

全方向移動パワーアシスト台車における 操作性改善に向けた LPF 選択手法

熊木広一¹ 大村廉^{†1}

概要：工場などでは，重量のある部品などの運搬のため台車が用いられており，作業車の負荷軽減のため，パワーアシスト化するための研究が行われている．しかし，モータの振動や人の手振れのノイズなどが原因となり，単純にパワーアシスト化しても逆に操作性を低下させることが解っている．本研究では，操作性の向上を目的とし，操作者の操作となるセンサ入力をフーリエ変換して特徴量を抽出し，あらかじめ用意したフィルタを選択することによって操作性を向上させる手法を提案する．評価実験により，位置合わせの操作性が向上したことを確認した．

LPF Selection for Operability Improvement of an Omni-directional Power Assisted Handcart

KOITI KUMAKI¹ REN OHMURA^{†1}

1. はじめに

現在，生産工場などにおいて重量のある「もの」の運搬作業は未だ人力で行われる場合も多く，このような作業は作業者の身体に多大な負担をかける．重労働による疲労は，集中力の低下を起し，事故の原因や作業効率低下の原因となる．そのため，労働者の負担軽減や，作業効率向上のために運搬作業用の台車をパワーアシスト化することが研究されている[1,2,5]．

しかし，台車を操作するときの力覚センサに入力された進行方向と加えた力（以下，操作入力と呼ぶ）をそのまま利用し，台車をパワーアシスト制御すると操縦者の意図しない動作が起きることがある．このような場合には，操作性の低下や安全性に問題が生じる[6,7]．また，組み立て工程では，重量のある部品を台車に乗せたまま運び，そのまま別の部品に接続する，といったことが行われる場合がある．このような作業では，パワーアシスト制御された台車を極めて高精度に移動させることが求められる．

パワーアシスト制御した際に操縦者が意図しない動作が発生する原因の一つとして，操縦の入力となるセンサに対して，台車の振動や操縦者の手ぶれなど，意図しない入力（以下，ノイズと呼ぶ）が混入することがある．このことに注目し，岩井らは入力センサからの波形にノッチフィルタを適用して操縦者の意図しない入力や，モータ振動の固有周波数を除去すること，操作性の向上を試みている[4]．また，原らはパワーアシスト化された装置にローパスフ

ィルタを用いることにより操作性を向上させている[3,8]．操作方法や手ぶれなどは操縦者により異なると考えられる．しかし，既存手法ではこのような操作者個人ごとに異なると考えられるノイズは考慮されていなかった．

本研究では，パワーアシスト台車の操作性を向上させるために，操縦者に適合したローパスフィルタを選択して適用する方法を提案する．カットオフ周波数が異なるローパスフィルタを予め複数用意し，操作の入力波形から操作者の特徴を抽出し，用意したローパスフィルタの中から操縦者に適切と考えられるものを選択する．

以下，本稿では，まず2章において本研究で対象とする全方向移動パワーアシスト台車のシステムについて述べる．次に，3章で操縦者個人の適切なフィルタのカットオフ周波数を確認する実験の結果について述べ，4章で提案手法について述べる．5章，6章において評価実験について述べ，フィルタを全く用いない場合，フィルタを操縦者により変更せずに固定した場合，適切なフィルタを選択した場合（提案手法）を比較評価した結果を述べ，提案手法の有効性を示す．

2. 全方向移動パワーアシスト台車システム

本章では，本研究で対象とするパワーアシスト台車のシステムについて説明する．図1にパワーアシスト台車のシステム図を示す．また，図2に実験で使用するパワーアシスト台車を側面から撮影した写真を示す．なお，使用する

¹ 豊橋技術科学大学 大学院

^{†1} 豊橋技術科学大学

パワーアシスト台車は狭い場所や障害物が多い場面が想定されているため全方向に移動ができるようメカナムホイールを用いている。

図1のOperatorブロックはパワーアシスト台車の操縦者を表している。操縦者が操作するパワーアシスト台車の方向や速度は6axis Force Sensorブロックの六軸力覚センサにより検出する。六軸力覚センサはパワーアシスト台車の天板に取り付けられた支柱の上部に取り付けられており、操縦者は六軸力覚センサに力を加えて操作する。台車制御には六軸力覚センサのX軸とY軸の方向ベクトル、Z軸の回転ベクトルを用いる。その他の要素は台車の制御に必要なため使用しない。Low Pass Filterブロック、および、Filter Select Functionブロックは本研究で提案する制御ブロックであり、Low Pass Filterブロックでは六軸力覚センサから入力されたデータにローパスフィルタを適用する。Filter Select Functionでは六軸力覚センサから入力されたデータから操縦者に適切なフィルタを選択し、Low Pass Filterブロックで用いるフィルタを選択されたフィルタに変更する。Wheelブロックではローパスフィルタ適用した波形を4つのメカナムホイールに命令する。Hand Cartブロックはパワーアシスト台車の進行方向と速度を表す。メカナムホイールは別々に進行方向や速度を制御することができ、前後移動以外に左右、斜め、回転を組み合わせることで全方向に移動することができる。

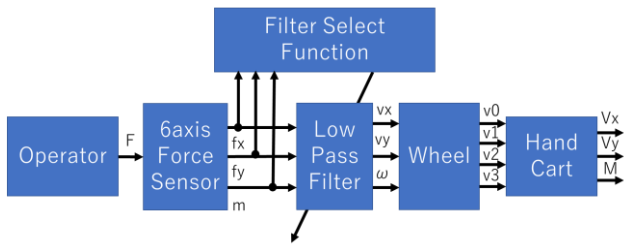


図1 パワーアシスト台車のシステム図

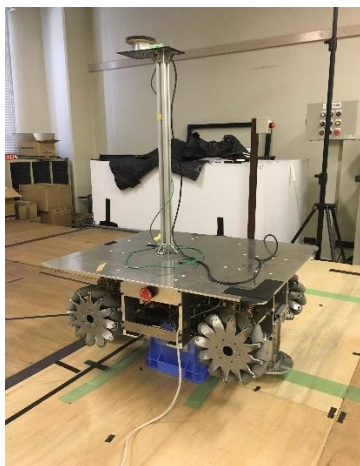


図2 パワーアシスト台車 (写真)

3. 適切なフィルタの個人差評価

まず、パワーアシスト台車の操作入力について、操縦者毎の違いを確認するための予備実験をおこなう。予備実験では、被験者にパワーアシスト台車を縦、横、右斜め前の3方向に延びた直線1mの指定経路を操作してもらい、被験者毎に最も経路の差が少なかったローパスフィルタのカットオフ周波数の違いを確認する。図3に指定経路のイメージ図と実際に使用した指定経路の写真を示す。予備実験の被験者数は5人である。図4に被験者の操作力の構成周波数を調査するためある被験者の入力データをフーリエ変換した結果を示す。図4からローパスフィルタのカットオフ周波数については、0.3Hzよりも低い周波数帯だけでは操作力の波形を表現できないこと、および、既存研究から1Hz以上はノイズとして排除できることから、0.3Hzから1Hzの間で0.1Hzごとに変化させた。すなわち、実験ではセンサ入力に1Hz以下のカットオフ周波数をもつローパスフィルタ（カットオフ周波数：0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0Hz）の8種類を適用したパワーアシスト台車について、被験者に指定した直線経路上を移動するよう操作してもらったこととなる。そして、指定した直線経路と実際にパワーアシスト台車が移動した経路の差を光学式モーションキャプチャにて計測した。

図5に、各被験者のカットオフ周波数別の指定経路と実際の経路の差の結果を示す。なお、それぞれの結果は各被験者に3回操作してもらった際の平均である。図5からわかるように、移動した経路と設定経路の差が最小であるフィルタのカットオフ周波数はそれぞれ被験者1が0.6Hz、被験者2は0.9Hz、被験者3は0.9Hz、被験者4は0.4Hz、被験者5は0.3Hzであった。また、被験者毎にフィルタのカットオフ周波数と経路差の関係の傾向は異なった。これらのことから、操縦者により適切なフィルタが異なることが解る。なお、被験者に適切なフィルタが適用された場合と位置の差が最大だったフィルタを適用した場合の位置の差は平均1.35cmの差があった。

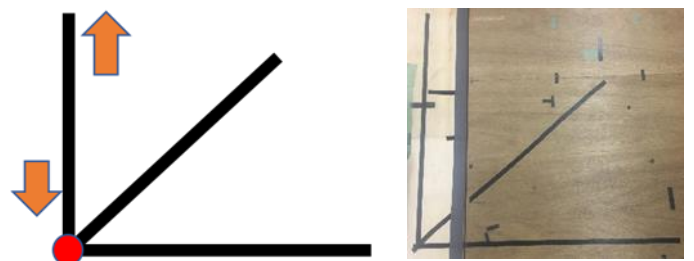


図3 指定経路のイメージ図と写真

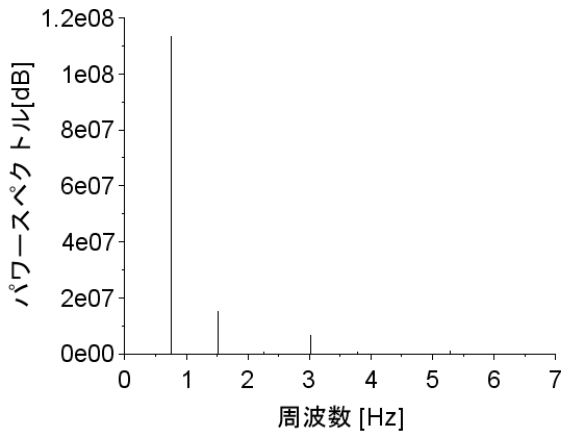


図4 ある被験者の操作力のフーリエ変換

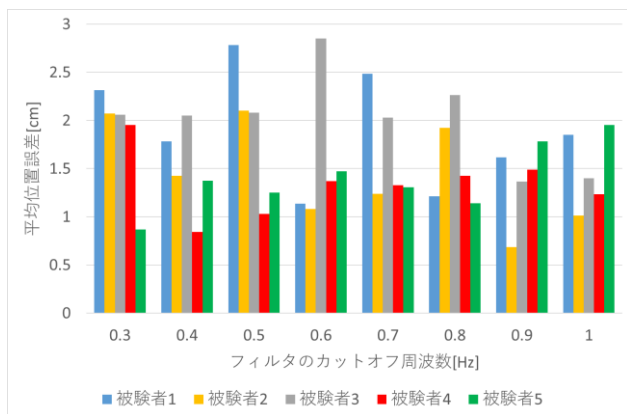


図5 操縦者に適合したカットオフ周波数

4. 提案手法

4.1 用意したフィルタ

提案手法で予め用意したフィルタについて説明する。図6にパワーアシスト台車を後退操作したときの六軸力覚センサ入力波形を示す。操縦者が意図してパワーアシスト台車を操作したときの入力波形を以下、操作入力波形と呼ぶ。この際、被験者には一定の速度で台車を動かすように意識してもらった。すなわち、図6においてY軸の波形に注目したとき、赤い線に挟まれた区間①にある大きな山が操作入力波形であり、緑の線に挟まれた区間②にある小さな山がノイズと判断できる。このことから、ノイズが人の操作入力波形よりも短い周期で力覚センサに入力されていることが解る。

ローパスフィルタにはIIRフィルタを用いることとし、チェビシェフII型によりフィルタ係数を決定する。また、設計したローパスフィルタの周波数特性の減衰域が0.3Hz幅であることを参考に操作入力が増衰域に入らないよう余裕を持たせ、カットオフ周波数が0.3, 0.6, 0.9, 1Hzの4種類のフィルタを用意する。

また、実験において、操縦者の操作入力波形に対してパワーアシスト台車の応答性が速すぎるためパワーアシスト台車の移動速度の変化が激しすぎ、そのことが要因となって操作性が低下することがわかった。これは、設計したローパスフィルタの位相特性（遅れ）を積極的に利用し、入力波形をなまらせることによって対応する。

3章で述べたよう、1Hz以下に人の操作入力の最大構成周波数があることからカットオフ周波数が1Hzのフィルタをシステムの初期設定とした。

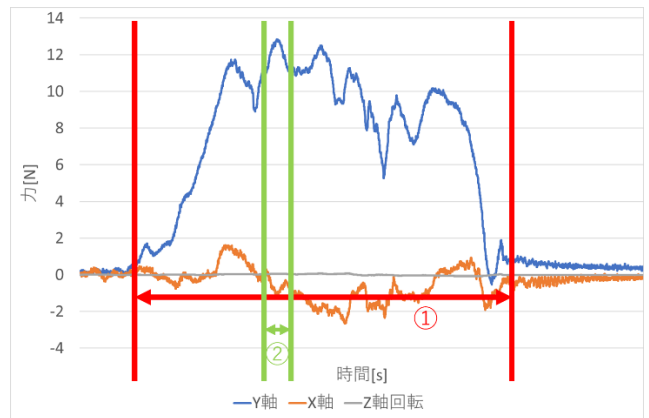


図6 後退操作時のセンサ入力

4.2 フィルタ選択アルゴリズム

本研究は操縦者の異なる操作入力に対応するため、操縦者に適合したフィルタによりパワーアシスト台車を制御できるようにすることを目的とする。操縦者に適合した理想の周波数特性をもつフィルタのパラメータを決定するためには、周波数特性を確認しながら何度もパラメータを微調整するため時間が掛かる。そのため、リアルタイムに計算で求めるのは困難である。そこで、4.1節で述べた、事前に用意したフィルタに従い複数フィルタを作成しておき、その中から操作中に適合したフィルタを選択する。

操縦者に適合したフィルタの選択では、操縦者の操作力に含まれるデータを取得するために六軸力覚センサにある程度の力が加えられた後のデータを利用する。そこで、取得するデータの時間、すなわちフィルタ選択期間は、用意したフィルタはカットオフ周波数0.3Hz間隔であることから、フーリエ変換したときに十分に入力波形の構成周波数が分離できるよう3秒間と設定した。通常、台車は前に押して使用されることが多いため、フィルタ選択期間に入力されたY軸方向の力を使用し、Y軸方向の入力3秒間についてフーリエ変換した時の最大構成周波数を上回り、かつ最小のカットオフ周波数を持つフィルタを選択することとした。

5. 評価実験

評価実験では、提案手法により、パワーアシスト台車の操作性が改善されることを確認する。評価実験では、被験者に予備実験と同じ設定経路でパワーアシスト台車を操作してもらった。

まず、提案手法のフィルタ選択アルゴリズムにより操縦者に適合するフィルタが選択できたか確認する実験を行った。この実験では、提案手法により選択されたフィルタと操縦者に適切と考えられるフィルタ(予備実験において、経路の差が最小であったフィルタ)が一致するかどうかを確認した。

次に、パワーアシスト台車の操作性向上に対する提案手法の有効性を確認するため、提案手法、および、ローパスフィルタを用いない手法(以下、フィルタなし手法と呼ぶ)、操縦者によりカットオフ周波数を変更せず 1.0Hz に固定した手法(以下、固定フィルタと呼ぶ)とで比較を行った。操作性に対する評価尺度として、3つの内容を対象にした。まず、台車を目的位置に位置合わせした時の精度として、設定経路の原点と折り返し地点でのパワーアシスト台車の位置の差を評価した。次に、操縦者の意図したように操作できていることを確認するためにパワーアシスト台車の移動経路と設定経路の位置の差を評価した。最後に、正確だけでなく、迅速に台車を制御できているかを確認するため、操作を開始してから原点に停止するまでの時間、および、設定経路の往路と復路の各区間に掛かる時間を評価した。以上、5項目を本研究ではパワーアシスト台車の操作性と考えて評価を行った。

加えて、操縦者のパワーアシスト台車の操作することで、操縦者の慣れの影響について評価を行った。試行回数は指定経路の三方向について、各方向を独立した試行回数とし、実験では各手法につき2回操作したため、計6回と考えた。そして、各回において、操作性の評価の各項目に与える影響を手法別に評価した。

実験では、予備実験と同じ被験者5人にパワーアシスト台車の操作をしてもらい、その軌跡を光学式モーションキャプチャによって測定した。指定経路は予備実験と同じく横移動、縦移動、斜め移動の3方向、それぞれの直線の長さは1mである。パワーアシスト台車の車体前方の真ん中、天板の上に反射マーカを取り付けた。被験者が実験中にパワーアシスト台車の操作慣れによる差を軽減するためにフィルタなし→固定フィルタ→提案手法→提案手法→固定フィルタ→フィルタなしの順番で操作してもらった。なお、実験中、被験者にはどの順番で制御されているのかは知らせなかった。

6. 結果

6.1 提案手法が選択したフィルタの確認

提案手法により選択されたフィルタが妥当であるかを確認する。表1に、予備実験により得られた操縦者ごとに適切と考えられるフィルタ、および、提案手法により選択されたフィルタと操縦者に適合するフィルタのカットオフ周波数の比較結果を示す。

表1よりしかし、被験者3については異なるフィルタが選択されているものの、被験者1と5で選択されたフィルタは適切なフィルタが選択されている。被験者2,4についても、選択フィルタとして設定したフィルタのうち最も適切なフィルタが選択されている。この選択手法では5人中4人は適合するフィルタが選択されており、高い精度で適切なフィルタが選択されていると言える。

表1 選択されたフィルタと適合するフィルタの比較

被験者	適切と考えられるフィルタ[Hz]	選択されたフィルタ[Hz]
1	0.6	0.6
2	0.9	1.0
3	0.9	0.3
4	0.4	0.6
5	0.3	0.3

6.2 5評価の結果

図7から図12に、各手法別にパワーアシスト台車を操作したときの移動経路(図7)、設定経路の原点における位置の差(図8)、折り返し地点における位置の差(図9)、パワーアシスト台車の移動軌跡と指定経路の差(図10)、設定経路の往復に掛かった時間(図11)、往路と復路のそれぞれに掛かった時間(図12)を示す。各図は赤色がフィルタを用いない手法、水色がフィルタのカットオフ周波数を1Hzに固定した手法、緑色が提案手法を示している。

図7より、提案手法の軌跡が指定経路に対して左右に振れることが少なく移動できていることが確認できる。図8より、提案手法の位置誤差が最小であることから最も精度よく位置決めができていたことが確認できる。図9より、折り返し地点での位置決めについては、固定フィルタの精度が一番良く提案手法は二番目だったことが解る。図10からは、提案手法によって移動時の設定経路と実際の移動経路の差に対する改善はみられなかった。また、図11においても提案手法はフィルタなし手法と比較すると時間が短縮されたが、固定フィルタと比較すると大きな改善はみられなかった。図12より、全体的に往路より復路にかかる時間が長くなる傾向があり、中でも往路と復路の差は提案手法が最小であったことがわかる。

提案手法により僅かではあるが原点への位置合わせの

精度と復路に掛かる時間が改善していることを確認できた。しかし、折り返し地点の位置誤差、移動経路と設定経路の差、操作を開始してから原点に停止するまでの操作全体に掛かる時間の3つの評価項目は改善されなかった。

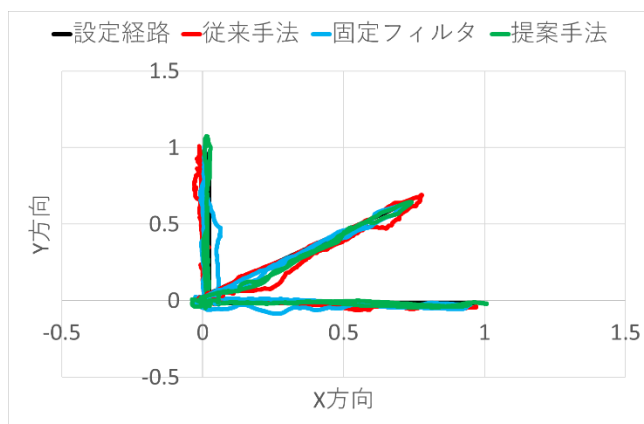


図7 ある被験者の移動軌跡

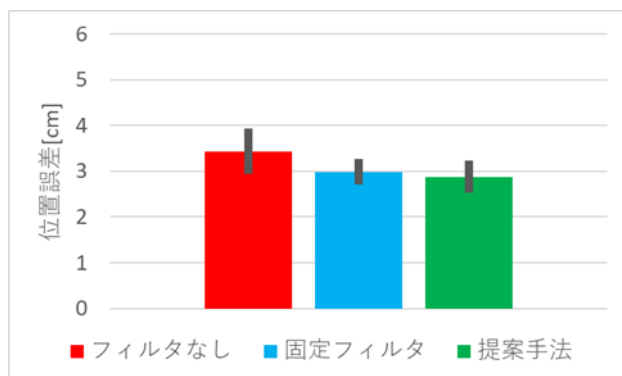


図8 原点停止時の位置合わせ時の平均位置の差

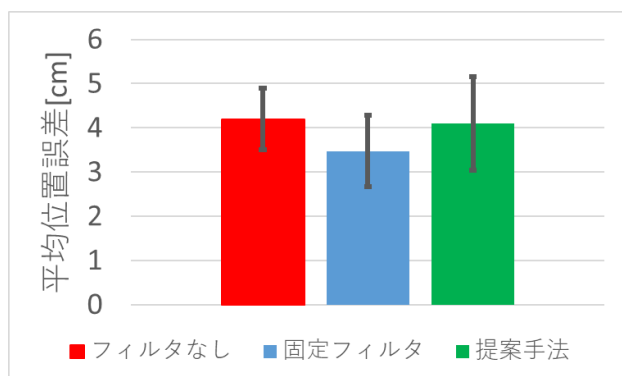


図9 折り返し地点の位置合わせ時の平均位置の差

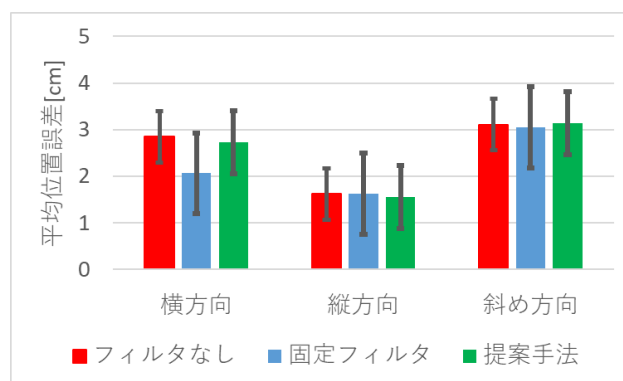


図10 移動した経路と設定経路の位置の差

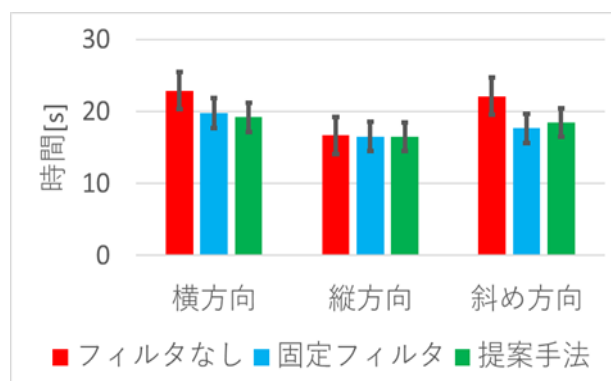


図11 往復に掛かる時間

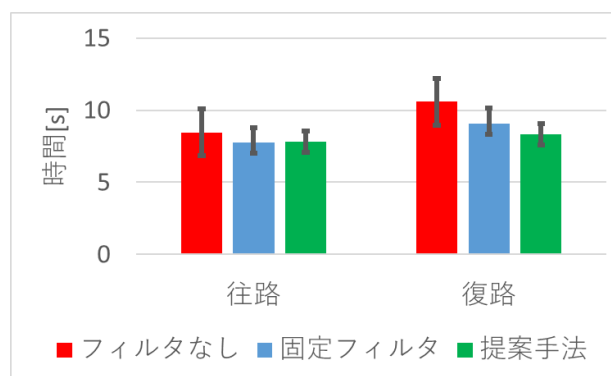


図12 往路と復路の移動時間の比較

6.3 操縦者の操作慣れによる変化

各手法別に操縦者がパワーアシスト台車を操作することで、パワーアシスト台車の操作を繰り返したときの評価の変化を確認する。

図13に各手法別にパワーアシスト台車を原点に位置を合わせたときの位置の差の変化を示す。図14にパワーアシスト台車を折り返し地点に位置合わせしたときの位置の差の変化を示す。図15にパワーアシスト台車が移動した経路と指定経路との差の変化を示す。図16に設定経路を往復するのに掛かる時間の変化を示す。図17に操作開始してから原点に停止するまでの時間の変化を示す。図18に設定経路の往路と復路の区間別に掛かる時間の変化を示す。

す。各図の赤色はフィルタなし、水色は固定フィルタ、緑色は提案手法の各手法をそれぞれ示している。

図 13 より試行回数 1 回目では提案手法が一番位置合わせの精度が良かったが、6 回目では固定フィルタの方が良い結果となった。図 14 より、全ての手法において試行回数 1 回目と 6 回目では 6 回目の方が位置合わせの精度が向上することが確認できた。図 13, 14 により指定経路の原点と折り返し地点の位置合わせの誤差は試行回数による変化はほとんど無かった。図 15 より 1 回目と 6 回目では全ての手法で僅かに 6 回目の方が精度は悪化したことがわかる。また、パワーアシスト台車の移動経路と指定経路の差は試行回数による変化に差はほとんど無かった。図 16 より操作終了までに掛かる時間は提案手法の 1 回目は一番短いが 6 回目ではほとんど差は無くなることがわかった。図 17 より提案手法の往路に掛かる時間は 1 回目から 6 回目までほとんど改善されなかったことがわかる。図 18 より復路に掛かる時間は 1 回目では提案手法が一番短かったことがわかる。

移動経路と指定経路の差以外の評価項目では 1 回目の評価が僅かな差ではあるが一番である。しかし、6 回目まで試行回数が増えると他の手法の精度が向上し、提案手法との順位が前後する。これらのことから、提案手法は被験者が台車の操作に不慣れな状態であっても良い操作性を引き出せることが確認できた。しかし、一方で、提案手法が試行回数による各評価の精度の変化が他手法に比べて小さく、操作性の学習による上達度は低いことがわかった。

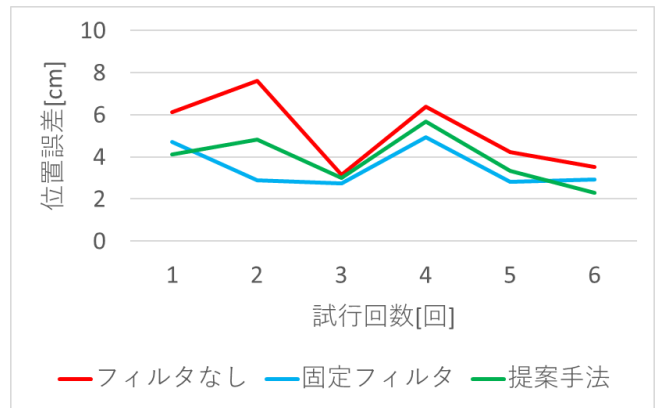


図 14 折り返し地点の位置誤差の学習による変化

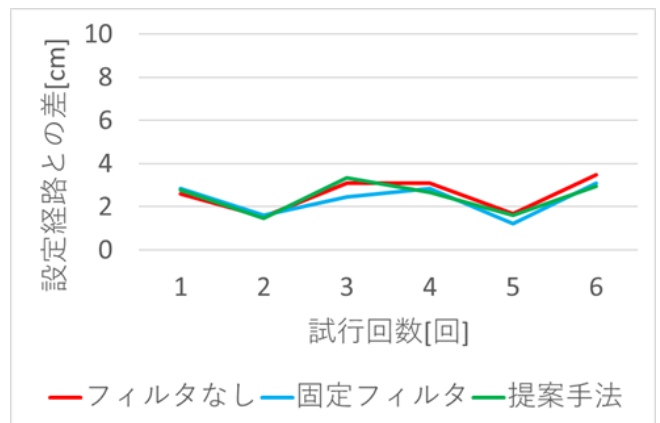


図 15 移動した経路と設定経路の位置の差の学習による変化

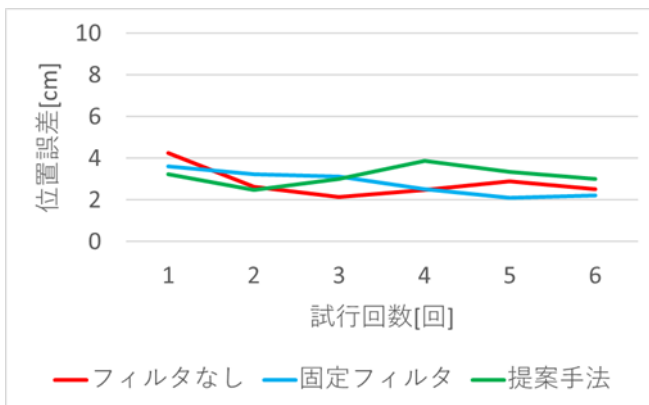


図 13 原点停止時の位置誤差の学習による変化

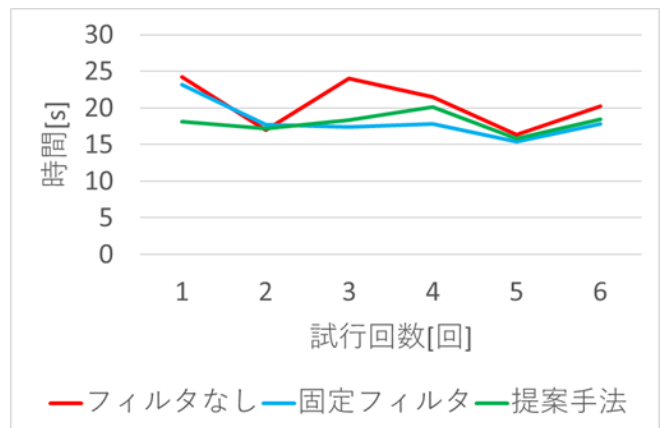


図 16 往復に掛かる時間の学習による変化

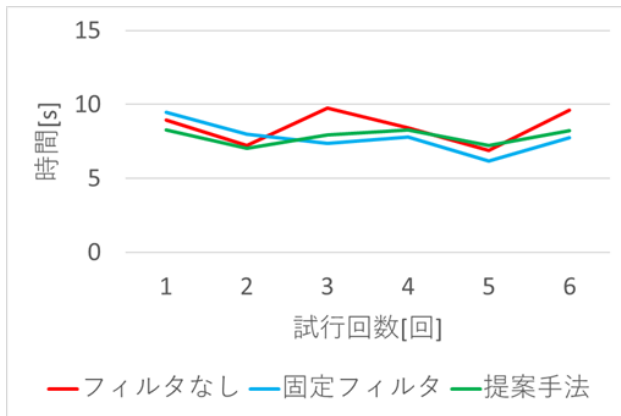


図 17 往路に掛かる時間の学習による変化

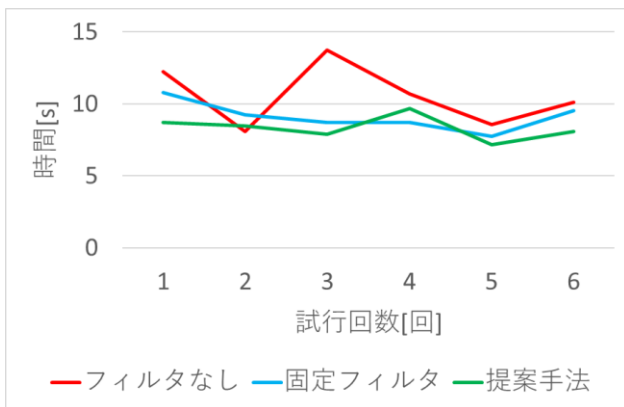


図 18 復路に掛かる時間の学習による変化

7. 考察

図 10 より移動経路と指定経路の差は、縦方向の場合は提案手法が一番精度が良く操作ができていたが、横、斜め方向の場合は固定フィルタよりも精度が悪くなる傾向がある。これは提案手法では通常、台車を操作する場合は前進移動することが多いため、フィルタ選択アルゴリズムで六軸力覚センサの Y 軸の入力データを使用するように設計したことが関係していると考えた。また、縦、横、斜めの 3 方向では横移動の動作の入る横操作、斜め操作の精度が悪くなる傾向があり操作が難しくなる。しかし、操作に掛かる時間については、図 11 より横方向移動と斜め移動方向の往復に掛かる時間がフィルタなし手法に比べ大幅に短縮されているのに対して、縦方向移動についてはあまり変化がみられない傾向がある。また、図 12 より設定経路の往路より復路の区間に掛かる時間の方が長いことから押す動作よりも引く動作の方が難しい傾向があるようだが、提案手法は復路に掛かる時間は最小であり、往路に掛かる時間も固定フィルタと同順位ではあるが最小である。また、往路と復路に掛かる時間の差が一番小さいため、往路復路の操作性の変化に強いことが解った。

提案手法の原点、折り返し地点の位置合わせの誤差、往

復に掛かる時間、往路、復路の各区間に掛かる時間は試行回数が 1 回目では精度が一番良い、6 回目までの間に固定フィルタが提案手法に近づいてく、または、固定フィルタの方が良くなる場合がある。これは、固定フィルタの場合、操縦者がパワーアシスト台車の操作特性を学習し、操縦者がシステムに合わせて操作入力を変えて対応するため試行回数が多くなるにつれて提案手法との差が小さくなったと考えられる。このことから、提案手法は初心者でも容易に操作性を向上させられることがわかる。一方で、固定フィルタにおいても、人の慣れが影響し、回数を重ねることによって提案手法と同程度の操作性を得られることがわかった。

8. まとめ

本研究では、パワーアシスト台車の操作性向上を目指し、台車の操縦者の操作入力の最大構成周波数を参考に、用意したフィルタの中から適切なローパスフィルタを選択して適用する手法を提案した。提案手法において、選択アルゴリズムにより選択されたフィルタが 5 人中 4 人は適切なフィルタが選択できていることを確認した。また、フィルタを使用しない従来手法、カットオフ周波数を操縦者により変更せず一つに固定したフィルタを用いた手法、提案手法で比較を行い、提案手法が最も精度よく指定経路に沿って台車を移動させられることを確認した。また、設定経路の原点にパワーアシスト台車を停車した時は提案手法の位置誤差が最も小さかった。提案手法による復路の操作時間が最も短いことから位置合わせが素早く行われていた。また、操作慣れに対する評価では、提案手法は初心者でも容易に操作性を向上させられることがわかった。

参考文献

- [1] 佐川克雄, 平野聡, 若生進一: パワーアシスト積載運搬台車の研究開発 (第二報), 茨城県工業技術センター研究報告, Vol.28, 27-29(2000)
- [2] 小野洋伸, 立若正弘, 平野聡, 若生進一: パワーアシスト配膳台車の開発, 茨上講演会講演論文集, online ISSN, 2424-2683(2001)
- [3] 原進, 湯地恒太, 吉浦隆仁, 山田陽滋: 意図しない入力による搬送物への影響を考慮したパワーアシストシステムの制御系設計, 日本機械学会論文集 C, Vol.28, 3279-3283 (2012)
- [4] 岩井翔吾, 野田善之: 振動要素を含む操作型搬送システムのフィルタ設計による操作支援システム, 第 57 回自動車制御連合化講演会 (2014)
- [5] Takanori Kiyota, Hiroki Sugimura, Chikara Hirano: Proposal of Power-Assisted Cart Based on Inherently Safe Control, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE
- [6] Susumu Hara, Kota Yuchi, Takahito Yoshiura, Yoji Yamada: Power Assist Controller Design Taking Account of Unintentional Input Force, ICIEA 2013 8th IEEE
- [7] Hiroshi Maeda, Shigeki Fujiwara, Hitoshi Kitano, Hideki Yamashita, Hideo Fukunaga: Control of an Omni-directional Power-assisted Cart, JSME (2003) 46, 931-937p

[8] 原進, 林準也, 櫛田陽平, 山田陽滋, 森田 良文: 構造的
不確かさと作業者への振動の影響を考慮した柔軟背構造物搬送の
ためのロバストアシスト: , 日本機械学会論文集 C Vol178 (2012)
163-175p