

ワイヤを用いた3台の産業用マニピュレータの協調組付けシステムにおける位置誤差補正手法の提案

Proposal of compensation method of positioning error for cooperative assembly system consisting of three industrial manipulators with wires

精密工学専攻 13号 押川 慶則
Yoshinori Oshikawa

1. 序論

近年、主に単体で使用されてきた産業用ロボットを複数台用いた双腕型のマニピュレータシステムのような協調制御が利用され始めている。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、位置制御での協調制御時、マニピュレータ間の相対位置誤差の発生に起因し過大な内力が発生する恐れがある。先行研究⁽¹⁾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。また、本ワイヤ機構の持つ冗長自由度を利用し、特定のワイヤへの負荷の集中およびワイヤの弛み発生を両方を防ぎつつ対象物の任意の位置・姿勢への制御を実現した。

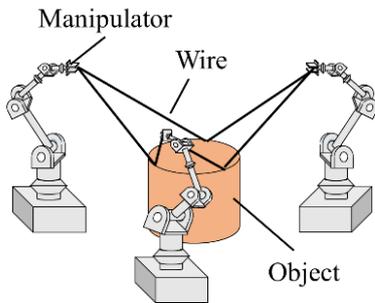


Fig. 1 Cooperative system model using wires

本システムは、重力場において n 本のワイヤを利用するため、重力を鉛直方向に張られたワイヤ張力と見なすことで、対象物の n 自由度を拘束することが可能である。本システムは1次独立な6本のワイヤを利用して対象物を懸垂するため、対象物の持つ並進および回転の6自由度を完全に拘束することができる。したがって、ある一定の大きさ以下の外力に対しては対象物に変位を発生させず作業を行うことができるという特徴がある。

このような、ワイヤを利用したシステムに関する研究⁽²⁾は数多く行われおり、重量物の取り扱いが可能である点、導入コストが安価である点が注目されている。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ワイヤによる幾何学的な拘束を利用するという特徴から、適用可能な作業が制限される場合がある。具体的には、ワイヤの弛みの発生が懸念される、外部環境との接触を伴う作業が当てはまる。ワイヤシステムは弛みが発生すると幾何学的な拘束が成立せず、対象物の位置・姿勢の把握および対象物の制御が困難と

なる。先行研究では、接触を伴う作業として組付け作業を対象とし、ワイヤが弛んだ場合でも制御可能とするための補正手法が提案されているが、条件式の不足から、対象物を懸垂する6本のワイヤのうち、1~3本のワイヤが弛んだ場合しか考慮されていなかった。

そこで、本論文では1~5本のうち任意本数のワイヤが弛んだ場合であっても適用可能な補正手法を提案する。なお、本論文では、位置誤差を持った穴への円柱の組付け作業時に、接触により任意本数のワイヤが弛んだ状況を想定する。この時、ワイヤによる幾何拘束のみでは対象物を制御できないため、静力学的な条件や接触による拘束条件を加え、対象物や穴の位置等の導出および補正を行う。また、本補正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. ワイヤを利用した協調系の特徴

本システムには、コンプライアンス機構部に対する運動学的な条件(条件1)、ワイヤを利用するための条件(条件2)といった、運用のために満たすべき二つの必要条件が存在する。本システムにおいて条件1が満たされないのは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の二つの場合のみであることが明らかとなっている⁽³⁾。そこで、本システムでは、制御指令値生成時に3台のマニピュレータ手先位置が作る三角形の面積にしきい値を設定することで、これらの状況を回避している。

条件2は、6本のワイヤ張力が全て正であるという条件であるが、Fig.2に示す本論文で想定する組付け作業の場合、穴との接触によりワイヤが弛み、条件2が満たされず制御指令の生成が不可能になってしまうため、ワイヤが弛んだ状況でも本システムを適用可能とするための補正手法提案の必要性がある。

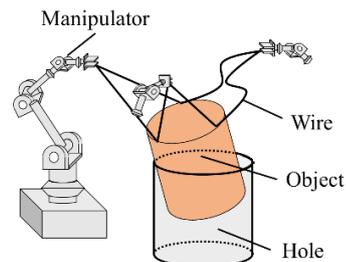


Fig. 2 Schematic model of assembling work

3. 協調制御手法

3.1 モデルの運動学

Fig. 3 にワイヤシステムの運動学モデルを示す. ワールド座標系 Σ_w を水平面が xy 平面となるよう定義する. 物体座標系 Σ_o の原点を対象物の重心にとり, 対象物の位置を $\mathbf{x}_o = [x_o \ y_o \ z_o]^T$, 姿勢を $\Phi_o = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ とし, 姿勢は Roll(z 軸回り), Pitch(y 軸回り), Yaw(x 軸回り)で表記する. Σ_{mj} を j 番目のマニピュレータのベース座標系とし, その原点を \mathbf{x}_{mj} とする. $(2i-1)$ 番目と $2i$ 番目のワイヤは i 番目の対象物上の取り付け点に接続されている. i 番目の対象物上の取り付け点から j 番目のマニピュレータの手先までのベクトルは, \mathbf{l}_{ij} と定義する. \mathbf{x}_{ej} を j 番目のマニピュレータ手先の位置ベクトル, \mathbf{x}_i を対象物上のワイヤ取り付け点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.

$$\mathbf{x}_{mj} + \mathbf{R}_{mj}^m \mathbf{x}_{ej} = \mathbf{x}_o + \mathbf{R}_o^o \mathbf{x}_i + \mathbf{l}_{ij} \quad (1)$$

なお, 左肩の添え字は基準となる座標系を示し, \mathbf{R}_{mj} , \mathbf{R}_o は, それぞれ Σ_{mj} , Σ_o の姿勢を表す回転行列である.

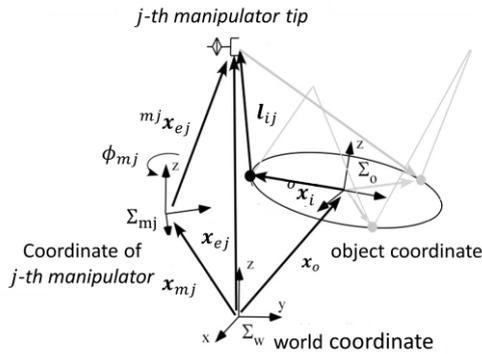


Fig. 3 The geometric relationship of robot hand and object

3.2 冗長自由度を利用した協調制御手法

本システムは, 各マニピュレータが6自由度を有することから, 合計で18自由度の制御入力がある. これに対して, 対象物の位置・姿勢の自由度は6であることから, 12自由度の冗長自由度を持つ. 一方で, 対象物の位置, 姿勢, ワイヤ張力を決定するのは3台のマニピュレータ手先の位置座標, 9自由度であるから, 本システムはマニピュレータ手先位置について3自由度の冗長自由度を有する. そこで, 本節ではマニピュレータの手先と対象物間のヤコビ行列の導出を行い, 手先位置座標に関する冗長自由度を利用した本システムの協調制御手法について説明する.

式(1)の左辺はワールド座標系から見た手先の位置ベクトル \mathbf{x}_{ej} , 右辺はワールド座標系から見たワイヤ取り付け点 \mathbf{x}_i と \mathbf{l}_{ij} の和であるから式(2)が成り立つ.

$$\|\mathbf{x}_{ej} - \mathbf{x}_i\|^2 = \|\mathbf{l}_{ij}\|^2 \quad (2)$$

また, 次章で述べる前提条件から本システムではワイヤ長は既知であるから, 6本のワイヤについて式(2)を全微分を計算することで, 各マニピュレータ手先の微小変位 $\Delta \mathbf{x}_{e1}$, $\Delta \mathbf{x}_{e2}$, $\Delta \mathbf{x}_{e3}$ と対象物位置・姿勢の微小変位 $\Delta \mathbf{x}_o$, $\Delta \Phi_o$ の関係を以下の式(3)のように導出することができる.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_o \\ \Delta \Phi_o \end{bmatrix} = \mathbf{J}_o \Delta \mathbf{x}_e \quad (3)$$

ただし, $\mathbf{x}_e = [\mathbf{x}_{e1} \ \mathbf{x}_{e2} \ \mathbf{x}_{e3}]$ であり, \mathbf{J}_o は対象物位置 \mathbf{x}_o , 姿勢 Φ_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. 式(3)を $\Delta \mathbf{x}_e$ について解くことで手先軌道の生成が可能となる.

$$\Delta \mathbf{x}_e = \mathbf{J}_o^+ \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_o \\ \Delta \Phi_o \end{bmatrix} + k(\mathbf{I} - \mathbf{J}_o^+ \mathbf{J}_o) \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{x}_e} \quad (4)$$

ただし, k は定数で, \mathbf{J}_o^+ はヤコビ行列 \mathbf{J}_o の疑似逆行列であり, $\mathbf{J}_o^+ = \mathbf{J}_o^T (\mathbf{J}_o \mathbf{J}_o^T)^{-1}$ である. なお, 本研究では補正手法の実現を目的とするため手先軌道生成時, 評価関数の設定は行わず, $k=0$ とした最小ノルム解を利用して手先軌道の生成を行う.

4. 補正手法

4.1 前提条件

提案する補正手法を適用するための前提条件を以下に述べる.

- 3台のマニピュレータの手先位置は既知である.
 - 物体座標系から見た対象物上の取り付け点および各ワイヤ長は既知かつ固定値である.
 - 対象物の形状, 寸法, 重量および穴の形状, 寸法は既知である.
 - 対象物は外力を受けているが, 静止状態である.
 - 円柱の側面上と穴のへりの一点が接触すると仮定する.
- 本論文では, 穴の設置個所に位置誤差が存在し, 目標地点において穴との接触が発生した場合, 正しい穴の位置へと対象物を補正することを想定する.

Fig. 4に穴と接触時のモデルを Table 1 に補正手法に利用する条件式と未知数との関係を示す.

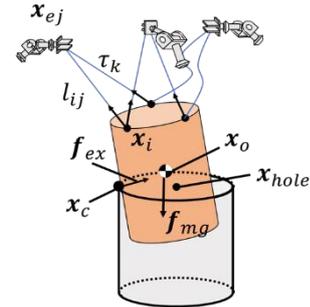


Fig. 4 Schematic model at the time of contact

Table 1 The number of condition equation and unknown

Condition equation	Unknown
Kinematics (n)	$\mathbf{x}_o(3)$, $\Phi_o(3)$
Force/Moment (6)	$\mathbf{x}_o(3)$, $\Phi_o(3)$, $\tau_k(n)$, $\mathbf{f}_{ex}(3)$
Geometry (2)	$\mathbf{x}_c(2)$, $\mathbf{x}_{hole}(3)$
$n+8$	$n+14$

Table 1 中張っているワイヤの本数を n 本, ワイヤ張力を τ_k , 接触点から対象物に対して加わる外力を \mathbf{f}_{ex} , 対象物と穴との接触点を \mathbf{x}_c , 穴の設置位置を \mathbf{x}_{hole} とする. ただし, 接触点の z 座標と穴の設置位置の z 座標は一致するため, 接触点の未知

数は x, y 座標の値の二つである. Table 1 から条件式の数 は $n + 8$, 未知数の数は $n + 14$ となる. したがって, 条件式以外 から与えるパラメータが少なくとも 6 個必要である. そこで, 本論文では, 力覚センサから外力 3 成分, 慣性計測装置 (IMU) から対象物の姿勢 3 成分を計測し, その値を利用する. なお, 力覚センサは複数得られる数値解の中から真の解に近い解 の選択にも利用する.

4.2 静力学条件

本論文では対象物が外力を受けることで n 本のワイヤが弛み, 静止状態にある時から補正を行うことを前提としている ため, 剛体の平衡条件を利用する. なお, 剛体の平衡条件は 以下の 1) および 2) が同時に成り立つことである.

1) 系に加わる外力の総和=0

ワイヤ張力を $\tau_k (k = 1 \sim 6)$ とし, 張力の方向ベクトルを $\mathbf{d}_{ij} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ とすると各ワイヤの張力ベクトル $\boldsymbol{\tau}_k$ は

$$\boldsymbol{\tau}_k = \tau_k \mathbf{d}_{ij} = \tau_{ij} \frac{\mathbf{x}_{ej} - \mathbf{x}_i}{\|\mathbf{x}_{ej} - \mathbf{x}_i\|} \quad (5)$$

と表すことができる. 張っているワイヤの張力の総和を \mathbf{f}_τ と すると, 以下の式 (6) が 1) の条件式となる.

$$\boldsymbol{\tau}_{sum} = \mathbf{f}_\tau + \mathbf{f}_{ex} + \mathbf{f}_{mg} = \mathbf{0} \quad (6)$$

2) 任意の点周りのモーメントの総和=0

対象物に加わる力は, 上記の $\mathbf{f}_\tau, \mathbf{f}_{ex}, \mathbf{f}_{mg}$ であり, それぞ れ対象物上のワイヤ取り付け点 \mathbf{x}_i , 接触点 \mathbf{x}_c および対象物重 心 \mathbf{x}_o に加わるため, 外積を取ることで求めることができる. したがって, \mathbf{m}_t を張力によるモーメント, \mathbf{m}_{ex} を外力による モーメント, \mathbf{m}_{mg} を重力によるモーメントとすると, これら の総和が 2) の条件式となる.

$$\mathbf{m}_{sum} = \mathbf{m}_t + \mathbf{m}_{ex} + \mathbf{m}_{mg} = \mathbf{0} \quad (7)$$

4.3 幾何学条件

幾何学の条件式には以下の 2 つを利用する.

1) 接触点は穴が作る円周上に存在する

本論文では, 穴の形状, 寸法およびその設置位置は既知と しているため, 接触点は式 (8) に示す穴が作る円の方程式を 満たす.

$$(x_c - x_{hole})^2 + (y_c - y_{hole})^2 = r_{hole}^2 \quad (8)$$

2) 円柱と穴は 1 点で接触する

前提条件より対象物は傾けた状態で組付け作業を行い, 円 柱の側面と 1 点で接触するため, 設置位置に誤差を持つ穴 に対して円柱は, Fig.5 に示すように, 以下の式が成り立つ.

$$\left| r_{hole} - \frac{r_{object}}{\cos \theta} \right| = \sqrt{(x_{hole} - x'_{object})^2 + (y_{hole} - y'_{object})^2} \quad (9)$$

なお, 対象物および穴の半径をそれぞれ r_{object}, r_{hole} , 対象物 の重心を通り, 方向ベクトルが \mathbf{n}_1 である直線と $z = z_{hole}$ 平面 との交点を $(x'_{object}, y'_{object})$, \mathbf{n}_1 と \mathbf{n}_2 のなす角を θ とする.

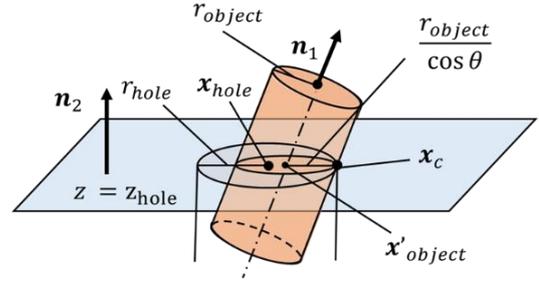


Fig. 5 Schematic view of geometrical condition

4.4 補正手法のアルゴリズム

補正手法のアルゴリズムを以下に示す.

- I. 目標地点において力覚センサおよび IMU により対象物 に加わる外力および対象物の姿勢を計測する.
- II. Table 1 に示す条件式と未知数との関係において, $n = 1 \sim 6$ の場合について式(2)および式(6)~(9)から成る連立 方程式を解く. なお, $n = 1 \sim 5$ の場合は, 張っているワイ ヤの組み合わせすべての場合について連立方程式を解く. なお, 得られた解のうち力覚センサの出力値と一致 する解を採用する.
- III. 求めた穴の中心位置を目標位置として式(4)を利用し, 手 先の軌道を生成する.

なお, 本論文では上記の非線形連立方程式の解を得るため に数値計算ソフトウェアとして MATLAB® を使用する.

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. 実験 には, 安川電機社製の 6 軸産業用ロボット MOTOMAN-HP3J (可搬重量 3kg, 位置決め精度 ± 0.03 mm) とサーボパック RT- Lab を利用した. また, 各マニピュレータ手先の初期位置は カメラによって計測する. ハイスピードカメラはディテクト 社の HAS-U1 を使用し, 距離計測システムは DippMotionV (計 測精度 0.3mm) を使用する. 力覚センサはレプトリノ製 6 軸 力覚センサ PFS055YA501U6 (分解能 ± 0.05 N) を, IMU は LORD 社製 3DM-GX5-25 を使用する.

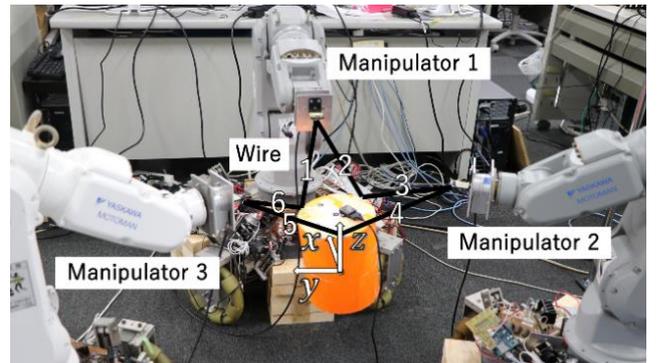


Fig. 6 Experimental system

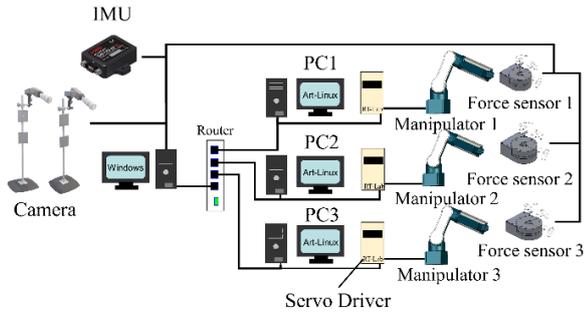


Fig. 7 Configuration of experimental system

実験手法は、手先位置を固定し、穴の設置位置を変化させることで、I) 3本のワイヤが弛んだ状況、II) 4本のワイヤが弛んだ状況とした時、提案手法により対象物位置、接触点、穴の中心位置、張っているワイヤの張力の導出し、計測値との比較および補正を行う。実験に利用する対象物は直径165mm、質量2.57kgであり、穴の直径は190mmである。対象物の初期位置は x, y, z とも0であり、初期姿勢は Roll = 0.72rad, Pitch = -0.03rad, Yaw = -0.19rad である。

5.2 実験結果

Fig.8 に I, Fig.9 に II 実施時の様子を示し、Table 2 に I, II 実施時の理論値と計測値との比較を Table 3 に提案手法により導出した穴の中心位置を目標値とした補正後の対象物の位置・姿勢を示す。なお、外力および対象物姿勢の計測結果を以下に示す。

I) $f_{ex}[N] = [-15.5, -1.4, 10.4]$

Roll = 0.64rad, Pitch = 0.29rad, Yaw = -0.03rad

II) $f_{ex}[N] = [10.4, -11.9, 16.0]$

Roll = 0.74rad, Pitch = 0.03rad, Yaw = -0.37rad

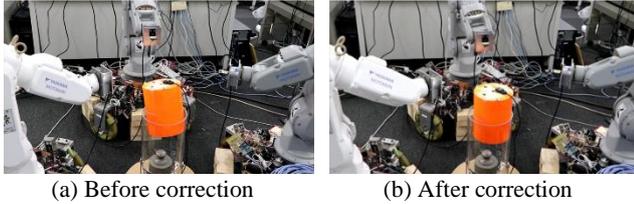


Fig. 8 Experiment (I)

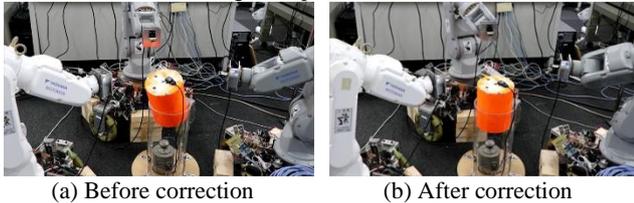


Fig. 9 Experiment (II)

Table 2 Comparison of theoretical value and actual value

	Experiment (I)		Experiment (II)	
	Theoretical	Actual	Theoretical	Actual
x_o [mm]	-40.8	-40.4	7.1	7.0
y_o [mm]	0.0	0.6	-22.8	-23.6
z_o [mm]	16.6	17.9	23.1	22.6
x_{hole} [mm]	-53.1	-61.5	16.9	16.0
y_{hole} [mm]	-5.8	-3.9	-34.7	-31.5

z_{hole} [mm]	0.0	1.3	0.0	0.5
τ_1 [N]	8.3	8.4	0.0	0.2
τ_2 [N]	16.5	15.9	0.0	0.1
τ_3 [N]	7.5	8.2	0.0	-0.5
τ_4 [N]	0.0	-0.7	0.0	0.5
τ_5 [N]	0.0	0.0	9.1	9.4
τ_6 [N]	0.0	0.0	8.5	9.1

Table 2 から I, II とも対象物の位置決めの高精度は高く、最大でも 1.3mm の誤差であった。一方で、穴の位置決めは I の場合最大で 8.4mm, II の場合最大で 3.2mm であった。これは計測値として利用している外力の影響が大きいと考える。力覚センサ 1 台で 2 本のワイヤ張力の合力を出力するため、I の場合 2 台分, II の場合 1 台分の計測値を利用している。よって、I の方が計測誤差の影響を受けやすいことが穴の位置決めの高精度低下に繋がったと考える。

Table 3 から対象物の位置決めに最大で 6.3mm の誤差が存在し、実際の穴の位置との差は最大で 7.2mm となった。これは、複数使用しているセンサの校正時の誤差に起因していると考えられる。一方で、本実験では対象物と穴との間隙は 25mm であることを考えると十分補正可能な範囲である。

Table 3 Object position and orientation after correction

	Experiment (I)		Experiment (II)	
	Target	After	Target	After
x_o [mm]	-53.1	-57.5	16.9	23.2
y_o [mm]	-5.8	-10.9	-34.7	-31.8
z_o [mm]	0.0	-0.8	0.0	-2.3
Roll [rad]	0.72	0.70	0.72	0.76
Pitch [rad]	0.00	-0.02	0.00	-0.03
Yaw [rad]	0.00	-0.02	0.00	-0.06

6. 結論

本論文では、ワイヤシステム機構を利用した、協調組付けシステムにおける補正手法を提案した。補正手法に利用する条件式の導出および検証実験による補正手法の有用性の確認を行った。従来手法では 1~3 本のワイヤの弛みにしか対応できなかったが、本手法では 1~5 本の任意本数のワイヤの弛みに対応可能である。本論文では、手先位置に関する冗長自由度は最小ノルム解の導出に利用したが、評価関数は設定していないため、今後は組付けに適した評価関数の設定も考えられる。また、本論文では組付け作業のみを対象としたが、今後は引き抜き作業時の解析も行うことで本システムを組付けおよび引き抜きの両方の作業への適用が可能となる。

参考文献

- (1) 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
- (2) Qian, S., Zi, B., Shang, WW. et al. A Review on Cable-driven Parallel Robots. Chin. J. Mech. Eng. **31**, 66 (2018).
- (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, **74**-748(2008) pp. 2985-29