

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730156

研究課題名(和文)分散重み付き皮膚変形モデルを応用した関節・筋モーメントアームの非線形モデル

研究課題名(英文) Non-linear model for joint-muscle moment arm based on skeletal-subspace muscle deformation

研究代表者

村井 昭彦 (Murai, Akihiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・研究員

研究者番号：90637274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、医療やリハビリ、スポーツ科学に展開されるヒトの運動解析や筋活動等の体性感覚情報推定技術のため、新しいデジタルヒューマンモデルを構築し計算アルゴリズムを開発した。クリエイティブ・コモンズライセンス下で用いることができるBodyParts3Dをもとにヒトの解剖学的形状を持つ皮膚・筋骨格モデルを構築し、形状変化をCGのキャラクタのスキニングの手法を応用することで低計算コストに実現した。ポリューメトリック筋モデルの変形から筋走行を計算することで、筋活動推定に重要である筋モーメントアーム長の推定精度向上(最大誤差45%→14%)を実現した。本モデルは体性感覚情報推定の精度向上に資する。

研究成果の概要(英文)：This research developed the novel digital human model and its computational algorithm that would be applied to the human motion analysis and somatosensory information (e.g. muscle activity) estimation for medical care, rehabilitation and sports science. I built the volumetric skin-musculoskeletal model that represents the human anatomical geometry based on BodyParts3D that is available under Creative Commons license. The volume deformations of skin and muscle were realized by applying Skeletal Subspace Deformation that is used for the skinning of character animation in the computer graphics field. My model and algorithm improved the accuracy of the muscle moment arm estimation (decreased its maximum error from 45% to 14%) by computing the muscle pathway from the deformation of the volume muscle model. This model and algorithm would contribute to the improvement of somatosensory information estimation.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：デジタルヒューマンモデル ヒトの運動計測・解析 体性感覚情報推定

1. 研究開始当初の背景

解剖学的知見に基づいた筋骨格モデルの構築、そして運動・動力学計算を用いた筋活動等の体性感覚情報の推定や可視化が行われている。筋骨格モデルを用いることにより、ヒトの運動解析において個々の筋や関節への負荷を定量的に推定することが可能である。これは診断、トレーニング、リハビリテーションを定量的なものに変える。

ロボティクスの分野で開発されてきた筋骨格モデルは、筋・腱・靭帯の各要素を骨格上に固定された始点・経由点・終点を結ぶワイヤで近似している(ワイヤ筋)。そして運動・動力学及び最適化問題を解くことにより、ヒトの運動中の体性感覚情報の推定や運動の順動力学シミュレーションに用いられる。ここでは筋等の要素のボリュームがモデル化されていないため、筋間の干渉や詳細な筋の走行変化の表現が困難である。そのため、肘や膝といった比較的構造が単純な関節においてさえも、筋が骨の中に埋まったり、表層筋が深層筋に埋まったりという問題が頻繁に生じる。これにより、計算される筋の関節に対するモーメントアームは実際のヒトのものとは大きく異なりうる。その結果、ヒトの運動特性と大きく異なる筋活動が推定されてしまい、筋骨格モデルの応用及び実用化を困難にしている。一方コンピュータグラフィクスの分野で開発され、皮膚変形のシミュレーション等に用いられている筋骨格モデルは、骨格や筋等をボリュームで表現している(ボリューム筋)。そして有限要素法等を用いて、筋同士や骨との干渉等を考慮した皮膚の変形を実現している。しかし、この手法は計算コストが非常に高く、また骨格の運動から筋活動を推定するモデルは実現されていない。

2. 研究の目的

ヒトの運動解析では、筋骨格モデルにより解析技術が躍進し、パーキンソン病の定量的診断等への応用が期待される。しかし、筋をワイヤで近似したモデルでは筋の干渉や走行変化が表現できず、また有限要素法等でのボリュームを持つ筋の変形は計算コストが高く、精度の良い筋活動等体性感覚情報の低計算コストでの推定は難しい。本研究はヒトの運動特性を反映した体性感覚情報の低計算コストでの推定を目的とし、

- (1) ボリュームとワイヤを持つ筋骨格モデルの構築、
- (2) 分散重み付き皮膚モデルによる詳細でリアルな筋の走行変化の低計算コストでの計算、
- (3) 走行変化を考慮したワイヤ筋の関節・筋モーメントアームの推定を実現する。

3. 研究の方法

- (1) ボリュームとワイヤを持つ筋骨格モデルの構築：
従来開発されてきた筋骨格モデル [1, 2] (図 1) は、骨格を剛体リンク、筋・腱・靭帯の各要素を骨格上に固定された付着点・経由点を結ぶワイヤで近似している。そして運動・動力学及び最適化問題を解くことにより、ヒトの運動中の体性感覚情報の推定や運動の順動力学シミュレーションに用いられる。ここでは筋等の要素のボリュームがモデル化されていないため、筋間の干渉や詳細な筋の走行変化の表現が困難である。従来のワイヤで近似された筋モデルは、骨格モデルの特徴点に筋の走行を表現するために必要な経由点が設定されている。そしてこの各経由点は骨格に固定されているため、関節が大きく屈曲した場合に肘や膝といった比較的構造が単純な関節においてさえも、筋が骨の中に埋まったり、表層筋が深層筋に埋まったりという問題が生じる。これにより計算される筋の関節に対するモーメントアームは実際のヒトのものより関節屈曲において伸筋は短く、屈筋は長くなってしまい(図 2)、ヒトの運動特性と大きく異なる筋活動が推定される。

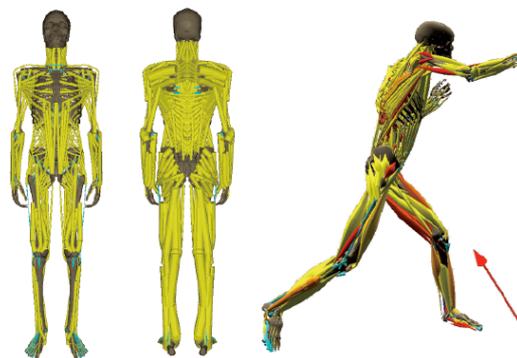


図 1: ワイヤ筋骨格モデル

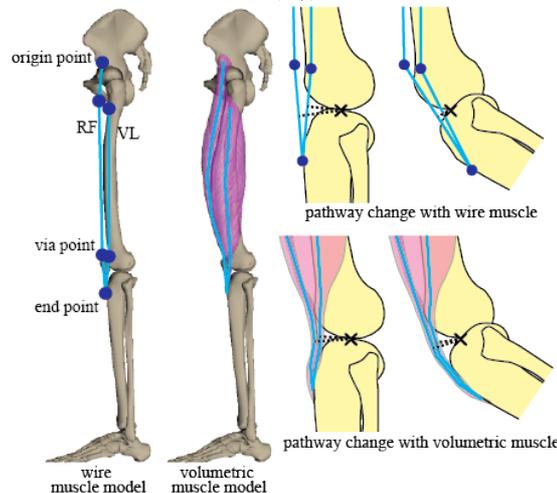


図 2: 筋走行の比較

この問題点を解決するため、ヒトの解剖学的な形状を持つボリユメトリック皮膚筋骨格モデルを構築する。ヒトの運動計測及びヒトのモデルに基づく運動解析は、診断、トレーニング、リハビリテーションのみでなく、今後ヒトに関わるさまざまなサービスに展開される。そのような分野におけるデファクト標準となるようなモデル・計測及び解析手法の確立を目指し、ライセンス等の問題がなく幅広く使われうるモデルを構築する。本モデルはライフサイエンス統合データベースセンターにより構築されたヒトの形状データ“BodyParts3D”をもとに開発を行う。BodyParts3Dは文部科学省委託研究開発事業として開発され、医学の情報・データ共有の促進を狙ったものであり、クリエイティブ・コモンズ表示-継承-2.1-日本の派生ライセンスの元で利用可能である[3]。

本モデルは次で述べるSSDを用いた変形を行うため、ボリユームを表現するポリゴンの整合性や解像度が重要である。ここではポリゴン整形として、

- ①ノイズ除去、
 - ②ポリゴンリダクション、
 - ③NURBS曲面による表現、
 - ④均一エッジポリゴンによるリメッシュを行う。
- (2) 分散重み付き皮膚モデルによる詳細でリアルな筋の走行変化の低計算コストでの計算：

構築したボリユメトリック皮膚筋骨格モデルを産総研にて開発するヒューマンシミュレータ“DhaibaWorks”[4]に実装し、運動シミュレーションを行う。

DhaibaWorksは、人体形状に骨格構造モデルを加えてその運動を再現し、製品との幾何学的・力学的相互作用を評価することを目的とし、デジタルヒューマン技術協議会という企業コンソーシアムを通して研究開発が進められている。

まず、ボリユメトリック皮膚筋骨格モデルに骨格構造モデルを加える。ここでは全身を18のアーマチャで表現する(図3)。それぞれの関節位置は構築した骨格形状データより推定する。それぞれの骨格ポリゴンはアーマチャと対応付けられ、各アーマチャの運動により各骨格ポリゴンの位置姿勢が決定される。

次にアーマチャと皮膚ポリゴンを関連付けることで皮膚変形をシミュレーションする。ボリユームを持つ物体の運動や変形を干渉を考慮してシミュレーションする際、しばしば有限要素法が用いられる。骨格や筋等をボリユームで表現し、有限要素法を用いて筋同士や骨との干渉等を考慮した皮膚の変形も実現されているが、非常に計算コストが高い。ここでは低計算コストでのシミュレーションを実現す

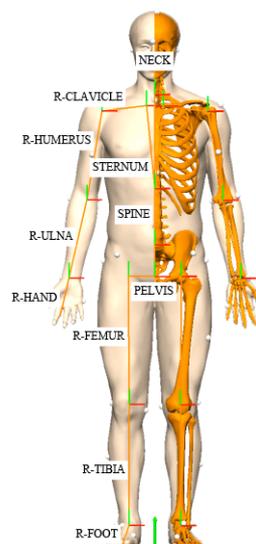


図 3：アーマチャの配置

るため、コンピュータグラフィックスの分野でキャラクタアニメーションのスキニングに用いられるSSD[5]を用いる。SSDは皮膚変形のアルゴリズムで、計算コストや手法の簡便さからよく用いられる。各アーマチャからポリゴンへの影響が重みで表され、頂点の移動は各アーマチャの位置姿勢の同次変換の重み付き和で表現される。キャラクタアニメーションではこの重みの決定が重要であり、関節部の重みの分配により自然な皮膚変形が実現される。本研究では“pinocchio”[5]に用いられるアルゴリズムに基づき、各アーマチャからポリゴンへの重みを計算する。最後に、アーマチャと筋ポリゴンを関連付けることで筋変形をシミュレーションする。ここでは、皮膚ポリゴンに適用した手法を適用する。

関節周りの不自然な皮膚変形(例えばcandy-wrapping等)は、キャラクタアニメーションの変形における1つの大きな問題である。pinocchioに用いられるアルゴリズムは自然なキャラクタの皮膚変形を実現するが、リアルなヒトのキャラクタには不十分である。図4第1行は一般的なアーマチャを用いて計算された重みパラメータを用いた体幹回旋時の皮膚変形を示す。体幹部分等皮膚がアーマチャから遠く離れている際に、小さな不自然な変形の結果として皮膚と骨の干渉が生じている。実際のヒトにおいて、骨格表面形状が皮膚表面形状を決定し、運動中の皮膚の変形は著しく骨格の表面形状に影響される。ボリユメトリック皮膚筋骨格モデルは皮膚のみでなく、筋や骨格の表面形状データを持ち、この特徴を有効利用する。一般的なアーマチャに加えて、アーマチャの各ボーンの関節中心から該当する骨格表面ポリゴンへ均等にサブボ

ーンを配置する．このサブボーンの位置および姿勢は，その親ボーンの位置および姿勢から計算する．そして各サブボーンからポリゴンへの重みの計算には，アーマチャからポリゴンへの重みの計算と同じアルゴリズムが用いられる．そしてサブボーンの重みは，その親ボーンの重みへ加える．図 5 にサブボーンをオレンジ色の線で示す．この表面形状に基づいたSSDにより，骨格ポリゴンに近い皮膚ポリゴンはその骨格に対応付けられたボーンに著しく影響され，ヒトに見られる自然な皮膚変形を実現する．ここで，開発するポリュメトリック皮膚筋骨格モデルは均一エッジ長ポリゴンからなり，サブボーンは均等な密度に配置される．サブボーンを実装することによる皮膚変形シミュレーションの改善およびサブボーンを均等な密度に配置するメリットは成果項に示す．

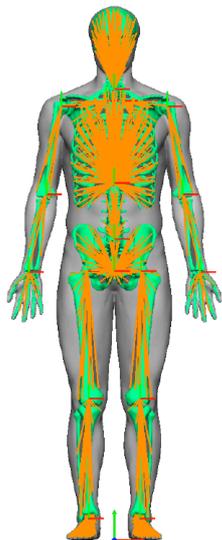


図 4 : サブボーンの配置

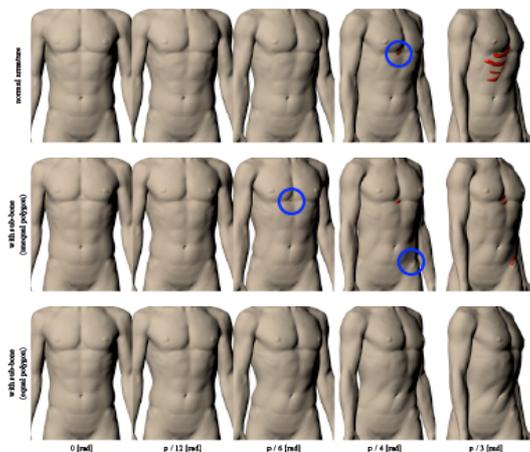


図 5 : 体幹回旋時の皮膚変形と干渉

- (3) 走行変化を考慮したワイヤ筋の関節・筋モーメントアームの推定 :

ワイヤ筋の走行は，ポリュム筋モデルの変形に基づきアップデートされる．各筋の走行は経由点およびそれらをつなぐパスから構成される．各筋において，筋の形状を表現するのに十分な数の経由点を配置する．それぞれの経由点は該当する筋の表面形状に関連付けられ，経由点の移動は移動最小二乗近似法を用いた as-rigid-as-possible法により計算される変形場に基づき推定される [6]．

4. 研究成果

- (1) ポリュムとワイヤを持つ筋骨格モデルの構築 :

図 6 に構築するモデルを示す．全身の皮膚，骨格及び下肢片側67の筋が含まれ，全ての要素はエッジ長およそ3mmの三角形ポリゴンで表現される．

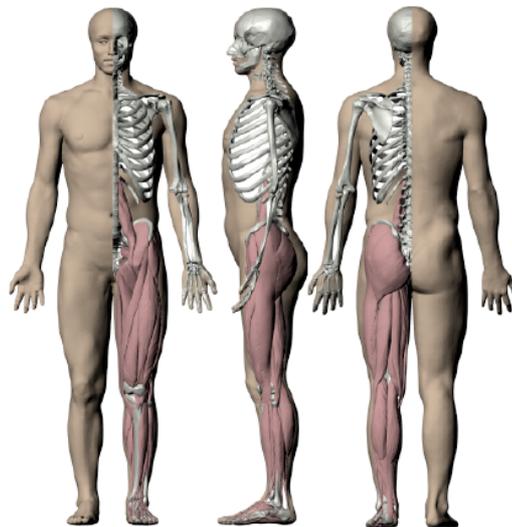


図 6 : 皮膚筋骨格モデル

- (2) 分散重み付き皮膚モデルによる詳細でリアルな筋の走行変化の低計算コストでの計算 :

構築したモデルを用い，実際に計測するヒトの運動を解析する．ここでは65の再帰性反射材マーカを用いた光学式モーションキャプチャシステムにより200Hzでヒトの動き(3.0m/sでの走行4秒(800フレーム))を計測する．図 7及び図 8に皮膚変形及び筋変形のシミュレーション結果の一部を示す．計算にはMacbook Pro(Mid2014 プロセッサ2.8GHz Intel Core i7中4コア，メモリ12GB)で行い，皮膚変形に02分46秒，筋変形に03分06秒を要する(表 1)．また図 9に，左膝を $\pi/6$ radずつ曲げた際の筋の変形を示す．膝周りの大腿四頭筋の伸展，屈曲における自然な変形が実現できているのが見られる．

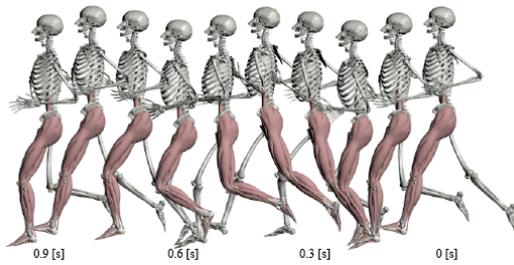


図 7：走行中の骨格および筋変形

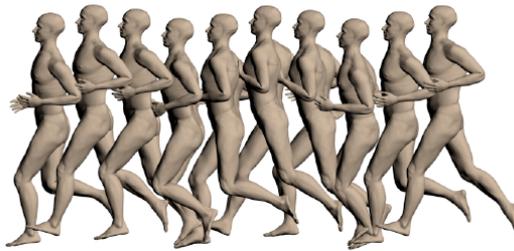


図 8：走行中の皮膚変形

- (3) 走行変化を考慮したワイヤ筋の関節・筋モーメントアームの推定：

図 9 に左膝を $\pi/6$ rad ずつ曲げた際の筋の変形を示す。緑点は左膝回転中心を示し、赤線はポリュメトリック皮膚筋骨格モデルにより推定された外側広筋の走行、青点線は従来のワイヤ筋骨格モデルにより推定された走行を示す。推定される外側広筋のモーメントアームおよび文献値 [7] を図 10 に示す。横軸は膝関節角度 rad, 縦軸は外側広筋のモーメントアーム mm および誤差 % を示す。実線は外側広筋のモーメントアーム、そして点線は文献値からの誤差である。赤丸線はポリュメトリック皮膚筋骨格モデルにより計算されたもの、青丸線はワイヤ筋骨格モデルにより計算されたもの、そして緑三角線は文献値である。文献値は、膝関節角度が 0 の時に誤差が 0 になるよう正規化する。図 4 は、一般的なアーマチャとサブボーンを実装した際の皮膚の変形とその骨格との干渉を比較したものを示す。第 1 行は一般的なアーマチャを用いた皮膚変形、第 2 行は一般的なポリゴンリダクションアルゴリズムにより作成した骨格ポリゴンによるサブボーンを用いたもの、そして第 3 行は均一エッジ長ポリゴンからなる骨格ポリゴンによるサブボーンを用いたものである。

実験、シミュレーションより次の結果が得られた。

- ① 図 7, 8, 9 において、走行運動時や膝の屈曲において、膝を大きく屈曲した際でも、皮膚や大腿直筋や外側広筋等の筋の自然な変形が見られる。

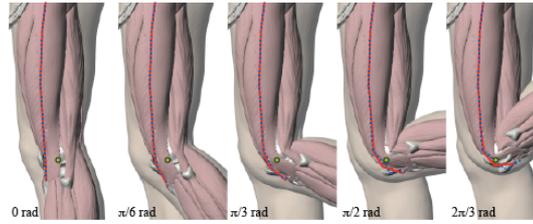


図 9：膝屈曲時の皮膚および筋の変形

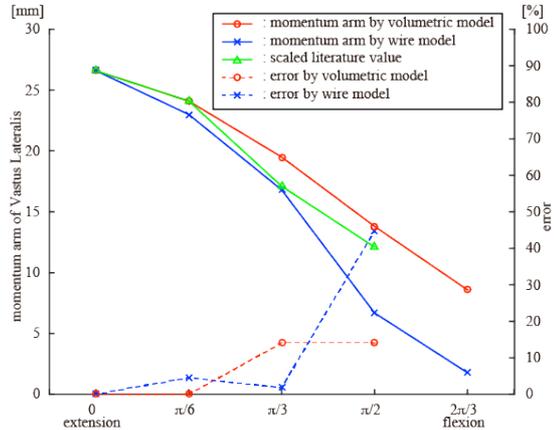


図 10：筋モーメントアームの検証

- ② 図 9 において、ポリュメトリック皮膚筋骨格モデルおよび表面形状に基づいた SSD による筋走行 (赤線) と、一般的なワイヤ筋骨格モデルにより計算される筋走行 (青線) に差異が見られる。青線は脛骨と干渉しているのに対して、赤線は骨を覆うように変形しているのが分かる。
- ③ 図 10 において、ポリュメトリック皮膚筋骨格モデルおよび表面形状に基づいた SSD から推定される外側広筋のモーメントアームは文献値に対して最大 14.1%、平均 7.02% の誤差である。これに対し、ワイヤ筋骨格モデルでは最大 44.8%、平均 12.8% の誤差である。
- ④ 図 4 第 1 行において、一般的なアーマチャを用いた場合、体幹を $\pi/4$ 回旋した際に皮膚と肋骨の間に干渉が見られる。そして第 3 行において、均一密度の骨格メッシュによるサブボーンを用いた SSD ではこの干渉を解決できている。一方、不均一密度の骨格メッシュによるサブボーンを用いた場合、体幹を $\pi/6$ 回旋した際に干渉が生じてしまう。

これらの結果より、次のことが分かる。

- ① ポリュメトリック皮膚筋骨格モデルおよび表面形状に基づく SSD により、低計算コストでヒトのような皮膚変形を実現した。
- ② 均一エッジ長ポリゴンからなる骨格表面形状から生成される均一密度のサブボーンは皮膚と骨格の干渉の問題を解決した。またシミュレーション結果より、サブボーンを適切に配置しない場合はこの干渉を悪化させる可能性も示した。

- ③ 表面形状に基づくSSDは皮膚および筋の自然な変形を実現し、この変形により生理学的に妥当な筋モーメントアームの推定を実現した。このボリユームトリック皮膚筋骨格モデルおよび表面形状に基づくSSDは、ヒトの筋活動等の体性感覚情報推定の精度向上につながり、正確なヒトの運動生成・制御メカニズムの解明に資する。

<引用文献>

- [1]Delp, S. L., Loan, J. P.: "A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement", IEEE Computing in Science and Engineering, vol. 2, pp. 46-55, 2000.
- [2]Nakamura, Y., Yamane, K., Fujita, Y, Suzuki, I.: "Somatosensory Computation for Man-Machine Interface from Motion-Capture Data and Musculoskeletal Human Model", IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, pp. 58-66, 2005.
- [3] "BodyParts3D, Copyrightc 2008 ライフサイエンス統合データベースセンター licensed by CC 表示継承 2.1 日本", 2008.
- [4] "Dhaiba": <http://www.dhaibaworks.com/>.
- [5]Igarashi, T., Moscovich, T., Hughes, J. F.: "As-rigid-as-possible shape manipulation", ACM Transactions on Graphics, vol. 24, pp. 1134-1141, 2005.
- [6]Cuno, A., Esperana, C., Oliveira, A., and Cavalcanti, P.R. "3D as-rigid-as-possible deformations using MLS". Proceedings of the 27th Computer Graphics International Conference, pages 115-122, 2007.
- [7]Visser, J. J., Hoogkamer, J.E., Bobbert, M. F., and Hiding, P.A. "Length and moment arm of human leg muscles as a function of knee and hip-joint angles". European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 61:453-460, 1990.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

Murai, A., Endo, Y., and Tada, M.. "Anatomographic Volumetric Skin-Musculoskeletal Model and Its Kinematic Deformation With Surface-Based SSD", IEEE Robotics and Automation Letters, Volume 1, Issue 2, Pages 1103 - 1109, 2016.

Demircan, E., Murai, A., Khatib, O., and Nakamura, Y.. "Muscular Effort for the Characterization of Human Postural

Behaviors", Experimental Robotics, Pages 685-696, 2106.

村井昭彦, 中村仁彦. "ヒト全身詳細筋骨格モデルの構築とその検証・応用について", 日本ロボット学会誌 Volume 32, Issue 10, Pages 870-873, 2014.

[学会発表] (計 3件)

Murai, A., Endo, Y., and Tada, M.. "Anatomographic Volumetric Skin-Musculoskeletal Model and Its Kinematic Deformation With Surface-Based SSD", IEEE International Conference on Robotics and Automation 2016, 2016.

村井昭彦, 遠藤維, 多田充徳, "アナトモグラフィックなボリユームトリック皮膚筋骨格モデルの構築", 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2C1-02, 2015.

Murai, A., Takeichi, K., Miyatake, T., and Nakamura, Y. "Musculoskeletal modeling and physiological validation", IEEE Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), Pages 108-113, 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.dhaibaworks.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村井 昭彦 (MURAI, Akihiko)
産業技術総合研究所・人間情報研究部門・
研究員
研究者番号: 90637274