

ワイヤを用いた3台の産業用マニピュレータの協調システムにおける組付け作業時のコンプライアンスを用いた補正手法の提案

Proposal of compensation method by mechanical compliance for cooperative assembly system consisting of three industrial manipulators with wires

精密工学専攻 1号 浅野 拓馬

Takuma Asano

1. 序論

近年、主に単体で使用されてきた産業用マニピュレータを複数台用いた協調制御が利用され始めている。しかし、位置制御による協調制御の際、マニピュレータ間の相対位置誤差により把持物体に対して過大な内力が発生する問題があるため先行研究では、Fig.1に示すように、マニピュレータの先端にコンプライアンス機構として、ワイヤを利用することでこの問題を解消した。また、ワイヤ機構の持つ冗長自由度を用いてワイヤのたわみ発生を防ぎながら対象物を任意の位置・姿勢へ制御することに成功した。⁽¹⁾ 本システムは、重力を鉛直方向に張ったワイヤ張力と見なし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6自由度を拘束することができるという特徴を有している。

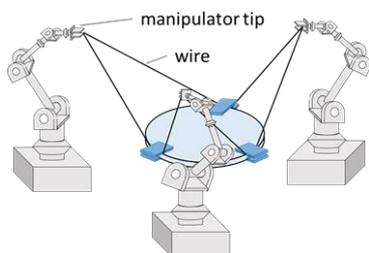


Fig. 1 Cooperative system model using wires

ワイヤを用いた協調制御に関する研究⁽²⁾はこれまで広く行われ潜在的に大きなスペースを有する点から建設現場から救助システム、リハビリテーションなど様々な場面に適用されている。これらのワイヤシステムはすべて正の張力により作動、制御が可能となっている特徴がある。そのため、障害物との衝突を回避する研究にも着目されているが、物体間での作業の場合例えば組付け作業などの場合にはこの問題を解消することは難しいと考えられる。したがって、本論文では任意のワイヤ本数がたわんだときの組付け補正手法を提案する。先行研究では、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たわんだ状況を想定したもので、ワイヤのたわみにより対象物を制御できないため、穴の位置を導出し補正を行う方法であった。解析的に穴の位置を導出するこの手法では計算が解なしになり補正が不可となる可能性があることが問題として挙げられる。

そこで、本論文ではあらゆる状況にも適応可能な穴への組付け作業時の補正手法を提案する。具体的には、本システムのワイヤのたわみにより発生するコンプライアンスを用いた組付け補正手法の提案を行う。また、提案手法が実現可能であることの検証、有用性の確認を行う。

2. ワイヤを利用した協調系の特徴

本システムにおける運用のために満たすべき条件としてコンプライアンス機構に対する運動学的条件、ワイヤを利用するための条件の二つが必要となる。前者が満たされないときは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みであることが明らかとなっている⁽³⁾。また、後者は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たわむため、本システムの運用は不可になってしまう。この問題に対する補正手法については4章で説明を行う。

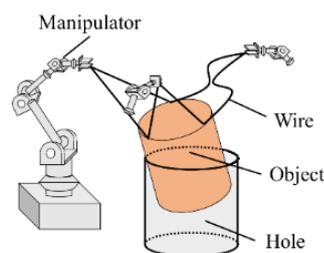


Fig. 2 Schematic model of assembling work

3. 協調制御手法

3.1 モデルの運動学

ワイヤシステムの運動学モデルを Fig. 3 に示す。ワールド座標系 Σ_w を xy 平面が水平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。本システムのような複数台のロボットを制御する場合は、各ロボットに対し座標軸が設定されており、カメラで計測する対象物位置なども座標軸ごとに変化するためそれを制御指令用プログラムに組み込むため回転行列を用い変換している。 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.

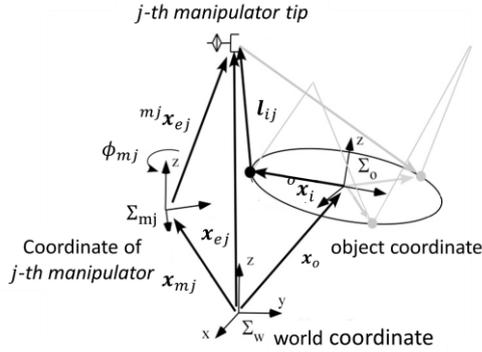


Fig. 3 The geometric relationship of robot hand and object

3.2 ワイヤシステム系の協調制御手法

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, 手先位置座標においての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 x_{ej} , 右辺はワールド座標系から見たワイヤ取り付け点 x_i とワイヤベクトル l_{ij} の和であるため式(2)が成り立つ.

$$\|x_{ej} - x_i\|^2 = \|l_{ij}\|^2 \quad (2)$$

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ため, 6本のワイヤについて式(2)の全微分を計算することにより, 各マニピュレータ手先の微小変位 Δx_{e1} , Δx_{e2} , Δx_{e3} と対象物位置・姿勢の微小変位 Δx_o , $\Delta \Phi_o$ の関係を以下の式(3)のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_o \\ \Delta \Phi_o \end{bmatrix} = J_o \Delta x_e \quad (3)$$

ただし, $x_e = [x_{e1} \ x_{e2} \ x_{e3}]$ であり, J_o は対象物位置 x_o , 姿勢 Φ_o とマニピュレータ手先位置 x_e 間のヤコビ行列である. 式(3)を Δx_e について解くことで手先軌道の生成が可能となる.

$$\Delta x_e = J_o^+ \begin{bmatrix} \Delta x_o \\ \Delta \Phi_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし, J_o^+ はヤコビ行列 J_o の疑似逆行列であり, $J_o^+ = J_o^T (J_o J_o^T)^{-1}$ である.

4. 補正手法

4.1 補正条件

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.

- 円柱の側面と穴が一点接触し静止している状態と仮定する.
- 3台のマニピュレータの手先位置は既知とする.
- 物体座標系から見た対象物上の取り付け点, 各ワイヤ長さは既知であり固定値とする.
- 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.

本論文は, 対象物に位置誤差が発生し, 組付け作業過程で穴との接触が発生した場合の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示す.

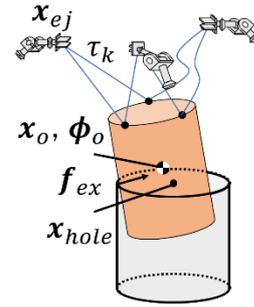


Fig. 4 Schematic model at the time of contact

4.2 コンプライアンス

対象物と穴が接触状態のとき, 任意の本数のワイヤにたわみが生じる. その物体の位置姿勢, 張っているワイヤの組み合わせ, ロボット手先位置などのパラメータにより動かしやすい方向というものが存在する. これをコンプライアンスと呼ぶ. 本システムにおいて, ワイヤ6本が全て張っている状態においては, 前述したように懸垂物の6自由度を拘束しているため動きやすい方向は存在しえず, コンプライアンスが無い状態と考える.

コンプライアンスは一般に, 機械的コンプライアンスを指す場合ばね定数の逆数として扱われるため, 本研究においてもばね定数の逆数をコンプライアンスとして定義する. 本システムにおけるワイヤシステム機構を, 重力を復元力としたばねモデルと考え, ばね定数の導出を行う.

ばね定数の導出においては, フックの法則である以下の式(5)を基に考える.

$$F = kx \quad (5)$$

上式におけるそれぞれのパラメータは, F はばねによる反力, k はばね定数, x は自然長からの伸び, または縮みを表している. これを本システムでは, F は懸垂物に加わる外力, k をばね定数, x をワイヤが弛んだ際に張っているワイヤのみで外力が生じず静止しているときの釣り合い位置からの変化量と見なして考える. ワイヤが弛んだ際に張っているワイヤのみで外力が生じず静止しているときの釣り合い位置導出のモデルを以下 Fig. 5 に示す.

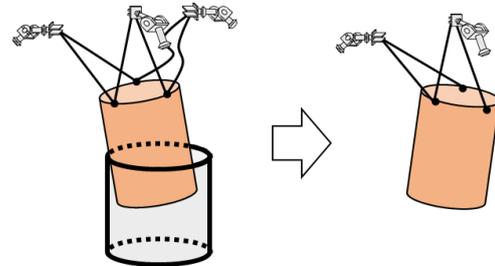


Fig. 5 equilibrium position model of forces

上右図に示す釣り合い状態のときの位置 $x = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]$ とする. 任意の本数 n 本たわんだとき式(2)は $(6-n)$ 個成り立つ.

また式(2)におけるワールド座標系からみた取り付け点において以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{object} + \mathbf{R}_o {}^o\mathbf{x}_i \quad (6)$$

\mathbf{x}_{object} は張っているワイヤのみで釣り合う物体位置, \mathbf{R}_o は張っているワイヤのみで釣り合う物体姿勢から求まる回転行列, ${}^o\mathbf{x}_i$ は物体座標系から見た対象物上の取り付け点を指す。また, Fig. 5 のモデル前後において式(7)が成り立つ。

$$mgh = \frac{1}{2}kx^2 \quad (7)$$

よって, 釣り合い位置は z の値が最小のときとなる。式(2), 式(6), 前節の前提条件である 3 台のマニピュレータの手先位置は既知。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という条件のもと式(2)を(6-n)本分各パラメータについて解いたのち z が最小となるような最小化計算を解くことにより, 釣り合い位置を導出する。しかし, 式(2)をパラメータについて解いたのち z について解く段階で, 式(2)が非線形連立方程式であるため解析的に計算することが不可である問題が生じた。

そこで本論文では, 外力が加わりワイヤはたわみ物体が静止している状態をばねに置き換えたときの自然長と考え, その状態において微小変化を加えばね定数を計算するものとするため, F は懸垂物に加わる外力の変化, k をばね定数, x を微小変位前後の変位とする。よってばね定数の導出式は式(8)となる。

$$\Delta F = k\Delta x \quad (8)$$

以下にばね定数計算手法を説明する。まず初期状態において懸垂物の位置姿勢の計測および, 力覚センサから外力 3 成分を計測する。次に初期状態から微小変化を与え, その地点においても初期状態と同様に懸垂物の位置姿勢の計測および, 力覚センサから外力 3 成分を計測する。計測された外力と位置姿勢の差分によりばね定数の導出を微小変位ごとに行う。このときの微小変化だが, 6 本張っている状態ではないため, 任意の位置に制御することができない。ここでの制御指令は, ワイヤがたわんでいないときの対象物位置から各軸方向にどれだけ変位させるかという目標値を設定し, 対象物を変位させていくものである。今回組付け作業においては対象物を回転させることは考慮せず, x, y, z 軸方向に微小変化することで組付け作業を進める。そのため制御指令プログラムの目標値においても, x, y, z 軸の並進方向の各軸に微小変化させたものを設定しており, ばね定数も x, y, z 軸の 3 方向について導出する。組付け作業過程において, どの軸方向に微小変化していくかの判別については次節の補正アルゴリズムにて説明する。

4.3 コンプライアンスを用いた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. 初期状態において力覚センサおよび IMU, カメラにより物体に加わる外力および対象物の位置姿勢を計測する。

- II. 微小変化を与えたのち力覚センサおよび IMU, カメラにより物体に加わる外力および対象物の位置姿勢を計測する。
- III. 求めたばね定数の絶対値を比較し, 絶対値が一番大きい軸方向であり絶対値を取る前の符号が負の場合はその軸の負の方向 (絶対値を取る前の符号が正の場合はその軸の正の方向) という条件のもと次の微小変化の方向を決定し, II に戻る。

ばね定数が大きい方向すなわちコンプライアンスが小さい方向に変位を与え続ける本手法は, 穴と対象物が接触したときの外力が同じ変位を与えたときでもより大きく変化するその方向が本システムにとって最適な組付け方向であると仮定し設定したものである。補正アルゴリズムにおいて初期状態における微小変位は任意に決定し, 2 回目の微小変位方向決定時に III を適用する。より簡易な組付け補正手法であることを示すためロボット制御指令回数の上限を最大 10 回と定め, 10 回目の組付け指令は対象物を鉛直方向に変位させ続け穴に挿入するものとする。また本システムにおける外力計算において対象物に加わる重力を含んで計算を行っている。6 本のワイヤがたわみ対象物が水平状態のときに加わる外力は重力のみであり, 実機で計測したところ $f_x = -0.04[\text{N}]$, $f_y = 0.06[\text{N}]$, $f_z = 25.2[\text{N}]$ となった。したがって, III における z 軸の負方向 (組付け方向) に変位させるときの条件として, Δx が負であり ΔF が正かつ絶対値が最大であるという条件を追加するものとする。

5. 実験

5.1 実験環境

実験環境を Fig. 6, 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 $\pm 0.03\text{mm}$) 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 2 台の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 $\pm 0.05\text{N}$) を, IMU は LORD 社製 3DM-GX5-25 を使用する。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。

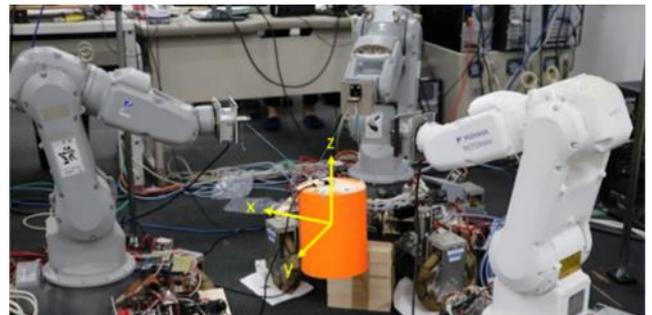


Fig. 6 Experimental system

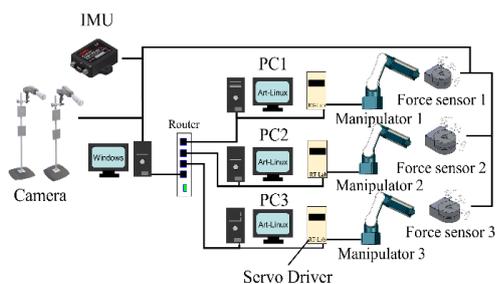


Fig. 7 Configuration of experimental system

各ロボットには Art-Linear を搭載した制御 PC が接続され、PC から RT-Lab には 6 軸の関節角度の増分が 1ms のサンプリングタイムで与えられる。協調制御指令は、別のメイン PC の windows 上で生成され、3 台の制御用 PC に通信で送られている。

5.2 実験手法

実験手法は、初期状態のマニピュレータ手先位置においてワイヤが 6 本張っているときの懸垂物位置姿勢、ワイヤ取り付け点、マニピュレータ手先位置の計測後、今回は先行研究の組付け補正手法と同条件であるワイヤが 3 本たわんだ状態を初期状態として設定する。補正アルゴリズムに従い、物体に対し 10 回微小変位を与えその後組付け作業を対象物に行うものとする。一回目の微小変位では、ばね定数の計測ができていないため、任意の方向に対しての微小変位を加える。微小変位を与えたら、物体に取り付けられた IMU と各ロボットの力覚センサ情報から接触点からの外力変化と物体の変位を計算しその状態におけるコンプライアンスを導出する。コンプライアンスの絶対値を比較しコンプライアンスが小さい方向に対して次の微小変位を与える。これを微小変位の上限を 10 回と設定しその後組付け方向に変位させ組付け成功するかを確認を行い本手法が組付け補正において有用であるか示すものとする。

5.3 実験結果

Fig.8 に実施時の様子を示し、Table 1 に初期状態から微小変化ごとの位置と外力を示す。Table2 に微小変化ごとのばね定数を示す。試行回数が多いため微小変位 3 回目から 6 回目までの計測データは省略するものとする。

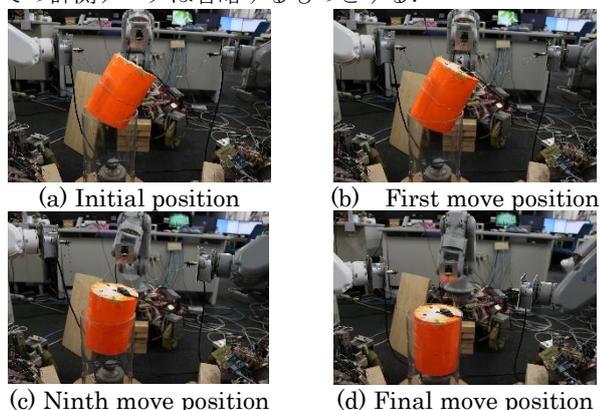


Fig. 8 Experiment

Table 1 position displacement value and Force displacement value

	Move 1	Move 2	Move 7	Move 8	Move 9
Δx [mm]	-18.4	27.3	30.6	-29.2	-0.6
Δy [mm]	19.9	20.7	16.9	-17.0	6.0
Δz [mm]	-10.3	-7.8	-7.9	6.4	-19.2
Δf_x [N]	0.5	-1.0	-4.5	3.8	4.6
Δf_y [N]	3.4	-2.4	-2.6	3.3	0.9
Δf_z [N]	-2.9	2.7	-0.6	-1.5	2.3

Table 2 Spring constant value

	Move 1	Move 2	Move 7	Move 8	Move 9
k_x	-0.03	-0.04	-0.15	-0.13	-7.20
k_y	0.17	-0.12	-0.16	-0.20	0.15
k_z	0.28	-0.35	0.08	-0.23	-0.12

初期位置は $x = -69.9\text{mm}$, $y = -4.4\text{mm}$, $z = -21.7\text{mm}$ で、外力は $f_{ex}[\text{N}] = [-9.8, 13.7, 10.1]$ である。実験における微小変位量は今回対象物と穴との間隙は 25mm であることを考慮し全ての微小変位を 20mm に設定し実験を行った。Table 2 における赤字の方向がコンプライアンスの絶対値比較によって決定し制御指令の目標値としている方向である。初期状態における微小変化の方向を y 軸の正方向に設定した。一回目の微小変位後の計測では k_z が一番大きく z 軸正方向に微小変位させるべきであるが、補正アルゴリズムにより y 軸の正方向に微小変位を与える。一方で、二回目の微小変位では k_z の絶対値が最大でかつ補正アルゴリズムの条件を満たしているため三回目の微小変位では組付け方向である z 軸負方向に変位を与えている。本実験ではワイヤはたわんでいて完全な制御ができていないが、微小変位の計測値より微小変位の方向以外により大きな変位が発生すること、初期状態では穴との接触により組付け困難である状態であったが、微小変位の指令を複数回与えることで組付け成功することを確認した。

6. 結論

本論文では、ワイヤシステム機構を用いた協調組付けシステムにおけるコンプライアンスを用いた補正手法を提案し検証実験において有用性の確認を行った。補正アルゴリズムにおける微小変位回数の多さが問題であり、今後は各微小変位量の増加、微小変位回数の減少による実験時間の短縮や安定性を向上させたコンプライアンスを用いた補正アルゴリズムを考慮することで同様のワイヤシステム機構に対しても適用することが可能になると考える。

参考文献

- (1) 大隅久, 荻坂まりな, 押川慶則, 関村悠太, 福井健人, 相山康道, 6本のワイヤを利用した3台の位置制御型マニピュレータによる大型物体の位置決めシステム, 日本機械学会論文集, **87-895(2021)** 20-00143
- (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. 2985-2993