

研究報告書

個性と調和する相適応型人間機械システム設計論の構築

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 12 月 ~ 2020 年 3 月

研究者: 栗田 雄一

1. 研究のねらい

人に対して物理的・身体的な支援を行う人間機械システムを、物理的ヒューマンロボットインタラクション (physical human-robot interaction: pHRI) システムと呼ぶ。pHRI で起こる人と機械の物理的接触を適切に制御していない機械システムは、人が自然な感覚で操作するには反力強さと反応遅れのバランスが悪く、人と機械を1つのシステムとみたときの人間機械システムの安定性が損なわれる。私は、個々の人のもつ特性をノイズと捉えて打ち消すばかりではなく、個性として肯定的に捉え、一人の人間と一台の機械がお互い共鳴しあうことで、大きなパフォーマンスを実現できるような人間機械システムを目指したい。これを解決するには、人の感覚運動機能の理解をもとに、機械を纏ったときに人に起こる適応的变化や人が感じる快適性や運動質感を適切に取り扱うことができる相適応型人間機械システム設計論の構築が必要である。以上の課題に対して、本プロジェクトでは、着用型運動アシスト機器をケーススタディの対象として取り組む。身体の不自由な人や高齢者向けの運動支援機器の多くは剛体フレームを介した外骨格型機器であるが、日常生活には不向きなことが多い。本研究では、代表者がもつ感覚運動機能を向上させる身体アシスト技術や低圧駆動人工筋のシーズ技術をベースに、軽量、柔軟な空気圧人工筋を人の身体の体表面に取り付けることで、まるで筋肉を着るような支援力を得ることができる運動アシスト機器を開発し、そのハードウェアやソフトウェアを変更したときの主観的・客観的パフォーマンス評価を通じて、人と機械の相適応性を考慮した人間機械システムにかかる基盤技術に関する知見を得ることをねらいとする。

2. 研究成果

(1) 概要

本プロジェクトでは、大きく次の 4 テーマについて研究を実施した。

研究テーマ 1: 人の機能的性質の理解とモデル化

人と物体の接触によって起こる力学的現象のモデル化とそれを人がどのように感じるかをモデル化するとともにその応用性を探る研究に取り組んだ。具体的には、指と物体の接触面計測による滑りの指標化、力知覚モデルの構築と力覚フィードバックへの応用などの研究を行った。

研究テーマ 2: 人の機能モデルをふまえた制御技術の開発

日常生活を助けるための運動計測手法、ならびに人工筋で人を効果的に支援するための設計方法を、人の身体機能をモデル化したシミュレータをベースに開発した。具体的には、筋ノイズに基づくジェスチャ認識率の改善手法の開発、人工筋の装着部位が支援効果に及ぼす影響の調査などを行った。

研究テーマ3: 運動アシスト機器の開発

共同研究先企業と共同で低圧駆動人工筋の利用シーンを探索し、電力を使わない歩行支援スーツの開発、センサと制御を加えたよりインテリジェントな歩行アシストのできる運動アシストスーツの開発、さらにこれら人工筋スーツの利用シーンを拡張しバーチャル空間のAvatarや遠隔地にいる人の動きを体験できるウェアラブル力覚フィードバックスーツに応用した。具体的には、低圧駆動型空気圧人工筋の開発と電力を使わない歩行支援デバイスへの応用、ウェアラブル力覚フィードバックスーツの開発などに取り組んだ。

研究テーマ4: 相応型人間機械システムの設計論の構築

人工筋スーツによる運動支援技術をベースに、これらが人の客観パフォーマンスならびに主観パフォーマンスに与える影響を調査し、相応型人間機械システムの設計論を議論するとともに、よりアクティブかつダイナミックな日常生活支援のフィールドとしてスポーツに着目し、スポーツ拡張への応用可能性を探った。具体的には、運動アシストと運動主体感の関係性の考察、視覚、聴覚、振動、力覚のモダリティの違いによるタイミング提示への影響の調査とタイミング提示スーツへの応用、スポーツ拡張スーツの開発に取り組んだ。

(2) 詳細

研究テーマ1: 人の機能的性質の理解とモデル化

人と物体の接触によっておこる力学的現象のモデル化とそれを人がどのように感じるかをモデル化するとともにその応用性を探る研究を行った。

指と物体の接触面計測による滑りの指標化

透明疑似指と物体の間との接触面画像を撮影することによって、指先の変形度合いを直接計測し、そこで起こる滑り現象を指標化する手法を提案するとともに、それを触感感度と関連付ける取り組みを行った。また関連技術による特許出願も行った。また企業と連携して3DCADソフト上で使える触感デジタルデザイン支援ツールを開発してウェブ上に無料公開(CADソフトは有料)するとともに、広島大学からプレスリリースを行った(<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/57377>)。

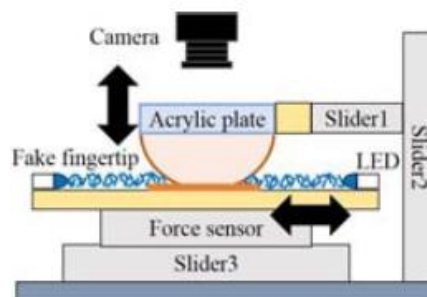
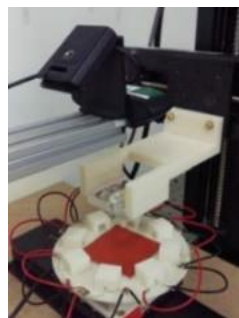




図1 疑似指と物体の間との滑り測定装置、およびプレスリリース

力知覚モデルの構築と力覚フィードバックへの応用

筋骨格モデルを用いて姿勢変化による筋活動の変化パターンを推定し、フェヒナー則に基づく力知覚モデルと組み合わせることで、人が主観的に感じる力感覚を予測する手法を開発した。また技術の社会実装としてマツダ（株）との共同研究を実施し、ステアリング操舵における力覚フィードバックの主観量を予測する技術を開発して国際誌に掲載された(IEEE Trans. On Haptics, 2018)。また名古屋工業大学田中由浩先生との共同研究で、ステアリング操舵時の力覚知覚バイアスが生じる機序を筋活動と Sense of effort を関連づけて説明する試みを実施し、論文掲載された(PLOS ONE、2020)。

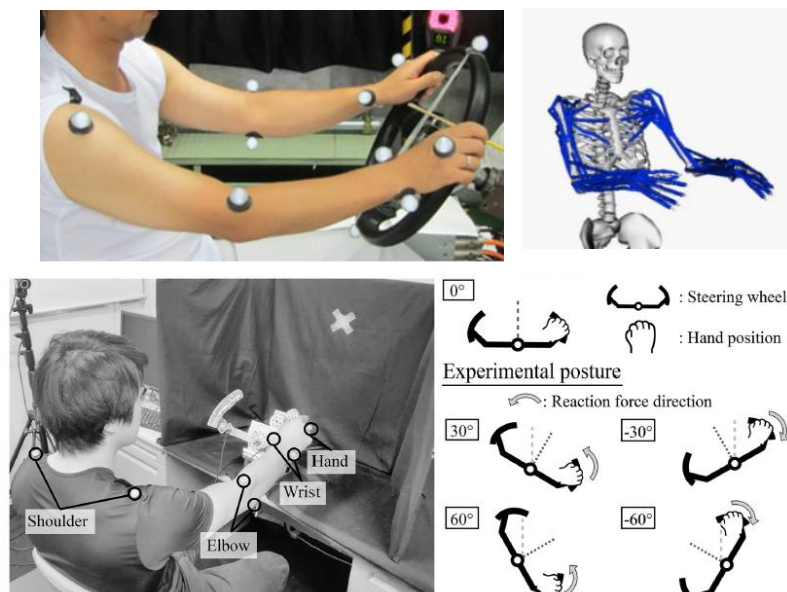


図2 ステアリング操舵における力覚フィードバック実験

研究テーマ 2: 人の機能モデルをふまえた制御技術の開発

日常生活を助けるための運動計測手法、ならびに人工筋で人を効果的に支援するための設計方法を、人の身体機能をモデル化したシミュレータをベースに開発した。

筋ノイズに基づくジェスチャ認識率の改善手法

筋骨格モデルを用いた運動シミュレーションによってジェスチャ動作を計算し、必要な筋活動度を計算した上で、信号強度依存ノイズを付与することで、試行ごとの運動のばらつきの再現を図った。解析結果がジェスチャの識別率に与える影響について考察し、適切なパラメータ選択により、運動ノイズのジェスチャ認識精度への影響を低減できることを確かめた。

人工筋の装着部位が支援効果に及ぼす影響

人工筋は軽量柔軟で人の運動に沿って伸び縮みするため着用感も良いが、取り付ける位置で支援力が大きく変化する問題がある。そこで人工筋モデルと筋骨格モデルに基づく物理シミュレーションにより、人工筋の装着部位が支援効果に及ぼす影響を評価した (Journal of Robotics and Mechatronics, 2018)。

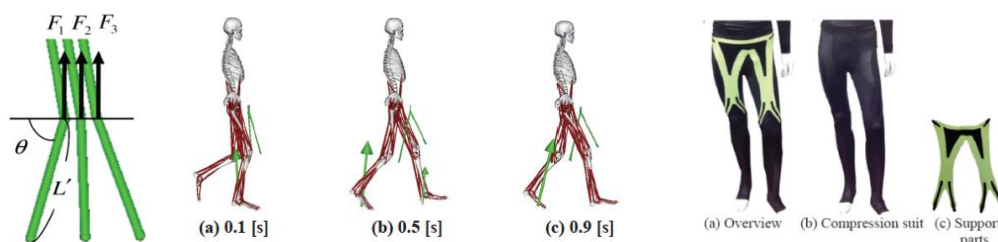


図 3 人工筋モデルと筋骨格モデルによるシミュレーション

研究テーマ 3: 運動アシスト機器の開発

企業と共同で低圧駆動人工筋の利用シーンを探索し、電力を使わない歩行支援スーツの開発、センサと制御を加えたよりインテリジェントな歩行アシストのできる運動アシストスーツの開発、さらにこれら人工筋スーツの利用シーンを拡張しバーチャル空間のアバターや遠隔地にいる人の動きを体験できるウェアラブル力覚フィードバックスーツに応用した。

低圧駆動型空気圧人工筋の開発と電力を使わない歩行支援デバイスへの応用

ダイヤ工業(株)との共同研究により、低圧で駆動する空気圧人工筋を新たに開発し、これを応用することで電力の外部供給が不要でありながら装着者の動きに合わせてアクティブに支援を行うことが可能な動作支援装置を開発し、国際論文誌に掲載されるとともに、ニュースや解説記事などで取り上げられる成果を得た (Advanced Robotics, 2017)。



図 4 空気圧人工筋による動作支援装置

また、開発した低圧駆動型人工筋の特性評価を行った。今期は静的な性質を評価し、内圧、発揮力、人工筋長さの関係性を計測しモデル化を、国際論文誌に掲載された (IEEE Robotics and Automation Letters, 2018)

ウェアラブル力覚フィードバックスーツ

人工筋スーツを、筋負担軽減に使うだけでなく、着用可能な力覚フィードバックデバイスとして利用するというアイデアを着想し、プロトタイプを製作した(日本ロボット学会学術講演会で発表)。また人工筋を手首に配置し、手首周りの内外転、伸展屈曲動作を支援するグローブ型デバイスを開発して、国際論文誌に掲載された (IEEE Robotics and Automation Letters, 2018)。(図 5)



図 5 カ覚フィードバックを取り入れた人工筋スーツとグローブ型デバイス

研究テーマ 4: 相応型人間機械システムの設計論の構築

人工筋スーツによる運動支援技術をベースに、これらが人の客観パフォーマンスならびに主観パフォーマンスに与える影響を調査し、相応型人間機械システムの設計論を議論するとともに、よりアクティブかつダイナミックな日常生活支援としてスポーツシーンに着目し、スポーツの拡張という新しいフィールドへの応用可能性を探った。

運動アシストと運動主体感の関係性の考察

着用型の運動アシストにおいて、主観パフォーマンスと客観パフォーマンスにずれが生じるのはどのようなときか、またアシストの時間ずれがアシスト感や運動主体感にどのような影響を及ぼすかについて、実験ならびに考察を行い、国内学会で発表した(日本ロボット学会学術講演会、2019)。

視覚、聴覚、振動、力覚のモダリティの違いによるタイミング提示への影響の調査とタイミング提示スーツへの応用

リハビリやスポーツトレーニングにおける運動タイミングの提示は主に指導者により口頭や身振り等で提示されているが、タイミングを正確に伝達するのは困難である。そこで力覚フィードバックによるタイミング提示スーツの開発を行い、野球のバットスイングにおけるタイミング提示を行う VR トレーニングシステムを試作して国際会議で発表した (Worldhaptics, 2019)。

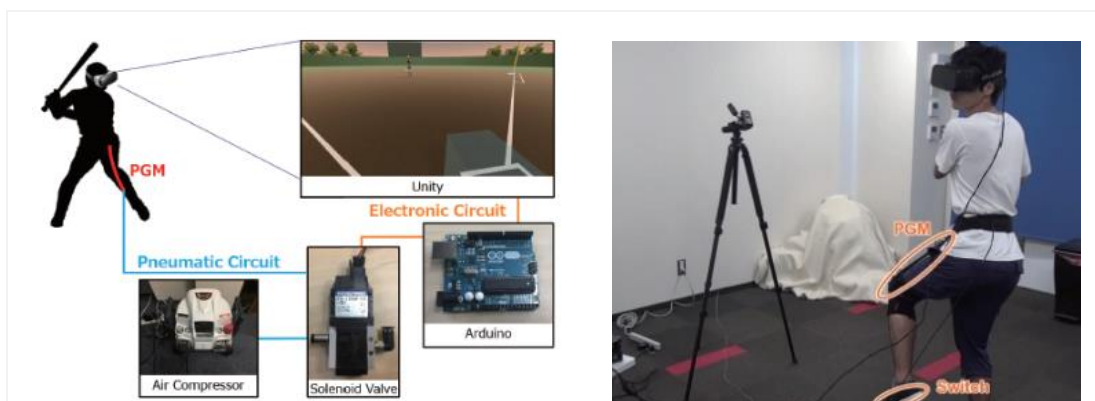


図 6 カ覚フィードバックによるタイミング提示スーツと VR トレーニングシステム

人工筋スーツによる運動スキルトレーニング支援

慶応義塾大学 Kai Kunze 先生との共同研究により、人工筋スーツを着用してカ覚フィードバックを行うことにより、リズム的なドラムたたき動作のトレーニングに有用であることを確認し、国際会議で発表した (Augmented Humans, 2020)。

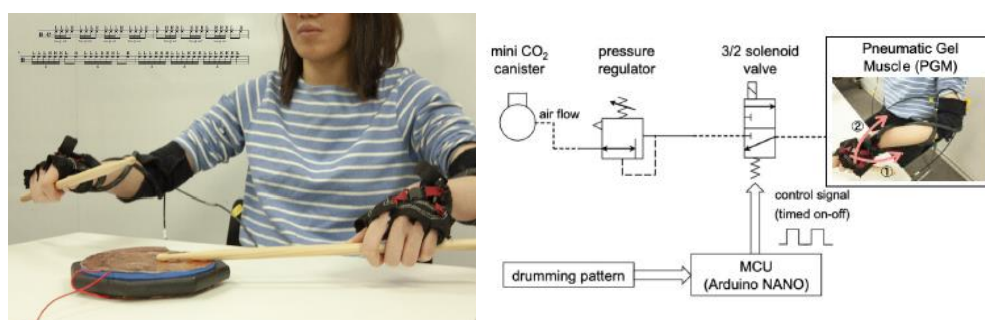


図 7 人工筋スーツによる運動スキルトレーニング支援

スポーツ拡張スーツ

軽量・柔軟・安価という人工筋スーツの利点を最大限活かした応用例として、スポーツ体験の拡張に取り組んだ。カ覚フィードバックスーツの活用により、フィールドを自由に駆け回りながら、他者とのインタラクションを力情報として受け取れる Muscleblazer というシステムと、それをゲームに利用した新しいスポーツを提案した。国際会議で発表ならびにデモを行った結果、日本チーム最高の第三位に表彰された。(図 8) (First International Symposium on Amplifying Capabilities, Competing in Mixed Realities, 2018)

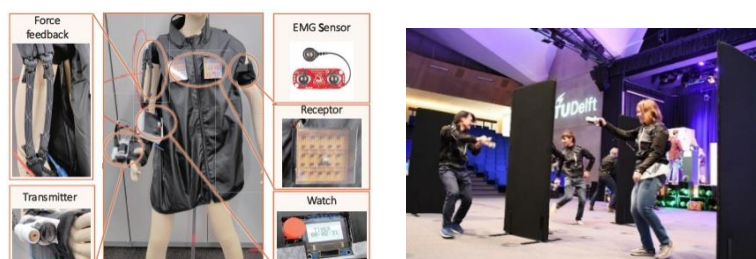


図 8 カ情報を伝達できる Muscleblazer とそれを利用したスポーツゲーム

3. 今後の展開

本研究課題では、①人の機能的性質の理解とモデル化、②人の機能モデルをふまえた制御技術の開発、③運動アシスト機器の開発、④相応型人間機械システムの設計論の構築のテーマを設定し、人と機械の相応インタラクションモデルの構築とその応用に取り組んだ。本プロジェクトで得られた成果は、運動アシストのデザインの重要性を強く示唆するものであった。実験では、動作の客観的なパフォーマンスと支援感などの主観的パフォーマンスで相反するケースが確認されている。アスリートのように記録や順位を競うユーザにとっては客観的パフォーマンスの向上が目的になるだろうが、エンタテインメントとしてスポーツを楽しむライトなユーザにとっては、主観的パフォーマンスの向上が重要視される状況もありうる。本プロジェクトで開発したソフトエグゾスkeletonスーツのような手軽な使い方を目的とする運動拡張機器では、ユーザの主観的感覚を考慮したデザインの重要性が増していくだろう。今後、発達心理や HCI(ヒューマンコンピュータインタフェース)の分野で研究されている運動主体感や身体所有感に関する知見を、運動アシストのデザインにも活用する取り組みの必要性を感じた。メガネは、視力を補正したり保護したりする感覚拡張器具といえるが、同時に装飾やファッションアイテムとしても使われている。本プロジェクトで開発した身体能力を拡張する機器も、はじめは機能面から評価されるだろうが、普及に伴い一般に広く認知され、日用品として利用されるようになれば、単なる性能ではない側面も重要視されるようになるだろう。そのときには、年をとる、という概念も、あいまいになっているかもしれない。多くの人が前向きに長生きしたいと思う世界のために、技術が貢献できることを模索し、実践していきたいと思う。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

本プロジェクトでは、①人の機能的性質の理解とモデル化、②人の機能モデルをふまえた制御技術の開発、③運動アシスト機器の開発、④相応型人間機械システムの設計論の構築のテーマを設定し、人と機械の相応インタラクションモデルの構築とその応用に取り組んだ。プロジェクト初期段階でダイヤ工業(株)との共同研究によって低圧駆動型ゴム人工筋を比較的自由に利用させていただけるようになったことをベースに比較的低出力・低機能・安価なソフトエグゾスkeletonに関する着想を得て以降は、その技術の開発と評価、応用フィールドの探索に努め、日常生活やスポーツアクティビティの拡張という新しいフィールドに挑戦することができた。その結果、論文 20 本、国際会議 33 本、解説記事 11 本、招待講演 18 件などの成果を出すことができたことから、当初目標は十分達成できたと考える。しかしながら、人と機械の相応性に関する議論と理論化は道半ばであり、今後は生理学、心理学、情報学などの分野の国内・回外研究者と研究をすすめていきたい。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

適切な研究実施体制を組むことができ、また研究費の執行もほぼ計画通りに実施できたと考える。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本プロジェクトを通じて発信した、人と機械の特性を考慮したマンマシンインタフェースデザイ

ンの重要性は、様々な方の興味をひくことができ、多くの企業との共同研究につながった。今後
もひきつづき基礎研究と応用展開の両輪ですすめて社会実装につなげていきたい。また本プロ
ジェクトを通じて人間拡張(Human Augmentation)という新しい分野の立ち上げに関わっており、
解説記事の執筆依頼や招待講演をさせていただく機会を多くいただけた。人間拡張分野の知
名度は高まっていることを実感しており、エマージングな本分野の国際学術的ネットワークの構
築をすすめるとともに、社会・経済へ成果を波及させていく活動をつづけていく。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Yuichi Kurita, Jumpei Sato, Takayuki Tanaka, Minoru Shinohara, and Toshio Tsuji, Unpowered sensorimotor-enhancing suit reduces muscle activation and improves force perception, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 47(6):1158-1163, December 2017
2. Kazunori Ogawa, Chetan Thakur, Tomohiro Ikeda, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, Development of a Pneumatic Artificial Muscle Driven by Low Pressure and Its Application to the Unplugged Powered Suit, Advanced Robotics, 31(21):1135-1143, November 2017
3. Yusuke Kishishita, Kazuhiro Takemura, Naoki Yamada, Toshihiro Hara, Atsuhide Kishi, Kazuo Nishikawa, Takahide Nouzawa, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, Prediction of Perceived Steering Wheel Operation Force by Muscle Activity, IEEE Transactions on Haptics, 11(4):590-598, December 2018
4. Swagata Das, Cassie Lowell, Yusuke Kishishita, Kazunori Ogawa, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, ForceHand glove: a wearable force-feedback glove with pneumatic artificial muscles (PAMs), IEEE Robotics and Automation Letters, 3(3):2416-2423, July 2018
5. Chetan Thakur, Kazunori Ogawa, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita, Soft Wearable Augmented Walking Suit with Pneumatic Gel Muscles and Stance Phase Detection System to Assist Gait, IEEE Robotics and Automation Letters, 3(4):4257-4264, October 2018

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件

(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)

主な学会発表

1. Ryota Sekizuka, Masaru Ito, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, and Yuichi Kurita, Evaluation System for Hydraulic Excavator Operation Skill Using Remote Controlled Excavator and Augmented Reality, The 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2019), Macau, China, November 4-8, 2019
2. Ai Higuchi, Junichiro Shiraishi, Yuichi Kurita, Evgeniia Shchelkanova, Yosuke Ikeda, Tomohiro Shibata, Gait Evaluation on Parkinson's Disease Patients Using Spontaneous Stimulus Induced by UPS-PD, 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), pp.412-416, Paris, January 14-16, 2019

受賞

1. 2019.3.5 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 SI2018 優秀講演賞（石橋侑也, 辻敏夫, 栗田雄一, 筋骨格モデルと信号強度依存ノイズによるジェスチャ動作における手先加速度の解析, 第 18 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（SI2018））

著作物

1. 栗田雄一, 指と物体の接触面計測による滑りの指標化と触感評価への応用, 表面技術, Vol.70, No.3, pp.133-136, 2019.3
2. 栗田雄一, ソフトアシスト技術による感覚・運動能力の拡張, システム制御情報学会誌リハビリと健康維持－工学連携がひらく未来特集号, Vol.63, No.8, pp.346-351, 2019.8

以上