

一种基于伴飞影像的目标运动状态测量方法

惠广裕

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘 要: 针对无人机编队飞行中传统定位方法在复杂环境下存在的成本高、易受干扰及系统复杂等问题,本文提出一种基于伴飞影像的单目视觉测量方法。通过构建“刚性基线-物像比视觉测距模型”,以翼尖连线为几何基准,结合光学投影变换解算相对位置,并引入载体姿态信息进行动态修正。试验结果表明:地面模拟在 2~7 m 范围内三维测量误差小于 2 cm;飞行试验在 X 向 13~30 m、Y 向 0~2.5 m、Z 向 0~4 m 包线内,三向测量误差均方根值分别优于 0.66 m、1.16 m 和 0.78 m,处理速度达 20 fps,且在多种编队阵型下表现稳定。该轻量化视觉测量技术有效解决了运动目标特征提取质量与实时性的矛盾,为复杂电磁环境下的无人机编队自主协同提供了可靠技术路径。

关键词: 伴飞影像;单目视觉;相对位置;无人机编队;物相比视觉模型

中图分类号: TN953+.2;TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

A method for target motion state measurement based on companion flight image

Hui Guangyu

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: To address the challenges of high cost, vulnerability to interference, and system complexity associated with traditional positioning methods in UAV swarm flight within complex environments, this paper proposes a monocular vision measurement method based on companion flight imagery. By constructing a "Rigid Baseline-to-Image Ratio Visual Ranging Model", the wingtip line is used as a geometric benchmark to calculate relative position through optical projection transformation, while incorporating carrier attitude information for dynamic correction. Test results demonstrate that the ground simulation achieves 3D measurement errors of less than 2 cm within a 2 to 7 meter range. Flight tests within the operational envelope (X: 13 to 30 m, Y: 0 to 2.5 m, Z: 0 to 4 m) show root mean square errors better than 0.66 m, 1.16 m and 0.78 m in the three directions respectively, with a processing speed of 20 fps and stable performance across various formation configurations. This lightweight vision measurement technology effectively resolves the conflict between feature extraction quality and real-time performance for moving targets, providing a reliable technical solution for autonomous coordination of UAV swarms in complex electromagnetic environments.

Keywords: companion flight image; monocular vision; relative position; UAV swarm; object-to-image ratio visual model

0 引 言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)编队飞行技术因其在物流运输、农业植保、军事侦察等领域的巨大应用潜力,已成为当前航空领域的研究热点。编队飞行的核心技术之一是实现成员间精确、可靠的相对位置测量,该数据是形成并保持队形、实现自主协同与防撞的基础,对于优化飞行控制律设计具有至关重要的作用^[1]。

传统的相对定位方法主要依赖全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)、激光雷达(light

detection and ranging, LiDAR)或多目立体视觉^[1]。其中,高精度 GNSS 在开阔空域性能优异,但其信号在复杂城市峡谷或强电磁对抗环境中极易受到遮挡、欺骗与干扰,导致定位精度下降甚至失效^[2];激光雷达虽能提供精确的深度信息,但其系统成本昂贵、功耗高,且产生的海量点云数据对机载计算平台的处理能力提出了严峻挑战,难以在资源受限的小型无人机平台上大规模部署^[3]。多目视觉测量方法通过三角测距原理可实现较高精度的定位^[4],然而,其依赖于严格的相机间时空同步与高精度标定,系统复杂度高,增加了编队系统的硬件负担并降低了其灵活性与可扩展

展性。

为克服上述局限,单目视觉测量方法凭借其硬件结构简单、成本低廉、功耗低及天然抗电磁干扰等优势,展现出巨大的应用前景^[5]。该技术主要通过单台摄像头捕获目标图像,利用特征识别与匹配算法获取目标的几何特征,进而结合光学投影模型解算相对姿态。国内外学者在此方向已开展了广泛研究。国外研究方面,黄钰洲^[6]提到在视觉同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)和特征点匹配方面取得了进展,但这类方法通常对场景纹理和光照变化敏感,且在目标高速运动导致的图像模糊情况下,特征提取与跟踪的稳定性急剧下降。国内魏振忠等^[1]系统综述了视觉位姿测量方法,强调了其在静态或结构化环境中的有效性;唐凯等^[3]利用立体视觉实现了动态目标跟踪,但其系统复杂性与标定维护成本限制了其在轻量化编队中的应用。此外,胡启国等^[7]探讨了基于智能优化算法与扩展卡尔曼滤波的多传感器融合方案,旨在提升姿态测量精度,但这同样增加了系统的复杂性和对特定传感器的依赖。

尽管单目视觉技术取得了显著进展,但将其直接应用于无人机动态伴飞场景仍面临核心挑战。现有方法多数建立在目标或观测平台之一处于静止状态的假设之上,或要求目标具有丰富的纹理特征与稳定的几何模型^[6]。然而,在无人机编队飞行中,观测方与被观测目标均处于高速运动状态,且受相对运动、振动及空气扰动影响,采集的图像常存在运动模糊、目标尺度与视角剧烈变化等问题,导致传统特征点,如尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)和带方向的 FAST 特征点与旋转的 BRIEF 描述符(oriented fast and rotated brief, ORB)提取质量差、匹配成功率低,难以满足高动态环境下测量参数的实时性与鲁棒性要求。此外,单目视觉固有的尺度不确定性难题,在动态场景下更为突出,传统解决方案往往依赖先验的目标尺寸或复杂的初始化过程,限制了方法的通用性。

因此,研究一种不依赖于丰富纹理特征、能够适应高动态环境、且计算轻量化的单目视觉测量方法,对于推动无人机编队技术在实际复杂环境下的应用至关重要。本文基于伴飞影像,提出了一种创新的目标运动状态测量方法。本方法的差异化创新在于:1)摒弃了对不稳定点特征的依赖,转而利用无人机固有的、稳定的几何结构(如机翼翼尖连线)作为空间约束,构建了基于目标轮廓信息的测量模型,显著提升了特征在动态环境下的鲁棒性;2)通过引入并在线校准“物像比”作为核心基准参数,有效解决了单目视觉的尺度模糊问题,实现了无需先验目标尺寸的绝对距离测量;3)紧密结合无人机的惯性导航姿态信息,对视觉测量结果进行动态补偿与坐标转换,有效抑制了动平台引入的投影误差。通过地面模拟试验与真实飞行验证,证明了本方法在保证实时性的同时,具有较高的测量精度与环境适应性,为复杂电磁环境下无人机编队的自主协同提供了

一种可靠、低成本的技术路径。

1 测量原理及数学模型

1.1 测量原理

无人机编队的阵型^[8]如图 1 所示。图像传感测量法主要利用机上加装的相机拍摄其他目标机,获取图像信息。然后,通过图像特征提取,将判读数据输入视觉成像模型计算相机坐标系坐标值,最后对相机坐标系坐标值引入惯导姿态参数修正,得到目标机相对测量无人机平台的空间位置信息^[8]。

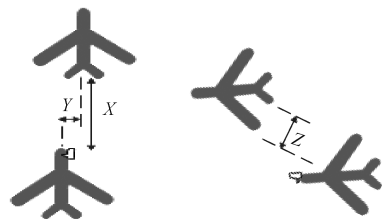


图 1 无人机编队阵型和测量参数

Fig. 1 UAV formation configuration and measurement parameters

1.2 测量模型

1) 坐标系

(1) 飞机坐标系 $P(P-P_xP_yP_z)$

飞机坐标系 $P(P-P_xP_yP_z)$ 原点 P 定义为飞机质心, P_x 轴指向机头方向, P_y 轴指向机翼方向, P_z 轴指向机体上方,如图 2 所示。

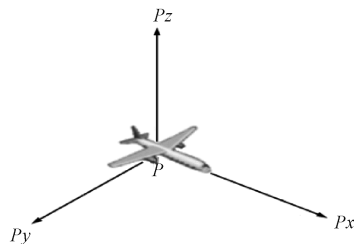


图 2 飞机坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the aircraft coordinate system

(2) 相机坐标系 $O(O-O_xO_yO_z)$

相机坐标系 $O-O_xO_yO_z$ 是光学成像系统坐标系,以摄影中心 O 为原点, O_y 轴与相机像平面的横轴平行, O_x 轴轴指向目标方向,垂直于相机像平面; O_z 轴垂直于 O_xO_y 平面,构成右手坐标系,如图 3 所示。

2) 基于翼尖约束的物像比动态测量模型

(1) 基准特征选择与物像比稳定性论证

本文方法的核心在于建立一个稳定的“物像比”基准,即目标物体的真实物理尺寸与其在图像中所占像素尺寸之间的比例关系。该基准的准确性直接决定了后续所有相对位置测量的精度。因此,基准特征的选择需满足以下几个关键原则:

结构稳定性:所选特征的物理尺寸在飞行过程中应保

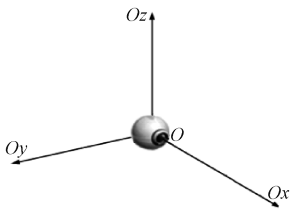


图 3 相机坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the camera coordinate system

持恒定或变化极小,且可被精确测量。

探测鲁棒性:该特征在图像中应易于被稳定、准确地检测和提取,受目标姿态变化、光照条件及大气能见度的影响小。

几何明确性:特征应能提供明确的几何约束,便于建立简洁的成像模型。

基于以上原则,本文选择目标无人机机翼的翼尖连线作为建立物像比基准的特征。其理由如下:

结构稳定性:无人机机翼为刚性结构,其翼展(即两侧翼尖之间的距离)是一个固定的、已知的设计参数。即使在飞行中因气动载荷产生微小形变,该形变也远小于测量精度要求,可忽略不计。相较于机身轮廓(可能因相机视角变化而显著改变)或涂装纹理(易受光照影响),翼展能够提供可靠的长度基准。

探测鲁棒性:翼尖通常是机翼上最为突出的点,即使在侧视或小幅俯仰/滚转姿态下,其轮廓特征依然明显。通过先进的图像处理算法(如边缘检测、角点检测或基于深度学习的关键点检测),可以较为精确地定位翼尖在图像中的像素位置。相比之下,其他潜在特征(如机身长、垂尾高)在不同视角下可见性差,且端点定位模糊。

几何明确性:翼尖连线是一条空间直线段在像平面上的投影。该线段长度直接关联于相机的焦距和物距,是透视投影模型中最为直接的观测量,便于构建动态视觉测量模型。

为验证翼尖连线作为基准特征的优越性,在相同试验场景下,对比了 3 种潜在特征的检测成功率和精度:翼尖连线、左右发动机舱连线和机身矩形包围框对角线。

实验在不同光照(正午强光、傍晚侧光)和不同相对姿态下进行,对 100 帧图像进行人工判读,结果如表 1 所示。

表 1 基准特征选型对比实验结果

Table 1 Comparative experimental results of benchmark feature selection

特征方案	平均检测成功率/%	特征点定位误差/pixel	备注
翼尖连线	95	1.2 ± 0.5	特征稳定,端点清晰
机身对角线	85	3.5 ± 1.8	包围框受姿态影响大,端点模糊
机身标识间距	77	2.8 ± 1.5	标识在部分姿态下被遮挡或光照敏感

实验结果表明,翼尖连线方案在检测成功率和定位精度上均显著优于其他方案,证明了其作为基准特征的鲁棒性。

物像比基准稳定性验证:物像比基准 $S_0=L_0/l_0$ 必须在实际应用环境中保持稳定。在不同环境条件下进行了验证实验,固定物距 $X=5.0\text{ m}$ 。实验在不同光照和不同能见度下进行,测量结果如表 2 所示。

表 2 不同环境条件下物像比基准稳定性验证

Table 2 Stability verification of the benchmark object-to-image ratio under different environmental conditions

实验条件	光照强度/lux	大气能见度/km	翼展真实值 L_0/m	成像像素 l_0/pixel	计算物像比 $S_0/(\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1})$	相对偏差/%
基准条件	晴天,50 000	>10	5.00	625.5	0.007 992	—
条件一	阴天,15 000	>10	5.00	625.1	0.007 998	+0.075
条件二	晴天,50 000	轻霾,约 5	5.00	624.8	0.008 002	+0.125
条件三	黄昏,800	>10	5.00	626.3	0.007 984	-0.100

数据分析表明,在不同光照和大气能见度条件下,计算得到的物像比 S_0 与基准值相比,相对偏差均小于 0.13%。这证明了基于翼尖连线建立的物像比基准对环境因素不敏感,具备高度的稳定性。其物理机理在于:光照和能见度的变化主要影响图像的整体亮度和对比度,但对于翼尖这种由强烈边缘构成的几何特征,其像素级定位精度所受影响甚微。

(2)物像比动态测量模型

在地面,将两架无人机按照前后式阵型摆放,并将两架无人机架设水平。测量前方无人机的机翼翼尖连线空间距离 w_0 ;利用后方无人机加装的相机拍摄前方无人机,

判读机翼翼尖连线在图像中所占的像素 w_{p_0} ;测量翼尖连线中点和相机安装位置在水平面上的投影距离 d_0 。将该状态下的物像比作为两机相对位置的物像比基准。

那么根据相机成像原理,则:

X 值计算:

$$\frac{f}{d_0} = \frac{w_{p_0}}{w_0} \tag{1}$$

$$\frac{d_i}{f} = \frac{w_i}{w_{p_i}} \tag{2}$$

$$X = d_i = f \times \frac{w_0}{w_{p_i}} = \frac{d_0 w_{p_0}}{w_0} \times \frac{w_0}{w_{p_i}} = \frac{d_0 w_{p_0}}{w_{p_i}} \tag{3}$$

其中, d_i 为翼尖连线中点和相机安装位置在水平面上

的投影距离为测量点与相机距离,即 X 值; f 为相机焦距; w_{pi} 为机翼翼尖连线在图像中所占的像素判读值。

Y 值计算:

$$\frac{d_i}{f} = \frac{y_i}{y_{pi}} \quad (4)$$

$$\frac{y_i}{y_{pi}} = \frac{w_0}{w_{pi}} \quad (5)$$

$$y_i = y_{pi} \times \frac{w_0}{w_{pi}} = (c_{h0} - y_{ci}) \times \frac{w_0}{w_{pi}} \quad (6)$$

$$Y = y_i = (c_{h0} - y_{ci}) \times \frac{w_0}{w_{pi}} \quad (7)$$

其中, y_i 是无人机航向之间的相对偏差值 Y ; c_{h0} 为相机画幅横方向分辨率值; y_{ci} 为机翼翼尖连线中心点的横向判读像素值; y_{pi} 为 y_{ci} 归一化到图像中心的像素值。

Z 值计算:

$$\frac{d_i}{f} = \frac{z_i}{z_{pi}} \quad (8)$$

$$\frac{z_i}{z_{pi}} = \frac{w_0}{w_{pi}} \quad (9)$$

$$Z = z_i = z_{pi} \times \frac{w_0}{w_{pi}} = (c_{z0} - z_{ci}) \times \frac{w_0}{w_{pi}} \quad (10)$$

其中, z_i 是无人机垂向之间的相对偏差值 Z ; c_{z0} 为相机画幅纵方向分辨率值; z_{ci} 为机翼翼尖连线中心点的横向判读像素值; z_{pi} 为 z_{ci} 归一化到图像中心的像素值。

3) 视觉测量修正模型

相机安装后,需要校准相机在无人机机体的安装要素,以便将视觉测量值修正到飞机坐标系下^[9]。

(1) 相机安装参数计算

相机的安装参数主要包括 (x_0, y_0, f) , 为相机中心在图像上的像素坐标和焦距,即内方位元素, $(X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa)$ 为相机中心在无人机飞机坐标系下的坐标,即相机外方位元素。直接测量这些要素,显然无法进行。本文利用摄影测量共线方程^[10]进行求取。

相机安装参数计算与系统标定:

将目标无人机固定于地面,确保其机体姿态水平。在相机测量场内构建了一个三维立体校准点阵。该点阵的具体技术要求如下:

点阵规模与空间分布:点阵由不少于 30 个高对比度圆形标志点(如黑白相间的同心圆标志)构成,这些标志点非共面分布,其三维空间分布应能完全覆盖相机的整个视场角,并在深度方向(沿相机光轴)上具有足够的延伸,以提供充分的几何约束^[11]。

标志点精度:每个标志点的中心在物理空间的位置精度要求优于 $1 \pm 0.5 \text{ mm}$ 。

坐标系建立:采用一台 Leica TS60 超高精度全站仪(测角精度 $0.5''$, 测距精度 $0.6 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6}$) 作为测量基准。全站仪首先通过后方交会法建立高精度的全局测量坐标系,然后逐一测量每个标志点的三维坐标。

标定过程与系统误差控制:相机拍摄点阵的多幅图像(通过改变点阵姿态获取 8~12 组图像),利用共线方程进行光束法平差整体解算,一次性求解相机的内方位元素 (X_0, Y_0, f) 和外方位元素 $(X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa)$ 。

共线条件方程:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (12)$$

$$\Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (13)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

其中, (x, y) 和 (x_0, y_0) 分别为像点和像主点在相机坐标系下的坐标, $(\Delta x, \Delta y)$ 为像点坐标误差修正, f 为摄影焦距, (x_0, y_0, f) 为相机内方位元素, $P(X, Y, Z)$ 为测量点 P 在无人机飞机坐标系下的坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为摄影中心在无人机飞机坐标系下的坐标; $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 为外方位角元素 φ, ω, κ 所确定的旋转矩阵中的各元素; k_1, k_2 为镜头径向畸变修正参数。

系统误差修正:共线条件方程本身已包含了镜头畸变(如径向畸变 k_1, k_2) 的系统误差修正模型,如式(11)~(13)所示。在平差计算中,这些畸变参数作为待求解参数与内外方位元素一同被优化,从而在模型层面有效修正了由镜头光学缺陷引入的系统误差^[12]。

误差评估:为评估标定结果的可靠性及剩余系统误差,引入重投影误差^[13]作为评价指标。它反映了利用求得的参数将控制点反投到像平面后,其位置与真实像点位置之间的差异。

(2) 姿态修正计算

无人机编队空间位置关系基准是目标机相对测量无人机机体坐标为参考的。因此,视觉测量结果需要进行姿态修正^[14]。

姿态修正是将相机坐标系方向通过修正,调整到与飞机坐标系方向一致。姿态修正主要通过角度旋转实现,通过 3 个步骤进行,分别是横滚角修正、俯仰角修正和方位角修正。横滚角、俯仰角和方位角 3 个角度值分别从飞机惯导系统中获取^[15]。

从相机坐标系 $O-O_x O_y O_z$ 到飞机坐标系 $P-P_x P_y P_z$ 的坐标变换公式可表示为:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_3 \begin{pmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(14)中, $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3$ 分别表示绕 O_x, O_y, O_z 轴的旋转矩阵,分别对应横滚角修正,俯仰角修正和方位角修正^[10]。

横滚角修正:

横滚角修正就是将相机坐标系 $O-O_xO_yO_z$ 绕 O_x 轴旋转角度 hg , 坐标系由 $O-O_xO_yO_z$ 旋转为 $O-O_x'O_z'O_y'$, 其中 hg 为机载惯导系统测量的飞机横滚角, 如图4所示。

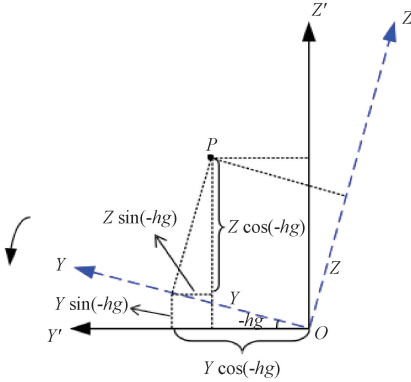


图4 横滚角旋转示意图

Fig. 4 Schematic diagram of roll angle rotation

横滚角修正数学模型表达式为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(hg) & \sin(hg) \\ 0 & -\sin(hg) & \cos(hg) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, X, Y, Z 为坐标系 $O-O_xO_yO_z$ 对应的坐标值; X', Y', Z' 为目标坐标系 $O-O_x'O_z'O_y'$ 对应的坐标值。

俯仰角修正:

俯仰角修正就是将中间坐标系 $O-O_x'O_y'O_z'$ 绕 O_y' 轴旋转角度 fy , 坐标系由 $O-O_x'O_y'O_z'$ 旋转为 $O-O_x''O_z''O_y''$, 其中 fy 为机载惯导系统测量的飞机俯仰角, 如图5所示。

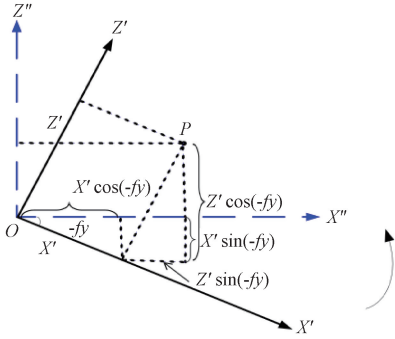


图5 俯仰角旋转示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pitch angle rotation

俯仰角修正数学模型表达式为:

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(fy) & 0 & -\sin(fy) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(fy) & 0 & \cos(fy) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, X', Y', Z' 为坐标系 $O-O_x'O_y'O_z'$ 对应的坐标值; X'', Y'', Z'' 为目标坐标系 $O-O_x''O_z''O_y''$ 对应的坐标值。

方位角修正:

方位角修正就是将中间坐标系 $O-O_x''O_z''O_y''$ 绕 O_z'' 轴

旋转角度 fh , 坐标系由 $O-O_x''O_z''O_y''$ 旋转为 $O-O_x'''O_y'''O_z'''$ 。其中 fh 为机载惯导系统测量的飞机方位角, 如图6所示。

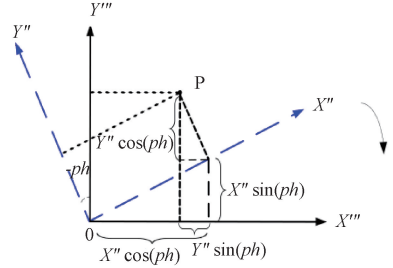


图6 方位角旋转示意图

Fig. 6 Schematic diagram of yaw angle rotation

方位角修正数学模型表达式为:

$$\begin{bmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(fh) & \sin(fh) & 0 \\ -\sin(fh) & \cos(fh) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, X'', Y'', Z'' 为坐标系 $O-O_x''O_z''O_y''$ 对应的坐标值; X''', Y''', Z''' 为目标坐标系 $O-O_x'''O_y'''O_z'''$ 对应的坐标值。

2 试验测试与结果分析

2.1 地面模拟试验

1) 试验设计

试验对象为一根长度为5 m的碳纤维杆(模拟无人机翼展, 其热膨胀系数可确保长度在试验中恒定), 两端粘贴高反差圆形标志点以精确标识“翼尖”位置。相机(像素: $1\,600 \times 1\,200$, 焦距: 25 mm)通过高精度万向节与导轨系统连接, 可沿杆的垂直平分线方向精确移动, 以模拟不同的相对距离。

试验物距范围为2.0~7.0 m, 以1.0 m为步长, 共计6个测试点。环境光照恒定; 相机内参已预先标定; 每次测量时, 确保测量杆与相机光轴垂直。

在每个物距测试点上, 独立重复测量5次。通过微调相机位置并重新采集图像, 以评估测量的重复性精度。共计获得30组有效测量数据。

采用Leica TS60全站仪(测距精度0.6 mm)在全局坐标系下同步测量杆件两端及中心点的三维坐标, 作为评估视觉测量结果的真值。

2) 试验流程与数据处理

在基准位置(物距 $d_0 = 32.32$ cm)拍摄图像, 获取基准物像比。随后, 按上述步长移动相机至各测试点。在每个点位, 进行5次重复测量; 采集图像后, 使用边缘检测算法定位杆件两端标志点, 计算连线长度及中心点像素坐标, 代入视觉测量模型解算三维坐标。最后, 将解算结果与全站仪真值进行比对, 计算误差。

测试现场如图7所示。试验测量数据如表3和4所示。

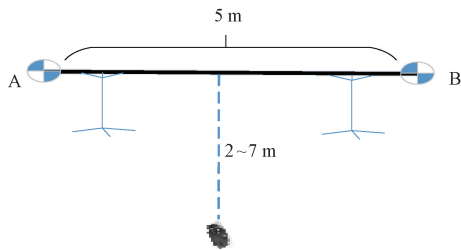


图 7 测量杆测量示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the measurement rod setup

3)试验结果与分析

试验测量数据与误差分析如表 4 所示。表中数据为每个测试点 5 次重复测量的统计结果。从表 4 可以得出以下结论：

(1)测量精度：在整个 2~7 m 的测试范围内,X 方向(深度方向)的最大绝对误差为 1.9 cm,Y,Z 方向的最大绝对误差均小于 1.1 cm。所有方向的测量误差均值均处于厘米级,证明了模型的有效性。

(2)重复性精度：各测点 5 次重复测量的坐标值标准差

表 3 测量杆中心点相机测量结果

Table 3 Camera measurement results for the center point of the measurement rod

w_{x0} /pixel	d_0 /cm	w_{xi} /pixel	中心点像素坐标	焦距 f /pixel	中心点坐标(修正前)
1 491	32.32	69	(493,37)	973	(698.39,220.24,403.89)
		97	(497,67)	973	(496.80,154.62,271.99)
		213	(645,119)	973	(226.24,36.02,111.78)

表 4 测量杆中心点测量结果

Table 4 Corrected measurement results for the center point of the measurement rod

物距真值/m	重复次数	中心点像素坐标/m	视觉测量坐标/m	全站仪坐标/m	坐标误差/m
2.00	5	(798.3±0.8,605.5±0.7)	(1.981±0.004, 0.011±0.003, 0.009±0.002)	(2.000, 0.000, 0.000)	(-0.019,0.011, 0.009)
3.00	5	(652.1±0.6,608.2±0.5)	(2.988±0.003, 0.008±0.002, -0.006±0.001)	(3.000, 0.000, 0.000)	(-0.012,0.008, -0.006)
4.00	5	(541.2±0.5,610.1±0.4)	(3.992±0.002, 0.005±0.001, 0.003±0.001)	(4.000, 0.000, 0.000)	(-0.008,0.005, 0.003)
5.00	5	(460.5±0.4,611.5±0.3)	(5.005±0.002, -0.003±0.001, -0.002±0.001)	(5.000, 0.000, 0.000)	(0.005,-0.003, -0.002)
6.00	5	(400.8±0.3,612.0±0.3)	(5.991±0.001, 0.004±0.001, 0.001±0.001)	(6.000, 0.000, 0.000)	(-0.009,0.004, 0.001)
7.00	5	(355.6±0.3,612.4±0.2)	(7.008±0.001, -0.002±0.001, -0.001±0.001)	(7.000, 0.000, 0.000)	(0.008,-0.002, -0.001)

注:坐标误差=视觉测量均值-全站仪真值。

极小(X 方向最大为 0.004 m,Y,Z 方向均小于 0.003 m),这表明本文方法具备较好的重复性精度和稳定性。

(3)误差趋势:X 方向的误差随着物距的增加并未显示出明显的发散趋势,说明基于固定物像比的测量模型在设定的距离范围内是可靠的。

试验结果表明,该视觉测量算法模型在受控地面环境下具有高精度和良好的重复性。

2.2 飞行试验

为验证所提视觉测量方法在真实飞行环境下的性能,利用两架小型无人机开展了空中飞行试验。试验不仅验证了基本场景下的测量能力,还重点探究了该方法在多飞行阵型与极端动态场景下的适应性与鲁棒性。

1)试验场景设计

试验设计了以下 3 类典型飞行场景,以全面评估算法

性能：

(1)场景一：基本前后编队(验证基准性能)。两架机保持稳定的前后队形飞行,飞行中在航向、横向和高度方向上进行缓慢、小幅度的变化(X:13~30 m,Y:0~2.5 m,Z:0~4 m)。此场景用于获取本方法的基础测量精度,并与 GPS(global positioning system)数据进行比对。

(2)场景二：多阵型适应性测试(验证空间几何适应性)。在保证安全的前提下,两架无人机交替变换 3 种典型编队阵型:并列编队,以验证大侧向偏移下的 Y 向测量能力;斜线编队(长机与僚机存在一定的纵向和侧向错位),以测试模型在非对称视角下的性能;高度差编队,其中僚机提升或降低高度,产生显著的 Z 向相对运动。不同阵型下翼尖连线与相机光轴的相对几何关系变化剧烈,是对“物像比”模型鲁棒性的有效检验。

(3)场景三:极端动态场景测试(验证动态性能与收敛性)。令长机进行一系列预设的机动动作,包括:高速接近与分离,以测试深度方向(X向)物距快速变化时模型的响应与精度;大坡度盘旋,此时僚机相机捕获的目标图像存在激烈的姿态角变化;S形机动,模拟规避动作,产生快速的Y向和Z向相对运动,验证特征提取与跟踪算法的动态性能。

2) 试验结果与分析

本次的试验结果采用加装的GPS测量数据进行对比分析。

图8~13展示了试验过程局部数据情况,其中图8、10和图12分别展示了在Y、X、Z三个方向,GPS测量结果与视觉测量结果以及两者之间的偏差情况。从图9、11和13可以看出,Y向误差约1.16 m,X向误差约0.66 m,Z向误差约0.78 m。

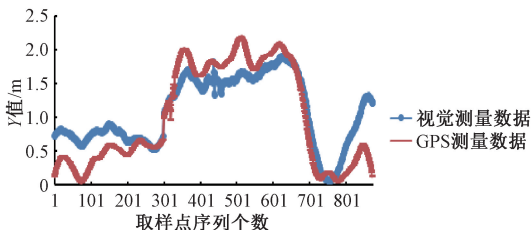


图8 Y向GPS测量与视觉测量结果

Fig. 8 Y-direction: GPS vs. visual measurement results

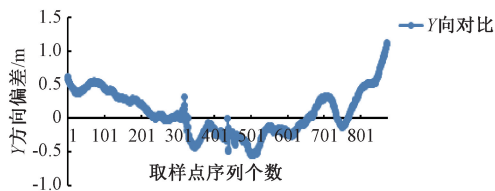


图9 Y向GPS与视觉测量结果差值

Fig. 9 Y-direction: difference between GPS and visual measurement results

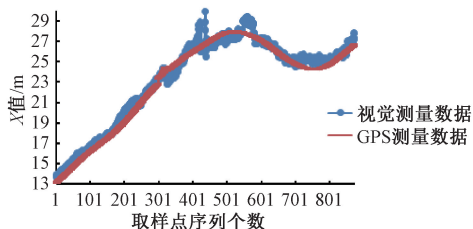


图10 X向GPS测量与视觉测量结果

Fig. 10 X-direction: GPS vs. visual measurement results

(1) 前后编队分析

从整个飞行试验过程来看,X方向测量结果一致性较好,误差约为0.66 m,说明算法在X方向测量结果精度较高。Y方向误差与Z方向误差相当。

在整个飞行过程中,Y方向误差主要表现为判读误差,

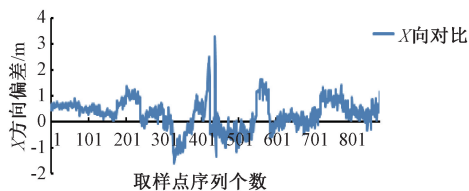


图11 X向GPS与视觉测量结果差值

Fig. 11 X-direction: difference between GPS and visual measurement results

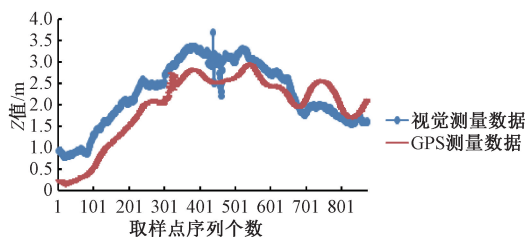


图12 Z向GPS测量与视觉测量结果

Fig. 12 Z-direction: GPS vs. visual measurement results

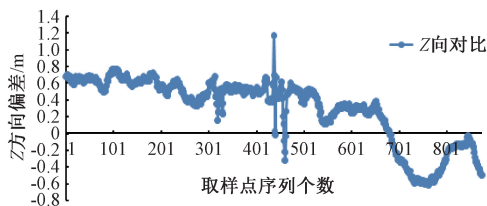


图13 Z向GPS与视觉测量结果差值

Fig. 13 Z-direction: difference between GPS and visual measurement results

这从式(7)计算模型可以看出。而判读误差跟两架机拍摄瞬时相对姿态引起的投影误差和判读像素值误差相关,因此,Y向误差具有一定的波动性。

从式(3)算法模型可以看出,X方向误差主要跟两侧翼尖之间的像素判读值误差有关,而翼尖判读值跟两架机拍摄瞬时相对姿态相关,因为相比Y值,X值少了一个像素判读误差,与GPS测量值比较一致,测量误差较小。

从式(10)算法模型可以看出,Z方向误差主要跟两侧翼尖之间的像素判读值误差有关,而翼尖判读值跟两架机拍摄瞬时相对姿态相关;同时还和判读像素值误差相关,因此,相比Y值,Z值多了一个像素判读误差,与GPS测量值比较一致,测量误差呈现波动性。

(2) 多阵型适应性分析

在不同阵型下,视觉测量系统均能稳定输出相对位置数据。表5统计了各阵型下与GPS差值的均方根误差(root mean square error, RMSE)。

分析表明,尽管在不同阵型下误差有微小波动(RMSE增幅小于12%),但各方向误差均稳定在1.3 m以内,且特征提取成功率始终保持在97.5%以上。这证明了基于翼尖连线的“物像比”模型对不同空间几何关系具有良好的

适应性,其性能未因阵型变化而显著退化。

表 5 多飞行阵型下视觉测量误差 (RMSE)
Table 5 Visual measurement errors (RMSE) under multiple flight formations

飞行 阵型	X 向 误差/m	Y 向 误差/m	Z 向 误差/m	特征提取 成功率/%
前后	0.66	1.16	0.78	99.5
并列	0.71	1.25	0.82	98.7
斜线	0.75	1.31	0.85	97.8
高差	0.69	1.28	0.88	98.2

(3) 极端动态场景下的性能分析

在极端动态场景下,算法的表现呈现出以下关键特征:

动态收敛性:在长机完成机动、进入相对稳定飞行的 3 s 内,视觉测量输出值能快速收敛至与 GPS 轨迹一致的新稳定状态,未出现发散现象,证明了模型在动态过程中的稳定性。

误差瞬变与恢复:在机动发生的瞬间,由于图像运动模糊和姿态角突变,特征点定位会出现瞬时误差增大的“毛刺”(如图 9、11、13 中所示)。然而,超过 95%的“毛刺”误差能在后续 5 帧(0.25 s)内迅速衰减,回归到正常误差范围内。这体现了算法对瞬时干扰的鲁棒恢复能力。

性能边界测试:在大坡度盘旋场景中,当目标机的滚转角超过 60°时,一侧机翼被严重遮挡,导致翼尖连线无法被完整提取,算法会短暂失效。这给出了本方法的一个有效应用边界,即需要保证目标的关键几何结构在视场中可见。

3) 试验结论

飞行试验结果表明:本文提出的视觉测量方法不仅在基本编队场景下能达到实用精度(X 向误差 0.66 m),在多种典型飞行阵型下也表现出稳定的性能,并对剧烈的相对机动具有良好的动态响应与收敛能力。虽然在高动态导致的图像质量下降或目标严重遮挡时存在性能边界,但在绝大部分战术动作下,该方法能够为无人机编队提供连续、可靠的相对位置信息,其适用性得到了从稳态到动态的全面验证,为在复杂任务环境中替代或辅助传统定位方法提供了有力的实验依据。

3 结 论

本文针对无人机编队飞行对轻量化、抗干扰相对定位技术的迫切需求,提出了一种基于伴飞影像与刚性基线约束的单目视觉测量方法。通过理论分析、地面模拟与飞行试验的综合验证。所构建的“刚性基线-物像比”视觉测量模型,通过将目标无人机的翼尖连线作为稳定的空间几何约束,有效克服了单目视觉的尺度不确定性难题,实现了

在动态环境下对相对位置的直接解算。

地面模拟试验表明,该方法在近距离测量范围内具备厘米级精度。飞行试验进一步证明,在 X 向 13~30 m、Y 向 0~2.5 m、Z 向 0~4 m 的典型编队包线内,其测量结果与 GPS 数据在 3 个方向上的误差均优于 1.5 m,处理帧率稳定在 20 fps,能够满足多数编队飞行训练与试验的实时性及精度需求。该方法对不同的编队阵型(前后、并列、斜线)具有良好的适应性。尽管在目标机大姿态角机动导致翼尖特征被严重遮挡时存在局限,但在大部分常规及动态机动场景下,系统能快速收敛并保持稳定跟踪,展现了其应对复杂飞行场景的潜力。

本方法具有硬件结构简单、成本低廉、全自主、抗电磁干扰的突出优势,为在 GNSS 拒止或复杂电磁环境下的无人机编队自主协同,提供了一条高性价比且可靠的技术路径,具备广泛的工程推广价值。

参考文献

[1] 魏振忠,冯广堃,周丹雅,等.位姿视觉测量方法及应用综述[J].激光与光电子学进展,2023,60(3):144-176.
WEI ZH ZH, FENG G K, ZHOU D Y, et al. A review of visual pose measurement methods and applications[J]. Laser& Optoelectronics Progress, 2023, 60(3):144-176.

[2] 严超,张泽旭,袁帅,等.GNSS拒止下面向目标监视的多无人机定位与控制方法[J].宇航学报,2023,44(10):1534-1543.
YAN CH, ZHANG Z X, YUAN SH, et al. Multi-UAV localization and control method for target surveillance under GNSS-denied environments [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(10): 1534-1543.

[3] 唐凯,张海涛,郑建杰,等.基于立体视觉的无人机动态目标实时跟踪[J].信息技术与网络安全,2020,39(12):30-36.
TANG K, ZHANG H T, ZHENG J J, et al. Real-time tracking of dynamic targets for UAVs based on stereo vision [J]. Information Technology and Network Security, 2020, 39(12): 30-36.

[4] 贵瑶.基于结构光视觉的钢轨廓形测量研究[J].高速铁路新材料,2024,3(2):1-7.
GUI Y. Research on rail profile measurement based on structured light vision [J]. Advanced Materials for High-Speed Railway, 2024, 3(2): 1-7.

[5] 邢艳军,王浩,叶东,等.基于单目视觉的非合作目标相对位姿测量[J].中国空间科学技术,2022,42(4):36-44.
XING Y J, WANG H, YE D, et al. Relative pose measurement of non-cooperative target based on monocular vision [J]. Chinese Space Science and

- Technology, 2022, 42(4): 36-44.
- [6] 黄钰洲. 面向室内复杂环境的视觉 SLAM 方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2025.
HUANG Y ZH. Research on visual SLAM method for complex indoor environments [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2025.
- [7] 胡启国,王磊,马鉴望,等. 基于 IQPSO-EKF 的多传感器融合姿态测量方法研究[J]. 机电工程, 2024, 41(2): 353-363.
HU Q G, WANG L, MA J W, et al. Research on multi-sensor fusion attitude measurement method based on IQPSO-EKF[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(2): 353-363.
- [8] 潘礼规,尹佳琪,徐春光. 一种无人机集群相对定位新方法 & 编队队形影响分析[J]. 兵工自动化, 2023, 42(10): 84-96.
PAN L G, YIN J Q, XU CH G. A new relative positioning method for UAV swarm and analysis of formation influence [J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(10): 84-96.
- [9] 严熠,杨盛毅,胡远利,等. 飞行器悬挂载荷的视觉位置测量方法[J]. 机械与电子, 2019, 37(12): 69-72.
YAN Y, YANG SH Y, HU Y L, et al. Visual position measurement method for aircraft suspended loads[J]. Machinery & Electronics, 2019, 37(12): 69-72.
- [10] 王龙华,曾国华,胡华锋,等. 精确三维数据测量的双目视觉系统优化设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 99-109.
WANG L H, ZENG G H, HU H F, et al. Optimal design of binocular vision system for precise 3D data measurement [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(7): 99-109.
- [11] 唐崇武,汪刚志,张飞飞. 面向自主空中加油的锥套识别与测量算法研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 111-116.
TANG CH W, WANG G ZH, ZHANG F F. Research on drogue recognition and measurement algorithm for autonomous aerial refueling [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1): 111-116.
- [12] 范钦红,张景威,于三甲,等. 组合视觉测量技术应用于大型船舶曲板尺寸检验[J]. 中国测试, 2024, 50(8): 94-100.
FAN Q H, ZHANG J W, YU S J, et al. Application of combined vision measurement technology in dimensional inspection of large ship curved plates[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(8): 94-100.
- [13] 熊小平,顾建伟,何彬,等. 基于重投影误差与极线约束的多相机标定方法[J]. 价值工程, 2025, 44(25): 116-118.
XIONG X P, GU J W, HE B, et al. Multi-camera calibration method based on reprojection error and epipolar constraint[J]. Value Engineering, 2025, 44(25): 116-118.
- [14] 冯祎,涂锐,韩军强,等. 一种 GNSS/视觉观测紧组合导航定位算法研究[J]. 全球定位系统, 2021, 46(6): 49-54.
FENG Y, TU R, HAN J Q, et al. Research on a tightly coupled GNSS/visual observation navigation and positioning algorithm[J]. GNSS World of China, 2021, 46(6): 49-54.
- [15] 姜国梁. 无人机多视图立体三维点云重建技术研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2024.
JIANG G L. Research on UAV multi-view stereo 3D point cloud reconstruction technology[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024.

作者简介

惠广裕(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行试验摄影光学测量技术。

E-mail: 316573463@qq.com