

### 3本のワイヤを有する七自由度クレーンとロボットの 協調制御システム\*

大隅 久<sup>\*1</sup>, 新井民夫<sup>\*2</sup>, 浅間 一<sup>\*3</sup>  
嘉悦早人<sup>\*3</sup>, 杉原理美<sup>\*4</sup>, 橋本学治<sup>\*4</sup>

#### Development of a Cooperative System Comprised of a Robot and a 7 D.O.F. Crane with Three Wires

Hisashi OSUMI, Tamio ARAI, Hajime ASAMA,  
Hayato KAETSU, Masami SUGIHARA and Gakuji HASHIMOTO

We propose a strategy for cooperation between a position-controlled manipulator and a crane with three wires. A compliant mechanism consisting of three free joints is designed and installed at the tip of the manipulator to avoid excessive inner forces due to mutual positioning errors of the manipulator and the crane. Since the cooperative system with the compliant mechanism becomes kinematically redundant, the characteristics of the redundancy are analyzed and a way to exploit the redundancy is discussed. The robot is position-controlled as a master and the crane is velocity-controlled as a follower by the feedback signals from the sensor systems of the crane and the free joint mechanism. The experimental results obtained using a prototype cooperation system verify the effectiveness of the cooperative strategy and the system architecture.

**Key Words:** Robot, Positioning, Crane, Cooperative Control, Free Joint

#### 1. 緒 言

重量物ハンドリングの自動化を目的とし、著者らはこれまでクレーンとロボットの協調システムを提案している<sup>(1)(2)</sup>。クレーンにより対象物の重力補償を行い、人間に代わるロボットにより対象物の位置決めを行う本協調システムは、クレーンの可搬重量とロボットの位置決め精度を併せもつという利点を有する。

このシステムを用いた重量物組付けの作業手順は、

- (1) クレーンが組付け点近傍まで重量物を搬送
- (2) 組付け点で待機したロボットが重量物を捕捉
- (3) ロボットが重量物を組付け点まで誘導
- (4) 組付け作業

となる。これら一連の作業を自動的に行う際に最も問題となるのが、残留振動する懸垂物をロボットで捕捉する方法である。これまで2本の弾性アームを利用し、人間のように両腕で物体を挟み、振動を抑制するための戦略を提案し検証実験を行っている<sup>(3)</sup>。この手

法を用いれば、1本だけのワイヤを有するクレーンを協調システムへ利用することが可能となる反面、把持のために最低限2台のロボットが必要となる。また振動の方向が多方向に及ぶ場合には制御系が複雑となり、実用化の妨げとなってしまふ。

著者らは3本のワイヤを有する七自由度新形クレーン機構を提案し(図1)、運動学、逆運動学<sup>(4)</sup>および振動制御法<sup>(5)</sup>を確立するとともに、試作および制御実験によりその有効性を検証した。その結果、本クレーンを利用することができれば、懸垂物に発生するすべての方向の振動がクレーン単体で制振可能となるので、

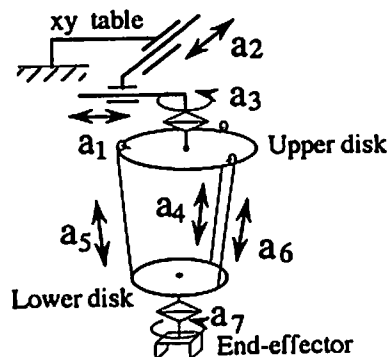


Fig. 1 Seven D.O.F. crane with three wires

\* 原稿受付 1996年7月8日。

<sup>\*1</sup> 正員, 中央大学理工学部 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)。

<sup>\*2</sup> 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

<sup>\*3</sup> 正員, 理化学研究所 (〒351-01 和光市広沢2-1)。

<sup>\*4</sup> 中央大学理工学部。

ロボットが捕捉する懸垂物は静止していると仮定でき、懸垂物を捕捉するための特別な制御は必要なくなる。

本稿では、これまで開発された3本のワイヤを有するクレーンと一般のPID位置制御系を有する産業用ロボットの協調制御システムの設計法を示し、この有効性を試作システムにより検証する。まず、位置制御系を利用して協調を実現するために、クレーンとロボットの間には六自由度のコンプライアンスが必要であることを説明する。次にクレーン懸垂系をばねモデルで表現することにより、ロボットが有するべきコンプライアンスを明らかにする。そして本研究で設計・試作した受動関節機構をロボット先端に導入する。受動関節機構の導入された本システムは運動学的な冗長自由度を有するので、システムの運動学的冗長性のもつ特性を考察する。最後にロボットをマスタ、クレーンをフォロワとした協調系を設計し、実験によりその有効性を検証する。

## 2. 位置制御系を有するロボットの協調制御システムの構成法

位置制御系を有する2台のロボットが同時に同一対象物を把持すると、そこには閉ループ機構が生成される。したがって2台のロボットがともに位置制御系により制御された場合、どちらかのロボットが位置決め誤差を発生すると対象物に過大な内力が発生し、対象物やロボットを破損する恐れがある。この問題に対処するため、従来の協調制御に関する研究の多くは、トルク制御系の利用を前提として、ロボット先端での力制御を行っている<sup>(6)</sup>。しかし、既存の産業用ロボットのほとんどは位置決め機構として設計されており、PID位置制御系により制御されているため、提案された制御系が実用化された例は少ない<sup>(7)</sup>。

これに対し著者らは弾性機構<sup>(8)(9)</sup>や受動関節の利用<sup>(10)</sup>による協調手法を提案している。図2は2台の剛体ロボットが受動関節を介して同一対象物を把持したシステムの機構モデルである。このとき、2台のロ

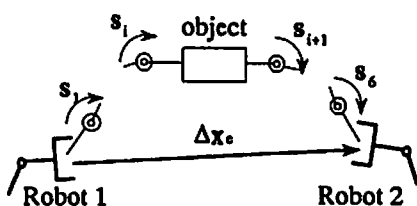


Fig. 2 Cooperative system between two position-controlled robots

ボットの手先間に六つの一次独立な方向に可動空間を有する六つの受動関節が存在すれば、位置制御系による協調が実現できる。これは、2台のロボット間の位置決め誤差を受動関節で実現することができ、なおかつその位置決め誤差を実現する六つの受動関節すべての値が2台のロボット間の相対位置・姿勢の誤差のみによって一意に決定されるからである。また、ばねを協調に利用する場合にも、ばねのたわみ方向を受動関節の可動方向とみなすことにより、全く等価な条件が得られる<sup>(11)</sup>。

本手法は、新たな機構を追加する必要がある点が制御によるコンプライアンスを利用する場合と比較して短所となるが、制御系が極めて単純化されることから、ロボット利用の目的が協調作業を中心とする場合には実用性が高いと考えられる。そこで本報ではこの原理をクレーンとロボットの協調に利用することでシステムの実現を図る。

## 3. クレーン・ロボット協調システムの設計

ワイヤ懸垂系のメカニズムは、ワイヤ駆動系の全関節を固定することにより対象物にフォームクロージャの条件が成立する、いわゆる  $n+1$  タイプと呼ばれるものと、ワイヤ長を含めた駆動系の関節角値のみでは対象物の位置・姿勢が決定できないタイプの2種類に分類することができ、前者は完全幾何拘束タイプ、後者は非完全幾何拘束タイプと呼ばれる<sup>(11)</sup>。クレーン等の懸垂系は後者に分類され、その特徴として対象物に外力が加わると振動を発生する。この振動は、ワイヤによる幾何拘束が存在しない方向にのみ発生する。本研究のように懸垂物を3本のワイヤでつり下げる場合には図3(a)の3方向に発生する。これらの振動はそれぞれ等価なばね・質量系によりモデル化することができるので、図2のロボット1をクレーンとみなした場合、クレーンは剛体リンクの先に一次独立な方向に張られた三つのばねを有している機構と考えることができる(図4)。図3(a)の対象物重心座標系に関する

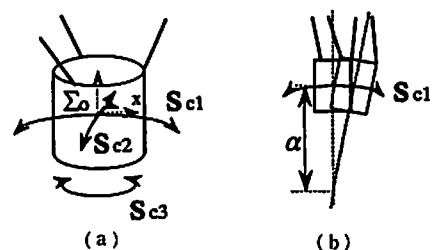


Fig. 3 Vibrations of wire suspension systems

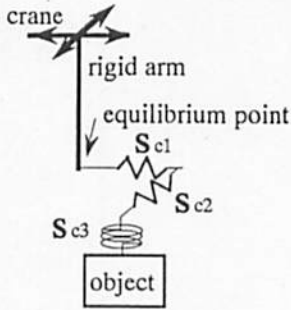


Fig. 4 Spring-mass model of a wire suspension system

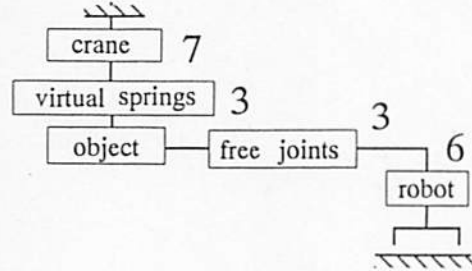


Fig. 6 Serial manipulator model consisting of crane and robot

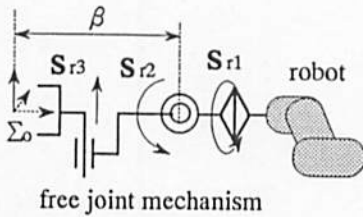


Fig. 5 Hand mechanism with three free joints

これらの方向ベクトルを  $s_{c1} \sim s_{c3}$  とすると、それぞれ

$$\begin{aligned} s_{c1} &= [0 \quad -\alpha \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \\ s_{c2} &= [\alpha \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T \dots\dots\dots (1) \\ s_{c3} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \end{aligned}$$

と表すことができる。ただし  $\alpha$  は水平方向振動の回転中心と重心間の距離で、図3(b)に示したとおりである。

よって、式(1)の三つのばねの方向と一次独立な方向に可動方向をもつ三つの受動関節を介してロボットが対象物を把持すれば、位置制御系による協調の条件が満たされる。本研究では、できるだけコンパクトに機構を実現することを目指し、図5に示す関節配置を有する受動関節機構を設計・試作した。図中に示したハンドの各パラメータを用いると、三つの受動関節の懸垂物重心座標系に対する可動方向ベクトル  $s_{r1} \sim s_{r3}$  はそれぞれ式(2)と表される。

$$\begin{aligned} s_{r1} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \\ s_{r2} &= [0 \quad 0 \quad -\beta \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T \dots\dots\dots (2) \\ s_{r3} &= [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned}$$

ここで

$$\det(s_{c1} s_{c2} s_{c3} s_{r1} s_{r2} s_{r3}) = -\alpha^2 \dots\dots\dots (3)$$

より、 $\alpha \neq 0$  であれば式(1)と(2)の六つのベクトルが一次独立であることがわかる。例えば本クレーン機構で円柱形状物体を扱う場合に  $\alpha = 0$  となるのは、ロボットハンドによる懸垂物把持点が、上部円盤と下部円盤の距離の2倍の長さだけ下部円盤よりさらに下方となる場合であり、実際のハンドリング物体の長さで

は  $\alpha \neq 0$  とみなして差し支えない。

なお、懸垂系の三つのばね定数は懸垂物の質量に比例し、またワイヤ長が長くなった場合には  $s_{c1}$ ,  $s_{c2}$  方向のばね定数はその長さにほぼ反比例し、 $s_{c3}$  方向は零に近づく。例えば懸垂物質量が1tでワイヤ長が10mの場合、 $s_{c1}$ ,  $s_{c2}$  方向のばね定数は約980 N/mで、クレーン・ロボット間誤差が10cm存在するとロボットには水平方向に約90Nの力がはたらく。よって、想定されるクレーンとの最大誤差を考慮した上で利用するロボットや、受動関節機構の強度を決定する必要がある。

#### 4. 協調制御系の設計

4.1 協調系の機構解析 受動関節やばねを内部に含む本協調系は機構的な冗長自由度を有する。本節ではまず、本システムにおける自由度の数を解析し、次いでその冗長自由度の利用法を検討する。

図6はクレーンのベースをベース、ロボットのベースを手先とするマニピュレータモデルである。このマニピュレータはアクチュエータを有するクレーン関節を七つ、ロボット関節を六つ、さらにクレーン懸垂系の等価ばねを三つ、ロボット先端に導入された受動関節を三つ、合計19個の関節を有している。

ロボットのベースは地上に固定されているので、このマニピュレータモデルの六つの自由度が幾何的に拘束されていると考える。目的の作業を懸垂物の位置決めとすると、さらに六つの幾何拘束が追加される。よって、合計12の幾何拘束により冗長自由度は七となる。

次に七つの冗長自由度がどのような効果を有するかについて考える。対象物を目標位置・姿勢に固定した状態で、再び冗長自由度を考えると、対象物とクレーンベースの間には、クレーン七自由度、懸垂系の等価ばね三つの合計10個の関節が存在する。このうち位置決めに必要な自由度は六であるので、クレーン側に

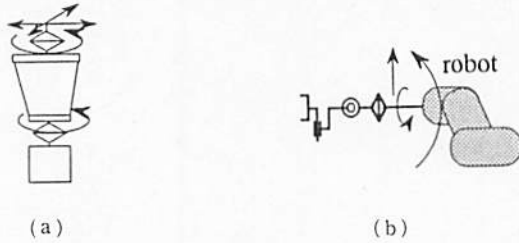


Fig. 7 Kinematic redundancy of crane and robot

は四つの冗長自由度が存在する。一方ロボット側には導入された受動関節三つとロボット本来の六つの関節の合計9個の関節が存在し冗長自由度は3となる。これらを図示すると図7(a), (b)となる。図7(a)はクレーン側に存在する冗長自由度方向を示したものである。懸垂物の3方向はロボットにより拘束されているので、この拘束方向に物体を駆動するクレーン動作は懸垂物の位置・姿勢を変えることがない。よって、クレーンは  $x, y$  方向にそれぞれ1自由度、 $z$  軸回り2自由度の冗長自由度を有する。図7(b)はロボットのもつ冗長自由度である。ロボットが受動関節の可動方向に動作しても、受動関節が変位するのみで懸垂物には力がかかるとはならない。したがって、図のような三つの冗長自由度を有していることがわかる。

**4.2 冗長自由度の利用法** 次に、これら七つの冗長自由度の利用法を検討する。本協調システムは、クレーンを重力補償、ロボットを位置決め精度向上に利用することを目標に設計されている。したがって冗長自由度利用の際にも、できるだけこれらの特性が発揮される利用法が望ましい。

まずクレーン側の四つの冗長自由度の利用法を検討する。協調系の設計方針に従うと、懸垂物の位置決めが完了した際にはロボット本体に懸垂物の重力をいっさい負担させないことが望ましいと考えられる。クレーン単体で懸垂物の目標位置・姿勢を達成してしまえばこの状態が実現でき、残された冗長自由度は1となる。この冗長自由度の存在するクレーン関節角空間は、アクチュエータ3と7の軸が一直線上にある場合にはこれら二つの関節を逆回転させる方向に存在し、懸垂物が傾いた状態で釣合っている場合にもこれに近い方向となる。この冗長自由度を利用すると、懸垂物を絶対座標で固定したまま懸垂物側の三つのワイヤ取付点の位置を回転させることが可能となるので、懸垂物位置決め点上空に障害物が存在した場合等に有効に利用できる。また、懸垂物を傾けて釣合せるときのように二つの回転軸が一直線上にない場合には、この冗長自由度を利用することにより特定のワイヤへの荷重

の集中を回避することが可能となる<sup>(4)</sup>。この手法は本協調系にもそのまま適用でき、アクチュエータ7の値を目標釣合い位置・姿勢に対してあらかじめ最適な値に設定することができる。

次にロボット側の三つの冗長自由度の利用法について考える。考えられる評価指標の種類としては大きく

(1) 目的の作業に対する最適性<sup>(10)(12)</sup>

(2) 協調のための機構条件に対する最適性

の2種類が考えられる。(1)のための具体的な評価指標としては、

(1.1) 受動関節機構先端におけるロボットの可操作性や力操作性を最大化することで、ロボット側からの対象物の制御性を最適化する、

(1.2) ロボットの位置決め精度ができるだけ高い位置・姿勢とする

等が考えられる。(1.1)は本協調系のロボットにアクチュエータとしての機能も期待したものであるが、クレーンの役割が懸垂物の位置決めに必要な力をすべて補償するものとする、あまり意味のある指標とはいえない。(1.2)はロボットにセンサとしての役割を期待したものであり本協調系の設計指針とも一致する。位置決め誤差がおもにロボットの関節角誤差に起因すると考えられる場合には、ロボットの可操作性楕円体の体積や方向性を利用して(1.2)に対応した評価関数を作ることができる。ただし、既存の産業用ロボットを利用し大型重量物の位置決めを行う場合には、ロボットの可動範囲内での位置決め精度は作業に必要な精度と比較して十分高いと考えてよい。次に(2)についての評価指標を検討する。(2)のための評価指標としては

(2.1) 式(1), (2)の六つのベクトルができるだけ直交するようロボット姿勢を決定することで、ロボット動作に対し協調の機構条件を崩れにくくする

(2.2) 各受動関節の関節変位が関節角可動領域の中間値にできるだけ近くなるようロボットの姿勢を決定する

(2.3) ロボットが動作する方向と受動関節の方向ができるだけ一致するようロボット姿勢を決定する

等が考えられる。(2.3)はロボットの目標動作があらかじめわかっている場合、動作時のロボットに力がかからないようにするという点で有効であるが、位置決め誤差の補正といった用途には意味がないものと思われる。(2.1), (2.2)が本協調系を確実に運用するための最も実用的な評価指標であると考えられる。(2.1)に関しては、クレーン側の等価ばねの直交性は変化させることができないので、受動関節に対応する三つの方

向ベクトルのみを最適化することになる。式(2)に示した受動関節機構の三つの方向ベクトルは、懸垂物が水平でさらに受動関節機構が(2・2)を満たしたときのものであり、 $\alpha \gg 1$ ,  $\beta \ll \alpha$ のときに六つのベクトルはほぼ互いに直交する。本試作装置の場合  $\alpha \approx 2.4$ ,  $\beta \approx 0.15$  であり、クレーンが大型化すれば  $\alpha$  の値もさらに増大する。よって、本報においては簡単のため(2・2)のみを評価指標として、冗長関節角の値を決定する。

5. 協調制御実験

5・1 協調制御システムの構成 本システムではクレーンが懸垂物の重力補償を行いロボットが位置決め精度を確保する。したがって、協調制御系もロボットをマスタ、クレーンをフォロワとした形態とする。どちらも位置制御系を利用し動力学は考慮しない。またロボットの協調動作範囲はクレーン可動範囲と比較して微小であるとし、クレーン側アクチュエータ7は4・2節に示した手法によりあらかじめ固定されているものとする。協調の手順を以下に示す。

クレーンによりロボット近傍まで搬送され制振された懸垂物をロボットが把持する。この際ロボット単独の動作には受動関節のブレーキを on しておく。ロボットが把持を完了すると、ブレーキを off にし、協調モードに入る。図8の協調モードでは、ロボットが目標位置決め点  $x_r$  まで動作すると、クレーン側の等価ばねにたわみ  $d_{c1} \sim d_{c3}$  が、またロボット側受動関節に変位  $d_{r1} \sim d_{r3}$  がそれぞれ発生する。クレーンの目標位置は、ばねのたわみ、受動関節変位がすべて零となる点である。よって、 $d_{c1} \sim d_{c3}$ ,  $d_{r1} \sim d_{r3}$  より懸垂物の目標動作を算出し、これをクレーンにフィードバックすることで協調が実現できる。これらの手順をまとめると以下のとおりとなる。

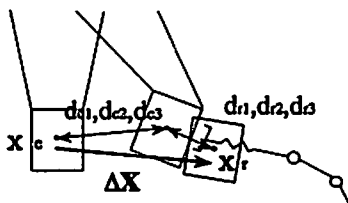


Fig. 8 Kinematic relationship of crane and robot

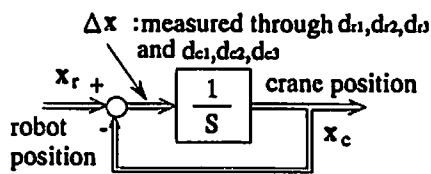


Fig. 9 Block diagram of cooperative system

- (1) クレーン運動学計算によりクレーン単独での懸垂物の釣合い位置・姿勢  $x_c$  を計算
- (2)  $d_{c1} \sim d_{c3}$ ,  $d_{r1} \sim d_{r3}$  を計測し、ロボットとクレーンの相対位置誤差  $\Delta x$  を算出
- (3) クレーンのヤコビ行列  $J$  を計算する
- (4) クレーンの関節角ベクトル  $q_c$  を  $q_c = q_c + J^{-1} \Delta x$  により更新

(1)~(4)を繰返すことにより協調動作が実現される。このアルゴリズムは概念的には1型のサーボ系となり(図9)、ロボットが停止した後の位置の定常偏差は発生しないが、ロボットの動作中には必ず偏差を生じる。これに対処するためには積分器の新たな導入等が必要となるが、本報では懸垂物の微小位置決め補正を協調制御の作業対象とし、動特性の補償は考慮しない。

5・2 実験装置 図10に試作した受動関節機構を示す。クレーン機構は高さ2.5m、上部円盤直径0.3m、下部円盤直径0.2mで、懸垂物質量は20kgである。詳細については文献(5)を参照されたい。クレーン側等価ばねのたわみ  $d_{c1} \sim d_{c3}$  の測定には、クレーン各関節に取付けられたエンコーダとクレーン下部円盤上に設置された傾斜計、振動ジャイロを用いる。これらの測定分解能を表1に示す。まず、クレーンアクチュエータのエンコーダにより懸垂物の本来の釣合い位置・姿勢  $x_c$  を算出し、次に傾斜計、ジャイロから得

Table 1 Resolutions of crane sensor system

x,y direction [mm]	$7.0 \times 10^{-2}$
wire length [mm]	$5.0 \times 10^{-2}$
rotation about x,y axis [rad]	$5.0 \times 10^{-3}$
rotation about z axis [rad]	$1.7 \times 10^{-3}$

Table 2 Resolutions of free joint angles

$d_{r1}, d_{r2}$ [rad]	$1.5 \times 10^{-1}$
$d_{r3}$ [mm]	$5.0 \times 10^{-1}$

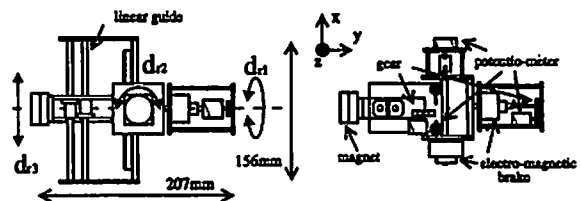


Fig. 10 Free joint mechanism

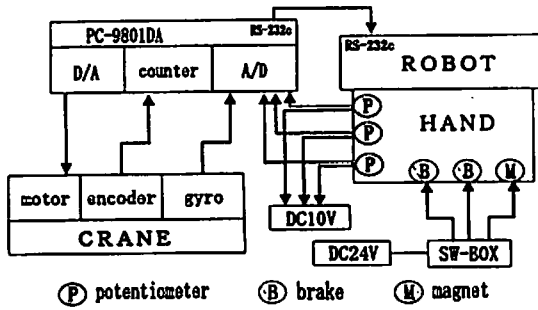


Fig. 11 Configuration of experimental system

られる懸垂物の実際の釣合い姿勢から懸垂物の現在位置・姿勢  $x_0$  を求める。この  $x_0$  と  $x_c$  の差として  $d_{c1} \sim d_{c3}$  が算出される。また、 $d_{r1} \sim d_{r3}$  を測定するためのポテンシオメータと、ロボットが単独で動作するときのためのブレーキがすべての受動関節に取付けられている。ポテンシオメータの精度を表2に示す。

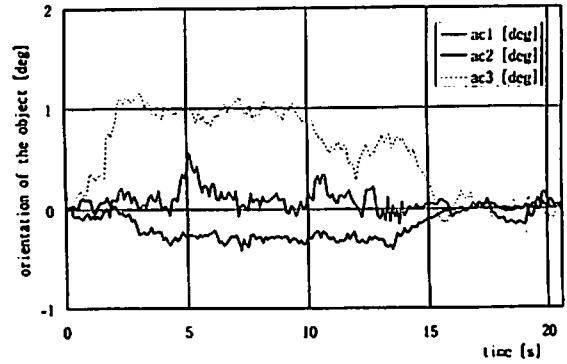
制御システムの構成を図11に示す。クレーン制御にはNEC製パーソナルコンピュータPC-9801DA (CPU 80386, 12 MHz)を用いる。ロボットは六自由度多関節形の三菱電機製MOVE MASTER RV-E2で、可搬重量2 kg, RS 232-cを介して位置制御される。位置決め精度は0.04 mmである。クレーンの各サーボモータは12 bit DAコンバータにより速度制御される。また、傾斜計出力、ポテンシオメータ出力、振動ジャイロ出力をADコンバータ、エンコーダ出力をカウンタボードによりそれぞれコンピュータに取込んでいる。クレーンの制御サンプリングは50 msである。

**5.3 協調制御実験結果と考察** 実験ではまず、ロボットが懸垂物を把持した後、いったん受動関節の各変位がすべて零となる位置までロボットを移動させ、その後、ロボットを

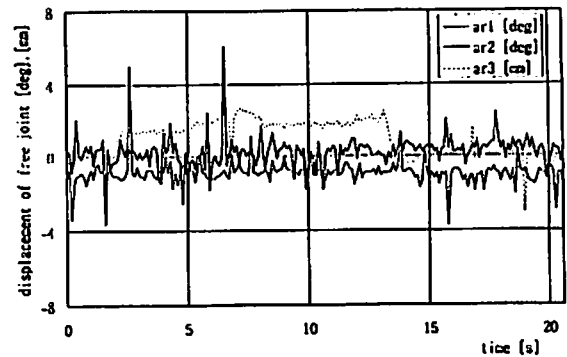
$$\Delta x = [50 \text{ mm} \quad 50 \text{ mm} \quad -50 \text{ mm} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

だけ7.3 mm/sで等速に動作させる。この動作に懸垂物が追従するようクレーンフィードバック制御を行う。

図12に実験結果を示す。図12(a)は懸垂物側の傾斜計およびジャイロから求められた傾き角を、図12(b)は受動関節角の値を示している。時刻1.5 sにおいてロボットが  $\Delta x_d$  の実現のための動作を開始し約13.5 sで停止している。一方クレーンは時刻零の時点からフィードバック制御され続けている。結果より、ロボットの停止後、それぞれの偏差はすべて速やかに零に収束しており、協調が実現できていることが確認できる。また受動関節の回転関節に若干ノイズが



(a) Displacement of virtual springs of crane



(b) Displacement of the free joints

Fig. 12 Experimental results

見られるが、懸垂物傾斜計の値からは懸垂物がほとんど振動なく搬送されているようすがわかる。また、5.1節で述べたように本制御アルゴリズムによって1型のサーボ系が構成されるため、ロボットが等速運動している間は定常偏差が発生していることが確認できる。以上より、本協調システムの有効性が検証された。

## 6. 結 論

本報では重量物の自動ハンドリングのためのクレーン、ロボット協調系を協調制御系で実現するための手法を提案し、3本のワイヤを有するクレーンと市販の産業用ロボットとの協調制御システムを構築し、その有効性を実験により検証した。

(1) 2台の位置制御系を有するロボットで同一対象物のハンドリングを行うための、受動関節の導入法を示し、クレーン・ロボット協調系に適用した。

(2) 内部に弾性部および受動関節を含む協調系の自由度を調べ、本システムにおける冗長自由度の効果を考察し、その利用法を提案した。

(3) ロボットをマスタ、クレーンをフォロワとする協調制御系の設計を行った。

(4) 試作システムを用いた協調制御実験により、

本システムの有効性を検証した。

協調に利用されるロボットの剛性を考慮し、受動関節を導入するという本研究の手法は、その簡便性から非常に実用的であり、今後のさらなる利用が期待できる。

#### 文 献

- (1) 新井民夫・大隅久, クレーンと受動関節の協調による重量物組立システム, 精密工学会誌, 57-3(1991), 467-472.
- (2) Arai, T. and Osumi, H., Construction System on Heavy Parts by the Coordinated Control between a Crane and a Robot, *Proc. 9th Int. Symp. Autom. and Robotics in Constr.*, (1992), 879-886.
- (3) 大隅久・新井民夫・佐藤賢一, 2本の弾性アームによる振動懸垂物の把持戦略, 日本ロボット学会誌, 12-8(1994), 1206-1213.
- (4) 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), 767-772.
- (5) 大隅久・新井民夫・藤平雅信・山口博明・浅間一・嘉悦早人, 3本のワイヤを有する7自由度クレーンの開発(第2報), 精密工学会誌, 59-12(1993), 2061-2066.
- (6) 例えば Hsu, P. Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems, *Trans. on Robotics and Autom.*, (1993), 400-410.
- (7) 小菅一弘・古賀雅伸・古田勝久・野崎景春, 仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御, 計測自動制御学会論文集, 27-1(1991), 93-100.
- (8) Osumi, H. and Arai, T., Cooperative Control between Two Position-controlled Manipulators, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Autom.*, 3(1994), 1509-1514.
- (9) 大隅久・新井民夫, 弾性機構の導入による産業用ロボットの協調作業への適用, 日本ロボット学会誌, 12-8(1994), 1192-1197.
- (10) Osumi, H., Arai, T., Yoshida, N., Shen, Y., Asama, H., Kaetsu, H. and Endo, I., Cooperative System between a Position-controlled Robot and a Crane with Three Wires, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, (1994), 347-358, Springer-Verlag.
- (11) Higuchi, T. and Ming: Study, A., on Multiple Degree-Of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires, *Proc. Asia Conf. Robotics and Its Appli.*, (1990), 101-106.
- (12) Chiu, S. L., Control of Redundant Manipulators for Task Compatibility, *Proc. 1987 IEEE Robotics and Autom.*, (1987), 1718-1724.