

# ワイヤを利用した3台の産業用マニピュレータによる協調制御

## Cooperative control of a three industrial manipulators with wire suspension mechanisms

精密工学専攻 28号 関村悠太

Yuta Sekimura

### 1. 序論

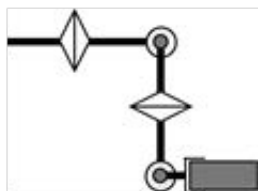
近年の生産現場では作業の複雑化や生産コストの観点等からロボットの導入が進んでいる。我々は特に塗装、溶接、組立といった様々な作業を行える産業用マニピュレータに注目し、その汎用性向上のため複数台での協調作業の実現を目指している。

しかし、協調作業を実現するには解決しなくてはならない課題が存在する。最も重要な課題となるのが、手先位置誤差による内力の発生である。マニピュレータの手先に位置誤差が発生した場合、把持物に過大な内力が発生し、把持物やロボットが破損してしまう可能性がある。この問題点に対して、インピーダンス制御等を用いることで解決している研究<sup>(1)</sup>等、力制御による研究が多く行われている。しかしこのような力制御では複雑な制御が必要であるといったデメリットが存在する。

先行研究では機構的なコンプライアンスによる問題の解決を目指し、Fig. 1のような受動関節機構を導入している<sup>(2)</sup>。この受動関節機構が発生する位置誤差に応じて受動的に動くことによって、過大な内力の発生を防ぐことができるため、位置制御ベースによる協調作業を実現するシステムの構築を可能とした。しかし、導入する受動関節構造自体が電磁ブレーキやエンコーダを備えなくてはならないため複雑化してしまうことや、ロボット単体での利用時に邪魔になってしまうこと等の問題がある。そこで本論文では、コンプライアンス機構として受動関節機構の代わりにワイヤ機構を利用することで、より実現容易な協調作業システムの開発を目指す。ワイヤ機構では受動関節機構とは異なり、マニピュレータ手先と把持物間の幾何学的関係は直接測定することができず、把持物の位置・姿勢が把握できないため、その幾何学的な関係性の導出を行う。



Fig. 1 Passive joint unit



### 2. ワイヤを利用した協調制御システム

#### 2.1 コンプライアンス機構

剛体を複数のワイヤで懸垂する際、懸垂に利用するワイヤ

本数が1本増える毎に、幾何拘束が1つずつ懸垂物に追加され、その分外力に対して動く方向が少なくなっていく。Fig. 2に示すように剛体を2本のワイヤで懸垂した場合、2自由度が拘束されるため4自由度が残るが、剛体の可動領域は先行研究で用いていた受動関節機構が剛体を把持した際と等価である。そのため、コンプライアンス機構として受動関節の代わりにワイヤ機構を利用することが可能であることがわかる。

#### 2.2 ワイヤを利用した協調制御システムモデル

2.1の考えから、本論文ではFig. 3のような協調制御システムを提案する。本システムはマニピュレータ3台が、ハンドリング対象物の3か所にそれぞれ2本ずつ取り付けられたワイヤを、それぞれ2本ずつ把持することによって構成されている。対象物は重力場で6本のワイヤに懸垂されており、完全幾何拘束条件が満たされているので、ある一定の大きさ以下の外力に対しては揺れが発生しない。また、このシステムはマニピュレータが相対位置誤差を発生しても過大な内力が発生しない。

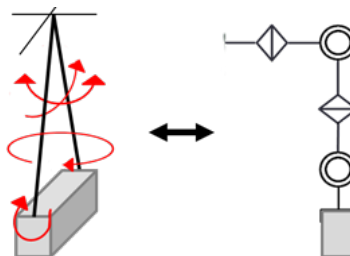


Fig. 2 Free motion space of rigid body suspended by two wires and passive joint mechanism

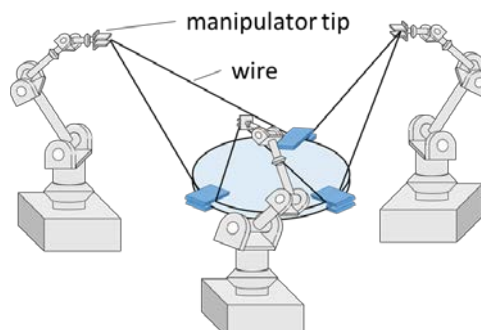


Fig. 3 Schematic view of cooperative system using wires

#### 2.3 モデルの特異姿勢

先行研究においてある特定の状況において対象物の拘束が不完全になってしまう、特異姿勢が存在することがわかっ

ている<sup>3)</sup>。本論文で提案する協調制御システムでは以下の2通りにおいて特異姿勢となってしまう。

- 3台のマニピュレータの手先が同一直線上に存在する場合
- 2本以上のワイヤが同一直線上に存在する場合

これらの状況に陥ってしまうと対象物の拘束が不完全になってしまい、対象物が揺動してしまうなどの問題が発生してしまう。そのため、実際にマニピュレータを動かし協調制御を行う際には、この特異姿勢を回避するための条件付けが必要となる。例えば、3台のマニピュレータの手先が同一直線上に存在させないためには、3つの手先によって作られる三角形の面積が一定以上の大きさにすること等の条件を、ワイヤが同一直線上に存在しないためには、マニピュレータの手先が一定以上は離れないようにする等の条件を設ける必要があると思われる。

### 3. 協調制御システムの運動学

#### 3.1 協調制御システムモデルの運動学

Fig 4に協調制御システムの運動学モデルを示す。ワールド座標系 $\Sigma_w$ は地面に水平な平面上に定義されている。懸垂対象物座標系 $\Sigma_o$ は懸垂された対象物の中心に定義され、対象物の位置 $\mathbf{x}_o$ 及び姿勢 $\Phi_o$ を表す。 $\Sigma_{mi}$ は*i*番目のマニピュレータのベースの座標系であり、その基準点は $\mathbf{x}_{mi}$ である。本協調制御システムには6本のワイヤが利用されているが、*i*番目のマニピュレータには2*i*番目及び2*i*+1番目のワイヤが接続されており、*i*番目のワイヤの対象物への取付点から*i*番目のマニピュレータの手先までのベクトルを $\mathbf{l}_{2i}$ と定義している。

${}^{mi}\mathbf{x}_{ei}$ を $\Sigma_{mi}$ から見た*i*番目のマニピュレータ手先の位置ベクトルとすると、これらのベクトルの幾何学的関係は式(1)のように表される。

$$\mathbf{x}_{mi} + \mathbf{R}_{mi} {}^{mi}\mathbf{x}_{ei} = \mathbf{x}_o + \mathbf{R}_o {}^o\mathbf{x}_i + \mathbf{l}_{2i} \quad (1)$$

このとき、 $\mathbf{R}_{mi}$ 、 $\mathbf{R}_o$ は、それぞれ $\Sigma_{mi}$ 、 $\Sigma_o$ の回転行列である。

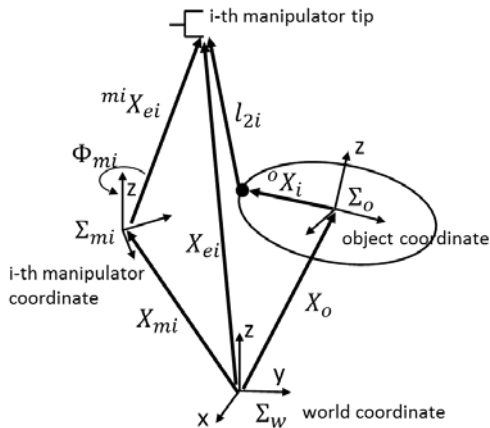


Fig. 4 The geometric relationship of robot hand and object

#### 3.2 マニピュレータ手先と対象物のヤコビ行列

マニピュレータの手先と懸垂対象物間のヤコビ行列の導

出を行う。まず、ワイヤの長さは既知であるため、以下のような式が得られる。

$$\|\mathbf{x}_{ei} - \mathbf{x}_i\|^2 = (x_{ei} - x_i)^2 + (y_{ei} - y_i)^2 + (z_{ei} - z_i)^2 = l_{2i}^2 \quad (2)$$

このとき、

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_o + \mathbf{R}_o {}^o\mathbf{x}_i \quad (3)$$

である。式(2)に含まれる変数はマニピュレータ手先位置 $\mathbf{x}_{ei}$ 及び懸垂物の位置 $\mathbf{x}_o$ 、姿勢 $\Phi_o$ のみである。そのため、ワイヤ6本分の式(2)について全微分することによって、Fig. 5にあるような $\Delta\mathbf{x}_{e1}$ 、 $\Delta\mathbf{x}_{e2}$ 、 $\Delta\mathbf{x}_{e3}$ と $\Delta\mathbf{x}_o$ 、 $\Delta\Phi_o$ の関係が以下の式(4)のように導出することができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}_o \\ \Delta\Phi_o \end{bmatrix} = \mathbf{J}_o \Delta\mathbf{x}_e \quad (4)$$

このとき、

$$\mathbf{x}_e = [\mathbf{x}_{e1} \quad \mathbf{x}_{e2} \quad \mathbf{x}_{e3}] \quad (5)$$

であり、 $\mathbf{J}_o$ は懸垂物位置 $\mathbf{x}_o$ 、姿勢 $\Phi_o$ とマニピュレータ手先位置 $\mathbf{x}_e$ 間のヤコビ行列である。

#### 3.3 マニピュレータ関節と手先のヤコビ行列

マニピュレータベース座標系 $\Sigma_{mi}$ における、*i*台目のマニピュレータの手先位置の変位とそのマニピュレータの関節角度 $\theta_i$ の間のヤコビ行列を $\mathbf{J}_{ei}$ と定義すると、マニピュレータ手先位置と関節角度の微小変位の関係は以下のように表される。

$$\Delta {}^{mi}\mathbf{x}_{ei} = \mathbf{J}_{ei} \Delta\theta_i \quad (6)$$

マニピュレータの関節は6つなので、

$$\Delta\theta_i = [\Delta\theta_{i1} \quad \Delta\theta_{i2} \quad \Delta\theta_{i3} \quad \Delta\theta_{i4} \quad \Delta\theta_{i5} \quad \Delta\theta_{i6}] \quad (7)$$

である。また、マニピュレータを操作する際には、ワールド座標系 $\Sigma_w$ における手先の移動量から必要な関節角度の回転量の計算を行うため、以下の式のような変換を行う必要がある。

$$\Delta\mathbf{x}_{ei} = \mathbf{R}_{emi} \mathbf{J}_{ei} \Delta\theta_i = \mathbf{J}_{mei} \Delta\theta_i \quad (8)$$

このとき、

$$\mathbf{R}_{emi} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ei} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{ei} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{ei} = \begin{bmatrix} \cos(\Phi_{mi}) & -\sin(\Phi_{mi}) & 0 \\ \sin(\Phi_{mi}) & \cos(\Phi_{mi}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

であり、式(10)の $\Phi_{mi}$ は $\Sigma_w$ に対する $\Sigma_{mi}$ のZ軸周りの回転角度である

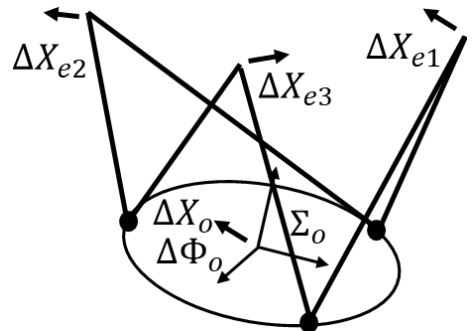


Fig.5 Small displacement of manipulator tip and object

## 4. 協調制御手法

### 4.1 協調手法の概要と前提条件

提案した協調制御システムでは、コンプライアンス機構を受動関節機構からワイヤ機構に変えたことによってマニピュレータ手先と協調対象物の幾何学的関係が直接測定できず、従来の協調手法が適用できなくなってしまった。そのため、3章で導出したマニピュレータと対象物の幾何学的関係を用いて、対象物を任意の位置・姿勢に動かすための、新たな協調手法を提案する。

ワイヤを利用した協調制御手法を提案するにあたり、前提条件を以下に示す。

- マニピュレータの手先には6軸力覚センサが搭載されている。
- マニピュレータの手先の高さの初期値は既知である。

### 4.2 協調制御アルゴリズム

Fig. 6 に本論文において提案する協調制御手法のフローチャートを示す。概要は以下の通りである。

- (1) カメラ及びレーザレンジファインダ等によって懸垂対象物の位置・姿勢を計測する。目標の位置・姿勢を達成していた場合は終了する。
- (2) 目標の位置・姿勢を達成していなかった場合、対象物の位置・姿勢及び手先の力覚センサの情報からマニピュレータ手先の位置・姿勢を導出する。詳しくは次節以降で述べる。
- (3) マニピュレータ手先の位置・姿勢から目標対象物位置・姿勢を達成するためのマニピュレータへの指令値を決定し、マニピュレータを動作させる。

この手順(1)~(3)を繰り返すことによって協調制御が実現できる。

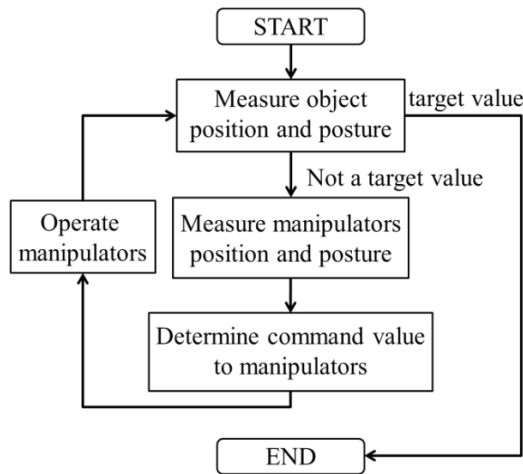


Fig.6 Control flowchart

#### 4.2.1 マニピュレータ手先位置

前節の協調制御アルゴリズム(2)において必要となるマニピュレータ手先位置の導出方法について説明する。Fig. 7 に示すように、 $P_i$ をマニピュレータ手先 $E_i$ から線 $G_iG_{i+1}$ への垂線の足とする。2本のワイヤ長 $l_{2i}$ 、 $l_{2i+1}$ 及びワイヤ取付点

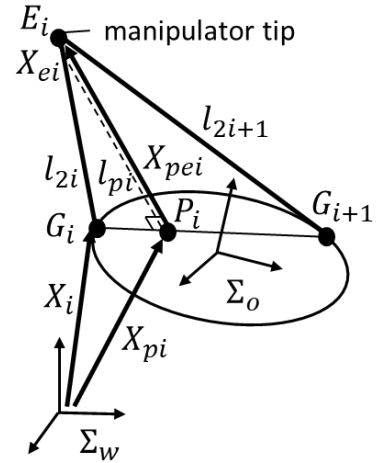


Fig.7 Relative position between manipulator tip and gripper

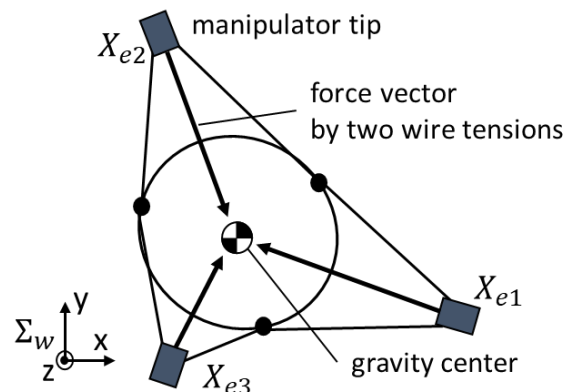


Fig.8 Top view of wire tension vectors applied to manipulator

$G_i$ と $G_{i+1}$ の位置は既知であるため、 $E_i$ 、 $P_i$ 間の距離 $l_{pi}$ も既知である。また、協調制御アルゴリズム(1)によって懸垂対象物の位置・姿勢も既知であることから、 $P_i$ の位置ベクトル $x_{pi}$ も計算できるため、 $P_i$ から $E_i$ までの位置ベクトル $x_{pei}$ が求まればマニピュレータ手先位置も求めることができる。

前提条件より $z_{ei}$ は既知であるため、 $z_{pi}$ は以下のようにして求められる。

$$z_{pei} = z_{ei} - z_{pi} \quad (11)$$

また、 $x_{pei}$ の長さは $l_{pi}$ と同じであるため、以下の式が成り立つ。

$$x_{pei}^2 + y_{pei}^2 + z_{pei}^2 = l_{pi}^2 \quad (12)$$

また、 $x_{pei}$ は線 $G_iG_{i+1}$ に対して垂直であるため、

$$x_{pei}^T (x_i - x_{i+1}) = 0 \quad (13)$$

が成り立つ。

式(11)~(13)から、 $x_{pei}$ のすべての要素が計算できるので、マニピュレータ手先位置がわかる。

#### 4.2.2 マニピュレータ手先姿勢

Fig. 8 に示すように、懸垂対象物が静止した状態であると、ワールド座標系のxy平面上においてマニピュレータ手先に加えられた力ベクトルは必ず対象物の重心を通過している。これは、もし力ベクトルが対象物の重心を通過していない場合、モーメントが発生してしまうため対象物が動いて

しまうことを考えれば明白である．そのため，マニピュレータ手先に搭載された力覚センサによって力ベクトルを計測すれば，現在マニピュレータの手先がどの方向を向いているかを知ることができる．

#### 4.2.2 マニピュレータ手先指令値

協調制御アルゴリズム(2)において必要となるマニピュレータ手先位置の導出方法について説明する．3.2節においてマニピュレータ手先と対象物の関係が式(4)のように求められたが，式中のヤコビ行列 $J_o$ の疑似逆行列を $J_o^+$ とすると以下の式が成り立つ．

$$\Delta x_e = J_o^+ \begin{bmatrix} \Delta x_o \\ \Delta \Phi_o \end{bmatrix} \quad (14)$$

上式の $\Delta x_o$ 、 $\Delta \Phi_o$ に協調制御アルゴリズム(1)にて計測した対象物の目標位置・姿勢までの偏差を代入することで，目標のマニピュレータ手先位置が導出できる．さらに，手先位置と関節角度の関係を表す式(8)から，式中のヤコビ行列の逆行列を用いると，

$$\Delta \theta_i = J_{mei}^{-1} \Delta x_{ei} \quad (15)$$

のような式が成り立つ． $\Delta x_{ei}$ に式(14)にて導出したマニピュレータ手先位置を代入することで，必要なマニピュレータ関節の回転角度を導出することができる．

## 5. 協調制御実験

### 5.1 実験環境

提案手法の有用性を確認するために協調制御実験を行った．Fig. 9は実験環境の写真である．使用したマニピュレータは安川電機製のMOTOMAN-HP3Jで，6自由度を有しており，耐荷重は3kgである．懸垂対象物の位置・姿勢を計測するためのカメラ・レーザレンジファインダとしては，Microsoft社のKinect v2を使用している．Kinectは床から約1.1mの高さに設置されている．解像度はxy方向に1.5mm，z方向に1mmである．懸垂対象物は半径82.5mm，高さ200mm，重さ2.5kgの円柱を使用している．

実験では，Table 1の初期位置・姿勢にある対象物を目標位置・姿勢まで，提案手法によって制御し，移動させる．対象物の姿勢はRoll, Pitch, Yawとし，それぞれ $\phi$ ， $\theta$ ， $\varphi$ で表す．



Fig.9 Experimental system

## 5.2 実験結果と考察

Table 1に実験結果を示す．Table 1から，提案手法によって対象物は目標位置・姿勢に移動していることがわかる．しかし，微小ではあるが誤差が残っていることも確認できる．これは対象物の位置・姿勢を計測する際に行うKinectを用いた画像処理に時間が掛かってしまい，システムのサンプリングタイムが0.8sと非常に長くなってしまっていることが原因だと考えられる．また，収束時間も約20sと非常に長くなっている．画像処理について最適化を行い，処理時間を短くすることが必要であると思われる．

Table 1 Position and posture of object

	initial pos.	final pos.	target pos.
X	-12.0 mm	-0.0 mm	0.0 mm
Y	49.5 mm	-1.5 mm	0.0 mm
Z	91.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
$\Phi(z)$	-28.0 deg	0.72 deg	0.0 deg
$\theta(y)$	-8.4 deg	-0.55 deg	0.0 deg
$\varphi(x)$	21.1 deg	0.15 deg	0.0 deg

## 6. 結論

本論文では，コンプライアンス機構としてワイヤ機構を利用した，複数台の産業用マニピュレータによる協調作業システムについて提案を行った．ワイヤ機構を用いることで先行研究における受動関節機構と比べ，容易に協調作業を実現することができる．まず，ワイヤを利用した協調制御システムモデルの提案を行い，その運動学についての解析を行った．そして協調制御手法を提案し，その有用性を実験によって検証した．実験結果から対象物を目標の位置・姿勢まで移動させることが確認できた．しかし，システムのサンプリングタイムが非常に長いとため，微小な誤差が残ってしまうことも確認できた．その原因である画像処理の高速化が今後の課題となる．

## 7. 参考文献

- (1) Schneider, A. S and Cannon, H. R, Object Impedance Control for Cooperative Manipulation: Theory and Experimental Results, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 8-3(1992) pp. 383-394
- (2) 太田諒, 森田一輝, 田村雄介, 大隅久, 受動関節機構を用いた3台の全方向移動マニピュレータの協調搬送制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2015) 2P1-V02
- (3) 大隅久, 加賀谷学, 相山康道, 3台の産業用ロボットによる協調制御システムの開発(受動関節機構の特異姿勢の導出), 日本機械学会論文集C編, Vol.74, No.748(2008) pp. 2985-2993.