自己復元機構を有する 倒立振り子型移動ロボットの傾斜角と外力の同時推定

Estimation of Tilt Angle and External Force of Inverted Pendulum Type Mobile Robot with Self-Righting Mechanism

正 小林 義光 (岐阜高専) ○学 小島 昇 (岐阜高専)
正 奥川 雅之 (愛知工業大学)

Yoshimitsu KOBAYASHI, Gifu National College of Technology, kobayashi@gifu-nct.ac.jp
Noboru KOJIMA, Gifu National College of Technology
Masayuki OKUGAWA, Aichi Institute of Technology

In the present study, the development of the tour guide robot that explains the exhibit such as the science pavilions to children is advanced, and the inverted type mobile robot that has the self-righting mechanism as a migratory mechanism is adopted. Disturbance observer which distinguished specific external force added by an inclination and external force which loaded on the circumference of a wheel axis was designed. In this paper, it is verified by simulation and experiment whether the disturbance observer is effective in the estimation of an angle of inclination and external force.

Key words: Self-Righting Mechanism, Inverted Pendulum, Mobile Robot, Disturbance Observer.

1 はじめに

ロボットを家庭や公共施設に導入する際、様々な問題点が考えられ、特に、電源・制御システムの故障及び異常による暴走や転倒など、利用者に対してロボットが危険な存在となる可能性がある。サービスロボットの多くは、人との共生空間内で活動するため、利用者に対して精神的・空間的な安全性を確保することは、サービスロボットの重要な条件である [1]。本研究では、移動機構をコンパクトに設計でき、高い機動力を有する倒立振り子型二輪移動機構に注目する。しかし、多くの倒立振り子型移動ロボットは、本体重心が上方に位置しているため本質的に不安定なシステムであることから、能動的な制御が必要であり、過負荷による転倒、電源及び制御システムの異常に対する安全性が懸念されている。

本研究では、科学館等で展示物を説明しながら誘導するツアーガイドロボットの開発を進めており、移動機構として自己復元機構を有する倒立振り子型移動ロボットを採用している [2]。これは重心を車軸より下方に配置することにより復元力によって直立を維持することができ、科学館等で安心して利用できることが期待される。

一方で、傾斜路においては復元力によって姿勢が傾く。よって、ロボットに搭載したカメラが上方を向くため、カメラ映像による遠隔操作に不都合が生じることが考えられる。また、本研究では振動抑制のために、ロボット本体の姿勢角、姿勢角速度および車輪回転速度の状態フィードバック制御 (LQR 制御) を実現したが、姿勢を直立に維持するように制御が機能するため、傾斜路では下降して静止できないことが課題として挙げられた [3]。その解決策として、本研究では、車輪速度の積分補償を加えた最適サーボ制御 (LQI 制御) により傾斜路での停止と、外乱推定オブザーバによる傾斜角の推定を提案した [4]。本手法は、ロボットの傾斜路に対する影響が、常に一定外力が作用することと等しいと考え、その外力に釣り合うトルクを発生することで、傾斜路での停止を実現し、また一定外力を推定することで、傾斜角を算

出するものである。一方で、走行中に人や障害物に接触した場合には、接触に伴う外乱に対してロボットは走行を停止又は後退するように安全性を確保することが望ましいと考えられる [5]。しかし、接触に伴う外力を傾斜路の影響と誤認識すると、その安全性は確保することは難しい。そこで、本研究では、傾斜路での停止・直立および接触に伴う安全性を同時に確保するためには、外力が傾斜路の影響か、または接触に伴うものであるかを区別することが非常に重要であると考え [6]。そこで、本論文では文献 [4] で提案した外乱推定オブザーバが傾斜角と外力の同時推定に有効であるかを数値計算と実験によって検証する。

2 自己復元機構を有する倒立振り子型移動ロボット

2.1 数式モデルの導出 [4]

Fig. 1 Modeling of the inverted pendulum type mobile robot with self-righting mechanism on inclination road.

Fig. 1 に傾斜路上での自己復元機構を有する倒立振り子型移動ロボットの車輪軸周りにモーメント負荷がかかった場合の簡易図を示す。ロボット本体の運動方程式は式 (1) および (2) としてラグランジュ法により導出される。

$$\alpha_{11}\ddot{\theta}(t) + \alpha_{12}\ddot{\phi}(t) + c_f\dot{\phi} + w = \kappa u(t) \quad (1)$$

$$\alpha_{21}\ddot{\theta}(t) + c_s\dot{\theta}(t) + M_p l g \theta(t) + \alpha_{22}\ddot{\phi}(t) + w = M_d(t) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= (M_p + M_t)r^2 - M_p l r + J_t \\ \alpha_{12} &= (M_p + M_t)r^2 + J_t \\ \alpha_{21} &= (M_p + M_t)r^2 - 2M_p l r + M_p l^2 + J_p + J_t \\ \alpha_{22} &= (M_p + M_t)r^2 - M_p l r + J_t \\ w &= (M_p + M_t)g r \sin \psi\end{aligned}$$

これらの運動方程式に対して状態変数を,

$$x(t) = [\theta(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \phi(t)]^T \quad (3)$$

とおくと, 次の状態方程式が得られる.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew + HM_d(t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0 & [1 \ 0] \\ -\alpha^{-1}\gamma & -\alpha^{-1}\beta \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^{-1}\delta \end{bmatrix}, \\ E &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\alpha^{-1}\epsilon \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ -\alpha^{-1}\zeta \end{bmatrix}, \\ \alpha &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} 0 & c_s \\ c_f & 0 \end{bmatrix}, \\ \gamma &= \begin{bmatrix} 0 \\ M_p g l \end{bmatrix}, \delta = \begin{bmatrix} \kappa \\ 0 \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \zeta = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Table 1 System parameters.

Parameter	Value	Unit
r	1.50×10^{-1}	[m]
l	4.0×10^{-2}	[m]
κ	38.0	[N]
g	9.81	[m/s ²]
M_p	16.4	[kg]
J_p	2.8×10^{-1}	[kg·m ²]
c_f	3.0×10^{-1}	[kg·m ² /s]
M_t	3.00	[kg]
J_t	7.0×10^{-2}	[kg·m ²]
c_s	5.80	[kg·m ² /s]

2.2 LQI 制御 [4]

姿勢角 $\theta(t)$ は加速度センサ (AS-3ACC: 浅草ギ研社製), 角速度 $\dot{\theta}(t)$ はジャイロセンサ (SK-GYRO: 共立電子産業社製), 駆動輪の回転速度 $\dot{\phi}(t)$ はエンコーダにより計測するため, 車輪速度の積分補償を含めた状態方程式の拡大系について次式の全状態フィードバック制御則を考える.

$$u(t) = -F_1 x(t) - F_2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

2.3 外乱推定オブザーバ [4]

式 (4) を用いて, 傾斜路において未知の傾斜角 ψ と車輪軸周りのモーメント M_d を推定するための外乱推定オブザーバを構成する. 外乱推定オブザーバは次式で与えられる.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_e(t) &= (A_e - K_e C_e) \hat{x}_e(t) + B_e u(t) \\ &\quad + K_e y'(t)\end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{x}_e = [\hat{\theta}(t) \quad \hat{\dot{\theta}}(t) \quad \hat{\phi}(t) \quad \hat{w} \quad \hat{M}_d]^T$$

Fig. 2 LQI system with disturbance observer.

3 実験 (モーメント負荷)

実験のシステム構成を Fig. 2 を示す. LQI 制御系により傾斜路での姿勢制御を実現し, LQI 制御系の入出力情報を用いて外乱推定オブザーバにより傾斜角と外力を推定する. 制御系はサンプリング周期 20[msec] で実装し, 加速度センサによる姿勢角 $\theta(t)$ とジャイロセンサによる姿勢角速度 $\dot{\theta}(t)$ の計測値は 10[Hz] のローパスフィルタによりノイズ処理をして利用する. 文献 [4] のモーメント負荷の実験では, 傾斜路において正しく推定が出来ていない. その理由は, ロボットの車輪軸周りにモーメント M_d を正しく負荷できなかったことが原因であると考えた. 車輪軸を回す力 F と M_d には $M_d = FR$ という関係があり, そこで Fig. 3 に示す方法で実験を行った.

Fig. 3 Experiment on inclination road.

4 実験結果 (モーメント負荷)

Fig. 4 に平地で静止した状態から約 2[sec] 後にモーメント $M_d = 1.37[\text{Nm}]$ を負荷させた場合の実験結果を示す. また Fig. 5 に傾斜角 5[deg] の傾斜路で静止した状態から約 2[sec] 後にモーメント $M_d = 0.88[\text{Nm}]$ を負荷させた場合の実験結果を示す. Fig. 4, Fig. 5 より, 傾斜角の推定値もモーメントの推定値も実際の値に収束することが確認できる. これらの結果から, 文献 [4] により提案されている外乱推定オブザーバが傾斜角とモーメントの推定に有効であるということが確認できる.

5 車軸を押す力が推定におよぼす影響

平坦路においても傾斜路においてもロボットの車輪軸を押すような力が推定にどのように影響するのかを検証する. Fig. 3 において, ロボットの車輪軸を押すような力 F_d を含めた運動方程式

Fig. 4 Experimental results on flat road with considering the moment load.

は以下のように表せられる.

$$\alpha_{11}\ddot{\theta}(t) + \alpha_{12}\ddot{\phi}(t) + c_f\dot{\phi} + w = \kappa u(t) + F_d r \quad (7)$$

$$\alpha_{21}\ddot{\theta}(t) + c_s\dot{\theta}(t) + M_p l g \theta(t) + \alpha_{22}\ddot{\phi}(t) + w = M_d(t) \quad (8)$$

いま, 車輪軸を押す力が働いた際の定常状態について考える. 傾斜路で $M_d = 0$, 静止 ($\theta = \text{const}$, $\dot{\theta} = \ddot{\theta} = \dot{\phi} = \ddot{\phi} = 0$) とすると, 車輪の回転角の釣り合いに関する式は,

$$w = \kappa u(t) + F_d r \quad (9)$$

となる. ここで, 車輪軸を押すような力と傾斜角により車輪が回されるような力の相似性を仮定し $w^* = w - F_d r$ を定義すると, 本体の姿勢の釣り合いに関する式は,

$$M_p l g \theta + w^* = 0 \quad (10)$$

となる. また, 平坦路ではタイヤの回転角の釣り合いに関する式は,

$$-F_d r = \kappa u(t) \quad (11)$$

となる. ここで, 本体の姿勢の釣り合いに関する式は w^* により誤認識された車輪軸周りのモーメント M_d^* が誤推定されると仮定すると,

$$M_p l g \theta + w^* = M_d^* \quad (12)$$

となる. これらの仮定の妥当性をシミュレーションによって確認した. Fig. 6 に平坦路で静止している状態に $-5[\text{N}]$ の力で車輪軸を押した結果を, Fig. 7 に傾斜路で $5[\text{N}]$ の力で車輪軸を押したシミュレーション結果を示す. Fig. 6, Fig. 7 より, 式 (9)~式 (12) が成り立つということが確認できる. 次に実際のロボットで実験

Fig. 5 Experimental results on slope with considering the moment load.

を行った. Fig. 8 に平坦路での実験結果, Fig. 9 に傾斜路での実験結果を示す. Fig. 8, Fig. 9 より収束の値が一致していることから, 式 (9)~式 (12) が実験的に正しいことが確認された. これらの結果より, 傾斜路においてロボットの車輪軸を押すような力が働いた際には, 傾斜角とモーメントの誤推定が起きることがいえる. しかし, Fig. 6 では θ がゼロに収束しているのに対し, Fig. 8 では異なっている. また Fig. 7 では θ が傾斜角 $5[\text{deg}]$ に対しての理論値 $22[\text{deg}]$ に収束しているが Fig. 9 では異なっている. ゆえに, 式 (7), (8) では, 車輪軸を押すような力がロボットに加わった際の姿勢角 θ の再現が出来ていないことがわかる.

6 おわりに

本論文では, 文献 [4] で提案した外乱推定オブザーバが傾斜角と外力の同時推定に有効であることを数値計算と実験により明らかにした. また, 自己復元機構の傾斜角の推定の際の車輪軸を押すような力に着目し, それが傾斜角とモーメントの推定にどのように影響するのかを検証し, 実験結果より自己復元機構において車輪軸を押すような力が傾斜角とモーメントの推定に影響を及ぼす際の関係性を数値計算と実験により明らかにした. 今後は車輪軸を押すような力と傾斜角による力の区別が必要だと考える.

参考文献

- [1] 杉本旭, "サービスロボットの安全と設計者責任", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 (2008), pp.337-338, 2008.
- [2] 奥川雅之, 高井優介, 椋木新, 小林義光, "自己復元機構を有する倒立振り子型移動ロボットの姿勢安定化制御", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 DVD(2009), No.2P1-F03, 2009.
- [3] 椋木新, 小林義光, 奥川雅之, 加藤雅大, "自己復元機構を有する倒

Fig. 6 Simulations on flat road.

Fig. 7 Simulations on inclination road.

Fig. 8 Experimental results on flat road.

Fig. 9 Experimental results on inclination road.

- 立振子型移動ロボットの走行制御”, 第 53 回自動制御連合講演会論文集 CD, pp.860-864, 2010.
- [4] 小島昇, 小林義光, 奥川雅之, 加藤雅大, ”自己復元機構を有する倒立振子型移動ロボットにおける傾斜角推定”, 第 54 回自動制御連合講演会論文集 CD, pp.754-759, 2011.
- [5] 細田裕司, 中村亮介, 柄川素, ”人間共生ロボットにおける倒立振子移動機構の走行制御方式”, 日本機械学会論文集 (C 編), 76 巻 770 号, 2010.

- [6] 竹園年延, 松本治, 小森谷清, ”搭乗型倒立振子の乗降時における路面傾斜と操作力の同時推定”, ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.362-367, 2009.