

文章编号: 0253-2239(2009)07-1824-06

基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法

吴宪祥¹ 郭宝龙¹ 王娟²

(¹西安电子科技大学机电工程学院 ICIE 研究所, 陕西 西安 710071)
²空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 提出了一种基于相位相关法的柱面全景图像自动拼接算法。首先推导了柱面投影公式、柱面平移量和平面平移量之间的对应公式;然后利用改进的相位相关法计算出归一化相位相关度的峰值及峰值点坐标,利用峰值作为相关度准则判断两幅图像是否存在重叠部分,利用最大相关度求交自动确定头尾图像,利用峰值点坐标判断两幅相邻图像的位置关系;最后将环绕拍摄的序列图像投影到柱面坐标系下,根据计算得到的变换参数进行图像拼接并融合得到柱面全景图像。实验结果表明,该算法能有效地实现顺序混乱的序列图像的自动排序和柱面全景图像拼接,具有较高的稳健性和拼接精度。

关键词 图像处理; 图像拼接; 相位相关; 自动排序; 柱面投影

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1824

Cylindrical Panoramic Image Automatic Mosaic Algorithm Based on Phase Correlation

Wu Xianxiang¹ Guo Baolong¹ Wang Juan²

¹ICIE Institute, School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University,
Xi'an, Shaanxi 710071, China
²Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University,
Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract An improved cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation is proposed. Firstly, the cylindrical projecting formulae are given. Then, the normalized cross-correlation function is computed, and the peak value and position of the normalized cross-correlation function are found. The peak value is used to estimate whether two images are overlapped. The first and the last image can be ascertained automatically by maximal correlation degree intersecting, and the relation of the overlapped images can be ascertained by the peak position. Finally, the rounding planar image sequences are projected to cylindrical coordinate, and the cylindrical panoramic image can be gained by stitching together the images in sequence with the calculated transformation parameters. Experimental results show that the proposed method outperforms traditional methods with high robustness and precision, which can sort the unordered image sequences and stitch the images in sequence into a cylindrical panoramic image effectively and automatically.

Key words image processing; image mosaics; phase correlation; automatic sequencing; cylindrical projection

1 引言

全景图像拼接就是将多张有重叠区域的同一场景的图像拼接融合成一幅包含各图像序列信息、全

视域和高分辨率的全景图像的技术^[1~3],在遥感、医学、监控、虚拟现实、视频编解码等领域有着广泛的应用。常用的全景图流形包括平面全景图、柱面全

收稿日期: 2008-07-15; 收到修改稿日期: 2008-11-16

基金项目: 国家 863 计划 (2006AA01Z127)、国家自然科学基金 (60802077、60572152) 和教育部博士点基金 (200660701004) 资助项目。

作者简介: 吴宪祥 (1980-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事模式识别, 计算机视觉等方面的研究。

E-mail: wuxianxiang@163.com

导师简介: 郭宝龙 (1962-), 男, 教授, 博导, 主要从事图像处理, 模式识别等方面的研究。

景图、球面全景图和立方体全景图。由于图像序列是实体景物在不同坐标系下的二维投影,直接对拍摄图像进行平面拼接无法满足视觉一致性。因此需要将待拼接的图像分别投影到一个标准的坐标系下,然后再进行图像的拼接。其中,柱面坐标由于其变换比较简单并且投影图像与其投影到圆柱表面的位置无关,用其描述的柱面全景图像可在水平方向上满足 360° 环视,具有较好的视觉效果,所以被广泛研究与应用。

为了正确地拼接出全景图像,要求相邻两幅图像之间要有一定的重叠区域,即待拼接的序列图像是按照实际场景内容顺序排列的。但是由于拍摄过程和后续的存储、处理等过程中,图像的排列顺序可能会变得混乱,致使不能直接进行全景图像的拼接。目前,很多图像拼接算法和图像拼接软件一般都要使用人工将顺序混乱的图像序列首先进行有效的排序。这样的人工干预非常耗时,而且如果序列图像的数量比较多时,人工排序变得非常困难。借助计算机进行序列图像自动排序的技术被提出并引起广泛关注^[4~7]。

文献[8]给出了一种基于相位相关的柱面全景图像拼接算法,论文先将图像进行柱面坐标投影,然后利用相位相关法进行拼接,存在以下 2 个问题:① 图像序列必须是顺序输入的;② 由于投影后图像的频谱会有较大的变化,柱面坐标投影后再利用相位相关法进行平移量检测往往不再有效。

本文提出了一种基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法:(1) 利用相位相关法进行图像自动排序和位移量进行计算,具体为,利用改进的相位相关法计算出归一化相位相关度的峰值及峰值点坐标,利用峰值作为相关度准则判断两幅图像是否存在重叠部分,利用最大相关度求交自动确定头尾图像,利用峰值点坐标判断两幅相邻图像的位置关系;(2) 利用柱面坐标投影公式,将环绕拍摄的序列图像投影到柱面坐标;(3) 推导了平面位移量与柱面位移量的关系式,根据计算得到的变换参数进行图像拼接并融合得到柱面全景图像。

2 柱面坐标映射

柱面投影就是找到柱面坐标和直角坐标的对应关系,将图像投影到柱面上,以便获得从投影中心(视点)观察图像在柱面上的成像,从而满足人类的视觉一致性。柱面投影原理如图 1 所示,其中, O 为

观测点,Cylinder 为投影柱面, I 为待投影图像, I' 为 I 的柱面投影图像。

将图 1(a)分别向观测点 O 所在水平面和垂直面投影,得到截面图为图 1(b)和图 1(c),其中 $P(x, y)$ 为 I 中的一点, $P'(x', y')$ 为其对应的投影点。设柱面半径 r ,投影宽度角为 θ ,图像宽度为 W ,高度为 H 。容易得到,柱面图像的宽度为 $r\theta$,高度仍为 H 。

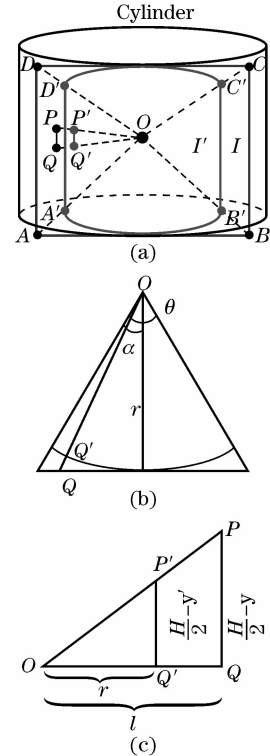


图 1 柱面坐标映射示意图。(a) 柱面映射示意图;
(b) 水平截面图;(c) 垂直截面图

Fig. 1 Cylindrical coordinate projection. (a) Cylindrical projection; (b) horizontal section; (c) vertical section

柱面投影公式为

$$\begin{cases} x' = r \frac{\theta}{2} + r \arctan \left(\frac{x - \frac{W}{2}}{r} \right), \\ y' = \frac{H}{2} - \frac{r \left(\frac{H}{2} - y \right)}{l}, \end{cases} \quad (1)$$

其反投影公式为

$$\begin{cases} x = \frac{W}{2} + r \tan \left(\frac{x' - r \frac{\theta}{2}}{r} \right), \\ y = \frac{H}{2} - \frac{\left(\frac{H}{2} - y' \right) \cdot l}{r}, \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$l = \sqrt{r^2 + (x - W/2)^2}. \quad (3)$$

在应用柱面投影公式进行柱面坐标映射时,相机的拍摄焦距 r 是一个重要的参数,其计算公式为

$$r = \frac{W}{2 \tan(\theta/2)}. \quad (4)$$

式中 θ 为每张图像所占的弧度角。一幅全景图像所占的角度为 2π 。假设相机拍摄时近似为等转角拍摄,相邻两幅图像的重合度为 η ,拼接成一幅 360° 全景图像需要图像总数为 n ,那么每一幅图像所占的弧度角就可以近似为

$$\theta = \frac{2\pi}{n} \times \frac{1}{1-\eta}. \quad (5)$$

柱面平移量 $\Delta x'$ 与平面平移量 Δx 之间的关系为

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\tan \varphi} \sin \varphi = \Delta x \cos \varphi, \quad (6)$$

其中

$$\varphi \approx \frac{\Delta x_c}{W} \theta. \quad (7)$$

3 自动排序

实现序列图像的自动排序需要解决以下 3 个关键问题:(1) 两幅序列图像之间重叠与否? 如何度量?(2) 如何确定序列图像的头图像和尾图像?(3) 如何确定两幅有重叠部分图像的位置关系? 文献[4,5]提出利用等距离匹配的思想实现序列图像的自动排序。该类方法计算量大,对噪声、运动目标和场景光照变化等稳健性差。文献[6]提出利用相位相关法实现序列图像的自动排序,但是在判断图像重叠与否时需要人工选定阈值,影响了算法的自动性和适应性。文献[7]提出了一种利用相位相关法的自动排序算法,但是论文要求序列图像大小相同,而且平移参数计算、图像的位置关系确定说明不够清楚。

本文采用改进的相位相关法确定两幅图像之间的重叠度和平移参数,利用最大相关度求交自动确定头尾图像,最后根据平移参数实现自动排序。

3.1 相位相关法

Kuglin 等人在 1975 年提出了相位相关法^[9~11],借助傅里叶变换将两幅待配准的图像变换到频域,根据傅里叶变换的移位性质,利用归一化的互功率谱直接计算出两幅图像间的平移量。相位相关法只利用互功率谱的相位信息,对图像的灰度信

息依赖性小,因此具有一定的稳健性。相位相关法基本原理如下。

设图像 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$ 之间存在平移量 $(\Delta x, \Delta y)$,其中

$$I_1(x, y) = I_2(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (8)$$

由傅里叶变换的移位特性,有

$$\hat{I}_1(u, v) = \exp[-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)]\hat{I}_2(u, v), \quad (9)$$

其归一化的互功率谱为

$$\widetilde{f}_{\text{corr}}(u, v) = \frac{\hat{I}_1(u, v)\hat{I}_2^*(u, v)}{|\hat{I}_1(u, v)\hat{I}_2(u, v)|} = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)}, \quad (10)$$

其中 \hat{I}_1 和 \hat{I}_2 分别对应 I_1 和 I_2 的傅里叶变换, \hat{I}_2^* 是 \hat{I}_2 的复共轭。

互功率谱的相位等于两幅图像的相位差。归一化的互功率谱进行逆傅里叶变换,得到一个冲激函数

$$f_{\text{corr}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)}] = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (11)$$

该函数在两幅图像的相对位移 $(\Delta x, \Delta y)$ 即“匹配点”处取最大值,其它地方接近零。找出公式(11)中的峰值点对应的位置,就可以确定平移量 $(\Delta x, \Delta y)$ 。在图像之间仅存在平移的情况下,冲激函数峰值的大小反应了两幅图像之间的相关性,在 $[0, 1]$ 区间取值。两幅图像重叠区域越大,其值越大。如果两幅图像内容相同时,其值为 1;完全不同时,其值为 0。如果两幅图像之间还存在透视、噪声或者运动目标时,那冲激函数的能量将从单一峰值分布到其它小峰值,但其最大峰值的位置有一定的稳健性。

图 2(a)和图 2(b)是大小为 256×256 的具有重叠部分的两幅图像,图 2(c)是利用相位相关法检测到 δ 函数。

3.2 序列图像自动排序算法

假设待拼接的图像数量为 N ,图像序列自动排序算法步骤如下:

① 对 N 幅序列图像的每一幅图像,按照上面提出的平移参数估计算法,计算其与每幅图像的归一化互功率谱,求逆傅里叶变换将其峰值作为图像之间的相关度。这样,一幅图像可以得到 $N-1$ 个相关度。

② 构造一个 $N \times N$ 的二维数组存储任两幅图像之间的相关度。显然,头图像和尾图像会有一幅相邻图像,其他每幅图像会有两幅相邻图像。也就是说,如果按照行从每幅图像的 $N-1$ 个相关度中选取“最大”的 2 个,则该行图像会与这两个相关度所对应的其中一幅或两幅图像相邻;如果按照列从

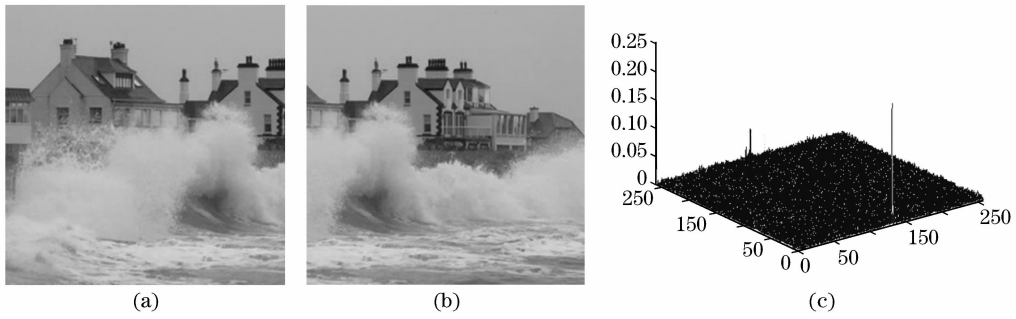


图 2 相位相关法估计平移参数。(a) 图像 1; (b) 图像 2; (c) 相位相关法检测到的 δ 函数

Fig. 2 Translation parameters estimation using phase correlation. (a) 1st image; (b) 2nd image; (c) δ function

每幅图像的 $N-1$ 个相关度中选取“最大”的 2 个，则该列对应的图像与这两个相关度所对应的其中一幅或两幅图像相邻。显然，行、列求交均为“最大”的相关度才为我们所求。按行或列，求交后均有两个值，则说明图像序列构成 360° 视角，可任选一幅为头图像，转至④；若求交后存在只剩一个值的情况，则对应为头图像或尾图像，求交后两个值的为中间图像。

③ 对于找出的这两幅头、尾图像来进一步区分。如果最大相关度所对应图像的水平平移量 $-\Delta x$ 为负，则是头图像。如果为正，则是尾图像。

④ 顺着找出的头图像逐一确定整个图像链。如果水平平移量 $-\Delta x$ 为负，则图像排在右边。

4 算法步骤

总结前面的论述，本文提出的柱面全景图像自动拼接算法步骤如下：



图 3 顺序错乱的输入图像

Fig. 3 Unordered images

表 1 相位相关度

Table 1 Phase correlation degree

Image series number	1	2	3	4	5	6	7
1	/	0.0202	0.0228	0.3454	0.0185	0.0198	0.1245
2	0.0202	/	0.1435	0.0209	0.3302	0.0203	0.0333
3	0.0228	0.1435	/	0.0181	0.0226	0.0172	0.0314
4	0.3454	0.0209	0.0181	/	0.0207	0.2429	0.0218
5	0.0185	0.3302	0.0226	0.0207	/	0.0197	0.1738
6	0.0198	0.0203	0.0172	0.2429	0.0197	/	0.0225
7	0.1245	0.0333	0.0314	0.0218	0.1738	0.0225	/

(1) 利用上文提出的自动排序算法进行图像序列的排序，并计算出相邻图像之间的平移量；

(2) 将待拼接的原始序列图像按照(1)式分别进行柱面投影，得到相应的柱面图像序列；

(3) 根据平面平移量计算出柱面平移量，进行图像拼接并融合得到柱面全景图像。

5 实验结果

图 3 是一组 7 幅大小均为 300×240 的顺序错乱的图像序列(拍于西安市兴庆公园,采用三脚架旋转拍摄,序列图像仅存在水平位移)。表 1 给出了每两幅图像的相位相关度的计算结果。每列选择 2 个最大值,每行选择 2 个最大的值。只保留行和列都取最大值的相关度,并按照前面的方法进行排序,见表 2。排序后的图像见图 4。图 5 给出排序后图像序列的柱面投影图,实验中取 $\theta=30^\circ$ 。根据平面平移量计算出柱面平移量并拼接融合得到柱面全景图见图 6。

表 2 自动排序
Table 2 Auto-sorting

Image series number	1	2	3	4	5	6	7
1	/			0.3454 (→④-191)			0.1245
2		/	0.1435		0.3302 (→⑤-188)		
3 (Head image)		0.1435 (→②-169)	/				0.0314
4	0.3454			/		0.2429 (→⑥-189)	
5		0.3302			/		0.1738 (→⑦-146)
6				0.2429		/	0.0225
7	0.1245 (→①-203)		0.0314		0.1738	0.0225	/



图 4 排序后的图像

Fig. 4 Ordered images



图 5 柱面投影图像

Fig. 5 Cylindrically projected images



图 6 柱面全景图

Fig. 6 Cylindrical panorama

6 结 论

实验表明,本文提出的柱面全景图像自动拼接算法能准确、自动地完成图像序列的自动排序与柱面拼接。采用相位相关法,借助 FFT 可保证算法的执行速度,同时也具有较高的精度和稳健性;采用“最大”相关度求交技术,可以实现序列图像自动排序,避免了手工干预;采用柱面坐标投影,提高了全景图的视觉一致性。

参 考 文 献

- 1 Brown L. G. A survey of image registration techniques[J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, **24**(4): 325~376
- 2 Zitová B., Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11): 977~1000
- 3 Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial[R]. Preliminary draft, Technical Report, MSR-TR-2004-92, 2005
- 4 Kyung Ho Jang, Soon Ki Jung, Minho Lee. Constructing cylindrical panoramic image using equidistant matching [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(20): 1715~1716
- 5 Hua Shungang, Zeng Lingyi, Ou Zongying. Fast algorithm for

- cylindrical panoramic image mosaic [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2006, **21**(4): 434~438
- 华顺刚, 曾令宜, 欧宗瑛. 一种快速的柱面全景图像拼接算法[J]. *数据采集与处理*, 2006, **21**(4): 434~438
- 6 Zhao Hui, Chen Hui, Yu Hong. An improved fully-automatic image mosaic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(2): 336~342
- 赵辉, 陈辉, 于泓. 一种改进的全景图自动拼接算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(2): 336~342
- 7 Zhao Wanjin, Gong Shengrong, Liu Quan *et al.*. An auto-sorting arithmetic for image sequence used in image mosaics[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(10): 1861~1864
- 赵万金, 龚声蓉, 刘全等. 一种用于图像拼接的图像序列自动排序算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(10): 1861~1864
- 8 Hu Shejiao, Ge Xiwang, Su Ling. Panoramic image mosaic based on domain correlation [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2007, **30**(1): 29~32
- 胡社教, 葛西旺, 苏菱. 基于相位相关的全景图像拼接[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2007, **30**(1): 29~32
- 9 C. Kuglin, D. Hines. The phase correlation image alignment method[C]. *Conference on Cybernetics and Society, New York: IEEE*, 1975: 163~165
- 10 S. Reddy, B. N. Chatterj. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 1996, **3**(8): 1266~1270
- 11 Hanzhou Liu, Baolong Guo, Zongzhe Feng. Pseudo-log-polar fourier transform for image registration [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2006, **13**(1): 17~20