

戦略的創造研究推進事業CREST  
研究領域「共生インタラクション」  
研究課題「技能獲得メカニズムの原理解明及び  
獲得支援システムへの展開」

研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2023年 3月

研究代表者:小池英樹  
(国立大学法人東京工業大学情報理工学院、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究の目的は、高度画像処理技術、拡張現実感技術、ソフトロボティクス技術、人工知能技術を用いて、高度な技能を人から獲得し(copy)、人に伝承(paste)する技能獲得支援システムの技術基盤を開発することである。そのために、トップアスリート、熟練音楽演奏家、障害者という特殊技能を持つ人々に着目し、(1)技能獲得メカニズムの原理解明、(2)技能獲得支援システムの開発を行った。小池グループはアスリートの動作計測および障害者の質的研究を行い、プロジェクト全体の基盤技術となる、(1)深層学習を用いた動作計測手法、(2)VR/ARを用いた差分提示手法、(3)未来予測手法、(4)細径人工筋肉を用いた力覚フィードバック装置等を開発した。古屋グループはピアニストに着目し、高速な指の動きや打鍵情報の計測・訓練装置、分析、データベース化、脳神経機序の評価を行った。同時に、小池グループと共同で(1)、(4)の適用を行った。牛場グループは脳科学の見地から、視覚情報の漸増的偏移が、ユーザの意識化での運動適応を誘導することを明らかにし、プロジェクト全体を通じて、効率的な記憶の定着手法の解明を行った。暦本グループは、牛場グループの研究の技術的支援を行うと同時に、熟練者と学習者の差分提示のための体外離脱感覚提示システムの開発、サイレントスピーチシステム、調整時間による技能獲得支援技術を研究し、アスリート、音楽演奏家、障害者支援のための新たな技術を開発した。

具体的成果としては、小池グループが開発した3次元姿勢認識手法は、これまで複数台カメラや閉鎖された計測環境を必要とした動作計測に対し、不完全な映像が撮影される単眼カメラでも高精度な技能計測を実現した。本技術はプロジェクトを通じてスポーツ、楽器演奏の動作計測の基盤として使われた。次に、小池グループと暦本グループが開発した深層学習による技能分析手法は、これまでスポーツ科学において主流だった各関節位置の差分比較に対し、多次元データをAutoencoderを用いて低次元空間に写像して比較し、さらにAutodecoderで復元することで、単純な関節座標の比較とは異なる差分提示を実現した。また、牛場グループは学習効果の持続性についての分析を行った。小池グループ及び暦本グループが開発した実時間フィードバックシステムは、これまでトレーニング後に行われていたコーチングを、VR/AR及びロボティクス技術を用いることで、実時間で視聴触力覚によって学習者に教示を行うことを実現した。開発された技術は様々な分野に適用されたが、特に古屋グループはピアノ演奏技能獲得に特化し、プロジェクト全体で開発された技術を統合する形で実用的技能獲得支援システムを実現し、さらに社会実装としてピアノアカデミーを開講した。同様に小池グループは国立スポーツ科学センターと連携し、競技スキーを対象として国内トップアスリートのための技能獲得支援システムを開発した。

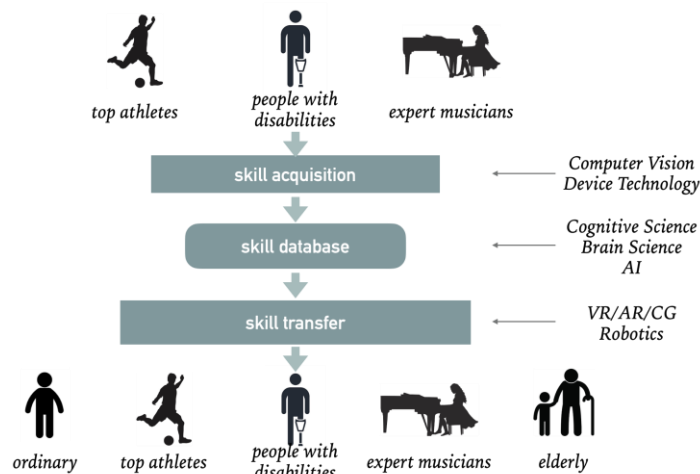


図1:プロジェクト全体の概略

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. 深層学習を用いたサイレントスピーチシステムの開発

概要:

本研究は、超音波センサー、あるいは小型慣性センサーを用いて口腔内イメージを取得し、深層学習により発話音声特徴量を推定することを可能とした。この結果、音声発話することなく自然言語認識システムに指令を与えることができ、スマートスピーカーをはじめとする様々な対話型システムを操作することを実現した。本研究成果はHCI系のトップ国際会議ACM CHI2019およびCHI2020で発表され、honorable mentionを獲得した。

- Naoki Kimura, Michinari Kono, Jun Rekimoto. SottoVoce: An Ultrasound Imaging-Based Silent Speech Interaction Using Deep Neural Networks, ACM CHI 2019

### 2. 体性感覚トレーニングによる熟練者の運動能力の限界克服

概要:

ハプティックデバイスを用いて強化学習に基づいてデザインされたアクティブハプティックトレーニングが、エキスパートピアニストの力触覚と巧緻運動機能を向上することに成功した。このような訓練効果は、フィードバック誤差学習に基づいたハプティックトレーニングや、教師信号や報酬を与えないハプティックトレーニングでは認められなかった。成果は、Science誌の姉妹誌であるScience Advances誌に受理・発表され、国内外のメディアで紹介された。

- Masato Hirano, Mizuha Sakurada, Shinichi Furuya. Overcoming the ceiling effects of experts' motor expertise through somatosensory training. Science Advances 6(47): eabd2558, 2020

### 3. ピアノ演奏時の手指姿勢推定手法とデータセット構築

概要:

深層学習を用いた手指姿勢推定には光学式モーションキャプチャによる関節座標の真値と手指画像が必要である。手指画像にはマーカーが写っているため正確な学習にはマーカー除去が必要だが、既存のGAN等では不自然な結果しか得られない。本研究では、マーカー付き画像から正確にマーカーを除去する深層学習ネットワークの開発に成功した。得られたマーカー除去画像と関節真値を用いて姿勢推定ネットワークを学習させた結果、高精度な手指認識が実現できた。本成果は今後のデータセット構築のコストを大幅に削減するのに貢献する。

- Erwin Wu, Hayato Nishioka, Shinichi Furuya, Hideki Koike. Marker-removal Networks to Collect Precise 3D Hand Data for RGB-based Estimation and its Application in Piano. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, Jan. , pp.2977-2985, 2023.

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. 人の解剖学的知見に基づく柔らかい力覚提示グローブの開発

概要:

本研究では、McKibben型細径人工筋肉を用いて、人のしなやかな動きを支援することのできる、軽量な力覚フィードバックグローブを開発した。従来のハードな外骨格型グローブと異なり、指の動きを妨げることなく、かつ指の曲げ伸ばしの2方向に対応することを可能とした。熟練ピアニスト5名での被験者実験を行った結果、既存の外骨格グローブに対し装着に対する違和感が最も低かった。また、本グローブを装着して高速打鍵練習を行った後では、練習前に比べて打鍵スピードが向上していることがわかった。特許出願済(特願2018-072764)である。

- Nobuhiro Takahashi, Shinichi Furuya, Hideki Koike, Soft Exoskeleton Glove with Human Anatomical Architecture: Production of Dexterous Finger Movements and Skillful Piano Performance, *IEEE Trans. on Haptics*, Vol.13, Issue 4, pp.679–690, 2020. (IEEE Robotics & Automation Society 2020 IEEE Transactions on Haptics Best Application Paper Award)

## 2. 胸装着型超広角小型カメラを用いた3次元動作および頭部姿勢推定手法の開発

概要:

本研究は、胸に装着した1台の超広角小型カメラが撮影する魚眼画像を深層学習ネットワークに入力することにより、装着者の3次元姿勢と3次元頭部姿勢を同時に推定することを可能とした。本システム構築にあたり人工データセット680,000枚、実画像データセット(16,000枚)を作成した。実験の結果、人工データセットで各関節の平均誤差が43.6mm、実画像データセットで84.9mmを得た。頭部姿勢では平均誤差が人工データセットで4.1度、実画像データセットで13.2度を得た。本研究成果はHCI系のトップ国際会議ACM UIST2020にフルペーパー採録された。発表と同時にデータセットを公開した。特許出願済(特願2019-142943)である。

- Dong-Hyun Hwang, Kohei Aso, Ye Yuan, Kris Kitani, Hideki Koike, *MonoEye: Multimodal Human Motion Capture System Using A Single Ultra-Wide Fisheye Camera*, *ACM UIST2020*, pp.98-111, 2020.

## 3. 腕装着型小型カメラを用いた3次元手指姿勢認識手法の開発

概要:

本研究は、スマートフォンの竜頭部分に内蔵された小型カメラを想定し、この小型カメラが撮影する手の甲の映像を深層学習ネットワークに入力することにより、装着者の3次元手指姿勢を推定することを可能とした。本研究成果はHCI系のトップ会議ACM UIST 2019, 2020にフルペーパー採録された。特許出願済(特願2021-143847)である。

- Erwin Wu, Ye Yuan, Hui-Shyong Yeo, Aaron Quigley, Hideki Koike, Kris M. Kitani, *Back-Hand-Pose: 3D Hand Pose Estimation for a Wrist-worn Camera via Dorsum Deformation Network*, *ACM User Interface Software and Technology (UIST2020)*, pp.1147-1160, 2020.
- Hui-Shyong Yeo, Erwin Wu, Juyoung Lee, Aaron Quigley, Hideki Koike, *Opisthenar: Hand Poses and Finger Tapping Recognition by Observing Back of Hand Using Embedded Wrist Camera*, in *Proceedings of 32nd ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST 2019)*, pp.963-971, 2019.

<代表的な論文>

1. Nobuhiro Takahashi, Shinichi Furuya, Hideki Koike, Soft Exoskeleton Glove with Human Anatomical Architecture: Production of Dexterous Finger Movements and Skillful Piano Performance, *IEEE Trans. on Haptics*, Vol.13, Issue 4, pp.679–690, 2020. (IEEE Robotics & Automation Society 2020 IEEE Transactions on Haptics Best Application Paper Award) (再掲)

概要:

本研究では、McKibben型細径人工筋肉を用いて、人のしなやかな動きを支援することのできる、軽量な力覚フィードバックグローブを開発した。従来のハードな外骨格型グローブと異なり、指の動きを妨げることなく、かつ指の曲げ伸ばしの2方向に対応することを可能とした。熟練ピアニスト5名での被験者実験を行った結果、既存の外骨格グローブに対し装着に対する違和感が最も低かった。また、本グローブを装着して高速打鍵練習を行った後では、練習前に比べて打鍵スピードが向上していることがわかった。

2. Shinichi Furuya, Reiko Ishimaru\*, Takanori Oku, Noriko Nagata. Back to feedback: aberrant sensorimotor control in music performance under pressure. *Communications Biology* 4(1): 1367, 2021

概要:

本研究は、ピアニストが心理緊張下で、熟練者の特徴であるフィードフォワード制御が、感覚情報を用いて運動を制御するフィードバック制御に切り替わる異常を、可変聴覚フィードバックシステムを用いた行動実験により明らかにした。さらに、当該システムを用いた新しい感覚運動統合トレーニングを発明し、緊張時の感覚運動統合機能の異常を正常化することに成功した。

3. Erwin Wu, Mitski Piekenbrock, Takuto Nakamura, Hideki Koike, SPinPong – Virtual Reality Table Tennis Skill Acquisition using Visual, Haptic and Temporal Cues, **IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics**, Vol. 27, No. 5, pp.2566-2576, 2021.

概要:

本研究では、VRを用いた卓球トレーニングシステムを開発し、VR空間内における経過時間を変更して高速なスピンスーブの返球を練習することで、効率的に高速スピンスーブの返球の技能が向上したことを、定量的及び定性的に示した。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### 1 小池グループ

研究代表者: 小池 英樹 (東京工業大学情報理工学院 教授)

研究項目

- ・アスリートの技能計測と抽象と伝承
- ・視線・身体動作環境認識装置
- ・行動ログによる未来予測手法の開発
- ・実時間マルチモーダルフィードバックによるスポーツ訓練システムの開発
- ・極細人工筋肉を用いた力覚フィードグローブの開発
- ・技術と身体感覚の関係に関する質的研究
- ・縫合技術獲得支援技術の開発

#### 2 暦本グループ

主たる共同研究者: 暦本 純一 (東京大学大学院情報学環 教授)

研究項目

- ・体外離脱感覚による技能獲得支援技術の研究
- ・調整時間による技能獲得支援技術の研究

#### 3 牛場グループ

主たる共同研究者: 牛場 潤一 (慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目

- ・「視覚プログラミング・グラス」の行動学的有効性検証
- ・「力覚プログラミング装具」の行動学的有効性検証

#### 4 古屋グループ

主たる共同研究者: 古屋 晋一 (ソニーコンピュータサイエンス研究所 シニアリサーチャー)

研究項目

- ・音楽家の超絶技能の抽象化と獲得メカニズムの原理解明による伝達・熟達支援

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

・CRESTチームによるドイツ訪問時に知り合ったDFKIのDidier Stricker教授との交流を続け、国際会議IEEE VR2019のワークショップHAA2019には招待講演をお願いした。その後、小池(日本)、Stricker教授(ドイツ)、INRIAのMarie-Odile Berger教授(フランス)の3名が代表となり、戦略的創造研究推進事業 AIPネットワークラボ「日独仏AI研究」に「Hybrid Deep Learning and Geometry-based Methods for Human Pose Estimation in Semantic Context」として応募した(不採択)。また、Stricker教授の学生が東工大に1年間研究員として滞在し、ピアノ演奏時の手指計測データセット構築の研究を行ない、その成果はCHI2021のワークショップHAA2021で発表した。

・CRESTの支援経費で、博士課程学生2名をCarnegie Mellon大学(米国) Robotics InstituteのKris M. Kitani教授の研究室に派遣し共同研究を行い、2編の共著論文を執筆し、2編ともHCI系のトップ会議UISTにフルペーパー採録された。Kitani教授とは引き続き共同研究を行っており、2022年夏にはKitani教授が東工大の小池の研究室に1ヶ月滞在し共同研究を行い、2022年冬には研究員1名をCMUに派遣する予定である。

・St Andrews大学(英国)のAaron Quigley教授(現Univ. of New South Wales, Australia)の博士学生

が研究員として東工大に1年間滞在して3次元手指認識の研究を行い、その成果はUIST2019、UIST2020, Mobile HCI2019にフルペーパー採録された。

・LMU Munich大学(ドイツ)のAlbrecht Schdmit教授と連携し、2020年Augmented Humans Conferenceで共同ワークショップを開催する予定だったが、Covid-19感染拡大のため中止となった。ただし、Schdmit教授との協力関係は続け、2022年2月にMunichで合同ワークショップを開催した。

・British Columbia大学(カナダ)のSidney Fels教授とスキー技能獲得支援に関する共同プロジェクトに関する協議を行っている。

・アスリートの動作計測・分析においては、国立スポーツ科学センターの石毛勇介副センター長との協力関係を築いている。また、バイオメカニクスの専門家である東京大学大学院総合文化研究科吉岡伸輔准教授、産業技術総合研究所人間拡張センター村井昭彦博士とも連携した。実際の動作計測、特に競技スキーの動作計測においては、石毛氏の研究グループ及び全日本スキーチームアルペン男子コーチ河野恭介氏と協力し、新旧日本代表選手10数名の動作データベースを作成した。またゴルフでは、日本ゴルフ協会ナショナル強化委員会コーチの岩本砂織氏に協力を依頼し、選手の動作計測を計画中である。

・他のCRESTチームとの連携としては、まず、東京大学生産技術研究所の佐藤洋一教授(「集合視による注視・行動解析に基づくライフイノベーション創出」研究代表)のチームとは、2018年と2019年の夏に合同合宿を行い、互いの研究成果に関する情報交換を行った。また、東京大学大学院情報理工学系研究科の五十嵐健夫教授(「データ駆動型知的情報システムの理解・制御のためのインタラクション」研究代表)のチームとは、脳神経外科医の顕微鏡を利用した縫合技術の獲得支援システムの開発を共同で行った。

・開発した胸カメラによる姿勢認識システムを、はこだて未来大学の角康之教授のグループに提供し、角教授の動作認識に関する研究に使用されている。

・開発したVR Skiシステムは、北陸先端科学技術大学院大学の金井秀明准教授のグループ及び東京大学の葛岡英明教授のグループに提供し使用されている。

・小池と暦本は、HCI関連分野のトップで活躍する特に若手研究者と、ERATO, CREST, さきがけ、新学術領域においてHCIに関連する大規模プロジェクトを牽引する研究者らが集う場として、「Winter Workshop」を2018, 2019年に開催し、HCI関連分野の横の繋がりを支援すると同時に、若手研究者の交流を推進した。

- 2018年:[https://hciworkshop.github.io/index\\_2018.html](https://hciworkshop.github.io/index_2018.html)

- 2019年:<https://hciworkshop.github.io>

・牛場は、バーチャルリアリティやブレイン・マシン・インターフェース装置を活用したリハビリテーションの事業化を進めるITUniverse社(カナダ)Ilia Borishchev氏と協議を深めており、当該分野の産業化を市として強化しているロシアSamara市で毎年開催されている国際会議の運営に協力している(招待講演、市民講座、ポスター審査、ハッカソン審査)。また、大学からの兼業許可を得て、ブレイン・マシン・インタフェース装置を活用したリハビリテーションの事業化を進める研究成果活用企業Connect株式会社を創業し(現LIFESCAPES)、代表取締役の立場で研究成果の産業応用を推進している。

・牛場は更に、同じ間瀬CRESTの平成30年度採択課題 研究代表者柳澤琢史氏と共同研究を立案した。具体的には、脳内の情報処理機構に基づいて脳波型ブレイン・マシン・インターフェース装置を設計して疼痛緩和を目指す研究とし、領域内チーム連携の研究課題公募「Colab」(2022年度)

に応募し、採択された。現在、装置構築を進めており、年度内にはフィージビリティ確認試験が完了予定である。

・古屋は、国際的ネットワークの形成を積極的に行っている。具体的には、ハノーファー音楽演劇メディア大学Eckart Altenmuller教授との演奏技能評価の共同研究や日本人若手研究員の派遣、ロンドン大学ゴールドスミス校Maria Herrojo Ruiz教授とのアガリの神経生理学研究があげられる。また、研究開発成果の社会実装として、ピアニストDina Yoffe氏と日本人ピアニスト6名とジュニアピアニストを対象としたピアノアカデミーの実施、ハノーファー音大における健常ピアニストおよび局所性ジストニアを罹患したピアニストを対象とした開発システムを用いたスキル診断の実施を行った。さらに、音楽と脳神経科学に関する世界最大の国際学会であるNeurosciences and Music (Neuromusic)にて、Scientific Committeeを務める他、2021年にイタリア、イギリス、アメリカの研究者らと共同でシンポジウムを行い、国際ネットワークの形成に取り組んだ。同様に、身体運動制御分野の最大の国際学会であるSociety for the Neural Control of Movementにおいても、アメリカやイスラエルの研究者らと手指の運動制御・学習に関する国際共同シンポジウムを開催し、国際ネットワークの形成と国際競争力の向上に取り組んだ。

・暦本は、東京大学においてヒューマンオーグメンテーション寄付講座(2017-2020)、さらに後継のヒューマンオーグメンテーション社会連携講座(2020-)を開設した。参加企業であるソニー、京セラ、凸版印刷、Tire4とともに人間拡張学、技能獲得支援の共同研究、シンポジウムの開催、啓蒙教育活動、および社会展開を進めている。