

可変インピーダンスを用いたセンサレスパワーアシストロボットの制御

学生員 関 弘 和 (東京大学)
正 員 堀 洋 一 (東京大学)

Control of sensorless power assist robot using variable impedance

Hirokazu Seki, Student Member, Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

Japan is now a serious aging society and this problem will be more serious in the near future. Therefore, engineering support for aged people is required. As an important example of such support, new control method of power assist robots which may be useful in caring aged people and assisting their work is presented in this paper. This control method is based on the robust position servosystem, and power assist control without force sensor can be realized using disturbance observer. In addition, variable impedance control designed by root locus enables us to operate the robot more naturally and human-friendly. Some experiments using 2-axis robot show the effectiveness of the proposed method.

キーワード：福祉制御工学、介護支援、ロバスト制御、センサレスパワーアシストロボット、可変インピーダンス

1. はじめに

我が国はすでに深刻な高齢社会を迎え、さらに2015年には4人に1人が65才以上の高齢者になると予想されている⁽¹⁾。諸外国と比較しても特に著しいこの高齢化現象は、少子化現象とも合間って、医療・介護の容量、高齢労働者の増加、社会全体の活気などさまざまな問題を引き起こすと考えられる。このような状況の中、高齢者に対する工学的な立場からの支援が必要不可欠である。

我々は、さまざまな工学分野の中でも特に、計測・制御の技術を基盤として高齢者や障害者を支援することを目指す「福祉制御工学」という分野を提唱している。安全性、使いやすさ、安価、ロバスト性をキーワードとして取り組んでおり、本稿で述べるパワーアシストロボットの研究もこれに基づくものである。これまでに、一人暮らしの高齢者の部屋をカメラでモニタリングし異常動作を検出するという、高齢者モニタリングシステムの基礎研究なども行っている⁽²⁾。

ロボット技術を用いた支援は高齢化問題を解決する可能性をもつ一つの手段である。これまで介護ロボットなど、いわゆる福祉ロボットとよばれるものの研究が行われてきたが、それらのほとんどははまだ実用化に至っていない。その理由として、コストや安全性、また本当に介護の場面で要求されるものであるか、役に立つものであるかという点にも課題があると考えられている。本研究では、高齢者を介護する動作を補助したり、あるいは高齢労働者の作業を補助するものとして期待されるパワーアシストロボットに注目し、これまでの

パワーアシスト技術において考えられてこなかった視点から、新しい制御手法について提案する。

2. パワーアシストロボットの定義と用途

2.1 パワーアシストの定義 パワーアシストとは、「人が作業・動作を行う場合に、その能力を増大させる、あるいは状況に適応させること」と定義できる⁽³⁾。特に高齢者や障害者の支援を考えた場合、その目的はQOL(Quality of Life)の向上、つまり生活レベルでの動作・行動の支援と言える。生活支援を行う上で、自立支援と介護支援という二つの大きな立場がある。前者は、高齢者や障害者が自立して日常生活動作をすることを支援するものであり、後者は、介護の場面で介護者の負担を軽減するための支援であり、介護者不足を補うことにもつながる。これらの生活支援においては、結果としては以下のことを期待している。

不可能であった作業・動作を行うことができる。

作業・動作を楽に行うことができる。

2.2 パワーアシスト装置への要求事項 パワーアシスト装置を考える場合の要求事項は以下の2つである。

<第1次的要求>：力の増幅、動作の補助

これはパワーアシストそのものの実現であり、その実現方法や、人間・ロボットの系の安定性が問題となる。

<第2次的要求>：安全性、安心感、操作性、使いやすさ

第1次的要求ほど具体的な形では現れないが、それだけ考慮されにくいものと言える。しかし、パワーアシスト機器を実際に使用できるものにするためには、第1次的要求よりもむしろ重要である。

2・3 これまでの関連研究と問題点 これまで、特に機械工学の分野からパワーアシストロボットの研究がなされてきた。Kazerooni⁽⁴⁾ はマスタスレーブ構造ではなく一つのアームだけで構成される装置を用いて、人間の力を増幅させるマニピュレータ“extender”を開発し、人間、extender、環境の三者を含めた制御系を解析した。しかし、力の増幅率と制御系の安定性との間にトレードオフが生じ、両者を同時に指定できないことが示された。これに対し小菅ら⁽⁵⁾ は仮想ツールの概念を用い、人間や環境の特性がわからない場合でも、増幅率とロボットの操作性を同時に指定できる制御系を構成した。

また林原ら⁽⁶⁾ は、アクチュエータの飽和を避けるために、重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する手法を提案した。また永井ら⁽⁷⁾ は、インピーダンス制御の目標値を人の力に応じて変更することで動作を補助する手法を提案し、これに基づいて上腕を補助する8軸ロボット装具を開発している。さらに、具体的な福祉機器への応用として、田島ら⁽⁸⁾ は、おむつを交換する際に足を持ち上げる動作を補助するための「おむつ交換ロボット」を提案している。

これまでの研究のほとんどで、人の加える力と環境への力を測るために力センサを二つ使用しているが、福祉機器への応用を考えた場合、コストなどの理由からできるだけセンサを用いないことが望まれる。また、ロバストな制御系を考察することがパワーアシストロボットのさらなる安全性と信頼性につながるとも考えられうる。本研究では、これまでのパワーアシスト研究であまり考察されなかったこれらの点に着目し、新しいパワーアシスト制御法を検討する。

2・4 本研究で扱うパワーアシストの形態 本研究では、図1のように(a)人間-ロボット-環境、(b)人間-環境-ロボット、のような位置関係を想定し、人間が出した力に対してロボットが動いて動作を補助するかを考える。福祉への応用場面としては、介護者が患者を抱き上げる動作の補助、高齢労働者の作業の補助などがあてはまる。

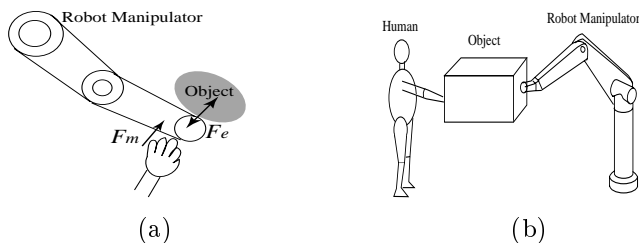


図1 パワーアシストロボットの実現例

Fig. 1. Realization of a power assist robot

本手法では力センサを用いておらず、コスト面や構造面で非常に意義がある⁽⁹⁾。また、センサレスにしたことにより生じる安定性の問題にも注目し、その設計方法を提案する。

3. センサレスパワーアシスト制御手法

3・1 ロバストな位置制御系 本手法で制御系の中に内包されるロバスト位置制御系について述べる。ここでは、目標値応答と外乱抑圧特性を独立に指定できる2自由度制御

系⁽¹⁰⁾を用いる。このような位置制御系を基本に据えることで、力制御などマニピュレータに要求されるほとんどすべての制御を統一かつ容易に実現できることが示されている⁽¹¹⁾。

2自由度制御系は図2(a)のような構成をしており、コントローラ $C_A(s)$, $C_B(s)$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \cdot \frac{Q(s)}{1-Q(s)} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_B(s) = \frac{G_{ry}(s)}{1-G_{ry}(s)} \cdot \frac{1}{P_n(s)} \cdot \frac{1}{1-Q(s)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r は指令値、 y は出力、 d は外乱、 ξ は観測雑音、 P_n はプラントのノミナルモデル、 $Q(s)$ は自由パラメータ、 $G_{ry}(s)$ は目標値応答特性の指定値、 q は関節角度を表す。また、ロバスト性の指標である感度関数 $S(s)$ 、補感度関数 $T(s)$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$S(s) = (1 - G_{ry}(s))(1 - Q(s)) \dots\dots\dots (3)$$

$$T(s) = 1 - S(s) \dots\dots\dots (4)$$

自由パラメータ $Q(s)$ はこの両者にもたせるべき周波数特性であり、図2(b)のようなローパスフィルタにする。

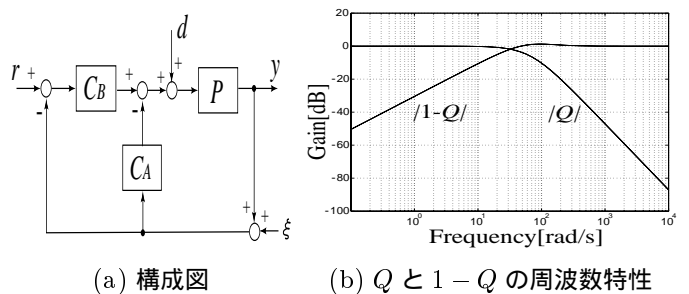


図2 2自由度ロバストサーボ系

Fig. 2. Two degrees of freedom robust servosystem

各関節にこの2自由度ロバスト制御を施して干渉力やパラメータ変動を抑圧することにより、各関節を非干渉化してロボットを制御することができる。

3・2 外乱オブザーバを用いた外力の推定 本研究では外乱オブザーバを用いて外力を推定し⁽¹²⁾、センサレスパワーアシストを実現する。式(5)のように、外乱オブザーバの出力 τ_d から干渉力 τ_{int} 、摩擦 $F + D\dot{q}$ 、慣性変動項 $\Delta J(q)\ddot{q}$ などを差し引くことで外力 τ_{ext} を求める。

$$\tau_{ext} = \tau_d - (\tau_{int} + F + D\dot{q} + \Delta J(q)\ddot{q}) \dots\dots\dots (5)$$

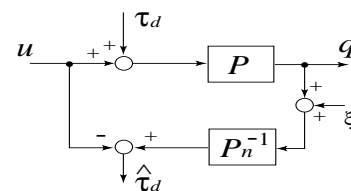


図3 外乱オブザーバを用いた外力の推定

Fig. 3. Estimation of the external force τ_m by disturbance observer

外力推定機構の構造は図3のようになる。 u は制御入力である。ここで、干渉力などは無視し、摩擦力 τ_f だけを考慮すると、人が与える力の推定値 $\hat{\tau}_m$ は次の式で表される。

$$\hat{\tau}_m = Q_1 \hat{\tau}_d - \tau_f \dots\dots\dots (6)$$

$$\hat{\tau}_d = \left(\frac{1}{P_n} - \frac{1}{P}\right)\theta + \frac{1}{P_n}\xi + \tau_d \dots\dots\dots (7)$$

摩擦力を含めた各外乱は、等角速度運動や角加速度運動により同定できることが示されている⁽¹³⁾。

3.3 インピーダンス制御を用いたパワーアシスト法
本研究ではインピーダンス制御を用い、人間の与えた力に応じて適当な位置指令を与えることでパワーアシストを実現する。これは位置制御ベースの手法と言える。

式(6)(7)で推定した外力 $\hat{\tau}_m$ に基づき、式(8)に示すインピーダンス制御を行うとき、制御系の構造は図4のようになる。ただし、剛性係数 $K = 0$ としている。

$$q_{adj} = C_I \hat{\tau}_m = \frac{1}{Ms^2 + Ds} \hat{\tau}_m \dots\dots\dots (8)$$

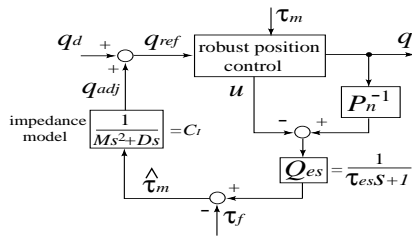


図4 センサレスパワーアシスト法の構成図

Fig. 4. Sensorless power assist control system

このとき、与える外力 τ_m から位置出力 q までの伝達関数は以下ようになる。

$$\frac{q}{\tau_m} = \frac{G_{ry} C_I Q_{es}}{1 + \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_n}\right) G_{ry} C_I Q_{es}} \dots\dots\dots (9)$$

ここで2軸ロボットを用いて実験を行う。1軸に $M_1 = 0.05, D_1 = 0.1$ 、2軸に $M_2 = 0.3, D_2 = 1.2$ を与えロボットの先を手で押して力を与えると、図5のような挙動を示す。

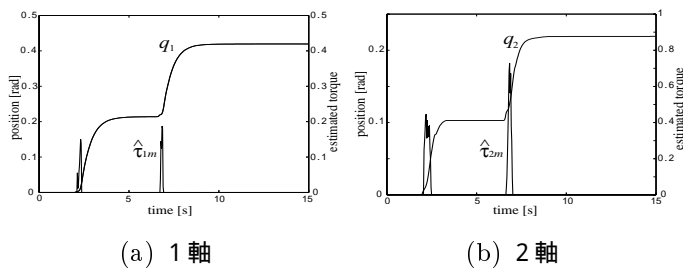


図5 外力と位置の関係

Fig. 5. Relationship between the imposed torque and position

与えた力に応じて関節角が変化しており、センサレスインピーダンス制御が実現できていることがわかる。しかし、このような一定のインピーダンスでは、協調作業や動作の補助において、立ち上がりや移動中の速度調節、位置決めなどがうまくできない、つまり操作性が良くないと言える。

4. インピーダンスの可変制御によるパワーアシスト法

4.1 インピーダンスと操作性の関係 インピーダンス制御を用いたパワーアシスト制御、協調制御において、式(10)のインピーダンスパラメータと操作性の関係について、これまでいくつか議論がなされてきた。

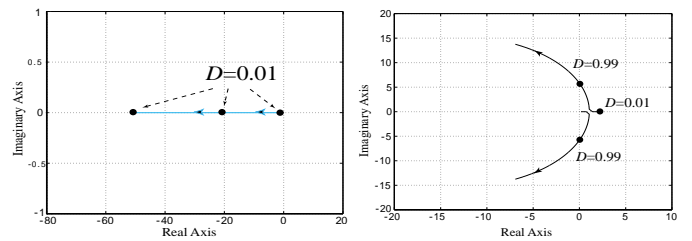
$$F = M\ddot{x} + D\dot{x} \dots\dots\dots (10)$$

慣性 M の大きさは立ち上がりの速さに対応し、 M が大きいほど立ち上がりが速い。一方、粘性 D は動きの大きさに対応し、 D が大きいほど大きく動く。

Ben-Lamineら⁽¹⁴⁾はパワーアシストや協調作業において、慣性 M と粘性 D が人間との接触における感性に大きく影響を及ぼすことを示し、アンケートをとることでその感性評価を行った。さらに山田ら⁽¹⁵⁾は、作業過程を起動、移動速度の調整、位置決めの中の三つのPhaseに分け、それぞれのPhaseに適するように M と D を変化させることで操作感覚や作業効率が良くなることを示した。またIkeuraら⁽¹⁶⁾は、速度によって D を変えることで、応答が速く、目標位置で振動もしない安定な協調作業を実現した。

4.2 根軌跡を用いたプラント変動に対する安定性の解析

本研究では、患者の抱き上げなど実際の介護動作を想定して制御系を設計することを目指す。ここで、ロボットに患者の体重がかかることをプラントの変動とみなし、式(9)の伝達関数について考察する。図6はプラント変動のある場合とない場合の根軌跡を示したものである。プラント変動がない場合($\frac{1}{Js^2 + Bs} = \frac{1}{J_n s^2 + B_n s}$)はインピーダンスの値によらず安定であるが、慣性のノミナル値が3倍になった場合($J_n = 3J$)は、小さいインピーダンスに対して極が右半平面に存在し、系が不安定になる。また、虚軸に近い極では応答が振動的になることから、これらを目安としてインピーダンスパラメータの設計に用いるべきである。



(a) プラント変動なし
($J_n = J, M = 0.3$)
(b) プラント変動あり (虚軸付近の根のみ表示)
($J_n = 3J, M = 0.3$)

図6 粘性 D を可変ゲインとした根軌跡

Fig. 6. Root locus with changing viscosity D

これにより、例えば患者が急にロボットから離れるような動きをした場合に安定性の問題が生じると言える。つまり、操作性を考慮してインピーダンスを可変にする場合の設計指針として、このような慣性変動による安定性の意味で、パラメータを変化させる範囲が限られることがわかる。

4.3 インピーダンスの設計手法 ここで、前述のインピーダンスパラメータ M, D の影響を考慮して、より自然な、抵抗感のないパワーアシストを実現する。

実際の介護動作を想定した場合、立ち上がりや動作そのものは速くなくてもかまわない。そこで、慣性 M はそれほど小さくない値に固定する。一方、人が加える力ができるだけ小さいこと、位置決めがある程度できることが求められる。そこで、粘性 D の値は速度の大きさによって変化させる。速度が小さいときは D を大きく、速度が大きいときは D を小さくすることでそれらを実現する。

$$\begin{cases} F = M\ddot{q} + C_1\dot{q} & \dot{q} < v_0 \\ F = M\ddot{q} + C_2\dot{q} & \dot{q} \geq v_0 \end{cases} \quad (11)$$

実験にはロボットの1軸だけを用い、2軸はフリーにして人が手でもつ部分として利用した。図7,8は、一定のインピーダンスを用いた場合と可変インピーダンスを用いた場合に、ある目標位置 q_r に位置決めしようとしたときの挙動の比較を示す。ここで、 $q_r = 0.7[\text{rad}]$, $M = 1.0$, $D_1 = 0.8$, $D_2 = 0.1$, $v_0 = 0.1[\text{rad/s}]$ とした。

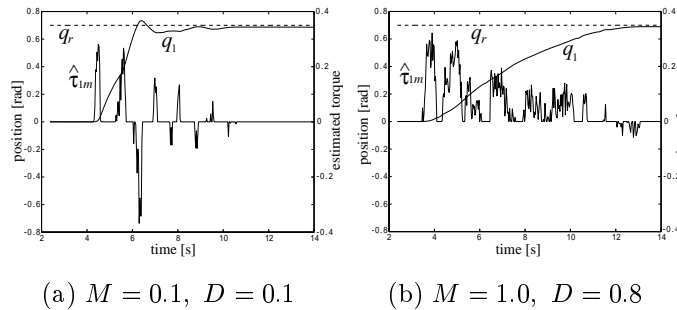


図7 一定のインピーダンスを用いた実験結果

Fig. 7. Experiment result using constant impedance

図7(a)では粘性が小さいため、少しの力で大きく動くが、位置決めをするのが困難である。逆に図7(b)では位置決めはできるが、大きな力が必要であり、要する時間も長い。

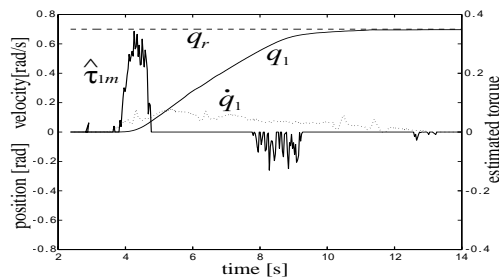


図8 可変インピーダンスを用いた実験結果

Fig. 8. Experiment result using variable impedance

インピーダンスを可変にすると、余分な力も必要なく、また位置決めも容易にでき、より自然で抵抗感のないパワーアシストが可能となる。本研究では速度に応じて変化させる手法を用いたが、インピーダンスの値やその変化のさせ方は、介護動作の補助、労働の補助、協調作業などそれぞれの場面、状況に応じて適切に設計することになると考えられる。

5. まとめ

本論文では、計測・制御の技術を基盤にして高齢者や障害者を支援する「福祉制御工学」における一研究として、患者の抱き上げ動作や高齢労働者の補助、協調作業などに有効となるパワーアシストロボットの制御手法について研究を行った。

外乱オブザーバにより人が加えた力を推定し、ロバストサーボ系を内包したインピーダンス制御を行うことでセンサレスパワーアシスト制御を実現した。また、ロボットに患者の体重がかかることをプラントの変動とみなし、根軌跡を用いた安定な制御系設計法を示した。さらに、速度に応じてインピーダンスを可変にすることで位置決めなどの操作性を向上し、より自然なパワーアシストが実現できることを実験により示した。

設計の上で、患者からの負荷、つまりプラント変動の大きさを知る必要があるが、これは慣性モーメントの同定を行うことで可能となる。また患者からの負荷を環境からの力としてセンサで計測し、制御系を設計することも可能である。さらに、力の増幅率は考慮しなかったが、操作性とともにパワーアシスト制御に必要な事項であり、これらは今後の課題となる。

文献

- (1) 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口 (平成9年1月).
- (2) H. Seki and Y. Hori: "Detection of abnormal human action using image sequences", *Proc. of International Power Electronics Conference -Tokyo 2000*, Vol. 3, pp.1272-1277 (2000).
- (3) 永井, 中西: "パワーアシスト機能を有する福祉ロボット・アシスト機器の機構と制御", *システム/制御/情報*, Vol. 44, No. 12, pp.688-695 (2000).
- (4) H. Kazerooni: "Extender: A case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals", *Proc. of IEEE International Workshop Robot and Human Communication*, pp.10-20 (1993).
- (5) 小菅, 藤澤, 福田: "仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御", *機械学会論文集 C*, Vol. 60, No. 572, pp.1337-1343 (1994).
- (6) 林原, 谷江, 荒井, 渡嘉敷: "パワーアシスト装置の研究 (第2報:重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の多自由度システムへの適用)", *機械学会論文集 C*, Vol. 65, No. 629, pp.198-205 (1999).
- (7) K. Nagai, I. Nakanishi, H. Hanafusa, S. Kawamura, M. Makikawa and N. Tejima: "Development of an 8 DOF robotic orthosis for assisting human upper limb motion", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3486-3491 (1998).
- (8) 田島, 斎藤, 田口: "バイラテラルサーボアクチュエータを用いたオムツ交換支援ロボットの研究", *ライフサポート学会予稿集*, pp.93 (2000).
- (9) 谷, 堀: "介護を目的としたパワーアシストロボットの協調制御", *電気学会産業計測制御研究会*, IIC-01-19, pp.109-114 (2001).
- (10) 梅野, 堀: "2自由度ロバストサーボ系の構成とマニピュレータの運動制御への応用", *電気学会論文誌 D*, Vol. 110-D, No. 11, pp.1163-1170 (1990).
- (11) 金子, 梅野, 堀: "2自由度ロバストサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御", *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 7, pp.830-840 (1991).
- (12) K. Ohishi, M. Miyazaki, M. Fujita and Y. Ogino: "H ∞ observer based force control without force sensor", *Proc. of IEEE IECON'91*, pp.1049-1054 (1991).
- (13) 村上, 大西: "外乱オブザーバに基づいた多自由度ロボットの動特性同定法", *日本ロボット学会論文誌*, Vol. 11, No. 1, pp.131-139 (1993).
- (14) M. S. Ben-Lamine, S. Shibata, K. Tanaka and A. Shimizu: "Impedance characteristics of robots considering human emotions", *JSME International Journal, Series C*, Vol. 40, No. 2, pp.309-315 (1997).
- (15) 山田, 佐藤, 鴻巣, 梅谷: "スキルアシストの提案", *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, pp.431-432 (1999).
- (16) R. Ikeura and H. Inooka: "Variable impedance control of a robot for cooperation with a human", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3097-3102 (1995).