



3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発 (第1報)*

—クレーンの逆運動学—

大 隅 久** 新 井 民 夫** 淺 間 一***

Development of a Seven Degrees of Freedom Crane with Three Wires (1st Report)
—Inverse Kinematics of the Crane—

Hisashi OSUMI, Tamio ARAI and Hajime ASAMA

A 7 d. o. f. crane with three wires is proposed for automatic heavy parts assembly. The crane can control not only desired position but also orientation of a suspended object. The position and orientation control method of the crane is discussed under a static condition. By solving the simultaneous equations given by the geometrical constraints of the wire lengths and force constraints of gravity, the kinematics is calculated. Since the equations are non-linear, Newton-Raphson method is used. The kinematic characteristics of the crane is analyzed and the relationship between the desired orientation and the shape of the object is obtained. Redundancy of the crane is used to minimize the maximum value among the three tensions of the wires. The algorithm of the inverse kinematics is proposed and experimental results using a prototype crane prove the verification of the algorithm.

Key words: wire suspended mechanism, heavy parts assembly, crane, kinematics, inverse kinematics, position and orientation control, redundancy

1. はじめに

建設現場, 自動車工場, 原発の保守等に見られる重量物ハンドリング作業は極めて危険なため自動化が望まれる。対象物の重量, 作業範囲を考慮すると, 自動化にはクレーン等のワイヤ懸垂機構が不可欠であるが, 1本のワイヤで物体を懸垂する既存のクレーン構造では懸垂物の姿勢が制御できず, 更にワイヤ回りの回転振動も制振不能である。このため現在の熟練人に代わるロボット等の利用が必要となる。筆者らはこれまで既存の産業用ロボットと懸垂重量物の間に低剛性アームを取り付けることにより, クレーンとロボットの協調システムが実現できることを示している¹⁾²⁾。また, 池田らもクレーンと補助ロボットで構成されるシステムを想定し, 既存のクレーンにおける懸垂物のバランスシステムを提案している³⁾。これらのシステムを実現する際には位置決め点で残留振動する重量物をロボットでいかに捕捉するかが課題となるが,

これに関する研究は非常に少ない⁴⁾。また, 重量物が巨大になると, 懸垂物の姿勢誤差を補うためにロボットに必要な力も非常に大きくなるため, もはや人間の代わりとは程遠い巨大なロボットの導入が必要となってくる。これらの問題を解消するために, 本研究では懸垂物の6自由度方向すべてに対する振動制御, 位置・姿勢制御が可能な機構を, ワイヤ懸垂構造で実現することを目指し, このために最小限必要となる3本のワイヤを有する7自由度クレーン機構の開発を行った⁵⁾⁶⁾。

ワイヤ懸垂機構における懸垂物の釣合い位置は, ワイヤ長による幾何的拘束条件, 静力学による力の釣合い条件, の2つから決定される。ワイヤが複数本利用されている場合, これら2条件が非線形連立方程式となるため一般には解析解が得られず収束演算が必要となる。目標釣合い位置・姿勢を実現するための逆運動学計算時には演算量が更に増大する。このため, 複数のワイヤで懸垂物の位置・姿勢を制御している研究は, 鉛直面内の2次元のみを可動空間に持つスタッククレーンの開発⁷⁾に見られる程度であり, 6次元の位置・姿勢制御が実現可能なものは提案されていない。

* 原稿受付 平成4年8月17日

** 正会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)

そこで本報では第1報として、3本のワイヤを利用したクレーン機構の運動学的な特性を考察し、機構の有する冗長自由度を利用した逆運動学計算アルゴリズムを提案する。次に、試作したクレーンを用いて逆運動学解の検証実験を行い、その有効性を検証する。

2. クレーン機構の概要

懸垂物の6自由度方向すべての変位・姿勢の微小移動が独立に制御可能であるためには、懸垂物重心に力、モーメント6成分を独立に加えることのできる構造が必要である。力の3成分は、ワイヤを1本のみ利用した既存のクレーンにおいてもワイヤ長、ワイヤの支点位置を制御することにより発生可能である。しかし、単独のワイヤはその両端でモーメントを伝達することができないため、ワイヤ長、支点位置を制御しても懸垂物の姿勢を変化させることが不可能である。ワイヤ長、ワイヤ支点位置の制御により懸垂物に3つのモーメントを加えるためには、最低でも取付点が1直線上にない3本のワイヤで懸垂する必要がある。

ワイヤの本数を更に増加させれば懸垂物の制御特性の向上も期待できるが、逆に特性が極めて複雑となる。そこで本研究では、ワイヤ懸垂機構による懸垂物の位置・姿勢制御の基礎技術の確立を目的とし、必要最小限の本数である3本のワイヤを利用する。また、ワイヤ上端の3つの支点の位置決め機構についてもできるだけ自由度の少ない単純な機構を用いることとする。

クレーン機構の概観を図1に示す。 $a_1 \sim a_7$ はアクチュエータにより駆動される関節変数で矢印は駆動方向を表す。 $a_1, a_2, a_4 \sim a_6$ の単位はm、 a_3, a_7 はradである。クレーン上部の機構は水平面内の xy 位置決め系と、その下に固定された回転機構からなり、回転部分の円盤には3つのワイヤ送り機構が設置してある。それぞれのワイヤ取付点は円周を3等分する点となっている。 $a_4 \sim a_6$ はワイヤ長を表す。ワイヤで懸垂された懸垂物側の円盤にも回転機構が設置してある。本機構では、懸垂物側にも7自由度目の回転関節を設けており、ワイヤ張力の均一化、回転方向の運動制御特性の向上を図っている。

なお本報では、クレーンの静的な特性のみを取り扱う。

3. クレーンの運動学

クレーンの7つの関節角値 $a_1 \sim a_7$ が与えられた時の懸垂物の釣合い位置・姿勢の算出手順を示す。

3.1 懸垂機構の運動学

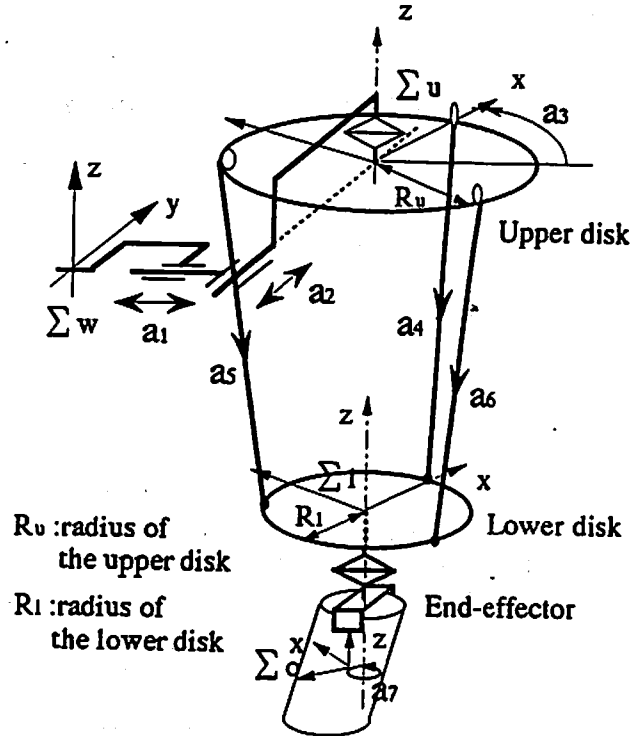


Fig. 1 Crane mechanism and coordinate systems

運動学計算に用いる座標系を図1のように導入する。作業表現の基準座標系としてクレーン座標系 Σ_w をとる。また上部円盤座標系 Σ_u 、下部円盤座標系 Σ_l 、対象物座標系 Σ_o をとる。 Σ_o の原点は懸垂物重心とし、姿勢は a_7 が0の時 Σ_l と一致するように設定する。

Σ_l は懸垂された座標系であり、 $a_4 \sim a_6$ の3つのワイヤ長による幾何的な拘束を受けているが、3つの自由度が決定されずに残される。これら幾何的拘束条件で決定されずに残された自由度が懸垂物に作用する力により決定される点が懸垂系の特徴である。力学的拘束条件の表現法として、対象物に重力以外の外力が作用している場合には①ワイヤ張力と対象物重力との力とモーメントの釣合い式を立てることが必要となる。この場合にはワイヤ張力も変数として扱われる。一方外力が作用していない場合には重力のみが懸垂物に働き、②対象物のポテンシャルエネルギーが最小となる条件、によりワイヤ張力を求めることなく位置・姿勢が計算できる。本報では外力が作用しない状態での運動学を扱うこととし、簡単のため②を利用する。

3.2 運動学の計算手順

運動学は懸垂物に課せられる幾何的拘束条件、力学的拘束条件を連立させることで計算される。以下では幾何的拘束条件、力学的拘束条件の順で計算法を示す。

Σ_i から Σ_j への同次変換行列を ${}^i T_j$ とする。ワイヤ上部の位置ベクトル x_{bi} ($i=1\sim 3$) を求めると、

$$x_{bi}' = {}^w T_u b_i, \quad x_{bi}' = [x_{bi}'^T \ 1]^T \quad (1)$$

但し、

$${}^w T_u = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_1 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$c_i = \cos(a_i), \quad s_i = \sin(a_i)$$

$$b_i = [R_u \cos(a_i) \ R_u \sin(a_i) \ 0 \ 1]^T$$

$$\alpha_i = \frac{2(i-1)}{3}\pi, \quad (i=1\sim 3)$$

と簡単に求めることができる。同様に下端支点の位置ベクトル x_{pi} ($i=1\sim 3$) も

$$x_{pi}' = {}^w T_0 ({}^i T_0)^{-1} p_i, \quad x_{pi}' = [x_{pi}'^T \ 1]^T \quad (2)$$

$$p_i = [R_i \cos(a_i) \ R_i \sin(a_i) \ 0 \ 1]^T$$

$${}^i T_0 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & x_i c_7 - y_i s_7 \\ s_7 & c_7 & 0 & x_i s_7 + y_i c_7 \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

と表現できる。但し、 x_i, y_i, z_i は $a_7=0$ の時の Σ_i における Σ_0 の原点座標を表す。式(2)の ${}^w T_0$ は基準座標系から懸垂物座標系への同次変換行列で、懸垂物の位置・姿勢6つのパラメータの関数となっている。

さて、 x_{bi}, x_{pi} 間がそれぞれワイヤによって連結されていることから、懸垂物の位置・姿勢6パラメータに対する幾何的拘束条件が式(3)として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \|x_{b1} - x_{p1}\| &= a_4 \\ \|x_{b2} - x_{p2}\| &= a_5 \\ \|x_{b3} - x_{p3}\| &= a_6 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

更に、幾何的拘束条件の下で残される3つの自由度として姿勢の3パラメータ ψ_0, θ_0, ϕ_0 を選ぶと、力学的拘束条件として式(4)を得る。

$$\frac{\partial U}{\partial \psi_0} = \frac{\partial U}{\partial \theta_0} = \frac{\partial U}{\partial \phi_0} = 0, \quad U = mgz_0 \quad (4)$$

m は懸垂物質量、 g は重力加速度、 z_0 は基準座標系における懸垂物重心の高さである。式(3),(4)で得られる6つの非線形連立方程式を解くことにより懸垂物の位置・姿勢 $x_0, y_0, z_0, \psi_0, \theta_0, \phi_0$ が算出できる。

以上で得られる解は張力が負となる場合を含んでいる。このため、得られた解から逆に張力を算出し、もし1本の張力が負となる場合には、負となるワイヤを除いた2本吊りのモデルを、2本の張力が負となる場合には1本吊りモデルを用いた新たな計算が必要となる。どちらも非常に容易なので本報では省略する。

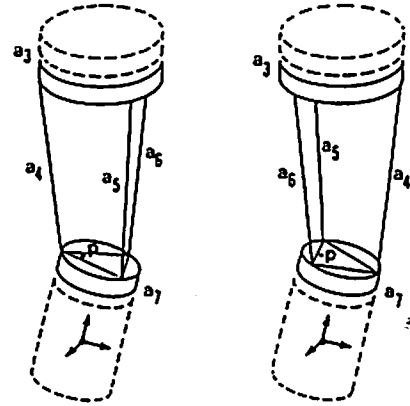


Fig. 2 Redundancy of the crane

4. クレーンの逆運動学

本クレーン機構は懸垂物の位置・姿勢6自由度に対し7つの関節を有しており、1自由度の冗長自由度を有している。冗長自由度マニピュレータの逆運動学に関しては、擬似逆行列と評価関数を利用した収束演算法が一般的であるが、解が局所的な最適解となるため、マニピュレータの初期姿勢に依存してしまう⁸⁾⁹⁾。

本研究では、まず本機構の有する冗長自由度の特性を調べ、この結果を利用してワイヤ張力の均一化を目的とした評価関数と簡単な幾何的関係を利用して1つの関節角値 a_7 を決定する。次に逆運動学計算を行うことにより大域的な最適解を得る。

4.1 クレーンの冗長自由度の特性

本機の冗長空間は関節角空間の $[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1]^T$ 方向に方向性を有する¹⁰⁾。この方向を直感的にとらえるため懸垂物の位置・姿勢を固定したままクレーンを冗長空間で動かした例を図2に示す。これよりクレーンの有する冗長自由度を利用してワイヤ長 $a_4 \sim a_6$ 、あるいは a_1, a_2 の値を大きく変えることが不可能である。従って、 a_3 または a_7 の利用を考えていく。

4.2 懸垂物の可動範囲

本機構の運動学的特性は $a_1 \sim a_7$ と共に懸垂物に作用する力の方向、大きさにも依存する。以下では外力が作用せず懸垂物に重力のみが働く場合を考え、重力方向と懸垂物の可動範囲との関係を明らかにする。

初めに a_7 を固定して冗長自由度を無くした場合を考える。懸垂物を目標位置・姿勢に位置決めできたと仮定し、目標姿勢にある懸垂物重心を Σ_w の z 軸に沿って下部円盤上に投影する(図3)。この時、3つの取付点が構成する正三角形の内部(境界を含む)に重心が投影されていれば、この目標位置・姿勢は達成可能となり、それ以外の場合には達成できない。これは ①ワイヤ張力は負の値を取り得ない、②ワイヤの3

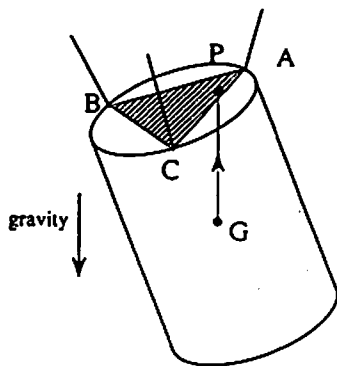


Fig. 3 Desired orientation and projection of the gravity center of the object

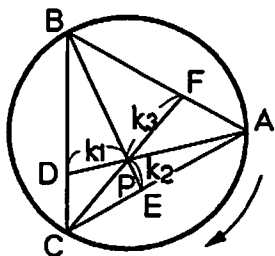


Fig. 4 Lower plate and projection

つの取付点のうち2点を結ぶ直線回りのモーメントの釣合いを考えると、重心がこの直線に対して残りの1点側に必ず存在する、という2条件から明らかである。

次に a_7 が利用可能とすると、正三角形を Σ_1 の xy 平面上で任意に回転させることができる。従って、懸垂物の重心が円盤の内部にさえ投影されれば、重心投影点を内部に含むよう正三角形をあらかじめ回転させておくことにより目標位置・姿勢が達成できる。つまり a_7 の導入により可動空間が広がったことになる。

重心が円盤の内部に投影されている限り、目標を達成できる a_7 はある区間において自由度を残しており、なんらかの評価関数の最適化に利用が可能である。そこで、本報では1本のワイヤへの張力の集中を回避するための評価関数を設定し、 a_7 の冗長度を決定する。

4.3 ワイヤ張力の均一化への冗長度の利用

ワイヤ張力の均一化を目的とした逆運動学解は、下部円盤上での重心の投影点とワイヤ取付点の幾何学的な位置関係から求まる。下部円盤を Σ_1 の z 軸方向から眺めた様子を図4に示す。A, B, Cはそれぞれワイヤ取付点、Pは重心の投影点である。また PD/AD を k_1 とする。懸垂物がこの姿勢で釣り合った場合、直線BC回りのモーメントは0である。従って重力を mg とすると、Aのワイヤ張力の重力方向成分は重力と反対方向に $k_1 mg$ の大きさを持つ。同様に点E, Fと長さの比 k_2, k_3 を図4のように設定すると、残りの

ワイヤ張力の z 成分は $k_2 mg, k_3 mg$ の大きさを持つ。従って、 k_1, k_2, k_3 はそのまま張力の基準座標系における z 成分の比を表している。これより、

$$\min_{\alpha_0 \in S} (\max(k_1, k_2, k_3)) \quad (5)$$

を満たす α_0 を決定すれば懸垂物の重力の1本のワイヤへの集中回避が図れる。但し、 S はクレーン逆運動学の解空間を表し、 $\max(k_1, k_2, k_3)$ は k_1, k_2, k_3 の最大の値を表す。この評価基準はワイヤ長/円盤半径比が大きい場合には近似的に張力の均一化と考えることができる。 k_1 は式(6)で求まる。

$$k_1 = \frac{R_1 + 2p \cos \beta}{3R_1} \quad (6)$$

$$p = \sqrt{(x_i - T_{31}z_i/T_{33})^2 + (y_i - T_{32}z_i/T_{33})^2}$$

β はPと Σ_1 原点を結ぶ線分が Σ_1 の x 軸と成す角で、 p はPと Σ_1 原点の距離である。 T_{3j} ($j=1\sim 3$) は Σ_w から Σ_0 への同次変換行列 ${}^w T_0 \in R^{4 \times 4}$ の $(3, j)$ 成分で、例えばロール・ピッチ・ヨーでの目標姿勢を ψ_d, θ_d, ϕ_d とすると式(7)のように計算できる。

$$\left. \begin{aligned} T_{31} &= -\sin \theta_d \\ T_{32} &= \cos \theta_d \sin \phi_d \\ T_{33} &= \cos \theta_d \cos \phi_d \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

k_2, k_3 は式(6)の β を $\pm 120^\circ$ ずらしたものとなる。これより式(5)を満たす解の1つは式(8), (9)で求まる。他の解はこれに $\pm 120^\circ$ を加えたものである。

イ) $p \leq R_1/2$ の時

$$a_7 = \arctan \frac{y_i - T_{32}z_i/T_{33}}{x_i - T_{31}z_i/T_{33}} \quad (8)$$

ロ) $R_1/2 < p \leq R_1$ の時

$$a_7 = \arctan \frac{y_i - T_{32}z_i/T_{33}}{x_i - T_{31}z_i/T_{33}} \pm \arctan \frac{\sqrt{4p^2 - R_1^2}}{R_1} \quad (9)$$

この式から、 a_7 の決定には目標姿勢のみが関与していることが分る。式(8)または(9)より a_7 が算出されるので、 $a_1 \sim a_6$ は一意に決定できる。

4.4 クレーンの逆運動学計算アルゴリズム

前節の結果から a_7 が決定できるので $a_1 \sim a_6$ は逆ヤコビ行列を用いた収束演算により一意に計算できる。

本クレーン機構の場合、ヤコビ行列の形を考察することで6次元空間の探索を3次元空間での探索に変換できる。機構の自由度配置から明らかのように式(10)のクレーンヤコビ行列 J は式(11)の形となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_0 &= J \Delta a \\ x_0 &= [x_0 \ y_0 \ z_0 \ \psi_0 \ \theta_0 \ \phi_0]^T \\ a &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 1 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ 0 & 0 & 0 & J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ 0 & 0 & 0 & J_{31} & J_{32} & J_{33} \\ 0 & 0 & 1 & * & * & * \end{bmatrix} \quad (11)$$

但し*, $J_{11} \sim J_{33}$ は0でない実数である。 J の1~3列の3~5行目の成分はすべて0となっている。このことは懸垂物のz成分, x, y軸回りの傾斜角が, $a_4 \sim a_6$, すなわち3つのワイヤ長を利用しなければ実現不能であることを意味する。これに対し $a_1 \sim a_3$ は関節角値がそのまま作業座標系の x, y, ϕ に対応している。よって, まず z_d, ϕ_d, θ_d のみを $a_4 \sim a_6$ で達成し, その後 $a_1 \sim a_3$ を計算するという手順を踏めば, 探索空間を $a_1 \sim a_6$ の3次元とすることができる。以下に手順を示す。

まずベクトル z, z_d, a_w を次のように定義する。

$$z_0 = [z_0 \ \phi_0 \ \theta_0]^T$$

$$z_d = [z_d \ \phi_d \ \theta_d]^T$$

$$a_w = [a_4 \ a_5 \ a_6]^T$$

また z_0 と a_w の間のヤコビ行列 J_w は式(11)の成分を用いて,

$$J_w = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

と表せる。現在位置・姿勢から計算される J_w と, z の目標値と現在値の差 $\Delta z = z_d - z_0$ を用いて, a_w の各関節の i 番目の繰返し計算値 a_{wi} を式(12)により更新する。

$$a_{w(i+1)} = a_{wi} + J_w^{-1} \Delta z \quad (12)$$

式(12)により得られる新たな $a_4 \sim a_6$ を用いて Δz が許容範囲に入るまで以上の手順を繰り返すことにより, 逆運動学解のうち $a_4 \sim a_6$ が得られる。得られた逆運動学解 $a_4 \sim a_6$ と, $a_1 \sim a_3$ の現在値から運動学計算を行い, 釣合い位置・姿勢の目標値からの偏差を求める。 z_d, ϕ_d, θ_d は既実現されているので, 誤差は x, y, ϕ 方向のみに存在する。これを $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$ とし, $a_1 \sim a_3$ を式(13)によって計算することで $a_1 \sim a_3$ の逆運動学解が得られる。

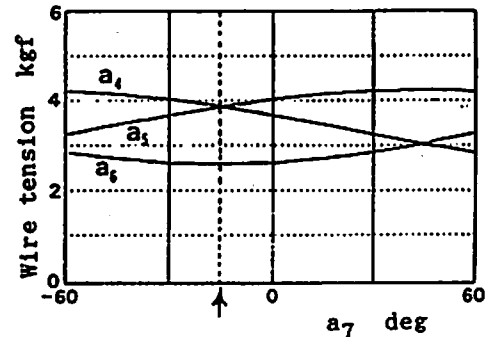
$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_1 + \Delta x \\ a_2 &= a_2 + \Delta y \\ a_3 &= a_3 + \Delta \phi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

5. 張力シミュレーションと測定実験

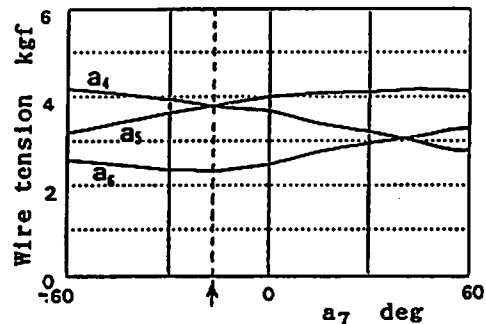
4章で求めた最適解の妥当性の検証を行う。実験に用いた試作クレーンは高さが2.5mで, 可動範囲はx

Table 1 Parameters of the experimental system

- Desired position and orientation :
 $x_d = [0.0[m] \ 0.0[m] \ -1.0[m] \ 0.1[rad] \ 0.1[rad] \ 0.0[rad]]^T$
- Optimal solution of a_7 : $a_7 = -15[deg]$
- Initial position of the gravity center of the object with reference to Σ_1 :
 $[x_i \ y_i \ z_i] = [0.0[m] \ 0.0[m] \ -0.1[m]]$
- Mass of the suspended object : $m = 10[kg]$



(a) Simulation result



(b) Experimental result

Fig. 5 Tensions of the three wires

方向0.9m, y方向0.6m, z方向1.0m, 可搬重量は20kgである。上部, 下部円盤半径はそれぞれ0.15m, 0.1mである。全関節にエンコーダが取り付けられてあり $a_1 \sim a_7$ が測定できる。懸垂物の姿勢計測センサにはz軸回りの回転角測定にジャイロが, x, y軸回りに2軸サーボ傾斜計が用いられ, 共に下部円盤に設置されている。また各ワイヤの下部円盤取付け部にロードセルが設置してあり, ワイヤ張力が測定できる。

図2に示したように懸垂物を目標位置・姿勢に固定したままクレーンを冗長空間で作動させ, ワイヤ張力を測定する。表1に実験条件を, 図5にワイヤ張力を示す。横軸はクレーン作動中の a_7 の値である。3本のワイヤ張力は a_7 に関し 120° ずつ位相のずれた値となるので, a_7 の 120° の区間で張力を調べれば最大値, 最小値がわかる。したがって, $-60 \sim +60^\circ$ の範囲での結果を示してある。なお下部円盤を合わせた懸垂物

の質量は10 kgである。(a)がシミュレーション結果, (b)が実験結果で, グラフ中の↑は式(8)から算出される最適解を表す。2つのグラフはほぼ同じとなっており, また理論的な最適解の点で張力の最大値が最小となることが確認できる。これより本計算法の正当性が検証できる。グラフでは張力の減少率, すなわち最大張力と最適解における最大張力との差が約11%程度であるが, この減少率は p の大きさに依存する。減少率 η は,

イ) $p \leq R_1/2$ の時

$$\eta = \frac{p}{3R_1} \quad (14)$$

ロ) $R_1/2 < p \leq R_1$ の時

$$\eta = \frac{4p - R_1 - \sqrt{3(4p^2 - R_1^2)}}{6R_1} \quad (15)$$

と表せる。 p が増加すると η はイ)の区間において単調増加であり, ロ)の区間において単調減少となる。これより, 本手法で得ることのできる最大の減少率は $p = R_1/2$ となる目標姿勢が与えられた場合に得られ, その値は約17%となる。本手法の利用による効果は大きいとは言い難いが, 逆運動学解として得られる大域的な最適解を利用することにより, 懸垂物の重量が大きくなった場合にもクレーンの性能を十分に発揮することができる。

6. 結 論

本報では, 重量物ハンドリング作業の自動化を目的とし, 以下のことを行った。

- (1) 重量物位置決め用の汎用マニピュレータとして3本のワイヤを有する7自由度クレーン機構を提案した。
- (2) Newton-Raphson法による運動学計算法を示した。
- (3) 懸垂物の取り得る姿勢とワイヤ取付点, 重量物重心, 重力方向の関係を明らかにした。

- (4) クレーンの冗長性を利用して, 1本のワイヤへの張力の集中回避を目的とする逆運動学計算法を提案し, その正当性を実機により検証した。

本研究のクレーン機構は既存のクレーンでは実現不可能であった懸垂物の姿勢制御, 懸垂物に生じるすべての振動の制振が可能となっている。この機構が利用可能な作業は建設をはじめ数多くの産業に見られ, 3K作業の中でも特に危険な重量物ハンドリング作業の自動化に向けて極めて有効な機構である。

参 考 文 献

- 1) 新井民夫, 大隅 久: クレーンとロボットの協調制御による重量物ハンドリング, 精密工学会誌, 57, 3 (1990) 467.
- 2) T. Arai, H. Osumi and J. Ohta: Crane Control System with an Industrial Robot, Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Contrs., (1988) 747.
- 3) 池田博康, 岩倉裕子, 天野光康, 向殿政男: 重量物搬送補助ロボット用システムの開発 (第1報), 第9回日本ロボット学会学術講演論文集, 3 (1991) 959.
- 4) 大隅 久, 佐藤賢一, 新井民夫: 2本の弾性アームによる振動懸垂物の把持, 第9回日本ロボット学会学術講演論文集, 2 (1991) 497.
- 5) T. Arai, H. Osumi and H. Yamaguchi: Assembly Robot Suspended by 3 Wires with 7 Degrees of Freedom, Proc. 11th Int. Conf. Assembly Automation, (1990) MS-90-807.
- 6) 大隅 久, 新井民夫, 榎本裕治: 複数のワイヤによる懸垂機構の制御 (第5報), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 3 (1991) 981.
- 7) T. Higuchi, A. Ming and J. Jiang-Yu: Application of Multi-Dimensional Wire Cranes in Construction, Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Contrs., (1988) 661.
- 8) C. A. Klein and Ching-Hsiang Huang: Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators, IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-13, 3, (1983) 245.
- 9) P. H. Chang: A Closed Form Solution for Inverse Kinematics of Robot Manipulator with Redundancy, MIT A. I. Memo, 854, (1986).
- 10) 大隅 久, 新井民夫, 浅間 一, 遠藤 勲: 3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発 (第1報), 第7回日本ロボット学会学術講演論文集, (1989) 607.