

外力信号空間を利用した智能化力センサレスパワーアシスト制御

正 員 呉 世訓* 上級会員 堀 洋一*

Intelligent Force Sensor-less Power Assist Control based on External Force Signal Space

Sehoon Oh*, Member, Yoichi Hori*, Senior Member

This paper proposes a novel force sensor-less power assist control that can change the extent of power assistance according to the property of external forces. The proposed control design enables a motor to assist only human force suppressing the gravity's effect. We use the signal space spanned by the observed external force and states of a system to distinguish the forces to be assisted from other external forces. One-armed robot is used for experiments of the proposed method and the result verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

キーワード：力センサレスパワーアシスト制御，外乱オブザーバ，智能化，外力判断，パワーアシスト制御器設計，人間親和型モーションコントロール

Keywords: force sensor-less power assist control, disturbance observer, intelligence, external force distinction, power assist control design, human friendly motion control

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。

従来のこの問題への対処は、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⁽⁶⁾。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、それがアシストされないようにする判別アルゴリズムが提案されていない。

そこで、本稿では外乱オブザーバの観測外力値以外にシステム自体の速度や位置などの状態を利用することで、現在観測している外力の性質を特定し、それをアシスト制御に反映できるアルゴリズムを提案する。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智能化力センサレスパワーアシスト制御が可能になる。

まず 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重力下での問題点

2.1 力センサレスパワーアシスト制御器設計 まず，力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。

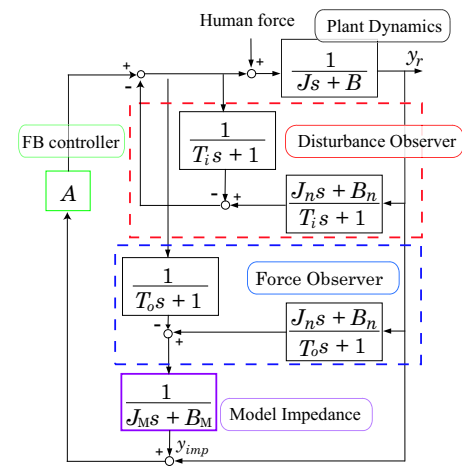


Fig. 1. Structure of Force Sensor-less Power Assist Control

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。

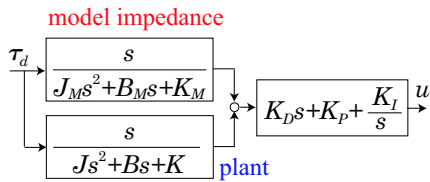


Fig. 2. Feedback Controller in Velocity Control Type

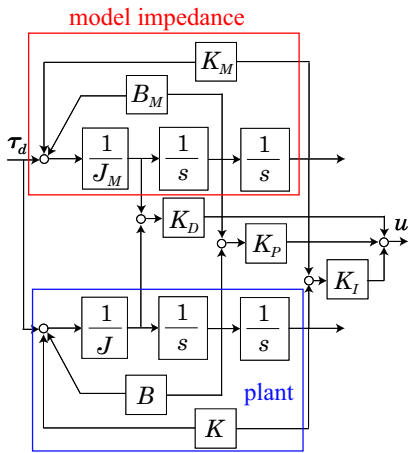


Fig. 3. Feedback Controller in Compliance Control Type

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。

この力センサレスパワーアシスト制御の特徴は、力センサを用いないで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 アシスト対象でない力環境での問題点 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）。

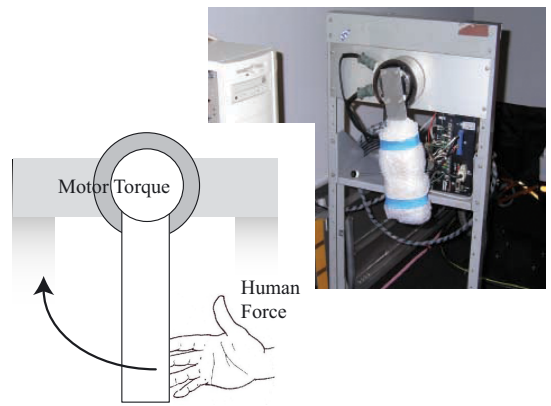
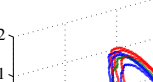


Fig. 4. One Arm Robot under the Influence of Gravity

しかし、摩擦力はこのような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いと FSPAC システム全体を不安定化する傾向もある。この特徴は 4.2 節で実験をもって示す。この実験と考察から、重力は何らかの手法をもってアシストしない力として区分してやる必要があることがわかる。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⁽⁵⁾。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にする。観測した外力、そして制御対象プラ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。



A 3D plot showing trajectories in the (ω, θ, δ) space. The vertical axis is δ (ranging from -2 to 2), the horizontal axis is ω (ranging from -5 to 5), and the depth axis is θ (ranging from 0 to 2). Three trajectories are shown: a green one, a blue one, and a red one. They all start near $(\omega, \theta, \delta) = (0, 0, 0)$ and evolve into complex, intertwined loops. A red dot is visible on the red trajectory.

A 3D plot showing the dithering signal d as a function of θ (rad) and ω (rad/sec). The vertical axis is d , ranging from -2 to 2. The horizontal axes are θ (rad) and ω (rad/sec), both ranging from -4 to 2. The plot displays two distinct, intertwined closed loops: a red one and a blue one. The red loop is generally higher in the d dimension than the blue loop. The axes are labeled ω (rad/sec) and θ (rad) at the base, and d on the vertical axis.

The diagram illustrates the proposed adaptive impedance control system. It consists of several interconnected blocks and signal paths:

- Human force** (u) is the input signal.
- Plant Dynamics** block: $\frac{1}{Js + B}$. It receives u and outputs y_r .
- Disturbance Observer** block: $\frac{1}{T_i s + 1}$. It receives u and outputs a signal to the **Force Observer**.
- Force Observer** block: $\frac{J_n s + B_n}{T_i s + 1}$. It receives the output from the Disturbance Observer and outputs a signal to the **Model Impedance** block.
- Model Impedance** block: $\frac{1}{J_M s + B_M}$. It receives the output from the Force Observer and outputs y_{imp} .
- FB controller** block: $\frac{1}{T_o s + 1}$. It receives y_{imp} and outputs a signal to the **Plant Dynamics** block.
- Adaptive Gain** (K): A red triangle block that receives inputs from the **FB controller** and the **Force Observer**, and outputs a signal to the **Plant Dynamics** block.

The overall system is designed to adaptively control the impedance of the plant in response to human force and disturbances.

4・2 ワンアームロボットによる外力判断実験 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 の荷物をつけた。まず提案手法の外力判別を行わなかった時に実験結果を図 8 に示す。 y_{lim} は図 7 に示されている規範速度、torque は

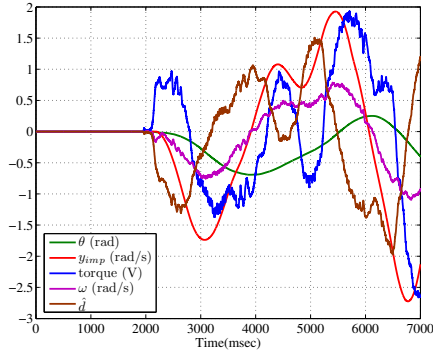


Fig. 8. Experimental Result without Proposed Method

アシスト力と内部外乱オブザーバフィードバック値が合計された最終制御入力値 u を指令値で表している。褐色の観測外力と青色の制御入力に注目すると、2秒で人間の操作力 $\hat{d}$ がアームの負の方向に動かすために働く、最初の3秒までは内部がイランオブザーバによる外乱抑制トルクが出るが、3秒からはアシスト力に変わる。しかし、その3秒にアームを押さえていた手から力を抜いた結果、すぐ大きな負の外力が働くことになり、それをアシストするためのトルクが生じる。4秒後からの y_{imp} に注目すると、大きな反対方向（正）の重力の影響により正の方向の規範速度が大きく作られていることがわかる。

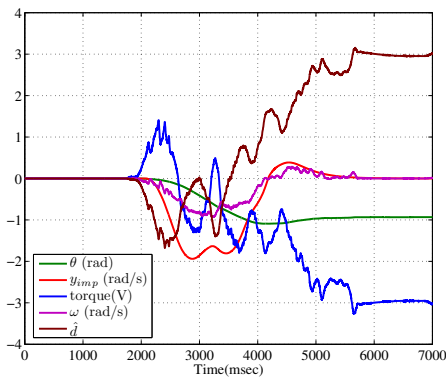


Fig. 9. Experimental Result with Proposed Method

図9は提案手法を適用した時の実験結果である。同じく2秒から人間がアームを持ち上げ、3秒にその手を離した。その後3秒、5秒後に手を完全に離しているが、負の外力がかかっているにもかかわらず y_{imp} が図8のような大きな反対方向の規範速度を作っていない。これは提案する可変ゲイン K が反対方向の力を出す重力を判断して0値になったからである。

どちらの実験でもアシスト力開始の遅れが目立つ。パラメータを調整することによってより素早いアシスト制御を得られることができてと思われる。

5. 結 論

図10はドア開閉動作時の人間操作力の特徴を、同じく x 軸をドアの回転角度、 y 軸がその角速度、 z 軸に人間が実際に要し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。十数人の複数の人による実験結果であるこの図から

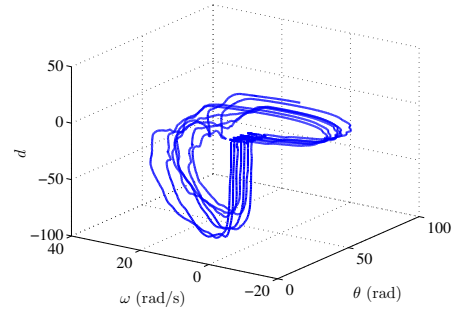


Fig. 10. Human Forces in Opeartion of Door

も、人間が普段特定動作をやっているときには、対象の速度や位置によってパターンを持った力の生成をしていることがわかる。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。

文 献

- (1) S. Oh, Y. Hori, "Sensor free power assisting control based on velocity control and disturbance observer", in *Proc. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 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. Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 221-228, Feb. 2004.
- (3) S. Hara, Y. Yamada, "A Control Method Switching from Servo Automatic Transfer to Force Sensorless Impedance Control Manual Positioning", in *IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-07-73, 2007.
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, Y. Hori, "Generalized discussion on design of force-sensor-less Power Assist Control" in *Proc. Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Mar., 2008, pp.492-497
- (5) S. Oh and Y. Hori, "Development of Intelligent Disturbance Observer based on Statistical Recognition using Input-output Measurements", in *IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-08-110, 2008
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.
- (6) T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi, "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, Apr. 1993.