

基于随转视觉的直升机桨叶挥舞量测量及分析^{*}

游 涛¹, 熊邦书¹, 朱金浩², 欧巧凤¹

(1. 南昌航空大学图像处理与模式识别江西省重点实验室 南昌 330063;
2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘要:精确测量直升机桨叶挥舞量并分析挥舞模式和规律,对旋翼气动性能评估和结构设计优化具有重要意义。为提高挥舞量视觉测量精度,并为全相位测量提供方案,设计了随转视觉测量系统,提出了相应的挥舞量测量方法,开展了挥舞模式与规律分析。首先,通过光电滑环实现了旋翼端向地面端的万兆级图像数据传输,设计了对称式相机安装支架保证相机与旋翼的整体动平衡,并在旋翼试验台完成不同转速、总距和周期变距下的全相位桨叶图像采集;其次,设计了小目标检测网络模型,克服了复杂光照干扰,实现了微小自发光标记点中心像素坐标的高精度定位,提高了标记点三维坐标的计算精度;再次,建立桨毂坐标系组,即在每个采集相位建立桨毂坐标系,将标记点三维坐标从相机坐标系转换到桨毂坐标系,解算各相位挥舞量,减轻了相机随旋翼旋转导致的坐标系漂移对测量精度的影响;最后,通过三阶多项式拟合分析同一相位挥舞空间模式,并利用复合正弦函数拟合分析旋转周期内的挥舞时域规律,为旋翼系统优化提供支撑。旋翼试验台测试结果表明,1.5 m×1.5 m 视场范围内,挥舞量静态与动态测量误差分别为 0.44 和 0.82 mm,挥舞模式和规律模型拟合度良好,均方根误差均<1 mm,验证了测量系统与方法的有效性及高精度特征,该系统已应用于旋翼设计试验验证。

关键词:桨叶挥舞量;随转视觉;桨毂坐标系;挥舞模式和规律分析;小目标检测

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.30

Measurement and analysis of helicopter rotor blade flapping based on rotating stereo vision

You Tao¹, Xiong Bangshu¹, Zhu Jinhao², Ou Qiaofeng¹

(1. Key Laboratory of Image Processing and Pattern Recognition of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Accurate measurement of helicopter rotor blade flapping, and analysis of its characteristic patterns are essential for evaluating rotor aerodynamic performance and optimizing structural design. To improve flapping visual measurement accuracy and enable full-phase measurement, this study develops a rotating stereo vision measurement system, proposes a corresponding flapping measurement method, and conducts analysis on blade flapping patterns and laws. First, via photoelectric slip rings, the 10-gigabit-level image data transmission from the rotor end to the ground end is realized. Meanwhile, a symmetric camera mounting bracket is designed to ensure the overall dynamic balance between the cameras and the rotor. Additionally, full-phase blade images are acquired on a rotor test rig under different rotational speeds, collective pitches, and cyclic pitches. Second, a small-target detection network is developed to handle complex illumination inference, enabling high-precision localization of the central pixel coordinates of tiny self-luminous marker points and improving the accuracy of their 3D coordinate computation. Third, a hub coordinate system is established for each acquisition phase. Marker 3D coordinates are transformed from camera to hub system to calculate phase-specific flapping, reducing errors from coordinate drift caused by camera-rotor rotation. Finally, third-order polynomial fitting analyzes in-phase flapping spatial patterns, while composite sine fitting analyzes flapping time-domain laws in the rotation cycle, supporting rotor system optimization. Experimental results on the rotor test rig demonstrate that, within a 1.5 m×1.5 m field of view, static and dynamic flapping measurement errors are 0.44 and

0.82 mm, respectively, both flapping patterns and laws models exhibit excellent agreement with experimental data ($\text{RMSE} < 1 \text{ mm}$). These results verify the effectiveness and high-precision characteristics of the proposed measurement system and method, and this system has been applied to the verification of rotor design tests.

Keywords: blade flapping; rotating stereo vision; hub coordinate system; flapping patterns and laws analysis; small target detection

0 引言

直升机旋翼高速旋转时,受气动力、惯性力和结构柔性等影响,桨叶会产生挥舞、摆振和扭转等运动^[1-3]。挥舞量作为旋翼定型实验的关键参数,对其精确测量并分析桨叶挥舞空间模式和时域规律,可为新型旋翼的设计优化、性能评估及生产维护提供可靠依据,因此备受学者关注。

目前,已经提出了多种方法对桨叶挥舞量进行测量。传统传感器测量法通过在桨叶内嵌入应变片实现测量^[4-5],但该方法改变了桨叶原始结构,且传感器会破坏桨叶气动外形,影响桨叶气动性能;同时由于桨尖等关键部位复杂曲面制约,传感器布置数量受限,难以完整获取桨叶挥舞量数据^[6]。

随着光学测量技术发展,视觉测量法以非接触、低成本优势在航空航天等高精度领域得到应用^[7-9]。在桨叶挥舞量测量中,视觉测量法分为单目与双目立体视觉,单目视觉实时处理能力强,相机通常固定于某一相位,单一方位测量精度高,但只有平面信息没有三维信息,还原桨叶挥舞时域规律能力有限^[10]。双目立体视觉具备快速数据采集和三维点坐标重建能力,可准确还原整个旋翼几何形状,在桨叶挥舞量测量领域得到广泛应用^[11-14],然而现有方法是将相机固定于地面或操作平台上采集桨叶图像^[15-18],导致部分相位存在遮挡,无法实现全相位桨叶挥舞量测量,且视场范围过大,测量精度通常仅 3 mm 左右,难以满足新型旋翼设计试验验证的高精度需求。

针对上述问题,设计了随转视觉测量系统,与传统视觉测量系统相比,该系统需要将万兆级图像数据从高速旋转的旋翼端传输到静止地面端,需要保障安装于旋翼桨毂上的立体视觉设备保持动平衡;该系统将相机安装于桨毂上,一方面缩小了视场范围,提高了测量精度;另一方面从系统上规避了相位遮挡。

随转环境中,工业相机的特殊布局导致传统反光标记点失效,需采用高对比度的自发光标记点。为减少标记点对桨叶气动特性的影响,需对其进行微型化设计,导致传统定位方法定位难和不准,造成桨叶挥舞量测量难和不准。现有视觉测量方法采用单一的桨毂坐标系转换方法难以解决相机随旋翼动态旋转引发的坐标系漂移对测量精度的影响,导致桨叶挥舞量解算误差增大。

综上,文章主要贡献可归纳为:首先,分析了传统测量方法在桨叶气动性干扰、相位遮挡与测量精度上的局

限;设计了随转视觉测量系统,其通过光电滑环实现了旋翼端向地面端的万兆级图像传输,设计了相机安装支架保证相机与旋翼整体动平衡,该系统缩小视场范围,并规避了相位遮挡,实现了高精度全相位测量。其次,提出了基于随转视觉的直升机桨叶挥舞量测量方法,主要包括:1)提出了小目标检测网络结构,克服了试验环境复杂光照干扰;2)构建了桨毂坐标系组,在各采集相位单独建立桨毂坐标系,抑制了由于旋翼高速转动引起的机械振动和转速不稳导致的桨毂坐标系漂移。最后,在旋翼塔环境下开展直升机桨叶挥舞量测量,对桨叶的挥舞空间模式、时域规律以及挥舞量测量精度进行分析与对比研究。试验表明,挥舞模式与规律模型拟合度良好,系统测量精度高于现有的立体视觉测量系统。

1 随转视觉测量系统

1.1 系统设计

随转视觉测量系统如图 1 所示,主要包括两个高帧率工业相机、高速光电滑环、同步倍频器、处理计算机、光电传感器、若干微小自发光标记点和 4 个光纤收发器。系统核心设计难点在于,实现从高速旋转的旋翼端向静止地面端稳定传输万兆级图像数据,以及安装立体视觉系统后,保持旋翼整体结构的动平衡。

工业相机安装于旋翼桨毂上随旋翼同步旋转采集桨叶图像时,为精准还原桨叶高速旋转时的挥舞规律,假设旋翼每分钟 872 r,一周采集 20 个相位,每张图像大小为 21.445 Mbit,旋翼端向地面端每秒的数据传输量为 12 466.693 Mbit,因此系统需具备万兆级数据传输能力。为此,定制了如图 2 所示型号为 DC49-W6E18-G7 的光电滑环,性能技术指标如表 1 所示。

表 1 光电滑环性能技术指标

Table 1 Photoelectric slip rings performance and technical specifications

项目	说明
环路数	光环 7 路, 电环 24 路
光纤类型	9/125(单模), 波长范围 1 500~1 600 nm, 带宽 $\pm 50 \text{ nm}$
工作转速	额定转速 1 050 r/min, 1 200 r/min(最大)
结构材料	硬质铝合金(阳极氧化)
防护等级	IP64(防油雾)

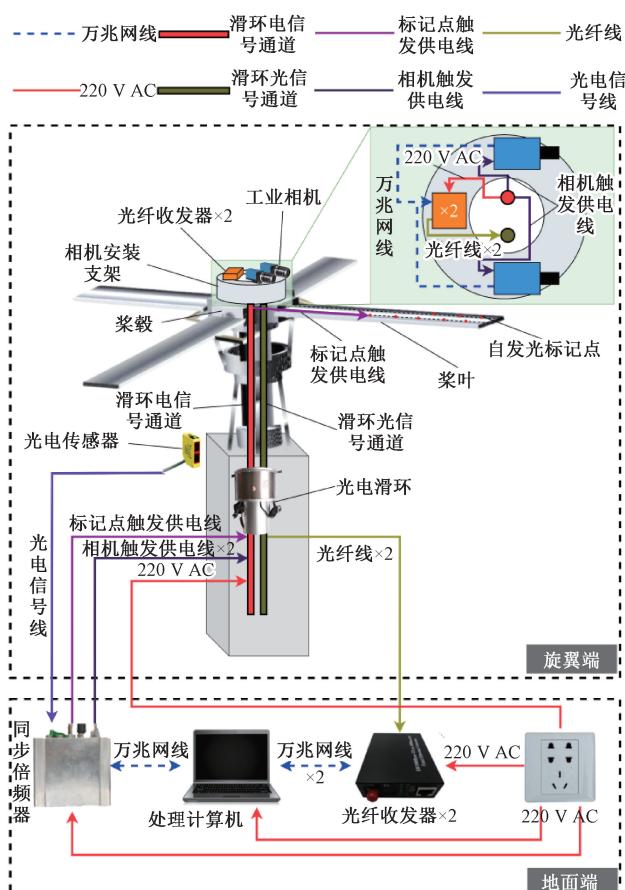


图 1 随转视觉测量系统

Fig. 1 The illustration of rotating stereo vision measurement system



图 2 光电滑环

Fig. 2 Photoelectric slip rings

工业相机采集的图像数据从电信号, 经光纤收发器转为光信号, 通过滑环的光信号通道传输至地面端, 再由地面端光纤收发器转换为电信号, 最终通过万兆网线传输至处理计算机。

旋翼已预先完成动平衡校准, 当加装工业相机等外部设备时, 若其旋转中心与旋翼桨毂旋转中心存在同轴度偏差, 高速旋转时将因离心力失衡引发旋翼台剧烈振动。为此, 设计了如图 3 所示的航空铝合金对称式相机安装支架, 为实现旋翼与支架的整体动平衡, 该支架前方及两侧设有配重块安装位, 通过精准配置配重块, 可抵消因质量偏心所产生的不平衡力矩。

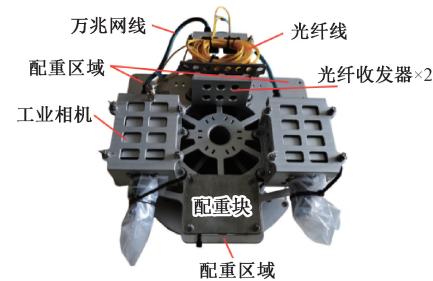


图 3 相机安装支架实物

Fig. 3 Camera mounting bracket

1.2 测量原理

系统桨叶挥舞量测量的具体原理为:

1) 微小自发光标记点铺设。在被测桨叶 0.5~1.0 R 处, 每隔 150.00 mm 铺设两排微小自发光标记点。

2) 立体视觉测量系统标定。首先进行单目标标定, 获得两个相机的内参矩阵与畸变系数, 再进行立体视觉标定, 得到两个相机的外参矩阵。

3) 桨叶图像采集。在不同转速、总距和周期变距下采集桨叶图像, 并将图像存储到处理计算机中。

4) 桨叶挥舞量解算。定位微小自发光标记点中心像素坐标, 获取相机坐标系下的三维坐标, 转换至桨毂坐标系后, 解算桨叶挥舞量。

2 随转环境桨叶挥舞量测量方法

随转视觉桨叶挥舞量测量包括两个过程: 微小自发光标记点高精度定位、桨毂坐标系建立及挥舞量解算。

2.1 微小自发光标记点高精度定位

为减轻对桨叶气动性能的影响, 标记点需微小化设计。为抓拍桨叶上标记点运动的瞬间, 相机曝光时间极短, 导致标记点曝光不足, 叠加试验环境复杂光照干扰, 传统目标检测算法难以满足需求。为此, 文章改进 YOLOv11-n 模型以提升微小目标检测精度。原模型通过三大分支检测大、中、小目标, 虽检测快速, 但在随转真实试验环境中, 对自发光标记点这类微小目标检测精度不足。为此, 针对模型网络结构及 C3K2 模块进行改进, 增强小目标特征提取能力。

1) YOLOv11-n 模型改进

改进网络结构如图 4 所示, 颈部移除中、大目标专用跨尺度特征融合路径及 64 pixels × pixels、32 pixels × 32 pixels 检测头; 为强化微小目标检测, 利用 P2 层低级视觉特征丰富、空间分辨率高的优势, 在颈部新增跨尺度特征融合分支, 促进浅层空间信息与深层语义信息互补融合, 并引入 256 pixels × 256 pixels 微小目标专用检测头。

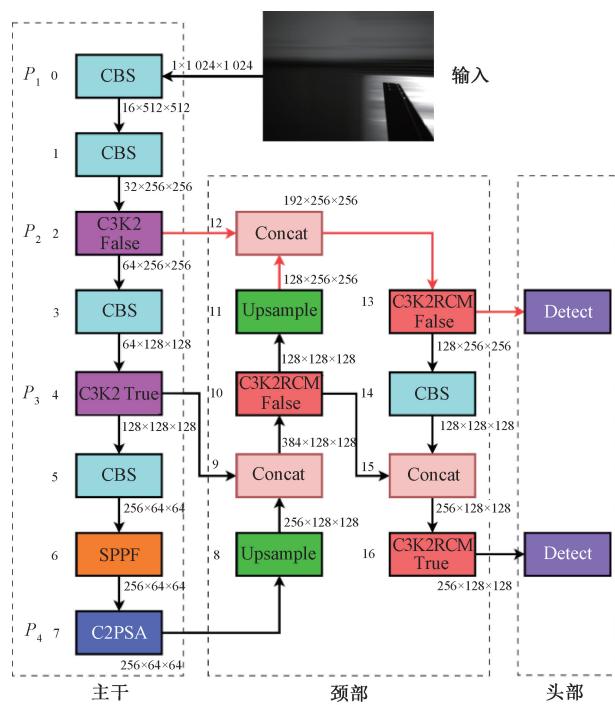


图 4 改进 YOLOv11-n 网络结构图

Fig. 4 The architecture of improved YOLOv11-n network

为进一步增强模型小目标特征提取能力,引入矩阵自校准模块^[19](rectangular self-calibration module, RCM)优化C3K2,得到C3K2RCM模块。将其应用于颈部,强化P2、P3层跨尺度融合特征,充分发挥金字塔上下文提取优势,结构如图5所示。

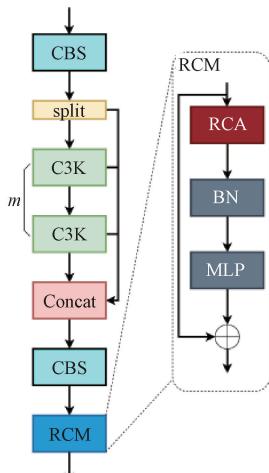


图 5 C3K2RCM 模块结构

Fig. 5 The architecture of C3K2RCM module

RCM中矩阵自校准注意力(rectangular self-calibration attention, RCA)采用双分支结构,上半分支通过垂直(Poolh)和水平(Poolw)平均池化捕获轴向全局上下文,经广播加法重建矩形区域,如图6所示;随后自校

准函数利用水平条形卷积校准该区域水平形状,经批归一化(batch normalization, BN)和线性整流函数(rectified linear unit, ReLU)处理后,再通过垂直条形卷积校准其垂直形状;最后经Sigmoid函数生成注意力特征权重,使矩形区域更精准逼近前景目标区域。自校准函数表示为:

$$\xi_c(y_1) = \text{Sig}(SConv_{k \times 1}(RB(SConv_{1 \times k}(y_1)))) \quad (1)$$

式中:SConv表示大核条形卷积;k表示条形卷积的卷积核;RB表示ReLU和BN; y_1 表示重建矩形区域。

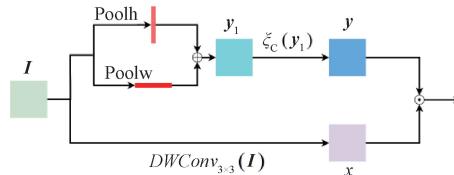


图 6 RCA 结构

Fig. 6 The architecture of RCA

RCA下半分支采用深度可分离卷积细化输入特征I,随后将注意力特征权重与细化后特征进行融合。RCA结构表达式为:

$$\xi_F(I, y) = DWConv_{3 \times 3}(I) \odot y \quad (2)$$

式中:DWConv表示深度可分离卷积; \odot 表示矩阵点乘;y表示校准后的注意力特征权重。

综上,C3k2RCM的结构表达式为:

$$F_{\text{out}} = BM(\xi_F(C3k2(x_1)), \xi_c(H_p(C3k2(x_1)) \oplus V_p(C3k2(x_1)))) + C3k2(x_1) \quad (3)$$

式中:BM表示BN和多层感知机(multilayer perceptron, MLP); H_p 和 V_p 分别表示水平和垂直平均池化; \oplus 表示广播加法; x_1 表示输入特征。

2) 数据集构建与模型训练

使用随转视觉测量系统在不同转速、总距和周期变距下采集大量桨叶图像,如图7所示。在不同时段室外光照强度下采集桨叶图像组成数据集,训练集为12 183张,验证集为1 622张,采用LabelImg软件标注出标记点区域。使用数据集对模型进行训练。



图 7 桨叶图像

Fig. 7 The images of rotor blade

3) 微小自发光标记点三维坐标计算

微小自发光标记点中心定位过程如图 8 所示。首先采用训练的深度学习模型对输入图像(图 8(a))进行标记点区域识别(图 8(b));然后,使用 EDCircles 算法对框选出的区域进行标记点边缘轮廓提取,从而定位标记点中心像素坐标(图 8(c));最后,采用标定好的立体视觉系统,计算各相位桨叶图像中标记点在相机坐标系下的三维坐标。

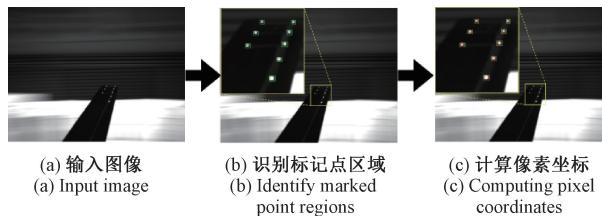


图 8 微小自发光标记点中心定位

Fig. 8 Center localization of tiny self-luminous marker points

2.2 桨毂坐标系建立及挥舞量计算

传统方法只建立一个桨毂坐标系,因旋翼高速转动引起的机械振动和转速不稳,导致桨毂坐标系漂移,影响桨叶挥舞量解算精度。为减轻此影响,构建桨毂坐标系组,即在每一个采集相位建立一个坐标系。

1) 桨毂坐标系组建立

总距为 0°时,桨叶呈拉平状态,该状态将作为后续测量的基准。桨叶上表面沿桨根至桨尖方向布置两排微小自发光标记点,共计 N 个。定义旋翼旋转一周划分为 M 个相位,如图 9 所示,需在每个相位采集总距为 0°的基准桨叶图像。定义第 i 相位第 j 标记点为 $\mathbf{P}_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$, $i = 0, 1, \dots, M - 1; j = 1, \dots, N$ 。

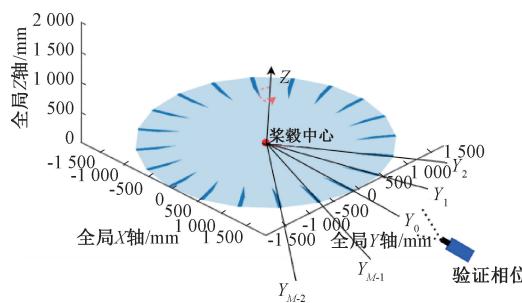


图 9 桨叶图像采集相位

Fig. 9 The illustration of paddle image acquisition phase

(1) 桨毂坐标系 Z 轴确定

在 i 相位处,通过基准桨叶平面上所有标记点三维坐标拟合平面方程 $a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$,取平面法向量作为桨毂坐标系的 Z 轴。基于点到平面代数距离平方和最

小原则,约束条件为 $a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 = 1$, 构建目标函数及约束条件为:

$$\begin{cases} \min_{a_i, b_i, c_i, d_i} \sum_{j=1}^N (a_i x_{ij} + b_i y_{ij} + c_i z_{ij} + d_i)^2 \\ \text{s. t. } a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

基于式(4)构造拉格朗日函数,计算标记点中心化坐标为:

$$\begin{cases} \tilde{x}_{ij} = x_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \\ \tilde{y}_{ij} = y_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{ij} \\ \tilde{z}_{ij} = z_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

基于式(5)构造式(4)对应的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_i = \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} \tilde{x}_{ij}^2 & \tilde{x}_{ij}\tilde{y}_{ij} & \tilde{x}_{ij}\tilde{z}_{ij} \\ \tilde{y}_{ij}\tilde{x}_{ij} & \tilde{y}_{ij}^2 & \tilde{y}_{ij}\tilde{z}_{ij} \\ \tilde{z}_{ij}\tilde{x}_{ij} & \tilde{z}_{ij}\tilde{y}_{ij} & \tilde{z}_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过特征值分解法,求解协方差矩阵 \mathbf{C}_i 最小特征值对应的特征向量 $\mathbf{n}_i = [a_i, b_i, c_i]^T$, 即为所求平面法向量,将其作为第 i 相位处桨毂坐标系的 Z 轴方向向量。

(2) 桨毂坐标系 Y 轴确定

平行于桨根至桨尖方向,选取任意两个标记点三维坐标,构建三维向量 \mathbf{v}_i 。将 \mathbf{v}_i 投影至法向量 \mathbf{n}_i ,投影长度为 $l_i = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_i$, 对应投影向量为 $l_i \mathbf{n}_i$ 。则 \mathbf{v}_i 向平面方程的投影向量为 $\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i - l_i \mathbf{n}_i$ 。 i 相位处桨毂坐标系的 Y 轴方向向量为:

$$\mathbf{y}_{hub,i} = \frac{\mathbf{v}_i - l_i \mathbf{n}_i}{\|\mathbf{v}_i - l_i \mathbf{n}_i\|} \quad (7)$$

(3) 桨毂坐标系 X 轴确定

依据右手坐标系准则,确定 i 相位处桨毂坐标系的 X 轴方向向量为:

$$\mathbf{x}_{hub,i} = \mathbf{y}_{hub,i} \times \mathbf{n}_i \quad (8)$$

(4) 桨毂坐标系原点确定

依据旋翼桨毂参数,已知桨毂中心到桨尖标记点长度为 2 216 mm,如图 10 所示,假设在相机坐标系下,两个桨尖标记点的中心点坐标为 $\mathbf{c} = (x_c, y_c, z_c)$, 将中心点沿着向量 $\mathbf{y}_{hub,i}$ 反方向移动 2 216 mm,所得三维坐标即为 i 相位处桨毂坐标系原点 $\mathbf{O}_{hub,i}$ 。

至此,在 M 个相位处分别建立桨毂坐标系,即完成桨毂坐标系组的构建。

(5) 标记点坐标变换

构建 i 相位处旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_i = [\mathbf{x}_{hub,i} \quad \mathbf{y}_{hub,i} \quad \mathbf{n}_i] \quad (9)$$

将原坐标系下第 i 相位第 j 标记点 \mathbf{P}_{ij} 转换至桨毂坐标系,公式为:

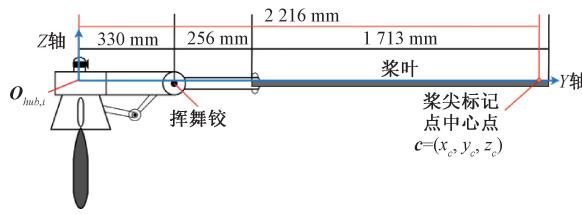


图 10 桨毂中心距离参数

Fig. 10 The illustration of hub center distance parameters

$$\mathbf{P}_{hub,ij} = \mathbf{R}_i^T (\mathbf{P}_{ij} - \mathbf{O}_{hub,i}) \quad (10)$$

2) 挥舞量解算

利用式(10), 将三维坐标从相机坐标系转换至桨毂坐标系, 以计算挥舞量, 如图 11 所示, 同一标记点在基准状态与挥舞状态的 Z 轴差值为挥舞量, 表达式为:

$$h_{ij} = z'_{hub,ij} - z_{hub,ij} \quad (11)$$

式中: $z'_{hub,ij}$ 和 $z_{hub,ij}$ 分别表示第 i 相位挥舞状态与基准状态下第 j 标记点 Z 轴坐标值。

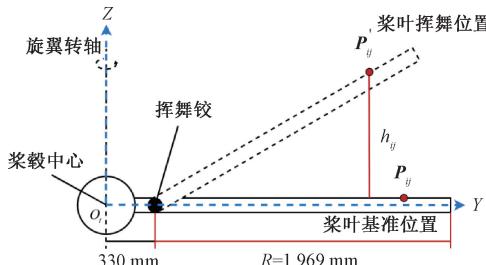


图 11 桨叶挥舞量解算示意图

Fig. 11 The illustration of rotor blade flapping amount calculation

测量挥舞量时, 测量值与真实值之间会存在误差。将标记点 P_{ij} 处挥舞量误差进一步转换成挥舞角误差的公式为:

$$\phi_{ij} = \arccos \frac{2L_j^2 - (h_{ij}^s - h_{ij})^2}{2L_j^2} \quad (12)$$

式中: ϕ_{ij} 表示第 i 相位第 j 标记点处的挥舞角误差值; L_j 表示挥舞铰到第 j 标记点的长度; h_{ij}^s 表示第 i 相位第 j 标记点处的挥舞量真值。

3 桨叶挥舞模式和规律分析

分析直升机桨叶挥舞的空间模式和时域规律, 是理解旋翼动力学、提升性能及优化气动设计的关键。空间模式分析可揭示桨叶不同位置挥舞量对气动性影响; 时域规律则通过关注挥舞量随旋转相位的周期性波动判断载荷分布, 为桨叶结构强度优化提供支撑。

为抑制数据噪声、提升测量结果的准确性与可靠性, 采用多周数据均值处理, 对相同相位标记点的挥舞量进

行优化, 以消除偶然因素导致的波动, 均值处理公式为:

$$h'_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N h_{ij}^m \quad (13)$$

式中: N 为采集周数; h_{ij}^m 为第 m 周第 i 相位第 j 标记点的原始挥舞量; h'_{ij} 为 N 圈均值处理后的挥舞量。

3.1 桨叶挥舞的空间模式分析

三阶多项式函数在直升机旋翼桨叶等复合旋转部件设计中已被证实具有显著的工程价值^[22-23], 故采用三阶多项式函数对桨叶不同位置挥舞量进行拟合, 即:

$$h(\alpha) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \quad (14)$$

式中: 系数向量 $\alpha = [a_0, a_1, a_2, a_3]$; r 为挥舞铰到标记点的长度。

3.2 桨叶挥舞的时域规律分析

为研究总距、周期变距与桨叶挥舞量的关系, 首先, 采用式(13)对 M 个相位的标记点挥舞量数据进行均值处理; 其次, 采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对处理后的数据开展频谱分析; 最后, 使用复合正弦函数对一周的均值处理数据进行曲线拟合^[1], 拟合公式为:

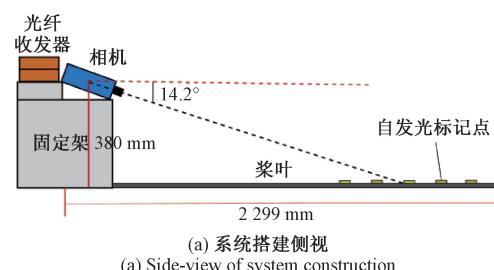
$$h(\lambda) = \sum_{k=1}^K a_k \sin(\omega_k \alpha + \theta_k) \quad (15)$$

式中: $\lambda = [a_1, \omega_1, \theta_1, \dots, a_k, \omega_k, \theta_k]$ 为系数向量; α 为 M 个相位对应的角度值。

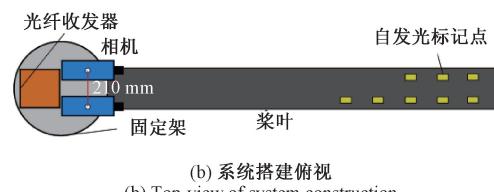
4 实验验证

4.1 实验设置

为验证随转视觉测量系统的可行性、挥舞量测量方法的有效性及精度, 同时分析桨叶挥舞模式与规律, 相关实验于中国直升机设计研究所开展, 实验场景布置示意图如图 12 所示。



(a) System setup side view



(b) Top-view of system construction

图 12 实验场景

Fig. 12 Diagram of experimental scene

实验涵盖相同转速、不同总距和周期变距下的 12 种状态, 每种状态采集 100 组图像并计算标记点挥舞量, 桨叶采集状态如表 2 所示。

表 2 桨叶采集状态表

Table 2 Rotor blade acquisition status table

转速/(r·min ⁻¹)	总距/(°)	周期变距/(°)	采集周数	相位数
872	0	0	100	20
872	2	0	100	20
872	4	0	100	20
872	5	0	100	20
872	6	横向-2	100	20
872	6	横向-1	100	20
872	6	横向 0	100	20
872	6	横向+1	100	20
872	6	横向+2	100	20
872	6	纵向-2	100	20
872	6	纵向-1	100	20
872	6	纵向 0	100	20
872	6	纵向+1	100	20
872	6	纵向+2	100	20
872	7	0	100	20
872	8	0	100	20
872	9	0	100	20
872	10	0	100	20

由表 2 可以看出, 在 872 r/min 的转速下, 旋翼旋转一周分为 20 个相位, 单状态重复采集 100 周, 采集 2 000 张桨叶图像用于后续分析。

在桨叶 1/4 弦线以 150 mm 为间隔粘贴 $K(K=5)$ 个微小自发光标记点, 编号为 $1, \dots, K$, 桨叶总长度 $R_b = 1\ 713\text{ mm}$, 具体数据如图 13 所示。通过航空透明胶固定线路, 以减轻对桨叶气动特性的影响。

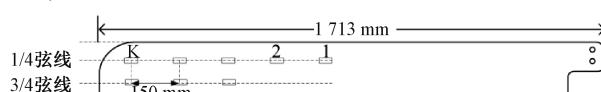


图 13 桨叶标记点位置

Fig. 13 Diagram of blade marker point positions

4.2 小目标检测方法对比实验

在微小自发光标记点数据集上, 将文章方法与主流目标检测方法对比, 验证小目标检测效果, 结果如表 3 所示, AP@50 较 RT-DETR-L 提升 2.1%, AP@50-95 较 YOLOv8-s 提升 5.7%, 精确率较 YOLOv10-n 提升 1.4%, 召回率较 RT-DETR-L 提升 2.6%。本方法在降低参数量的同时, 性能较主流方法显著提升。

表 3 方法对比实验

Table 3 The comparison of various methods

方法	训练轮数	精确率/%	召回率/%	AP@50/%	AP@50-95/%	参数量/M
		%	%	%	%	
YOLOv8-n	300	94.7	62.2	79.9	33.600	3.0
YOLOv8-s	300	75.6	84.0	88.6	0.416	11.1
RT-DETR-L ^[20]	300	93.7	93.2	96.3	0.412	31.0
YOLOv10-n ^[21]	300	96.1	63.4	87.0	0.372	2.7
YOLOv11-n	300	78.9	84.5	88.6	39.900	2.5
本文方法	300	97.5	95.8	98.4	47.300	2.1

4.3 测量精度分析

1) 静态测量精度分析

静态测量精度由陶瓷标定板圆形标记点三维测量精度表征, 已知标定板精度为 0.01 mm, 相邻标记点间距为 35.00 mm, 每一排最远标记点距离为 210.00 mm, 如图 14 所示。在 1.5 m 处采集 4 组图像, 每组 50 张, 计算各组标记点间距平均值, 测量结果如表 4 所示, 当标定板与相机光轴呈现 45° 时测量误差最大, 即挥舞量静态测量精度为 0.44 mm。

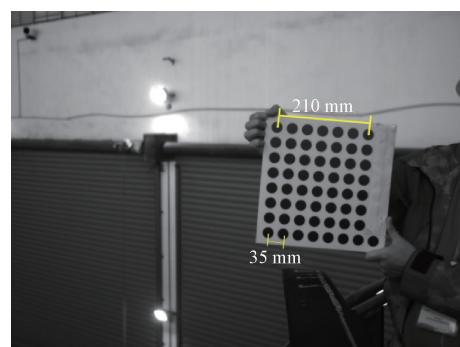


图 14 静态精度验证场景

Fig. 14 The accuracy verification in static scenario

表 4 静态测量精度结果

Table 4 Static measurement accuracy results

标定板摆放位置	真实值	测量均值	误差	方差	均方差
与光轴垂直	35.00	35.12	0.12	0.06	0.25
与光轴垂直	210.00	210.25	0.25	0.21	0.45
与光轴 45°	35.00	35.07	0.07	0.12	0.34
与光轴 45°	210.00	209.56	0.44	0.42	0.64

2) 动态测量精度分析

文献[10]可在单一相位处对桨叶挥舞量进行高精度测量,其精度已通过实际试验验证,且为行业内测量精度最高,故以该方法的测量结果作为近似真值,用于验证本系统测量精度。文章与文献[10]都以 0° 总距状态为基准,计算其他总距状态下的挥舞量。图 15 给出了两种方法在不同总距状态下的挥舞量对比,其横坐标为总距,纵坐标为挥舞量和挥舞角误差值。表 5 给出了两种方法之间的挥舞量和挥舞角误差值。

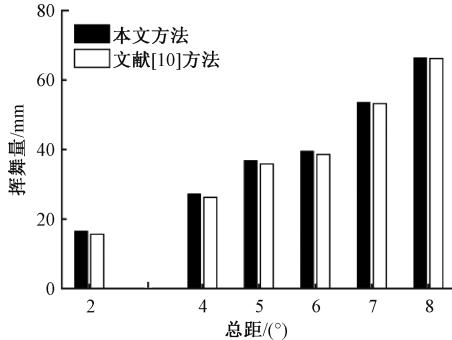


图 15 文章与文献[10]的挥舞量测量结果对比

Fig. 15 Comparison of flapping amount measurement results between this paper and reference[10]

由表 5 可以看出,以两种方法在不同总距测量的挥舞量误差的平均值表征动态测量精度,挥舞量的动态测量误差为 0.82 mm,利用式(12)将挥舞量误差转换成挥舞角误差为 0.03°。

表 5 动态测量精度结果

Table 5 Dynamic measurement accuracy

总距/(°)	挥舞量误差/mm	挥舞角误差/(°)
2	0.91	0.03
4	1.01	0.03
5	1.02	0.03
6	0.97	0.03
7	0.38	0.01
8	0.24	0.01
均方根误差	0.82	0.03

4.4 挥舞模式分析

以 0° 总距下桨叶高度为基准,通过式(13)计算其他总距下各相位标记点的平均挥舞量;利用式(14)对 $1/4$ 弦线上 5 个标记点在某一相位的挥舞量数据进行拟合。图 16 展示 872 r/min 的转速下,不同总距的实测挥舞量散点及三次多项式拟合曲线,其中横坐标为标记点至挥

舞铰中心距离 r 与桨尖至挥舞铰中心距离 R 的比值,纵坐标为挥舞量。

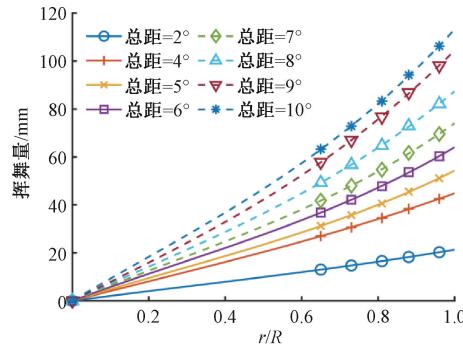


图 16 不同总距下桨叶在 0° 相位的挥舞模式

Fig. 16 Flapping patterns of rotor blade at 0° phase under different collective pitches

如图 16 所示,相同总距下,挥舞量随标记点至桨尖距离的减少而单调递增;总距从 2° 增至 10° 时,第 5 号标记点挥舞量从 20.27 mm 增至 105.63 mm,同一标记点挥舞量随总距增大而显著提升。8 条拟合曲线均方误差最小为 0.03 mm,最大为 0.42 mm。

针对 9° 总距,如图 17 展示了 0° 、 54° 、 108° 、 162° 和 216° 相位处的挥舞量对比分析结果。在同一相位处,挥舞量随标记点至桨尖距离的减少而单调递增;第 5 号标记点在 54° 相位时挥舞量最小,为 97.60 mm, 216° 相位时挥舞量最大,为 103.68 mm。三次多项式拟合结果符合桨叶动力学特征。

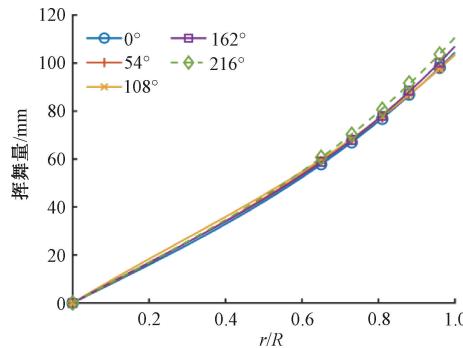


图 17 9° 总距下桨叶在不同相位处的挥舞模式

Fig. 17 Flapping patterns of rotor blade at different phase under 9° collective pitch

4.5 桨叶挥舞规律与总距的关系分析

根据奈奎斯特采样定理 $f_s \geq 2f$, 为准确还原桨叶挥舞运动的时域变化规律,在试验中,桨叶每旋转一周均匀采集 20 个相位的图像数据。采集频率 f_s 和旋转频率 f 满足 $f_s = 20f$, 因此,基频分量对应的归一化数字角频率

$$\text{为 } 2\pi \frac{f}{f_s} = \frac{2\pi}{20} = 0.1\pi。$$

针对桨叶 $0.65 R$ 标记点, 在 100 个旋转周期内, 采用式(13)对 20 个相位的挥舞量数据进行均值处理, 将所得 20 个均值序列进行 FFT 获得频谱, 分析不同总距下的频率特性, 如图 18 所示。

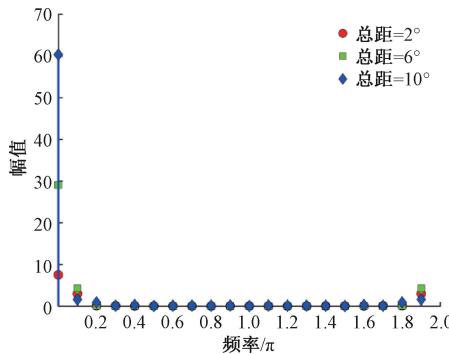


图 18 不同总距下桨叶挥舞量数据的频谱

Fig. 18 Frequency spectrum of rotor blade flapping data under different collective pitches

图 18 可以看出, 在总距 2° 下, 挥舞量频谱包含幅值较大的直流分量、幅值稍低的基波以及平稳的高次谐波。直流分量表征桨叶旋转周期内的平均挥舞高度, 基波反映挥舞幅度的周期性变化, 谐波则与桨叶结构共振特性相关。随着总距增大, 直流分量显著提升, 基波幅值小幅波动, 各次谐波幅值无明显变化, 符合总距对桨叶气动载荷的作用规律。

为量化挥舞量与总距的关系, 利用式(15)对 20 个相位的挥舞量数据均值进行拟合, 如图 19 所示。

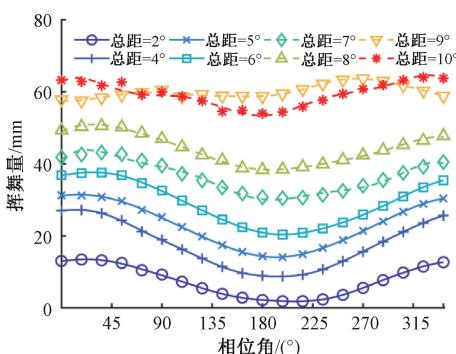


图 19 不同总距下桨叶 $0.65 R$ 处旋转一周挥舞规律

Fig. 19 Flapping patterns of rotor blade at $0.65 R$ during one revolution under different collective pitches

图 19 可以看出, $0.65 R$ 位置挥舞量在相同总距下呈现基波与谐波叠加的正弦函数曲线趋势。总距从 2° 增至 10° , 挥舞量平均值显著增大, 与图 18 中直流分量变化

趋势一致。拟合结果均方根误差最小为 0.11 mm , 最大为 0.73 mm 。

4.6 桨叶挥舞规律与周期变距的关系分析

利用式(13)对桨叶 $0.65 R$ 处标记点 100 个旋转周期内的各相位挥舞量数据进行均值处理, 经 FFT 获得频谱, 对比叠加周期变距前后的频谱特征, 如图 20 所示, 横坐标为频率, 纵坐标为幅值。

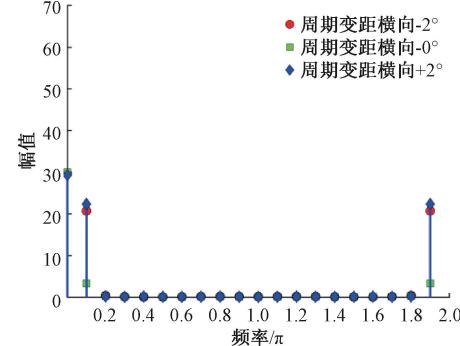


图 20 不同横向周期变距下桨叶挥舞量数据的频谱

Fig. 20 Frequency spectrum of the amount of rotor blade flapping under different lateral cyclic pitches

图 20 频谱分析表明, 总距 6° 、横向周期变距 0° 时, 挥舞量以基波为主, 伴有平稳谐波; 施加周期变距后, 基波幅值显著增大, 直流分量和谐波幅值无明显变化, 符合周期变距气动载荷作用机制。

为量化挥舞量与周期变距的关系, 图 21 和 22 分别给出了 6° 总距、不同横向和纵向周期变距时, $0.65 R$ 位置挥舞量实测散点与式(15)拟合曲线。

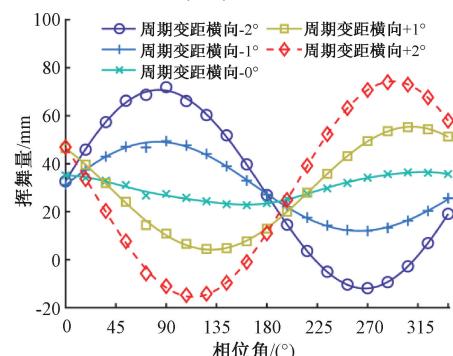


图 21 6° 总距不同横向周期变距下桨叶 $0.65 R$ 处挥舞量

Fig. 21 Flapping amount of rotor blade at $0.65 R$ under 6° collective pitch and different lateral cyclic pitches

图 21 可以看出, 横向周期变距从 -2° 变化到 2° 时, $0.65 R$ 位置挥舞量变化显著, 正负向横向周期变距的拟合曲线在相位上呈现对称反向特性, 拟合的均方根误差最小为 0.65 mm , 最大为 0.77 mm , 与图 20 的基波变化趋势一致, 符合直升机横滚控制需求; 图 22 可以看出, 正负

向纵向周期变距则在幅度上呈现对称反向特性,符合直升机俯仰控制的气动响应规律。

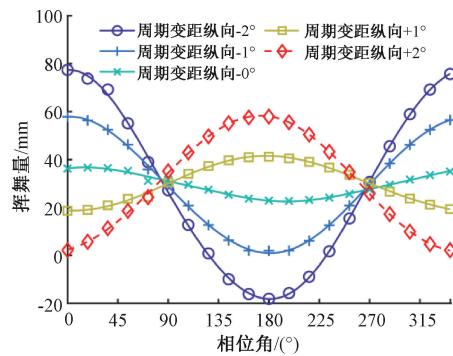


图 22 6° 总距不同纵向周期变距下桨叶 $0.65 R$ 处挥舞量

Fig. 22 Flapping amount of rotor blade at $0.65 R$ under 6° collective pitch and different longitudinal cyclic pitches

4.7 测量方法对比分析

不同测量方法优缺点对比结果如表 6 所示。

表 6 不同测量方法对比

Table 6 Comparison of different measurement methods

方法	指标			
	是否接触	测量精度	运行速度	局限性
文献[11]	否	挥舞角误差: 0.1°	离线处理	视觉系统精度受环境条件影响大
文献[14]	否	桨叶局部长度: 182 mm 挥舞角误差: 0.36°	较快	系统图像采集帧率不足,难以实现多相位测量
文献[1]	否	桨叶长度: $2\ 100$ mm 挥舞量动态测量误差: 0.98 mm 挥舞角动态测量误差: 0.03° 桨叶长度: $2\ 299$ mm 挥舞量动态测量误差: 0.82 mm 挥舞角动态测量误差: 0.03°	离线处理	视场范围大, 精度提升困难,存在部分相位遮挡
本文方法	否	挥舞角动态测量误差: 0.03° 挥舞量静态测量误差: 0.44 mm	离线处理	需要对旋翼整体进行动平衡试验

5 结 论

本研究设计了一套随转视觉测量系统,采用光电滑

环实现了旋翼端至地面端的万兆级图像数据传输,设计了对称式相机安装支架,保证了旋翼端整体动平衡性能;提出了一种随转环境下桨叶挥舞量测量方法,包括微小自发光标记点定位与桨毂坐标系组构建方法,并进行了挥舞量数据拟合与分析。该系统具有非接触测量、精度高和全相位测量的技术优势,在中国直升机设计研究所旋翼试验台开展了真实桨叶测量试验,结果表明,在 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 视场范围内,挥舞量静态和动态测量的误差分别为 0.44 和 0.82 mm,分析不同总距及周期变距下的挥舞量数据,构建的桨叶挥舞空间模式和时域规律模型拟合度良好,均方根误差均 < 1 mm,为旋翼系统优化提供可靠支撑。试验验证了系统及方法能够有效实现桨叶挥舞量的高精度测量。

本研究所提出的测量方法,随着嵌入式设备算力提升与网络模型轻量化技术的发展,将来可在直升机试飞定型中用于机载桨叶形变测量,也可用于航空发动机叶片形变测量。

参考文献

- [1] 欧巧凤,肖佳兵,陈垚锋,等. 直升机桨叶挥舞量的全场景视觉测量及分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 146-156.
- [2] OU Q F, XIAO J B, CHEN Y F, et al. Full-scene measurement and analysis of helicopter blade flaps based on vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 146-156.
- [3] 黄昱钦,欧巧凤,张少杰,等. 直升机桨叶摆振量的全场景视觉测量及分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 30-40.
- [4] HUANG Y Q, OU Q F, ZHANG SH J, et al. Full-scene measurement and analysis of helicopter blade lead-lags based on vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 30-40.
- [5] 张宇杭,韩东,万浩云. 桨叶分段线性扭转对旋翼性能的提升[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 323-335.
- [6] ZHANG Y H, HAN D, WAN H Y. Rotor performance improvement by blade piecewise linear twist [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 323-335.
- [7] ZHENG J H, CHENG W ZH, LI Y, et al. In-flight measurement method and application research of helicopter rotor blade motion parameters [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(9): 194-211.
- [8] WEBER S, KISSINGER T, CHEHURA E, et al.

- Application of fibre optic sensing systems to measure rotor blade structural dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158: 107758.
- [6] JIAO SH K, ZHENG J H. Aerodynamics analysis of helicopter rotor in flight test using strain gauge sensors[J]. Sensors, 2025, 25(6): 25061911.
- [7] 高玉闪, 闫松, 张志伟. 基于双目视觉和圆形标记点的发动机位移精确测试技术[J]. 航空学报, 2024, 45(11): 165-174.
- GAO Y SH, YAN S, ZHANG ZH W. Precise engine displacement testing technique based on stereo vision and circular mark points[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(11): 165-174.
- [8] 张展. 基于双目视觉的三维重建关键技术研究(中国科学院沈阳计算技术研究所)[D]. 北京:中国科学院大学, 2019.
- ZHANG ZH. Research on key techniques for 3D reconstruction based on stereo vision (Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences) [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [9] 司马兵, 彭松, 马友青, 等. 嫦娥四号月面巡视器全景相机制图方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(2): 151-160.
- SIMA B, PENG S, MA Y Q, et al. Research on a mapping method of Chang'E-4 lunar rover's panoramic camera [J]. Science China: Technological Sciences, 2020, 50(2): 151-160.
- [10] 曾乐平, 熊邦书, 易晖, 等. 复杂背景和光照下双旋翼直升机桨尖间距实时测量方法[J]. 应用科学学报, 2024, 42(2): 314-322.
- ZENG L P, XIONG B SH, YI H, et al. Real-time measurement for tip clearance of twin-rotor helicopter under complex background and illumination[J]. Journal of the Applied Sciences, 2024, 42(2): 314-322.
- [11] ZAPPA E, LIU R, TRAINELLI L, et al. Laser and vision-based measurements of helicopter blade angles[J]. Measurement, 2018, 118: 29-42.
- [12] STRUB F K, ANAND V R, LAU B H, et al. Wind tunnel test of the SMART active flap rotor[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2018, 63(1): 1-16.
- [13] BODEN F, STASICKI B, SZYPULA M, et al. In-flight measurements of propeller blade deformation on a VUT100 cobra aeroplane using a co-rotating camera system [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(7): 074013.
- [14] ZAPPA E, LIU R, TRAINELLI L, et al. A vision-based technique for in-flight measurement of helicopter blade motion[J]. Experimental Techniques, 2020, 44(1): 1-18.
- [15] 欧巧凤, 赵平均, 熊邦书, 等. 基于立体视觉的旋翼共锥度动态测量系统精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1692-1698.
- OU Q F, ZHAO P J, XIONG B SH, et al. Accuracy analysis of the measuring instrument for taper angle of running rotor blades based on stereo vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1692-1698.
- [16] ZUO CH L, WEI CH H, MA J, et al. Full-field displacement measurements of helicopter rotor blades using stereophotogrammetry[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021(1): 811601.
- [17] WEI CH H, ZUO CH L, LIAO X H, et al. Simultaneous Pressure and displacement measurement on helicopter rotor blades using a binocular stereophotogrammetry PSP system[J]. Aerospace, 2022, 9(6): 292.
- [18] ZUO CH L, MA J, WEI CH H, et al. Deformation measurements of helicopter rotor blades using a photogrammetric system[C]. Photonics, 2022, 9(7): 466.
- [19] NI ZH L, CHEN X H, ZHAI Y J, et al. Context-guided spatial feature reconstruction for efficient semantic segmentation[C]. European Conference on Computer Vision, 2024: 239-255.
- [20] ZHAO Y AN, LYU W Y, XU SH L, et al. Detrs beat yolos on real-time object detection[C]. 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 16965-16974.
- [21] WANG AO, CHEN H, LIU L H, et al. Yolov10: Real-time end-to-end object detection[C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2024, 37: 107984-108011.
- [22] HUANG J SH, ZHOU K Y, XU J L, et al. Flap-wise vibrations of non-uniform rotating cantilever beams: An investigation with operational experiments[J]. Journal of

sound and vibration, 2023, 553: 117648.

- [23] STACHYRA G, KLODA L, SZMIT Z. Coupled modal analysis and aerodynamics of rotating composite beam[J]. Materials, 2023, 16(23): 7356.

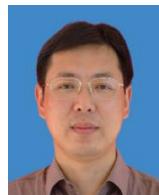
作者简介



游滔, 2023 年于南昌航空大学获得学士学位, 现于南昌航空大学攻读硕士学位, 主要研究方向为图像测量。

E-mail: youtao202108@163.com

You Tao received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2023. He is currently pursuing his master degree at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes image measurement.



熊邦书(通信作者), 1991 年于福建师范大学获得学士学位, 2001 年于西北工业大学获得硕士学位, 2004 年于西北工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为图像测量、机器视觉。

E-mail: xiongbs@126.com

Xiong Bangshu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Fujian Normal University in 1991, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 2001 and 2004, respectively. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests

include image measuring and machine vision.



朱金浩, 2020 年于河北工业大学获得学士学位, 2023 年于中国科学院大学获得硕士学位, 现于北京航空航天大学攻读博士学位, 主要研究方向为目标检测、机器视觉。

E-mail: jinhaozhu@buaa.edu.cn

Zhu Jinhao received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2020, his M. Sc. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2023. He is currently pursuing his doctor's degree at Beihang University. His main research interests include object detection and machine vision.



欧巧凤, 2004 年于西北工业大学获得学士学位, 2007 年于西北工业大学获得硕士学位, 2018 年于西北工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为图像处理、机器视觉。

E-mail: ou.qiaofeng@nchu.edu.cn

Ou Qiaofeng received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 2004, 2007 and 2018, respectively. She is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. Her main research interests include image processing and machine vision.