

## パワーアシスト装置の制御に関する研究

### Study on control system of power assist device

○ 上村貴彦\* 有我祐一\* 渡部慶二\* 村松鋭一\* 遠藤茂\*

\* T. KAMMURA\*, Y. ARIGA\*, K. WATANABE\*, E. MURAMATSU\* and S. ENDO\*

\*山形大学工学部

\*Yamagata University

キーワード: パワーアシスト装置(Power assist device), 安全性(Safety)

連絡先:〒992-0061 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部応用生命システム工学 渡部・村松・有我研究室

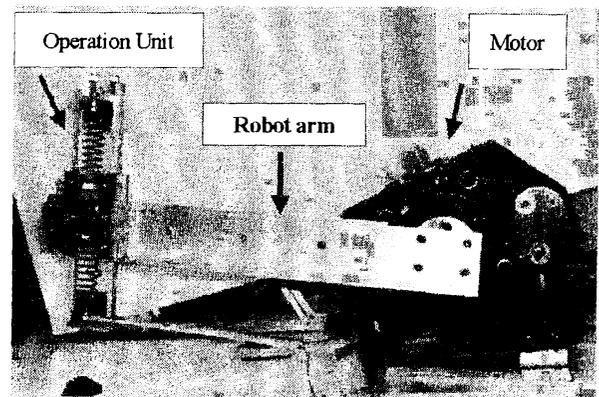
上村貴彦, tell: 090-9927-8490, E-mail: ttt60547@st.yamagata-u.ac.jp

### 1 はじめに

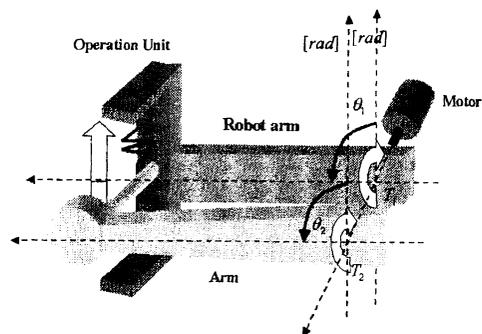
現在, 高齢者介護や重量物運搬時における人の肉体的負担を軽減させ, 作業効率を上昇させる装置としてパワーアシスト装置の研究開発が多くなされている<sup>1)</sup>. その中でも, 操作者の筋電位を利用して装置を動かす方式で開発されているロボットスーツHAL<sup>2)</sup>, 筋肉の硬さを制御に用いる方式<sup>3)</sup>などが有名である. しかし, 操作者の筋電位等の生体信号を装置の指令値に用いることは装置の安全性・汎用性の点で問題があると考えられる.

筋電位等の生体信号は微小であるのでノイズの影響を受けやすいため, ノイズを確実に除去する信号処理が必要になる. また, 生体信号には個人差があるため, 操作者の意思に相当する筋電を信号処理で確実に取り出す必要がある. これらの信号処理無しでは, 装置の動作が不安定になる可能性がある. しかし, この信号処理系は操作者ごとで調節する必要があ

ると考えられる. その場合, 調節に時間を要するため, 1台の装置を誰でもすぐに



(a):The experiment setup



(b):Model.

Fig.1:Power assist device

使えるとは言いがたい。

本研究では、人の操作する力を装置の指令値にすることで現在開発されている装置と同じ効果を持ちつつより高い安全性と汎用性を実現できるパワーアシスト装置の開発を目的とする。この装置は、人の操作力を検出する操作力検出装置とロボットアームで構成され、独自のアルゴリズムによって制御されている。操作力検出装置は、圧力センサとバネを組み合わせた機構となっている。人の操作力はバネを通じて装置に伝わり、その力は、圧力センサによって検出される。検出された操作力とモータの発生トルクに応じて制御を行うことで、人とロボットアームとが負荷を分担して物を持ち上げ、操作者の作業負担を軽減させる。この方式では、人が装置に加える力を直接検出し制御系へと入力するため、筋電位等の生体信号に比べ汎用性と信頼性が向上すると考えられる。

先行研究において著者らは、直動型の装置を用いて提案手法の成立性を明らかにした<sup>4)</sup>。今回は、肘関節運動に対応したロボットアーム型の装置を開発し、提案手法がこの装置でも成立するかどうかをシミュレーションと実機によって検証を行い、その検証結果を報告する。

## 2 制御対象

### 2.1 装置概要

製作した肘関節用パワーアシスト装置の概観とモデル図を Fig.1 に示す。装置は、人が支持する操作部と、重量物を運搬するロボットアーム部とに分けられる。ロボットアームの根元のモータは、人の肘

関節の回転軸とロボットアームの回転軸が同じ軸上に来るように設計されている。ロボットアームに荷物が加わると、制御系によってその荷重を操作者とロボットアームとが分担して支えるように制御される。

### 2.2 操作力検出装置

操作力検出装置は、人の操作力を検出して制御に使用するためのものである。この装置の概観を Fig.2 に示す。この装置は、人が操作する操作レバーと人の操作力をロボットアーム側に伝えるバネと、伝達される力を感知する圧力センサ((株)ニッタ製 Flexi Force)によって構成されている。レバーにはガイドレールが設けられ動作を1軸に制限している。

操作力はバネを介してロボットアーム側に伝えられる。この伝達される力の強弱は、バネの縮み量と1対1で対応している。また、バネの縮み量は、人の腕とロボットアームとの相対角度で決まる。よって、ロボットアームと人の腕との相対角度を制御すれば、人の腕とロボットアーム間の力制御をしていることと等価となる。

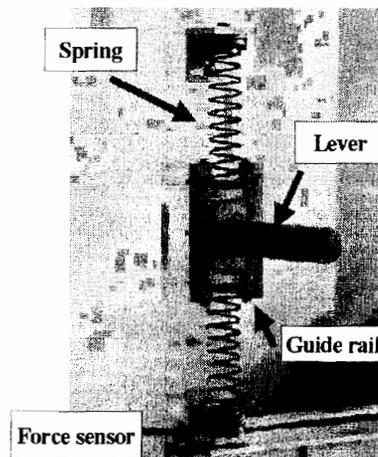


Fig.2: Operation unit

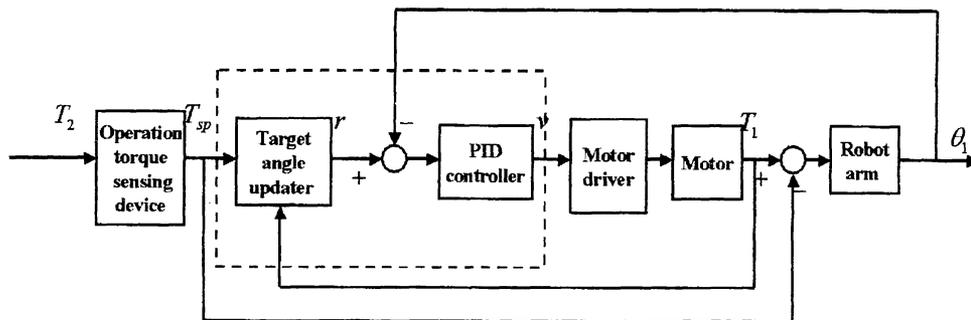


Fig.3:Block Diagram

### 2.3 力学モデル

装置のモデル化を行う。各パラメータの定義は Table.1 に示す。ロボットアームと人の腕の運動方程式を導出するとそれぞれ次式となる。

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = T_1 - D_1 \dot{\theta}_1 - (2m_0 + m_1)gl \sin \theta_1 + T_{sp} \quad (1)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 = T_2 - D_2 \dot{\theta}_2 - m_2 gl \sin \theta_2 + T_{sp} \quad (2)$$

ここでバネの反発力  $T_{sp}$  は

$$T_{sp} = 2Kl(\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

である。バネの反発力は、人の腕とロボットアームの相対角度で決まる。式(1)と(2)から、人の腕とロボットアームとの力の伝達は、バネの反発力によって行われていることがわかる。

## 3 制御系

装置全体のブロック線図を Fig.3 に示す。点線で囲われている部分がこの装置の制御系となる。この制御系は、PID制御器と目標角度更新部によって構成されている。以下、各要素について述べる。

### 3.1 PID 制御器

PID制御器はロボットアームの角度制御を行うために、目標値  $r$  と現在値  $\theta_1$  との偏差  $e$  を 0 にするための制御電圧  $v[V]$  を算出する。

$$e = r - \theta_1 \quad (4)$$

$$v = K_p e + K_i \int e dt - K_d \dot{\theta}_1 \quad (5)$$

Table.1:Definition of parameter

$I_1$	Moment of inertia of robot arm	0.477 [Nm <sup>2</sup> /rad]
$I_2$	Moment of inertia of man's arm	0.022 [Nm <sup>2</sup> /rad]
$D_1$	Damping coefficient of robot arm	0.09 [Nm <sup>2</sup> /rad]
$D_2$	Damping coefficient of man's arm	0.1 [Nm <sup>2</sup> /rad]
$g$	Gravitational acceleration	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$m_0$	Weight	3.75 [kg]
$m_1$	Weight of robot arm	0.5 [kg]
$m_2$	Man weight	1 [kg]
$K$	Spring coefficient	100 [N/rad]
$l$	Half of length of robot arm	0.17 [m]
$l$	Half of length of man's arm	0.17 [m]
$T_1$	Motor torque	- [Nm]
$T_2$	Man torque	- [Nm]
$T_{sp}$	Spring torque	- [Nm]
$\theta_1$	Movement angle of robot arm	- [rad]
$\theta_2$	Movement angle of person's arm	- [rad]

$K_p, K_i, K_d$  の各パラメータはロボットアーム単体を安定且つ良好なステップ応答するように定めた。

### 3.2 目標角度更新部

目標角度更新部は、操作者の操作力  $T_{sp}$  とモータの発生トルク  $T_1$  とを比較し、次式の関係を満たすように目標値  $r$  を更新していく。ここで  $\alpha$  は力の増幅率、 $\delta$  は不感帯として設定された微小な値である。

$$T_1 = (\alpha \pm \delta) T_{sp} \quad (6)$$

目標値  $r$  の更新はFig.5のフローチャートに示した条件判断によって瞬時に行われる。

### 3.3 動作原理

ここでは、動作原理をロボットアームの動作と目標角度更新部の働きの間係を示しながら説明する。

始めに、Fig.5(a)のように人と装置が荷重を分担して停止している初期状態を考える。この時、式(6)を満たす力のつり合いが発生していると、ロボットアームにおける力のつり合いは次式のようになる。

$$T_1 + T_{sp} = (2m_0 + m_1)gl \quad (7)$$

この式より、全ての負荷を人とモータとで分担していることがわかる。

次に、Fig.5(b)のように人の腕を上微小角度  $\Delta\theta$  だけ動かした場合を考える。動かした瞬間は、ロボットアームはPID制御によって初期目標角度に制御されているので動かない。このため、バネが変化量  $\Delta\theta$  に応じた分だけ縮み  $T_{sp}$  が増加し、 $T'_{sp}$  となる。その結果、力の関係が

$$T_1 < (\alpha \pm \delta) T'_{sp} \quad (8)$$

となるので、目標角度更新部がFig.4のフローチャートに従い目標値を更新する。一回の更新で目標値は微小角度  $STEP$  分だけ変化し、目標値の更新は式(6)を満たすまでくり返し続けられる。その結果ロボットアームは微小なステップ動作を繰り返しながら移動を行う。

式(6)を満たすまでロボットアームが上昇したとき、ロボットアームは停止する(Fig.5(c))。このとき、力のつり合いは再び式(7)となり、さらに、人が動いた  $\Delta\theta$  だけロボットアームは変位しているため、操作者は小さな力  $T_{sp}$  で荷物を  $\Delta\theta$  だけ持ち上げたことになる。

レバーを下げる場合も同様の原理で動作することによって、操作者が自在にロボットアームを操って荷物を動かすことが可能になる。

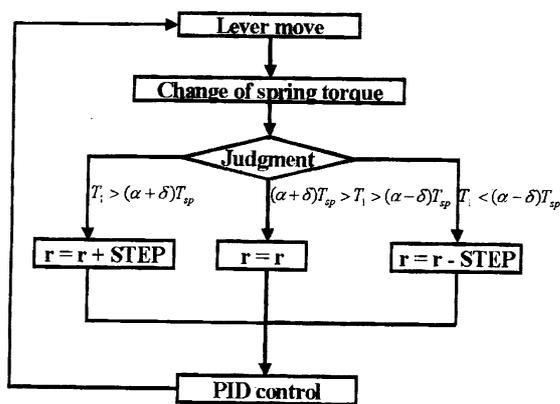


Fig.4:Flow chart

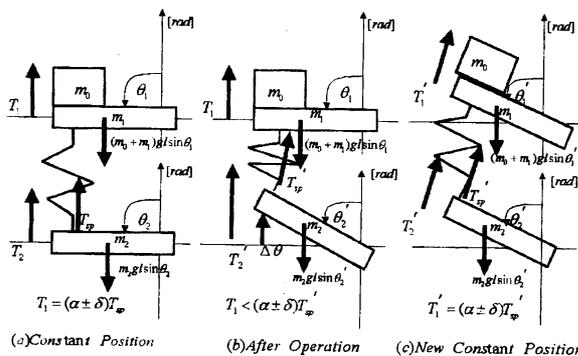


Fig.5:Outline of operation

## 4 シミュレーションと実験

### 4.1 シミュレーションによる検証

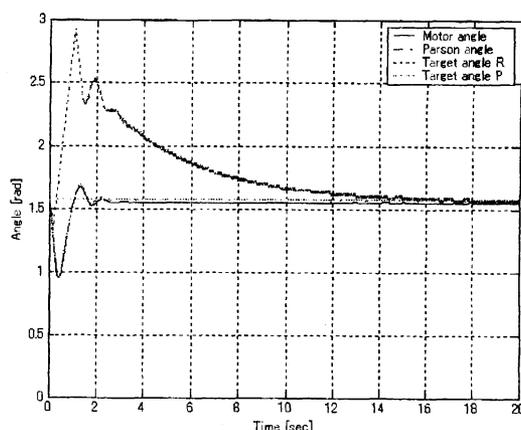
提案する制御システムの成立性を明らかにするためシミュレーションによる検証を行った。

始めに、ロボットアームの先端に3.75kgの荷物を積載して地面と水平な角度を維持するシミュレーションを行った。増幅率 $\alpha=1$ ,  $\delta=0.025$ , PID制御器のパラメータ $K_p=4$ ,  $K_i=1$ ,  $K_d=2$ とした時の結果をFig.6に示す。制御開始直後は振動が見られるが、最終的にロボットアームと人の腕ともに水平角度(1.57rad)に収束した。その時、 $\delta$ 分の若干の誤差は見られるが、ほぼモータトルクと操作力が1対1の関係となっていることがFig.6(b)よりわかる。よって、式(6)を満たしていることが確認できた。以上のことから、ロボットアームの角度制御を行うことで力制御を行ったと同等の効果が得られることが分かった。開始直後の動作の振動は、初期の制御入力が0であることと、人の腕のPID制御器を適当に設計していることが原因であり、実機では問題にならない。

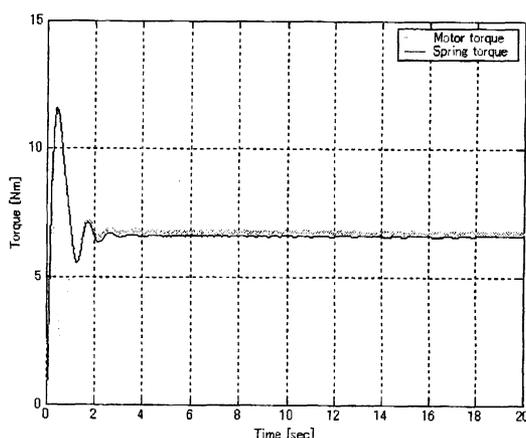
次に、 $\delta=0.025$ として、腕を水平位置に保った状態で増幅率 $\alpha$ を1~5の範囲で変化させた場合の検証を行った。その時のモータトルクと操作力を比較した結果をTable.2とFig.7示す。 $\delta$ による若干の誤差はあるが、増幅率 $\alpha$ の増加に伴い、操作力が式(6)に従って減少して、その比率は $T_1:T_{sp}=\alpha:1$ となっていることが分かる。このことから、増幅率を調節することで操作者の負担を調節できると言える。

さらに、増幅率 $\alpha=1$ ,  $\delta=0.025$ として、

人の腕を上下に動かした場合のシミュレーションを行った。その結果をFig.8に示す。Fig.8(a)より、ロボットアームが人の腕の動きを追従していることがわかる。しかし、ロボットアームの移動に対して目標値の更新が遅れている。その時、水平状態の時よりも必要になる操作力が若干大きくなってはいるが、式(6)の関係を大きく崩す程ではないので、全体の動作に影響はない。そして、再び紙幣状態となるときも、式(6)を満たし安定となる。



(a):Angle of robot arm and person



(b):Torque of robot arm and spring

Fig.6: Simulation results

(When command input is the horizontal position)

これは腕を下ろす動作の時も同様になった。

以上の結果から、

- ・システムの安定性
- ・任意の力増幅率の設定
- ・人の動きに対するロボットアームの追従性

の3点が実現していることが確認できた。よって提案する手法は成立すると考えられる。

#### 4.2 実験による検証

提案する制御システムの成立性を明らかにするために実験による検証を行った。

始めに、ロボットアームの先端に3.75kgの荷物を積載して地面と水平な角度を維持する実験を行った。PID制御器はシミュレーションと同じ値を用いた。増幅率 $\alpha = 1$ 、 $\delta = 0.1$ の時の結果をFig.9に示す。実験結果はノイズを除去するためにカットオフ周波数100Hzのローパスフィルタをかけて処理している。人の腕が水平な角度を維持している時、 $\delta$ 分の誤差はあるが、ほぼモータトルクと操作力が1対1の関係にあることがわかる。よって式(6)を満たしていることが確認できた。

次に、 $\delta = 0.1$ のとき、人の腕を水平位置に保った状態で増幅率 $\alpha$ を1~5の範囲で変化させた場合での検証を行った。その時のモータトルクと操作力を比較した結果をTable.3とFig.10に示す。若干の誤差はあるが、増幅率 $\alpha$ の変化に伴い、操作力が式(6)に従って変化し、トルクの比率が $T_1 : T_{sp} = \alpha : 1$ となっていることが分かる。このことから、増幅率 $\alpha$ を変化させることで操作者の負担を任意に調節可能

であることが実験でも証明された。

さらに、増幅率 $\alpha = 1$ 、 $\delta = 0.1$ として、腕を上下に動かした場合の実験を行った。実験結果をFig.11に示す。実験においてもロボットアームの追従性を確認できた。トルクの変化はノイズの影響がひどく読み取れなかったが、ほぼ $T_1 : T_{sp} = \alpha : 1$ の関係を満たしているように見受けられる。以上の結果から、シミュレーションで確認できた

Table.2:Simulation results

(Relation of torques and amplification rate)

Load (Nm)	Amplification rate $\alpha$	Motor torque (Nm)	Spring torque (Nm)
13.3	0.25	2.9	10.4
13.3	0.5	4.5	8.8
13.3	1	6.7	6.6
13.3	2	8.9	4.4
13.3	3	10.0	3.3
13.3	4	10.7	2.6
13.3	5	11.2	2.2

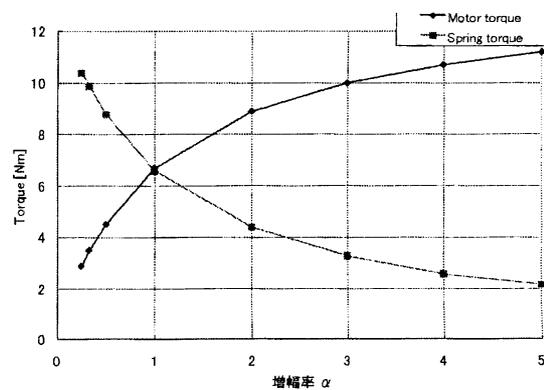


Fig.7:Simulation results

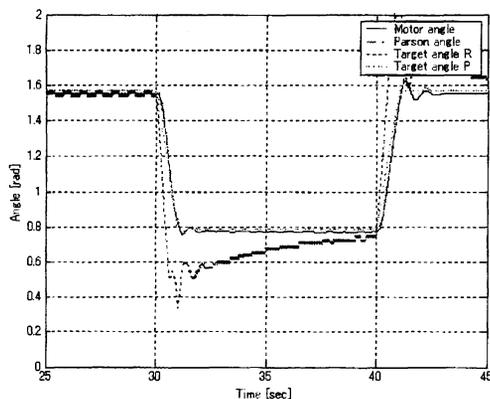
(Relation of torques and amplification rate)

- ・システムの安定性
  - ・任意の力増幅率の設定
  - ・人の動きに対するロボットアームの追従性
- の3点が実験結果からも明らかになった。

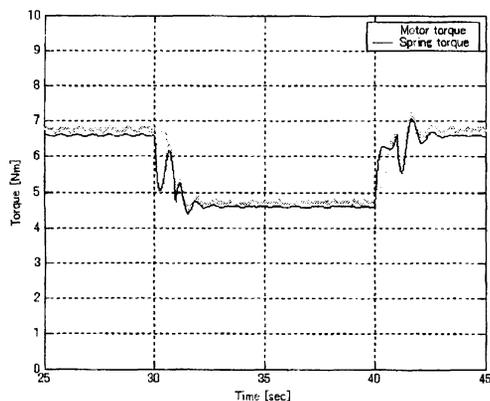
Table.3:Experiment results

(Relation of torques and amplification rate)

Load (Nm)	Amplification rate $\alpha$	Motor torque (Nm)	Spring torque (Nm)
15	0.25	3.62	10.28
15	0.5	4.92	9.49
15	1	7.96	7.39
15	2	10.41	5.43
15	3	10.16	3.46
15	4	11.47	3.67
15	5	12.94	2.7



(a):Angle of robot arm and person



(b):Torque of robot arm and spring

Fig.8:Simulation results

(When a person moves his arm)

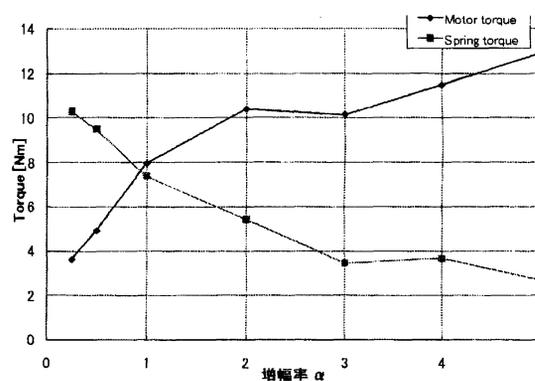
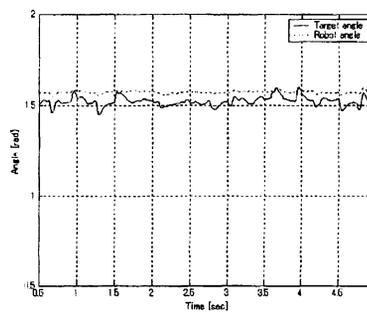
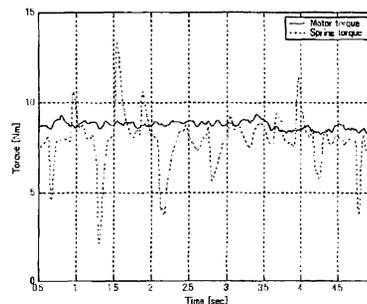


Fig.10:Experiment

(Relation of torques and amplification rate)



(a):Angle of robot arm



(b):Torque of robot arm and spring

Fig.9:Experiment results

## 5 おわりに

本研究では、操作力検出装置を用いたパワーアシスト装置とその制御系を提案した。装置は人の操作力を検出する操作力検出装置とロボットアームとで構成した。操作力検出装置は圧力センサとバネを組み合わせた機構とした。人の操作力はバネを通じてロボットアームに伝わり、その力は圧力センサによって検出される。検出された操作力とモータの発生トルクに応じて独自のアルゴリズムで制御を行った。

この装置の成立性を明らかにするためにシミュレーションと実験を行った。その結果、この装置は荷物の支持や運搬を安定に行うことが確認できた。さらに、設定した力の分配通りに、操作者の負担を軽減することも確認できた。

以上の結果から、提案する操作力検出装置を用いたパワーアシスト装置とその制御系の成立性が明らかになった。

今後は、PID制御パラメータ、目標角度更新幅、増幅率等が操作感に与える影響を調査し、最適なパラメータを検討する。さらに、他の制御理論の適用についても検討をする予定である。

## 参考文献

- 1) 金岡克弥 パワー増幅ロボットシステム設計概論 日本ロボット学会誌 Vol.26 No3, 255/258 (2008)
- 2) 山海嘉之, 李秀雄, 筋電位を用いた歩行支援のためのパワーアシストシステム HAL-1 に関する研究, 茨城講演会講演論文集 Vol.2000, 268/270 (2000)
- 3) 石井峰雄, 山本圭次郎, 兵頭和人, 完全独立型パワーアシストスーツの開発, 日本機会学会論文集(C編), Vol.72, 857/864 (2006)
- 4) 有我祐一, 上村貴彦, 渡部慶二, 遠藤茂, 力増幅型重量物運搬作業支援装置の制御, 第50回自動制御講演連合会, 596/598 (2007)