

筋活動を用いた遠隔操作のための遅延補償手法の提案

山下 航輝[†]

近藤 一晃[‡]

下西 慶[‡]

中村 裕一[‡]

[†] 京都大学工学部

[‡] 京都大学学術情報メディアセンター

1. はじめに

オペレータが遠隔地のデバイスと連動して、リアルタイムの操作を行う際に、遠隔地の情報の伝送遅延、及びオペレータの操作の伝送遅延、機器の動作遅延などに起因した、操作性の低下が問題となる。本研究では、筋電位を用いてオペレータの動作を予測することによって、後者2つの遅延を緩和する手法を提案する。実際に、リモコンカーに搭載されたカメラの映像を見ながらオペレータが運転操作を行う環境を構築し、その中で予測を用いた遅延補償の効果を検証する。

2. 遠隔操作における遅延補償

遠隔操作における遅延として、本研究ではオペレータの操作の伝送遅延、及び機器の動作遅延に着目する。これらの遅延を想定した遠隔操作の構成を図1(a)に示す。

前者の遅延が δ_1 、後者の遅延が δ_2 とすると、オペレータが時刻 t で行った操作が遠隔地のデバイスに反映されたことがオペレータ側で確認できるのは時刻 $t + (\delta_1 + \delta_2)$ である。この遅延の補償として、 $\delta_1 + \delta_2$ 先のオペレータの動作を予測して、時刻 $t - (\delta_1 + \delta_2)$ に送信することが考えられる。この場合の構成を図1(b)に示す。

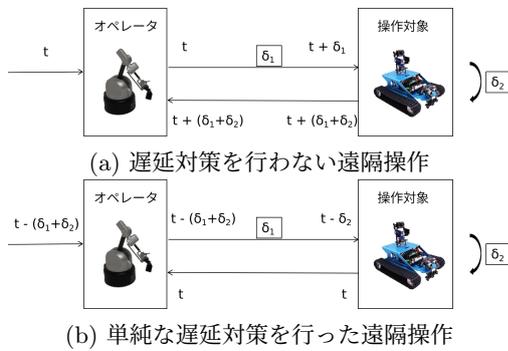


図 1: 遠隔操作の構成

本研究では、図1(b)に示した構成の遠隔操作の手法を提案する。

3. 遠隔操作の構成

3.1 オペレータ側

本研究において、オペレータ側ではハプティックデバイス (VIRTUOSE DESKTOP 6D) を用いて、操作時の手の位置や速度、デバイスにかかる外力を計測するとともに、反力の提示を行う。また、リモコンカーに搭載したカメラの映像をディスプレイ上に表示し、それを見ながら操作を行う。オペレータの動作は、腕の横向きの伸

展と屈曲とし、台上で肘の位置を固定することで、地面と水平方向のみにデバイスを動かすようにした。実験を行っている際のオペレータ側の様子を図2に示す。



図 2: 実験中のオペレータの様子

同時に、オペレータの動作を予測するために、ハプティックデバイス进行操作している腕の筋電位計測を行う。計測した筋は表1に示した腕の6箇所、いずれも腕の屈曲と伸展の際に賦活するものである。

表 1: 筋電測定箇所及び活性化する動作

名称	動作
上腕二頭筋	肘の屈曲
上腕三頭筋	肘の伸展
長掌筋	手首の屈曲
長橈側手根伸筋	手首の伸展
回外筋付近	手首に力を入める/手首の伸展
橈側手根屈筋	手首の屈曲

3.2 操作反力の設定

レバーを用いた操作を模擬するため、操作に対する反力については、ハプティックデバイスから操作量に応じた粘弾性を与えることとした。そのために図3のような仮想空間を用いて反力を生成した。手前方向にx軸、右方向にy軸、上方向にz軸が設定されており、球体の上下に摩擦力のない十分大きい壁を設置し、完全に上下方向の動きを制限している。

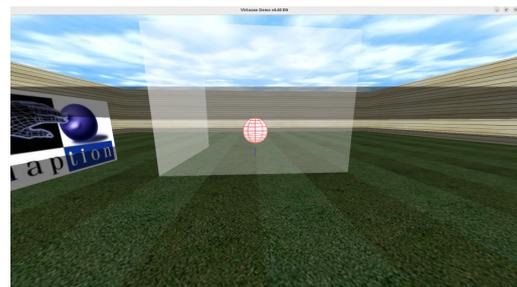


図 3: 仮想空間の様子

Temporal Delay Compensation for Remote Operation using Muscle Activation Measurement K. Yamashita, K. Kondo, K. Shimomishi, Y. Nakamura (Kyoto Univ.)

3.3 遠隔側

遠隔側のデバイスとして、図4に示したようなリモコンカー (Yahboom Raspberry Pi Tank Robot) を用いた。動作については前進、後退、転回及び停止とし、搭載されたカメラからの映像をオペレータ側に提示する。オペレータ側からの操作情報については、搭載した Raspberry Pi が TCP 通信によって受け取り、その情報をもとにモータを制御して動作を行う。

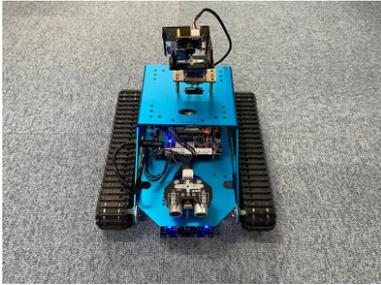


図4: リモコンカーの様子

3.4 操作力の予測

操作中のオペレータの動作では、予測に用いる入力として、筋電位及び外力を用いる。ただし、単独の筋電位の値は変化が激しく、そのままでは予測が困難であるため、複数筋の協調関係を推定した筋シナジー [1, 2] を用いた。そのため、計測された筋電位に対しバンドパスフィルタ、整流、ローパスフィルタをかけた後に、筋活性度 [3] を求め、非負値行列因子分解を行って筋シナジーを推定する。

筋シナジーの空間パターン、時間パターンを計算した例をそれぞれ図5、図6に示す。

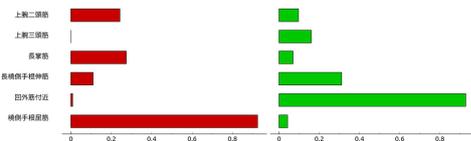


図5: 操作中の筋シナジーの空間パターン

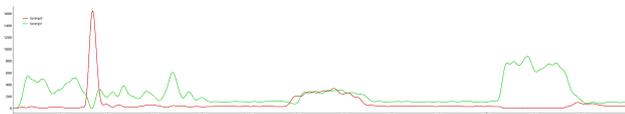


図6: 操作中の筋シナジーの時間パターン

操作力の予測器としては LSTM を用いた。図2に示した環境下で、事前にオペレータの筋電位及び力データを計測し、それをを用いて LSTM の学習を行った。実験時に LSTM の入力として与える筋シナジーの時間パターンの推定値 H は、学習時に用いた筋シナジーの空間パターン W 、各時刻において計測された筋活性度の値 M を用いて計算する。具体的には、筋シナジーの関係 $W * H = M$ を用い、最小二乗法によって計算している。

LSTM による予測結果の例を図7に示す。ここで入力として与えたデータは 50Hz、予測幅は 200ms である。

図7のグラフは x , y 方向の力を表しており、実線が実測値、破線が予測結果である。このグラフより、実測値に近い値が予測可能であることが分かる。

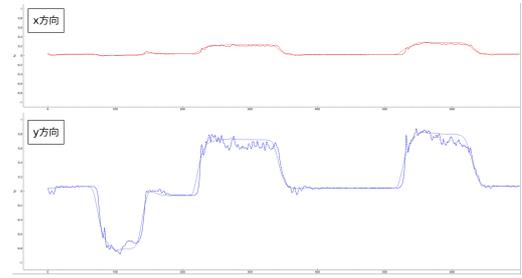


図7: LSTM による予測結果

4. 予測を用いた操作実験

図2で示したような環境において、オペレータの動作を計測するとともに、学習済みの LSTM を用いて予測を行い、遅延補償を試みる。遅延のある環境下での遠隔操作を模擬するため、意図的に伝送遅延を与えることとした。実験では、伝送遅延を 200ms に設定した。

LSTM から得られた短時間後の力の予測値を操作情報に変換し、リモコンカーに伝送して動作させる。リモコンカーの開始位置から前方に停止線を用意し、カメラの映像を見ながら操作した場合の誤差を比較する。

比較のため、予測を用いない場合、及び伝送遅延を設定しない場合についても実験を行う。これまでの結果として、予測を用いない場合、遅延のないときと比較して、200ms の伝送遅延を設定したときには、停止線からのずれが大きくなることがわかっている。現在、操作力の予測値を用いることによって操作性が改善されるかどうか等、種々の検証を行っている段階である。

5. まとめ

遠隔操作において伝送遅延や機器の動作遅延が生じる場合に、筋電位を用いてオペレータの動作を予測することによってそれらの遅延を緩和する手法を提案した。今後は提案した手法について試行を重ね、十分なデータを得るとともに、これを用いた際の操作性の変化を評価し、実用可能であるかを確かめる必要がある。

謝辞: 本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 (採択番号 03801) の支援を受けている。

参考文献

- [1] 上野 祐樹, 土屋 慧, 松尾 芳樹. 非負値行列因子分解を用いた筋シナジー解析における筋電チャンネル数削減手法. *計測自動制御学会論文集* Vol.58, pages 495-504, 2022.
- [2] 船戸 徹郎, 青井 伸也. シナジーの解析とその応用. *計測と制御* Vol.56, pages 193-198, 2017.
- [3] Sybert Stroeve. Learning combined feedback and feedforward control of a musculoskeletal system. *Biological Cybernetics*, 75(1), 73-83, Jul 1996.