

計測自動制御学会東北支部 第 260 回研究集会  
(2010.10.29)  
資料番号 260-18

## 持ち上げ動作支援のための 前腕支持型パワーアシストシステムの開発

### Development of Forearm Support-Type Lift Assist System (FOLAS)

○野澤秀隆, 李秀雄, 井上健司

○Hidetaka NOZAWA, Suwoong LEE, Kenji INOUE

山形大学  
Yamagata University

キーワード : パワーアシストシステム (powerassist system), カセンシング (force sensing)

連絡先: 〒 992-8510 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科 井上・李研究室  
李秀雄, Tel:+81-298-26-3320, E-mail:lee@yz.yamagata-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我が国の高齢化は世界に例をみない速度で進行しており,既に5人に1人が高齢者という超高齢社会となっている.今後も高齢化率の上昇は続き,2055年には国民の2.5人に1人が65歳以上の高齢者になると推計されている.

人口高齢化による年齢構成の不均衡は労働負担の増加を引き起こし,中でも運輸・農業・介護分野における労働力不足が深刻な問題になると考えられる.このような分野では中腰姿勢で重量物を持ち上げる動作が多く,腰痛などの傷害を負うリスクが高い.そこで,これらの持ち上げ動作を補助し作業負担を軽減するパワーアシストシステムの開発が進められ,これまでにいくつかの関連研究が報告されている.

装着型のパワーアシストシステム[6], [7], [8]は,構造的に密着性と可動性に優れるため使用者は直感的にシステムを操ることが出来るという利点がある.しかし,装着に時間と労力を要するため,動作の支援が必要なとき直ちに使用することは難しく,システムが暴走したときに脱出が困難である.一方,操作型のパワーアシストシステム [3], [9]は,システムの装着が不要なので必要時に即使用可能という利点がある.反面,使用者はレバー操作などシステムの操作法に熟達する必要がある.従来のシステムにおけるこれらの課題は,パワーアシストが社会に広く受け入れられる上で妨げとなると考えられる.

そこで私たちは,これらの問題に対するひとつの解決策として前腕支持型パワー

アシストシステム(forearm support-type lift assist system:以下FOLASと略記)を提案する。

## 2. FOLAS

### 2. 1 設計理念

FOLAS の基本理念を Fig. 1 に示す。人間が物体を持ち上げるとき、筋トルクが関節周りに生じ、Fig. 1-(a)に示すように筋力と負荷力が打ち消し合う。装着型のパワーアシストシステムが各関節を補助するのに対して、FOLAS は Fig. 1-(b)に示すように使用者の前腕のみを支持する。さらに、FOLAS ではベルトなどの固定具は一切使用せず、使用者の前腕との接触面における相互作用力のデータのみに基づき動作する。こうした特徴から、FOLAS では使用者が体をシステムに固定することなく、直感的に操作することができるため使用者の持ち上げ動作を自然に補助することが可能である。さらに、暴走時にはすぐ脱出できる。

### 2. 2 システム構成

FOLASの実験用試作機をFig. 2-(a)に示す。試作機は主に前腕支持部と平行リンクアームに分けられる。前腕支持部は使用者の前腕と持ち上げる物体の荷重を受け止めることが出来る。エアークッションは前腕支持部の上部に取り付けられる。FOLASと使用者の前腕の間に生じる相互作用力データは、空気圧センサ(Panasonic, ADP5150)により検出されたエアークッション内の圧力変化から間接的に取得する。前腕支持部は2自由度平行リンクアームの上に取り付けられ、動作中は水平な位置に保たれる。ギヤードDCサーボモータ(Maxon, RE40GB, 150W, 441:1 gear ratio)とロータリーエンコーダ(Maxon, RE40GB, 150W, 441:1 gear ratio)はジョイント0とジョイント1に組み込まれている。この機構により、FOLASはFig. 2-(b)で定義する水平

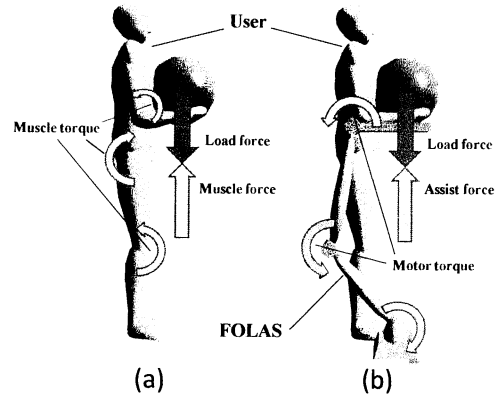


Fig. 1 Design concept on the system of FOLAS (a) lifting motion without assist (b) lifting motion with assist of FOLAS

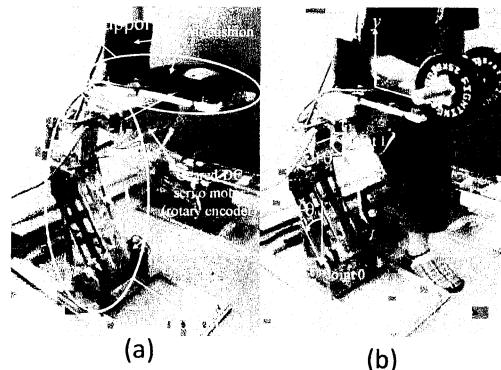


Fig. 2 Experimental prototype of FOLAS (a) system configuration (b) definition of direction and rotation

方向(x)及び垂直方向(y)において使用者の持ち上げ動作を支援することが出来る。

Fig. 3に制御系の概要を示す。制御信号処理のための、組み込み制御コンピュータ(Interface Corp., PCI - CM06C2ASTD, Celeron 600MHz, 256MB memory), コンパクトフラッシュカード(Interface Corp., 02J - 1007BAC, 2GB), A/Dコンバータ(Interface Corp., PCI - 3168C), パルスカウンタ(Interface Corp., PCI - 6205C), D/Aコンバータ(Interface Corp., PCI - 3341A)はFOLASのコントロールボックスに収められている。D/Aコンバータはモータドライバへの命令信号を生成しサーボモータを制御する

### 3. FOLAS の制御則

使用者が FOLAS の補助を受けつつ物体を持ち上げるときの、FOLAS、人間の腕、荷重の力のつり合いを Fig. 4 に示す。エアークッションにかかる力は次の方程式で表せる。

$$F_y^a(t) = F_y^l(t) - F_y^m(t) \quad (1)$$

$F_y^a(t)$  はエアークッションにかかる力を示し、 $F_y^l(t)$  と  $F_y^m$  はそれぞれ持ち上げる物体と使用者の前腕により y 軸方向に働く力を示す。FOLAS の基本的なパワーアシスト制御は目標のアシスト力に一致するように実行される。y 軸方向に物体を上下させる場合、次のようなフィードフォワード + フィードバックの力制御則を採用する。

$$F_y^s(t) = F_y^d + F_y^c + k_{Fy}(F_y^d + F_y^c - F_y^a(t)) \quad (2)$$

$F_y^s(t)$  は FOLAS により生じる力、 $F_y^d$  は持ち上げられる物体の荷重を補償するための望ましいアシスト力、 $F_y^c$  は使用者の前腕によって加えられる y 軸方向の接触力、 $k_{Fy}$  はカフィードバック制御のための比例ゲインである。ただし、 $F_y^s$  は使用者が荷を動かすことなく前腕を前腕支持部に乗せたときの  $F_y^a(t)$  の平均値から決定する。同様に、x 軸方向の操作の制御則は次のように表せる。

$$F_x^s(t) = F_x^c + k_{Fx}(F_x^c - F_x^a(t)) \quad (3)$$

従って、FOLAS によるパワーアシスト動作のための関節トルクは次のように計算される。

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_0(t) \\ \tau_1(t) \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} F_x^s(t) \\ F_y^s(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\tau_0(t)$  と  $\tau_1(t)$  は Fig. 2-(b) で定義した関節トルク、 $J^T$  はヤコビアン of 転置行列である。

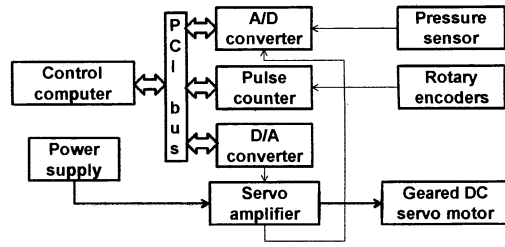


Fig. 3 control system of FOLAS

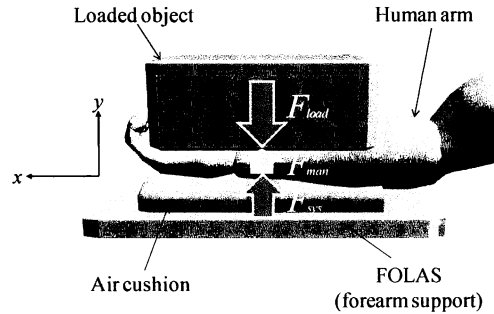


Fig. 4 Force interaction among FOLAS, human arm, and load (side view)

仮に FOLAS の動作中に前腕とエアークッション間の接触面積が変わらないとすれば、 $F_x^a$  と  $F_y^a$  は次の関係から間接的に計測できる。

$$P_x^a \propto F_x^a \quad (5)$$

$$P_y^a \propto F_y^a \quad (6)$$

$P_x^a$  と  $P_y^a$  は x 軸方向と y 軸方向の使用者の操作力を検出するためのエアークッションの中の空気圧である。

### 4. 実験

本研究では FOLAS の有用性を確認するために垂直方向の持ち上げ動作の基礎実験を行う。

#### 4.1 実験手順

実験内容は 4 秒サイクルの定期的なビープ音に合わせた 5kg のダンベルの上げ降ろしである。Fig. 5(a)(b) のようなアシストなしとアシストありの持ち上げ動作を 6 セット行う。

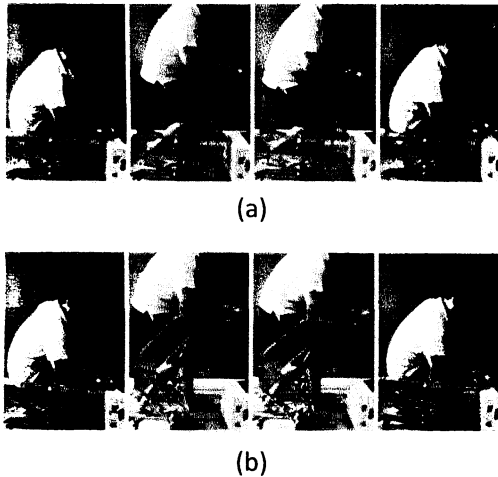


Fig. 5 Motion in experiment 8 (a) not assisted motion, (b) assisted motion

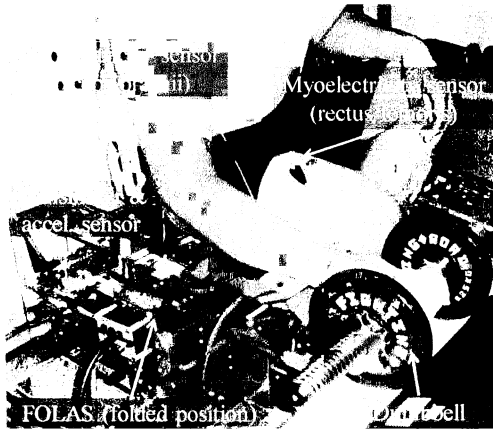


Fig. 6 Experimental setup

実験のセットアップを Fig. 6 に示す. 動作中の腕と脚の筋肉の活性を評価するため, 物体の持ち上げに主として使われる肘の屈筋 (上腕二頭筋) とひざの伸筋 (大腿直筋) に筋電センサを取り付ける. 加速度センサは持ち上げ動作の加速度を測るため, 無線送信機とともに被験者のウエストに固定する. 筋電位と加速度データは無線で実験用 PC に送られる.

#### 4.2

Fig. 7 と Fig. 8 はそれぞれアシストなしとアシストありの場合の実験結果である. 最初のグラフは被験者の操作力がエアークッションに加わることによって変化する空気圧センサデータを示す. 2 番目と 3 番目のグラフはそれぞれ FOLAS の関節角度とトルクである. 4 番目のグラフは上腕二頭筋と大腿直筋の筋電位のデータを示す. 1 番下のグラフは被験者の動作の加速度を示している. ただし上腕二頭筋と大腿直筋の筋電位データはデータを表す便宜上, 正と負で示している.

筋電位と加速度のデータは, アシストありとアシストなしの場合共に周期的に変化している. 空気圧センサの自動オフセット調整機能により, 圧力データは Fig. 6 において 0 kPa を示す. Fig. 7 における空気圧の基準値は, 被験者がエアークッションの上で 3 秒間ダンベルを持つ間に取得されたセンサデータの平均値として計算される. FOLAS は被験者の持ち上げ動作を支援するために式(4)の制御則によって動作し, 周期的に上下する.

持ち上げ動作を評価するため, [10]を参照して以下の筋肉活性化率(MAR)を採用した.

$$MAR = \frac{\int_0^T m_a(t) dt}{\int_0^T m_{na}(t) dt} \quad (7)$$

T は実験時間,  $m_{na}(t)$  と  $m_a(t)$  はそれぞれアシストなしとアシストありの実験中の筋電信号の値である. 6 回の実験における MAR の平均値と標準偏差を表 1 にまとめた. これから, FOLAS は上腕二頭筋の筋負担を軽減するのに大いに貢献しているが大腿直筋の筋負担は軽減できていないことが分かる.

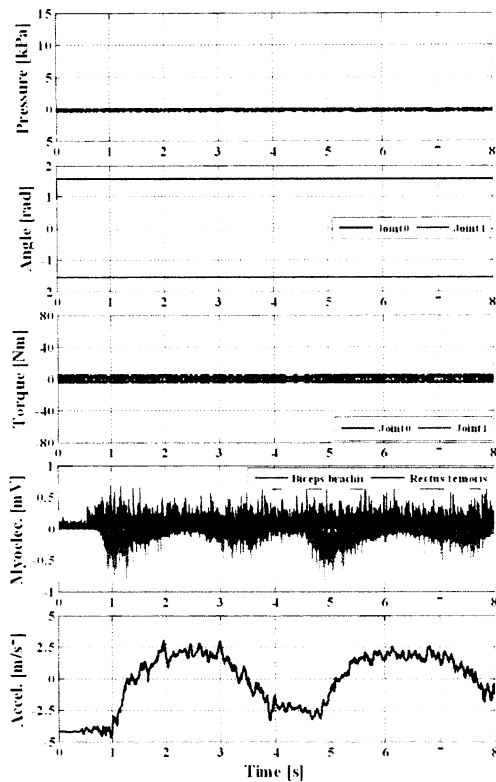


Fig. 7 Experimental result for not assisted motion

効果の違いは筋肉の機能に由来すると考えられる. Fig. 5 に示したような持ち上げ動作中, 上腕二頭筋は, ひじ関節がダンベルにより加えられる負荷モーメントに抗い続ける静的運動のために機能する. 一方, 大腿直筋はしゃがむという動的運動に役立つ. 式(4)の力制御則は FOLAS が上腕二頭筋に代わり, 静的運動を支援するために動作することを可能にする. しかし, 制御則は一定の負荷力を補償する基準力のみに基づき実行されるものなので, 大腿直筋のような動作関連の筋肉による動的運動は支援できない. 上記のことから判断すると, たとえ制御方法の改善が強く必要であるとしても, 我々は新型のパワーアシストシステムとして FOLAS の有用性を確かめることができる.

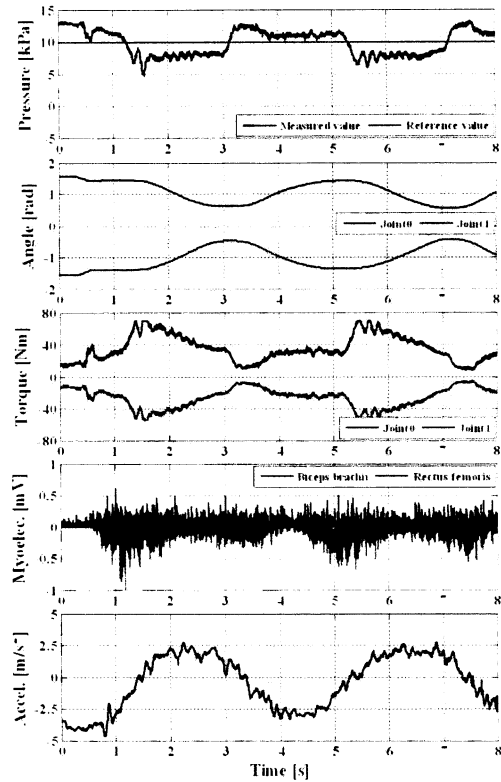


Fig. 8 Experimental result for assisted motion

Table 1 MAR of biceps brachii (elbow flexor) and rectus femoris (knee extensor)

	Biceps brachii	Rectus femoris
Mean	0.63	1.10
SD	$\pm 0.0585$	$\pm 0.0566$

## 5. 結論

本研究で, 我々は直感的に操作でき装置の装着を必要としない前腕支持型パワーアシストシステムを提案し, その詳細を記述した. FOLAS の設計理念, システム構成と動作原理を紹介した. FOLAS の有用性を実証するために基本機能性を確かめるための実験を行い結果を示した. 今後, 動的運動を含む持ち上げ動作を支援するために, 制御則をさらに改善する必要がある.

## 6. 参考文献

- [1] M. Peshkin and E. Colgate, "Cobots," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 26, no. 5, pp. 335-341, 1999.
- [2] [http://www.stanleyassembly.com/products/material\\_handling/lift.aspx](http://www.stanleyassembly.com/products/material_handling/lift.aspx)
- [3] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono, Y. Umetani, "Proposal of Skill-Assist : A System of Assisting Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks", *Proc. of IEEE Int. Conf. of System, Man, and Cybernetics*, Tokyo, Japan, pp. IV11-16 (1999)
- [4] S. Fujiwara, H. Kitano, H. Yamashita, H. Maeda, H. Fukunaga, "Omnidirectional Cart with Power Assist System", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 4, pp. 931-937, 2002.
- [5] <http://www.yamaha-motor.co.jp/product/wheelchair/complete/townypas/index.html>
- [6] M. Ishii, K. Yamamoto, K. Hyodo, "Stand-Alone Wearable Power Assist Suit - Development and Availability", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17 No.5, pp. 575-583, 2005.
- [7] H. Kobayashi, M. Iba, H. Suzuki "Posture Control of a Muscle Suit for the Upper Limb", *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 7-12, Luoyang, China, 2006.
- [8] <http://www.cyberdyne.jp/english/robotsuithal/index.html>
- [9] Y. Kume, H. Kawakami, "Development of Power-Assist Motion Assist Technology for Transfer Motion Assist Robot", *Matsushita Technical Journal (in Japanese)*, Vol. 54, No. 2, pp. 50-52, 2008.
- [10] J. Rosen, M. Brand, M. Fuchs, M. Arcan, "A Myosignal-Based Powered Exoskeleton system", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 31, No. 3, pp. 210-222, 2001.