

外乱オブザーバを利用した速度ベースのパワーアシスト制御器設計とロボットや車椅子への応用

呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

Design of Velocity-Based Power Assistance Controller Using Disturbance Observer and its Application to Robot and Wheelchair

Sehoon Oh and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, a controller that amplifies the external force exerted by human is designed.

This controller adopts the disturbance observer, which will make the controller force-sensorless. Direct amplification of the observed external forces can unstabilize the system. To prevent this, the proposed controller focuses on the increasement in velocity.

To verify the effectiveness of the proposed method, it is applied to a one-link robot and a wheelchair. For wheelchair application, some stability analysis and additional feedforward control for slope environment is suggested.

キーワード: パワーアシスト制御、外乱オブザーバ、車椅子、慣性制御

(Power Assistance Control, Disturbance Observer, Wheelchair, Inertia Control)

1 序論

1.1 外乱増幅の必要性

工学による人間の生活補完を目標とする福祉工学が注目を浴びている [1]。マスメディアでも介護ロボットや医用工学などをとり上げるようになってきており、工学の人間生活サポートへの新しい一歩と思われてきた。その中で制御工学が担うべきところは大きいといえる。

人間への直接的なサポートのための制御は従来の産業応用を目的とした制御とは様々な面で異なっている。その中でも特に人間が外乱になるケースが多いことを考慮すると、その外乱を抑制するだけでなく増幅する必要性が出てくる。人間が外乱になった場合、外乱を抑制することは大きな危険をもたらすことになる。去年の春東京で発生した回転扉による子供の事故がその一例である。このように人間への安全性を考慮したときに外乱への感度を高める必要性が出てくる。

また、パワーアシスト機器を力センサーレスで実現しようとするときも、外乱増幅の必要性が出てくる。センサーつきのアシストは測定できた力をアシストする構造になるが、センサーレスのアシスト制御は外乱を増幅する制御になりるので外乱への感度を高める制御が必要となってくる。

1.2 本研究で行ったこと

そこで、本研究では外乱オブザーバの構造を利用した外乱増幅制御器を設計した。安定性を考慮して推定した

力をそのまま増幅するのではなく、速度のレベルに直した増幅を行う。これによりアシストに周波数的な重みを持たせることができ、特定の周波数だけの感度を上げることが可能になる。提案する手法をロボットと車椅子に適用した実験を行った。特に車椅子を対象とした制御では考えられるいくつかの問題点を挙げ、それに対する解析も行った。また、提案手法の 2 自由度性を解析して回転扉のように外乱にだけ高い感度で動く必要があるプラントに対しても提案手法がよいソリューションになることを示した。

2 外乱応答設計によるパワーアシスト制御

2.1 慣性制御を用いた外乱増幅制御

外乱オブザーバを利用した力センサーを用いないパワーアシスト制御はいくつか提案されている (たとえば、[2] など)。しかし、それらのアシスト制御は推定した力に基づいて力制御か位置制御の観点からパワーアシストを行っている。ところが、フィードバックによる慣性の減少 [3] も対象を軽く見せかけるという意味でパワーアシストになる。ここでは、この慣性を自由に設計することで、パワーアシストを実現する制御を提案、実験によってその有効性を確かめる。参考文献 [3] とは違い、ここでは粘性項も考慮した制御器を設計する。

図 1 に提案する制御器のブロック線図を示す。

ブロック線図からでもわかるように、まずは外乱オブザーバを利用して入力端外乱を推定、それを利用して目標となる速度を計算する。「推定外乱」からの「目標速度」

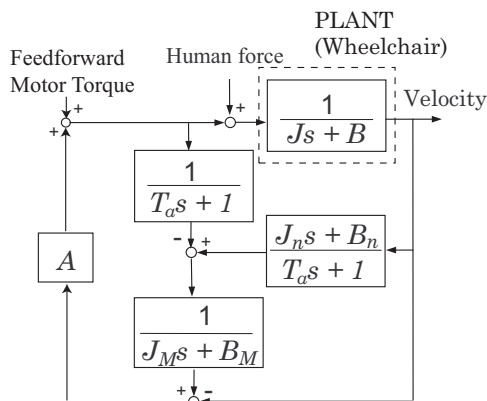


図 1: Block Diagram of Proposed Control Design

の計算は $\frac{1}{J_M s + B_M}$ の目標モデルを持って行う。もちろんモデルプラントの J_M, B_M は実際プラントの J, B より小さく設定し、外乱への感度を高めることにする。ゲイン A は実速度の目標速度への追従特性を決めるファクターであり、安定性などを考慮して選定する。

このフィードバック制御により、外乱(人間の力)から車椅子の速度までの伝達関数は以下の式(1)のようになる。

$$T_{yd}(s) = \frac{1}{J_s + B + A} \left(\frac{J_M s + B_M + A}{J_M s + B_M} \right) \quad (1)$$

前述したように J_M, B_M は自由に決められるパラメータで、 A は速度追従のためのフィードバックゲインである。適切に選定された J_M, B_M はシステムを外乱に対して適切に敏感にし、よいアシストを行うようになる。これらのパラメータの選定法は、車椅子に限定したときに時間応答を持って考えることができる。参考文献[4]にはその考察がなされている。

2.2 ロボットアームへの応用

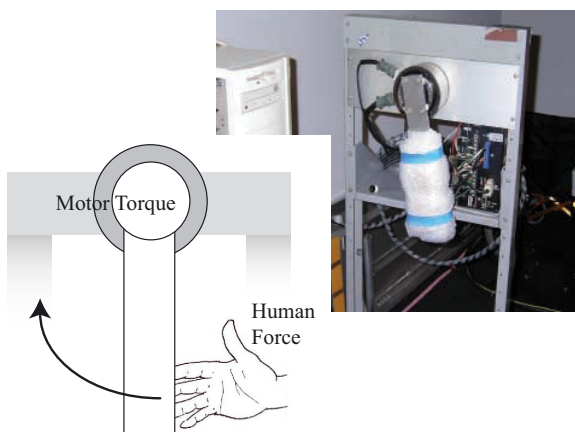
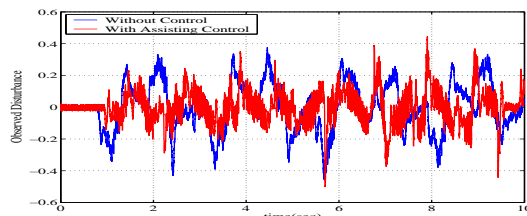
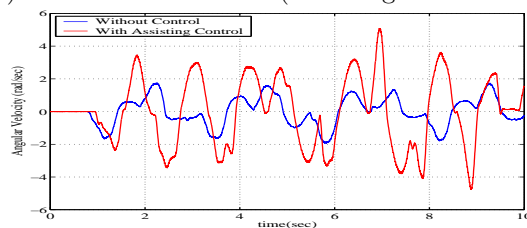


図 2: Experimental Setup

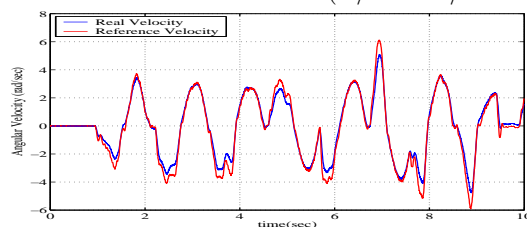
提案手法の有効性を実証するため、図 2 に示すようなロボットに提案手法を適用し実験を行った。これは未来ロボットなどにおける人間との共同作用を想定した実験でもある。ロボットのアームに操作者は力を与え、そのときのロボットの速度を見て提案手法のアシスト特性を調べるようにした。図 3 にその結果を示す。



(a) observed disturbance (including human force)



(b) velocities of the robot arm (w/ and w/o control)



(c) velocity tracking

図 3: Experimental Results

アシスト制御ありとなしの、二つの実験が行われた。両方の実験は同じ基準姿勢から始められており、人間による外力以外の外力はほぼ同じで、また人間の力に比べそれほど大きくない大きさである。実験に使われた物理仕様は以下のとおりである。

表 1: Parameter Values (normalized to motor voltage)

J	0.024	B	0.1	J_M	0.005	B_M	0.001	A	1
-----	-------	-----	-----	-------	-------	-------	-------	-----	---

図 (a) は両実験の外乱オブザーバで観測された外乱を示している。この外乱は主に人間の力であるが、両者における人間が加えた力にそれほど差がないことがわかる。図 (b) に人間の力によって駆動されたロボットの速度を示した。加えている人間の入力と同じ程度であったにもかかわらず速度は大きい差を見せている。提案手法によってアシストされているロボットの方が、アシスト制御のないロボットに対し約 2 倍に近い速度を見せている。図 (c) は制御器の追従特性を見せている。この結果から適切な

J_M, B_M と A によって希望する外乱応答特性が設計可能で、それによりアシストが実現されることがわかる。

2.3 提案制御手法の2自由度性解析

提案手法における外乱応答特性と指令値追従特性の関係を解析する。外乱が働かないときは所定の動きをするためにフィードフォワード的に出力する力と外乱が働いたときのフィードバック出力の比較である。このようなプラントの例には回転扉がありうる。普段は重いドアをまわすために一定の力(フィードフォワード出力)を出しているが、人間の力(外乱)がそのドアに働いたときはそれに敏感に反応し、出していたフィードフォワード出力より小さな外乱に対してもとまらなければならない。このような作用が提案手法で実現できることを示す。これは外乱応答と指令値応答の比較によって解析できる。

提案手法によるプラントの出力は以下の式のようになる。

$$y = \frac{A}{J_s + B + A} r + \frac{1}{J_s + B + A} \left(\frac{J_M s + B_M + A}{J_M s + B_M} \right) d \quad (2)$$

ただし、 r は図1における指令値(=フィードフォワード出力)であり、回転扉の例では扉を一定の速度で回すために必要なトルク値である。 d は外乱で、人間の力にもなりうる。二つの力に対するプラント出力の感度を見るために、プラントの動きを止めるために必要な、すなわち力のバランスをとれる r と d の比を確かめることにする。式(2)の y が0になったときの力を式(3)に示した。定常状態を考え $s = 0$ にした結果である。

$$d = -\frac{AB_M}{B_M + A} r \quad (3)$$

この式は回転扉を回すための力 r に対し人間の力は $-\frac{AB_M}{B_M + A}$ の比を持って働くことを意味する。前節で利用したロボット実験での物理定数(表2.2)を利用したシミュレーション結果を図4に示す。

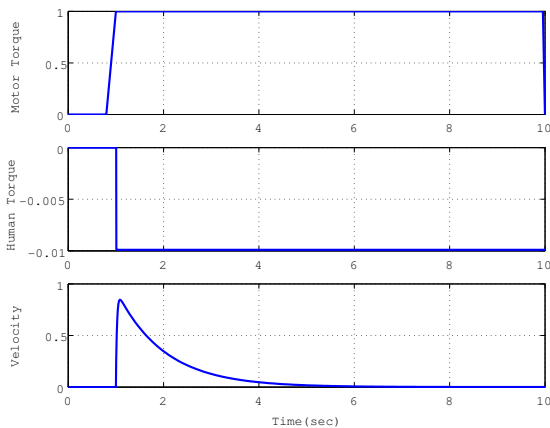


図4: Simulation for Static Force Comparison

この結果から、モータが出しているトルク指令の約100分の1の外力でプラントの動きが止まることがわかる。また、この感度の比がプラントの物理的な特性 J, B と関係なく決まるのが興味深い。この結果より、提案手法が昨

年起きた回転扉による事故の解決策のひとつになりうると思われる。

3 車椅子への適用

序論でも紹介したように提案する外乱増幅制御を車椅子に適用すると力センサーレスのパワーアシスト制御を実現することが可能になる。センサーを利用したアシスト制御は、センサーが付着しているところ以外に働いた力のアシストはされない。車椅子の場合は、乗っている自分が漕ぐケースもあるが後ろから介助者によって動くケースもある。力センサーを利用したアシスト制御ではこの両者をアシストすることはできない。といって、様々な場所に力センサーをつけるのはコスト的な面から有効な対策ではない。提案手法はこの力センサーが必要ないアシスト制御になっており、このような車椅子の特徴に適合している制御だといえる。提案手法を車椅子に適用した実験を行う。

3.1 外乱増幅アシストの安定性

人間の力を外乱として正確に検出するためには、車椅子と乗車者の体重などのパラメータを用いた正確な逆プラントを用いなければならないが、現実ではこれらのパラメータは日常的に変動するものである。乗車者・車椅子

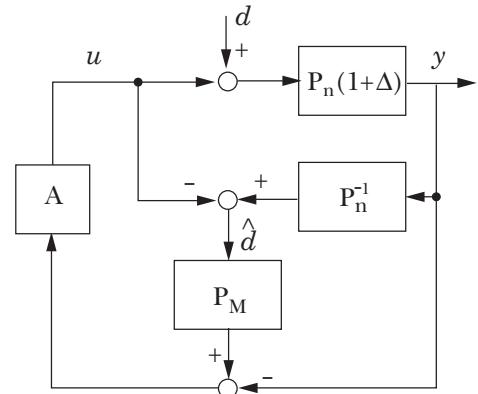


図5: Controller with Model Uncertainty

系の重量、車輪空気圧の変動をプラントの乗法的摂動として仮定すると外乱増幅アシストモデルは図5に示す等価モデルで表される。各状態変数は次式のとおりである。

$$y = P_n(1 + \Delta)(u + d) \quad (4)$$

$$u = a(P_M \hat{d} - y) \quad (5)$$

$$\hat{d} = (1 + \Delta)d + \Delta u \quad (6)$$

ここで、 P はコントローラ中で用いる乗車者・車椅子系であり実プラントでは $(1 + \Delta)$ 倍の変動が起こるものと想定している。プラント変動により推定される外乱には Δu が混入する。 $P_M = kP$, ($k > 1$) の仮定から、外乱増幅アシスト系での外乱 (d) から実プラントの出力 (θ) までの伝達関数は

$$y = \dot{\theta}$$

$$\begin{aligned}
&= P_n(1 + \Delta) \left(1 + \frac{A(1 + \Delta)(k - 1)}{P^{-1} + A(1 - \Delta)(k - 1)} \right) d \\
&= P_n(1 + \Delta)(1 + f(\Delta))d \quad (7)
\end{aligned}$$

となる。乗車者の体重がコントローラで想定したものより軽い場合、 $\Delta > 0$ となり、重い場合には $-1 < \Delta < 0$ となる。プラント誤差 Δ は現実的には不可観測な要素である。外乱増幅の実体は $f(\Delta)$ であり、この関数の安定性が系全体の安定性に関わっている。プラントを $P_n = \frac{1}{J_n s + B_n}$ とすれば、 $f(\Delta)$ の持つ極は次式で表される。

$$s = -(B_n + A(1 - \Delta)(k - 1)) / J_n \quad (8)$$

したがって、日常的使用を考慮するとプラント P_n の設定は実際の乗車者・車椅子系よりも若干重く ($\Delta < 0$) しておく必要があることが分かる。大人用にプラント P_n が設定された外乱増幅アシスト車椅子に子どもが乗った場合・乗車者がいない場合には車椅子の重量が軽すぎることから、車椅子が加速したまま止まらなくなる現象が起こる。図6に外乱増幅アシストコントローラを不安定と

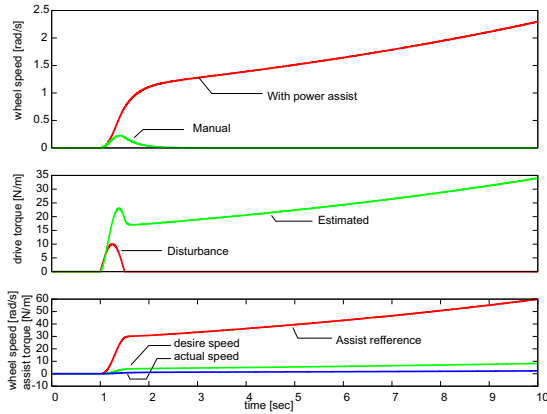


図6: Unstable System with Power Assisting Control : $J_n = 12.0, B_n = 40.0, k = 10.0 (J_M = 1.2, B_M = 4.0), \Delta = 0.57$

なるように設定した場合のシミュレーションを示す。外乱を推定するプラントの設定には $J_n = 12.0, B_n = 40.0$ とし、 P_M は $k = 10.0$ となるように $J_M = 1.2, B_M = 4.0$ とした。これに対し、乗車者・車椅子系 P_n へのモデル誤差は $\Delta = 0.57$ とし、コントローラで設定した系よりも軽い乗車者を想定した。このような設定では、前述の $f(\Delta)$ が積分的挙動を陽に示し、図6のような結果を引き起こしている。

実際の外乱増幅アシストコントローラを設計する際には、プラント P_n と所望のプラント P_M とを厳密に $P_M = kP_n$ とする必要はなく、安定性の向上のために、所望のプラントの粘性係数 B_M を大きくしておくことが望ましい。

また、車体重量を逐次推定するなどの適応コントローラの追加も安全性向上の面から検討すべき課題であると言える。

従来のパワーアシスト機構と異なり、車椅子に加わった力に対してモータからのアシスト量は車体重量などの影響を受けて変化してしまう。

次節において、モデル誤差 Δ におけるアシストコントローラのアシスト変化を紹介する。

3.2 モデル誤差によるアシスト性能の変化

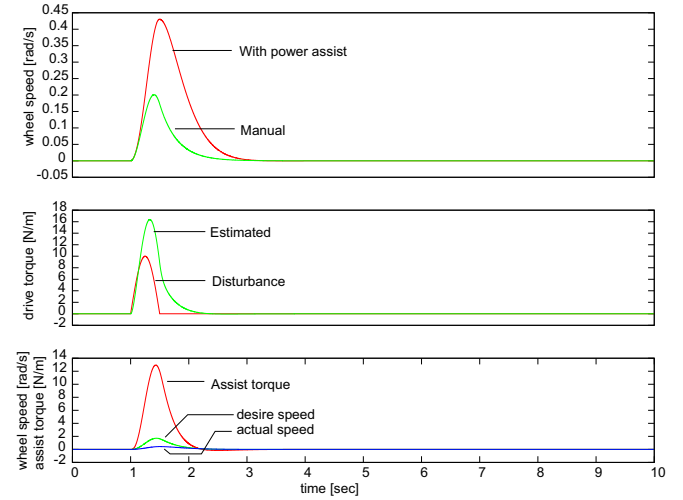


図7: Simulation Results: $\Delta > 0$

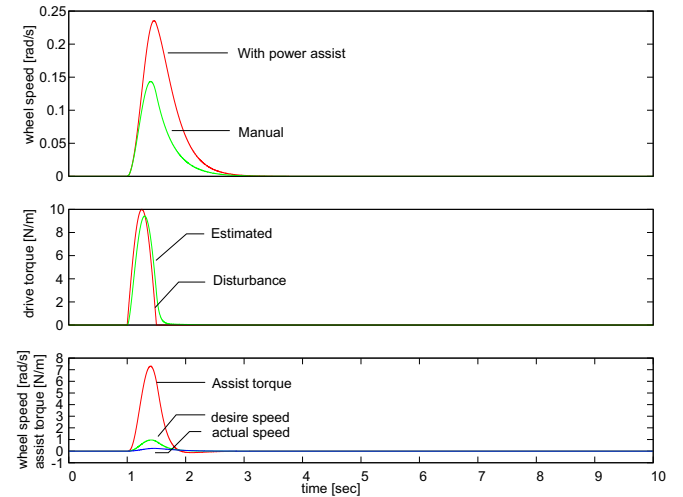


図8: Simulation Results: $\Delta = 0$

前節の式(6)に示したようにモデル誤差が実用段階では常に存在しその大小に伴ってアシストコントローラのアシストも変化する。

$$\hat{d} = (1 + \Delta)d + \Delta u \quad \dots (6)$$

モデル誤差 Δ が存在すると、外乱の推定は実際の外乱 d の $(1 + \Delta)$ 倍変化したもの以外に、アシスト力 u がモデル誤差の分だけ含まれてしまう。図7、図8、図9に Δ を変化した場合の外乱増幅アシストされた車椅子挙動のシミュレーション結果を示す。これらの結果は、コントローラ的设计はそのままで、乗車者が替わることでアシストの様子が変化することを表したものである。乗車者が重くなるにつれてアシスト量が減少してゆき、また推定される外乱も小さくなり図中上段に示す車椅子の走行速度がアシスト無しの場合(図中上段: manual)と変わらなくなってしまうことが分かる。

また、図中中段に示す推定外乱の様子は、モデル誤差 $\Delta = 0$ に近い場合には外乱を良く推定出来るが乗車者が

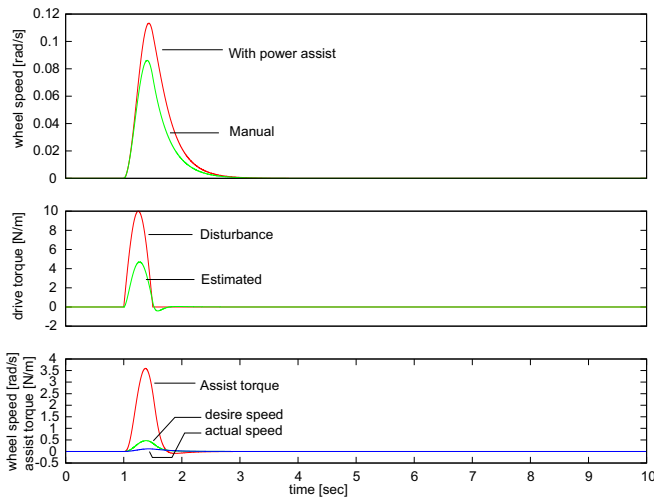


図 9: Simulation Results: $\Delta < 0$

軽い場合 ($\Delta > 0$) にはアシスト力 u の影響が大きく現れ、乗車者が重い場合 ($\Delta < 0$) には推定される外乱が小さくなる。

3.3 車椅子による実験結果

次に実験による外乱増幅アシストの結果を示す。

実験は平坦面で行い、車椅子を漕いで移動を行う。その際に車椅子後輪のハンドリムに設置したトルクセンサにより漕ぐ力を計測している。

図 10 では実際の乗車者・車椅子系とコントローラのプラントがほぼ同等である場合の実験結果である。乗車者が漕いだ力の半分程度をモータにより補助され、結果的に約 1.5 倍から 2 倍程度にアシストされている。また、外乱推定値が実際に車輪を漕いだ力を精度良く表せていることが分かる。

一方、正值のモデルに誤差がある場合には、アシスト量が増えると共にコントローラ内では図 11 中段に示すように実際に加えた力の他に、モータによるアシスト力 (図中下段: assist_torque) が外乱推定 (図中中段: estimated_value) に現れていることが分かる。

3.4 坂道でのアシスト制御

提案する制御はすべての外乱に対して感度を上げていため重力に対する感度も高くなっている。すなわち実用的なアシストでは抑圧されるべき重力までもアシストされ増幅されてしまう。そこで、文献 [5] で紹介するような傾斜角推定機構が必要になる。車いすが走行している傾斜の角度がわかればフィードフォワード的にその角度に比例する力を出すことで重力を抑圧することが可能である。

図 12 に、傾斜角推定機構を利用するフィードフォワード重力補償器をつけた実験結果を示す。路面傾斜は $8^\circ (0.15[\text{rad}])$ の長さ $2[\text{m}]$ のスロープを用意した。

重力外乱補償が無い場合、当然のことながら乗車者が加えている力に対してのアシストがほとんど無く、傾斜による負荷のほとんどを乗車者が受け持っている。また、図中上段の "wheelchair frame angle" から前輪が小刻み

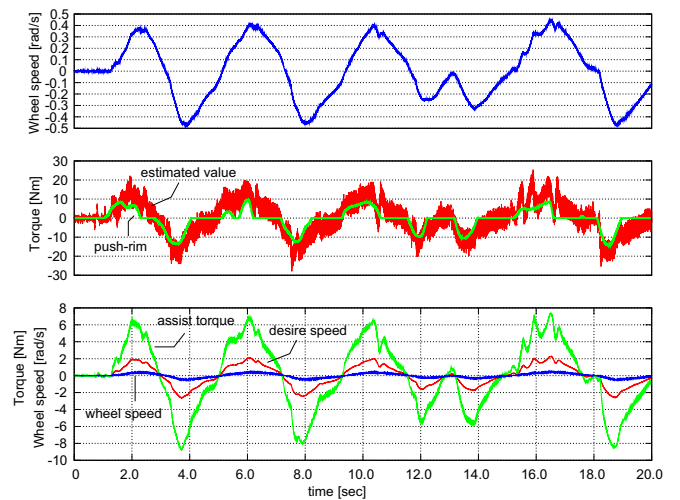


図 10: Experimental Results: $\Delta \approx 0$

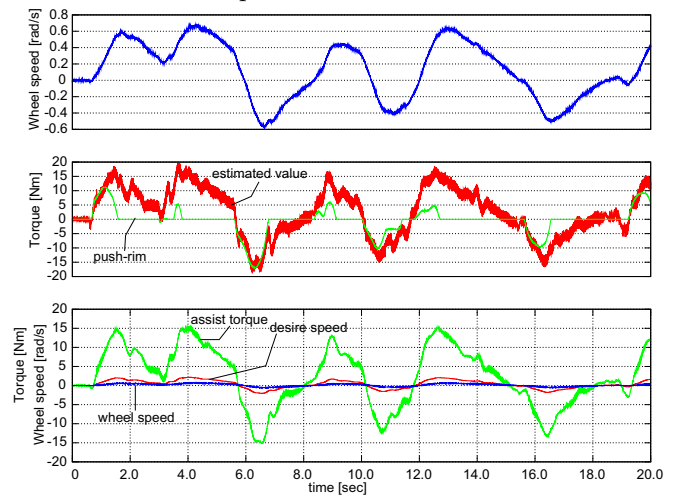


図 11: Experimental Results: $\Delta > 0$

に浮上していることが分かる。重力外乱補償が無いと後方へ降下して行く加速度が大きいことやハンドリムを持ち替えた際の漕ぎ力の反作用などの影響から前輪浮上が起きやすいためである。

重力外乱補償を用いた結果を登り坂においては図 13 に、下り坂においては図 14 にて示す。登り坂においては、重力外乱補償無しの結果 (図 12) と違いアシスト量が漕ぎ力に追従して発生できていることが分かる。さらに漕ぎ出しからの車椅子の速度上昇がなだらかであることにアシストの効果が読み取れる。重力外乱補償無しの結果では速度上昇が波打ちしている。図中上段には算出された傾斜に対するモータの重力外乱補償トルクを示している。この重力外乱補償トルクにより、乗車者が車輪のハンドリムから手を離しても急に降下していくことを抑制している。適切に補償量を調節すれば完全に静止することも可能であるが、モータの過熱防止についても考慮し若干弱めの補償に留めておくことが安全性の面でも現実的である。

下り坂においては、乗車者が漕ぐことでの前輪浮上といった不安定挙動は起こりにくい。また進むことに対する力補助よりも減速に対し補助が必要であるため重力外

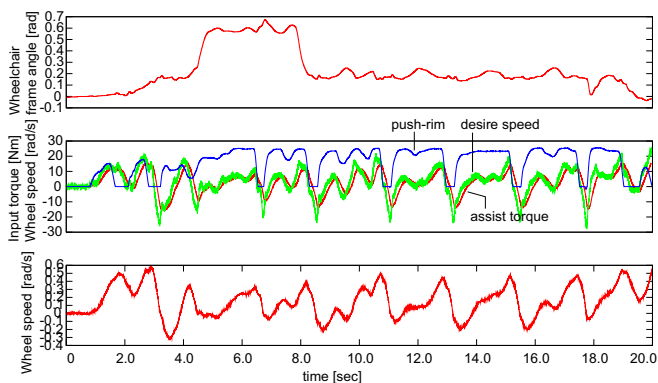


図 12: Experimental Results : w/o Gravity Compensation(Upward)

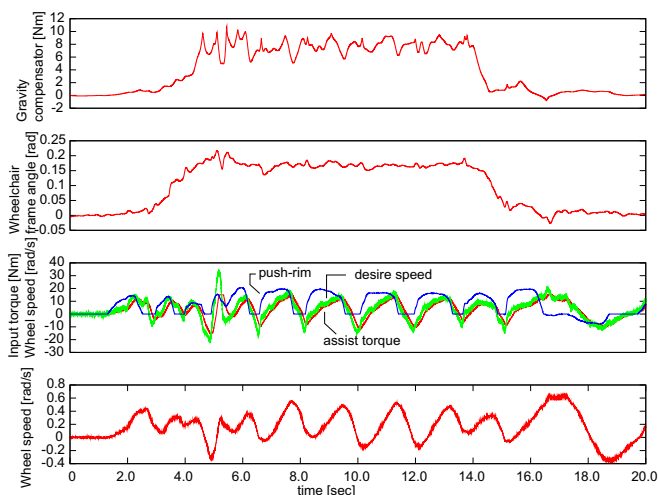


図 13: Experimental Results : w/ Gravity Compensation(Upward)

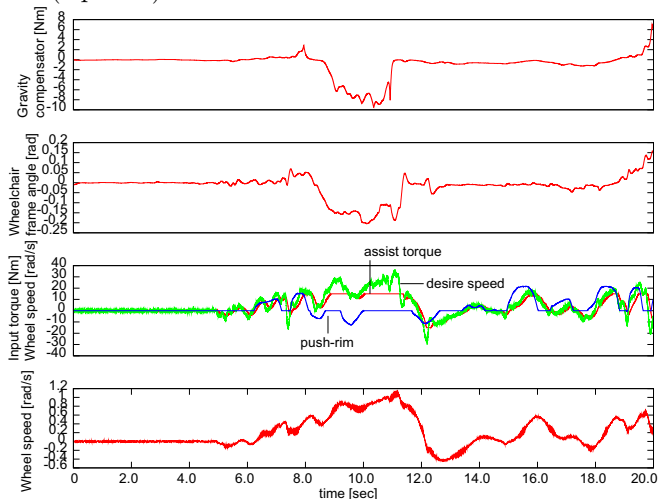


図 14: Experimental Results : w/ Gravity Compensation(Downward)

乱補償器が適当に働く必要がある。図 14 での実験結果では重力外乱補償が働いているが外乱増幅アシストがそれを上回り相殺されている。

下り坂においては外乱増幅アシスト機能を停止あるいは弱めるといった処置の必要性が認められる。

4 結論

本研究では力センサーレスパワーアシスト制御を実現するための制御手法を提案した。外乱オブザーバによる外力の推定とそれに基づいた速度ベースの外乱増幅を実現する構造であった。まずはロボットに適用してその有効性を確認した後車椅子に適用し実験を行った。乗車者だけでなく介助者もアシストできる制御器として、車椅子における提案手法は特に有効なアシスト制御である。その有効性や安全性を考慮するためモデル化誤差に対する簡単な解析と傾斜での重力補助制御を行いその実験結果を示した。

提案手法のもっとも重要な特徴は、アシスト制御のために正確な力の推定は必要でないことである。それは力の次元でなく、速度の次元でアシストを行っており、推定した力に若干のノイズが乗っていたり不正確であっても自然で滑らかなアシストができるようになっている。この特性は推定値からに対するモデル出力に追従させるアシスト性を調整するゲイン A 変更することで調節可能である。また J_M, B_M のパラメータも同時に適切に設定することで外乱の周波数応答を自由に設計できる (式 (1))。この周波数応答を安全性向上やユーザへの好みに合わせるためどう設計するべきであるかは今後考えていきたい項目である。

謝辞

本研究における安定性解析や傾斜での重力補償実験は東京大学の梶直輝氏によって行われたものであり、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 伊福部 達, 「福祉工学の挑戦」, 中公新書 1776, 2004
- [2] Yukiko Kaida, Toshiyuki Murakami: "An Approach to Detection of Human Input Torque and Its Application to Power Assist Motion in Electric Wheelchair," Japan Industry Applications Society Conference. Vol. II, pp. 419 - 424, 2004.9.14-16, Takamatsu
- [3] Y.Hori: "Design of Inertia Imulator using Disturbance Torque Observer", *National Convention Record IEEJ - Industry Applications Society*, pp.91-94, 1987.
- [4] Sehoon Oh, Yoichi Hori: "A Novel Control Method for Power-assisted Wheel Chair", Proc. of 6th SNU-UOT Joint Seminar on Electrical Engineering, pp.51-54, 2003.11, Seoul
- [5] Sehoon Oh, Naoki Hata, Yoichi Hori: Proposal of Human-friendly Motion Control - Control Design for Power Assistance Tools and its Application to Wheelchair, IECON 2004, 2004.11.2-7, Pusan