ワイヤ懸垂型マニピュレータの開発*

大 隅 久^{*1}, 越 川 昌 浩^{*2}
宇 津 木 康^{*2}, 萩 原 利 宣^{*3}

Development of a Wire Suspended Manipulator

Hisashi OSUMI^{*4}, Masahiro KOSHIKAWA,
Yasushi UTSUGI and Toshinobu HAGIWARA^{**} Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University,
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan

A wire suspended manipulator in a three dimensional space on a vertical plane is developed. The system consists of a 4 D.O.F. manipulator and a crane with two wires. The base link of the manipulator is suspended by two wires those lengths and upper end positions are controlled respectively. In order to avoid the vibration and displacement of the suspended base link, not only the position and orientation of the end-effector but the position of the gravity center of the suspended part are controlled by using the 4 D.O.F. manipulator. Additionally, two wire directions are used for avoiding the positioning errors under the existence of external forces. Some fundamental experiments show the validity of the proposed control algorithm.

Key Words: Robot, Manipulator, Wire Suspension Mechanism, Position Control, Redundant Manipulator

1. 結 言

マニピュレータのベースを移動させることにより、マニピュレータの操作性を保ったまま可動範囲を増大させることができる。これまで移動機構として車輪機構、脚機構等が提案されているが、3次元空間での大きな移動は困難である。筆者らはこれまで移動機構としてワイヤ懸垂機構の利用を提案し、1本のワイヤでマニピュレータを懸垂したシステムを試作し、その制御方法を確立している^①。本研究ではマニピュレータを懸垂するワイヤの本数を増やすことにより、マニピュレータ先端での制御性を大幅に向上できることを示し、その設計法を示すとともに、制御法を確立することを目的とする。

一般に、移動機構としてワイヤ懸垂系を利用すると、懸垂されたマニピュレータの動作に伴い発生する姿勢変化、あるいは手先での発生力により、マニピュレータを懸垂するベース自体も釣り合い位置に変位が発生したり、振動が発生する。

一方、ベース部が移動機構に取り付けられた移動マニピュレータに関する研究の多くは、移動機構として台車を想定している。そして、移動マニピュレータが持つ冗長自由度を利用して移動台車の転倒を防止する手法や、マニピュレータの可操作性を向上させる手法などを提案している^{②④}。しかし台車は、転倒直前まで地面から完全な幾何拘束を受けており、外力で位置ずれの発生するワイヤに懸垂された移動機構には直接適用することができない。

一方、手先を動かすとベースも移動してしまうという現象は宇宙用マニピュレータも同様である。これに関する研究では、運動量、角運動量の保存則から導出された拡張ヤコビ行列を定義し、これに基づいてマニピュレータを制御する手法が提案されている。また、吉田らは、ベースが平行板バネで支持されたシステムにおいて、ベースを振動させることなくマニピュレータ手先を目標点まで動的に移動させるための軌道設計法を提案している^⑤。この研究は、ベース部の機構コンプライアンスを制御対象とするという立場には立っておらず、本研究のアプローチとは異なる。

本論文では、平面内3自由度の簡単な系におけるワイヤ懸垂型マニピュレータの構造の提案を行い、そ

* 原稿受付 2003 年 1 月 15 日。

^{*1} 正員, 中央大学理工学部(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)。^{*2} 正員, 中央大学大学院理工学研究科。^{*3} 学生員, 中央大学理工学部。

E-mail: osumi@mech.chuo-u.ac.jp

の静力学特性を示すとともに、構造に運動学的な冗長性を持たせることにより、作業に最適な逆運動学解を比較的簡単に算出できることを示す。

2. ワイヤ懸垂型マニピュレータの機構

2. 1 ワイヤ懸垂型マニピュレータの設計

ワイヤに懸垂されたマニピュレータの最大の問題は、マニピュレータに加わる外力や、マニピュレータ自身の姿勢変化によって、ベースリンク自体の位置・姿勢が変化してしまうため、逆運動学計算が複雑となったり、振動が発生し、制御が困難となってしまうことである。これらの問題に制御で対処することも可能と思われるが、原理的にこれらの問題を解決できる機構を設計することができれば、制御方法を単純化することができ、制御性能の向上も期待できる。

図1はマニピュレータ先端に外力が作用した様子をあらわす。(a)では外力が水平に働き、マニピュレータ先端が変位するのに対して、外力がワイヤ直下に向かって作用する(b)の場合には、マニピュレータは変位しない。これは、マニピュレータに対するワイヤの幾何拘束がワイヤを含む鉛直線上であるため、ワイヤが外力に対する反力を全て発生したためである。この考えを利用すれば、図1(c)のようにワイヤを2本利用し、手先をその交点にくるように設置することで、ある程度の大きさまでは、手先に水平方向の外力がかかっても、手先が変位することはない。

Fig.1 Wire suspended manipulator with external force

Fig.2 Wire suspended manipulator with pose change

今度はワイヤを2本利用した懸垂系を示す。図2(a)はマニピュレータの姿勢変化によって、ベースが傾いた状態を表す。ベースリンクの傾きが発生するのは、つりあい点において、懸垂部の重心が必ず2本のワイヤ交点を通る鉛直線上に存在するためである。よって、マニピュレータの関節に冗長自由度を付加し、重心の水平方向変位も制御対象とすることで、ベースリンクの傾きを発生させることなく手先を任意方向に移動させることが可能となる。

なお、ワイヤ本数を更に増したり⁶⁾、リンク機構と組み合わせることで、マニピュレータ手先での発生力を3次元に拡張したり、冗長自由度マニピュレータを用いなくとも、ベースを動かなくすることは可能である。ただし、クレーン部が大掛かりとなったり、力の発生可能範囲が広くとれない、といった問題もあり、必ずしも有効とは言えない。

2. 2 ワイヤ懸垂型マニピュレータ機構の概要

以上の考察より、提案する機構を図3のように決定した。マニピュレータは4リンクで、ベースの中央から懸垂されている。またベースはその両端からワイヤで吊り下げられている。平面内3自由度の制御のためにワイヤ支点の水平方向位置、ワイヤ長の4自由度と4リンクマニピュレータの計8自由度が用いられている。よって本機構は5自由度の冗長自由度を有している。ただし、ベース姿勢角は大きく変位させない限り作業性能に大きな影響を持たないパラメータなので、ここでは0とし、ベース部は水平になるようにしておく。これにより冗長自由度は4となる。また、運動学的なパラメータを図4に示す。

(x_g, y_g) はワイヤにより懸垂されている部分全体の重心座標を表している。また目標作業は手先位置・姿勢 $(x_{p0}, y_{p0}, \theta_0)$ とそこでの目標発生力 f_{g0} の実現とする。

Fig.3 Kinematic model of wire suspended manipulator

ここでは冗長空間の4つの独立変数としてワイヤ傾き角 θ_1, θ_2 , ベースの位置座標 x_b, y_b を用いる. 2本のワイヤが平行でない場合には, これら4つの変数を決めることにより, まず, 2台のクレーンの位置, 及びワイヤ長が簡単に決定できる. 次に, 目標の手先位置・姿勢を与えることで, マニピュレータ部の4つの関節角が決定できる. この際, 2本のワイヤ交点の真上に懸垂部の重心が存在しなければならないという力の釣り合い条件を用いる.

交点のx座標は, ワイヤ傾き角 θ_1, θ_2 とベースのx座標 x_b により, 式(1)のように決定される.

Fig. 4 Kinematic parameters of the manipulators

$$x_G = x_b - \frac{l_1}{2} + \frac{l_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (1)$$

一方, 懸垂部分の重心のx座標 x_G は, 式(2)のように4つの関節角 $q_1 \sim q_4$ で決定される.

$$x_G = x_b + \frac{1}{M} (m_1 c_1 \cos q_1 + m_2 c_2 \cos q_{12} + m_3 c_3 \cos q_{123} + m_4 c_4 \cos q_{1234}) \quad (2)$$

ただし,

$$M = m_b + m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

$$q_{12} = q_1 + q_2, q_{123} = q_{12} + q_3, q_{1234} = q_{123} + q_4$$

である. ところで, 手先目標位置・姿勢の3変数は式(3)と与えられる.

$$\begin{aligned} x_e &= x_b + l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_{12} + l_3 \cos q_{123} \\ &\quad + l_4 \cos q_{1234} \\ y_e &= y_b + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_{12} + l_3 \sin q_{123} \\ &\quad + l_4 \sin q_{1234} \\ \phi_e &= q_{1234} \end{aligned} \quad (3)$$

よって, 式(2)と式(3)を連立させることで全ての関節角値が算出できる.

ここでヤコビ行列 $J \in R^{4 \times 4}$ を

$$\begin{bmatrix} \Delta x_e \\ \Delta x_g \end{bmatrix} = \Delta \mathbf{x} = J \Delta \mathbf{q} \quad (4)$$

と定義すると, 式(5)を満たすよう $\Delta \mathbf{q}$ を決定することで, ベースを動かさず $\Delta \mathbf{x}_{ed}$ を実現できる.

$$\Delta \mathbf{q} = J^{-1} \Delta \mathbf{x}_d, \quad \Delta \mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{ed}^T & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

なお, ワイヤが平行な場合には, 2本のワイヤ間に重心が存在する限りどのような動作も可能である.

3. 静力学特性

本機構ではベースを変位させずにマニピュレータ手先で2次元力を発生できる. この発生可能な力ベクトル $\mathbf{f}$ の作用線はワイヤ交点を必ず通る. そして, 2本のワイヤ張力ベクトルを $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ とすると, 式(6)と表される.

$$\mathbf{f} = T_1 \mathbf{a}_1 + T_2 \mathbf{a}_2 \quad (6)$$

ここで T_1, T_2 はそれぞれ張力の大きさを表す. 懸垂のためだけに必要な張力を T_{gi} ($i=1,2$) とすると, 2つの張力はそれぞれ

$$T_i \geq -T_{gi} \quad (i=1,2)$$

の値しか取り得ず, T_{gi} は懸垂部の質量とワイヤ傾き角のみの関数となる⁽⁴⁾. この関係を図5に示す.

θ_1 が大きい時には左方向に, θ_2 が大きい時には右方向に力が出しやすいことがわかる.

手先において発生可能な力ベクトルと $\mathbf{f}$ の関係は, ワイヤ交点と手先の幾何学的関係を考えると判り易い. 図6のように, 発生可能な $\mathbf{f}$ は, 2本のワイヤ交点を通る並進力である. これを手先に変換すると, 並進力はそのまま伝達されると同時に, 手先と交点の相対位置に応じて手先にモーメントが発生する. つまり, 手先で発生できる力の並進成分はワイヤ傾き角によって決まり, モーメントは相対位置によって決まることがわかる⁽⁸⁾⁽⁹⁾. この関係を利用することで, 有効な冗長自由度利用法が検討できる.

Fig. 5 Wire angles and capable forces

Fig. 6 Cross point between two wires and end-effector

4. マニピュレータの可動範囲

一般に、広い可動領域を持つクレーンの時定数は大きく、フィードバック制御にはあまり向いていない。また、位置決め精度も高いとは言い難い。そこで、本機構の制御方法としては、まずワイヤの上部支点及びワイヤ長の制御によりベースを動かす、マニピュレータ手先を作業点近傍まで移動させ、次にマニピュレータ部のみを利用して手先の微小動作を行う、といった方法を取る。この際、マニピュレータがどのような姿勢をとった状態を仮定するかで、初めにベースを移動させる目標位置が変わってしまう。マニピュレータの初期姿勢として、可操作性を最大にする、条件数を利用して最適姿勢を求めておく、といった方法も考えることができる。しかし、ベースを一旦位置決めした後は、できるだけマニピュレータ単独で作業を行わせたいことから、ベースを動かさずにマニピュレータが動作できる範囲をあらかじめ調べておく、可動領域の中央付近に手先がくる姿勢としておくことが便利である。そこで、手先を水平に保ったまま、水平方向にどれだけの距離を移動できるかについて、シミュレーションを行った。なお、ここではワイヤは左右対称とし、ワイヤ交点がベース中央となるように設定している。利用したパラメータを表1に示す。これは試作機の値となっている。

結果を図7に示す。右と左の曲線がそれぞれ可動領域の限界を示している。左側の線は、途中が大きくくびれている。これはマニピュレータが第3関節で折りたたまれ、第1、第2、第3リンクがほとんど一直線になった状態である。この姿勢ではもはや重心制御と手先制御が両立しない。この時の式(5)のヤコビ行列はランク落ちしている。ただし、実際には構造的な制約から、各関節には可動範囲がある。全ての関節が可動範囲に存在する領域が図7のRの部分である。なお、これらの結果は、ベースリンク質量や長さによって大きく異なる。なお、本論文では最適設計問題は扱っていない。

Table 1 Parameters of wire suspended manipulator

	l_i m	c_i m	m_i kg
Base link(0)	0.16		9.0
Link 1	0.50	0.29	6.3
Link 2	0.33	0.15	1.7
Link 3	0.33	0.22	1.3
Link 4	0.14	0.068	0.3

Fig. 7 Working space of the suspended manipulator

5. 軌道制御実験

マニピュレータの手先を等速度で移動させる実験を、2通りの条件で行う。一つは、マニピュレータ部のみを最小ノルム解により動作させる場合、もう一つは提案手法を用いる場合、すなわち式(5)に基づいた指令により動作させる場合である。そして、ベースに取付けた傾斜計により、ベースの傾き角を測定することで、提案手法の有効性を検証する。なお、本実験では動力学的影響を無視している。

マニピュレータを図8に、装置のシステム構成を図9に示す。ベースは3本のワイヤで懸垂されている⁽¹⁰⁾。ただし、マニピュレータの存在する平面内のみを作業空間とすると、本システムを2次元モデルとして扱うことができる。その際、3本のワイヤ取付け点を、作業空間に関して対称としておくことで、ベースと3本のワイヤを、図4のベースリンクと2本のワイヤと同等とみなせる。なお、実験ではクレーン部の制御は行っていない。

Fig. 8 Photos of prototype robot

可動範囲の考察を基に、マニピュレータ先端がベース下部 47cm となるように初期姿勢を設定した。この高さは、マニピュレータの水平方向可動範囲が最も広くなる高さである。

Fig. 9 System configuration

実験結果を図 10 に示す。縦軸はベースの傾き角度、横軸は手先の水平方向変位を表している。グラフの x 軸が 0 の点がマニピュレータ初期姿勢で、ベースは水平である。手先には等速度軌道 7.5[mm/s]を与えている。グラフを見ると、重心位置を制御対象とした提案手法ではベースがほとんど傾いていないのに対して、最小ノルム解のみを利用した動作生成方法では、ベースが傾いていくことがわかる。

Fig. 10 Experimental results

グラフでは非常に周期の短い振動ノイズが見られる。基礎実験の結果から、ノイズの発生に合せてアーム全体が細かく振動する様子が観察されており、ノイズはギアのカタによるものであると考えられる。また、提案手法のグラフにおいて、約 8cm の所で一度大きな振動が見られる。観察の結果、これも機構のカタに起因していることがわかっている。動力学的効果を見逃したことによる影響は、懸垂部の振り子振動周期に近い成分として現れると思われるが、今回の実験ではほとんど観測されていない。これは

マニピュレータ動作が遅いためであり、高速動作時には考慮が必要になるものと思われる⁽¹¹⁾。

6. 結論

平面内 3 自由度を作業空間とするワイヤ懸垂型マニピュレータの構造を提案した。マニピュレータに機構的な冗長性を与え、手先位置・姿勢のみならず重心の水平方向変位も制御対象とすることで、準静的にベースを傾かせずにマニピュレータを動作させることができることを示した。更に試作機を用いた基礎実験により、提案手法の有効性を検証した。動力学的効果を考慮した更なる高速動作の実現、及び 3 次元空間への拡張が課題である。なお、本研究の一部はファナック FA ロボット財団平成 11 年度研究開発助成により行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) T.Arai, S.Matsumura, Y.Yoshimura and H.Osumi, "A proposal for a wire suspended manipulator. A kinematic analysis", *Robotica*, Vol.17, No.1, pp.3-10, 1999.
- (2) 大隅, "移動マニピュレータの制御", *日本ロボット学会誌* Vol.13(7), pp.904-907, 1995.
- (3) T.Fukuda et al, "Manipulator/Vehicle System for Mani-Robot Cooperation", *Proc. 1992 ICRA*, Vol.1, pp.74-79, 1992.
- (4) Q.Huang, S.Sugano and I.Kato, "Stability Control for a Mobile Manipulator Using a Potential Method", *Proc. IROS 94*, pp.839-846, 1994.
- (5) K.Yoshida, D.Nenchev, "Reaction Null-Space Based Control of Under Actuated Manipulators", *Proc. IROS98*, pp.1358-1363, 1998.
- (6) J.Albus, R.Bostelman, N.Dagalakis, "THE NIST ROBO-CRANE", *J.of Robotics Systems*, 10(5), pp.709-724, 1993.
- (7) K.Yuasa et al, "Hybrid Drive Parallel Arm for Heavy Material Handling", *Proc. IROS 99*, pp.1234-1240, 1999.
- (8) 大隅, 沈, 新井, "ワイヤ懸垂系における操り指標", *日本ロボット学会誌*, Vol.12, No.7, pp.1049-1055, 1994.
- (9) R.Kurtz and V.Hayward, "Dexterity Measure for Tendon Actuated Parallel Mechanisms", *Proc. Int. Conf. on Advanced Robot*, pp.1141-1141, 1991.
- (10) 大隅, 新井, 浅間, "3本のワイヤを有する 7 自由度クレーンの開発 (第 1 報)", *精密工学会誌*, Vol.59, No.5, pp.767-772, 1993.
- (11) M.Yamamoto, N.Yanai and A.Mohri, "Inverse Dynamics and Control of Crane-Type Manipulator", *Proc. IROS 99*, pp.1228-1233, 1999.