中国科学 F辑: 信息科学 2009 年 第 39 卷 第 7 期: 742～750
www.scichina.com info.scichina.com

《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

基于刀刃曲线分层定位的 DMC 影像修复方法

潘俊, 王密*, 李德仁, 冯甜甜

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079
* 通讯作者 E-mail: wangmi@lmars.whu.edu.cn

收稿日期: 2008-03-06; 接受日期: 2009-01-12
国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB701300)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA12Z120) 和武汉市青年科技晨光计划 (批准号: 200750731253) 资助项目

摘要 针对面阵数码航空相机 DMC 彩色合成影像存在的色彩过渡不平滑现象, 提出了一种基于刀刃曲线分层定位的影像修复方法. 该方法基于刀刃曲线, 采用分层的策略能自动确定过渡区域和拼接线的位置. 在此基础上, 通过随后 CCD 影像间的整体重建和过渡区域的局部重建来完成 DMC 影像的修复处理. 实验取得了较好的效果, 验证了算法的有效性.

关键词
DMC 影像
后处理
镶嵌
影像修复

0 引言

随着数据获取技术的飞速发展, 数码航空相机得以问世, 面阵数码航空相机是其中的一种. 它与传统胶片相机相比, 具有更好的几何稳定性, 更高的辐射质量, 快速获取, 不需晒像、影像扫描等特点 [1~3], 而且其投影方式仍然为中心投影, 传统的处理方法仍然适用, 因此得到了广泛的应用. 在当前的主流商业面阵数码航空相机中, Z/I Imaging 公司的 DMC(digital mapping camera) 数码航空相机在全球很多国家已经得到了广泛的应用, 我国目前已经购买了多台 DMC 数码航空相机, 并且在很多工程项目中得到了应用. DMC 数码航空相机为了克服直接生产大面阵 CCD 传感器在成本和技术上的困难, 通过多镜头组合的方式, 将多个小面阵的 CCD 传感器组合形成虚拟的大面阵 CCD 传感器, 从而使获取的影像在具有高几何分辨率的同时也具有较大的地面覆盖范围 [4~6].

DMC 数码航空相机由 8 个同步工作的 CCD 相机组合而成: 4 个多光谱相机 (生成 R, G, B 和近红外影像) 和 4 个全色相机 (生成 4 幅具有一定重叠的高分辨率全色影像), 每个 CCD 相机都有自己的镜头. DMC 在完成航空飞行任务获取原始的影像数据后需要进行后处理 (post-processing) 来生成各种影像产品: 首先对各镜头获取的影像进行几何和辐射校正, 将 4 幅全色影像镶嵌并进行几何转换形成一个大幅面的虚拟影像. 虚拟影像具有一个新的、虚拟的相机常量, 能被看作一个理想的中心投影影像. 同时, R, G, B 三个波段的影像通过颜色匹配生成彩色影像. 然后将虚拟影像和彩色影像进行融合生成 DMC 彩色合成 (color composite) 影像 [7~11]. 通常由后处理软件包生成的 DMC 彩色合成影像具有很好的影像质量, 但在某些特殊情况下, 4 个面阵 CCD 镶嵌过程没有完全消除 CCD 影像间的辐射差异, 从而使其仍然存在色彩过渡不平滑现象. 由于 DMC 彩色合成影像是几个小 CCD 影像的镶嵌与融合的结果, 不存在明显的接缝, 所以通常镶嵌处理中的接缝消除算法 [12~21] 不再适用. 文献 [22] 对这种情况的处理进行了一个尝试, 但其不能自动确定过渡区域和拼接线的位置. 文献 [23] 对自动确定过渡区域和拼接线的位置的可行性做了进一步的研究, 但方法不够稳健, 且没有考虑到各种情况. 因此, 本文提出了一种基于刀刃曲线分层定位的影像修复方法.

引用格式: 潘俊, 王密, 李德仁, 等. 基于刀刃曲线分层定位的 DMC 影像修复方法. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(7): 742–750

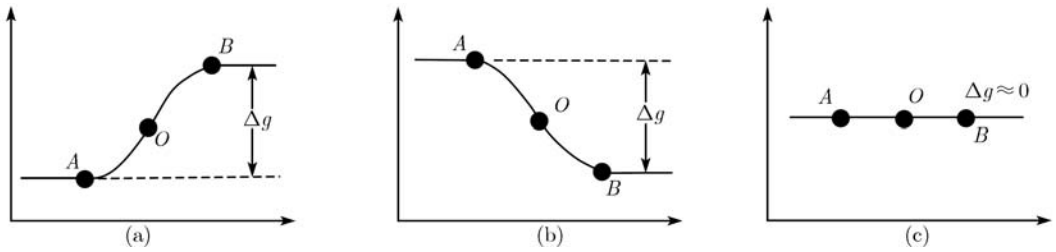


图 1 过渡区域附近像素值分布曲线示意图

1 影像修复方法

根据过渡区域附近像素值的分布, 存在色彩过渡不平滑现象的 DMC 彩色合成影像在过渡区域附近像素值的分布曲线存在 3 种情况, 如图 1 所示. 图 1(c) 表示色彩过渡平滑的情况, 当然这种情况不需要再进行修复; 图 1(a) 和 (b) 分别表示两种色彩过渡不平滑的情况. 图 1 中, 曲线表示过渡区域附近像素值的分布情况, A、B 两点之间的区域为过渡区域, O 点为拼接线所在位置, Δg 表示在过渡区域附近 CCD 影像之间存在的辐射差异. 可以看出, 这种色彩过渡不平滑现象发生在一个较宽的区域, 过渡区域附近像素值的分布具有对称性.

这种现象的另一个特点是情况的复杂性. 在实际影像中, 图 1 中所示的 3 种情况可能同时出现在同一过渡区域的不同部分中, 即在同一过渡区域内, 某些部分可能是图 1(a) 所示的情况, 某些部分可能是图 1(b) 所示的情况, 而某些部分又可能是图 1(c) 所示的情况.

导致这种现象的因素有很多. 比如不同相机的 CCD 在成像时响应存在的差异性, 同一相机的 CCD 不同部分的响应存在的差异性, 外在的成像条件的影响等, 而在后处理过程中又没有能够完全消除这些影响.

1.1 处理流程

DMC 彩色合成影像是几个 CCD 影像的拼接和融合结果, 其 CCD 影像拼接过程如图 2 所示, 其中的几何处理过程如图 2(a) 所示 [2,3,11]. 图 2(a) 中虚线矩形区域表示 DMC 彩色合成影像的范围, 中间的几个相互交错的多边形区域表示连接点区域. 通过分析 DMC 彩色合成影像, 本文假定拼接的辐射处

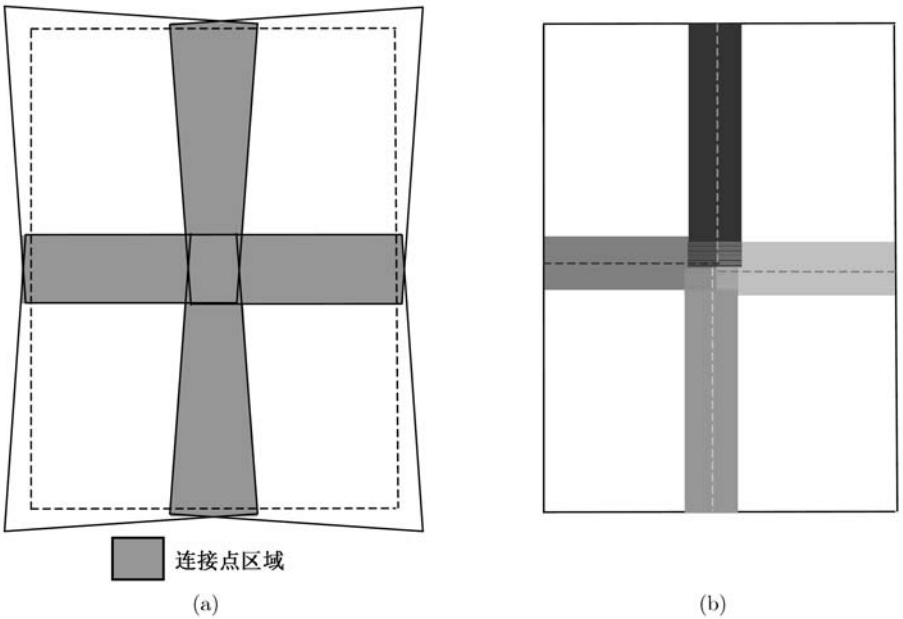


图 2 DMC 的 CCD 影像拼接过程

理过程如图 2(b) 所示. 图 2(b) 中每两个相邻的 CCD 影像之间的矩形区域表示一个过渡区域, 过渡区域中间的虚线表示该过渡区域内的拼接线. 一幅 DMC 彩色合成影像一共有 4 个过渡区域和 4 条拼接线. 镶嵌时, 在拼接线左侧区域, 取左影像的像素值; 在拼接线右侧区域, 取右影像的像素值; 在过渡区域内, 通过羽化等处理在色彩上获得一个平滑的过渡.

设 I_1、I_2 分别表示左、右 CCD 影像, W 表示镶嵌处理的权函数, Δg 表示过渡区域附近 CCD 影像之间存在的辐射差异; R_L, R_T, R_R 分别表示左影像区域、过渡区域和右影像区域, 则镶嵌处理可以用如下公式表示 [14,16]:

$$I=\begin{cases} I_1(x,y), & (x,y)\in R_L,\\ I_1(x,y)+W(x,y)\cdot\Delta g, & (x,y)\in R_T,\\ I_2(x,y), & (x,y)\in R_R. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $0\leqslant W(x,y)\leqslant 1$, I 是镶嵌结果. 如果能确定拼接线和过渡区域的具体位置, 得到辐射差异 g, 就可以对影像进行修复, 从而消除 CCD 影像间存在的辐射差异. 完整的处理如图 3 所示, 其中, 最关键的步骤是确定过渡区域和拼接线的位置, 这是因为:

1) 过渡区域和拼接线的大致位置虽然是已知的, 但是其具体位置并没有与 DMC 影像存放在一起, 对于用户而言是未知的, 而且对于不同的影像, 位置也是不同的;

2) 过渡区域的位置是计算 CCD 影像之间存在的辐射差异所必需的;

3) 过渡区域和拼接线的位置是进行影像修复、改正 CCD 影像间存在的辐射差异的基础.

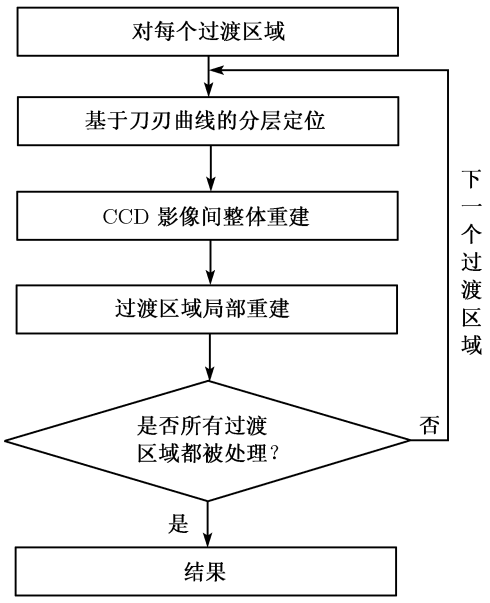


图 3　处理流程

1.2　基于刀刃曲线的分层定位

由于在 DMC 彩色合成影像中并不存在明显不连续的地方, 辐射差异也发生在一个相对较宽的区域内, 所以不能直接确定过渡区域和拼接线的位置. 本文采用间接的方法, 在确定过渡区域位置的基础上来确定拼接线的位置. 根据过渡区域内像素值分布曲线的中心对称性, 拼接线的位置就是对称中心, 因此确定了过渡区域的位置之后, 其中点就是拼接线的位置.

本文借鉴边缘检测原理来确定过渡区域的具体位置, 并进而确定拼接线的位置. 理想的边缘是存在不连续的地方, 即在较窄区域发生的急剧变化. 边缘检测算子能够利用一阶导数极值或二阶导数过零点的性质检测出在较窄区域发生的具有阶跃状和屋顶状等变化的边缘, 但是由于拼接线附近灰度值分布的阶跃状变化发生在一个较宽的区域 (即过渡区域) 内, 因此不能直接采用边缘检测算子来定位.

考虑到地物的连续性, 而且单镜头 CCD 影像在镶嵌处理前都经过了辐射校正, 因此理想情况下, (1) 式中的 I_1 和 I_2 可以看成是两个具有不同 "高度" 的灰度平面. 由于色彩过渡不平滑现象只是发生在垂直于拼接线的方向上, 因此可以将二维问题进行简化, 以便于处理. 设 $I_1(x)=a_1$, $I_2(x)=a_2$, 则有 $\Delta g=a_2-a_1\neq 0$. 则在一维情况下, 设 A、B 点处坐标分别为 x_A、x_B, 由 (1) 式有:

$$I=\begin{cases} a_1, & x<x_A,\\ a_1+W(x)\cdot(a_2-a_1), & x_A\leqslant x\leqslant x_B,\\ a_2, & x_B<x. \end{cases} \quad (2)$$

又根据图 1(a) 和 (b) 所示, 在过渡区域内, 过渡区域附近像素值的分布曲线是一个渐变的曲线, 具有对称性, 具有刀刃曲线相似的形状, 因此本文根据文献 [24] 中刀刃曲线的模拟方法来拟合权函数 W. 则

在一维情况下, 权函数可以表示为

$$W(x) = A\cos Bx + C. \tag{3}$$

图 1(a) 和 (b) 所示的 2 种情况则对应于不同的取值范围. 设 $u = Bx$, 则 (3) 式简化为

$$W(u) = A\cos u + C. \tag{4}$$

由于 (2) 式在 A、B 点处连续, 所以 (2) 式可导, 其导数可以表示为

$$\frac{\partial I}{\partial u} = \begin{cases} 0, & u < Bx_A, \\ -A(a_2 - a_1)\sin u, & Bx_A \leqslant u \leqslant Bx_B, \\ 0, & Bx_B < u. \end{cases} \tag{5}$$

$\frac{\partial I}{\partial u}$ 可导的充要条件是当 $u = Bx_A$ 时, $-A(a_2 - a_1)\sin u = 0$, 且当 $u = Bx_B$ 时, $-A(a_2 - a_1)\sin u = 0$, 即 $x_A = k\pi/B$, $x_B = (k+1)/\pi/B$, 其中 k 为整数.

因此, 当 $\frac{\partial I}{\partial u}$ 可导的条件不满足时, 则在 A、B 点处, $\frac{\partial I}{\partial u}$ 不可导, A、B 为其跳跃间断点, 故此时 A、B 点处不连续, 可以检测出它们的位置.

当 $\frac{\partial I}{\partial u}$ 可导的条件满足时, $\frac{\partial I}{\partial u}$ 可导, 其导数为

$$\frac{\partial^2 I}{\partial u} = \begin{cases} 0, & u < Bx_A, \\ -A(a_2 - a_1)\sin u, & Bx_A \leqslant u \leqslant Bx_B, \\ 0, & Bx_B < u. \end{cases} \tag{6}$$

此时在 A、B 点处, 有 $\cos u = \pm 1$, 则 $-A(a_2 - a_1)\sin u \neq 0$, 所以 $\frac{\partial^2 I}{\partial u}$ 不可导, A、B 为其跳跃间断点, 故此时 A、B 点处不连续, 可以检测出它们的位置.

综上所述, 无论像素值的分布曲线是否具有二阶导数, 其一阶或二阶导数在 A、B 两点处必然存在不连续情况, 据此可确定出 A、B 点的具体位置. A、B 点之间的区域即为过渡区域, A、B 的中点即为拼接线所在的位置. 过渡区域定位示意图如图 4 所示, 图 4(a) 和 (b) 分别对应于图 1(a) 和 (b) 中的情况. 需要指出的是, 上面的证明是基于连续分布的, 但是影像是离散的, 过渡区域附近的像素值的分布曲线也是在离散情况下获得的, 因此导数计算由差分替代.

由于目前的边缘检测方法只能应用于单波段影像 [25], 而主分量变换能将多波段影像转换成为一些相互之间只有很小相关性的分量, 第一主分量包含大部分信息量, 剩余的主分量所包含的信息依次减少. 因此, 本文采用主分量变换的方法, 将获得的第一主分量选作定位处理的单波段影像. 为了增强方法的稳健性, 自动定位处理采用了分层的处理策略. 具体步骤如下:

1) 将每两幅相邻 CCD 影像之间一定宽度范围的影像区域作为搜索区域, 对搜索区域影像进行主分

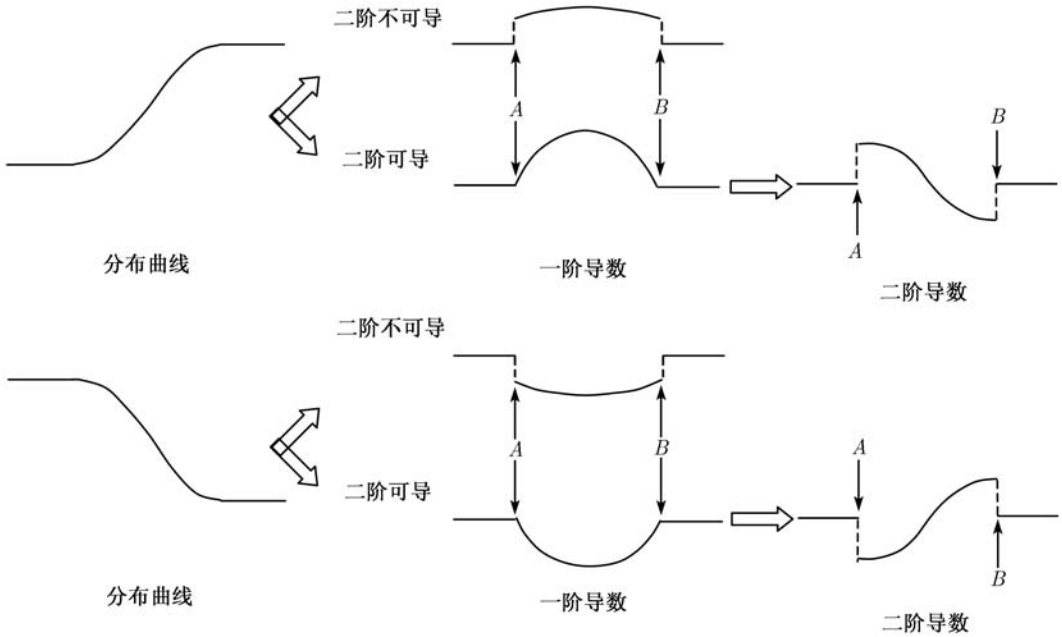


图 4 过渡区域定位示意图

量变换, 将第一主分量作为定位处理的单波段影像;

2) 将搜索区域的第一主分量影像分割成大小相等的小块, 每个小块包含一小段拼接线;

3) 采用 9 像元平均的方法计算第一主分量影像的金字塔影像;

4) 取平行于拼接线的影像行或列的平均值来获得每个金字塔影像层每一影像块的初始的像素值分布曲线, 由于像素值的分布曲线是在离散情况下获得的, 为了获得更平滑的分布曲线, 对获得的初始的像素值分布曲线进行一维均值滤波. 然后计算分布曲线的二阶差分;

5) 利用二阶差分在每个影像块中检测过渡区域的位置. 检测处理在金字塔影像层中由上而下依次进行, 首先在分辨率最低的顶层影像层中进行, 在分布曲线的二阶差分中搜索最大值和最小值, 它们的位置即为过渡区域的位置. 对随后的影像层, 将上一层搜索得到的位置作为初始的位置, 在初始位置附近小范围内搜索更准确的位置.

6) 采用投票策略来确定过渡区域的最终位置. 统计各影像块检测得到的过渡区域的位置, 将出现频率最高的位置作为过渡区域的最终位置, 过渡区域中间的位置即为拼接线的位置.

1.3 CCD 影像间整体重建

CCD 影像间的整体重建在一个较大的尺度上进行, 在过渡区域两侧一个较宽的范围内, 对 DMC 影像进行重建, 消除 CCD 影像之间存在的辐射差异, 具体步骤如下:

1) 计算 CCD 影像之间存在的辐射差异. 如图 1 所示, 过渡区域两侧一定大小区域内计算的影像均值的差值即为 CCD 影像之间存在的辐射差异 Δg.

2) 采用线性方法消除 CCD 影像之间的辐射差异. 为了获得更平滑的色彩过渡, 辐射差异用较宽的区域来改正, 改正值随像素和拼接线之间的距离变动, 距离拼接线越近的像素改正值越大; 在拼接线处, 改正值为 $\Delta g/2$. 这与一些镶嵌算法中的接缝消除算法相似 [12,19].

CCD 影像间的整体重建的一维示意图如图 5 所示, 其在拼接线两侧宽度为 L 的范围内分别进行, 虚线表示处理前拼接线附近像素值的分布情况, 实线表示处理后拼接线附近像素值的分布情况. 由于处理前影像在拼接线附近像素值的分布是连续的, 所以在大尺度上虽然在整体上会消除 CCD 影像间的辐射差异, 但是在过渡区域的局部区域, 它将打断原有像素值的连续性, 在拼接线处形成新的 “接缝”.

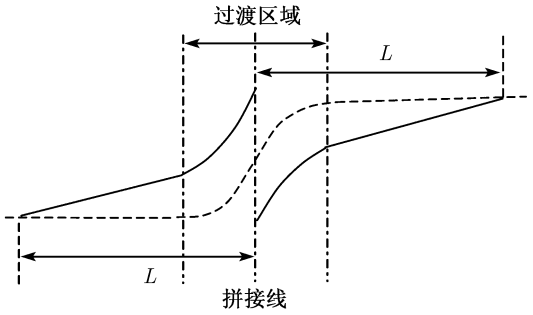


图 5 CCD 影像间整体重建

1.4 过渡区域局部重建

过渡区域的局部重建是在 CCD 影像间的整体重建的基础上进行的, 它在过渡区域内, 它将消除整体重建形成的新 “接缝”, 从而彻底消除 DMC 彩色合成影像存在的色彩过渡不平滑现象, 其关键问题是得到恰当的改正值.

过渡区域局部重建的一维示意图如图 6 所示, 虚线表示整体重建后的情况, 实线表示局部重建后的情况. 设 $\Delta g'$ 表示 A、B 两点之间的辐射差异 (A、B 两点之间的区域为过渡区域), $f(x)$ 表示 “打断” 处理之后的像素值的分布曲线, 又设在 A 点有 $f(x_A) = y_A$, 在 B 点有 $f(x_B) = y_B$. 因为采用线性的方法, 所以在一维情况下, 过渡区域内期望影像的像素值的分布曲线是一条直线, 斜率为 $g'/(x_B - x_A)$; 又由于 A 点在直线上, 所以一维情况下期望影像 I_E 可表示为

$$I_E = \frac{(x - x_A)\Delta g'}{x_B - x_A} + y_A. \tag{7}$$

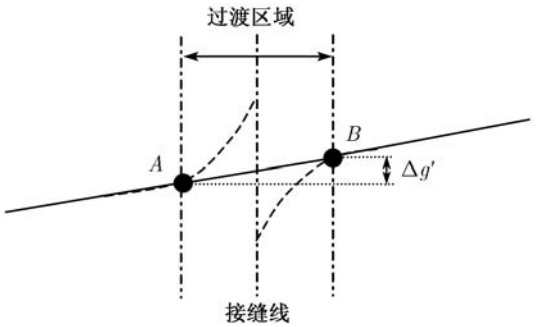


图 6 过渡区域局部重建

设 I_B 表示处理后的影像, 则各像素的改正值即为: $I_E - I_B$. 通过这种方法就可以获得恰当的改正值.

2 影像修复实验

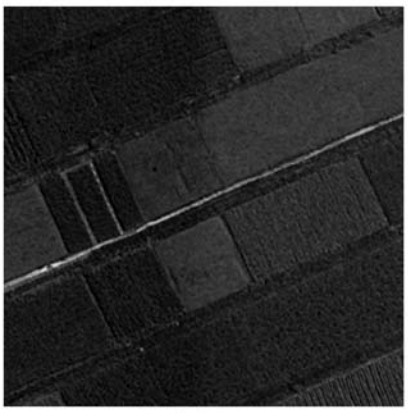
用于实验的 DMC 彩色合成影像是由 DMC 的后处理软件包生成的, 影像大小为 7680×13824 像素. 图 7 给出了一个典型的存在色彩过渡不平滑现象的 DMC 彩色合成影像的处理效果, 包括处理结果以及 6 个区域的细节图. 图 7(a) 是处理前的影像, 图 7(b) 是本文方法的处理结果. 图 7(g)~(j) 分别为图 7(c)~(f) 在结果影像中对应的区域, 它们显示了处理效果的细节, 处理前后细节影像的对比更清楚的反映了处理的效果. 从图中可以看出 CCD 影像之间的色彩不够平滑, 同种地物在过渡区域附近呈现出不同的颜色, 经过处理后, 原影像中明显的色彩过渡不平滑现象已经被消除了, 同种地物的色彩也趋于一致, 影像质量得到了明显的改善. 通过实验可以看出, 过渡区域存在的主要的辐射差异已经被消除了, 实验取得了成功, 这也验证了算法的可行性和效果.



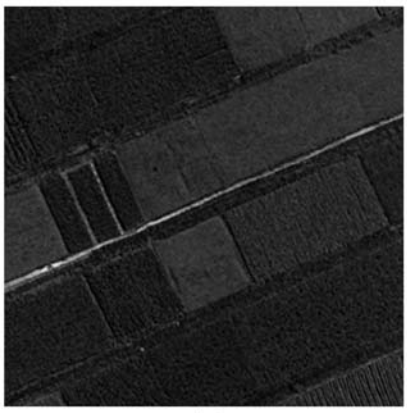
(a)



(b)



(c)



(g)

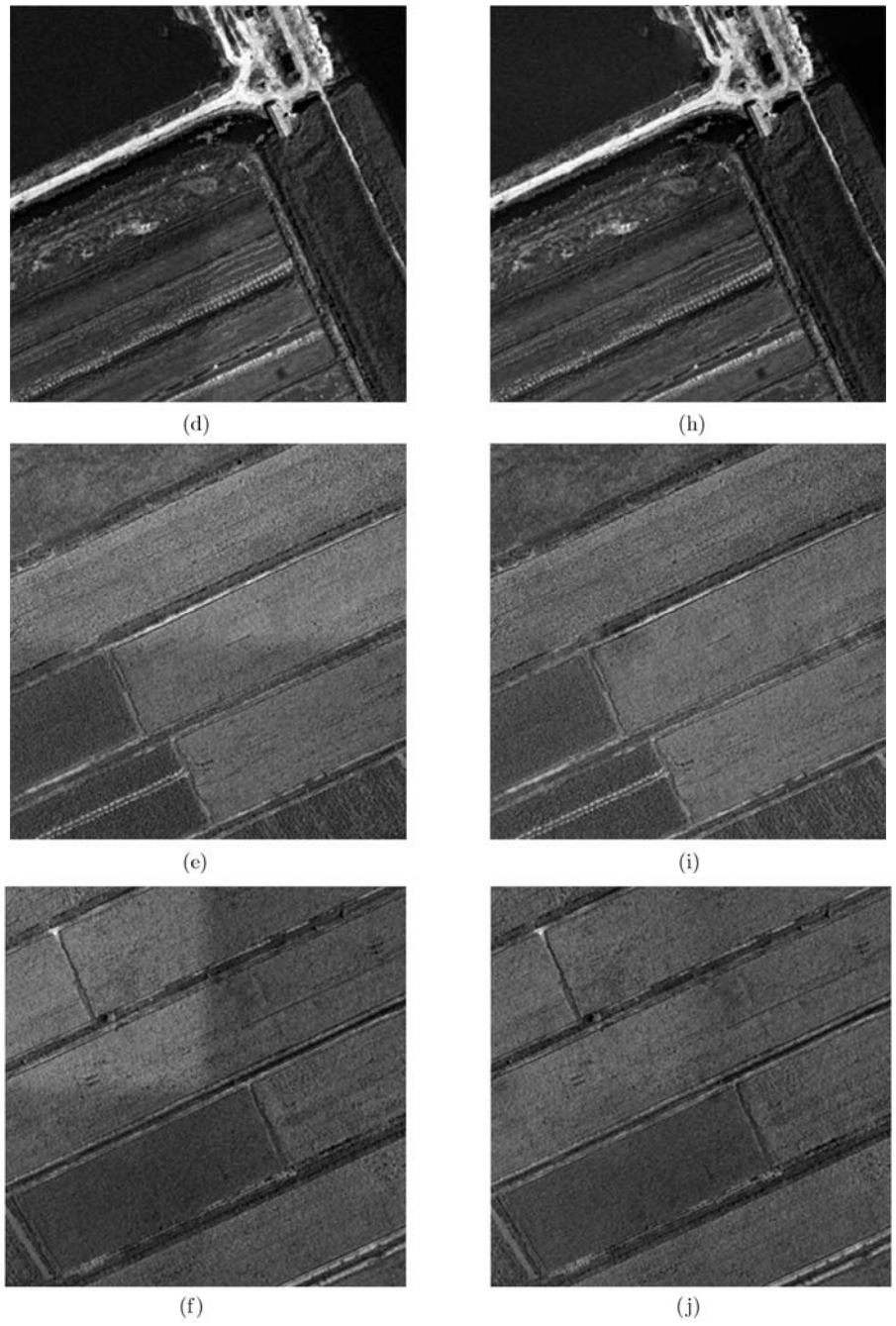


图 7　处理效果

(a) 原始 DMC 彩色合成影像; (b) 处理结果; (c)~(f) 原始影像中几个区域的细节; (g)~(j) 结果影像中对应的几个区域的细节

3　结论

消除 DMC 彩色合成影像存在的色彩过渡不平滑现象, 主要存在两个困难: 一个是过渡区域和拼接线的自动定位, 实际情况的复杂性增加了定位的难度; 另一个是基于过渡区域和拼接线而进行的影像修复, CCD 影像之间原有像素值的连续性使得完全消除 CCD 影像之间存在的辐射差异变的困难, 地物特征分布的不规则性也会影响影像修复的效果.

本文在分析这种色彩过渡不平滑现象的特点的基础上, 提出了一种基于刀刃曲线分层定位的影像修复方法. 一方面, 为了能够自动定位过渡区域和拼接线的位置, 基于刀刃曲线, 从理论上分析了过渡区域和拼接线定位的可行性, 并通过实验进行了验证, 证明了理论分析的正确性; 同时为了增强方法的稳健性与定位的准确性, 采用了分层处理策略以及投票机制, 逐步精确过渡区域和拼接线的具体位置. 另一方面, 为了尽可能消除 CCD 影像之间存在的辐射差异, 并减小地物特征在影像修复过程中的影响, 采用不同尺度的调整来优化处理, 先进行 CCD 影像间的整体重建, 在大范围内消除辐射差异, 然后进行过渡区域的局部重建, 进而在过渡区域内消除局部像素值的不连续性. 算法在同样的参数设置下对大量影像进行了实验, 实验结果验证了算法的可行性与效果, 且比已有的方法更稳健.

本文方法主要的缺点在于它可能会使某些局部区域的影像像素值存在失真现象. 出现这种现象的原因在于本文的方法基于如下假定: 局部区域内的地物的像素值具有极大相关性. 在大部分情况下, 这种假定是能够满足的, 而且多尺度的分层策略以及投票机制已经被用于增强方法的稳健性. 当这种假定不满足的时候, 采用更稳健的策略来对方法进行优化可能会避免像素值的失真, 进一步提高处理效果.

致谢 感谢武大吉奥信息工程技术有限公司为本文的工作提供了大量的实验数据.

参考文献

1 Hinz A. The Z/I imaging digital aerial camera system. In: Fritsch D, Spiller R, eds. Photogrammetric Week'99. Heidelberg: Wichmann, 1999. 109–115

2 Tang L, Dörstel C, Jacobsen K, et al. Geometric accuracy potential of the digital modular cameral. In: Proceedings of IAPRS, Vol. XXXIII, Part B4/3. Amsterdam, 2000. 1051–1057

3 Madani M, Dörstel C, Heipke C, et al. DMC practical experience and accuracy assessment. In: Proceedings of ISPRS, Vol XXXV, B2. Istanbul, 2004. 396–401

4 Dörstel C, Zeitler W. Geometric calibration of the DMC: method and results. Int Arch Photogramm Remot Sens, 2002, 34(1): 324–333

5 王慧, 吴云东, 张永生. 面阵 CCD 数字航测相机影像几何拼接误差模型与分析. 测绘学院学报, 2003, 20(4): 257–262

6 林宗坚, 宣文玲, 孙杰, 等. 由小面阵 CCD 组合构成宽角航空相机. 测绘科学, 2005, 30(1): 94–98

7 Hinz A, Dörstel C, Heier H. Digital modular camera: system concept and data processing workflow. In: Proceedings of IAPRS, Vol. XXXIII, part B2. Amsterdam, 2000. 164–171

8 Hinz A, Dörstel C, Heier H. DMC-The digital sensor technology of Z/I Imaging. In: Fritsch D, Spiller R, eds. Photogrammetric Week 2001. Heidelberg: Wichmann, 2001. 93–103

9 Heier H, Hinz A. Results from the digital modular camera DMC. In: Proceedings of ASPRS. Washington, 2002

10 Heier H, Kiefner M, Zeitler W. Calibration of the digital modular camera DMC. In: FIG XXII International Congress. Washington, 2002

11 Dörstel C, Jacobsen K, Stallmann D. DMC-photogrammetric accuracy-calibration aspects and generation of synthetic DMC images. In: Grün A, Kahmen H, eds. Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, Institute for Geodesy and Photogrammetry. ETH Zürich, 2003. 74–82

12 Milgram D L. Computer methods for creating photomosaics. IEEE Trans Comput, 1975, C-24(11): 1113–1119

13 Pelge S. Elimination of seams from photomosaics. Comput Graph Image Process, 1981, 16: 90–94

14 Burt P J, Adelson E H. A multiresolution spline with application to image mosaics. ACM Trans Graph, 1983, 2(4): 217–236

15 Adelson E H, Anderson C H, Bergen J R, et al. Pyramid method in image processing. RCA Eng, 1984, 29(6): 33–41

16 Hsu C T, Wu J L. Multiresolution mosaic. IEEE Trans Consum Electr, 1996, 42(4): 981–990

17 Afek Y, Brand A. Mosaicing of orthorectified aerial image. Photogramm Eng Rem S, 1998, 64(2): 115–125

18 Uyttendaele M, Eden A, Szeliski R. Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics. In: Proceedings of CVPR. Hawaii, 2001. II: 509–516
19 朱述龙, 钱曾波. 遥感影像镶嵌时拼接缝的消除方法. 遥感学报, 2002, 6(3): 183–187
20 Levin A, Zomet A, Peleg S, et al. Seamless image stitching in the gradient domain. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision. Prague, 2004. 377–389
21 Zomet A, Levin A, Peleg S, et al. Seamless image stitching by minimizing false edges. IEEE Trans Image Process, 2006, 15(4): 969–977
22 Wang M, Pan J, Feng T T. A radiometric post-processing approach to color composite DMC images. In: Proceedings of MIPPR. Wuhan: SPIE, 2005. 6043: 60430T
23 潘俊, 王密. 多尺度的 DMC 彩色合成影像辐射再处理方法. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32(9): 800–803
24 周松涛, 宣家斌. 基于景物灰度分布特征的影像恢复技术. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 230–234
25 Wang L, Gong P, Biging G S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. Photogramm Eng Rem S, 2004, 70(3): 351–357