

# 基于钣金件层次包围盒的折弯碰撞检测方法

王栋,游有鹏,何健,韩朝

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对机器人钣金折弯过程中可能发生的干涉、碰撞问题,就钣金折弯的碰撞进行检测研究。基于对钣金中性层的分析,计算各钣金基体间的相对位置关系,对各钣金基体创建紧密性较好的 OBB 包围盒;为减少碰撞检测次数,提出面向钣金件的层次包围盒树状结构,通过与机器人操作末端抓手连接的钣金件抓取基体底面,创建钣金件 OBB 包围盒并做粗碰撞检测。当发生干涉情况,则将各基体分割成更小的 OBB 包围盒以有效减少计算次数。仿真试验表明:该检验方案的效率较高。

**关键词:**机器人;钣金折弯;碰撞检测;钣金中性层;层次包围盒

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0185-04

## Collision Detection Method Based on Hierarchical Bounding Box of Sheet Metal Bending

WANG Li, YOU Youpeng, HE Jian, HAN Chao

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the possible occurrences of interference and collision in the process of robot sheet metal bending, the research on the collision detection of sheet metal bending is carried out. Based on the analysis of the sheet metal neutral layer, the relative positional relationship between the sheet metal substrates is calculated and a tight OBB bounding box is created for each sheet metal substrate. In order to reduce the number of collision detections, a hierarchical bounding box tree structure for sheet metal parts is proposed. The sheet metal part connected with the robot operating end gripper is used to grab the bottom surface of the substrate to create the sheet metal part OBB bounding box and perform coarse collision detection. When interference occurs, each matrix is divided into smaller OBB bounding boxes to effectively reduce the number of calculations. The simulation test shows, the detection scheme has high efficiency.

**Keywords:** robot; sheet metal bending; collision detection; sheet metal neutral layer; hierarchical bounding box

## 0 引言

机器人钣金折弯作为一种先进的自动加工技术,可以有效保障生产的效率,对多道弯工件可以保障加工稳定性和准确率<sup>[1-2]</sup>。

随着计算机虚拟仿真技术的发展,离线编程代替人工示教逐渐成为主流<sup>[3-4]</sup>。在机器人钣金折弯离线编程仿真过程中,需要及时检测并判断钣金件在随机器人抓手移动过程中可能发生的干涉、碰撞情况。然而,钣金件在折弯仿真过程中会产生基体的旋转弯折<sup>[5]</sup>,并没有合适的现成碰撞检测模型。

目前,仿真系统碰撞检测模型,包括基于八叉树结构的层级三角面片检测模型<sup>[6]</sup>、基于 AABB 和 OBB 的优化融合包围盒模型<sup>[7]</sup>、基于包围盒紧密率和多层建模结构的混合碰撞模型<sup>[8]</sup>以及基于 B+树结构进行存储的 AABB 包围盒模型<sup>[9]</sup>。

本文以机器人钣金折弯离线编程仿真为背景,针对钣金件在仿真折弯过程中不断改变的几何形状,提出一

种钣金件的层次包围树状结构方案:基于钣金件的中性层概念建立树状结构中叶子结点基体三维结构,并且伴随着一道道折弯过程,构建不同的层次包围盒结构,与机器人钣金折弯环境中各单元进行碰撞检测,及时预测干涉信息,为后续钣金折弯机器人路径规划与仿真研究提供参考。

## 1 构建钣金基体包围盒

### 1.1 钣金件折弯分析

钣金折弯属于冷变形加工,遵循体积不变原则,然而钣金的内外侧分别受压力和拉力的不同,钣金的内侧受挤压压缩,钣金的外侧受拉伸长,内、外侧中间必存在某一位置,既不受拉力也不受压力,即该层在长度方向上并不会发生变化,该位置就被称作金属板材的中性层<sup>[10]</sup>。在确定折弯位置后,可根据折弯角度  $\alpha$ 、折弯半径  $r$ 、中性层系数  $K$  以及板厚  $\delta$  确定折弯长度  $l_3$ ,如式(1)所示,钣金折弯面中性层分析如图 1 所示。

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2018YFB1309203)

**第一作者简介:**王栋(1997—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为机器人折弯离线编程仿真,wangli779@163.com。

$$l_3 = l_{\text{弧}} = \frac{\pi(r+K \times \delta)(180-a)}{180} \quad (1)$$

式中中性层系数  $K$  表示钣金的中性层位置厚度与整体厚度的比值,与钣金件的材料厚度以及折弯半径有关,如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

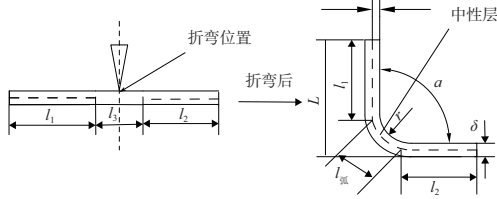


图 1 钣金折弯面中性层分析

表 1 钣金件中性层系数

$r/\delta$	0.5	0.6	0.7	1.0	1.1	1.2	1.5	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	$\geq 8.0$
$K$	0.24	0.25	0.26	0.30	0.32	0.33	0.36	0.39	0.40	0.43	0.46	0.48	0.50

将图 1 所示中性层分析转到三维空间内,如图 2 所示。其中,  $M_i$  表示旋转基体中性层中心姿态坐标系;  $M_{il}$  表示旋转基体中性层与折弯体相交的中心姿态坐标系;  $M_b$  表示抓取基体中性层姿态坐标系;  $M_{bl}$  表示抓取基体中性层与折弯体上表面相交的中心姿态坐标系;  $l_b$  表示由中性层  $K \times \delta$ 、圆角  $r$  和折弯角度  $a$  计算得到的折弯线,其位于抓取基体中性层与折弯体相交线的正上方  $\frac{\pi(r+K \times \delta)(180-a)}{180}$  处。折弯过程中,旋转基体相对于世界的位姿  $O_i$  可通过抓取基体相对于世界的位姿  $O_b$  和折弯线  $l_b$  进行旋转变换计算。

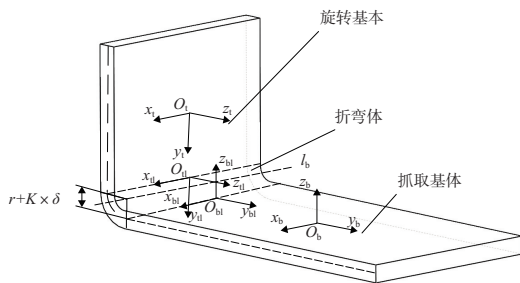


图 2 三维平面内钣金折弯分析

## 1.2 钣金基体包围盒设计

基于上述以中性层为基础的钣金件各基体的折弯旋转变换模型,为开展碰撞检测,需进一步选择合适的包围模型对钣金件进行包围并自适应求取折弯后钣金件的模型尺寸。

用于碰撞检测最常见的包围盒包括有球形包围盒(Sphere)、轴对齐包围盒(AABB)、有向包围盒(OBB)、离散有向多面体包围盒(K-DOP)。

钣金件可根据工艺拆分成多个折弯体和基体,其中折弯体为受压变形的弯曲板块,而基体为随折弯在空间发生旋转的平面板块。钣金件在折弯过程中,折弯体发生形

变,钣金整体三维构型也将随之变化,如若使用单一 AABB 包围盒或者 OBB 包围盒,如图 3 所示,紧密拟合性较差,难以对实际仿真过程中复杂碰撞情况进行有效检测。

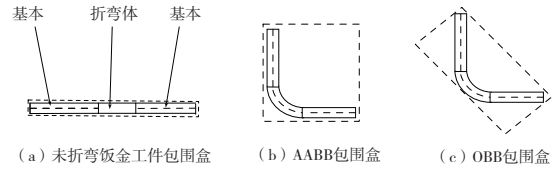
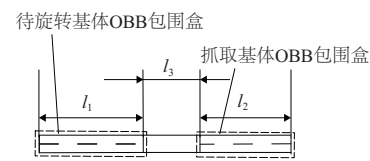
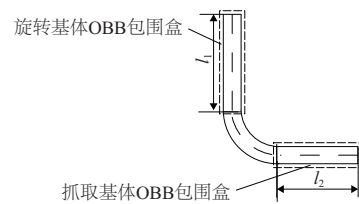


图 3 单一包围盒

为此,本文对每个基体单独建立包围盒:首先对抓取基体建立 OBB 包围盒,并对相邻的旋转基体依据上述中性层分析,构建旋转基体的 OBB 包围盒,如图 4 所示。



(a) 未折弯基体 OBB 包围盒



(b) 折弯基体 OBB 包围盒

图 4 针对钣金件的基体包围盒设计

考虑到折弯旋转体 OBB 包围盒的计算往往较复杂,且干涉碰撞多发生在旋转体拉伸面,本文采取延长基体在折弯基体方向的长度  $l_c$  来简化处理,如图 5 所示。

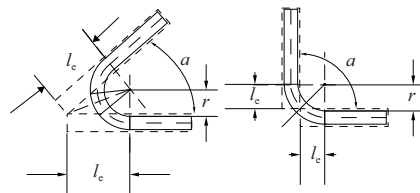


图 5 针对钣金件的折弯体包围盒设计

通过延长折弯基体找到折弯内侧表面的交点,对折弯处包围盒进行简化设计,长度  $l_c$  可由折弯角度  $a$ 、折弯半径  $r$  计算得到,如式(2)所示。

$$l_c = r \times \cot \frac{(180-a)}{2} \quad (2)$$

在构建基体包围盒的过程中,由 1.1 节分析以中性层中心点作为基体包围盒的中心姿态  $O_i$ ,用  $d_x^i, d_x^j, d_y^i, d_y^j, d_z^i, d_z^j$  表示该钣金基体在  $O_i$  在 3 个方向上的偏移值,该数据结构包含有 18 个浮点数。

最终构建出的三维钣金包围盒如图 6 所示。

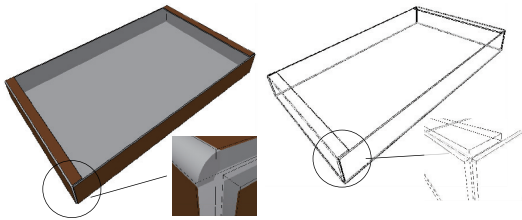


图6 三维 OBB 包围盒实现

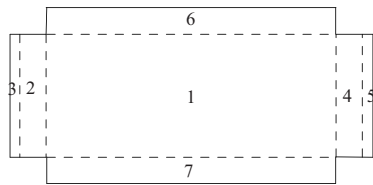
## 2 钣金件层次包围盒结构树检测方案

根据上文,一个包含有多道折弯的钣金件进行碰撞检测时需建立多个基体的 OBB 包围盒,每次检测若按序对各基体包围盒进行碰撞检测,其时间复杂度为  $O(n)$ ,耗时且实时性效果较差。因此需对钣金件整体进行层次设计,以减少计算次数,降低仿真流程检测时间。

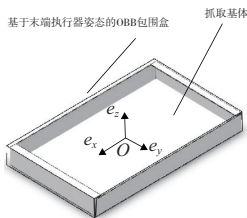
### 2.1 钣金件层次包围盒树状结构设计

钣金件的碰撞判断基于钣金件各基体,各基体依据 1.2 节进行包围盒建模,因此该层次包围树的叶子节点为每个基体已建模完成的 OBB 包围盒。

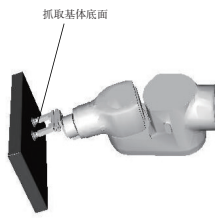
某包含 6 道折弯的钣金件如图 7 所示,图 7(a) 为二维展开图,虚线为折弯线,可形成 7 个基体面;图 7(b) 为三维立体图;图 7(c) 为钣金件在仿真场景下的抓取姿态。



(a) 钣金件二维展开图



(b) 钣金件三维立体图



(c) 钣金件抓取位姿

图7 某6道折弯的钣金件

现以该钣金件为例,构建出如图 8 所示的层次包围树,其构建步骤如下。

1) 对所有基体进行组合,计算出当前折弯工序下钣金件的整体 OBB 包围盒。该整体 OBB 包围盒中心姿态相对于抓手姿态进行建立,并以该 OBB 包围盒作为根节点,如图 8 第一层所示。

2) 确定参考基体作为分割依据,若上一层是根节点,则抓取基体为参考基体,否则以分割后最靠近参考基体的某基体作为参考面;进行分割的过程中,该层子节点包括参考基体的包围盒和与该参考基体某侧相连的部分基体

组合后的包围盒。如图 8 所示,第二层的分割依据为抓取基体 1,其四侧都需单独分割,其分割结果为 2-3、6、7、4-5;而 2-3、4-5 为基体组合,需要进一步分解。以 2-3 组合包围盒为例,当前作为分割依据的参考基体为与第一层分割依据的基体 1 相连的基体 2;同理 4-5 组合包围盒的参考基体为基体 4。

3) 若当前节点包括多个基体,需要进一步分解,重复步骤 2);若当前节点仅包括一个基体,则该分支为叶节点,不再进行分解。

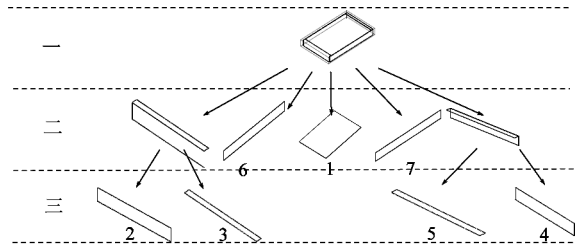


图8 某6道折弯钣金件层次包围树

根据上述方法构造的自顶而下的钣金件层次包围树,仅需要在每次进行钣金件弯折工序时进行更新;而分层结构中每个节点所表示的包围盒,其姿态都相对于图 7(c) 所示的抓取点姿态。在 OBB 包围盒数据更新的过程中,仅在当前节点存在干涉需要计算时对包围盒几何特征进行计算,避免对每个基体进行包围盒几何特征计算的过程。

### 2.2 碰撞检测流程

在钣金件移动过程中,首先对根节点的整体包围盒进行特征计算并作粗碰撞检测;当发生碰撞时,基于深度优先搜索(DFS)进行层次树的遍历,如图 9 所示,对当前遍历到的节点进行包围盒的特征计算,并进行碰撞计算。

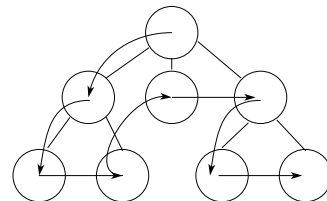


图9 深度优先搜索

如图 8 所示,当碰撞点发生在基体 6 上时,需要进行 3 次 OBB 包围盒特征计算和碰撞检测,避免了对 6 个基体循环检测的情况发生。同时大部分情况下仅需要根据检测区域对第一层的钣金件整体 OBB 包围盒即可判断是否出现干涉情况。

## 3 仿真应用分析

### 3.1 碰撞检测可行性分析

为验证本文钣金件碰撞检测方案有效性,选取机器人夹持钣金件在完成折弯后从折弯机前方至码垛台移动的过程进行仿真测试,其中可能会与场景中其他设备模型发

生干涉碰撞。现对该场景进行搭建并进行碰撞测试,其仿真流程如图 10 所示。

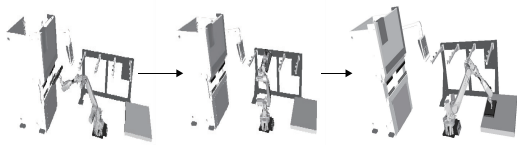


图 10 成型钣金码垛流程

首先对翻面架建立简易包围盒,在机器人仿真轨迹流程下,计算得碰撞干涉情况如图 11 所示,其碰撞点发生于翻面架前侧吸盘的包围盒。

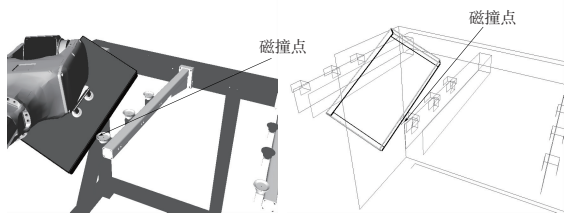


图 11 干涉碰撞点

### 3.2 层次包围盒效率分析

基于图 10 所示成型钣金码垛流程,从开始移动到发生碰撞过程中一共产生 22 帧机器人的姿态计算和碰撞检测。图 12 为本文的层次包围盒检测方案与传统对各基体建立 OBB 包围盒循环判断方法在同时序下的检测时间对比,该检测时间包括机器人的姿态变换与机器人模型更新。

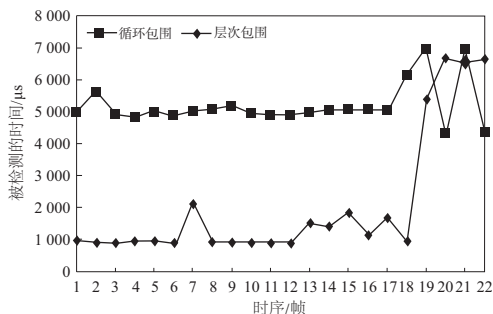


图 12 同时序下检测时间比较

从图 12 可以看出本文的检测方案在少干涉区域检测效率远高于传统方案;在发生碰撞干涉时,检测效率有明显下降,相比于传统方案耗时差距不大,全流程总体检测时间得到明显优化。

## 4 结语

针对钣金机器人离线编程过程中存在的钣金件与场景设备干涉的问题,提出基于钣金件的层次包围盒方法。详细介绍了折弯钣金件各基体的 OBB 包围盒构建,通过对基体的长度扩展,避免了对折弯体的包围盒建立。同时,采用层次包围盒方案,根据粗碰撞结果对可能发生碰撞的钣金基面进行预计算,再细化到具体钣金基面进行二次判断,进一步减少整体碰撞检测次数。仿真实验表明,本文碰撞检测方案在保证碰撞检测精确性的前提下提高整体的检测效率,可为后续钣金折弯机器人路径规划与仿真研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 孙立宁,许辉,王振华,等. 工业机器人智能化应用关键共性技术综述[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(2): 211-219, 406.
- [2] 杨晟. 金属钣金机器人自动化折弯技术的研究[J]. 金属加工(热加工), 2018(1): 16-18.
- [3] 刘欢庆,苏宇锋,高建设,等. 基于 SolidWorks 的涂胶机器人离线编程系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(8): 88-91.
- [4] HOLUBEK R, DELGADO SOBRINO D R, KOŠTÁL P, et al. Offline programming of an ABB robot using imported CAD models in the RobotStudio software environment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 693: 62-67.
- [5] 易晗. 基于图和规则的钣金件特征识别方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [6] 廖伟东,李俊渊,黄昕. 机器人仿真系统碰撞检测技术研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(9): 67-70.
- [7] 惠学武,孟祥宇. 融合包围盒智能算法的虚拟场景碰撞检测研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 209-213.
- [8] 胡春安,谢伟超,王振东. 依赖包围盒紧密率及多层建模结构的混合碰撞检测算法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 74-80.
- [9] 杨帆. 基于 B+树存储的 AABB 包围盒碰撞检测算法[J]. 计算机科学, 2021, 48(增刊 1): 331-333, 348.
- [10] 许路佳,范立成,张凤明. 一种钣金折弯过程抓取点轨迹计算方法的研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 99-100, 117.
- [11] 柯旭贵,张荣清. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.

收稿日期: 2021-12-14