は 2050 年までに 8 億 4300 万人に増加すると推定されている[1]。日本の製造業においても腰痛の発件数は多く、業務中の作業負担によって生じ、労働災害として認定された腰痛（災害性腰痛）は 2023 年には 854 件発生しており、大きな課題となっている[2]。国内外に複数の工場を保有する自社においても、これまでにやってきたヒアリング結果から、立位による組立作業において腰痛を持つ作業者が多いことが分かっている[3]。このような健康被害の発生は、従業員の健康寿命の短縮や生産性低下を招くため、企業は従業員に対して安全で持続可能な職場環境の整備に取り組む必要がある。

腰痛の発生要因は多様であり、腰部に動的あるいは静的に過度な負荷がかかる動作要因や、悪質な作業空間、不適切な機器や設備の配置などの環境要因、年齢や性別や体格や勤務条件などの個人的要因があげられる[4]。特に、環境要因や個人的要因のほか、一定時間休息なしでの作業が問題視されており、実際に仕事上の怪我経験者の約 88% が休息を取らず作業を継続しているという報告もある[5][6]。自社の製造業務関係者に対するヒアリングにおいても、休息が常に十分ではないことが分かっている。こうした状況は腰痛の発生リスクを高めるため、休息の重要性が指摘されている[6]。

これらの課題に対処するには、作業中に作業者が自身の姿勢状態を認知することや、腰痛の発生リスクが高いときに休息を促すことが効果的である[3]。作業環境や作業者の姿勢による身体負荷は、人間工学的評価により客観的に判断することができる[6]。例えば、Kinect 等の骨格推定センサーと McAtamney らによる迅速上肢評価法 (RULA ; Rapid Upper Limb Assessment) [7] を組み合わせた手法が提案され

ている[5][6]。しかし、評価データを作業者にどのように提示し休息を促すかについては、十分な研究が行われていない。

課題から、作業者の姿勢や身体負荷に関する情報を認知させ、さらに姿勢改善などの適切な行動を誘導することが求められる。これらを実現するための情報提示手段として、従来ではタブレット端末やプロジェクタの活用が進められている[3][8][9]。しかしながら、こうした端末は作業指示書の役割も持つため、作業を妨げない位置に固定されている場合が多く、タブレット端末上の情報提示は作業者の視野外となる傾向があり、必要な情報を見逃す恐れがある[10]。また、日々の作業でタブレット端末での情報提示に慣れることで、提示情報への注意力が低下し、その結果として情報の見逃しが生じる可能性も考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、これらの課題に対して AR 情報提示を用いることで解決を試みる。作業者の姿勢と腰部負荷をリアルタイムで AR 情報提示し、作業者が自身の疲労蓄積を常時認知して適切なタイミングで休息できる仕組みを提案する。本提案により腰痛の発件数を低減、または予防に貢献することが期待できる。

2. 先行研究

製造現場の作業員へ、姿勢状態や身体の状態の気づき（認知）と、適切な行動への促し（誘導）を実現するための情報提示手段について、代表的な例を紹介する。

2.1 従来の情報提示

タブレット端末やプロジェクタを用いた情報提示方法は、作業の指示書に利用されている[8][9][11]。また、著者らは先行研究において、筋骨格系の疲労蓄積状態をタブレット端末上で可視化し、作業員自身の状態を認知できるシステムの提案を行った[3]。また、疲労が蓄積してきた場合には、ストレッチ動画の提示によって休息行動への誘導を促す取

[†] 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

り組みをしている。しかしながら、タブレット端末やプロジェクタは作業空間に固定設置するケースが多く、これらを物理的に設置するスペースの確保の問題や、作業動線や視野から外れた際の提示情報への気づきやすさの低減が課題となっていた[10]。また、日々の作業でのこれらの情報機器の情報提示に慣れることで、提示情報への注意力が低下し、その結果として見逃しが生じると考えられる。作業者の見逃しの解決策として、タブレット端末の情報提示の際に効果音を加えることが挙げられるが、工作機械の動作音など多くの環境雑音がある作業現場で利用が困難である[8]。

2.2 ARによる情報提示

近年、工場作業支援におけるAR情報提示として、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）やARグラスを用いた提案が行われている[12][13][14]。AR情報提示は作業者自身がHMDを装着するため情報提示機器設置のスペースを必要としない。また、視界の前方に情報が付加されるため、提示情報の見逃しの課題を解決することができ、情報表示の配置を柔軟に行うことができることから、作業の妨げにもなりにくいと考えられる。

また、AR情報提示では画像や動画などの2次元情報提示だけではなく、3次元アニメーションや3次元アバターといった立体的な情報を表示することができるため、作業者に対して、より情報への理解が深まることが考えられる。

しかし、従来のAR情報提示の研究では、業務の効率化を向上させるための組み立て作業[13]やピッキング作業[14]に重点が置かれており、作業者自身の身体負荷への認知や状態変化に応じた誘導については、十分に検討されていない。

2.3 積極的休息の必要性

自社では作業者各自の判断で休息をとることが推奨されているが、実際のヒアリングでは十分な休息がとられていない事例があった[3]。すなわち、作業者が自発的に自身の疲労蓄積状態を認知し、休息行動に誘導する仕組みが十分に機能していない点が課題である。

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[15]。先行研究では、作業の合間に積極的休息である体操を取り入れることで、腰痛の程度が有意に低下している[16]。積極的休息の一例として挙げられるストレッチは、準備運動や整理運動の一要素として活用されている[17][18]。腰痛予防の対策としても、ストレッチを中心とした腰痛予防体操を実施させることが挙げられている[4]。

作業現場においては、短時間のストレッチが腰痛の予防、作業効率の改善、長期的な健康保持に期待できると考えられる。

3. 提案手法

3.1 システムの構成

本研究で提案するシステムは、製造現場にて立位での組立作業を行う作業者に対し、HMDを通じて作業者自身の姿勢と腰部負荷に関する情報をリアルタイムにてARで提示することで、作業者へ積極的休息、具体的にはストレッチを促すことを目的としている。本システムは主に3つの要素から構成されている。

● ボディトラッキング

ボディトラッキングは、HMDのカメラから関節点を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荷を評価することを可能にしている。本研究ではHMDとしてMeta社のMeta Quest 3を使い、ボディトラッキングも本製品の機能を使用する[19]。

● 計算プログラム

計算プログラムは、ボディトラッキングから得た関節点のデータをもとに、ベクトル内積やクォータニオンの計算を行い、腰角度とRULAスコアを算出する。本研究では、腰角度とRULAスコアから作業者の身体負荷評価を決めた。その結果を出力画面に表示している。

● 出力画面

出力画面は、HMDの映像出力画面のことであり、作業者に視覚的に提示するインターフェースである。計算プログラムの結果に応じて、疲労蓄積状態や回復行動をとるための表示を行う。本研究では、出力画面をUnityで作成した。

3.2 作業者への情報提示の流れ

本研究で提案する情報提示の流れは、以下のとおりである。

1. 機器のボディトラッキング機能で装着者の関節位置を計測
2. 関節点の位置から腰関節角度を算出
3. RULAによって身体負荷を評価
4. 身体負荷を蓄積して疲労状態を推定
5. HMD上に状態可視化の3次元アバターを表示
6. 負荷の蓄積が所定の閾値を超えたときにHMD上にストレッチを促すための3次元アバター（以下、ストレッチアバター）を提示

3.3 身体負荷評価

身体負荷の評価指標として、1章で紹介した評価指標である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。

以上より、本研究で使用する計測機器はMeta Quest 3を用いて作業者のボディトラッキングを行い、ボディトラッキングから得た関節データをもとにベクトル内積やクォー

タニオンの計算を行い、腰角度と RULA スコアを算出する。腰角度とスコアの対応付けは以下のとおりである[7].

- 前屈がない、あるいは座位でも背もたれや机で体幹が支えられている場合：1
- 20 度以下の前屈：2
- 20～60 度の前屈：3
- 60 度以上の前屈：4

本研究では、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スコア、および対象物の荷重スコアは扱わない。

3.4 身体負荷認知 AR 情報提示

身体負荷認知 AR 情報提示は、作業者が自身の身体負荷について視覚的に気づき理解するためのものである。具体的には、図 1 のように、HMD 上に状態可視化の UI (User Interface) を表示し、特定の身体部位における疲労の蓄積疲労度具合を、人型の 3 次元アバター、腰の角度、身体負担、状態バーの 4 つによって表現する。人型の 3 次元アバターはボディトラッキングで計測された装着者のリアルタイムの動きを表示する。また、3 次元アバターのそばに 2 次元の UI を情報提示して、リアルタイムで装着者の腰角度と身体負荷が連動して変化する。状態バーでは、RULA スコアに基づいた累積値を緑色、黄色、赤色の 3 段階の色をベースにグラデーションカラーで表現する。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。配色は、日本産業規格 (JIS Z9103) の JIS 安全色[20]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。色の 3 段階と RULA スコア 4 段階との対応付けは、RULA スコア 1 及び 2 を緑色、RULA スコア 3 を黄色、RULA スコア 4 を赤色とした。RULA スコア 1 及び 2 は作業のわずかな動きで変化するため腰の負担は少ないと考え、緑色としている。

このような AR 情報提示により、作業者は自身の疲労蓄積状態を 3 次元アバターで認知できるため、本システムが適切なタイミングで休息行動を促すことが期待される。

3.5 行動促進 AR 情報提示

行動 AR 情報提示は、作業者が作業を止めて休息をとるように促すためのものである。すなわち、身体負荷認知 AR 情報提示により身体状態を把握した作業者が、実際に具体的な回復行動をとることを促すためのものである。

RULA 評定値の累積が所定の閾値を超えたとき HMD 上にストレッチアバターとメッセージが表示される。ストレッチアバターは著者らによって計測したストレッチの身体記録データが再生される。

ストレッチにより筋肉や関節の可動域が広がることで、柔軟性が高まり[21]、腰痛予防が期待できる。また、作業者自身の疲労状態への気づきを促し、休息行動への意識づけ

にも役立つと考える。ストレッチの実践は作業の区切りや転換点となり、長時間労働による慢性的な疲労や注意力の低下を防ぐ効果も期待される。

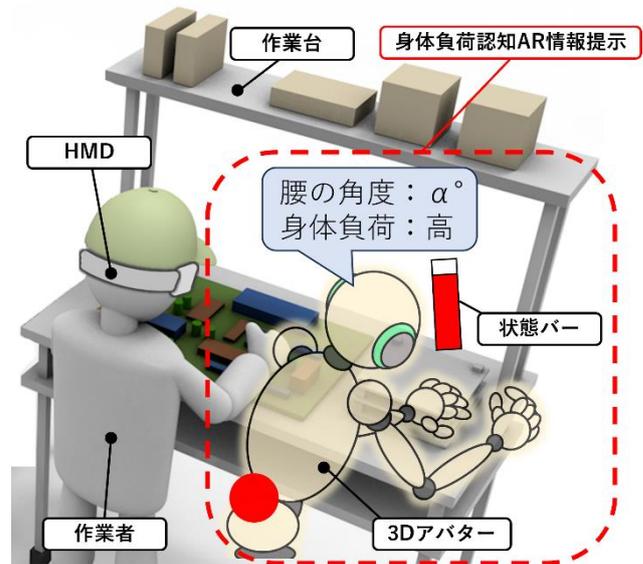


図 1 身体負荷認知 AR 情報提示の概要

4. システムの効果検証

今後は提案した AR 情報提示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 章で紹介した身体負荷認知 AR 情報提示と行動促進 AR 情報提示が、先行研究で提案されたタブレット端末を用いた情報提示と比較してどれだけ効果があるのかを調査することと、AR 情報提示のなかでも 3 次元アバターを提示することの有用性を検証することである。

以下の 3 点を仮説としている。

仮説 1: 提案システムの介入により、AR 情報提示はタブレット端末を用いた 2 次元情報提示と比較しての見逃し回数が軽減する。

仮説 2: AR 情報提示のほうが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: AR 情報提示のなかでも、3 次元アバターによって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。

実験タスクは、著者らが行った先行研究[3]と先行研究[22]に基づき、レゴブロ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クアップ作業と、作業面と肘高の間の距離を示す差尺[22]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を計画している。

実験条件は、上記の仮説を検証するために以下の 3 条件としている。

実験条件 1: タブレット端末による 2 次元情報提示 (図 2)

実験条件 2 : 2 次元情報提示の AR 情報提示 (図 2)

実験条件 3 : 2 次元情報提示と 3 次元アバターによる AR 情報提示 (提案手法)

実験条件 1 では, タブレット端末に図 2 の 2 次元情報を提示する. タブレット端末は作業を妨げない位置に固定する. 実験条件 2 では, HMD を装着し, 図 2 の 2 次元情報を AR 化して情報提示を行う. 実験条件 3 では, 3 章にて紹介した提案手法を行う.

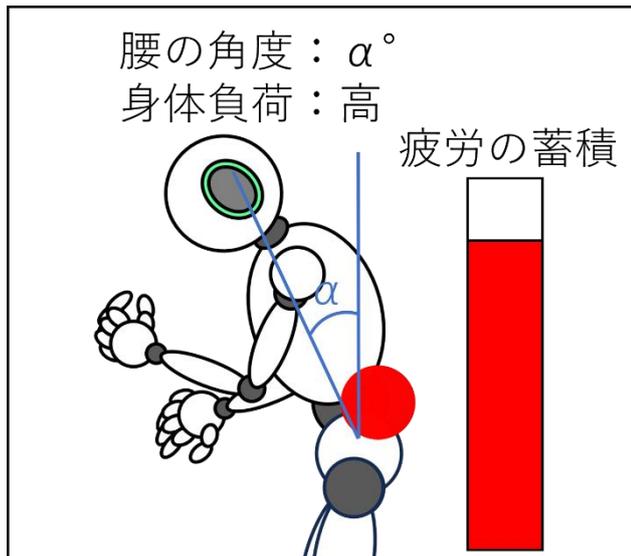


図 2 2 次元情報提示

5. おわりに

本研究では, HMD を用いて作業者が自身の腰の疲労状態をリアルタイムに認知できる AR 情報提示を提案した. 今後はタブレット端末での情報提示方法と比較しその効果を検証予定である. 検証結果をもとに作業者へ認知負荷がかからない情報提示を模索していきたい.

参考文献

- [1] Lancet Rheumatol, Global, regional, and national burden of low back pain, 1990-2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021. 2023, vol.5, pp.316-329.
- [2] “業務上疫病発生状況等調査 (令和 6 年) 第 1 表 業務上疫病発生状況”. https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_61103.html. (参照 2025-12-1).
- [3] 山越孝平, 富田智晶, 赤津裕子, 片桐一浩. 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. 情報処理学会 インタラクシオン 2025, pp. 616-619
- [4] “腰痛予防対策”, https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_31158.html. (参照 2025-12-1).
- [5] Darius Nahavandi, M.. Skeleton-free RULA ergonomic assessment using Kinect sensors. Intelligent Decision Technologies, 2017, vol.

- 11, pp. 275-284.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 富田智晶, 赤津裕子, 鈴木雄介. 工場における主体感のある操作が可能な視線入力によるタブレット操作方法の検討. ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.26, no.3, 2024.
- [9] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士. プロジェクタを用いた 3 次元遠隔指示インターフェースの構築. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2002, vol.7, no.2, pp.169-176.
- [10] Yang Liu, Qin Go. Effects of secondary task eccentricity and visual salience on attention allocation in multitasking across screens. International Journal of Human-Computer Studies, 2024, vol.192, 103363.
- [11] 松原貴史, 五福昭夫. タブレット手順書に要求される機能の調査結果に基づく具体的な機能設計の機能評価. システム制御情報学会論文誌, 2024, vol. 37, no. 7, pp. 175-184.
- [12] Josef Buchner, Katja Buntins, Michael Kerres. The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. 2023, vol.19, no.1, pp.19-31. Journal of Computer Assisted Learning, 2022, vol.38, no.1, pp.285-303.
- [13] 高山日名子, 芹川聖一, 北園優希. AR を用いたプラモデル組み立て支援システムの提案. 産業応用工学会論文誌, 2025, vol.13, no.1, pp. 46-51.
- [14] 松本紀子, 大塚康平, 田野俊一. 物流 AR ピッキングシステムにおける HMD 表示画角の影響の分析. 信学技報, 2020, vol.119, no.457, pp.235-240.
- [15] “休養・こころの健康”, https://www.mhlw.go.jp/www1/topics/kenko21_11/b3.html. (参照 2025-12-12).
- [16] 高野賢一郎. 勤労者における職業別の肩こりや腰痛の実態と職業別予防体操の効果. 日職災医誌, 2014, vol. 62, no. 1, pp. 32-37.
- [17] Fradkin AJ, Sherman CA, Finch CF. Improving golf performance with a warm up conditioning programme. Br J Sports Med 2004, vol.38, no.6, pp.762-765.
- [18] “健康日本 21 アクション支援システム”, <https://kennet.mhlw.go.jp/information/information/exercise/s-04-006>. (参照 2025-12-19).
- [19] “Meta Horizon Unreal 用 Movement SDK”, <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unreal/unreal-movement-overview/>. (参照 2025-12-04).
- [20] “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/pdf1/Viewer/863e275e-6c62-4179-a70a-5544ecf73c26/d4a28ce7-3d7d-45ea-989a-0a4f5bbf2ffb>. (参照 2025-12-12).
- [21] Winters MV, Blake CG, Trost JS, et al. Passive versus active stretching of hip flexor muscles in subjects with limited hip extension: a randomized clinical trial. Phys Ther, 2004, vol.84, no.9, pp.800-807.
- [22] 茂木伸之, 三澤哲夫, 肝付邦憲. 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.