



3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発 (第2報)*

—懸垂物の振動制御—

大隅 久** 新井民夫** 藤平雅信*** 山口博明***
浅間 一† 嘉悦早人† 浦井輝夫††

Development of a Seven Degrees-of-Freedom Crane with Three Wires (2nd Report)
— Vibration Control of a Suspended Object —

Hisashi OSUMI, Tamio ARAI, Masanobu FUJIHARA, Hiroaki YAMAGUCHI,
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Teruo URAI

This research proposes a 7 D. O. F. crane with three wires for automatic heavy part handling. Since the crane suspends its object with three wires, it can reduce all the vibration modes of its suspended object. This paper proposes a method of the vibration control of the suspended object. Though the dynamic model of the crane control system is very complicated, three decoupled sub-systems are obtained after the linearization of the dynamic equations at an equilibrium point. Three optimal regulators are designed respectively and installed in the crane to reduce the residual vibrations in positioning. The experimental results using a prototype crane prove that the crane is efficient in handling heavy parts.

Key words: heavy parts handling, crane, wire suspension mechanism, vibration control

1. はじめに

建設を代表とする各種産業に見られる重量物ハンドリングは作業にとって極めて危険であることから、自動化が強く望まれている。重さが数トン程度の重量物のハンドリングには、可搬重量、可動範囲の点でワイヤ懸垂機構の利用が不可欠となる。しかし、1本のワイヤのみで懸垂する既存のクレーン単体では、懸垂物の姿勢が制御できず、さらにワイヤ回りに発生する懸垂物の振動も制御不能である。このため現状では作業者の補助を省くことが不可能となっている。

これに対し筆者らは、単体で懸垂物の位置・姿勢6自由度の制御が可能で、しかも懸垂物に生じ得るすべての振子振動の制振が可能なクレーン機構として、図1に示す7自由度クレーン機構を提案している¹⁾²⁾。ワイヤ本数を更に増やし7本のワイヤで適当な方向から引張ることで、懸垂物を任意の位置・姿勢に固定することも可能であるが³⁾、本クレーンでは操作性を考慮

し懸垂のためのワイヤを3本のみ利用している。 $a_1 \sim a_7$ は各アクチュエータの関節変数を表す。矢印は駆動方向で、 $a_1, a_2, a_4 \sim a_6$ は長さ、 a_3, a_7 は回転角度である。本機構は重量物ハンドリングのための汎用クレーンとしてその活躍が大いに期待される反面、運動学的・動力学的特性は複雑である。そこでまず第1報において静的な条件下における運動学的解析を行い、クレーン単独での懸垂物の位置・姿勢6自由度の位置決めを実現した。しかし、懸垂物が外乱等により力積を受けると、釣合い点を中心とした3次元の振動が発生する。このため実作業への適用を考えると、動力学

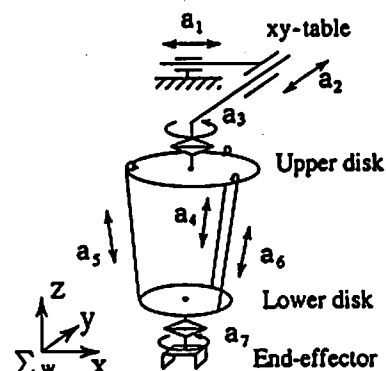


Fig. 1 Schematic view of the crane

* 原稿受付 平成5年4月19日
** 正会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)
*** 学生会員 東京大学大学院
† 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)
†† 理化学研究所

を考慮した懸垂物の振動制御系は不可欠となる。

第2報では、振動制御を実現することを目的とし、クレーン機構の動力学解析を行う。その結果得られる線形化モデルを基に懸垂物の残留振動制御手法を提案し試作機による検証実験を行う。懸垂物の振動制御については多くの研究があるが^{4)~6)}、複数のワイヤを有するクレーンに関する研究は少ない⁷⁾⁸⁾。

2. クレーンによる作業の概要

2.1 組付け作業手順

クレーン機構を用いた一般の組付け作業は

- 1) 玉掛け作業
- 2) 搬送 (グロスモーション)
- 3) 懸垂物の制振
- 4) 組付け点への誘導 (ファインモーション)
- 5) 組付け作業

の5つのフェーズよりなる⁹⁾。1)で玉掛けされた懸垂物は2), 3)のフェーズでクレーンにより位置決め点近傍まで搬送され制振される。4)では組付けのための目標位置、姿勢へゆっくりと微小量移動され、5)において作業員あるいはそれに代わるロボットによりねじ締め等の組付け作業が行われる。本クレーン機構を用いた場合も同様の手順で作業を実現することを考えることとし、これらのフェーズでの制御形態を見ると、1)と5)は作業員あるいはロボット等が行うフェーズ、2), 3)はクレーンが単独で行うフェーズである。4)については組付け作業に要求される相対位置精度の大きさによりクレーン単独で実現可能であるかロボット等の補助が必要かが決定されるが¹⁰⁾、いずれの場合についても第1報²⁾の結果が利用可能である。以上の5つのフェーズのうちクレーンの動力学を考慮して制御系設計を行うことが不可欠となるのは3)のフェーズである。

2.2 動力学方程式導出に際しての仮定

ラグランジュ方程式による動力学方程式の導出を行うが、本クレーン機構の厳密な動力学特性は極めて複雑となるため、得られた方程式から特性を解析し制御系設計を行うことが困難である。しかし動力学の考慮が実際に必要とされるのは、2.1節で示したように2)のグロスモーション後に発生する3)の懸垂物の残留振動制御時のみであることから、方程式の導出に当たっては以下の仮定を設ける。

- (a) すべてのワイヤ張力は常に正である。
- (b) 懸垂物重心は下部円盤座標系 Σ_1 の Z 軸上にある。
- (c) 3本のワイヤ長は等しく、固定されている。

(d) 振動する懸垂物の姿勢角 (ロール・ピッチ・ヨー (ψ, θ, ϕ)) の各パラメータの値は微小である。

(a), (d) は残留振動がワイヤがたるむほどの大きさではなく、また懸垂物に発生する角度変化も小さいことを意味し、(b), (c) はクレーン円盤中心の真下に対象物を水平に保ちながら懸垂すること、ワイヤ長を制振に利用しないことを意味している。(c) に関しては、ワイヤ長も利用することにより制振特性の向上が期待できるが、同時に懸垂物の動力学特性の複雑化を招くため有効な制御則の構築が極めて難しくなる。(c) は搬送過程のみの仮定で、クレーンの有効性を損なうものではなく、使用上も問題とはならないと考えられる。

3. 動力学方程式導出手順

ラグランジュの方程式を利用した動力学方程式の導出手順を示す。

- ① 懸垂物の姿勢を表す3つのパラメータ ψ, θ, ϕ (ロール・ピッチ・ヨー) と、3本のワイヤ長を除く4つのクレーン関節変数の計7つをクレーン制御系の一般化座標に選び、懸垂物原点の x, y, z 座標をこれら7変数で表現する。
- ② 懸垂物のポテンシャルエネルギー、運動エネルギーを①と同様のパラメータで表現する。
- ③ ψ, θ, ϕ の3つのパラメータを含む \sin, \cos をテーラー展開し、以下の近似を行う。

$$\sin x = x, \quad \cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2$$

- ④ ラグランジュ方程式に代入し①で選んだ7つの変数に関する運動方程式を求める。
- ⑤ 2次以上の微小量を見捨てる線形化を行う。

(a)~(d)の仮定にもかかわらず④の結果得られる非線形の動力学方程式は非常に複雑となり、姿勢パラメータに関するものでは数百項に及ぶ。しかし⑤の線形化により式(1)~(7)のようにわかりやすい結果が得られる。

$$M_1 \ddot{a}_1 + p\ddot{\theta} = F_1 \quad (1)$$

$$p\ddot{a}_1 + (I+q)\ddot{\theta} + k_n\theta = 0 \quad (2)$$

$$M_2 \ddot{a}_2 - p\ddot{\phi} = F_2 \quad (3)$$

$$p\ddot{a}_2 - (I+q)\ddot{\phi} - k_n\phi = 0 \quad (4)$$

$$(I_{ux} + I_{1x} + I_{ox}) \ddot{a}_3 + (I_{1x} + I_{ox}) \ddot{\phi} + I_{ox} \ddot{a}_7 = \tau_3 \quad (5)$$

$$(I_{1x} + I_{ox})(\ddot{a}_3 + \ddot{\phi}) + I_{ox} \ddot{a}_7 + k_t\phi = 0 \quad (6)$$

$$I_{ox}(\ddot{a}_3 + \ddot{\phi} + \ddot{a}_7) = \tau_7 \quad (7)$$

但し

$$M_2 = m_y + m_1 + m_0$$

$$M_1 = M_2 + m_x$$

$$I = I_1 + I_0$$

$$p = m_1 c_1 + m_0 c_0$$

$$q = m_1 c_1^2 + m_0 c_0^2$$

$$c_1 = \frac{L_{u1} R_1}{R_u - R_1}$$

$$c_0 = c_1 + {}^1z_0$$

$$L_{u1} = \sqrt{L^2 - (R_u - R_1)^2}$$

$$k_h = \{(m_1 + m_0) c_k + m_0 {}^1z_0\} g$$

$$k_l = (m_1 + m_0) \frac{R_u R_1}{L_{u1}} g$$

$$c_k = \frac{2L_{u1} R_1^2}{(R_u - R_1)^2} + \frac{R_u R_1}{2L_{u1}}$$

F_i : アクチュエータ i の発生する力 ($i=1, 2$)

τ_i : アクチュエータ i の発生するトルク ($i=3, 7$)

m_y : y 方向移動テーブル質量

m_1 : 下部円盤質量

m_0 : 懸垂物質量

m_x : x 方向移動テーブル質量

L_{u1} : 上部, 下部円盤間距離

L : ワイヤ長

R_u : 上部円盤半径

R_1 : 下部円盤半径

1z_0 : 下部円盤重心から見た懸垂物重心 z 座標

I_{uz} : 上部円盤の Σ_{wz} 軸回り慣性モーメント

I_{1z} : 下部円盤の Σ_{wz} 軸回り慣性モーメント

I_{0z} : 下部円盤, 懸垂物の Σ_{wz} 軸回り慣性モーメント

ト

I_0 : 懸垂物の Σ_{wx} (y) 軸に関する慣性モーメント

I_1 : 下部円盤の Σ_{wx} (y) 軸に関する慣性モーメント

ト

c_0 : 懸垂物重心と横揺れ時の回転中心間の距離

c_1 : 下部円盤重心と横揺れ時の回転中心間の距離

k_h : 振子の水平面傾き角に対する等価ばね定数

k_l : 振子のねじれ方向回転角に対する等価ばね定数

g : 重力加速度

各パラメータは図2の通りである。式(1), (2)が図中の x 方向, 式(3), (4)が y 方向, 式(5)~(7)が z 軸回りの回転の運動を表している。式(1)~(7)より, 懸垂物の運動は図3に示す3つの独立した方向の運動の重ね合わせとなっており, さらに x と y 方向の運動方程式は, ワイヤ取付点の配置が x, y 方向で異なっているにもかかわらず(図4)全く等価であることがわかる。

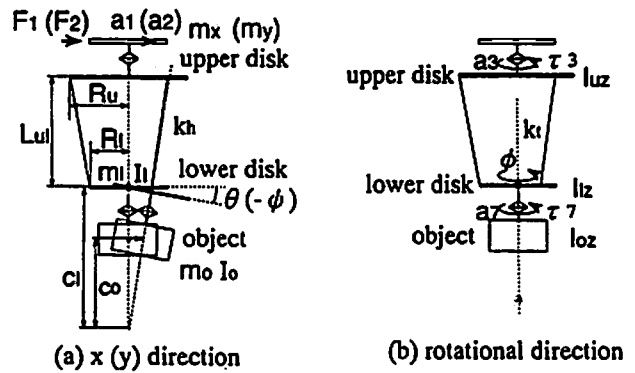


Fig. 2 Vibration model

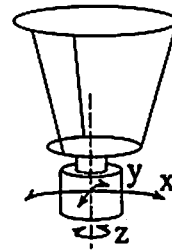


Fig. 3 Three vibration modes

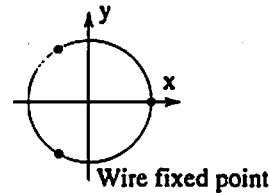


Fig. 4 Top view of the lower disk

4. 振動制御系の設計

4.1 振動制御系の設計

3章の結果より, 線形化モデルにおいては懸垂物に発生する3つの振動がそれぞれ独立で, しかもアクチュエータの制御入力も他の方向の運動には影響しないことが明らかとなった。従って, 3つの方向に独立に最適レギュレータを導入することにより, 簡単に振動制御が実現できると考えられる。 x, y 方向の運動モデルはパラメータは異なるものの全く同じ形となるので, レギュレータは2種類用意すればよい。以下では x, y 方向(横揺れ方向), z 軸回りの回転方向(ねじれ方向)の2つについて制御系を設計する。

4.2 横揺れ方向の制御モデル

x 方向の振動制御にはアクチュエータ1を利用するが, 実際のクレーンではアクチュエータとしてDCサーボモータを利用しており, 入力は電圧となる。更に, モータと移動テーブルの間には摩擦, 減速比の大きなボールねじが利用されているので, 懸垂物の振動により発生する反力がモータの回転トルクに及ぼす影

響を無視することとすると、式(1),(2)は式(8)の状態方程式に変換できる。

$$\dot{x} = Ax + bu \tag{8}$$

$$x = [a_1 \quad \dot{a}_1 \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{p}{T_1(I+q)} & -\frac{k_h}{I+q} & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_1}{T_1} & 0 & -\frac{K_1 p}{T_1(I+q)} \end{bmatrix}^T$$

T_1 : アクチュエータ1の時定数

K_1 : アクチュエータ1の速度/入力電圧比

y方向の振動に対してはアクチュエータ2を利用するが、式は省略する。

4.3 ねじれ方向の制御モデル

制御入力としてアクチュエータ3,7の2つへの電圧指令を利用することができるが、ここでは簡単のためアクチュエータ3を固定しアクチュエータ7のみを利用する。従って状態方程式は(9)となる。

$$\dot{x} = Ax + bu \tag{9}$$

$$x = [a_7 \quad \dot{a}_7 \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{I_{1z}}{T_7 I_z} & \frac{k_t}{I_z} & \frac{I_{1z}}{T_7 I_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{I_{oz}}{T_7 I_z} & -\frac{k_t}{I_z} & -\frac{I_{oz}}{T_7 I_z} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_7 I_{1z}}{T_7 I_z} & 0 & -\frac{K_7 I_{oz}}{T_7 I_z} \end{bmatrix}^T$$

$$I_z = I_{1z} + I_{oz}$$

T_7 : アクチュエータ7の時定数

K_7 : アクチュエータ7の速度/入力電圧比

4.4 振動制御系の構成

以上に示したそれぞれの状態方程式に対し、式(10)で表される評価関数PIを最小とする最適レギュレータを3つの方向それぞれに対して独立に設計し、図5のようにクレーン制御系に組み込むこととする。

$$PI = \int (x^T Q x + r u^2) dt \tag{10}$$

r: 入力電圧に対する重み

Q: 釣合い点からの変位ベクトルに対する重み行列
これにより振動の3成分を独立に制振することが可能となると考えられる。

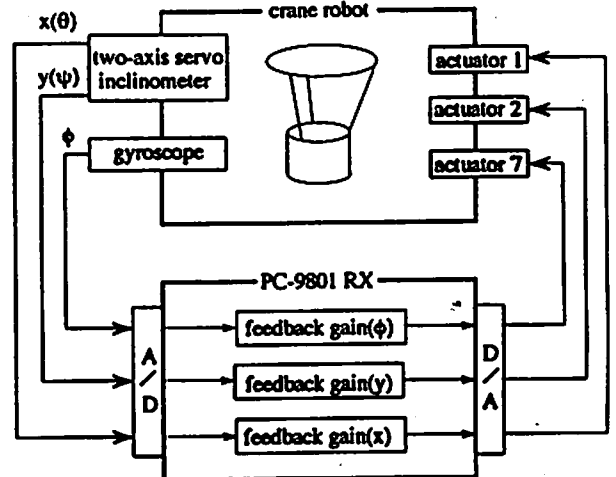


Fig. 5 Configuration of the controller

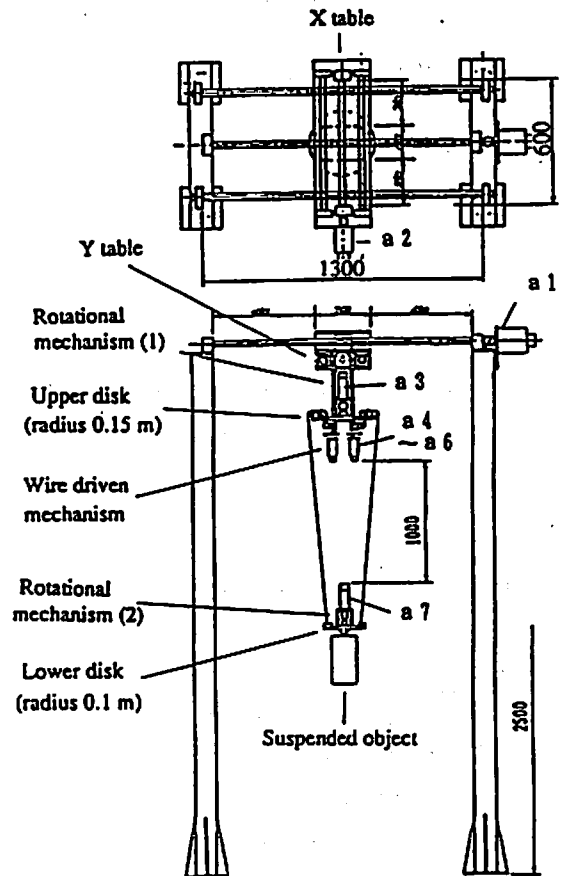


Fig. 6 Mechanism of the prototype of the crane

5. 試作クレーンの特性と振動制御実験

5.1 実験システム

図6に試作クレーンを示す。高さ2.5m、可動範囲はx方向0.9m、y方向0.5m、z方向1.0m、可搬重量は20kgである。アクチュエータ1~3,7にはDCサーボモータが、アクチュエータ4~6にパルスモータが利用されている。アクチュエータ1,2はボールねじ駆動によるxyテーブルを構成している。アク

Table 1 Specifications of the crane

	x	y	z
Working distance mm	9.0×10^2	5.0×10^2	1.0×10^3
Max. speed mm/s	5.0×10^2	5.0×10^2	1.7×10
Min. step mm	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}
Min. angle rad	4.9×10^{-3}	4.9×10^{-3}	1.4×10^{-2}

Table 2 Resolutions of the sensor system

x, y -direction mm	7.0×10^{-2}
Wire length mm	5.0×10^{-2}
Rotation about x, y -axis °	5.0×10^{-3}
Rotation about z -axis °	1.0×10^{-1}

Table 3 Parameters of the control system

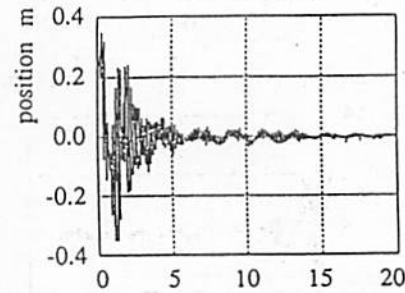
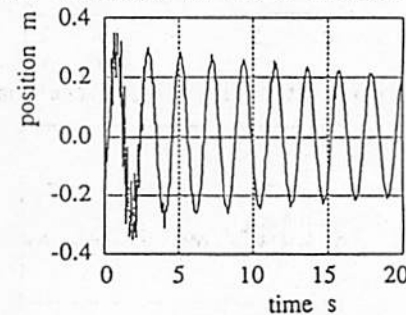
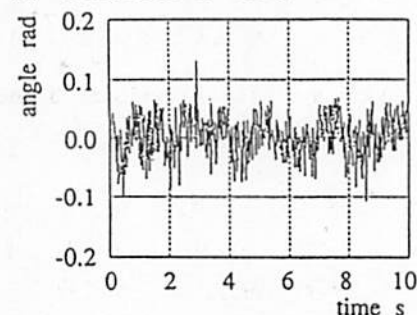
$m_u : 2.3 \times 10$ [kg]	$I : 4.0 \times 10^{-2}$ [kg·m ²]
$m_l : 1.5 \times 10$ [kg]	$I_{lx} : 6.0 \times 10^{-2}$ [kg·m ²]
$m_o : 1.5 \times 10$ [kg]	$I_{oz} : 6.0 \times 10^{-3}$ [kg·m ²]
$R_u : 1.5 \times 10^{-1}$ [m]	$T_l : 4.0 \times 10^{-2}$ [s]
$R_l : 1.0 \times 10^{-1}$ [m]	$T_r : 3.0 \times 10^{-2}$ [s]
$z_o : -1.5 \times 10^{-1}$ [m]	$K_l : 6.0 \times 10^{-2}$ [m/s·V]
$L_{ul} : 1.2$ [m]	$K_r : 3.0 \times 10^{-2}$ [rad/s·V]
$c_o : 2.3$ [m]	$K_h : 1.6 \times 10^2$ [N/m]
$c_d : 2.4$ [m]	$K_t : 1.5$ [Nm/rad]

チェーンタ 3, 7 にはハーモニックドライブギヤが、また 3 本のワイヤの巻上げにはウォームホイールギヤがそれぞれ用いられている。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。これらのセンサにより懸垂物の 3 つの姿勢パラメータが測定できるので、 $a_1 \sim a_7$ と併用することにより懸垂物の位置、姿勢が算出できる。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。クレーン、センサ系の仕様をそれぞれ表 1、表 2 に示す。

クレーン制御は NEC 製パーソナルコンピュータ PC-9801 RX (CPU 80286, 12 MHz) により行い、12 bit DA, AD コンバータが用いられている。制御サンプリングは x, y 方向の振動制御に関して 10 ms、ねじれ方向に関して 50 ms である。使用センサのハードウェア仕様が傾斜計とジャイロで異なるため、方向によりサンプリング時間が異なっている。実験システムの各パラメータ、用いたフィードバックゲインによるレギュレータの極はそれぞれ表 3、表 4 の通りである。横揺れ振動に関しては初期振幅が 200 mm、ねじれ振動に関しては 1 rad とする振動の制御シミュレーションを行い、それぞれ速度指令が飽和せず安定な制

Table 4 Poles of the optimal regulators

x, y -direction	Rotational direction
$-0.54 \pm 3.3j$	$-0.52 \pm 4.7j$
-0.44	-0.19
-25.0	-34.0

(a) Vibration in the x -direction(b) Vibration in the y -direction

(c) Vibration in the rotational direction

Fig. 7 Results of the vibration control

振応答を示すよう重み行列 Q と r を決定した。

5.2 振動の直交性の検証実験

3 つの振動方向の運動をそれぞれ独立とみなして制御することが可能であることを検証するため、3 方向に振動を発生させ、 x 方向のみ振動制御を行った。実験結果を図 7 に示す。

実験結果より、機構のガタにより高周波のノイズが見られるが、 x 方向の振動のみが制振され、そのほかの方向の振動は自由振動を続けていることが確認できる。これより x 方向の制御入力、すなわちアクチュエータ 1 の運動は y 方向、 z 軸回転方向には影響を及ぼさないこと、逆に y 方向、 z 軸回転方向の振動が x

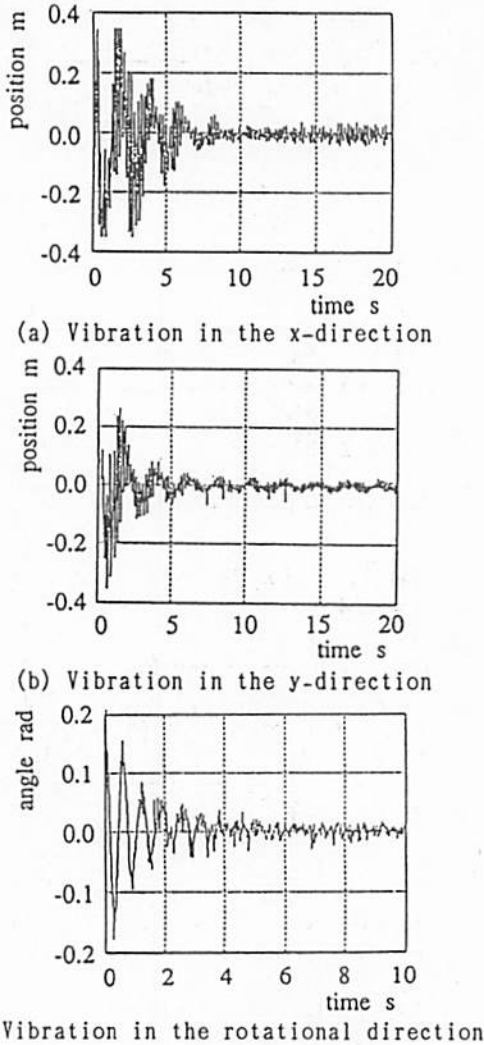


Fig. 8 Experimental results

方向の振動にエネルギーを供給しないことが確認できる。従って、独立な3つのレギュレータを導入することにより3つの振動が設計通りの極で減衰することが予想される。

5.3 制振実験

次に3方向すべてにレギュレータを導入し、5.2節と同様3方向に加振し制御を行った結果を図8に示す。

実験結果よりすべての方向の振動はレギュレータの作用によりすべて安定に制振されていることがわかる。x, y方向に関しては、自然減衰のみの場合振動が静止するまで約5分かかるが、制御により約10秒で制振が完了している。またねじれ方向に関しても、自然減衰の場合の約30秒に対して、10秒以内で振動の制御が行われている。これより、振動解析結果に基づいた制御系設計手順の有効性が検証された。

6. 結 論

本報では、第1報で提案したクレーン機構の動力学方程式を導出し振動制御系の設計を行い、試作機による検証実験を行った。

- (1) 動力学方程式を導出すると極めて複雑な非線形が得られるが、釣合い点近傍における線形化により、運動が3つの直交する方向の運動の重ね合わせとなることを明らかにした。
- (2) 動力学の解析結果を基に3つの方向独立に最適レギュレータを設計し導入した。
- (3) 設計した振動制御系の有効性を実機を用いた実験により検証した。

この結果、自由空間におけるクレーン単体での懸垂物の運動制御がすべて可能となった。本クレーンの利用により、搬送され残留振動している重量物を人手にたよらず制振することが可能となり、作業者の安全のためにも大いに活躍が期待される。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 大隅 久, 新井民夫, 浅間 一: 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, 59, 5 (1993) 767.
- 3) 大隅 久, 沈 于思, 新井民夫: 複数のワイヤによる対象物の操りに関する研究(第一報), 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, Vol. 3, (1992) 895.
- 4) 吉本堅一: 鉱石アンローダの自動化, 機械の研究, 23, 1 (1971) 40.
- 5) 福田敏男, 新家利彦: ゴンドラロープ系の位置・姿勢制御, 日本機械学会論文集(C編), 52, 482 (1986) 2677.
- 6) 坂和愛幸, 中住 晃: 油圧シリンダを用いた旋回式クレーンのモデリングと制御, 計測自動制御学会論文集, 21, 3 (1985) 298.
- 7) T. Higuchi, A. Ming and J. Jiang-Yu: Application of Multi-Dimensional Wire Cranes in Construction, Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Constr., (1988) 661.
- 8) T. Higuchi and A. Ming: Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires, Proc. Asian Conf. on Robotics and Its Application, (1990) 101.
- 9) T. Arai and H. Osumi: Crane Control System with an Industrial Robot, Proc. 5th Int. Symp. Robotics in Constr., (1988) 747.
- 10) T. Arai and H. Osumi: Construction System on Heavy Parts by the Coordinated Control between a Crane and a Robot, Proc. 9th Int. Symp. on Automation and Robotics in Constr., (1992) 879.