



## 外耳道の加速度を利用したロボットの操縦意図の抽出

中尾駿太<sup>1)</sup>, 原彰良<sup>1)</sup>, 宮本拓<sup>1)</sup>, 西村朋樹<sup>1)</sup>, 古川正紘<sup>1-3)</sup>, 前田太郎<sup>1-2)</sup>

1) 大阪大学 情報科学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5, shunta-nakao, akiyoshi-hara, hiroki-miyamoto, tomoki-nishimura, m-furukawa, t-maeda@hiel.ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4)

3) 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ (〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

**概要:** 人間の四肢とは独立した動作が可能である外耳道に着目し, 外耳道から観測される加速度情報からユーザの四肢を用いずにロボットを操縦する手法を提案する. 本研究では, 耳栓型加速度センサと操縦桿を用いることでロボットの行動分節を推定する精度を評価し, 操縦者がロボットを操縦しているつもりになっているときの外耳道の変化によって生じる加速度の変化からロボットの操縦意図に起因する分節行動の推定可能性を検証する.

**キーワード:** ロボット, 外耳道加速度計測, 操縦意図, 行動分節

### 1. はじめに

現在, 多くの多自由度ロボットはレバーやボタンといったインターフェースを用いて操縦されている. この操縦法ではロボットを自在に操るためにはそのロボットの持つ行動コマンドと同数以上のボタンやその組み合わせの準備または自由度数だけのレバーを必要とする. しかし, その多自由度さゆえに操縦者は非常に多くの操縦法を学習する必要がある.

そこで, 多自由度による学習が困難である操縦の問題を解決するロボットの制御方法として先行研究に「つもり」制御がある[1][2]. 「つもり」制御の実現方法を図 1 に示す. 見まね学習などにおいて, 人間の随意運動は離散的な分節構造をもつことが指摘されており[3], 「つもり」制御では, 操縦対象に対する離散化された操縦意図を抽出し, 操縦対象のある時間連続な定型動作 (以下行動分節) を 1 対 1 対応させることで, 意図レベルで整合性のとれた制御を実現している.

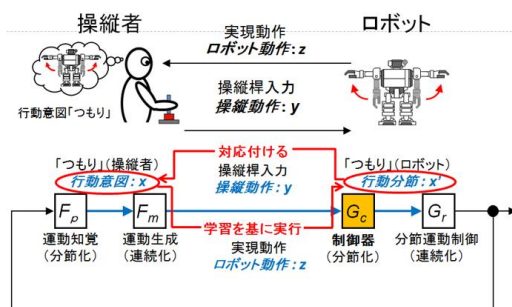


図 1: 「つもり」制御のシステム概要図

これまででは操縦者がロボットの動作する動画を見ながら, 画面内のロボットを操作しているつもりになって低自由度の操縦桿へ力を込めることで操縦意図の抽出を行っている. そこで, 本研究では操縦意図を抽出する手法として人間の四肢とは独立した動作が可能である頭部に存在する各器官の中でも外耳道に着目した. 外耳道の変化によって生じる加速度を測定する耳栓型加速度センサと操縦桿を用いて操縦意図を抽出することで, ロボットの行動分節を推定する精度を評価し, 外耳道の加速度の変化からロボットの操縦意図に起因する分節行動の推定可能性を検証する.

### 2. ヒトの操縦意図の抽出実験

#### 2.1 実験装置の概要

抽出環境を図 2 に示す. 図に示す 17 自由度を持つヒト型ロボット (近藤科学社製 KHR-3HV) を用いて動画を作成し, その動画をディスプレイに映している. 動画では上肢の運動のみを利用している. また, 動画はロボット背面から撮影されており, 被験者はロボットを背後から観察する



図 2: 実験環境

ことになる。操縦桿は 6 軸力センサ(レプトリノ社製 PFS055YA251U6)の上に垂直にグリップを固定したものを右手用および左手用として計 2 個用意した。2 個の操縦桿は机に固定されており、被験者がグリップを握った状態で手に込めた力を力センサからデータとして得る。このときグリップは固定されているため、グリップが傾いたり動いたりすることはない。各力センサから得られる値は並進方向の力成分( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), モーメント成分( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )の 6 軸分のデータである。よって操縦桿の入力側は計 12 自由度となる。

耳栓型加速度センサは 9 軸センサ(InvenSense 社製 MPU-9250)を耳栓に取り付けたものを右耳用の 1 つのみ用意した。左耳には加速度センサを取り付けていない通常の耳栓を被験者に装着してもらった。耳栓型加速度センサからは被験者がロボットを操縦しているつもりになって操縦桿に力を込めている間の外耳道の加速度をデータとして得る。9 軸センサから得られる値のうち本研究で評価した値は 3 軸の並進加速度成分( $AccX$ ,  $AccY$ ,  $AccZ$ )と 3 軸の回転角速度成分( $GyroX$ ,  $GyroY$ ,  $GyroZ$ )の 6 軸分のデータである。よって耳栓型加速度センサの入力側は計 6 自由度となる。

本実験においてロボットの制御周波数、力センサ及び耳栓型加速度センサの計測のサンプリング周波数は 50 Hz である。また、被験者の姿勢は胸当てによって固定され、姿勢及び手の位置関係は一定を保っている。被験者には実験中は頭部をできるだけ動かさないように教示をした。

## 2.2 抽出実験手順と条件

ロボットの行動分節として一定間隔長(1.6 秒)の連続動作(行動分節)を 44 種類用意した。各連続動作はロボットにおいて左右対称であり、静止を含まない速度印象が同じになるもののみを選定した。そしてこの 44 種類の行動分節の中から 22 個を組み合わせた動作列を 5 種類(A, B, C, D, E)用意する。44 種類の連続動作は動作列 A, B, C, D の中にそれぞれ 2 回ずつ現れ、1 つの動作列中には同一の連続動作は存在しない。各動作列は 5 回連続で被験者に提示される。また、これら動作列を 4 種類(A, B, C, D)×5 回を 1 セットとし、4 種類の動作列はランダムな順に提示される。また、セットの間には 3 分間の休憩を設けた。これを 8 セット(A, B, C, D の各動作列に対して 40 施行)行い、8 セット終了後 3 分の休憩の後に動作列 E を 5 回連続で提示し、操縦桿の入力を行った。

被験者は各動作列を見ながら自分が操縦するつもりになって操縦桿に対して入力を行う。なお、被験者は提示される動作列を覚えるように教示されており、これによって被験者自身がロボットを操縦している状況と等価な操縦意図を被験者内部に作り出している。操縦桿入力を行わせる際、被験者にロボットの行動分節の区切りを提示するために、ロボットの行動分節と行動分節の間にリズム音を提示しており、被験者はこれに合わせて入力を行う。被験者には胸当てのある椅子に体重を預けるように座ってもら

い、その姿勢のまま肘を最も楽な位置においた上で操縦桿を握ってもらう。

被験者は A, B の 2 人の 20 代の学生であり、被験者 2 人は男性であった。まず、被験者 2 人には耳栓型加速度センサを装着せずに操縦桿のみを用いての操縦意図抽出実験を行ってもらい、その後 1 週間程度の期間をあけて耳栓型加速度センサを装着し、操縦桿と併用して操縦意図抽出実験を行ってもらった。

## 2.3 抽出実験の結果

耳栓型加速度センサを装着した場合の操縦桿入力の一例として被験者 A, B の動作列 D に対する左手側  $F_x$  軸の操縦桿入力の値を標準化したものを図 3 に示す。縦軸が入力された力を標準化したもの、横軸が時間経過、各プロットがある 1 試行の操縦桿入力である。図に示すように、被験者 A は 1 つのセットにおける操縦桿入力の分散が 1 セット目と 8 セット目(最終セット)では分散が小さくなっていないが、被験者 B は操縦桿入力の分散が 1 セット目から 8 セット目で分散が小さくなっている。操縦桿のみ用いた実験でも同様の傾向が見られた。

次に、耳栓型加速度センサの入力の一例として被験者 A, B の動作列 C に対する  $GyroZ$  軸の角速度入力の値を標準化したものを図 4 に示す。縦軸が入力された角速度の値を

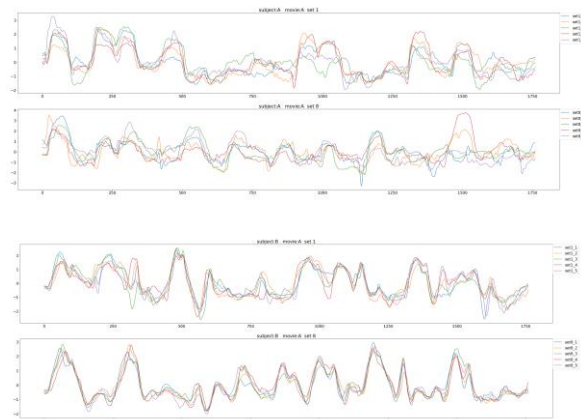


図 3: 被験者 A, B の操縦桿入力一例

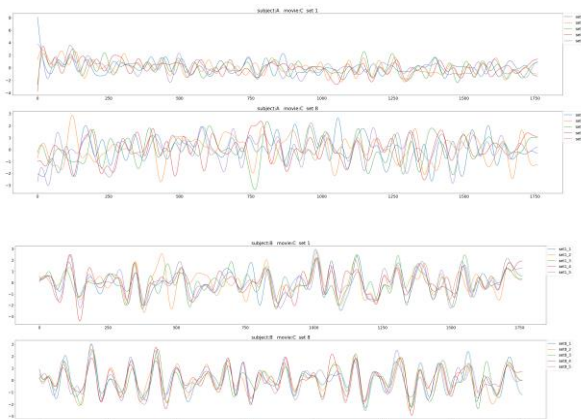


図 4: 被験者 A, B の耳栓型加速度センサの入力一例

標準化したもの、横軸が時間経過、各プロットがある1試行の耳栓加速度センサの入力である。図に示すように、操縦桿のデータと同様に被験者 A は1セット目と8セット目で分散が小さくなっておらず、被験者 B では1セット目から8セット目で分散が小さくなっている。

また、操縦桿入力と耳栓型加速度センサの入力が収束していくかの様子の一例を示す。各プロットは動作列 A, B, C, D に対応し、最終試行回と横軸に示す試行回における入力との平均二乗誤差平方根を表しており、この誤差が小さいほどその試行回での入力が最終試行回の入りに近いことがわかる。図5に耳栓型加速度センサを装着した実験の左手側 Fx 軸の操縦桿入力における収束の様子、図6に耳栓型加速度センサの GyroZ 軸の角速度入力における収束の様子を示す。図に示すように被験者 A は操縦桿、耳栓型加速度センサの入力が収束していなかったが、被験者 B は操縦桿、耳栓型加速度センサの入力がともに収束していた。これは操縦桿のみを用いた実験の操縦桿入力においても同様の傾向がみられた。

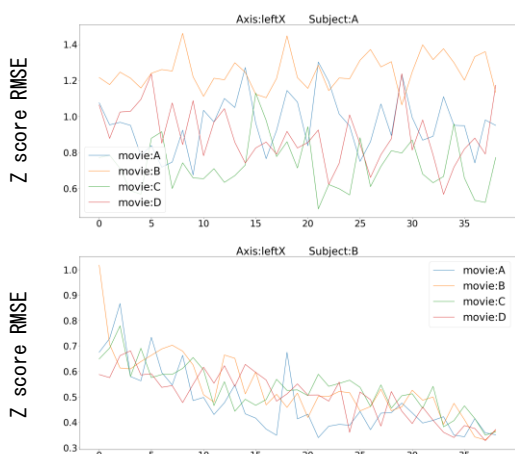


図5:被験者 A, B の操縦桿入力の収束する様子

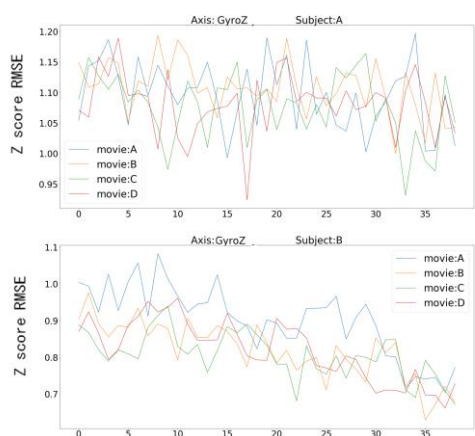


図6:被験者 A, B の耳栓型加速度センサ入力の収束する様子

### 3. ニューラルネットワークを用いた学習制御器の評価

本章では、ニューラルネットワークを用いた学習制御器によって操縦桿入力と耳栓型加速度センサの入力から操縦者の操縦意図の推定精度について確認する。

学習制御器で用いられるニューラルネットワークは操縦桿入力を学習させるものと耳栓型加速度センサの入力を学習させるものを2つ用意した。それぞれのニューラルネットワークの入力には1行動分節1.6秒間の時系列データ80サンプル×入力側の自由度数分与える。2層目以降は細胞数50、活性化関数にはReLUを用いた全結合層を隠れ層とした。出力層にはソフトマックス関数を使用した。目的関数には交差エントロピーを用い、最適化手法にはAdamを使い学習率を0.001[%]とした。さらに正規化として中間層の各層にDropoutを70%の割合で行い、L2ノルム正規化項を目的関数に加えた。また、入力の前処理として操縦桿入力は10Hz、耳栓型加速度センサの入力は1Hzのバターワースフィルタをかけたものに標準化を行った。学習回数は50000 epochとした。

ニューラルネットの訓練のためのデータセットとして、2章の抽出実験で得られたA, B, C, Dの動作列に対する操縦桿と耳栓型加速度センサの入力のうち2セット目から7セット目までの2~5回目の入力を用いた。これは1セット目までは動作列の流れを覚えさせるために用いられ、各動作列に対する入力を5回連続で行わせるうち1回目の入力は動作列を思い出させるために使われていると考えられているため使用しなかった。また、8セット目は評価に用いるために学習には使用しなかった。

評価には学習に用いなかった8セット目のA, B, C, Dの動作列に対する操縦桿と耳栓型加速度センサの入力を用いた操縦意図推定と動作列Eに対する操縦桿と耳栓型加速度センサの入力を用いた操縦意図推定を行った。ただし、各動作列に対する入力を5回連続で行わせるうち1回目の入力は上記と同様の理由で使用しなかった。

耳栓型加速度センサを装着した実験において8セット目の動作列A, B, C, Dと動作列Eに対する操縦桿入力をを用いたときの運動分節の推定確率を被験者A, Bそれぞれ図7, 図8に示す。横軸が学習制御器の学習回数であり、縦軸が横軸の学習回数が終わった後の運動分節推定の正答率を示す。左図が8セット目の動作列に対する正答率で右図が動作列Eに対する正答率を示した図である。図に示すように、被験者Aは8セット目に対する正答率は4~5割、動作列Eに対する正答率は2~3割程度であるのに対して、被験者Bは8セット目に対する正答率が9割、動作列Eに対する正答率が8割程度と高い正答率を示した。これは操縦桿のみを用いた実験でも同様の傾向がみられた。

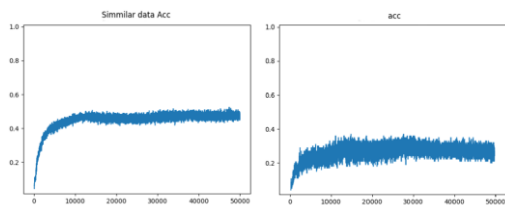


図 7:被験者 A の操縦桿入力の運動分節推定精度

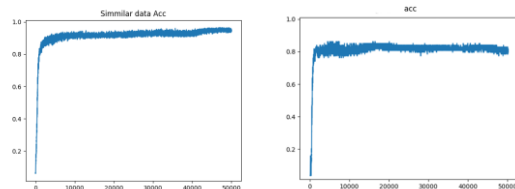


図 8:被験者 B の操縦桿入力の運動分節推定精度

次に 8 セット目の動作列 A, B, C, D と動作列 E に対する耳栓型加速度センサの入力を用いたときの運動分節の推定確率を被験者 A, B それぞれ図 9, 図 10 に示す。このグラフの横軸と縦軸は図 7, 図 8 と同様なものを示す。図に示すように被験者 A の正答率は 8 セット目の動作列, 動作列 E に対する正答率ともに数%程度であったのに対して, 被験者 B の 8 セット目の動作列, 動作列 E に対する正答率は 3~4 割程度を示した。

操縦桿のみを用いた実験, 耳栓型加速度センサを装着した実験ともに操縦桿入力が収束していなかった被験者 A では操縦桿入力による運動分節の推定精度が低く, 学習できていなかった。また, 耳栓型加速度センサの入力による推定精度も低く学習していなかった。操縦桿のみを用いた

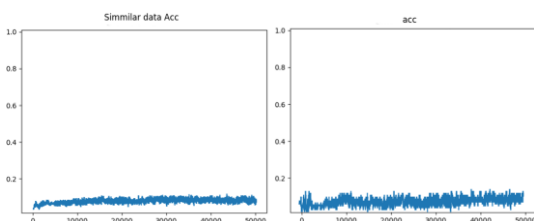


図 9:被験者 A の耳栓型加速度センサ入力の運動分節推定精度

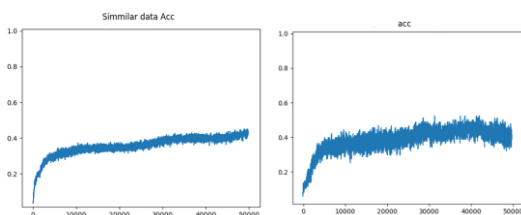


図 10:被験者 B の耳栓型加速度センサ入力の運動分節推定精度

実験, 耳栓型加速度センサを装着した実験ともに操縦桿入力が収束していた被験者 B においては, 運動分節の推定精度は操縦桿入力では 8 割以上の高い正答率を出し, 耳栓型加速度センサの入力においても 3~4 割程度の正答率を示した。

#### 4. 考察

被験者 A と B とで運動分節の推定精度が大きく異なる結果を見せた。この原因として被験者 B は実験を行う前から実験で提示されるロボットが動作する動画を何度も視聴していたためロボットの動作列に対する運動イメージが定着していたために高い再現性を持った操縦意図の抽出が可能であったと推察される。被験者 A は運動イメージが定着しておらず予期していたロボットの分節行動と異なる分節行動に対して誤った入力を何度か与えていたことから操縦意図の抽出が再現性の低いものとなったと推察される。

実験結果からロボットの運動イメージが定着している状態であれば操縦桿入力ほどの精度はないが, 外耳道からの入力も再現性を持って操縦意図の抽出を行えることが示唆される。

これらの考察から運動イメージを定着させることでロボットを操縦しているつもりになっているときに生じる外耳道の変化から操縦意図に起因する分節行動の推定が可能であると実証された。

しかし, 本研究では 1 回の実験で耳栓型加速度センサは装着をし続けた状態で行われており, 耳栓型加速度センサを取り外して再度装着するときの再現性は確保していない。再現性のある耳栓型加速度センサの装着方法などによって, 装着しなおしても再現性のある入力が行えるようになることが課題となる。

**謝辞** 本研究はコマツみらい建機協同研究所との共同研究の成果である。

#### 参考文献

- [1] 前田太郎:「つもり」の検出と伝送:遠隔伝送における随意性の拡張可能性の検討, 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2009.
- [2] 坂口翔太, 岡田慎矢, 丹羽真隆, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎:「つもり」の抽出によるロボット操縦支援技術の提案と随意性の評価, 第 10 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. 365-368, 2009.
- [3] 稲邑哲也, 中村仁彦, 戸嶋敏樹, 江崎英明:ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル創発の統合モデル, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No.2, pp.256-263, 2004.