

# ジョイスティックによるワイヤを利用した3台の産業用マニピュレータの協調制御

## Coordinated control of three cable tightly coupled manipulators with joystick

精密工学専攻 57号 蔣 偉波  
Jiang weibo

### 1. 序論

近年、製造技術の高度化に伴い、産業用ロボット単体での利用だけでなく、複数台のマニピュレータによる協調制御システムが利用され始めている。そこでは、ロボット間の物理的な接続に伴い発生する力の制約を考慮することが必要である[1]。産業用のロボットマニピュレータは位置制御される場合がほとんどであり、これにより協調制御を行った場合、相対位置誤差によりマニピュレータ間に過大な内力が発生する恐れがある。しかし、協調の理論はトルク制御系の利用がベースとなっているものがほとんどであり[2]、市販の産業用ロボットではユーザが使いこなすことが難しい。先行研究[3]では、Fig.1に示すように、位置制御系を有する汎用的なマニピュレータの先端にコンプライアンス機構として、ワイヤを導入することで、この問題に対応した。マニピュレータ手先の位置と懸垂物との運動学の関係を導出し、更に本システムの冗長自由度を利用し、ワイヤたるみおよびワイヤへの負荷の集中を回避しながら懸垂物を任意の位置・姿勢に制御することを実現した。

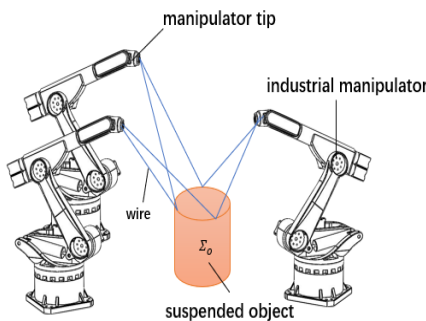


Fig. 1 Schematic view of a cooperative system using wires

このように複数のワイヤを利用したシステム[4]は、構造が単純で、コストが安く、可搬重量が大きいという利点がある。ただし、先行研究で提案されたワイヤ機構を含め、これらのシステムは、目標点の座標を一つ一つ入力するため、現場での位置合わせが必要となる複雑な生産環境には適さない。

そこで、本論文では先行研究における協調システムに対して、3自由度のジョイスティックでそれぞれ物体の位置と姿勢をリアルタイムに制御するシステムを開発する。これにより操作性を高め、複雑な作業環境に応じて迅速かつ的確な制御を行うことを可能とする。また、既存の産業用マニピュレータの利用を前提とし、本論文では速度制御を用いている[5]。最後に、本制御手法が実現可能であることの検証および有用性の確認を行う。

### 2. 協調システムモデルの運動学

Fig. 2にワイヤシステムの運動学モデルを示す。このシステムでは、各マニピュレータは2本のワイヤで物体を吊り下げている。ワールド座標 $\Sigma_w$ を基準とした水平面をx-y平面と定義する。物体座標の原点 $\Sigma_0$ を物体の重心とし、物体の位置を $x_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 、ロール角、ピッチ角、ヨー角で表される姿勢ベクトルを $\theta_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ とする。使用する6本のワイヤのうち、物体の*i*番目の接続点に接続するワイヤを $2i-1$ 番目と $2i$ 番目とし、*j*番目のマニピュレータから*i*番目の接続点へのベクトルを $l_{ij} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ と定義する。 ${}^{mj}x_{ej} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ を $\Sigma_{mj}$ から見た*j*番目のマニピュレータの位置ベクトルとする。 ${}^0x_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ は、 $\Sigma_{mj}$ から見た物体上の接続点の位置ベクトルである。これらのベクトルの幾何学的な関係は、式(1)で表される。

$$x_{mj} + R_{mj} {}^{mj}x_{ej} = x_0 + R_0 {}^0x_i + l_{ij} \quad (1)$$

ただし、 $R_{mj}$ と $R_0$ はそれぞれ $\Sigma_{mj}$ と $\Sigma_0$ の回転行列である。

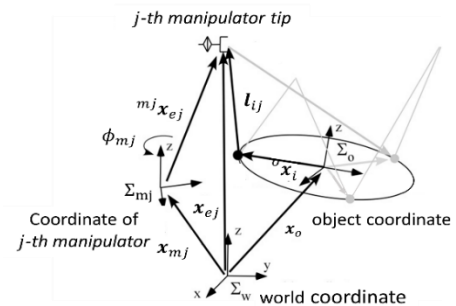


Fig. 2 The geometric relationship of robot hand and object

### 3. 協調制御手法

#### 3.1 冗長自由度を利用したマニピュレータ制御

各マニピュレータの自由度は6自由度、システムには合計18自由度がある。また、物体の位置と姿勢の変位は、各マニピュレータの手先の位置の座標で決まるため、手先の位置に対して3自由度の冗長自由度が存在する。物体の移動中に、ワイヤの張力が急激に変化することがあり、評価関数が不連続となる。そこで、式(2)で表されるワイヤの張力の二乗和を評価関数として用いる。

$$H = \sum_{i=1}^6 \tau_i^2 \quad (2)$$

評価関数  $H$  を最小化するマニピュレータの最適な手先動作は、式(3)のように表すことができる。

$$\Delta x_e = J_0^+ \Delta x_0 - k(I - J_0^+ J_0) \frac{\partial(H)}{\partial x_e} \quad (3)$$

ただし、 $k$  は定数、 $J_0^+$  はヤコビ行列 $J_0$ の擬似逆行列である。

この関数はワイヤの張力が変化しても連続的であり、特定のワイヤに張力が集中することを避けることができる。

### 3.2 評価関数による最小張力の維持

ワイヤの張力が一定値以下にならないように、式(2)の評価関数に最小張力に関する項をペナルティ関数として導入し、 $K_a$ を定数として最小張力を維持するようにした。このように、張力が $\tau_{min}$ に近づき、基準値 $\tau_{th}$ を下回ると、張力の二乗が強くなり、 $\tau_{min}$ より大きくなると、張力の2乗は減少する。

$$H = \sum_{i=1}^6 T_i^2, \begin{cases} T_i = \tau_i & (\tau_i \geq \tau_{th}) \\ T_i = \frac{K_a}{\tau_i - \tau_{min}} & (\tau_i < \tau_{th}) \end{cases} \quad (4)$$

$\tau_i$ が基準値より低い場合は、式(3)の $k$ を小さくするように定数の $\omega$ を設定し、式(5)を用いて手の位置が急激に変化するのを防ぐようにした。

$$k = \omega \times k \quad (5)$$

### 3.3 ワイヤ懸垂系に課せられる幾何的拘束条件

本システムは位置制御による協調系のため、3台のマニピュレータの手先配置が特定の幾何的関係になった場合、突然あるワイヤが弛んでしまう。この特異姿勢になると、物体に幾何拘束の存在しない空間が発生し、懸垂物の位置を幾何的に固定できなくなる[6]。この特異姿勢は下記の2つの条件で発生する。

- 3台のマニピュレータ手先が同一直線上に存在する
- 3台のマニピュレータ全ての手先姿勢が水平となっており、お互いのx軸が平行となっている

このうち、実際に発生しやすいのは1番目の条件であり、これを防ぐために、Fig.3に示すように、3つのマニピュレータ手先で囲まれた三角形の面積 $S_1$ を、予め定めた下限値 $S_2$ より大きくなるよう、マニピュレータ動作に拘束条件を設ける。

また、物体が運動している時、急激な加速度によって揺れを発生させないためには、協調搬送時の加減速が以下の不等式を満たす領域であることが必要である。

$$J_w^{-T} \begin{bmatrix} F_a \\ 0 \end{bmatrix} > J_w^{-T} \begin{bmatrix} -F_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

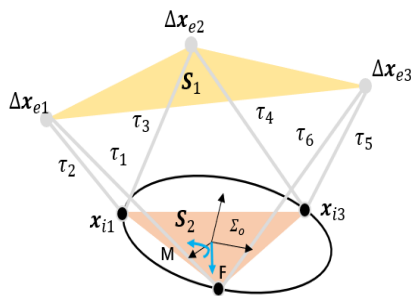


Fig. 3 Wire tension and system constraints

## 4. ジョイスティック制御

ジョイスティックを用いた速度制御手法では、ジョイステ

ィックからのデータを物体の速度指令に変換して使用する。速度の方向と大きさは、ジョイスティックに割り当てられた各軸の傾きによって決定される。

Fig.4に示すように、本研究で用いたジョイスティックは3自由度を持ち、懸垂物の目標位置、目標姿勢はモードを切り替えて利用する。位置制御ではジョイスティック出力座標 $X_j, Y_j, Z_j$ が定義されている。また、姿勢制御ではジョイスティックのRoll $j$  (Z軸回り)、Pitch $j$  (Y軸回り)、Yaw $j$  (X軸回り)が個別に制御される。



Fig. 4 Three degrees of freedom joystick

ジョイスティックからの物体の指令速度は式(7),(8),(9)で決定する。

$$V_n = K_j(X_{jn} - X_{j0}) \quad (7)$$

$$\Delta X_n = V_n t \quad (8)$$

$$X_n = X_{int} + \Delta X_1 + \dots + \Delta X_{n-1} + \Delta X_n \quad (9)$$

ただし、

$V_n = (V_{xn}, V_{yn}, V_{zn}, \phi_n)^T$ : ジョイスティックから出力される物体の各自由度の速度

$K_j = (K_{jx}, K_{jy}, K_{jz}, K_{j\phi})$ : ジョイスティックの情報を物体の各自由度の速度に変換するゲイン

$X_{jn} = (X_{jn}, Y_{jn}, Z_{jn}, \phi_{jn})^T$ : ジョイスティックの初期データ

$X_{j0} = (X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}, \phi_{j0})^T$ : ジョイスティックの原点データ

$\Delta X_n = (\Delta X_{xn}, \Delta Y_{yn}, \Delta Z_{zn}, \Delta \phi_n)^T$ : 速度制御による各サンプリング点での物体の微小な変位量

$X_n = (X_{xn}, Y_{yn}, Z_{zn}, \phi_n)^T$ : 速度制御に基づく物体の変位量

$X_{int} = (X_{int2}, Y_{int2}, Z_{int2}, \phi_{int2})^T$ : ジョイスティックで操作する前の物体の初期値

$n$ : サンプル数

$t$ : 1回のサンプリング時間

である。この $K_j$ を適切に決定することで、協調輸送の細かい操作が可能になる。また、オペレーターが遠隔操作することで、操作性が高まり、より実用的なシステムとなる。

Fig. 5に本実験での制御フローチャートを示す。

- ステップ1、物体を初期位置、姿勢に移動させる。

- ステップ2, 最小張力と特異姿勢回避を考慮したジョイスティック制御を行う。
- 以上の動作による制御を行い, 最小張力制約と冗長自由度を持つ評価関数が協調操作性に与える影響を検証する。

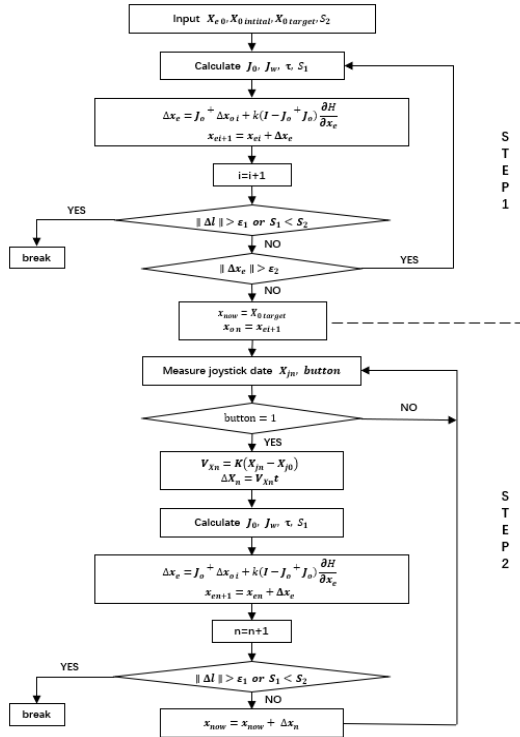


Fig.5 Control flowchart

## 5. 実験

### 5.1 実験環境

実験環境を Fig. 6 にシステムの構成を Fig.7 に示す. ジョイスティックには THRUSTMASTER の 3 自由度 TCA を, マニピュレータは安川電機製 6 自由度 MOTOMAN-HP3J を使用する. 各マニピュレータ手先の初期位置の計測に, ディテクト社 HAS-U1 を使用し, 距離計測には DippMotionV (計測精度 0.3mm) を使用する. 各マニピュレータ手先にレプトリノ製 6 軸力覚センサ PFS055YA501U6(分解能 $\pm 0.05N$ )を, 懸垂物に LORD 社製 IMU の 3DM-GX5-25 を使用する. 対象物は 2.5kg の円柱 ( $\phi 165 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ) である. ステップ2で物体の初期位置は  $X = 20 \text{ mm}$ ,  $Y = 20 \text{ mm}$ ,  $Z = -20 \text{ mm}$  であり, 姿勢は  $\text{Roll} = 0.7 \text{ rad}$ ,  $\text{Pitch} = 0.0 \text{ rad}$ ,  $\text{Yaw} = 0.0 \text{ rad}$  である.

### 5.2 実験結果

実験に用いたサンプリング時間  $t$  は 50ms, ゲイン  $K_j$  は 0.00244,  $\tau_{th}$  は 4.3N,  $\tau_{min}$  は 3.9N,  $K_a$  は 1 である. システムの安全のためワークスペースを  $X_0 \in (-60, 80)$ ,  $Y_0 \in (-60, 80)$ ,  $Z_0 \in (-60, 20)$  と設定した. 最小ノルム解の場合は  $k=0$ , 冗長自由度の場合は  $k=-0.5$  を設定する.

Table 1 はステップ1の実験における物体の最終位置, 姿勢で, 添え字の  $t$  はそれぞれ与えられた指令,  $a$  は動作結果である.  $k=0$  とした最小ノルム解の場合, 位置の最大誤差は 3.4mm, 冗長自由度を使用した  $k=-0.5$  の場合は 4.8mm であ

り, 最小ノルム解の場合より若干誤差が大きくなっている. この原因は, マニピュレータ手先の初期姿勢の誤差に起因していることが考えられる.

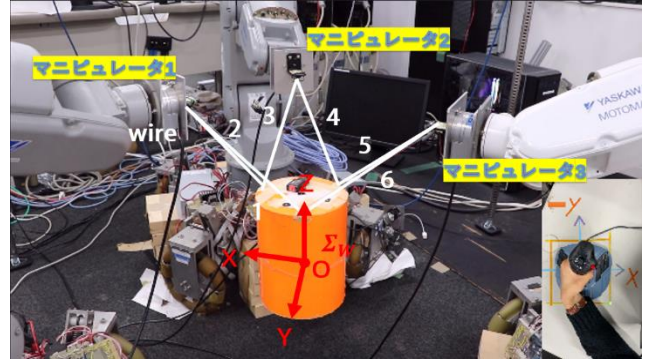


Fig. 6 Experimental system

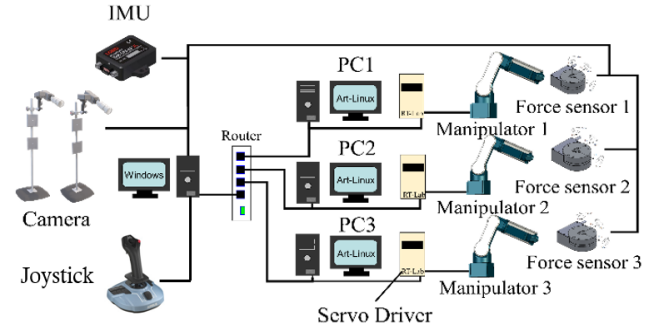


Fig. 7 Configuration of experimental system

Table 1 Terminal position of the object in positioning experiment

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	$\phi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\Psi$ [rad]
$X_t(k=0)$	11.3	20.7	-33.5	0.70	0.00	0.00
$X_a(k=0)$	10.0	23.6	-30.1	0.69	0.03	0.00
$X_t(k=-0.5)$	27.6	13.8	-25.7	0.70	0.00	0.00
$X_a(k=-0.5)$	32.4	11.3	-27.6	0.67	0.03	-0.02

Table 2 は位置実験に最小ノルム解と冗長自由度を使用した場合のワイヤ張力である. 実測値はシミュレーションデータに近く, 冗長自由度を利用した際にはワイヤ張力の二乗も減少する. これにより, 提案手法の有効性が検証され, 冗長自由度を使用することで動きを安定させることができる. ただし, 最大誤差は 1.3N から 1.8N に増加した.

Table 2 Wire tension at terminal position in position experiment

	$\tau_1$ [N]	$\tau_2$ [N]	$\tau_3$ [N]	$\tau_4$ [N]	$\tau_5$ [N]	$\tau_6$ [N]	$\sum_{i=1}^6 \tau_i^2$
Sim( $k=0$ )	7.7	8.1	5.6	8.6	9.3	5.8	355.4
Exp( $k=0$ )	7.4	7.6	4.3	9.9	9.7	5.7	357.1
Sim( $k=-0.5$ )	5.8	6.2	4.5	5.8	6.2	4.7	188.8
Exp( $k=-0.5$ )	4.2	6.9	6.3	6.3	7.7	5.0	227.2

Fig. 8, Fig.9 はそれぞれ最小ノルム解, 冗長自由度を利用

した場合の最終位置での手先位置，及び実時間の様子である。Fig.8 では動作中に特異姿勢に近づき物体動作が不安定となり，システムは最終的にシミュレーションとは異なる位置で停止した。一方，冗長自由度を利用した Fig. 9 では，物体は安定に動作し，実験位置がシミュレーションと一致した。

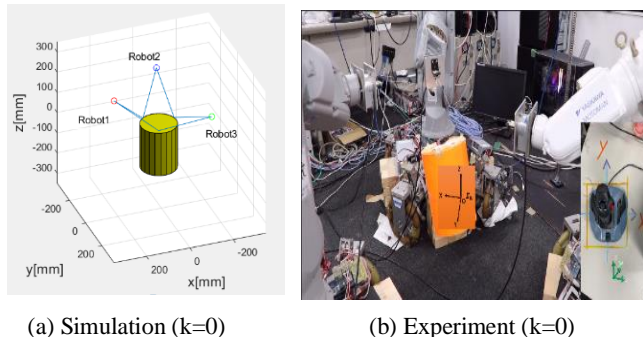


Fig. 8 Pose experiment under minimum parametric solution

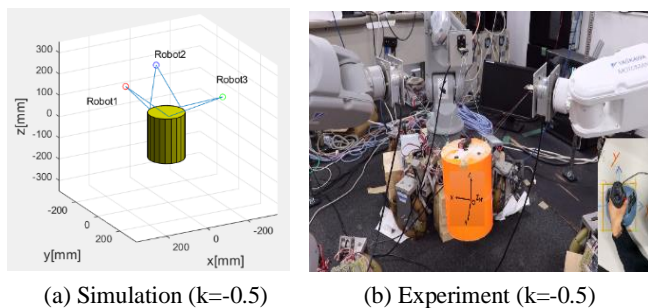


Fig. 9 Pose experiments using redundant degrees of freedom

Table 3 はジョイスティックによる物体の姿勢制御実験における懸垂物の最終位置，姿勢である。目標位置指令は与えられないので，誤差がなければいずれも初期の 20mm となる。結果を見ると  $k = 0$  では実測値と目標位置，姿勢の差が大きいものに対して， $k = -0.5$  では位置誤差が最大 4.8mm，ピッチ誤差も 0.17rad から 0.02rad と大幅に減少している。これより，冗長自由度を用いた制御の有効性が示されている。

Table 3 The final position of the object in Posture experiment

	x[mm]	y[mm]	z[mm]	$\Phi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\psi$ [rad]
$X_t (k = 0)$	20.0	20.0	-20.0	0.70	0.06	0.06
$X_a (k = 0)$	42.8	33.48	-31.84	0.71	0.23	0.11
$X_t (k = -0.5)$	20.0	20.0	-20.0	0.70	-0.09	0.00
$X_a (k = -0.5)$	17.2	15.2	-20.1	0.71	-0.07	0.02

Table 4 は姿勢実験に最小ノルム解と冗長自由度を使用した場合の最終位置でのワイヤ張力である。 $k=0$  では，ワイヤの最小張力が 1N と，シミュレーションとは全く異なる値になった。これに対して冗長自由度を使用した場合，張力の二乗和が 507 から 195 に減少し，最大誤差も 1.2N 程度であり，システムの有効性が検証された。ただし，3.6N という測定値があり，設定した最小値 3.9N を満たしていない。これは，実

験誤差によるものと考えられる。

Table 4 The wire tension at the last position in Posture experiment

	$\tau_1$ [N]	$\tau_1$ [N]	$\tau_1$ [N]	$\tau_1$ [N]	$\tau_1$ [N]	$\tau_1$ [N]	$\sum_{i=1}^6 \tau_i^2$
Sim( $k = 0$ )	6.8	8.7	5.0	12.3	12.9	3.8	480.8
Exp( $k = 0$ )	6.0	11.0	1.0	10.4	12.2	9.7	507.7
Sim( $k = -0.5$ )	7.2	5.8	5.3	4.1	4.8	7.0	201.7
Exp( $k = -0.5$ )	6.4	5.1	5.4	4.4	3.6	8.1	195.0

## 6. 結論

本論文では，ワイヤシステム機構を利用し，3 台の産業用マニピュレータやジョイスティックによるリアルタイム協調制御システムを提案した。最小ノルム解による動作と冗長自由度を利用したそれぞれの場合についてシミュレーションと検証実験を行い，ジョイスティックを使用したリアルタイム制御方法の妥当性が検証された。提案手法に基づく本実験の結果は，物体の位置誤差が 4.8mm 以内，姿勢誤差が 0.02 rad 以内である。提案手法によりシステムの操作性を改善でき，リアルタイムに制御可能なため複雑な生産に適したシステムの有効性が示されたと言える。今後は，リアルタイム制御のため，懸垂物が到達できる位置や姿勢の計算など，システムのワークスペースを考慮した具体的な手法を検討する必要がある。

## 参考文献

- (1) Babvey, S., Momtahan, O., & Meybodi, M. R. (2003, September). Multi mobile robot navigation using distributed value function reinforcement learning. In 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422) (Vol. 1, pp. 957-962). IEEE.
- (2) Nakamura, et.al (1987) "Mechanics of Coordinative Manipulation by Multiple Robotic Mechanisms," Proc. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.991-998.
- (3) 関村悠太, 森下翔午, 大隅久, 相山康道, ワイヤを用いた三台の全方向移動マニピュレータによる協調搬送, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集 1A2-E05
- (4) Wong, C. Y., Seet, G., & Sim, S. K. (2011). Multiple-robot systems for USAR: key design attributes and deployment issues. International Journal of Advanced Robotic Systems, 8(1), 12.
- (5) Kim, H. J., Tanaka, Y., Kawamura, A., Kawamura, S., & Nishioka, Y. (2015, August). Development of an inflatable robotic arm system controlled by a joystick. In 2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) (pp. 664-669). IEEE.
- (6) Osumi, et.al. (2008) "Cooperative Control System for Three Industrial Robots: Singular Configurations of Passive Joint Mechanisms", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.74, No.748, pp. 2985-2993.