

二輪駆動型車椅子における姿勢安定化制御 Stabilization Control of Two Wheels Driven Wheelchair

80717092 中村彰洋 (Akihiro Nakamura) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

車椅子は現在最も普及している福祉器具の1つであり、多くの多機能化に関する研究がなされている。しかしながら車椅子は、キャストを有するため旋回性が低い、段差乗り越えがしにくいなどの欠点がある。

そこで、本研究では新たに二輪駆動型車椅子を提案する。この車椅子は、キャストを有しないため旋回や段差乗り越えが容易になる。しかし、静的な姿勢が不安定であるという問題を有する。そこで本研究では、姿勢安定化をよりロバストに実現する制御系を提案する。

提案手法の特徴は、安定性をリアプノフの安定定理で保証していること、ゲイン決定をしやすく運動方程式を利用して加速度参照値を決めていること、ピッチ角の外乱をピッチ角外乱オブザーバによって推定しているという3点にある。

2 モデリング

本研究では、左右独立で駆動する二輪駆動型車椅子を使用する。ピッチ角及び角速度はジャイロセンサで測定する。左右輪はインホイールモータを用いており、エンコーダで車輪の回転角を測定する。二輪駆動型車椅子は、図1に示すようにモデル化する。

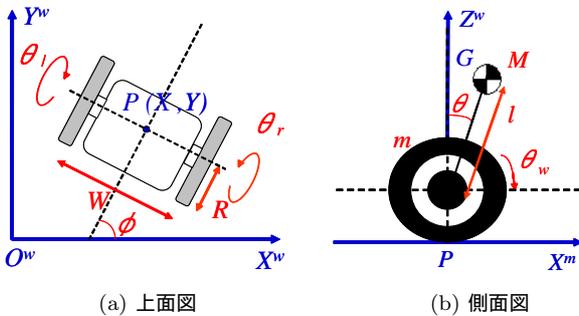


図1: 移動ロボットのモデル図

運動学は、横方向には移動しない・タイヤは滑らないという2つの仮定より(1)式のように求まる。

$$\begin{bmatrix} v \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} & 0 \\ \frac{R}{W} & -\frac{R}{W} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = J_{aco2} \dot{\theta} \quad (1)$$

動力学は、ラグランジュの方程式より(2)式のように求まる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (2)$$

ただし、 τ は左右輪の入力トルクとピッチ角の入力トルクを表している。ピッチ角は受動関節であるため、ピッチ角の入力トルク T_3^m は0となる。(2)式中の M は慣性行列、 H は遠心力・コリオリ力、 G は重力項を表す。

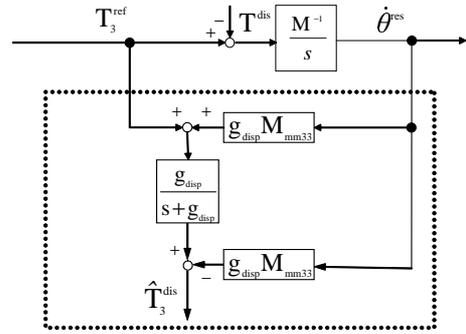


図2: ピッチ角外乱オブザーバ (PADO)

3 制御系の設計

3.1 ピッチ角の運動方程式

ピッチ角方向の運動方程式は、(3)式で与えられる。

$$M_w(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_l) + M_{33}\ddot{\theta} + G_3 + H_3 = T_3^m - T_3^{dis} \quad (3)$$

ラグランジュ方程式から求めた慣性行列を M_{mm} と定義し、 $M_{mmw}(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_l)$ を入力、 $M_{mm33}\ddot{\theta}$ を出力とみなして(3)式を変形すると、(4)式が導かれる。

$$\begin{aligned} M_{mm33}\ddot{\theta} &= -M_{mmw}(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_l) - \tilde{T}_3^{dis} \\ &= T_3^{ref} - \tilde{T}_3^{dis} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 T_3^{ref} は、左右輪から生成される仮想的なピッチ角トルク参照値を表している。 \tilde{T}_3^{dis} はモデル化誤差や重力などピッチ角方向の外乱全てを含む。ピッチ角に関して加速度制御系を構成するためには、 \tilde{T}_3^{dis} を推定する必要がある。

3.2 ピッチ角外乱オブザーバ (PADO)

提案するピッチ角外乱オブザーバ (PADO) について説明をする。ピッチ角方向の外乱及びモデル化誤差を表す \tilde{T}_3^{dis} は、PADO を用いて(5)式のように推定することが可能である。

$$\begin{aligned} \hat{T}_3^{dis} &= \frac{g_{disp}}{s + g_{disp}} (T_3^{ref} + g_{disp} M_{mm33} \dot{\theta}) - g_{disp} M_{mm33} \dot{\theta} \\ &= \frac{g_{disp}}{s + g_{disp}} \tilde{T}_3^{dis} \end{aligned} \quad (5)$$

PADO のブロック線図を図5に示す。

PADO の特徴は、ピッチ角の外乱を仮想的なピッチ角のトルク参照値とピッチ角速度応答から推定できる点にある。また、擬似微分の使う回数を1度減らすことができるので、ノイズの影響を軽減できる。

3.3 姿勢安定化制御

ピッチ角速度を安定に保つための制御系を提案する。リアプノフ関数の候補として V を(6)式のように定義する。

$$V = \frac{1}{2} K_{\theta 1} (\theta - \theta^{cmd})^2 + \frac{1}{2} K_{\dot{\theta} 2} (\dot{\theta} - \dot{\theta}^{cmd})^2 \quad (6)$$

\dot{V} は, (4) 式を利用すると次式のように計算される.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (\dot{\theta} - \dot{\theta}^{cmd})[K_{\theta 1}(\theta - \theta^{cmd}) - K_{\theta 2}\ddot{\theta}^{cmd} \\ & + K_{\theta 2} \frac{\{-M_{mmw}(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_l) - \tilde{T}_3^{dis}\}}{M_{mm33}}] \end{aligned} \quad (7)$$

ただし, \tilde{T}_3^{dis} は PADO を用いて推定することができる. (7) 式が準不定になるように, 制御入力 ($\ddot{\theta}_r^{ref} + \ddot{\theta}_l^{ref}$) を以下のように設定する.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_r^{ref} + \ddot{\theta}_l^{ref} = & -\frac{1}{M_{mmw}}[\hat{T}_3^{dis} - M_{mm33}\{-\ddot{\theta}^{cmd} \\ & + \frac{K_{\theta 1}}{K_{\theta 2}}(\theta - \theta^{cmd}) + K_{\theta 3}(\dot{\theta} - \dot{\theta}^{cmd})\}] \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式の左右輪への分配比を変えることで様々な軌道を描くことが可能となる. 今回は直線軌道を考えているため, 分配比は 1:1 に設定して実験を行っている. (8) 式の加速度参照値から仮想的なピッチ角トルク参照値 T_3^{ref} は生成される. (7) 式を用いて (9) 式に変換される.

$$\dot{V} = -K_{\theta 3}(\dot{\theta} - \dot{\theta}^{cmd})^2 \leq 0 \quad (9)$$

(9) 式より, $\dot{\theta} \rightarrow \dot{\theta}^{cmd}$, $\theta \rightarrow \text{constant}$ が保証される. 外乱項を無視してピッチ角の入力と応答に関して伝達関数を求めると, (10) 式のように求まる.

$$\frac{\theta^{res}}{\theta^{cmd}} = \frac{s^2 + K_{\theta 3}s + \frac{K_{\theta 2}}{K_{\theta 1}}}{s^2 + K_{\theta 3}s + \frac{K_{\theta 2}}{K_{\theta 1}}} \quad (10)$$

伝達関数を見ると, 単純な 2 次系の連続軌道追従制御の形になっているため, 制御入力 (8) 式には容易にゲインを決定できるというメリットもある.

3.4 全体の制御系

全体の制御系を図 3 に示す.

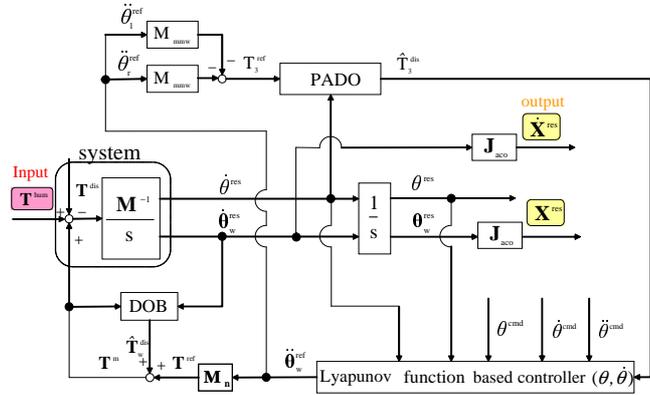


図 3: 全体の制御系

4 実験結果

提案手法の有効性を確認するため, 搭乗者が二輪駆動型車椅子に乗り降りする実験を行った. 本実験では, 姿勢安定化の可否, 及び PADO の有効性を確認する.

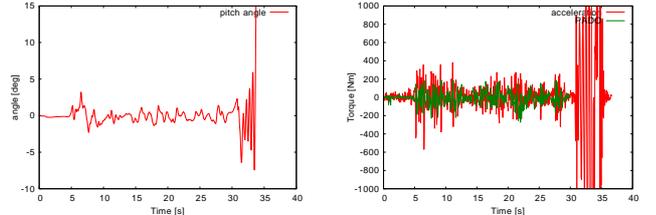
制御パラメータを表 1 に示す.

(8) 式中の PADO の推定値を零とした加速度参照値を用いた時の実験結果を図 4 に示す. また, (8) 式を加速度参照値として用いた時の実験結果を図 5 に示す. 各々 (a) にはピッチ角応答を, (b) にはトルク推定値を示す. (a) 中の青く囲まれた部分は, 搭乗者が二輪駆動型車椅子に乗り降りした時を表している. (b) の赤線は, ピッチ角加速度応答にモデリングで求めた慣性をかけてトルク次元に変換した値を表している. 緑線は, PADO の推定値を表している.

図 4(a), 図 5(a) から, 搭乗者が二輪駆動型車椅子に乗った

表 1: 制御パラメータ

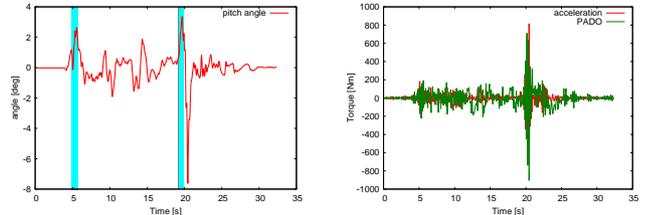
変数	値	説明
$K_{\theta 1}$	1.0	ピッチ角ゲイン 1
$K_{\theta 2}$	49.0	ピッチ角ゲイン 2
$K_{\theta 3}$	14.0	ピッチ角速度ゲイン
g_{disw}	14.0	外乱オブザーバのカットオフ周波数
g_{disp}	50.0	PADO のカットオフ周波数
M	78.0	二輪駆動型車椅子の座席部分と搭乗者の合計質量
l	1.0	制御参照点 P と重心 G の距離



(a) ピッチ角応答

(b) トルク推定値

図 4: PADO を用いなかった場合の実験結果



(a) ピッチ角応答

(b) トルク推定値

図 5: PADO を用いた場合の実験結果

状態での姿勢安定化はどちらの実験でも実現できていることが分かる. しかし PADO を用いなかった時は, 降車時に二輪駆動型車椅子のピッチ角が発散してしまった. 一方 PADO を用いた時は, 最後まで姿勢安定化を実現できている. 図 4(b), 図 5(b) を見れば分かるように, 降車時には, ピッチ角方向に非常に大きなトルクが発生している. これは, 搭乗者は降車時に二輪駆動型車椅子を少し傾けて下に押しつけるため, 降りた瞬間に大きな加速度参照値が生成されてしまうのが原因と考えられる. PADO は, ピッチ角方向に加わったトルクを補償することができるため, 降車時にも二輪駆動型車椅子を安定した姿勢に保たせることができる.

以上より, PADO を用いることでよりロバストな姿勢安定化を実現できていることが確認できた.

5 結論

本研究では, 新たに二輪駆動型車椅子を提案した. 提案する車椅子はキャストを有しないため, 旋回や段差乗り越えが容易になる. 本論文では, 提案する二輪駆動型車椅子の姿勢安定化をよりロバストに実現する制御系の提案をし, 実験により有効性を確認した.

参考文献

- [1] A. Chihan and T. Murakami: "A Robust Control of Two-Wheeled Mobile Manipulator with Underactuated Joint by Nonlinear Backstepping Method" *Keio University Master Thesis 2008*
- [2] M. Sasaki, N. Yamamoto, O. Matsumoto, K. Komoriya: "Steering Control of the Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform (PMP)" *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1697 - 1702 (2005)