

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560230  
 研究課題名（和文）  
 ワイヤ懸架機構による 6 自由度ダイレクトマニピュレーションアシストシステムの研究  
 研究課題名（英文）  
 Study on 6DOF Direct Manipulation Assisted System with Wire Suspended Mechanism  
 研究代表者  
 三好 孝典（Takanori Miyoshi）  
 豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
 研究者番号：10345952

研究成果の概要：本研究では、垂直一自由度・水平二自由度に加え、ロール角、ピッチ角、ヨー角の姿勢制御を可能とするワイヤ懸架機構によるパワーアシストシステムを構築した。このシステムは通常の 3 軸移動可能なクレーンシステムに対し、サーボモータで駆動される 2 本の直動シリンダと、ワイヤ張力を計測する三つのロードセルを追加することで実現された。成果として、わずか 20N 程度の力で直接荷物を把持して 30kg の荷物を任意の位置・姿勢に制御することができた。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機会力学・制御

キーワード：制御機器，パワーアシスト

## 1. 研究開始当初の背景

少子高齢化社会の日本では、労働者の高齢化、労働者の減少が進み、作業負担を補助する装置が望まれている。完全自動化システムでは作業負担を大幅に減らすことができるが、汎用性に乏しい問題があり、また、雇用枠の減少を招いてしまう。このような背景より近年、人間の作業動作を補助、強化するパワーアシストシステムの研究が盛んに行われている。

産業現場では、特に組み付け工程等の重労働を有する労働環境に対して、巨大かつ高剛性なシリアル型の機構を用いたパワーアシストシステムの研究が多くされている。またそ

れらのシステムの多くは力センサ等の操作レバーを用いての操作で、人間の手作業のように搬送物を直接把持してのパワーアシストシステムの例は少ない。

一方、パラレルリンクシステムはシリアル機構に比べ比較的小さな動力源で高速かつ高精度に物体操作が可能である。姿勢制御が可能なることも特徴であり、物体のハンドリングに適しているが、物体を直接把持してのパワーアシストに用いた例は少ない。

従来、著者らは工場でのパワーアシストシステムの開発として、手作業での操作に着目し、荷物を直接把持し、少ない力での搬送が可能とする、天井クレーン型のパワーアシストシステムを提案してきた。特徴として作業

者が直接搬送物を把持するため、一般的なロータリースイッチでの操作に比べ直感的に位置決めなどの操作がし易いことが挙げられる。また、制御対象であるクレーンシステムは産業に数多く普及しているため、コストが抑えられる点も有利である。しかしながら、当該システムでは水平鉛直方向3軸しか制御できないため、姿勢制御が困難であるという問題点を有していた。

## 2. 研究の目的

本研究では、従来の3軸にロール角、ピッチ角、ヨー角を加えた6軸パワーアシストシステムを提案する。更に搬送物の厚み、重心変動を考慮することで、実用性の高いシステムを構築する。本システムは、作業者が直接荷物を把持してわずかな力で思い通りに重量物の位置・姿勢を制御できるものである。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験装置

図1に、直動シリンダを用いた2軸姿勢制御装置を示す。装置は直動シリンダ2本と非伸縮ワイヤ1本を用いて、搬送物を吊り下げる形に設置する。ここで姿勢制御装置の懸架支点を  $T_0$  とする。このように設置することで、直動シリンダ2本の伸縮により、搬送物の回転姿勢2軸を制御する。ワイヤ端、シリンダ端にはロードセルが取り付けられ、それぞれに掛かる張力を測定する。また、姿勢制御装置は図2に示すように天井クレーンに吊るされる形で取り付けられる。Z軸モータにより姿勢制御装

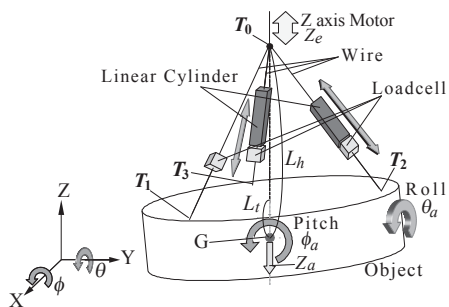


Fig.1 Overview of attitude control apparatus

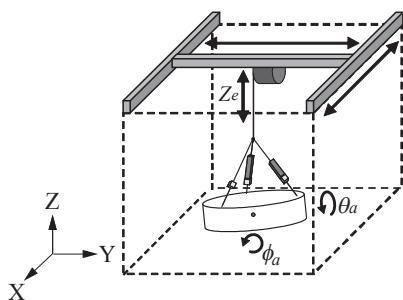


Fig.2 Overview of 5-DOF system

置は上下動、そしてカートにより水平方向に移動可能である。われわれの実験装置は水平鉛直方向X, Y, Zそして回転方向, の5自由度を持つシリアル-パラレルワイヤシステムとなる。

なお、ヨー角の制御はシステムがワイヤ一本で吊るされているため、特にアクチュエータを用いずとも作業者の力で容易に回転することができる。

### (2) 6軸機構のモデル化

本研究では、作業者が対象物のどの場所にもどの程度の操作力を加えたときに、どのように対象物が運動するかを、非線形な6DOFモデルとして定式化する必要がある。

### (3) 制振ロバストパワーアシストコントローラ的设计・システム化

実験装置、モデルを統合して、6DOFパワーアシストシステムの構築を目指す。非線形共振を有し、しかもその共振モードが操作力の場所に依って変化するモデルであるため、コントローラには高いロバスト性が要求される。

## 4. 研究成果

### (1) 非可動ワイヤについて

パラレルワイヤ懸垂機構ではVector Closureの考え方に基いて機構設計がなされた。それにより、2本の可動ワイヤと非可動ワイヤ1本で構成されるシステムで、所定の自由度が可能であることを明らかにした。

### (2) モデル式の導出

シリアルメカニズム シリアル機構として天井クレーンは図2に示すようにX, Y, Zの3自由度を有する。詳細はスペースの関係で割愛するが、それぞれの速度は、式(2)で表されることになる。

$$[X, Y, Z] = [x, y, L_h + Z_a + Z_e]^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z}_a + \dot{z}_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

パラレルメカニズム 運動物理学から姿勢制御システムのモデル方程式を示す。搬送物は剛体である多面体を想定し、搬送物形状

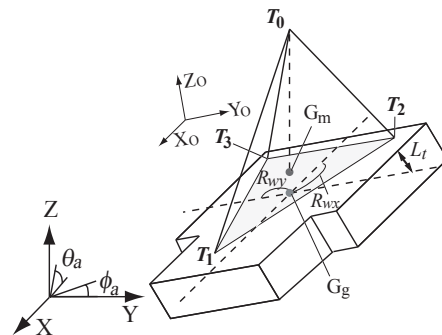


Fig.3 Suspend model

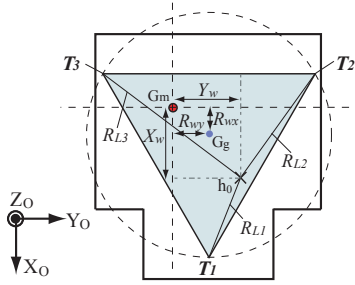


Fig.4 Top view of suspend model

からの幾何学的重心を  $G_g$  とし、物体の実質的な質量重心を  $G_m$  とする。そして、重力は質量的重心  $G_g$  から  $X$  軸、 $Y$  軸に沿ってそれぞれ  $R_{wx}$  [m]、 $R_{wy}$  [m] ずつ離れた位置に存在し、搬送物表面から垂直方向に  $L_i$  [m] の位置に存在する時、懸架モデルは図3,4のように示される。詳細は割愛するが、装置構成の幾何学的関係から、それぞれの変数の値が求まる。

また、重心の垂直移動距離  $Z_a$ 、ロール角  $\theta_a$ 、ピッチ角  $\phi_a$  とロープ長  $L_1, L_2, L_3$  との関係は以下の式で表される。

$$\dot{L} = J^{-1} \dot{X}_a$$

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_a \\ \dot{\theta}_a \\ \dot{\phi}_a \end{bmatrix} \quad (16)$$

( $i=1,2,3$ )

$$a_{i1} = \frac{\partial L_i}{\partial Z_a} = \frac{1}{L_i} (L_z + x_i S \theta_a - y_i C \theta_a S \phi_a - z_i C \theta_a C \phi_a) \quad (17)$$

$$a_{i2} = \frac{\partial L_i}{\partial \theta_a} = \frac{L_z}{L_i} (x_i C \theta_a + y_i S \theta_a S \phi_a + z_i S \theta_a C \phi_a) \quad (18)$$

$$a_{i3} = \frac{\partial L_i}{\partial \phi_a} = \frac{L_z}{L_i} (-y_i C \theta_a C \phi_a + z_i C \theta_a S \phi_a) \quad (19)$$

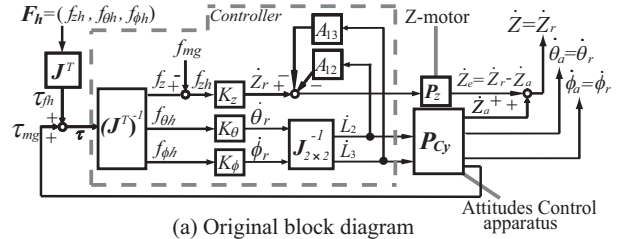
また、搬送物重心に加わる力ベクトルと張力の関係は式(22)の関係にある。ワイヤ  $L_1, L_2, L_3$  にかかる張力を張力ベクトル  $F = [f_1, f_2, f_3]^T$  とし、搬送物質量を  $m$  [kg] とすれば、操作力を加えない状態での  $L_1, L_2, L_3$  それぞれにかかる張力ベクトル  $mg$  は、搬送物重心に加わる鉛直方向の力  $f_z$  [N] と、搬送物に加わる回転方向のトルク  $f_\theta, f_\phi$  [Nm] を用いて(23)となる。

$$F = J^T mg \quad (22)$$

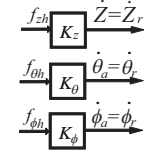
$$mg = J^T \begin{bmatrix} f_z \\ f_\theta \\ f_\phi \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

### (3) パワーアシストシステムの構築

搬送物位置の水平鉛直方向の3自由度、搬送物姿勢の回転方向2自由度に対する5自由度



(a) Original block diagram



(b) Simplification of block diagram

Fig.5 Block diagram of power assisted system

パワーアシストシステムを構築する。このシステムは、工場内での組み付け作業などを想定し、制御対象である搬送物の質量重心位置、重量はあらかじめ既知とする。図5に本稿で提案する姿勢制御パワーアシストシステムのブロック線図を示す。図5の破線部がコントローラであり、それ以外がプラントを表す。

コントローラ的设计 図5破線部のコントローラについて説明する。設計するシステムの仕様を次のように定義した。

1. 人の加えた操作力ベクトル  $F_h$  の各成分に沿った方向へのみパワーアシストを行う。
2. 人の加えた操作力ベクトル  $F_h$  の各成分に比例した大きさの姿勢速度ベクトル  $\dot{X}_r = [\dot{Z}_r, \dot{\theta}_r, \dot{\phi}_r]^T$  を出力する。

操作者の意図する方向と速度を制御することで姿勢制御を行うことができる。また、著者は従来研究においても、力に比例した搬送物速度を用いたパワーアシストを行っているため、組み合わせに適していることも理由である。以下、設計した制御系を示す。

張力補償、操作力の推定 ロードセルは張力 [N] として、人の操作力と搬送物重量によって生じる重力の和を検出する。制御を行うには張力 から操作力ベクトル  $F_h$  を推定する必要がある。そこで  $(J^T)^{-1}$  をかけ、検出値 より  $F_h + F_{mg}$  を推定する。式(26)に示すように、推定値と  $F_{mg}$  の差分をとることで、操作力  $F_h$  を検出する。

$$\begin{bmatrix} f_{zh} \\ f_{th} \\ f_{ph} \end{bmatrix} = (J^T)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

計算に用いるヤコビ行列  $J$  は、搬送物姿勢と共に変化する。そのため、本コントローラではエンコーダより得られるシリンダ長  $L_2, L_3$  [m] より、順運動学を用い  $Z_a, \theta_a, \phi_a$  の算出を

行い,  $(J^T)^{-1}$  を逐次更新する.

逆モデルと2軸同期化制御によるZ軸と姿勢角の制御  $K_z, K_\theta, K_\phi$  は各軸の操作力から速度への変換係数, すなわちゲインである. シリンダの伸縮速度を操作入力  $K_z \dot{z}_a, K_\theta \dot{\theta}_a, K_\phi \dot{\phi}_a$  に追従させるために逆モデルを用いる. シリンダへの指令入力は式(27)となる. ここで逆モデルはヤコビ行列  $J$  の  $2 \times 2$  要素から式(28)で表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ \dot{\phi}_a \end{bmatrix} = J_{2 \times 2}^{-1} \begin{bmatrix} K_\theta f_{\theta h} \\ K_\phi f_{\phi h} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$J_{2 \times 2}^{-1} = \begin{bmatrix} A_{22} & A_{32} \\ A_{22} & A_{33} \end{bmatrix}^{-1} \quad (28)$$

$L_2, L_3$  が伸縮すると, 式(24)より  $\dot{z}_a$  と  $\dot{\theta}_a, \dot{\phi}_a$  が連動して動作するため, 設計方針を満足できない. そこで, 鉛直方向速度  $\dot{z}$  をリアルに結合された外部アクチュエータである, Z軸モータを同期制御する手法を用いることでこの問題を解決する. 式(2), (24)より, システムの挙動は式(29)で表される. そこで式(30)によってZ軸モータ速度  $\dot{z}_e$  を補正する.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta}_a \\ \dot{\phi}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{12} & A_{13} \\ A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{z}_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\dot{z}_e = -A_{12} \dot{z}_2 - A_{13} \dot{\theta}_3 + K_z f_{zh} \quad (30)$$

これにより各軸への操作力は非干渉化された独立なシステムとなり, 図5(b)に書き換えられる.

水平面方向のパワーアシスト 準静定状態での水平方向パワーアシストシステムは式(31)で表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{px}}{mg} & f_x \\ \frac{K_{py}}{mg} & f_y \end{bmatrix} \quad (31)$$

$f_x, f_y$  は水平方向の各軸の操作力で,  $K_{px}, K_{py}$  は各軸のコントローラゲインである. 式(29), (30), (30)より, 各軸は独立に, 操作力に比例した速度を実現することができる.

シミュレーションによる動作確認 構築した姿勢制御パワーアシストシステムの動作確認をする. 搬送物重量は20.4[kg]とし,  $R = 0.4$ [m],  $L_1 = 0.78$ とし, コントローラゲインは  $K_z = 0.1$  [(m/s)/N],  $K_\theta = K_\phi = 0.05$  [(rad/s)/Nm]とし,  $G_m$ と $G_g$ が同じ場合と, 異なる偏重心の場合で, 人の操作力を加えた際のシミュレーションを行った. 偏重心の場合は  $R_{mx} = 0.05, R_{my} = 0.1$ とした. 結果を図6, 7に示す. 図6が偏重心でない場合で, 図7が偏重心の場合の結果である. 上から, 人の加える操作力, シリンダとワイヤにかかる張力, 張力から推定された操作力, 姿勢角速度, 鉛直方向速度を示す. 偏重心の場合, 操作力の無い初期状態からも  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  にかかる張力がそれぞれ

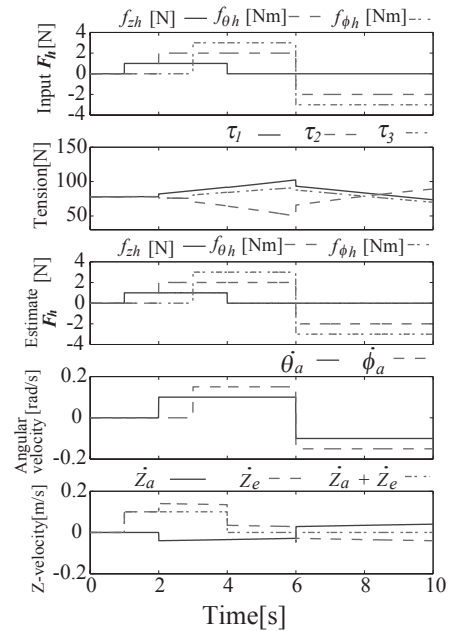


Fig.6 Simulation results without shift

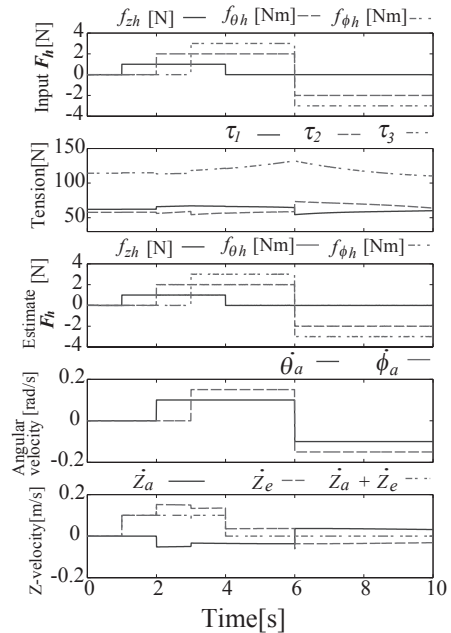


Fig.7 Simulation results with shift

異なるが, 推定された操作力は加えた操作力と一致していることが分かる. また,  $f_{\theta h}, f_{\phi h}$  に応じて, 姿勢角速度  $\dot{\theta}_a, \dot{\phi}_a$  が変化し, 鉛直方向変動  $\dot{z}_a$  が生じる. しかし  $\dot{z}_e$  に補正が入るため,  $f_{zh}$  が0[N]となった4[s]以降は作業座標系での位置  $\dot{z}_a + \dot{z}_e$  は変動しないことがわかる. 以上の結果から偏重心に応じた操作力の推定とパワーアシスト制御が確認できた.

#### (4) 結言

従来の天井クレーンを用いたパワーアシストシステムを拡張し, 搬送物の位置と姿勢を自由に制御可能な6自由度ワイヤ懸架式パワー

アシストシステムの構築を行った。対象となる搬送物の幾何学的重心と質量重心のずれを考慮して、モデリングを行った。本システムはシリアル - パラレル混在システムであり、パラレル部には2本のみ直動シリンダを用いる。このためシリアル部と同期化制御を行うことで、各軸の操作力に応じた非干渉制御を実現した。また、シミュレーションにおいて作業者の操作方向と力に応じた速度での、姿勢のパワーアシスト制御を確認した。産業用パワーアシストの中でもワイヤ懸架方式のものの学術的研究は著者の知る限りなく、この意味で世界でも画期的なシステムである。現在取り組んでいる実験では、わずか20N程度の力で直接荷物を把持して30kgの荷物を任意の位置・姿勢に制御することが可能である。本システムはコストも抑えられるため、産業界での幅広い利用が期待できる。

#### 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)

三好孝典, 小島秀人, 寺嶋一彦, 川合悦蔵: 鋳型合わせ作業に対する三自由度ワイヤ懸架式パワーアシストシステムの開発と制御, 鋳造工学会誌, 80(7), [403-409], (2008)

Y. Miyashita, T. Miyoshi, K. Terashima, H. Makino and E. Kawai: Development of Power-Assisted Wire Suspension System and Its Application to Mould Setting, International Journal of Cast Metals Research, Science and Engineering of Cast Metals, Solidification and Casting Processes, AFC-10 Special Issue, 21(1-4), [281-286], (2008),

K. Terashima, T. Miyoshi, Y. Noda: Innovative Automation Technologies and IT Applications of the Metal Casting Process Necessary for the Foundries of the 21st Century, International Journal of Automation Technology, 2(4), [229-240], (2008)

[学会発表](計4件) [査読付のみ]

鈴木健嗣, 三好孝典, 寺嶋一彦, 直動シリンダを用いた5自由度ワイヤ懸架式パワーアシストシステムの構築, 第14回ロボティクスシンポジウム, pp.167-172, (2009)

T. Miyoshi, Y. Miyashita, M. Yamamoto, A. Niinuma, K. Kubo, K. Terashima: Hybrid

Conveyance System with Automatic Path Planning and Power Assistance, Proc. of 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July, [13120], (2008)

鈴木健嗣, 三好孝典, 寺嶋一彦, 姿勢制御を含めた4自由度ワイヤ懸架式パワーアシストシステムの構築, 第13回ロボティクスシンポジウム, pp.1-6, (2008)

Yuuki Miyashita, Manabu Yamamoto, Kenji Suzuki, Takanori Miyoshi and Kazuhiko Terashima, Study on Effectiveness of Power-Assisted Wire Suspension System, Int. Conf. on Mechatronics and Information Technology (ICMIT2007), Gifu, Japan, Dec. 5-6, pp.41, (2007)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計4件)

寺嶋一彦, 三好孝典, 小島秀人, 他2名: 天井クレーンによる搬送方法およびこの搬送方法を利用した天井クレーンシステム, 特願2007-052705, (2007)

寺嶋一彦, 三好孝典, 小島秀人, 他2名: 搬送方法およびこの方法を実施する搬送手段の制御システム, 特願2007-064826, (2007)

寺嶋一彦, 三好孝典, 小島秀人, 他2名: 搬送方法およびこの方法を実施する搬送手段の制御システム, 特願2007-118339, (2007)

寺嶋一彦, 三好孝典, 他: 昇降装置の制御システム, 国際出願 PCT/JP2007/60445, (2007)

取得状況(計0件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

三好孝典:

豊橋技術科学大学工学部 准教授  
研究者番号: 10345952

##### (2) 研究分担者

寺嶋一彦:

豊橋技術科学大学工学部 教授  
研究者番号: 60159043

澤田和明:

豊橋技術科学大学工学部 教授  
研究者番号: 40235461