パラレルメカニズム形工作機械設計支援システムの開発*

— 作業領域解析システム —

趙 曉明** 門脇 聡*** 洪川哲郎† 遠山退三† 服部和也† 堤 正臣**

Development of Support System for Design of Parallel Mechanism Based Machine Tools
- Analysis System of Working Space -

Xiaoming ZHAO, Satoru KADOWAKI, Tetsuro SHIBUKAWA, Taizo TOYAMA,
Kazuya HATTORI and Masaomi TSUTSUMI

It is required to get large working space when the parallel mechanism based machine tools are used. However, the shape of working space is considerably complicated because of the influence of the self-interference generated between the parts and of singular points. In this paper, an analysis system for calculating the working space of parallel mechanism based machine tools is developed. It can be adapted to various types of parallel mechanism based machine tools including tilting type, perpendicular type, telescopic type and revolving type. Taking HexaM machine developed by Toyoda Machine Works Co. as the model, the developed software is proved to be effective by comparing the results of experiment and simulation. Moreover, the HexaM machine is evaluated by investigating the influence of the shape and dimension of parts on the working space.

Key words: parallel mechanism, machine tool, working space, analysis system, volume

1. 緒 言

パラレルメカニズム形工作機械の設計では、より大きな作業領域を得ることが要求されるが、機構の形式、部品の形状、寸法などによって機械の各要素間に生じる自己干渉や特異点の影響で、製作した機械の作業領域はかなり複雑な形となり、設計仕様と異なる可能性がある。したがって、パラレルメカニズム形工作機械を設計する段階でその作業領域を正確に把握することは重要である。

武田ら¹⁾²⁾は運動伝達性を考慮して Stewart Platform³⁾機構の実用作業領域を解析した。佐渡友ら⁴⁾は Pierrot ら⁵⁾の提案した6自由度パラレルロボット HEXA に対してモータの回転角の制限、幾何学パラメータの制限およびボールジョイントの可動範囲の制限を考慮に入れて作業領域を解析した。増田ら⁶⁾は、垂直直動型パラレルメカニズムの運動学、機構の干渉を検討して、試作した垂直直動型パラレルメカニズムの作業領域を求めた。著者ら⁷⁾は豊田工機社製パラレルメカニズム形工作機械 HexaM⁸⁾をモデルとして、シミュレーションおよび実験から作業領域を解明し、その作業領域を表す数式を提案した。

しかし、これらの研究で示した作業領域はいずれも独自のモデル、固有の寸法緒元だけに有効であるため、機構の形式、部品の形状、寸法などの変化によって変わる作業領域には対応しておらず、機械設計ツールとしては使えない。したがって、機械の設計や改造の段階で、機構の形式、部品の形状と寸法などの変化に応じた作業領域を解析するシステムの開発

が必要となる。

本研究では、前報⁷⁾の自己干渉、特異点の検出方法および作業領域の解析ソフトウェアをもとにして、傾斜直動型、垂直直動型、伸縮型および回転型のパラレルメカニズム形工作機械について、部品の形状、寸法を変更させた場合にも対応できる作業領域解析システムを開発する。次に、豊田工機社製の HexaM 機において、剛性向上を目的とした改造を実施したため、その改造前後の作業領域の解析と実験との比較から開発したシステムの有効性を明らかにする。さらに、本システムを用いて機構の形式、部品の形状、寸法が作業領域に及ぼす影響を調べ、改造後の HexaM 機の作業領域を評価する。

2. システムの構成

本研究で開発したパラレルメカニズム形工作機械設計支援システムの主メニューを図1に示す。本システムは主に機構の設定部、機構の運動解析部と作業領域の解析部とから構成されている。ただし、機構の設定部は傾斜直動型、垂直直動

Fig.1 Main menu of analysis system of working space

* 原稿受付 平成12年6月26日

** 正会員 東京農工大学大学院 (小金井市中町2-24-16)

*** 学生会員 東京農工大学大学院

† 正会員 豊田工機(株)技術研究所 (刈谷市朝日町1-1)

Fig.2 Schematic view of the tilting type parallel mechanism HexaM

型、伸縮型、回転型の4種類、機構の運動解析部は逆解析、順解析およびある特定位置での干渉解析の3種類、作業領域解析部は並進作業領域の解析および回転作業領域の解析の2種類を解析できるようになっている。すなわち解析しようとする機構に対して、部品の形状、寸法、ジョイントの回転角範囲、スライダのストロークなどを入力し、解析項目を指定して解析を行う。次に、これらの設定と解析とを説明する。

2.1 機構の設定部

図2に示すように、スライダユニットがXY平面と垂直ではない、ある角度に傾いた直動型を傾斜直動型と呼ぶ。豊田工機社製のHexaM機⁸⁾はこの類型に属する。ただし、6個のサーボモータ、スライダ軸、ロッドおよびトラベリングプレートジョイント（以下、TPジョイントと略す）は、3組に分け、120°の間隔で配置されている。

垂直直動型、伸縮型および回転型をそれぞれ図3～図5に示す。増田ら⁶⁾、武田ら¹⁾および佐渡友ら⁴⁾の解析対象の機種はそれぞれ垂直直動型、伸縮型および回転型に属する。ここに示した垂直直動型、伸縮型および回転型のパラレルメカニズムには、TP、TPジョイント、主軸モータなどの形状、寸法およびロッドの配置方法を図2のHexaM機と同じにしたが、実際の機構の作業領域を解析する際に、その機構の形状および配置方法により設定部を調整して解析を行うことにする。

Fig.3 Schematic view of the perpendicular type

Fig.4 Schematic view of the telescopic type

Fig.5 Schematic view of the revolving type

この4種類のパラレルメカニズムにおいて、設定できるパラメータは、1)スライダユニットの組立て用基準点の配置方法と中心円の半径 r_1 、2)TPジョイントの配置方法と中心円の半径 r_2 、3)TPジョイントの形状と寸法、4)TPの形状と寸法、5)スライダユニットの傾斜角度 β 、6)スライダの高さ h 、7)窓枠、カバーのサイズ、8)工具の突き出し長さ t 、9)ロッドの長さ d 、10)スライダのストローク S_s 、11)伸縮対偶のストローク S_T 、12)リンクの回転角の制限 θ の12種類がある。このうち、機種によって設定できないものもある。例えば、伸縮対偶のストローク S_T の設定は伸縮型しか対応できない。

上述の設定内容に基づき運動解析や作業領域解析を行うために定義する直角座標系XYZと回転座標系ABCも図2～図5に示す。

2.2 機構の運動解析部

逆運動解析とは、出力節となる工具中心点の位置と工具姿勢により入力節であるスライダの位置（直動型）、伸縮対偶の伸縮量（伸縮型）、または回転リンクの角位置（回転型）を求める問題である。

Fig.6 Modification of TP and its joint

順運動解析とはスライダの位置(直動型), 伸縮対偶の伸縮量(伸縮型), または回転リンクの角位置(回転型)により工具中心点の位置と工具姿勢とを求める問題である. この4種類のパラレルメカニズムの順運動解析において, 解析解の存在しない方程式をPowell共役方向法⁹⁾を使って解くことにする.

ある特定位置における干渉解析とは工具中心の位置と姿勢とを与えた場合に機械が自己干渉や特異点を生じるかどうかを解析することである. その自己干渉の検出方法および特異点の判断方法は前報⁷⁾と同じである.

2.3 作業領域解析部

前報⁷⁾で記述したように機械の自己干渉と特異点を生じない工具位置・姿勢から構成した範囲を作業領域と呼ぶ. このうち, 工具姿勢の変化がない, すなわち $A=0^\circ, B=0^\circ, C=0^\circ$ の場合の工具位置 X, Y, Z の変化範囲を並進作業領域, ある特定位置 X, Y, Z における工具姿勢 A, B, C の変化範囲を回転作業領域とそれぞれ呼ぶ. ボールエンドミルのような回転工具を使用する際に, C 軸の周りに TP が回転しなくても ($C=0^\circ$), 加工には支障がないため, A 軸および B 軸の回転作業領域だけを解析する.

3. HexaM 機の改造および作業領域の変化

3.1 HexaM 機の改造部位

前報⁷⁾から作業領域は工具を下げると小さく, 工具を上げると大きくなることがわかった. その原因は TP と TP ジョイントとの干渉, ロッドと窓枠との干渉およびスライダリミットである. 改造後の HexaM 機は剛性を向上させることを目的としているため, 図6に示したようにジョイント等のユニットが大きくなりスライド高さも大きくなっている.

3.2 改造前後の作業領域の変化

工具の高さ $Z=30\sim 530$ mm の範囲において, 第2章で説明した機構設定部に改造前後の HexaM 機の形状および寸法を入力して, 並進作業領域を解析した. その結果および作業領域の内接円(以下作業領域円と略す)半径 R を図7に示す. ただし, 改造前の作業領域は破線, 改造後の作業領域は実線で囲む網掛けで表す. また, 改造後の機械を用いて実験した作業領域の限界を同図に●で示す. 図7から, 1) 改造後の機械の作業領域は改造前と比べて工具高さが低い場合に広く, 工具高さが高い場合に狭くなること, 2) 工具高さ Z が 490 mm, 530 mm のとき, 主軸モータとスライダユニット下端部との干渉によって作業領域内に非作業領域を生じること, また, 3) 作業領域の解析値と実験値とはほぼ一致することがわかる. これらのことから, 本研究で開発した作業領域の解析システム

Fig.7 Working space of HexaM at different tool height

Fig.8 Relationship between radius of workpiece space and tool height

が有効であると言える.

HexaM 機の改造前後の作業領域を比較するために, 工具高さ Z を 10 mm から 600 mm まで 10 mm ごとに变化させて図7のように求めた作業領域円半径 R との関係性を調べた. その結果は, 図8に示すように作業領域円半径 R は Z の増大(工具を引き上げる)につれて小→大→小→大→小の順で変化していて, $Z=460$ mm のところで主軸モータとスライダユニットとの干渉の影響で急速に減少して一定値となることがわかる. 工具高さ $Z=10$ mm から 600 mm までの作業領域円半径 R を用いて求めた作業領域体積 V (図中の斜線部を横軸に1周回して得られる体積に相当する)を作業領域の大きさの評価関数とすると, 改造前後の作業領域体積はそれぞれ 0.438 m^3 と 0.350 m^3 となった. すなわち, 改造後の機械の作業領域体積は改造前より小さくなった.

4. 作業領域に及ぼす機構パラメータの影響

機構の形式, 部品の形状, 寸法が作業領域に影響を及ぼすことは緒言で述べた. 次に, HexaM 機を基本モデルとして, 作業領域に対する各パラメータの影響を検討する. 回転作業

Fig.9 Radius and volume of working space at changing the slider height

Fig.10 Radius and volume of working space at changing the tilting angle of slider unit

領域は機構の形式、部品の形状、寸法のほかに工具位置の影響もあるため、比較しにくくなる。そこで、ここでは並進作業領域（以下作業領域と略す）だけを比較・検討する。

一方、機構の形式および寸法などの変化に伴い、カバー形状を変形する可能性があるから、以下の各パラメータの影響を検討する際に、カバーおよび窓枠の干渉を考慮しないことにする。

4.1 スライダ高さ h の影響

図2(a)に示したスライダ高さ h を 50 mm から 250 mm まで変えて解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図9に示す。下横軸は工具高さ Z 、左縦軸は工具高さ Z に対応する作業領域円半径 R 、上横軸はスライダ高さ h 、右縦軸はスライダ高さ h に対応する作業領域体積 V 、細線は R 、太線は V である。図9から、作業領域体積 V はスライダ高さ h が 60 mm の場合最大となり、それを超えると徐々に減少していくことがわかる。したがって、HexaM 機のスライダ高さ h を 100 mm から 144 mm と改造したことは、作業領域体積を減少させたことになる。

4.2 スライダユニットの傾斜角度 β の影響

スライダユニットの傾斜角度 β を 0° から 90° まで変えて解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図10に示す。上横軸を除く各軸、細線および太線は図9と同じである。図10から、 V はスライダユニットの傾斜角度 β が 40° の場合最大となるが、 $Z < 310$ mm のよく使う工具高さの範囲において

Fig.11 Radius and volume of working space at changing the radius of base circle

Fig.12 Radius and volume of working space at changing the radius of joint circle

は HexaM 機のような $\beta=30^\circ$ の作業領域円半径 R がより大きいことがわかる。

4.3 ベース円の半径 r_1 の影響

図2に示したベース円の半径 r_1 を 100 mm から 400 mm まで変えて解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図11に示す。図11から、 V はベース円の半径 r_1 が 150 mm の場合最大となるが、工具が上 ($Z=460$ mm) 下 ($Z=10$ mm) 位置における作業領域円半径 R の差（以下上下半径差と略す）が 312 mm に達していることがわかる。これに対して、HexaM 機のように $r_1=270$ mm の場合、 V はやや減少したが、上下位置の作業領域円半径 R はそれぞれ 528 mm, 444 mm で、その差は 84 mm と減少した。

4.4 ジョイント円の半径 r_2 の影響

図2に示したジョイント円の半径 r_2 を 150 mm から 400 mm まで変化させて解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図12に示す。図12から、 r_2 が 190 mm から 310 mm までの間において、 V は徐々に大きくなるが、上下位置での作業領域円半径の差が拡大していることがわかる。図6に示したようにジョイント円の半径 r_2 を 190 mm から 210 mm と改造したことによって、 V が増大した反面、上下半径差が拡大されたが、 $Z < 310$ mm のよく使っている工具高さの範囲において改造後の作業領域円半径 R が改造前より大きくなっている。

4.5 ロッド長さ d の影響

図2に示したロッド長さ d を 600 mm から 1600 mm まで変

Fig.13 Radius and volume of working space at changing the length of rod

化させて解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図 13 に示す。図 13 から、1) ロッド長さ d を短くする場合工具は下げられない ($R=0$)、ロッド長さ d を長くする場合工具は上げられない ($R=0$)、2) V はロッド長さ d が 1120 mm のときに最大となることがわかる。これに対して、HexaM 機のように $d=1100$ mm の場合、 V はやや減少したが、上下半径差は $d=1120$ mm の場合より小さくなった。

5. 変形した機構の作業領域

図 2 の傾斜直動型 HexaM 機を図 3～図 5 のように垂直直動型、伸縮型および回転型に変形して解析した作業領域円半径 R と作業領域体積 V とを図 14 に示す。ただし、この解析では、

- 1) 工具、ホルダ、主軸、主軸モータ、TP、TP ジョイントおよびロッドの形状、寸法は HexaM と同様とし、
- 2) 図 3 の垂直直動型において、 r_1 は図 2(b) のカバーの半径 s と同じ、スライダのストロークは $l_2=1100$ mm (HexaM 機のストローク) で、その始点はテーブル上面から $l_1=800$ mm だけ離れ、
- 3) 図 4 の伸縮型においてベース円半径 r_1 は 1300 mm (HexaM 機のスライダから Z 軸までの最大距離と相当する) で、伸縮対偶の最小、最大長さはそれぞれ 1100 mm, 2200 mm で、
- 4) 図 5 の回転型においてベース円の半径 r_1 は 900 mm、駆動節の長さ s_1 は 600 mm とした。

同図から、本研究では開発したシステムは HexaM 機のほかに垂直直動型、伸縮型および回転型の作業領域を解析できることがわかる。また、垂直直動型、伸縮型、回転型に対しても、図 9 から図 13 のように、作業領域体積 V はパラメータの値を変更することによってより大きな値が得られ、機械の設計や改造に際して情報を提供できると考えられる。

6. 結 言

本研究では、前報⁷⁾の検出方法と作業領域の解析ソフトウ

Fig.14 Radius and volume of working space of typical parallel mechanisms

エアとをもとにして、傾斜直動型、垂直直動型、伸縮型および回転型のパラレルメカニズム形工作機械の作業領域解析システムを開発し、HexaM 機の実験結果と比較して、その有効性を確認した。さらに、本システムを用いて、機構の各パラメータが HexaM 機の作業領域に及ぼす影響を検討した。得られた主な結果は次のようになる。

- (1) 本システムによって解析した HexaM 機の作業領域は実験結果とはほぼ一致している。
- (2) 現在の HexaM 機ではスライダ高さを除き、設定パラメータは最適値に近く、より大きな作業領域と、より小さな上下半径差とをもたらしている。
- (3) 本システムは傾斜直動型のほか、垂直直動型、伸縮型および回転型の作業領域を解析することができる。

参 考 文 献

- 1) 武田行生, 舟橋宏明: パラレルマニピュレータにおける運動伝達性, 日本機械学会論文集(C編), **59**, 560 (1993) 1142.
- 2) 武田行生, 舟橋宏明: パラレルマニピュレータの特異点とその近傍における運動特性および静力学特性, 日本機械学会論文集(C編), **60**, 570 (1994) 701.
- 3) D. Stewart: A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Inst. Mech. Eng., Part 1, 1965-1966, **180**, 15 (1965) 371.
- 4) 佐渡友哲也, 内山 勝: パラレルロボット HEXA の作業領域解析, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1993) 843.
- 5) F. Pierrot, M. Uchiyama, P. Danuchez and A. Fournier: A New Design of a 6-DOF Parallel Robot, J. Robotics and Mechatronics, **2**, 4 (1990) 308.
- 6) 増田峰知, 藤原基芳, 新井健生: 垂直直動型パラレルメカニズムの運動学解析と試作, 日本機械学会論文集(C編), **65**, 638 (1999) 4076.
- 7) 趙 曉明, 波川哲郎, 遠山退三, 服部和也, 堤 正臣: パラレルメカニズム形工作機械の作業領域の解析とその近似表現, 精密工学会誌, **66**, 4 (2000) 584.
- 8) 波川哲郎, 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.
- 9) M. J. D. Powell: An Efficient Method of Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives, Compute. J., **7**, (1964) 155.