

外乱オブザーバを利用した電車ドアの快適で安全な制御

○小柳拓也(東京大学) 稲玉繁樹(富士電機アドバンステクノロジー株式会社)

呉世訓(東京大学) 堀洋一(東京大学)

A Novel Control Methods with Disturbance Observer for Safe and Delightful Door Motion

*Takuya Koyanagi⁽¹⁾, Shigeki Inatama⁽²⁾, Sehoon Oh⁽¹⁾, Yoichi Hori⁽²⁾

⁽¹⁾ The University of Tokyo

⁽²⁾ FUJI Electric Advanced Technology Co., Ltd.

Abstract — Recently, accidents caused by electrical doors have occurred frequently. This paper suggests cooperative controls between human and automatic door. First, we develop force sensor-less impedance control to be able to realize model impedance at opening and closing motion. Second, we propose a new impact force suppression control method using environmental stiffness estimation. Finally, the effectiveness of proposed method is demonstrated by some experiments with a train door experimental machine.

Key Words: disturbance observer, impedance control, impact force suppression

1. 序論

1.1. はじめに

電動ドアは利便性の高く、あらゆる場所で使用されており、現代社会に無くてはならないツールである。しかしながら、2004年六本木の森ビルの大型回転ドアで起きた男児の死亡事故を代表として、電動ドアに関する事故も同時に多く発生している。このような重大な事故を契機とし、電動ドアの安全対策への意識が高まっており、様々な安全対策が取られるようになった。[1]そもそも、電動ドアは日常生活において、人間と接触する可能性が非常に高く、十分な安全対策が要求されることは言うまでもない。

本研究においては、主に電車のドアを対象とし、ドアの安全な開閉を目指すものである。電車のドアの安全対策として特異な点は、センサに頼ることができない点にある。通常、電動ドアでは、赤外線センサなどにより、人や物の有無を判別しているが、電車のドアにおいては人がドア付近に密集している場合もあるため、赤外線センサを使用することはできない。また、ドアが人と接触する面は広く、点ではなく線で力を検知する必要があるため、力センサは適さない。

従って、外乱オブザーバを用いることによって、力センサレスで快適で安全なドアの開閉を目指す。そのための手法として、電車ドアのためのインピーダンス制御と環境剛性に基づく衝撃力緩和制御を提案する。また、これらの手法は、電車ドアに限らず、その他多くの機械系の制御に適用できるものであることを最初に断っておく。

1.2. 電車ドア実験機の紹介

本研究では、富士電機システムズより電車ドアの実験機をお借りし、様々な実験を行った。ここでは、その実験機を紹介する。実験機の外観を Fig. 1 に示す。

実験機はラックピニオンによる電気モータ(最大出力300[N])駆動の構造をもち、モータにはエンコーダが取り付けられている。大きさは、高さ1700[mm]、幅2[m]、総重量230[kg]であり、だいたい実際の電車ドアの2分の1にあたる。またドアのストロークは500[mm]である。制御部はマイコン(ルネサス製SH-7083)によって構成されており、サンプリングタイム250[us]にて電流制御を、2[ms]にてモータ制御を行っている。



Fig. 1 電車ドア実験機の外観

2. 電車ドアのための力センサレスインピーダンス制御

2.1. 二自由度制御によるドアの開閉

従来の電車のドアの開閉は、PI制御器による速度制御により行われていた。しかしながら、PI制御では、目標値応答と外乱抑圧特性を独立に決定することができないため、外乱を抑えスムーズな開閉と、人間の力のある程度考慮する人に優しい開閉とを、同時に実現することが困難であった。

電車ドアにおいては、まずドアがスムーズにかつ確実に開閉することが前提となる。ドアがスムーズに開閉しないと、電車の遅延などの問題が発生するばかりでなく、最悪乗客が挟まれたまま電車が発車するといった事故にもつながりかねない。そこで、本研究では、まず外乱オブザーバによる外乱のFF補償を加えた、二自由度サーボ系に基づくドアの開閉を実現した。Fig. 2 に二自由度サーボ系に基づくドア閉時の、ドアの速度と外乱のグラフを示す。

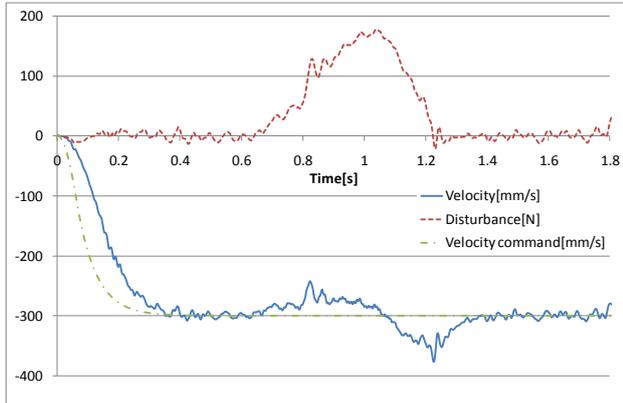


Fig. 2 二自由度制御に基づくドアの開閉

図中、波線は外乱オブザーバの出力、実線はドアの速度を表している。グラフからもわかるように、ドアは外力に対して非常に強く、確実なドアの開閉を実現する。しかしながら、人間の力も外乱として抑圧し、人間の力の介入を全く考慮しないため、場合によってはかえって危険な制御になり得る。そこで、スムーズかつ確実なドアの開閉を実現しつつ、人間の力のある程度考慮するドアの制御手法を実現すべく、インピーダンス制御を適用する。

2.2. 速度指令を実現するインピーダンス制御

インピーダンス制御は、主にロボットの力制御の分野で研究が行われているが、その中でも速度指令を実現しながら、言い換えれば動きながらのインピーダンス制御というものは考えられていない。[2][3]そこで、開閉動作を行いつつインピーダンス制御を行う手法を提案する。[4]提案する制御のブロック線図を Fig.3 に示す。

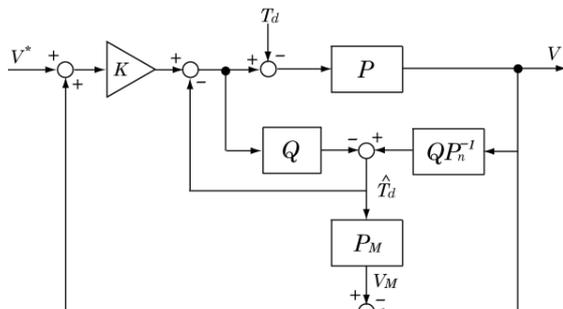


Fig.3 電車ドアのためのインピーダンス制御ブロック線図

図中のブロックについて、 P はプラント、 P_n はプラントのノミナルモデル、 Q はローパスフィルタ、 P_M はモデルインピーダンスを表している。また、 V はドアの速度、 V^* は速度指令値、 V_M はモデルインピーダンスを実現する速度指令、 T_d は外乱、 \hat{T}_d は外乱オブザーバによる外乱推定値を表している。

開閉のための速度指令 V^* と、モデルインピーダンスを実現する速度指令値 V_M を足し合わせることで、開閉動作をしながらのインピーダンス制御を実現することができる。また、外力 $T_d=0$ の時、 $V_M=0$ であり、このときドアは通常通り開閉する。

2.3. 実験結果

速度指令を実現するインピーダンス制御の実験を行った。実験における、各パラメータの値を Table.1 に示す。

Table.1 インピーダンス制御実験パラメータ

K	2.5
J_n [$N \cdot s^2$]	59.7
B_n [$N \cdot s$]	60.5
Q	$1/(1+0.025s)$

Fig.4 に $J_m=J_n, B_m=1/2B_n$ としたとき、Fig. 5 に $J_m=4J_n, B_m=B_n$ としたときの結果を示す。

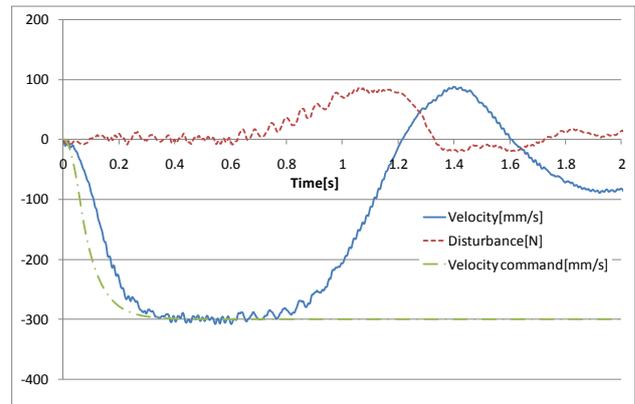


Fig. 4 $J_m=J_n, B_m=1/2B_n$ としたとき

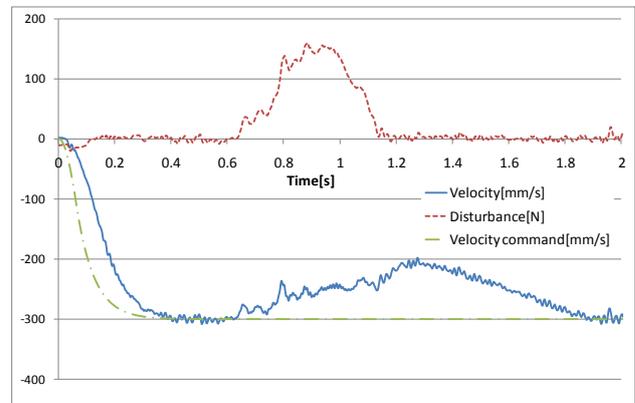


Fig. 5 $J_m=4J_n, B_m=B_n$ としたとき

Fig. 4、Fig. 5 を比べてみると、外乱に対する応答特性が大きく異なることが分かる。Fig. 4 では、小さな外乱に対してドアの速度が大きく変化しているのに対して、Fig. 5 では Fig. 4 ほどドアの速度は変化していない。また、ドア加速時における、速度追従特性は両者でほとんど変わらない。つまり、外力に対する応答のみが変化し、速度指令に対する追従性は変化しない。

さらに、参考として Fig. 6 に $J_m=J_n, B_m=1/2B_n$ としたときの V^*+V_M と V との関係を示す。

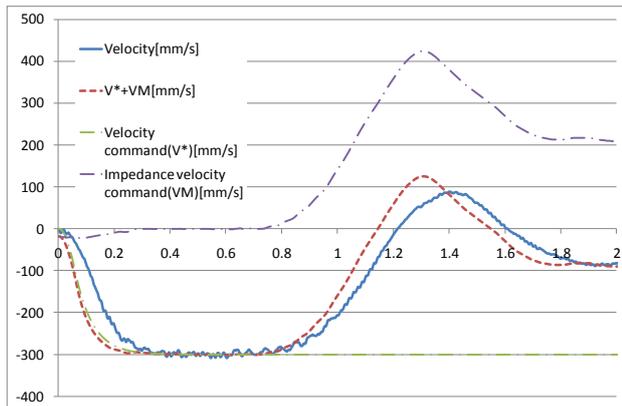


Fig. 6 インピーダンス制御時の V^*+V_M と V との関係

このグラフより、開閉動作のための速度指令と、モデルインピーダンスを実現する速度指令の和に速度が追従することにより、開閉動作をしながらのインピーダンス制御が実現されていることが分かる。

3. 衝撃力緩和制御

3.1. 衝突過程において発生する力

前章では、人間が電車ドアに接触することを前提とした人の力の介入を考慮した制御法を提案した。しかしながら、人間と電車ドアに接触時には衝突という現象が起こる。本章では、まず衝突時に発する力の特徴について述べる。そして、力センサレスで衝突を素早く検知する手法として、環境剛性という概念を導入する。さらに、環境剛性を用いて衝撃力を緩和する手法を提案する。

Fig. 6 に電車ドアが物体と衝突した際に発生する衝撃力を示した。実験においては、電車ドアを全開状態から $-300[\text{mm/s}]$ の速度指令を与え、力センサに衝突させた場合である。

Fig. 6 から分かるように、物体が衝突する際、非常に短い時間の間に、 $250[\text{N}]$ もの非常に大きな力が発生する。そのため、衝撃力を制御するのは非常に困難であり、様々な方法が提案されている。これら従来の制御法では、衝突をすばやく、かつ確実に検知するために力センサを用いている。しかしながら、序論で述べたように力センサは非常に高価であり、力センサのある場所でしか力を検知できないため、電車ドアには不向きである。

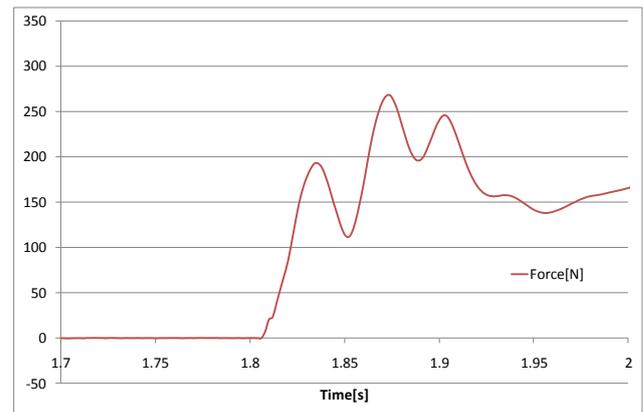


Fig. 6 衝突時に発生する力

次節では、力センサなしで衝突を素早く検知する手法として、環境剛性という概念を導入する。

3.2. 環境剛性の推定

衝突の際、発生する衝撃力は衝突した環境によって大きく異なる。例えば、石のような硬い物体にぶつかったときには衝撃力は非常に大きいが、スポンジのような柔らかい物体に衝突したときには衝撃力は小さい。そこで、衝突した物体を単純なバネ系に見なし、そのばね係数を環境剛性と呼ぶことにする。環境剛性を K とすると、発生する衝撃力は次のように表せる。

$$F = K(x_{\max} - x_{\text{off}}) \quad (1)$$

F : 衝撃力

K : 環境剛性

x_{off} : 衝突した位置

x_{\max} : 衝突が止まった位置

両辺を微分すると、

$$\frac{d}{dt} F = Kv \quad (2)$$

v : ドア速度

従って、環境剛性は次のように推定される。

$$K = \frac{F'}{v} \quad (3)$$

実際の制御では、外力 F は外乱オブザーバの出力を用いている。この環境剛性 K は、ドアにかかる外乱オブザーバの推定外力を微分し、ドア速度で割るだけの簡単な計算であるため、マイコンのような処理速度の遅いマシンでも簡単に、かつ瞬時に計算できる。また、外乱オブザーバの推定外力値を微分することで摩擦などによるモデル誤差などの外乱を遅れなく除去することができる。

電車ドア実験機を用いて、電車ドア閉時の衝突における環境剛性の様子を実験機を用いて調べた。その結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 は電車ドアを定速で閉めている際に、金属の物体を衝突させたときの様子である。外乱オブザーバによる衝撃力の推定値、環境剛性、ドア速度をグラフにまとめた。

この結果を見ると、環境剛性は外乱オブザーバが反応するより20[ms]-50[ms]早く、衝突を検知していることがわかる。環境剛性の推定によりこのように大きな衝撃力が発生する前に衝突を検知することができるのである。

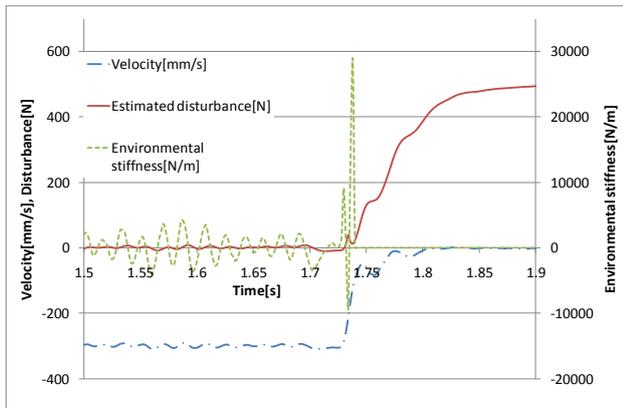


Fig. 8 衝突時の環境剛性の様子

3.3. 環境剛性の推定に基づく衝撃力緩和制御

推定された環境剛性を用いて、衝撃力を緩和する。そこで、環境剛性によって衝突を検知し、その衝突によって発生する衝撃力を推定し、フィードフォワード的にトルク指令を与えることにより、衝撃力を緩和する方法を提案する。

衝突を検知した後、一定加速度にてドアを停止させるとすると、衝突後のドアの速度は、

$$v = v_0 - \alpha t \quad (4)$$

のように表すことができる。 v_0 は衝突時の速度、 t は衝突してから時間、 α はドアの加速度を表している。これより、電車ドアが衝突してから停止するまでに動く距離は、

$$x_{\max} - x_{\text{off}} = \frac{v_0^2}{2\alpha} \quad (5)$$

式(1)より、発生する衝撃力は、環境剛性 K を用いて、

$$F = K(x_{\max} - x_{\text{off}}) = K \frac{v_0^2}{2\alpha} \quad (6)$$

と表される。今、発生する衝撃力を 50[N] に抑えたいとすると、必要となる加速度 α は次のようになる。

$$F = K \frac{v_0^2}{2\alpha} = 50 \quad (7)$$

$$\therefore \alpha = \frac{v_0^2}{100} K \quad (8)$$

従って、衝撃力緩和の際に必要なモータートルクはノミナルモデル J_n を用いて、次のように計算できる。

$$T = J_n \alpha = \frac{v_0^2}{100} K J_n \quad (9)$$

これより、衝突を検知した後、式(9)に基づくトルク指令をフィードフォワード的に与え、衝撃力を緩和する。

3.4. 実験結果

提案した手法により衝撃力が緩和されることを実験により確認した。実験結果を Fig. 9 に示す。実験により、衝撃力が大きく緩和されていることが分かる。

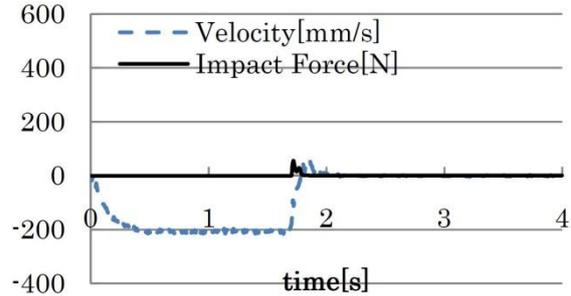


Fig. 9 衝撃力緩和実験

4. まとめ

電車ドアの快適で安全な開閉を実現する制御手法を2つ提案した。一つは電車ドアのためのインピーダンス制御であり、これによりスムーズな開閉を損なわずに、かつ人間に対して安全な挙動を実現できる。そしてもう一つは、環境剛性に基づく衝撃力緩和制御である。環境剛性という概念を導入することにより、素早く衝突を検知し、衝撃力を緩和することができる。また、実験機による実験を行い、これらの手法の有効性を確認した。

最後になったが、本研究において多大な協力を頂いた小林邦生さんには、この場をお借りしてお礼申し上げたい。

参考文献

- [1] 畑村洋太郎: “ドアプロジェクトに学ぶ 検証回転ドア事故”, 日刊工業新聞社, 2006.
- [2] N. Hogan: “Impedance Control: “An Approach to Manipulation: Part 1-3”, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [3] 小島宏行ほか: “特集「ロボットの力制御」”, 日本ロボット学会誌, vol. 9, No. 6, pp61-614, 1991.
- [4] 呉世訓, 堀洋一: “外力情報判断を利用した力センサレスパワーアシスト制御”, 第13回知能メカトロニクスワークショップ, 知能メカトロニクス専門委員会, pp.63-68, 2008.