

基于海面影像的立体摄影相对定向方法

王英霞^{1,2,3}, 姜文正^{2,3}, 陈 胜^{2,3}

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

2. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋环境与数值模拟研究室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要:海面影像的纹理信息少、匹配精度低致使现有的相对定向方法误差大, 稳定性差; 通过对其进行改进, 有效地提高了相对定向参数标定的精度和稳定性。文中建议了几何模型, 并以共面方程为控制方程, 采用附有参数的条件平差法计算相对定向参数, 同时发展了初始值计算方法, 保证了迭代的收敛性。从两个方面入手提高相对定向参数标定的精度和稳定性, 并给出了详细的计算流程: 1) 在摄影区域内近似均匀的选取特征点, 并采用高精度的匹配方法进行影像匹配; 2) 在大量的共轭点对(不低于 1 000 个)中选取最优匹配点(不低于 300 个)进行相对定向参数计算。海面实测数据分析时通过迭代的方式在 1 200 个共轭点中逐渐剔除了粗差点和误差较大点, 最终得到了由 321 个最优匹配共轭点计算出的精确相对定向参数, 检验了所述方法的可行性。该研究解决了相对定向标定精度低、稳定性差的问题, 提高了立体摄影海浪测量技术的可靠性, 有利于其推广和应用。

关键词:海浪; 立体摄影; 相对定向; 共面方程

中图分类号: P714

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)01-0034-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.003

海浪在海气相互作用、海洋上层混合中扮演着重要角色^[1-3], 是物理海洋学研究的热点。准确可信的外海观测数据是深入开展海浪理论及其应用研究的基础。岸基立体摄影海浪三维测量技术是一种利用架设在岸边或平台上的两台或多台相机同步采集海面影像, 通过影像匹配和透镜成像原理精确测量海面起伏的三维时空分布, 并据此计算海浪各要素, 反演海浪波数谱的高精度海浪测量技术。它是一种非常有效的方向谱观测手段, 可以弥补目前海洋观测设备的不足^[4-5]。得益于数码相机和计算机的发展, 近几年立体摄影海浪测量技术获得了显著的提高, 并逐渐成为一种实用化的海浪测量手段^[6-19], 如一些学者利用立体摄影测量的三维海浪数据重新审视了海浪的动力学特性, 研究了海气相互作用机制, 得出了一些从浮标等单点测波数据中无法得到的结论^[16-20]。

受陆地近景摄影测量的影响, 目前大部分立体摄影海浪测量系统是建立在直接线性变换理论基础上的^[6-9, 21], 然而基于直接线性变换理论建立的立体摄影测量系统定标时需要海面控制点, 这带来了较大的困难, 限制了立体摄影的应用。鉴于此, Benetazzo^[10]、Benetazzo 等^[11]、Gauego 等^[12] 和 Jiang 等^[22] 各自提出了无需海面控制点的立体摄影海浪观测技术, 该技术依次经过相机固有参数标定(或内定向)、相对定向和基于平均海面的绝对定向三个环节实现了立体摄影海浪测量, 避免了对海面控制点的需求, 大大降低了立体摄影海浪测量的难度。然而, 海面影像的纹理信息少, 匹配精度低, 现有的相对定向方法误差较大, 稳定性差, 严重影响了立体摄影海浪测量的可靠性。为此本文针对海浪这种特定的测量物, 改进了相对定向方法, 有效地提高了相对定向的精度和计算的稳定性。

收稿日期: 2016-12-02

资助项目: 国家重点研发计划项目——海洋上层混合过程参数化及实验验证(2016YFC1401403); 国家自然科学基金青年基金项目——海面控制点海浪测量技术及其应用研究(41506041); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——岸基立体摄影海浪测量系统研发(GY02-2012T01)

作者简介: 王英霞(1980-), 女, 山东日照人, 博士, 工程师, 主要从事立体摄影海浪测量方面研究。E-mail: wangyx@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

1 相对定向几何模型

为了便于立体摄影的数学描述,我们定义 2 个右手笛卡尔坐标系(图 1)。其一以相机主点 o 为坐标原点, x 轴、 y 轴分别平行于像素排列的行方向和列方向, z 轴沿主光轴指向物方,称为相机坐标系;其二以相机感光传感器的中心为坐标原点, u, v 轴分别平行于 x, y 轴,称为影像坐标系。相对定向是确定 2 个相机之间的相对位置,即确定图 1 所示的相机坐标系 $o-xyz$ 与 $o'-x'y'z'$ 之间的转换关系。设左相机坐标系 $o-xyz$ 连续绕 y, x, z 轴旋转 $\beta_y, \beta_x, \beta_z$ 角度后与右相机坐标系 $o'-x'y'z'$ 对应坐标轴相互平行;再设 $o-xyz$ 连续绕 y, x 轴旋转 α_y, α_x 角度后, z 轴与基线 $\vec{oo'}$ 重合。这样相对定向变为了确定参数 $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y, \beta_z$ 的值,本文将这 5 个参数称为相对定向参数。

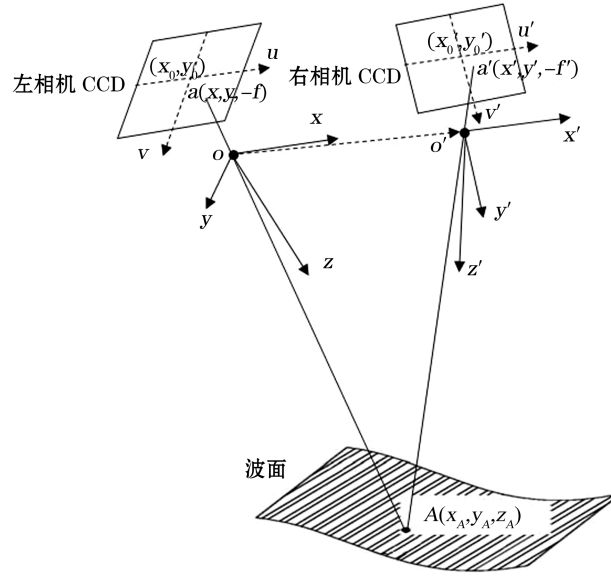


图 1 相对定向几何模型

Fig.1 Geometric model of relative orientation

若不考虑畸变,相机通过中心投影成像,如图 1 所示,则直线 $oa, o'a', oo'$ 共面,其中 a, a' 是物点 $A(x_A, y_A, z_A)$ 的左、右像点。设 $(x, y, -f)$ 表示左像点 a 的左相机坐标系坐标, $(x', y', -f')$ 表示右像点 a' 的右相机坐标系坐标,则共面方程可表示为

$$F = \begin{vmatrix} -\sin\alpha_y \cos\alpha_x & -\sin\alpha_x & \cos\alpha_y \cos\alpha_x \\ x & y & -f \\ \xi_{a'} & \eta_{a'} & \zeta_{a'} \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中, $(\xi_{a'}, \eta_{a'}, \zeta_{a'})$ 满足关系式:

$$\begin{pmatrix} \xi_{a'} \\ \eta_{a'} \\ \zeta_{a'} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_0 \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -f' \end{pmatrix}, \quad (2)$$

\mathbf{R}_0 表示坐标系 $o-xyz$ 与 $o'-x'y'z'$ 之间的转换矩阵:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos\beta_y \cos\beta_z - \sin\beta_y \sin\beta_x \sin\beta_z & -\cos\beta_y \sin\beta_z - \sin\beta_y \sin\beta_x \cos\beta_z & -\sin\beta_y \cos\beta_x \\ \cos\beta_x \sin\beta_z & \cos\beta_x \cos\beta_z & -\sin\beta_x \\ \sin\beta_y \cos\beta_z + \cos\beta_y \sin\beta_x \sin\beta_z & -\sin\beta_y \sin\beta_z + \cos\beta_y \sin\beta_x \cos\beta_z & \cos\beta_y \cos\beta_x \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因此,若像点 a, a' 的坐标已知,则式(1)是以相对定向参数为未知数的方程。

实际海浪测量时必须考虑镜头畸变的影响。设 (u, v) 是物点 $A(x_A, y_A, z_A)$ 的实际像点在左影像坐标系中的坐标,则 $(x, y, -f)$ 与 (u, v) 的关系可以表示为:

$$\begin{cases} x = x_0 + u + \delta x \\ y = y_0 + v + \delta y \end{cases}, \quad (4)$$

式中, x_0, y_0 表示影像坐标系原点在相机坐标系中的坐标(图 1); $\delta x, \delta y$ 表示畸变修正项,对精度要求不太高的海浪测量,可近似^[23]:

$$\begin{cases} \delta x = k_1(x_0 + u)r^2 \\ \delta y = k_1(y_0 + v)r^2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中, k_1 表示径向畸变系数, $r = \sqrt{(x_0 + u)^2 + (y_0 + v)^2}$ 表示像点到像主点的距离。将式(4)中含有的 3 个参数 x_0, y_0, k_1 及镜头焦距 f 称为相机固有参数,这些参数需要在海浪测量前校准。

通过影像匹配得到共轭点对 a, a' 的影像坐标系坐标 $a(u, v), a'(u', v')$,再由式(4)求出相应的相机坐标系坐标,然后代入式(1)即可得到一个以相对定向参数为未知数的共面方程;每一个共轭点对可列出一个共面方程,原则上,通过影像匹配得到至少 5 个共轭点对,列出至少 5 个共面方程即可求出相对定向参数。

2 相对定向参数的计算

2.1 共面方程组的平差算法

为了得到精确的相对定向参数,实际参与计算的共轭点对的个数要远多于 5 个,为此我们以共轭点对影像坐标 u, v, u', v' 为观测值,以相对定向参数 $\hat{\mathbf{X}} = [\alpha_x \ \alpha_y \ \beta_x \ \beta_y \ \beta_z]^T$ 为平差参数,采用附有参数的条件平差方法计算相对定向参数。设 \mathbf{F} 表示由 n 个共轭点对列出的共面方程列阵,将 \mathbf{F} 线性化后的条件方程可表示为

$$\mathbf{A}\mathbf{V} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{W} = 0, \quad (6)$$

式中, $\mathbf{V} = [\Delta u_1 \ \Delta v_1 \ \Delta u_1' \ \Delta v_1' \ \dots \ \Delta u_n \ \Delta v_n \ \Delta u_n' \ \Delta v_n']^T$ 表示观测值的改正数; $\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{X}_0$ 表示参数的改正数, \mathbf{X}_0 表示参数 $\hat{\mathbf{X}}$ 的初始值,而 $\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \hat{\mathbf{L}}} \right|_{L, X_0}$, $\mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \hat{\mathbf{X}}} \right|_{L, X_0}$, $\mathbf{W} = \mathbf{F}(L, \mathbf{X}_0)$, $\mathbf{L} = [u_1 \ v_1 \ u_1' \ v_1' \ \dots \ u_n \ v_n \ u_n' \ v_n']^T$ 表示观测值矩阵。

根据附有参数的条件平差原则,权阵为单位阵, $\hat{\mathbf{x}}$ 的值为

$$\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{N}_{BB}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{N}_{AA}^{-1} \mathbf{W}, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{N}_{AA} = \mathbf{A} \mathbf{A}^T$, $\mathbf{N}_{BB}^{-1} = \mathbf{B} \mathbf{N}_{AA}^{-1} \mathbf{B}^T$ 。 $\hat{\mathbf{X}}$ 的一次迭代值为 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}}$,进一步迭代即可求出参数 $\hat{\mathbf{X}}$ 的平差值。

2.2 迭代初始值

式(1)为含有 5 个参数的非线性方程,在上述迭代过程中容易发散,因此参数的初始值 \mathbf{X}_0 非常重要,本文发展了一种参数初始值 \mathbf{X}_0 的获取方法。

将式(1)展开并稍作整理得

$$L_1 y x' + L_2 y y' - L_3 y f' + L_4 f x' + L_5 f y' - L_6 f f' + L_7 x x' + L_8 x y' - L_9 x f' = 0, \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned}
L_1 &= D_x c_1 - D_z a_1, & L_2 &= D_x c_2 - D_z a_2, & L_3 &= D_x c_3 - D_z a_3, \\
L_4 &= D_x b_1 - D_y a_1, & L_5 &= D_x b_2 - D_y a_2, & L_6 &= D_x b_3 - D_y a_3, \\
L_7 &= D_z b_1 - D_y c_1, & L_8 &= D_z b_2 - D_y c_2, & L_9 &= D_z b_3 - D_y c_3,
\end{aligned} \tag{9}$$

式中,

$$[D_x \ D_y \ D_z] = D [-\sin\alpha_y \cos\alpha_x \quad -\sin\alpha_x \quad \cos\alpha_y \cos\alpha_x], \tag{10}$$

式中, D 表示基线 oo' 的长度,需由测量得到; $\mathbf{R}_0 = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$ 为由式(3)所示的转换矩阵。

式(8)两边同除以 L_5 得:

$$L_1^0 y x' + L_2^0 y y' - L_3^0 y f' + L_4^0 f x' + L_5^0 f y' - L_5^0 f f' + L_7^0 x x' + L_8^0 x y' - L_9^0 x f' = 0, \tag{11}$$

式中, $L_i^0 = \frac{L_i}{L_5}, L_5^0 = 1$ 。

式(11)可看成以共轭点对坐标的积为系数的线性方程,每一个共轭点对可列出一个方程。当共轭点对个数大于 8 个时,以 $L_i^0 (i=1,2,\dots,8, i \neq 5)$ 为平差参数,方程右侧 0 用间接平差的改正数代替,采用间接平差方法即可求出参数 L_i^0 的值。

将式(9)整理可得:

$$\begin{aligned}
L_5^2 &= \frac{2D^2}{L_1^{02} + L_2^{02} + L_3^{02} + L_4^{02} + L_5^{02} + L_6^{02} + L_7^{02} + L_8^{02} + L_9^{02}}, \\
D_x &= \sqrt{\frac{1}{2} L_5^2 (L_1^{02} + L_2^{02} + L_3^{02} + L_4^{02} + L_5^{02} + L_6^{02} - L_7^{02} - L_8^{02} - L_9^{02})}, \\
D_y &= -\frac{L_1 L_7 + L_2 L_8 + L_3 L_9}{D_x}, \quad D_z = \frac{L_4 L_7 + L_5 L_8 + L_6 L_9}{D_x}, \\
b_1 &= \frac{D_y a_1 + L_4}{D_x}, \quad b_2 = \frac{D_y a_2 + L_5}{D_x}, \quad b_3 = \frac{D_y a_3 + L_6}{D_x}, \\
a_3 &= \frac{L_2 L_4 - L_1 L_5 - D_z L_3 - D_y L_6}{D^2}, \quad c_3 = \frac{D_z a_3 + L_3}{D_x}.
\end{aligned} \tag{12}$$

上述各量都可以由参数 L_i^0 和已知的基线长度 D 求得,由式(3)可得:

$$\beta_x = \arcsin(-b_3), \beta_y = \arctan\left(\frac{-a_3}{c_3}\right), \beta_z = \arctan\frac{b_1}{b_2}. \tag{13}$$

由式(10),并考虑实际的几何关系可得:

$$\alpha_x = \arcsin\left(\frac{-D_y}{D}\right), \alpha_y = -\arccos\left(\frac{D_z}{D \cos\alpha_x}\right). \tag{14}$$

实验表明将式(13)和式(14)所求得的相对定向参数作为初始值时迭代收敛。

3 实验与讨论

3.1 实验设计

外海实验基于陆丰 13-1 石油平台进行,时间为 2015-01-07。陆丰 13-1 石油平台位于南海北部(116°09'E, 21°35'N),水深约 146 m,距岸边约 200 km;相机安装在平台主甲板上,距离水面约 35 m,左相机主光轴指向 55°,如图 2 所示。拍摄前 6 h 内风速 15~17 m/s,风向 30°~50°。

使用 2 台 SI-6600CL 型相机拍摄海面影像,实验前采用文献[24]给出的方法标定相机固有参数。表 1

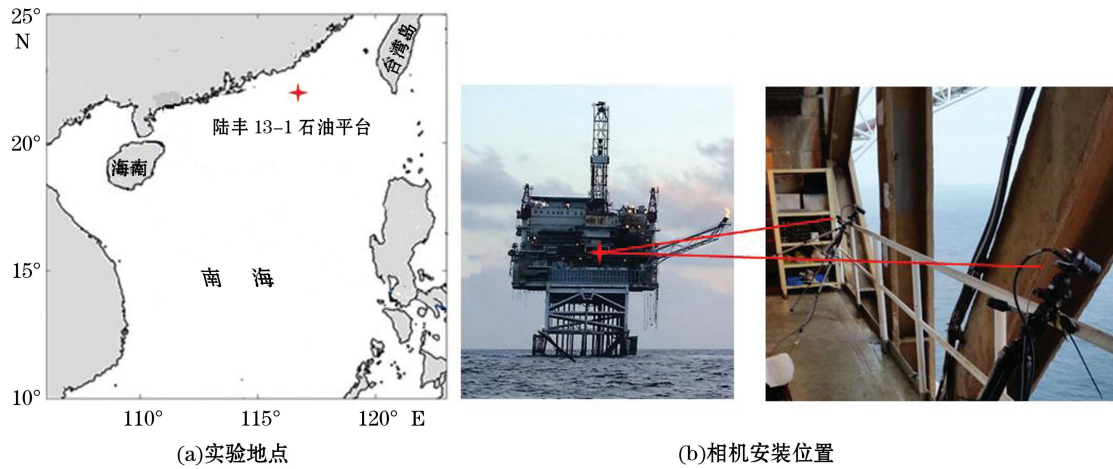


图 2 实验地点和相机安装位置

Fig.2 Experimental site and installation of cameras

给出了标定结果,其中 x_0, y_0 是影像坐标系原点在相机坐标系中的坐标, k_1 是径向畸变系数, f 是相机焦距。

表 1 相机固有参数值

Table 1 Camera intrinsic parameters

相机固有参数	x_0/mm	y_0/mm	k_1/mm^{-2}	f/mm
左相机	-0.268	0.294	-5.88×10^{-5}	16.06
右相机	-0.262	0.215	-6.30×10^{-5}	16.00

3.2 相对定向的实现

由相对定向参数的控制方程组式(6)可见,共轭点对的匹配精度和数量决定着相对定向参数的精度和计算稳定性,因此本文从两个方面入手提高相对定向参数的标定精度和计算稳定性。其一,在摄影区域内近似均匀的选取特征点,并采用高精度的匹配方法寻找其共轭点;其二,在大量的共轭点对中(不低于 1 000 个)挑选最优匹配的共轭点对(不低于 300 个)进行相对定向参数计算。为此我们设计了如图 3 所示的相对定向参数计算流程。

少量特征点的提取及特征点的匹配。图 4 是海浪测量时拍摄的一个影像对,将左影像中的测量区域均匀分成 6×6 个分区,采用 Moravec 算子在每个分区内提取一个特征点。对每一个特征点采用如下方法匹配其共轭点:

第 1 步,利用金字塔影像匹配方法粗定位。按每 3×3 个像素平均为一个像素生成 3 层金字塔影像,进行金字塔匹配确定右影像上共轭点坐标的近似值,第 1 层匹配窗口大小取 19×19 个像

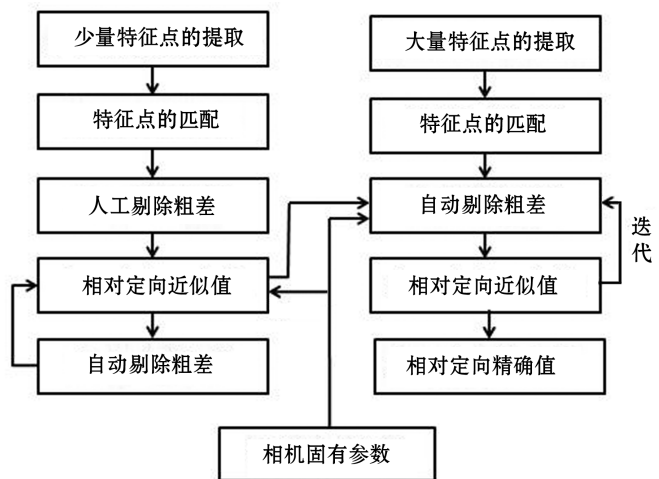


图 3 相对定向参数计算流程图

Fig.3 The flowchart of calculating the Relative orientation parameters

素,第2层取 15×15 个像素,第3层取为 11×11 个像素。

第2步,利用最小二乘影像匹配方法精确定位。以第1步获得的共轭点的近似位置为初始值,采用最小二乘匹配方法精确确定共轭点的影像坐标。这里的最小二乘方法需同时考虑影像的辐射畸变和几何畸变,窗口大小取 21×21 个像素。

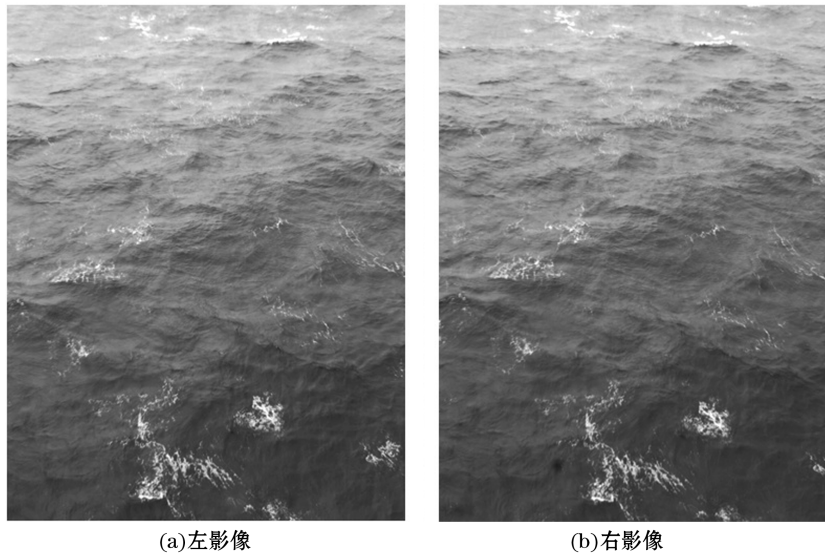


图4 实验拍摄的影像对

Fig.4 Pairs of images taken in the experiment

人工剔除粗差。上述的海面影像匹配结果中可能含有粗差点(匹配错误点),因此需要对36个共轭点对进行粗差识别和剔除。这就需要人工通过对比共轭点对的位置判断并剔除明显的粗差点。图5给出了36个特征点的影像匹配结果,图中可见第12个特征点匹配错误,需要剔除。

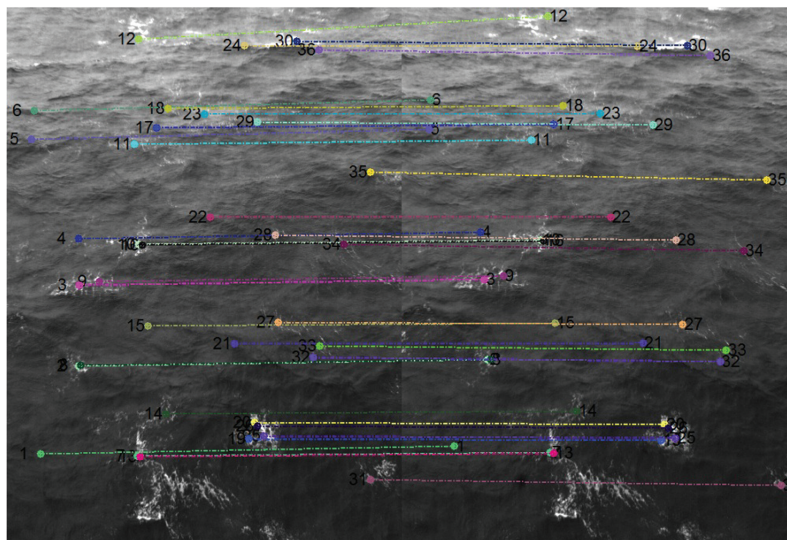


图5 影像匹配结果

Fig.5 Matching of the images

相对定向参数的近似值及自动剔除粗差。将人工识别的粗差点剔除,利用剩余的共轭点对根据本文中

第二部分所述方法计算相对定向参数,并求出核线的解析表达式,所谓的核线就是左相机像点和基线确定的平面与右相机感光平面的交线。计算右影像上的各共轭点横坐标对应的核线纵坐标,以及共轭点纵坐标与核线纵坐标的差值。理论上共轭点应在其核线上,差值为零,因此差值的绝对值越大匹配误差也越大。将绝对值大于 5 个像素的共轭点对剔除,利用剩余共轭点对重新计算相对定向参数,表 2 给出了计算结果,该结果将用于识别和剔除大量特征点匹配的粗差点。

表 2 少数特征点确定的相对定向参数近似值(rad)

Table 2 Relative orientation parameter approximation determined by limited number of points of characteristics (rad)

相对定向参数	α_x	α_y	β_x	β_y	β_z
参数值	0.034	-1.489	0.004	0.046	-0.049

大量特征点的提取及特征点匹配。将左影像中的测量区域均匀分成 40×30 个分区,采用 Moravec 算子在每个分区内提取一个特征点,采用上述特征点匹配方法找到其共轭点。根据表 2 所示的相对定向参数值计算各共轭点横坐标对应的核线纵坐标以及共轭点纵坐标与核线纵坐标间的差值,图 6 给出了计算结果。

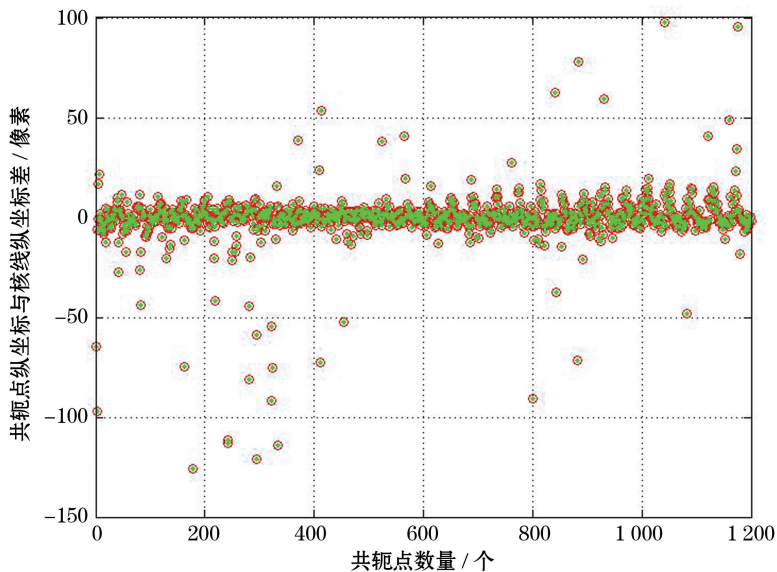


图 6 右影像上各共轭点纵坐标与对应核线纵坐标的差值

Fig.6 The difference between the ordinates of the conjugate point and of the corresponding epipolar line

自动剔除粗差及相对定向精确值。如图 6 所示,在 1 200 个共轭点中,差值绝对值大于 10 个像素的共轭点即可认为是粗差点。设 S_{10} 表示剔除粗差点后的剩余共轭点对集合,利用 S_{10} 重新计算相对定向参数,其结果用 X_{10} 表示(表 3)。由相对定向参数 X_{10} 计算 S_{10} 中各共轭点横坐标对应的核线纵坐标以及共轭点纵坐标与核线纵坐标间的差值。剔除差值绝对值大于 8 个像素的共轭点对,用剩余的共轭点对(用集合 S_8 表示)重新计算相对定向参数,结果用 X_8 表示(表 3)。再由相对定向参数 X_8 计算集合 S_8 中各共轭点横坐标对应的核线纵坐标以及共轭点纵坐标与核线纵坐标的差值。剔除差值绝对值大于 6 个像素的共轭点对,用剩余共轭点对(用集合 S_6 表示)重新计算相对定向参数,结果用 X_6 表示(表 3)。依次类推分别计算剔除绝对值大于 5, 4, 3, 2, 1 个像素的共轭点对,计算得到相应的相对定向参数 X_5, X_4, X_3, X_2, X_1 (表 3)。这样通过迭代方式,逐渐剔除粗差点和匹配误差较大的共轭点,使相对定向参数逐渐趋近真值,最终利用 321 个最优匹配的共轭点对计算出了准确的相对定向参数值 X_1 。

表 3 迭代过程的相对定向参数 (rad)

Table 3 The relative orientation parameters in the iterative process (rad)

相对定向参数	α_x	α_y	β_x	β_y	β_z
X_{10}	0.022	1.520	0.004	0.051	-0.049
X_8	0.019	-1.524	0.004	0.052	-0.049
X_6	0.012	-1.535	0.005	0.054	-0.049
X_5	0.005	-1.546	0.005	0.054	-0.049
X_4	0.002	-1.549	0.005	0.055	-0.050
X_3	-0.004	-1.561	0.006	0.054	-0.050
X_2	-0.014	-1.581	0.006	0.054	-0.050
X_1	-0.015	-1.586	0.006	0.054	-0.050

3.3 相对定向参数的检验

为了检验相对定向参数的精度,将图 4 左影像均匀分成 50×50 个分区,在每个分区内提取一个特征点,并通过上述特征点影像匹配方法(此方法与相对定向参数无关)找到其在右影像上的共轭点,理论上这些共轭点应该在核线上。将相对定向参数代入式(1)求出核线解析表达式,并计算共轭点横坐标对应的核线的纵坐标值。图 7a 给出了各共轭点纵坐标与相应核线纵坐标的差值。从图中可见,除少数的粗差点(差大于 10 的点)外,各点的差值均匀对称的分布在 0 线周围。图 7b 给出了差值的概率密度分布,图中的虚线表示相同标准差的正态分布曲线,可见差值的概率密度分布非常近似于正态分布,剔除粗差点后其数学期望为 -0.02 个像素,标准差为 3.7 个像素。显然,这些差值是由影像匹配的偶然误差引起的,因此可以认为所有共轭点都在核线上。由于共轭点和核线是由相互独立的方法得到的,其结果与理论上的预期相同;差值的期望值为 0.02 个像素,这表明受相对定向参数精度影响的系统误差非常小;所以相对定向参数的标定是准确的且精度较高。

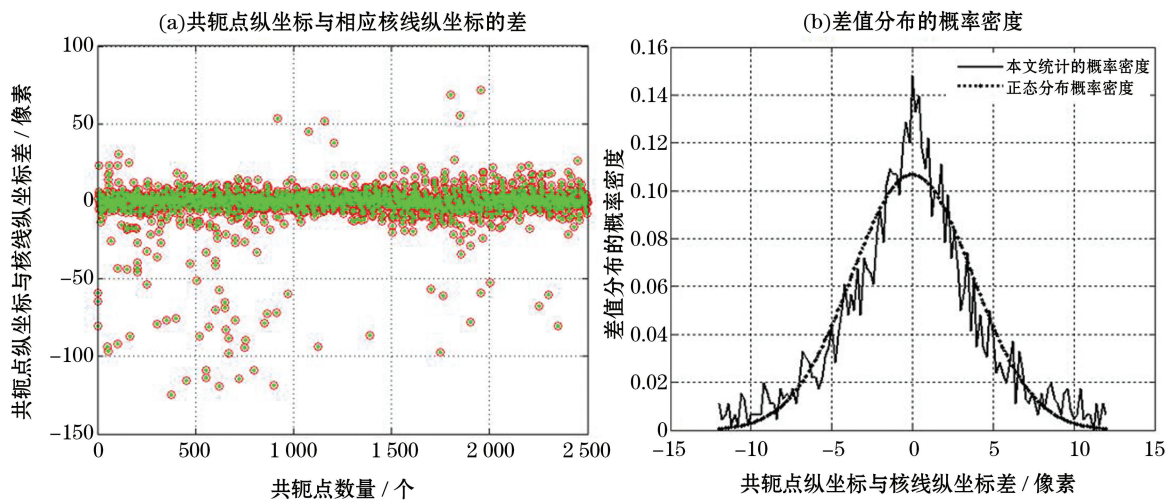


图 7 共轭点纵坐标与相应核线纵坐标的差及其概率分布

Fig.7 The difference between the ordinate of the conjugate point and of the corresponding epipolar line and its probability density distribution

4 结 语

我们在本文中改进了相对定向方法,一方面将特征点作为目标点,采用最小二乘影像匹配法寻找其共轭点,最大限度地提高了匹配精度;另一方面通过迭代的方式在众多的匹配结果中批量提取最优匹配点,保证了进行相对定向参数计算的共轭点对数量;因此可有效地提高相对定向的精度和计算稳定性。外海实验时首先提取了 36 个特征点,经特征点匹配和人工剔除粗差点后计算出了相对定向参数的近似值;然后利用这些近似值通过迭代的方式逐渐剔除 1 200 个共轭点中的粗差点和误差较大点,最终得到了由 321 个最优匹配共轭点计算出的精确相对定向参数,从而检验了本文所述方法的可行性。该研究解决了相对定向定标精度低,稳定性差的问题,提高了立体摄影海浪测量技术的可靠性。

参考文献(References):

- [1] MELVILLE W K. The role of surface-wave breaking in air-sea interaction[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, 28: 279-321.
- [2] THORPE S A. Dynamical processes of transfer at the sea surface[J]. *Progress in Oceanography*, 1995, 35(4): 315-352.
- [3] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): 293-317.
- [4] KROGSTAD H E, BARSTOW S F. Recent advances in wave measurement technology[C]//*Proceedings of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Brest: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1999: 19-24.
- [5] FEDELE F, BENETAZZO A, GALLEGO G, et al. Space-time measurements of oceanic sea states[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 70(10): 103-115.
- [6] WANEK J M, WU C H. Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(5-6): 723-747.
- [7] BECHLE A J, WU C H. Virtual wave gauges based upon stereo imaging for measuring surface wave characteristics[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(4): 305-316.
- [8] VRIES S, HILL D F, SCHIPPER M, et al. Remote sensing of surf zone waves using stereo imaging[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(3): 239-250.
- [9] VRIES S, HILL D, SCHIPPER M, et al. Using stereophotogrammetry to measure coastal waves[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 2(56): 1484-1488.
- [10] BENETAZZO A. Measurements of short water waves using stereo matched image sequences[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(12): 1013-1032.
- [11] BENETAZZO A, FEDELE F, GALLEGO G, et al. Offshore stereo measurements of gravity waves[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 64(2): 127-138.
- [12] GALLEGO G, YEZZI A, FEDELE F, et al. A variational stereo method for the three-dimensional reconstruction of ocean waves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(49): 4445-4457.
- [13] BENETAZZO A, BARBARIOL F, BERGAMASCO F, et al. Stereo wave imaging from moving vessels: Practical use and applications[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 109: 114-127.
- [14] KOSNIK M V, DULOV V A. Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface[J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 22(1): 15504-15512.
- [15] LIU P C. Contemplating ocean wave measurements[J]. *International Journal of Geosciences*, 2013, 4(4): 229-233.
- [16] BANNER M L, BARTHELEMY X, FEDELE F, et al. Linking reduced breaking crest speeds to unsteady nonlinear water wave group behavior[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(11): 114502.
- [17] BENETAZZO A, BARBARIOL F, BERGAMASCO F, et al. Observation of extreme sea waves in a space-time ensemble[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(9): 2261-2275.
- [18] LECKLER F, ARDHUIN F, PEUREUX C, et al. Analysis and interpretation of frequency-wavenumber spectra of young wind waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(10): 2484-2496.
- [19] MIRONOV A S, YUROVSKAYA M V, DULOV V A, et al. Statistical characterization of short wind waves from stereo images of the

- sea surface[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117(C12): C00J35.
- [20] BERGAMASCO F, BENETAZZO A, BARBARIOL A, et al. Multi-view horizon-driven sea plane estimation for stereo wave imaging on moving vessels[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 95: 105-117.
- [21] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry[C]//*Proceedings of the ASP/UI Symposium, Close-Range Photogrammetry*. Urbana: American Society of Photogrammetry, 1971: 1-18.
- [22] JIANG W Z, YUAN Y L, WANG Y X. Study on stereo photography for ocean wave measurements in no sea control points[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 119101. 姜文正, 袁业立, 王英霞. 无海面控制点的立体摄影海浪测量方法研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 119101.
- [23] WANG Z Z. *Principle of photogrammetry*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997. 王之卓. *摄影测量原理*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.
- [24] WANG Y X. Three-dimensional wave observation technique of shore-based digital photography and its application[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. 王英霞. *岸基数字摄影海浪三维观测技术及应用研究*[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

A Relative Orientation Method of Stereo Photography Based on Sea Image

WANG Ying-xia^{1,2,3}, JIANG Wen-zheng^{2,3}, CHEN Sheng^{2,3}

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Ocean Environment and Numerical Simulation Laboratory, The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)*

Abstract: Sea surface image has very limited texture information and low matching precision, which leads to significant error and poor stability in existing relative orientation method. An improved method was proposed to improve the accuracy and stability of relative orientation parameter calibration. The geometric model of the relative orientation and the coplanar equations were built, and the conditional adjustment method with parameters were adopted to calculate the relative orientation parameters. For the convergence of the iteration, an initial value calculation method was developed. Two aspects were focused in this paper to improve the accuracy and stability of the relative orientation parameters, with a detailed calculation process. One aspect refers to selecting the points of characteristics in the photographic region as uniformly as possible, and implementing the high-precision matching method for image matching. The other refers to selecting the optimal matching points (no less than 300) in a large number of conjugate point pairs (no less than 1 000) to calculate relative orientation parameters. In the offshore experiment, we eliminated the points of coarse error and significant errors from the 1 200 conjugate points, and obtained the accurate relative orientation parameter calculated by 321 optimal matching conjugate points, so the feasibility of the method described in this paper has been verified. Method developed in this study solves the problem of low accuracy and poor stability of the relative orientation calibration, and improves the reliability of the stereo photogrammetry for ocean wave measurement, which is beneficial to its popularization and application.

Key words: ocean wave; stereo photography; relative orientation; coplanar equations

Received: December 2, 2016