



シリーズ

研究の動向

■ 3D技術を活用したアパレル設計の高度化に向けて —体形研究とバーチャルボディ開発の視点から—

日本女子大学 武本 歩未

1. はじめに

近年、製造業をはじめとする幅広い分野において、3Dデータを用いた設計支援ソフトウェアが導入され、製品設計の現場で利用されている。特に、人間が使用するものの設計においては、仮想空間内で寸法や形状を決定するだけでなく、使用者の人種や性別、年齢といった属性に加え、製品が使われる環境、天候、気候などをモデル化し、製品の機能性を評価する取り組みが広がっている¹⁾。

アパレル設計の分野でも、着装シミュレーションシステムの活用が進み、人体の寸法や形状、動作等の情報を反映したバーチャルボディを用いて、衣服の体形適合性や動作適合性が評価されるようになった。このような取り組みは、機能性を重視するスポーツウェアをはじめ、スーツ、カジュアルウェア、寝衣など、様々な服種の設計でみられる。すでにISOでは、デジタルフィッティングを用いた性能評価に関する規格²⁾が制定されており、今後ますます普及するものと考えられる。

仮想空間内で衣服の性能を適正に評価するには、衣服を着用する人間の身体の寸法や形状を適切にモデル化した高精度のバーチャルボディが必要となることから、人体の三次元形状データを用いた体形分析、体形分類、平均化に関する研究が盛んに行われている^{3)~7)}。これらの一連の研究の基礎となるのが、産業技術総合研究所によって開発された相同モデル⁸⁾の技術である。著者が大学院生時代に在籍していた日本女子大学・大塚美智子名誉教授の研究室でも、2008年頃から相同モデルを前提とした主成分分析やクラスター分析による体型特徴の抽出や類型化の研究が行われるようになった^{9)~11)}。このよう

に、著者の研究活動の当初から、三次元形状データや相同モデルを用いた体形研究のための環境が整っていたことにとても感謝している。この環境がその後の研究の基盤となり、方向性を定めるものとなった。

本稿では、これまでに著者らが取り組んできた相同モデルを用いた体形研究やこれを応用したバーチャルボディの研究について紹介し、今後の課題について言及する。なお、相同モデルの詳しい説明については、参考文献^{8)12)~14)}を参照いただきたい。

2. 相同モデルによる体形分析の手法の検討¹⁵⁾¹⁶⁾

相同モデルの基本的な考え方として、「形状モデルは人体座標系を基準に表現する」という点がある⁸⁾。相同モデルの統計処理は、このモデルを構成する各ポリゴン頂点の座標値(x,y,z)を用いるため、モデルの原点や座標系は、人体の基準点や形状に基づき定義されなければならない。三次元座標系における相同モデルの位置が共通化されていない場合には、主成分分析による形状特徴の抽出において、「形状計測時の被験者の立ち位置」など体形特徴以外の因子が抽出されることもある。そのため、座標系の定義は大変重要な工程である。

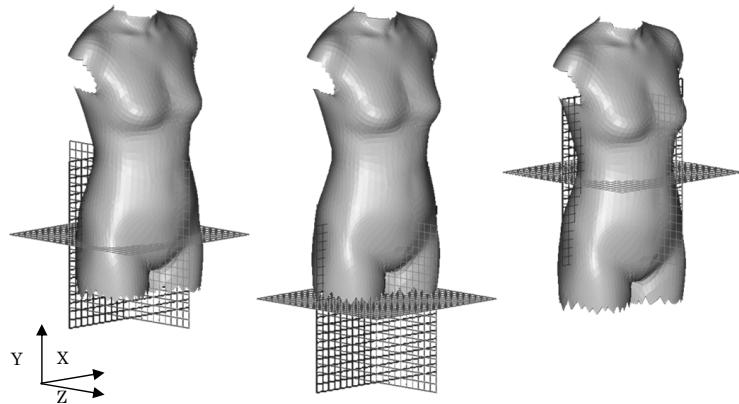
相同モデルを用いた研究は、前述のとおり、形状分析や類型化に関するものはあるものの、相同モデルの生成方法や分析方法そのものに関する報告は少ない。現在、ISOでは3Dボディデータの形状分析手法の策定が検討されているが¹⁷⁾、現状では、この座標系の定義に関して、標準化された手法ではなく、分析対象の形状データや分析目的に応じて、研究者が検討する必要がある。

相同モデルの座標系の共通化の手法として、人体の解剖学的な基準点を用いる方法や、形状データの各ポリゴン頂点の重心位置を用いた方法などが用いられるが、各手法の特徴を比較し、まとめた報告はみられなかった。そこで、著者らは、20~70歳女性123名の相同モデルを用い、図1に示す3つの条件で座標系を共通化し、それぞれに主成分分析を施し、結果を比較した¹⁶⁾。

Ayumi TAKEMOTO

日本女子大学家政学部被服学科 講師

〔著者紹介〕(略歴)日本女子大学家政学研究科被服学専攻修了。日本女子大学家政学部被服学科助手、助教を経て、2022年4月より現職。
〔専門分野〕被服構成学、被服体型学。さまざまな人を対象に、人体の寸法・形状・動作姿勢に着目し、3Dデータを活用した体形研究、衣服設計に役立つバーチャルボディの研究を進めている。



条件1：
体幹部形状の頸椎点
のX座標、転子点のY
座標、頸側点のZ座標
が0となるように移動

条件2：
体幹部形状の慣性主
軸をY軸に変換した後
に、体幹部形状のY座
標の最小値が0となる
ように移動

条件3：
体幹部形状の慣性主
軸をY軸に変換した後
に、体幹部形状の後
ろウエスト点のY座標
が0となるように移動

図1 座標系の共通化の条件

(文献16 図1～3を改変)

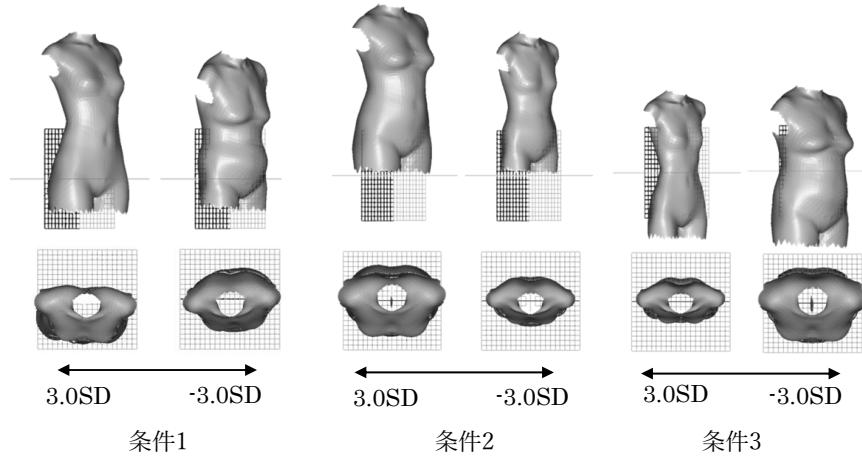


図2 各条件における第1主成分得点の±3.0標準偏差 (SD) に位置する仮想形状

(文献16 図4～6を改変)

条件1では、人体の解剖学的な基準点を用いて座標系を共通化した。これに対し、条件2、3では、形状データの重心を求め、そこから得られた慣性主軸をY軸とした。さらに、条件2では原点を体幹部形状の最下点に設定したのに対し、条件3では、ウエスト位に設定した。

図2は、条件ごとに主成分分析を施し、抽出された第1主成分得点の±3.0標準偏差 (SD) に位置する仮想形状を示した。これらは、第1主成分軸の両端がもつ特徴を表現した形状であるため、3.0SD形状と-3.0SD形状の特徴や相違を観察することで、主成分を解釈できる。条件1および条件2では、±3.0SD形状間で体幹部の高さに差がみられたことから、主に高さを表す成分と解釈した。加えて、頭上図の比較から、条件1では±3.0SD

形状間で座標系の原点に対する腰部の位置に差があり、この主成分には体幹部の傾きを表す成分も含まれていた。次に、条件3では、±3.0SD形状間で、主に体幹部の周径に差がみられたことから、幅や厚みの大きさを表す成分が抽出され、条件1、2とは異なる傾向を示した。これは、原点を形状データの中間位に設定したために、高さ(Y方向)のばらつきが小さくなったことによるものと考えられる。

このように、相同モデルの座標系の共通化の手法の相違により、主成分分析で抽出される成分が異なることが確認された。座標系の共通化に解剖学的な基準点を用いる場合、身体の傾きに関する成分が抽出される。これは姿勢にかかわる重要な成分であるものの、人体の外形そのものの

特徴を明瞭に捉えるためには、身体の傾きやねじれを調整することも必要である。また、この方法は、三次元形状計測時に専門家によって精度高く人体の基準点の設定ができた場合にのみ有効な方法であると考えられる。

形状データの各ポリゴン頂点の座標値を用いた共通化の手法では、数理的に形状データ間の傾きや回転が調整されるため、身体の傾きやねじれの成分は抽出されにくい。しかし、人体の外形を捉えることを主目的としている場合には有効な方法といえる。さらに、条件3のように、身長などばらつきが大きい成分を調整することで、衣服の補正に関わる新たな形態特徴が捉えられる可能性がある。このように、これらの方法はいずれも一長一短があり、研究目的や解析対象に応じて適切な手法を選択する必要がある。

3. 男女兼用衣料のための成人男女混合の体形分析

被服分野における体形研究は、年齢層や性別などの属性に適合した衣服を設計することを目的としているため、対象集団ごとに区分して実施されてきた。一方で、近年ではユニセックス衣料や男女兼用サイズなど、着用者の性別を問わない衣服が市場でも多くみられる。しかし、現状の男女兼用衣料のサイズ展開は、男性のサイズ表を

基準に女性用の小さいサイズが加えられたものが多く、女性の体形への適合性には課題がある。男女兼用衣料における体形適合性向上のためには、男女の体形の寸法的な差異だけでなく、形態的な差異また共通性を捉えておく必要がある。

そこで、20~30歳代の男女各52名の形状データを一括して主成分分析を施し、男女の体形の差異や共通性を捉えることを目的として検討した¹⁸⁾。図3は、取得した第1と第5主成分得点の散布図である。図中には、各主成分得点の±2.0SDに位置する仮想形状も併せて示している。第1主成分得点では、2.0SD形状の体格は小さく、乳房のふくらみのある女性的な体形、-2.0SD形状の体格は大きく、男性的な体形特徴がみられ、体格の大きさと性差を表す成分と解釈できる。さらに、正の方向に女性、負の方向に男性が分布する傾向がみられた。一方、第5主成分得点では、2.0SD形状は胴部にくびれがあるのに対し、-2.0SD形状はその傾向がみられず、胴部のくびれを表す成分と解釈できる。ただし、この得点では男女が混在して分布しており、胴部のくびれの大小は、男女共通の形態特徴であることが確認された。

このように、性別による明確な形態差がある一方で、性別では明瞭に区分できない特徴があることが明らかと

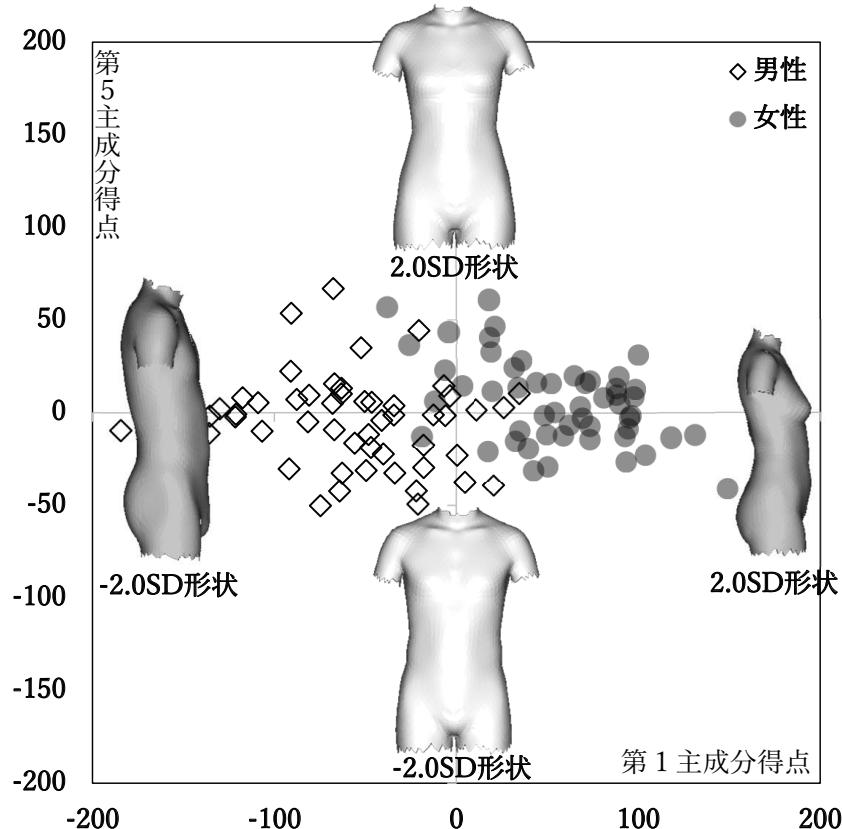


図3 男女一括の主成分分析における第1と第5主成分得点の散布図、および各主成分得点の特徴を表す仮想形状

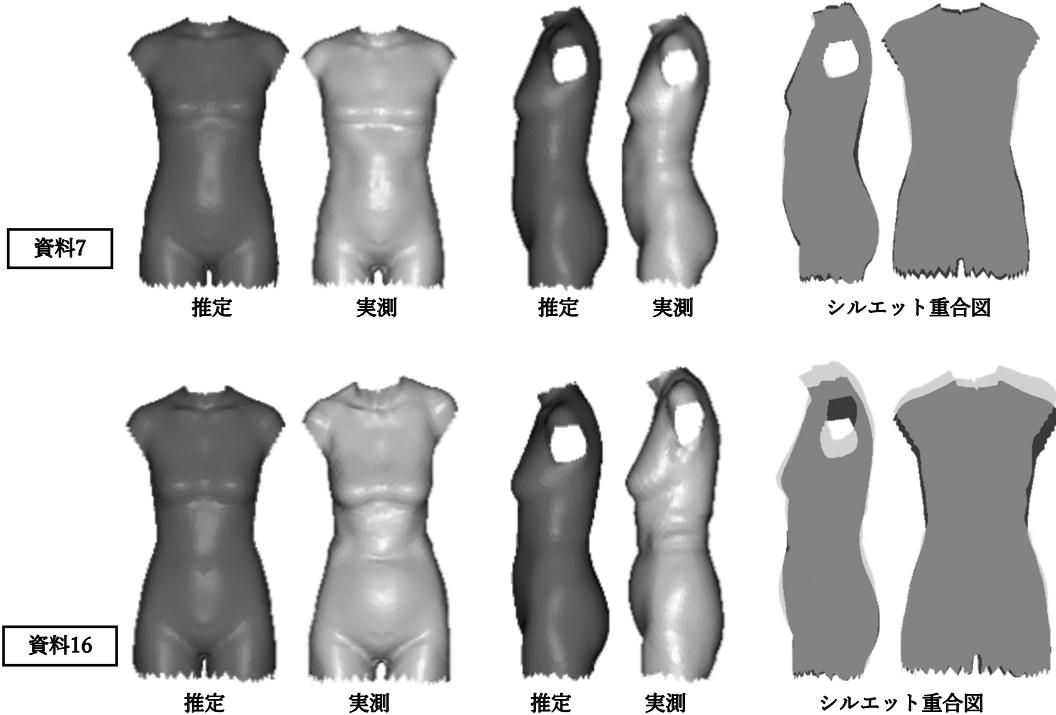


図4 推定体幹部形状と実測体幹部形状の比較（黒：推定体幹部形状、灰：実測体幹部形状）
(文献19 図7を改変)

なった。男女兼用衣料の設計においては、性別に共通する形態特徴と形態差を適切にカバーした設計、サイズ展開が求められる。

4. 人体寸法データを用いた体形推定¹⁹⁾とバーチャルボディ生成への応用²⁰⁾

人体寸法・形状データを活用した体形研究や製品設計のためのバーチャルボディ研究が進められ、特定の年齢層や属性における体形データは整備、活用されている。しかし、アパレルの生産現場の多様な目的に応じたデータ整備は依然として十分ではなく、製品の設計や評価に必要な体形の情報を、その時々の条件に応じて出力し、活用できる環境やデータベースの整備が求められる。

このような背景から、著者らは、さまざまな着用者層に対応したバーチャルボディの開発を目指して、研究を進めている。既報¹⁹⁾では、三次元人体形状データの主成分分析で得られた主成分得点と人体寸法データとの対応関係を重回帰分析により明らかにし、人体寸法データを用いて体幹部形状を推定する方法を提案した。

この方法で推定した25体の体幹部形状群と、これに対応する実測の体幹部形状群の主要身体寸法項目について平均値の差の検定をしたところ、いずれの項目においても両群間に有意差は認められなかった。図4に、25体のうち、推定精度が高かった資料7と精度が低かった資料16について、推定体幹部形状と実測体幹部形状、さらに

それらのシルエット重合図を示す。資料7では、推定体幹部形状は、高さ・幅・厚みにおいて実測体幹部形状の特徴を高精度で再現していた。一方、資料16では、推定体幹部形状の高さが低く、矢状面における背面の湾曲度も小さく再現され、加えて、実測体幹部形状でみられる肩の高さの左右差は再現されなかった。

このように、人体の部分的な形態特徴の推定には課題が残るもの、人体のサイズは高精度で推定できることがわかった。現在、この推定方法を応用し、成人男子用・女子用の衣料サイズ規格に対応したバーチャルボディの開発を進めている²⁰⁾。これが実現できれば、アパレル設計の3D化に大きく寄与できると期待している。

5. バーチャルボディを用いた動作適合性の評価における課題への取り組み

人体の形状を精度高く再現したバーチャルボディを用いれば、仮想空間内でも実在の人体に衣服に着用させた状態と同様に、体形適合性の評価が可能となる。一方、動作適合性については、バーチャルボディに動きの情報を組み込んだ際に、バーチャルボディの形状が不自然に変形する部位もみられ、動きに伴う形状変化を精度よく再現できないことが課題となっている。

この要因として、ボディの体表形状と骨格モデル（ボディ内部の骨格）との運動関係が不十分であることがあげられる。仮想空間内で衣服の動作適合性を適正に評価

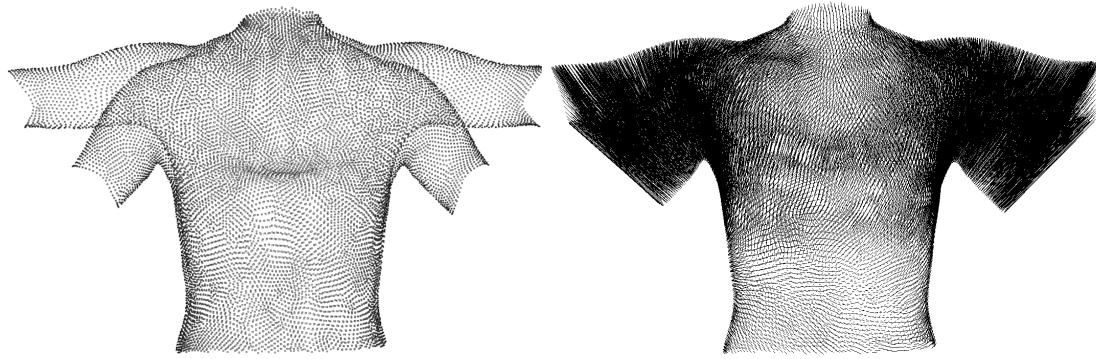


図5 平均形状（外転45°と90°）とそれらの対応する各ポリゴン頂点間を結んだ線分
(文献24 図10を改変)

するためには、動きに伴うバーチャルボディの形状変化の精度を向上させることが不可欠であるため、この問題に対して、機械工学、コンピューターグラフィックス、機械学習などの分野で学際的に研究が進められているが^{21)~23)}、アパレル用3D-CADへの実装は現段階では達成していない。

本研究では、被験者16名を対象に、三次元形状計測を行い、腕を側方に45°開いた姿勢（外転45°）と90°開いた姿勢（外転90°）の二つの姿勢のデータを取得し、これらを相同モデル化して、それぞれの平均形状を求めた²⁴⁾。外転45°と90°の相同モデルは、対応のある同一頂点数のデータで構成されているため、対応する頂点のxyz座標値を用いれば、両平均形状の各ポリゴン頂点間の距離を算出できる。図5は、両平均形状の頂点群とそれらの対応する各ポリゴン頂点間を線で結び、変化の方向を可視化したものである。このように動作時の姿勢における三次元形状データの頂点座標の変化を定量化し、モーフィング技術（ある形状や画像を別の形状や画像に滑らかに変化させるCGの手法）に応用することで、3Dモデルの各ポリゴン頂点位置を線形補間して形状を変化させ、自然な形状を持つバーチャルボディを生成することができる。本手法により生成した“動態バーチャルボディ”は3D-CADに取り込むことが可能であり、これを用いることで精度の高い動作適合性評価が可能になると考えられる。

6. おわりに

海外では、3D-CADを活用した衣服設計が盛んに行われるようになり、これに対応すべく、米国や欧州の企業では、多様な集団の体形情報の収集やバーチャルボディの整備が進められている。一方、日本ではアパレルメーカーにおける3D-CADの導入は進んでいるものの、衣服設計の現場で本格的に活用されている例は一部にとどまる。これは、3D-CAD活用に必要なデータ整備、人材、

コストなどの要因に加え、従来のフィジカルでの衣服設計技術、生産体制が確立しており、新たな手法が入り込む余地が少ないことも一因と考えられる。

今後、3D-CADによるアパレル設計が持続可能な取り組みとして大きな役割を果たすためには、フィジカルでの設計手法の代替として用いるのではなく、従来では実現できなかった設計や性能評価を可能にする手段としての活用が期待される。3D技術を活用したアパレル設計の高度化に向け、今後も研究を進めていきたい。

付 記

本研究の一部は、JSPS 科研費JP25242010、JP16H03029およびJP19H01614の助成によって行われたものであり、ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 内田孝尚. バーチャルエンジニアリングのもたらす産業革新. 日立総合計画研究所研究レポート外部寄稿. 2022, 17, 2-3. <https://www.hitachi-hri.com/research/contribution/file/Vol17-2-3.pdf> (閲覧 2025.3.28).
- 2) ISO 20947-3. Performance evaluation protocol for digital fitting systems. 2023.
- 3) 渡邊敬子, 木爪佳奈子, 田中千尋, 杉本由紀子. 衣服設計のための若年女性の肩部形状の3次元的把握. 京都女子大学生活造形学教室. 2006, 51, 53-58.
- 4) Watanabe, K. Body Type Classification of the Three-dimensional Torso Shape of Japanese Men Aged 20 to 70 Years for Efficient Clothing Design. *Proceedings of 3DBODY.TECH 2017, 8th.* 2017, 347-355.
- 5) 丸田直美, 宮武恵子, 小松千佳. アパレル製品設計のための50代女性の3Dシミュレーションモデル開発に向けての研究 (基盤研究 (C) 16K00796). 研究成果報告書. 2019.
- 6) 渡邊敬子, 川向美緒. 三次元計測データに基づくボディ

- 設計のための体型分類. 織消誌. 2024, 65, 6, 417-424.
- 7) 島公嗣, 梅本実穂, 土肥麻佐子. ラグビージャージーの体型適合性を高めるための3次元人体形状分析とデジタルボディの試作. 織消誌. 2024, 65, 11, 768-775.
 - 8) 国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター. “AIST/HQL 人体寸法・形状データベース2003相 同 モ デ ル”. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/fbodydb/model/index.html> (閲覧 2025.3.14).
 - 9) 田中あづさ, 大塚美智子. 後期高齢女性の下半身ボディ設計のための体型分析. 日本女子大学大学院紀要. 家政学研究科・人間生活学研究科. 2010, 16, 13-18.
 - 10) 全ソyun, 大塚美智子, 武本歩未. 高齢女性の座位姿勢の体幹形状の分析. 日本家政学会誌. 2013, 64, 10, 655-661.
 - 11) 張立娜, 武本歩未, 大塚美智子. 三次元計測データに基づく中国人中高年女性の体型特徴の分析. 日本家政学会誌. 2015, 66, 11, 563-573.
 - 12) 持丸正明. Digital Humanに基づくボディ開発. 織消誌. 2001, 42, 2, 87-91.
 - 13) 財団法人機械システム振興協会（委託先 社団法人 人間生活工学研究センター）.“精密な人体形状相同モデル化システムの開発と製品設計への適用に関するフィージビリティスタディ報告書”. 2006. https://www.hql.jp/hql/wp/wp-content/uploads/2017/08/sodo_model2006.pdf (閲覧 2025.9.17).
 - 14) 持丸正明. 人体モデルが健康とファッショントをつなぐ. 産総研 TODAY. 2007, 7, 8, 16-17.
 - 15) 武本歩未, 大塚美智子. 相同モデルを用いた体型分析方法に関する検討—生成方法および分析方法の相違による統計解析への影響—. 日本女子大学大学院紀要. 家政学研究科・人間生活学研究科. 2021, 27, 219-226.
 - 16) 武本歩未, 大塚美智子. 相同モデルを用いた体型分析方法に関する検討—生成方法および分析方法の相違による統計解析への影響—. 日本女子大学大学院紀要. 家政学研究科・人間生活学研究科. 2022, 28, 211-216.
 - 17) ISO/AWI TS 20756. Clothing — Body shapes — Shape analysis of 3D body scan data. Under development.
 - 18) 武本歩未, 中村朱里, 鯨岡詩織, 大塚美智子. 男女兼用衣料設計のための成人男女混合の体形分析. 織維製品消費科学2024年度年次大会要旨集. 2024.
 - 19) 武本歩未, 大塚美智子. 手計測データの重回帰分析による三次元人体形状の推定—アパレル3D-CADのためのバーチャルボディ生成方法の精度検証—. 織維製品消費科学会誌. 2021, 62, 5, 303-316.
 - 20) 武本歩未, 横井孝志, 大塚美智子. 成人男子用衣料設計のためのサイズ別バーチャルボディの開発—バーチャルボディの生成と実用化に向けた検証—. 織維製品消費科学2025年度年次大会要旨集. 2025.
 - 21) Loper, M.; Mahmood, N.; Romero, J.; Pons-Moll, G.; Black, M. J. SMPL: a skinned multi-person linear model. *ACM Transactions on Graphics*. 2015, 34, 6, Article 248.
 - 22) Murai, A.; Hong, Q. Y.; Yamane, K.; Hodgins, J. K. Dynamic skin deformation simulation using musculoskeletal model and soft tissue dynamics. *Computational Visual Media*. 2017, 3, 1.
 - 23) Rudolf, A.; Stjepanovic, Z.; Cupar, A. Study Regarding the Kinematic 3D Human-Body Model Intended for Simulation of Personalized Clothes for a Sitting Posture. *Materials*. 2021, 14, 5124.
 - 24) 武本歩未, 横尾優美, 横井孝志, 大塚美智子. 相同モデルを用いた人体の形状変化の分析—肩関節外転に伴う人体の寸法, 形状の変化—. 日本女子大学大学院紀要. 家政学研究科・人間生活学研究科. 2024, 30, 119-125.