

① デジタルヒューマン技術が 実現する臨床現場や生活空間に おける運動解析

多田充徳 戸田晴貴 丸山 翼 | 産業技術総合研究所

臨床における運動解析の意義

運動器疾患や脳血管疾患など、運動機能に問題を抱える患者の診療やリハビリテーションでは、動きの観察が広く行われている。疾患の症状や回復の度合いを正しく把握し、プログラムを立案するためであるが、多くの場合、医師、理学療法士、そして作業療法士らの経験や暗黙的な知識に基づく定性的な評価にとどまっていた。

しかし、疾患名が同じでもその重症度や背景が異なれば、患者の動きもその患者に適した診療やリハビリテーションも異なる。患者の状態に応じてこれらをテーラーメイド化するには、疾患ごとの定性的な比較ではなく、動きのメカニズムの解析や介入効果の評価を定量的に行うことで、疾患をさらにサブグループに分類する必要がある。つまり、臨床現場や生活空間における運動データの大規模な計測と蓄積、そしてバイオメカニクスで用いられているような運動学・動力学的手法による運動データの解析が望まれる¹⁾。

しかし、装置の価格やその設置スペースの制約などにより、バイオメカニクスにおける計測手法をそのまま臨床現場や生活空間に導入することは困難である。また、解析結果を即時的に可視化できれば、リハビリテーションのモチベーション向上にもつながるが、従来のバイオメカニクスではオフライン解析が主たる方法であった。一方、これらを解決する鍵が筆者らが研究しているデジタルヒューマン技術にある。

本稿では、従来のバイオメカニクスにおけるアプローチを概観するとともに、デジタルヒューマン技術とウェアラブルセンサを用いた運動解析技術の概要と、これを活用した臨床現場や生活空間における運動解析の将来を展望する。

バイオメカニクスのアプローチ

光学式モーションキャプチャ

バイオメカニクスにおいて運動解析を目的とした研究の多くが、統制された実験室内で光学式モーションキャプチャを用いた運動計測を行っている。光学式モーションキャプチャとは、赤外線光源を搭載したカメラと、再帰性反射素材で覆われた球状のマーカを用いた運動計測手法である。たとえば、全身の運動を計測する際には、図-1の左に示すように、専用の計測着を装着してもらった上で、60点程度のマーカを全身に貼付する必要がある。

この方法には、運動計測の精度が高いというメリットがあるものの、装置の価格が高価で、カメラの設置に広大なスペースを要するというデメリットがある。このため、モーションキャプチャを導入している臨床現場はごくわずかである。大学や研究所であればこの装置を導入している施設も多いが、そこに来ることができる患者には、普段から活動量が多く運動機能が高い傾向がある。つまり、実験協力者の選択にバイアスが生じる可能性を排除できない。

また、モーションキャプチャを用いた運動解析はオフラインで行われることが多い。マーカ軌跡の計算までは自動的に行うことができるが、マーカを貼付した部位については解析の前にオペレータが手動で与える必要があるからである。計測した動きの変化を即時的に可視化できれば、リハビリテーションにおけるモチベーション向上にもつながるが、従来のバイオメカニクスではオフライン解析が主たる方法であり、このような観点での研究は稀である。

実験室と日常生活環境の違い

前節で説明したように、バイオメカニクスの計測と解析の方法にはいくつかの問題があるが、最大の問題は非日常的な実験室内で計測を行う点にある。このような環境で行われる運動が、その人の普段の動作を反映しているのか、という問題を払拭することは難しい。筆者らもモーションキャプチャを用いた実験室内での運動計測を実施するが、緊張から実験協力者の運動が不自然になったと思われる場面に遭遇したことが何度もある。

普段何気なく行う単純な歩行動作であっても、路面の状況や荷物の有無により変化する可能性が高い。つまり、診療やリハビリテーションにおける運動計測は、臨床現場や生活空間のように、その患者の日常に近い

環境で実施することが望ましい。自然な運動をさり気なく計測し、解析結果に基づく即時的な介入ができれば、データの質と診療成績の向上が期待できる。

デジタルヒューマン技術を用いたアプローチ

筆者らが所属する研究チームでは、デジタルヒューマンモデルと慣性計測装置 (Inertial Measurement Units, 以下 IMU) を使用した簡易的な運動計測の実現に向けた研究を実施している。

個人別デジタルヒューマン (DH) モデル

このために必要な1つ目の技術が、個人別デジタルヒューマンモデルの生成である。その名の通り特定個人(この場合実験協力者となる患者)の体型を再現したコンピュータモデルであるが、いかなる現場でも計測が行えるように、少数の計測寸法値と全身の寸法データベースから迅速に生成できるようになっている。

たとえば、図-2の(a)に身長が1,700ミリメートルで体重が異なる3体型を、同図の(b)に体重が70キログラムで身長が異なる3体型を示す。前者では体重が軽いほど、後者では身長が高いほどスリムな体型となることが分かる。基準となるデジタルヒューマンモデルには93の寸法項目が定義されている。この手法では、寸法データベースを参照することで少数の計測寸法値からその個人の93の寸法値を推定し、これに従い基準モデルを変形させることで個別モデルの生成を行っている²⁾。

図-2に示す通り、このデジタルヒューマンモデルには個人ごとの体型を表すメッシュモデルだけでなく、骨格構造を再現したリンクモデルも含まれており、それぞれのリンクには重心や慣性テンソルといった質量特性が定義されている。このため、このモデルを用いて運動が復元できれば、関節角度に着目した運動学的な解析や、関節トルクに着目した動力学的な解析が実施できる。また、詳しくは次節以降で説明するが、計

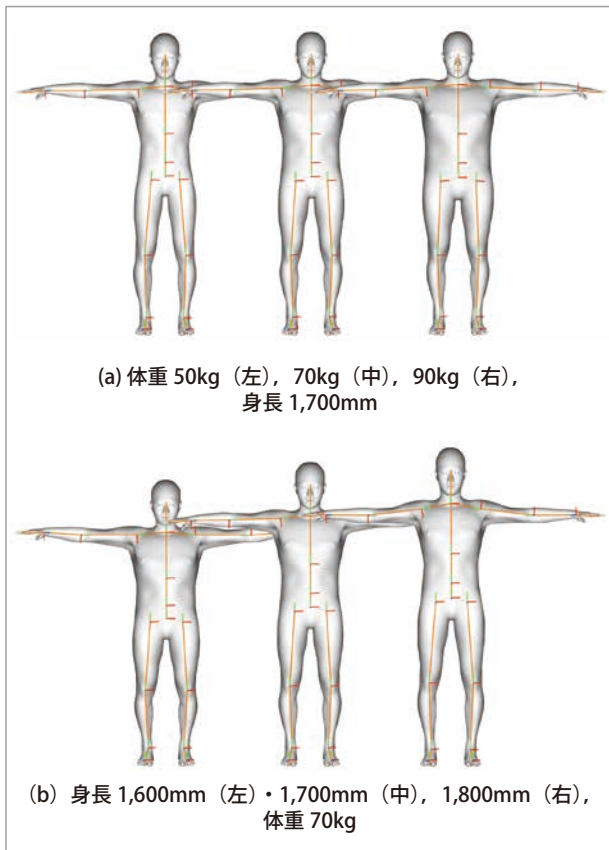


■ 図-1 光学式モーションキャプチャ (左) と IMU センサを用いた運動計測 (右) の様子

測精度の向上，センサ数の削減，そして計測データの蓄積を実現する際にも，この個人別デジタルヒューマンモデルが活用できる。

DHモデルと拘束を併用した運動計測

簡易的な運動計測の実現のために必要な2つ目の技術が，前節で説明したデジタルヒューマンモデル



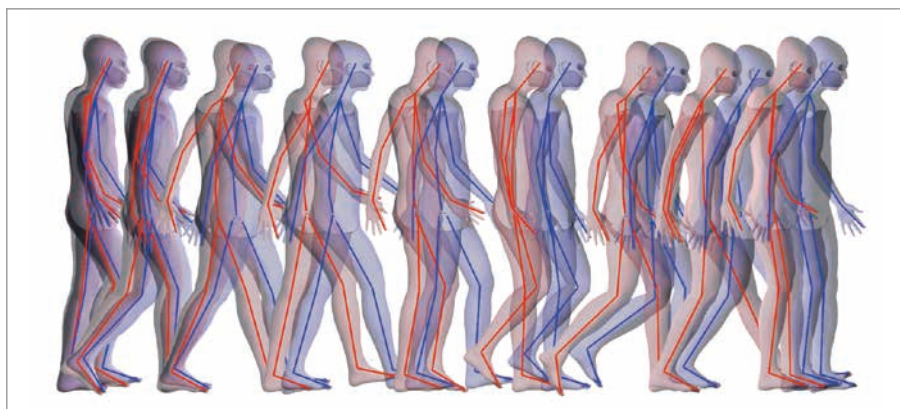
■ 図-2 身長と体重から生成した個人別デジタルヒューマンモデル

とさまざまな拘束条件を併用した運動の復元である。現状では，図-1の右に示す通り，身体の各リンクに姿勢を計測するためのIMUセンサを貼付することで運動計測を行っている。IMUセンサは小型（50×30×12ミリメートル程度）かつ軽量（15グラム程度）であり，弾性ベルトで固定できるため装着も容易である。計測の準備も短時間でできるため，患者と実験者の負担を低減できる。

ただし，IMUセンサとは姿勢を計測するためのものであり，このセンサだけでは運動に伴う身体位置の変化を知ることができない。また，体幹に近い近位リンクを基準に姿勢を復元するため，手先や足先に近い遠位リンクほど位置の誤差が累積するという問題がある。

これらを解決するには，デジタルヒューマンモデルと拘束条件の併用が有効である。図-3では，接地脚を基準とした姿勢の復元を繰り返すことで，身体位置の変化を予測している³⁾。光学式モーションキャプチャを用いた計測結果と比べると進行方向に対して8%程度の誤差が累積するが，環境にカメラを設置する必要がなく，普段着の上に小型のセンサモジュールを貼付するだけで全身運動の計測が実現できる意義は大きい。

また，手先でハンドルを握っていたり，足先がペダルに接触しているなど，身体と製品，または身体と環境の間に接触が生じる場合には，これらを位置の拘束条件として導入し全体最適化を行うことで，運動計測の精度が向上することを確認している³⁾。IMUセンサを用いた運動計測システムにはすでに市販されている製



■ 図-3
IMUセンサとDHモデルを用いた計測結果（赤）と光学式モーションキャプチャを用いた計測結果（青）

品⁴⁾もあるが、先述のようにさまざまな制約条件を柔軟に導入できる点が筆者らの技術の特徴の1つである。

従来の光学式モーションキャプチャとは異なり、この技術を用いればカメラの画角や配置を気にする必要がない。このため、**図-4**のように屋外環境での長距離歩行の連続計測も可能となる。また、最適化を用いた姿勢復元の周波数は30ヘルツであり、個人別デジタルヒューマンモデルを用いて、計測した運動を即時的にアニメーションできる。これにより、計測に基づく介入の頻度を高めることができる。なお、本稿で紹介したすべての技術は、運動解析のためのプラットフォームソフトウェアであるDhaibaWorks⁵⁾上に実装されている。

今後の展望

このように、IMU センサを用いた運動計測には、その患者の日常に近い環境で自然な運動をさり気なく計測し、解析結果に基づき即時的に介入を行うために必要な要件が備わっている。また、すべての計測データはデジタルヒューマンモデルという同一の表現形式を持つため、運動学・動力学的解析を実施した上で、その結果を横断・縦断的に比較すること、そしてデータを蓄積することが可能となる。

一方で、現状の方法では全身の10カ所以上にIMU センサを貼付する必要があるため、臨床現場や生活空

間でさり気ない運動計測ができたとしても、それはあくまで計測実験の一環でしかない。現在筆者らは運動データベースと機械学習を併用することで、必要なIMU センサの数を減らすための研究に取り組んでいる。

たとえば、靴や時計のように、普段何気なく身につける装着品に内蔵されたIMU センサだけで運動計測ができるようになれば、診療やリハビリテーションを生活に組み込むことができる。これは、疾患の早期発見や運動機能の迅速な回復につながる。このように、臨床と実生活の垣根を取りはらえるように、今後もデジタルヒューマン技術の研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 戸田晴貴 他：リハビリテーション領域におけるバイオメカニクス研究の現状と課題，バイオメカニクス研究，Vol.22，No.3，pp.110-117 (2018)。
- 2) Nohara, R. et al. : Multiple Regression Based Imputation for Individualizing Template Humanmodel from a Small Number of Measured Dimensions, in Proceedings of the 38th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.2188-2193 (2016)。
- 3) Maruyama, T. et al. : Constraint-based Realtime Full-body Motion-capture Using Inertial Measurement Units, in Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.4288-4293 (2018)。
- 4) Xsens MVN Analyze, <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn-analyze/>
- 5) Endo, Y., et al. : Dhaiba : Development of Virtual Ergonomic Assessment System with Human Models, in Proceedings of the 3rd International Digital Human Modeling Symposium, #58 (2014)。

(2019年1月22日受付)



■図-4 屋外環境における歩行計測の様子

多田充徳 m.tada@aist.go.jp

2018年より産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究チーム研究チーム長。デジタルヒューマン技術に関する研究と、これを活用することで、さまざまな現場で計測と介入を行うための現場志向インタラクション技術に関する研究を実施。

戸田晴貴 haruki-toda@aist.go.jp

2018年まで理学療法士として中枢神経疾患や運動器疾患のリハビリテーションに従事。同年より産業技術総合研究所特別研究員。さまざまな環境下でのヒトの歩行を解析し、歩行変容を生じさせるための介入手法を確立するための研究を実施。

丸山 翼 tbs-maruyama@aist.go.jp

2017年より産業技術総合研究所特別研究員。個人別デジタルヒューマンモデルとIMU センサを用いたリアルタイム運動計測・解析と、機械学習に基づく少数IMU センサからの運動推定に関する研究を実施。