

一本レール型いす式階段昇降機の 2自由度スライディングモード制御

瀬戸山明雄 平田光男 (宇都宮大学)

足立修一 (慶應義塾大学) 坂庭 浩 (シンテックス(株))

Two-Degrees-of-Freedom Sliding Mode Control System for Seated Stairlift with Single Rail

A. Setoyama and M. Hirata (Utsunomiya University),
S. Adachi (Keio University), and H. Sakaniwa (Syntex Co., Ltd.)

Abstract— As a welfare equipment, a seated stairlift is used to go up and down stairs in the home. Recently, the seated stairlift with single rail has been developed to reduce the production cost and the construction time. However, it is necessary to control the seating face horizontally in real-time by using an actuator. In this paper, we apply a two-degrees-of-freedom control system of sliding mode scheme to improve the control performance. The effectiveness is shown by experiment.

Key Words: Seated stairlift, system identification, sliding mode control, two-degrees-of-freedom control

1 はじめに

本格的な高齢化社会を迎えた今、高齢者や障害者が個性豊かに、そして自立して生活できるように福祉機器の開発やバリアフリー住宅・設備など新たな取り組みが活発化してきている。一例として、自宅の上下階を自由に行き来できるいす式階段昇降機の開発が挙げられる。我々はこれまで、Fig.1 に示したような設置の自由度が高く、製作コストが抑えられる一本レール型いす式階段昇降機の研究・開発を行ってきた。

一本レール型では姿勢制御が必要となるが、文献 [1] では傾斜センサを座面に取り付けて、傾斜角が常に 0 deg となるようにフィードバック制御を行った。しかし、使用した傾斜センサは液面変化を利用したものであったため、パイプの角度変化が大きい場所では、座面を水平に保つことが難しかった。また文献 [2] では、パイプ角度をあらかじめ実測し、その情報を用いてフィードフォワード制御を行うことで制御性能の改善を試みた。PID 制御による 2 自由度制御系を構成することで、外乱抑圧特性や目標値追従特性の向上を確認することができた。しかし、座面の傾きを ± 0.5 deg 以内に抑えるという目標を達成することはできなかった。これは、定常状態のときや目標値が一定のときにモータの不感帯によって座面角の微調整ができないためによるものだった。

そこで本報告では、非線形特性を持つモータを含めたいす式階段昇降機に対して非線形制御手法の一つである 2 自由度スライディングモード制御手法を適用することで、座面の傾斜角の変動を抑えることを試みる。そして、実験によりその有効性を検証する。

2 いす式階段昇降機のモデリング

2.1 いす式階段昇降機の構成

Fig.2 に示すように、一本レール型いす式階段昇降機は、階段に設置される一本のレールとそのレールを移動する昇降機から構成されている。昇降機は台車駆動部と座面駆動部に分かれており、台車駆動部はレール

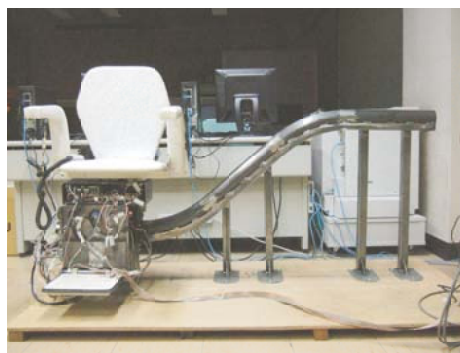


Fig. 1: Seated stairlift on the single rail

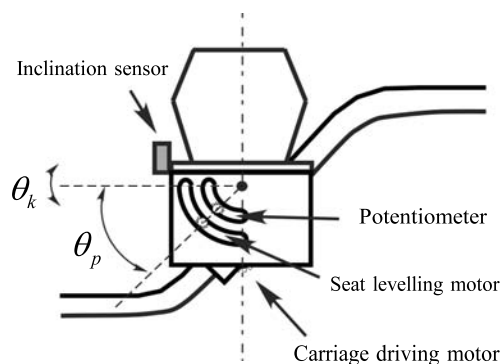


Fig. 2: Schematic diagram of the plant

に対して常に平行になるように移動する。一方、座面駆動部は、床と平行、つまり水平になるよう、モータにより姿勢が制御できるようになっている。ここで用いるモータは、バッテリー駆動が可能で安価な速度制御型のブラシレスモータであり、電圧で与える速度指令値が制御入力となる。Fig.3 に示すモータドライバからモータまでの静特性より、約 ± 0.58 V 以下では動作しないことがわかる。このモータはもともと一定速駆動用に作られており、低速度域の性能を考慮した設計になっていないためである。一方、観測出力は台車駆動

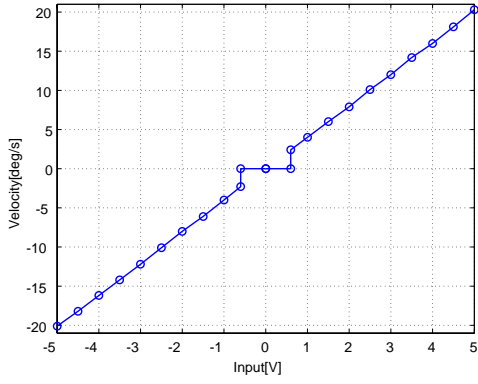


Fig. 3: Static nonlinearity of motor driver

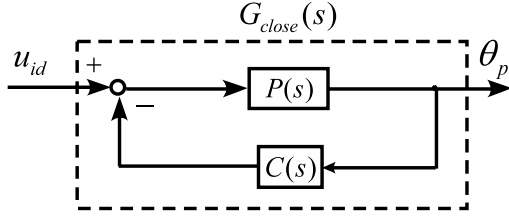


Fig. 4: Closed-loop system for system identification

部に取り付けられたポテンショメータによる台車と座面の相対角 θ_p である．また，座面駆動部に取り付けられた傾斜センサにより，座面の水平からの傾斜角 θ_k が測定できる．さらに，レールの端で昇降機が停止するようリミットスイッチを設けている．今回，下側のリミットスイッチが ON になる位置を昇降機の初期位置とする．また，初期位置からの台車の相対位置は，台車駆動用モータに取り付けたロータリーエンコーダで検出できるようにした．

2.2 システム同定法によるモデリング

制御対象に関する物理的な情報や事前情報がなくても，制御対象の入出力データのみからその伝達関数を同定できるシステム同定法を用いてモデリングを行う．同定対象は原点極を持つ不安定なシステムなので，Fig.4 に示す閉ループ系を構成し，閉ループシステム同定の間接法 [3, 4] を適用した．今回は $C(s) = 1$ による簡単な比例制御により閉ループ系を安定化できたので，この制御器を用いて安定化を行い，同定入力として u_{id} に M 系列信号を加え，そのときの座面と台車の相対角 θ_p を計測した．そして，最小 2 乗法により 2 次の ARMAX モデル $G_{close}(s)$ を同定し，制御対象の伝達関数 $P(s)$ を $P = G_{close}/(1 - G_{close}C)$ から求めた．ここで，制御対象は原点極を持つ不安定なシステムなので，得られたモデルの極の中で原点に最も近い極を積分器に置き換えた．最終的に得られた制御対象の伝達関数 $P(s)$ を以下に示す．

$$P(s) = \frac{0.1641(s + 12.12)}{s(s + 4.18)} \quad (1)$$

2.3 目標軌道の計測

本制御系では，フィードフォワード制御を行うために，台車位置に対するパイプの傾き角 θ_r の情報が必要となる．そこで，座面と台車の相対角を 0 deg に保った状態で，昇降機をゆっくり動かし，その時の台車位置

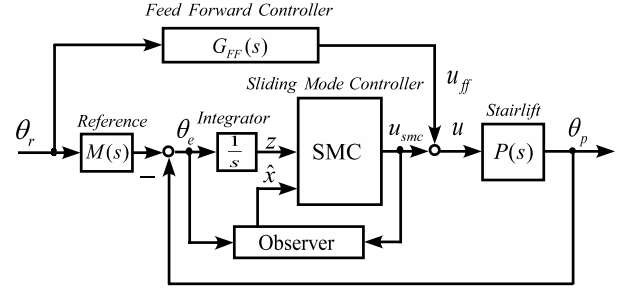


Fig. 5: Two-degrees-of-freedom control system

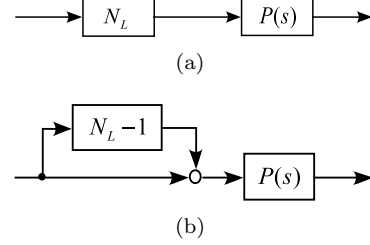


Fig. 6: Input nonlinearity N_L and its equivalent disturbance

と傾斜センサの出力の関係を実測した．さらに，得られたデータを平均化処理し，台車位置とパイプの傾斜角の関係を表すテーブルを作成した．

3 制御系設計

3.1 モデルマッチング 2 自由度制御系

本稿では，Fig.5 に示すモデルマッチング 2 自由度制御系を構成し，座面と台車の相対角 θ_p をあらかじめ実測したパイプ角 θ_r に追従させるように制御を行う．もし， $\theta_r = \theta_p$ が成り立てば，座面は水平となる．Fig.5 において，SMC はフィードバック制御器であるスライディングモード制御器， G_{FF} はフィードフォワード制御器であり， M は規範モデルである．2 自由度制御系では， $G_{FF} = M/P$ と選ぶと， θ_r から θ_p までの伝達関数が M となるので，目標値応答特性は M で決められる． M は G_{FF} が安定プロパーとなる伝達関数の中で，できるだけ高い周波数帯域まで $|M(j\omega)| \approx 1$ となるように選ぶ．一方，スライディングモード制御器 SMC は，制御対象 P の変動や外乱により $\theta_r \neq \theta_p$ となったときに働くので，外乱抑圧特性とロバスト安定性を高めた設計を行う．スライディングモード制御では制御対象の状態が必要になるので，同次元オブザーバによって状態を推定した．規範モデル M を

$$M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

で与えた．ここで，パラメータ ω, ζ が設計パラメータになる．

3.2 スライディングモード制御器

3.2.1 マッチング条件

モデリングの際は，制御対象を線形モデルと仮定したが，実際にはモータドライバが Fig.3 に示す非線形性を有している．この非線形特性は Fig.6(a) で示すように制御対象の入力端に存在する．このとき，Fig.6(a) の非線形特性は Fig.6(b) のように，制御対象の入力端に存在する等価外乱として考えることができるのでスラ

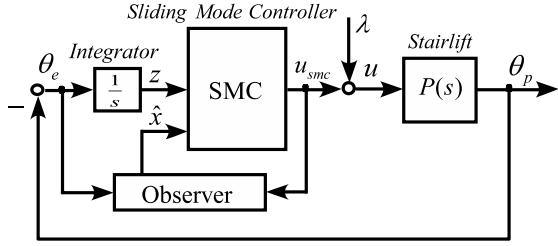


Fig. 7: SMC system with matching disturbance

スライディングモード制御のマッチング条件を満たす．よって，高いロバスト性が期待できる．

3.2.2 切換超平面の設計

2自由度制御系を構成しているため，スライディングモード制御器は制御対象に変動が生じたときのみ働く．したがって，Fig.7に示すように $\bar{\theta}_r = 0$ 及び $u_{ff} = 0$ としたシステムについて切換超平面を設計する．なお，図中の $\lambda(x, t)$ は入力端に存在する非線形特性に対応したマッチング外乱である．まず，(1)式の伝達関数モデルを可制御標準形に直し，積分器の状態を z として拡大系を構成する．ただし， $y = \theta_p$ ， $x = [z, x_1, x_2]^T = [x_{eq}^T, x_2]^T$ とする．

$$z = -\int_0^t y dt$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -c_1 & -c_2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \{u_{smc} + \lambda\}$$

$$= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \mathbf{0} & a_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} \{u_{smc} + \lambda\} \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & -c_1 & -c_2 \end{bmatrix} x$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 & c_2 \end{bmatrix} x \quad (4)$$

そして，切換関数を次式で定義する．

$$\sigma = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} S_1 & s_3 \end{bmatrix} x \quad (5)$$

すると，スライディングモードが生じているとき，マッチング外乱は切換入力で打ち消されるため，等価制御系は次式となる．

$$\dot{x}_{eq}(t) = (A_{11} - s_3^{-1}A_{12}S_1)x_{eq}(t)$$

$$= \tilde{A}x_{eq}(t) \quad (6)$$

上式より， \tilde{A} 行列の特性方程式の根が安定になるように設計パラメータ s_1, s_2, s_3 を決定すれば，この誤差システムは原点に収束する．

3.2.3 制御入力の設計

本稿では，制御方法として最終スライディングモード制御法を用いる．よってスライディングモード制御入力 u_{smc} は，線形制御入力を u_l ，非線形制御入力を u_{nl} とすると，

$$u_{smc} = u_l + u_{nl} \quad (7)$$

となる．ここで，線形制御入力 u_l は(3)，(5)式で導出される等価制御入力であり，次式で示される．

$$u_l = -(SB)^{-1}SAx \quad (8)$$

Table 1: Design parameters

Eigenvalues of \tilde{A}	$[-9, -10]$
Hyper plane S	$[-4.4, 11.6, 1.00]$
Gain K	2.0
Observer poles	$[-20, -25]$
Reference model	$\zeta = 0.66, \omega_n = 10$
Input limitation	$\pm 5V$

ただし， A, B, S は次式で定義する．

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \mathbf{0} & a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} S_1 & s_2 \end{bmatrix}$$

一方，非線形制御入力は

$$u_{nl} = -K(SB)^{-1} \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (9)$$

とした．ここで， K は切換ゲインである．

次に，リアプノフ関数によって制御入力の設計パラメータである K を決定する．リアプノフ関数を

$$V = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (10)$$

とすると，システムが安定となるための条件は

$$\dot{V} = -K \frac{\sigma^2}{\|\sigma\|} + SB\lambda\sigma < 0 \quad (11)$$

となる．ここで， $\lambda\sigma \leq |\lambda|\|\sigma\|$ より，(11)式が成立するための十分条件として

$$K > SB|\lambda| \quad (12)$$

が得られる．さらに，等価外乱 $\lambda(x, t)$ に上限値 ρ が存在するとして $|\lambda| \leq \rho$ を満たす定数 ρ を導入すると，次式を満たすような K を決定すればよいことがわかる．

$$K > SB\rho \quad (13)$$

なお，実機実験を行う際は，チャタリング防止のため平滑関数を導入した．

4 実機実験

4.1 各種設計パラメータの決定

各種設計パラメータをTable 1に示す．オブザーバの極は，スライディングモード制御器が正しく動作するための重要な設計パラメータの一つである．そこで，制御対象の出力と推定出力値を比較しながら，設計仕様である座面の傾斜角が $\pm 0.5 \text{ deg}$ を達成できるように，少なくとも推定誤差は $\pm 0.5 \text{ deg}$ より小さくなるように決定した．規範モデルの設計パラメータ ω, ζ は，急な振動が生じない滑らかな応答となるように決定した．(6)式の \tilde{A} の極は，スライディングモードが生じているときの動特性を決定するものであり，切換関数 $\sigma(t)$ が0に拘束されたときのスライディングモード制御器の線形制御入力と非線形制御入力を見比べながら決定した．指針として，平滑関数を導入する前の理想的な条件下で，状態が超平面に拘束され，線形制御入

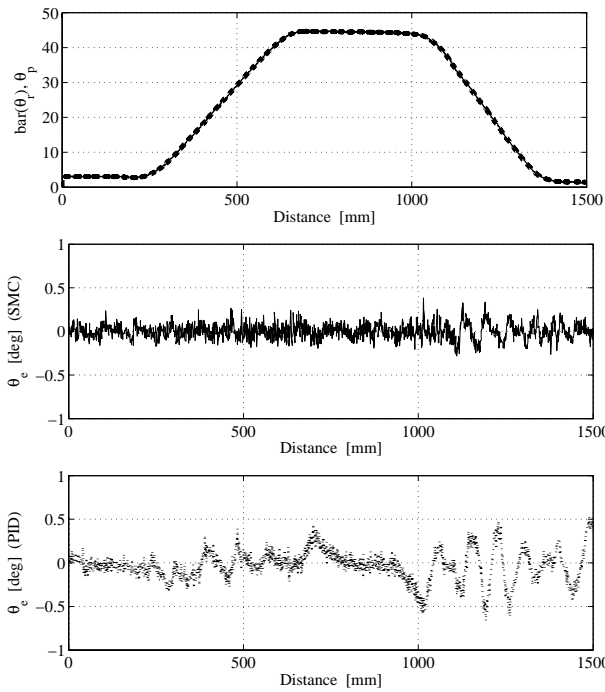


Fig. 8: Experimental results (solid line: sliding mode control, dotted line: PID control, dashed line: reference)

力が振動的になっていないかどうかを見ながら決定した。切換ゲイン K は、(13) 式を満たすように決定することが前提であるが、大きくしすぎるとチャタリングを発生させてしまう恐れがある。しかし、小さくしてしまうと昇降機に乗る人の個体差や体重移動などの摂動に対してロバスト性が失われる。よって、本稿では乗る人の体重が 60 kg 程度するとき、体重移動に対して制御系がロバストになるように決定した。

4.2 実験結果

前述した SMC, オブザーバ, 規範モデルをサンプリング周期 10 ms で離散化して実装した。そして、制御性能について検証を行った。座面部に 60 kg 程度の人間を乗せて昇降機を移動させたときの θ_p の応答を Fig.8 の上段に、規範モデル M の出力 $\bar{\theta}_r$ と座面と台車の相対角 θ_p との偏差 $\theta_e = \bar{\theta}_r - \theta_p$ を中段にそれぞれ実線で示す。また、比較のために PID 制御による 2 自由度制御の結果を点線で下段に示した。ここで、PID 制御の設計パラメータは試行錯誤によって比例ゲインを 1.2, 積分ゲインを 1.4, 微分ゲインを 0.2 とした。Fig.8 よりスライディングモード制御手法では、偏差 θ_e を全体的に約 ± 0.4 deg 以内に抑えることができている。なお、Fig.9 に示す切換関数の応答より、パイプ角度が変化する部分に当たる 250~700 mm と 1100~1500 mm とでは拘束の様子に違いが見られる。これは、後半の方が昇降機の構造上、重力によって生じる外乱の影響を受けやすいためだと考えられる。

Fig.10 に制御対象に印加される制御入力を示す。上段がフィードフォワード制御入力、下段がフィードバック制御入力である。2 自由度制御系を用いているので、主な制御入力はフィードフォワード制御入力であるが、制御対象の変動が大きく生じるパイプ角度が変

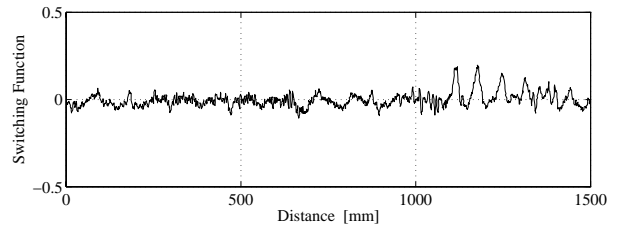


Fig. 9: Switching function

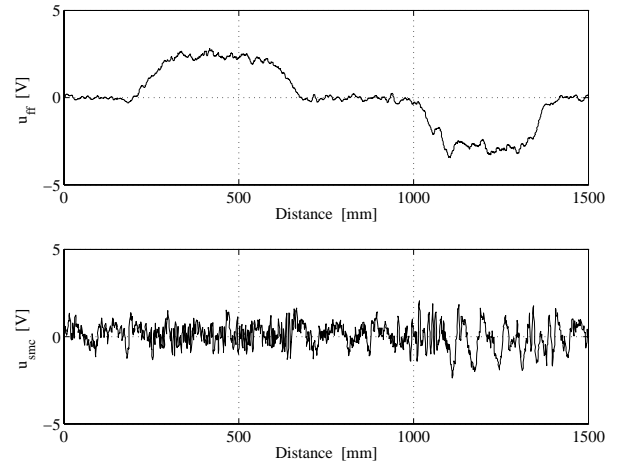


Fig. 10: Control input (Upper: feedforward control, Lower: feedback control)

化する部分は、偏差を小さくするようにフィードバック制御入力が大きくなっている様子が見られる。

最終的に、安心して乗ることができ、乗り心地が良くなくてはならない。スライディングモード制御による結果は PID 制御よりも偏差が抑えられているため、座面が傾くことによる不安感はない。また、チャタリングによる持続的な振動も感じられなかった。しかし、瞬間的に小さな振動が起こることがあった。

5 おわりに

本報告では、1 本レール型いす式階段昇降機に対してシステム同定法により制御対象のモデルを求め、スライディングモード制御によるモデルマッチング 2 自由度制御系を構築した。そして、実験によりその有効性を確認した。今後は、チャタリング防止のための平滑関数の再検討や昇降機のメカニズムの改良を通してより高い安心感が得られるよう改善して行きたい。

参考文献

- [1] 芦川, 平田, 足立, 坂庭: ロバスト制御理論による一本レール型いす式階段昇降機の姿勢制御, 日本機械学会 関東支部 第 12 期総会講演会, pp.305-306 (2006)
- [2] 瀬戸山, 平田, 足立, 坂庭: 2 自由度制御によるいす式階段昇降機の姿勢制御系設計, 日本機械学会 関東支部 第 13 期総会講演会, pp.19-20 (2007)
- [3] 足立: MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 (1996)
- [4] 足立: MATLAB による制御のための上級システム同定, 東京電機大学出版局 (2004)