

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月26日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560239

研究課題名（和文）

ウェアラブル力覚センサを用いたワイヤ懸架式パワーアシストシステムの研究

研究課題名（英文）

Study on Wire Suspended Power Assistance System Using Wearable Force Sensor

研究代表者

三好 孝典 (MIYOSHI TAKANORI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10345952

研究成果の概要（和文）：

超高齢化社会を迎え、シルバー世代の就業を如何に確保するかは日本において差し迫った課題である。そこで我々は人の小さな力をアシストし、高齢者においても重量物を軽々と取り扱うことのできるパワーアシストシステムの構築を目指した。

まず、研究者らは、人体を13リンクの剛体運動と仮定し、両腕、両脚、胴体、頭などの加速度を計測することで、手先が外部環境に及ぼす力を最大20N程度の誤差で推定するヒューマンフォースオブザーバを構築した。次に、免震構造に用いられる積層ゴムを使用した垂直抗力とせん断力を測定可能な床反力センサを研究・開発した。最終的にこれらの技術を組み合わせ、天井クレーン装置を用いて、推定された操作力から質量60kgの荷物をパワーアシストにより移動させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

It is a very important social problem that a silver generation's employment is secured in Japan. Therefore, our purpose is the construction of a power assistance system which can deal with a heavy load lightly in elderly people.

First, researchers assumed the human body was constructed by the rigid parts with 13 links, and developed the human force observer which estimated the applied force toward the environment by measuring acceleration of both arms, both legs, the body, and the head.

Next, the floor-reaction-force sensor, which could measure the human applied force to the floor, was build using the lamination rubber.

Finally, such technology was combined and it succeeded in moving a heavy load with a mass of 60 kg by the proposed power assistance system using the overhead traveling crane.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：制御機器, パワーアシスト, ウェアラブル, バイオメカニクス

### 1. 研究開始当初の背景

超高齢化社会を迎え、シルバー世代の就業を如何に確保するかは日本において差し迫った課題である。当該世代の人々は、高度な知的能力、判断能力を有するにもかかわらず、肉体的能力の制約から就業が困難になる場合がある。これらの現状を踏まえ、我々は人の小さな力をアシストし、高齢者や力の弱い人においても重量物を軽々と、位置・姿勢を制御することのできるワイヤ懸架式のパワーアシストシステムの研究開発を行うこととした。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、新開発のウェアラブル薄型3軸力覚センサにより、ワイヤ懸架式パワーアシストシステムを制御し、20[N]程度の力で200kg級の重量物を自在に操ることである。本研究では人間はセンサではなく対象物を直接把持し、ダイレクトマニピュレーションを実現する。したがって作業者が対象物に密着して操作でき操作性が極めて良い。また、センサは靴底に仕掛けられた装着型の力覚センサであるが、アクチュエータはクレーン装置として別に存在するため、万が一のときは退避でき安全であるとともに、極めて大きなアシスト力を発揮する事ができる。

### 3. 研究の方法

研究は、次の3項目において行われた。

- (1) ウェアラブル薄型3軸力覚センサの製作と特性解析
- (2) 人体運動力学モデル・ヒューマンフォースオブザーバの構築
- (3) パワーアシストコントローラ的设计・システム化

### 4. 研究成果

- (1) ウェアラブル薄型3軸力覚センサの製作と特性解析

本研究において開発されたウェアラブル薄型3軸力覚センサの写真を図1に示す。本センサは48×48×11[mm]と小型で、水平方向の力を測定するせん断力検知部と、垂直方向の力を測定する荷重検知部の2つを組み合わせである。本センサの特徴は積層ゴムアイソレータ構造と呼ばれる、ゴム板と鋼板を交互に重ね合わせた免震装置に使われる構造を用



図1 ウェアラブル力覚センサ

いることにより、人体の体重のかかる縦方向には十分な剛性を持つ一方、せん断力方向には良く歪み、せん断力を適切に計測できるこ

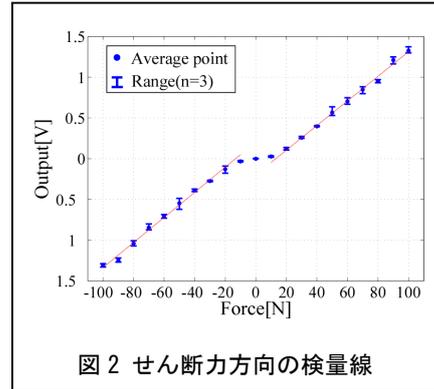


図2 せん断力方向の検量線

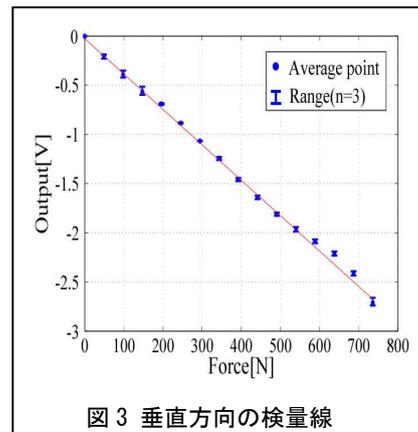


図3 垂直方向の検量線

とである。また、構造が簡単であるため小型化も容易でコストも比較的低価格である。開発したセンサのせん断力方向の検量線を図2に示す。±10[N]で不感帯があるものの、それ以外の領域ではほぼ線形性を示す。

同様に、垂直方向の検量線を図3に示す。図に示されるように、垂直方向の力の検出に対しても十分な線形性を有する。

さらにインパルス応答により獲得した本センサの周波数特性を図4に示す。周波数帯域は15Hzほどであるが、パワーアシスト自体が高い周波数応答を要求しないため、本研究に用いるには十分有効な応答性を有することが確認できた。

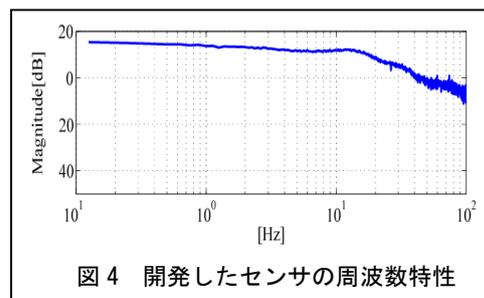
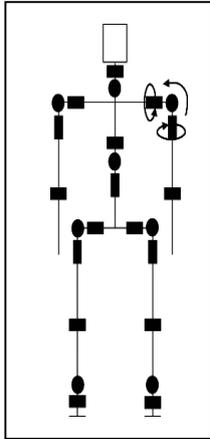


図4 開発したセンサの周波数特性

(2) 人体運動力学モデル・ヒューマンフォースオブザーバの構築

本研究では、人体モデルとして図 5 の 13 リンク剛体モデルを用いた。

図 5 人体の剛体モデル



関節の部分の●と■は回転軸を表す。各リンクの挙動と力の関係は、次の式で表される。

$$\begin{bmatrix} f_{j+1} \\ \tau_{j+1} \end{bmatrix} = I_j^S \begin{bmatrix} \dot{v}_{oj} \\ \dot{\omega}_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_j \times & 0 \\ 0 & \omega_j \times \end{bmatrix} I_j^S \begin{bmatrix} v_{oj} \\ \omega_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_j^E \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_j \\ \tau_j \end{bmatrix}$$

ここで  $f$  は関節の力、 $\omega$  はリンクの回転、 $v$  はリンクの重心の速度である。  $j$  は関節の番号を表し、関節 0 ( $j=0$ ) の力  $f_0$  は床反力である。  $f_0$  はセンサにより計測され、本式に基づいて  $f_1$  (くるぶしの力)、 $f_2$  と順々に関節の力を求めて行き、最終的には手先が外界に与える力を導出する。これがヒューマンフォースオブザーバの機能である。

開発したヒューマンフォースオブザーバの操作力の推定精度を評価した。天井クレーンを用いた搬送物の搬送動作から、スクワットのように足を伸ばして体ごと荷物を持ち上げる際の操作力とその推定値の比較結果を図 6 に示す。(a) のグラフは Z 軸方向(高さ方向)の手先が外界に加える操作力の推定結果と力覚センサの実測値である。また、(b) のグラフは Z 軸方向の床反力の値、(c) のグラフは操作力の推定結果と力覚センサの値の誤差を示している。(d) のグラフは、腰の Z 軸方向の位置を示している。グラフ(a)、(b)、(d) より、グラフ(d) の腰の挙動と同じ周期でグラフ(a) の操作力の推定値と力覚センサの実測値、グラフ(b) の床反力が変化していることが確認できる。また、グラフ(a) においては、操作力の推定値と力覚センサの実測値はおおむね一致しているが、局所的に 15N 程度の大きな誤差が見られる。ここで、グラフ(c)、(d) から人が立ち上がる時(Ex. 8.5s 前後)、もし

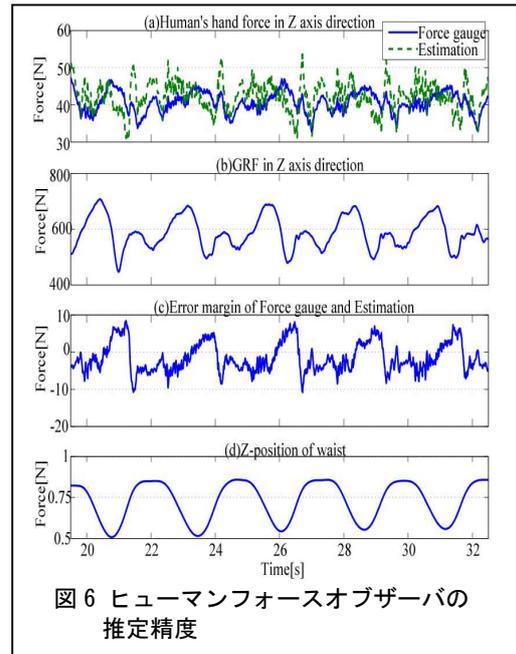
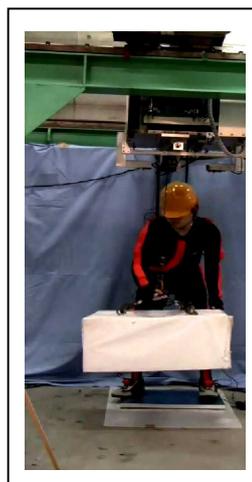


図 6 ヒューマンフォースオブザーバの推定精度

くはしゃがみこむとき(Ex. 15.5s 前後)に誤差が大きく生じていることが観察される。しかしながら、この程度の誤差であれば操作性は損なわれるものの、パワーアシストが不可能なレベルではない。なぜならば、重量物搬送の際に 20[N]程度の操作力を発揮する事は、通常の作業でも行われているためである。また、高さ方向の操作力の誤差の 2 乗平均値は 6.3[N]と、極めて精度の良い推定が可能であることが確認された。

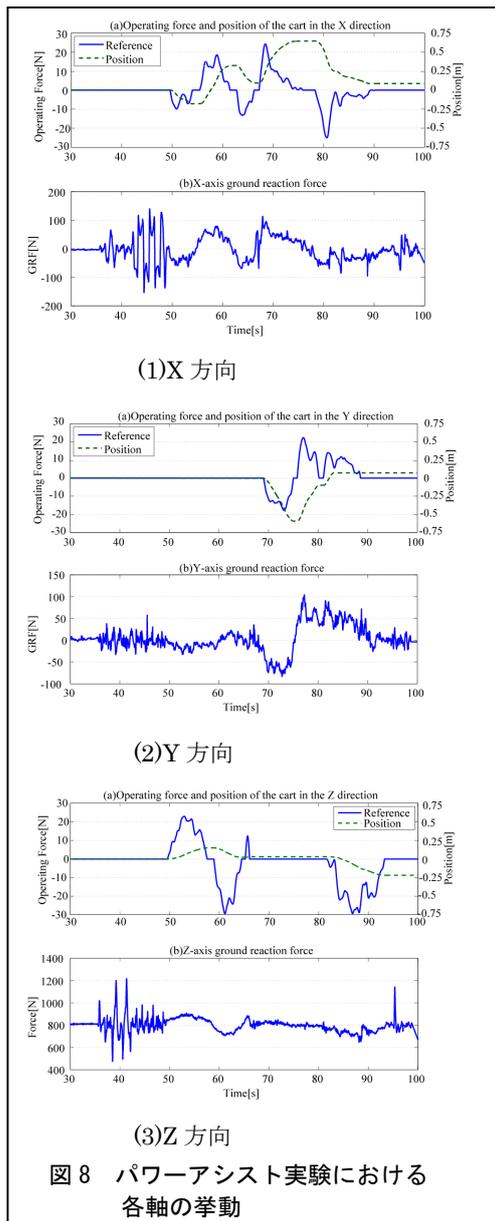
(3) パワーアシストコントローラ的设计・システム化

構築したヒューマンフォースオブザーバを用いてパワーアシスト実験を行った。図 7 に実験の様態を示す。実験は、3 次元動作解析装置、床反力計、天井クレーンを用いて行



った。搬送物の重量は 60kg である。

図 7 パワーアシスト実験の様態



実験結果を図 8 に示す。上図は X 軸方向、中図は Y 軸方向、下図が Z 軸方向の結果である。いずれのグラフも (a)の実線が操作力の推定値に 2.5N の不感帯を設け、5Hz のローパスフィルタを設けた後の操作力、点線がその操作力を速度指令としたときのカートもしくは荷物の位置、(b)は実験中の床反力の値を示している。(b)において、38[s]~41[s]までがスクワット動作、41[s]~49[s]までが体を左右に揺らす動作、49[s]以降が搬送動作中の床反力の変化である。

各グラフの(a)より、操作力に従って天井クレーンの各軸が正常に動作を行っていることが確認できる。また、グラフ(a)、(b)の 38[s]~49[s]より、X 軸、Z 軸方向では搬送動作よりも搬送動作前（荷物に力を加えていない状態）の挙動の方が床反力を大きく出力しているにも関わらず、操作力を 0 と正しく推定し、天井クレーンが動作してないことが確認

できる。以上の結果より、本研究の成果を用いることで、床反力から操作力を推定し、その操作力を用いてパワーアシストを行うことが可能であることが示された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T.Miyoshi, A.Niinuma, K.Terashima, Y.Miyashita, Development of industry Oriented Power-assisted System and comparison with Conventional Machine, *International Journal of Automation Technology*, 査読有、2009, 3(6), pp.692-699
- ② 寺嶋一彦, 三好孝典, 野田善之、21 世紀の鋳造工場に必要な革新的オートメーション技術、*鋳造工学会誌*, 査読有、2009, 81 (8), pp.400-408
- ③ H.Kitagawa, K.Terashima, T.Miyoshi, S.Kitamura, J.Urbano, Neuro-Fuzzy Control of Power-Assist Omnidirectional Wheelchair Using Human-Friendly Touch Panel, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査読有、2009, 21(3), pp.427-434

[学会発表] (計 10 件)

- ① 高森和博, 三好孝典, 寺嶋一彦、パワーアシストシステムのための床反力による操作力推定手法の提案、第 17 回ロボティクスシンポジウム、萩市・山口県、2012, pp.447-454
- ② Kazuhiro Takamori, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Estimation of Applied Force by Using Human Body Dynamics Model、SICE annual conference 2011, pp.1430-1435
- ③ Takanori Miyoshi, Kenji Suzuki, Kazuhiko Terashima, Development of 5 DOF Wire Suspension Power-Assisted system Using Linear Cylinders, The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011), 上海・中国、2011, pp. 342-348
- ④ Hokuto Mizutani, Yoshiyuki Noda, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Robust Rebound Suppression Control for Push-pull Solenoid Considering the Characteristic Change During Operation, SICE Annual Conference 2010, Taipei, Taiwan, 2010, TA05.06, pp.137-143
- ⑤ Koumei Yamashita, Yoshiyuki Noda, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Sway Suppression Control to Passenger with Muscle Weakness on Electrical Wheelchair, SICE Annual Conference 2010, Taipei, Taiwan, 2010, FB06.02, pp.2010-2015
- ⑥ Masaya Yamada, Yoshiyuki Noda, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Modeling and Control on Passenger Posture Behavior

Considering Seat Angle of Electrical Wheelchair, SICE Annual Conference 2010, Taipei, Taiwan, 2010, FB06.03, pp.2016-2021

⑦ K. Kubo, T. Miyoshi, K. Terashima, Influence of Lift Walker for Human Walk and Suggestion of Walker Device with Power Assistance, 2009 International Symposium on Micro -Nano Mechatronics and Human Science (MHS2009), Nagoya, Japan, 2009, pp.525-528

⑧ K. Kubo, T. Miyoshi, K. Terashima, Improvement of walking motion with power assisted walker, 2009 International Conference on Mechatronics and Information Technology, Gwangju, Korea, 2009, pp.384-385

⑨ T. Sawano, H. Kojima, T. Miyoshi, K. Terashima, Study of Power-assisted Attitude Control with Direct Manipulation for Four DOF, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, Japan, 2009, pp.776-780

⑩ A. Niinuma, T. Miyoshi, K. Terashima and Y. Miyashita, Evaluation of Effectiveness of a Power-Assisted Wire Suspension System Compared to Conventional Machine, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009, pp.369-374

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：搬送装置および搬送装置の制御システム

発明者：三好孝典, 寺嶋一彦

権利者：豊橋技術科学大学, 新東工業 (株)

種類：特願

番号：2009-291485

出願年月日：2009/12/22

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：Control system for a lifting device

発明者：三好孝典, 寺嶋一彦

権利者：豊橋技術科学大学, 新東工業 (株)

種類：特許登録

番号：米国特許 8125173 号

取得年月日：2012/2/28

国内外の別：国外

[その他]

<http://www.syscon.me.tut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 孝典 (MIYOSHI TAKANORI)

豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10345952

(2) 研究分担者

寺嶋 一彦 (TERASHIMA KAZUHIKO)

豊橋技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：60159043

(3) 連携研究者

木村 哲也 (KIMURA TETSUYA)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：70273802