パラレルメカニズム形工作機械加工支援システムの開発*

— 工作物の段取り位置決定方法 —

趙 曉明** 渋川哲郎*** 服部和也*** 遠山退三*** 大坪和義*** 堤 正臣**

Development of Support System for Machining in Parallel Mechanism Type Machine Tools
- Determination of Location of Workpiece -

Xiaoming ZHAO, Tetsuro SHIBUKAWA, Kazuya HATTORI, Taizo TOYAMA, Kazuyosi OTUBO and Masaomi TSUTSUMI

This paper uses HexaM made by Toyoda Machine Works Co. as an analytical model of parallel mechanism type machine tools. Much collision may be generated for its complicated structure and working space, when a workpiece is machined using this machine. For example, those collisions are generated between the moving components of the parallel mechanism, between the moving components and a workpiece and between the moving components and the tool storage for automatic changing. In this paper, an algorithm for detecting and avoiding those collisions are proposed. The method for avoiding the collisions is conducted by readjusting the location of the workpiece without amending the tool path. It is confirmed through experimental works that the proposed algorithm is useful to detect the collisions prior to the actual machining.

Key words: parallel mechanism, machine tool, collision check, collision avoidance, location

1. 緒 言

パラレルメカニズム形工作機械では、機械の各要素間に生じる自己干渉や特異点などの問題(以下、自己干渉と略す)が存在するほか、切削中に機械と工作物との干渉(以下、機械—工作物間の干渉と略す)およびワークスペース内に設置された周辺機器との干渉(以下、機械—周辺機器間の干渉と略す)を生じる可能性もある。そのため、パラレルメカニズム形工作機械を使って切削する前に、1)該当工作物が加工できるかどうか、2)切削中に干渉検出および干渉を生じた場合の対策があるかどうか、3)工作物の最適な段取り位置がどこにあるか、などの問題点を解決しなければならない。

著者らは、豊田工機社製パラレルメカニズム形工作機械 HexaM¹⁾ をモデルとして、シミュレーションと実験とから自己干渉を生じない作業領域を明らかにし、その作業領域の近似表現式を提案した²⁾。一方、機械の工具系(工具、ホルダ、主軸)と工作物系(工作物、ジグ)間に生じる干渉および干渉回避については、工具系の形状をある平面に投影し、この投影した形状を包絡する矩形領域内に存在する工作物系上の点列データと工具系との内外判別に基づいて干渉検出を行う方法³⁾⁴⁾、半球、円すいおよび円柱のプリミティブで構成される工具系と三角形のポリゴンパッチで表現した工作物系との稜線交差から干渉検出を行う方法⁵⁾などが発表されている。

これらの研究では、1)切削中の機械—周辺機器間の干渉を考慮していない、2)工具系と工作物系との干渉検出では、トラベリングプレート(以下、TPと略す)、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)、ロッドと工作物系との干渉を考慮していない、3)工具系と工作物系との干渉

が検出された場合、ツールパス中の工具姿勢を変化することによって干渉回避を行っているが、ツールパスを修正せずに工作物の段取り位置を調整して干渉を回避することはできない。そこで、自己干渉、機械—工作物間の干渉、機械—周辺機器間の干渉を、工作物の段取り位置の調整により回避するシステムの開発が必要となる。

本研究では、機械の自己干渉、機械—工作物間の干渉および機械—周辺機器間の干渉に対して、それぞれ干渉検出用チェックファイルを作成し、干渉検出および干渉が検出された場合に工作物の段取り位置の調整による干渉回避方法を提案する。さらに、該当工作物の加工可能性、および干渉の検出方法と回避方法とを利用して干渉を生じない工作物の最適な段取り位置算出システムを開発し、実機実験によりこのシステムの有効性を検証する。

2. 干渉検出と干渉回避

本研究で使用している HexaM 機、周辺機器(マガジン)および工作物の簡略図を図1に示す。上述の自己干渉、機械—工作物間の干渉および機械—周辺機器間の干渉のほかに、工作物を段取りするときに、工作物と周辺機器との干渉(以下工作物—周辺機器間の干渉と略す)を生じる可能性もある。これらの干渉を回避する際に、工具姿勢を変化する方法と、工作物の段取り位置や姿勢を調整する方法とが考えられるが、本研究では、工作物の段取り位置だけを調整することによって干渉回避を行う。ただし、周辺機器を設置しないまたはワークスペース外に設置した機械に対して、機械—周辺機器間の干渉、工作物—周辺機器間の干渉がないため、対応する干渉検出および干渉回避が省略できる。

2.1 自己干渉の検出方法と回避方法

パラレルメカニズム形工作機械を使って切削するときの自己干渉を速く検出するために、少数の干渉検出用点を作成す

* 原稿受付 平成12年4月19日

** 正会員 東京農工大学大学院(小金井市中町2-24-16)

*** 正会員 豊田工機(株)技術研究所(刈谷市朝日町1-1)

Fig.1 Schematic view of the parallel mechanism

Fig.2 Check points and check method of collision with working space

る手法と、並進作業領域円²⁾と回転作業領域円²⁾とによるラフチェック手法とを併用する。

前報²⁾に述べたように、工具とZ軸の距離が大きいくほど、工具のZ座標値が大きいくほど、そして、工具が大きく傾くほど自己干渉が生じやすい。そこで、図1に示した工作物に対して、図2(a)に示すようにツールパスの外側の点(○)、より高い工具位置をとる点(□)およびより大きな傾き角をもつ点(◇)だけを干渉検出用点として自己干渉検出用ファイルを作成する。自己干渉検出を行う際に、検出用ファイルから干渉検出用点の工具位置と姿勢とを読み出し、前報²⁾で提案した数式を用いて図2(b)に示す並進作業領域円および回転作業領域円を求める。工具位置と姿勢とがこの作業領域円以内にある場合には自己干渉が生じない。作業領域円以外にある場合には前報²⁾で開発したソフトウェア(PWSH)により自己干渉の検出を行う。

自己干渉が検出された場合、その干渉を生じた干渉検出用点から機械のZ軸までのベクトルの向きを回避方向とする。工作物の段取り位置を回避方向へ10 mmだけ移動する。連続2回の回避方向のなす角度が150°以上の場合、工作物の段取り位置を高さ方向へ10 mmだけ移動する。また、自己干渉が主軸モータとスライダユニットとの干渉である場合、工作物

Fig.3 Check method of collision between the parallel mechanism and workpiece

が高すぎるまたは工作物の段取り位置が高すぎるため、本機械を用いる加工は不可能と判断する。

2.2 機械—工作物間の干渉の検出方法と回避方法

機械—工作物間の干渉を生じる可能性のある機械部品と工作物との関係を図3に示す。この機械—工作物間の干渉を効率的に検出するために、次のように干渉検出用点を作成して干渉検出を行う。

工具中心を頂点とし、工具、ホルダ、主軸、TPおよび主軸モータを含む円すいの頂点角を θ_0 、工具中心とTPジョイントとの最小距離を D_0 、工具軸方向における最小距離を H_0 とすると、 θ_0 、 D_0 と H_0 は機械の各部品の寸法およびTPに取付けた軸 γ の回りに回転できるTPジョイントの最大回転角により求められる。一方、工作物は切削面と非切削面とに囲まれる。切削面を切削点群、機械と干渉する可能性のある非切削面を非切削点群で表す。以下、切削点群と非切削点群とを表面点と総称する。

ある切削点Pにおいて、点Pとほかのすべての表面点Qとを結ぶ線分PQと工具軸とのなす角 θ 、線分PQの長さ D 、および線分PQを工具軸方向へ投影した長さ H を求める。 $\theta < \theta_0$ の表面点を第1種の干渉検出用点、 $D > D_0$ かつ $H > H_0$ の条件を満たす表面点を第2種の干渉検出用点とする。すべての切削点に対して、この2種類の干渉検出用点を求めて干渉検出用ファイルに保存する。

機械—工作物間の干渉の検出は、2種類の干渉検出用点に対して各自に行われ、それぞれ第1種の干渉検出、第2種の干渉検出と呼ぶことにする。第1種の干渉検出においては、工具、ホルダ、主軸、TPおよび主軸モータから構成した工具系と第1種の干渉検出用点とをある平面へ投影して工具系の投影が存在する領域内の干渉検出用点のみを用いて干渉検出を行う方法⁴⁾を使用する。第1種の干渉が工作物の段取り位置と関係ないため、段取り位置を求める前にこの干渉検出を1回だけ行う。また、工作物に対する工具姿勢を変えない場合この干渉が回避できないため、第1種の干渉が検出された

Fig.4 Check points and avoidance vector of collision between the parallel mechanism and magazine

場合、本ツールパス(工作物に対する工具姿勢)を用いる加工が不可能と判断する。

第2種の干渉検出においては、TP ジョイント、ロッドから構成した工具系と第2種の干渉検出用点とを使って第1種の干渉検出のように行えるが、工作物の段取り位置の変化がTP ジョイント、ロッドの位置と姿勢の変化をもたらすため、工作物の段取り位置を新たに設定した後に行わなければならない。そこで、第2種の干渉検出用点の数を削減することによって干渉検出の時間の短縮が図れる。本研究での第2種の干渉検出用点の条件は $D > D_0$ かつ $H > H_0$ であるため、より小さな工作物あるいはより平坦な工作物の場合では、第2種の干渉検出用点の数を削減することができる。

第2種の干渉が検出された場合、自己干渉の回避方法と同じように処理する。

2.3 機械一周辺機器間の干渉の検出方法と回避方法

本研究のモデルとした HexaM 機ではテスト的にテーブル上に設置したマガジンが機械一周辺機器間の干渉の対象となる。テーブル上に設置しているマガジンと同一象限であるツールパスの外側の点を干渉検出用点とする。マガジン、工作物およびツールパスの上面図を図4に示す。マガジンをテーブルの第1象限に設置したため、ツールパスの中心に対する第1象限の外側の点(○)を抽出して干渉検出用点ファイルを作成する。

一方、工具、ホルダ、主軸、TP ジョイント、ロッドおよび主軸モータは円柱として、TP、マガジンは半径がゼロの円柱(稜線)と有界平面とからモデル化している。機械一周辺機器間の干渉を検出する際に、すべての干渉検出用点において機械の各部品の位置と姿勢とを求めて、工具、ホルダなどを表す円柱およびTPの稜線とマガジンの有界平面との交点の有無、マガジンの稜線とTPの有界平面との交点の有無を判断する。交点がある場合、マガジンと干渉する。交点がない場合、マガジンと干渉しない。上述したように工作物の段取り位置の変化が機械部品の位置や姿勢などの変化をもたらすため、機械一周辺機器間の干渉の検出は工作物の段取り位置ごとにも行わなければならない。

マガジンとの干渉が検出された場合、テーブルの中心へ向かうマガジン内側平面の法線を回避方向とする。回避方法は自己干渉の回避方法と同じである。

2.4 工作物一周辺機器間の干渉の検出方法と回避方法

段取りするときに生じる工作物と周辺機器との干渉を快速検出するために、XY 平面に投影した工作物、周辺機器をその形状を包絡する2次関数または多角形で表す。工作物一周辺機器間の干渉の検出は、この2次関数または多角形間の交点問題となる。交点がある場合には干渉を生じる。交点がない場合には干渉を生じないとみなす。この干渉検出も工作物の段取り位置を変えることに行わなければならない。干渉が検出された場合の回避方法は上述した機械一周辺機器間の干渉の回避方法と同じである。

2.5 干渉検出用点の補間

上述した干渉検出方法からわかるように、工作物一周辺機器間以外の干渉検出は、特定の干渉検出用点における交点の有無を求める問題になる。干渉検出用点間の距離が大きい場合、その中央に生じる干渉を漏らして検出できなくなるおそれがある。その解決方法としては、小西ら⁵⁾の提案したプリミティブとポリゴンパッチとの稜線交差による方法と、干渉検出用点間の距離を小さくする方法との二つがある。前者は機械—工作物間の干渉検出に有効であるが、自己干渉と機械一周辺機器間の干渉の検出に対応できない。後者は干渉検出用点間の距離を小さくしすぎると、膨大なデータ量と計算時間とをもたらす問題があるが、本研究では、あるしきい値によって干渉検出用点間の距離を短縮する方法を使用して干渉検出の安全性および計算時間の削減を図る。具体的な方法は次の通りである。

CAM システムから出力した工作物の表面点群とツールパスとに対して、隣合う表面点間の距離またはツールパス中の工具位置間の距離があるしきい値より大きい場合、その表面点またはツールパス点の間に補間点を挿入する。すなわち補間点を挿入した後の工作物の表面点群とツールパスとにおいては、隣合う点間の距離は該当しきい値以内に抑えられる。

干渉検出を行う際に機械部品を5 mm だけ拡大して、機械部品間の交点、周辺機器との交点および工作物の干渉検出用点との内外関係を求める。交点がある場合または干渉検出用点が拡大した機械部品内に入った場合では干渉を生じるとみなすが、その交点または干渉検出用点から部品表面までの距離が5 mm 以内であれば実際には干渉が生じない。以下、この5 mm を安全余量と呼ぶ。そこで、安全余量を干渉検出用点間の距離を短縮するためのしきい値とすると、干渉は漏れなく確実に検出でき、計算時間もあまり増えない。

3. 段取り位置算出アルゴリズム

任意の工作物に対して、工作物の底面をテーブルの上面に、XY 平面におけるツールパスの中心をテーブルの中心に設置する位置を最適な段取り位置とする。干渉などによってこの最適な位置に段取りできない場合、まず工作物を同一の水平面内に移動して干渉を生じない段取り位置を探索する。同一

Fig.5 Algorithm for locating workpiece

の水平面内に段取りできる位置が見出せない場合、次に工作物の段取り位置を高さ方向に移動して探索しつづけて、段取り位置または段取りできない結論を出力するまでこの過程を繰り返す。このような探索過程および前述した自己干渉、機械—工作物間の干渉、機械—周辺機器間の干渉および工作物—周辺機器間の干渉の検出方法・回避方法に基づいて、提案する工作物段取り位置を算出するシステムのアルゴリズムを図5に示す。

step1: 基本データを読み込む。この中で、工具、ホルダの半径と突出し長さ、表面点群、ツールパス、周辺機器の位置およびXY平面に投影した周辺機器、工作物の形状を包絡する2次関数または多角形のデータを入力する。

step2: 本機による加工の可能性を調べる。工作物の表面点群とツールパスから、XYZ方向における工作物の外形寸法、工具の移動距離を求める。その外形寸法または工具の移動距離が大きすぎる場合には、本機による加工が不可能のメッセ

Fig.6 Workpiece and tool path

ージを出力して終了する。

step3: 干渉検出用点ファイルを作成する。自己干渉、2種類の機械—工作物間の干渉および機械—周辺機器間の干渉の検出用点ファイルを作成する。

step4: 第1種の機械—工作物間の干渉を検出する。干渉が検出された場合には、その干渉が回避できないとのメッセージを出力して終了する。

step5: テーブル中心に対するツールパス中心 $C(x, y, z)$ の初期値を設定する。初めに x, y を0, z をツールパス中心から工作物の底面までの距離 s と設定する。すなわち初めに工作物の底面をテーブルの上面に、ツールパスの中心をテーブルの中心に設置する。

step6: ツールパス中心 C の位置を求める。2.1節～2.4節に記述した自己干渉、第2種の機械—工作物間の干渉、機械—周辺機器間の干渉、工作物—周辺機器間の干渉の検出方法および回避方法を用いて、ツールパス中心を移動する。すべての干渉が生じなくなるまでこのstepを繰り返す。

step7: 工作物の段取り位置を出力する。求めたツールパス中心 C の位置と工作物座標系におけるツールパスの中心位置とから工作物の段取り位置(機械座標系における工作物座標系の原点の位置)を求めて出力する。

4. 解析結果と実験結果

上述のアルゴリズムに基づいてパラレルメカニズム形工作機械を用いて切削するときの工作物の段取り位置を算出するシステムを開発した。図6に示す外形寸法 $350 \times 350 \times 120$ mmの工作物に対して、切削面に垂直な工具姿勢をとる場合、汎用CAMソフトウェアであるCAMANDシステム⁶⁾によって作成したツールパスの工具中心位置と工具姿勢(切削点の法線方向)も同図に示す。ただし、ツールパスの点数は1862点である。このツールパスに沿って、半径3 mm、突出し長さ52 mmのスクウェアエンドミルを半径30 mm、突出し長さ45 mmのホルダを介して主軸に取付けて切削する場合の工作物の段取り位置をパソコン(CPU: AMD ATHLON 850 MHz)を使って算出した。算出時間は約70秒であった。段取り位置の計算過程および最終の結果は次の通りである。

4.1 干渉検出用点の数

ツールパスにおいて隣合う工具位置の距離が安全余量より大きいものがあるため、補間点を挿入するとツールパスの

Fig. 7 Change of process of location of workpiece

Fig. 8 Final location of workpiece

点数は 7158 点となる。また、図 6 に示した工作物には切削面以外の表面と機械との干渉を生じる可能性がないため、表面点群は工具姿勢を調整するための点数(例えば図 6 に破線の○で囲まれる部分)を除いたツールパスの工具中心点から構成している。その表面点群の点数は 6905 点となる。ツールパスおよび表面点群から作成した自己干渉検出用ファイルの点数は 1950 点、機械一周辺機器間の干渉の検出用ファイルの点数は 440 点、第 1 種、第 2 種の機械—工作物間の干渉の検出用ファイルの点数は 0 点である。一方、工作物一周辺機器間の干渉検出は二つの 4 角形の交点を求める問題となる。

以上の干渉検出用ファイルの点数はツールパスの点数、表面点群の点数よりかなり少なくなった。

4.2 段取り位置と実験結果

工作物の段取り位置の計算過程を図 7 に示す。図中、○は工作物底面中心点を該当位置に段取りすると機械一周辺機器間の干渉、●は自己干渉をそれぞれ生じること、★は干渉を生じなく段取りできることを表す。図 7 からワークスペース内に周辺機器を設置したパラレルメカニズム形工作機械において、工作物の段取り位置に影響を与える主要因は機械一周辺機器間の干渉であることがわかる。工作物を★位置に段取りするときの概略図を図 8 に示す。図 8 から工作物底面の中心はテーブルの中心に対して(−41.08, −43.73)mm、テーブル上面から 100 mm だけ離れている。これは、機械と第 1 象限に設置しているマガジンとの干渉が存在して、その干渉を回避するためである。そこで、段取りするとき工作物の下に高さ 100 mm 以上の敷板を敷く必要がある。

Table 1 Calculation and experimental result of location

No.	Location			Collision?		Minimum clearance mm
	x mm	y mm	z mm	Calculation	Experiment	
1	−41.08	−43.73	100	○	○	6
2	−40	−40	100	○	○	5
3	−30	−30	100	×	○	4
4	−20	−20	110	○	○	8
5	0	0	110	○	○	8

○ : Collision free, × : Collision

図 8 に示した段取り位置の座標値、その座標値を整数に調整した座標値、該当座標値に段取りするとき干渉を生じるかどうかの解析結果、実機の実験結果、および実験を行う際に目視で観察された機械とマガジンとの最小のすきまをそれぞれ示す。ただし、○は干渉を生じないこと、×は干渉を生じることを表す。表 1 において 3 番目の段取り位置($x=-30$ mm, $y=-30$ mm, $z=100$ mm)以外の解析結果と実験結果とは一致している。3 番目の段取り位置のすきま 4 mm が本システムの安全余量 5 mm より小さいことから、その結果は妥当であり、本研究で開発した工作物の段取り位置算出システムは有効であると言える。

5. 結 言

本研究では豊田工機社製 HexaM をモデルとして、パラレルメカニズム形工作機械を用いて切削するとき生じる機械の自己干渉、機械—工作物間の干渉、機械一周辺機器間の干渉および工作物を段取りするとき生じる工作物一周辺機器間の干渉の検出方法、およびツールパスを修正せずに工作物の段取り位置を調整することによってこれらの干渉を回避する方法を検討し、工作物の段取り位置を算出するシステムを開発した。さらに、実験結果との比較を行い、その有効性を確認した。得られた主な結果は次のようになる。

- (1) 該当工作物が加工できるかどうかを自動で算出できた。
- (2) 干渉の検出方法および回避方法を提案した。
- (3) 開発したシステムにより求めた位置に工作物を段取りして切削するときすべての干渉は生じない。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 趙 暁明, 渋川哲郎, 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.
- 3) 鈴木 裕, 桑野義正, 後藤勝征, 竹内芳美, 佐藤 真: 5 軸加工用 CAM システムの開発, 精密工学会誌, **60**, 6(1994) 832.
- 4) 趙 暁明, 葛 東方, 堤 正臣: 同時 5 軸制御マシニングセンタ用 CAM システムに関する研究, 精密工学会誌, **61**, 12(1995) 1745.
- 5) 小西和正, 福田好朗, 岩田一明: 5 軸制御加工における工具干渉検出と回避法に関する研究, 精密工学会誌, **63**, 9(1997) 1258.
- 6) SDRC 社: CAMAND MULTI AXIS, Version 12.0.