

文章编号: 2095-4980(2014)02-0290-06

基于多分辨率图像融合算法的岩心图像拼接

刘 跃, 吴晓红, 王正勇, 孔紫阳

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 针对岩心图像由于光照不均, 及其自身因素导致的拼接图像出现明显拼接缝的问题, 对比分析了多种图像融合算法, 并将多分辨率图像融合算法引入到岩心图像拼接中, 该算法利用拉普拉斯金字塔结构将图像按频率进行分解, 对各个频率上的带通图像分别进行融合, 再利用金字塔反变换还原出融合结果图, 最终实现了岩心图像无缝拼接。

关键词: 岩心图像拼接; 图像融合; 多分辨率; 无缝拼接

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0290

Core images stitching based on multi-resolution image fusion algorithm

LIU Yue, WU Xiao-hong, WANG Zheng-yong, KONG Zi-yang

(School of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A variety of image fusion algorithms are comparatively analyzed in order to solve the apparent seam problem caused by the non-uniform lighting and by the features of the core images themselves. The multi-resolution image fusion algorithm is introduced into the core images stitching. The Laplacian pyramid structure is used in the algorithm, which decomposes the images according to the frequency, and fuses the band-pass images at each frequency respectively. Then the inverse transform is performed to restore the fusion results of the images, and ultimately the seamless stitching of core images is achieved.

Key words: core images stitching; image fusion; multi-resolution; seamless stitching

在实物地质工作中, 为了防止岩心由于风化、腐蚀或者反复采样而导致的原始信息丢失, 需要利用岩心图像扫描技术^[1]对钻取获得的实物岩心进行扫描, 从而将实物资料转换成数字图像资料。在岩心扫描过程中, 对于长度为 1 m 的实物岩心, 由于受传感器尺寸或者是图像采集头物距的限制, 往往不能通过 1 次成像便获得全景图, 而需通过采集多幅图像然后利用图像拼接技术, 拼接成 1 幅完整的岩心全景图像。因此, 图像拼接技术在岩心扫描中得到广泛应用。而图像融合作为图像拼接技术中的核心技术难点之一, 直接影响到最终的拼接效果, 例如, 普通的图像融合算法会使拼接图像产生明显的拼接缝或“鬼影”现象^[2]。

图 1 为岩心图像拼接过程。将待拼接的岩心图像进行预处理后利用 sift 算法进行配准^[3]。之后根据匹配特征点的变换关系利用变换矩阵将岩心图像进行合并, 最后将合并的岩心图像的重叠部分进行融合得到拼接结果图。针对拼接后图像产生拼接缝的问题, 将多分辨率图像融合算法引入到岩心图像拼接中, 得到了满意的拼接效果。

1 几种图像融合算法的分析与比较

1.1 取大取小融合法

设 P_1 和 P_2 为待融合的 2 幅图像, $P_1(x,y)$ 和 $P_2(x,y)$ 分别为 P_1 和 P_2 中对应的点的灰度值, $P(x,y)$ 为融合结果图上的对应点。像素灰度值取大融合法^[4]是以 P_1 和 P_2 以对应坐标取像素灰度值较大的点作为融合结果的对应点, 其公式描述如下:

$$P(x, y) = \text{Max}\{P_1(x, y), P_2(x, y)\} \quad (1)$$

从公式(1)可以看出像素灰度值取大融合方法比较简单,属于空间域上的简单图像融合法,速度较快,但是融合效果只在很少场合适用。同样,像素灰度值取小融合法^[4]是将 P_1 和 P_2 中的对应坐标取像素灰度值较小的点作为融合结果的对应点,公式如下:

$$P(x, y) = \text{Min}\{P_1(x, y), P_2(x, y)\} \quad (2)$$

其适用场合与像素灰度值取大融合法类似。

1.2 线性过渡融合法

重叠区域线性过渡法,也叫加权平均融合法,这种融合法使得 2 幅待拼接图像的重叠区域可以在 2 幅图像之间平滑过渡^[5]。在线性过渡融合法中,2 幅图像的加权系数随着像素点位置的不同,加权系数的不断变化,每个像素点都对应一个权值 $a(x)$ 。设 $P_1(x, y)$ 和 $P_2(x, y)$ 分别为待拼接图像 P_1 和 P_2 中对应的点,公式描述如下:

$$P(x, y) = a(x)P_1(x, y) + (1 - a(x))P_2(x, y) \quad (3)$$

$a(x)$ 为权值,其中:

$$a(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_L \\ \frac{x_R - x}{x_R - x_L} & x_L < x < x_R \\ 0 & x \geq x_R \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_L, x_R 为 P_1 和 P_2 重叠区域的左右边界; x 为重叠区域中的某个像素点。由此可以看出,由于 $a(x)$ 是 x 的线性函数,所以过渡是渐变的。线性过渡融合法对于包含冗余信息较多的图像,可以提高其信噪比,但如果拼接区域图像有平移情况,则会出现“鬼影”现象,致使融合部分图像模糊。图 2(a)为线性过渡融合法示意图, D 为 2 幅图像重叠区域。图 2(b)和图 2(c)为线性过渡融合和非线性过渡融合结果的 1 组对比图像。设 P_1 的亮度大于 P_2 的亮度,则从示意图可以看出线性过渡融合法可以使 2 幅图像间的亮度平滑过渡。

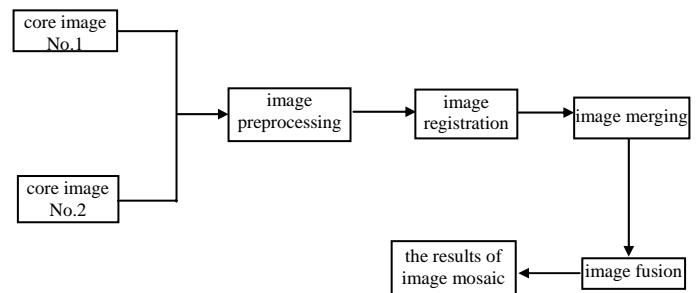
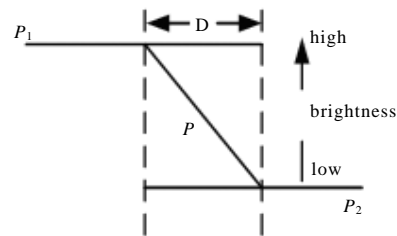
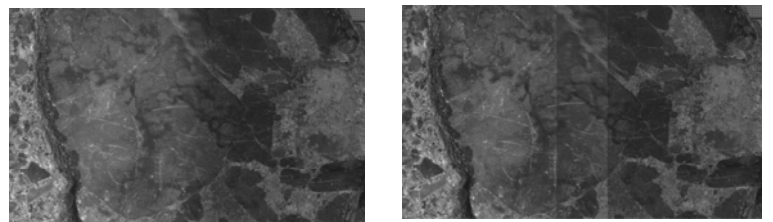


Fig.1 Stitching process of core images
图 1 岩心图像拼接过程



(a) schematic diagram of linear transition fusion



(b) result diagram of linear transition fusion (c) result diagram of nonlinear transition fusion

Fig.2 Linear transition fusion method
图 2 线性过渡融合法

1.3 多分辨率法

虽然线性过渡融合法可以一定程度减缓光照不均对拼接结果的影响,从而使融合效果得到一定的提升,但是仍然存在模糊问题,其原因在于待拼接的 2 幅图像在配准过程中由于图像存在形变,图像根据配准结果合并后重叠区域 D 中 2 幅图像的空间位置对应不完全准确。在此情况下,若重叠区域 D 过大,则融合图像会产生“鬼影”现象;若 D 过小,则融合图像会产生明显的拼接缝。由于图像频率覆盖的区间较大,因此大小特征之间相差较大,所以很难找到合适的区域 D 使融合图像既不产生明显的拼接缝,又不存在“鬼影”^[6]。基于以上问题, P J Burt 和 E H Adelson 提出了一种多尺度、多分辨率样条技术^[7]。该技术利用拉普拉斯金字塔结构对图像按频率进行降采样滤波,得到 1 组不同频率的带通图像。对每个频率上面的图像,在其重叠区域 D 进行加权操作,最后将操作后的各个频率上的图像合成新的实际图像。这样就解决了原始图像由于频率信息复杂而不能一次性找到合适的作用区间 D 的问题,这就是多分辨率法的主要思想。其具体过程为先将图像从空间域变换至频域,对频域上的图像进行带通滤波得到 1 组带通图像,然后在这一系列带通图像中对同一个通带内的图像分别进行融合,最后再将融合的结果从频域反变换回空间域,则得到了最终的结果图,其原理如图 3 所示。使用该算法进行图像融合,能够消除拼接缝和“鬼影”现象,对于岩心图像拼接非常适用。本文将多分辨率图像融合法引入到岩心图像拼接中,得到了较好的拼接效果。

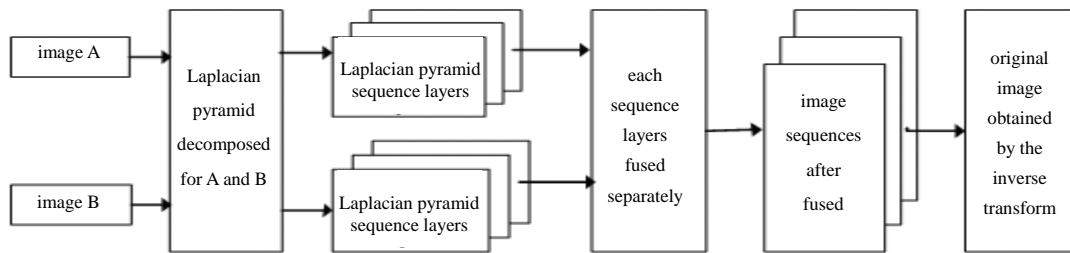


Fig.3 Multi-resolution image fusion
图3 多分辨率图像融合原理图

2 多分辨率法在岩心图像拼接中的应用

由于岩心图像信息量大,特征较多,所以岩心图像的频率往往会覆盖一个较大的频率区间,对于原始岩心图像很难找到合适的重叠区域 D 来进行加权融合。此时,先把 2 幅待拼接岩心图像信号分解为一系列的带通信号,由于每个带通信号都是经过降采样带通滤波得到的,所以每个带通图像的大小都不一样,从而导致每组带通图像的重叠区域 D 大小不一样。将待拼接 2 幅图像相应频率的带通信号分别选取合适的重叠区域 D 和合适的策略进行加权融合,最后把所有带通信号再重新合成 1 个完整的图像信号,则得到了融合结果图。

2.1 高斯金字塔

在把岩心图像分解成带通信号时,为了保证图像信息不丢失,所分解成的带通信号必须覆盖原始图像的频率范围。为了将岩心图像分解成带通信号,在实际运算中,首先对源图像进行多次降采样低通滤波,生成 1 组高斯金字塔图像^[8]。其过程的数学表达式如下:

$$G_l(x, y) = \begin{cases} P(x, y) & l = 0 \\ \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{l-1}(2x+m, 2y+n) & l > 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,高斯金字塔图像的每一层都是其上一级图像经过滤波之后进行隔行隔列降采样的结果。其中 G_l 为第 l 层高斯金字塔图像。 $P(x, y)$ 为原始图像,即高斯金字塔图像最底层。 $w(m, n)$ 是 1 个二维分离的 5×5 窗口模板函数,该模板窗口函数又称为生成核,它具有低通特性。此外,生成核函数需要满足以下条件:

- 1) 可分行: $w(m, n) = w(m)w(n)$;
- 2) 对称性: $w(1) = w(-1)$, $w(2) = w(-2)$;
- 3) 归一性: $\sum_{m=-2}^{+2} w(m) = 1$;
- 4) 等贡献性: $w(0) + 2w(2) = 2w(1)$ 。

由上述条件可得: $w(1) = w(-1) = 0.25$, 设 $w(0) = a, 0.25 < a < 0.5$, 则 $w(2) = w(-2) = 0.25 - 0.5a$ 。

在实际岩心图像拼接中, $w(0)$ 取值为 0.4, 则得到如下一个窗口模板:

$$w(m, n) = \frac{1}{400} \begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \\ 5 & 25 & 40 & 25 & 5 \\ 8 & 40 & 64 & 40 & 8 \\ 5 & 25 & 40 & 25 & 5 \\ 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

此外,还可以对 $w(0)$ 取其他值而得到不同的窗口模板函数,但必须满足上述 4 个条件。

2.2 拉普拉斯金字塔

拉普拉斯金字塔图像^[9]是高斯金字塔图像通过两两相减而获得的带通图像。由于高斯金字塔图像 G_0, G_1, \dots, G_N 是 1 组低通图像,且其最高频不同,所以两两相减所得到的拉普拉斯金字塔图像实际上是 1 组带通图像,也就是源图像在不同频带内的带通图像,这些带通图像覆盖了源图像的所有频率范围。但是由于在生成高斯低通图

像的过程中,上下层图像之间经过了采样处理,那么上下层图像的尺寸就会存在差异,所以在进行相减之前首先要对上层图像进行插值,使两者的尺寸相同。即是将 $(M+1) \times (N+1)$ 大小的图像通过插值扩展成 $(2M+1) \times (2N+1)$, 将 G 插值 1 次后得到的扩展图像记为 $G_{l,1}$, 它们的数学关系为:

$$G_{l,1}(x,y) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m,n) G_l \left(\frac{x+m}{2}, \frac{y+n}{2} \right) \quad (7)$$

当 $\frac{x+m}{2}$ 和 $\frac{y+n}{2}$ 为整数时才进行如上运算。经过插值处理后,第 l 层图像尺寸与 $l-1$ 层图像相同,于是可以进行相减操作。令:

$$\begin{cases} LP_l = G_l - G_{l+1,1} & 0 \leq l \leq N-1 \\ LP_N = G_N & l = N \end{cases} \quad (8)$$

则 LP_0, LP_1, \dots, LP_N 构成拉普拉斯金字塔。其中第 N 层已经没有上层图像,所以直接定义 $LP_N = G_N$ 。此过程相当于是对岩心图像进行带通滤波,得到不同频带内的岩心图像。对各个频带内的岩心图像,利用加权法融合,最后再做金字塔反变换重建出融合结果图。反变换过程可由式(9)得出:

$$\begin{cases} G_l = LP_l + G_{l+1,1} & 0 \leq l \leq N-1 \\ G_N = LP_N & l = N \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可得,将 LP_0, LP_1, \dots, LP_N 图像序列的最上层图像 LP_N 通过插值扩展与其下 1 层图像相加,依次向下执行,最后得到 G_0 , 即高斯金字塔底层图像,也就是最终的融合结果图。

2.3 加权系数的选取

在得到了 P_1 和 P_2 两幅图像重叠区域的拉普拉斯金字塔序列后,将之分别记为序列 LP_1 和序列 LP_2 , 需要对 LP_1 和 LP_2 的各个对应层进行加权融合。针对实际岩心图像,2 幅图像之间或多或少会存在一定的光照差异,同时由于岩心图像细节特征主要集中在图像的高频部分,而反映图像亮暗的信息主要集中在图像的低频部分。为了让最终的融合结果既能消除光照不均的影响,使 2 幅图像间的亮暗平滑过渡,又不产生“鬼影”,因而对图像的高频和低频部分分别采取不同的加权融合策略,即是对 2 幅图像的拉普拉斯金字塔序列相应频率层分别采用不同的加权方法,如平均加权、线性过渡加权、基于梯度值加权^[10]等。本实验中,取拉普拉斯金字塔图像层数 $N=4$ 。具体加权系数的选取如下:

- 1) 顶层图像频率最低,对于最终融合图像亮暗影响最大,所以采取线性过渡法的加权系数进行加权。
- 2) 对于下 3 层图像,频率较高,描述了岩心图像的细节特征,为了消除“鬼影”,采用 1 种最佳拼接缝^[11-12]的加权融合方法,具体方法如下:
 - a) 对于 P_1 和 P_2 的高斯底层图像,用文献[11]或[12]的方法建立 1 条最佳拼接缝;
 - b) 对 P_1 和 P_2 拉普拉斯底层图像进行加权时,根据 a) 中最佳拼接缝的位置,融合后图像位于最佳拼接缝左侧的点都取 P_1 上的点,位于最佳拼接缝右侧的点都取 P_2 上的点。即选取最佳拼接缝的左侧对应权值 $a(x,y)$ 为 1,最佳拼接缝的右侧对应权值 $a(x,y)$ 为 0;
 - c) 下 3 层中的其他 2 层采取同样的加权策略。其中最佳拼接缝掩膜由原始 P_1 和 P_2 图像的高斯金字塔的相应层建立获得。

此外,对于取 $N=4$ 层拉普拉斯金字塔图像,还有其他加权系数选取策略,如上 2 层采取线性过渡系数,下 2 层采用最佳拼接缝掩膜等。经过大量实验验证,针对岩心图像实际特点,采用如上所述的加权系数策略实际工

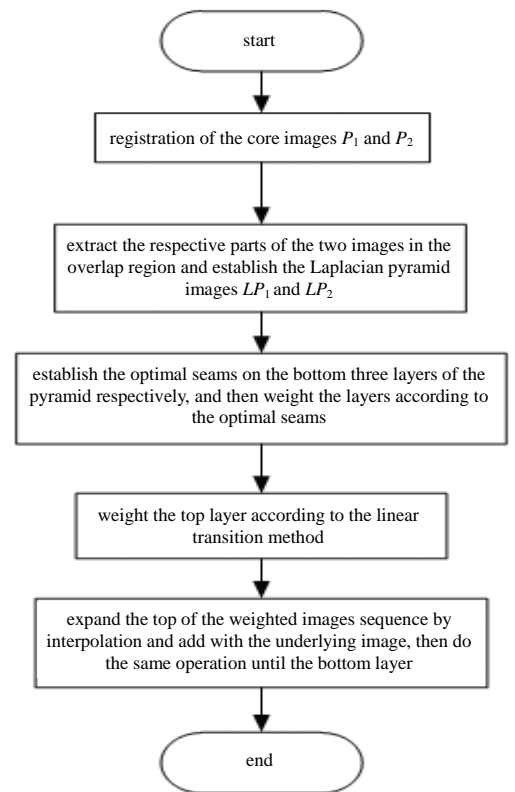


Fig.4 Flow chart of image stitching

图 4 图像拼接流程图

程效果最优。由此也进一步说明了岩心图像的特点,就是亮度信息主要集中在了某个低频范围内,其他很大频率范围都表征了岩心图像的细节信息,符合岩心图像特征丰富的特点。

2.4 算法流程

根据以上分析,设待拼接的 2 幅岩心图像为 P_1 和 P_2 ,先将 2 幅图像进行配准以及合并,然后对合并后 2 幅图像的重叠区域进行图像融合,本实验对岩心图像拼接的流程如图 4 所示。

3 实验结果及分析

图 5(a)、图 5(b)为待拼接图像,用最大像素灰度值和线性过渡法得到的拼接结果分别如图 5(c)、图 5(d)所示,可以看出用最大像素灰度值法拼接的图 5(c)存在亮度差异和明显的拼接缝,用线性过渡融合法拼接的图 5(d)出现了轻微模糊和“鬼影”。将多分辨率融合法引入到岩心图像拼接中,利用上述多分辨率融合算法步骤对图像进行拼接融合,得到结果如图 5(e)所示。可以看出,过渡带没有明显的亮度差异和拼接缝,同时也消除了“鬼影”和模糊现象。

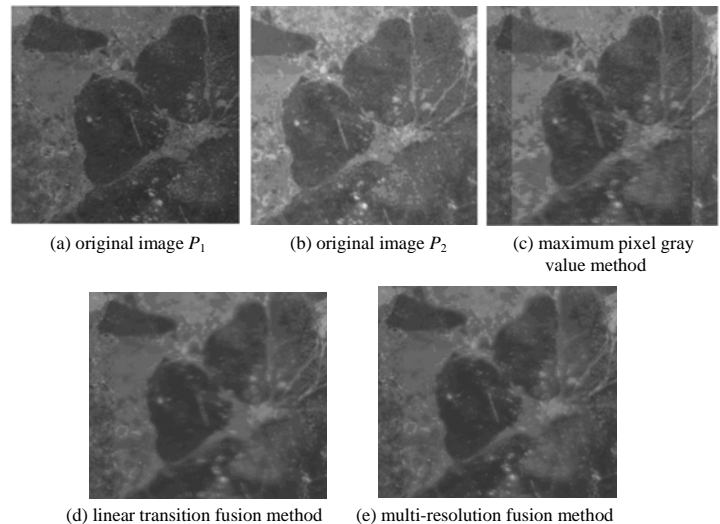


Fig.5 Comparison of experimental results

图 5 实验结果对比

4 结论

针对岩心图像信息量大,细节丰富以及岩心图像受光照不均影响等实际情况,对比了在岩心图像拼接中常用的图像融合算法。由于普通融合算法存在不足,将多分辨率法引入到岩心图像拼接中,使得拼接效果得到大幅提升,满足了实际工程应用中岩心图像的拼接要求,具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 杨玉臣,马玉忠. 岩心图像扫描技术的开发及应用[J]. 录井技术, 2002,13(2):43-46. (YANG Yu-cheng, MA Yu-zhong. Core scanning technology development and application[J]. Mud Logging Technology, 2002,13(2):43-46.)
- [2] 潘恒辉. 图像拼接中鬼影消除算法研究[J]. 舰船电子工程, 2010,30(3):125-128. (PAN Heng-hui. Research on Eliminating Ghosting in Image Mosaic[J]. Ship Electronic Engineering, 2010,30(3):125-128.)
- [3] 吴晓红,罗代升. 基于 SIFT 特征提取的高清晰岩心图像自动配准[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2009,46(1):124-128. (WU Xiao-hong, LUO Dai-sheng. SIFT-based feature extraction of high-definition core images automatic registration[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2009,46(1):124-128.)
- [4] 魏世超. 图像融合方法研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2012. (WEI Shi-chao. Methods Research on Image Fusion[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012.)
- [5] 罗文斐,李岩,王小铭. 基于平滑渐进图像镶嵌的新算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2004,40(36):50-53. (LUO Wen-fei, LI Yan, WANG Xiao-ming. A New Graduation Algorithm in Image Mosaic[J]. Computer Engineering and Applications, 2004,40(36):50-53.)
- [6] 华骅. 图像拼接系统算法研究及实现[D]. 成都:四川大学, 2007. (HUA Hua. Study on Image Mosaic System[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.)
- [7] Burt P J, Adelson E H. A multiresolution spline with application to image mosaics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983,2(4):217-236.
- [8] 孔紫阳. 岩心扫描图像镶嵌系统的设计与实现[D]. 成都:四川大学, 2010. (KONG Zi-yang. Research and Implementation of Core Image Mosaic System[D]. Chengdu: Sichuan University, 2010.)
- [9] 武杰,王峰,周锐,等. 基于多分辨率分析的图像融合方法研究[J]. 科技创新与生产力, 2011(8):71-73. (WU Jie, WANG Feng, ZHOU Rui, et al. Research on Image Fusion Based on Multi-resolution Analysis[J]. Taiyuan Science and Technology, 2011(8):71-73.)

(下转第 298 页)