

受限观测条件下光电对地定位的全局最优化方法

陈晨^{1,2}, 关棒磊^{1,2*}, 尚洋^{1,2**}, 李璋^{1,2}, 于起峰^{1,2}¹国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;²图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 高精度的目标实时定位对于无人机侦察和指引目标至关重要。但在大倾角、小交会角等受限观测条件下, 机载光电平台对地定位精度难以满足任务需求。为提高受限观测条件下机载光电平台对地定位的精度, 提出了一种基于观测平台位置和对目标激光测距的对地定位全局最优化方法。首先, 根据地面固定目标的连续观测数据建立加权误差方程, 再将非线性问题转换为特征向量求解问题, 无需迭代优化即可求出全局最优解。然后, 通过蒙特卡罗仿真分析定位方法受误差源的影响, 并通过多次飞行实验验证了该定位方法的有效性。实验结果表明, 在受限观测条件下, 所提方法对地定位误差低于 30 m, 运算耗时不超过 10 ms。本文方法具有定位精度高、计算效率高等优点, 以及较高的工程应用价值。

关键词 目标定位; 受限观测; 全局最优解; 激光测距; 机载光电平台

中图分类号 V249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221696

1 引言

利用机载光电平台进行目标的识别和精准定位, 是无人机(UAV)智能化的重要特征^[1-2]。随着计算机视觉、摄影测量等技术的迅猛发展, 无人机光电平台在目标识别、跟踪和定位等方面取得了长足的进步, 并在国防、航空、交通等关键领域起着重要作用。例如, 通过无人机侦察在战场上为指挥员提供有用的信息, 具有巨大的情报保障价值和作战指挥作用^[3]。然而, 实际作战过程中无人机侦察往往面临着大倾角、小交会角等严苛观测条件, 导致机载光电平台的观测方程具有严重的病态性, 传统光电对地定位方法在这类受限观测条件下的定位精度显著降低^[4]。

针对上述受限观测条件下光电对地定位的难题, 国内外专家学者从图像匹配定位和几何定位两种不同的技术途径展开了探索。从图像匹配定位角度来看, 实测图与参考图有较大的视角差异, 为此学者们研究了提高匹配算法的仿射不变性。Brese等^[5]对初步匹配的仿射不变区域进行归一化和对齐, 以模拟场景仿射变换, 能匹配垂直和水平视角变化高达 80° 的场景。Śluzek^[6]提出的 SIMSER (Scale-Insensitive Maximally Stable Extremal Regions) 提高了 MSER (Maximally Stable Extremal Regions) 算法的尺度不变性。但每种特征图像匹配算法都存在一定的局限性, 需结合实际场景改进。曾庆化等^[7]利用机载惯性信息求解实测图

与参考图之间的变换关系, 减小图像间视角差异, 提高了大视角图像匹配的效率。陈艳^[8]基于 ORB (Oriented Fast and Rotated Brief) 算法, 对图像进行视角模拟, 消除图像变形, 研究了远距离斜下方的同源和异源图像的匹配问题。从几何定位角度来看, 受限观测条件下设计阵的列向量存在复共线性, 使得设计阵呈现病态^[9]。余卓^[10]将有偏估计中的岭估计方法应用到目标定位测速中, 提高了受限观测条件下机载光电平台对目标定位测速的精度和鲁棒性。

在大倾角、长焦距的受限观测条件下, 图像透视变换效应明显, 物体分辨率低, 给利用图像信息的对地定位算法引入了较大误差。上述研究在一定程度上提高了受限观测条件下的定位精度, 但多利用图像信息进行定位, 几何定位研究较少。目前, 距离信息被广泛用于多个定位领域^[11-13]: 在卫星激光测距定位领域, 根据测距交会原理^[14], 利用三个地面已知点到卫星的距离构建方程组; 在室内定位领域, Larsson等^[15]利用发送器和接收器间的距离求解三边测量问题; 在光电平台目标定位领域, 陈丹琪等^[16]利用激光测距值建立非线性方程组, 将最小二乘的粗解作为高斯牛顿迭代法的初值。

现有研究表明, 激光测距仪在 10 km 内测距误差小于 10 m^[17], 而且不受大倾角、小交会角等观测条件的影响, 使得激光测距在对地定位中具有极高的应用价值。考虑到机载光电平台中通常配备有激光测距

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-19; 录用日期: 2022-11-07; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11902349, 11727804)、湖南省自然科学基金(2020JJ5645)

通信作者: *banglei.guan@hotmail.com; **shangyang1977@nudt.edu.cn

仪,本文结合机载光电平台的位置信息和平台与目标之间的测距信息进行约束求解,将非线性问题转换为特征向量求解问题,设计了一种基于激光测距的光电对地定位全局最优化方法,用于提高观测条件不佳情况下的对地定位精度和计算效率。

2 基本原理

无人机对地定位系统主要由光电平台、导航系统等组成。光电平台安装在无人机机身下部的吊舱中,搭载了电视跟踪器、激光测距仪等设备。光电平台能够通过电视跟踪器对感兴趣的地面目标进行跟踪锁定,并通过激光测距仪得到平台与目标之间的测距信息。虽然目标成像提供了对目标的指向信息,但无人机平台以及光电吊舱姿态角度一般难以达到高精度定位目标所需求的精度。本文方法结合导航系统提供的无人机三维位置信息和对目标的激光测距信息,在不使用目标方位角度的情况下,可以实现对地面目标的精确定位。

图 1 为无人机对地定位示意图,无人机飞行过程中,目标 P 被锁定在视场中心区域,观测视线与铅直方向的夹角 θ 是倾角。当在目标正上方观测时, $\theta = 0$, 观测条件最佳, θ 越大, 观测条件越差^[10]。

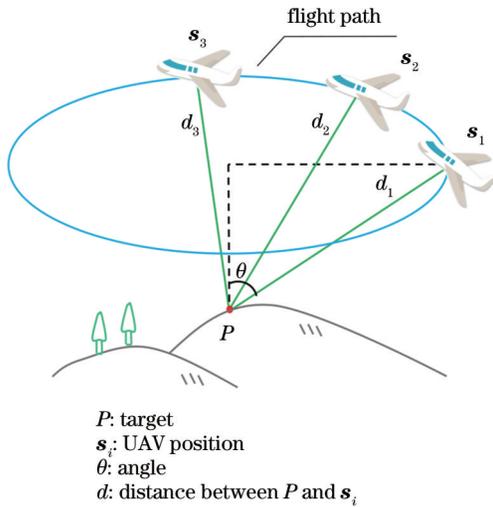


图 1 无人机对地定位示意图
Fig. 1 Ground target localization with UAV

2.1 理论基础

根据 WGS-84 坐标系 (World Geodetic System-1984 Coordinate System) 提供的椭球模型,建立如图 2 所示的地心地固坐标系 (ECEF), 也称为地球坐标系。其原点 O 位于地球质心, Z_E 轴与地轴平行指向北极点, X_E 轴指向本初子午线与赤道的交点, Y_E 轴垂直于 $X_E O Z_E$ 平面与其余两轴构成右手坐标系。

由大地坐标系中任意一点的坐标 (L, B, H) 到地球坐标系的坐标 (x, y, z) 的变换关系为

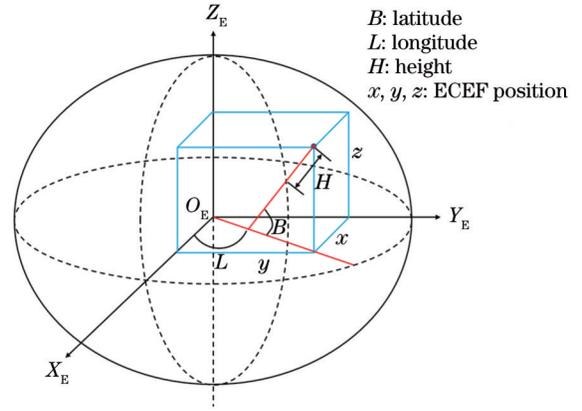


图 2 地球坐标系与大地坐标系
Fig. 2 Earth coordinate system and geodetic coordinate system

$$\begin{cases} x = (N + H) \cos B \cos L \\ y = (N + H) \cos B \sin L \\ z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases}, \quad (1)$$

式中: e 为椭球第一偏心率; N 为该点对应的卯西圈的曲率半径。由地球长半轴 a 、短半轴 b 以及该点纬度表示为

$$\begin{cases} e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \end{cases}. \quad (2)$$

2.2 全局最优化对地定位方法求解

根据观测平台位置信息与到目标的距离信息进行目标定位,在无线电定位领域应用较多。受文献[15]的启发,针对目前基于激光测距值进行目标定位的已有算法耗时长、鲁棒性差的问题,本文提出了基于激光测距的光电对地定位全局最优化方法,将给定多个位置信息与距离信息进行目标位置解算的问题表述为一个特征值问题,通过导出等价特征向量,给出非凸优化问题的快速闭式解。如图 3 所示,根据组合导航系统提供的经纬高得到无人机在地球坐标系下的坐标,结合激光测距仪提供的距离信息进行目标位置解算。

如图 1 所示,无人机通过跟踪器将目标锁定在摄像机视场中心,以地面静止目标为圆心绕圆飞行,每隔一定时间组合导航系统输出无人机的位置信息,激光测距仪输出目标与无人机之间的距离信息。 t_i 时刻无人机位于航迹点 i , 目标与无人机间的距离可以描述为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中: (x, y, z) 为目标位置; (x_i, y_i, z_i) 为无人机位置; d_i 为激光测距值。记 $x = [x \ y \ z]^T$, $s_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, 假设观测误差为 ϵ_i , 则有:

$$d_i = \|x - s_i\| + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

通过光滑平方最小二乘公式 (SLS)^[18] 使误差和

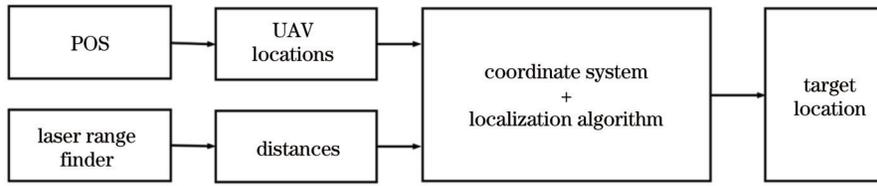


图 3 基于激光测距的对地定位工作流程

Fig. 3 Ground target localization based on laser ranging

最小:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^3} \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\|x - s_i\|^2 - d_i^2 \right)^2 \right\}. \quad (5)$$

考虑到不同航迹点 i 处的观测噪声 ε_i 不同, 设置不同的权重 $\omega_i = \frac{1}{d_i^2 \sum_{i=1}^N (1/d_i^2)}$, $i = 1, 2, \dots, N$, 权重之和满足 $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$ 。

则可将加权模型描述为

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \left(\|x - s_i\|^2 - d_i^2 \right)^2. \quad (6)$$

将式(6)展开, 得到:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \left(x^T x - 2x^T s_i + s_i^T s_i - d_i^2 \right)^2. \quad (7)$$

为求全局最优解, 对式(7)求导, 得到:

$$\nabla f(x) = 4 \sum_{i=1}^N \omega_i \left(x^T x - 2x^T s_i + s_i^T s_i - d_i^2 \right) (x - s_i) = 0. \quad (8)$$

将式(8)整理可得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \nabla f(x) &= (x^T x)x - (x^T xI + 2xx^T) \left(\sum_{i=1}^N \omega_i s_i \right) + \\ &\left\{ \sum_{i=1}^N \omega_i \left[(s_i^T s_i - d_i^2)I + 2s_i s_i^T \right] \right\} x + \sum_{i=1}^N \omega_i (d_i^2 - s_i^T s_i) s_i = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

为消除式(9)中包含 x 的二次项, 令 $t = \sum_{i=1}^N \omega_i s_i$,

对 x 和 s_i 进行加权中心化处理:

$$\begin{cases} x = x - t \\ s_i = s_i - t \end{cases} \quad (10)$$

平移后 $\sum_{i=1}^N \omega_i s_i = 0$, 则可将式(9)表示为

$$(x^T x)x + Ax + b = 0, \quad (11)$$

式中: A 为对称矩阵, 可对角化, $A = \sum_{i=1}^N \omega_i \left[(s_i^T s_i - d_i^2)I_3 + 2s_i s_i^T \right]$; $b = \sum_{i=1}^N \omega_i (d_i^2 - s_i^T s_i) s_i$ 。将 A 分解为 $A = UDU^T$, 记 $D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3)$, 令:

$$\begin{cases} x = U^T x \\ b = U^T b \end{cases} \quad (12)$$

则式(11)可写成如下形式:

$$(x^T x)x + Dx + b = 0. \quad (13)$$

将式(13)与变换后的 x 作 Hadamard 积, 记 $x^2 = [x^2 \ y^2 \ z^2]^T$, 有

$$(x^T x)x^2 + Dx^2 + bx = 0. \quad (14)$$

结合式(13)和式(14), 有

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x^2 \\ y^2 \\ z^2 \\ x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -d_1 & 0 & 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d_2 & 0 & 0 & -b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_3 & 0 & 0 & -b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_1 & 0 & 0 & -b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_2 & 0 & -b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_3 & -b_3 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 \\ y^2 \\ z^2 \\ x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

M

记 $\lambda = x^2 + y^2 + z^2$, $X = [x^2 \ y^2 \ z^2 \ x \ y \ z \ 1]^T$, 则式(15)可表示为 $\lambda X = MX$, 其中 λ 为矩阵 M 的特征值, X 为矩阵 M 的特征向量。对于三维空间, 式(6)最多存在 7 个不同的驻点, 且所有的驻点都在特征向量中, 因此通过枚举所有的特征向量可以保证找到全局最优解。

对矩阵 M 进行谱分解 $M = U_1 D_1 U_1^T$, 其中对角矩阵 D_1 由 7 个特征值组成, 将 U_1 的每个列向量的最后一位化为 1, 得到 7 个特征值对应的特征向量 $[x_i^2 \ y_i^2 \ z_i^2 \ x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T$, 从中提取 $x_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, 对每个 x_i 作式(12)和(10)的逆变换 $x_i = Ux_i + t$, 即可得到 7 个目标位置。根据 7 个目标位置的分布差异, 结合实际观测情况, 可从 7 个位置中选取全局最优解 x 。

上述算法流程可总结为表 1。

3 误差分析

为验证本文提出的基于激光测距的光电对地定位全局最优化方法(以下简称“特征向量法”)的可行性和有效性, 在大倾角受限观测条件下, 采用蒙特卡罗法分析在最少观测条件以及冗余观测条件下不同误差源的定位精度影响。对每组实验进行 10000 次独立仿真实验, 通过对比多次实验结果误差的中值来衡量定位精度。

不同于测距交会法至少要求 3 个不共线的观测

表 1 算法流程
Table 1 Algorithm flow

Algorithm	Global optimal localization algorithm based on laser ranging
Application:	High altitude, long distance, large inclination, small intersection angle, and other restricted observation conditions
Input:	N locations of the UAV and distances d_i
Output:	Target location x
1:	Use Eq. (1) to get UAV location s_i in the earth coordinate system
2:	Establish weighted model Eq. (6)
3:	Derivation of Eq. (9), use Eq. (10) to weighted centralization x and s_i
4:	Use Eq. (15) to find the eigenvector of the square matrix M
5:	Inverse transform $x_i = [x_i, y_i, z_i]^T, i = 1, \dots, 7$ in the eigenvector to find 7 target locations
6:	Select the real location of ground target according to the actual situation x

点,特征向量法的最少观测条件是4个不共面的点,为此可利用4个不共面且每3个不共线的航迹点,将4组测距交会法结果中最优的一组与特征向量法比较,分析测距误差和无人机位置误差在最少观测条件下的影响。

为进一步验证本文算法在受限观测条件下的鲁棒性,将特征向量法与最小二乘和高斯牛顿的混合算法^[16](以下简称“LS+GN法”)以及测距交会法进行对比,分析测距误差和无人机位置误差在冗余观测条件下的影响。当有 $N(N > 3)$ 个航迹点时,测距交会法最多有 C_N^3 个不同的可行解, N 越大遍历耗时越久,一种可行方法是结合随机抽样一致性(RANSAC)算法^[19],再利用Levenberg-Marquardt算法^[20-21]对求得的结果进行优化(以下简称“测距交会+LM法”)。

最后增设不同的无人机圆弧飞行角度和航迹点个数,分析飞行轨迹对本文方法各轴方向定位精度和总定位精度的影响。

3.1 最少观测条件

如图4所示,在直角坐标系下,目标 P 位于原点,假设无人机飞行高度为2 km,观测斜距为5 km,以目标为圆心绕圆飞,4个航迹点均匀分布在 90° 的一段圆

弧上。考虑到4个航迹点不能位于同一平面,可在航迹点间均匀设置高度差,首尾航迹点高度差200 m,观测斜距仍为5 km。

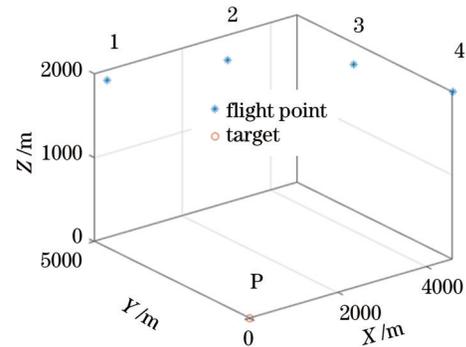


图 4 四个航迹点与目标位置分布图

Fig. 4 Distribution map of four track points and target locations

采用蒙特卡罗法进行两组对比实验:第一组设定无人机位置信息准确,激光测距值误差服从均值为0、标准差为0~10 m的正态分布;第二组设定激光测距值准确,无人机位置误差服从均值为0、标准差为0~5 m的正态分布,仿真结果如图5所示。

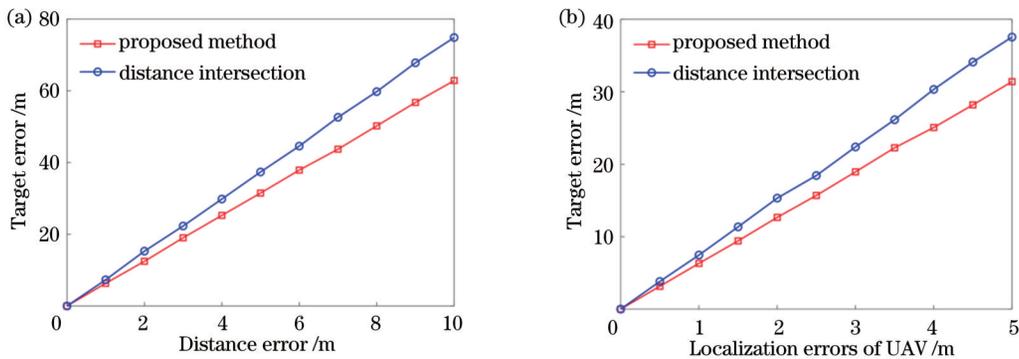


图 5 最少观测条件下的定位误差。(a)不同激光测距误差;(b)不同无人机位置误差

Fig. 5 Target error under minimum observation conditions. (a) Different laser distance errors; (b) different localization errors of UAV

由图5可知,在满足最少航迹点观测个数的条件下,随着激光测距误差和位置噪声误差增大,两种方法

的目标定位误差基本呈线性增长,但在同一个误差等级下,特征向量法比测距交会法的误差更小,验证了本

文定位方法的可行性。

3.2 冗余观测条件

如图 6 所示,在直角坐标系下,目标 P 位于原点,假设无人机飞行高度为 2 km,观测斜距为 5 km,倾角约为 66.42° ,以目标为圆心在上方绕圆飞,航迹点均匀分布于 90° 的一段圆弧上,每两个航迹点之间间隔 0.5° ,用于仿真计算的航迹点 $N=181$ 。同理,在航迹点间均匀设置高度差,首尾航迹点高度差 200 m,以保证航迹点不位于同一平面。

为模拟实际过程中目标同时受导航系统定位精度和激光测距仪测量精度的影响,采用蒙特卡罗仿真法进行两组对比实验:第一组设定无人机位置误差标准差为 5 m,激光测距误差标准差为 0~10 m;第二组设定激光测距误差标准差为 10 m,无人机位置误差标准差为 0~5 m,误差均服从正态分布。

由于高斯牛顿迭代法对初值有一定精度要求,最小二乘粗解误差越大,越容易导致算法不收敛^[22],即无

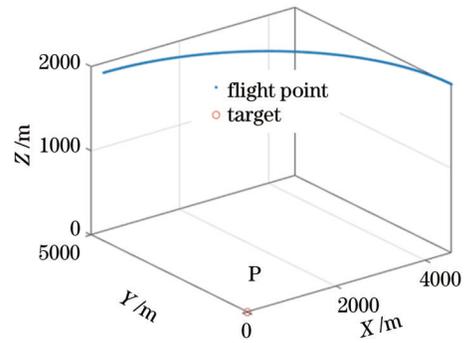


图 6 无人机飞行轨迹示意图

Fig. 6 Schematic diagram of UAV flight path

法得到有效的初值,故利用 LS+GN 法进行解算时,只取能获得有效初值的优化结果,仿真结果如图 7 所示。在激光测距误差标准差为 10 m、无人机位置误差标准差为 5 m 的情况下,不同方法用 Matlab 进行 10000 次独立运算的时间如表 2 所示。

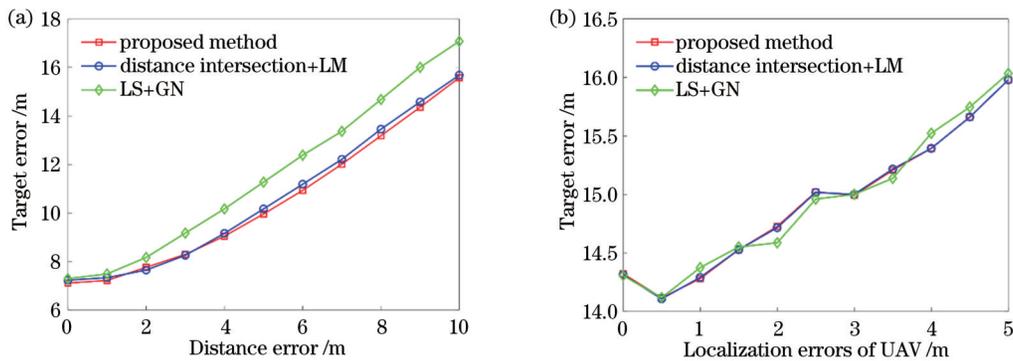


图 7 冗余观测条件下的定位误差。(a)位置误差一定,测距误差不同;(b)测距误差一定,位置误差不同

Fig. 7 Target error under redundant data. (a) Certain localization error, different distance errors; (b) certain distance error, different localization errors

表 2 不同方法运算时间

Table 2 Running time of different methods

Method	Time /s
Proposed method	9.7212
Distance intersection+LM	400.5146
LS+GN	15.9291

不难看出,航迹点增多后,特征向量法和测距交会+LM法的定位精度相较于最少观测条件下的解有明显提高。由图 7(a)可知,位置误差一定时,随着测距误差增大,目标定位误差也随之增大,三种方法的误差曲线均呈现平稳上升的走势。特征向量法和测距交会+LM法定位精度接近,总体上特征向量法略优于测距交会+LM法,而 LS+GN 法较之其他两种方法误差更大。由图 7(b)可知,测距误差一定时,随着位置误差增大,目标定位误差曲线总体上呈现上升的趋势,但误差并非严格递增。结合图 7(a)可见,标准差为 10 m 的测距误差带来的定位误差较标准差为 5 m 的位置误差更大,导致进行多次随机独立实验取结果

中值时,图 7(b)中出现了随着位置噪声标准差增大,定位误差上下波动的情况。且由于 LS+GN 法只统计了利用最小二乘法能求得有效初值的结果,其误差曲线走势与另外两种方法存在差异。

表 2 中测距交会+LM 法耗时最长,主要原因在于航迹点总数 N 较大时,测距交会定位法的最多可行解 C_N^3 数值较大,虽然引入 RANSAC 算法极大地减少了运算量,但仍然需要多次迭代计算,导致需要花费较多时间求解。虽然 LS+GN 也对初值进行了优化,但利用最小二乘法能直接求得初值,较测距交会+LM 法大大缩短了初值运算时间。特征向量法耗时最短,主要原因在于特征向量法无需迭代优化处理,相较于另外两种需要迭代优化的算法,大大减少了运算时间。

由仿真结果可知,特征向量法运算耗时最短,无需迭代优化即可在更短的时间内得到和结合了 RANSAC 算法的测距交会+LM 法相当的精度,且能直接求得全局最优解,比 LS+GN 法更稳定。

3.3 飞行轨迹的影响

为研究本文方法的目标定位精度与上方盘旋飞行的无人机飞行轨迹之间的关系,设定不同的轨迹圆弧角度和航迹点个数,用蒙特卡罗仿真法在无人机位置误差标准差为 5 m、激光测距误差标准差为 10 m 的情

况下进行两组对比实验:第一组设定航迹点个数 $N=181$,无人机飞行轨迹圆弧角度从 50° 增加至 290° ;第二组设定无人机飞行轨迹圆弧角度为 90° ,航迹点个数从 51 增加至 301,仿真结果如图 8 所示。

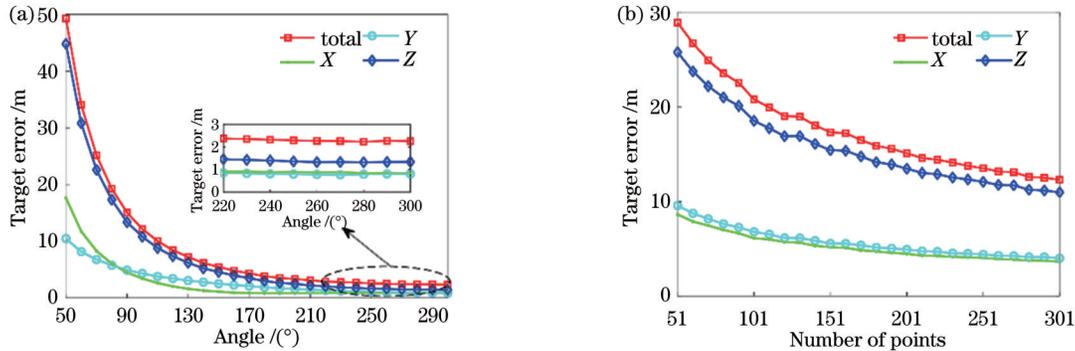


图 8 轨迹圆弧角度和航迹点个数的影响。(a)不同轨迹圆弧角度;(b)不同航迹点个数

Fig. 8 Influence of angle and number of points. (a) Different angles; (b) different number of points

由图 8(a)可知,在大倾角绕飞定位过程中,定位误差主要来源于 Z 轴方向(高度误差),X 轴方向和 Y 轴方向的定位误差相近。航迹点数量一定,飞行轨迹角度为 50° 时,X 轴方向误差大于 Y 轴方向误差,随着轨迹角度增加,Y 轴方向误差逐渐大于 X 轴方向误差,最终趋于相同。在飞行角度从 50° 增加至 90° 时,误差曲线下降迅速,随着飞行角度继续增加,误差曲线下降较为舒缓。在无人机位置误差服从均值为 0 m 标准差为 5 m、测距误差服从均值为 0 标准差为 10 m 的正态分布的情况下,轨迹圆弧角度为 50° 时定位误差约为 50 m,轨迹圆弧角度大于 210° 时目标定位误差在 3 m 以内。由图 8(b)可知,定位误差主要来源于高度误差,航迹点数量越多,定位精度越高。

兴趣的目标,得到不同全球定位系统(GPS)实时时间和无人机的经纬高信息,并利用激光测距仪测量无人机与目标之间的距离信息。选取飞行实验中的 6 组飞行数据分别进行目标定位。将其中一组数据利用式(1)转换到地球坐标系下,数据中心化后绘出飞行轨迹和目标间的位置关系如图 9 所示。

可见,在输入误差一定时,通过增加绕飞圆弧角度和航迹点个数可以提高目标定位精度,其中高度方向的定位精度得到了显著提高。

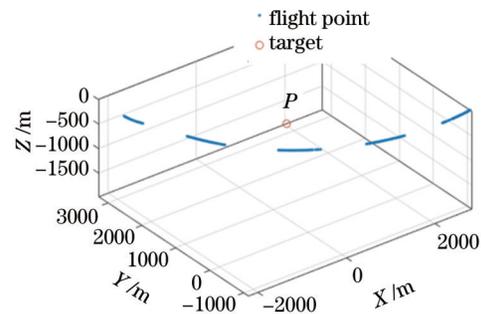


图 9 飞行实验航迹点分布图

Fig. 9 Distribution map of track points in flight test

4 实验结果

在飞行实验中,无人机在目标上空约 2 km 处盘旋飞行,距目标约 5 km,利用光电成像系统锁定跟踪感

6 组飞行数据对应的无人机飞行轨迹角度和航迹点个数见表 3,三种不同方法的总定位精度、各轴定位精度和运算耗时见表 4。

表 3 实验参数

Table 3 Test parameters

Group	1	2	3	4	5	6
Angle / ($^\circ$)	91.2082	101.4900	70.5888	88.2109	76.6969	74.8772
Number of points	316	290	154	223	349	307

飞行实验的 6 组数据定位误差与图 7 和图 8 所示结果相符。第 1 组实验测距交会+LM 法精度最高,第 2 组实验 LS+GN 法精度最高,其他 4 组实验本文提出的特征向量法精度最高。其中,第 5 组飞行实验,由于最小二乘初值偏离真值较大,算法无法求出有效解。

通过飞行实验验证,证明工程效果与仿真实验效果一致。三种方法的定位误差皆主要来源于高度误差(Z 轴方向),X 轴方向和 Y 轴方向的定位误差相近,三种方法的总定位误差接近,但特征向量法运算耗时较其他两种方法更短,航迹点数量在 300 以内时,特征向

表 4 不同方法定位精度和运算时间
Table 4 Localization accuracy and running time of different methods

Method	Accuracy	Group					
		1	2	3	4	5	6
Proposed method	Total /m	21.8932	29.5559	22.2309	18.1407	7.2741	13.5806
	X /m	0.6426	7.7087	2.8339	2.8780	2.4144	4.0306
	Y/m	1.2890	3.5265	4.6843	2.8450	0.5305	4.6432
	Z/m	21.8476	28.3141	21.5464	17.6835	6.8412	12.1090
	Time /s	0.0090	0.0018	0.0012	0.0079	0.0099	0.0085
Distance intersection+LM	Total /m	21.8930	29.5581	22.2499	18.1466	7.2782	13.5825
	X /m	0.6428	7.7073	2.8388	2.8834	2.4171	4.0298
	Y/m	1.2898	3.5275	4.7141	2.8293	0.5209	4.6430
	Z/m	21.8455	28.3167	21.5587	17.6913	6.8453	12.1115
	Time /s	0.0412	0.0251	0.0237	0.0419	0.0756	0.0342
LS+GN	Total /m	22.0909	29.2806	22.2639	18.1466	—	13.7961
	X /m	0.5752	7.8272	2.8505	2.8426	—	3.9172
	Y/m	1.2010	3.4342	4.7393	2.8837	—	4.5206
	Z/m	22.0507	28.0053	21.5661	17.6890	—	12.4319
	Time /s	0.0124	0.0036	0.0025	0.0174	0.0141	0.0103

量法耗时可控制在 10 ms 以内。

5 结 论

本文针对大倾角的受限观测条件,提出了一种基于激光测距的全局最优化光电对地定位方法,通过连续观测无人机的位置信息和到目标的距离信息建立加权误差模型。将非线性问题转换为特征向量求解问题,通过枚举 7 个特征向量找到全部驻点,无需迭代优化即可求出全局最优解。飞行实验和仿真实验结果表明,在大倾角的受限观测条件下,与传统定位方法相比,本文方法具有定位精度高、运算耗时短、鲁棒性高的优点,便于受限观测条件下对地面固定目标进行定位,具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 金国栋, 谭力宁. 无人侦察机光电平台目标定位技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2021: 127.
Jin G D, Tan L N. Target location technology of photoelectric platform for unmanned reconnaissance aircraft[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2021: 127.
- [2] 钟麟, 张岐坦. 基于无人机电光平台的定位技术[J]. 计算机与网络, 2021, 47(13): 53-57.
Zhong L, Zhang Q T. Target localization technology of UAV photoelectric platform[J]. Computer & Network, 2021, 47(13): 53-57.
- [3] 杨帅, 程红, 李婷, 等. 无人机侦察图像目标定位在军事上的应用研究[J]. 红外技术, 2016, 38(6): 467-471.
Yang S, Cheng H, Li T, et al. Military application of UAV reconnaissance target localization[J]. Infrared Technology, 2016, 38(6): 467-471.
- [4] Zhang X F, Yuan G Q, Zhang H W, et al. Precise target geo-location of long-range oblique reconnaissance system for UAVs [J]. Sensors, 2022, 22(5): 1903.
- [5] Brese C L, Zou J J. Affine invariant matching based on orientation estimation[C]//2013, 7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), December 16-18, 2013, Carrara, Australia. New York: IEEE Press, 2013.
- [6] Śluzek A. Improving performances of MSER features in matching and retrieval tasks[M]//Hua G, Jégou H. Computer vision-ECCV 2016 workshops. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2016, 9915: 759-770.
- [7] 曾庆化, 潘鹏举, 刘建业, 等. 惯性信息辅助的大视角目标快速精确定位[J]. 航空学报, 2017, 38(8): 321171.
Zeng Q H, Pan P J, Liu J Y, et al. Fast and accurate target positioning with large viewpoint based on inertial navigation system information[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 321171.
- [8] 陈艳. 基于特征图像匹配的目标定位关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Chen Y. Research on the key technology of target position based on feature image matching[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [9] 归庆明, 李国重, 欧吉坤. 岭-主成分组合估计及其在测量平差中的应用[J]. 测绘工程, 2002, 11(4): 11-13.
Gui Q M, Li G Z, Ou J K. Combining ridge and principal component estimation and its applications in survey adjustment [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2002, 11(4): 11-13.
- [10] 余卓. 弱观测条件下基于岭估计对目标定位测速方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
Yu Z. Research on target localization and velocity measurement based on ridge estimation under weak observation condition[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [11] 芦竹茂, 武娜, 赵亚宁, 等. 基于激光雷达的无人机在杆塔附近的定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0401001.
Lu Z M, Wu N, Zhao Y N, et al. Location of unmanned aerial vehicle based on lidar near electric tower[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0401001.
- [12] 丁亚男, 张旭, 徐振国, 等. 自适应三边定位算法在航站楼内的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0228002.
Ding Y N, Zhang X, Xu Z G, et al. Application of adaptive three-sided positioning algorithm in terminal building[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0228002.
- [13] 赵黎, 韩中达, 张峰. 基于神经网络的可见光室内立体定位研究

- 究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706004.
- Zhao L, Han Z D, Zhang F. Research on stereo location in visible light room based on neural network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706004.
- [14] 徐绍铨, 张华海, 杨志强. GPS 测量原理及应用[M]. 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- Xu S Q, Zhang H H, Yang Z Q. Principle and application of GPS measurement[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.
- [15] Larsson M, Larsson V, Astrom K, et al. Optimal trilateration is an eigenvalue problem[C]//ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 12-17, 2019, Brighton, UK. New York: IEEE Press, 2019: 5586-5590.
- [16] 陈丹琪, 金国栋, 谭力宁, 等. 基于非线性最小二乘法的无人机机载光电平台目标定位[J]. 光电工程, 2019, 46(9): 84-92.
- Chen D Q, Jin G D, Tan L N, et al. Target positioning of UAV airborne optoelectronic platform based on nonlinear least squares[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(9): 84-92.
- [17] 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 8-16.
- Zhang H, Qiao C, Kuang H P. Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 8-16.
- [18] Luke D R, Sabach S, Teboulle M, et al. A simple globally convergent algorithm for the nonsmooth nonconvex single source localization problem[J]. Journal of Global Optimization, 2017, 69(4): 889-909.
- [19] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[M]//Fischler M A, Firschein O. Readings in computer vision. Amsterdam: Elsevier, 1987: 726-740.
- [20] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441.
- [21] 王罗刚, 王同合, 范百兴, 等. Levenberg-Marquardt 算法在空间三维测边网中的应用[J]. 测绘工程, 2016, 25(3): 68-72.
- Wang L G, Wang T H, Fan B X, et al. Application of Levenberg-Marquardt algorithm to 3D trilateration network[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(3): 68-72.
- [22] Siregar R W, Tulus, Ramli M. Analysis local convergence of Gauss-Newton method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 300: 012044.

Global Optimization Method for Ground Target Localization of Electro-Optical Platform under Limited Observation Conditions

Chen Chen^{1,2}, Guan Banglei^{1,2*}, Shang Yang^{1,2**}, Li Zhang^{1,2}, Yu Qifeng^{1,2}

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Objective Unmanned aerial vehicle (UAV) shows extraordinary superiority on the battlefield with high mobility, low cost, no casualties, and other advantages, which has changed the form of modern war and made unmanned intelligent war mainstream. For example, using UAVs for reconnaissance provides helpful information for commanders on the battlefield, which has excellent intelligence support value and operational command function. It should be noted that high-precision and real-time target localization is a necessary condition for UAV reconnaissance and target strikes. The airborne electro-optical platform is equipped with high-resolution imaging equipment to recognize the target at a long distance so that the ground target can be tracked and measured without entering the target area. However, in the case of limited observation conditions, such as large inclination angles and small rendezvous angles, the traditional localization method can no longer meet the accuracy requirement. At present, most of the target localization methods to improve accuracy under limited observation conditions can be divided into two basic types. One is based on image matching, and the other is based on geometry. But under the condition of a large inclination angle, the localization method based on image matching is seriously affected by the perspective transformation. Moreover, the results show that limited observation conditions make the design matrix ill-conditioned, and the condition number of the least square method is very large, which seriously affects the accuracy of the geometric localization method. Therefore, improving the target localization accuracy under limited observation conditions is of great significance.

Methods The laser range finder has high measurement accuracy. It is not affected by the limited observation conditions such as a large inclination angle and small rendezvous angle, which makes laser ranging have tremendous application value in the field of ground target localization. In order to improve localization accuracy under limited observation conditions, this paper proposes a global optimization method for ground target localization based on the platform's location and laser ranging. In this method, first, according to the continuous observation data of the static ground target, the weighted error

equation in the earth-centered and earth-fixed (ECEF) coordinate system is established. Second, the nonlinear problem is transformed into the problem of the eigenvector solution. Third, all stationary points are found by enumerating seven eigenvectors. Finally, the actual location of the ground target is calculated according to the actual situation. In fact, the critical point of this method is to transform the nonlinear problem into an eigenvector problem through data centralization, singular value decomposition, and other steps. This not only accurately finds the global optimal solution of the equation without iteration or optimization procedure but also improves the efficiency and stability of ground target localization.

Results and Discussions The ground target localization system is mainly composed of an airborne electro-optical platform, integrated global position system (GPS) and inertial navigation system (INS), and laser range finder. Furthermore, the platform flies in a circle over the ground target, obtaining the UAV's longitude, latitude, and height in the world geodetic system-1984 coordinate system, as well as the distance between the UAV and the static ground target at different time. The simulation experiment results based on the Monte Carlo method show that the localization accuracy is affected by location error of the airborne electro-optical platform, distance error of laser ranging, and data size of continuous observation (Fig. 5, Fig. 7, and Fig. 8). Furthermore, the flight test results show that the proposed method is feasible and effective under limited observation conditions. The target localization error is less than 30 m when the platform is 5 km away from the target, and the observation angle is 66.42° . Moreover, the operation time can be controlled within 10 ms when the quantity of continuous observation data is within 300 (Table 3 and Table 4).

Conclusions In view of limited observation conditions such as large inclination angles and small rendezvous angles, this paper proposes a global optimization method to improve the accuracy of ground target localization. According to the location information provided by the integrated navigation system and the distance information provided by the laser range finder, the corresponding measurement model and weighted error model are set up. A fast closed-form solution for nonconvex optimization problems is obtained by deriving equivalent eigenvectors. The simulation and flight experiments results show that the proposed method has the advantages of high localization accuracy, computational efficiency, and robustness compared with the traditional localization method under limited observation conditions, which is of great significance to the reconnaissance and attack of targets on the battlefield.

Key words target localization; limited observation; global optimal solution; laser ranging; airborne electro-optical platform