

デジタルヒューマン技術の最新動向と建設機械への適用可能性

持丸 正明

人間の機能をコンピュータ上にモデル化し、製品と人体の相互作用を、製品 CAD データと人間モデルとでシミュレーションするデジタルヒューマン技術が研究されている。本稿では、産総研で開発している「Dhaiba」というデジタルヒューマン技術の概要を通じて、デジタルヒューマン研究の動向を紹介するとともに、建設機械設計への適用を展望する。

キーワード：人間工学，人間中心設計，デジタルヒューマン

1. はじめに

デジタルヒューマン技術とは、人間の構造や機能をコンピュータ上に再現して、人間と製品の相互作用をコンピュータ上でシミュレーションする技術である。細胞、臓器、血管、筋骨格系の詳細構造をモデル化して、薬剤や医療機器と人体との相互作用をシミュレーションすることで医療に役立てる研究がある。また、臓器、筋骨格構造と慣性特性をモデル化し、自動車衝突シミュレーションに活用している研究もある。一方で、人間の体形、運動、変形、感覚をマクロな機能レベルで再現して、製品の人間工学評価に利用している事例もある。産総研デジタルヒューマン研究センター（以下、DHRC）では、主としてマクロな機能レベルの人体モデルを研究し、製品の人間中心設計への活用を進めている。本稿では、このような機能レベルでのデジタルヒューマン技術に着目し、筆者らが開発している人体機能モデル「Dhaiba」の概要説明を通じて最新研究動向を紹介し、建設機械設計への適用を展望する。

2. デジタルヒューマン技術の動向

機能レベルでのデジタルヒューマン技術は、1990年代から本格的に研究され、実用化されてきた。これらはコンピュータマネキン（computer manikins）と呼ばれることが多く、CADで設計された製品モデルの空間に、人間モデルを持ち込んで到達域や視野などをチェックする目的で利用が始まった。人間中心設計における最大の困難性は、個人差対応にあると言って

良い。設計者自身も人間であるわけで、そもそも人間にとって使いにくいように設計することはあり得ない。それにもかかわらず、使いにくい製品が設計されてしまうのは、設計者が自分以外の人間の特性を予測しきれないことに原因がある。「そんなユーザがいるとは思わなかった」という言葉に象徴される。デジタルヒューマン技術とは、「こんなユーザがあり得る」ことを、設計段階で設計者に知らせる効能を持っている。

現在、市販コンピュータマネキンとしては、SIEMENS社の Jack、Human Solutions 社の RAMSIS、Dassault 社の SafeWork の3つがよく利用されている。Jack は、ペンシルベニア大学の Badler 教授らのチームが、RAMSIS はミュンヘン工科大学の Bubb 教授らのチームが、SafeWork はカナダの Genicom Consultants という企業が開発したものである¹⁾。それぞれ、CADと連携しており、CAE ツールのひとつとして位置付けられている。自動車、航空機産業で幅広く活用されており、工場のライン設計や福祉機器開発でも利用されつつある。無論、人間のすべての機能を再現できているわけではなく、デジタルヒューマン技術そのものは開発途上である。世界各国の大学や研究機関で、継続して研究が進められている。上記の大学の他に、ミシガン大学（HUMOSIM）、アイオワ大学（Santos）、オランダ TNO、フランス INRETS、そして、DHRC（Dhaiba）が拠点となり、研究開発を進めている。

市販コンピュータマネキンの現時点での技術課題は、おおむね、以下のようなものである²⁾。

①人体機能寸法の再現精度：集団を代表する体形モデルに所定の姿勢を与えたとき、手先の到達寸法など

の機能寸法が精度良く再現できないことがある

- ②運動の自動生成：製品を操作するときの運動を自動生成する機能が乏しく，ユーザがいくつかのキーフレーム姿勢を構成して中間姿勢を自動補間したり，モーションキャプチャで実測したデータを使うなどの手間が必要である
- ③負担，快適性の仮想評価：操作負担，快適性の評価機能が十分ではない
- ④詳細な手の機能の再現：手先による操作，把持などを再現できるだけの十分な精度の手のモデルがない，もしくは，上記の操作，把持姿勢を生成する機能が乏しい
- ⑤認知行動機能の再現：人間が外部環境を認識して，それに応じて行動を選択する機能が再現できていない

3. 人体機能モデル Dhaiba の開発

DHRC では，2 節で述べた技術課題のうち，①から④の課題を解決するための研究開発を進めてきた。センターでは，機能的にモデル化する (Functional)，科学的根拠とデータに基づいてモデル化する (Authentic)，個人差をモデル化する (Variational) の 3 つのコンセプトに基づいて開発を進めている。

(1) 体形モデル

市販コンピュータマネキン，ロボットのように体節が関節で接続された外観を持つものが多い。一方，近年，人体 3 次元形状スキャナによって体表面形状と解剖学的特徴点を簡便かつ大量に計測できるようになった。Dhaiba プロジェクトでは，このデータに基づきアパレル分野などでも活用可能なリアルな外観を持つ体形モデルを開発している。従来の体節モデルの代表体形構成に用いられる人体寸法は，個人間で計測項目が対応しており多変量統計がそのまま適用できる。これに対し，3 次元形状データは個人によってデータ点数が異なり，単純な比較統計ができない。そこで，実測した解剖学的特徴点を手がかりに，Dhaiba モデルを実測した 3 次元形状データにフィッティングする技術 (図-1 左) を開発した。これにより，すべての個人の 3 次元体形が解剖学的に対応付けられた同一点数の多面体モデル (人体相同モデル) で表現されることになる。この頂点データを主成分分析することで，3 次元体形の個人差を 20 程度の主成分に圧縮して表現できる。この主成分を用いて，日本人集団を代表する統計的な代表体形モデルを構成した (図-1 右) ³⁾。

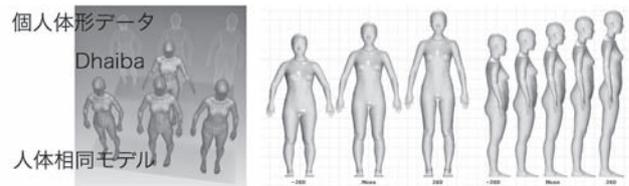


図-1 体形相同モデリングと代表体形モデル

(2) 機能的関節構造モデル

先に挙げた技術課題①の機能寸法とは，手を前方挙上したときの到達寸法など，特定の姿勢での寸法を指す。市販のコンピュータマネキンでは，手足の寸法や全身寸法を入力して体形モデルを生成する。この体形モデルの手を前方挙上させ，その機能寸法をコンピュータ内で計測して，それを人間の実測寸法と統計的に比較することで精度を検証した。この結果，+ 40 から - 80 mm にもおよぶ寸法誤差が生じていることが分かった ⁴⁾。この主たる要因は，肩関節の構造を単純にモデル化している点にある。そこで，DHRC では，上肢と体幹にそれぞれ 3 点以上のマーカを貼り，その運動から瞬間中心に準ずる考え方で生体内の機能的関節中心を最適化計算する技術を開発した。体幹に対する機能的な肩関節中心の軌道曲面をモデル化することで，機能寸法を精度良く再現 (誤差 10 mm 以下) するモデルを提案した。この方法を全身の関節に拡張して全身機能的関節中心データを多数の被験者で計測した。これを，主成分分析することで，機能的関節構造の個人差を代表するモデルを構成している (図-2) ⁵⁾。

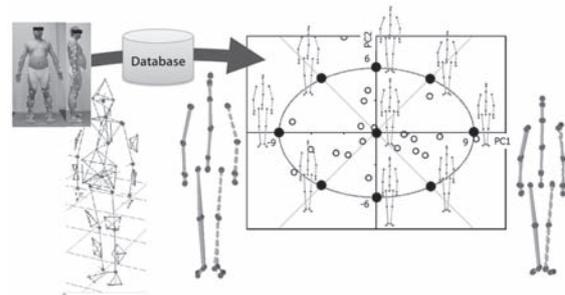


図-2 機能的関節構造の代表モデル

(3) 運動生成モデル

人体モデルの運動を自動生成する研究は，コンピュータグラフィクス，バイオメカニクス，ロボティクスなどの分野で研究されている。エネルギー消費最小，筋疲労最小のような評価関数を最適化することで運動を生成する方法が提案されている。歩行などの基本動作の生成には成功しているが，複雑な運動の生成は実現できていない。そこで，DHRC では，実測した運動データベースに基づいて中間的な運動を生成する

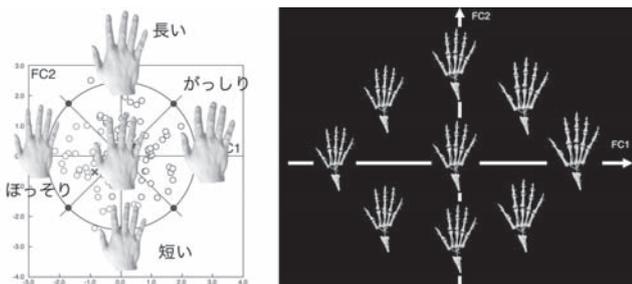
アプローチを選択した。製品の設計寸法を変えた場合の運動を異なる人体寸法の被験者で実測し、時間軸にキーフレームを設定して関節角度の対応づけを行い、一連の運動をキーフレーム×関節数の多次元ベクトルとして表現する。これを設計寸法に対してマッピングし、任意の設計寸法について近傍の設計寸法の実測運動データを重みつきで合成する⁶⁾。運動データベースを蓄積しなければならないというデメリットはあるが、技術そのものは汎用性が高く、図一3に示す乗車運動のみならず、ペダル操作、サイドブレーキ操作などにも適用可能であることを確認している。これらの技術は、複数の自動車会社の社内CADシステムに実装され、活用が始まっている。



図一3 設計寸法に応じて生成された乗車動作

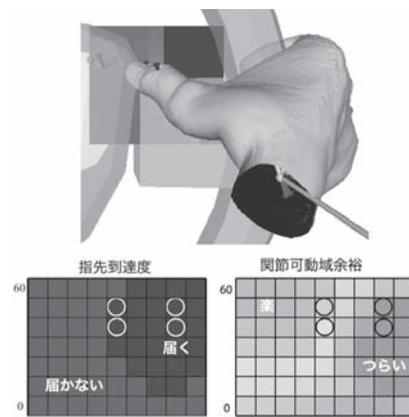
(4) 手の機能モデル

スイッチ操作などを模擬するには、全身モデルよりも解像度の高い精密な手の機能モデルが必要となる。DHRCでは、300人の男女について80箇所の寸法を独自に計測し、因子分析に基づいて日本人を代表する手の表面形状モデルを構成した(図一4左)⁷⁾。さらに、その関節構造をモデル化するために、異なる姿勢で取得したMR画像から骨領域を抽出して、関節の屈曲軸と関節中心を精度良く計算する技術を開発した。前述の300人のうち20人についてMR画像から関節中心を計算し、その関節間距離を外部寸法から計算する回帰式を得た。これに基づいて代表手モデルの関節構造モデルを構成した(図一4右)⁸⁾。



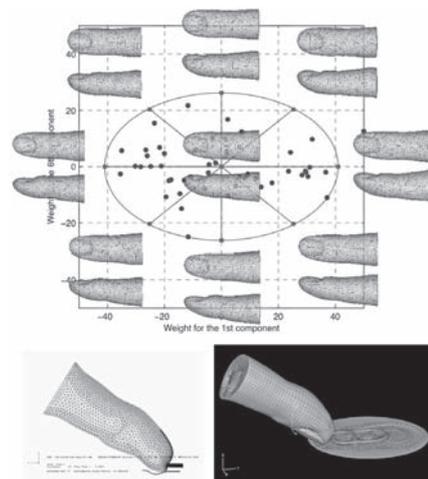
図一4 手の代表形状モデルと代表関節構造モデル

運動データベースを用いて、製品の操作姿勢を自動生成することができる。(3)と類似した方法で、実測した運動データを補間合成し、さまざまな中間姿勢を計算した。図一5は自動車のステアリングスイッチ操作姿勢を生成した結果である。運動データベースには、スイッチエリアの直方体の頂点に相当する8つの実測姿勢データが格納されており、この範囲内の任意の位置での操作姿勢を計算によって推定した。さらに、指先の到達可能性、および、操作姿勢における関節可動域余裕を評価することで、スイッチの押しやすさを仮想評価できることを示した。評価結果は、心理実験の結果と合致した⁹⁾。



図一5 ステアリングスイッチ操作姿勢生成と操作性評価

指先がスイッチなどに触れたときの指先の変形と摩擦の機能を再現するために、指先を3次元の有限要素モデルとして構成した。個人ごとの有限要素モデルを簡便に構成するために、指先のMR画像間の空間相違を歪み関数で表現し、それをモデル変形に適用する技術を開発した。50人の指先MR画像から個人ごとの有限要素モデルを構成し、(1)と同様の技術で有限

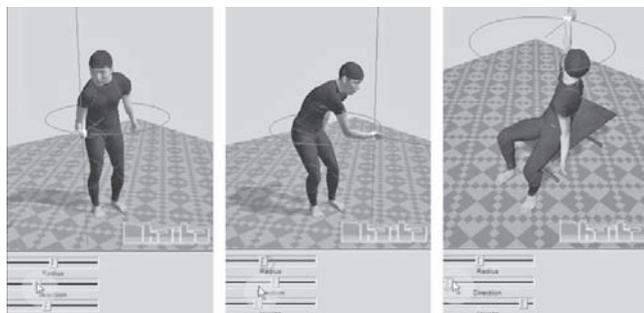


図一6 指先有限要素の代表モデルとプルタブ開封シミュレーション

要素モデル構造の個人差を主成分分析し、日本人を代表する指先モデルを生成した(図一6上)¹⁰⁾。これらの指先モデルにより、製品操作時の指先に生じる摩擦現象を精密に再現できるようになり、パッケージの操作性向上などに活用されている(図一6下)。

(5) 統合可視化ソフトウェア

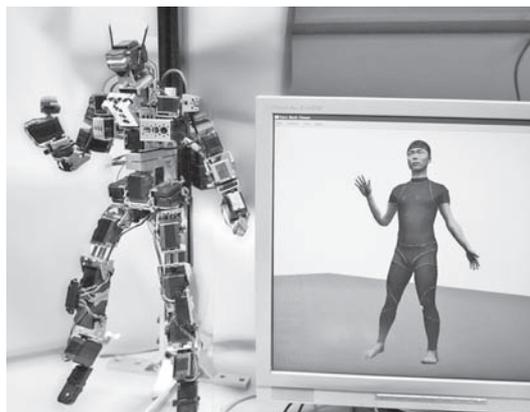
DHRCでは、上記のモデルを統合し可視化するソフトウェアの開発を進めている。体形と基本姿勢(立位・座位)を選び、リーチターゲット位置を指定することで、リーチ姿勢を生成、表示できる。可視化ソフトウェアには、製品オブジェクトをインポートすることができ、逆に生成した姿勢の体形データを多面体データとしてエクスポートすることもできる。オブジェクトとの衝突が起きた場合には、それを画面に表示する。このDhaiba可視化ソフトウェアは、2010年3月にDHRCのWebサイトから公開予定である。なお、このソフトウェアは、要素技術のプログラムがバックグラウンドで動作し、それらがプログラム間通信することで可視化ソフトウェア上で統合表示する構造となっている。可視化ソフトウェアのプログラムインタフェース部分も開示する予定であり、ユーザが独自のプログラムを追加することも可能となる。



図一7 Dhaibaによるリーチ姿勢生成

(6) Active Marionette インタフェース

(5)ではリーチターゲットの指定によってDhaibaのリーチ姿勢を生成するというインタフェースに限定されている。個々の関節を動かすことで任意の姿勢を与えることも可能であるが、コンピュータの2次元インタフェースで人体の3次元姿勢を変更するのは容易ではない。そこで、DHRCでは、小型ロボットを介して、Dhaibaの姿勢をコントロールするインタフェース「Active Marionette」を開発している。ロボットの姿勢をDhaibaに伝達するだけでなく、Dhaibaがオブジェクトと衝突した結果や、関節可動域の限界をロボット側のサーボを使って力覚提示できる機能を備えている。



図一8 Active Marionette インタフェース

4. 建設機械への適用に向けて

(1) 設計支援

建設機械の市場はグローバルであり、かつ、女性労働者も増えていることから、人体寸法や操作力限界などで、今まで以上に広範な個人差を考慮する必要がある。これらの背景から、建設機械設計におけるデジタルヒューマン技術の潜在ニーズは大きいと思われる。しかしながら、乗用車に比べ導入は遅れ気味である。下記の技術的課題が障壁になっていると理解している。

第一の課題は建設機械のサイズに伴う計測困難性である。通常の工事現場で見える建設機械も乗用車より大きい。特殊環境(たとえば鉱山など)では、さらに巨大な建設機械が動いている。車両に乗り込むためには階段のようなものをのぼることになる。これらの乗車運動をモデル化するには、この運動を計測する必要があるが、既存の光学式モーションキャプチャで計測できるようなものではない。そこで、加速度計やジャイロセンサを併用した非光学的なモーションキャプチャ技術と人体モデルを組み合わせた計測技術の確立が必要となる。

第二の課題は操作系の複雑さとダイナミクスである。建設機械には多数の操作レバーがあり、その操作性評価が重要となる。現在の人体モデルでも、可操作性などを評価することで人体機構と機械機構の整合性を評価することはできるが、人間が備える操作学習機能まで踏まえて評価するのが難しい。人間の操作学習系を一次遅れ系のシステム同定問題としてモデル化する研究も行われており、それらを、人体機能モデルと統合する取り組みも必要となろう。

(2) 機械操作データの収集と再活用

最後に前広な提案をしたい。建設機械が乗用車より大きく進んでいる部分がある。それは、多くの建設機

械にGPSや操作モニタが搭載され、それらのデータが企業に集約される仕組み（コマツのKOMTRAXなど）が実装されている点である。これは「車両の運用情報を収集し、顧客サービスに再活用する」仕掛けである。車両を操作しているのが人間であることを考えると、これは人間の操作運動データを収集しているとも言える。操作者の人体寸法を取得できれば、デジタルヒューマンモデルを用いて、車両操作情報を操作者の運動情報に変換することは不可能ではない。世界中のさまざまなユーザの乗降、操作運動データを衛星回線を通じて大量に蓄積でき、これらのデータを分析して、より操作性の良い設計に活用するというサイクルを廻すことができるのではないか。データは実験室だけで収集する時代ではない。サービスを介して、顧客自身に参加いただいて、実環境で大規模データを集め、それらをデジタルヒューマンモデルを用いて解析するという視点もあって良い。

5. おわりに

デジタルヒューマン技術の動向を、特に、筆者らが開発しているDhaibaの開発動向を通じて紹介した。建設機械へのデジタルヒューマン技術の適用を検討していただきたい。その上で、建設機械特有の課題があれば、それらを大学や産総研などに問題提起し、共同研究をすることで問題解決し、適用場面を拡げていく取り組みが有効であろう。企業内での情報が不足しているようであれば、類似の取り組みをしているメンバーのコンソーシアム（DHRC主催のデジタルヒューマン技術協議会など）に参加するのも一案である。

JCM A

《参考文献》

- 1) 持丸正明：デジタルマネキン，日本機械学会誌，Vol.107, No.12, pp.917-919, 2004.
- 2) 持丸正明：製品設計を支援するデジタルヒューマン技術，設計工学，Vol.43, No.1, pp.2-8, 2007.
- 3) Mochimaru, M and Kouchi, M. : Statistics of 3-D body shapes using PCA or MDS and their applications, IEA Congress, 2009.
- 4) Kouchi, M., Mochimaru, M. and Higuchi, M. A Validation Method for Digital Human Anthropometry: Towards the Standardization of Validation and Verification. SAE Trans. J Aerospace, p.254-259, 2005.
- 5) Aoki, K., Kawachi, K., Kouchi, M. and M. Mochimaru: Functional Joint Rotation Centers for Whole Body Digital Manikin, SAE DHM Symposium, 2008.
- 6) Kawachi, K., K. Aoki, M. Mochimaru and M. Kouchi: Motion Distribution Map of Ingress to Driver's Seats, SAE DHM Symposium, 2007.
- 7) Kouchi, M., N. Miyata and M. Mochimaru: An Analysis of Hand Measurements for Obtaining Representative Japanese Hand Models, SAE DHM Symposium, 2005.
- 8) Miyata, N., Kouchi, M. and Mochimaru, M: Generation and Validation of 3D Link for Representative Hand Models. SAE Trans. J Passenger Cars, 2007.
- 9) Miyata N. and Mochimaru, M.: Hand posture prediction for designing push-button switches distribution, SAE DHM Symposium, 2009.
- 10) Nohara, K., Tada, M., Umeda, K. and Mochimaru, M.: Synthesizing Possible Variations of Finger Structure Using Principal Component Analysis for Non-Rigid Volume Registration Results. ISHF Symposium, 2007.

【筆者紹介】

持丸 正明（もちまる まさあき）

(株)産業技術総合研究所
デジタルヒューマン研究センター
副センター長

