

人に優しいパワーアシストドアの研究

- 動的人間モデルを使ったドア開閉パターンの解析と応用 -

小林邦生* , 呉世訓 , 堀洋一 (東京大学)

Research on human-friendly Power Assist Door
-Analysis and application of opening door pattern based on dynamic human model-
Kunio Kobayashi* , Oh Sehoon, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Recently, accidents caused by automatic doors have occurred frequently. In this paper, we propose a safer power assist system using a disturbance observer (DOB). However, disturbance observers are sensitive to modeling error and disturbance by the wind, etc. which may activate the door. Therefore, we propose new control techniques that assist only human input by modeling a person as a PID feedback system. Using simulation, we confirmed that the new control methods assist only human input.

キーワード：ドア、パワーアシスト制御、人間モデル、外乱オブザーバ
(door, power assisting control, human model, disturbance observer)

1. はじめに

日本では少子高齢化が進む中、パワーアシスト技術に注目が集まっている。パワーアシストは人間が加えた力を増幅するシステムであり、電動とマニュアルの中間に位置する方法である。近年、回転扉やエレベータなどにおいて事故が多発している。これらの事故の原因は、力の発生源であるモータを人間の力の介入を考えないオープンループで制御していることにある。この問題を、力のフィードバック制御などをうまく導入した人間に優しいパワーアシストシステムにより解決し、安全な電動扉を制作したい。

従来の電動扉の問題を分析すると、

- フィードフォワード（開ループ）制御であり、人間の介入動作時の挙動を深く考慮していない
- 人間の介入を感知するためのセンサの選定に問題がある
- センサでその介入を感知してもモータ制御にどう反映するかが正しく考慮されていない

といった点が原因として挙げられる。そこで私は、ドアに力センサを用いずにエンコーダをセンサとして利用した外乱オブザーバを利用したパワーアシストシステムの利用を提案する。ドアのような危険を伴うシステムには、人間に優しいフィードバック制御を設計する必要がある。パワーアシスト制御を用いるメリットを次にあげる。

- (1) ドアに指などが挟まれた状態を確実に感知することが出来る。
- (2) on/off 制御と違い、人間が押した力の大きさによって開ける速度を変化させることが出来る。
- (3) どこを押しても開く

1. 従来の方式では、力センサがないところに指が挟まった場合、指が挟まったことを感知することが出来ない。しかし、エンコーダを用いてモータを外乱オブザーバとして



図 1 計測に用いたドア

Fig. 1. Picture of door for the experiment

利用し外乱を推定すれば、どのような挟まり方をしたとしてもドアに指が挟まれた状態を感知することが出来る。^{(3) (8)}

2.on/off スイッチを使った制御では、ドアは一定速度でしか開くことがない。これでは真に人間に優しいドアとはいえないのでは無いだろうか。人間はドアをゆっくり開けたいときもあれば速く開けたいときもある。ドアが開くスピードが遅すぎる場合は、急いでいる人間にとってはそれはイライラする原因となる可能性もある。またドアが開くスピードが速すぎると、ドアの反対側に居る人間にぶつかっ

てしまうかもしれない。人間の力に沿った速度でドアを開けることが出来れば人間とドア本来の動きを保ったまま、パワーアシストによる軽いドアの実現化が可能だろう。

3. 外乱オブザーバを利用したパワーアシストでは、ドア全体に対してかかった力を推定し、それを元にアシストする。そのため、スイッチを設ける必要がなく、ドアのどの部分を押しでもそれを感知しアシストすることが出来る。これにより車椅子などを利用している障害者や子供によるドア開閉をもサポートすることが出来る。

しかし、屋外にこのパワーアシストドアを実用するためには大きな問題点がひとつ残っている。それが、風の力と人間の力の区別である。本来、屋外に設置されたドアは風によって開閉しないように、非常に重く作られている。重いからこそ、モータによるパワーアシストが必要であるため、屋内だけでなく屋外で利用できるパワーアシストドアを考える必要がある。

本論文では、ドアを押す際の人間モデルを考慮することにより、上記のパワーアシストのメリットを残したまま風と人間の区別をする知能的なパワーアシストドアの提案をする。人間が挟まれて怪我のする事がないドアを第一の目標として掲げ、その上で、強風が吹いても開かないが、人間がそっと押しただけで簡単に開くドアを、研究の最終目標として目指す。そのひとつのアプローチとして本研究を発表する。

本稿の構成は以下とする。第2章では、外乱オブザーバを利用したセンサレス制御について述べる。第3章では人間モデルの同定と人間モデルを利用したアシスト手法の提案について述べる。第4章で提案モデルと従来のモデルでのシミュレーション結果を述べ提案手法について考察し、第5章でまとめる。

2. 外乱オブザーバを用いたパワーアシスト制御

現在使われているドアのアシスト機構は、ほとんどがフィードフォワード制御であり、人間動作の介入を考慮していない。力センサを用い、人間が挟まっているかどうかを判別しているシステムもあるが、このシステムでは、力センサがないところに人間が挟まった際にはセンサで感知できず、人間が怪我をする危険性がある。そのため、人間が挟まったかどうかを、ドア表面に力センサをつけて感知するのではなく、モータの動きを見て外乱オブザーバを用い、ドア全体にかかる力を推定する方法の方がより安全性が高い。⁽¹⁾⁽²⁾ 外乱オブザーバを用いたパワーアシスト手法を図2に示した。このシステムを利用することにより、理想的なモデルインピーダンスを用い、あたかも実際のドアよりも軽いドアを動かしているようなアシストを行うことが出来る。

3. 人間モデルを用いたパワーアシストモデルの提案

3.1 人間がドアを押し開ける動作の解析

人間がドアを開けている様子を観測するため、東京大学生産技術研究所の堀研究室の実験室 (Ce-502) の入り口に設置されたドアにエンコーダと力センサを取り付け、人間によるドア

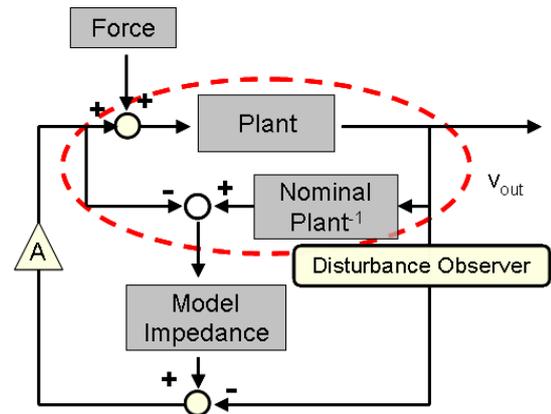


図2 外乱オブザーバを用いたパワーアシスト制御
Fig. 2. Power assist system with DOB

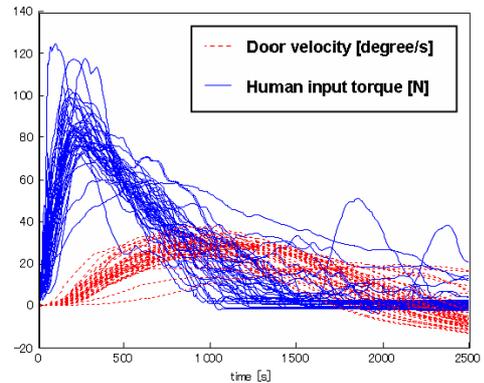


図3 ドアのy方向の速度と入力トルク
Fig. 3. Door velocity and human input torque

への入力トルクとその時のドアの位置やドアの速度を計測した。(図1)

このドアにはダンパやバネがついているため、人間がドアを開けた後、ドアは自然と閉まる構造になっている。またこのドアは屋内にあるため、風による外乱トルクが発生する可能性はない。パワーアシストドアへの適用を考慮し、ドアのノブは使用せずドア表面を押すとノブを回すことなくそのまま開く構造に改造した。ドアを押して部屋に入室する際には、力センサを押すようにし、数日間にわたって、研究室の学生や職員、十数名がドアを開ける様子を計測した。今回は、ドアを引いて開けるときのデータは計測せず、押したときだけ計測を行った。その結果を図3に示す。図3では、人間の進行方向をy方向とし、ドアのy方向の速度と人間がドアを押す力を時系列に沿ってプロットした。(式(1))

$$v_y = v \cos \theta \dots \dots \dots (1)$$

図3を見ると特徴として以下の特徴をあげることが出来る。

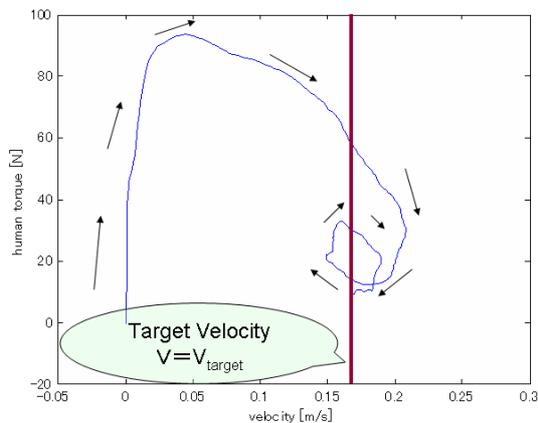


図 4 ドアの色度 - 入力トルク
Fig. 4. Door velocity - human torque

- ドアの色度とドアにかかるトルクを比べると力の方が早く立ち上がりその後でドアの色度が追従している形になっている。
- 入力トルクに注目すると、ピークが1つだけの場合、2つの場合、3つの場合などがある。それぞれのピークの出るテンポは一定であり波打つような特徴的な波形をしている。

また、研究室の学生や職員、十数名がドアを実際に開ける様子を動画に撮影し、人間がどのようにドアを開けているかを観測した。その特徴をまとめる。

- 歩いてきたスピードにあわせるようにしてドアを開ける。(ゆっくり歩いてきた人はゆっくり開け、速く歩いてきた人は勢いよく開ける)
- 両足が地面に接地している時にしかドアに対して強い力を出すことが出来ない。
- ドアを押し開ける場合、多くの人間は腕を伸ばすのではなく体ごとドアを開けるような動作を行う。

3.2 人間のドア開閉動作のモデル化 人間がドアを押すとドアは一度勢いよく開くが、ドアのパネによってそのスピードを弱めようとする方向に力が働く。それに対して、人間がまた力を加えドアの色度を速めようとする。その様子を横軸にドアのy方向(人間の進行方向)の色度、縦軸に人間の入力トルクに取り図4に示す。このように、ドアは最初に大きな力を受け色度をぐんと伸ばす。そしてドアが開くと同時に人間は片足をあげ前に進もうとするために、バランス上の問題からドアにかかる力が弱くなる。力が弱くなるとドアのパネによってドアの色度が弱まる。が、しかし人間の足がまた着地するにしたがって人間はバランスを取り戻し、ドアに更に大きな力を加えている。この動作は、あたかも人間がドアを一定色度に向かって収束させようと色度制御しているように見る事が出来る。(7)

3.3 人間モデルの同定 そこで人間は、ドアを開ける際、一定の目標色度に向かってPID制御をかけている

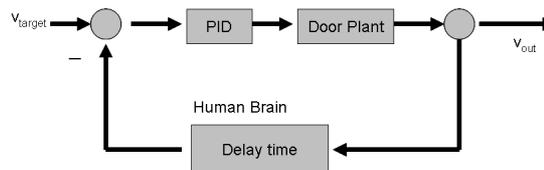


図 5 人間のドア開閉動作時のモデル化
Fig. 5. Human model of opening a door

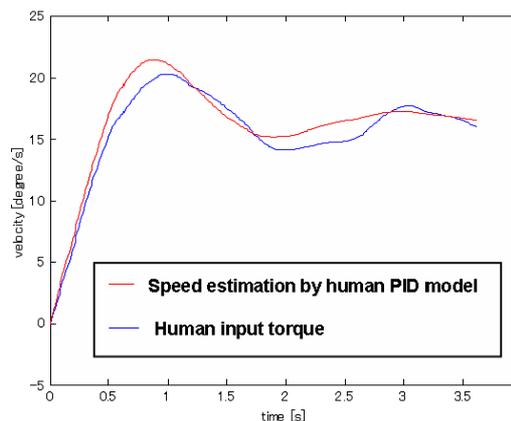


図 6 人間がドアを押し開ける時のドアの色度とPIDモデルによるドア色度の推定
Fig. 6. Door experimental velocity and estimation velocity by human PID model

と考へ、人間のドア開閉動作時のモデル化を試みる。(図5)⁽⁵⁾⁽⁶⁾

人間は、ドアを押し入室する場合、歩いてきた色度を保ったまま入室しようとする考へる。これを人間の目標色度として定める。人間がドアに力を入れ、ドアを開けた際、そのドアの色度を目で見えて脳で感知するまでには一定の遅れ時間が発生する。人間が持っている特有の無駄時間は、目で見えてその情報が脳で判断されるまで180ms、脳で判断してから手で更に押しと指令を出すのに必要な時間が20msである。(4) また、人間はドアが急に重くなった場合は即座に反応する特性を持っている考へられ、指令値がランプ関数状の場合でも指令値を追従する能力を持っている考へ、人間はPID制御器を持っている考へた。

人間のPID制御モデルを、計測された実験データを用いて最小二乗法により同定したのが図6である。このように、人間を無駄時間を持ったPID制御器とみなすと人間によるドアの開閉動作をある程度推定できる事が分かった。

3.4 人間以外の外乱を抑えるアシスト手法の提案 上記の人間モデルを利用し、風外乱と人間による外乱の判別をするパワーアシストシステムを提案する。私が提案するモデルを図 ref7 に示す。

このシステムは外乱オブザーバによって外力を推定し、その外力に対しては通常通りアシストする。そのほかに、エ

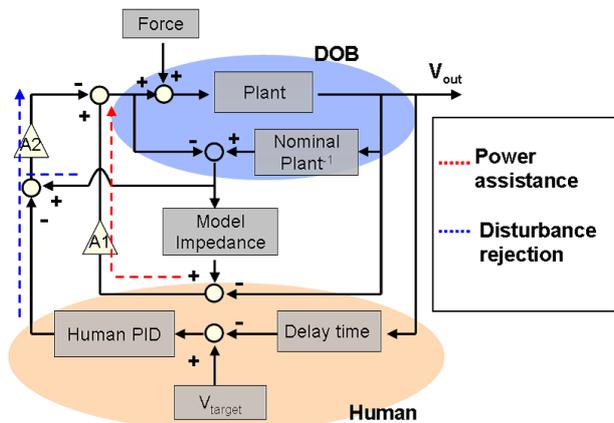


図 7 提案アシスト手法のブロック線図
Fig. 7. New power assist system block diagram

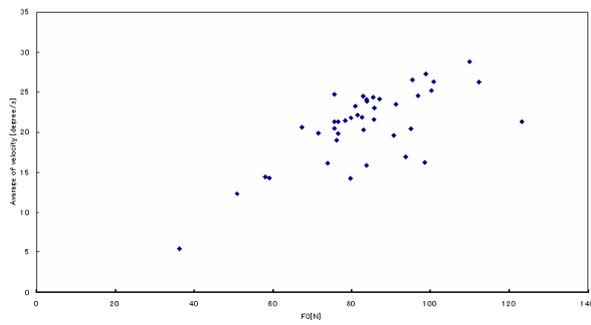


図 8 一定の角度 θ_0 における入力トルクとドアの平均速度の分布
Fig. 8. Door velocity and human primary torque

ンコーダを通じて得られたドアの速度とドアにかかる力を使い、人間によるトルクを推定し人間以外の外力を抑圧するフィードバック項をシステムに入れた。これにより、風やモデル誤差などの人間以外の外乱を抑え、人間によるトルクは通常通りアシストするシステムになっている。

3・5 目標速度について 図 7 を導入するためには、ドアが実際に開く前に人間の目標速度を推定しなくてはならない。人間のドア開閉動作解析を行うと、ドアを速く開けようとする人はドアを最初から強く押し、ドアをゆっくりあげようとする人は優しく押す傾向にあるということが分かった。(図 8) そこで、この結果を利用し、ドアが一定の角度 θ_0 まで開いたときの入力トルク F_{θ_0} を用いて、

$$v_{target} \propto F_{\theta_0} \dots\dots\dots (2)$$

とすることにより、目標速度 v_{target} をドアが開く瞬間に推定することにした。

3・6 モードの切り替え 提案するアシスト手法では、目標速度 v_{target} を追従し続けてしまうため、ドアを安全に閉めるためにモードの切り替えが必要である。本研究ではドアが閉まる時には人間はドアに力を加えず、ばねによって自然に閉まるのがもっとも望ましいと考える。ま

た、ドアが閉まる間にドアに力がかった場合、それは人間や障害物がドアに挟まっている危険性が高い。そのため、ドアが閉まる間には外乱に対して十分なパワーアシストをする必要がある。パワーアシストを始めてから、ドアが一定角度よりも開き、推定された外乱が充分小さくなった場合、つまり

$$\theta > \theta_{final} \text{ かつ } F < F_0$$

となった際、ドアはこれから閉まろうとしていると判断し、図 2 のシステムを利用する。図 7 で提案したシステムを、モード 1、図 2 をモード 2 とし、二つのモードを使い分け人間に優しいパワーアシストの実現を試みる。

最初はモード 1 を使ってアシストを開始し、風などの人間以外の外乱やモデル誤差などの入力トルクに対しては抑制する。やがてドアが充分に開き ($\theta > \theta_{final}$) かつ外乱オブザーバによる推定外乱が充分小さくなった時 ($F < F_0$) ドアはこれから閉まるとみなしモード 2 を用いて制御する。モード 2 ではドアはどんな入力トルクに対してもアシストするため、人間が挟まって怪我をする危険性を回避することが出来る。

また、ドアが一定角度より小さくなり ($\theta < \theta_0$) 外乱オブザーバによる推定外乱が充分小さくなったとき ($F < F_0$) ドアは安全に閉まったとみなしモード 1 に戻す。

4. 提案手法のシミュレーションによる検証

今回提案したアシスト手法と従来のアシスト手法をシミュレーションによって比較した。(図 9,10)

4・1 人間トルクによる入力とステップ波入力による比較 実験室のドア (図 1) によって計測した人間の典型的なトルクを入力外乱とし、提案したアシスト手法についてシミュレーションを行った。(図 9)

また、風による外乱や、モデル誤差によって外乱オブザーバが誤って推定した外乱を想定し、一定のステップ波を入力外乱としてシミュレーションを行った。(図 10)

図 9(b) を見ると、モード 2 だけを利用した場合でも提案手法でもパワーアシストは実現しているが、(d) を見ると分かるように、提案手法では一度ドアのスピードを下げた後またアシストするといった特徴的なアシストをしていることが分かる。これは人間が本来ドアを押す際に、人間の歩幅に沿って両足を地面に着地させている時のみ力を出すことが出来るという結果に似ている。アシストされたドアの速度を見ると (図 9(b)(d))、両方アシストとも平均 40 [degree/sec] ほどの速度を出すことが出来ているのでどちらも、問題なくアシストできているといえるだろう。

それに対し、図 10 を見ると、人間とは違った入力トルクがあった場合、提案手法ではアシストを抑えているのがよくわかる。モード 2 だけを利用した場合はドアを 70 [degree/sec] までアシストしているのに対し (図 10(b))、提案手法では最大 30 [degree/sec] ほどまでに抑えることが出来ている (図 10(d))。このシミュレーション結果は、提案手法が人間の力のみをアシストし、他の力に対しては抑制する事が出来ていることを実証できたといえるだろう。

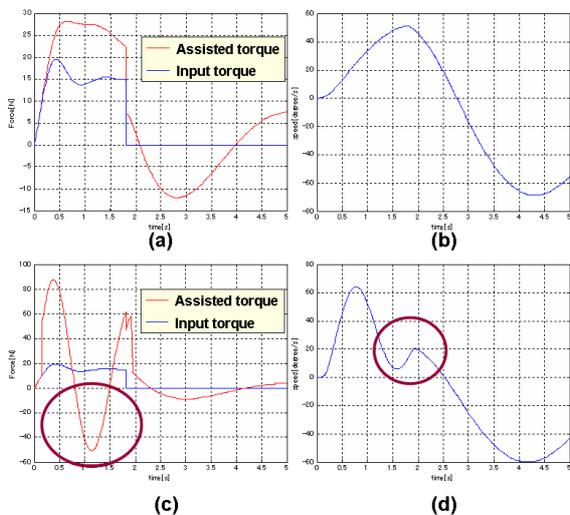


図9 人間トルクを入力トルクとした際のアシスト結果 (a) モード2のみによるアシストトルク (b) モード2のみを使いアシストした場合のドアの速度 (c) 提案手法によるアシストトルク (d) 提案アシスト手法によるドアの速度
 Fig. 9. (a)Assisted torque by mode 2 (b)Door velocity by mode 2 (c)Assisted torque by new control method (d)Door velocity by new control method

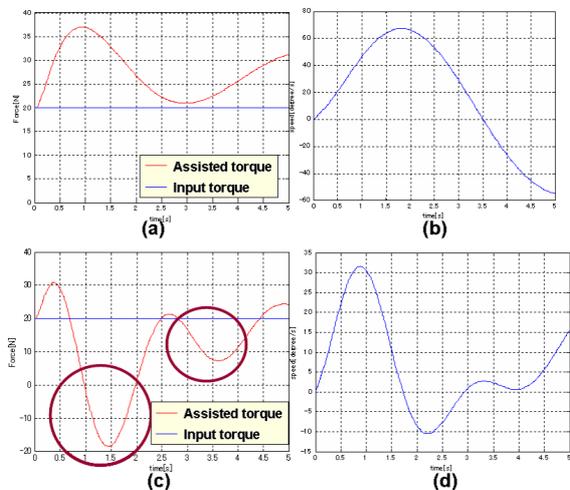


図10 ステップ波を入力トルクとした際のアシスト結果 (a) モード2のみによるアシストトルク (b) モード2のみを使いアシストした場合のドアの速度 (c) 提案手法によるアシストトルク (d) 提案アシスト手法によるドアの速度
 Fig. 10. (a)Assisted torque by mode 2 (b)Door velocity by mode 2 (c)Assisted torque by new control method (d)Door velocity by new control method

今回のシミュレーションでは入力値に、実験室のパワーアシストされていない通常のドアにて計測した人間のトルクを用いたが、しかし実際にこのシステムをドアに実装した場合は、ドアがパワーアシストされるにしたがって人間の入力トルクも変化はせずである。そのため、今回のシ

ミュレーションでは入力外乱を人間によるトルクとしたにも関わらず、一部を人間以外のトルクと判断し抑制してしまっている。これはシミュレーションでは限界があるためやむをえないことであり、これから実機での検証が必要となる。

4.2 人間モデルによるゲイン調節アシスト法の提案
 図7を用いたパワーアシストでは、力を増幅するフィードバック項と力を抑制するフィードバック項を持っている。力を抑制するフィードバックは、人間以外の力を抑制し、強風が吹いたとしてもドアがバタバタと開かないというメリットもある。がしかし、ゲインや目標速度の選び方によっては図9(c)のように人間がドアを押してもドアがそれに対して反対に押し返してくる危険性も伴う。そのため安全性を第一に考慮した場合、力を抑制せずに増幅のみする制御システムが望ましいと考えられる。そこで、図11に入力外乱が人間によるトルクに近ければ近いほどゲインを大きくする、ゲイン調節アシスト法を提案する。このアシストシステムは入力トルクを抑えることはせず、アシストゲインを可変にすることで人間が押した場合はより強くアシストし、他の外乱に対してはアシストしない知能的なパワーアシストシステムである。

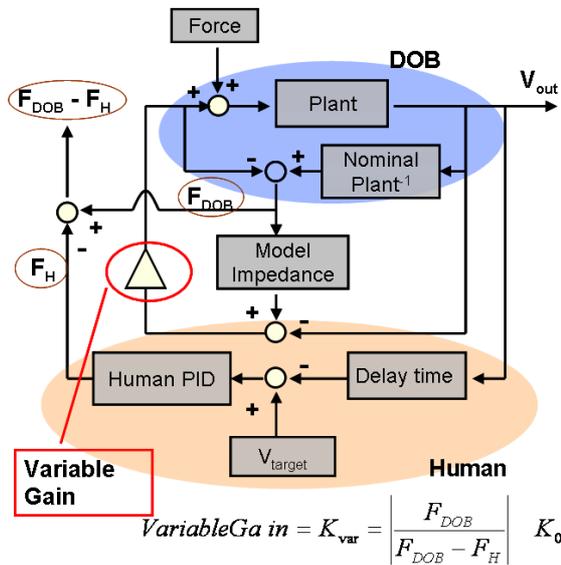


図11 ゲイン調節アシスト法のブロック線図
 Fig. 11. New power assist system using variable gain

このゲイン調節アシスト法を用いる際も、モードの切り替えは図7の場合と同様の方法を取り、ドアが閉まる時には図2のシステムを利用した。また、ゲインは式(3)に従い可変とした。

$$VariableGain = K_{var} = \frac{F_{DOB}}{F_{DOB} - F_H} \dots \dots (3)$$

(K_{var} :可変ゲイン, F_{DOB} :外乱オブザーバによる外乱推定値, F_H :人間モデルによる推定人間トルク値)

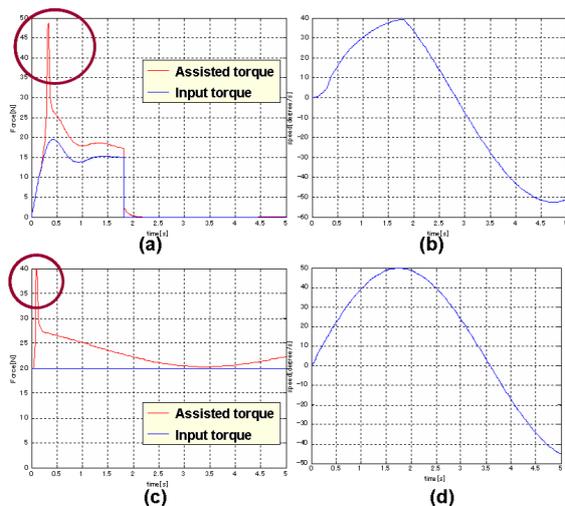


図 12 (a) 人間トルクを入力とした時のゲイン調節アシスト法によるアシスト (b) 人間トルクを入力とした時のゲイン調節アシストによるドアの速度 (c) ステップ波を入力としたときのゲイン調節アシスト法によるアシスト (d) ステップ波を入力としたときのゲイン調節アシスト法によるドアの速度

Fig. 12. (a) Assisted human input torque using variable gain method (b) Door velocity using variable gain method (c) Assisted step input torque using variable gain method (d) Door velocity using variable gain method

このシステムを使い先ほどと同様に、人間トルクとステップ波に対するシミュレーション応答を観測した。結果を図 12 に示す。この結果を見ると、入力外乱に対して反対の力をフィードバックしないため、安全なパワーアシストが行えているといえるだろう。人間トルクに対しては十分にアシストを行えている上、ステップ波に対しては少ないアシストに抑えることが出来た。このアシスト手法では、もとの入力外乱を抑えることは出来ないため、そもそもドアのバネを強くしておくなどの工夫をする必要がある。また、今回のゲインのとり方では $F_{DOB} = F_H$ となる点でゲインが 1 になってしまっている。(図 12(a)(c)) ゲインの取りかたに関しては更なる工夫が必要だろう。

5. 結論とこれからの課題

最初に、パワーアシストドアの必要性和現在のドアシステムの問題について述べた。第 2 章では外乱オブザーバを利用したパワーアシストモデルについて述べた。第 3 章では、人間がドアを押すモデルを PID モデルとし、人間がドアを押すモデルを同定した。第 4 章では、人間モデルを利用し、人間以外の外乱を抑えるパワーアシストシステムを提案した。またシミュレーション結果を提示し、その有用性について述べた。またこのアシスト法の課題について述べ、その課題をクリアした新しいパワーアシストシステムとして入力トルクが人間の入力に近ければ近いほどアシストゲインを強くする ゲイン調節アシスト法 を提案した。また、それによるシミュレーション結果を示し、このシステ

ムの有用性について述べた。

今後の課題として、本研究では人間の目標速度がドアがある角度に開いた時にドアにかかっている力 F_{θ_0} に比例するとし式 (2) を元にシミュレーションを行ったが、これで充分推定出来ているとはいえないだろう。今後、目標速度の推定に関して力の積分値や平均値を利用するなどの更なる工夫が必要である。また、今回のシミュレーションでは、図 2 にて計測した人間のトルクと、ステップ波を入力トルクとしたシミュレーションを行った。が、しかし第 5 章でも述べたように実際には人間の入力トルクは変化するため、この入力トルクは実際のパワーアシストシステムに入力される人間トルクとは異なる。人間のモデルの検証を正確に行うためには実験機を作成し実際に実験してみる必要がある。また、このほかに抑制したい外乱として外で実際に計測される風力や、DOB のモデル誤差による生じてしまう外乱などについてもシミュレーションを行い、モデルの評価をしたい。

参考文献

- (1) 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, Pusan, 11., pp. 2-7, 2004
- (2) H. Kazerooni: "Extender: A case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals", Proc. of IEEE International Workshop Robot and Human Communication, pp.10-20, 1993
- (3) Takeaki Sugimoto, Hirokazu Seki, Susumu Tadakuma: "Rectilinear Driving Improvement of Power Assisted Wheelchair Based on Disturbance Estimation of Right and Left Wheels", Japan Industry Applications Society Conference 2004, Y-35, 2004
- (4) 加藤 洋介: 「人間適応型システムのためのロボット操作特性の考察及び GUI の開発」, 東京電機大学大学院 2004 年度修士論文, 2005
- (5) K. Furuta, M. Iwase and S. Hatakeyama: "Internal Model and Saturating Actuation in Human Operation from View of Human Adaptive Mechatronics", IEEE Trans. of Industrial Electronics, Vol.52, No. 5, pp. 1236-1245, 2005
- (6) Philippe Micheau: "Evaluation of the lambda model for human postural control during ankle strategy", Biol. Cybern. 89, pp. 227-236, 2003
- (7) 田窪朋仁, 井上健司, 坂田幸太郎, 前泰志, 新井健生: "片足支持期の重心移動を利用したヒューマノイドによる押し動作", ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-L1-46, 2004
- (8) Seiichiro Katsura, Yuichi Matsumoto, Kouhei Ohnishi: "Modeling of Force Sensing and Validation of Disturbance Observer for Force Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 530-538, February, 2007