

# 基于图像轮廓曲线提取的CT系统参数标定

龙建辉<sup>1,2</sup>, 陈海涛<sup>1,3</sup>, 兰家旺<sup>1,3</sup>, 陈世梅<sup>1,3</sup>

(1.福建工程学院 数理学院, 福建 福州 350118;

2.福建省大数据挖掘与应用技术重点实验室, 福建 福州 350118)

3.福建工程学院 数据分析研究中心, 福建 福州 350118;

**摘要:** CT系统安装时常存在误差,需对安装好的系统进行参数标定。基于图像轮廓曲线的提取,通过建立数学模型来标定CT系统参数,标定了CT系统探测器单元间的距离、旋转角度和旋转中心,并对对应标定参数进行误差分析。

**关键词:** 参数标定; 图像轮廓提取; 误差分析

中图分类号: O241

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)01-0044-06

## CT system's parameter calibration based on the extraction of image contour curves

LONG Jianhui<sup>1,2</sup>, CHEN Haitao<sup>1,3</sup>, LAN Jiawang<sup>1,3</sup>, CHEN Shimei<sup>1,3</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Big Data Mining and Applications, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

3. Data Analysis and Research Center, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

**Abstract:** Errors always occur in the installation of the CT system, so it is necessary to calibrate the parameters of the installed system. Based on the extraction of image contour curves, a mathematical model was established to calibrate the parameters of the CT system. The distance between two adjacent receivers of CT system, the rotation angle and the rotation center were calibrated; error analysis were made for the corresponding calibration parameters

**Keywords:** parameters calibration; extraction of image contour; error analysis

计算机断层成像技术(computed tomography, CT)可以在不破坏样品的情况下,利用样品对射线能量的吸收特性对生物组织和工程材料的样品在多个不同角度下进行断层成像,由此获取样品内部结构信息,但CT系统安装时存在误差,影响成像质量<sup>[1]</sup>,因此需要借助于已知结构的样品,对安装好的CT系统进行参数标定。目前国内对投影旋转中心(center of rotation, COR)的高精度标定已有许多研究<sup>[2-4]</sup>。但对探测单元之间距离

和旋转角度标定的文献还较少。本文针对平行束CT系统,以图像轮廓曲线作为出发点,运用几何知识和线性回归、最小二乘法等方法,建立了一种有效的参数标定模型,为CT参数的标定提供了一种精度较高的新方法。

## 1 数据的获取及假设

本文数据来源于2017年全国大学生数学建模竞赛A题。<sup>①</sup>依据问题,提出如下假设:1)实验

收稿日期: 2017-12-19

基金项目: 福建工程学院教育科学研究项目(GB-YK-16-01、GB-J-11-41)

第一作者简介: 龙建辉(1975-),男,湖南长沙人,副教授,博士,研究方向:数值分析,矩阵计算。

① 2017年高教社杯全国大学生数学建模竞赛题目.[2017-12-09].<http://mcm.bjyun.com/front/detailTopic>.

所收集的数据能客观反映实际情况;2) 正方形托盘所在的平面平行于探测器平面;3) 托盘的旋转轴垂直于托盘所在平面;4) 平行入射的 X 射线在旋转过程中, 始终垂直于探测器平面;5) 所测量的物体的尺寸远大于探测器单元的距离;6) 所测量的物体在旋转过程中不会发生形变。

## 2 标定模板参数和 CT 的接收信息

在正方形托盘上放置两个均匀固体介质组成的标定模板, 模板几何信息如图 1, CT 系统使用的 X 射线从 180 个方向照射模板得到的  $512 \times 180$  的像素投影图像如图 2。

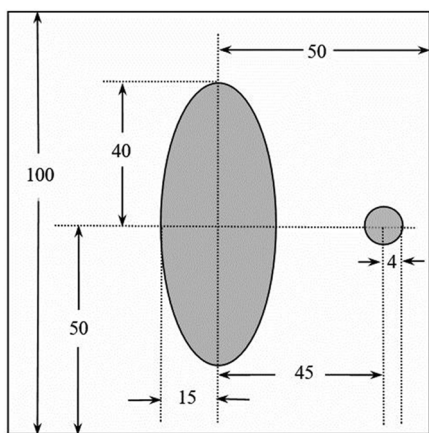


图 1 模板几何示意图(单位:mm)

Fig.1 The template's geometric diagram (unit: mm)

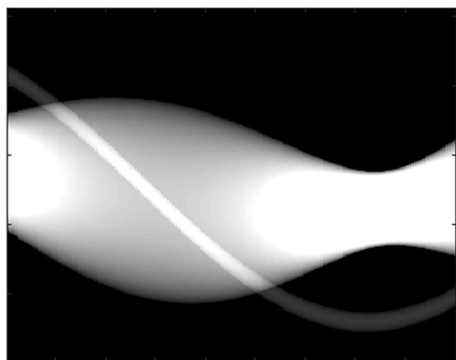


图 2 模板的投影图像

Fig.2 Projection image of the template

## 3 CT 系统参数的标定

### 3.1 轮廓曲线的提取

#### 3.1.1 提取图像轮廓

首先对原始图像进行灰度归一化, 得到灰度

值落在  $[0, 1]$  内的灰度图像。然后利用图像轮廓区域的灰度值变化幅度较大的特点, 对图像的灰度矩阵按列做二阶差分处理。最后从二阶差分后的灰度矩阵中提取出绝对值大于设定阈值的点, 即可提取出图像的轮廓。在观察二阶差分后图像的数值分布和测试多种阈值后, 本文将阈值设为 0.01, 提取出的轮廓如图 3。可以直观地看到图像轮廓由 4 条曲线组成。

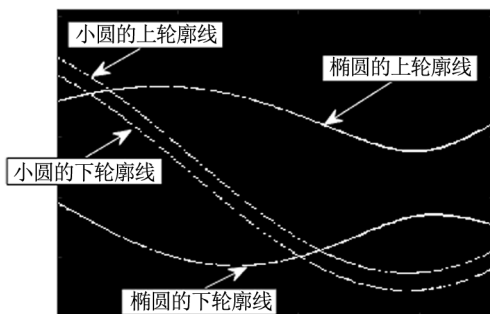


图 3 轮廓图像

Fig.3 Contour image

#### 3.1.2 分离轮廓曲线

在 3.1.1 中得到轮廓图像上, 有的线粗, 有的线细, 这是由于一条轮廓线在一列上对应点的数量不同造成的。当一条轮廓线在一列上只对应一个点时, 可以直接以该点坐标作为曲线在该列的几何坐标, 而当一条轮廓线在一列上对应多个点时, 还需进一步利用多个点的信息求出该曲线在这列上的准确几何位置。对此本文采用聚类的方法, 把同一列上距离小于一定阈值的轮廓点聚为一类, 并以聚类的几何中心作为新轮廓点, 使得每列只剩下 4 或 3 个点(当发生曲线相交时, 有两条曲线会共用一个点, 故一列上只会有 3 个点)。在反复选择不同的距离阈值进行聚类测试后, 本文选择将每列上距离在 3 个像素单位长度以内的点聚为一类。

最后分离曲线的关键在于判定每列上的 3 或 4 个点是属于哪条轮廓线。在此使用编号标记的方法, 来判断每列点的归属。算法利用了本文所用标定模板轮廓曲线的两条特殊性质: 1) 每列最多只有一对曲线会发生相交; 2) 曲线相交后一定会互相穿过对方。故当曲线发生相交时, 只要交换两条轮廓线的高度编号, 其他情况下保持高度编号不变, 即可完成对所有点的判定。

令四元组  $(ell_d, ell_u, cir_d, cir_u)$  分别表示椭圆下轮廓线、椭圆上轮廓线、小圆下轮廓线、小圆上轮廓线所对应高度编号,  $p$  表示曲线交点的高度编号。则算法具体描述如下:

Step1 将每列的轮廓点按从下到上的顺序标记上高度编号 1, 2, 3, 4。

Step2 通过观察图像矩阵的第一列给四元组赋以对应的初始值(本文赋值为(1, 2, 3, 4)), 并从第 2 列开始执行 Step3。

Step3 判断当前列是否有 4 个轮廓点, 若有, 令  $p=5$  并转入 Step5, 否则转入 Step4。

Step4 判断上一列是否有 4 个轮廓点, 若有, 先计算上一列中距离最接近的两个点高度编号, 再交换四元组中与这两个点编号相同元素的位置, 并将  $p$  更新为两个高度编号中的最小值。执行 Step5。

Step5 按顺序输出四元组中的元素, 输出时若元素  $x$  的数值大于  $p$ , 则输出  $x-1$ 。否则输出  $x$ 。执行 Step6。

Step6 判断是否有下一列。若有一列, 进入下一列并再次执行 Step3。否则终止算法。

表 1 中给出使用该算法得到几个比较关键列的编号。

表 1 关键列的编号表

Tab.1 Numbering table of the key columns

列号	$ell_d$	$ell_u$	$cir_d$	$cir_u$
1	1	2	3	4
2	1	2	3	4
13	1	2	2	3
16	1	3	2	4
22	1	3	2	3
24	1	4	2	3
100	1	3	1	2
102	2	4	1	3
108	2	3	1	2
110	3	4	1	2
180	3	4	1	2

最终利用该算法得到的编号, 对点进行归类。得到分离效果如图 4, 部分坐标数据见表 2。

### 3.2 标定探测器单元之间的距离

由图 1 可知, 椭圆与小圆的圆心距为 45 mm。利用表 2 的数据, 分别对  $ell_d, ell_u$  和  $cir_d, cir_u$  取

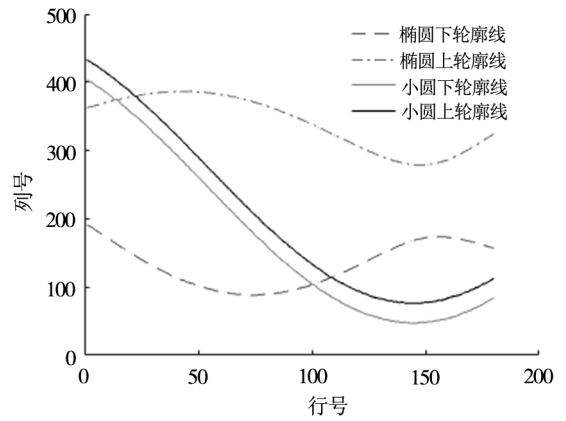


图 4 分离的轮廓线

Fig.4 Separated contour curves

表 2 四条曲线的坐标表

Tab.2 Coordinate table of the four curves

列号	$ell_d$	$ell_u$	$cir_d$	$cir_u$
1	192.0	362.5	404.5	433.0
2	189.0	364.0	401.0	431.0
3	188.0	364.0	400.5	429.0
4	185.5	365.0	398.0	426.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
178	159.0	320.0	80.5	108.5
179	158.0	322.0	82.0	110.5
180	157.0	324.5	84.0	112.5

算术平均值, 即可得到每个角度下小圆投影的几何中心  $O_{cir}$  和椭圆投影的几何中心  $O_{ell}$  的坐标。再将两个中心坐标相减, 得到两个圆心投影的距离  $d$ 。最后测得小圆中心与椭圆中心投影的最大距离  $d_{max} = 163.25$  像素长度。根据几何关系, 最大距离  $d_{max}$  约等于圆心距  $d_0$ , 故探测器单元间的距离  $d_s$  应满足式(1)

$$d_s = \frac{45}{163.25} = 0.2757 \text{ mm} \quad (1)$$

探测器单元间距离的标定值为 0.2757 mm。

### 3.3 标定系统的各个旋转角度

#### 3.3.1 初步求解旋转角度

如图 5,  $O_{cir}$  和  $O_{ell}$  别对应小圆中心与椭圆中心在投影面  $X'$  上的投影。X 射线的垂线与圆心连线的夹角  $\theta$  满足式(2), 因此可用反余弦函数求解  $d$  对应的  $\theta$ 。

$$\theta = \arccos\left(\frac{d}{d_0}\right) \approx \arccos\left(\frac{d}{d_{max}}\right) \quad (2)$$

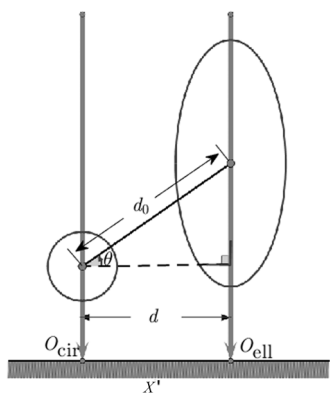


图 5 圆心连线投影

Fig.5 Projection of the centroid connection line

此时求解出的角度因反余弦函数值域的限制,落在  $0 \sim 180^\circ$  以内。与所要求的  $0 \sim 360^\circ$  不符,还需对部分角度进行象限修正。因为 CT 系统是一直朝一个方向小幅度旋转的,所以角度应表现出单调递增或者单调递减的趋势。观察图 4 小圆的轮廓曲线可发现,刚开始小圆投影位于椭圆左边,且呈现出往椭圆投影聚拢的趋势,再结合图 5,不难看出角度是单调递增的,即角度的一阶差分恒大于 0。基于以上结论,本文使用的角度象限修正方案如式(3)、(4),其中  $\theta_i$  代表未象限修正前的第  $i$  个角度,  $\theta'_i$  代表象限修正后的第  $i$  个角度。修正象限后得到的部分角度见表 3。

表 3 角度分布表

Tab.3 Angle distribution table

列号	旋转角度/ $(^\circ)$	列号	旋转角度/ $(^\circ)$
1	29.914 7	153	180.000 0
2	31.293 5	154	186.345 0
3	31.796 7	155	186.345 0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
150	174.505 8	178	207.351 0
151	175.514 5	179	208.291 0
152	175.514 5	180	209.203 2

$$\begin{cases} \theta_2 - \theta_1 \geq 0 & \theta'_1 = \theta_1, \theta'_2 = \theta_2 \\ \theta_2 - \theta_1 < 0 & \theta'_1 = 360 - \theta_1, \theta'_2 = 360 - \theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \theta_i - \theta_{i-1} \geq 0 & \theta'_i = \theta_i \\ \theta_i - \theta_{i-1} < 0 & \theta'_i = 360 - \theta_i \end{cases}, 2 < i \leq 180 \quad (4)$$

3.3.2 旋转角度的修正

在表 3 可看出,初步解出的角度在  $180^\circ$  附近

产生明显抖动,故需要对角度的异常值进行处理。针对此问题本文利用 CT 系统扫描时几乎是等距旋转的特点,对计算得到的角度数据以列号为自变量,角度作为因变量,对一元线性方程  $y = kx + b$  做线性回归。回归图像如图 6,具体回归参数见表 4,修正后的部分角度见表 5。

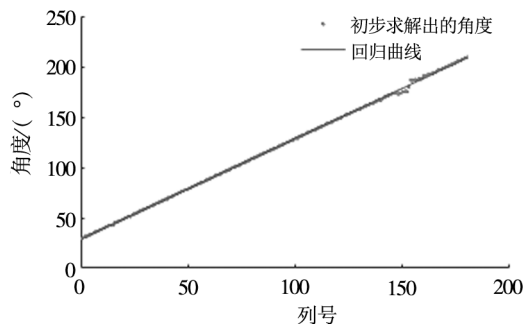


图 6 线性回归效果图

Fig.6 Diagram of linear regression effect

表 4 回归参数表

Tab.4 Table of regression parameters

参数	估计值/ $(^\circ)$	置信区间/ $(^\circ)$
$b$	28.747 0	[28.463 1, 29.031 0]
$k$	0.997 9	[0.995 2, 1.000 6]

注:表中显著性水平  $\alpha = 0.05$

表 5 修正后的部分角度表

Tab.5 The revised part of the angle table

列号	旋转角度/ $(^\circ)$	列号	旋转角度/ $(^\circ)$
1	29.745 0	153	181.423 0
2	30.742 8	154	182.420 8
3	31.740 7	155	183.418 7
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
150	178.429 3	178	206.370 0
151	179.427 2	179	207.367 9
152	180.425 1	180	208.365 7

3.4 标定旋转中心位置

如图 7, X 射线的方向垂直投影面  $X'$ , 椭圆的圆心为  $S$ ,  $T$  点为旋转中心所在位置。椭圆中心在投影面上的投影为  $O_{ell}$ 。 $r = |ST|$  表示椭圆中心到旋转中心的距离,  $r'$  代表  $r$  的投影长度。 $\varphi_0$  为旋转中心与椭圆中心的连线关于椭圆短轴的夹角。 $l_c$  为旋转中心到探测器左端点的水平距离。

则有椭圆中心的投影满足式(5)



$$d_r = d + \frac{D_{11} - D_{12} - (D_{21} - D_{22})}{2} \quad (9)$$

由  $D_1, D_2 \in (0, 1)$  可得

$$-1 < \frac{D_{11} - D_{12} - (D_{21} - D_{22})}{2} < 1 \quad (10)$$

#### 4.1.3 测量单元间距的标定误差

在投影过程中,除了长度测量存在误差外,不可能也恰好出现  $180^\circ$  或者  $0^\circ$  的投影角度,所以真实圆心距  $d_0$  与测得两圆心投影的最大距离  $d_{\max}$  应满足如下不等式:

$$d_0 \cdot \cos\varphi_{\min} - 1 \leq d_{\max} \leq d_0 + 1 \quad (11)$$

其中,  $\varphi_{\min}$  为投影方向与圆心连线的绝对值最小的夹角,而 CT 系统角度测量间距在  $1^\circ$  左右,所以有

$$\varphi_{\min} \leq 0.5^\circ \quad (12)$$

此时最大相对误差可近似表示为:

$$\left| 1 - \frac{d_{\max}}{d_0} \right| \leq \left| 1 - \frac{d_0 \cos\varphi_{\min} - 1}{d_0} \right| \approx 1 - \cos(0.5^\circ) + \frac{1}{163.25} \approx 0.62\% \quad (13)$$

#### 4.2 旋转角度的误差

在初步计算旋转角度时,先计算  $d$  与  $d_{\max}$  的比值,再计算比值的反余弦函数值得到角度。其中  $d$  的测量误差是影响角度精度的主要因素。由式(10)、(11)可知,  $d$  最大可能有 1 像素长度的误差,所以角度误差  $D_\varphi$  满足式(14)。

$$D_\varphi \leq \arccos\left(\frac{d-1}{d_{\max}}\right) - \arccos\left(\frac{d}{d_{\max}}\right) \Rightarrow D_\varphi \leq \arccos\left(\frac{d_{\max}\cos\theta - 1}{d_{\max}}\right) - \theta \quad (14)$$

根据式(14)可用 MATLAB 做图,得到结果如图 10。当  $\theta = 180^\circ$  或  $\theta = 0^\circ$  时,角度误差上界达到最大值,此时  $D_\varphi \leq 6.345^\circ$ ,所以图 6 会在  $180^\circ$  附近发生明显地抖动。而从总体上来看,80% 的角度下  $D_\varphi < 1^\circ$ 。

#### 参考文献:

- [1] 王召巴. 旋转中心偏移对 CT 重建图像质的影响[J]. 兵工学报, 2001(3): 323-326.
- [2] 孟凡勇. 基于投影原始数据的 CT 旋转中心精确确定方法[C]. 中国体视学学会. 第十三届中国体视学与图像分析学术会议论文集. 北京: 中国体视学学会, 2013: 6.
- [3] 李保磊, 傅健, 黄巧珍, 等. 一种基于正弦图的工业 CT 系统转台旋转中心自动确定方法[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1341-1345.
- [4] 赵雨晴, 丛长虹, 胡春红, 等. 基于正弦图的投影旋转中心校正方法[J]. 图学学报, 2017, 38(4): 596-602.
- [5] 邹慧. 工业 CT 系统误差源—角度及尺寸误差的校准方法研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.

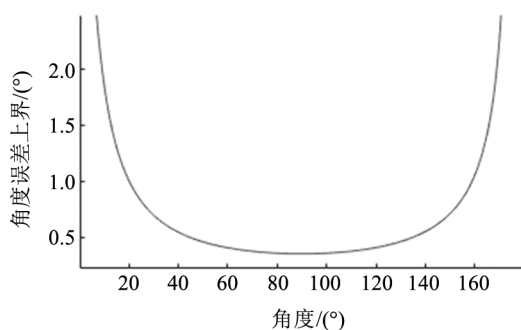


图 10 角度误差的上界与角度的关系图

Fig.10 Diagram of the relation between the maximum of the angle error and the angle

#### 4.3 旋转中心的误差

旋转中心的计算过程较为复杂,误差受到太多因素的影响,难以直接估计。故只给出实际测得的精确值和标定值之间的误差,以此来大致衡量旋转中心精度。

表 7 旋转中心误差对照表

Tab.7 Comparison table of rotation center errors

	精确值	标定值	绝对误差	相对误差
$x_c$	-9.266 34	-9.228 14	0.038 2	0.41%
$y_c$	6.272 88	6.280 13	0.007 3	0.12%

#### 5 结论

通过提取 CT 扫描图像的轮廓,分离出标定模板上的椭圆和小圆轮廓曲线。然后利用得到的轮廓曲线,计算出小圆和椭圆的圆心坐标。结合几何关系对得到的圆心数据进行拟合,得到了探测单元间的间距,180 个投影角度和旋转中心的标定值。最后对标定的参数误差进行定量分析,得出标定值的误差均在可接受的较小范围内,说明本文采取的标定方法具有一定的鲁棒性和可行性,可在 CT 参数的标定方面应用推广。