ワイヤ吊り下げロボットの位置姿勢制御

中山　恵介*　富田　洋文*　吉田　英晴**　小松　優陽***　平間　毅***

1. はじめに

近年、インフラ設備、建物などの老朽化が進んでおり、高所のメンテナンス作業の需要が増加している。高所メンテナンス作業の一手段として、固定物から複数本のワイヤを用いて吊り下げた、ロボットによるメンテナンスが考えられる。

この場合、作業対象物の位置や形状に合わせて作業するためには、ロボットの位置姿勢を調整する必要が生じる。位置姿勢調整は、ワイヤ長を変化させることで行うが、従来の逆運動学計算結果のみを用いるだけでは、位置姿勢調整の誤差が課題となる。

2. 目的

本研究では、吊り下げロボットの位置姿勢調整の誤差を低減するため、「逆運動学計算による位置姿勢調整」と「PID 制御による位置姿勢制御」を併用した制御手法について、基礎検証を実施した。

3. 研究内容

3.1 ワイヤ吊り下げロボットの位置姿勢制御

3.1.1 システムの概要

図 1 に位置姿勢制御を評価するシステムの概要を示す。ロボットの位置姿勢は、回転 2 自由度、並進 1 自由度で表し、3 本のワイヤを用いて固定側からロボットを吊り下げ、電動ウインチ内モータの巻取り、巻戻しにより位置を調整する機構とした。ワイヤ長は、逆運動学計算を基に調整する。目標姿勢と現在姿勢に誤差が生じた場合、誤差を低減するために PID 制御を用いてワイヤ長を微調整した。

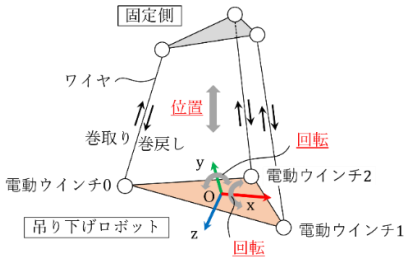

図 1　ワイヤ吊り下げロボットの概要

3.1.2 吊り下げロボットの目標ワイヤ長計算

パラレルメカニズム [1]を用いて、吊り下げロボット（以下、吊下物という）を初期位置姿勢から目標位置姿勢まで調整するためのワイヤ長を計算した。

図 2 に評価装置における座標系の模式図を示す。フレーム固定側の座標系を$O-XYZ$、吊下物の座標系を$O-xyz$、$O-XYZ$から見た固定側のワイヤ連結点座標$a_{i(i=0,1,2)}$、$O-XYZ$から見た吊下物のワイヤ連結点座標b_i、初期ワイヤ長l_i、目標ワイヤ長l_i'とし、ワイヤ長の変化量Δl_iを求めた。

フレーム固定側の座標系$O-XYZ$に吊下物の座標系$O-xyz$が一致すると仮定した状態から、まず回転座標変換を行った。X軸周りにα回転（新たにできる座標系を$O-x'y'z'$とする）、座標系$O-x'y'z'$をY軸周りにβ回転（新たにできる座標系を$O-x''y''z''$とする）、座標系$O-x''y''z''$をZ軸周りにγ回転（新たにできる座標系を$O-x'''y'''z'''$とする）させる回転座標変換行列Dを式(1)により求めた。

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\alpha & -S_\alpha \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_\beta & 0 & S_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\beta & 0 & C_\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_\gamma & -S_\gamma & 0 \\ S_\gamma & C_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここでC_α、C_β、C_γは、それぞれ$\cos\alpha$、$\cos\beta$、$\cos\gamma$をS_α、S_β、S_γは、それぞれ$\sin\alpha$、$\sin\beta$、$\sin\gamma$を表す。初期位置姿勢(b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})を行列Dによる回転座標変換後に、Z軸方向へT_zだけ並進させた吊下物のワイヤ連結点座標$(b'_{ix}, b'_{iy}, b'_{iz})$は式(2)により求めた。

$$\begin{pmatrix} b'_{ix} \\ b'_{iy} \\ b'_{iz} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} b_{ix} \\ b_{iy} \\ b_{iz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(1)、(2)を用いて、ワイヤ長の変化量Δl_iを式(3)により求めた。

$$\Delta l_i = l'_i - l_i = \sqrt{(b'_{ix} - a_{ix})^2 + (b'_{iy} - a_{iy})^2 + (b'_{iz} - a_{iz})^2} - l_i \quad (3)$$

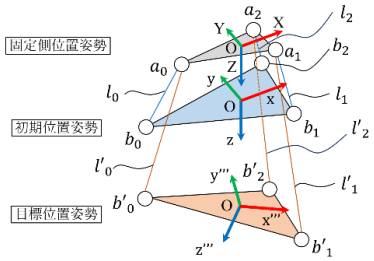

図 2　評価装置における座標系の模式図

3.1.3 吊下物の位置姿勢制御

図 3 にモータの配置、図 4 に吊下物の位置姿勢制御の流れを示す。吊下物の位置姿勢は、ワイヤ長の変化量だけ各モータを回転させて、目標に近づける。次に、姿勢センサによる x 軸周りの姿勢、y 軸周りの姿勢をフィードバック値とし、各モータの巻取り、巻戻しを PID 制御することにより、吊下物の姿勢誤差を低減し、目標に近づける。姿勢は、吊下物座標系の x 軸周り、y 軸周りに分けて調整する。PID 制御による各モータへの入力$u(t)$は式(4)により求めた。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \dot{e}(t) \quad (4)$$

ここでK_p、K_i、K_dはそれぞれ P ゲイン、I ゲイン、D ゲイン、$e(t)$は目標姿勢と現在姿勢の誤差を表す。

*IT・マテリアルグループ　**研究推進グループ　***産業連携グループ

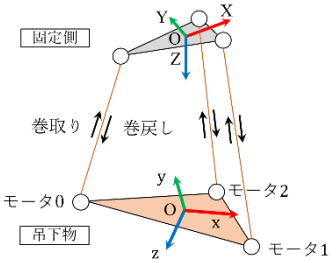

図 3　位置姿勢制御に使用するモータの配置

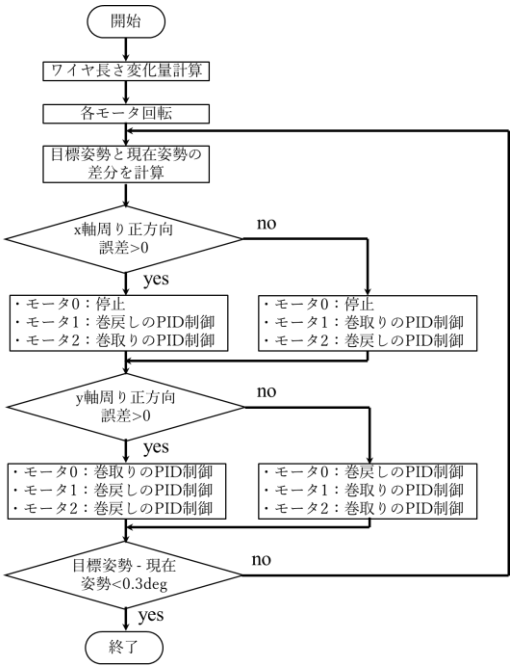

図 4　位置姿勢制御の流れ

3.2 簡易検証装置による位置姿勢制御の評価

3.2.1 検証実験方法

図 5 に吊下物の位置姿勢制御の簡易検証装置概要を示す。モータを使用したワイヤ吊下物を想定し、樹脂製プレート上に 3 台のモータを配置し、モータとフレームを 3 本のワイヤで接続することで吊り下げロボットを模擬した。3 個のモータを用いて巻取り、巻戻しを行い、ワイヤ長を調整して、吊下物の位置姿勢を調整する。3 個のモータを制御するため、マイコン（Arduino Due）を使用した。姿勢センサは姿勢制御、マーカは姿勢制御の評価用として用い、それらの座標系の軸方向が一致するよう樹脂製プレートに姿勢センサとマーカを取り付けた。以下、実験方法を示す。

・固定側座標系に対する Z 軸方向の吊下物位置 325mm において、x 軸周り、y 軸周りの吊下物の姿勢が 0deg の時を初期位置姿勢とした。
・姿勢センサ及びマーカから取得した x 軸周りの姿勢、y 軸周りの姿勢を初期姿勢として記録した。
・初期位置姿勢から Z 軸方向に 175mm 並進後、初期姿勢からの相対角度を目標値とし、姿勢センサから取得した x 軸周りの姿勢、y 軸周りの姿勢を用いて姿勢を制御した。
・位置姿勢制御後の目標値との誤差評価は、x 軸周りの姿勢、y 軸周りの姿勢について、カメラで撮影したマーカ画像をソフトウェア（6D-MARKER Analyst）で解析した結果を用いた。

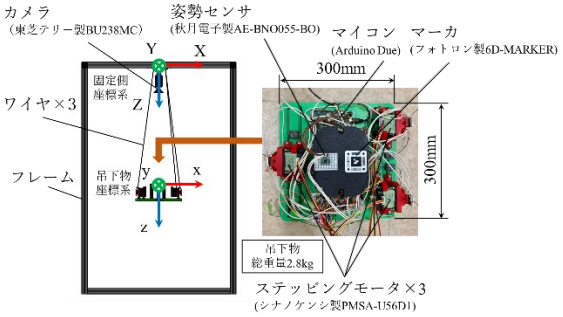

図 5　簡易検証装置の概要

3.2.2 検証結果及び考察

表 1 に検証結果を示す。目標値を x 軸周り、y 軸周りでそれぞれ 15、30、45deg に設定し、合計 9 条件に対して、x 軸周り、y 軸周りの回転における目標値との差分を検証した。位置姿勢制御後における目標値との差分は±2.5deg 以内であった。

誤差の要因として、PID 制御の定常偏差が考えられる。適切なゲイン設定をすることで定常偏差を小さくできる。

表 1　位置姿勢制御後の目標値との差分

				目標値との差分(deg)	
				x軸周りの回転	y軸周りの回転
目標値(deg)	x軸周りの回転	15	y軸周りの回転 15	-0.08	-0.58
			30	1.60	0.48
			45	0.22	2.28
		30	15	-0.34	-0.08
			30	1.62	0.35
			45	1.95	1.79
		45	15	-0.37	0.16
			30	0.67	0.26
			45	-2.24	-2.58

4.　まとめと今後の課題

本研究では、吊り下げロボット(吊下物)の回転 2 自由度、並進 1 自由度を制御するための基礎検討として、3 本のワイヤを用いた位置姿勢制御を検証した。簡易検証装置による検証の結果、位置姿勢制御後における目標値との差分は±2.5deg 以内であった。今後は、従来手法（逆運動学計算による位置姿勢調整）と本研究の手法（PID 制御による位置姿勢制御を併用）を吊下物の姿勢制御の誤差を用いて評価する予定である。

なお、本研究は令和 4 年度から令和 8 年度まで文部科学省特別電源所在県科学技術振興事業「次世代メンテナンスビジネスに向けたドローンの高機能化に関する試験研究事業」の一環として実施しているものである。

5.　参考文献等

1)　立矢宏：“パラレルメカニズム”、森北出版株式会社（2019）