

基于 PSO 算法的 CT 系统标定模板的优化设计

张 路¹,林勇康²,艾昕晨²,沙 超¹,王汝传¹

(1. 南京邮电大学 计算机学院、软件学院、网络空间安全学院,江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,江苏 南京 210003)

摘 要:计算机断层扫描技术是当今最先进的成像技术之一,CT 系统可以在维持样品原样的情况下,根据样品某一断层对射线的吸收和透过率的不同,获取断面图像,凭借其非接触、高分辨率、无破坏性等优点在临床医学、生物、工业等领域有着广泛的应用。然而,在 CT 系统安装后,误差往往是不可避免的,例如旋转中心、旋转角等参数误差,需要利用已知结构的模板进行误差参数标定和补偿。因此,标定模板的设计就会影响到最终系统成像的质量。对此,提出了一种基于 PSO 算法的 CT 系统标定模板的设计方案,根据三个目标函数,即标定精度尽量高、单个探测器的接收信息方差尽量大、探测器的利用率尽量高,以及相关约束条件建立多目标规划模型,并运用 PSO 算法进行求解,具有收敛快、精度高等优点。

关键词:PSO 算法;CT 系统;参数标定;多目标规划

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)11-0203-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.11.044

Optimization Design of CT System Calibration Template Based on PSO

ZHANG Lu¹,LIN Yong-kang²,AI Xin-chen²,SHA Chao¹,WANG Ru-chuan¹

(1. School of Computer Science, Software and Cyberspace Security, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. School of Electronic, Optical Engineering and Microelectronics, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract:Computed tomography (CT) is one of the most advanced imaging techniques. The CT system can be used to obtain the image of the cross section according to the different absorption and transmittance of the sample, without destroying it. With the advantages of non-contact, high resolution and no destructive, it is widely used in clinical medicine, biology, industry and other fields. However, after the installation of CT system, the error such as rotation center and rotation angle is usually unavoidable, and the error parameter calibration and compensation should be carried out with the help of the template of the known structure. Therefore, the design of the calibration template will affect the quality of the final image. A design scheme for the calibration template of CT system based on PSO is proposed. In this scheme, the PSO is used to solve a multi-objective programming model built with three objectives which are composed of high calibration accuracy, large variance of the detector's receiving information, high utilization of the detector, together with related constraints. Simulation shows that this method not only convergences fast, but also ensures a higher precision.

Key words:PSO; computed tomography system; parameter calibration; multi-objective programming

0 引 言

CT 系统,即电子计算机断层扫描,是一种可以利用人体不同组织对 X 射线吸收率的不同而对人体内部进行成像的仪器^[1-2]。此外,CT 也可以应用在工程上,工程 CT 可以对工程对象内部进行成像,完成工程

结构检测等任务^[3]。

然而,在 CT 系统安装完成后,系统往往存在误差,需要用已知参数的标定模板来进行误差参数标定,便于进行误差补偿。因此,标定模板的设计往往影响着标定误差参数的精度,进而影响到最后的成像质量。

收稿日期:2017-12-28

修回日期:2018-05-04

网络出版时间:2018-06-29

基金项目:江苏省优秀青年基金(BK20160089);江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师培养计划、江苏省普通高校研究生培养创新工程(KYCX17_0796, KYCX17_0797, SJCX17_0238);南京邮电大学 1311 人才计划

作者简介:张 路(1997-),男,研究方向为计算机仿真与数值计算;沙 超,副教授,研究方向为传感网协同信息处理技术;王汝传,教授,研究方向为物联网信息获取技术。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180629.1706.046.html>

文中提出的基于 PSO 算法的标定模板设计方案,具有精度高、收敛快等特点,并与爬山法、遗传算法进行了对比。

1 CT 系统工作原理

一种常见的 CT 系统如图 1 所示。系统工作时,样品以及托盘静止不动,512 个等间距的“光源-探测器单元组”绕托盘某固定旋转中心逆时针旋转 180 次。由于旋转误差的存在,不一定是等间距旋转。经过处理后,计算机得到 180 组接收信息,每组接收信息包含 512 个探测器的探测数值,即可根据探测器信息结合标定的参数还原样品截面图。CT 系统的参数标定是指标定安装完成后的旋转中心点的坐标,探测器单元的间距,以及 CT 系统旋转的 180 个方向角。

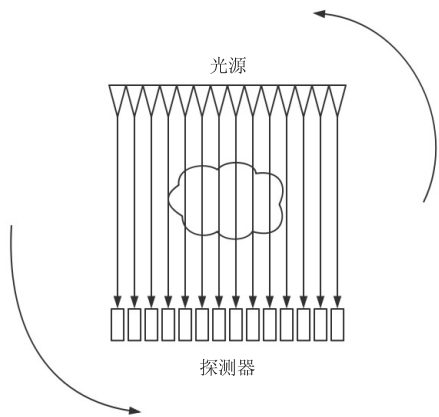


图 1 CT 系统工作原理

为了提高标定的精度和稳定性,需要对模板进行最优化设计。模板的设计围绕以下 3 个目标进行:标定精度尽量高;单个探测器的接收信息方差尽量大;探测器的利用率尽量高。

其中,“单个探测器的接收信息方差尽量大”这个目标会充分利用探测器的量程,以对不同材质起到更好的区分度。但是,此目标将导致模板呈现直杆形状,因为直杆形状下的模板能让单个探测器的接收信息从 0 变化到最大值。

而“探测器的利用率尽量高”这个目标,会充分利用探测器资源。但是,此目标将导致模板呈现半径较大的圆形。因为半径大的圆形在任何角度下都能被更多的探测器探测到。

综上所述,在各个目标的制约与均衡下,最终的模板主体形状会是一个介于圆与直杆之间的形状,即椭圆形。此外,为了能够更加便捷地测定探测器间距,并能够使模板产生不对称性,以增大各个方向的接收信息区别,在椭圆右侧引入一个圆。

故最终的标定模板为一个椭圆与一个圆构成的图形,假定圆位于椭圆右侧。在标定模板的设计方案中,

需要求解的参数有椭圆的离心率 e ,长轴长度 a ,圆的半径 r ,圆心和椭圆中心的距离 d 。设定模板为均匀的单一材质,吸收率 μ 为 1。

2 多目标规划模型的建立

为了求解出最优的标定模板,针对上文中的待定参数,建立多目标规划模型,分别确定目标函数和约束条件,过程如下所述。

2.1 目标函数的建立

2.1.1 目标函数一:标定精度尽量高

标定之后的理论计算值与实际值的误差尽量小,误差一般可以用理论值与实际值差值的平方和描述,其表达式为: $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_{ij} - P'_{ij})^2$ 。而精度可以用误差的倒数表示,故精度的目标函数表达式为: $\max \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_{ij} - P'_{ij})^2}$ 。其中, P_{ij} 为第 i 个角度下第 j 个探测器接收信息的实测值; P'_{ij} 为第 i 个角度下第 j 个探测器接收信息的理论值; n 为旋转角的个数,文中取 180; m 为探测器个数,文中取 512。

由于接收信息经过了增益等处理,结合 Beer-lambert 定律^[4],理论值可以通过下式计算。

$$\int_L \mu(x, y) dl = \Delta I = P'_{ij} \quad (1)$$

由于 μ 为常量,所以 P'_{ij} 只与穿透厚度 l 有关。当射线穿过椭圆时,穿透厚度 l_1 可通过联立椭圆与射线直线方程求解;当射线穿透圆时,穿透厚度 l_2 可通过联立圆与直线方程求解。最后总厚度 $l = l_1 + l_2$,结合式 1 即可求出 P'_{ij} ,最后代入目标函数,可以求出第一个目标函数值。

2.1.2 目标函数二:单个探测器接收信息方差尽量大

对每一个探测器来说,增大接收信息方差,就增大了 X 射线强度转化为电信号后的数值方差,就增大了各个材料在电信号下的区分度,使得做出的图像辨析度更高。根据样本方差公式,得到此目标的表达式为:

$$\max \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{ij} - \bar{p}_{ij})^2 \right], 1 \leq j \leq 512. \text{ 其中, } p_{ij} \text{ 表示第 } j \text{ 个探测器在第 } i \text{ 个角度下的探测值; } \bar{p}_{ij} \text{ 表示第 } i \text{ 个角度下所有探测器的接收信息均值; } n \text{ 为旋转角度,文中取 180。对所有的探测器求平均值,用来表示整体平均方差大小,最终目标函数为:}$$

$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \max \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{ij} - \bar{p}_{ij})^2 \right]$ 。当整体方差的平均值越大,说明系统内单个探测器接收信息的方差越高。

2.1.3 目标函数三:探测器的利用率尽量高

探测器的利用率越高,就能够充分利用其资源,避

免资源浪费,同时,若标定时充分利用探测器资源,还可提高标定的准确度。探测器的利用率最高的目标定

义如下: $\max \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}}{n \times m}$ 。其中, x_{ij} 表示装置位于第 i 个方向角中第 j 个探测器是否探测到物体,若探测到,则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。 x_{ij} 可利用椭圆在任意方向的投影长度公式判断。用 n 个角度下的 m 个探测器,平均每个探测器探测到的次数尽量大来描述这个目标。

2.1.4 目标函数的转化

对于三个目标函数,求解的难度相对较大,因此,在保证目标不变的情况下,可对目标函数进行一定的改进。

目标函数一可转化为: $\max (d - b - r)^2$ 。目标使圆与椭圆间隔尽可能大,根据探测器间距测量方法,能提高探测器间隔的标定精度。

目标函数二可转化为: $\max e$ 。此目标使得椭圆尽可能扁平,从而使得单个探测器接收信息方差尽可能大。

目标函数三可转化为: $\max a^2 + b^2$,此目标使得椭圆尽可能大,从而提高探测器利用率。其中, a 为椭圆形模板的半长轴, b 为椭圆的半短轴。

其示意图如图 2 所示。

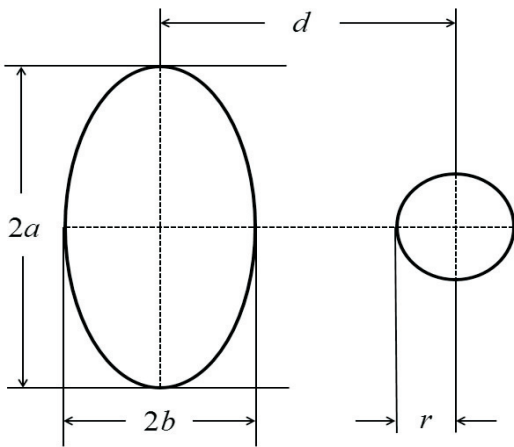


图 2 待求解模板示意图

考虑到所求的目标函数都是要求最大值,因此首先考虑相加。但是因为数量级上有差异,首先要将其进行标准化^[5],建立一个目标函数 F 。将上述三个目标函数分别记作 F_1, F_2, F_3 ,则最终的目标函数为:

$$F = \frac{F_1}{F_{1 \max}} + \frac{F_2}{F_{2 \max}} + \frac{F_3}{F_{3 \max}} \quad (2)$$

2.2 约束条件的确定

约束条件一:椭圆长轴长度与离心率范围的约束。一方面,椭圆要限定在托盘内。文中的系统托盘宽度为 100 mm。另一方面,椭圆不能与圆相交,由此得到如下两个约束数据:

$$\begin{cases} 0 \leq a \leq 50 \\ 0 \leq a\sqrt{1-e^2} + 2r \leq 50 \end{cases} \quad (3)$$

约束条件二:圆的半径范围约束。圆的半径范围一方面与椭圆离心率有关;另一方面,半径和圆与椭圆中间距离也限定了圆不能超出托盘区域,关系式如下:

$$0 < d + r < 50 \quad (4)$$

约束条件三:圆与椭圆相对位置关系的约束。为了能够更加方便地测定探测器间距,要保持圆和椭圆之间有一定的间距,关系式如下:

$$d - a\sqrt{1-e^2} - r > 0 \quad (5)$$

3 基于 PSO 算法的优化求解

根据新设计的模块信息,可采用对参数遍历的方式来达到多目标规划的最优解。然而,考虑到需要对椭圆的离心率 e ,椭圆的长轴长度 a ,圆的半径 r 、椭圆中心和圆心的间距 d ,分别进行遍历,计算量繁重且结果不精确。故根据收敛速度及求解精度的需要,采用 PSO 算法^[6-10]对模型进行求解。

PSO 算法,即粒子群优化算法,是由 Eberhart 和 Kennedy 基于群鸟觅食行为提出。在粒子群算法中,每个粒子都被当成一只鸟。在群鸟觅食的过程中,每只鸟的初始位置和飞翔方向都是随机的。每只鸟都不知道食物的具体位置。但是,随着时间的推移,这些鸟通过相互学习、信息共享和不断积累觅食的经验,自发组织积聚成一个群落,并朝着食物前进。迭代终止的条件一般为目前搜索的最优位置满足目标函数的最小容许误差,或者达到了最大迭代次数。

在本例中,PSO 算法的具体步骤如下:

步骤 1:由于需要对椭圆的离心率 e ,椭圆的长轴长度 a 以及圆的半径 r 、椭圆中心和圆心的间距 d 进行遍历求解,因此,首先确定一个四维粒子 (a, e, r, d) ,根据已经确定的约束条件,在范围内对四维粒子进行赋值。

$$\begin{cases} a = \text{rand}(0, 50) \\ e = \text{rand}(1, 10) \\ r = \text{rand}(0, 5) \\ d = \text{rand}(10, 20) \end{cases} \quad (6)$$

步骤 2:在已经确定的约束条件下,进行第一次选取。为了能够得到全局最优解,需要先设置 100 个粒子,粒子按照粒子运动规律在全球范围内演变。在满足最优化目标的条件下,从粒子群中选取较小的 (a, e, r, d) 作为下一次选取的上限: $a_{\max}, e_{\max}, r_{\max}, d_{\max}$ 。

步骤 3:同理,在满足最优化目标的条件下,从粒子群中选取较大的 (a, e, r, d) 作为下一次选取的下限: $a_{\min}, e_{\min}, r_{\min}, d_{\min}$ 。

步骤 4:在已经确定的上下限范围内进行下一次选取。

$$\begin{cases} a_1 = a_{\min} + (a_{\max} - a_{\min})\text{rand}(0,1) \\ e_1 = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min})\text{rand}(0,1) \\ r_1 = r_{\min} + (r_{\max} - r_{\min})\text{rand}(0,1) \\ d_1 = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min})\text{rand}(10,20) \end{cases} \quad (7)$$

步骤 5:设定迭代次数。经过测试,本例中的 PSO 算法大部分在 31 ~ 73 次迭代之后达到收敛条件。为了兼备结果的精确性和速度,选定最大迭代次数为 100 次。

在托盘尺寸为 100 mm × 100 mm ,探测器为 512 组,旋转 180 个角度的情况下,对表 1 中 PSO 算法的求解参数进行求解。

表 1 PSO 算法参数值

PSO 参数	符号	值
粒子数	x	100
惯性因子	w	0.729
加速常数 1	c_1	1.494
加速常数 2	c_2	1.494
最大飞翔速度	V_{\max}	1

借助 MATLAB 的粒子群工具箱,求得标定模板的各项参数值,如表 2 所示,此时的目标函数值为 2.086 2。

表 2 标定模板的各项参数

模板参数名称	符号	值
椭圆长半轴	a	45.01
椭圆短半轴	b	14.85
椭圆离心率	e	0.92
圆的半径	e	6.27
椭圆中心与圆心距离	d	40.20

4 不同算法对比

为了检测 PSO 算法与其他优化算法在求解本问题上的优劣,分别采用爬山法^[11-12]和遗传算法^[13-15]进行求解。

爬山法是一种求解局部最优解效果较好的算法。通过不断与邻居节点的函数值进行比较,如果邻居节点函数值较大,则用邻居节点代替当前节点,从而寻求到最优解。若初值选取的不恰当,爬山法往往找到的是局部最优解。

遗传算法是基于达尔文进化论产生的一种随机搜索算法,通过模拟自然界生物进化过程寻找最优解。包含复制、交叉、变异三种算子。对非线性问题有良好效果。 万方数据

爬山算法和遗传算法的参数如表 3 所示。

表 3 爬山算法与遗传算法求解参数

爬山法		遗传算法	
参数名	参数值	参数名	参数值
反射因子	100	种群数量	100
收缩因子	0.729	变异率	0.01
拓展因子	1.494	交叉率	0.85
全收缩因子	1	交叉方法	均匀交叉

在 MATLAB R2017b 下,经过求解,得到的迭代搜索对比如图 3 所示。

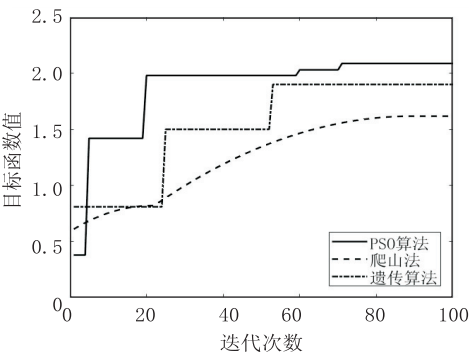


图 3 不同算法迭代搜索图

由图可以看出,在本例中,爬山法容易陷入局部最优解的状况,在多次测试中,只有少数几例由于随机初值选取在全局最优解附近,使得爬山法取得了全局最优解,其他大部分情况均陷入了局部最优解。而本例中存在 4 个维度的搜索,遗传算法在高维问题的收敛速度较慢甚至很难收敛。

5 结束语

提出了一种基于 PSO 算法的标定模板的设计方案。首先根据设计目标确定标定模板大致形状,然后根据相关目标与约束条件建立多目标规划模型,最后采用 PSO 算法求解出模板的参数,得到了在指定情况下的最优化模板设计方案。与爬山法、遗传算法的对比结果证明了 PSO 算法在本例中的优越性。

但是,在运行过程中,PSO 算法同样存在一些问题,例如求解参数的设置对最终结果影响很大,局部搜索能力较差,结果不稳定等。因此,如何降低对参数的依赖性,提高结果的稳定性和局部搜索能力,是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] VENKATESAN V,SANDHYA M K,JENEFER B M. Computed tomography scan simulation techniques; a survey [C]//Fourth international conference on signal processing, communication and networking. Chennai, India: IEEE,2017:

1-5.

[2] WANG W A,LIN M C. A fast method in reconstruction 3D computed tomography medical images [C]//International conference on industrial engineering and engineering management. Xiamen,China ;IEEE,2010:1877-1881.

[3] 徐留根,彭春增,全建龙,等. 工业 CT 在航空机载传感器可靠性提升中的应用[J]. 传感器与微系统,2016,35(10):158-160.

[4] HUSAIN I,CHOUDHURY A,NATH P. Fiber-optic volumetric sensor based on beer-lambert principle [J]. IEEE Sensors Journal,2013,13(9):3345-3346.

[5] 马丹祥,初建宇,王 政,等. 基于多目标规划的防灾避难场所选址模型研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(2):1-7.

[6] HONG Y,CHOI B,OH G,et al. Nonlinear conflict resolution and flow management using particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2017,18(12):3378-3387.

[7] 刘生建,罗 林,杨 艳. 一种快速自适应粒子群算法[J]. 软件导刊,2017,16(9):42-45.

[8] 李荣龙,罗 杰. 一种改进的粒子群优化算法[J]. 计算机技术与发展,2015,25(7):67-71.

[9] 刘春燕,杨巍巍. 云计算基于遗传粒子群算法的多目标任务调度[J]. 计算机技术与发展,2017,27(2):56-59.

[10] 季斌炜,陈潇一. 基于粒子群算法的配电网无功补偿方法研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(3):111-114.

[11] XIAO Xi,HUANG Xuanrui,KANG Qing. A hill-climbing-method-based maximum-power-point-tracking strategy for direct-drive wave energy converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(1):257-267.

[12] 魏 康,杨晓元,刘龙飞,等. 爬山算法对一阶相关免疫函数非线性度的优化研究 [J]. 计算机应用研究,2015,32(5):1500-1502.

[13] QIU Meikang,MING Zhong,LI Jiayin. Phase-change memory optimization for green cloud with genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64 (12): 3528 - 3540.

[14] 莫汉培,陈秋良,张子臻. 遗传算法求解电力设施选址问题 [J]. 计算机技术与发展,2016,26(3):197-201.

[15] 董朝阳,路 遥,王 青. 改进的遗传算法求解火力分配优化问题 [J]. 兵工学报,2016,37(1):97-102.

+++++

(上接第 202 页)

统的研究与实现[J]. 计算机应用研究,2010,27(5):1732-1736.

[7] 黄祥志,刘 南,刘仁义,等. 适用于可编辑 WebGIS 的动态缓存策略[J]. 计算机工程,2011,37(5):285-287.

[8] 杜清运,虞昌彬,任 福. 利用嵌套金字塔模型进行瓦片地图数据组织[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(5):564-567.

[9] 韦 胜. ArcEngine 环境下实现瓦片地图的访问与拼接 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2012,37(6):737-740.

[10] 王小军,刘 璐. 基于 ArcGIS Engine 进行瓦片式切图的技术研究 [J]. 测绘与空间地理信息,2010,33(4):49-51.

[11] 寇曼曼,王勤忠,谭同德. Google map 数字栅格地图算法及应用 [J]. 计算机技术与发展,2012,22(4):204-206.

[12] JOHN A T, ANTHONY J T, MARK A K. The handling of large digital orthophoto raster database in GIS [J]. ISPRS, 1994,30(4):457-459.

[13] BAUMANN P. Web-enabled raster GIS services for large image and map databases [C]//Proceeding of 12th international workshop on database and expert system applications. Munich,Germany ;IEEE,2001:870-874.

[14] 郭啟倩,武晓红,李盛乐. 瓦片式震中分布图生成及局部自动更新 [J]. 地理空间信息,2015,13(1):115-118.

[15] YE Hua,MA Yan,DONG Limin. Land ecological security assessment for Bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model-with data in 2009 as case [J]. Energy Procedia, 2011,5:2172-2177.