

汎用 ICT 機器による座位運動の負荷モニタリングシステムデザイン-逆動力学に基づく負荷量評価尺度の提案・利用文脈の探索

村山 修太ⁱ 茂呂 征弥ⁱ 菅原瑞貴ⁱⁱ 渡部勇ⁱⁱ 西條 美紀ⁱ

概要: 脊髄損傷者の在宅筋トレやデスクワーク中の短時間介入では、強度や過負荷兆候を自己判断できる解釈可能なフィードバック(FB)が不足している。本研究は汎用 PC と 2 台の RGB カメラのみで座位プッシュアップの 3D 姿勢を推定し、準静的逆動力学近似により肘・手首の正の仕事量を算出し、1RM 相当条件の理論仕事量で正規化した相対仕事量スコアとしてリアルタイム提示するシステムを実装した。1 次実験 (N=7) では約 4 Hz で安定更新し、関節間整合と個人内のまとまりが確認され、逸脱検知に用い得る可能性が示された。予備的体験 (N=1) では筋トレ動機とは独立に「身体状態の把握 (違和感・過負荷の早期気づき)」としての価値が示唆され、低強度活動を日常に埋め込む“身体チェック型 FB”の設計要件を得た。

1. はじめに

歩行困難なレベルの脊髄損傷 (Spinal Cord Injury、以下 SCI) 者 (例: 車いす常用者) は、移動や運動機会が制約されやすく、体力低下や褥瘡・慢性疼痛等の二次的健康問題の予防という観点から、日常生活での継続的に運動を実施できる環境の整備が重要となる。成人の SCI に対して、心肺体力及び筋力の向上を目的に「中・高強度の有酸素運動 20 分×週 2 回」に加え「主要筋群の筋トレ (各筋群 3 セット、週 2 回)」が推奨される[1]。一方で、SCI 者の運動実施には、施設・設備へのアクセス、疲労や疼痛、情報不足等多面的な障壁が存在し、施設依存ではなく在宅で実施可能な運動支援の必要性が指摘されている[2]。

在宅での筋トレを安全かつ効果的に成立させるには、実施者が「強度が足りているか/過負荷になっていないか」を判断できる解釈可能なフィードバック(以下、FB)が鍵となる。かつ、支援技術 (Assistive Technology) は機能的有用性だけで普及が決まるわけではなく、外観や審美性が「支援機器らしさ」の知覚やスティグマ知覚に影響し得る事が報告されている[3]。在宅支援の実装では「測れる・提示できる」だけでなく、「どう見え、どう意味づけられ、どのように受容されるか」までを設計対象に含める必要がある事が示唆される。中でも障害者専用機器としてラベリングされる事はスティグマ知覚や継続利用の阻害要因となり得るため、SCI 者に必要な要件を満たしつつ、健常者にも適用可能なヘルステックとして理解される外観・言語・利用シナリオとして設計・提示する事が望ましい。[21]

ここで有効な設計思想としてインクルーシブデザインがある。インクルーシブデザインは、人間の多様性 (能力・文化・年齢等) を前提に、排除が生じるミスマッチを見出して設計に反映するアプローチとして整理されており、特定集団向け専用品として閉じず、より広い利用者に拡張可能な解へ繋げる事を志向する[4]。本研究では SCI という高

ニーズ文脈を起点にしつつ、「車いす利用者向けに見える事」を固定化しない提示・意味づけ、つまり、ユニバーサルに受け入れられる見え方を検討課題として位置づける。

さらに、座位での運動支援は SCI に限らず健常者にも継続し得る。長時間の座位行動は死亡リスクとの関連が報告されており、身体活動量が高い場合にその関連が緩和され得る一方で[5]、職場の情報労働者では仕事の性質上、座位の中断 (マイクロブレイク) の導入が作業の流れや社会的状況 (人目・会議等) と衝突し得る[6]。故に、職場でも「準備や移動を要せず短時間で実施できる」座位運動の候補を具体化する必要がある。本研究で扱う「座位プッシュアップ」とは、椅子・車いすの座面に両手を置き、肘を伸ばして体幹を一時的に持ち上げて戻す、下肢を用いずに上肢と体幹で荷重を支持する簡便な動作であり、机と椅子があれば短時間で実施でき器具準備や更衣を要しにくいことからマイクロブレイクとして適用可能性を持つ一方で、健常者にとっては馴染みのある運動文化ではないため、体験を交えて成立する利用文脈を探索する事が重要である。尚、本稿では利用文脈を、利用者がいつ・どこで・何の目的で・どの程度の負担感で本システムを用いるかという状況の連なり (タイミング/場所/意味づけ/受容条件) として扱う。

以上より本研究では、座位で実施可能なプッシュアップ動作を対象に、汎用 ICT 機器 (汎用 PC) で運動負荷を定量化し、解釈可能な FB として提示する仕組みを提案する。何故なら特殊機器の必要性は健常者の利用意向を低下させるためだ。そのため本システムは、馴染みのない運動の FB が日常の作業実践に入り込む条件を探索するためのプロトタイプとして位置づけ、体験を通じて成立条件を引き出すエクスペリエンス・プロトタイプング(以下、EP)[13]の考え方を参照する。本稿では、まず 1 次実験として負荷推定・仕事量算出の力学的妥当性と汎用 PC 上でのリアルタイム性 (遅延・更新周波数・安定稼働) を検証、併せて予備的に利用体験を通じて実利用者の生活の流れに合った、利用

ⁱ 東京科学大学環境・社会理工学院

ⁱⁱ 株式会社ユニバーサルトレーニングセンター

文脈の手がかりを得る。

そこで、本研究の目的は、汎用 PC 内蔵カメラ+市販 Web カメラの 2 台 RGB カメラで座位プッシュアップの上肢負荷をリアルタイム評価し、デスクワーク中のマイクロブレイクとして成立する提示条件を探索する事とする。

2. 関連研究

2.1 座位行動への介入/マイクロブレイク

デスクワーク等の長時間座位は、筋骨格系の不快感や心代謝リスクと関連するため、座位の中断 (sedentary breaks) や短時間休憩 (micro-break) を取る事が推奨されてきた。職場における座位行動 (SB) 低減介入をまとめた系統的レビューでは、介入全体として SB 削減に一定の有効性が報告されている。[6]また、10 分未満のマイクロブレイクに関するメタ分析では、活力の向上・疲労の低減には小さいながらも有意な効果が示される一方、作業成績の改善はタスク特性に依存しうる事が示唆されている。[7] さらに、オフィスワーカーを対象とした“能動的マイクロブレイク”の系統的レビューでは、筋骨格系の不快感や疲労等の軽減が期待でき、生産性を大きく損ねない可能性が整理されている。[8]

2.2 画像・簡易センシングによる運動推定・FB

近年、深層学習に基づく姿勢推定を用いて、カメラ映像から関節角度や運動学量を算出し、トレーニング/リハビリへ FB する研究が増えている。例えば、複数台カメラと OpenPose を用いた 3D マーカレスモーションキャプチャは、光学式 Mocap との比較により、運動評価へ利用可能な精度を目指した検証が報告されている。[10] また、OpenPose を用いた運動解析の妥当性・信頼性を検討する研究もあり、実運用では推定誤差・遮蔽・計算負荷等を考慮した設計が重要となる。[11]リハビリ文脈では、マーカレス CV システムの家庭利用を視野に入れたプロトタイプ開発が議論されている。[12] 一方、既存の多くは“可動域・フォームの評価”に重点があり、運動負荷 (関節トルクや仕事量) を、汎用カメラのみからリアルタイムに定量化して提示する試みはまだ限定的であり、在宅・日常環境での導入容易性には課題が残る[24]。以上の整理から、本研究の課題は (1) 汎用 ICT 機器のみで成立する 2 台 RGB カメラ計測に基づく上肢負荷推定パイプラインの実装、(2) その負荷指標をデスクワーク中のマイクロブレイクとして成立させる提示条件の探索、の 2 点に集約される。そこで次章では、入力 (2 台カメラ) から 3D 姿勢推定、平滑化、負荷指標算出、UI 提示、ログ化までの処理系を示し、続いて体験プロトタイプとしての評価手順を述べる。

2.3 エクスペリエンス・プロトタイプング(以下、EP)

本研究は、計測アルゴリズムの精度評価だけでなく、「日常のどのタイミングで、どの情報提示が受け入れられるか」という利用文脈の探索も目的とする。そのため、早期に体

験可能なプロトタイプを通じて、設計チーム・利用者・関係者が将来の利用状況を“体感”しながら要件を具体化する EP が有効である[13]。以上より、本研究では、カメラベース負荷推定という技術要素の検証と並行して、体験を通じた利用文脈の条件を抽出するために、EP の枠組みを採用する。

3. 研究方法

3.1 研究デザインと方法論的立場

本研究の主目的は、健常者にとって馴染みの薄い座位トレーニング (座位プッシュアップ) が、日常の作業環境の中でどのような条件 (タイミング、場所、意味づけ) で成立しうるかを、体験を交えて探索する事である。そのため本稿では、将来の利用状況を一人称で理解可能にするためにプロトタイプ体験を用いる EP の考え方を参照[13]、また、共創・実環境志向を特徴とする Living Lab の議論を踏まえ、完全な現地観察に至る前段として、会議室環境で参加者の実機・実作業を取り入れた「縮小版の実環境」条件を構成した。本稿の評価は二段階である。1 次評価では、文脈探索の前提となる汎用 PC 上でのリアルタイム推定・可視化の妥当性、負荷指標の挙動の妥当性を技術的に検証する (1 次実験)。二次評価に相当する文脈探索は、デモペーパーの紙幅とスケジュール制約を踏まえ、予備的な体験セッション (N=1) として最小構成で実施し、詳細な深掘りインタビュー (象徴性・社会規範・職場文化への接続等) は今後の反復評価で扱う方針とした。

3.2 1 次実験：技術的検証 (N=7)

1 次実験では、提案システムが汎用 PC 上で座位プッシュアップ動作をリアルタイムに処理できるか、又相対仕事量スコアが計測ノイズに対して過度に不安定にならないかを検証した。参加者は成人 10 名 (男性 8 名、女性 2 名、平均年齢 24 歳 [SD=2.4]、体重 60.8±10.6kg) であり、上肢運動を著しく制限する既往歴は報告されなかった。参加者は座位プッシュアップ動作を所定回数実施し、その間の姿勢推定・平滑化・負荷推定ログを取得した。評価指標として (a) 処理速度 (更新周波数・遅延・フレーム落ち)、(b) スコアの安定性 (平滑化前後の変動)、(c) 肘・手首の関節間整合 (順位相関や差分のロバスト指標) と帯域[0.5, 1.5]への同時カバレッジを算出し、逸脱検知の可能性を探索した。

3.3 受容意向・特性調査 (N=10)

1 次実験と並行して、座位トレーニング及び本システムに対する利用意向、ならびに利用意向と関連しうる個人特性を質問紙で収集した。

3.4 予備的体験評価：実作業中の介入 (N=1)

文脈探索の入口として参加者 1 名に対し、通常作業の合間に座位プッシュアップ介入 (30-60 秒) を 2 回実施させた。介入前に Day Reconstruction Method(DRM)[20]により利用者の文脈を探索した後に、提案システムの可視化を提示

し、介入直後の簡易質問と半構造化インタビューにより利用文脈を聴取した。

3.5 データ解析 (量的・質的)

量的解析では更新周波数・遅延等を集計し、相対仕事量スコアについて関節間整合・個人内再現性・逸脱指標を算出した。質的解析では、追跡インタビューを実施し、当日の行動エピソードを再構成した。得られた発話は簡易テーマ整理 (rapid thematic analysis) として1次コード付与→テーマ統合→要約の手順で設計要件を整理した。

3.6 倫理的配慮

実験に先立ち、研究目的・手順・想定リスク・データの取り扱いを説明し、書面によるインフォームド・コンセントを取得した。なお、本研究は所属機関の倫理審査承認を得て実施した (承認番号: 2025112)。

4. 提案システム

4.1 システム全体概要

提案システムは、汎用 PC 上で動作し、カメラ映像から上肢姿勢を推定して座位プッシュアップ動作の負荷を算出し、リアルタイムに可視化する。



Figure 1 システム全体図



Figure 2 使用外観及び使用ハードウェア



Figure 3 提案システム UI

当日のデモ展示では、2台 RGB カメラの簡易キャリブレーションから推定・可視化までを被験者が体験できる形で提示し、1RM で正規化した相対仕事量スコアに基づく負荷 FB が低強度の座位運動でも成立する事を示す。

c ここで、 j : 関節番号、 i : リンク番号、 E : 末端外力を表す。本稿ではベクトルを $\vec{\cdot}$ 、行列 (慣性テンソル) を \cdot で表す。なお記号は文献[14]と一部異なる (対応: 文献の F , M は本稿の \vec{f}^{in} , \vec{M}^{in})。また、平面運動を仮定し、回転量は面外成分のみが寄与するため、本稿では回転の擬似項及び関節入力をモーメント

4.2 提案モデル

4.2.1 力学指標の定義

本研究では、RM 法 (反復回数に基づく筋力評価) が持つ「同一動作の反復を、可動域と負荷の関係として比較できる」という解釈可能性に着想を得て、負荷指標を「関節トルクに基づく仕事量の正成分」として定義する。左右の上肢をそれぞれ 2 リンク直列機構 (前腕-上腕) として近似し、手関節を環境との接続点とした座位プッシュアップの反復中に、肘・手首の関節トルクを逆力学で推定する。なお、手部は系外 (環境側) に含め、手部に作用する接触力は手関節の拘束条件 (基点反力) に吸収されるものとして、前腕・上腕の運動方程式には明示的に導入しない。

逆力学計算は、d' Alembert の原理[15] (慣性力を加えた釣合い) と Jourdain の原理[16] (仮想速度に対する仮想パワーが 0) に基づくヤコビ行列を用いた多体系運動方程式[14]の枠組みに従う。リンク j の擬似外力・擬似モーメントを下記式で定義して、

$$\vec{F}_j^{\text{PS}} \stackrel{\text{def}}{=} m_j (\ddot{r}_{g,j} - \vec{g}) \quad \vec{M}_j^{\text{PS}} \stackrel{\text{def}}{=} I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i)$$

部位 j の負荷量を表すトルク量 τ_j は下記の数式で算出した。

$$\tau_j = \sum_{i=1}^j \vec{M}_i^{\text{PS}} + \sum_{i=1}^j (\vec{r}_i^g \times \vec{F}_i^{\text{PS}}) - \tau_E - (\vec{r}_j^x \times \vec{f}_E)$$

として算出。 m_j はリンク j の質量、 $r_{g,j}$ はリンク重心位置、 r_i^g は関節からリンク重心への位置ベクトル、 r_j^x は関節から外力作用点 (端点 E) への位置ベクトル、 \vec{g} は重力加速度、 ω_j は角速度、 I_j は慣性テンソルだ。導出上は慣性項を含むが、対象とする座位動作の反復速度と汎用 PC の推定更新レートの範囲では重力・準静的成分が支配的であると仮定し、 $\ddot{r}_{g,j}$ や $\dot{\omega}_j$ に起因する慣性項を無視した。

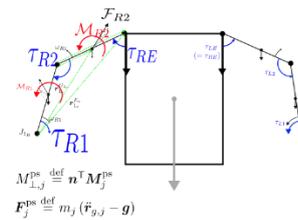


Figure 4 負荷計算モデル前額面c

得られた関節トルクから、RM 法と同様に速度に依らない「同一可動域で持ち上げた量」の指標として仕事量を定義する。関節 x の 1 反復あたりの仕事量は下記式で算出。

成分の符号付きスカラー M として表す。

図 X は前額面への投影図であり、計算は 3 次元で行う。図中の回転量は当該平面の法線方向成分 ($\vec{n} \cdot \vec{M}$) のみを示す。

$$W = \int_{-0.5\pi}^{0.25\pi} \tau_x(\theta) d\theta \approx \sum_k \tau_{x,k} \omega_{x,k} \Delta t$$

1RM100%相当条件での準静的理論仕事量を個人の筋力量の基準値として用いる。

$$W_x^{RM} \approx (m_x \cdot r_g + m_{db} \cdot r_x) \cdot 16.73$$

ここで m_x は関節 x が支持する上位リンク群の等価質量(例:手関節なら前腕・上腕等の合計)、 m_{db} はダンベル質量、 r_g は関節から等価重心までの距離、 r_x は関節から外力作用点までの距離である。以上により、本研究の負荷指標は「逆力学で推定した関節トルクに基づく仕事量(J)」として定義され、RM法の解釈可能性(反復可能性と仕事量の対応)を力学量として扱える。尚、この基準値は人体寸法・質量等の簡便仮定に依存するため、絶対強度(%1RM)の厳密推定よりも、関節間整合・個人内再現・逸脱検知に主眼を置く。AIST人体寸法DB1991-92[22]を用いて W_x^{RM} の式のパラメータを算出し、標準体型における男女毎に前腕と上腕の負荷それぞれ算出する式を用いた。尚、取得データ解析時のノイズ処理は3D姿勢データにGCVSPL[23]を活用した。微分でノイズが増幅し、角速度・加速度の値が不安定になるためである。

4.2.2 FB尺度と提案閾値

FBには、プッシュアップ動作1サイクル中に各部位が行った正の仕事量を、1RM相当条件での準静的理論仕事量で割った「1RMで正規化した相対仕事量スコア」を用いる。これは%1RMの厳密推定ではなく、個人内での負荷の増減、肘・手首の整合、及び逸脱(フォーム崩れ/推定破綻)の検知を目的とする。

$$\begin{aligned} (\text{運動強度}(\%)) &= \frac{(\text{実測値})}{(\text{理論的最大強度})} \\ &= \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \tau_k \omega_k \Delta t}{(m_x \cdot r_g + m_{\text{maxweight}} \cdot r_x) \cdot 16.73} \end{aligned}$$

4.2.3 1RMの推定(間接法)

本研究では、間接法により1RMを推定した。被験者には、ダンベルを把持した状態で手関節及び肘関節の屈曲伸展(ダンベルカールに相当)を反復させ、100%1RMに達しない負荷における反復回数 n を計測した。本研究でダンベルを用いた上肢の反復課題(ダンベルカール相当)を1RM推定の参照運動として採用した理由は、(i)ダンベルという汎用負荷により実験環境で再現性のある強度設定が可能である事に加え、(ii)肘屈曲トルク(上肢筋力)は、物体の持ち上げ・保持・運搬など日常生活動作(ADL)における基本要素であり、上肢筋力の個人差を反映する簡便な指標となり得るためである。実際、肘関節屈曲トルクはADL(lifting/carrying等)に重要である事が指摘されており、また上肢筋力はIADLを含む生活機能と関連するという報告もある。反復回数 n に対応する%1RMは、参考文献に示す対応表([19])に基づき $p(n)$ として取得し、ダンベル質

量を m とし、推定1RM(質量換算値)を $m_{1RM} = \frac{m}{p(n) \cdot 100}$ と算出した。

5. 1次実験: 技術的検証

5.1 目的

研究で想定するEPは、単なる概念提示や画面モックではなく、本実験で用いたシステムを自身の座位プッシュアップ動作に対する負荷をリアルタイムに推定し可視化する道具として体験する事を目指す。そこで1次実験では、(i)汎用PC上でのリアルタイム推定・可視化の成立性、(ii)1RMで正規化した相対仕事量スコアとしての挙動の可能性を探索的に検証する。加えて、本システムに一定の利用意向を示す参加者(初期受容者)を同定し、二次実験における利用文脈探索に適した参加者層の手がかりを得る。

5.2 方法

1次実験には、学部生・大学院生10名(男性8名、女性2名)が参加した。実施日は2025年9月25日であった。参加者の平均年齢は24.0歳(SD=2.4)であり、自己申告による体重は 60.8 ± 10.6 kgであった。参加者はいずれも、上肢の運動を著しく制限する既往歴を報告しなかった。次に、会議室でRM法間接法[19]に則り個人の上肢筋力量を計測した。その後被験者は、miki社製車椅子BAL-1に座り座位状態でプッシュアップ動作を10回反復した。

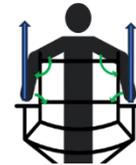


Figure 5 計測プッシュアップ動作の算出部全体

6. 結果

6.1 指標の挙動

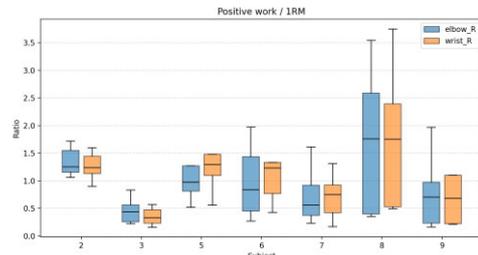


Figure 6 提案式に基づく被験者毎のプッシュアップ動作負荷の割合(右上腕と右前腕の負荷量)

本システムは、上肢の関節トルクから算出した仕事量に基づく相対仕事量スコア(positive work/1RM)を約4Hzで更新し、UI上に部位別に提示できた。相対仕事量スコアの分布は個人差が大きく、中央値は概ね0.3-1.3の範囲に収まる一方で、一部被験者では1(1RM相当)を上回る試行

や分散の大きい試行が観測された。一方、肘・手首の2指標は同一被験者内で概ね同程度の増減傾向で、関節差よりも被験者差（動作様式・体格・推定誤差等）の影響が支配的であった。

肘・手首の整合性を確認するため、順位相関と差分のロバスト指標を算出したところ、 ρ は全員で0.72–1.0と高く、被験者内では両関節が概ね同じ挙動を示した。例として Subject 2 では手首-肘の中央値差は-0.049、差分 MAD の正規化値は 0.063、両関節が同時に [0.5, 1.5]に入る割合 ($dual_{coverage}$) は 0.86 であった。一方、Subject 8 は肘・手首の差分自体は小さい ($rel_{mad} \approx 0.005$) が、両者とも帯域外に位置しやすく $dual_{coverage}=0.0$ であり、フォーム差・個人特性・推定誤差のいずれかによる逸脱検知対象となる可能性が示された。

6.2 予備的体験 (N=1)

追跡インタビューでは、運動行為の捉え方と受容条件に関して、複数の示唆が得られた。第一に参加者は筋トレ自体への関心は高くない一方で、動作中の負荷量 FB には関心を示した。具体的には、運動の成果（鍛える事）よりも、肩周りの違和感や過負荷の兆候に気づける事、日常の身体状態を把握して調整できる事に価値が置かれていた。ポップアップ通知で提示される内容としても、単に運動を促す情報より「肩が痛くないか」等の健康リスクを想起させるチェックが望ましいという意見が得られた。

7. 議論・限界

7.1 考察

相対仕事量スコア (positive work/1RM) は、被験者間で分布が大きく異なり、一部試行では 1 (1RM 相当) を上回る値が観測された。これは、(i) 約 4 Hz のサンプリングに伴う角速度・仕事量推定の離散化誤差、(ii) 姿勢推定ノイズ、(iii) 人体寸法・質量等の簡便仮定、(iv) 慣性項の簡略化といった要因が重畳した結果として生じた可能性が高い。以上より、本指標を%1RM の絶対値を厳密に推定する指標として解釈する事は避け、1RM で正規化した相対仕事量スコアとして位置づける。本稿では、肘と手首で同様の増減傾向が得られる点に代表される①関節間整合、同一被験者内で一定のまとまりが得られる②個人内再現性、及び整合性の崩れや帯域外への逸脱を捉える③逸脱検知を主要な強みとして整理する。実運用に向けては、ノイズ処理の改善に加え、処理後の指標定義に整合する閾値・正規化の校正を再設計する事が重要である。

一方で、質的調査では、上肢筋力が低い被験者（右上腕外側の 1RM=9.3kg）が筋トレ自体への関心は高くない一方で、負荷量 FB が肩周りの違和感や過負荷兆候の把握に役立つ点に強い関心を示した。さらにデスクワーク中の介入箇所探索と統合すると、本システムは「筋トレの達成」ではなく、低強度の座位活動を日常に埋め込むための“身体

チェック型 FB”として設計すべきであるという知見が得られた。先行研究では、新奇な対象は提示されたカテゴリ一名（ラベル）を手がかりに期待・評価が形成され、初期に与えた尤もらしいラベルが解釈を強く規定し得る [18]。また、行為へのタグ付けが行為自体を促進し得る behavioral labeling も報告されている [17][18]。そこで本研究では、本システムを座位プッシュアップを計測と FB を伴う「計測体操」として暫定的に位置づけ、今後は対象者数を増やして命名が理解・期待・継続意図に与える影響を検証する。

7.2 限界と今後の検証

本稿の議論は、解釈と設計仮説の提示に留まり、車いす利用者を含む多様な利用者集団における「象徴の受け取られ方」や「スティグマ知覚の変化」を直接検証できていない。今後は、参加者が日常的に用いるノート PC 環境に本プロトタイプを持ち込み、実作業の合間への運動提案として体験させる反復評価を行う。これにより、座位トレーニングが成立しうる条件を、半構造化インタビューとシナリオを用いて精緻化する。さらに長期的には、地球温暖化進行時の将来利用シナリオを構成し、ユニバーサルな受容に向けた仮説生成を行う。

8. おわりに

本研究では、汎用 PC 内蔵カメラと市販 Web カメラの 2 台 RGB カメラのみという最小構成で、座位プッシュアップ中の上肢負荷を RM 相当の規格化指標 (positive work/1RM) として算出し、リアルタイムに提示するデモシステムを実装した。今後は個人差を踏まえた“処理後指標”に整合する閾値の構築・校正によって、過負荷回避や自己調整を支える指標としての実用性を高められる。さらに、筋トレ自体への関心が低い参加者でも負荷 FB に価値が見出された事から、本アプローチは「運動動機づけ」に閉じず、日常場面における身体状態の把握と過負荷回避を目的とする能動的自己調整（「筋トレ」と「休憩」の間隙を埋める利用文脈）として展開可能である。総じて、本研究の新規性は、①特殊機材を排除し実生活に実装可能な計測・提示系を 2 台 RGB カメラで成立させた点、②主観的感觉を規格化負荷へ接続する閾値構築・校正の設計課題を明示し、実装と初期検証で見通しを得た点、③「筋トレ支援」だけでなく自己調整・過負荷回避のための日常的 FB という適用領域を開拓した点にある。

謝辞 資金・助言の形で協力して頂いた共同研究先の株式会社ユニバーサルトレーニングセンターの皆様に謹んで感謝の意を表明します。

参考文献

[1] Martin Ginis K.A., van der Scheer J.W., Latimer-Cheung A.E. et al. Evidence-based scientific exercise guidelines for adults with spinal cord injury: an update and a new guideline. *Spinal Cord*, 2018.<https://www.nature.com/articles/s41393-017-0017-3>

- [2] Williams T.L., Smith B., Papathomas A. Exercise awareness and barriers after spinal cord injury. *Spinal Cord*, 2014. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4095007/>
- [3] dos Santos A.D.P. *et al.* Aesthetics and the perceived stigma of assistive technology for visual impairment. *Disabil Rehabil Assist Technol.*, 2022. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32501732/>
- [4] Inclusive Design Research Centre (OCAD University). What do we mean by Inclusive Design? 2010. <https://legacy.idrc.ocadu.ca/about-the-idrc/49-resources/online-resources/articles-and-papers/443-whatisinclusivedesign>
- [5] Ekelund U. *et al.* Does physical activity attenuate, or even eliminate, the detrimental association of sitting time with mortality? *The Lancet*, 388(10051), pp.1302–1310, 2016. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30370-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30370-1)
- [6] Mainsbridge, C. P., Cooley, D., Dawkins, S., de Salas, K., Tong, J., Schmidt, M. W., & Pedersen, S. J. (2020). Taking a Stand for Office-Based Workers' Mental Health: The Return of the Microbreak. *Frontiers in public health*, 8, 215. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00215>
- [7] Albulescu, P., Macsinga, I., Rusu, A., Sulea, C., Bodnaru, A., & Tulbure, B. T. (2022). "Give me a break!" A systematic review and meta-analysis on the efficacy of micro-breaks for increasing well-being and performance. *PloS one*, 17(8), e0272460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272460>
- [8] Radwan, A., Barnes, L., DeResh, R., Englund, C., & Gribanoff, S. (2022). Effects of active microbreaks on the physical and mental well-being of office workers: A systematic review. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2026206>
- [9] Nakano, N., Sakura, T., Ueda, K., Omura, L., Kimura, A., Iino, Y., Fukushima, S., & Yoshioka, S. (2020). Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose With Multiple Video Cameras. *Frontiers in sports and active living*, 2, 50. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00050>
- [10] Ino, T., Samukawa, M., Ishida, T., Wada, N., Koshino, Y., Kasahara, S., & Tohyama, H. (2024). Validity and Reliability of OpenPose-Based Motion Analysis in Measuring Knee Valgus during Drop Vertical Jump Test. *Journal of sports science & medicine*, 23(1), 515–525. <https://doi.org/10.52082/jssm.2024.515>
- [11] Cunha, B., Mações, J., & Amorim, I. (2025). Smartphone-Based Markerless Motion Capture for Accessible Rehabilitation: A Computer Vision Study. *Sensors*, 25(17), 5428. <https://doi.org/10.3390/s25175428>
- [12] Keisuke Osawa, Yu You, Yi Sun, Tai-Qi Wang, Shun Zhang, Megumi Shimodozono, Eiichiro Tanaka, Telerehabilitation System Based on OpenPose and 3D Reconstruction with Monocular Camera, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2023, 35 巻, 3 号, p. 586-600, 公開日 2023/06/20, Online ISSN 1883-8049, Print, <https://doi.org/10.20965/jrm.2023.p0586>,
- [13] Buchenau M., Suri J.F. Experience Prototyping. *Proc. DIS 2000*, pp.424–433. <https://doi.org/10.1145/347642.347802>
- [14] 太田 憲, 仰木 裕嗣, C-1 Jourdain の原理に基づく逆動力学解析に適した全身の運動方程式の導出(モデル化と分析), シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 2015, 2015 巻, セッション ID C-1, p. _C-1-1_-_C-1-7_, 公開日 2017/06/19, Online, <https://doi.org/10.1299/jsmeshd.2015.C-1-1> ,
- [15] Lanczos C. *The Variational Principles of Mechanics*, 4th ed., Dover Publications, 1986.
- [16] Wang L.S., Pao Y.-H. Jourdain's variational equation and Appell's equation of motion for nonholonomic dynamical systems. *Am J Phys.*, 71(1), pp.72–82, 2003.
- [17] Moreau C.P., Markman A.B., Lehmann D.R. What Is It? Categorization Flexibility and Consumers' Responses to Really New Products. *J Consum Res.*, 27(4), pp.489–498, 2001. <https://doi.org/10.1086/319623>
- [18] Fritze M.P., Völkner F., Melnyk V. Behavioral Labeling: Prompting Consumer Behavior Through Activity Tags. *J Marketing*, 88(4), pp.22–39, 2024. <https://doi.org/10.1177/00222429231213011>
- [19] 日本健康スポーツ連盟, 車いすフィットネストレーナー教本: 車いすユーザーの健康維持と基礎体力の向上を図る. 国際学園 and 星雲社 (発売), 2021. 参照: 2024 年 4 月 2 日. [Online]. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130569987990906016.bib?lang=ja>
- [20] Kahneman, D., Krueger, A. B., Schkade, D. A., Schwarz, N., & Stone, A. A. (2004). A survey method for characterizing daily life experience: the day reconstruction method. *Science (New York, N.Y.)*, 306(5702), 1776–1780. <https://doi.org/10.1126/science.1103572>
- [21] Nierling, L., Maia, M. J., Čas, J., Capari, L., Krieger-Lamina, J., Wolbring, G., Bratan, T., Fischer, P., Hennen, L., Mordini, E.: *Assistive technologies for people with disabilities — Part III: Perspectives, needs and opportunities*, European Parliamentary Research Service (EPRS), Scientific Foresight Unit (STOA), Study, PE 603.218, January 2018. doi:10.2861/11162. Available: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2018/603218/EPRS_IDA%282018%29603218%28ANN3%29_EN.pdf (accessed 2025-12-18)
- [22] 産業技術総合研究所 人工知能研究センター デジタルヒューマン研究チーム. AIST 人体寸法データベース 1991-92. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/91-92/> (参照 2025-12-18)
- [23] Woltring H.J. A Fortran package for generalized, cross-validated spline smoothing and differentiation. *Advances in Engineering Software*, 8(2), pp.104–113, 1986. [https://doi.org/10.1016/0141-1195\(86\)90098-7](https://doi.org/10.1016/0141-1195(86)90098-7)
- [24] Lam, W. W. T., Tang, Y. M., & Fong, K. N. K. *A systematic review of the applications of markerless motion capture (MMC) technology for clinical measurement in rehabilitation. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20, 57, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01186-9> [SpringerLink](https://www.springer.com/journal/11869)