

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

Simulation of Disturbance Compensation Control of Dual Manipulator for an Inverted Pendulum Robot Using The Extended State Observer

永野健太*, 佐藤拓磨*, Luis Canete**, 高橋隆行*

Kenta Nagano*, Takuma Sato*, 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: 人支援ロボット (Human Support Robot), 倒立振り子 (Inverted Pendulum), 双腕マニピュレータ (Dual Manipulator), 拡張状態オブザーバ (Extended State Observer)

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

1. 緒言

1.1 研究背景

近年, 人間支援を目的としたロボットの開発が活発に行われている。これらのロボットにおいては, 人間や環境に対する高い安全性と, 様々なサービスを効率よく行うことが可能な高い作業性の両立が求められている。しかし, この両機能は一般的に相反する性質を持っており, 一つのシステムにおいてそれらを両立するのは困難な課題である。この課題に対して車輪型倒立振り子機構のロボットを用いることは, 自重を利用することで非力なアクチュエータを用いた軽量なマニピュレータでも容易に高い可搬重量を得ることが可能であることから, 高い安全性と高い作業性を同時に実現することを可能にする手段であると考えられる。

筆者らは, 倒立振り子機構の上記のメリットを積

極的に利用可能な, 腰関節及び両腕を有する対人サービスに適した人間支援ロボット I-PENTAR を提案している^{1, 2)}。I-PENTAR の外観を Fig. 1 に示す。また, これまでに機構的に不安定な倒立振り子型ロボットが機構的に安定なロボットと同等, 又は, その機構的不安定性を活用した特有の作業を安全かつスムーズに実行するために適したマニピュレータとして, 安全性及び作業性を考慮した倒立振り子型アシストロボット用双腕マニピュレータの開発が行われた³⁾。マニピュレータの外観を Fig. 2 に示す。筆者らは, 倒立振り子型アシストロボット用双腕マニピュレータを開発中の倒立振り子型アシストロボット I-PENTAR へ搭載し, 様々な人間支援のためのタスクを行うことを目標としている。

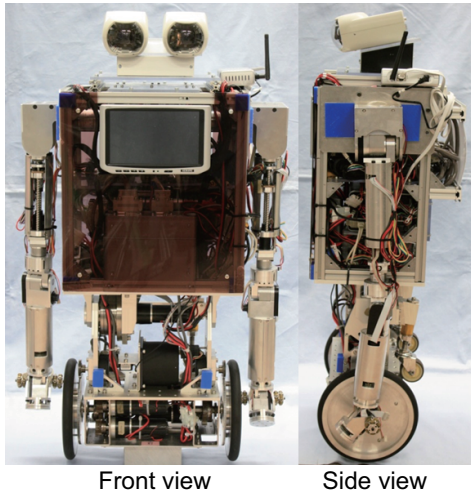


Fig. 1 Inverted Pendulum Type Assistant Robot(I-PENTAR)

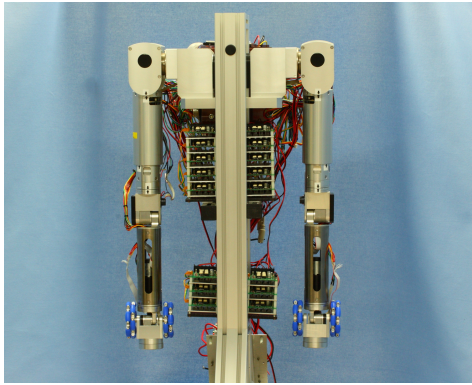


Fig. 2 8 D.O.F dual manipulator

1.2 研究目的

倒立振り子型ロボットにマニピュレータを搭載し様々なタスクを行わせる場合，未知の外乱に加え，マニピュレータの動作がロボット本体に影響を与えることが予想される．しかし，対象とするマニピュレータがこれらの外乱と比較して非力で軽量な場合，マニピュレータを搭載したロボットを正確にモデリングし，制御を行うことは得策ではない．そこで，本研究では倒立振り子型ロボットにおけるマニピュレータの動作の影響に対して，制御系を本体側とマニピュレータ側の2つに分離し，それぞれで外乱の補償を行い制御系間の情報のやりとりを最小限にする制御系を提案する．外乱補償については，本体側では段差等の外部からの外乱に加え，マニピュ

レータの動作を外乱と見なして補償を行う．また，マニピュレータ側では未知重量の物体の把持等の外乱に加え，倒立振り子型ロボットの揺れを外乱と見なして補償を行う．本論文ではマニピュレータ側での外乱補償制御のシミュレーションについて述べる．

2. 拡張状態オブザーバ

本章では，一般的な n 次の非線形システムに対する拡張状態オブザーバ⁴⁾(Extended State Observer, 以降 ESO) について述べる．

システムの入力を $u(t)$ ，出力を $y(t)$ として，一入出力の n 次の非線形システムを考える．

$$y^n(t) = f(y^{(n-1)}(t), y^{(n-2)}(t), \dots, y(t), w(t)) + bu(t) \quad (1)$$

ここで， $w(t)$ は有界な外乱， b は定数であり， f は外乱を含んだシステムすべての動特性である．以降，記述を簡単にするため $f(y^{(n-1)}(t), y^{(n-2)}(t), \dots, y(t), w(t))$ を f と記述する．ここで， $h = \dot{f}$ という h を定義する．すると式 (1) は状態空間モデルとして次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， $x = [x_1, x_2, \dots, x_{n+1}]^T$ は状態変数である．式 (2) における x_n は f であり，その拡張状態は x_{n+1} と表され，オブザーバは x_{n+1} 用いることで y と f を推定することができる．このようなオブザーバを拡張状態オブザーバ (ESO) と呼ぶ．ESO はモデル化されていないダイナミクスに加わる外乱と y を推定することが可能である．

式 (2) のシステムにおいて，入力として u と y を与えた ESO は次のように表現できる．

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

ここで, $\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n+1}]^T$ はオブザーバによって推定される変数, $l_i (i = 1, 2, \dots, n+1)$ はオブザーバゲインである.

ESO の制御則としては以下のものを用いる.

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

この時, オブザーバにより推定される \hat{f} が, $\hat{f} = f$ となれば式 (1) のシステムは以下のように表すことができる.

$$y^{(n)}(t) \approx u_0 \tag{5}$$

これにより出力 y を容易に制御することが可能である.

本論文ではマニピュレータの各関節に ESO を構成し適用する. また, システムの入力 u として PD 制御を用いる.

3. ロボットのモデル

シミュレーションに用いた倒立振り子型ロボット及びマニピュレータのモデルとパラメータをそれぞれ Fig. 3, Table 1 に示す. 2つの車輪を1つの車輪とみなした代表車輪と, 車輪以外の胴体, 双腕マニピュレータを1つの2関節マニピュレータとみなしたアームにより構成される二次元のモデルを用いる. $q = [\psi, \theta_w, \theta_1, \theta_2]^T$ と定義し, このモデルより運動方程式を求めると以下のようなになる.

$$\begin{aligned}
M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + V\dot{q} + G(q) \\
= E\tau_w + T_1\tau_1 + T_2\tau_2 + D\tau_d
\end{aligned} \tag{6}$$

ここで, $M(q)\ddot{q}$ は重力項, $C(q, \dot{q})$ は遠心力とコリオリ力項, $V\dot{q}$ は粘性項, $G(q)$ は重力項である.

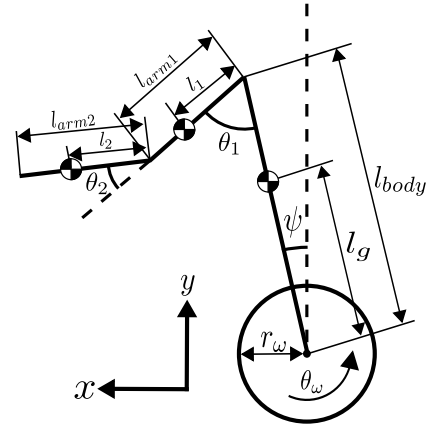


Fig. 3 Model for dual manipulator and I-PENTAR

Table 1 Control variables and parameters

Symbol	Unit	Description
ψ	rad	Inclination angle of CoG
θ_w	rad	Rotational angle of wheel
θ_1	rad	Rotational angle of upper link
θ_2	rad	Rotational angle of lower link
M_g	Kg	Mass of body
m_w	Kg	Mass of wheel
m_1	Kg	Mass of upper link
m_2	Kg	Mass of lower link
l_g	m	Length between the origin of body coordinates and CoG
l_1	m	Distance of gravity of upper link
l_2	m	Distance of gravity of lower link
r_w	m	Radius of wheel
τ_w	Nm	Motor torque of wheel
τ_1	Nm	Motor torque of upper link
τ_2	Nm	Motor torque of lower link
g	m/s ²	Gravity acceleration

4. 関節空間における外乱補償

マニピュレータの関節空間における追従制御及び外乱の補償について ESO の有用性を検証するためシミュレーションを行った. その際, 比較として PD 制御のみの場合についても同様の条件でシミュレーションを行った.

4.1 シミュレーション条件

マニピュレータの各関節に目標値としてシミュレーション開始後 5[s] から 8[s] の間で関節角度 θ_1 が 0.5[rad], θ_2 が 1[rad] 変化する軌道を与えた. また, 未知の外乱に対する挙動を見るため,

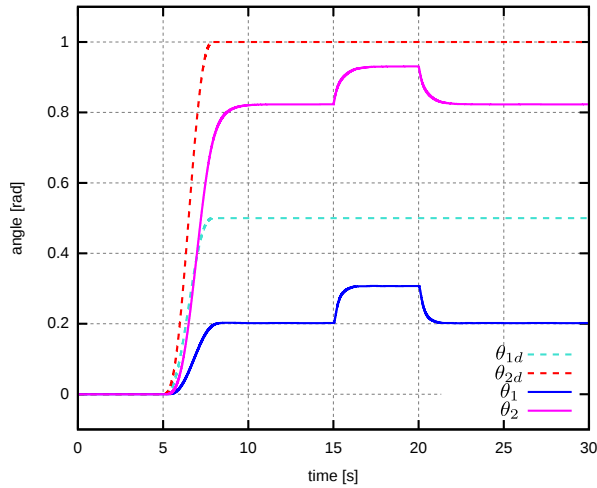


Fig. 4 Disturbance compensation control in the joint space by PD control

ここではマニピュレータが荷物を持ったことを想定し、15[s] から 20[s] の間、各関節に 2[Nm] のステップ状の外乱を各関節に入力した。

4.2 シミュレーション結果

PD 制御の場合と ESO を適用した場合の各関節角度の変化をそれぞれ Fig. 4 , Fig. 5 に示す。

Fig. 4 より PD 制御の場合では目標値に対して偏差が残っていることがわかる。また、外乱が入力されている区間は各関節角度が収束値から 0.1[rad] 程度変化していることが分かる。

Fig. 5 より ESO の適用により目標値に対する偏差が PD 制御の場合と比較すると大きく減少していることがわかる。また、外乱に対しては目標値からの偏差は残ることが無く目標値へ収束していることが分かる。

これより、ESO の適用により PD 制御による偏差の減少及び関節角度における外乱の補償が可能であると考えられる。

5. 作業空間における先端位置の補償

ロボットが作業を行う際には、本体の揺れやマニピュレータへの外乱によってマニピュレータの先端位置が動かないことが望ましい。そこ

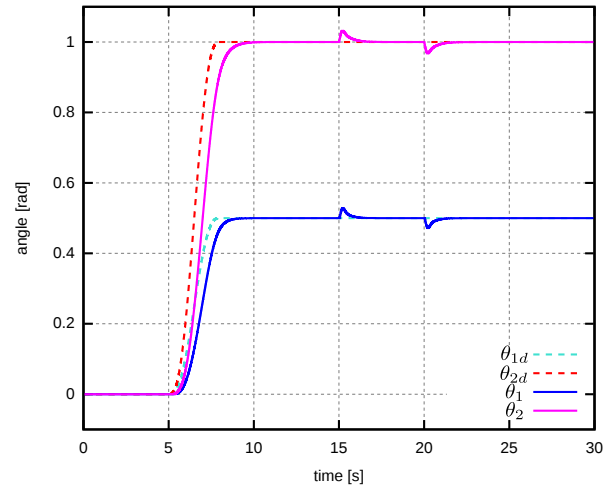


Fig. 5 Disturbance compensation control in the joint space by ESO

で、本章ではマニピュレータの作業空間において先端位置の制御を行い、先端位置の補償について ESO の有用性を検証するためシミュレーションを行った。その際、比較として PD 制御のみの場合についても同様の条件でシミュレーションを行った。

5.1 目標角度と目標角速度

目標角度をロボットのモデルより求める。車輪の回転中心の位置を P_w , ロボットの肩の位置を P_s , マニピュレータの先端位置を P_e とすると各点は式 (7) のように表現できる。この時、 $P_d(x_d, y_d) = [x_d, y_d]$ を目標位置とする。

$$\begin{aligned} P_w(x_w, y_w) &= [r_w \theta_w, r_w] \\ P_s(x_s, y_s) &= [l_{ws} \sin \psi, l_{ws} \cos \psi] \\ P_e(x_e, y_e) &= [x_d, y_d] \end{aligned} \quad (7)$$

また、各点間の距離は式 (8) のように表現できる。

$$\begin{aligned} l_{ws} &= l_{body} \\ l_{se} &= \sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2} \\ l_{we} &= \sqrt{(x_e - x_w)^2 + (y_e - y_w)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

各パラメータをロボットのモデル上に表すと Fig. 6 のようになる。これらより、マニピュレータの各関節の目標角度は以下のように表現できる。

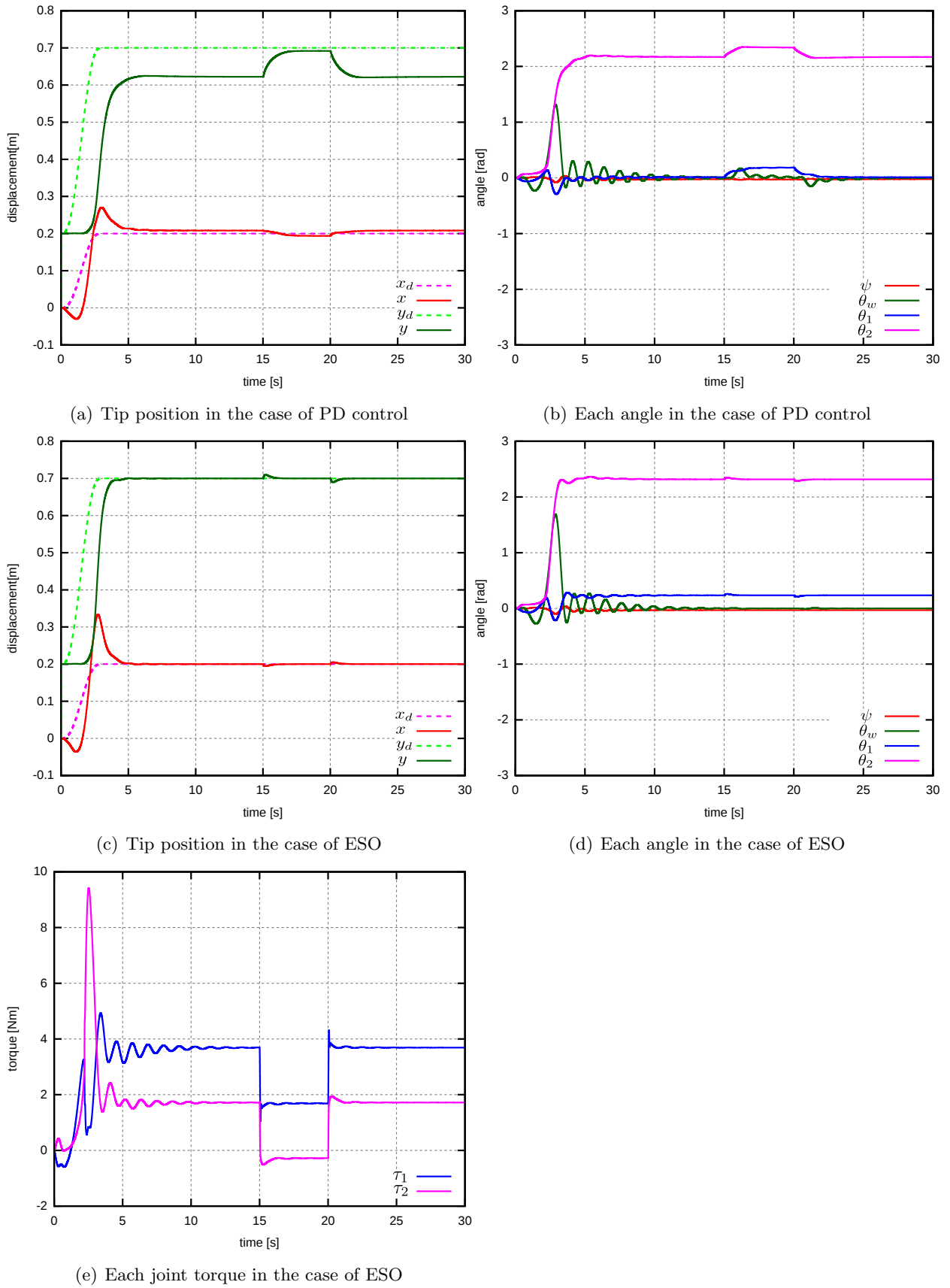


Fig. 7 Simulation results in the case of applying step disturbance to each joint of manipulator

5.3 シミュレーション結果

5.3.1 各関節に外乱を入力した場合

マニピュレータの各関節にステップ状の外乱を加えた際の先端位置の変化を，PD 制御と ESO を適用した場合のそれぞれについて Fig. 7(a)，Fig. 7(c) に示す．その際のマニピュレータの各関節角度，本体の傾き，車輪の回転角度を，PD 制御と ESO を適用した場合のそれぞれについて Fig. 7(b)，Fig. 7(d) に示す．また，ESO 適用時の各関節のトルクを Fig. 7(e) に示す．

Fig. 7(a)，Fig. 7(b) より PD 制御の場合では安定状態において目標位置との偏差が残っていることがわかる．また，外乱に対しては先端位置が安定状態から 0.07[m] 程度移動していることがわかる．

Fig. 7(c)，Fig. 7(d) より ESO を適用した場合は，安定状態においては偏差が無く，外乱に対しての先端位置の目標位置との偏差は 0.01[m] 程度になっていることがわかる．また，マニピュレータの各関節が発生し得る最大トルクは $\tau_1 = 30[\text{Nm}]$ ， $\tau_2 = 13[\text{Nm}]$ である．Fig. 7(e) より ESO 適用時の各関節のトルクは最大トルクを超えていないことがわかる．

これより，ESO の適用により偏差の減少及び物体の把持による外乱の補償が可能であると考えられる．なお，制御開始時における挙動については 5.4 節で考察する．

5.3.2 ロボットの胴体に外乱を入力した場合

ロボットの胴体にステップ状の外乱を加えた際の先端位置の変化を，PD 制御と ESO を適用した場合のそれぞれについて Fig. 8(a)，Fig. 8(c) に示す．その際のマニピュレータの各関節角度を，本体の傾き，車輪の回転角度を，PD 制御と ESO を適用した場合のそれぞれについて Fig. 8(b)，Fig. 8(d) に示す．また，ESO 適用時の各関節のトルクを Fig. 8(e) に示す．

Fig. 8(a)，Fig. 8(b) より PD 制御の場合では安定状態において目標位置との偏差が残ってい

ることがわかる．また，Fig. 8(b) より外乱に対しては車輪の回転に伴い先端位置が安定状態より 0.06[m] 程度移動していることがわかる．

Fig. 8(c)，Fig. 8(d) より ESO を適用した場合は，安定状態においては偏差が無く，外乱に対しては PD 制御の場合と同様に車輪は回転しているが先端位置の偏差は 0.01[m] 程度になっていることがわかる．また，Fig. 8(e) より ESO 適用時の各関節のトルクは最大トルクを超えていないことがわかる．

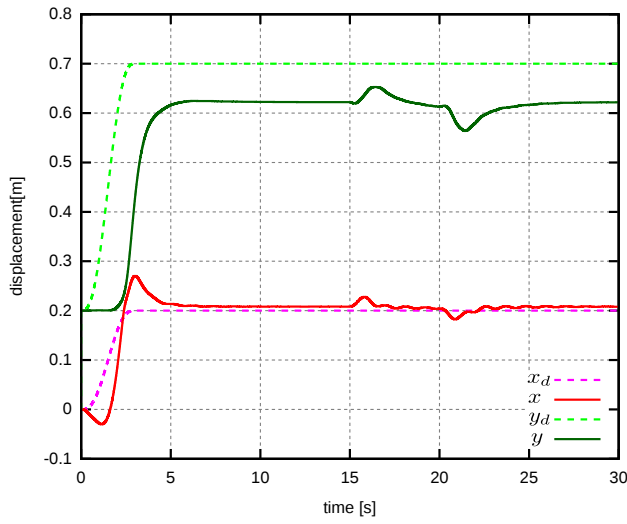
これより，ESO の適用により偏差の減少及び本体の揺れによる外乱の補償が可能であると考えられる．

5.4 初期応答について

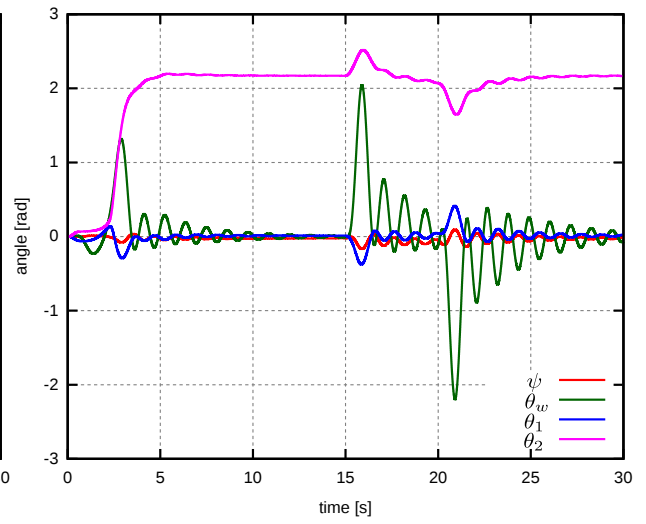
初期応答において PD 制御と ESO を適用した場合のどちらも軌道を追従しておらず，特に x 方向においてはオーバーシュートが見られる．軌道の追従に関しては，初期姿勢の状態でマニピュレータが特異点にあるため本論文で用いた特異点低感度法の影響により目標の軌道を追従できない状態にあると考えられる．また，オーバーシュートに関してはマニピュレータが軌道を追従できない状態で車輪が大きく回転することにより発生していると考えられる．

そこで，マニピュレータが特異点にあり目標の軌道を追従できない状態にある場合でも車輪の回転を抑えることでオーバーシュートが減少することを確認するため，マニピュレータの動作速度を遅くすることで車輪の回転を抑えた場合のシミュレーションを行った．目標値としてシミュレーション開始後 0[s] から 10[s] の間で先端位置が $P_d(x_d, y_d) = [0, 0.2]$ から $P_d(x_d, y_d) = [0.2, 0.7]$ に移動する軌道を入力した場合の結果を示す．

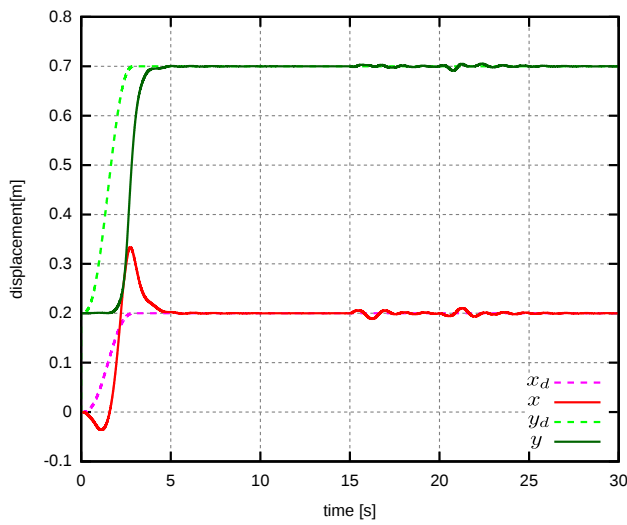
ESO を適用した場合の先端位置の変化は Fig. 9(a) のようになり，その際のマニピュレータの各関節角度，本体の傾き，車輪の回転角度は Fig. 9(b) のようになった．



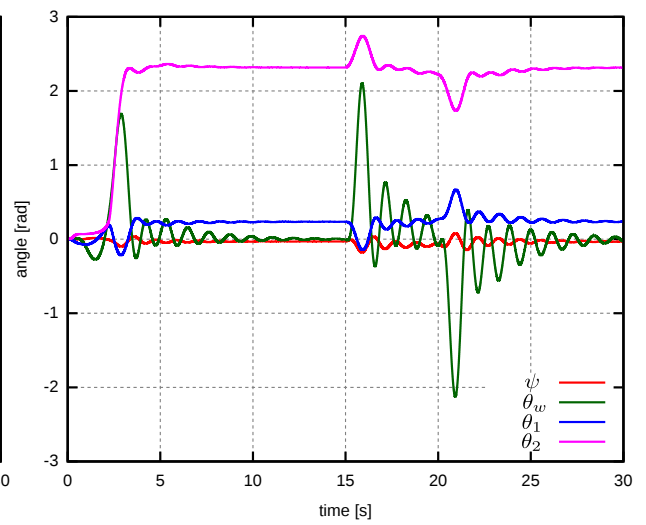
(a) Tip position in the case of PD control



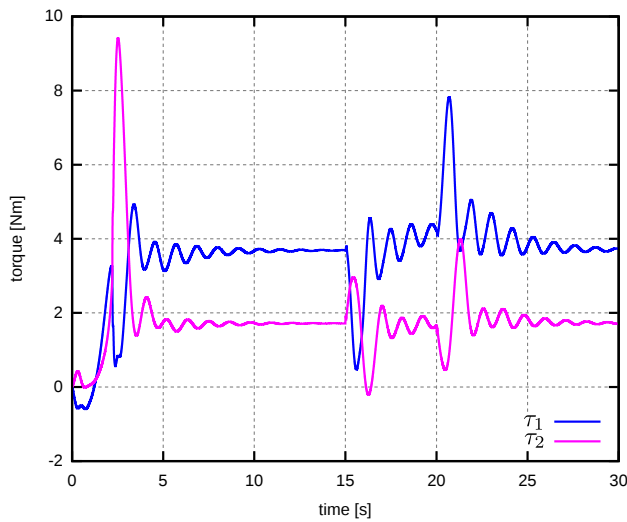
(b) Each angle in the case of PD control



(c) Tip position in the case of ESO

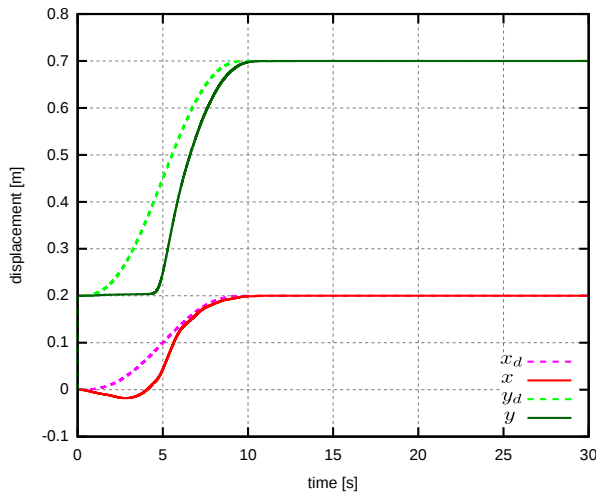


(d) Each angle in the case of ESO

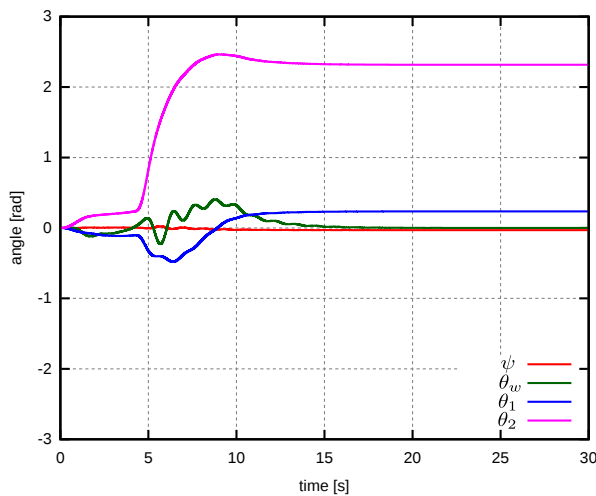


(e) Each joint torque in the case of ESO

Fig. 8 Simulation results in the case of applying step disturbance to robot body of manipulator



(a) Tip position in the case of ESO



(b) Each angle in the case of ESO

Fig. 9 Examination of the initial response

Fig. 9(a), Fig. 9(b) より先端位置は軌道を追従していないが、動作速度を遅くすることによって車輪の回転が抑えられ、 x 方向におけるオーバーシュートが減少していることがわかる。

これより、オーバーシュートは車輪の回転を抑えることで減少させることが可能だと考えられる。しかしながら、この方法はあくまで現象の原因を確認するために用いたものであり、実際のロボット制御には使用できない。現在、筆者らは本体傾斜角指令値を用いた車輪回転角度の抑制⁶⁾によって実現する方法について検討している。また、特異点に対しても他の適切な対策を検討している。

6. 結言

本論文では車輪型倒立振り子ロボット用双腕マニピュレータの ESO を用いた外乱補償制御について述べた。その結果として、ESO を各関節に適用することにより目標角度への追従性能の向上と外乱に対する補償が効果的に行われることがシミュレーションにより確認された。また、作業空間においても ESO を適用することにより先端位置の外乱に対する補償が効果的に行われることがシミュレーションにより確認された。しかし、今回用いた特異点低感度法の影響により初期応答において目標の軌道に追従できないことがあることが確認された。

今後は、特異点に対するより適切な対策方法の検討を行い、ロボット本体側の制御系との統合を目指す。最終的に I-PENTAR がマニピュレータを用いた人間支援を実現するための問題解決を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 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 2011, 1P1-I04, 2011.
- 2) Luis Canete, 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, Intelligent Robots and Systems 2012, October 7-12, Vilamoura, Algarve Portugal, 2012.
- 3) 鄭聖熹, 木村直, 安沢孝太, 佐々木裕之, 高橋隆行. 倒立振り子型アシストロボット用軽量双腕マニピュレータの開発 -機構設計と制御システム構築-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2P1-G16, 2009.
- 4) 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・高精度運動制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 86-93, 2000.
- 5) 阿部崇志, Dragomir N. Nenchev, 妻木勇一. 特異点通過軌道を用いた冗長運動制御法の比較, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 1P2-N-027, 2005.

- 6) 佐藤拓磨, 永野健太, Luis Canete, 高橋隆行.
拡張状態オブザーバを用いた車輪型倒立振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, 計測自動制御学会東北支部第 277 回研究集会, 277-10, 2012.