

改进的工业 CT 图像与 CAD 模型的比对检测*

张志波¹, 曾理^{1,2}, 何洪举¹

(1. 重庆大学数学与统计学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044)

摘要: 改进了一种基于工业计算机断层成像(industrial computed tomography, ICT)图像与计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型的比对检测算法, 分析工件制造误差。首先对工业 CT 图像用三维 Otsu 法进行阈值分割, 并分别提取边缘面与角点特征; 然后对工业 CT 图像角点特征与工件的 CAD 模型用文中研究的旋转投影法求取方向包围盒, 进而实现粗配准; 再结合角点特征点集和奇异值分解—迭代最近点算法进行精配准, 最近点对的求取用 k-d 树进行加速; 最后在边缘面上显示误差。实验结果表明, 该方法在工件比对检测过程中, 粗配准精度更高, 适应性更好。整个比对检测过程更加高效, 速度上有了较大的提高。

关键词: 计算机断层成像; 计算机辅助设计; 三维 Otsu 法; 方向包围盒; 角点; 迭代最近点

中图分类号: TP391; TP206

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)06-2342-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.091

Improved comparison inspection algorithm between ICT images & CAD model

ZHANG Zhi-bo¹, ZENG Li^{1,2}, HE Hong-ju¹

(1. College of Mathematics & Statistics, Chongqing University, Chongqing 401331, China; 2. ICT Research Center, Ministry of Education Key Lab of Optoelectronic Technology & System, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper improved an algorithm of analyzing the manufacture error based on comparison inspection between ICT images and the CAD model. Firstly, it segmented the ICT images by 3D Otsu threshold method, and then obtained the edge surface and corner features. Secondly, it calculated the oriented bounding boxes (OBB) of the ICT images' corner features and the work-piece's CAD model using the presented rotating projection method presented, then realized the rough registration by the two OBBs. Then the singular value decomposition and iterative closest point (SVD-ICP) algorithm were used to complete the precise registration between the CAD model and corner features of ICT images. The k-d tree was used to improve the calculation speed of searching for the closest point. Finally, it displayed the error using edge surface. The experimental results indicate that the result of rough registration in this paper is more accurate and applicable. The whole algorithm is more rapid and efficient.

Key words: industrial computed tomography; computer aided design; 3D Otsu method; oriented bounding box; corner; iterative closest point;

0 引言

随着人们对产品性能、外观等要求的不断提高, 产品的设计越来越复杂, 产品的制造难度也越来越大。如何评价产品的制造质量就变得很重要。各种数字化测量设备为产品的误差分析提供了条件, 并成为制造精度评价的主要手段。工业计算机断层成像(CT)技术通过射线束穿透被测物体进行扫描得到断层投影数据, 再重建工件的内部三维图像^[1], 能非接触、不破坏地实现对物体内部结构与形状的测量, 且检测速度快、分辨率高, 因此工业 CT 技术已经越来越多地应用于无损检测、逆向工程^[2]等领域中。

数字化比对检测过程的主要步骤为: a) 获取待测工件的测量点云数据; b) 将该点云数据与计算机辅助设计(CAD)模

型进行配准; c) 误差分析与显示。

模型的配准过程是自动比对检测过程的关键和核心。目前常用的配准方法如 Besl 等人^[3]提出的基于优化理论的迭代最近点(ICP)算法, 该算法使用的前提是需要有一个比较好的初始位置和姿态估计, 另外当点云数据比较大时, 其计算效率不高。Shammaa 等人^[4]通过对 CT 切片提取边缘后与离散的部分 CAD 模型用 ICP 算法进行配准, 其方法对两者的初始位姿要求较高。刘晶等人^[5-7]研究了工业 CT 切片重构模型与 CAD 模型基于复形法、遗传算法、ICP 算法等的配准方法, 以解决工业 CT 用于无损检测时的定位偏差问题。

文献[8]在 CT 与 CAD 模型的比对过程中, 首先用模板自适应细胞神经网络提取出工业 CT 图像的三维边缘面, 然后利用主成分分析进行粗配准, 再用奇异值分解—迭代最近点算法进行精配准, 并使用了 k-d 树等进行了加速, 但由于其匹配过

收稿日期: 2011-09-20; **修回日期:** 2011-11-02 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972104); 重庆市教委科研资助项目(KJ111502); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2010BB4222)

作者简介: 张志波(1986-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理; 曾理(1959-), 男, 四川郫县人, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、工业 CT 重建、高性能计算等(drlizeng@hotmail.com); 何洪举(1985-), 男, 重庆黔江人, 硕士, 主要研究方向为图像处理。

程中使用的边缘面数据量巨大,比对速度较慢。在数据点分布不均匀的情况下,结合最小包围盒的思想修正了粗配准结果,但其鲁棒性依然不能达到满意效果。

本文研究了一种利用旋转投影来构造方向包围盒的方法,并用构造出的方向包围盒进行粗配准,使配准更加精确,适应性更好。另外,针对数据量太大导致配准速度缓慢的问题,结合三维角点特征点集和SVD-ICP算法进行精确配准,在很大程度上提高了配准速度。

1 特征点集提取

1.1 CAD模型特征点集提取

首先将CAD模型转换成STL格式,然后将其进行网格细分后,取三角网格的顶点作为待配准点集。

1.2 ICT模型特征点集提取

大多数工业CT图像的边缘比较清晰,灰度值变化较为明显。因此在提取边缘时使用简单快速的阈值分割算法。

1.2.1 最大类间方差法分割图像

最大类间方差法^[9]是Otsu提出的一种基于一维灰度直方图的阈值分割算法。该方法是在判决分析的基础上推导出来的,是一种自动的无参数、无监督的阈值分割方法。该方法因为计算简单、速度快而得到广泛应用。其基本原理如下:

设数字图像的灰度级($G=1,2,\dots,L$),将图像中的像素按灰度级用阈值 T 划分为两类 C_0 和 C_1 , C_0 、 C_1 分别包含灰度等级在 $\{1,2,\dots,T\}$ 和 $\{T+1,T+2,\dots,L\}$ 内的像素。然后计算出 C_0 和 C_1 的类间方差 $\sigma_B^2(T)$,则最佳阈值 T^* 满足

$$\sigma_B^2(T^*) = \max_{1 \leq T \leq L} \{\sigma_B^2(T)\}$$

然后对于工业CT图像体数据 $f(x,y,z)$ 进行阈值分割,分割后的图像可定义为 $g(x,y,z)$:

$$g(x,y,z) = \begin{cases} 1 & f(x,y,z) > T^* \\ 0 & f(x,y,z) \leq T^* \end{cases}$$

1.2.2 三维CT图像体数据边缘提取

传统的工业CT图像序列边缘提取方法是沿某一方向提取每一个切片图像的边缘线,然后组成边缘面。但当工件的某些边缘面与切片方向重合时,就不能从切片序列中提取出来。考虑到工业CT体数据层间的固有关系,首先将阈值分割后的体数据 $g(x,y,z)$ 沿三个互相垂直的方向划分切片序列^[10],每个切片序列就是一幅二值图像,因此对每个方向切片序列的切片逐个使用Canny算子^[11]即可得到边缘,重组即可得到对应方向的边缘体数据。最后将三个方向的边缘体数据按位或运算融合得到完整的工件边缘面体数据。

1.2.3 三维CT图像体数据角点特征提取

角点能保留图像图形的重要特征,减少数据的信息冗余度,从而有效地提高计算速度,有利于对图像快速匹配。角点没有明确的数学定义,人们普遍认为角点是图像边缘曲线上的曲率极大值点。

Harris等人^[12]提出的检测方法是用一个高斯窗或矩形窗在图像上移动,计算模板窗口衍生出的 2×2 的局部结构矩阵:

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$$

其中: $w(x,y)$ 为窗口函数。求出矩阵 M 的特征值 λ_1 和 λ_2 ,建

立度量函数:

$$R = \text{def}M - k(\text{track}M)^2$$

其中: $\text{def}M = \lambda_1 \lambda_2$; $\text{track}M = \lambda_1 + \lambda_2$ 。若 $R > 0$,则认为该点是角点。此方法具有旋转不变性,但结果有较大的冗余,需要根据实际经验设置 R 的阈值,以去除冗余。

Shi等人^[13]提出的算法也是基于局部结构矩阵 M :计算 M 的特征值 λ_1 和 λ_2 ,给定阈值 T ,若 $\min(\lambda_1, \lambda_2) > T$,则该点为强角点。Shi等人的方法在很多情况下可以得到比Harris方法更好的结果。

Harris和Shi等人提取出的角点检测方法使用起来都很方便,但是精度不能达到亚像素级。

Chen等人^[14]在Harris和Shi等人的基础上提出了一种简单的亚像素级角点检测方法,将角点定位到了亚像素级。

本文提取角点时,仍然将体数据 $g(x,y,z)$ 沿三个相互垂直的方向划分切片序列^[10],对每个方向切片序列的切片。首先,使用Shi提出的方法找到图像中的像素级角点位置;然后,使用Chen提出的方法找到这些角点的亚像素级位置所在,重组即可得到对应方向的角点特征体数据;最后,将三个方向的角点体数据融合^[10],即可得到完整的工件三维角点特征点集。

2 模型配准过程

测量数据点集与CAD模型点集的配准过程一般分为两个阶段:第一个阶段为初始配准,能够使测量数据模型与CAD模型之间的方位偏差较小;第二个阶段为精确配准,使测量数据模型与CAD模型之间处于最佳拟合状态。

2.1 方向包围盒粗配准

测量数据模型与CAD模型之间具有较大的方位偏差,直接进行精确配准,收敛速度会比较慢,也常会陷入局部收敛,而导致错误的匹配结果。为了提高精确配准的速度和精度,本研究用旋转投影法来构造两个模型的方向包围盒,通过两个模型的包围盒来确定初始配准的旋转矩阵 R 和平移矢量 t 。

2.1.1 包围盒

目前包围盒技术已广泛应用于碰撞检测中,它的基本思想是通过建立对象的包围盒来逼近对象的几何模型,从而用体积略大的形状简单的包围盒代替复杂的几何对象。

包围盒有以下两个方面的约束:a)简单性,包围盒应该是简单的几何体;b)紧密性,包围盒应该尽可能地贴近被包围的几何对象。

应用比较多的包围盒有轴向包围盒AABB(axis-aligned bounding box)^[15]和方向包围盒OBB^[16]。

AABB:沿坐标轴的包围盒称为轴向包围盒,对象的AABB被定义为包含该对象且各边平行于坐标轴的最小长方体。

OBB:它是一个比较著名的包围盒类型,对象的OBB被定义为包含该对象并且方向任意的最小的长方体,其最大的特点是方向的任意性,这使得它可以根据被包围对象的形状特点尽可能紧密地包围对象。

方向包围盒的构造方法近年来也有较多的研究。陈华^[17]使用了一种遍历的方式求取方向包围盒,方法简单实用,但是速度较慢。张开兴等人^[18]利用扫描数据生成三角网格模型,应用单纯形优化算法生成三维模型的方向包围盒。刘健等人^[19]采用主元分析方法降维求取方向包围盒。陈柏松等人^[20]提出了基于非线性主成分分析的方向包围盒构造方法。

后面三种包围盒构造方法时间复杂度都较低,但是对于点集分布不均匀的情况得到的包围盒不够精确。

2.1.2 旋转投影法求方向包围盒

本文研究了一种新的方向包围盒构造方法。为了构造方向包围盒,首先定义半轴向包围盒。

半轴向包围盒是为了确定 OBB 而定义的一种包围盒类型。指定一个方向作为物体包围盒的一个主方向,然后求取在该主方向固定的情况下的物体最小包围盒,称这个最小包围盒为半轴向包围盒。

求半轴向包围盒的具体步骤如下:

a) 指定矢量 n 作为主方向,将数据点集 P 投影到过 O 点、以 n 为法向量的平面上,得到平面点集 P_1 。平面点集 P_1 的最小包围矩形为 $Rect$ 。

b) 将数据点集 P 投影到矢量 n 上,得到点集 P_2 ,求出点集 P_2 中距离最远两点的距离 L 及两点相应的位置。

c) 由 a) 中求得的最小包围矩形 $Rect$ 和 b) 中求得的最远距离 L ,即可得到以 n 为指定主方向的半轴向包围盒。

如图 1 所示,深灰色区域表示物体 P ,包围住物体 P 的浅灰色包围盒正是以 n_α 为指定主方向的半轴向包围盒 B_α 。

旋转投影法求方向包围盒的具体步骤如下:

a) 以任意方向 n 为初始方向(不妨设为 X 轴方向,则 $n = (1, 0, 0)$),绕与 n 垂直的任意方向(不妨设为 Z 轴)旋转 α ($0 < \alpha < \pi$) 角度得到矢量 $n_\alpha = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0)$,以 n_α 作为半轴向包围盒的指定主方向,求得该方向下的半轴向包围盒 B_α 及其体积 V_α 。求出体积最小的半轴向包围盒 B_{α^*} ,即 α^* 满足 $V_{\alpha^*} = \min_{0 < \alpha < \pi} \{V_\alpha\}$ 。如图 2 中所示,深灰色区域表示物体 P ,包围住物体 P 的浅灰色包围盒就是 B_{α^*} 。

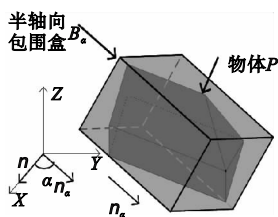


图1 物体 P 及其半轴向包围盒 B_α

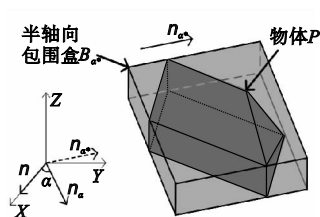


图2 物体 P 及其半轴向包围盒 B_{α^*}

b) 当 $\alpha = \alpha^*$ 时, V_α 取得最小值,此时矢量 n_{α^*} 与方向包围盒 OBB 的一个主方向垂直,因此在与矢量 n_{α^*} 垂直的平面上搜索该主方向及方向包围盒。

易得矢量 m ,使得 $m \perp n_{\alpha^*}$ (不妨设 $m = (-\sin \alpha^*, \cos \alpha^*, 0)$),以矢量 m 为初始方向绕 n_{α^*} 旋转 β ($0 < \beta < \pi$) 得到 m_β ,以 m_β 作为半轴向包围盒的一个主方向,求出该方向下的半轴向包围盒 B_β^* 及体积 V_β^* ,求出最佳角度 β^* ,满足 $V_{\beta^*} = \min_{0 \leq \beta < \pi} \{V_\beta^*\}$ 。此时的包围盒 B_{β^*} 即为方向包围盒。如图 3 所示,深灰色区域表示物体 P ,包围住物体 P 的粗线框即为物体 P 的方向包围盒 OBB。

在待配准模型对称性特别高的情况下(如本文的轮毂实验数据),OBB 包围盒不唯一,此时配准容易出现错误。将数据点集 P 投影到过 O 点、以 m_{β^*} 为法向量的平面上,对该数据模型在该平面上投影点集使用力矩主轴法^[21]求得两个主方向 a 、 b 。以 m_{β^*} 、 a 和 b 作为 OBB 的三个主方向重新构造包围盒。

2.1.3 方向包围盒初始配准

a) 利用旋转投影法分别求出 CAD 模型点集与 CT 图像三

维角点特征点集的 OBB,记录下 OBB 的尺寸和中心,以及对应的三个主方向。

b) 根据两个模型的 OBB 中心位置,得到初始配准的平移矢量 t 。根据 OBB 长、宽、高的大小关系,确定两个模型三个主方向的对应关系,进而得到初始配准的旋转矩阵 R 。

2.2 结合角点特征的 SVD-ICP 精配准

经过方向包围盒的初始配准,两个模型的相对位置和姿态已经比较接近,然后进一步进行精确配准。ICP 算法^[3]是三维数据精确配准方法中最具代表性的一种方法。其主要步骤包括:

- 通过最近邻准则建立两个点集间的一一对应;
- 通过单位四元数法估计对应点集的变换参数;
- 利用上一步得到的参数对待配准点集进行变换;
- 当不满足迭代终止条件时,重复前面三步。

SVD-ICP 算法^[7,22]就是将奇异值分解和迭代最近点算法相结合,即在估计对应点集的变换参数时采用奇异值分解的方法。本文采用 SVD-ICP 算法来实现三维角点特征点集与 CAD 模型的精配准。

ICP 和 SVD-ICP 算法都比较耗时,由于 k-d 树^[23]结构具有快速查找邻近的特点,本文采用该结构来加速每一步迭代过程中对最近邻点的搜索。k-d 树的实质是一种二叉树,对于一个 k 维的欧式空间,被一个正交于任意一个 k 维坐标轴的超平面 ($k-1$ 维)递归分割为两个子空间,直到每个子空间所包含的数据个数不超过给定的值为止,且每个子空间中至少包含一个数据。k-d 树结构查找最近点时间复杂度为 $O(N \log N)$,比传统的遍历算法时间复杂度 $O(N^2)$ 要小得多。

3 实验及结果

以下实验均在 CPU 为 Intel Pentium E5800 @ 3.20 GHz、内存为 DDR3 1333 MHz (2 GB) 的 Windows 7 系统上用 Microsoft Visual Studio 2008 进行编程实现。

3.1 三维 CT 图像的边缘面提取实验

使用 1.2.1 和 1.2.2 节的方法,在三维阈值分割基础上,使用 Canny 算子^[11]提取三个垂直方向切片序列的边缘并融合的方法,提取一个车轮轮毂 CT 数据 ($452 \times 452 \times 75$) 的边缘面。图 4 是轮毂 CT 数据使用三维显示软件 3DMed^[24]得到的三维显示图,图 5(a)是本文方法提取的边缘图的三维显示,边缘面的提取总时间为 10 s。得到边缘特征点的数量为 430 504 个。图 5(b)是文献[8]中将工业 CT 体数据沿三个互相垂直的方向划分切片,并逐切片采用模板自适应 CNN 提取边缘得到的边缘面的三维显示,边缘面提取的总时间为 91 s,得到边缘特征点集的数量为 464 636 个。从实验结果可以看出两种方法都能较准确地提取出 CT 数据的边缘面,但本文中的方法更为高效、快速。

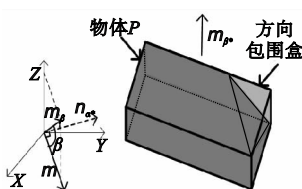


图3 方向包围盒示意



图4 轮毂三维显示

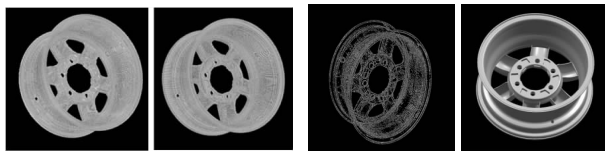
3.2 三维 CT 图像的角点提取实验

使用 1.2.3 节中三维 CT 图像的角点提取方法提取轮毂 CT

数据($452 \times 452 \times 75$)的三维角点特征点集。图6为三维角点特征集显示图,角点特征集提取时间为18 s。得到的角点特征点数量为79 341个。对比图5和6可知,角点特征集已经能够体现出轮毂的轮廓特征,而角点特征点集的数据量仅为边缘特征点集的1/5左右,在很大程度上降低了CT数据集的冗余度。

3.3 三维CT图像与CAD模型的比对检测实验

为了验证本文方法的有效性,将图6所示的车轮轮毂的三维角点特征点集与通过逆向工程^[25]获得的车轮轮毂CAD模型(图7)进行比对实验,并与文献[8]中的方法进行比较。为了直观地显示配准误差,配准后在误差为0处灰度取为128,误差最大值处灰度取为255,误差为其他值时在128与255之间进行插值,从而得到一个误差灰度显示图。



(a)本文方法边缘面 (b)文献[8]方法的边缘面
图5 轮毂边缘面提取结果三维显示
图6 本文方法提取角点特征集显示

经过本文方法对两个模型进行粗配准的误差显示如图8(a),精确配准结果的误差显示如图8(b),粗配准的平均误差为2.107 mm,最大误差为10.098 mm;精确配准后的平均误差为1.921 mm,最大误差为9.012 mm。整个配准过程用时479 s。

按文献[8]方法对轮毂的工业CT图像边缘数据与CAD模型进行配准。粗配准结果误差显示如图9(a),精确配准后误差显示如图9(b)。图中亮度越大的点误差越大,粗配准的平均误差为2.976 mm,最大误差为12.835 mm;精确配准后平均误差为1.898 mm,最大误差为8.364 mm。整个过程用时4 762 s。



(a)粗配准结果 (b)精配准结果 (a)粗配准结果 (b)精配准结果
图8 本文中算法的配准结果 图9 文献[8]中算法的配准结果

精确配准后的误差主要直观地反映制造工件与CAD模型不一致误差,也包含少量CT重建图像误差、边缘面定位误差、配准误差等。通过两种配准算法的对比看到,本文配准算法的粗配准结果更为精确,最终结果的精度比文献[8]中算法精度稍低,但是总配准时间缩短为原来的1/10左右。因此本文算法更为高效、实用。

4 结束语

本文在文献[8]的基础上,研究了一种新的方向包围盒获取方法,并针对文献[8]中运行速度比较慢的问题,结合三维角点特征点集和SVD-ICP算法进行精确配准。最后,以轮毂模型为例验证本文算法。实验结果表明,文中的算法粗配准结果更为精确。最终结果的精度与文献[8]中结果精度差不多,但速度上有了较大的提高。因此,本文算法更加高效和实用。

致谢 重庆大学ICT研究中心吴志芳为本文提供了实验中轮毂的CAD数据,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 邹晓兵,曾理. 锥束螺旋CT半覆盖扫描重建[J]. 光学精密工

程,2010,18(2): 434-442.

- [2] 曾理,何洪举,刘长江. 基于神经网络边缘提取的工业断层成像图像拟合[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1): 24-29.
- [3] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(2): 239-256.
- [4] SHAMMAA M H, SUZUKI H, MICHIKAWA T. Registration of CAD mesh models with CT volumetric model of assembly of machine parts[J]. Visual Compute,2007(23): 965-974.
- [5] 刘晶,张定华,毛海鹏. 基于复形法配准工业产品CT切片模型和CAD模型[J]. 计算机应用研究,2004,21(7): 248-252.
- [6] 胡栋材,赵歆波,张定华,等. 自适应遗传算法配准三维数字样品模型及其CAD模型[J]. CT理论与应用研究,2008,17(2): 8-14.
- [7] 刘晶,张定华,毛海鹏,等. 基于SVD-ICP算法配准CT切片重构模型与CAD模型[J]. 计算机工程与应用,2004,40(24): 195-196,204.
- [8] 何洪举. 基于边缘提取的工业CT图像与CAD模型的比对算法研究[D]. 重庆: 重庆大学,2011.
- [9] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics, 1979,9(1): 62-66.
- [10] 刘长江,曾理. 工业CT三维体数据边缘面提取[J]. 计算机工程与应用,2009,45(18): 219-221.
- [11] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6): 679-698.
- [12] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proc of the 4th Alvey Vision Conference. 1988:147-151.
- [13] SHI Jian-bo, TOMASI C. Good features to track[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 1994: 5932-6001.
- [14] CHEN Da-zhi, ZHANG Guang-jun. A new sub-pixel detector for X-corners in camera calibration targets[C]//Proc of WSCG2005 Plzen-Bory. Czech Republic: UNION Agency-Science Press, 2005: 97-101.
- [15] GANOVELLI F, DINGLIANA J, O'SULLIVAN C. BucketTree: improving collision detection between deformable objects[C]//Proc of Spring Conference on Computer Graphics. 2000.
- [16] GOTTSCHALK S, LIN M, MANOCHA D. OBBTree: a hierarchical structure for rapid interference detection[C]//Proc of SIGGRAPH. 1996:171-180.
- [17] 陈华. 确定任意形状物体最小包围盒的一种方法[J]. 工程图学报,2010,31(2): 49-53.
- [18] 张开兴,张树生,白晓亮. 基于最小包围盒的三维模型的配准技术[J]. 机床与液压,2008,36(4): 5-7.
- [19] 刘健,孙殿柱,李延瑞,等. 散乱点云局部点集最小包围盒快速求解算法[J]. 农业装备与车辆工程,2010(6): 27-29.
- [20] 陈柏松,叶雪梅,安利. 基于非线性主成分分析的最小包围盒计算方法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(11): 2375-2378.
- [21] 蔡利海,龙志祯. 主轴变换在三维MRI图像校准中的应用[J]. 计算机工程与应用,2005,41(24): 74-77.
- [22] UMEYAMA S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991,13(4): 376-380.
- [23] 史宝全,梁晋,刘青,等. 基于约束搜索球的点云数据与CAD模型精确比对检测[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(5): 929-934.
- [24] 中国科学院自动化研究所医学图像研究室. 3DMed [EB/OL]. (2009-12-31). <http://www.3dmed.net/Medical>.
- [25] 段黎明,刘元宝,吴志芳,等. 基于工业计算机断层成像技术的三维CAD模型重构方法[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(3): 479-486.