

目视助航灯具光度参数测试研究

侯启真, 杨博恩, 史秉鑫

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

摘要: 根据目视助航灯具光源特性和灯具检测存在的问题, 介绍了一种基于线阵 CCD 的检测助航灯具出射光强分布的系统; 系统以线阵 CCD 为光电探测元件采集出射光束各个方向的光信号, 再由数据采集系统转化、实时采集并传输到上位机进行处理; 通过寻找并优化相关的插值算法, 对系统检测得到的数据进行数据处理, 最终绘制光束的等光强曲线并求解得到出射角的范围; 实验证明: 通过检测系统得到的数据经算法求解后得到的结果, 与测试标准进行对比, 验证出该检测系统的可行性以及优化后算法的优越性, 能满足测量的实际需要。

关键词: 线阵 CCD; 光强; 插值算法; 等光强曲线; 出射角

Research of Detecting Photometric Parameters for Airport Navigation Lights

Hou Qizhen, Yang Boen, Shi Bingxin

(Aviation Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: For light-emitting characteristics of navigation light and the problem of light-detecting, a novel system based on linear CCD to detect intensity distribution of the navigation light was proposed. In the system, Linear CCD as detector elements was used for collecting signals intensity for each direction, and then the collected data was transformed and real-time transmitted to the host computer for processing. By finding and optimizing the associated interpolation algorithm, and processing the data, finally it can perform data processing, respectively drawing equivalency light intensity curve and solving range of effluence angle. By processing the data collected by the detection system, comparing the final results with the relevant standards, the experimental result show the metering system is feasible and superiority of optimizing validation algorithms, meeting the actual needs of the measurement.

Keywords: linear CCD; light intensity; interpolation algorithm, equivalency light intensity curve; effluence angle

0 引言

机场助航灯具属于信号光源, 与一般的照明灯具相比, 光学参数要求有明显的不同, 具有点光源、出射光强度高、出射角小等特点。助航灯具出射光的光强、出射角等参数在引导飞机安全着陆时的正确判断中非常重要, 国际民航组织 (ICAO) 对机场助航灯具安装时灯具的光度学参数要求有具体量化标准^[1], 当灯具的一些固定参数不能满足标准要求时, 要及时维修或更换^[2], 以防止飞行安全事故的发生。

本文首先通过利用一个基于线阵 CCD 的灯具测光系统获取灯具出射光束的光强空间分布数据, 实现灯具光强的静态检测, 然后对获取的数据进行处理, 最后得出结果并验证。根据助航灯具光源的特点和测试要求, 利用一种综合了距离加权法、加权最小二乘法和张力样条函数等插值算法后改进的矩形网格法来绘制等光强曲线, 同时用一种非拟拟合曲线算法处理数据得出出射角范围, 给出判断是否合格的结论。论文通过处理检测系统得到的助航灯具光强空间分布数据, 对处理算法进行验证, 对其量化检测分析有重要的意义。

1 灯具检测系统

如图 1 所示, 灯具检测系统是在暗室内进行测量实验的,

主要由安装灯具的测试转台、安装在三脚架上的光电探测头和安装有配套系统的计算机等几部分组成。

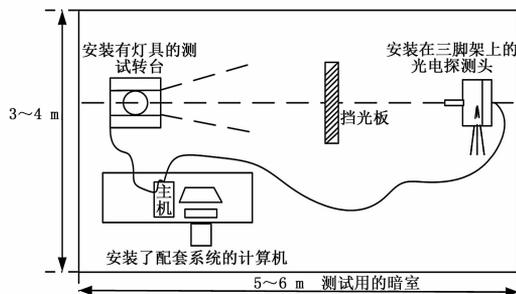


图 1 检测系统光路图

首先利用激光矫正仪校正安装在灯具台上的助航灯具的几何中心和光电探头的中心矫正到同意基准线上^[3], 然后通电后在计算机配套系统上设置与测试灯具类型对应的系统参数后开始测试, 灯具测试转台开始转动, 对应的光电探头检测到的对应光斑空间位置的光信号, 经由信号处理部分处理后传输到上位机上, 上位机就可以得到对应的灯具光强数据。检测系统的测试标准为国际民用航空公约附件 14 (ICAO ANNEX14), 测试距离在 10 m 以内。

系统硬件设计框图如图 2 所示, 检测系统主要由以下几部分组成: 光学系统模块 (步进电机驱动、线阵 CCD 驱动、灯具测试台、光电探测头)、信号调理模块、模数信号转换模块、数据采集系统模块、USB 数据传输模块和上位机处理等。

收稿日期: 2014-02-12; 修回日期: 2014-04-12。

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (10JCYBJC00800); 中国民航大学校基金项目 (04-CAUC-03E)。

作者简介: 侯启真 (1966-), 女, 天津人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事机场电气及自动化, 目视助航设施运行与测控方向的研究。

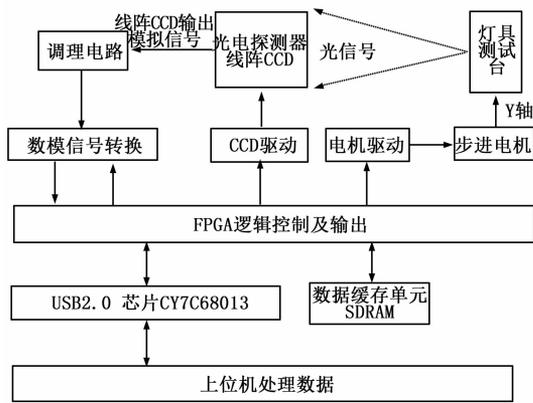


图 2 系统硬件设计框图

2 检测数据处理

2.1 等光强曲线绘制算法分析

绘制等值线常用的方法总的归纳起来有矩形网格法和三角网格法。两种方法的算法和过程差别较大,各有特点。矩形网格法较易实现,设计程序简单,但是要求原始数据点的排列要均匀,同时要求被研究的空间变量分布连续;而三角网格法对原始数据点空间分布没要求并且绘制精度高,但算法和程序结构较复杂。从技术方向上等值线绘制可以分为插值和曲线拟合两种方法,综合考虑插值算法的效果比曲线拟合效果更好^[4]。网格点插值指用已知离散点列上的值来估计网格点上的值,有距离加权法、迭加法、方位法、克里格法、加权最小二乘法和趋势面法等很多方法,这些方法各有优缺点^[5]。

助航灯具光束的光强空间分布均匀,根据其特点和测量要求,等光强曲线的绘制要从绘制速度、绘制精度和曲线平滑程度上着手^[6]。本文提出了在规则矩形网格法基础上综合距离加权法和加权最小二乘法改进的距离加权最小二乘插值算法。该算法较为忠实原始数据点并且可以保证插值精度和运算速度,但绘制成的曲线有不平滑的缺点,为改善其这一缺点,加入张力样条函数对曲线进行平滑处理。

绘制等值线首先要将离散数据网格化后建立数字高程模型,然后进行等值线的追踪和绘制。构建数字高程模型首先将原始数据点的横、纵坐标的最大值及最小值构成矩形网格的边界;其次根据需要将矩形再划分为 $m \times n$ 个小矩形,即形成矩形网格;最后,用插值算法得到每个网格点的高程值。如果将离散的数据插值到网格区域内的特定一点 (a, b) 处,需要得到一个多项式 $p(x, y)$:

$$p(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5y^2 \quad (1)$$

按距离加权分析:

$$Q = \sum_{i=1}^n [p(x_i, y_i) - z_i]^2 W[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2] \quad (2)$$

式(2)中, n 为离散数据点数, z_i 为 $p(x_i, y_i)$ 的观测值, W 是权函数。要使 Q 值达到极小,并且是求出(1)式的 c_n , 按照最小二乘法原理求得

$$\frac{\partial Q}{\partial c_n} = 0 \quad (n = 0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

求出 c_n 值即可计算出点 (a, b) 上的光强值 $f(a, b)$ 。对于加权函数 W 为了防止溢出按加权方式有: $W(d^2) = 1/(d^2 + \epsilon^2)$, ϵ 为任意小数, $d^2 = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2$ 当 (a, b) 接近 $(x,$

$y)$ 时, 它的值比较大, 而在远离时, 它的值比较小

等值线绘制完成后我们需要求解主次光束的平均光强, 因为绘制的等光强曲线边界还不够平滑, 为减小误差, 选用张力样条函数对曲线进行平滑处理。张力样条函数基本构思是分段插值函数为直线插值和两个双曲函数 $sh\sigma x$ 和 $ch\sigma x$ 的线性组合^[7]:

$$f(x) = c_1 + c_2x + c_3sh\sigma x + c_4ch\sigma x \quad (4)$$

式(4)中, σ 为张力系数, 待定的张力样条具有连续的一、二阶导数, 并要求 $(f'(x) - \sigma^2 f(x))$ 在每个数值区间上成线性变化, 通过有关复杂的数学推导, 可以得到张力样条函数的函数表达式:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma^2 sh(\sigma h_i)} \{ f''(x_i) sh[\sigma(x_{i+1} - x)] + f''(x_{i+1}) sh[\sigma(x - x_i)] \} + [y - \frac{f''(x_i)}{\sigma^2}] \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + [y - \frac{f''(x_{i+1})}{\sigma^2}] \frac{x - x_i}{h_i} \quad (x_i \leq x \leq x_{i+1}, i = 0, 1, 2, \dots, n-1; h_i = x_{i+1} - x) \quad (5)$$

其中 $\sigma \neq 0$, 因为当 $\sigma \rightarrow 0$ 时上式为一标准的三次样条函数表达式可以保证曲线既光滑, 又通过已知数据节点^[7]; 当 $\sigma \rightarrow \infty$ 时张力样条函数退化为分段线性函数可以绝对保证线段不相交。因此使用这种方法可以选择合适的张力系数来应对不同的曲线状况, 张力系数 σ 越大, 插值曲线的张力越强。根据研究, 在不考虑相邻线段相交而且得到光滑曲线的前提下, 任何一条光滑曲线的 σ 的计算方法都是一样的, 即为 $\sigma = 1.5 \times n/s[n]$, 式中 n 和 $s[n]$ 分别为线段的原始数据点数和累计长度。因为光束的光强值分布均匀, 相邻等值线相交的可能性很小, 所以利用此式求得 σ 值。确定具体参数后, 进行插值并绘制出对应的平滑的等光强曲线。

图 3 为等光强曲线算法实现流程图。

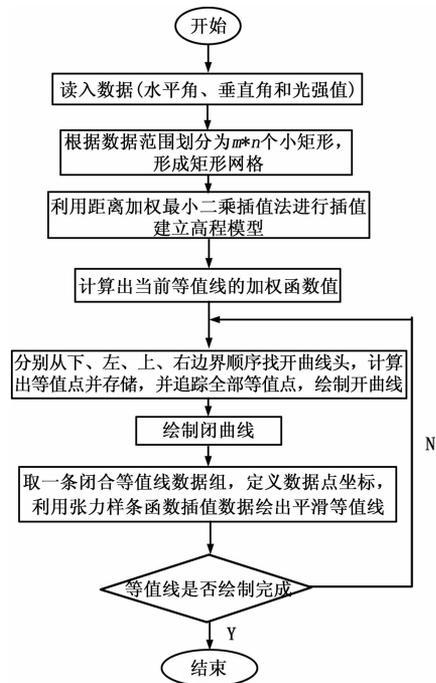


图 3 绘制等光强曲线流程图

2.2 灯具光束出射角计算方法分析

首先利用拟合曲线使曲线上的点逼近原始数据点的变化趋势，再利用一种拐点判别方法寻找拐点，最终确定光束的有效出射角。

由已知的离散数据点选择与实验点误差最小的曲线^[8]

$$S(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + \dots + a_n\varphi_n(x) \quad (6)$$

称为曲线拟合的最小二乘法。

若记

$$(\varphi_j, \varphi_k) = \sum_{i=0}^m \omega(x_i)\varphi_j(x_i)\varphi_k(x_i) \quad (7)$$

$$(f, \varphi_k) = \sum_{i=0}^m \omega(x_i)f(x_i)\varphi_k(x_i) \equiv d_k \quad (8)$$

上式可改写为 $\sum_{j=0}^n (\varphi_k, \varphi_j)a_j = d_k; (k=0, 1, \dots, n)$ ，这个方程成为法方程，可写成矩阵形式 $\mathbf{G}\mathbf{a} = \mathbf{d}$ ，其中 $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T, \mathbf{d} = (d_0, d_1, \dots, d_n)^T$,

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_n) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_1, \varphi_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varphi_n, \varphi_0) & (\varphi_n, \varphi_1) & \dots & (\varphi_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

它的平方误差为：

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^m \omega(x_i)[S(x_i) - f(x_i)]^2 \quad (10)$$

为使结果更符合实际状况，利用最小二乘法进行拟合曲线时，需要选择合适的多项式次数进行曲线拟合。拟合成曲线后，可以得到曲线上的坐标数据，根据曲线上拐点的特点，在数学定义及物理意义的基础上，利用一种快速有效的数学算法来求解拐点^[9]。

首先将曲线的有效区间 $[m, n]$ 分割，小区间无限小，分割点为 $x_0, x_1, \dots, x_k, \dots, x_{n-1}$ ，对应纵坐标为 $f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_k), \dots, f(x_{n-1})$ 。假如拐点在两分割点之间，则判别式为

$$F(k) = \left(\frac{f(x_{k-1}) - f(x_{k-2})}{x_{k-1} - x_{k-2}} - \frac{f(x_{k-2}) - f(x_{k-3})}{x_{k-2} - x_{k-3}} \right) \times \left(\frac{f(x_{k+2}) - f(x_{k+1})}{x_{k+2} - x_{k+1}} - \frac{f(x_{k+1}) - f(x_k)}{x_{k+1} - x_k} \right) < 0 \quad (11)$$

为简化算法并且具有普遍性，进行 n 等分区间 $[m, n]$ ，则 (11) 可以变转为

$$F(k) = (f(x_{k-1}) + f(x_{k-3}) - 2f(x_{k-2})) \times (f(x_k) + f(x_{k+2}) - 2f(x_{k+1})) < 0 \quad (12)$$

将得到的各坐标点依次代入判别式 (2) 或 (3) 计算 $F(k)$ ，判断代入公式的点是否为拐点若判别式 (11) 或 (12) 在 $k=a$ 处成立，则说明位于 x_a 与 x_{a+1} 之间^[10]。显然，当 $\Delta \rightarrow 0$ (或 $n \rightarrow \infty$) 时，则 $x_a \rightarrow p_0$ ，即 m 充分大时， $(x_a, y_a) \approx P = (p_0, f(p_0))$ 。根据对求解出射角的精度要求，一般 n 取 300~3 000 就能取得较好的效果。

图 4 为求解光束出射角的程序流程图。

3 检测结果分析

国际民用航空公约附件 14 对助航灯具光束的中心光强、次光强、最弱光强范围，以及出射角相关参数给出了具体量化标准，并列出了各类助航灯具的等光强曲线。根据上述算法处理得到的光强数据，进行等光强曲线的绘制和光束出射角的求

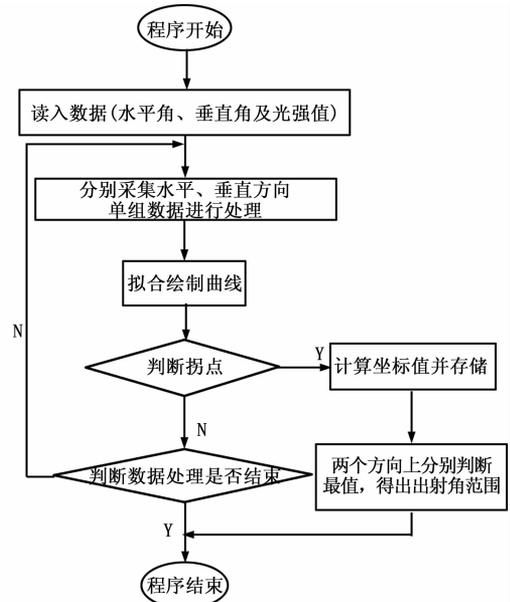


图 4 求解出射角的流程图

解，然后根据标准可以判断灯具是否合格^[11] (试验以进近灯光系统中的中线灯为例，附件 14 规定为白光且主光束最小光强为 20 000cd，水平方向有效出射角为 $-16.5^\circ \sim 16.5^\circ$ 垂直方向有效出射角为 $0^\circ \sim 14.5^\circ$)。

如图 5 分别参考的标准的等光强图和实际利用改进的矩形网格法算法绘制的光强图；实测值为 20 655.963 9cd，结果判断为合格。

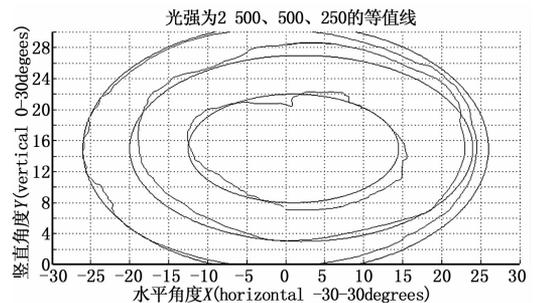


图 5 绘出的等光强曲线图

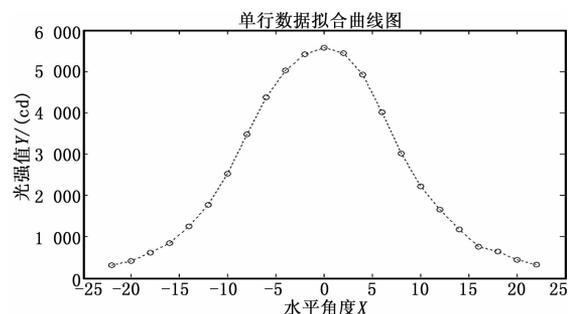


图 6 单行数据拟合曲线图

如图 6 为一行数据组拟合成的曲线图，图 7 为描绘的部分拐点标记图。最后求得拐点值确定水平方向有效出射角为 $-17.2^\circ \sim 16.8^\circ$ 垂直方向有效出射角为 $0^\circ \sim 14.8^\circ$ ，出射角判断

(下转第 2017 页)

采用苹果 4s 智能手机摄像头拍摄图像。图像处理设备为英特尔 Celeron (R) 台式机, 2.4GHz CPU、2G 内存。图像处理程序在 Matlab 平台下开发。相机距离地面 1.1 m、光轴与水平方向夹角约 20°向下倾斜。分别采集车道前方与车道旁的图像。原始图像文件为 JPG 格式, 处理时转换为灰度图片 JPG 格式。图像大小为 256 * 256 像素。其实验结果如表 1 所示。

表 1 本文检测值与实际值对比表

	长宽高(1组)	长宽高(2组)
测量值(m)	4.46/1.69/1.35	4.94/1.87/1.36
实际值(m)	4.20/1.65/1.45	4.60/1.80/1.50
	长宽高(3组)	长宽高(4组)
测量值(m)	4.12/1.52/1.85	4.10/1.66/1.71
实际值(m)	3.86/1.50/1.91	3.88/1.60/1.86

6 结论

文章提出了一种基于图像测量的车辆超限检测方法。相比以往使用的基于传感器与限定杆的测量方式, 该方法在高效性与准确性的基础上实现了检测自动化与智能化。采用基于车道线的背景去除方法以及基于 ROI 的分块投票测量法, 算法简单, 有针对性地解决了利用图像测量在车辆超限检测中存在的问题。实验中, 本文算法能够较为精确的测量车辆长、宽、高

参数, 针对不同光照与车辆均有良好的检测效果。

参考文献:

- [1] 庞宏源. 高速公路超限检测中的超宽、超高、及超长检测系统 [J]. 现代工业经济和信息化, 2012, 24 (1): 75-76.
- [2] 何晓鸣. 车辆长宽高测量仪 (车辆轮廓尺寸测量仪) 介绍 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/ebf015fead51f01dc281f1bb.html>. 2013. 10. 01/2013. 11. 10.
- [3] 杨宇喜. 基于改进 Hough 变换的车道线检测技术 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (2): 292-294.
- [4] 张弘. 数字图像处理与分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] William K. Pratt. 数字图像处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 贺助理. 基于图像能见度检测技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [7] 刘卫国. MATLAB 程序设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] C. -C. Hsu. Three-dimensional measurement of distant objects based on laser-projected CCD images [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2009, 3 (1): 197-207.
- [9] 孟海岗. 基于平面约束的 CCD 相机标定方法改进 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.

~~~~~

(上接第 2010 页)

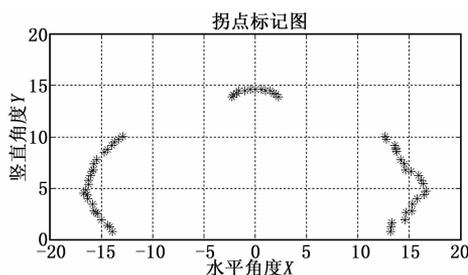


图 7 拐点标记图

为合格。

## 4 结论

本文通过对助航灯具光源发光特性的分析, 利用一种光强检测系统, 得到对应光强的数据, 利用改进的矩形网格法绘制光强分布曲线, 可以快速地得到平滑的等光强曲线; 同时利用找到一种计算方法可以确定光束射出角。且进行了多次实测各类助航灯具实验, 实验证明对该系统测量结果的处理, 在速度和精度上速度均满足灯具检测需求<sup>[12]</sup>。

另外, 系统测试时改变测试范围, 扩大数据组信息量, 然后经过相关算法可以进行灯具的光轴和色度分析, 完善检测系统成为一个可以测出多种光度学参数的助航灯具检测系统。

### 参考文献:

- [1] 国际标准和措施机场民用航空公约附件十四 (第五版) [Z].

国际民航组织, 2009 (附录 2): 1-26.

- [2] 中国民用航空局机场司. AP-191-WM-CA-2000-3 《民用机场助航灯光系统运行维护规程》[Z], 2000.
- [3] 崔健超. 汽车前照灯悬吊式检测装置的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009.
- [4] 顾滨兵, 杨兆海, 高宇, 等. 基于网格序列法和端点量化的等值线生成算法 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28 (1): 78-81.
- [5] 黄州. 地质构造等值线的插值和绘制方法研究 [D]. 湖北: 武汉理工大学, 2009.
- [6] 王修岩, 李宗帅, 乔辉, 等. 基于三自由度携载机构的助航灯具光强检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2385-2387.
- [7] 迟文学, 吴信才, 于海洋, 等. 张力样条函数在雨量等值线光滑中的应用研究 [J]. 水文, 2007, 27 (1): 22-25.
- [8] 任洪海. 计算机图形学理论与算法基础 [M]. 湖北: 辽宁科学技术出版社, 2012.
- [9] 毋河海. 数字曲线拐点的自动确定 [J]. 武汉大学学报, 2003, 28 (3): 330-335.
- [10] Zhang Q, Eagleson R, Peters T M. Rapid scalar value classification and volume clipping for interactive 3D medical image visualization [J]. Visual Computer, 2011, 27 (1): 3-19.
- [11] 中国民用航空局机场司. AP-191-WM-CA-2000-3 《民用机场助航灯光系统运行维护规程》[Z], 2000.
- [12] Sundaramoorthi G, Yezzi A. Sobolev active contours [J]. International journal of Computer Vision, 2007, 73 (3): 345-366.