ベッドメイキング作業熟練者の動作に注目したモーションキャプチャ解析とその展望

鈴木 官優　相原 明梨　ウィジェシンゲ ディウヌゲ ブッディカ
野口 聡馬　大野 颯真　加藤 れな　我妻　広明

本研究では，ベッドメイキング作業自動化に向けた作業手順・シーツ張力制御・目標状態などの工学的条件を特定するため，熟練者のマットレス 4 隅における三角折動作をモーションキャプチャで 26 試技計測し，両手首および両前腕の運動学的指標を用いた多変量解析を行った．BVH 時系列より作業順は全 26 試技で corner-FL (左手前, 1 番目) → corner-BL (左奥, 2 番目) に一貫性があり，その後，作業順 3 番目は corner-FR (右手前)，作業順 4 番目は corner-BR（右奥）となる組み合わせが，主要な作業順であることが示された．

手首 6 指標による多変量分散分析（MANOVA）では，対角ペア corner-FL・BR vs corner-BL・FR (H_{DIAG}) が partial $\eta^2 = 0.701$ で顕著な特徴量を示し，Mahalanobis 距離も corner-FL–BR 間で 1.09 と最短となった．一方，初期観察で主観的な差異が認められた動作順 (H_{AB}, corner-FL・BL vs corner-FR・BR) は手首だけに注目した場合 $\eta^2 = 0.327$ と弱く現れたが，身体重心を原点とする身体座標系において，前腕の向き・重心・手首距離の 3 構造指標を追加した 9 指標では，H_{DIAG} を $\eta^2 = 0.658$ で維持しつつ H_{AB} が $\eta^2 = 0.573$ まで大幅に上昇した．すなわち，初期観察の動作順の差異は，手首だけでは定量指標として十分でなかったが，上肢構造まで含めれば定量的に捉えられることが示された．本結果は phase 検出閾値を slow=25cm/s と slow=40cm/s の両条件で検証し ($|\Delta\eta^2| < 0.05$)，特段の閾値依存性がないことも認められた．今後は，シーツ張力や力解析も含めたモデリングについて検討する必要がある．

1　はじめに

近年，少子高齢化の進行に伴い，介護・医療や宿泊施設の現場における人手不足が課題である [4]．中でも，宿泊施設の清掃業務では効率的かつ丁寧な動作が求められ，第一に作業の習熟度が重要であること，また，作業品質だけでなく，迅速さが求められる．これらは，作業状況に応じた適切な動作および力の制御が必要となることが推定される．ベッドメイキングに関するボディメカニクスについての研究は，習熟度改善のための教育目的で，動画解析を行い，前傾角度や膝関節角度について計測し，評価を行った研究 [5] はあるものの，当該動作を機械的に再現する制御の観点から必要な特性を抽出するには，十分でなかった．

本研究では，熟練者の動作をモーションキャプチャを用いて三次元計測し，特に，「三角折」 [6] に注目してマットレス隅での動作分析を行った．熟練者特有の動作特徴を明らかするため，一連のベットメイキング動作から，4 隅の動作をそれぞれ取り出す手法を検討し，さらに三角折中の手首の軌道や速度，上肢構造を表す指標を抽出し，動作の差異を定量的に分析することを目的とした．

2　モーションキャプチャ計測実験

モーションキャプチャシステムは，身体に取り付けたマーカーやセンサなどを用いて身体各部の位置・姿勢を計測し，身体運動を三次元的に記録する技術である．取得した三次元座標から，身体各部位の軌跡，速度，加速度，関節角度などの運動学的指標を算出す

Motion Capture Analysis Focusing on Bedmaking Work Operations by Experts and Its Future Prospects.

Kanu Suzuki*1, Akari Aibara*1, Diunuge Buddhika Wijesinghe*1, Souma Noguchi*1, Souma Ohno*1, Rena Kato*1, Hiroaki Wagatsuma*1, *1: 九州工業大学大学院生命体工学研究科, Dept. of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology.

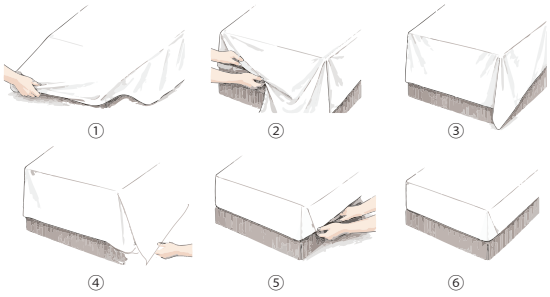

図 1　ベットメイキングにおける三角折の手順（模式図）

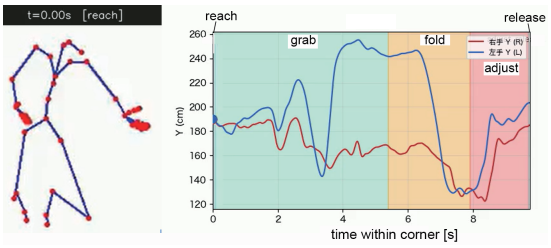

図 2　モーションキャプチャによる BVH 骨格（skeleton）解析例

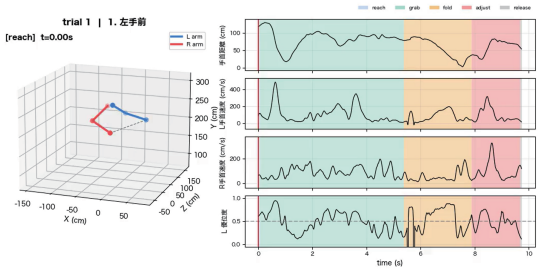

図 3　両腕動作抽出後の解析例

ることができ，スポーツ科学 [1]，医療 [3]，CG [7]，ロボット工学 [8] など幅広い分野で利用されている．本計測実験では，1 名の熟練作業者について，26 試技を計測した．動作計測は，REBOCAP [2] を用いた．

3　ベッドメイキングにおける三角折

三角折とは，ベッドメイキングにおいてマットレス四隅の余剰シーツを対角線状に折り上げ，三角形を形成しながらマットレス下へ折り込むことで角部を固定する技法である．本技法は, シーツ表面に適切な張力を付与して皺やたるみを抑制し, 患者の体動や荷重によるシーツのずれ・崩れを防止する効果を有する [6]．その作業は，シーツの持ち上げ，折り返し，引き込み，張力調整といった複数の工程から構成され，シーツの状態に応じた両手の協調動作を要する点に技術的特徴がある（図 1）．

本研究では，マットレス 4 隅の作業動作の違いや共通する特徴を解析した．取得した三次元座標データから両手首の位置および速度を算出し，手の軌道や左右手の協調関係を評価した．さらに，手首の動きだけでは捉えにくい身体の使い方を評価するため，肘および身体重心の情報を用いて上肢構造についても解析した．図 2，図 3 はモーションキャプチャから得られたデータより解析を行った例を示す．身体重心から手首までの距離や，肘から手首へ向かう前腕の方向を指標とすることで，手首の運動だけでなく，身体に対する上肢の使い方を定量的に評価した．また，作業を複数の段階（以後，phase と呼ぶ）に分割し，各工程における手首の速度や左右手の協調関係を比較した．

4　解析方法

まず，各試技における 4 隅の作業区間を特定した．4 隅の作業位置を自動的に推定する方法についても検討したが，作業中の身体姿勢や手の位置，動作のばらつきなどの影響により，4 隅（以後，corner と呼ぶ）の作業区間を安定して特定することが困難であった．そこで本研究では，各試技の動作を目視確認しながら，4 隅それぞれの作業開始から終了までの区間を手動でアノテーションした後，このアノテーションを教師データとして，以降の phase 分割および動作指標の算出に用いた．

抽出した作業区間について，左右手首の三次元位置および速度を算出した．時刻 t における手首の三次元位置を $\mathbf{p}(t)$，フレーム間隔を $\Delta t = 1/60$ 秒とすると，手首速度 $v(t)$ は次式で求めた．

$$v(t) = \frac{\|\mathbf{p}(t+\Delta t) - \mathbf{p}(t)\|}{\Delta t} \tag{1}$$

ここで，$\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表す．算出した速度は Savitzky-Golay フィルタ (窓幅 0.25 秒，多項式次数 3) で平滑化した．平滑化された手首速度に対して 2 段階の速度閾値 (下限 $v_{\mathrm{slow}} = 25$ cm/s, 上限 $v_{\mathrm{fast}} = 80$ cm/s) を適用し，各隅を reach，grab，fold，adjust，release の 5 phase に自動分割した．各 phase について，左右手首間距離，速度優位度 $v_L/(v_L + v_R)$，両手速度の位相相関ラグ，速度ピーク回数，両手の先行順序 (onset/peak/offset)，phase 継続時間などの指標を算出し，試技間の変動係数 (Coefficient of Variation; CV $= |\sigma/\mu|$) から動作の再現性を評価した．

さらに，手首の運動だけでは捉えにくい上肢全体の動作構造を評価するため，肘および身体重心 (Center of Mass; COM) の情報を加えた解析を行った．BVH 骨格における Hips joint を身体重心の近似位置とし，鉛直上向きを y' 軸，頸部–骨盤ベクトルの水平面成分を z' 軸，$x' = y' \times z'$ とする body-frame 座標系を各フレームで構築した．両前腕ベクトル $\vec{v}_L = \mathrm{wrist}_L - \mathrm{elbow}_L$，$\vec{v}_R = \mathrm{wrist}_R - \mathrm{elbow}_R$，および重心–手首ベクトル $\vec{r}_L = \mathrm{wrist}_L - \mathrm{hips}$，$\vec{r}_R = \mathrm{wrist}_R - \mathrm{hips}$ を定義し，以下の 14 構造指標を計算した: 前腕並行性 $\cos(\vec{v}_L, \vec{v}_R)$，ねじれ $(\vec{v}_L \times \vec{v}_R)\cdot y'$，COM–手首距離 $|\vec{r}|$ の左右平均と非対称度，radial 速度 $d|\vec{r}|/dt$ の振幅と FFT ピーク周波数，前腕–COM 整合角 $\theta = \angle(\vec{v}, \vec{r})$，手首軌跡の掃引角度．これらについても phase ごとに試技間 CV から再現性を評価した．

最後に，CV 選抜で再現性の高い手首指標 6 個 (rev5 primary set) と，それに独立性を持つ上肢構造指標 3 個 (前腕–COM 整合角 L/R, 重心–手首距離) を統合した 9 指標で多変量分散分析 (MANOVA) を実施した．2 群比較には Hotelling T^2，4 群比較には Wilks Λ を用い，効果量として partial η^2 を報告した．corner 間の相対距離は共分散を考慮した Mahalanobis 距離で評価した．また，phase 検出閾値を $v_{\mathrm{slow}} = 40$ cm/s に緩和したデータセットにも同一の解析手順を適用し，指標の頑健性を評価した．

表 1　Phase 検出閾値による grab phase 検出数の比較

Phase 検出閾値	Corner-FL	Corner-BL	Corner-FR	Corner-BR
slow = 25 cm/s	4	11	12	17
slow = 40 cm/s	15	22	24	24

5　結果

5.1　両手首を中心とした動作解析

26 試技の 4 隅について，左右手首の三次元位置および速度に基づく動作解析を行った．4 隅を表現する用語として，実験全体を撮影したビデオ機器の位置を基準に，手前と奥を定義した．実際に，熟練作業者が作業した順番は，26 試技のうち，作業順 1 番目は corner-FL，作業順 2 番目は，corner-BL で一貫していた．一方，作業順 3 番目は，corner-FR が 21 試技，corner-BR が 5 試技であり，作業順 4 番目は，corner-BR が 21 試技，corner-FR が 5 試技であった．

初期解析では，phase 検出に slow=25 cm/s を用いていたが，corner-FL の grab phase の検出数が 4 試技と少なく，一部の試技で grab 区間を十分に抽出できない問題が確認された．そこで，phase 検出閾値を slow=40 cm/s に変更して再解析した．その結果，grab phase の検出数は corner-FL で 15 試技，corner-BL で 22 試技，corner-FR および corner-BR で 24 試技まで増加した．表 1 に phase 検出閾値による grab phase 検出数の比較を示す．

以上から，slow=40 cm/s では grab phase を含む作業区間をより安定して抽出できると判断し，以降の主解析には slow=40 cm/s によるデータを用いた．

再解析では，各 phase について左右手首の速度優位性および左右手首間距離などの指標を算出し，試技間の再現性を評価した．その結果，`v_dom_adjust`，`hd_mean_adjust`，`hd_mean_fold`，`hd_mean_grab`，`v_dom_release`，`v_dom_fold` の 6 指標を採用した．これらは slow=40 による再解析において高い再現性を示した指標であり，左右手の速度関係および左右手首間距離を中心に動作特徴を表すものであると考えられる．

なお，本研究では指先を直接計測していないため，grab phase は指による把持そのものを表すものではなく，手首速度が閾値を下回る減速区間として扱っ

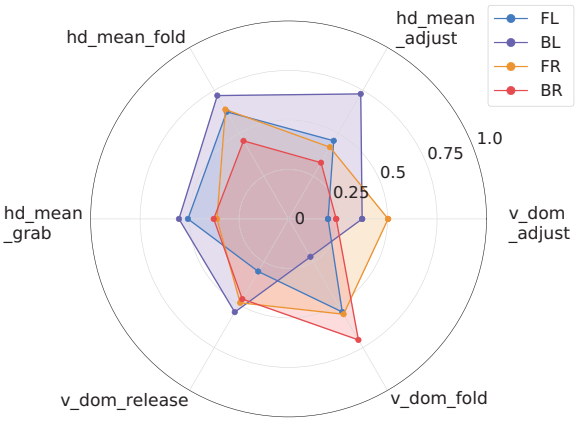

図 4　6 指標による 4 隅の動作評価．corner-FL: 左手前 (作業順 1 番目), corner-BL: 左奥 (作業順 2 番目), corner-FR: 右手前 (作業順 3・4 番目 majority), corner-BR: 右奥 (作業順 3・4 番目 majority).

た．また，両手距離（hand distance）は左右手首マーカー間の三次元距離を意味する．

図 4 に 6 指標による corner 特徴を示す．4 つの corner では各指標の組み合わせが異なり，corner ごとに特徴的な動作パターンが形成されていることが確認できる．なお，正規化 radar では peak 軸が corner 間で異なるため特徴量の違いが強調して表示されるが，後述する Mahalanobis 距離を用いた多変量距離評価では，corner-FL・BR 間および corner-BL・FR 間の距離が他ペアより小さく，対角位置に基づく類似構造の存在が定量的に示される．

さらに，6 指標を用いて corner 間の多変量比較を行った．4 隅全体を比較する $H_{4\mathrm{WAY}}$，corner-FL・BL と corner-FR・BR を比較する H_{AB}，corner-FL・BR と corner-BL・FR を比較する H_{DIAG} を設定し，MANOVA によって評価した．その結果，slow=40 では，H_{DIAG} の partial η^2 が 0.701，$H_{4\mathrm{WAY}}$ が 0.449，H_{AB} が 0.327 となった．

特に H_{DIAG} で最も大きな効果量が得られたことから，手首の位置および速度に基づく解析では，corner-FL・BR と corner-BL・FR という対角方向の関係が強く現れることが確認された．

また，slow=40 の 6 指標における Mahalanobis 距離は corner-FL–BR で 1.09，corner-BL–FR で 2.20 となり，対角ペア以外の組み合わせの平均 3.31 より小さい値を示した．特に corner-FL と corner-BR では手首を中心とした動作特徴が強く類似しており，対角位置に基づく動作の類似構造が示された．

一方，本研究で当初着目していた corner-FL・BL と corner-FR・BR の左右差（動作順）については，6 指標による解析では対角方向の類似性ほど明瞭には表現されなかった．この結果は初期観察における左右差（動作順）を否定するものではなく，手首の位置や速度のみでは左右の corner における身体の使い方を十分に表現できない可能性を示している．そこで，手首の運動に加えて上肢全体の構造を考慮した解析を行った．

5.2　上肢構造を考慮した動作解析

同じ 26 試技のデータを用いて，手首位置および速度に加え，肘を含む上肢構造を考慮した解析を行った．BVH 骨格における Hips joint を身体重心（COM）の近似位置として身体座標系の基準とし，左右の肘から手首へ向かう前腕ベクトルおよび身体重心から手首へ向かうベクトルを定義した．これらを用いて，前腕の方向と身体重心から手首への方向との関係，および身体重心から手首までの距離を算出した．

これらの構造指標について試技間の再現性を評価した結果，adjust phase における右前腕の整合角，身体重心から手首までの距離，左前腕の整合角などが高い再現性を示した．特に adjust phase の右前腕整合角は max CV=0.17，身体重心から手首までの距離は 0.26，左前腕整合角は 0.29 であり，高信頼指標として選定された．

さらに，これらの上肢構造指標と既存の手首中心指標との相関を調べた結果，最大の絶対相関係数は 0.38 であり，両者は同一の情報を単純に重複して表しているわけではないことが示された．したがって，上肢構造指標を追加することで，手首の位置や速度だけでは表現しにくい身体の使い方を評価できると考えられる．

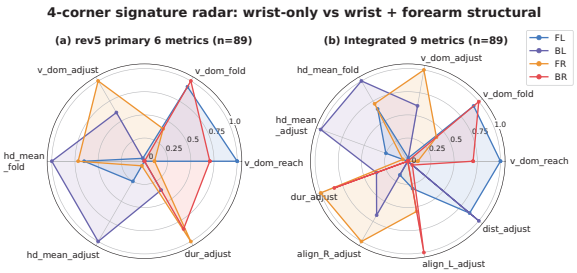

図 5　9 指標による 4 corner の動作特徴

5.3　6 指標と 9 指標による動作解析の比較

手首中心の 6 指標による解析結果を踏まえ，同じ 26 試技に対して，手首中心指標と上肢構造指標を統合した 9 指標による解析を行った．これにより，手首の運動情報と上肢全体の構造情報を同時に考慮した corner 特徴を評価した．

なお，本比較における 6 指標セット（`v_dom_adjust`, `hd_mean_adjust`, `hd_mean_fold`, `hd_mean_grab`, `v_dom_release`, `v_dom_fold`）は slow=40 での CV 選抜結果を反映しており，9 指標セット（`v_dom_reach`, `v_dom_fold`, `v_dom_adjust`, `hd_mean_fold`, `hd_mean_adjust`, `dur_adjust`, `align_R_adjust`, `align_L_adjust`, `dist_adjust`）は再現性の高い上肢構造指標との統合を優先した構成である．したがって，6 指標から 9 指標への変化は単純な指標追加ではなく，情報の異なる組み合わせによる比較となっている点に注意する．

図 5 に 9 指標による corner 特徴を示す．6 指標の場合と同様に corner ごとの特徴的なパターンが確認され，corner-FL と corner-BR では比較的近い傾向がみられた．このことから，上肢構造を追加した場合にも対角方向の類似性は維持された．

さらに，9 指標を用いて H_{DIAG}, H_{AB} および H_{4WAY} について MANOVA を行った．slow=40 による解析では，H_{DIAG} の partial η^2 は 0.644，H_{AB} は 0.573，H_{4WAY} は 0.488 となった．

表 2 に 6 指標と 9 指標による MANOVA の効果量を比較して示す.9 指標においても H_{DIAG} が最も大きな効果量を示したことから，対角方向の動作特徴が主要な特徴として維持されることが確認された．一方，

表 2　6 指標および 9 指標による MANOVA の効果量の比較

仮説	6 指標	9 指標	差
H_{DIAG}	0.701	0.644	−0.057
H_{AB}	0.327	0.573	+0.246
H_{4WAY}	0.449	0.488	+0.039

H_{AB} は 6 指標の 0.327 から 9 指標の 0.573 へ大幅に増加した．このことから，上肢構造に関する情報を加えることで，手首中心の解析では十分に表現されなかった corner-FL・BL と corner-FR・BR の左右差（動作順）がより明確に表現されたと考えられる．他方，H_{4WAY} は 0.449 から 0.488 と微増にとどまり，対角軸と左右軸の重ね合わせにより 4-way 全体構造も緩やかに強化されることが示された．

すなわち，仮説とした左右差（動作順）は，前腕の方向や身体に対する手の位置といった上肢構造を含めることで定量的に捉えられる動作特徴であったと考えられる．一方，H_{DIAG} は 9 指標でも最大の効果量を示しており，左右差（動作順）の存在によって対角方向の類似性が否定されたわけではない．4 隅の動作には，対角方向の類似性と左右方向の差が同時に存在しており，手首の運動と上肢構造を組み合わせることで，より複雑な動作特徴として捉えられることが示された．

なお，slow=25 と slow=40 による 9 指標の解析を比較すると，H_{DIAG}，H_{AB}，H_{4WAY} の partial η^2 の差はそれぞれ 0.014，0.031，0.008 であり，いずれも 0.05 未満であった. このことから，phase 検出閾値を変更しても corner 間の主要な動作差に関する結論は大きく変化しないことが確認された．

6　議論

熟練者動作における phase ごとの特徴について述べる．手首軌跡の掃引角度と身体重心方向への速度変化を用いて，動作を安定把持，線形引っ張り，移行動作，微細反復動作，広弧動作の 5 種類に分類した. その結果，熟練者の動作は，大きな手の移動，保持，方向転換，細かな調整など複数の運動パターンから構成されていた. 特に広弧動作は fold および adjust に多

く（各 47%，53%を占める），シーツを大きく移動・折り込む動作と対応していた. 一方，微細反復動作は grab phase（34%）で最も優勢であり，シーツを掴む瞬間の細かな手首調整と関連していた．また，adjust phase（19%）にも微細反復動作が現れており，折り込み後の微調整に対応すると考えられる．これらの結果から，熟練者は作業内容に応じて異なる運動パターンを phase ごとに使い分けている可能性が示された.

また，fold および adjust における左右手の動作パターンの一致率は，corner-FL で 53%，corner-BR で 40%，corner-BL で 33%，corner-FR で 27%であった．corner によって左右手の協調パターンが異なることから，手の役割分担についても corner の位置に依存した特徴が存在する可能性が示された．左側 corner (corner-FL・BL 平均 43%) は右側 corner (corner-FR・BR 平均 33.5%) より両手対称率が高く，H_{AB} と方向的には整合する部分がある．一方，corner-FL が最高で corner-FR が最低という順序は H_{DIAG} ないし H_{AB} のいずれの構造とも完全には一致せず，身体軸との位置関係や被験者の利き手性など複数の要因が関与する可能性がある.

7 結論

以上の結果から，熟練者のベッドメイキング動作には，corner の位置に応じた複数の動作特徴が存在することが明らかとなった. 手首中心の 6 指標では corner-FL・BR および corner-BL・FR の対角位置に類似性が認められ，特に corner-FL と corner-BR の Mahalanobis 距離が 1.09 と小さいことから，対角方向の動作類似性が検証された．一方，corner-FL・BL と corner-FR・BR の左右差（動作順）については，上肢構造情報を加えることでより明確に捉えることができた．9 指標による slow=40 の解析では，H_{AB} の partial η^2 が 0.573 となり，6 指標の 0.327 から大幅に増加した. この結果は，熟練者が左右の corner に対して単に手首を異なる位置へ移動させているだけではなく，前腕の方向や身体に対する手の位置を変化させながら作業を行っている可能性を示唆する.

したがって，熟練者の動作は，「手がどのように動いたか」という手首中心の運動情報と，「その動作をどのような上肢姿勢で実現したか」という構造情報の両方から捉える必要があると考えられる. 特に，同様の手首軌道であっても肘や前腕の位置・方向が異なれば，身体全体としての動作姿勢は異なる. このことは，熟練者の動作をロボットへ応用する上でも重要である．今後は，手首の軌道，左右手の協調，上肢構造，シーツ状態および力情報を統合することで，熟練者が行っている作業状態の判断と動作調整をモデル化し，ロボットの動作計画および力制御へ反映することが期待される.

謝辞 ベッドメイキング作業の計測および実験については，株式会社山﨑ビル環境サービスによる計測環境の提供ならびに熟練者のご尽力を頂いた．関係各位に深く感謝申し上げる．本研究の一部は，九州工業大学–株式会社山﨑ビル環境サービス間の共同研究の支援を受けた.

参 考 文 献

[1] Liu, R., Kimachi, K., Tai, K., Hakata, H., Sakamoto, K., Koido, M., Nakayama, M., and Asai, T.: Kinematic factors associated with first-touch control and trap-to-pass transition in football during a dynamic receive-to-pass task, *Football Studies*, Vol. 2(2026), pp. 100071.

[2] REBOCAP: Hong Kong Rebocap Technology Co., Limited, https://rebocap.com/.

[3] 佐久間亨, 木村健作, 小林真: 慣性センサ式モーションキャプチャで収集した 3 次元関節キネマティクスデータに基づく正常歩行の標準値, 日本リハビリテーション医学会誌, Vol. 61, No. 1(2024), pp. 50–63.

[4] 厚生労働省: 労働経済動向調査, 2026. https://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/koyou/keizai/2602/dl/4kekkagaiyo.pdf, 2026 年 8 月 9 日参照.

[5] 山住康恵, 櫻井美奈, 中村昌子, 竹安晶子, 中原るり子: A 大学看護学生のベッドメイキングにおけるボディメカニクス習得に関する研究, 日本看護学教育学会誌, Vol. 30, No. 3(2021), pp. 75–85.

[6] 高津愛結, 前田奈那子, 安部茉里, 玉井夏帆, 小林美綺, 齋藤このみ, 松平明日絵, 由井愛莉, 横畑智洋, 渡辺千華子, 岩渕起江, 前田竜耶, 原口昌宏, 竹内朋子: エアマットレスに対するずれにくいベッドメイキングの検討 – 三角法と結び法の比較, 日本看護技術学会誌, Vol. 18(2019), pp. 108–114.

[7] 松河剛司, 横山清子, 梅谷智弘, 永田雅典: モーションキャプチャと 3DCG を用いた動作解析システム, 人間工学, Vol. 45, No. 1(2009), pp. 12–18.

[8] 稲邑哲也: ジャイロ式モーションキャプチャシステムと ロボット研究への応用, バイオメカニズム学会誌, Vol. 33, No. 1(2009), pp. 85–87.