

3 リンク 6 自由度型パラレルメカニズムの 内力を利用した位置制御

Position control of 6-DOF parallel mechanism with three link using internal force

○ 松上芳隆 (立命館大院) 三谷篤史 (立命館大) 杉山正治 (立命館大)
榎木義人 (立命館大院) 吉田守夫 (立命館大) 正 秋下貞夫 (立命館大)

Abstract: This paper describes position control of 6-DOF parallel mechanism with three link using internal force. When an end effector receives load, the influence by the error caused by joint clearance is large. A position and a posture do not become settled but accuracy falls. We proposed that the method using internal force of canceling the error caused by joint, raising mechanism stiffness, and decreasing position error.

KeyWords : Internal Force, Stiffness of Mechanism, Position Control, Force Control

1 はじめに

パラレルメカニズムを工作機械に応用する場合に考慮すべき点として、ジョイントの隙間による影響があげられる。ジョイント隙間は避けがたい点であるが、その場合ジョイントの軸と軸穴の位置に誤差が生じ、エンドエフェクタの位置精度に影響を及ぼす。特に外部負荷を受ける場合には、軸と軸穴の接触位置が変動するため、エンドエフェクタの位置が変動する。これはジョイントの隙間によってエンドエフェクタの機構剛性が低下することを意味する。本研究では、内力を利用することにより、ジョイントの隙間を解消することで機構剛性を高め位置制御の精度を向上させる方法[3]を検討する。本研究では回転型リンクに直動型リンクを組み合わせた複合型リンクを3組用いた、6自由度を有する3次元パラレルリンクメカニズムについて検討する(Fig.1)[2]。複合型リンクの回転型アクチュエータにはACサーボモータとハーモニックドライブギアを用いる。直動型アクチュエータには超音波モータとボールねじ、ナットを用いる。回転型リンクと直動型リンクの接続には1自由度のジョイントを用いる。エンドエフェクタとリンクの接続には球面ジョイントを用いる。これを3組、上下それぞれ正三角形の頂点の位置で接続し、3リンク 6 自由度の3次元パラレルリンク機構を実現する。

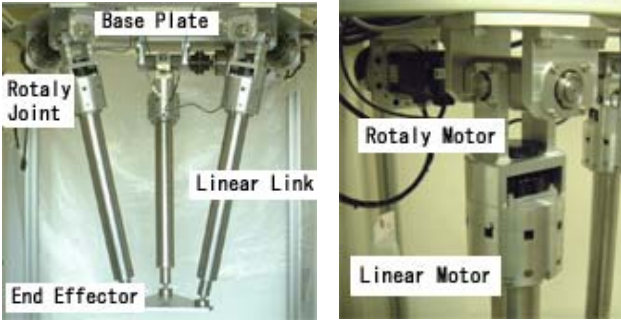


Fig.1: Experiment system

2 Jacobian

パラレルメカニズムの逆運動学は一般に以下のように与えられる。なお、ここではエンドエフェクタにおける z 軸まわりの回転は定数とする。

$$q = q(P_e) \quad (1)$$

ここで、 P_e はエンドエフェクタの位置・姿勢を表し、 $P_e = (x, y, z, \alpha, \beta)^T$ である。 α は x 軸まわりの回転、 β は y 軸まわりの回転である。また $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \ell_1, \ell_2, \ell_3)^T$ であり、 θ_i はACモータの回転角、 ℓ_i はリンクの長さである。式(1)より以下の関係が導出される。

$$\dot{q} = J\dot{P}_e \quad (2)$$

ここで $J = \partial q / \partial P_e \in R^{6 \times 5}$ はヤコビアンであり、エンドエフェクタの外力 $F_e = (F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}, m_{e\alpha}, m_{e\beta})^T$ と回転リンク制御力 $\tau = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$ 及び、直動リンク制御力 $f = (f_1, f_2, f_3)^T$ との関係は J を用いて表せる。

$$F_e = J^T \begin{bmatrix} \tau \\ f \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 内力の制御

「内力」とは「外力=0」の条件を与えた時に、ジョイントに生じるモーメント、力である[1]。超音波モータは、保持力があるために回転自由の元に推力を与えることはできないという特徴を持つ。そのため、特殊な制御アルゴリズムを用いる必要がある。ここでは、 $\tau_{int} = (\tau_{int1}, \tau_{int2}, \tau_{int3})^T$ を与えた時には、有限の保持力 $f_{int} = (f_{int1}, f_{int2}, f_{int3})^T$ が発生すると考える。従って、今ジョイントに生じる外力は陰的 (implicit) にしか与えられないので、直動リンクの内力に対する入力 f_{int} を任意に与え、外力 $F_e = 0$ とした時のACモータ入力 τ_{int} を(3)式より求める。すなわち、

$$0 = J^T [\tau_{int1}, \tau_{int2}, \tau_{int3}, f_1, f_2, f_3]^T \quad (4)$$

これを変形すると次式が得られる。

$$P_1 \tau_{int} = -P_2 f_{int} \quad (5)$$

ここで、 $P_1 \in R^{5 \times 3}$, $P_2 \in R^{5 \times 3}$ は(3)式のヤコビアン $J^T \in R^{5 \times 6}$ の成分から構成される行列で、ヤコビアンと以下の関係を持つ。

$$J^T = [P_1 \ P_2] \quad (6)$$

式(5)は冗長性を持つために、解は一意に定まらない。そこで、 P_1 の疑似逆行列を用いることで近似解を求める。

$$\tau_{int} = -P_1^+ P_2 f_{int} \quad (7)$$

ただし、

$$P_1^+ = (P_1^T P_1) P_1^T : \text{pseude-inverse}$$

4 位置制御

逆運動学によりエンドエフェクタの目標位置 $P_{et} = (x_t, y_t, z_t, \alpha_t, \beta_t)^T$ に対する各リンクの目標長さ $(\ell_{1t}, \ell_{2t}, \ell_{3t})^T$ 及び回転角 $(\theta_{1t}, \theta_{2t}, \theta_{3t})^T$ を求め、それに対してフィードバックを行う。この時、直動リンクの位置制御を先に完了させ、その後に回転モータの制御を行う。その際に、 f_{int} を与え(7)式に代入することで τ_{int} を計算し制御入力に加える。

$$\tau_i = \tau_{inti} + \tau_{fbi} \quad (8)$$

ただし、 τ_{fbi} は位置制御入力である。

5 内力の効果

ここでは、内力の効果を確かめる実験を行った。なお、ベースの中心を原点とし、重力方向に z 軸を取り、原点より任意のベース側ジョイント方向に y 軸、それに直交する x 軸を取る。まず、エンドエフェクタの位置、姿勢を $P_e = (0, 800, 0, 0, 0)$ とし、エンドエフェクタに外力を加えた時のエンドエフェクタの移動量を計測することにより、機構剛性を計算した。この時、内力の大きさを変えることで機構剛性がどのように変化するかを調べた。その結果をFig2, 3に示す。図中の点の実験値を表し、曲線はその3次近似線である。

図から分かるように、内力の大きさに比例して、機構剛性も高くなっている。しかし、 $F_{int} = 13[N]$ を過ぎた辺りから機構剛性は減少傾向にある。これは内力をオープンループで与えているため、モータの駆動特性の個体差やパラメータの誤差、リンクのたわみなどに対応できず、内力の均衡が保たれなくなったためである。実験データにばらつきがある理由として考えられることは z 軸まわりの回転による影響がある。本研究においては z 軸まわりの回転を一定、すなわち固定状態に保つと設定しているが、実際には容易に回転することを確認している。この原因として、回転リンクと直動リンクの結合には1自由度の受動ジョイントを用いているが、このジョイントは内力による隙間の解消が困難であることが考えられる。また z 軸まわりの回転は、内力の大きさに基づき確認されている。これはエンドエフェクタの位置、姿勢が特異点にあるため負荷条件の変動によって機構剛性が大きく変動するのではないかと考えられる。

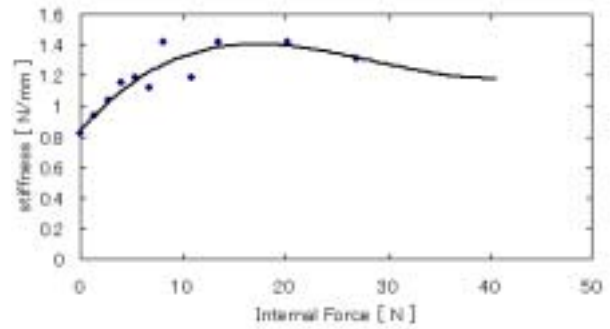


Fig.2: x-axis stiffness

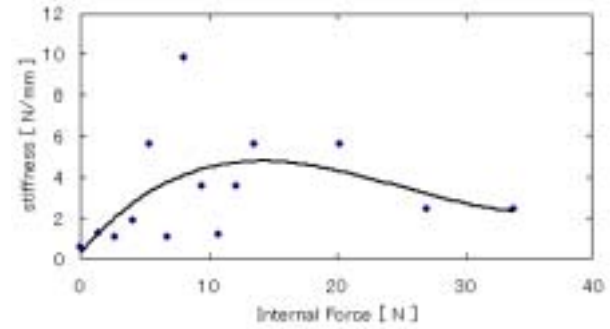


Fig.3: y-axis stiffness

6 おわりに

本報ではパラレルメカニズムの機構的な隙間を解消し、位置精度の向上を計り、機構剛性を高める方法として内力を設定する方法を提案した。今後の予定として、特異点の解析と受動ジョイントの隙間による影響の改善方法を検討する。

謝 辞

本実験装置の設計、製作にあたりご協力いただいた、三菱電機株式会社の藪内賀義氏、勝清志氏に感謝の意を表します。

References

- [1] 花房秀郎, M.Arif ADLI, "閉じた機構の剛性に及ぼす内力の効果", 日本ロボット学会誌 Vol.10, No.1, pp.128-134, 1992.
- [2] 榎木義人, 杉山正治, 松上芳隆, 三谷篤史, 吉田守夫, 秋下貞夫, "3リンク6自由度パラレルリンクロボットのPTP制御", 2002年3月, 第77期定時総会講演会, 講演予定
- [3] 三谷篤史, 秋下貞夫, "冗長自由度を有するパラレルメカニズムの内力利用による速度・力制御", 第19回日本ロボット学会学術講演会, 東京(東京大学), Sep. 2001.