高精度位置決め装置のための広動作域な 5自由度を有する柔軟パラレルメカニズム

A 5 DOF Compliant-Parallel Mechanism
within a Wide Range of Working Area for High Precision Machine

正 荒田 純平 (名古屋工業大学) 正 小塚 裕明 (名工大) 市川 翔平 (名工大)
奥田 憲司 (ブラザー工業株式会社) 翁長 明範 (ブラザー工業) 大野 元嗣 (ブラザー工業)
正 佐野 明人 (名工大) 正 藤本 英雄 (名工大)

Jumpei ARATA, Nagoya Institute of Technology, jumpei@nitech.ac.jp

Hiroaki KOZUKA, Nagoya Institute of Technology

Shohei ICHIKAWA, Nagoya Institute of Technology

Kenji OKUDA, Brother Industries, Ltd.

Akinori ONAGA, Brother Industries, Ltd.

Motoshi OHNO, Brother Industries, Ltd.

Akihito SANO, Nagoya Institute of Technology

Hideo FUJIMOTO, Nagoya Institute of Technology

In this paper, we propose a compliant-parallel mechanism that enables a wide working area and high precision. The prototype was implemented as a 5 DOF compliant-parallel mechanism, that was designed based on two DELTAs within $400 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ and $\pm 3 \text{ deg}$ of working area. The evaluation test conducted on the prototype showed $0.74 \mu\text{m}$ of repeat accuracy that is promising to be applied for an optical parts assembly machine.

Key Words : Parallel mechanism, Mechanism design, Complaint mechanism

1. はじめに

柔軟な構造を有し、構造そのものが変形することにより、動作伝達・変換を行う機構をコンプライアントメカニズムという。他方、機構基部と機構先端を複数のアームにより支持された機構であるパラレルメカニズムがある。コンプライアントメカニズムは、機械的なガタがなく動作し、潤滑の必要がなく摩耗粉や騒音が発生しない。従来から、ばねの微小な変形を用いたコンプライアントメカニズムが開発されてきた [1]。しかし、高精度である一方で動作域はマイクロメートルオーダーにとどまっていた。また、コンプライアントメカニズムのために様々な形状のばね関節が研究されたが、広い動作域および高精度のためにばね形状や加工が多面的になりがちである [2]。そこで、本研究では広い動作域を有する柔軟なばね関節を提案し、パラレルメカニズムに応用したコンプライアントパラレルメカニズム (C-P メカニズム) を提案している [3]。本稿では、プリンターやプロジェクター内部に使用されるレンズやミラーのピックアップから高精度位置決め作業に応用した 5 自由度を有する柔軟パラレルメカニズムを開発し、評価を行ったので報告する。

2. 5 自由度柔軟パラレルメカニズム試作機

レンズやミラーのピックアップから高精度位置決めのため、並進 3 自由度および回転 2 自由度、計 5 自由度が必要である。動作域は並進 3 自由度で $400 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ 、回転 2 自由度でそれぞれ $\pm 3 \text{ deg}$ である。また、本応用では機構先端の絶対位置をカメラなどの画像系によりフィードバック制御を行っているため、特に繰り返し位置決め精度が要求さ

Fig. 1 Developed prototype

れる。必要な繰り返し精度は並進: $1.0 \mu\text{m}$ 、回転: 0.01 deg である。なお、一連の作業に必要なサイクル時間は 30s と比較的長く、この応用では速度を必要としない。本稿では、これら仕様を満たすように図 1 に示した 5 自由度柔軟パラレルメカニズムを開発した。

2.1 機構学

開発した試作機の機構学モデルを図 2 に示す。本機構は、並進 3 自由度、回転 2 自由度の計 5 自由度を有する。これを並進 3 自由度を有するパラレルメカニズム DELTA を 2 つ組み合わせて実現する。本機構は 3 つのアームと 6 つの動作入力を持つ。基準座標系 Σ_0 の XY 平面上 X 軸方向と平行に配置された 3 つの直動動作入力により、並進 3 自由度動作を行う。また、 Σ_0 の Z 軸方向と平行に配置された 3 つの直動動作入力により、2 つの DELTA 機構先端に

Fig. 2 A kinematic model of the prototype

変位差が生じ、機構先端は回転 2 自由度動作を行う。なお、2 つの DELTA 機構先端の距離は一定で動作させる。

2.2 実装

回転 1 自由度互連溝ばね関節：機構学モデルから、要求仕様の動作域を満たすよう各回転 1 自由度関節の最大屈曲角度を求めると $\pm 60\text{deg}$ であった。よって、本研究で提案した互連溝ばね関節を FEM 解析により形状寸法の最適化を行い、最大屈曲角度を $\pm 60\text{deg}$ まで拡大した。実装したばね関節を図 3 に示す。材質はばね鋼 SUP6（ヤング率：206GPa，降伏応力：1080MPa）を用い、ワイヤ放電加工にて製作した。本ばね関節は板ばねの左右から細い溝が交互に連続して並んでおり、屈曲しやすい薄い弾性部、比較的厚く変形しにくい剛体部を有する。この形状により、低剛性で広い屈曲動作域と高剛性な回転 1 自由度拘束を実現する。

回転 2 自由度ばね関節：本試作機の機構構成上、2 つの回転 2 自由度関節が必要である。そこで、本研究では、図 4 に示すような放射状に溝の入ったばね関節を提案した。FEM 解析より、最大 $\pm 3\text{deg}$ の動作域を有することが分かった。試作機：図 1 に開発した試作機を示す。並進動作のための直動動作入力として、THK 製のボールねじと安川電機製モータを組み合わせた直動アクチュエータ（ストローク：600mm，リード：20mm，分解能： $0.10\mu\text{m}$ ）および回転動作のための直動動作入力として、千葉精密製の直動アクチュエータ（ストローク：25mm，分解能： $0.016\mu\text{m}$ ）を用いた。動作域を満たすよう、リンク $Link4_{ki}$ ， $Link4'_{ki}$ の長さは 350mm とした。すべて部品には寸法，幾何およびはめ合い公差の入った穴加工を施し，位置決めピンおよびノックピンにより部品の組み立て精度向上を図った。制御 OS として VxWorks5.5.1 を使用し，制御周波数 1kHz にて位置制御を行った。

3. 繰り返し位置決め精度評価実験

本試作機の応用には，繰り返し精度が重要である。そこでレーザー変位計（分解能： $0.2\mu\text{m}$ ）を用いて繰り返し精度評価を行った。原点および動作域直方体（ $400 \times 150 \times 150\text{mm}$ ）の頂点を位置決め点とした。各 2 点間を 30 回繰り返し位置決めし，それらの各軸方向のばらつきを計測し，繰り返し精度を求めた。

その結果，全点の平均繰り返し精度は $X:0.67$ ， $Y:0.83$ ， $Z:0.71\mu\text{m}$ ， $\alpha:0.010$ ， $\beta:0.005\text{deg}$ と，要求仕様を満た

Fig. 3 A serially-layered flat spring joint

Fig. 4 2 DOF rotational compliant joint

す高精度な動作が確認された。これは，各関節がすべてばね関節で構成され，構造として一体であり，コンプライアント パラレルメカニズム部においては機械的なガタが全く発生しなかったためであると考えられる。同時に， $400 \times 150 \times 150\text{mm}$ の動作域を有することも実験的に明らかになった。

4. ま と め

本稿では，最大屈曲角度 $\pm 60\text{deg}$ を有する互連溝ばね関節を用いてパラレルメカニズムに応用し，5 自由度のコンプライアント パラレルメカニズム試作機を開発した。動作域は並進： $400 \times 150 \times 150\text{mm}$ ，回転 2 自由度： $\pm 3\text{deg}$ を実現した。また，平均繰り返し精度は $X:0.67$ ， $Y:0.83$ ， $Z:0.71\mu\text{m}$ ， $\alpha:0.010$ ， $\beta:0.005\text{deg}$ を有することを確認した。これらにより，柔軟に屈曲する互連溝ばね関節をパラレルメカニズムに用いることで，応用目的である光学部品のピッキング及び精密位置決めのための動作が可能であることを確認した。なお，ばねを用いた機構であるため機構剛性や固有振動数なども重要であり，今後評価する予定である。

文 献

- [1] 谷川民生，新井健生，“並進 3 自由度を有するマイクロフィンガーモジュール”，日本ロボット学会誌 Vol.20-2，pp.196-205，2002。
- [2] Trease, B.P., Moon, Y.M., and Kota, S., “Design of Large-Displacement Compliant Joints,” *Trans. the ASME, J. of Mechanical Design*, Vol.127-4, pp.788-798, 2005.
- [3] 小塚裕明，荒田純平，藤本英雄，佐野明人，その他，“コンプライアント パラレルメカニズムを用いた高精度・広動作域位置決め装置”，日本ロボット学会誌，Vol.30-7，pp.735-743，2012.