

車椅子における横方向外乱抑制を応用した片手漕ぎの実現

呉世訓 (東京大学) 堀洋一 (東京大学)

One-hand-propulsion with Lateral Disturbance Rejection Control for a Power-assisted Wheelchair

*Sehoon OH (The University of Tokyo), Yoichi HORI (The University of Tokyo)

Abstract— This paper deals with lateral control for a power-assisted wheelchair. A wheelchair on a slope needs to suppress the gravity's effect, and that suppression should be different according to the direction. The proposed controller copes with all these problems. As an extension of this lateral disturbance control, one-hand-propulsion control is also suggested. All the controllers are verified by experiments.

Key Words: power-assisted wheelchair, lateral control, lateral disturbance, disturbance observer, gravity rejection, phase plane, one hand propulsion

1. 序論

最近、注目を浴びている様々な福祉機器の中、パワーアシスト車椅子 (power-assisted wheelchair) のフィードバック制御に、この研究は注目した。このパワーアシスト車椅子は、モータによる利用者へのアシストをしつつ、広い移動可能環境を与える。普及しているジョイスティック型の電動車椅子だと室内には入れなく、アシスト性は高いといえるが移動可能な範囲が狭い。それとは違いパワーアシスト車椅子はマニュアル車椅子と同じ程の自由度をもって様々な環境に移動ができる上、モータによるアシストもできる特徴を持っている。このような実用的な面に加えパワーアシスト車椅子は、人間 - 機械の協調システムでもあるので制御器設計の面からも面白い題材である。このアシスト制御に関しては、人間が入れた力を増幅するだけのパワーアシストであればフィードバックの必要性はないが、坂における重力などの外乱に対する車椅子の動きを考えるとフィードバックアシストの必要性が出てくる。ここではその横方向の外乱を抑制する制御器の設計し、それを利用して車椅子の片手漕ぎを実現する。

車椅子へのもっとも大きな影響を及ぼす外乱は重力である。図 1 と 2 に前後方向と横方向の重力の影響をイラストで表した。この重力に打ち勝ち、車椅子を前方に、または思っている方向に進ませるのに必要な力は平面で運転するときに必要な力の何倍も大きい。この重力の影響をなくす補助こそパワーアシスト車椅子に必要なアシスト性能である。著者たちは文献 [1] で、前後方向の重力の補助に関して重力に対するコンプライアンスを新たに設計するという概念で制御器を設計した。本研究では横方向の重力ないしは外乱に注目する。

横方向の重力は図 2 のように車椅子の進行方向に影響を与える外乱であり、前後方向との外乱抑制とは少し違う観点の外乱抑制性能が必要となってくる。これらの点に焦点を置き横方向の外乱抑制制御を設計する。

2. 横方向外乱抑制制御

文献 [1] では図 3 のような前後方向の重力抑制制御を行った。 $\frac{1}{Js+B}$ は車椅子のダイナミクス、“FF Cont.(Assist)” は人間の力を測定しそれを倍増するパ

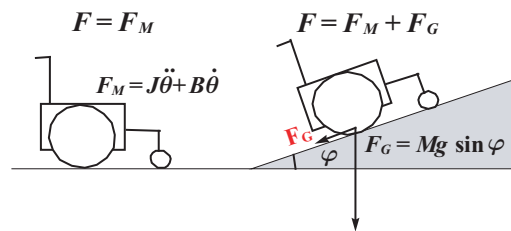


Fig.1 坂における重力の影響：前後方向

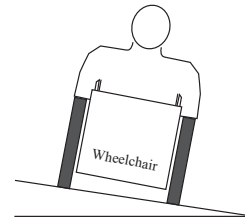


Fig.2 坂における重力の影響：横方向

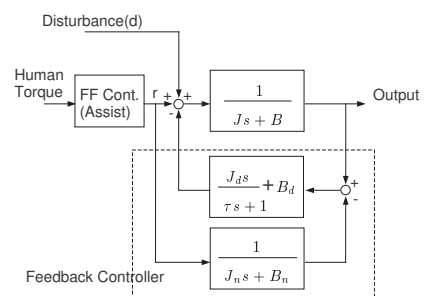


Fig.3 前後方向重力の抑制制御 [1]

ワーアシスト制御を意味し、点線で囲まれた部分がフィードバックによる重力抑制制御である。この制御はフィードバックにより前後方向の外乱に対する車椅子のダイナミクスを

$$\frac{1}{Js+B} \rightarrow \frac{1}{(J+J_d)s+(B+B_d)} \quad (1)$$

に変える制御であった。この手法は速度をフィードバックし、外乱に対するダイナミクス（コンプライアンス）を弾性を入れていない粘性までを自由に変える速度制御であった。

人間は乗り物に関して、前後方向では速度制御、横方向では位置制御を行っている。これは誤差の観点から考えるとわかることであり、前後方向に関して人間は位置の誤差に違和感を感じない。駐車などの特定の場所に止めることを目的とする時以外の普通の運行では位置の誤差は人間にはまったく気にならない。それに比べ速度の誤差は人間が敏感に反応するものであり、自分が願っている速度が出るよう乗り物を制御するのが普通である。

ところが、横方向に関しては位置誤差あるいは角度の誤差は進行方向を変えてしまうものであり、人間がとて敏感に反応してしまうものである。これを考えると横方向の重力抑制は上記した前後方向の重力抑制制御とはまた違う観点からの設計が必要になることがわかる。

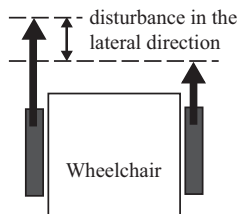


Fig.4 横方向外乱の定義

そこで、本研究では図4のように横方向の外乱を定義し、これに基づき外乱抑制制御を考えていく。この外乱に対するプラントの応答をどうすべきか考えるため、図5と図6のような制御器を設計した。

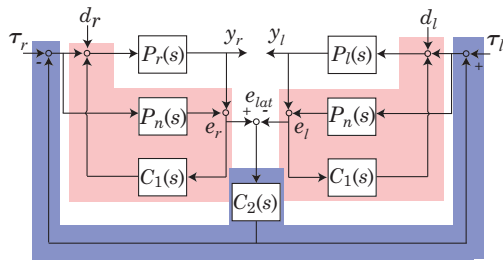


Fig.5 提案する横方向外乱抑制制御：力制御タイプ

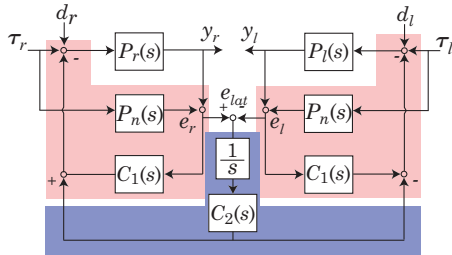


Fig.6 提案する横方向外乱抑制制御：位置制御タイプ

前後方向と独立に横方向の外乱制御を行いたいので、図5、6では最初に述べて前後方向の外乱抑制制御をそ

のままにして置きながら、横方向の制御器を追加した。赤い四角内の部分が前後外乱、青い四角内が横外乱に対するそれぞれの制御器である。前後方向の外乱抑制制御器は図3で示した制御器を設計する。横方向の外乱に対しては二種類の制御器設計が可能である。

まず、横方向の外乱 d_{lat} を式(2)のように定義する。ただし、 d_r と d_l は右と左両輪それぞれに働いている外乱である。

$$d_{lat} = d_r - d_l \quad (2)$$

提案する制御器の目的は d_{lat} の $e_r - e_l$ に対する影響をできるだけ小さくするのにある。この $e_r - e_l$ を e_{lat} と定義し d_{lat} から e_{lat} までの伝達関数を求めると $C_2(s)$ をどう設計するか決めることができる。

図5の制御器によるこの伝達関数は

$$T_{lat1}(s) = \frac{e_r - e_l}{d_{lat}} = \frac{P}{1 + PC_1} - \frac{2PC_2P}{1 + PC_1} \quad (3)$$

のようになる。ただし、 $P_r = P_l = P_n$ であると仮定した。

この伝達関数を小さくする $C_2(s)$ は式(4)のように与えられる。

$$C_2(s) = \frac{1}{2} \frac{P_n(s)}{\tau s + 1} \quad (4)$$

この $C_2(s)$ は $T_{lat1}(s)$ を理想的な条件下で0にする。このように設計した $C_2(s)$ は、また横方向における外乱オブザーバ [2],[3] と同じ構造を持つことにもなる。ところが、本研究の手法はトルク測定による人間の意思を残しておいた点、また前後方向の外乱抑制制御と一緒に設計できている点を特徴とする。

図6による伝達関数は

$$T_{lat2}(s) = \frac{e_r - e_l}{d_{lat}} = \frac{P}{1 + P(C_1 + 2\frac{C_2}{s})} \quad (5)$$

となる。この制御器を位置型制御器、すなわち位置誤差をなくす制御器とするには $C_2(s)$ を以下のように与えればよい。

$$C_2(s) = \frac{1}{2} (K_D s + K_P) \quad (6)$$

ここで K_D は横方向の粘性を増やす項、 K_P は弾性を増やす項になっている。この結果 $C_2(s)$ は伝達関数を

$$T_{lat2}(s) = \frac{1}{(J + J_d)s^2 + (B + B_d + K_D)s + K_P} \quad (7)$$

のようにする。

また、定常的な外乱に対する定常誤差 e_{lat} をなくすため積分器 $\frac{K_I}{s}$ を $C_2(s)$ に加えることもできるが、ワインドアップ現象など、乗っている人に違和感を与えることもありうる。そこで、本研究では最初に述べてカタイプの外乱抑制制御を採択し実験を行う。

2.1 実験による外乱抑制効果の確認

市販されている YAMAHA JW にエンコーダ、ジャイロスコープ、加速度センサーをつけ実験を行った。横方向の外乱抑制特性を調べるため、

- 前後方向外乱抑制は非常に弱めに行い、

- 人間のトルクをアシストしないことで外乱として扱うことにした。

すなわち、横方向の外乱をトルクセンサーで測りながら、人間の手によって自由に入れられるようにした。図7から9が実験結果である。

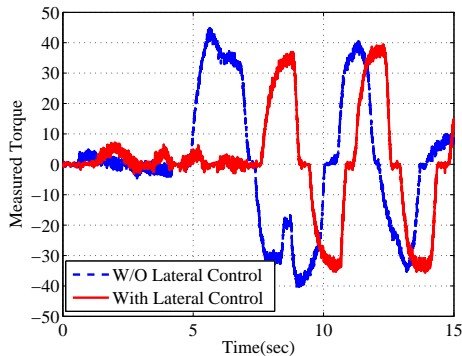


Fig.7 加えられた横方向外乱

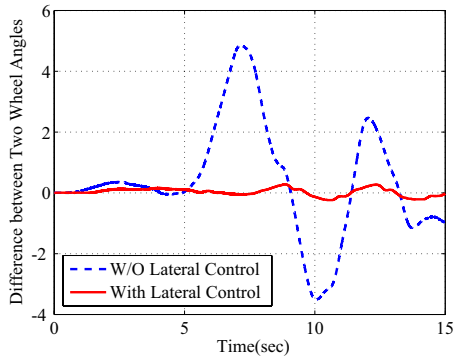


Fig.8 右と左車輪の回転角度の差

図7は横方向外乱として入れられたトルクである。青い点線が提案する制御なしの、赤い実線が制御を行ったときの結果である。最初の5秒か7秒までは右と左の車輪に同じ程度のトルクが加えられていて、左右車輪角の差はそれほど現れない。また、その後は大きなトルクが互いに反対側に加えられている。

図8に、このトルクによる実験結果を左右の車輪の角度差で示した。提案手法を用いないとその差は大きくなり、これが乗車者への意思とは関係なく車椅子をターンさせるトルクになってしまう。これを補正するため乗車者は大きな力を出さなければならない。ところが、提案手法を適用するとこの差は小さくなり、横方向の外乱を抑制していることが確認できる。

図9、10は提案する外乱抑制制御が横方向の外乱だけに働くことを示している。図9は観測された外乱である。7秒までは左右に働く外乱が同じ方向に働いており、車椅子を直進させている。図10に示された左右の車輪角を見ると7秒までは車輪が動いており、外乱の影響が抑制されていないことがわかる。7秒から両外乱は相反する方向に働いている。しかも、7秒までの外乱に比べ大きさ自体も大きい。にもかかわらず、それによって車輪が動く量は少なく、左右の外乱の差があるときだけ、すなわち横方向の外乱が現れたときだ

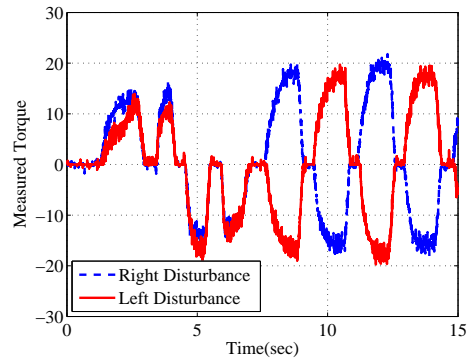


Fig.9 同一方向また逆方向の外乱

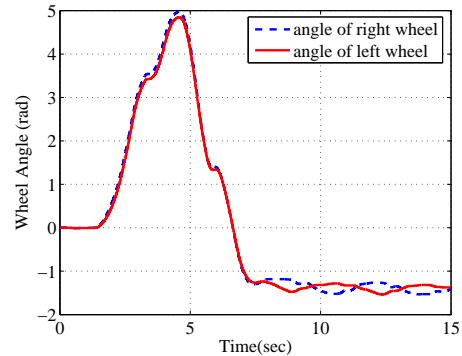


Fig.10 両外乱抑制制御の独立性:左右の車輪角度

け提案手法が有効に働くことがわかる。

3. 位相平面を利用した片手漕ぎの実現

ここでは、半身不随の人も車椅子を一人で利用することを可能にする片手漕ぎを特別なインターフェースを利用せずに、ソフト的な制御手法だけで実現する方法を提案する。もちろん、ここで提案する手法は特別なインターフェースを採用したときにも適用できる。しかし、本研究では制御だけによる片手漕ぎ実現を目指し、片手のトルク入力から方向に関する情報ももらうことにする。

まず、片手漕ぎのために必要な技術は以下の二つである。

1. 進行方向を決める人間の意思をどう読み取るか。
2. 読み取った進行方向情報を実際にどのように実現するか。

特に二番目の問題に関しては前節で説明した横方向制御を適用することで解決することができる。

3.1 制御器による進行方向の実現

まず、車椅子を直進させるためには

1. 人間の力に対するアシストトルクを両車輪に同時に与え、
2. 横方向の外乱の影響をなくす

必要がある。これを実現するため図11のような制御器を設計した。

同期化係数と定義した $K(\dot{\tau}, \tau)$ が1であれば、上で述べた直進するための制御が施され車椅子は直進する

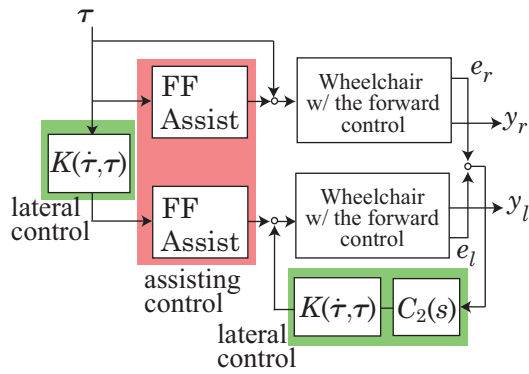


Fig.11 同期化係数 $K(\dot{\tau}, \tau)$ を採用した片手漕ぎ制御

ことになる。一方、 $K(\dot{\tau}, \tau)$ が0であれば、車椅子を直進させるための制御は効かなくなり、漕いでいる方の車輪だけが回るようになる。この同期化係数 K を0から1の間でソフト的に変えることによって片手でも方向の自由な制御ができるようになる。

しかし、この K はどのように決めるか。これに関しては特別なハードウェア的なインターフェースを利用することも可能であるが、ここでは図12のような $\dot{\tau}$ と τ の関数としてこの K を決めることにする。図12はトルクの位相平面図であって、直進モードとターンモードの二つの領域に分かれる。入れているトルクこの位相平面上のどこにあるのかによって直進かターンかを決定する。これによって速さを決定するトルクの大きさ以外に、トルクの勢い $\dot{\tau}$ によって進行方向を決めることが可能になる。

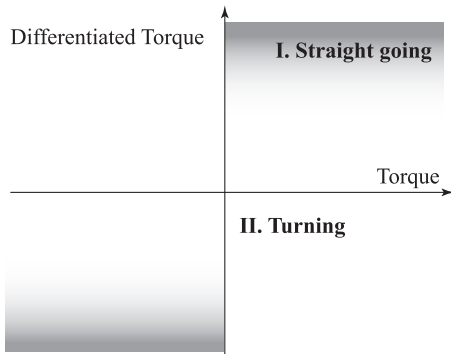


Fig.12 片手漕ぎ制御のための位相平面の分割

もちろん急激なモードの変化は好ましくないので式(8)のようなシグモイド関数を切り替えの面として採用した。

$$K(\dot{\tau}, \tau) = \text{sgn}(\tau) \frac{1}{1 + e^{-\beta(\dot{\tau} - \dot{\tau}_0)}} \quad (8)$$

3.2 実験結果

図13と14が実験結果である。図13は $\dot{\tau}$ とその関数としての K を示している。これを見ると同期化係数 K が $\dot{\tau}$ によって変えられていることがわかる。 K は $\dot{\tau}$ が30を超えると直進モードの1になるようにしている。 K がいったん1になると速度とトルクが0になるまでその値を保持する。図13では8秒近くで K が1

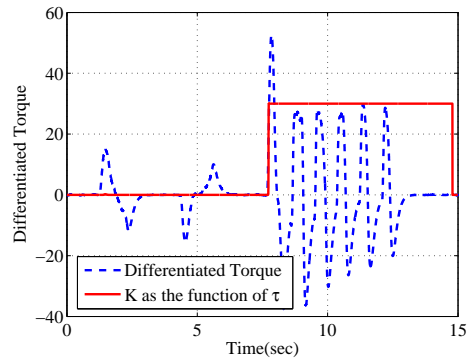


Fig.13 $\dot{\tau}$ と $30K(\dot{\tau}, \tau)$

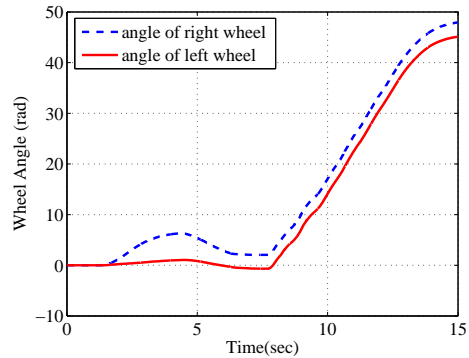


Fig.14 片手漕ぎの結果としての両車輪

になっている。図14は左右の車輪回転角度である。8秒までは右車輪だけが回転していて、車椅子をターンさせている。しかし、8秒からは図13で見られるように K が直進モードになるため両車輪が同時に同じ量ずつ動いていることがわかる。簡単な実験であるが入力トルクの勢いによって、また同期化係数によって片手漕ぎが実現されていることが確認できる。

4. 結論

重力などの横方向の外乱を人間の特徴に合わせ抑制できる制御器を設計し、実証した。また、その拡張として車椅子の片手漕ぎができる制御器を設計、実証した。人間の意志を制御器のひとつの係数として反映する提案構成は、他の人間との共同作業を行うシステムへ拡張できるであろう。

参考文献

- [1] 呉 世訓, 堀 洋一: “やわらかい外乱抑制を利用した人間親和型制御法の一提案”, 平成16年電気学会産業応用部門大会, 2003.9.14-16, 高松
- [2] Seiichiro Katsura, Kouhei Ohnishi: “Advanced Motion Control for Wheelchair Based on Environment Quarrier”, Proceeding of Japan Industry Applications Society Conference, II.281-286, 2004.
- [3] Takeaki Sugimoto, Hirokazu Seki, Susumu Tadakuma: “Rectilinear Driving Improvement of Power Assisted Wheelchair Based on Disturbance Estimation of Right and Left Wheels”, Proceeding of Japan Industry Applications Society Conference, Y-35, 2004.