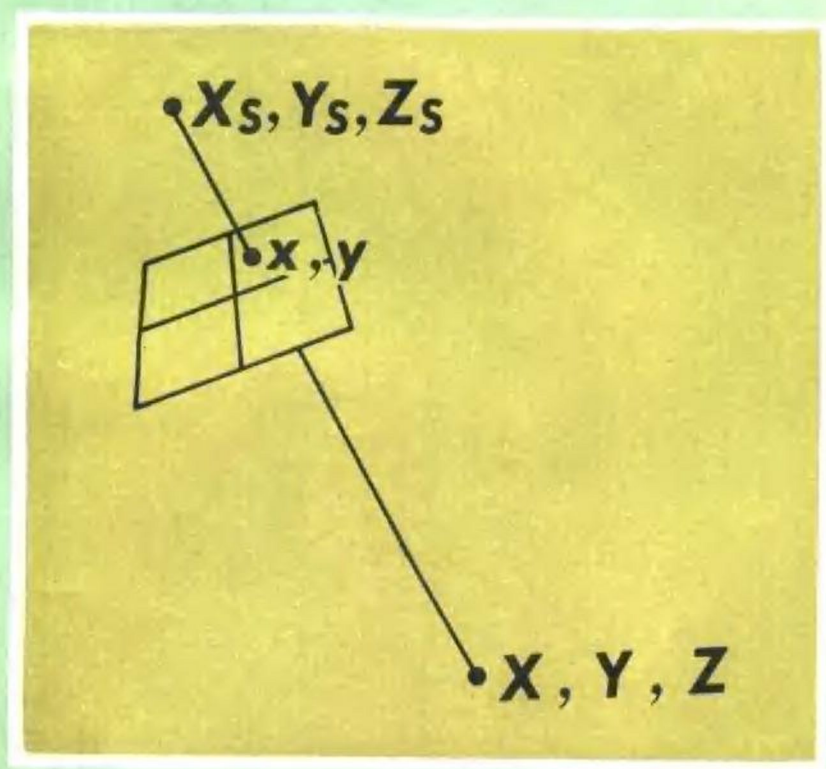


像片校准

[苏] B.Б.杜宾诺夫斯基



测绘出版社

像片校准

[苏]B.Б 杜宾诺夫斯基 著

温学龄 张绪茂 译

测绘出版社

本书叙述了确定和顾及以量测为目的(像片校准)的像片的中心投影性质的一般理论,像片校准工艺的原理,答解实际问题的具体方法以及在建立摄影测量网时实现这些方法的特点。

读者对象为:对地形和其他被考察对象从事遥感研究的工程技术人员,大地测量、农业、土地整理和建筑高等院校的研究生。

В.Б.ДУБИНОВСКИЙ
КАЛИБРОВКА СНИМКОВ
МОСКВА «НЕДРА» 1982

—
像 片 校 准

[苏]В.Б.杜宾诺夫斯基著

温学龄 张绪茂 译

*

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 8.5·字数 199 千字

1987 年 7 月第一版·1987 年 7 月第一次印刷

印数 0,001—1,700 册·定价 2.15 元

统一书号: 15039·新 480

前 言

摄影测量是一种对目标保持一定距离的（无接触的）客观的研究方法，它根据空间客体和现象的影像（像片）对其进行定量和定性研究。这一方法在对地球表面、自然环境、自然资源和太阳系行星的宇航研究中，在制作、更新和修编不同比例尺的地图以及解决多数科技和国民经济任务中得到越来越广泛的应用。

为了满足对像片的摄影测量处理成果日益增长的需求，一些高精度的立体摄影测量仪器和与之相适应的、处理原始测图数据的技术方法，已相继形成并仍在不断完善。

应用任何最完善的技术的效果，均取决于原始像片的几何质量和摄影测量质量，而质量要经过校准才能确定。

本书试图根据国内、外就像片的几何校准问题所作的理论和试验研究进行系统的论述，以求从根本上提高用像片解决量测任务的精度，扩大利用高效率的摄影测量方法的可能性。

作者在编写本书的过程中，曾得到有关人员的帮助和支持，在此表示感谢。

目 录

绪论	(1)
第一章 用摄影测量方法确定像片几何特性的依据	(7)
§ 1 解决摄影测量中量测任务的条件和联系	(7)
§ 2 像片误差	(12)
§ 3 对测定系统误差的基本要求和削弱像片偶然误差影响的途径	(23)
§ 4 像片系统误差测定方法的理论依据。像片校准	(28)
第二章 像片校准的摄影测量方法理论	(37)
§ 5 像片校准的摄影测量方法的一般原理。校准参数	(37)
§ 6 像片校准具体途径的依据和答解问题的几何条件	(46)
用控制数据校准像片	(47)
不用控制数据校准像片	(63)
像点配置的影响	(75)
§ 7 像片校准的摄影测量方法	(78)
§ 8 不严格遵守几何条件时的解题方法。数学严密解的可靠性评价	(79)
几何条件被破坏时补偿的可能性	(79)
近似多项式形式和式中项数的选择	(82)
数学严密解的可靠性评价	(84)
§ 9 解超定非线性方程组	(85)
§ 10 消减未知数的数量	(88)
§ 11 像片校准技术方案的基础	(90)

第三章	用试检（检验）场的像片校准像片	(95)
§ 12	用控制点坐标 X_F, Y_F, Z_F 校准像片	(95)
§ 13	根据线段长度 D_F 及其端点的高程 Z_F 校准像片	(99)
§ 14	单独利用物空点的平面坐标 X_F, Y_F 和高程 Z_F	(105)
§ 15	利用在物空间量测的 θ 角	(111)
§ 16	利用摄影站和任一物空点之间的量测距离 $D_{\text{Л. Б}}$	(118)
第四章	在建立摄影测量网的过程中确定和顾及像片的系统误差	(121)
§ 17	在测定和消除像片系统误差的同时严密建立摄影测量网	(121)
§ 18	依次建立摄影测量网和校准像片	(127)
§ 19	用地面检查区的像片校准像片	(130)
§ 20	对像片的野外控制的要求	(136)
第五章	不使用强制数据进行像片校准	(139)
§ 21	校准从空间一点所拍摄的像片	(140)
§ 22	消减未知数的数量	(144)
§ 23	校准从假定水平基线拍摄的像片	(151)
§ 24	校准从假定垂直基线拍摄的像片	(162)
§ 25	通过构建摄影测量自由网校准像片	(167)
第六章	像片校准方法在解决科学和国民经济问题中的应用	(170)
§ 26	构建航线和区域摄影测量网	(170)
	校准参数的选择	(170)
	用光束法建立的摄影测量网	(172)
	以预构网为基础建立的摄影测量网	(173)
	通过答解超定非线性方程组进行构网	(176)

	利用对地域多次摄影的结果建立摄影测量网(不用像片校准消除系统误差)	(181)
§ 27	消减摄影测量问题的未知数个数和校准参数个数	(183)
§ 28	在测绘地形和地物过程中统计像点的系统误差 $\delta \overline{x}_i, \delta \overline{y}_i$	(188)
§ 29	在解决太阳系行星的研究与制图任务中校准航天像片	(190)
	利用强制控制数据校准像片	(191)
	不用强制控制数据校准像片	(192)
	校准电视像片	(194)
	校准航天像片方法及技术流程的发展方向	(194)
§ 30	校准用于解决非地形测量任务的像片	(195)
§ 31	量测处理伦琴射线像片的特点	(202)
第七章	像片校准方法的试检研究结果	(205)
§ 32	用解析模型校准像片方法的研究	(205)
	试验研究的目的和方法	(205)
	以利用强制控制数据为基础的校准方法的研究	(206)
	以像片对性质为基础的校准方法的研究(不用强制控制数据)	(211)
§ 33	利用像片校准方法的试验结果	(222)
	建立摄影测量网	(222)
	专题的解算	(226)
§ 34	解算以非线性方程组形式表示的摄影测量问题	(232)
文献目录		(237)
附录		(240)
	利用试验场像片校准像片和摄影镜箱	(240)

引 言

像片之所以被广泛应用，其主要优点是，不必直接接触被研究的对象就能获得它的有关资料，即可以测制通行困难地区的地形图，不必涉及被研究对象的自然发展和中断生产过程对其进行调查研究。

被考察对象的范围大小，可大到宏观世界（根据从地面、飞机和宇宙飞行器拍摄的像片研究恒星和太阳系行星）小到微观世界（微生物学、眼科学、神经外科手术、罪行调查学中的研究对象等）。拍摄像片的距离也极不相同，远则几十万公里，近则几毫米。

像片在加密大地网和制作地形图方面有着最广泛的用途。

不管像片用于何种领域，为了从像片获得必要的数量特征，解决问题的原理和处理像片的一般理论是雷同的。处理像片的一般理论是 30~50 年代由卓越的苏联科学工作者的劳动建立起来的，他们是：苏联科学院通信院士 H.Γ. 克尔利教授，A.C. 斯吉利多夫教授，俄罗斯联邦功勋科技活动家、列宁奖金和国家奖金获得者 Φ.B. 德洛贝雪夫教授，俄罗斯联邦功勋科技活动家 M.Д. 康新教授，俄罗斯联邦功勋科技活动家、俄罗斯联邦功勋发明家 A.H. 洛班诺夫教授，国家奖金获得者 Γ.B. 罗曼诺夫斯基教授，H.A. 乌尔马耶夫教授。

快速电子计算机的制造和投入实际应用，为像片的处理开辟了新的质的可能性：严密解决全部量测任务；通过建立和平差空中摄影测量网精确加密大面积大地控制；有可能处理内、外方位元素值不同的像片；有可能估计以解析形式表示的像片的任何误

差；采用补充资料；建立地面的解析模型并据以解决实际作业任务。像片的应用范围明显地扩大了。

将快速电子计算机用于解析摄影三角测量取得开拓性成果的是 A.H. 洛班诺夫教授。他研究出了摄影测量航线网和区域网的严密的解析构网法和平差法，在地形大地测量生产中得到了广泛的应用。在 A.H. 洛班诺夫的领导下，解析摄影测量在苏联已形成自己的流派。

在空中摄影三角测量方面，作过大量研究工作的有：M.Д. 康新，И.Д. 卡尔果波洛夫，B.Я. 芬科夫斯基，M.M. 马什莫夫，B.K. 马利亚夫斯基教授；И.Т. 安基波夫，Ф.Ф. 雷申克，B.И. 巴夫洛夫，M.H. 布鲁舍夫，И.И. 弗纳列夫斯基 技术科学博士；P.П. 奥夫辛尼可夫，B.A. 波利亚科娃，B.B. 波哥列洛夫，B.H. 别雷等技术科学副博士。从不同方面撰写论文，阐述有关像片处理理论和实践的有：Л.Н. 瓦西里耶夫，B.Ф. 捷涅科，H.Д. 伊里寅斯基，B.H. 罗捷奥诺夫，B.M. 谢尔鸠科夫，И.Т. 库什金，Л.С. 乌尔马赫尔教授；M.И. 布洛夫，A.M. 波布利亚少夫，Ф.С. 秋夫连，П.Д. 安姆洛明，A.П. 扎里涅鲁卡斯，Ю.П. 肯科，Ш.Е. 库兹涅佐娃，И.П. 克里斯捷夫，A.H. 默捷肯，И.М. 巴夫罗夫，M.A. 普拉多年科，A.П. 特鲁宁，Ю.М. 特鲁宁，Г.Д. 弗多鲁克，M.H. 尤丹诺夫等技术科学副博士。

大量的研究成果产生了许多解决实际问题的具体方法。

处理像片（加密大地测量网，测绘地貌和地形地物，确定地物的范围大小等）的所有解析法的理论基础，是假定影像点是被摄影物的中心投影，该中心投影符合摄影条件或与之相类似。这一投影的几何特性（参数）应为已知。因此，知道像片的中心投影参数是用任何熟知的方法精密处理像片的决定条件之一。

像片的中心投影通常决定于航摄机的特性。由于像片应用领域的广泛性，研制出了众多型号的测量摄影机和投影摄影机。这

些摄影机可分为两种基本类型：一种是内方位元素值可变的，另一种是内方位元素值不可变的(固定的)。内方位元素值固定的摄影机中又有无穷对焦和有限距离对焦之分(图 1)。这种类型的摄影机中，有许多在结构上容许在不大的范围内进行调焦。内方位元素值可变的摄影机（如专门量测摄影机，轻便摄影机，普通摄影机）拍摄的每一张像片，各有自己的内方位元素值。

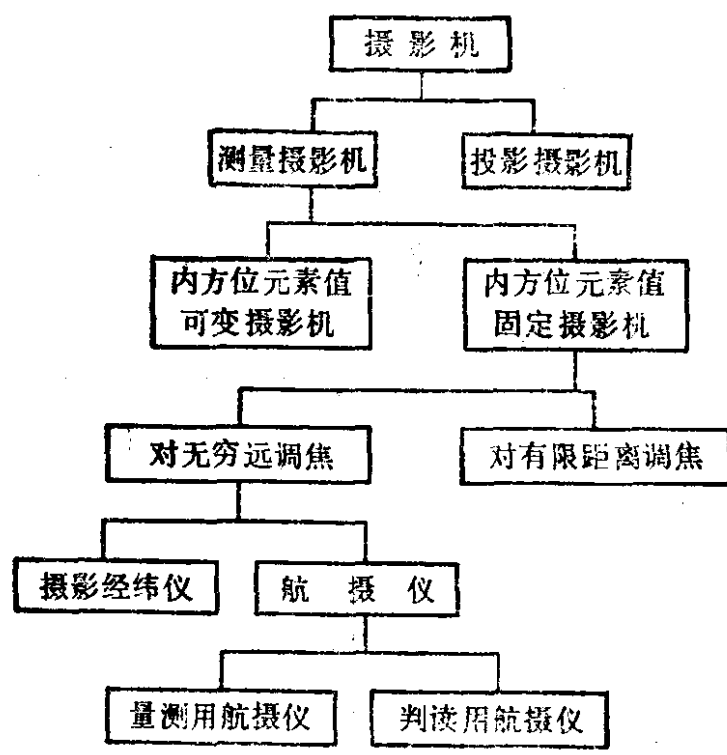


图 1 摄影测量量测用摄影机

因此，首先就产生确定内方位元素的问题。由于生产中不可避免的制造误差，所有摄影机不能保证获得符合某一具体中心投影的像片，从而加大了解决上述问题的难度。来自被摄景物的每条摄影光束，通过光学系统时会产生折射，而每条光束又都有各自的、与理论值不符的折射系数。上述因素导致中心投影产生不均匀变形。投影光束的内射束与外射束不同，因此，必须同时确

定内方位元素和中心投影的变形。

摄影时射入镜头的内射束，受外界条件的影响而变得弯曲，这就在更大程度上使中心投影模型和模型参数的确定复杂化。

可见，确定像片中心投影参数的最或是值是高精度处理像片中的一个需要从多方面研究的复杂问题，它包括一系列有待解决的重大的具体技术问题。

中心投影的实际参数偏离理论值，使得在相同条件下拍摄的全部像片的中心投影产生相同的变形。这种差值带有系统性，它使像片的摄影测量处理结果产生系统变形和偶然变形。

在摄影测量网的实际构网中，采用变形的中心投影参数会带来网的严重变形。为消除这种变形，需要使用比对未变形的网进行外部定向多得多的控制资料(点)。

现实的摄影测量网的精度，通常要低于假定不存在系统误差所推求的理论精度。正因为如此，不容许用偶然误差的累积公式计算控制点之间的距离。在实际工作中，这样的计算一定要根据试验构网的抽样结果进行改正。

长焦距非地形测量航摄机所拍摄的大量像片，一般却不可能用来进行量测，这是一个致命的弱点。

为保障国民经济对大比例尺地图的需求，摄影测量工作量和成本，有了很大的增加。因此，人们对于小比例尺航空摄影表现出强烈的兴趣。如果为保证 1:100000 和 1:50000 比例尺的测图需要，曾采用 1:70000~1:50000 和更大的航摄比例尺，那么，为保证 1:25000~1:2000 比例尺的测图需要，航摄比例尺可比待编地图的比例尺 (1:40000~1:10000) 小得多。为保证摄影测量网加密和小比例尺像片成图的预期精度，必须从根本上提高像片中心投影变形的确定和估算精度。

在制造专门的量测摄影机，研制像机的校准设备和方法的条件下，才有可能用像片的摄影测量处理方法解决许许多多的实际任务，这要投入大量的经费和时间。

从以上所述可以看出, 确定像片中心投影参数这个带根本性的问题, 已经到了急需解决的时候了。

国内外都承认, 为解决全部量测任务, 在高精度处理像片方面的中心问题之一, 是确定相应于拍片条件时的像片的参数。

在校准设备和起始数据的基础上, 提高摄影测量量测精度和构网精度的问题, 在历届国际摄影测量协会 (MΦO) 及该协会的第一和第三委员会历次讨论会上, 都占有重要位置。

国际摄影测量协会第十四届会议(1980年7月13日~25日, 西德, 汉堡), 曾对信息处理的数学问题作过探讨(第三委员会), 证明: 由于在中等规模的区域范围内建立了摄影三角测量网(条件是网点上设标志, 像片有60%的纵向和横向重叠等), 而使像片比例尺网点坐标的测定精度达到了: 平面 $m_{x,y} = 3$ 微米; 高程 $m_h = 5$ 微米。同时还暴露了一些需要解决的问题。因此, 会议一致公认, 研究测定和消除粗差和系统误差的方法, 是1980~1984年E. 基尔别拉教授领导下的第三委员会的最重要的任务之一*。

A. H. 洛班诺夫, M. Д. 康新, B. M. 谢尔鸠科夫, Л. Н. 瓦西里耶夫教授; И. Т. 安基波夫, С. В. 克诺罗佐夫, И. И. 菲纳列夫斯基技术科学博士; П. Д. 安姆洛明, В. Г. 阿夫列莫夫, М. И. 布洛夫, А. П. 岡恰罗夫, Е. А. 默莉娜, Г. Е. 科洛米茨, Ю. М. 特鲁宁, А. Н. 契尔尼, Д. Н. 契尔卡索娃等技术科学副博士发表了大量论文, 从各个方面研究了像片系统误差的确定和估算问题以及对内方位元素未知的像片的处理。

围绕这一问题, 国内外学者所作的努力都未能使这一复杂问题从议事日程上消失。

在一些著作中, 叙述了测定和顾及相应于拍摄条件的像片的中心投影参数的一般摄影测量方法, 及由这一方法得出的具体解题方法和它们的工艺原理。

* N. T. 安基波夫, H. Л. 马卡连柯, С. С. 赫恒在国际摄影测量协会第十四届大会上的报告。见苏联《测量与制图》1981年 №2, 49—56。

这一方法的基本研究工作是在 1967~1978 年期间完成的，在这以后的年代里，研究工作更为详尽和深化，显示出了国内外学者的主要成就。

第一章

用摄影测量方法确定像片

几何特性的依据

§ 1. 解决摄影测量中量测任务的条件和联系

从像点是被摄目标点中心投影的结果这一假设出发, 解析摄影测量的全部方法都是建立在这些点之间相应联系的数学表达式基础上的。这些联系的数学模型又是以投影光束共线和共面为条件的。

共线是单像测图的理论基础, 而共线和共面则是双像测图的理论基础。

就单张像片而言, 地面点 M 及该点在像片上的影像 m 和摄站 S , 都在同一直线上 (图 2)。

在像片坐标系中, m 点的位置可由以下向量确定

$$R' = r - f_i = \overline{xi} + \overline{yj} - \overline{f_i}$$

向量 $SM = R - R_s$ 和 R' 共线。在 ijk 坐标系中, 这一条件取如下形式

$$R = R_s + \lambda AR' \quad (I.1)$$

或

$$R' = \lambda^{-1} A^{-1} (R - R_s)$$

式中 λ ——某个标量; A ——向量 R' 由 ijk 坐标系转换为 ijk 坐标系的转换矩阵。

(I.1) 式决定着模型的基本联系: 单张像片——实地。

下面我们将得出像对的初始联系。

如果像片为空间定向 (图 3), 则向量 R_s, R'_1, R'_2, S_2M 在同一平面内, 亦即共面。向量 R_1 和 R'_1 共线, 因此有

$$R_1 = NR'_1 \quad (I.2)$$

式中 N ——标量。

向量 $S_2M = R_1 - R_s$ 和 R'_2 亦共线。因而

$$[R_1 - R_s, R'_2] = 0 \quad (I.3)$$

将 (I.2) 式代入 (I.3) 式得

$$N[R'_1R'_2] = [R_sR'_2] \quad (I.4)$$

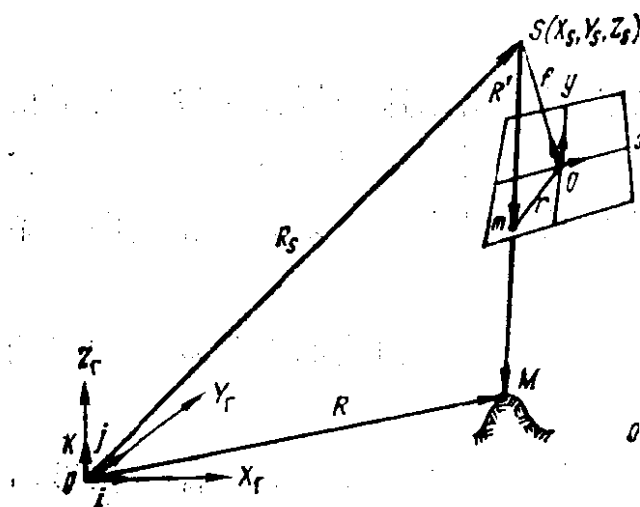


图 2 单张像片和地面点

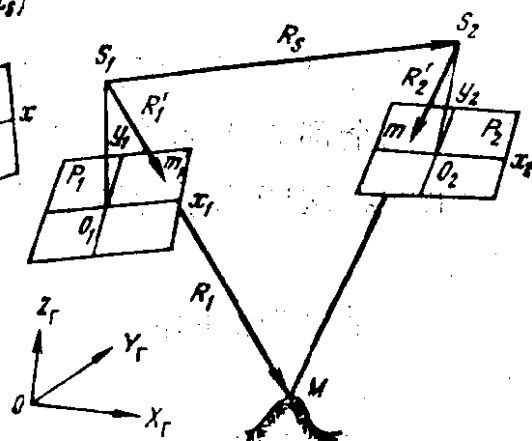


图 3 已定向的像对和地面模型

(I.2) 式和 (I.4) 式为像对数学关系的普遍式。以标量 $\pm$ 向量的乘积

$$(R_s[R'_1R'_2]) = 0 \quad (I.5)$$

描述的向量 R_s, R'_1 和 R'_2 的共面条件, 只与三个向量的方向有联系。在满足 (I.5) 式的条件下, 所有交会的总体构成被摄物体的模型。因此, (I.5) 式是像片相对定向的条件。

为解决实际任务, 往往把向量投影到 X, Y, Z 坐标轴上, 将相应光束共线和共面的初始方程变换成坐标形式。

(I.1) 式投影后, 得到单张像片的初始方程为,

$$\left. \begin{aligned} X_r &= X_s + (Z_r - Z_s) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} = X_s + (Z_r - Z_s) \frac{X'}{Z'} \\ Y_r &= Y_s + (Z_r - Z_s) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} = Y_s + (Z_r - Z_s) \frac{Y'}{Z'} \end{aligned} \right\} \quad (I.6)$$

式中 f ——像片焦距; X_r, Y_r, Z_r ——物(地面)空点坐标; X_s, Y_s, Z_s ——摄影站坐标(像片外方位线性元素); x, y ——相对于坐标原点, 即主点的像点坐标; $a_k, b_k, c_k (k=1, 2, 3)$ ——方向余弦。

函数式 (I.6) 表示成以下形式

$$X_s + (Z_r - Z_s) \frac{X'}{Z'} - X_r = 0, \quad Y_s + (Z_r - Z_s) \frac{Y'}{Z'} - Y_r = 0 \quad (I.7)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(x, y, x_0, y_0, f, a, \omega, \kappa, X_s, Z_s, X_r, Z_r) &= 0 \\ \varphi_2(x, y, x_0, y_0, f, a, \omega, \kappa, Y_s, Z_s, Y_r, Z_r) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.8)$$

如果将 (I.6) 式中的空间坐标系原点平移至坐标为 $X_0 = X_s, Y_0 = Y_s$ 一点, 并把地面点化算至水平像片比例尺, 则得倾斜像片和水平像片点的坐标联系式为:

$$x^0 = -f \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f}, \quad y^0 = -f \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \quad (I.9)$$

改写成与 (I.7) 和 (I.8) 的类似形式为

$$f \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} + x^0 = 0, \quad f \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} + y^0 = 0 \quad (I.10)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \varphi_3(x, y, x_0, y_0, f, a, \omega, \kappa) &= 0 \\ \varphi_4(x, y, x_0, y_0, f, a, \omega, \kappa) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.11)$$

考虑到点 S_1 (空间坐标系原点) 的坐标, 由 (I.2) 和 (I.4)

式得像对公式如下

$$X_r = X_{s_1} + Nx_1^0, \quad Y_r = Y_{s_1} + Ny_1^0, \quad Z_r = Z_{s_1} - Zf \quad (I.12)$$

式中

$$N = \frac{(X_{s_2} - X_{s_1}) + \frac{x_2^0}{f} (Z_{s_2} - Z_{s_1})}{x_1^0 - x_2^0}$$

x_1^0, y_1^0 —— (I.9) 式中像点的纠正坐标。(I.12) 式也可表示成以下两种形式:

$$\begin{aligned} X_{s_1} + Nx_1^0 - X_r &= 0, \quad Y_{s_1} + Ny_1^0 - Y_r = 0, \\ Z_{s_1} - Nf - Z_r &= 0 \end{aligned} \quad (I.13)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \varphi_5(x_n, y_n, x_0, y_0, f, a_n, \omega_n, \kappa_n, X_{s_n}, Z_{s_n}, X_r) &= 0 \\ \varphi_6(x_n, y_n, x_0, y_0, f, a_n, \omega_n, \kappa_n, X_{s_n}, Y_{s_n}, Z_{s_n}, Y_r) &= 0 \\ \varphi_7(x_n, y_n, x_0, y_0, f, a_n, \omega_n, \kappa_n, X_{s_n}, Z_{s_n}, Z_r) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.14)$$

式中下标 $n = 1$ 和 2 , 1 表示左像片, 2 表示右像片。

根据 (I.5) 式, 对相对定向元素的第一坐标系而言, 其相对定向条件的坐标形式为

$$Y_1'Z_2' - Z_1'Y_2' = 0 \quad (I.15)$$

$$\text{或} \quad q^0 = y_1^0 - y_2^0 = 0 \quad (I.16)$$

对第二坐标系则有

$$\begin{aligned} \frac{Y_{s_2}}{X_{s_2}}(X_2'Z_1' - X_1'Z_2') + \frac{Z_{s_2}}{X_{s_2}}(X_1'Y_2' - Y_1'X_2') + (Y_1'Z_2' \\ - Z_1'Y_2') = 0 \end{aligned} \quad (I.17)$$

* 此处所列举的 N 的值, 适应于处理平面航摄像片, 是将标量 N 投影到 XY 平面上得到的。在处理其他类型的摄影像片时, 此标量是 YZ 或 XY 平面上的投影。