研 究 終 了 報 告 書

「人の挙動観察に基づく対象情報の推定と身体動作予測」

研究期間: 2017 年 10 月～2021 年 3 月
研 究 者: 牧野 泰才

1. 研究のねらい

本研究では，身体性情報への機械学習の適用をテーマとして，大きく以下の 2 つの研究課題について解決することを狙いとする.

(1)身体動作に表出する触覚的情報の推定

近年の VR 技術の進展に伴い，体験の質向上における触覚の重要性について言及されることが増えてきている. しかし，そのような文脈では，いかにリアルな触感を再現するか？に主眼が置かれており，いかに触覚情報を取得するかについての議論は少ない. 360 度全周カメラのような，VR 用途での応用が容易な視聴覚システムが充実してきている今，それらと親和性の高い触覚センシングは，今後の VR･AR 環境の発展に必須であると考える.

これに対して，人が対象に触れている様子を観察することで，その中に含まれる対象の弾性率や摩擦といった触覚的な情報を検出することが可能になると考え，それを映像ベースで推定することを目的とした. 特に，人の皮膚同士の接触時にどの程度の力が生じているかというような，センサを直接配置することの難しい環境下での利用や，調理時のようなセンサを食品に接触させたくないような状況での利用などに応用可能と考えている.

(2)身体動作履歴に基づく近い将来の動作予測

人の身体動作に含まれる情報の一つに，少し未来の行動を予測するための予備動作が含まれており，例えば人がすれ違うとき，他者の歩様からそれを予測しお互いにぶつからないように歩行している. この人の少し先の予測能力を，機械で獲得し活用することを考えた. すなわち，人の骨格情報を計測し，直近の人の動作予測を行えるかどうかを議論し，活用することを2つめの狙いとする.

このような動作の予測は，身体性を伴ってインタラクションを行うような遠隔コミュニケーション時の遅延の解消や，転びそうな老人を予測し早めにサポートすることによる怪我の予防，子どもの飛び出しなど危険の予測，スポーツにおけるクセの解析や適切なフォームの指導等にも適用可能であり，その応用範囲は広い.

一方で，どのような動作であればどの程度先の未来まで予測可能であるか？そのときの精度はどの程度であり，実用的な範囲であるか？といった点は議論されていないため，予測のための基礎的な検討から実応用までを含めた，近未来予測技術の基盤研究全体がこの研究の2つめの狙いである.

2. 研究成果

(1)概要

主に 2 つの項目があるため，それぞれについて概要を示す.

(1)身体動作に表出する触覚的情報の推定

本課題については，人の動作の観察により，どの程度触覚的な情報が推定できるかを，対象の

硬さの推定，把持物体の質量の推定といった観点から評価した．対象の弾性率の推定では，既知の弾性率を持つ試料を棒で押下した際の手や棒の挙動をカメラと深度センサで撮影し，その情報から対象の弾性率が推定できることを確認した（代表発表論文1）．把持物体の質量推定では，直立した人がかばんを持ち上げる際に，かばんの質量に応じてその持ち上げ方の挙動が変化することを利用し，持ち上げ時の骨格情報から質量を推定可能であることを示した．

（2）身体動作履歴に基づく近い将来の動作予測

将来の動作予測については，基礎検討と応用の 2 つの観点から行った．基礎検討としては，歩行やジャンプといった全身性の運動において，重心移動について5cm 以内程度の精度で予測が可能であることを確認した．一方で，手先や足先のような四肢の予測には誤差が大きいことが確認されたため，これをより詳しく検証するために，人が静止状態から動き始めた際に，意図する動作以外の身体部位に，どのタイミングで関連動作が生じるかを計測した．その結果，手のみを動かすようなときには他の身体部位に関連動作は現れにくく，予備動作はほぼ生じないことが確認された．

応用としては，バレーボールのトス動作からどの程度ボールの軌道を予測できるか，外乱が入るような転倒動作の計測からそれを事前に予測できるか，といった，特定の動作に特化した形の予測を行った．バレーボールのトス予測では，一定の位置でトスを上げるという練習環境において，ボールの軌道を予測することに成功した（代表発表論文2）．転倒予測については，そもそも自然な歩行時に躓きのような外乱により転倒する動作を記録したデータセット自体が無かったため，安全に転倒を行える状態で骨格情報の計測を行い，転倒データセットを構築することから始めた．それを用いた結果，外乱の入った直後のフレームで転倒を予測できることを示せた（代表発表論文3）．一方で，仮に外乱が入った瞬間に予測できたとしても，その情報を利用できる猶予時間は0.4 秒程度であり，それを人に知らせて行動させるには短いことも確認された．

（2）詳細

（1）　身体動作に表出する触覚的情報の推定

概要にて示した，硬さの推定と把持物体の持ち上げ動作に基づく対象物体の質量推定についての結果を図1に示す．どちらも，横軸が真値，縦軸が推定値を示す．すなわち図中の 45 度のラインに沿って推定されているのが望ましい状態を表す．それぞれ一人の被験者が複数の試料について押下したり，持ち上げたりしたデータを計測して学習し，未知の硬さ，質量のサンプルについての結果を求めたものである．硬さの方については，未知の試料は1点であるが，質量推定については1㎏ おきに学習し，500g ずらしたもので推定しているため，すべての点が学習に利用していない試料となっている

このように人の挙動を利用することで，硬さや挙上物体の質量などが推定が可能であることが確認され，個人内では統一的な動きで対象をハンドリングしていることが示された．

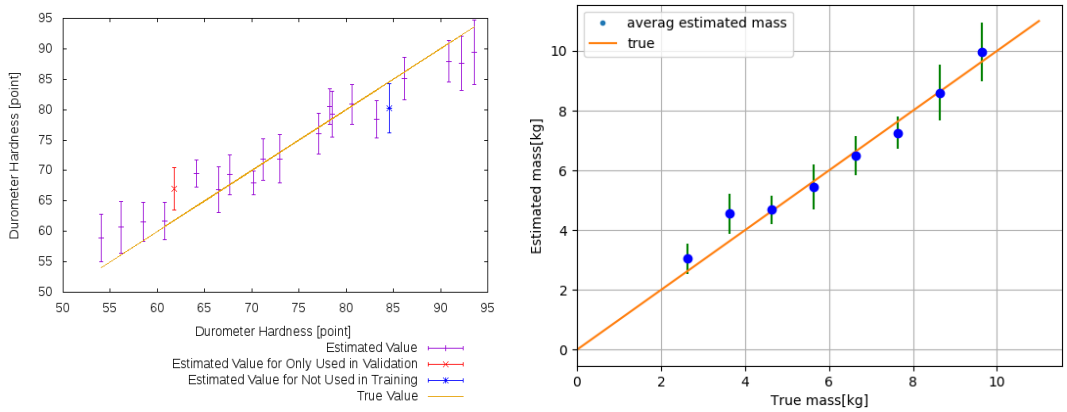

図1. 左：硬さ推定の結果. 青の結果は学習に利用されていない未知の硬さ試料である.
右：挙上動作から推定された質量. 学習に利用した質量とは 500g ズレているが推定できる.

達成状況

対象物体の硬さの推定，把持物体の持ち上げ動作に基づく質量の推定，また上では示さなかったが，対象を触察時の押下力や摩擦力の推定等を行い，全てにおいて，個人の動作を学習した場合に，それら触覚的な特徴を推定できることを確認した. すなわち，人が対象に接する際に，その身体挙動には対象の触覚的性質に応じて個人内で統一的な傾向があることを確認できた. これは，触覚的な情報がどのように身体動作に反映されるかを理解する上で重要な知見が得られたと考えている.

一方，当初の計画では，より汎用的な，未学習の個人について同様の推定を行い，多様なシーンでの利用を目的としていたが，これらに共通した課題として，個人差の影響が大きく，現時点では排除できないことを確認している. つまり，複数人で学習した際に学習に利用した個人については推定できても，未知の個人の動きに対してはその精度が大きく低下してしまう. これは，触覚的な挙動は個人の中では統一された傾向で動いているのに対し，他者との間の類似性が低いことを示す結果であり，これまでの触覚研究で指摘されていた点と一致する. 機械学習はこのような個人性を排除するための研究が多くなされており，そのような手法の適用による汎化が今後の課題である.

（2）身体動作履歴に基づく近い将来の動作予測

歩行やジャンプといった全身性の動作について 0.5 秒程度先の予測が出来ることを確認したうえで，いくつかの応用展開を行った. 上述のバレーボールと転倒の予測結果の図を示す. 人の3次元骨格情報を入力としたときに，人がハンドリングしているボールの軌道という，人以外のモノの挙動の予測が出来ることが確認された. また転倒予測では，転倒開始から頭部が自由落下を始めるまでの時間的な条件（0.17 秒程度後に頭部の落下が始まる），予測が出来たとしたときに頭部が 30cm 以上落下するまでの許容時間（0.44 秒）などを検証することが出来た. 転倒時にエアバッグを展開するような場合には，このような許容時間で十分である. 一方でその場合には予測ミスを無くす必要があるが，現状では通常歩行時に転倒と誤認識してしまう確率を 0 には出来ておらず，更なる改善が必要と考えている.

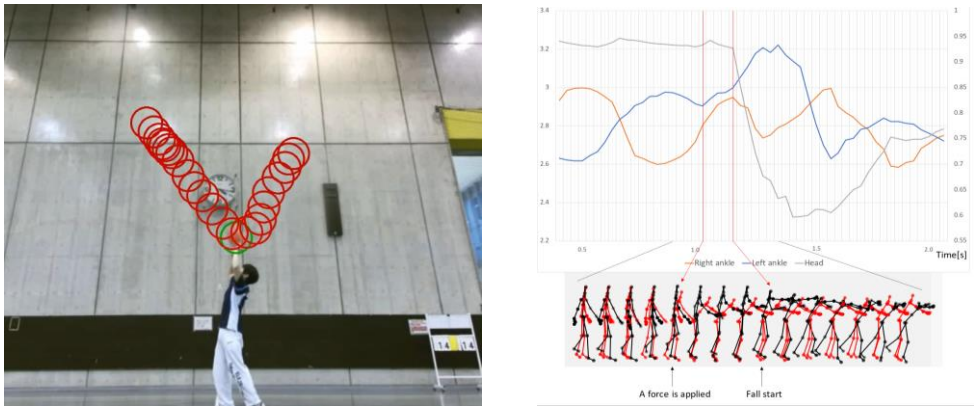

図2　左：バレーボールのトス軌道予測結果．緑が現在のボール，赤が 0.3 秒後のボールの予測結果の履歴を重ね描きしたもの．手に触れる瞬間にはボールが背面にトスされることが予測されている．右上：計測された転倒データの頭の鉛直方向の軌道（灰）と左右の足首の軌道（橙と青）．左側の赤線のタイミングで外乱が印加され，右側の赤線のタイミングから頭部が自由落下を始める．右下：実際の骨格（黒）と予測結果（赤）外乱印加時から予測身体が転倒を始める様子が確認できる．

このような予測動作の情報をリアルタイムに人にフィードバックしたときに，それを人がどのように行動に反映するかの検証を行った．床面に人の骨格情報をプロジェクションし，1）予測動作として 0.3s 速く動く影，2）遅延なく同期して動く影（実際は投影までの遅延分を補償するように予測を入れている），3）0.3s 遅れて動く影，の 3 種類を投影したときの人の感じ方と実際のジャンプの高さについて計測した．結果として，人は予測映像がプロジェクションされ自分の実際のジャンプよりも先にそれが動き出す様子を見ると，体が軽く，速く動いたように感じられ，また高く飛んでいるように感じられる傾向があった．一方で実際のジャンプの高さを観測すると，予測映像を提示されたときにそのジャンプの高さが有意に下がる傾向があることも確認された．すなわち，高く軽く飛んでいるように感じている一方，実際には低く飛んでいるという結果である．予測された映像が，実際の自分の挙動に影響を及ぼしうるという結果である．被験者は 9 名とやや少ないため今後さらなる検証が必要であるが，リアルタイムの予測を利用して初めて出来るようになった成果の一つである．

達成状況

身体動作から近い将来をリアルタイムに予測する，という点においては，世界に先駆けてそれを実証し提案できたと考えている．応用として転倒の予測やスポーツへの適用なども行い，その可能性を示すことが出来た．そのリアルタイム性を活かし，リアルタイムでジャンプ動作の予測結果をフィードバックした場合に，人の動作に影響を及ぼせることも示した．これは，従来になかった予測された自身の動作との意識的なインタラクションと考えることができる．

一方で，当初の計画では，遠隔地とのコミュニケーションにおける遅延解消を想定していたが，そのようなコミュニケーションで特に重要となる手腕の動作のような四肢の挙動については，予測が難しいことが確認された．実際に高精度に四肢の挙動を計測し，その中に予備動作が含まれるかどうかを検証し，手の挙動については予備動作が生じにくいことを確認した．その意味で当初の目的を達成できたとは言えないが，一方で近未来の動作予測という点で，その適用可能な動作群を検証できたと考えており，十分な成果を挙げられたと考えている．

3.　今後の展開

本研究課題を通して，触覚情報の推定，行動の予測どちらについても大きく浮き彫りになった課題の一つが属人性の問題である．特に触覚情報の推定において，個人内では統一的な動きで対象と接しており，力や硬さ等の推定も可能となるが，複数人で学習した際に個人間の動き方に同じ傾向がないためか推定が難しくなる，という場合がほとんどであった．

動作予測のスポーツ応用などを考えた場合も，個人の癖を知るという点では属人性を含めた学習が行われるのが望ましいが，誰にでも適用可能なモデルという観点では属人性の含まれないモデルが必要である．この属人性のレベルを切り替えて活用できるようなモデルの作成に現在取り組んでおり，これが実現することで本研究課題の 2 つの柱である触情報の推定と近い将来の動作予測がどちらもより発展すると考えている．

4.　自己評価

本研究は，リアルタイムに 0.5 秒先を予測し，その結果を体験者自身にフィードバックするという点で，世界で初めてそれが可能であることを示したものと考えている．予測可能な動作群に制約はあるものの，歩行やジャンプといった重心移動を伴う全身運動については，学術会議やイベント等でデモを行った範囲では年齢性別を問わず多くの方に体験してもらえた．予測された動作でしか出来ないアプローチとして，予測情報のフィードバックにより，人の動作自体が変化するということも確認でき，リアルタイム予測の応用可能性を示すことが出来た．

一方で，当初目的としていた遠隔地とのコミュニケーションの遅延の解消，という点については原理上難しいということが確認でき，実現には至らなかった．遠隔との身体性を伴ったコミュニケーションの場合，主に手で握手やハイタッチをするようなシーンが想定されるが，歩行やジャンプのような全身運動と比較して，手のみ腕のみを動かせば良いような小さな動きについては，静止状態からの動き出し時にその予備動作が生じていないことが確認できたためである．これは，遅延のない遠隔コミュニケーションの実現，という目的から見ると残念な結果であるが，一方で動作予測の限界を，身体動作の表出タイミングの観点で議論できたものであり，その意味での成果は出すことが出来たと考えている．

触覚情報の推定については，これまでにも書いたように，個人差をいかに解消するかという点に大きな課題が残った．今回の「個人内での推定はある程度可能であるが，個人差の影響のため汎用的なモデルを作るのは難しい」という結果は，人が手の動きを見て判断した場合についての先行研究の結果と合致するものであり，その結果を機械学習の観点から裏付ける結果となった．これは硬さ推定や質量推定，あるいは力推定など，推定したい物理量に依らずに見られた傾向であり，身体動作に表出する特徴量を扱う上での根本的な課題と考えている．通常の機械学習の考え方では，大量のデータを用いることで個人差の背後にある個人に依らない本質的な動きに迫る，というのが常套手段であるが，身体動作計測の場合，実際に被験者を集め 3 次元計測を行う必要があるため，データの大規模化が難しい．このあたりの課題に即したモデルづくり，データ活用の点で，課題が残ったと考えている．

本成果の一部は，企業との共同研究やスポーツ団体からのデータ提供による実際のスポーツ分析においての応用などに展開している．盲導犬協会と連携し，人のみに限らず，動物と人との行動インタラクションの定量評価に向けた取り組みにも発展している．それらが発展し，スポーツ中継などでの活用や，動物の行動解析のためのツールとしての活用など，より具体的な応用も

見込めると考えている.

5. 主な研究成果リスト

(1)代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:37件(原著論文1件, 査読あり国際会議発表8件, 国際会議チュートリアルを含む招待講演 9件)

1. 三河 祐梨, 牧野 泰才, 篠田 裕之. 深層学習を用いた押下動作映像からの硬さ推定. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 4, p. 239-248

人が棒を用いて弾性体を押下している際の手と棒の挙動を計測し, カラー画像と深度画像を用い, その時の対象の硬さを推定可能であることを示した. 個人に特化した形で学習を行うと精度よく推定が出来るが, 複数人で学習した場合にはその精度が低下することが確認され, 触動作に個人差が大きいことも確認された. 調理の最中に, 加熱に伴う柔らかさの変化の推定などへの応用が期待できる.

2. Shuya Suda, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda. Prediction of Volleyball Trajectory Using Skeletal Motions of Setter Player, In Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019 (AH2019). 1-8

バレーボールにおいてセッタープレイヤーが行うトス動作の中に, トスされたボールの軌道を決定する情報がどの程度含まれるかを予測により検証した. 700 回程度のトス動作の骨格情報を計測し, その動作と少し先のボールの位置とを対応付けて学習させることでボール一個半程度の平均誤差で軌道を推定出来ることが示された. 身体部位のどの情報を利用すると軌道予測が出来るかを調べることで, 軌道決定に重要な身体部位がどこにあるかを合わせて議論し, 動作に含まれる癖の推定に利用できることを示した.

3. Ryoma Mori, Toki Furukawa, Yasutoshi Makino and Hiroyuki Shinoda. Measurement of Disturbance-Induced Fall Behavior and Prediction Using Neural Network, 2020 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)

人の転倒動作の予測可能性を議論するために, 転倒データを計測し, 人の転倒動作がどの体の時間関係で生じるものであるかを検証し, 予測を行った場合に転倒が予測されてから実際に人の頭部が 30cm 程度落下するまでにどの程度の余裕があるかを検証した. 転倒予測自体は足に外乱が入った瞬間から予測できるが, それであっても 0.4 秒程度の余裕しか無いことを示した.

(2)特許出願

なし

(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)

・森崎汰雄, 森涼馬, 森瞭輔, 牧野泰才, 伊藤勇太, 山川雄司, 篠田裕之 “超音波の非接触力を用いた卓球における変化球の実現” 情報処理学会 インタラクション 2020
インタラクティブ発表賞 一般投票

・倉井 敬史, 牧野 泰才, 篠田 裕之, ニューラルネットワークを用いた人動作予測モデルにおける最適入力時間長の検討, SICE SI 部門講演会, 2019. **優秀講演賞**

・Yasutoshi Makino, Yutaro Shioi, Yuuki Horiuchi, and Hiroyuki Shinoda “Interference of Projected Future Self,” 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)