

# 研究報告書

## 「マルチスケール身体モデルに基づく運動評価技術の開発とその応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成23年11月～平成27年3月

研究者: 栗田 雄一

### 1. 研究のねらい

本研究は、情報技術を活用してコンピュータ内に人の特性を考慮した身体モデルを構築することで、生体力学的根拠が明確な運動の制御性・効率性を評価する手法を開発し、人の運動特性の可視化へつなげるとともに、製品ユーザビリティの評価、人の運動アシストへ応用していくことを目指す。モーターや人工筋で駆動するロボットとは異なり、人は冗長性の高い筋骨格システムにより身体を動かしている。人の力学的特性を踏まえた身体モデルをシステムに持たせることで、外的運動情報の入力に基づき筋活動レベルでの身体活動を推定し、人の主観的な負担感の評価へもつなげられる可能性を秘める。そこで本研究では、身体モデルとして筋や骨などの機構的・力学的関係を模した筋骨格モデル、運動指令から筋の運動単位が活動し筋全体が収縮するまでの筋収縮モデル、さらに人の主観的な感覚・感性知覚モデルとを利用し、人の運動感覚の評価を目指す。これらのモデルを利用して、心理物理実験による主観的感覚の収集というアプローチと、筋収縮の組み合わせによる運動生成というアプローチの両者を組み合わせ、人の感覚運動を評価する技術の確立をねらう。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

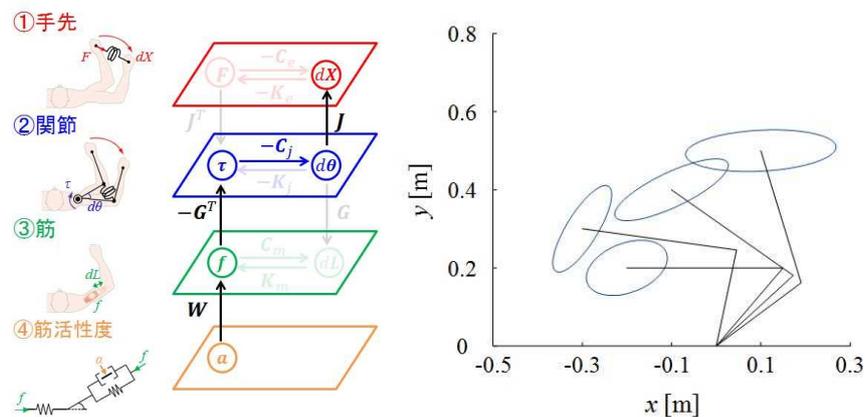
本研究では、筋や骨の機構的・力学的関係を模した筋骨格モデル、運動指令から筋の運動単位が活動し筋全体が収縮するまでの筋収縮モデル、さらに人の主観的な感覚・感性知覚モデルをそれぞれ構築し、これらを通じて人がある運動を行う際に身体でどのように筋が活動するか、さらに筋活動にともなって人が運動をどう知覚するかを評価するプラットフォームを構築した。構築したプラットフォームに対して人の運動データならびに外部から与えられる力を入力することで、その運動を実現するために必要な筋活動や、運動アシストによる筋負担低減効果の評価、ならびにそれを人がどのように感じるかを予測することが可能になる。具体的には、筋活動変化が2次元空間における手先変位に与える影響を可視化する筋活性度コンプライアンス楕円の解析的算出を行うとともに、3次元モデルへ拡張することでステアリング操舵におけるカフィードバックを主観的に人がどう感じるのかを予測するシステムの構築を行った。さらに開発したプラットフォームを利用して、人の運動を効果的に補助するためのアシストウェアの開発も行い、適切な筋力補助が人の感覚運動機能を高める効果があることを発見した。くわえて、電気刺激により筋を強制収縮することで、仮想的な力覚感を作ることができるシステムを開発するとともに、視覚や振動覚といったマルチモーダルな情報を付加することでカ

覚の強さを増すことができることの発見にもつながった。

## (2) 詳細

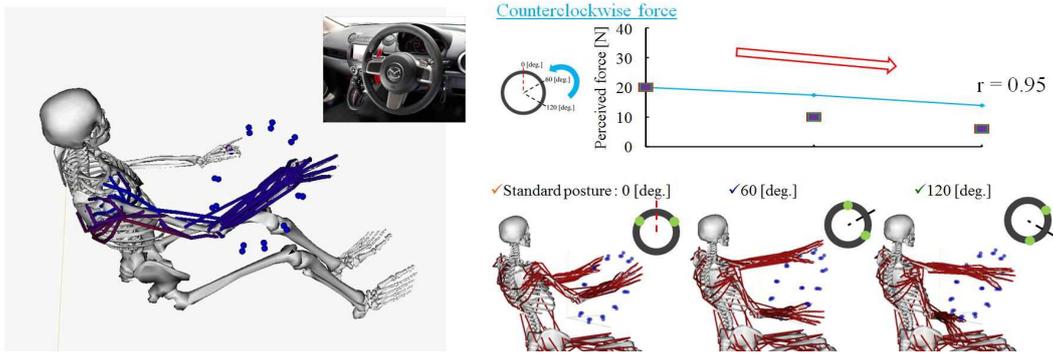
### テーマA：筋骨格モデルに基づく手先コンプライアンス楕円の解析的算出法の提案

装着型ロボットは、人に直接負荷を与えることから、安全性に対する配慮が必要とされる。人の運動を害さないようなスムーズで賢いアシストを行うためには、人の筋骨格系のもつダイナミクスを考慮することが重要である。しかし人のダイナミクスを実測することは非常に手間がかかる。そこで本研究では、上肢の2関節6筋モデルと、手先位置、関節角度、関節トルク、筋活性度の関係性から、手先筋活性度コンプライアンス楕円を解析的手法で求める手法を提案した。コンプライアンス楕円は、長軸が小さな筋活性度変化で手先が大きく変化することを意味し、短軸が逆に筋活性度変化に対して手先変位が小さいことを意味する。筋活性度が脳からの運動指令とより強い関係性があることを考えると、提案手法により得られた楕円体は手先の柔らかさの評価であると同時に、手先を動かす際のしんどさを評価する指標であるとも言える。今回の運動評価手法は、人に直接的に負荷を与える機器のアシスト制御戦略を考える上でも有用である。



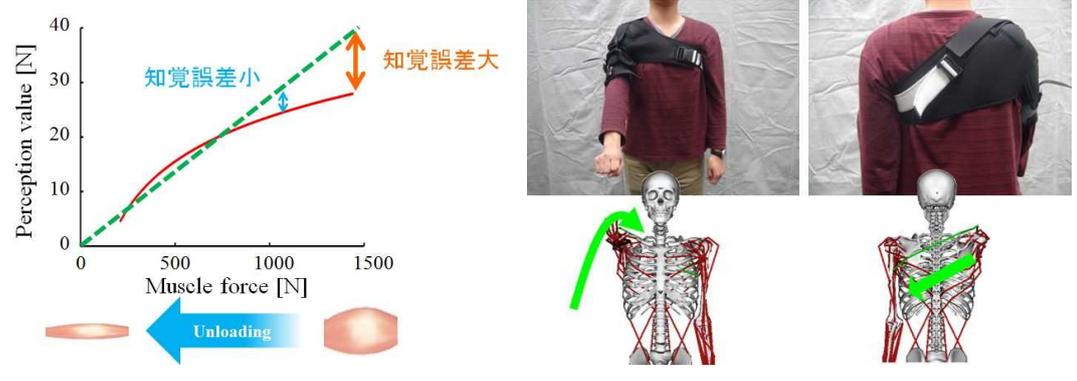
### テーマB：筋力推定に基づくステアリング操作時の力知覚モデルの構築

よりよい製品作りにおいて、物理的なスペックやコストに加えて、主観的な使いやすさなどを考慮することが求められている。ここで人間の運動・知覚特性のモデル化ができれば、製品の設計段階で人の主観的感覚を予測することも可能となりうる。本研究では、筋活動量が力知覚量に影響するという仮説をたて、人の心理物理実験から得られたデータに基づき、ステアリング操作時の力知覚特性モデルを構築した。3次元筋骨格モデルを利用してステアリング操舵時の各姿勢における筋活性度推定を行い、筋活動量に対してウェーバー・フェヒナー則に従う非線形の知覚変換フィルタをかけることで、人の主観的な力知覚量の変化特性を推定する手法を提案し、その評価を行った。



**テーマC：人の力知覚機能を向上させるウェアの開発**

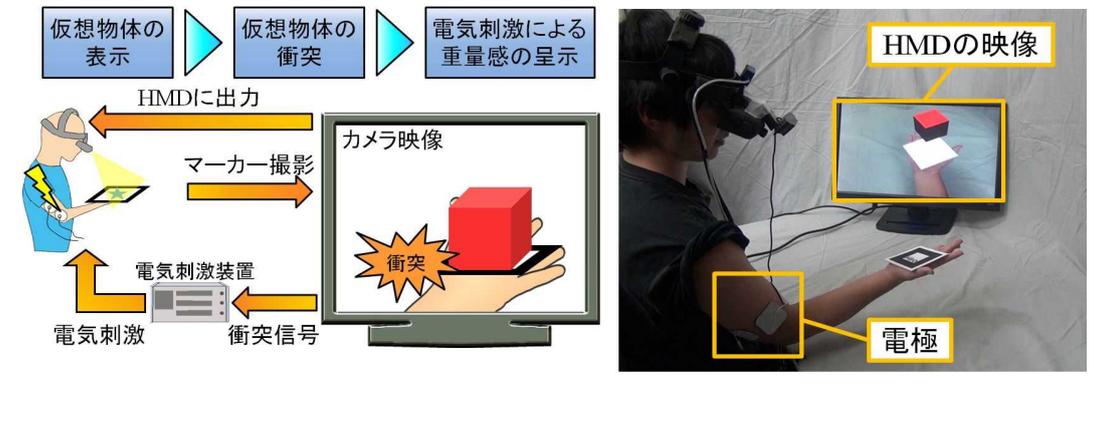
障害者や高齢者のためだけでなく、過酷な環境下で働く健康な人々に対しても運動機能や行動能力を向上させる力学的アシストへのニーズがある。人の骨格筋には筋紡錘やゴルジ腱器官といった感覚器が存在しており、これらの感覚器の機械的感度および中枢での感覚情報処理に対して、筋活動の度合いが影響を及ぼしている。テーマBの研究より、重量知覚に筋活動が影響することが確認されていた。特に筋活動が低いとき、より正確に外部刺激の強さを知覚することができることを示唆されており、これは適切に筋活動をアシストすることで、知覚感度を高め、感覚運動機能を向上させることができることを示唆している。そこで本研究では、伸縮性素材を用いて上肢の筋負担を補助し感覚運動機能を向上させることのできるウェアラブルスーツ：SEnS (Sensorimotor Enhancing Suit)を開発し、その評価実験から有効性を確認した。



**テーマD：骨格筋電気刺激ならびに視覚・振動覚刺激による仮想重量感呈示手法の提案**

力覚や触覚は物体に触れたときにその物体の存在や性質などを認識するために大変重要な感覚である。ウェアラブルな力覚呈示を実現するためには装置を小さくする必要があるが、発揮力が小さくなったり力呈示が可能な範囲に制限があったりといった問題がある。そこで第三の手法として、電気刺激を利用する。重量感には筋や腱内に存在する受容器が重要な役割を果たしていることから、筋収縮によってこれら受容器を刺激することにより、仮想的な重量感を与えることができる可能性がある。本研究では、電気的筋肉刺激を用いて重量感を呈示するシステムの構築を行い、開発したシステムを用いて

視覚・触覚情報による重量感の変化に関する検証実験を行った。実験の結果、視覚・触覚刺激を与えることで同じ電圧の電気刺激でも知覚する重量感が変化することを確認した。また、電気刺激に視覚・触覚刺激を加える事で重量感の調節が行える可能性を示した。



### 3. 今後の展開

我々は様々な機器や製品によって支えられて生活しているが、かしこいサポートを行うためには、人と機械との物理的・心理的インタラクションが不可欠である。したがって、人や人を含めた機械システムのモデル化や、機械システムを介した人間の機能拡張に関係する研究分野が重要性を増すとともに、これらの技術を応用した機器や製品がますます開発されるようになっていこう。これらの機器は、身体機能の拡張や補助、安全かつ安心な生活を送るためのサポート、そして人間を取り巻くサービスの質的向上につながるものが強く期待されており、本研究により開発した人の運動感覚評価プラットフォームを核として、今後は人をスムーズかつ安全にアシストするロボット制御への応用、人が主観的に感じる感覚予測と体感や主観のデザインへの応用、使いやすさの定量評価、現場で働く人々を補助するスーツの開発などへ展開していく。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

##### 研究目的の達成状況

生体力学的な作用としてのマルチスケール性のモデリングを目的とした研究として、2次元筋骨格モデルに基づく手先コンプライアンス楕円の解析的算出手法を考案した。これにより従来のように人を厳密に固定して測定せずに手先運動特性が評価できるようになり、人の特性を考慮した機器設計への応用可能性が拓けた。また、人の感覚特性も考慮した評価にも取り組み、3次元筋骨格モデルに基づく人の主観的力知覚特性の評価法の開発を行った。この研究は自動車メーカーからの強いニーズに基づいて車のステアリング操舵を最初の対象として実験を行っており、さきがけ研究により開発した身体モデルによる筋活動推定プラットフォームを産業応用する最初の事例となった。さらに、人の感覚運動特性を向上させるアシストウェアという世界的に見ても例

のない新しい概念の運動アシスト手法を提案し、プロトタイプウェアの製作と効果検証まで行った。くわえて、骨格筋電気刺激を使って仮想力覚感を出すという斬新なアイデアも提案し、基礎的考察を行った。このように、運動評価を目的とした筋活動推定プラットフォームの開発という技術的な核となる成果に加えて、アシストウェアや力覚呈示手法といった社会応用性、インタラクティブ性の高い新概念のアプリケーション開発まで研究期間内に遂行できたことから、当初予定していた目的はおおむね達成できたと評価できる。

#### 研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

さきがけの研究をより円滑に進めるべく、学内の研究スペースの整備を行うため途中年度で当初予算計画を若干変更した年度もあったが、研究遂行のためには大いにプラスになった。実施体制には大きな変更もなく、おおむね計画通りの執行ができた。

#### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

人の特性を理解して製品やサービスを設計することの重要性は誰もが異論ないことと思うが、その方法論は経験的な知識に頼っているのが現状である。開発した筋活動推定プラットフォームは、工学的に根拠のある定量的な指標を算出できるため、社会実装と親和性が高い。すでに、本研究により開発した人の運動感覚を評価する技術を核として、様々な共同研究の芽がうまれている。また、「ヒューマンモデリング」をキーワードとした国際交流にも積極的に取り組み、広島、香港、東京で、それぞれ複数の国内・国外研究者が講演する国際ワークショップをリーダーシップをとって主催し、分野の啓発と国際的なプレゼンスの向上を目指した活動を行った。さらに日本ロボット学会誌において特集号の編集を担当してヒューマンモデリングの工学応用に対する啓発に努めるとともに、日本機械学会や計測自動制御学会の主催する国内学会でオーガナイズドセッションを企画したり、広島市内でイブニングセミナーの立ち上げとファシリテータをつとめることを通じて研究者の地域における情報発信の新しい場の提供を目指したりするなど、新しい分野を開拓し、国際・国内を問わずネットワークを拡げる活動も行っている。今後は具体的な応用や社会実装を見越した研究にもより力をいれていきたい。

(2) 研究総括評価（本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った）。

##### （研究総括）

本研究は、生体力学的な筋骨格モデルや筋収縮モデルに加えて、主観的な感覚・感性知覚モデルを用いて人の運動感覚を評価し、製品のユーザビリティの向上や人の運動アシストに寄与することを目的としている。客観的モデルと主観的モデルの双方を用いて、人が感じる効果を最大限に導き出すところに研究の特徴がある。例えば、筋活動が低いときに人が外部刺激の強さを正確に知覚することを利用し、上肢の感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツを開発している。また、開発した筋活動推定プラットフォームを自動車のステアリング操舵に応用する実験を進めている。さらに、こうした研究活動をヒューマ

ンモデリングと呼び、数度の国際ワークショップを主催しリーダーシップを発揮していることは高く評価できる。人と機械の接触面が様々に拡大する近未来において、重要性を増す研究であるので、今後も活動を継続し世界をリードする研究者となることを期待したい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文（原著論文）発表

1 Yuichi Kurita, Minoru Shinohara, and Jun Ueda, Wearable Sensorimotor Enhancer for Fingertip using Stochastic Resonance Effect, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 43, Issue 3, pp.333-337, 2013
2 石川敬明、辻敏夫、栗田雄一、電気刺激ならびに視覚・振動覚刺激による仮想重量感呈示、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol. 19、No. 4、pp. 487-494、2014
3 Yuichi Kurita, Wearable Haptics, In E. Sazonov and M. Neuman (ed.), Wearable Sensors, Chapter 1.3, ELSEVIER, September 2014
4 Yuichi Kurita, Kohei Sakurada, and Tosho Tsuji, Evaluation of endpoint compliance based on the estimation of the muscle activity, International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, pp.1187-1189, Krakow, Poland, July 19-23, 2014
5 Yuichi Kurita, Jumpei Sato, Takayuki Tanaka, Minoru Shinohara, and Tosho Tsuji, Unloading muscle activation enhances force perception, Augmented Human 2014, March 7-9, 2014

### (2) 特許出願

研究期間累積件数：2件

1

発 明 者： 栗田雄一、辻敏夫、櫻田浩平  
発明の名称： 人体運動評価装置、方法、およびプログラム  
出 願 人： 広島大学  
出 願 日： 2012/12/7  
出 願 番 号： 特願 2012-267838、特開 2014-113225

2

発 明 者： 栗田雄一、辻敏夫、近藤雅也  
発明の名称： 工業製品デザインシステム、方法、およびプログラム  
出 願 人： 広島大学  
出 願 日： 2014/2/25  
出 願 番 号： 特願 2014-033795

### (3) その他の成果（主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等）

#### ・論文（国内）

1. 佐藤純平、竹村和紘、山田直樹、岸篤秀、西川一男、農沢隆秀、辻敏夫、栗田雄一、筋力推定に基づくステアリング操作時の力知覚モデル、日本機械学会論文集C編、

Vol. 79、No. 808、pp. 4917-4925、2013

・口頭（国際）

1. Takaaki Ishikawa, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, Wearable pseudo-haptic interaction by using electrical muscle stimulation, AsiaHaptics2014, A-14, Tsukuba, November 18-20, 2014
2. Jumpei Sato, Kazuhiro Takemura, Naoki Yamada, Atsuhide Kishi, Kazuo Nishikawa, Takahide Nouzawa, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, Investigation of subjective force perception based on estimation of muscle activities during steering operation, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 76-81, Kobe, Japan, Dec. 14-17, 2013

・口頭（国内）

1. 岸下優介、辻敏夫、栗田雄一、筋負担度のリアルタイム可視化システムの構築、平成 26 年度日本人間工学会中国・四国支部、関西支部合同大会、2014
2. 石川敬明、辻敏夫、栗田雄一、骨格筋電気刺激による重量感呈示 - 視覚と振動刺激の影響 -、第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集、pp. 436-437、2014
3. 栗田雄一、佐藤純平、田中孝之、篠原稔、辻敏夫、感覚運動機能を向上させるウェアラブルスーツ:SEnS、第 32 回日本ロボット学会学術講演会、RSJ2014AC2Q2-04、2014
4. 栗田雄一、近藤雅也、辻敏夫、筋負担度を考慮したインタフェースデザイン法の提案、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集、3P1-H07(1)-(2)、2014
5. 佐藤純平、田中孝之、篠原稔、辻敏夫、栗田雄一、力知覚機能を向上させるウェアラブルスーツ、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集、3P1-H05(1)-(3)、2014
6. 石川敬明、辻敏夫、栗田雄一、電気刺激による重量感に対する視覚および振動刺激の影響、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集、3P2-B05(1)-(2)、2014 櫻田 浩平、辻 敏夫、栗田 雄一、手先筋活性度コンプライアンスの提案、第 58 回システム制御情報学会講演論文集、pp. 121-127、2014
7. 栗田雄一、櫻田浩平、辻敏夫、筋骨格モデルを利用した手先筋活性度コンプライアンスの評価、第 19 回ロボティクスシンポジウム、2014
8. 栗田雄一、佐藤純平、辻敏夫、竹村和紘、山田直樹、岸篤秀、西川一男、農沢隆秀、筋力推定に基づく力知覚の感覚量評価の試み、日本人間工学会誌、2013
9. 栗田雄一、佐々木桂一、辻敏夫、筋骨格モデルを用いた筋力推定に基づくドア開閉の効率性評価、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集、2A2-D02、2012
10. 櫻田浩平、佐藤純平、辻敏夫、栗田雄一、筋骨格モデルと終点誤差を考慮した運動評価、第 45 回日本人間工学会中国・四国支部大会講演論文集、pp. 154-155、2012
11. 佐々木桂一、栗田 雄一、辻敏夫、筋骨格モデルを利用した上肢到達運動の効率性評価、第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集、pp. 1646-1649、2011

・その他（出版物、講演、受賞）

1. Yuichi Kurita, Human Assistive System for Improving Sensorimotor Performance, 2014 International Workshop on Human Assistive Systems Based on Human Modeling in Tokyo, Workshop talk, 2014.12.14
2. Yuichi Kurita, Computational Modeling of Subjective Force Sensation for Assisting Human Activity, IEEE ICRA 2014 Workshop on Human Modeling and Control for Assistive Technologies, Workshop talk, 2014.6.1
3. 栗田雄一、主観的な感覚はデザインできるか ～運動・知覚のヒューマンモデリングと工学的応用～、デジタルヒューマン技術協議会招待講演、2014.8.29
4. 栗田雄一、心地よいアシストを実現するための人の感覚運動特性モデリング、信州大学 人を支える知能ロボティクス・メカトロニクス技術講演会招待講演、2014.8.27
5. 栗田雄一、人を賢くサポートするためのコンピュータシヨナルヒューマンモデリング、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門東北地区特別講演会：ロボティクスによる人間支援最新技術招待講演、2014.7.4
6. 栗田雄一、広島大学研究推進機構平成24年度特に優れた研究を行う若手教員（Distinguished Researcher）受賞、2013.2.26