

# 外力情報判断を利用した新しい力センサレスパワーアシスト制御

## Novel Force Sensor-less Power Assist Control with External Force Classification

呉 世訓\*, 堀 洋一\*\*

Sehoon Oh\* and Yoichi Hori\*\*

\*東京大学 大学院工学系研究科, sehoon@horilab.iis.u-tokyo.ac.jp

\*\*東京大学 大学院新領域創成科学研究科, hori@iis.u-tokyo.ac.jp

概要: モータが人間と接触して人間の力をアシストするパワーアシスト制御の新しいアルゴリズムを提案する. 特に応答性や小型化を目指し, 力センサレスでパワーをアシストする力センサレスパワーアシスト制御(Force Sensor-less Power Assist Control; FSPAC)が注目を浴びているが, この FSPAC では抑制すべき外力までをアシストしてしまう問題がある. そこで推定した外力をアシストするか抑制するか判断する必要がある, 本研究ではその判別問題に関する解決策を提案する. 外乱推定値と同時に測定したプラントの位置・速度信号を持って生成した信号空間を利用することでアシストすべき力とそうでない力を区分し, それぞれ異なる制御を行う. ワンリンクロボットアームを利用して人間の力と重力の力を区分し, 人間の力だけをアシストする実験を行った.

### 1. 序論

力センサレスパワーアシスト制御(Force Sensorless Power Assist Control, 以下 FSPAC)が, 福祉と医療関係領域への応用可能性から注目を集めている. [1],[2],[3].

この FSPAC の多くは, 従来産業用制御でロバスト制御として使われてきた外乱オブザーバを力推定機構として採用しており[4], 力センサを持たなくても外力の大きさをすばやく推定できるようにしている. しかしこの外乱オブザーバを利用したパワーアシストはアシストしたい人間の操作力だけを推定するのではなく, 抑えなければならない摩擦力や重力までもアシストしてしまう.

従来の手法ではこの問題への対処として, あらかじめ摩擦力の大きさをテーブルとして持ち, それを外力観測値から引いている[5]. しかし, 重力など荷重やシステムの状態によってその大きさが変わる外力に対しては, 単なるテーブルを利用して抑えるべき外力値を決めることは出来ない. 何か外力の特徴を見てそれをアシストすべきかそうでないかを判断する判

別アルゴリズムが必要となる.

そこで, 本稿では外乱オブザーバの観測外力に判断基準を設けアシストすべきかどうかを決める新しいパワーアシスト制御を提案する. 推定した外力とそれと同時に測定したシステム自体の速度や位置で生成した信号空間を利用して, その中に判断基準を設け, 現在推定された外力の性質を特定する. そこで特定された外力の性質に基づきアシストをやるかやめるかの判別を行い, それをアシスト制御に反映する. この手法により力センサレスパワーアシスト制御に判断能力を持たせた知能化力センサレスパワーアシスト制御が可能になる.

本稿の構成として, 2 節では力センサレスパワーアシスト制御の基本とその問題点を提示, 3 節ではその解決のための信号空間を利用した外力特徴判別を提案する. そして, 4 節では実際にワンアームロボットに対し提案アルゴリズムを実装, その実験結果を持って提案手法の有効性を示す.

### 2. 力センサレスパワーアシスト制御の設計と外力判断の必要性

## 2.1 カセンサレスパワーアシスト制御器設計

まず、カセンサレスパワーアシスト制御器の設計法を説明する．図1がそのFSPACの一般的構造である．

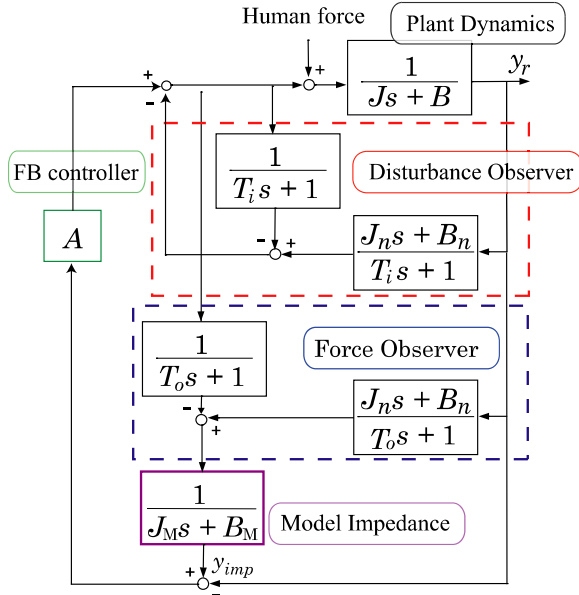


図1 カセンサレスパワーアシスト制御の基本構造

このFSPACは二つの外乱オブザーバを持つ．まず、内側の外乱オブザーバは外力を抑制するので、外力の本来のプラントへの影響が抑制される．外側の外乱オブザーバ（外力オブザーバとも呼ばれる）は内側の外乱オブザーバと同じく外力を推定するが、ここで推定された外力はその後の構造を通してアシストされるようになる．すなわち、内側の外乱オブザーバで外力本来の影響を消した上、外側の外乱オブザーバループを通して外力をアシストする構造となっている．

外側の外乱オブザーバの後にあるモデルインピーダンスは、外力に対する新しい応答を決定する規範モデルである．モータによるアシストを受けるためには本来のプラントより軽くて動きやすいモデル（たとえば、 $J_M < J_n$ ,  $B_M < B_n$ ）にする必要がある．この規範モデルによりプラントが外力に対してどれほど動きやすくなるか、すなわちアシスト力のレベルが決まってくる．

このモデルインピーダンスの出力が参照出力信号( $y_{imp}$ )になり、その後のフィードバック

制御によって実際の出力がこの出力に追従するようになる．この参照出力信号への追従のためにフィードバック制御器（図1ではA）がある．

フィードバック制御器にPID制御を使った時の設計をモデルインピーダンスと一緒に現わすと図2のようになる．これは図3のコンプライアンス制御構造と全く等価な制御器設計である．

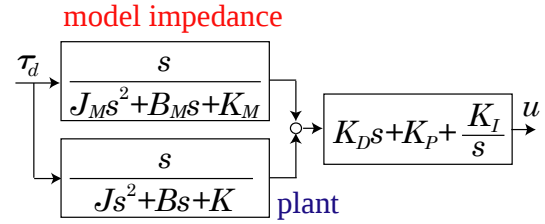


図2 速度制御型フィードバック制御

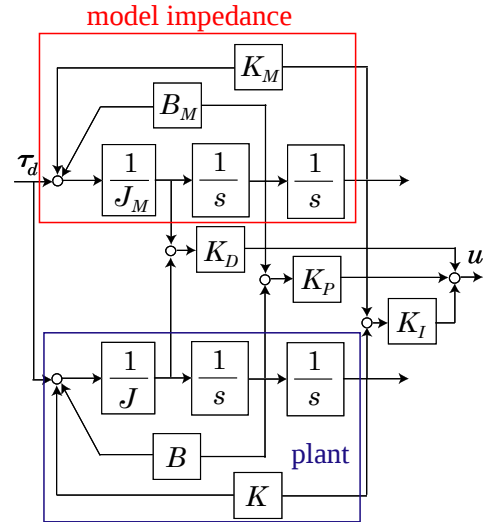


図3 コンプライアンス制御型フィードバック制御

このカセンサレスパワーアシスト制御の特徴は、カセンサを用いなくて速いモータの応答を利用して外力に対するプラントの特徴を軽くすることにある．ただし、モデルに基づいた手法であるだけにモデル誤差へのロバスト性が弱い．

## 2.2 外力判断の必要性

モデル化誤差へのロバスト性問題以外にこのFSPACが持つ弱点として、外力の区分ができないことが挙げられる．すなわち、アシストしてはいけない力までをアシストしてしまうことである．たとえば、重力や摩擦力が人間の

力と同時に働いている時に人間の力はアシストしたいが、重力や摩擦力は抑制しなければならない。しかし、現在の FSPAC の外力オブザーバから観測される外力ではこの区別ができない。

そこで、従来の手法では摩擦力などをあらかじめ測定しテーブルとして設けておき、外力オブザーバからその値を引いてやることで摩擦力はアシストしないようにしている（この手法は反力推定オブザーバと呼ばれる）。

しかし、摩擦力はこのようにあらかじめ測定しておくことができるが、荷重が変わる時の重力などはあらかじめ測定することができない。図 4 のように重力が動作方向に働く振り子型ロボットアームでは、重力が正しく抑制されなく、何らかの手法をもって重力をアシストしない力として区分してやる必要がある。そこで、次節以降はある信号空間上で重力が持つ特徴を調べ、それに基づく外力判断アルゴリズムを提案する。

### 3. 外乱オブザーバ信号空間から見る外力特性

#### 3.1 外乱オブザーバの信号による信号空間

著者らは外乱オブザーバによって観測された外力情報を位置や速度などのシステムの情報と組み合わせることで外乱状況を判断できる手法を提案している[6]。ここでは、その一環として、同じく外力情報を位置や速度などのシステムの情報と組み合わせ、それを 3 次元空間上に配置することで外力の特徴を調べることとする。観測した外力、そして制御対象プラ

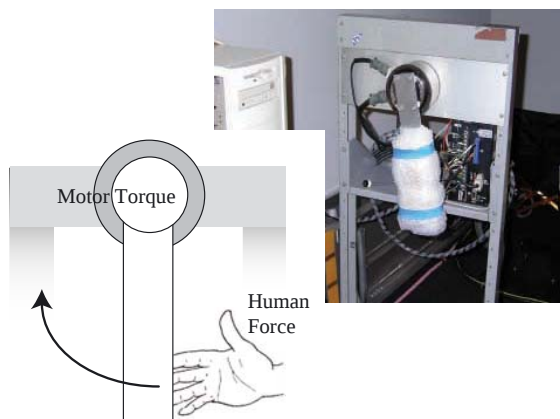


図 4 重力影響下のロボットアーム

ントの位置と速度の情報で書いた 3 次元空間をここでは信号空間と呼ぶことにする。

#### 3.2 各外力の信号空間上での特徴づけ

そこで、図 4 のロボットに対して人間がそのアームを持ち上げて自由落下させる実験を行い、その時の観測外力の軌跡を信号空間上に描かせた。図 5 がその軌跡である。図 6 は重力による自由落下をさせず、操作者の人間がそのアームをゆっくり下ろした時の力軌跡である。

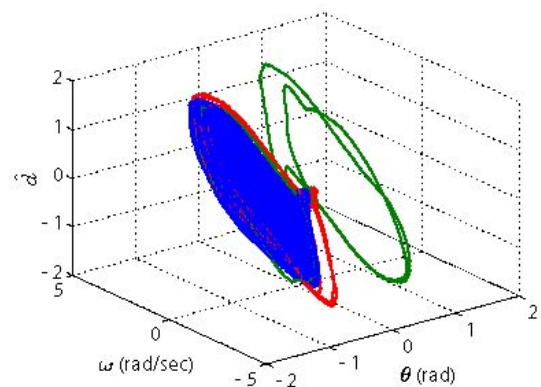


図 5 重力による外力軌跡

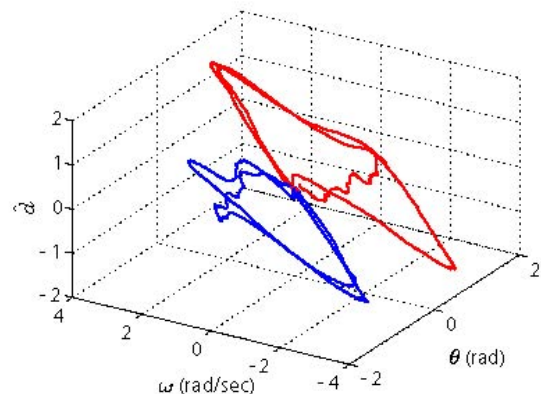


図 6 人による外力軌跡

$\hat{d}$  は観測された外力、 $\omega$  はアームの角速度、 $\theta$  は角度を意味する。特に注目すべきなのは

$$\theta < 0, \omega > 0, \hat{d} > 0 \text{ ..... (1)}$$

$$\theta > 0, \omega < 0, \hat{d} < 0 \text{ ..... (2)}$$

の領域である。人間がアームを持ち上げた後、落下させる時の力の軌跡はこの領域に来ようになっていて、重力による落下だとここが必ず腕の位置（と重さ）による特定の軌跡を描くことになる（図 5）。それに比べ、図 6 では人間の自由な操作で、アームをゆっくり落としていたため、その領域での力の軌跡が重力による

ものと違う．

この信号空間上の特徴を利用した知能化力センサレスパワーアシスト制御を次節で提案する．

#### 4. 外乱オブザーバ信号空間を利用した知能化力センサレスパワーアシスト制御

2節で紹介した力センサレスパワーアシスト制御と 3 節で紹介した信号空間上の外力特徴を統合する．

##### 4.1 知能化力センサレスパワーアシスト制御器の設計

図 7 が提案する知能化力センサレスパワーアシスト制御器の構造である．

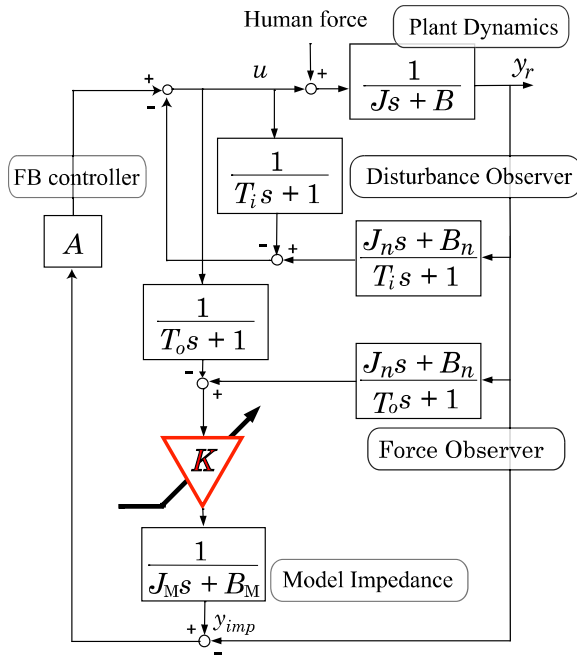


図 7 提案する新しい力センサレスパワーアシスト制御

図 1 と比べると外力オブザーバの出力に新しい可変ゲイン  $K$  が加えられている．この  $K$  を信号空間上での外力の軌跡を見ながら戦略的に調整することで特定の外力だけにアシストを行えるようにした．外力の情報を見てアシストしてはいけない外力の場合には  $K = 0$  とすることで内側の外乱オブザーバだけが働き、その外力は抑制されるようになる．

このゲイン  $K$  を図 5 と 6 の結果を考慮してシグモイド関数を利用して以下のように定義

する．

$$K = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1 + e^{-P(\hat{d} - d_p)}} & (\theta \leq 0) \\ 1 - \frac{1}{1 + e^{P(\hat{d} - d_n)}} & (\theta > 0) \end{cases} \quad \text{---(3)}$$

$\hat{d}$  は外乱オブザーバで観測された外力、 $d_p$  と  $d_n$  はゲイン切り替えの中心値として設計する切り替え外力値、 $P$  はその切り替えの滑らかさを定義する係数となっている．

切り替え外力値を 0 と設計すると反対方向に動かす外力はまったくアシストされなくなる．人間の力で調整できる小さい力の反対方向外力に関してはアシストが作用できるようにするには  $d_p, d_n$  を 0 から少しバイアスする必要がある．ここでは図 6 での人間操作力の大きさをみて、0.6 と -0.6 をそれぞれ  $d_p, d_n$  として設定した． $P$  は 10 と切り替え外力値の前後で速く切り替えが成されるように設定した．

##### 4.2 ワンアームロボットによる外力判断実験

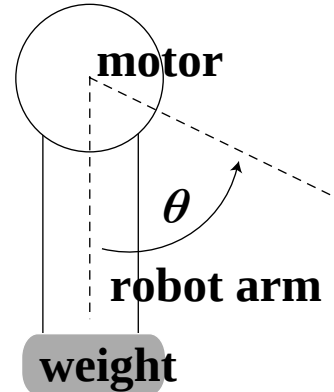


図 8 実験用ワンアームロボット構成

図 4 のロボットを利用して実験を行った．アームの駆動モータとしては NSK の DD モータ BS0404 シリーズを利用した．そして長さ 30cm, 質量 0.5kg の腕をつけた上に、その腕の最先端にフックをつけ、0.9kg の荷重をつけた．

このシステムに対し図 9 のようなノミナルプラントとモデルインピーダンスをそれぞれ用いて図 7 の力センサレスパワーアシスト制御器を設計した．

図 8 が実験の構成で、荷重を持ったアームが

垂直下に来た時が初期状態角で  $0\text{rad}$  である．そこから人間が力を反時計方向に加え角度を増やしていく．新しい力センサレスパワーアシスト制御を行いこの実験を行った結果を図 10 に示す．

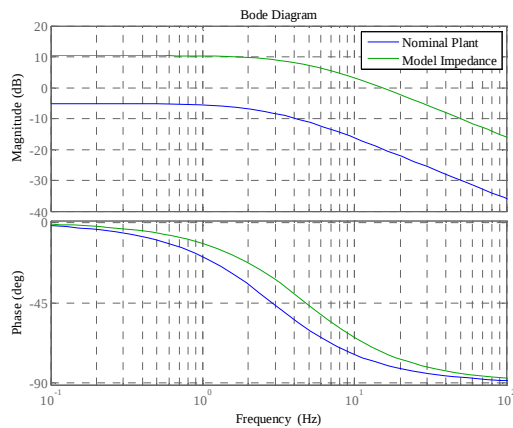


図 9 ノミナルプラントと

モデルインピーダンス

赤い点線が推定された外部力, 緑の実線は提

案している可変ゲイン  $K$ , 青い破線は可変ゲインによってフィルタリングされた外部力, 水色の実線はこの制御結果得られたロボットアームの回転角である．

実験開始後 2 秒辺りで人間が力を加え, ロボットアームを回転させる．角度が増える方向に人間の力を加えて回転させている．そして, 5 秒経過時に手をロボットから離す．

$0\text{rad}$  以外の  $\theta$  は常に重力の影響を受けて,  $0\text{rad}$  に戻ってしまう．しかし提案手法に 5 秒から 8 秒の間, 人間の操作力がなくても measured angle は一定に保たれている．これは可変ゲイン  $K$  が 0 になり, 図 7 の内側の外乱オブザーバループだけが働き重力の影響を打ち消していることを意味する．

実際に緑の実線で表されている可変ゲイン  $K$  の値を確認すると 5 秒から 8 秒の間 0 になっている．

8 秒以降また人間が力を入れてロボットアームを  $0\text{rad}$  に戻している．4.1 節で説明したように外力の数値を  $-0.6(\theta$  が正であるときの

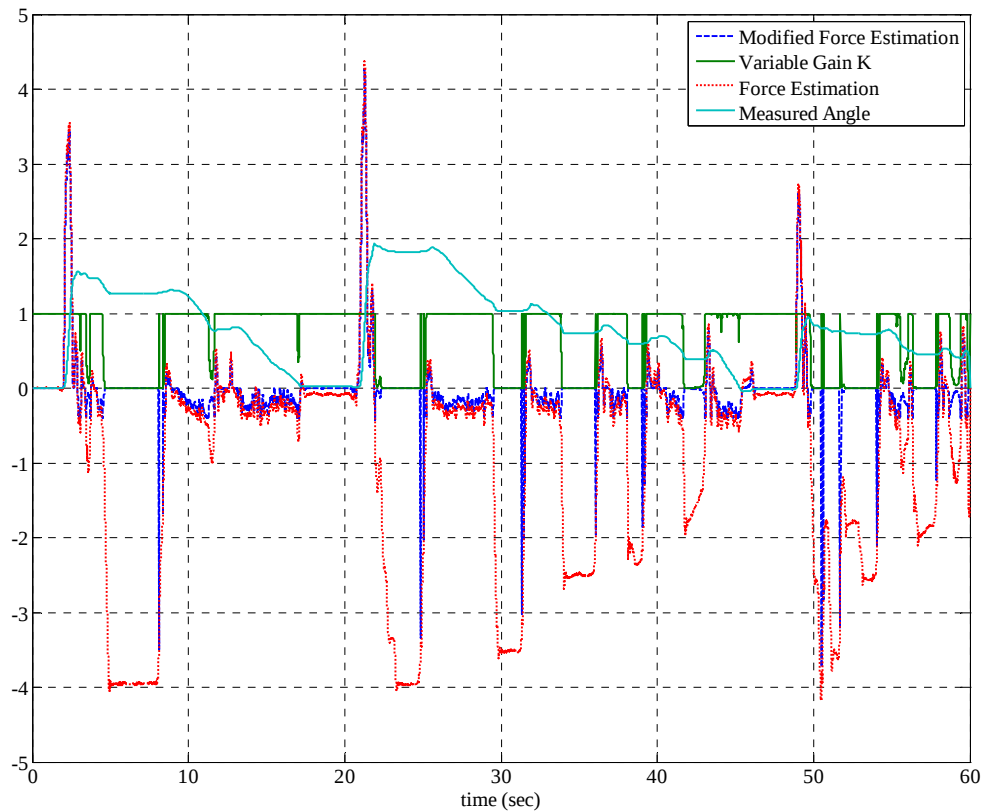


図 10 提案手法による実験結果

$d_n$ )としているため、操作者がこれを越えない力を加えると  $K$  は 1 になり外部パワーアシストループがオンになることで角度  $\theta$  が動くようになる。

20 秒から 45 秒までは最初に力を加え  $\theta$  を  $90^\circ$  近く回転させた後、徐々に  $\theta$  を 0rad に戻していく実験を行っている。その途中の 23,30,34,38 秒では急にロボットアームから手を離している。

実験結果から、手が離れている間は提案手法の早い判断によってパワーアシストがオフになり、 $\theta$  が止まっていることがわかる。また、 $\theta$  が止まった後、人間がまた小さい力で  $\theta$  を重力と同じ方向に動かそうとするとその力に対してはアシストがオンになり  $\theta$  が 0rad に戻される。このオン・オフの判断は可変ゲイン  $K$  の動きを見るとよくわかる。

この実験から式(3)で提案している外力判断が正しく働いていることがわかる。

## 5. 結論

ここで提案した外力判断機構を入れた力センサレスパワーアシスト制御は様々な応用が考えられ、たとえば電動パワーアシストドアを一例に考えることが出来る。

図 11 はドア開閉動作時の人間操作力の特徴

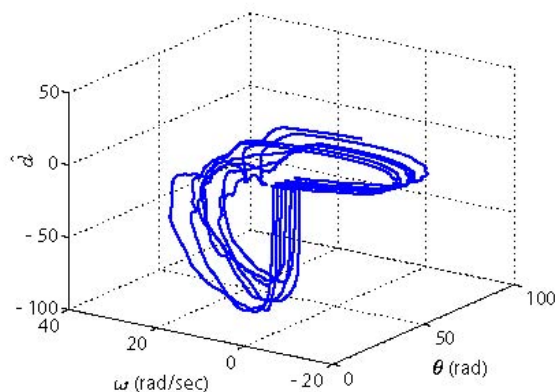


図 11 一般的なドア開閉動作に必要な力を、同じく  $x$  軸をドアの回転角度、 $y$  軸がその角速度、 $z$  軸に人間が実際要れた力を力センサで図った値をもって信号空間上に表したのである。

十数人の複数の人による実験結果であるこの図からも、人間は普段特定の力パターンを用

いて何かの操作をすることが多く、それらは対象の速度や位置によってパターン化される力であることがわかる。このドアはまさに 4 節で用いた外力の判断基準が適用できる対象で、人間が望んでいるドアの開閉パターンに関する力なのかそうでないのかをこの信号空間の軌跡に基づき判断できる。

このように、提案する外力信号空間による外力判断の適用範囲は多く、それらに本稿で提案したような知能化センサレスパワーアシスト制御を適用することで従来力センサレスパワーアシスト制御が適用できなかった領域にも FSPAC が利用できるようになるはずである。

## 参考文献

- [1] S. Oh and Y. Hori: Sensor free power assisting control based on velocity control and disturbance observer, Proc. ISIE, June, 2005. vol.4, pp. 1709- 1714
- [2] S. Katsura, K. Ohnishi: Human Cooperative Wheelchair for Haptic Interaction Based on Dual Compliance Control, IEEE Trans. IE, vol. 51, no. 1, pp. 221-228, Feb. 2004.
- [3] 原 進、山田 陽滋：サーボ自動搬送から力覚センサレスインピーダンス制御による手動位置決めに切り替わる制御手法、平成 19 年電気学会産業計測制御研究会、IIC-07-73、2007.
- [4] S. Oh and Y. Hori: Generalized discussion on design of force-sensor-less Power Assist Control, Proc. AMC, Mar., 2008, pp.492-497
- [5] T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi: Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator, IEEE Trans. IE, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, Apr. 1993.
- [6] 呉 世訓、堀 洋一：入出力の確率的処理を用いた外乱オブザーバインテリジェント化の一提案、電気学会産業計測制御研究会、IIC-08-110、2008.