

拡張状態オブザーバを用いた車輪型倒立振り子ロボットのマニピュレータ動作時における外乱補償制御の検討

A study on disturbance compensation control of a wheeled inverted pendulum robot during arm manipulation using Extended State Observer

佐藤拓磨*, 永野健太*, Luis Canete**, 高橋隆行*

Takuma Sato, Kenta Nagano, Luis Canete, Takayuki Takahashi

*福島大学, **福島大学大学院

*Fukushima University, **Graduate School of Fukushima University

キーワード: 拡張状態オブザーバ (Extended State Observer), 外乱補償制御 (Disturbance Compensation Control), 車輪型倒立振り子ロボット (A Wheeled Inverted Pendulum Robot)

連絡先: 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学共生システム理工学類 高橋研究室
佐藤拓磨, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: takukma@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 人の生活環境でサービスを提供するロボットの開発が活発に行われている^{1, 2)}. 人の生活を支援するロボットに要求される性能として, 様々なタスクをこなす高作業性と, 人と生活環境に危害を加えないための高安全性がある. しかし, 相反するこれら 2 つの性能を同時に向上させることは困難である. 一方, 車輪型倒立振り子機構を持つロボットは非力なマニピュレータを用いることで安全性を保ちつつも, 自重を利用することで高作業性が実現可能である. その他にも簡易な移動機構であることから, 俊敏性に優れる, 軽量化が容易である, 4 輪駆動ロボットと比較して段差登坂能力が高いというメリットを持つ. 筆者らは, 倒立振り子機構の上記のメリットを積極的に利用することで, 対人サービスを効率よく提供することが可能な人間支援ロ

ボット「I-PENTAR (Inverted PENDulum Type Assistant Robot)」を提案している.

2. I-PENTAR の概要と研究目標

I-PENTAR の概観と, ハードウェアの仕様をそれぞれ Fig.1 と Table 1 に示す. 現在 I-PENTAR は, 7.5[kg] 程度の重量物持ち上げタスク³⁾ やスロープ上での台車の Pushing・Pulling タスク⁴⁾ を実現している.

今後は, I-PENTAR に搭載されたマニピュレータを用いて Fig.2 に示す軽量物体の拾得動作, 人との物体受け渡し動作, 道具を使用した様々な人支援タスクの実現を目標としている. そこで, 人の生活環境において人と同程度の精密さを要する作業を行うために, マニピュレータ動作時における本体の動きを抑制する必要がある.

Fig.2 に示すマニピュレータを用いたタスク

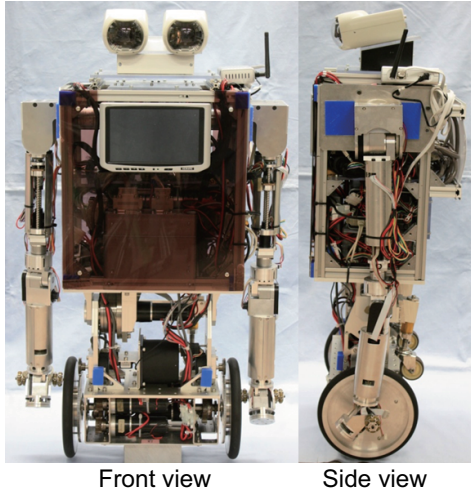


Fig. 1 Inverted Pendulum Type Assistant Robot(I-PENTAR)

Table 1 Hardware Specification of I-PENTAR

| | |
|-----------|--|
| Size | $0.9 \times 0.34[W] \times 0.3[D]$ [m] |
| Weight | 39.0 [kg] |
| D.O.F | Mobie(2), Arm(16), Waist(1) |
| Sensor | Gyro sensor(2), Encoder(19) |
| Actuator | DC motor(21) |
| OS | ARTLinux(Sampling time:1[ms]) |
| Interface | FPGA(PC104) |

では荷物，道具，環境などから I-PENTAR へ未知の外乱が与えられることが予想される．これらの外乱と比較して I-PENTAR のマニピュレータは細く軽量であるため，マニピュレータを搭載した I-PENTAR を正確にモデリングし，制御を行うことは得策ではない．これらを踏まえ，筆者らはマニピュレータの制御系と倒立振り子ロボット本体の制御系を分離し，これら 2 つの制御系間の情報のやりとりを最小限とする制御系を提案する．すなわち，マニピュレータの制御系から見ると本体の倒立振り子の安定化制御のための動きは外乱として扱い，本体の制御系から見るとマニピュレータの動きは外乱として扱う．従って，本論文ではマニピュレータの動きを未知の外乱として捉え，倒立振り子機構を持つロボット本体側の外乱補償制御について検討を行う．

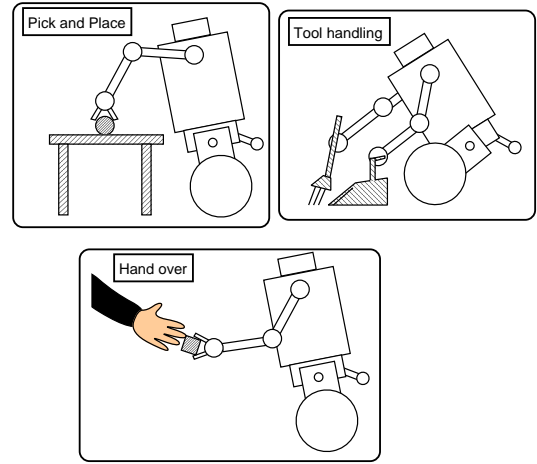


Fig. 2 Target tasks of I-PENTAR using its robot arm.

3. 拡張状態オブザーバ

未知の外乱，誤差を含むシステムに対する制御手法として，拡張状態オブザーバ (以下 ESO:Extended State Observer)^{5, 6)} を用いた外乱補償制御がある．入力 $u \in \mathbb{R}$ ，出力 $y \in \mathbb{R}$ の SISO(Single-Input Single-Output) 系として式 (1) で表される非線形時変動的システムを考える．

$$y^{(n)}(t) = f(y^{(n-1)}(t), \dots, y(t), w(t)) + bu(t) \quad (1)$$

ここで， w は外乱，ノイズなどであり， b は入力に対する係数である．このとき， $h \equiv \dot{f}$ を定義すると式 (1) は状態空間モデルとして以下のように表現できる．

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= x_{n+1} + bu \\ \dot{x}_{n+1} &= h(x, u, w, \dot{w}) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで， $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{n+1}]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ は拡張状態 $x_{n+1} = f$ を含む状態変数ベクトルである．式 (2) で表されるシステムに対し全状態オ

オブザーバを式 (3) のように構成する .

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + l_1(x_1 - \hat{x}_1) \\
 &\vdots \\
 \dot{\hat{x}}_{n-1} &= \hat{x}_n + l_{n-1}(x_1 - \hat{x}_1) \\
 \dot{\hat{x}}_n &= \hat{x}_{n+1} + l_n(x_1 - \hat{x}_1) + bu \\
 \dot{\hat{x}}_{n+1} &= l_{n+1}(x_1 - \hat{x}_1)
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで $\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n+1}]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ はオブザーバによる推定変数ベクトル ,
 $l = [l_1, l_2, \dots, l_{n+1}]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ はオブザーバゲインである . 式 (2) で表されるシステムは可観測であり , オブザーバゲインを適切に選択することによりシステムの状態変数ベクトル x を推定できる .

3.1 拡張状態オブザーバを用いた外乱補償制御

ESO による推定値を用いた外乱補償制御における制御則は式 (4) で与えられる .

$$u = \frac{u_0 - \hat{f}}{b} \tag{4}$$

ここで , ESO による推定が適切に行われていると仮定し , 式 (1) に式 (4) を代入すると式 (5) が得られる .

$$\begin{aligned}
 y^{(n)}(t) &= f(\cdot) - \hat{f} + u_0 \\
 &\approx u_0
 \end{aligned} \tag{5}$$

以上により式 (1) で表されるシステムは , 式 (5) で表される外乱とノイズのない原点に n 個の重根を持つシステムとなり , フィードバック安定化可能となる .

3.2 I-PENTAR への適用

I-PENTAR は本体の傾斜角度 ψ と車輪の回転角度 θ_w の 2 つの状態変数を出力可能であり , 入力 は車輪に与えるトルク τ_w である . 1 入力 2 出力系である I-PENTAR のシステムに ESO を

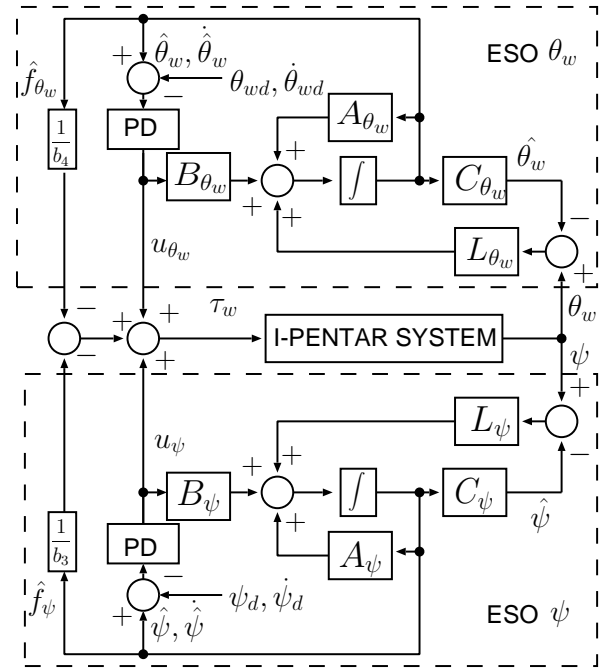


Fig. 3 Block diagram of the control system.

適用するため , I-PENTAR のシステムダイナミクスを式 (1) の形で表すと式 (6) となる .

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_\psi(\psi, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w, \tau_d) \\ f_{\theta_w}(\psi, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w, \tau_d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \tau_w \tag{6}$$

ここで , I-PENTAR への入力 τ_w を仮想的に $\tau_w \equiv u_\psi + u_{\theta_w}$ と定義し , u_ψ, u_{θ_w} に分解する . そして , ψ のシステムについての入力を u_ψ と見なし , u_{θ_w} は $f_\psi(\cdot)$ の内部に含めてしまう . 同様に θ_w のシステムについての入力を u_{θ_w} として扱い , u_ψ は $f_{\theta_w}(\cdot)$ の内部に含める . 以上の操作により式 (7) , 式 (8) が得られ , それぞれ ψ, θ_w についての ESO を構成することができる ^{7, 8)} .

$$\ddot{\psi} = f_\psi(\psi, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w, u_\psi, \tau_d) + b_3 u_\psi \tag{7}$$

$$\ddot{\theta}_w = f_{\theta_w}(\psi, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w, u_{\theta_w}, \tau_d) + b_4 u_{\theta_w} \tag{8}$$

I-PENTAR のシステムに外乱補償制御を適用した際のブロック線図を Fig. 3 に示す . ここ

$$\begin{aligned}
 \text{で , } A_\psi &= A_{\theta_w} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} , B_\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix} , \\
 B_{\theta_w} &= \begin{bmatrix} 0 \\ b_4 \\ 0 \end{bmatrix} , C_\psi = C_{\theta_w} = [1 \ 0 \ 0] \text{ であり ,}
 \end{aligned}$$

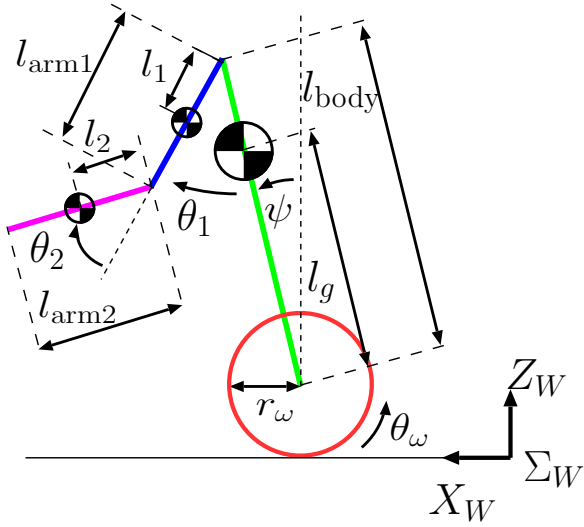


Fig. 4 2DOF model of I-PENTAR.

$L_\psi \in \mathbb{R}^3, L_{\theta_w} \in \mathbb{R}^3$ はオブザーバゲインである.

4. マニピュレータ動作時におけるI-PENTARのシミュレーション

マニピュレータを搭載した I-PENTAR は強い非線形性を有するため、数値シミュレーションを行った結果をもとに I-PENTAR 本体の挙動について考察する.

4.1 モデリング

シミュレーションのため、マニピュレータを搭載した I-PENTAR を 3 リンクと車輪で構成されるリンク機構と見なし、モデリングを行う. I-PENTAR のシミュレーションモデルを Fig.4 に示す. ここで、本体の質量を M_g 、マニピュレータ第 1 関節の質量を M_1 、マニピュレータ第 2 関節の質量を M_2 と定義する. また、以下では簡単のため $l_{\text{arm1}} = 2l_1, l_{\text{arm2}} = 2l_2$ とした.

ここで、 $\mathbf{q} \equiv [\psi, \theta_w, \theta_1, \theta_2]^T \in \mathbb{R}^4$ と定義し、Lagrange 方程式より運動方程式を導出すると、式 (9) の形で表される.

$$\begin{aligned} M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) \\ = E\tau_w + T_1\tau_1 + T_2\tau_2 + D\tau_d \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 $M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は加速度についての係数行列、 $H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^4$ はコリオリ力、遠心力などに関する項、 $G(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^4$ は重力項である. $\tau_w, \tau_1, \tau_2, \tau_d$ はそれぞれ、I-PENTAR 本体の入力トルク、マニピュレータ第 1 関節の入力トルク、第 2 関節の入力トルク、I-PENTAR 本体に加わる外乱を表している.

$$\text{ここで、} E = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ である.}$$

また、 $-M^{-1}(\mathbf{q})(-H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - G(\mathbf{q}) + T_1\tau_1 + T_2\tau_2 + D\tau_d) \equiv \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^4$ と定義し、 $\tau_w \equiv u_\psi + u_{\theta_w}$ と分解すると式 (10) のように表される.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + M^{-1}(\mathbf{q})E\tau_w \\ &= \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + M^{-1}(\mathbf{q})E(u_\psi + u_{\theta_w}) \quad (10) \end{aligned}$$

従って、 ψ についての ESO では式 (10) において $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ の第 1 成分と $M^{-1}(\mathbf{q})Eu_{\theta_w}$ が推定され、 θ_w についての ESO では式 (10) において $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ の第 2 成分と $M^{-1}(\mathbf{q})Eu_\psi$ が推定される.

4.2 シミュレーション条件

マニピュレータの振り上げ、振り下ろし動作には式 (11) に示す 5 次の時間多項式の係数 a_i ($i = 0, \dots, 5$) を式 (12) に示す初期条件、終端条件より求めた軌道 $\theta_d(t)$ に PD 制御を用いて追従させた. ここで、 t_0 は振り上げ(下ろし)開始時刻、 t_f は振り上げ(下ろし)終了時刻、 θ_0, θ_f はそれぞれ初期角度、終端角度である.

$$\theta_d(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \theta_d(t_0) &= \theta_0 & \dot{\theta}_d(t_0) &= 0 & \ddot{\theta}_d(t_0) &= 0 \\ \theta_d(t_f) &= \theta_f & \dot{\theta}_d(t_f) &= 0 & \ddot{\theta}_d(t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

I-PENTAR には ESO による外乱補償制御を適用し，以下の2通りのマニピュレータの振り方に対しシミュレーションを行った際の本体の挙動を確認する．

条件 1 速く，大きくマニピュレータ第 1 関節を振る動作

条件 2 細かくマニピュレータ第 2 関節を振る動作

条件 1 ではマニピュレータ第 1 関節を動作時間 2[s]，終端角度 2[rad] で振り上げ，振り下ろしを行う．条件 1 で入力した指令値 θ_{1d} ， θ_{2d} を Fig.5 に示す．

条件 2 では第 1 関節を動作時間 2[s]，終端角度 1[rad] で振り上げた後，第 2 関節を三角関数による指令値を与えて振動させる動作を行う．その後，第 1 関節を振り上げと同じ速度で振り下ろす．条件 2 で入力した指令値 θ_{1d} ， θ_{2d} を Fig.6 に示す．

さらに，マニピュレータが荷物を持ったことを想定した外乱を考える．ここでは，15[s] でマニピュレータ第 2 関節の質量を 1.5[kg] 増加させ，20[s] で第 2 関節の質量を元に戻すことで，マニピュレータが荷物を把持した際の挙動についてシミュレーションを行う．

4.3 シミュレーション結果

条件 1 と条件 2 でマニピュレータを動作させた際の本体の挙動についてシミュレーションを行った結果をそれぞれ Fig.7，Fig.8 に示す．

4.4 シミュレーション結果の考察

Fig.7，Fig.8 の結果から，マニピュレータの質量の変化による車輪角度の挙動については，ESO を用いた外乱補償制御を適用したマニピュレータによる手先先端位置の補償⁹⁾を行うことで手先位置を補償できる程度の値となった．しかし，条件 1，条件 2 の双方でマニピュレータ第

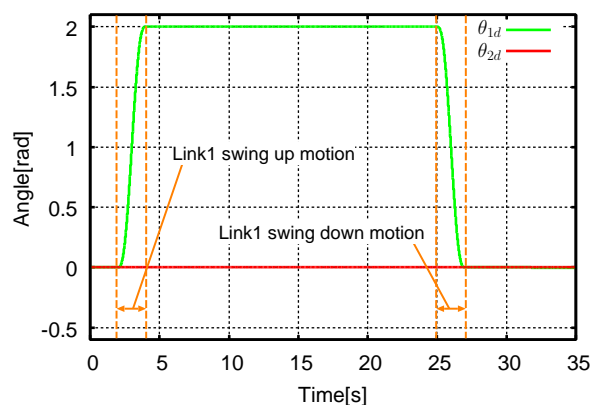


Fig. 5 Input trajectories θ_{1d} and θ_{2d} in case 1.

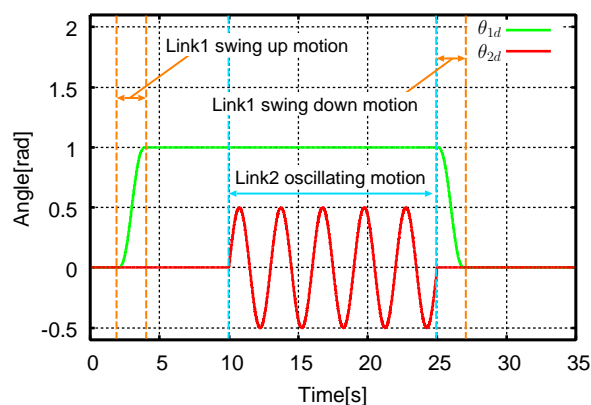


Fig. 6 Input trajectories θ_{1d} and θ_{2d} in case 2.

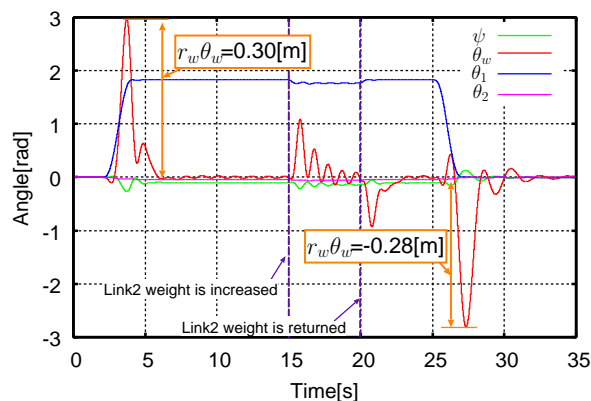


Fig. 7 Simulation result in case 1.

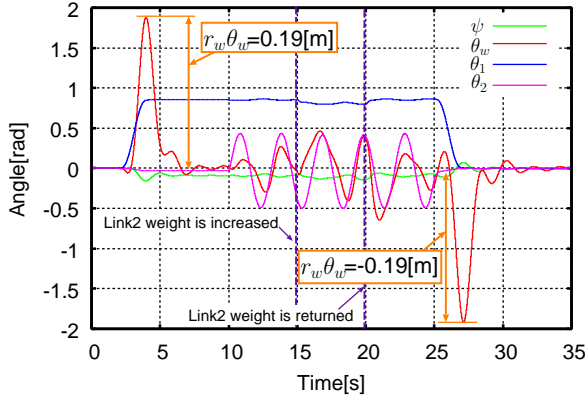


Fig. 8 Simulation result in case 2.

1 関節の振り上げ，振り下ろし時に，マニピュレータが動作する方向へ車輪が大きく回転することによって倒立安定化を行っている様子が確認された．この車輪の大きな動きはマニピュレータによる手先先端位置の補償ができない可能性があるため，車輪の角度をさらに抑制する方法を検討する必要がある．

5. 本体傾斜角指令値の設計

第4.章での考察から，マニピュレータの振り上げ，振り下ろし時の車輪角度を抑制する必要があることが明らかになった．I-PENTARは外乱に対して，車輪による移動の他に本体を傾けることによって転倒することなくバランスを保つ．よって外乱が与えられたとき，本体の傾斜角度を速やかに外乱を相殺できる値へ収束させれば車輪の動きを抑制することができる．そこで，本論文ではマニピュレータ動作時に本体へ傾斜角の指令値をフィードフォワード的に与えることでマニピュレータ動作時の車輪角度を抑制する手法について検討する．

本体傾斜角の指令値を設計するにあたり，考慮すべき点は以下の3点である．

- 1) 車輪角度 θ_w を抑制できるか
- 2) マニピュレータ側との情報のやり取りが最小限か

- 3) 様々なマニピュレータの振り方に対応できるか

5.1 外乱オブザーバを用いて指令値を設計する方法

I-PENTAR 本体側の情報のみを用いて傾斜角度の指令値を設計するために，最小次元外乱オブザーバ (以下 RODO:Reduced Order Disturbance Observer)¹⁰⁾ を用いる方法について検討する．ここで， $\mathbf{x} \equiv [\psi, \theta_w, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w]^T$ を定義し，式(6)で表される I-PENTAR のシステムを不安定な平衡点近傍で線形化すると式(13)，式(14)の線形システムの形で表すことができる．

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\tau}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tau_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tau_w \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tau_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(13)，式(14)の線形化されたシステムに対し， τ_d を推定するための RODO を式(15)，式(16)のように構成する．

$$\dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{LD}\mathbf{z} + (-\mathbf{LDL} - \mathbf{LA})\mathbf{x} - \mathbf{LB}\tau_w \quad (15)$$

$$\hat{\tau}_d = \mathbf{z} + \mathbf{L}\mathbf{x} \quad (16)$$

ここで， $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^4$ はオブザーバゲインである．

一方，定常状態の外乱 τ_d と本体傾斜角度 ψ の関係は以下の式(17)で近似することができる¹⁰⁾．

$$\psi \approx \frac{\tau_d}{M_g g l_g} \quad (17)$$

そこで，本体傾斜角の指令値 ψ_d を式(17)とオブザーバ出力 $\hat{\tau}_d$ を用いて与えた．

5.1.1 指令値を与えた場合のシミュレーション

4.2節と同様の条件1，条件2でマニピュレータを動作させた際の本体の挙動について，シミュ

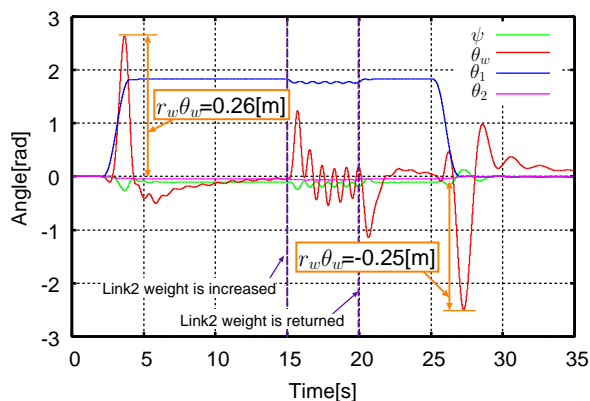


Fig. 9 Simulation result when using RODO for ψ_d calculation in case 1.

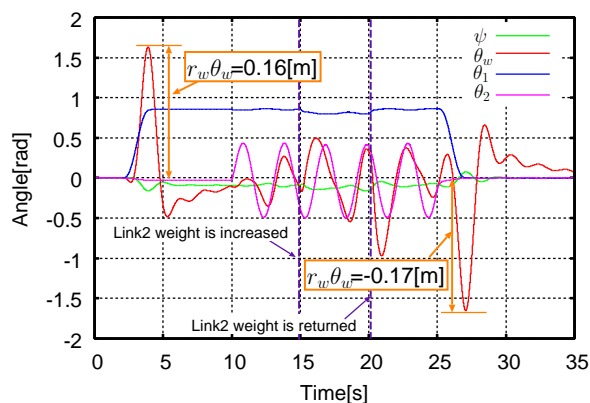


Fig. 10 Simulation result when using RODO for ψ_d calculation in case 2.

レーションを行った結果をそれぞれ Fig.9 , Fig.10 に示す．ここで，オブザーバゲインは試行錯誤により， $[0 \ 0 \ 1.0 \ 0.2]$ と選定した．

また，条件 1 について本体傾斜角度 ψ と本体傾斜角指令値 ψ_d の動きを Fig.11 に示す．

5.1.2 シミュレーション結果の考察

Fig.9 , Fig.10 に示す結果から考察する．外乱オブザーバによる外乱の推定値から本体傾斜角度の指令値を取得する方法においても，マニピュレータ質量の変化による車輪の動きはマニピュレータ側で補償できる値になっている．しかし，第 1 関節の振り上げ，振り下ろし時には双方の条件で期待通りの成果が得られなかった．特に条件 1 では Fig.11 に示すように外乱オブザー

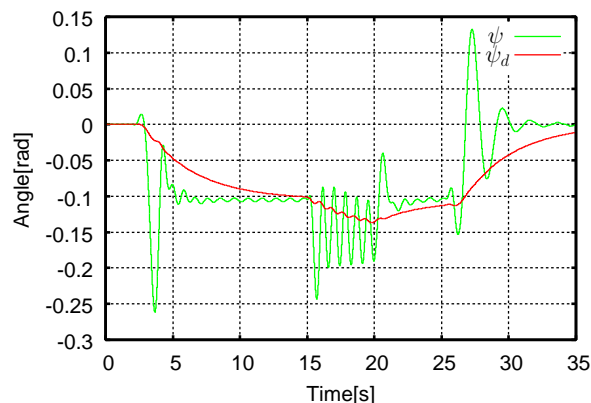


Fig. 11 Plot of ψ and ψ_d using RODO in case 1.

バの収束が遅いため，マニピュレータの急激な動きに対して外乱の推定が追いついていないことが分かる．従って，適切な指令値が生成されないため車輪角度を抑制することができていない．また，外乱の推定速度を調整するためのオブザーバゲインのチューニングは，シミュレーション内であっても困難であった．以上の点から，外乱の推定値から本体傾斜角度の指令値を取得する方法では車輪角度を抑制することに限界があると考えられる．

5.2 マニピュレータの関節角度から重心位置を取得する方法

5.1 節で，マニピュレータ側の情報を一切使用せずに指令値を設計する方法では車輪角度を抑制することに限界があるという結論に至った．そこで，マニピュレータ側のパラメータ (ノミナル質量と長さ) が既知であり，角度情報がリアルタイムで取得できる場合の指令値の設計方法について検討する．

Fig.4 より，I-PENTAR 本体とマニピュレータの幾何学的拘束と質量から，平衡状態となる本体傾斜角を算出することができる．マニピュレータまで含めた I-PENTAR のモーメントの

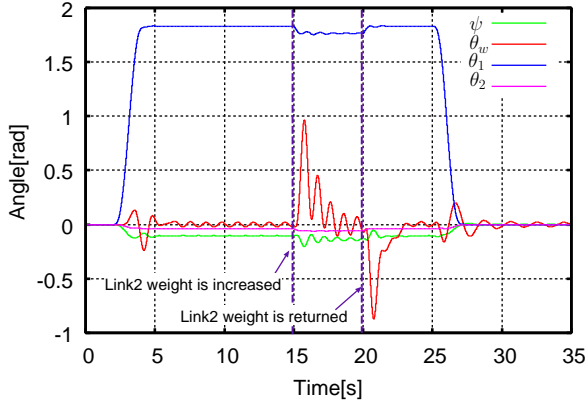


Fig. 12 Simulation result when using arm and pendulum parameters for ψ_d calculation in case 1.

釣り合いを式で表すと式 (18) となる .

$$M_g L_g(\psi)g + M_1 L_1(\psi, \theta_1)g + M_2 L_2(\psi, \theta_1, \theta_2)g = 0 \quad (18)$$

ここで, $L_g \equiv l_g \sin \psi$, $L_1 \equiv (l_{\text{body}} \sin \psi - l_1 \sin(\theta_1 - \psi))$, $L_2 \equiv (l_{\text{body}} \sin \psi - l_{\text{arm1}} \sin(\theta_1 - \psi) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \psi))$ と定義した . 式 (18) を ψ について解くと式 (19) となる .

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{M'' l_1 S_{\theta_1} + M_2 l_2 S_{(\theta_1 + \theta_2)}}{M' - M'' l_1 C_{\theta_1} - M_2 l_2 C_{(\theta_1 + \theta_2)}} \right) \quad (19)$$

ここで, $M' \equiv M_g l_g + (M_1 + M_2) l_{\text{body}}$, $M'' \equiv M_1 + 2M_2$ とおき, $\sin \theta \equiv S_\theta$, $\cos \theta \equiv C_\theta$ という表記を用いた . 式 (19) を I-PENTAR が平衡状態になるための傾斜角指令値 ψ_d として与えることで, 車輪角度の収束を速める手法について検討を行った .

5.2.1 指令値を与えた場合のシミュレーション

4.2 節と同様の条件 1, 条件 2 でマニピュレータを動作させた際の本体の挙動についてシミュレーションを行った結果をそれぞれ Fig.12, Fig.13 に示す .

また, 条件 1 について本体傾斜角度 ψ と本体傾斜角指令値 ψ_d の動きを Fig.14 に示す . さらに, 条件 1 で指令値を入れた場合と入れない場

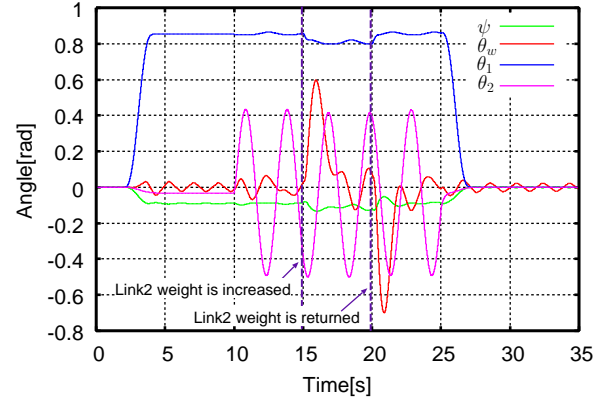


Fig. 13 Simulation result when using arm and pendulum parameters for ψ_d calculation in case 2.

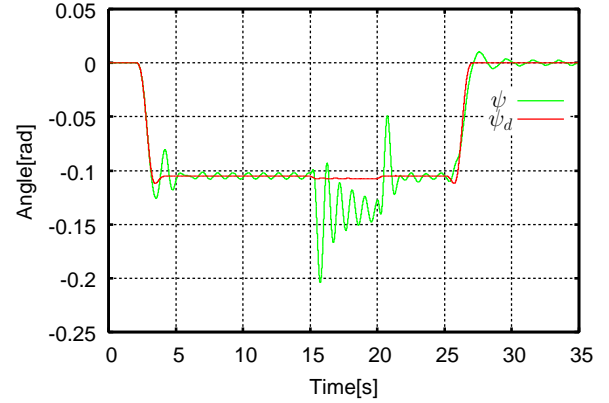


Fig. 14 Plot of ψ and ψ_d in case 1.

合について I-PENTAR 本体への入力トルク τ_w の動きを Fig.15 に示す .

5.2.2 シミュレーション結果の考察

Fig.12, Fig.13 に示す結果から, マニピュレータの質量の変化による車輪の動きはマニピュレータ側の制御で補償できる値であることが分かった . さらに, マニピュレータの動きによる外乱は本体の傾斜角度をマニピュレータの関節角度によって変わる平衡状態へ追従させることで, 安定したマニピュレーションのための外乱補償が達成されている . また, Fig.15 に示すように適切にバランスをとる動作によってマニピュレータ動作時の入力トルク τ_w も小さく抑えられている .

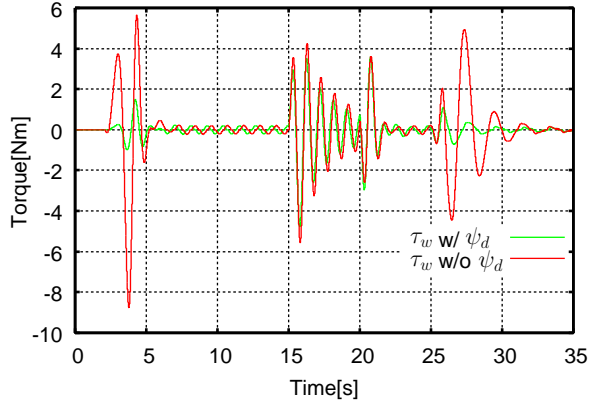


Fig. 15 Plot of τ_w in case 1.

Table 2 Values use for simulating effects of erroneous parameters.

| | |
|-------------------|--------|
| M_g | +20[%] |
| M_1 | -20[%] |
| M_2 | +20[%] |
| l_g | -20[%] |
| l_1 | +20[%] |
| l_2 | -20[%] |
| l_{body} | +20[%] |

5.3 指令値にパラメータ誤差を含む場合のシミュレーション

5.2 節では車輪の回転角度 θ_w を抑制するために式 (19) を ψ_d として与える方法を提案した。しかし、実際のマニピュレータの長さ、質量からなる各パラメータには誤差が予想される。そこで、パラメータに誤差を与えた場合についても同様にシミュレーションを行う。各パラメータに与えた誤差を Table 2 に示す。

5.3.1 指令値にパラメータ誤差を含む場合のシミュレーション結果

指令値にパラメータ誤差を内包させ、4.2 節と同様の条件 1 と条件 2 でマニピュレータを動作させた際の本体の挙動について、シミュレーションを行った結果を Fig.16, Fig.17 に示す。

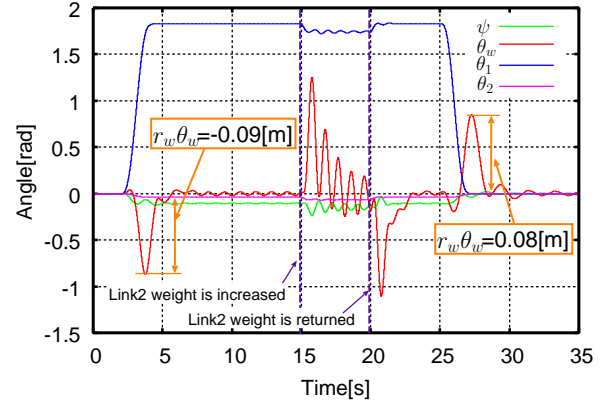


Fig. 16 Simulation result when using ψ_d considering parameter error in case 1.

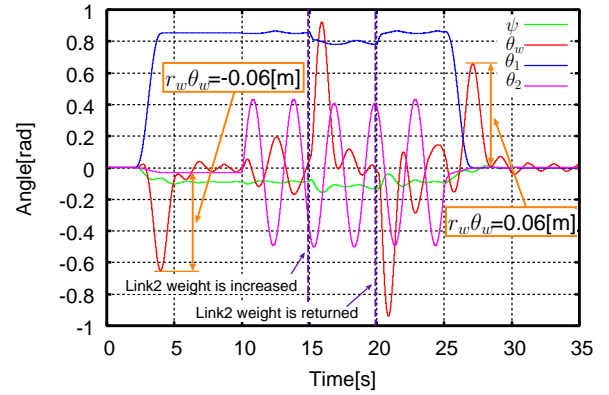


Fig. 17 Simulation result when using ψ_d considering parameter error in case 2.

また、条件 1 についての本体傾斜角度 ψ と本体傾斜角指令値 ψ_d の動きを Fig.18 に示す。

5.3.2 シミュレーション結果の考察

Fig.16, Fig.17 に示すシミュレーションの結果から、4.2 節と同様の条件 1 と条件 2 とともにパラメータ誤差による大きな傾斜角指令値が与えられているため、マニピュレータが動作した方向と逆に車輪が回転する様子が確認された。しかし、Table2 に示す程度のパラメータ誤差を含む場合では、車輪角度のピーク値は指令値を入力しない場合を超えることはなく、マニピュレータ側で補償できる値となっている。しかし、今後の実機での検証結果によってはリアルタイムでのパラメータ推定について検討する必要がある。

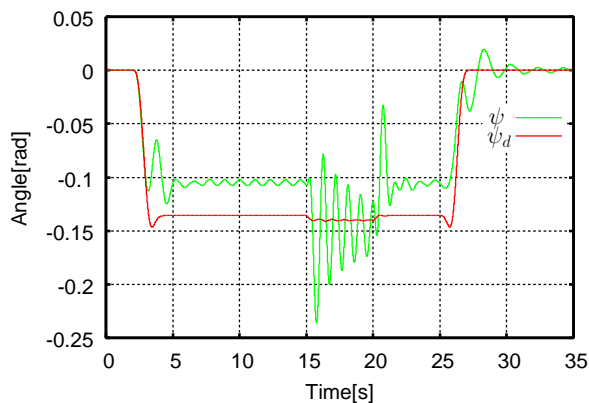


Fig. 18 Plot of ψ and ψ_d in case 1.

6. おわりに

本論文では車輪型倒立振り子ロボットが精密なマニピュレーションを行うために、本体の動きを抑制する方法について提案した。

未知の外乱，誤差を補償する手法として拡張状態オブザーバを用いた外乱補償制御があるが，I-PENTAR 本体に外乱補償制御を適用した場合でも，マニピュレータ動作時に本体が大きく動くことがシミュレーションによって確認された。その結果を踏まえて，さらに本体の車輪角度の動きを抑制するために，本体傾斜角の指令値を設計する2つの手法について検討した。

外乱オブザーバを用いて指令値を設計する方法では，マニピュレータ側の情報を使わずに制御系を完全に分離できる。しかし，外乱オブザーバの収束性の改善，ゲインの選定，I-PENTAR 本体の正確なモデリングが必要となる。

マニピュレータ側のパラメータ（ノミナル質量と長さ）と関節角度を取得できる場合には，合成重心の位置を指令値とすることでマニピュレータ動作時の車輪の角度を非常に小さく抑制することがシミュレーションによって確認された。また，マニピュレータ側のパラメータ誤差を内包する指令値を与えた場合についても検証を行った。シミュレーション結果から，本論文で与えた程度の誤差による車輪の動きはマニピュレータの制御系によって補償が可能だと考えられる。

今後はシミュレーション結果が実機と一致す

るか確認した後に，マニピュレータ側の制御系との統合を行っていく予定である。特に，分離した制御系を統合した際の制御性能については詳しく検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 中村亮介, 網野梓, 一野瀬亮子, 柄川索, 玉本淳一: 人間共生ロボット”EMIEW 2”の開発: 機構と制御システム構成 (ホーム & オフィスロボット), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2008, No.[2P1-I03], (2008).
- 2) 向井利春, 平野慎也, 中島弘道, 境田右軌: 介護支援ロボット RIBA の安全対策と移乗作業の実現, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2010, No.[1A1-E24], (2010).
- 3) 木村直, 鄭聖熹, Luis Canete, 高橋隆行: 車輪型倒立振り子ロボットにおける未知質量物持ち上げ動作, ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集, Vol.2011, No.[1P1-I04], (2011).
- 4) Luis Canete and Takayuki Takahashi: Disturbance compensation in pushing, pulling, and lifting for load transporting control of a wheeled inverted pendulum type assistant robot using the extended state observer, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.7, No.12, (2012).
- 5) Q. Zheng, L.Q. Gao, and Z. Gao: On validation of extended state observer through analysis and experimentation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.134, No.2, pp.024505.1–024505.6, (2012).
- 6) マハワンバグス, 羅正華, 韓京清, 中嶋新一: 拡張状態オブザーバによるロボットの高速度・高精度運動制御, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.86–93, (2000).
- 7) R. Miklosovic and Z. Gao. A dynamic decoupling method for controlling high performance turbofan engines. In *Proc. of the 16th IFAC World Congress*, pp.4–8, (2005).
- 8) Z. Shen and G. Zhiqiang. Active disturbance rejection control for non-minimum phase systems. In *29th Chinese Control Conference*, pp.6066–6070. IEEE, (2010).
- 9) 永野健太, 佐藤拓磨, Luis Canete, 高橋隆行: 拡張状態オブザーバを用いた倒立振り子型ロボット用双腕マニピュレータの外乱補償制御のシミュレーション, 計測自動制御学会東北支部第277回研究集会, Vol.277, No.11, (2012).
- 10) Luis Canete and Takayuki Takahashi: A disturbance compensation method for pushing control of an inverted pendulum robot, *the 29TH Annual Conference of the Robotics Society of Japan*, Vol.2011, No.[1I3-8], (2011).