

# 2017 年度

東京大学 人工物工学研究センター  
人工物と人との相互作用研究部門

## 移動ロボティクス研究室 (太田研究室) 研究紹介

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5  
東京大学柏キャンパス総合研究棟 5F

URL: <http://otalab.race.u-tokyo.ac.jp>

### メンバー

教授	太田 順
助教	緒方 大樹
特任研究員	白藤 翔平, Jose Ildefonso Udang Rubrico, 姜 平
博士課程学生	Veerachart Srisamosorn, 上西 康平, Hamdi Sahloul, 武田 研恒, 范 長湘, 高 思霄, 林 静思
修士課程学生	Becky Su, Anner de Jong, 菅野 俊介, 陳 臻怡, 陳 毅冰, Akin Yalcin, 伊藤 達真, 霧生 和樹
学部 4 年生	竹内 暉英, 藤川 華織
研究生	Enrico Piovanelli
秘書	田村 美香, 中村 綾子

## 研究の概要

我々は 1989 年から群知能ロボットの研究を行ってきました。我々は、「ある空間に滞在し、動作している人間」、「人間を支援する知的エージェントとしてのロボット」、「ロボットと人間が相互作用する環境」の三者から構成される系を考えてきました。我々は、動作計画手法、進化的計算、最適化学、制御工学等を理論的基盤として、ロボット工学、サービス工学、生産システム工学に関する研究プロジェクトを遂行しています。最終的には人間と相互作用し人間を支援するエージェントの知能並びに運動・移動機能を解明し、人を含むマルチエージェントシステム設計論の構築を目指します。現在は「マルチエージェントロボット」、「大規模生産／搬送システム設計と支援」「移動知、人の解析と人へのサービス」という 3 つの分野において研究を行っています。

具体的には以下のテーマについて研究を進めています。

### マルチエージェントロボット

重量物操作のための小型移動ロボットの開発

ロボットの性能を考慮した複数ロボットへの教示

3次元シーンにおける ICP の外れ値からの効率的な前景のセグメンテーション手法

高齢者の感情の推定のための飛行船を用いた顔自動追従システム

### 大規模生産／搬送システム設計と支援

ピッキングを対象とした画像認識における撮影環境と認識処理プロセスの自動設計

### 移動知、人の解析と人へのサービス

人間同士の時間的共創過程の解明

複数の症状を再現可能な患者ロボットの開発

腰部アシスト装置の開発に向けたベルトロック機構の提案と検証

高密度表面筋電位を用いた前腕伸筋の活動の信号源推定

順動力学シミュレーションによるヒトの起立姿勢制御の再現

## 重量物操作のための小型移動ロボットの開発

家庭環境やオフィスにおける重量物操作をロボットが人間に代わっておこなうことで、人間の身体的負荷を軽減することができるが、こうした環境は一般的に狭く、工場で用いられているような大型のロボットの運用は困難である。また、対象物や作業環境は流動的に変化するため、環境に固定されたロボットによる作業も現実的ではない。そこで、小型移動ロボットによる重量物操作の実現を目指す。

重量物操作のためにはある程度大きな力を物体に及ぼさなければならないが、小型移動ロボットの場合、高出力を発揮したときにその反力によってロボット自身が転倒する可能性がある。ロボットが一度転倒してしまうと作業の続行は極めて困難になるため、こうした転倒の発生を防がなければならない。転倒を防止できれば、これまで困難であった重量物操作が可能になる。さらに複数台の小型移動ロボットの協調により、例えば重量物を傾けてその下に台車を置き搬送する[1]といったような、より多彩な操作が可能になる。

本研究では、高出力を発揮しても転倒しないマニピュレータとして、図1に示す機構を提案した[2]。これは、床と物体に接触する直動アクチュエータのそれぞれの接触部に受動関節が用いられていることにより、反力の方向が常にアクチュエータの向きと一致し、機構を転倒させるモーメントが発生しないというものである。この機構は出力の大きさによらず転倒することはない。さらにこの機構を搭載した小型移動ロボットを開発した(図2)[3]。

このロボットは関節が受動であるため、出力しながら力を及ぼす位置、方向を調整することができない。そのため出力前に物体に対して適当に配置することが重要になる。ここでは既知の重量物の傾け操作をおこなうための配置決定の手法を提案した。まず物体にかかる力を解析し、傾け操作に必要なロボットの台数が1台か2台かを決定する。1台の場合はロボットにかかる力の解析からロボットが滑らずに物体を傾けるための条件が得られる。2台の場合は物体を支えるための2台目のロボットを導入し、ロボットが滑らない条件を制約条件として、力の和の最小化問題を解くことで最適配置が得られる。この手法を用いて図3のように実際に40.0kgの物体を傾けた[3]。

**Keywords:** mobile robot, large force, pushing manipulation

### Reference

1. F. Ohashi, K. Kaminishi, J. Heredia, H. Kato, T. Ogata, T. Hara and J. Ota: "Realization of Heavy Object Transportation by Mobile Robots Using Handcarts and Outrigger," ROBOMECH Journal, 3:27 DOI 10.1186/s40648-016-0066-y, 2016.
2. S. Shirafuji, Y. Terada and J. Ota: "Mechanism Allowing a Mobile Robot to Apply a Large Force to the Environment," Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, pp 795-808, 2016.
3. 伊藤 達真, 白藤 翔平, 太田 順: "協調による重量物操作をおこなうための小型移動ロボットの開発," 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2017, 2017.

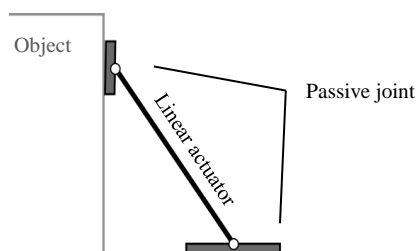


図1 反力によって転倒しない機構



図2 小型移動ロボット



図3 2台のロボットによる重量物の傾け操作

## ロボットの性能を考慮した複数ロボットへの教示

本研究では、複数ロボットからなるシステムへ、どのように動作を人が教示するかという問題に着目し、1人の人が教示した動作を、容易に複数ロボットの動作へと分解し、ロボットの動作へと変換する方法を提案している。ここではいかなのような手法を提案した。はじめに、人がある作業を達成するために必要な動作の例を、人に取り付けた簡易なデータグローブを通してロボットに直接的に示す(図1)。本研究で開発したシステムは計測された物体操作の形態の多様性に応じて適正ロボット台数を割り出す。さらに、開発した専用のエディタを人が操作することにより、自動的に決められたロボットの台数に応じて、各ロボットに適切に動作を振り分けるとともに動作を設定する。最後に、ここまでの過程で得られた各ロボットの動作の軌道を、システム上で無駄のない形式に補正されることで、より迅速なロボット動作が実現される。提案した方法論を用いて、物体の持ち上げ、物体の傾け、椅子の展開等の4種類の作業を人間が教示し、対応する複数台のロボットによる物体操作の動作プログラムが生成できることを確認するとともに、従来の手法よりも短時間でロボットの動作プログラムを生成できることを確かめ、提案手法の有効性を確かめた(図2)。

**Keywords:** mobile robot, cooperating manipulation, teaching

### Reference

1. Figueroa Heredia, Jorge David, Sahloul, Hamdi, & Ota, Jun. (2016). Teaching mobile robots using custom-made tools by a semi-direct method, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 28(2), 242-254.
2. Jorge David Figueroa Heredia, Jose Ildefonso U. Rubrico., Shouhei Shirafuji, and Ota Jun. (2017). Teaching Tasks to Multiple Small Robots by Classifying and Splitting a Human Example, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 29(2)



図1 椅子の展開の教示

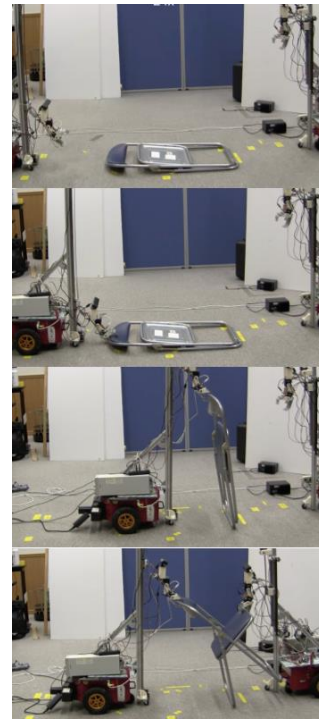


図2 生成された複数台のロボットの動作

### 3次元シーンにおける ICP の外れ値からの 効率的な前景のセグメンテーション手法

カメラによって撮影されたシーンから動いている物体のモデルを再構築するには、いかに背景と前景をセグメンテーションするかが重要である。前景は 3 次元点群の位置合わせに用いられる一般的な手法 Iterative Closest Point (ICP) の結果の外れ値として現れる。多くの研究では、モフォロジカルフィルタやグラフ最適化といった手法でこれらの外れ値からノイズを除去して前景を取得する。通常はこれらの外れ値がどのように選択されたかを気にすることはなく、単に ICP の外れ値として単一的に扱う。

本研究では動いている RGB-D センサを用いて環境を 3 次元的に再構築する。新しいフレームと、それまでに統合したサーフェイスとの位置合わせは、ICP アルゴリズムによって達成される。そのうえで、前景にある物体は ICP の結果の外れ値 (図 1b) から意味のあるセグメントを取り出すことで得られる。セグメント化された前景は静的な再構築のプロセスとは独立した、前景の構築のプロセスとして、前景オブジェクトを追従しながら新しく得られたサーフェイスを統合していく。

本研究では、既存の研究では区別されていなかった、ICP の外れ値の判断基準である 5 種類の要因を陽に区別して ICP の結果を調査した。結果としてノイズを除去した後の前景は主に、距離に起因した外れ値の領域にあることを確かめた (図 1c)。これを踏まえ、距離に起因した外れ値から遠距離の点群を切り捨てたものを抜き出し、これにバイラテラルフィルタを適用する手法を用いることで、実時間処理で既存の手法に比べ 12% 評価値の高いセグメンテーションの結果が得られた (図 2)。詳細はこの手法に関する論文を参照のこと<sup>[1]</sup>。

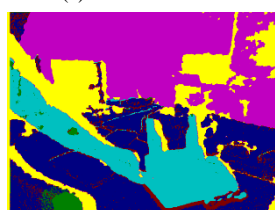
ここでの結果は、遠距離にある点群や角度、空間に関する外れ値を除いたほうが、前景のセグメント化のプロセスは、時間、質ともに向上することを表している。さらにここでは、グラフカットといったグラフ理論を用いた抽出画像の洗練化手法も意味がないことも確かめた。現在は、物体が動き始めてすぐに静的な環境からセグメント化できるように研究を進めている。



(a) RGB フレーム



(b) ICP の外れ値



(c) 外れ値の区分化によるノイズの削減

- 見失った深度値
- 距離の外れ値
- 対象の空間外
- 遠距離の点群
- 角度の外れ値
- 外れ値以外

図 1. 用いた RGB データと位置合わせの結果得られた ICP の外れ値。(a) 動いている物体が写った RGB 画像。(b) 対応する ICP の外れ値。(c) 外れ値の区分を表すカラーマップ。距離の外れ値 (緑がかかった青色) が提案手法で用いた外れ値。

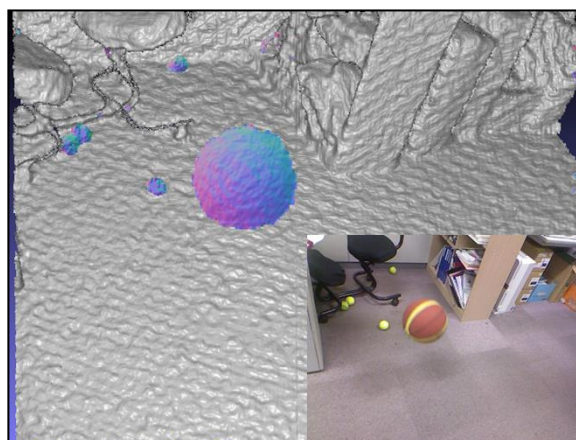


図 2. (中央) 再構築した環境にフォンシェーディングを適用した表面。色付けたものが前景。いくつかのボールがバウンドするシーンから明確に前景を抜き出していることがわかる。(右下) 対応する RGB 画像。

[1] Hamdi Sahloul, Jorge Figueroa, Shouhei Shirafuji, and Jun Ota, "Foreground segmentation with efficient selection from ICP outliers in 3D scene," in 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, Dec 2015, pp. 1371-1376.



## 高齢者の感情の推定のための飛行船を用いた顔自動追従システム

介護施設内において高齢者の方に適切な介護を行うためには、顔の表情を定期的に観察する必要がある。現在は、介護士が高齢者の顔を確認し、その顔に笑顔があるかどうかを判断基準とした観察が経験的におこなわれている。しかし、介護の必要な高齢者の数に対し介護士の数は十分とは言えず、定期的な観察が必要なこの手法は非効率であり介護士に大きな負担を強いている。そのため、人の顔を追跡しながら、表情の計測を行うことのできる何らかのシステムがあれば介護士の負担を減らすことができる。そこで、本研究は環境カメラと移動カメラを併用して人間の顔の追跡を行い、顔画像を撮影するシステムの構築を目的とする。

先に提案した手法では、人の顔画像を取得し、その人の感情の推測をおこなうことのできる、小型のカメラが搭載されたクアドロータを用いていた。空間上での各人の位置・姿勢とクアドロータの位置を測定するため Kinect カメラを必要な領域が収まるように環境に配置する。カメラから得られた人の位置と向きを用いて、顔から一定距離、離れた場所でカメラが顔の正面へ向くように、クアドロータの目標位置、姿勢を定めて、クアドロータはそこへと移動するよう制御される。これによって横3メートル、縦3.5メートルのエリア内で1人の対象者の顔を追跡することが可能になったが、クアドロータの電池寿命が短く、騒音の問題があった。その問題に対し、新たにクアドロータの代わりに浮揚ガスが充填された飛行船用いる手法を提案している。また、複数の魚眼カメラを用い、人間と飛行船の位置を測定する(図1)。浮揚ガスによりプロペラを動かさずにホバリングができ、電池消費及びプロペラの騒音を減らすことができる。また、飛行船は友好的、安全的なロボットである。図2に飛行船のプロトタイプを示す。

**Keywords:** 飛行船, 魚眼カメラ, 人間追跡, 顔追跡

### Reference

- [1] Srisamosorn, V., Kuwahara, N., Yamashita, A., Ogata, T., and Ota, J. "Design of Face Tracking System using Environmental Cameras and Flying Robot for Evaluation of Health Care". *Digital Human Modeling: Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. DHM 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9745. Springer, Cham, pp. 264-273, Jul 2016.*
- [2] Srisamosorn, V., Kuwahara, N., Yamashita, A., Ogata, T., and Ota, J. "Design of Face Tracking System Using Fixed 360-Degree Cameras and Flying Blimp for Health Care Evaluation". *Proceedings of the 4th International Conference on Serviceology (ICServ 2016), pp. 63-66, Jul 2016.*

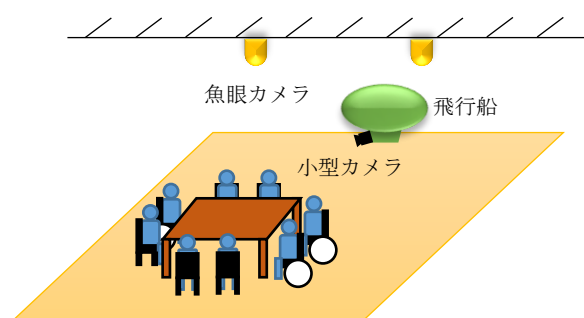


図1 システムのイメージ: 介護施設での魚眼カメラと飛行船

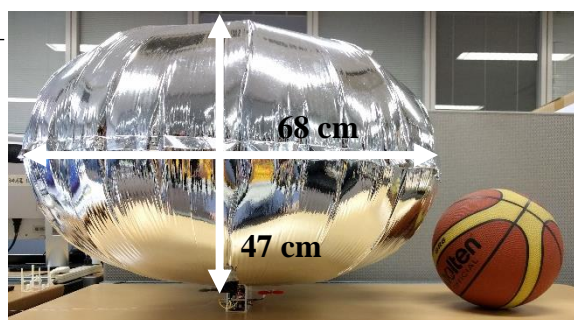


図2 飛行船のプロトタイプ

# ピッキングを対象とした画像認識における 撮影環境と認識処理プロセスの自動設計

生産能力の向上や生産コストの削減のため、製品の組立や検査など多くの作業において、画像認識技術が用いられている。画像認識を行うためには、まず、画像を取得するための撮影環境を適切に設定する必要がある。次に、その画像中から認識対象の物体種類、位置、角度などを認識をするための処理プロセスを設計することが必要となる。画像認識には、画像変換・特徴抽出・識別という3つの処理が一般的に含まれる。これら、撮影環境と画像認識処理の設計は専門家によって成されるが、環境設定と画像認識に含まれる処理とパラメタの組み合わせは膨大であり、かつ、それらが相互依存関係にあるため、多くの時間と労力を要する。

本研究では、製造ラインにおけるピッキング作業を例にとり、認識対象の物体種別、位置、角度を認識するための、撮影環境と画像認識処理を同時に自動設計することを試みている (Fig. 1)。撮影環境として、カメラと認識対象との距離、および、照明の明るさ (RGB それぞれの明度) を考慮する。また、画像認識処理には、現在、局所特徴量を利用した認識手法を用い、その前処理パラメタと特徴量を用いた識別機の設計を対象としている。以上を実機ベース最適化問題として定式化し、メタヒューリスティクスを用いて導解することを試みる。実験ベース最適化を用いる理由は、現実世界における撮影環境の不確実性のためである。この不確実性のため、理論的な導解、もしくは、計算機実験だけによる導解が非常に困難である。Fig. 2 と Fig. 3 それぞれに、実際の実験の概念図と、提案したアルゴリズムを示す。実験の結果、妥当な時間内に十分な認識精度をもった解を導出できることが確認された。

**Key words:** automatic design, optimization, image recognition, image acquisition environment

## Reference

- [1] K. Tsujimoto, *et al.*: "Simultaneous Design of Image Conversion Parameters and Classifier in Object Recognition for a Picking Task," Proc. Int. Conf. Robotics Biomimetics (ROBIO2014), pp. 457-462, 2014.
- [2] 行澤大吾, 緒方大樹, 高田俊之, 植山剛, 太田順: ピッキングを対象とした撮影環境を含む画像認識システムの自動設計, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 野田, 3月15-16日, p.155, 2016

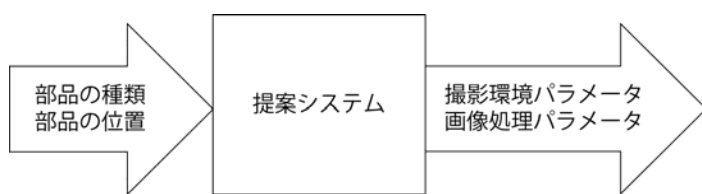


Fig. 1 問題設定

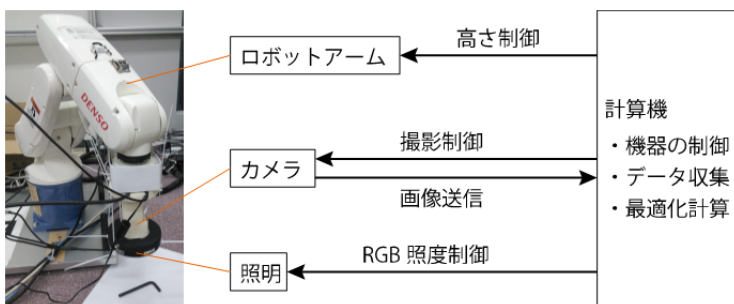


Fig.2 実験ベース最適化による導解のための実験概念図

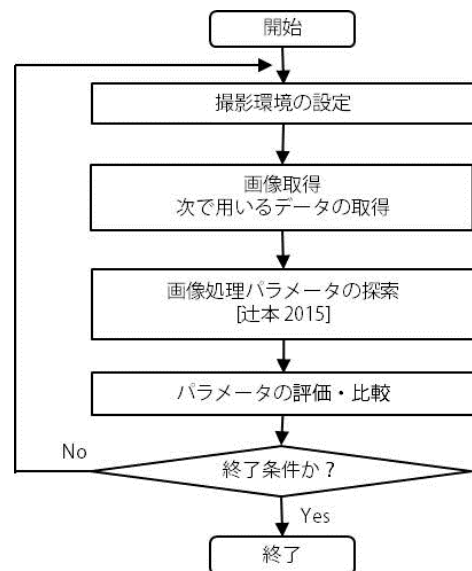


Fig.3 導解アルゴリズム

## 人間同士の時間的共創過程の解明

スポーツやオーケストラに見られるように、人間は、多者間で協調しながら行動することができる。そこには、感覚情報の処理と統合、運動指令から運動の遂行、および、他者との協調などにかかる複数の時間遅れが存在しているが、それにもかかわらず、人間は他者と協調してリアルタイムに運動を生成している。このような人間の共創的コミュニケーションは、ヒューマンインタフェースやヴァーチャルリアリティなどの分野に見られるように、人間と人工物の協調が問題となる人工物の設計を考える上でも重要である。

そこで、心理学的な行動実験を用いて、共創的なプロセスの特徴とメカニズムを明らかにすることを目指している。具体的には、指タッピングによる3者間の協調的リズム生成課題を用いている。結果、人間のリーダに2人が同時に合わせるリズム生成は、メトロノームに2人で合わせる時よりも、テンポが速くなりやすいことが明らかとなった。これは、人間が外界の刺激よりも無意識のうちに早く指をタップすることと、人間のリーダは、追従する二人の生成するリズムを無視するように言われていたにもかかわらず、無意識のうちに影響を受けていたためと考えられる。また、メトロノームとのリズム生成においては、メトロノームに追従してリズムを生成する傾向があるのに対して、人間同士でリズムを生成するとき、他者の作るタイミングを予期的にとらえていることが示唆された。

**Keywords:** 時間的共創、多者間コミュニケーション、協調的リズム生成

### References

- 1) T. Ogata, T. Katayama, Y. Miyake and J. Ota, Cooperative Rhythm Production between Three People through Auditory Signals. In Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp. 456—459, Nagoya, Nov. 2012.
- 2) 片山貴裕、緒方大樹、三宅美博、太田順、3者間リズム生成課題を用いた複数の他者との時間的協調の観察とモデル化. 第25回自律分散システムシンポジウム資料、pp. 215—220、仙台、2013

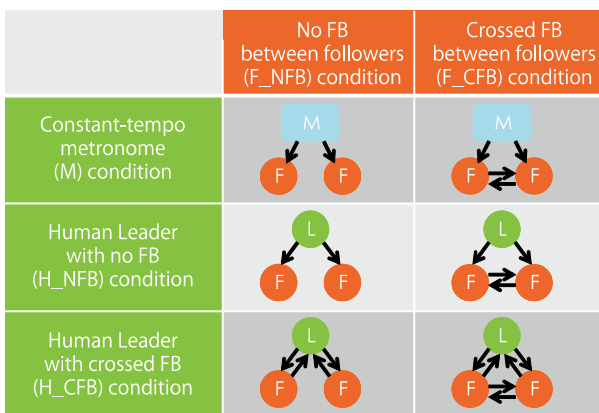
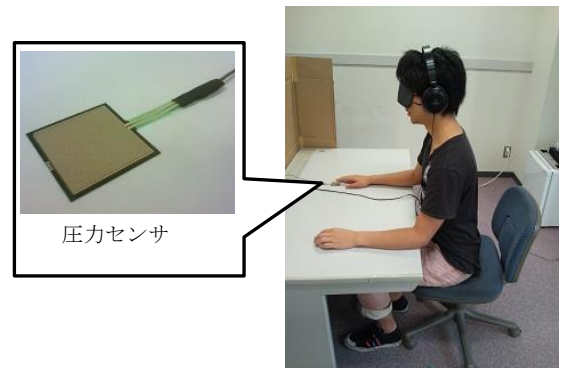


Fig. 2 テンポを一定に保つリーダの条件とそれに合わせてリズムを生成するフォロワ2人の条件。矢印の方向にタイミング情報が伝えられることを意味している。

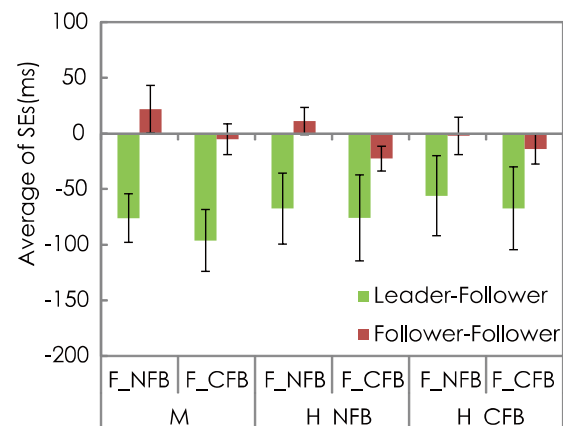


Fig. 3 同期誤差 (SE) の結果。フォロワはリーダに対して早打ちする傾向がある。人間同士の方がその傾向は小さい。



## 複数の症状を再現可能な患者ロボットの開発

超高齢化社会に伴い、看護師に求められる技術はますます高度化している。また、看護師は患者一人一人に即した介護を行うことが求められる。しかし、倫理的な問題から看護学生は実際の患者を相手として看護技術を学ぶことができない。このことは看護学生が多様な患者に対応する能力を獲得する大きな妨げとなっている。

そこで、我々は複数の患者の状態を再現できる、車椅子移乗スキル学習用の患者ロボットの開発を行っている。この患者ロボットは大きく分けて3つの状態を再現できる。一つ目は麻痺により身体の運動に影響が出ている状態、二つ目は身体を動かすと痛みを伴い苦痛を表現する状態、また、三つ目は医療機器を装着している状態である。これらの状態に対し、看護師は適切に車椅子移乗を行う必要がある。

以上の状態を再現するために、これまで我々が開発してきた、力の弱った高齢者を再現した患者ロボットを基にして、新たなロボットの開発に取り組んだ (Fig. 1)。具体的には、片麻痺、および、四肢麻痺患者の体幹の動きを再現するために、新たな腰部と臀部の関節を開発した。これらにはコンプライアントジョイントを組み込み、また、力センサを搭載した。コンプライアントジョイント中のバネにより、人間の身体のコンプライアンスを再現している。また、実際の麻痺患者のビデオから制御メカニズムの開発とパラメタ設定を行った。また、関節速度が一定以上になると「痛い」と表現するメカニズムを開発した。さらに、点滴管やスリングなどの医療機器を取り付け可能にした。今後は、看護学生の教育効果が見られるかについて実験を行う予定である。

**Key Words:** Robot patient, Nursing education, Skill acquisition, Paralysis simulation, Various type of patients

### Reference

- [1] Z. Huang, T. Katayama, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, K. Aida, N. Kuwahara, T. Ogata and J. Ota, "Design and evaluation of robot patient for nursing skill training in patient transfer," *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 19, pp. 1269-1285, 2015.
- [2] T. Ogata, A. Nagata, Z. Huang, T. Katayama, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, K. Aida and J. Ota, "Mannequin system for the self-training of nurses in the changing of clothes," *Kybernetes*, vol. 45, no. 5, pp. 839-852, 2016.

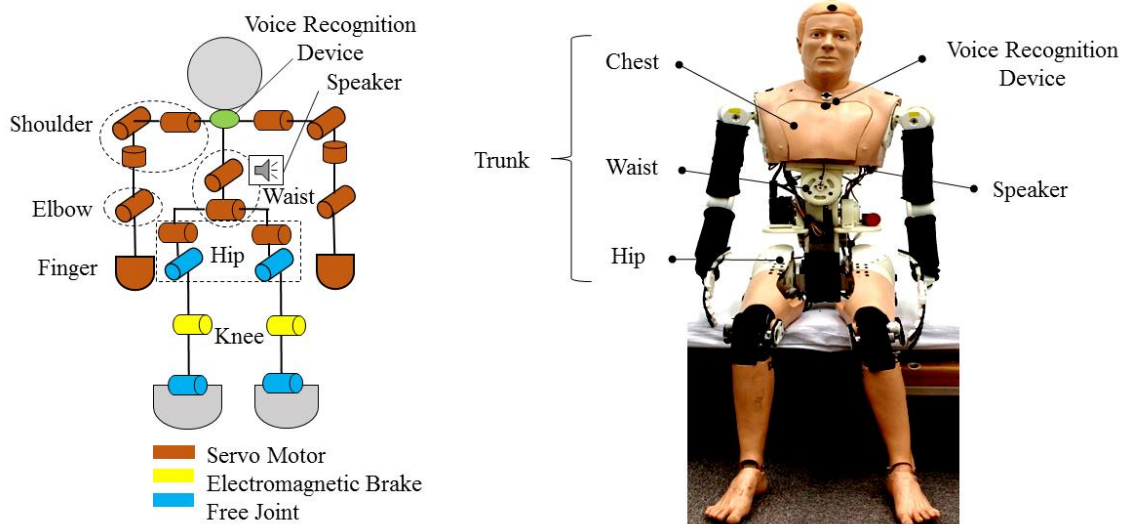


Fig.1. 患者ロボットの概要。各関節と音声認識と発声装置（左）とロボット外観（右）

## 腰部アシスト装置の開発に向けたベルトロック機構の提案と検証

看護師をはじめ多くの職業や作業で生じる身体的な負担、またそれによって生じる腰痛等の疾患は大きな社会問題である。そのなかでも中腰等の不自然な姿勢での作業を長時間おこなうことによる腰への負担の累積は、腰痛を引き起こす原因の1つであることは、かねてから指摘されている。

本研究では、看護や介護等の作業で中腰や前傾姿勢をとった際に、腰に沿って取り付けられたベルトによって腰部を支える装置の開発をおこない、腰痛の発生を未然に防ぐ研究に取り組んでいる。このような装置を実現するため、腰部に取り付けたベルトを任意の姿勢で機械的にロックすることで体重を支え、また、中腰作業が終わった際にこのロックを解除するための機構の提案と開発をおこなった。ここで提案した機構は、ベルトを2重に配置し、ベルトと摩擦体との間で発生する摩擦を利用することで、小さな力で理論上無限大の力を支えることが可能な機構である(図1)。また、振動を加えることで摩擦係数を変化させ、ベルトのロック状態を切り替える方法を提案し、実験によりこのシステムの有効性を確かめた(図2)。現在はこの装置を取り付けた腰部アシスト装置の開発を進めるとともに、ベルトを用いて腰部を効果的に支持するための機構を、腰部の運動の計測を通して調査している。

**Keywords:** assistive device for lumber, locking mechanism for a flat belt

### Reference

1. 松井 尚孝, 白藤 翔平, 太田 順. (2016). 超音波振動と二重平ベルト構造を用いたロック機構の開発. 第34回日本ロボット学会予稿集. RSJ2016AC1E1-08, (pp. 1-3), 山形.
2. Matsui Naotaka, Shirafuji Shouhei and Ota Jun. (2016). Locking mechanism based on flat, overlapping belt, and ultrasonic vibration, Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2016), (pp.461-466). Qingdao, China

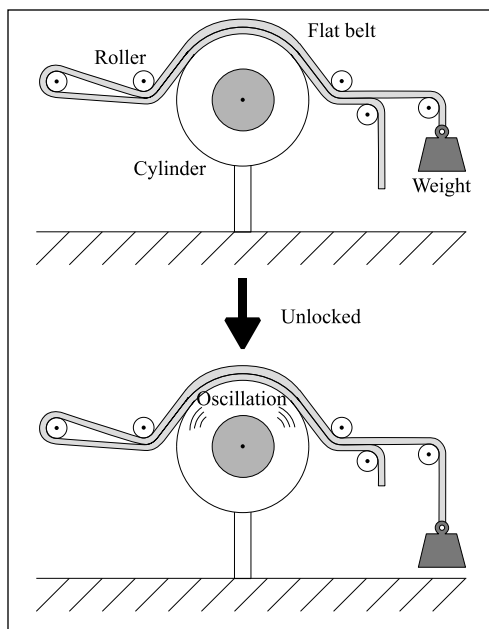


図1 ベルトのロック状態を切り替える機構

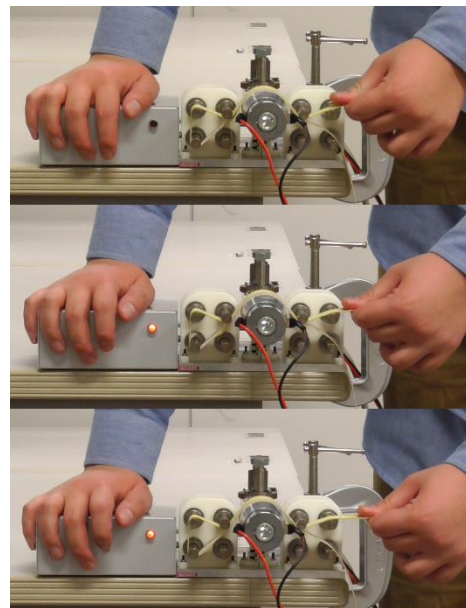


図2 試作した装置とロックを開放する様子

## 高密度表面筋電位を用いた前腕伸筋の活動の信号源推定

一般的な表面筋電位は前腕内の深部筋や小さな筋の活動を計測するうえで現実的ではない。一方で、脳波計測の分野では計測された信号を分離し脳内のどこで活動が起こっているかを推定する技術が研究されている。この技術は表面筋電位の信号源推定にも応用が可能と考えられるが、これまでにそのような研究はなされていない。

本研究では、一般的な脳波の信号源推定の手法（図1）を前腕の筋活動の同定に応用する手法を提案し、これを実験により検証している。実験では高密度表面筋電位計を用いて指と手首の等尺性運動時における筋電位を計測した（図2）。信号源の推定は、はじめに独立成分分析で計測した筋電位信号を分離、被験者毎のMRI画像から物理学ベースの前腕の順モデルを構成、これによって得られる信号源とセンサ点との間の関係を表す行列を通して、独立な信号と信号源との関係が得られる。推定された信号源は、対象の運動を生じさせる筋の位置との近さで評価し、提案手法の有効性を確かめた。

**Keywords:** electromyography, source localization, source separation

### Reference

Su,Becky, Shirafuji,Shouhei, Oya,Tomomichi, Ogata,Yousuke, Funato,Tetsuro, Yoshimura,Natsue, Pion-Tonachini,Luca, Makeig,Scott, Seki,Kazuhiko, & Ota,Jun. (2016). Source separation and localization of individual superficial forearm extensor muscles using high-density surface electromyography. Proc. IEEE Int. Symp. Micromechatronics and Human Science (MHS2016), (pp. 245-250). Nagoya.

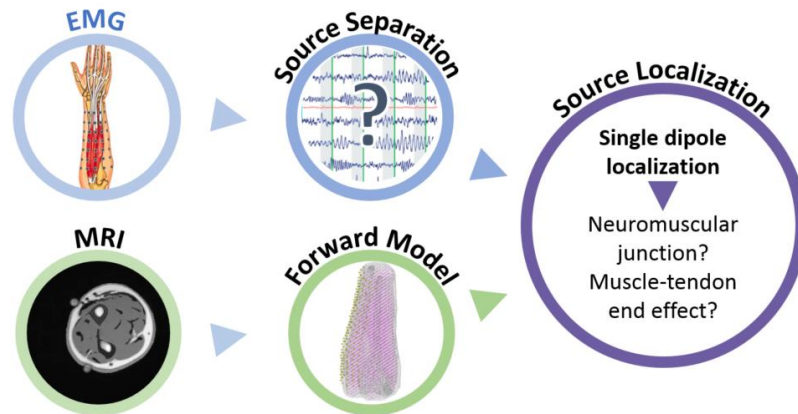


図1. 脳波の信号源推定手法の筋電位への応用。

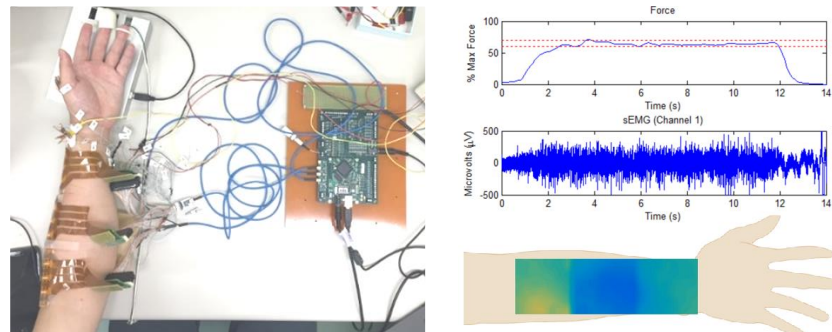


図2. 実験環境（左），計測した力の例（右上），計測された筋電位の時間変化の例（右中央），筋活動のカラーマップの例（右下）。

## 順動力学シミュレーションによるヒトの起立姿勢制御の再現

起立姿勢制御は、ヒトの直立姿勢の維持を可能とするものであり、快適な生活を送る上で不可欠なものである。起立姿勢制御に関する過去の研究の多くでは、人体を表現するために筋肉のない逆振り子モデルが用いられていたが、それらは生理学的に妥当なものではなかった。また、逆動力学シミュレーションにより、実験データに基づく神経コントローラの作成が行われていた。しかし、この手法では実験データが再現されるものの、神経コントローラの正しさは保証されなかった。筋骨格系の順動力学シミュレーションにより、ヒトの姿勢制御をモデリングすることが求められていた。

我々は、筋骨格モデル (Fig. 2) の起立姿勢を維持可能な、神経コントローラ (Fig. 1) を提案する。コントローラは、起立に必要な筋活動を司るフィードフォワード要素と、複数の感覚入力に基づいたフィードバック要素からなる。コントローラのパラメータは、起立時のエネルギー消費が最小となるよう、最適化により設定される。提案したコントローラにより、ヒトが起立する際の、異なる感覚入力に対する筋活動の変化が再現された。これは、コントローラが生理学的に妥当であることを示すものである。現在、このコントローラを用い、起立時に外力が加えられた際の身体の反応についてのシミュレーションも行っている。

**Keywords:** postural control, musculoskeletal model, biological simulation

### Reference

1. Jiang, Ping, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, & Ota, Jun. (2017). A postural control model incorporating multisensory inputs for maintaining a musculoskeletal model in a stance posture. *Advanced Robotics*, 31 (1-2), 55-67. doi: 10.1080/01691864.2016.1266095.
2. Jiang, Ping, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, & Ota, Jun. (2016). Generation of the human biped stance by a neural controller able to compensate neurological time delay. *PLoS ONE*, 11 (9): e0163212. doi: 10.1371/journal.pone.0163212.
3. 上西 康平, 千葉 龍介, 高草木 薫, 太田 順. (2017). 水平外乱を補償する筋骨格モデルの姿勢制御, 第 29 回自律分散システム・シンポジウム資料, (pp.103-108). 東京.

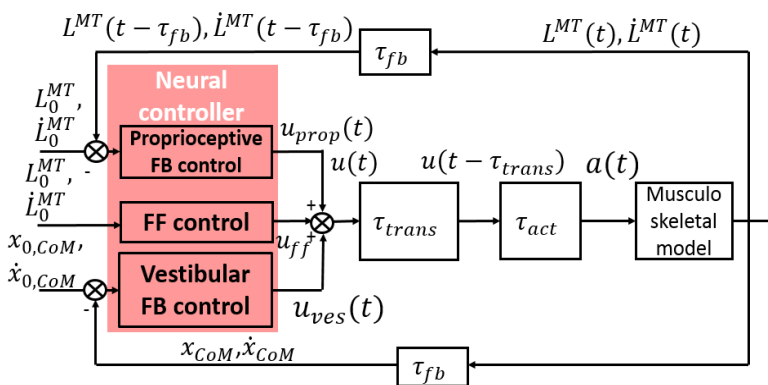


Fig. 1 神経コントローラモデル.  $u$ : 統合された制御信号.  $a$ : 筋活性.

$L^{MT}, L_0^{MT}$ : 筋の長さの現在値と目標値.  $\dot{L}^{MT}, \dot{L}_0^{MT}$ : 筋の速度の現在値と目標値.

$x_{CoM}, \dot{x}_{CoM}$ : 矢状面方向における質量変位の変位と速度.

$\tau_{trans}, \tau_{fb}, \tau_{act}$ : 神経回路における, 信号伝達, フィードバック, 筋活性に由来する時間遅れ.

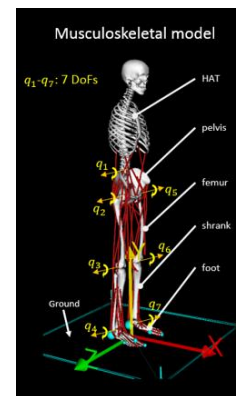


Fig. 2 筋骨格モデル