G130011

ハイブリッド式パラレルメカニズムにおける力制御システムの構築

竹田 大輔^{*1}, 立矢 宏^{*2}, 米田 拓郎, 岩崎 平

Construction of the Force Control System in a Hybrid Type Parallel Mechanism.

Daisuke TAKEDA, Hiroshi TACHIYA^{*2}, Takuro YONEDA, Taira IWASAKI^{*2} Kanazawa Univ. Dept. of Natural Science and Technology
Kakuma-machi, Kanazawa city, Ishikawa, 920-1192 Japan

Parallel mechanisms are considered as machine tools, because they have high rigidity and highly precise positioning. Previously, we proposed a spherical 5-degrees hybrid type parallel mechanism that is composed of a spherical 3 degrees parallel mechanism and a plane guide table. The proposed mechanism has high rigidity and large workspace and we confirmed that the proposed mechanism can cut a work smoothly. As a parallel mechanism can output large force, it is hoped to be applied not only to cutting but also to processing which pushes a tool against an object such as abrasion, sheet metal processing. In these cases, force control as well as positioning control of the mechanism is required. Thus, this study proposes force control system of the previously proposed hybrid type parallel mechanism. The proposed control system can operate both the force and the position by the same variables. We actually build up the control system and confirmed that the hybrid type parallel mechanism can control pressing force and can avoid obstacles automatically.

Key Words : Mechanical Engineering, Mechanism, Manipulator, Force Control, Parallel mechanism, Compliance

1. 結 言

パラレルメカニズムは、剛性が高く、高精度な位置決めが可能なことから、加工作業への応用が従来より検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。本研究においても、先に、空間3自由度パラレルメカニズムに平面案内テーブルを組み合わせた、剛性が高く、作業領域が広いハイブリッド式パラレルメカニズムを提案し、実際に切削加工へ応用することを実現している⁽³⁾⁽⁴⁾。パラレルメカニズムは大きな力を発生可能であることから、切削だけでなく研磨や板金加工など、工具を対象物に押しつけて加工を行う作業への応用も考えられる。その場合、パラレルメカニズムには位置決めだけでなく、力の制御が必要となる。そこで、本研究では、先に提案した空間5自由度ハイブリッド式パラレルメカニズムを対象に力制御システムの構築を行った。

2. 対象マニピュレータの概要

図1(a)は、対象マニピュレータである空間5自由度ハイブリッド式パラレルメカニズム型加工機⁽³⁾⁽⁴⁾である。同加工機は空間3自由度パラレルリンクマニピュレータと平面案内テーブルにより構成される。出力点の位置・姿勢を示すために、図1(b)のようにベース上にO-XYZ絶対座標系、出力節に取り付けた工具先端にT-X_TY_TZ_T工具座標系を設定する。O-XYZ絶対座標系は、XY軸をテーブル駆動方向とする右手直交座標系であり、原点Oはベース中心にある。O-XYZ座標系とT-X_TY_TZ_T座標系の各軸方向が一致する場合を初期姿勢とし、初期姿勢でのツール座標系の原点TはZ軸上にあるとする。

本加工機は、上部の空間3自由度パラレルリンクマニピュレータによって位置姿勢(Z, θ_1 , θ_2)を決定し、下部

^{*1} 学生員, 金沢大学 大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 正員, 金沢大学理工研究域機械工学系(〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

の平面案内テーブルによって位置(X , Y)を決定する. ここで(θ_1 , θ_2)は図2に示すように, それぞれ $X_T Y_T$ 平面における回転軸の向きと同回転軸まわりの回転角度を表す. 力制御時は, 空間3自由度パラレルリンクマニピュレータにおいて Z 方向, さらに, X , Y の微小変位を利用し実現する.

Fig.1 Hybrid parallel mechanism type machine tool

Fig.2 Posture expression of the output link

3. 力制御手法

本研究では, 工具を取り付ける出力軸に装着した力覚センサによって工具先端に発生する負荷力を検知し, 目標負荷力を達成する方向に適切な変位量を与えることによって, 対象物への負荷力を制御する. 実際には, 位置制御と力制御をその都度切り替えながら行うため, 位置制御時と力制御時の制御対象変数が同一であることが望ましい. そこで, 式(1)で表される実機姿勢角 θ_1 , θ_2 と工具先端点の変位 X , Y の入出力関係を利用し, ヤコビ行列 J を用いて工具先端点の微小変位 ΔX , ΔY に対する実機姿勢角変位量 $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ を式(2)のように導いた. なお, 式(1)において R_{out} は出力節の半径, L_{tool} は工具の長さを表す. 同式を利用することで工具先端点の微小変位 ΔX , ΔY を達成する実機姿勢角変位 $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ を近似的に算出する. これにより, 対象とする機構で, 位置と力の制御を同一変数で実現できる.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} R_{out} \sin 2\theta_1 (1 - \cos \theta_2) - L_{tool} (\sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ \frac{1}{2} R_{out} \cos 2\theta_1 (1 - \cos \theta_2) + L_{tool} (\cos \theta_1 \sin \theta_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \quad (2)$$

力制御には式 (3) に基づく PID 制御を用いる。 e は負荷力の偏差を、 u は駆動量を表す。 K_p , K_I , K_D はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。本研究では K_p , K_I , K_D の値を過渡応答法によって求め、その値を基準とし、繰り返し実験によって各ゲインを調整した。

$$u(t) = c_f \left(K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

式(3)中の c_f は実機の動作性を決定するコンプライアンス定数である。この定数を調整することで目的とする力制御動作を実現する。

4. 力制御実験

4・1 押し付け力制御実験

構築した力制御システムの有効性を確認するために、押し付けによる力制御実験を行う。本実験では接触対象物に応じたコンプライアンスを設定し、実験によって決定した PID 制御パラメータを用いることで、迅速に目標負荷力を達成可能か確認する。実験ではジュラルミンの平板に対して押し付けを行い、負荷力は Z 方向のみを制御する。実験条件を表 1 に示す。

Table.1 Experiment condition of the pressing

Target force [N]	Sampling time [s]	PID parameter			Compliance [N/mm]
		K_p	K_I	K_D	
200	0.01	0.5	0.001	0.05	6.67×10^{-4}

実験結果を図 3 に示す。図 3 より、工具と対象物の接触後、約 0.3[s] で目標負荷力に到達し、行き過ぎ量も小さい。また、目標負荷力へ収束後も負荷力は安定して目標値を達成し続けている。これより、構築した力制御システムは迅速な力制御が可能である。

Fig.3 Control results of the force for the pressing

4・2 傾斜面のなぞり実験

力制御システムを用いて磨きなどの加工を行う場合、空間 3 自由度パラレルメカニズムによる力制御だけでなく、XY テーブルによる位置制御も同時に行う必要がある。このような制御が安定して可能であることを確認するため、傾斜面の法線方向に対し一定の負荷を加えなぞる実験を行う。

実験の概略を図 4 に示す。XY テーブルにジュラルミンの傾斜台を取り付け、空間 3 自由度パラレルリンクマニピュレータにより傾斜面の法線方向の力を制御しながら、XY テーブルを駆動させることでなぞり動作を行う。実験条件を表 2 に示す。

Table.2 Experiment condition of tracing the slope

Target force [N]	Sampling time [s]	PID parameter			Compliance [N/mm]	Velocity of XY Table[mm/s]	Angle of slope[°]
		K_p	K_I	K_D			
200	0.01	0.1	0.01	0.05	2×10^{-3}	0.38	20

実験結果を図5に示す。図5より負荷力は目標値に迅速に収束しており、その後も安定して目標負荷力を維持していることがわかる。すなわち、構築した力制御システムによれば、接触面が傾斜しており、なぞること接触位置の高さが変化する場合にも、一定負荷でのなぞり動作が安定して行える。

Fig.4 Outline of tracing the slope

Fig.5 Control results of the force for tracing the slope

4・3 障害物を回避しながらのなぞり実験

対象物表面に突起などの障害物が存在する場合に、これらを回避または外郭にそってなぞり動作を行う制御が可能であることを確認する。対象には表面に障害物を配置した図6に示すジュラルミン板を用いる。本実験では、鉛直方向に一定負荷を与えながら、工具と障害物の接触によって発生する負荷力に応じ工具にY方向変位を与えることで、図中矢印の経路で障害物を回避しながらのなぞり動作を行う。このときに生じる鉛直方向以外への工具先端の力は設定したコンプライアンスに従う。実験条件を表3に示す。

Table.3 Experiment condition of obstacle avoidance

Target force [N]	Sampling time [s]	PID parameters						Compliance [N/mm]		Velocity of XY table[mm/s]
		Z axis			Y axis					
		K_p	K_I	K_D	K_p	K_I	K_D	Z axis	Y axis	
200	0.01	0.3	0.05	0.05	7.5×10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	2×10^{-3}	2	0.763

実験時の工具先端の変位を図7に、負荷力の変化を図8に示す。図7からわかるように、工具先端は障害物に沿って移動した。図8よりZ方向負荷力は迅速に目標負荷力に収束し、その後も目標負荷力を維持している。また、Y方向へは障害物に応じて柔軟に動作するようにコンプライアンスを設定したため、発生負荷力が微小となっている。これより、構築した力制御システムにおいて、障害物を回避しながらのなぞり動作が可能であることが示された。

Fig.6 Plate with obstacle objects

Fig.7 Displacement of the tool tip

Fig.8 Measured force in each axis

5. 結語

5 自由度ハイブリッド式パラレルメカニズム型加工機を対象として力制御系を構築した。同制御系では出力軸に取り付けた力覚センサによって検知した負荷力と対象物の剛性から発生力を調整可能であり、制御のための変数は位置制御と同一である。構築した制御システムでの押し付け実験を行い、力制御が可能であることを確認した。また、実際の加工を想定した動作を行い、障害物を有する平面や傾斜面に対しても適用できることを示した。

文 献

- (1) 垣野義昭, パラレルメカニズムへの期待, 精密工学会誌, 63-12, (1997), 1643-1645
- (2) 渋川哲郎・遠山退三・服部和也, パラレルメカニズム形切削加工機, 精密工学会誌, 63-12, (1997), 1671-1675
- (3) 谷内宏史・立矢 宏・海 貴之・服部亮治, パラレルメカニズム型加工機の出力運動予測による工具経路の生成, 日本機械学会論文集 C 編, 75-752 号(2009), 1114-1121
- (4) 立矢 宏・青木泰穂・谷内宏史・武田昌士, 応答曲面法によるパラレルメカニズム型加工機のキャリブレーション, 日本機械学会論文集 C 編, 76-767 号(2010), 1870-1877