

文章编号 2097-1842(2023)04-0777-11

基于数字高程模型高程快速迭代的航拍图像目标定位方法

李梓豪^{1,2}, 匡海鹏^{1*}, 张泓³, 庄楚恒^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 空军装备部驻长春地区军事代表室, 吉林长春 130033)

摘要:在大倾角航空相机对地面目标定位过程中,借助数字高程模型(DEM)可有效解决地球椭球模型定位存在的大地高误差影响。为获取地面坐标的准确信息特别是高程信息,首先,根据载机的位置姿态信息以及航空相机的框架角等信息利用齐次坐标变换求解出成像系统视轴在地理坐标系下的指向,再利用数字高程模型确定目标点的坐标。针对成像过程中目标点高程计算繁琐、容易不迭代等问题,提出了一种对目标高程值进行快速迭代的方法。通过对目标区域高程进行折半查找处理,计算该处视轴光线高程与地面高程差值。继续计算该高程差中值并继续迭代,直到小于一定阈值。最后使用蒙特卡洛分析法对整个成像过程存在的误差项进行分析。实验结果表明:采用快速迭代法进行计算,当收敛阈值为十分之一DEM网格精度时,迭代效率提升45.5%,收敛速度大大提高;且通过数字高程模型计算,在飞行高度为15409 m,相机框架角大于74°时,对于山地区域目标的圆概率误差小于200 m,可以满足实际工程需要。

关键词:航空相机;对地目标定位;数字高程模型;快速迭代法;误差分析

中图分类号:V443.5 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0215

A target location method for aerial images through fast iteration of elevation based on DEM

LI Zi-hao^{1,2}, KUANG Hai-peng^{1*}, ZHANG Hong³, ZHUANG Chu-heng^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Image and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Representative Office of Air Force Department in Changchun, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: kuanghp@163.com

Abstract: In the positioning process of aerial cameras with large inclination angles, the influence of height error in the earth ellipsoid model can be effectively solved with the help of a digital elevation model (DEM). This is very important for obtaining accurate ground coordinates, especially elevation. Firstly, the orientation of the line-of-sight angle in the geographic coordinate system is solved by transforming homogeneous co-

收稿日期:2022-11-11; 修订日期:2022-12-12

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(No. 80-H30G03-9001-20/22)

Supported by Key Project of High Resolution Earth Observation System (No. 80-H30G03-9001-20/22)

ordinates according to the position and attitude information of the carrier aircraft and the frame angle information of the aerial camera, and then the longitude and latitude of the target point are determined by a digital elevation model. To overcome the tedious nature of calculating target elevation and the non-convergence in the imaging process, a fast iterative method is proposed to iterate over the target elevation's value. The difference between the light elevation of the visual axis and the ground elevation is calculated by halving the target elevation. The median elevation difference is calculated iteratively until it is less than a certain threshold. Finally, Monte Carlo analysis was used to analyze the error terms in the whole imaging process. When the convergence threshold is 1/10 DEM in grid accuracy, the iteration efficiency increases by 45.5% and the convergence speed is greatly improved. Through the calculation of the digital elevation model, when the flight height is 15,409 meters and the camera frame's angle is greater than 74° , a mountainous area's target circular error probability is less than 200 m which meets the real engineering needs.

Key words: aerial camera; ground target localization; digital elevation model; fast iteration method; the error analysis

1 引言

为了满足实际科研需求,航空相机不仅要获得高分辨率的航空图像,还要能够对航拍区域进行精确的定位^[1-3]。对于航空相机地面目标定位算法的研究,国内外学者已经取得了一定的成果。王家骥^[4]等根据航空相机设备获取的对目标的指向向量和成像距离等信息,通过建立从被测目标到地面中心测量站 9 个坐标系,进行多次线性变换,构造多个变量的统一测量方程,实现了对目标的定位。周前飞^[5]等提出一种基于像元视线向量的多目标自主定位模型,实现了对多个目标的实时定位。

但上述方法全部依赖于激光设备进行测距定位,激光测距设备会增加载机有效载荷的质量及功耗,并且激光测距设备的工作距离有限,无法进行远距离定位。为了摆脱激光测距设备, Hosseinpour H R^[6]使用装载了实时动态测量 GPS 系统的无人机进行目标定位,通过在目标区域反复成像测量并对获取的数据进行扩展卡尔曼滤波处理实现目标准确定位。孙辉^[7]和徐诚^[8]分别提出了建立目标交会测量目标函数,根据最小二乘原理,建立关于直线交会点坐标的线性方程组,最后通过坐标变换确定目标点的位置。但对目标区域多次成像会使侦察效率降低,且多次拍摄的遥感图像需要进行配准,计算复杂。Helgesen H H^[9]和 Stich E J^[10]分别提出了基于地球椭球模型的地面目标

定位算法,消除了地球曲率对目标定位的影响。李彬^[11]等分析了大倾角远距离航空成像系统的系统误差,提出了探测器安装误差修正模型、组合惯导安装误差修正模型、相机转轴安装误差修正模型,并在此基础上提出了修正系统误差定位方法。刘浩^[12]以 TDICCD 航空相机为研究对象,针对航空相机光轴指向误差分析、误差修正及振动对光轴指向和成像质量影响等地形起伏问题展开研究。杜明鑫^[13]等为方便准确地实现三维姿态角的测量,设计了一种基于透镜阵列的测量系统,并建立了微小三维姿态角测量分析模型。张健^[14]等为减小航空遥感器体积及质量,提出了一种用于航空遥感器平面反射镜系统的装调方法。乔川^[15]考虑基于地球椭球模型的目标定位算法受地形起伏影响较大的问题,采用数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 代替地球椭球模型,大幅提高了丘陵、山区等地形条件下的目标定位精度,但采用局部穷举的算法进行计算,运算量过大,实时性较差。

本文针对利用航空图像进行定位过程中对地面坐标进行迭代时容易出现迭代发散,运算量大的问题,提出了一种快速迭代获取目标高程的定位算法。该算法依据相机 POS 获得的相机位置、姿态角信息以及相机角编码器提供的角度信息,通过坐标系之间的齐次变换来确定目标在地理坐标系下的视轴光线,并利用快速迭代法获得视轴与 ASTER GDEM 高程数据交点的高程信息,进而推导目标点的经纬度。然后,采用蒙特卡洛法

对影响视轴精度的安装误差、姿态测量误差和框架角误差等因素进行了分析。最后对平原、丘陵以及山地区域分别进行了实际飞行实验以验证该算法的有效性。

2 地面目标定位算法

对地目标定位算法的原理是依据相机导航系统和相机框架角编码器所提供的参数建立相应的坐标系, 利用齐次坐标变换将物方坐标、像方焦平面坐标以及视轴参数等统一到同一个坐标系中, 通过目标点与像方焦面位置关系便可以计算出目标点的二维坐标。大倾角航空相机的成像原理如图 1 所示, 成像系统安装在一个两轴框架内。

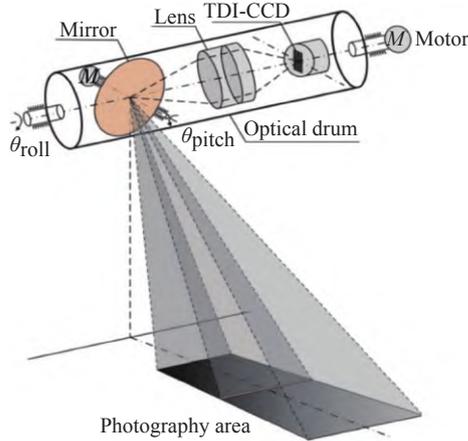


图 1 航空相机原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of the aerial camera

2.1 基于地球椭球模型定位

航空相机对地面物体成像时的空间关系如图 2 所示。航空相机通过相机携带的 CCD 探测器对目标区域进行拍摄, 接收目标图像, 目标发出的光线成像在探测器上, 符合中心成像原理。以相机光学系统的投影中心 S_0 为原点, 建立相机坐标系 $S_0 - X_s Y_s Z_s$, $S_0 Z_s$ 轴为相机视轴指向。CCD 焦平面上的像点与相机坐标系原点的连线经过地面实际物点 Target 的位置。

为了描述目标投影的位置, 建立像方焦面图像坐标系, 如图 3 所示。该坐标系 X_1, Y_1 两轴与相机坐标系 X_s, Y_s 轴方向一致。

则目标点在探测器上的投影点 T 在相机坐标系下的坐标为:

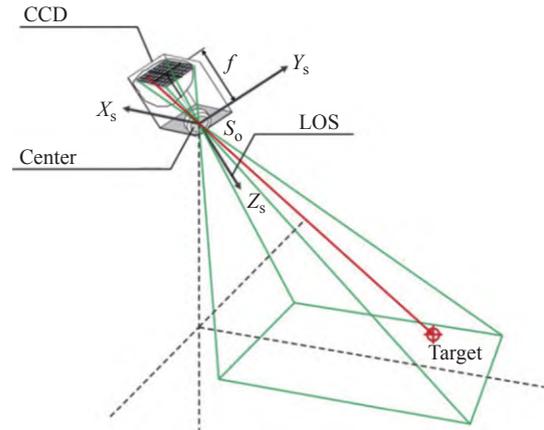


图 2 航空相机成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of airborne camera imaging

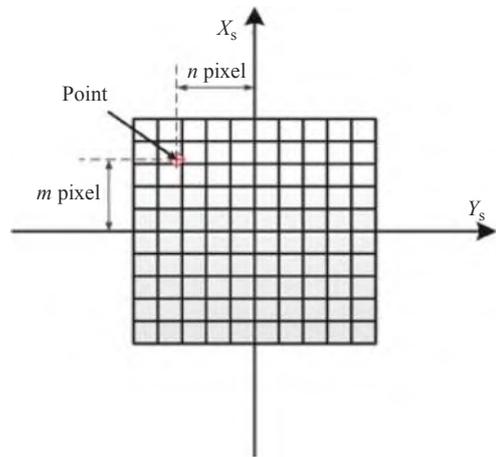


图 3 图像平面坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the image plane coordinate system

$$T'_s = [a \times m \ a \times n \ -f]^T \quad (1)$$

其中 a 为 CCD 的像大小, f 为成像系统的组合焦距。将目标投影点在相机坐标系下的坐标 T'_s 转换至地球坐标系下, 为 $T'_E = [X'_E \ Y'_E \ Z'_E]^T$, 需要经过齐次坐标变换, 如式(2)所示。其中 C_{NED}^{EFED} , C_{AC}^{NED} , C_s^{AC} 分别为地理坐标系到地球坐标系, 载体坐标系到地理坐标系, 以及相机坐标系到载体坐标系的齐次坐标变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} T'_E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_E \\ Y'_E \\ Z'_E \\ 1 \end{bmatrix} = C_{NED}^{EFED} \times C_{AC}^{NED} \times C_s^{AC} \times \begin{bmatrix} T'_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$S_s = [0 \ 0 \ 0]^T$ 为相机坐标系原点在相机坐标系下的坐标。则相机原点在地球坐标系下的坐标 $S_E = [X'_E \ Y'_E \ Z'_E]^T$ 应满足:

$$\begin{bmatrix} S_E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S^E \\ Y_S^E \\ Z_S^E \\ 1 \end{bmatrix} = C_{NED}^{EFED} \times \begin{bmatrix} S_S \\ 1 \end{bmatrix} = C_{NED}^{EFED} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在使用地球椭球模型进行近似计算时,建立地球坐标系 ECEF (Earth-Center Earth-Fixed), 其原点位于地球质心, X_E 轴指向地球赤道面与格林尼治子午圈的交点, Z_E 轴指向地球北极, Y_E 轴在赤道平面里与其余两轴成右手坐标系, 如图 4 所示。

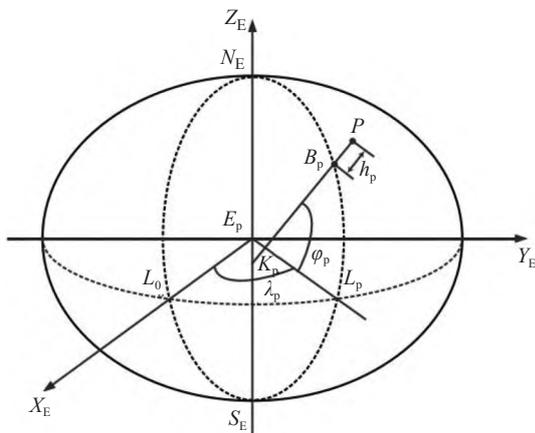


图 4 地球坐标系与地球椭球模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the ECEF coordinate frame and the Earth ellipsoid model

在航空相机成像过程中,地面目标点与相机坐标系的原点及像面的像点在同一条直线上。因此,目标点在地球坐标系下的坐标 $T_E = [X_T^E \ Y_T^E \ Z_T^E]$ 应满足:

$$\frac{X_T^E - X_S^E}{X_{T'}^E - X_S^E} = \frac{Y_T^E - Y_S^E}{Y_{T'}^E - Y_S^E} = \frac{Z_T^E - Z_S^E}{Z_{T'}^E - Z_S^E} \quad (4)$$

基于地球椭球模型的地面目标定位算法需要已知目标的大地高信息,若目标的高程为 h_T , 则目标在地球坐标系下的坐标 $T_E = [X_T^E \ Y_T^E \ Z_T^E]$ 应满足:

$$\frac{(X_T^E)^2}{(R_E)_T^2} + \frac{(Y_T^E)^2}{(R_E)_T^2} + \frac{(Z_T^E)^2}{(R_P)_T^2} = 1 \quad (5)$$

$(R_E)_T = R_E + h_T$ 为地球椭球在目标大地高所对应的的半长轴, $(R_P)_T = (R_E)_T(1 - e^2)^{\frac{1}{2}}$ 为地球椭球在目标大地高所对应的的半短轴。联立式(4), 式(5)可以得出目标在地球坐标系下的坐标 $[X_T^E \ Y_T^E \ Z_T^E]$ 。以图 4 空间中任一点 P 点为例, 假设其地球坐标系坐标为 $[X_p^E \ Y_p^E \ Z_p^E]$, P 点的地理位

置信息 $[\varphi_p \ \lambda_p \ h_p]^T$ 可以通过下式计算得到。

$$\begin{bmatrix} X_p^E \\ Y_p^E \\ Z_p^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_n + h) \cos \varphi_p \cos \lambda_p \\ (R_n + h) \cos \varphi_p \sin \lambda_p \\ (R_n(1 - e^2) + h_p) \sin \varphi_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: R_n 是纬度为 φ 时卯酉圈的曲率半径。反解目标的经纬度通常使用迭代的方式, 通过式(6)建立方程组:

$$\begin{cases} (R_n)_i = \frac{R_E}{(1 - e^2 \sin^2(\varphi_p)_{i-1})^{1/2}} \\ (h_p)_i = \frac{[(X_p^E)^2 + (Y_p^E)^2]^{1/2}}{\cos(\varphi_p)_{i-1}} - (R_n)_{i-1} \\ (\varphi_p)_i = \arctan \left\{ \frac{Z_p^E [(1 - e^2)(R_n)_{i-1} + (h_p)_{i-1}]}{[(X_p^E)^2 + (Y_p^E)^2]^{1/2} ((R_n)_{i-1} + (h_p)_{i-1})} \right\} \end{cases} \quad (7)$$

迭代需要合适的初值:

$$\begin{cases} (R_n)_0 = R_e \\ (h_p)_0 = [(X_p^E)^2 + (Y_p^E)^2 + (Z_p^E)^2]^{1/2} - (R_e R_p)^{1/2} \\ (\varphi_p)_0 = \arctan \left\{ \frac{Z_p^E [(1 - e^2)(R_n)_0 + (h_p)_0]}{[(X_p^E)^2 + (Y_p^E)^2]^{1/2} ((R_n)_0 + (h_p)_0)} \right\} \end{cases} \quad (8)$$

迭代四次以上即可保证 P 点纬度的计算精度不低于 $0.00001''$, 高度精度也可以达到 0.001 m ^[16]。迭代后 P 点经度为:

$$(\lambda_p)_0 = \arctan \left(\frac{X_p^E}{Y_p^E} \right) = \begin{cases} (\lambda_p)_0 & X_T > 0 \\ (\lambda_p)_0 + \pi & X_T < 0, (\lambda_p)_0 < 0 \\ (\lambda_p)_0 - \pi & X_T < 0, (\lambda_p)_0 > 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 数字高程模型

在利用基于地球椭球模型的目标定位算法解算目标位置时,目标大地高误差会严重影响定位精度,同时大倾角航空相机的工作方式通常为扫摆成像,每次成像过程对应不同的倾角,因此需要对不同大地高误差及不同倾角下的成像目标定位精度进行分析。假设载机位置信息为 $[28.9702, 89.0043, 15409]$, 目标大地高 3824 m , 利用 matlab 对地球椭球模型定位算法进行分析,分析在大地高标准差为 $10 \sim 190 \text{ m}$ 时,不同成像倾角下的目标定位的均方根误差,其结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

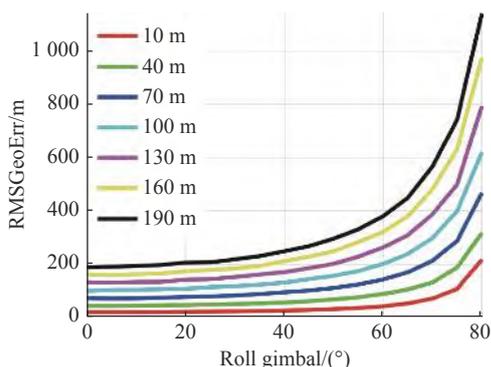


图5 不同大地高标准差下成像倾角对目标定位精度的影响

Fig. 5 Effects of imaging inclinations on target positioning accuracy under different ground height standard deviations

通过分析大地高以及倾角对定位精度的影响,可以看出基于地球椭球模型对地目标定位方法的定位误差随着地形起伏以及成像倾斜角度的增大而增大。基于地球椭球模型的算法采用平均高程进行目标定位计算,对于地形变化较大的区域定位效果较差。针对该问题,可引入数字高程模型来获取目标区域的地形情况,实现复杂地形区域目标的高精度定位需求,可以有效减小目标大地高误差对定位的影响。由于 ASTER GDEM V2 的垂直精度约为 20 m, 所以其定位精度应与大地高标准差为 20 m 时采用基于地球椭球模型的定位精度基本一致。

3 高程迭代方法

数字高程模型克服了地球椭球模型模糊大地高所带来的定位误差过大问题。然而,获取目标点准确的高程信息是保证定位精度的关键。文献 [17] 提出一种迭代摄影测量方法求解投影光线在地面上的位置。其基本原理为:取地面点近似高程值 Z_0 , 利用投影光线方程确定初始投影点 A_0 位置坐标 (X, Y) 。根据坐标 (X, Y) 垂直跟踪到地形表面得到其对应的高程值 Z_1 。将高度从 Z_0 更新到 Z_1 , 重复以上过程确定后续的投影点, 直至收敛。输出最后坐标点位置 (X, Y, Z) 作为地面坐标。这种迭代计算方法原理如图 6 所示。

常规迭代摄影方法适用于地形较为平坦的区域。但其存在迭代计算结果无法收敛的两种情况: 当视轴光线的倾角与目标点附近地面坡度角

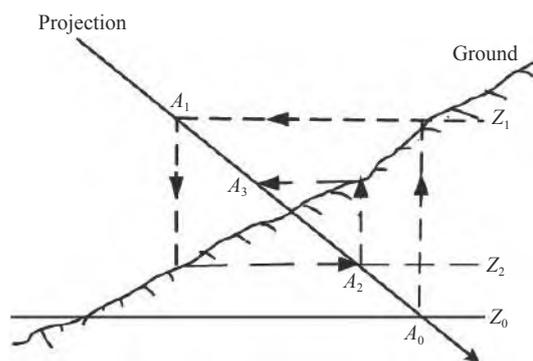


图6 迭代摄影测量法计算过程

Fig. 6 Calculation process of the iterative photogrammetry method

大小相等时, A_0 、 A_1 点与地面上的投影点恰好构成一个矩形, 此时迭代过程将在矩形 4 个顶点之间往复; 当目标点地面坡度角比视轴光线的倾角更大时, 此时迭代计算将在目标点两侧无规则振荡, 无法逼近目标点, 如图 7 所示。

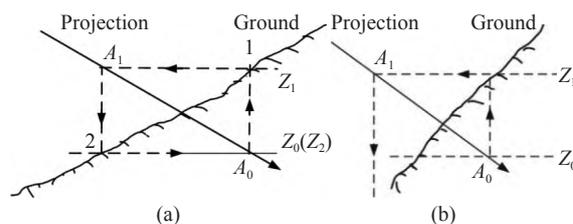


图7 常规迭代方法不收敛的情形。(a)情形1; (b)情形2
Fig. 7 Situations of the iterative non-convergence of the regular iterative method. (a) Situation 1; (b) situation 2

针对上述两种情形, 文献 [18] 提出一种改进的迭代方法。由高程初值 Z_0 确定 A_0 点, 在垂直方向上以及水平向外方向分别确定地面上的 1、2 号点, 过这两点的直线与视轴光线相交于点 A_2 。过 A_2 点再次从垂直及水平方向确定 3、4 点再次计算, 得到新的交点位置。重复这一过程直至收敛到目标点或达到设定的阈值。其基本原理如图 8(a) 所示。

改进的迭代方法在视轴光线与地面相交于近端时收敛, 当视轴光线与地面相交于远端时, 会出现迭代不收敛的情况。而这种情况在进行远距离大倾角成像时很容易发生, 如图 8(b) 所示。

为了避免迭代不收敛的问题, 文献 [15] 提出使用全局搜索法(局部穷举法)。虽然将目标点附近全部高程范围作为迭代窗口, 经过一定的时间算法能够收敛, 但这种算法迭代次数繁多, 尤其是

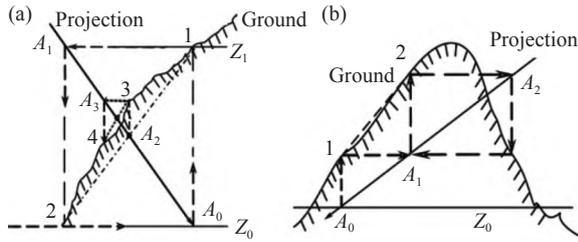


图 8 文献 [9] 的改进迭代方法。(a)可收敛情形; (b)不收敛情形

Fig. 8 Improved iterative calculation method in Ref. [9]. (a) Convergent situation; (b) non-convergent situation

在地形崎岖的山地区域, 迭代效率低下。针对此问题, 莫德林^[19]提出了采用不同步长进行分段迭代的定位算法。其基本思想是: 在迭代初期按照图 8(a)所示方法进行计算, 当迭代到预先设定的次数时, 采用视向量分段迭代算法。以目标区域高程构建一个迭代窗口, 其范围为 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$, 对该窗口内的视轴向量按高程间隔 ΔZ 划分, 分别计算每个分段处视轴向量上的点与其对应的地面点之间的高程差 Δh , 寻找到 Δh 最小的高程值 Z_{new} , 选择该窗口作为新的迭代窗口, 继续进行分段, 直至 Δh 小于一定阈值。基本原理如图 9 所示。

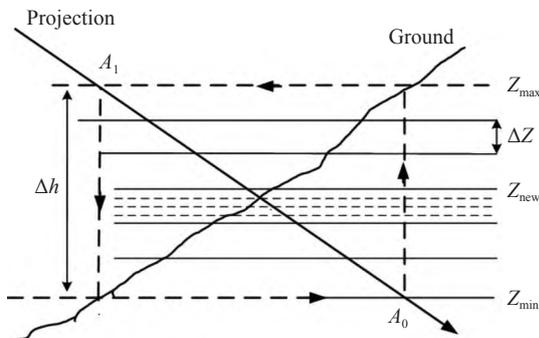


图 9 视向量分段迭代基本原理

Fig. 9 Basic principle of visual vector segmentation iterative calculation

该算法可以有效处理之前算法迭代不收敛的问题, 但是该算法对于迭代窗口的构建, 步长的更新如何确定等问题需要视情况调整, 算法复杂且影响因素众多, 影响算法的收敛速度。

4 快速迭代算法

在实现地面目标定位的过程中, 保证算法收

敛速度与算法的适用性同样重要。局部穷举法不存在像常规摄影迭代法和改进迭代法可能出现的迭代不收敛问题, 视向量分布迭代法进一步解决了局部穷举法计算量巨大的问题。但视向量迭代法算法是基于局部穷举法的改进, 且采用了与改进迭代法结合的策略。两种算法的结合解决了迭代不收敛的问题, 同时相较于局部穷举法提高了效率。但两种算法结合也提高了算法的复杂度。为了保证迭代的收敛性以及算法的简洁性, 本文提出了一种快速迭代算法。上述方法出现不迭代的情形都是由于在地面目标点上下循环或震荡, 本文方法可始终保持投影光线在地面上方区域(即投影光线上的点与地面高程差值大于零), 从而避免了循环导致的不迭代情况。该算法只需选取初始最大高程值即可进行迭代, 相较于视向量分段迭代法, 无需预先设定迭代窗口与迭代步长, 保证了算法的简洁性。其基本原理如图 10 所示。

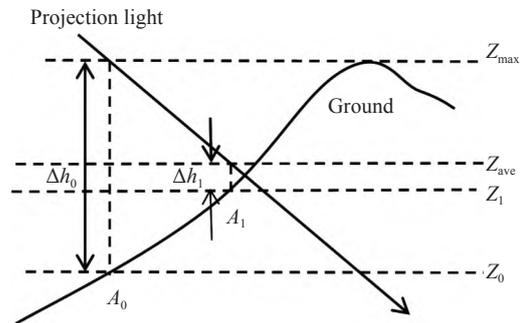


图 10 快速迭代法基本原理

Fig. 10 Basic principle of the fast iterative method

4.1 本文算法流程图及基本原理

在全局搜索法的基础上, 取目标区域的最高大地高 Z_{\max} , 将其垂直向下投影到数字高程模型上, 得到点 A_0 , A_0 对应的高程值为 Z_0 。 Z_{\max} 与 Z_0 的差值 Δh_0 大于零, 求取 Z_{\max} 与 Z_0 的中值 Z_{ave} , 计算 Z_{ave} 与 A_1 点的高程值 Z_1 的高程差 Δh_1 , 若 Δh_1 大于 0, 说明 Z_{ave} 对应视轴光线上的点位于目标点上方, 将 Z_{ave} 与对应地面高程组成新的迭代窗口; 若 Δh_1 小于 0, 则将 Z_{ave} 与 Z_{\max} 组成新的迭代窗口, 继续迭代直至高程差值 Δh_i 在误差允许范围内。通常情况下, 该范围为 DEM 网格精度的 1/10。本文提出快速迭代法的具体流程图如图 11 所示。

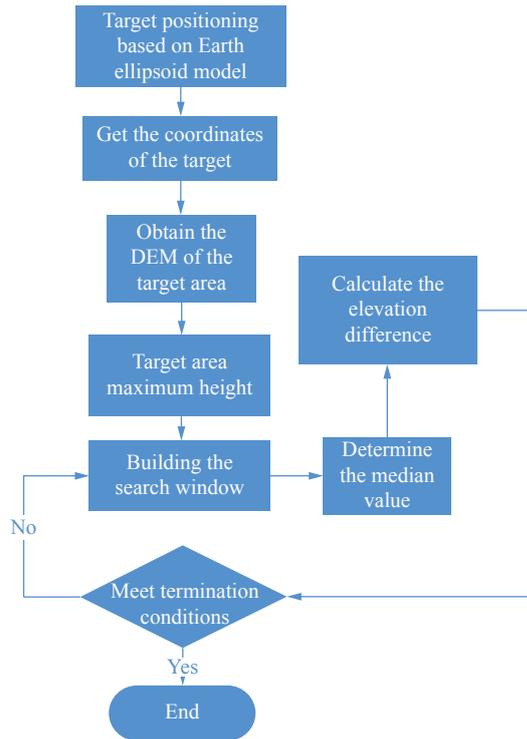


图 11 快速迭代法示意图

Fig. 11 Schematic diagram of fast iterative method

4.2 算法具体实现

快速迭代方法的具体实现步骤如下:

(1) 首先利用地球椭球模型估算目标的地理位置, 提取该目标区域的高程信息;

(2) 获取该目标区域的高程最大值 Z_{max} , 视轴光线在该高程对应数字高程模型上的点的高程值为 Z_0 , Z_{max} 与 Z_0 的差值为 Δh_0 , $\Delta h_0 > 0$;

(3) 取高程中值 $Z_{ave} = (Z_{max} + Z_0)/2$, 计算中值 Z_{ave} 在投影光线上的点与其在数字高程模型上的投影点的高程 Z_1 的差值 Δh_1 。若 $\Delta h_1 > \varepsilon$, (ε 为允许的误差值) 则取 $Z_{max} = Z_{ave}$, $Z_0 = Z_1$, 进入步骤 (3), 否则进入步骤 (4);

(4) 若 $\Delta h_1 < 0$, 则取 $Z_{max} = Z_{max}$, $Z_0 = Z_{ave}$, 进入步骤 (3), 否则输出高程值 $Z = Z_{ave}$, 得到目标高程。

相较于视向量分段迭代算法, 本算法也是通过高程差来更新迭代窗口并判断目标点位置的。但分段迭代法需预先设置迭代窗口的步长以及窗口的更新规则, 依据地形的复杂度要进行不同的设置才能达到最好的效果, 而快速迭代算法在迭代过程中会自行更新迭代步长, 且地形起伏越大, 迭代步长越长, 在山地区域能收敛到目标点附近, 确保了算法的效率; 当收敛到目标点附近时, 迭代步长会迅速缩短, 保证算法的精确度。

5 测量实验与结果

目标定位精度是评判航空相机的一项重要指标。在对地目标定位过程中, 主要受到目标指向误差和载机位置误差的影响。通常采用蒙特卡洛分析方法对目标定位误差进行仿真分析。

5.1 目标定位误差分析

在航空相机对地目标定位过程中, 载机 LOS 系统输出的经度、纬度和高度以及载机飞行姿态等信息, 包括相机角编码器输出的视轴角度信息等都存在一定的误差, 这些误差都会影响对地目标定位的准确性。各参数的误差值如表 1 所示。

表 1 视轴指向误差计算中的仿真数据

Tab. 1 The simulation data for the line-of-sight (LOS) direction error calculation

	误差来源	误差 σ
载机姿态测量误差	航向方向	0.05°
	俯仰方向	0.02°
	横滚方向	0.02°
相机框架角测量误差	外框架	0.02°
	内框架	0.02°
组合导航系统校准误差	航向方向	0.03°
	俯仰方向	0.01°
相机框架安装误差	横滚方向	0.01°
	外框架	0.01°
	内框架	0.01°

对该视轴方向取样本数 10000 进行模拟仿真, 得到航空相机视轴指向在当前地理坐标系下的名义值 $[0.9386; -0.2277; 0.2592]$, 得到目标指向误差分布如图 12 所示。由误差概率分布图

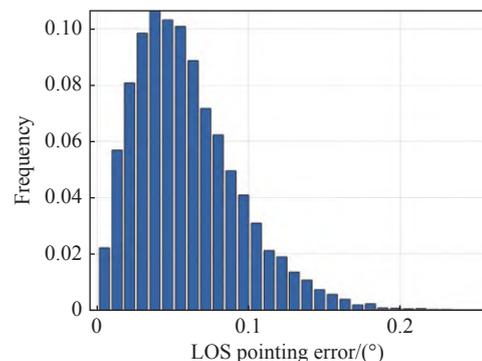


图 12 视轴指向误差概率分布图

Fig. 12 Probability distribution of the LOS pointing error

可以看出,通过对该目标点进行 10000 次成像模拟实验,超过 50% 的视轴指向误差值落在 $0.004^{\circ}\sim 0.05^{\circ}$ 的范围内,且视轴指向误差小于 0.10° 占 86.24%,仿真误差值小于 0.15° 占 98.4% 以上,视轴指向的均方根值误差为 0.0681° 。该误差分布符合实际使用精度,满足实际工程需求。

5.2 飞行实验验证

以某型大倾角航空相机航拍图像为实验数据。该相机焦距为 1900 mm,成像倾角为 78° 。航空图像行数为 48836,列数为 7584。飞机飞行高度在 15409 m 左右,与目标距离 26000 m 以上,飞行方向为 -102.44° ,摆扫开始角度为 -6.44° ,摆扫结束角度为 -18.21° ,利用实际飞行的 56 组数据进行定位。在飞行实验中,采用 3 组来自平原、丘陵以及山脉的 ASTER-GDREM V2 的数字高程模型数据进行实验,该 DEM 精度为 20 m。三处地形对应的载机姿态位置信息、框架角位置信息等信息的名义值如表 2 所示,误差同表 1。

为验证快速迭代算法的正确性,对三处地形分别计算,航空图像及定位结果如图 13(彩图见期刊电子版)所示。图 13 对应的 3 组地形目标点坐标分别为 $[29.3559124, 88.8988296, 3850.0036]$ 、 $[29.3746921, 88.9026302, 3935.7022]$ 和

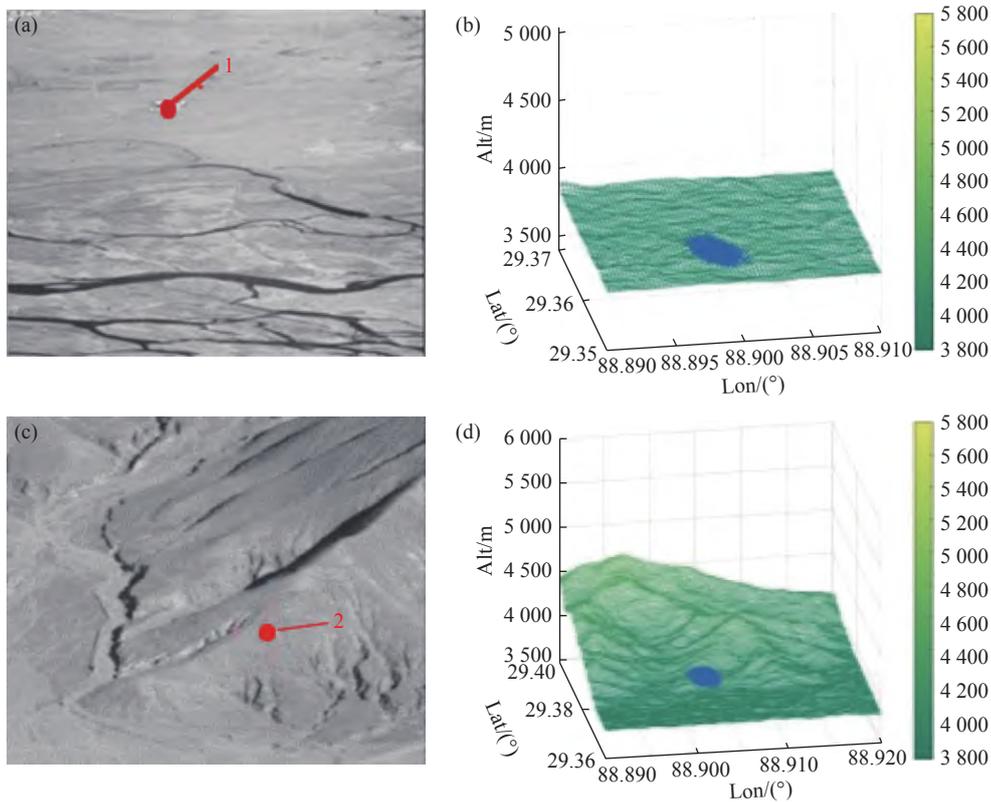
表 2 测量变量的名义值

Tab. 2 Nominal values of the measurement variable

误差变量	平原	丘陵	山地
载机纬度	28.9702°	28.9703°	28.9705°
载机经度	89.0043°	89.0045°	89.0056°
载机大地高	15409 m	15409 m	15409 m
载机航向角	-102.4800°	-102.4800°	-102.4800°
载机俯仰角	2.8679°	2.8679°	2.8679°
载机横滚角	-0.3876°	-0.3876°	-0.3876°
外框架	74.6747°	75.3977°	78.7673°
内框架	0.2304°	-0.7532°	-0.7064°

$[29.4453004, 88.8862045, 5289.8706]$,与谷歌地图进行比较,实际误差分别为 153.5 m、118.8 m 和 516.9 m,分析三处地形使用快速迭代法的定位坐标误差,其中圆概率误差为 CEP(50%),如表 3 所示。

对于以上地区分别采用局部穷举法、改进迭代测量法、视向量分段迭代法和快速迭代算法进行计算。实验环境为 Microsoft Win10 64 位操作系统,CPU 为 Intel(R) Core(TM) 2.90 GHz,内存容量为 16 GB。允许高程误差为 0.2 m 的条件下,分别进行定位计算迭代平均时间数(100 次),结果如表 4。



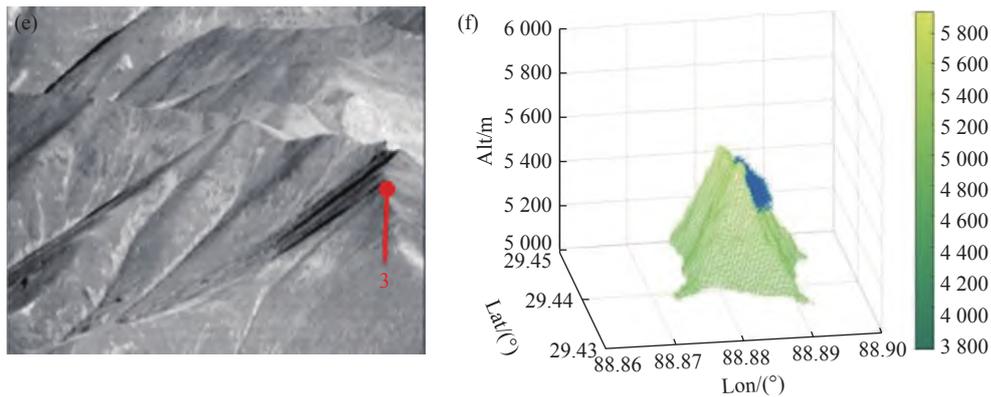


图 13 不同地区航空影像及定位结果。(a)~(b)平原;(c)~(d)丘陵;(e)~(f)山脉

Fig. 13 Aerial images of different regions and positioning results. (a)~(b) plain; (c)~(d) hill; (e)~(f) mountain

表 3 快速迭代法坐标定位误差结果

Tab. 3 Error results of coordinate positioning by the fast iterative method

地形	平原	丘陵	山地
纬度均方根误差	0.001 131°	0.000 903°	0.001 923°
经度均方根误差	0.000 546°	0.000 496°	0.000 499°
大地高均方根误差	20.3096 m	26.7596 m	36.253 1 m
定位均方根误差	137.7469 m	114.3994 m	221.8547 m
圆概率误差	114.7890 m	95.3328 m	184.8812 m

表 4 不同方法迭代时间统计

Tab. 4 Iteration times of different methods (ms)

	局部穷举法	改进迭代法	视向量迭代法	快速迭代法
平原	4 156	3 843	3 540	3 648
丘陵	18 610	5 269	4 712	4 530
山地	1 249 840	86 312	36 879	20 106

根据以上实验数据可以得到以下结论:

(1)由表 3 结果可知,快速迭代算法的精度较高,纬度均方根误差小于 0.002°,经度均方根误差小于 0.001°。在 DEM 精度为 20 m 的情况下,大地高均方根误差为 20 m 左右。平原、丘陵和山地的地形在该实验条件下,圆概率误差分别为 114.7890 m, 95.3328 m 和 184.8812 m,且表 3 得到的误差符合图 5 仿真结果,该算法满足实际工程需要。

(2)由图 13 及表 4 可知:在地形起伏较小的

地区(平原),快速迭代算法以及其他算法均有效,且效率相当;对于地形起伏稍大的区域(丘陵),采用固定步长迭代的局部穷举法运算过于繁琐,不再适用;而改进迭代方法与视向量迭代法和本文快速迭代算法都可以收敛,且效率接近;对于地形起伏较大的区域(山地),改进迭代方法由于坡度背向问题容易出现不收敛而不再适用;而视向量迭代法和本文快速迭代算法都可以收敛,且本文算法效率提高接近 45.5%。上述结果验证了快速迭代算法的正确性,证明该算法具有较好的鲁棒性。

6 结 论

在分析已有获取地面高程方法的基础上,针对大倾角航拍图像地面目标定位算法在地形起伏较大区域容易出现迭代不收敛以及算法复杂度较高的问题,提出了一种快速迭代算法对目标高程值进行迭代。通过投影光线与对应地面高程的差值作为判断标准,不断迭代并缩小窗口。通过对不同地形的实验分析,证明了该快速迭代算法可以解决大倾角航空相机在地形起伏较大区域迭代不收敛,计算过程繁琐的问题。通过计算得到目标定位纬度均方根误差小于 0.002°,经度均方根误差小于 0.001°,在大地高标准差比较大的山地区域,圆概率误差小于 200 m,定位效率提升 45.5%,满足实际工程需要。

参考文献:

[1] 檀立刚. 机载光电侦察设备目标自主定位技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研

- 究所), 2012.
- TAN L G. Research of target automatic positioning technology in airborne photo-electricity survey equipment[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [2] 王晶, 杨立保, 高利民. 机载光电平台目标定位测量技术[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 531-534.
- WANG J, YANG L B, GAO L M. Target orientation measuring of airborne EO platform[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 32(4): 531-534. (in Chinese)
- [3] 穆绍硕, 乔川. 小型机载光电平台中基于扩展卡尔曼滤波的地面目标定位算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 321-331.
- MU SH SH, QIAO CH. Ground-target geo-location method based on extended Kalman filtering for small-scale airborne electro-optical platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 321-331. (in Chinese)
- [4] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 105-116.
- WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [5] 周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 189-203.
- ZHOU Q F, LIU J H, XIONG W ZH, *et al.*. Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 189-203. (in Chinese)
- [6] HOSSEINPOOR H R, SAMADZADEGAN F, DADRASJAVAN F. Precise target geolocation and tracking based on UAV video imagery[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B6: 243-249.
- [7] 孙辉, 李志强, 张建华, 等. 机载光电平台目标交会定位[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 988-996.
- SUN H, LI ZH Q, ZHANG J H, *et al.*. Target localization with intersection measurement for airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 988-996. (in Chinese)
- [8] 徐诚, 黄大庆, 孔繁镛. 一种小型无人机无源目标定位方法及精度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(5): 1115-1122.
- XU CH, HUANG D Q, KONG F Q. Small UAV passive target localization approach and accuracy analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(5): 1115-1122. (in Chinese)
- [9] HELGESEN H H, LEIRA F S, JOHANSEN T A, *et al.*. Detection and tracking of floating objects using a UAV with thermal camera[M]//FOSSEN T I, PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. *Sensing and Control for Autonomous Vehicles*. Cham: Springer, 2017: 289-316.
- [10] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance[C]. *2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*, IEEE, 2013: 136-140.
- [11] 李彬, 丁亚林, 修吉宏, 等. 大倾角远距离航空成像的修正系统误差定位方法[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1265-1274.
- LI B, DING Y L, XIU J H, *et al.*. System error corrected ground target geo-location method for long-distance aviation imaging with large inclination angle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1265-1274. (in Chinese)
- [12] 刘浩. 三轴 TDICCD 航空相机指向误差及成像质量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- LIU H. Research on pointing error and imaging quality of the three-axis TDICCD aerial camera[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [13] 杜明鑫, 闫钰锋, 张燃, 等. 基于透镜阵列的三维姿态角度测量[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 45-55.
- DU M X, YAN Y F, ZHANG R, *et al.*. 3D position angle measurement based on a lens array[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 45-55. (in Chinese)
- [14] 张健, 王健飞, 方新, 等. 航空遥感器平面反射镜系统装调方法[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 534-544.
- ZHANG J, WANG J F, FANG X, *et al.*. Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 534-544. (in Chinese)
- [15] 乔川. 基于数字高程模型的高空远距离航空相机对地目标定位技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- QIAO CH. Research on ground target geo-location technology based on digital elevation model for high-altitude long-range aerial camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

- [16] 乔川,丁亚林,许永森,等.大角度倾斜成像航空相机对地目标定位[J].光学精密工程,2017,25(7):1714-1726.
QIAO CH, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1714-1726. (in Chinese)
- [17] SHENG Y W. Comparative evaluation of iterative and non-iterative methods to ground coordinate determination from single aerial images[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 267-279.
- [18] 郭海涛.基于卫星遥感影像的单片测图与修测技术的研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2002.
GUO H T. Research on monolithic mapping and inspection technology based on satellite remote sensing image[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2002. (in Chinese)
- [19] 莫德林.航空长焦斜视相机成像模型与几何检校方法研究[D].郑州:战略支援部队信息工程大学,2018.
MO D L. Research on imaging model and geometric calibration method for airborne long focal wiskbroom camera[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2018. (in Chinese)

作者简介:



李梓豪(1998—),男,山西大同人,硕士研究生,2020年于哈尔滨工业大学获得学士学位,目前主要从事航空目标定位方面的研究。E-mail: 17863107753@163.com



匡海鹏(1971—),男,吉林长春人,博士,研究员,硕士生导师,1994年于吉林工业大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位。主要从事航空相机电子学方面的研究。E-mail: kuanghp@163.com