

環境変動にロバストな力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 force sensorless power assist robot robust to environmental change

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

In this paper, as one of important support for aged people, we present how to design force sensorless power assist robot assisting aged people's work and carer's motion. The proposed control methods are based on robust control and consider environmental characteristics because many kinds of environments exist in power assist motions. There are two basic methods, position control based and force control based. This paper focuses on force control based method and environmental observer is introduced to make robust against environmental parameter change. It can realize stable power assist motion and desired assist ratio even if environmental characteristic is unknown. Some experimental results show the effectiveness of the method.

キーワード : 福祉制御工学, 力センサレスパワーアシストロボット, 外乱オブザーバ, 力制御ベース法, 環境オブザーバ

1. はじめに

我々は「福祉制御工学」という分野を提唱しており、計測・制御技術に基づく高齢者障害者支援を目指している。これは、我が国がすでに深刻な高齢社会を迎えているという背景もあるが、さらに諸外国も同様の現象が起きつつあるという世界的な背景をも含んでいる。「福祉制御工学」においては、福祉と制御工学を結びつけるいくつかの重要な要素、例えば安全性、使いやすさ、安価、ロバスト性などを抽出し考察を行っているが、本研究もこれに基づくものである。

本研究では、介護動作を補助したり、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、最初にその用途と制御手法に基づいて分類・整理を行う。次に、力制御系をベースとしたパワーアシスト動作の実現手法とその有効性について示すとともに、位置制御をベースとした手法との比較検討も行う。

2. パワーアシストロボットの基本的定義と分類

2.1 高齢者支援のためのパワーアシスト技術 パワーアシスト技術は、様々なケースにおいて高齢者を支援する可能性をもつ重要な要素の一つである。例えば、患者をベッドから抱き上げたり持ち上げたりする場合、工場で働く高齢者が何か重いものを動かすような場合に大変有用である。「パワーアシスト」は人間の能力を増大させる、あるいは力を増幅して楽に作業させることを目的とする動作の支援と定義される。このとき、力の増幅、操作性、安全性などが要求される。

パワーアシスト動作において力を受けるもの(「環境」と呼ぶ)には、患者や重い荷物など様々なものが考えられる。中にはその特性が数学的に容易に表現できるものもあるかもしれ

ないが、ほとんどの環境は複雑な非線形要素をもっているなどして容易に表現できない。パワーアシスト動作を始める前に、その詳細なモデルを同定するのも非現実的である。例えば患者が環境となる場合、その環境特性は患者の姿勢や着ている服などによって変わるはずである。そこで、たとえ環境の正確な特性を知らなくても、どのような環境にもパワーアシスト動作を実現することが求められる。

2.2 パワーアシストロボットの形態 パワーアシスト技術は多くの場面で貢献する可能性をもつため、その形態についても様々なものが考えられる。そこで、実際の用途とその制御手法に基づいてある程度分類する必要性が生じる。

(1) 人間-ロボット-環境接触型 < HRE system >

環境を移動させたり、大きな力を与えて作業するような場合がこのシステムにあたる。ロボットは、人間からの力 F_m (トルク τ_m) に基づいて力 F_e (トルク τ_e) を環境に与える。

(2) 人間-ロボット接触型 < HR system >

このシステムでは、ロボットと環境はほぼ一体となって動き、力は人間-ロボット間にのみはたらくとみなせる。このシステムはさらに以下の二種類に分類される。

(2a) 重力項支配型

患者の抱き上げ、持ち上げ動作では、加速度はそれほど大きくなく、必要な力のうち重力項が大部分を占める。

(2b) 慣性変動型

平面的なロボットを用いて重い荷物を移動させるようなケースがこれにあたる。このとき重力項は含まれないが、ロボットと環境がほぼ一体となり、慣性モーメントが変動する。

図1はこれら三つの基本的形態を表す。

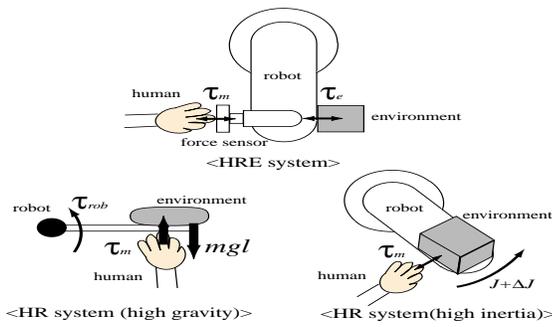


図1 パワーアシストロボットの基本的形態

Fig. 1. Basic forms of power assist robots.

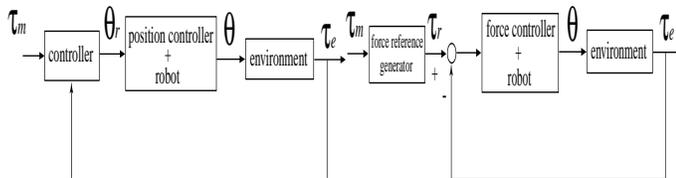
本研究では(1)HRE systemに焦点をあて、特に力制御系をベースとしたパワーアシスト動作の実現を目指す。図1上に示されるような形態で、DDロボットを用いて実験を行う。

2.3 パワーアシスト動作の評価 パワーアシストの一つの大きな目的は、人間に要求される力を減らし楽に動作させることである。これまでの研究例では、操作感や使いやすさについて被験者にアンケートをとることで評価を行うものも多かった⁽¹⁾。しかしここでは、式(1)で定義される評価値Vを用いて数値的にパワーアシスト動作について評価を行う。

$$V = \frac{\int_0^T F_m dt}{x_f - x_0} \quad (1)$$

Tは動作に要した時間、 x_f は最終位置、 x_0 は初期位置である。この評価値Vは、単位距離動作させるのに必要な力積の値を表す。この値が小さいほど、人間は容易に物体を移動させることができる。後ほどの実験でこの評価法を適用する。

2.4 パワーアシスト制御法の分類 二つの基本的な制御手法が考えられる。一つは、人間の力と環境からの力に基づいて位置の規範値を生成する手法である。もう一つは、得られた力の情報から力の規範値を生成する手法である。つまり、位置でアシストするか力でアシストするかである。



(a) 位置制御ベース型 (b) 力制御ベース型

図2 パワーアシスト制御法の構成図

Fig. 2. Configurations of two power assist methods.

前者において、人間の入力する力 F_m (トルク τ_m)と環境からの力 F_e (トルク τ_e)から、ロボットに与えられる位置規範値 θ_r が生成される。これを「位置制御ベース型パワーアシスト法」と呼ぶことにする。図2(a)にその構成図を示す。この手法は、インピーダンス制御等を用いて実現される⁽²⁾。環境との作用力 F_e (トルク τ_e)は直接的に制御されることはないが、位置軌道や操作性などを自由に指定されることが期待できる。

後者においては、 F_m (τ_m)から、ロボットと環境の間にはたらく力の規範値 F_r (トルクの規範値 τ_r)が生成される。これを「力制御ベース型パワーアシスト法」と呼ぶことにする。図2(b)にその構成図を示す。 F_e (τ_e)が直接的に制御されるため、望みの力増幅が正確に実現されることが期待できる。

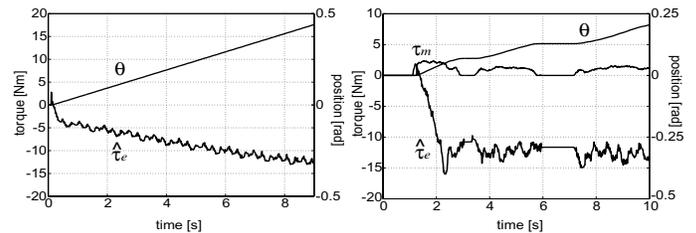
3. 外乱オブザーバを用いた環境作用力の推定

τ_m と τ_e の二つの力に基づくパワーアシスト制御では、それぞれを測定するために二つの力センサが通常用意される⁽³⁾⁽⁴⁾。本研究では、外乱オブザーバ⁽⁵⁾を用いて環境との作用力を推定することで、力センサの数を減らす。これにより、コスト面、構造面、さらにロボットアームのどの部分に環境が接触してもかまわない、など多くの利点が生まれる。

外乱オブザーバはロボットの各軸に含まれる外乱トルクを推定するものであるが、その出力値 $\hat{\tau}_d$ には干渉トルク τ_{int} 、重力項 τ_g 、摩擦トルク、 $F + D\dot{\theta}$ 、慣性変動項 $\Delta J(\theta)\ddot{\theta}$ 、他の外力 τ_{ext} などが含まれる。人間の入力トルク τ_m と環境との作用トルク τ_e は、ロボットにとっては外力と見なされる。そのため、 τ_e は外乱出力値 $\hat{\tau}_d$ から、力センサで測定される τ_m と他の非線形項を差し引くことによって推定される。

$$\hat{\tau}_e = \hat{\tau}_d - (\tau_m + \tau_{int} + \tau_g + F + D\dot{\theta} + \Delta J(\theta)\ddot{\theta}) \quad (2)$$

τ_e を外乱オブザーバによって推定した結果を図3(a)(b)に示す。最初に、特性が剛性係数のみで近似されるシンプルな環境としてゴムを用いる。ロボットに等速運動をさせた場合にゴムとの間にはたらくトルクの推定値 $\hat{\tau}_e$ を図3(a)に示す。この実験結果より、特性はおよそ $K_e = 30[N/rad]$ と表現できる。次に段ボールを環境として用いる。この場合、ロボットとの接触面でのへこみ、重量、地面との間にはたらく摩擦力などが存在し、容易に表現できない特性をもつと言える。図3(b)は、人間の入力トルク τ_m を力センサで測定し、このトルクに基づいてインピーダンス制御を行い段ボールを押したときに推定されるトルク $\hat{\tau}_e$ を示したものである。これらの環境は後ほどのパワーアシスト実験で用いる。



(a) ゴム (b) 段ボール

図3 外乱オブザーバによる環境作用力の推定

Fig. 3. Estimation of the environmental torque.

4. 力制御ベース型パワーアシスト法

上述のように、力制御ベース型パワーアシスト法では環境との作用力が直接的に制御される。この基本手法として、図4に示されるような単純フィードバックを用いた力制御系を考える。ロバスタな位置制御器には2自由度制御系⁽⁶⁾を用いる。

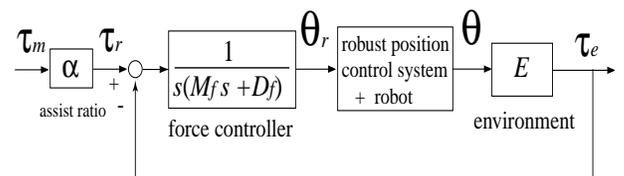


図4 力制御ベース型パワーアシスト法

Fig. 4. Force control based power assist method.

環境のモデルを $D_e s + K_e$ とすれば、力制御器 $\frac{1}{s(M_f s + D_f)}$ により、 τ_r から τ_e までを 2 次系として設計することができる。

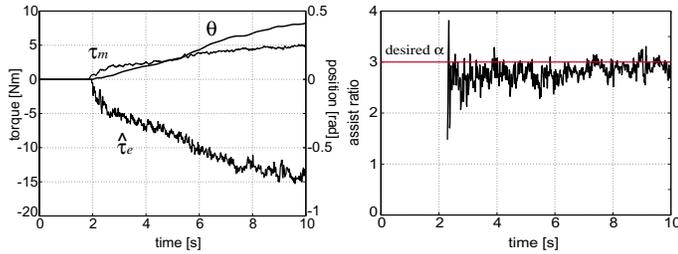
$$\frac{\tau_e}{\tau_r} = \frac{D_e s + K_e}{M_f s^2 + (D_f + D_e)s + K_e} \quad (3)$$

力制御器のパラメータ M_f, D_f は、環境のノミナルモデル D_{en}, K_{en} と目標値応答の時定数 τ_f を用いて計算される。

$$M_f = K_{en} \tau_f^2, \quad D_f = 2K_{en} \tau_f - D_{en} \quad (4)$$

式 (4) から、もし、 $2K_{en} \tau_f - D_{en} < 0$ となるとき、力制御器に不安定極をもちシステムは内部不安定となる。

図 4 のように、人間の入力するトルク τ_m とアシスト率 α から力の規範値 τ_r を生成することでパワーアシスト制御が実現される。単純フィードバックによる力制御ベース型パワーアシスト制御の実験結果を図 5(a)(b) に示す。環境にはゴム ($K_e = 30[N/rad]$) を用い、ノミナルモデルはそれと同じ ($K_{en} = 30[N/rad]$) とした。安定したパワーアシスト動作と望みのアシスト率 $\alpha = 3$ が実現されていることがわかる。

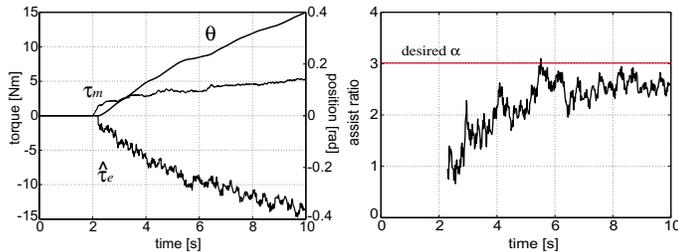


(a) 位置と力の応答 (b) $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ の計算結果

図 5 $K_{en} = 30[N/rad]$ とした実験結果 (ゴム)

Fig. 5. Power assist control using force control based method (gum).

次に、 $K_{en} = 120[N/rad]$ として同様に実験を行った結果を図 6(a)(b) に示す。環境のパラメータ変動により、望みの力応答とアシスト率が実現されないことがわかる。



(a) 位置と力の応答 (b) $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ の計算結果

図 6 $K_{en} = 120[N/rad]$ とした実験結果 (ゴム)

Fig. 6. Power assist control using force control based method (gum).

5. 環境オブザーバを導入したパワーアシスト法

5.1 環境オブザーバの導入 工場での作業など、力の増幅を主目的としたパワーアシスト動作においては、たとえ環境の特性が変動しても望みの力応答とアシスト率が実現されることが要求される。そこで、環境のパラメータ変動に対してロバスト化をはかる「環境オブザーバ」⁽⁶⁾ を力制御ベース型パワーアシスト法に適用する。その構成図を図 7 に示す。

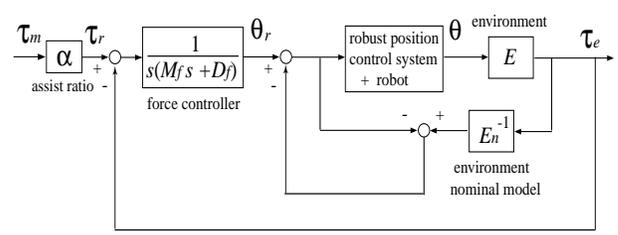
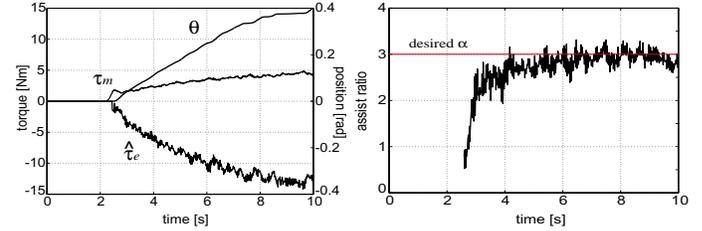


図 7 環境オブザーバを用いたパワーアシスト法

Fig. 7. Configuration of power assist control using environmental observer.

同様にゴムを環境として、実験を行った結果を図 8(a)(b) に示す。環境のノミナルモデルは $K_{en} = 120[N/rad]$ とし、目標のアシスト率は $\alpha = 3$ とした。環境オブザーバを適用した手法では、たとえノミナルモデルと実際の環境特性が異なっても正確なアシスト率が実現できることが示されている。



(a) 位置と力の応答 (b) $\frac{\tau_e}{\tau_m}$ の計算結果

図 8 ゴムを用いた実験結果

Fig. 8. Power assist control with environmental observer (gum).

式 (1) で定義した値 V を用いて評価を行った結果を図 9 に示す。フィードバックのみでは望みの力応答が得られず、環境特性が変動するにつれて必要となる力が大きくなる。一方、環境オブザーバを適用した手法では望みのアシスト率が達成され、たとえ環境特性が変動しても必要となる力はほとんど変わらない。人間に楽に作業させるというパワーアシストの本来の目的に対し、この手法が大変有効であることが示された。

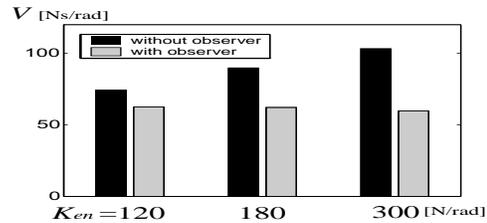


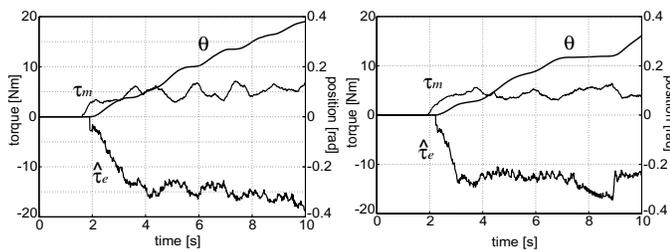
図 9 環境オブザーバの効果

Fig. 9. Evaluation of the effectiveness of environmental observer.

次にこの手法を用いて、複雑な特性をもつ段ボールを押すパワーアシスト動作の実験を行う。環境のノミナルモデルに粘性係数 D_{en} が含まれる、つまり $E_n^{-1} = \frac{1}{D_{en}s + K_{en}}$ となるとき、これはローパスフィルタの形をしており、 $\frac{D_{en}}{K_{en}}$ がその時定数 τ_{en} を表していることになる。

$$E_n^{-1} = \frac{1}{K_{en}} \frac{1}{\frac{D_{en}}{K_{en}}s + 1} = \frac{1}{K_{en}} \frac{1}{\tau_{en}s + 1} \quad (5)$$

環境のノミナルモデルを $D_e = 10, K_e = 800$ とした場合の実験結果を図 10(a) に示す。時定数 τ_{en} が小さいため、位置応答だけでなく人間の入力トルクまでも振動的になっている。位置応答が振動的になることで、人間も安定した力を入力できなくなるためである。



(a) $D_e = 10, K_e = 800$ (b) $D_e = 80, K_e = 800$
 図 10 段ボールを用いた実験結果

Fig. 10. Power assist control with environmental observer (cardboard box).

環境オブザーバの出力は直接位置指令値 θ_r に加えられるため、もし段ボールのような複雑な特性をもつ環境が、振動的な作用力あるいは急激に変動する作用力を発生し、かつ τ_{en} が小さい場合は、位置応答にもその影響が伝わり操作性に悪影響を与えてしまう。 $D_e = 80, K_e = 800$ として τ_{en} をより大きくした場合の実験結果を図 10(b) に示す。ノミナル値を調整することで、より安定なパワーアシスト動作が実現される。

5.2 インピーダンス制御を用いた力制御ベース型パワーアシスト法 これまでの実験結果のように、図 7 の力制御系を用いた場合には、アシスト動作の間、操作者はずっと力を出し続けていなければならない。これを改善する手法の一つとして、図 11 に示されるようなインピーダンス制御を利用した力制御ベース型手法について考える。永井ら⁽⁷⁾はこの考えを計算トルク法のトルク式の一部として利用しているが、ここでは図 7 の力制御系への指令値として用いる。指令値 τ_r はインピーダンス式 (6) によって決定される。

$$\tau_r = M\ddot{\theta} + D\dot{\theta}_e + K\theta_e, \quad \theta_e = \theta - \theta_m \quad (6)$$

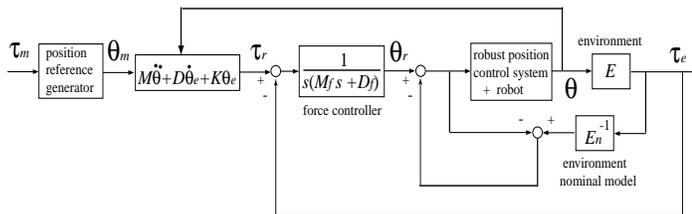
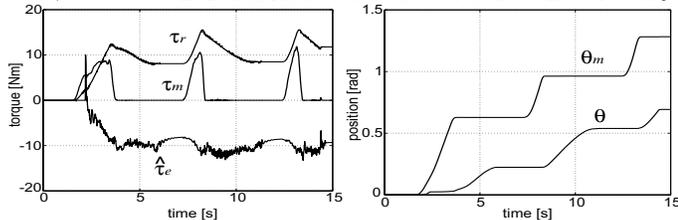


図 11 インピーダンス制御を用いた力制御ベース型パワーアシスト法

Fig. 11. Configuration of force control based method using impedance control.

図 11 中の位置指令生成は、インピーダンス制御式 $\frac{1}{M_m s^2 + D_m s}$ などを用いて実現される。段ボールを環境として実験を行った結果を図 12(a)(b) に示す。動き始めのときのみ力が必要であり、トータルとして必要な力を少なくできることがわかる。



(a) 力応答 (b) 位置応答
 図 12 段ボールを用いた実験結果

Fig. 12. Force control based method using impedance control (cardboard box).

6. 位置制御ベース型手法との比較

我々は位置制御ベース型手法の一つとして、人間側と環境側それぞれにインピーダンス制御を行う双方向インピーダンス制御を提案した⁽²⁾。この手法では、たとえ環境に接触していなくても安定な位置軌道を生成し、またインピーダンスパラメータを調整することで、操作性やおおまかなアシスト率を設定できるという利点がある。一方、環境オブザーバを導入した力制御ベース型手法は、本論文で示したように環境特性の変動によらず正確なアシスト率を実現できるという利点をもつ。

ともに環境特性を知りえなくても安定なパワーアシスト動作が実現され、様々な装置に適用できるという可能性が示された。前者は特に、安全性を最優先する介護動作などで有用となる。患者が暴れた場合でも安全な接触が実現できるからである。一方、力制御ベース法は、力の増幅に重きを置くような作業に大変適していると言える。これらの手法それぞれの特徴と実現したいパワーアシスト動作の特徴、つまり何を優先するかを考慮することにより様々な装置に適用が可能となる。

7. まとめ

本稿では福祉制御工学における一研究として、介護動作や労働補助に有効なパワーアシストロボットの制御手法について示した。高齢者支援への応用について多いに考慮した上で、その用途と制御手法に基づきパワーアシストロボットの形態を整理した。次にその一つの形態について特に力制御ベース型手法に焦点をあて、実験を通してその有効性を実証した。

力制御ベース型手法では環境に与える力を直接的に制御するため、位置制御ベース型手法とは異なる利点が存在する。また環境変動に対するロバスト化をはかるオブザーバを導入したことで、どのような環境に対してもパワーアシスト動作の本来の目的である「楽な作業」の実現が可能となり、新しい評価値を用いてその有効性が示された。本研究ではシンプルな装置による実験を行ったが、実際の介護動作や力作業に対して位置制御ベース型や力制御ベース型手法がどのように適用されるべきかについて実験的検討を行うことを今後の課題とする。

文 献

- (1) 山田, 鴻巣, 森園, 梅谷: “自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案”, 機械学会論文集 C, Vol. 68, No. 666, pp.509-516 (2002).
- (2) 磯, 関, 堀: “負荷特性に応じたインピーダンス制御を用いたセンサレスパワーアシスト法”, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-02-41, pp.149-154 (2002).
- (3) 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).
- (4) 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).
- (5) 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).
- (6) T. Umeno, T. Kaneko and Y. Hori: “Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators”, *IEEE Trans. on Industrial electronics*, Vol. 40, No. 5, pp.473-485 (1993).
- (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).