

文章编号: 1001-1595(2011)03-0351-08

双介质摄影测量共线理论研究

钦桂勤, 黄桂平, 张永生

信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052

The Research of Collinearity Theory for Two-media Photogrammetry

QIN Guiqin, HUANG Guiping, ZHANG Yongsheng

Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: With a brief introduction of the pin-hole model, it describes the view that the projection center of camera is the equivalent of two nodal points. This paper also presents a different view from the traditional standpoint of two-media photogrammetry, illustrating the collinearity relation for two-media photogrammetry owe to the shift of datum marks. With the basis of the collinearity theory, it concludes that the principal length in two-media photogrammetry is approximately equal to the one in one-media photogrammetry multiplying with the refractive index of the object space in two-media photogrammetry. The experiment on one antenna shows that high levels of accuracy can be achieved.

Key words: photography optical laws; location of datum marks; two-media photogrammetry; underwater photogrammetry; principal distance of camera

摘 要: 从摄影光学理论出发, 推导摄影物镜成像系统的基点位置公式; 利用针孔成像模型, 分析得出摄影物镜的投影中心即为成像系统两节点的等效; 简要阐述双介质摄影测量的传统观点, 利用同一摄影物镜在不同介质中构成的光学系统, 说明双介质摄影测量成像系统基点位置相对单介质时发生变化, 并在此基础上提出与传统观点不同的看法——双介质摄影测量共线理论; 详细分析双介质摄影测量的针孔模型, 得出“双介质摄影测量时相机主距近似等于单介质摄影测量主距与双介质摄影的物方空间折射率的乘积”这一论断; 最后通过水下摄影试验结果证明上述结论。

关键词: 摄影光学; 基点位置; 双介质摄影测量; 水下摄影测量; 相机主距

中图分类号: P234 文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2008AA042410)

1 引 言

双介质摄影测量在大多数摄影测量教材和资料中被归结为特殊的摄影测量, 同摄影机和被摄物体同处在空气中的常规摄影测量有所不同^[1-3]。双介质摄影测量技术就是利用物方空间和像方空间处在两种不同介质中拍摄的图像确定被摄目标几何特性的技术。作为摄影测量学的一个分支, 双介质摄影测量在过去的 30 年内在国内外得到了不少研究和应用, 这些研究和应用主要都属于水下摄影测量范围^[2,4-7], 主要用来测制海底地图, 并为水生物学、水文学、水下考古、探坝、核反应器探查和水下近景变形测量等学科提供测量手段。但从实际的测量结果来看, 精度并不高, 水下应用也主要集中在水下目标探测方面。

目前国际上对水下人工结构物测量精度要求越来越高, 因此国内外许多学者对双介质摄影测量算法进行了大量的研究, 提出了各种算法, 主要

采取两种途径^[4,7]: 一种是基于光在多介质中传播的几何过程, 另一种基于常规摄影补偿光折射影响的近似修正。这些算法在一定程度上提高了测量精度, 但也存在一些缺点: 随着多介质环境下几何特性的复杂化以及大多数算法要求迭代解算, 因此其计算量会逐渐增大。当大量物方点的坐标需要解算时, 这个问题将变得很严重。

本文从摄影光学理论出发, 具体分析了双介质中摄影物镜构成的成像系统特性; 利用小孔成像模型, 分析推导出双介质摄影测量也满足常规摄影测量中的“共线理论”, 从而完全可以利用常规摄影测量中的理论算法去解决双介质摄影测量中的问题。但双介质摄影中的投影中心和主距均发生变化, 文中具体分析了这些变化, 并详细推算出其具体变化关系式。

2 摄影光学理论

摄影物镜的光学系统一般由若干“组”共轴而又彼此有空气间隙的透镜所组成(甚至含有反光

镜)。每组透镜可能是一个单片透镜,也可能是由两片或两片以上单片透镜互相胶合而成,如尼康AF20mmF2.8D镜头由9组12片透镜组成。虽然各片透镜或是凸透镜、或是凹透镜,但组成摄影物镜后共同起会聚作用^[8],图1为各种摄影镜头。

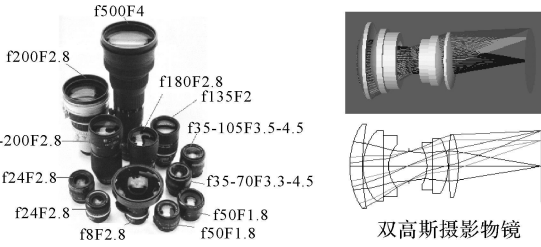


图1 常见的摄影镜头

Fig. 1 Some general photographic lenses

2.1 摄影光学基本概念^[8,9]

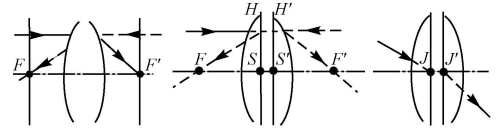
在视觉检测和摄影测量中,摄影物镜的成像模型一般用理想光学系统成像模型来近似,下面讨论的就是基于理想光学系统成像模型的基本概念。从几何光学角度来看,每个摄影物镜都可以看作是一个独立的光学系统,存在几对具有特殊成像性能的基准点和基准面,简称基点和基面。它们分别是一对主点、主平面,一对焦点、焦平面和一对节点、节平面(分别对应于物方空间和像方空间),均位于摄影物镜的光轴上。这些基点、基面平时既看不见、又摸不着,但在成像时却决定了成像的性质,代表了该摄影物镜的特性。

图2(a)中,像方焦点 F' 为无限远轴上物点对应的像,而物方焦点 F 为无限远轴上像点对应的物;过焦点垂直于光轴的平面为焦平面,分物方焦平面和像方焦平面。

图2(b)中, S, S' 为光学系统中的物方主点和像方主点, H, H' 为物方主平面和像方主平面,其垂轴放大率为+1,从而有出射光线在像方主平面上的投射高度一定与入射光线在物方主平面上的投射高度相等,即光线在两个主平面之间与光轴平行。从而可以这样理解,来自物方诸投射光线在物方主平面上发生折射,再以平行于光轴的方向射向像方主平面,最后在像方主平面上发生折射射出。因此不管物镜由多少个透镜组成,经过多少次折射,其结果都相当于主平面上发生折射,以后再研究光学系统特性时均采用主平面来代替摄影物镜。

节点的物理意义在于:物点发出的光线经过摄影物镜成像时,凡是射向物方节点 J 的光线,

在经摄影物镜折射后,所有的出射光线都经过像方节点 J' 并以与入射光线平行的方向射出,即过节点的入射光线经过摄影光学系统后出射方向不变,如图2(c)。两节点的这一特性在摄影测量中有着重要的意义。



(a) 焦点和焦平面 (b) 主点和主平面 (c) 节点和节平面

图2 光学系统中的基点和基面

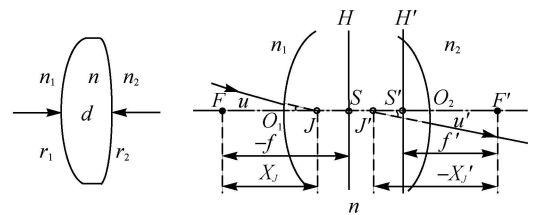
Fig. 2 The datum marks and planes in optical system

当摄影镜头位于空气介质中时,物方主点与物方节点重合,像方主点与像方节点重合,相应的主平面和节平面也重合,它们具有两者共同的特性,单介质摄影测量就用到这种特性。当摄影镜头位于非空气介质中时,节点与相应主点不重合,相应的主平面和节平面也不重合,在双介质摄影测量(如水下摄影测量)中,必须考虑到这个特点。

一个光学系统的三对基点和基面构成了该光学系统的基本模型,如果已知该光学系统的基点和基面的位置,那么该光学系统成像性质就完全确定。不同的光学系统,只表现为这些基点的相对位置不同而已。

2.2 摄影光学基点位置^[9]

为了分析问题的方便,把由若干个透镜组成的光学系统等价成一个“整体透镜”,将它当成一个单独的透镜来考虑其成像特性。假设这个透镜的第一折射球面半径为 r_1 ,第二折射球面半径为 r_2 ,透镜两球面顶点间隔为 d ,透镜折射率为 n ,物方空间折射率为 n_1 ,像方空间折射率为 n_2 ,如图3(a),该透镜的基点位置见图3(b)。基点和基面的命名同图2,其他符号参量的命名及正负见参考文献[9], O_1, O_2 分别为第一、二折射球面与光轴的交点。



(a) 单个透镜的结构

(b) 基点位置

图3 摄影光学中基点位置关系

Fig. 3 The relationship of the datum marks and planes in optical system

由近轴区域球面折射的物像公式 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} =$

$\frac{n' - n}{r}$ 可以推导出该系统的焦点位置

$$l_F = O_1 F = \frac{-n_1 r_1 [n r_2 + d(n - n_2)]}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (1)$$

$$l_F' = O_2 F' = \frac{n_2 r_2 [n r_1 - d(n - n_1)]}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (2)$$

由光组组合焦距公式推导出该系统的焦距

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta} = \frac{-n n_1 r_1 r_2}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (3)$$

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} = \frac{n n_2 r_1 r_2}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得

$$f/f' = n_1/n_2 \quad (5)$$

也就是说透镜的物方焦距与像方焦距之比为物方折射率与像方折射率之比。

该系统的主点位置为

$$l_S = O_1 S = O_1 F + FS = l_F - SF = l_F - f = \frac{-n_1 r_1 (n - n_2) d}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (6)$$

$$l_S' = O_2 S' = O_2 F' + F'S' = l_F' - S'F' = l_F' - f' = \frac{-n_2 r_2 (n - n_1) d}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (7)$$

由牛顿公式和牛顿公式的垂轴放大率公式及节点的角放大率为 +1 的特性, 推导出节点位置为

$$\left. \begin{aligned} x_J &= FJ = f' \\ x_J' &= F'J' = f \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$l_J = O_1 J = O_1 S + SF + FJ = l_S + f + f' = \frac{-n_1 r_1 (n - n_2) d + n r_1 r_2 (n_2 - n_1)}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (9)$$

$$l_J' = O_2 J' = O_2 S' + S'F' + F'J' = l_S' + f' + f =$$

$$\frac{-n_2 r_2 (n - n_1) d + n r_1 r_2 (n_2 - n_1)}{n^2 r_2 - n n_1 r_2 + n n_2 r_1 - n^2 r_1 + d(n - n_1)(n - n_2)} \quad (10)$$

由上述基点位置表达式, 可以得出: 一个光学系统的特性不仅与构成该系统的各个透镜组的结构 r_1, r_2, d 及 n 有关, 还与该光学系统的物方和像方所处介质的折射率 n_1, n_2 有关, 这一特点在双介质摄影测量共线理论中至关重要。

当透镜的结构一定时, 基点位置和焦距仅与物方空间和像方空间的折射率 n_1, n_2 有关。当 $n_1 = n_2$ 时, 即光学系统处在同一介质中, 节点与相应主点重合, 这时物镜的主点就具有节点的特性, 即过主点的共轭光线彼此平行; 而且物方焦距和像方焦距大小相等。当 $n_1 \neq n_2$ 时, 即摄影物镜位于非空气介质(即双介质摄影, 如水下摄影系统)中, 节点与相应主点不重合, 但是过节点的共轭光线仍然是彼此平行的; 物方焦距和像方焦距大小不相等。

3 单介质摄影测量共线理论

所谓单介质摄影, 就是摄影光线穿过具有相同光学性质的介质, 即像方空间和物方空间处在同一介质中的摄影。由于相机的结构和感光原理决定了像方空间必须在空气介质中, 因此单介质摄影测量中, 物空间必须在空气中才能保证物方空间和像方空间处在同一介质中。

目前常规摄影测量主要指单介质摄影测量。常用的摄影测量像片, 如航摄像片、近景像片等都是单介质摄影, 该技术比较成熟, 应用较广。

单介质摄影时, $n_1 = n_2 = 1$, 代入基点位置表达式(1)到式(10)中, 有

焦距大小

$$f = \frac{-\frac{n}{n-1} r_1 r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (11)$$

$$f' = \frac{\frac{n}{n-1} r_1 r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (12)$$

主点位置

$$l_S = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (13)$$

$$l_S' = \frac{r_2 d}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (14)$$

节点位置

$$l_J = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (15)$$

$$l_j = \frac{r_2 d}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \quad (16)$$

从而有 $l = l_s$ 、 $l_j = l'_s$ 、 $f' = -f$ ，即单介质摄影测量时，摄影物镜的相应节点与主点重合，物方焦距与像方焦距大小相等。

3.1 单介质摄影物镜中心

三维空间中的物体到像平面的投影关系为成像模型，理想的投影成像模型是光学中的中心投影，也称为针孔模型。摄影系统利用针孔成像原理，在针孔处安装一个摄影物镜，在光屏处放置感光材料，物体经摄影物镜成像于感光像面上^[10]。针孔成像中，针孔即是投影中心；摄影物镜构成的光学系统中，也必然有一个对应于针孔的摄影中心，而且物点发出的光线经过这个摄影中心到达像点方向不会发生改变。

摄影物镜成像时，物点发出许多光线，相应像点是这些光线相交的结果。在这些光线中有一条光线通过节点，它由物点发出向物方节点（又叫前节点）方向投射，再经像方节点（又叫后节点）沿平行于投射光线方向射出，也就是前面所说“过节点的光线方向不会发生改变”。利用针孔成像原理讨论摄影物镜成像时，可以只用过节点的光线来代表物镜的物像关系。

因此，在物方空间，摄影中心可以认为是物方节点；在像方空间，摄影中心可以认为是像方节点。在摄影测量和计算机视觉中，为了考虑问题的方便，一般将后节点连同像平面一起平移到后节点与前节点重合，重合的节点 O 为投影中心，也就是镜头中心^[9]。

单介质摄影测量时，物镜的节点正好与其对应主点重合，因此可以认为重合主点就是摄影中心，在实际的摄影测量中，更多地称摄影物镜的主点为镜头中心^[1,9,11]，因为常规摄影测量绝大多数是单介质摄影。

3.2 单介质摄影物镜的焦距和主距

物镜焦距为物镜焦点到主平面的距离，分物方焦距和像方焦距，单介质摄影时，物方焦距与像方焦距大小相等。主距为自镜头中心（后节点）至像平面的垂距 f_0 ，又称像距，与摄影物镜的焦距不是一个概念。

但在航摄像片中，由于地面点发出的光线可认为是无穷远处的光线，经摄影物镜后应该聚焦于焦平面，所以投影中心到像片的垂距 f_0 与像方节点或主点到像方焦点的距离相等，即主距等于焦

距^[1,9,11]。在近景摄影中，当物体在镜头前 300 倍焦距以外，成像位置就可认为在透镜像方焦平面上，这种情况下主距也等于焦距^[12]。具体单介质摄影测量中，当物体在镜头前 10 倍焦距以外，主距较焦距略大些，但在单介质摄影测量迭代解算过程中，可以将焦距作为主距的近似初值进行迭代计算，焦距可以近似看作主距^[13]，但焦距不同于主距。

3.3 单介质摄影测量三点共线理论

利用针孔成像模型，可以用过节点的光线来代表透镜成像的物像关系，而且两个节点可以假设重合为镜头中心，物镜成像就类似于针孔成像。那么物点、投影中心和物点对应的像点三点在一条直线上，它们之间满足共线条件方程。从而可以通过两台以上的相机对被测目标同时拍摄（或一台相机移动位置再拍摄）获取两张以上的影像，利用三点共线条件方程建立相对定向模型，解算出目标点的空间三维坐标，进而对被测目标进行几何形状、位置等特性进行分析^[1,10,11]。

4 双介质摄影测量共线理论

双介质摄影测量技术就是利用物方空间和像方空间处在两种不同介质中拍摄的图像确定被摄目标几何特性的技术。按摄影方式可以分为两类^[14]：一类摄影物镜和被摄目标均在非空气介质中，如水下摄影测量，摄影物镜和目标物均在水中，摄影物镜通过某种防水措施进行保护；另一类为摄影物镜在空气中，而目标物在非空气介质里，如水下摄影测量中，摄影物镜在水上对水下目标进行摄影，摄影物镜不需要防水保护措施。本文只对第一类双介质摄影测量方式进行研究，文后若未特别标明，一律按第一类双介质摄影测量方式考虑。

4.1 双介质摄影测量的传统观点

由于相机的结构和感光原理决定了像方空间必须在空气介质中，因此双介质摄影测量中，物空间就处在另外一种非空气介质里。传统观点认为，双介质摄影测量中，镜头的摄影中心位置仍然同单介质摄影时一样保持不变，物距和像距也未发生变化，只是由物点发出的光线在界面处发生折射，从而导致物点、摄影中心和相应像点这三点不再共线^[2,4,7,14]。

如图 4(a) 和 (b)，分别为相机在水上和相机在水下对水下目标进行拍摄时普遍认为经过的光路图， P 为像平面、 O 为镜头中心、 MN 为水与空

气的分界面, n_1 、 n_2 分别为空气和水的折射率, 像点 a 对应的物点为 A 。无论相机没入水下多深, 像方空间仍为空气, 只认为物方在水中, 而镜头中心为划分物方与像方的分界点, 因此图 5(b) 中认为水与空气的分界面经过镜头中心。如果在单介质中, 像点 a 对应的物点为 A' 而不可能是 A , 因为 a 点和 A' 点与镜头中心在一条直线上; 双介质中, 像点 a 和对应的物点 A 和镜头中心 O 显然不在一条直线上。

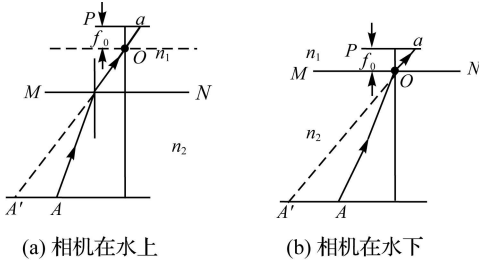


图 4 水下摄影测量传统光路图

Fig. 4 Traditional optical paths in underwater photogrammetry

相机在水上, 水上的光线可以利用针孔成像模型, 水与空气分界面处利用光的折射定律, 图 4(a) 这种理解是有道理的, 完全符合传统观点。本文不考虑这种双介质摄影测量, 只考虑相机在水下的情况。

相机在水下的情况, 如果认为镜头在水上和在水下其成像性质不变, 即摄影物镜的基点位置不发生变化, 水中镜头的投影中心与空气中镜头重合。对照针孔成像模型, 原本过投影中心的光线应该直线传播, 但由于光线由一种介质到另一种介质时会在界面处发生折射, 不再沿直线传播, 在“摄影物镜在水中和空气中构成的光学系统基点位置不发生变化”这个假设前提下, 这种“水中摄影光线在分界面处发生折射”的观点是成立的。所以一直以来, 对此感兴趣的学者们在这个观点下进行了大量研究和探讨: 双介质摄影测量时, 成像光线穿过两种不同的介质, 物点和对应的像点与镜头投影中心不在一条直线上, 因此单介质摄影测量中所用的共线方程和共面条件方程不能直接用在双介质摄影测量中建立相对立体定向模型, 他们试图寻找新的理论模型进行解算, 考虑界面处的折射, 引入了界面方程和介质的折射率^[2,4-7]。

双介质摄影测量传统观点成立的前提是同一

相机镜头在不同的介质中其成像性质不变, 从而有物点发出的光线在界面处发生折射, 导致物点、摄影中心和相应像点这三点不再共线。

这种假设前提与本文 1.2 节介绍的摄影光学理论部分推导的结论相矛盾, 一个光学系统的特性不仅与构成该系统的结构有关, 还与该光学系统的物方和像方所处介质的折射率有关。显然, 同一摄影物镜在空气中和在水中, 其物方所处的介质是不同的, 因此其成像性质也不可能相同。

4.2 双介质摄影物镜基点位置变化

由摄影光学理论可知, 如果已知一个光学系统的基点和基面的位置, 那么该光学系统成像性质就完全确定。不同的光学系统, 只表现为这些基点的相对位置不同。同一个摄影物镜, 保持摄影物镜的结构不变, 在空气中拍摄照片和在水中拍摄照片, 会构成两种不同的光学系统, 基点和基面位置不一样, 它需要用两种不同的光学系统来描述, 如图 5(a) 和(b), 给出了同一摄影物镜在不同介质中构成的光学系统示意图。

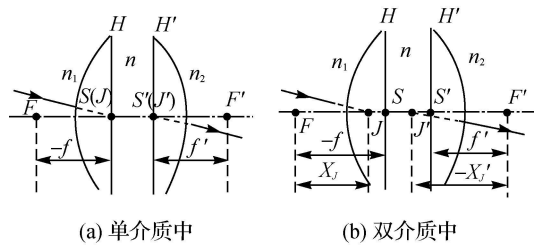


图 5 同一摄影物镜在不同介质中构成的光学系统
Fig. 5 The optical system of the same photographic lens in the different media

图 5(a) 描述了单介质摄影(即空气中摄影)时物镜构成的光学系统: 将 $n_1 = n_2$ 代入公式(1)到(10), 可以得到 $l_J = l_s$ 、 $l'_J = l'_s$ 、 $f' = -f$, 即主点与相应的节点重合, 物方焦距与像方焦距大小相等。图 5(b) 描述了双介质摄影(假设在水中摄影)时物镜构成的光学系统: 由于 $n_1 \neq n_2$, 代入公式(1)到(10)可知, $l_J \neq l_s$ 、 $l'_J \neq l'_s$ 、 $f' \neq -f$, 即主点与相应的节点不再重合, 物方焦距与像方焦距大小也不相等。

由图 5(a) 和(b) 可以看出, 同一摄影物镜在单介质中和双介质中构成的光学系统不一样, 具体表现在摄影光学基点位置不同。

4.3 双介质摄影测量的针孔模型

同单介质摄影测量一样, 双介质摄影测量的投影中心位置为摄影物镜在双介质中构成的光学

系统两节点的等效。由图 5(a) 和 (b) 可以看出, 同一摄影物镜在单介质中和在双介质中构成的光学系统不同, 它们对应的节点不重合, 因此摄影物镜在双介质摄影测量中的投影中心和在单介质摄影测量中的投影中心不重合。

因此, 在利用针孔成像模型上, 双介质摄影测量同单介质摄影测量一样, 投影中心位置为双介质摄影测量构成的新光学系统两节点的等效, 像点仍然为物点和投影中心的连线与像平面的交点, 只不过投影中心的位置相对单介质时发生了变化。如图 6, 同一摄影物镜在空气中和在水中摄影时构成的小孔成像模型: P 为像平面、 O 为摄影物镜在空气中时的投影中心、 O' 为摄影物镜在水中时的投影中心、像点 a 为物点 A 在空气中对应的像、像点 a' 为物点 A 在水中对应的像, 点 a 、 A 和 O 它们三点在一条直线上, 点 a' 、 A 和 O' 它们三点也在一条直线上。显然水中摄影物镜构成的光学系统的投影中心 O' 相对于空气中同一摄影物镜构成的光学系统的投影中心 O 沿光轴向下移动一定的距离, 空气中摄影主距为 f_{0one} , 水中摄影主距为 f_{0two} , 主距大小发生了变化。

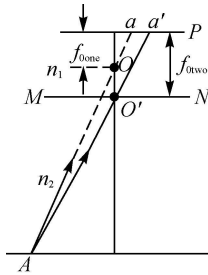


图 6 同一摄影物镜在不同介质中构成的小孔成像模型

Fig. 6 The pin-hole imaging model of the same photographic lens in the different media

双介质摄影测量的主距仍然为其光学系统后节点到像平面的距离。由于双介质摄影测量光学系统相对于单介质摄影测量光学系统发生了变化, 其光学系统节点位置相对单介质时发生了偏移, 从而导致其主距大小发生变化。在单介质摄影测量中, 已分析了将像方焦距近似作为主距的合理性; 在双介质摄影测量中, 尽管主点和节点不重合, 不能将主距近似看成像方焦距, 但是仍然可以将主距(后节点到像平面的距离)近似看成后节点到像方焦点的距离。由公式(8)、(3)和(5)可知, 双介质摄影测量中, 镜头后节点到像方焦点的

距离为

$$f_{0two} \approx J'F' = -F'J' = -x_j = -f_{two} = \frac{nn_1r_1r_2}{n^2r_2 - nn_1r_2 + nn_2r_1 - n^2r_1 + d(n-n_1)(n-n_2)} = \frac{n_1}{n_2} f'_{two} \quad (17)$$

像方空间处在空气里, 因此 $n_2 = 1$, 所以式(17)可简化为

$$f_{0two} \approx J'F' = -f_{two} = n_1 f'_{two} \quad (18)$$

即双介质摄影测量中光学系统的主距可近似为其像方焦距与物方空间所在介质的折射率 n_1 的乘积。而双介质摄影测量中的像方焦距近似等于单介质摄影测量中的像方焦距^[3, 15], 即

$$f'_{two} = \frac{nn_2r_1r_2}{n^2r_2 - nn_1r_2 + nn_2r_1 - n^2r_1 + d(n-n_1)(n-n_2)} = \frac{nr_1r_2}{n^2r_2 - nn_1r_2 + nr_1 - n^2r_1 + d(n-n_1)(n-1)} \approx \frac{\frac{n}{n-1}r_1r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} = f'_{one} \quad (19)$$

由公式(17)至(19)可得

$$f_{0two} \approx J'F' = -f_{two} = n_1 f'_{two} \approx n_1 f'_{one} \quad (20)$$

在 2.1 节中已分析了将单介质摄影物镜的像方焦距近似看成主距的合理性, 因此式(20)可进一步写成

$$f_{0two} \approx n_1 f_{0one} \quad (21)$$

从而有同一摄影物镜双介质摄影时相机主距近似等于单介质摄影主距与双介质摄影的物方空间折射率的乘积, 在光束法平差中完全可以作为迭代初值进行计算。

当相机在水下拍摄时, 其光学系统的后节点到像平面的距离近似为空气中摄影时的相机主距与水的折射率的乘积, 后面的试验将进一步证实该推导的合理性。

4.4 双介质摄影测量的共线理论

由上述分析可知, 双介质摄影测量中, 物方空间不同于单介质摄影测量的物方空间, 相机的光学系统相应发生变化, 但是摄影镜头的光学系统中“过节点的光线方向不会发生改变”这一特性不变。因此, 双介质摄影的物点、投影中心和相应像点三点仍然共线, 摄影中心相对单介质时发生了偏移, 像点是物点和新的投影中心的连线与像平面的交点。

单介质摄影测量中的共线模型仍然适用于双

介质摄影测量中, 因此完全可以利用单介质摄影测量原理和处理过程对双介质摄影测量进行处理。需要注意的是, 双介质摄影测量中相机的投影中心和主距发生了变化, 在计算时, 只要将单介质的主距乘以双介质物方空间介质折射率作为新的主距初始值进行光束法平差计算。

5 试验与结果

水下摄影测量是一种较为常见的双介质摄影测量, 为验证本文的理论, 对口径为 0.36 m 的某铝制小天线进行了水下摄影测量试验。试验是在一个直径 1.3 m、高 1 m 的塑料大桶中进行的: 桶中注满水, 将待测天线放入桶中, 将尼康专业级相机 D2H/f20 mm 装入专门研制的“水下精密摄影测量防水箱系统”中, 从不同的位置和角度共拍摄了 23 张像片。防水箱玻璃窗口采用的是 5 mm 厚的 k9 玻璃(相当于平行玻璃板, 对测量的影响参看文献[16]), 相机的镜头刚好贴紧玻璃窗口, 闪光灯也透过玻璃窗口工作。拍摄时, 防水箱系统没有完全没入水中, 但能够保证相机镜头最前端的玻璃透镜已经在水面以下, 这样就能确保摄影物镜的物方空间在水中, 试验相关图片如图 7。

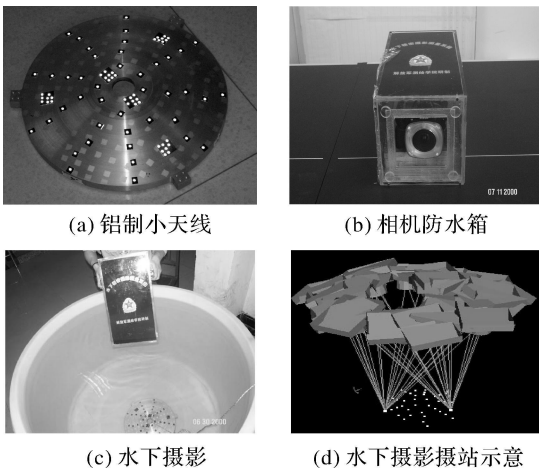


图 7 水下摄影试验相关图片

Fig. 7 The pictures of the experiment in underwater photogrammetry

被测铝制天线采用的加强结构设计, 可以认为是刚性的, 即该天线放在水上(空气中)和放在水下的形态一样, 不发生形变, 即理论上它们在水下和在空气中的测量结果均一样。

在待测天线表面共粘贴了 47 个直径为 3 mm 的圆形人工反光标志点。在空气中测量时, 采用

美国 GSI 公司的工业摄影测量系统 V-STARS 测出这些标志点的三维坐标, 其测量精度优于 $0.01 \text{ mm}^{[17-18]}$ 。然后用本文的方法测量出水下摄影时相应标志点的坐标, 对两组数据进行比较, 相应标志点的差值如表 1, 47 个点位差值的均方根为 0.077 mm, 由此可见, 水下摄影测量的结果与水上测量结果高度一致。此外, 水上、水下摄影测量相机自检校参数值如表 2, 为 V-STARS 计算参数值, 其中 C 为相机主距值。很显然水下相机主距值近似为水上相机主距值的 1.33(水的折射率)倍, 从而也论证了本文推导的“双介质摄影测量时相机主距近似等于单介质摄影测量主距与双介质的物方空间折射率的乘积”这一结论。

表 1 铝制小天线水上、水下摄影测量对应点位差值

Tab. 1 The comparison of coordinates in-air and underwater photogrammetry

点位	DX	DY	DZ
1	-0.127 9	0.001 8	-0.007 1
2	0.002 5	0.006 5	-0.002 3
⋮	⋮	⋮	⋮
46	0.004 7	0.007 1	0.027 8
47	0.107 6	-0.003 7	0.016 9
RM S	0.074 4	0.015 1	0.014 5

表 2 水上、水下相机标定参数

Tab. 2 The parameters of self-calibration in-air and underwater camera

标定参数	数值	
	水上	水下
f/mm	19.734 6	26.151 2
x_0/mm	-0.081 4	-0.060 2
y_0/mm	0.059 3	0.056 6
K_1	0.211 2	-0.137 8
K_2	-0.025 6	-0.028 0
K_3	0.001 1	0.011 5
P_1	0.000 6	-0.000 2
P_2	-0.007 5	-0.013 8
b_1	-0.000 7	-0.002 3
b_2	-0.000 0	0.005 5

6 结束语

本文从摄影光学理论出发, 推导出摄影物镜成像系统的基点位置公式; 利用针孔成像模型, 分析得出摄影物镜的投影中心即为成像系统两节点的等效; 简要阐述了双介质摄影测量的传统观点, 利用同一摄影物镜在不同介质中构成了不同的光

学系统,说明了双介质摄影测量成像系统基点位置相对单介质时发生变化,并在此基础上提出与传统观点不同的看法——双介质摄影测量共线理论;并详细分析了双介质摄影测量的针孔模型,得出“双介质摄影时相机主距近似等于单介质摄影时相机主距与双介质摄影的物方空间折射率的乘积”这一论断;最后通过水下摄影测量试验结果证明上述结论。

需要强调的是,本文推导的双介质摄影测量共线理论,只适用于整个物方空间不在空气中的双介质摄影测量,不包括物方空间一部分在空气里另一部分在非空气中的情况。如相机在水上的水下摄影测量情况,不能直接使用本文的理论;但相机在水下,只需镜头的最前端没入水中即可,双介质摄影测量共线理论成立。

参考文献:

- [1] WANG Zhizhuo. Principles of Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990: 340-345. (王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,1990:340-345.)
- [2] WANG Younian, HAN Ling, WANG Yun. Experimental Research of Underwater Close range Photogrammetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1988, 17(3): 217-224. (王有年,韩玲,王云.水下近景摄影测量试验研究[J].测绘学报,1988,17(3):217-224.)
- [3] MODUNCE L E. Underwater Photography[M]. ZHANG Wendi, trans. Beijing: Science Press, 1979: 107-124. (默顿斯 L E.水中摄影学[M].张闻迪,译.北京:科学出版社,1979:107-124.)
- [4] SHAN Jie. Relative Orientation for Two-media Photogrammetry[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 1993, 10(3): 38-44. (单杰.双介质摄影测量的相对定向[J].解放军测绘学院学报,1993,10(3):38-44.)
- [5] CHANG Benyi. Basic Formulas of Two-media Photogrammetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1991, 20(4): 288-294. (常本义.双介质摄影测量基本公式[J].测绘学报,1991,20(4):288-294.)
- [6] LI R, LI H, ZOU W, et al. Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(2): 364-375.
- [7] GILI T, SAGI F. Photogrammetric Modeling of Underwater Environments[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(5): 433-444.
- [8] SHA Zhanxian. Photographic Lenses: Characteristics and Guide to Purchase[M]. Beijing: China Photography Press, 2004: 65-69. (沙占祥.摄影镜头的性能与选择[M].北京:中国摄影出版社,2004:65-69.)
- [9] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001: 14-34. (郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2001:14-34.)
- [10] ZHU Zhaoguang, SUN Hu, CUI Bingguang. Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1995: 4-5. (朱肇光,孙护,崔炳光.摄影测量学[M].北京:测绘出版社,1995:4-5.)
- [11] JIANG Yanchuan. Principles of Analytical Photogrammetry[M]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, 1991: 1-27. (江延川.解析摄影测量学[M].郑州:信息工程大学测绘学院,1991:1-27.)
- [12] Shanghai Catering Service Company. Photography Technology[M]. Beijing: China Financial and Economic Publishing House, 1980: 32-50. (上海市饮食服务公司编.摄影技术[M].北京:中国财政经济出版社,1980:32-50.)
- [13] CARROLL J S. Photographic Facts and Formulas[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1984: 12-34. (卡罗尔 J S.摄影实践与处方[M].北京:测绘出版社,1984:12-34.)
- [14] SHAO Xihui. Military Engineering Photogrammetry[M]. Beijing: The PLA Press, 1991: 117-128. (邵锡惠.军事工程摄影测量[M].北京:解放军出版社,1991:117-128.)
- [15] LAVEST J M, RIVES G, LAPRESTE J T. Underwater Camera Calibration[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2000, 1843: 654-668.
- [16] LI Xiaoting, HU Jinmin. Metrology Optics[M]. Beijing: China Metrology Press, 2003: 25-28. (李小亭,胡金敏.计量光学[M].北京:中国计量出版社,2003:25-28.)
- [17] HUANG Guiping. Study on the Key Technologies of Digital Close Range Industrial Photogrammetry and Applications[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 59-62. (黄桂平.数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D].天津:天津大学,2005:59-62.)
- [18] HUANG Guiping, QIN Guiqin, LU Chengjing. Testing and Application of the Digital Close-range Photogrammetry for the Large Scale 3-D Measurement V-STARS[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2009, 29(2): 5-9, 22. (黄桂平,钦桂勤,卢成静.数字近景摄影大尺寸三坐标测量系统 V-STARS 的测试与应用[J].宇航计测技术,2009,29(2):5-9,22.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-05-27

修回日期: 2011-01-27

第一作者简介: 钦桂勤(1977—),女,博士研究生,讲师,主要从事水下摄影测量与传感器技术相关研究。

First author: QIN Guiqin(1977—), female, PhD candidate, lecturer, majors in underwater photogrammetry and sensor technique.

E-mail: qguiqin@sohu.com