

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.14

# 基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统

曹彦鹏<sup>1,2</sup>, 赵博闻<sup>1,2</sup>, 沈凝<sup>1,2</sup>, 杨将新<sup>1,2\*</sup>, 陈剑<sup>1,3\*</sup>, 居冰峰<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江大学 浙江省先进制造技术重点研究实验室, 浙江 杭州 310027;

3. 浙江省智能运维机器人重点实验室, 浙江 杭州 311121)

**摘要:** 针对目前视觉跟踪平台研究中存在的大视野与高分辨力不可兼得以及高速运动目标跟踪难以实现等痛点问题, 设计了一种基于二维振镜的新型视觉跟踪平台, 可以在保证视野范围的前提下, 兼顾高帧率和高分辨力特性, 实现动态目标 50 FPS 的实时跟踪以及 100 倍放大后的高保真信息采集。首先, 对基于二维振镜的光学系统进行几何建模, 对光路变化与动态视角之间的耦合关系进行分析, 完成了双相机协同系统的坐标系变换; 其次, 针对运动目标实时跟踪任务, 采用一种基于动态模板匹配和卡尔曼滤波器的目标检测跟踪算法, 以保证目标物体的快速、准确定位; 最后, 从动态视野范围、响应速度、跟踪目标定位精度及跟踪目标极限速度四个方面对系统性能进行评估, 并选择多个典型场景对系统的应用领域进行分析。结果表明: 该系统特殊的双相机协同工作模式和极快速的动态响应特性, 使其很好地弥补了现有视觉跟踪平台的不足, 在智能监控、智慧交通、国防军工等领域中具有广阔的应用前景和极高的研究价值。

**关键词:** 光学器件; 二维振镜; 几何光学; 机器视觉; 目标跟踪

**中图分类号:** TB9; O439

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2023)01-0143-11

## Dynamic target real-time tracking and high-fidelity information acquisition system based on two-dimensional galvanometers

CAO Yanpeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Bowen<sup>1,2</sup>, SHEN Ning<sup>1,2</sup>, YANG Jiangxin<sup>1,2\*</sup>, CHEN Jian<sup>1,3\*</sup>, JU Bingfeng<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Robot for Operation and Maintenance of Zhejiang Province, Hangzhou Shenhao Technology, Hangzhou 311121, China)

**Abstract:** To address the painful problems in the current research of visual tracking platform, such as the inability to have both large field of view and high resolution, and the difficulty of high-speed motion target tracking, we designed a novel visual tracking platform based on two-dimensional (2D) galvanometers. It can achieve real-time tracking of dynamic targets at 50 FPS and high-fidelity information acquisition after 100 × magnification, when we take into account the high frame rate and high resolution characteristics

**收稿日期:** 2023-01-19; **修回日期:** 2023-02-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(52075485, 52075486); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01139)

**引用格式:** 曹彦鹏, 赵博闻, 沈凝, 等. 基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 143-153.

**Citation:** CAO Y P, ZHAO B W, SHEN N, et al. Dynamic target real-time tracking and high-fidelity information acquisition system based on two-dimensional galvanometers[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1): 143-153.



while ensuring the field of view. Firstly, the geometrical modeling of the optical system based on the 2D galvanometers is made, the coupling relationship between the optical path change and the dynamic angle of view is analyzed, and the coordinate transformation of the dual-camera cooperative system is completed. Secondly, for the real-time target tracking task, a target detection and tracking algorithm based on dynamic template matching and Kalman filter is adopted, which ensures the fast and accurate positioning of the target object. Finally, the performance of the system is evaluated from the four aspects of dynamic field of view, response speed, tracking target positioning accuracy and tracking target limit speed, and several typical scenarios are selected to analyze the application fields of the system. The results show that the special dual-camera cooperative working mode and extremely fast dynamic response characteristics of the system well compensate for the shortcomings that exist in a visual tracking platform, and have broad application in the fields of intelligent monitoring, intelligent transportation, and military defense. It is proved that our system has broad application prospects and high research value.

**Key words:** optical devices; two-dimensional galvanometer; geometrical optics; machine vision; target tracking

## 0 引言

视觉跟踪系统是智能感知领域的关键技术之一<sup>[1]</sup>,广泛应用于智慧安防<sup>[2]</sup>、城市交通<sup>[3]</sup>、国防军工<sup>[4]</sup>、生物医学<sup>[5]</sup>、工业检测<sup>[6]</sup>等领域。针对动态目标的跟踪任务,使用视角固定的感知设备通常难以取得较好的效果<sup>[7]</sup>。视觉跟踪平台<sup>[8]</sup>(即视觉云台)可以通过特殊的运动机构扩大视野范围,实现动态目标的定位和跟踪,最大程度获取目标的细节信息,为智能感知设备提供更丰富、准确的目标数据,因此对于视觉跟踪平台的研究具有重要的意义。

目前,针对视觉云台的研究相继开展,按照成像特点和跟踪原理可以将其分为机械式云台<sup>[9]</sup>与数字式云台<sup>[10]</sup>两类。机械式云台是一种传统的硬件驱动型云台,通过电机控制相机转动,从而改变相机视角,扩大系统的视野范围。其优点是在保证较大视野的前提下,清晰地拍摄到目标图像;缺点是电机需要带动整个相机转动,导致系统惯性较大,严重限制了响应时间和拍摄帧率(跟踪帧率至多可达30 FPS),难以实现高速目标的跟踪<sup>[11]</sup>。数字式云台是一种算法驱动型的云台,其视野范围固定,通过对图像进行适当的裁剪和处理实现特定目标的跟踪,常用于视频监控领域。由于视角不变,相机无需运动,数字式云台的系统响应更快,能保证更高的采集帧率,但因为其原始图像视角较广,目标图像在原始图像中所占的像素点较少,经裁剪后分辨率大大降低(放大倍率至多可达16倍),丢失了目标的细节信息<sup>[12]</sup>。

由此可见,现有的视觉跟踪平台难以兼顾大视野、高帧率和高分辨力等多个特性<sup>[13]</sup>。

目前,视觉跟踪平台研究中存在大视野与高分辨力不可兼得、高速运动目标跟踪难以实现等不足之处。本文从系统方案设计、系统数学建模、目标检测与跟踪算法设计、系统性能验证与应用分析等多个方面开展研究工作,设计了一种基于二维振镜的新型视觉跟踪平台,通过搭建变视野相机模组,结合广角相机与高倍率相机,将动态目标的检测跟踪任务与细节信息采集任务进行解耦,兼顾大视野范围与信息保真度;同时,引入体积小、响应快、精度高的二维振镜,用于快速改变高倍率相机视角,保证高速运动目标跟踪的高帧率与稳定性,实现动态目标的实时追踪与高保真信息采集。

## 1 系统方案设计

基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统如图1所示,其核心为广角相机与高倍率相机组成的变视野相机模组以及用于改变高倍率相机视角的二维振镜<sup>[14]</sup>。此系统的工作流程为:

①利用广角相机进行全局观测,基于目标检测和跟踪算法确定目标位置,获得目标在广角相机图像中的像素坐标 $(x, y)$ ;

②基于先验的系统几何光学建模,将目标在广角相机图像中的像素坐标 $(x, y)$ 转换为二维振镜两台偏转电机的转角 $(\theta_1, \theta_2)$ ,并向二维振镜发送控制指令,改变两面反射镜的转角;

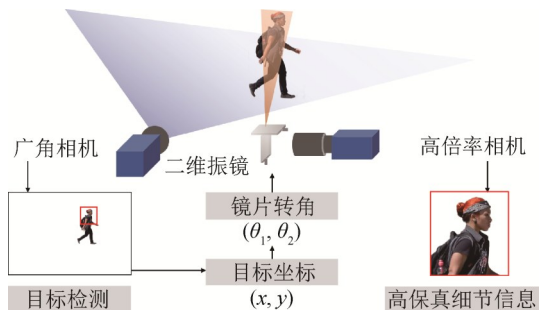


图1 基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统示意图

Fig.1 Diagram of dynamic target real-time tracking and high-fidelity information acquisition system based on two-dimensional galvanometers

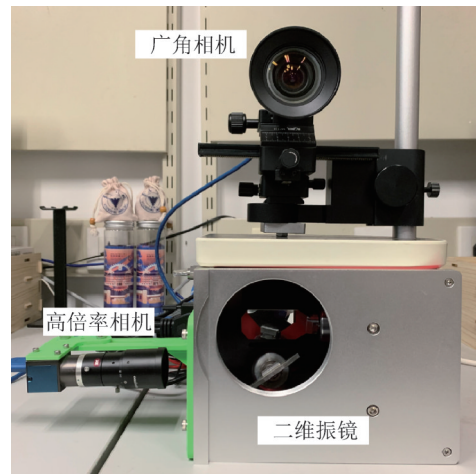
③二维振镜收到指令后，将两面反射镜偏转到指定角度，改变高倍率相机的入射光路，使其视角朝向目标物体，采集经过高倍率镜头放大的目标细节图像；

④对广角相机的下一帧图像进行采集，重复步骤①至步骤③，实现动态目标的实时跟踪与目标信息的高保真采集。

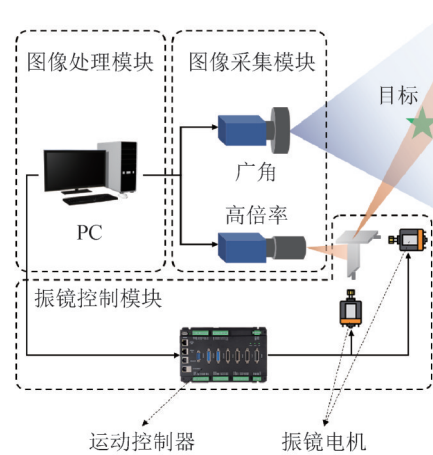
搭建的基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统如图2所示。整个系统主要由振镜控制模块、图像采集模块和图像分析处理模块三部分组成。其中，振镜控制模块主要包括振镜运动控制板卡和振镜电机，完成振镜运动控制指令的闭环精准控制，实现高倍率相机成像前的光路转换功能；图像采集模块包括广角和高倍率两台相机，二者协同工作，实现全局图像的获取和动态目标的细节捕捉；图像处理模块则主要由计算机组成，用于完成多设备间的协同通讯、目标检测与跟踪算法的部署以及两台相机的图像采集和存储。

## 2 系统数学建模

二维振镜作用下的高倍率相机，可以看作一台在空间中不断变换着视角的动态相机，每一组振镜转角 $(\theta_1, \theta_2)$ 均对应着高倍率相机在空间中的一个特定视角方向。只要能够建立广角相机图像坐标 $(x, y)$ 与振镜转角 $(\theta_1, \theta_2)$ 之间的数学关系，就能通过调整振镜与高倍率相机组成的动态相机的视角方向，使其在跟踪过程中始终朝向广角相



(a) 实验设备  
(a) Experimental device



(b) 硬件配置  
(b) Hardware configuration

图2 基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统框架

Fig.2 Framework of dynamic target real-time tracking and high-fidelity information acquisition system based on two-dimensional galvanometers

机图像中检测到的目标物体。因此，对成像系统进行几何光学建模是非常有必要的<sup>[15-16]</sup>。

反射变换矩阵是用于对图形进行反射变换的矩阵，点 $(m, n)$ 沿直线 $y = \tan \theta \cdot x$ 进行反射，其影像点 $(m', n')$ 可写为

$$\begin{pmatrix} m' \\ n' \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： $P$ 为该线性变换的反射变换矩阵。

$$P = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

在分析振镜对高倍率相机成像光路的影响时，可依据图3所示原理。真实相机（光心为 $c_r$ 、光轴

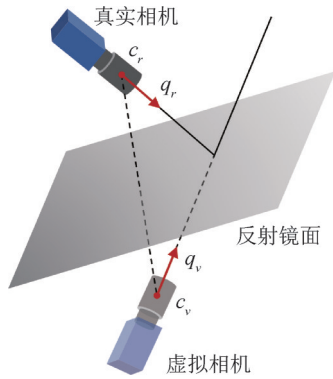


图3 真实相机与虚拟相机之间的几何关系  
Fig.3 Geometry between real camera and virtual camera

为  $q_r$ ) 经过镜面反射后的视角方向可以看作其以镜面为对称平面对称后的虚拟相机 (光心为  $c_v$ 、光轴为  $q_v$ ) 直接观察的视角方向<sup>[17]</sup>, 二者的几何关系可以用反射变换矩阵来表示。

如图4所示, 设俯仰镜片  $M_1$  的镜面中心坐标为  $(0, 0, 0)$ , 旋转轴为  $z$  轴, 镜面与  $y$  轴所成角度为  $\theta_1$ ; 水平转动镜片  $M_2$  距离俯仰镜片距离为  $d$ , 镜面中心坐标为  $(0, d, 0)$ , 旋转轴为  $(1, 0, 0)$ , 镜面与  $y$  轴所成角度为  $\theta_2$ , 两镜片所在平面的方程为

$$y = \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right) \right] \cdot x \quad (3)$$

$$z = (\tan \theta_2) \cdot (y - d) \quad (4)$$

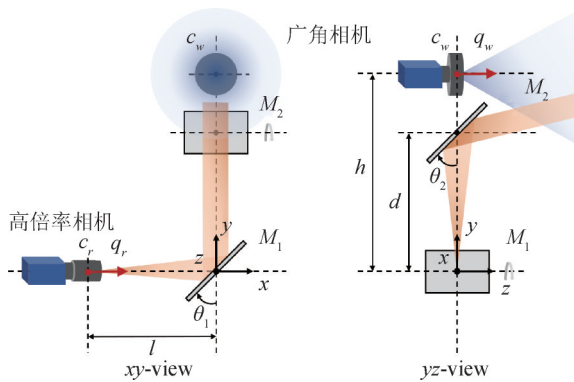


图4 基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统几何关系图

Fig.4 Geometry of dynamic target real-time tracking and high-fidelity information acquisition system based on two-dimensional galvanometers

根据式 (1) 和式 (2) 的反射变换理论, 俯仰镜片  $M_1$  和水平转动镜片  $M_2$  的反射变换矩阵  $P_1$  和  $P_2$  的齐次坐标形式为

$$P_1(\theta_1) = \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$P_2(\theta_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 & d(1 - \cos 2\theta_2) \\ 0 & \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 & -d \sin 2\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

图4中, 高倍率相机布置在距离俯仰镜片沿  $x$  轴负方向  $l$  处, 其光心坐标为  $c_r = (-l, 0, 0)$ 、光轴方向为  $q_r = (1, 0, 0)$ 。由上文分析可知, 高倍率相机经过二维振镜的反射后, 可等效为光心坐标为  $c_v$ 、光轴方向为  $q_v$  的虚拟相机,  $c_v$  和  $q_v$  可通过反射变换矩阵  $P_1$  和  $P_2$  求得, 线性变换的表达式为

$$\begin{pmatrix} c_v \\ 1 \end{pmatrix} = P_2 P_1 \begin{pmatrix} c_r \\ 1 \end{pmatrix} = P_2 P_1 \begin{pmatrix} -l \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} q_v \\ 1 \end{pmatrix} = P_2 P_1 \begin{pmatrix} q_r \\ 1 \end{pmatrix} = P_2 P_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

将式 (5) 和式 (6) 代入可得

$$c_v(\theta_1, \theta_2) = \begin{pmatrix} l \cos 2\theta_1 \\ -(l \sin 2\theta_1 + d) \cos 2\theta_2 + d \\ -(l \sin 2\theta_1 + d) \sin 2\theta_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$q_v(\theta_1, \theta_2) = \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:  $l$  和  $d$  均为固定参数, 由系统结构设计决定;  $\theta_1$  和  $\theta_2$  均为可变参数, 由振镜角度变化范围决定。

广角相机布置在距离俯仰镜片沿  $y$  轴正方向  $h$  处, 其光心坐标为  $c_w = (0, h, 0)$ 、光轴方向为  $q_w = (0, 0, 1)$ 。可见, 两台相机的光心并不重合, 但由于在实际应用场景中, 系统与待跟踪目标之间的距离通常远大于广角相机和高倍率相机光心之间的偏置, 所以可近似认为两台相机的光心重合<sup>[18]</sup>, 从而建立起广角相机图像坐标  $(x, y)$  与振镜转角  $(\theta_1, \theta_2)$  之间的数学关系, 保证高倍率相机的动态视角可以准确指向广角相机中检测到的目标物体。



### 3 目标检测与跟踪算法设计

#### 3.1 基于动态模板匹配的目标检测算法

为了能够实现动态目标的跟踪,需要在广角相机图像中定位到目标物体<sup>[19-21]</sup>,采用一种基于动态模板匹配的目标检测算法,以实现目标物体的快速、准确定位。模板匹配是指在待搜索图像中寻找与目标模板图像最相似的部分,找到最像目标模板的子区域便可确定目标的位置,是一种广泛应用于目标检测和跟踪任务中的轻量化算法。

动态模板匹配算法如图5所示,手动框选目标区域作为算法的初始目标模板 $T_0(x', y')$ ,通过划窗的方式在初始帧图像 $I_0(x, y)$ 中进行遍历,利用式(11)计算初始帧图像 $I_0(x, y)$ 中不同子区域与模板图像 $T_0(x', y')$ 的相似度 $R(x, y)$ 。

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (T(x',y') - I(x+x',y+y'))^2}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I(x+x',y+y')^2}} \quad (11)$$

相似度 $R(x, y)$ 最高的区域即为目标所在区域。为了提升算法的运算速度和实时性,在 $k$ 时刻的后续帧图像 $I_k(x, y)$ 中,不再对全图进行遍历,只在 $k-1$ 时刻目标位置的一定邻域内进行搜索,同时会将 $k-1$ 时刻搜索到的目标区域 $S_{k-1}(x', y')$ 作为 $k$ 时刻的模板图像 $T_k(x', y')$ 。

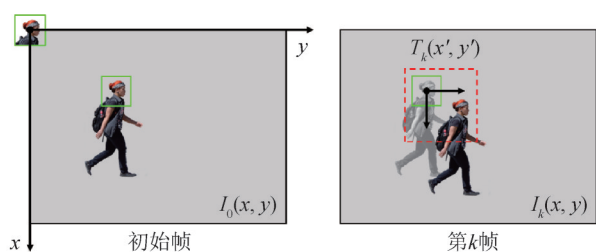


图5 动态模板匹配算法示意图  
Fig.5 Diagram of dynamic template matching algorithm

为了一定程度上解决由于尺度、光照和遮挡等干扰导致的跟踪过程中目标丢失问题,采用基于均值哈希和汉明距离的模板动态更新策略,通过比较模板图像 $T_k(x', y')$ 与搜索到的目标区域 $S_k(x', y')$ 的相似程度来判断模板是否需要更新。具体步骤为:①将 $T_k(x', y')$ 与 $S_k(x', y')$ 图像灰度化并缩放至 $8 \times 8$ 的大小;②分别计算其各自的灰度均

值;③分别遍历 $T_k(x', y')$ 与 $S_k(x', y')$ 的每一个像素点并与其各自的灰度均值进行比较,若大于则置1,小于则置0,分别得到各自的64位哈希值 $H_T$ 和 $H_S$ ;④利用式(12)的异或操作计算 $H_T$ 和 $H_S$ 的汉明距离 $D_H$ 。

$$D_H = H_T \oplus H_S \quad (12)$$

若 $D_H$ 大于指定阈值,则认为 $T_k(x', y')$ 与 $S_k(x', y')$ 不相似, $k+1$ 时刻的目标模板不进行更新,保持 $T_k(x', y')$ 不变;若 $D_H$ 小于指定阈值则将 $k$ 时刻搜索到的目标区域 $S_k(x', y')$ 作为 $k+1$ 时刻的模板图像 $T_{k+1}(x', y')$ 进行更新。

#### 3.2 基于卡尔曼滤波器的目标跟踪算法

在获得广角相机图像后,需要进行图像的预处理、目标模板的匹配更新以及振镜角度的测算,存在一定的时间延迟,所以当系统发送振镜控制指令时,目标物体的实际位置已经发生了偏移,这就要求目标跟踪算法能够对目标物体的运动轨迹进行预测。因此,使用基于卡尔曼滤波器<sup>[22]</sup>的目标跟踪算法来实现目标轨迹的预测。

卡尔曼滤波器的操作包括预测与更新两个阶段:在预测阶段,卡尔曼滤波器会根据上一时刻的估计值,计算出对当前时刻的状态估计;在更新阶段,卡尔曼滤波器会根据当前时刻的观测值优化并更新系统的预测值,提高新估计值的准确性。卡尔曼滤波器可以用系统过程模型和系统观测模型来描述,过程模型可以用线性随机微分方程表示,这是一个离散控制过程的系统,其方程可写为

$$x(k) = \mathbf{F} \cdot x(k-1) + \mathbf{B} \cdot u(k) + w(k) \quad (13)$$

系统观测模型的方程为

$$z(k) = \mathbf{H} \cdot x(k) + v(k) \quad (14)$$

式中: $x(k)$ 和 $u(k)$ 分别为 $k$ 时刻系统的状态和 $k$ 时刻对系统的控制量; $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为状态转移矩阵和控制矩阵; $w(k)$ 为过程的噪声; $z(k)$ 为 $k$ 时刻的观测值; $\mathbf{H}$ 为观测矩阵; $v(k)$ 为观测的噪声。 $w(k)$ 和 $v(k)$ 为高斯白噪声,不随系统状态变化而变化,其协方差分别为 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 。

假设现在的系统状态是 $k$ ,根据系统模型,可以通过系统上一时刻的状态预测出当前的状态,

预测的状态估计方程表达式为

$$x(k|k-1) = \mathbf{F} \cdot x(k-1|k-1) + \mathbf{B} \cdot u(k) \quad (15)$$

式中： $x(k|k-1)$ 为利用上一时刻系统预测得到的结果； $x(k-1|k-1)$ 为上一时刻系统的最优结果。

对预测得到结果 $x(k|k-1)$ 所对应的协方差进行更新，其意义在于描述预测值的准确程度，预测的协方差矩阵估计方程可写为

$$P(k|k-1) = \mathbf{F} \cdot P(k-1|k-1) \cdot \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (16)$$

式中： $P(k|k-1)$ 为 $x(k|k-1)$ 对应的协方差； $P(k-1|k-1)$ 为 $x(k-1|k-1)$ 对应的协方差。

计算观测余量 $y(k)$ 、观测余量的协方差 $S(k)$ 和卡尔曼增益 $K_g(k)$ 的表达式分别如下

$$y(k) = z(k) - \mathbf{H} \cdot x(k|k-1) \quad (17)$$

$$S(k) = \mathbf{H} \cdot P(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (18)$$

$$K_g(k) = P(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T \cdot S(k)^{-1} \quad (19)$$

$$= P(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot P(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

现在状态 $k$ 的最优化估算值 $x(k|k)$ 可以结合预测值和观测值计算得到，即更新的状态估计方程可表示为

$$x(k|k) = x(k|k-1) + K_g(k) \cdot y(k) \quad (20)$$

在整个系统终止之前，卡尔曼滤波器需要不断执行预测和更新，因此，还需通过式(21)来更新 $k$ 状态 $x(k|k)$ 下的协方差。

$$P(k|k) = (\mathbf{I} - K_g(k) \cdot \mathbf{H}) \cdot P(k|k-1) \quad (21)$$

上述方程为更新的协方差矩阵估计方程，式中， $\mathbf{I}$ 为单位矩阵，在单模型单观测情景下， $\mathbf{I} = 1$ 。当系统进入下一状态 $k+1$ 时， $P(k|k)$ 即为预测方程中的 $P(k-1|k-1)$ ，依此类推完成回归算法的搭建，实现跟踪目标轨迹的预测。

## 4 系统性能验证与应用分析

### 4.1 系统性能评估

在完成系统平台搭建和算法设计后，需要通过定量评价指标对系统的性能进行评估，以验证系统设计的合理性。综合考虑设计目标和应用场景，选择从系统动态视野范围、系统响应速度、跟踪目标定位精度及跟踪目标极限速度四个方面来评估系统性能。

#### 1) 系统动态视野范围

本系统中配备的广角镜头为日本computar公司的M0528-MPW3，焦距为5 mm、视场角为 $83.2^\circ \times 67.5^\circ$  ( $H^\circ \times V^\circ$ )；高倍率镜头为日本computar公司的M7528-MPW3，焦距为75 mm，视场角为 $6.7^\circ \times 5.0^\circ$  ( $H^\circ \times V^\circ$ )。将高倍率镜头视场角代入第2节中建立的数学模型可以对系统的动态视野范围进行估算，当目标和系统之间的距离为20 m时，系统的动态视野范围为 $36.2 \text{ m} \times 26.4 \text{ m}$ ，与广角镜头的视野范围基本匹配。可认为目标在距离系统20 m处的可运动范围为 $36.2 \text{ m} \times 26.4 \text{ m}$ ，高倍率相机可以捕获到的静态视野范围为 $3.62 \text{ m} \times 2.64 \text{ m}$ 、分辨力为 $720 \times 540$ 的目标高保真细节图像。

#### 2) 系统响应速度

文中所述的系统响应速度即完成当前时刻下动态目标检测及跟踪、振镜角度测算、振镜运动、视频显示输出这样一个完整周期所需要的时间。由于要持续输入和输出高分辨力及高帧率的视频流，图像处理和存储的时间占比很高，如仍采用线性编程的方式，无法保证跟踪系统的实时性。因此在程序设计中使用了并发编程的架构，以提高CPU利用率，提升程序运行速度。经过多次重复测试，在处理器为Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU 2.30 GHz、内存为16.0 GB的计算机运行环境下，曝光时间设置为10 ms，广角相机图像采集及预处理耗时为12 ms；本文设计的目标检测跟踪算法平均耗时为6 ms；振镜选用了国产品牌金海创的SG8330扫描振镜，其动态响应时间为1.5 ms，振镜角度测算并运动到位的平均耗时为2 ms。综上所述，系统的平均响应时间为20 ms，对应帧率为50 FPS，可满足实时性与高帧率的要求。

#### 3) 跟踪目标定位精度

跟踪目标定位精度实际上是指几何光学建模的准确性，它影响着系统在获取目标位置后，能否在高倍率相机上得到正确且完整的目标细节图像输出。在理想情况下，跟踪目标应位于高倍率相机画面的正中心；如果几何光学建模结果不准确，可能会导致目标无法出现在系统的动态视野中。图6所示为跟踪目标定位精度实验，图6(a)为广角相机的图像，图6(b)为经过振镜成像后高倍率动态相机的图像。将小球在画面中按照一

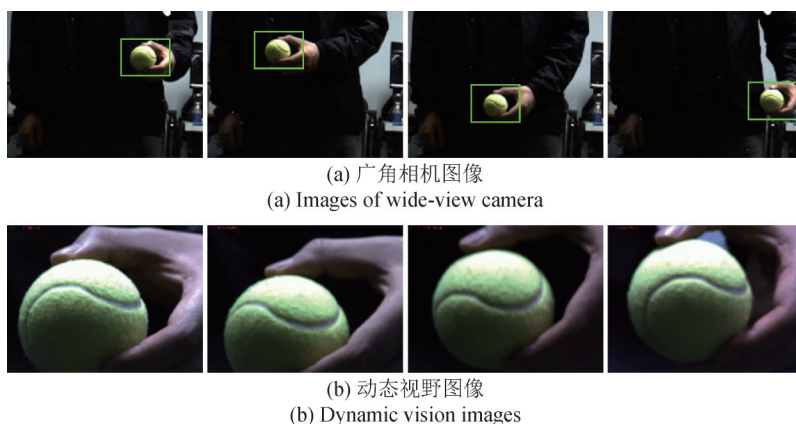


图6 跟踪目标定位精度实验

Fig.6 Experiment of tracking target positioning accuracy

定轨迹运动，通过记录小球中心与画面中心的偏差值来评估跟踪目标定位精度，偏差越小，说明几何光学建模的准确性越高，跟踪目标定位越精准。通过统计高倍率相机中连续的100帧图像，小球中心误差值在30个像素以内的图像比例为98%，系统跟踪目标定位精度较高。

#### 4) 跟踪目标极限速度

跟踪目标的允许速度范围是视觉跟踪云台关注的重点指标之一，有必要对该指标进行评估。由于无人机的飞行速度可控，且在空中活动范围较宽阔，可以为极限速度的测量提供足够的空间。因此，选用无人机作为极限速度测量实验的跟踪目标。在实验中，控制无人机在距离振镜跟踪平台约20 m处匀速飞行，通过高倍率相机的画面来观察本系统的跟踪效果。若高倍率相机视野中能够捕捉到无人机体积的80%，则判定当前时刻未

丢失目标；当视野内的无人机体积小于80%时，判定当前帧丢失目标。

实验选用大疆公司型号为DJI Mavic 2 Pro的无人机，其最高时速为72 km/h，可设置匀速飞行模式。预先定义好一定的梯度，逐渐提高无人机飞行速度，重复多次实验发现，当无人机飞行速度不大于65 km/h时，本系统能够很好地对目标进行跟踪，跟踪成功率在95%以上；当无人机飞行速度大于65 km/h时，跟踪效果有所下降，有一定概率出现丢失目标的情况。如图7 (a)和图7 (b)所示分别展示了跟踪成功和跟踪失败时，高倍率相机捕捉到的连续多帧图像。由此可知，在工作距离为20 m的情况下，本系统能够对速度不大于65 km/h的目标有稳定的跟踪效果；当目标速度超过此范围时，系统仍可正常工作，但效果有所下降。



图7 跟踪目标极限速度实验

Fig.7 Experiment of tracking target limit speed



### 4.2 典型应用场景分析

在完成系统性能评估后，有必要通过真实应用场景来测试该系统的使用效果。本文选择了三个典型场景来对系统的应用场景进行分析。

#### 1) 行人跟踪

行人跟踪是安防领域常见的任务之一，其不仅需要准确定位目标，还需要尽可能多地捕捉到目标的细节信息，如面部、服饰及动作细节等，以便于对目标身份的核查确认。将系统布置于距

离拍摄对象约30 m处进行测试，为了更好地呈现跟踪效果，图像序列以5帧为间隔来进行展示。图8(a)为广角相机中行人目标的检测和跟踪效果，对图8(a)中目标区域进行放大后得到图8(b)，可以发现由于目标在原图像中较小、分辨率很低，面部细节和服装细节几乎完全丢失，无法辨认目标身份。而在本系统采集到的动态跟踪画面中，能清晰观察到行人的面部细节特征，补充了缺失的关键信息。

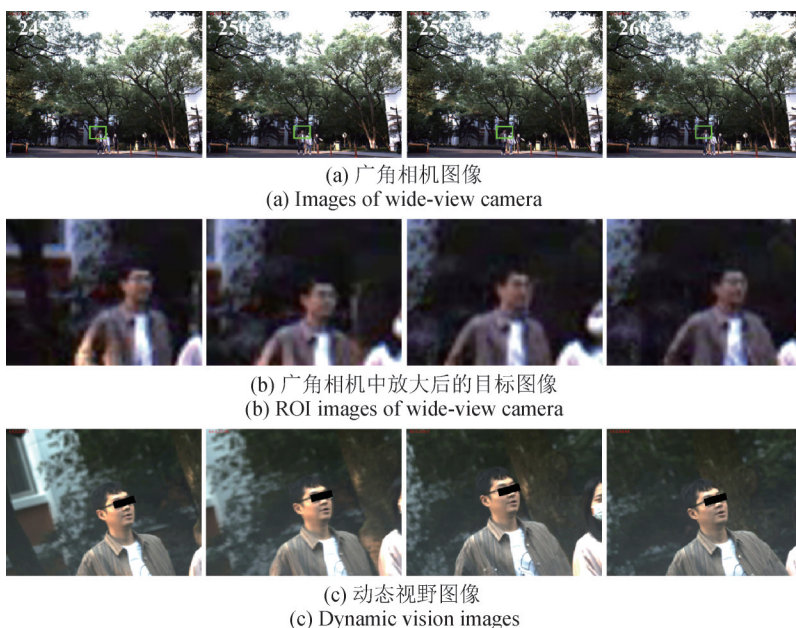


图8 行人跟踪实验效果图

Fig.8 Experiment of pedestrian tracking

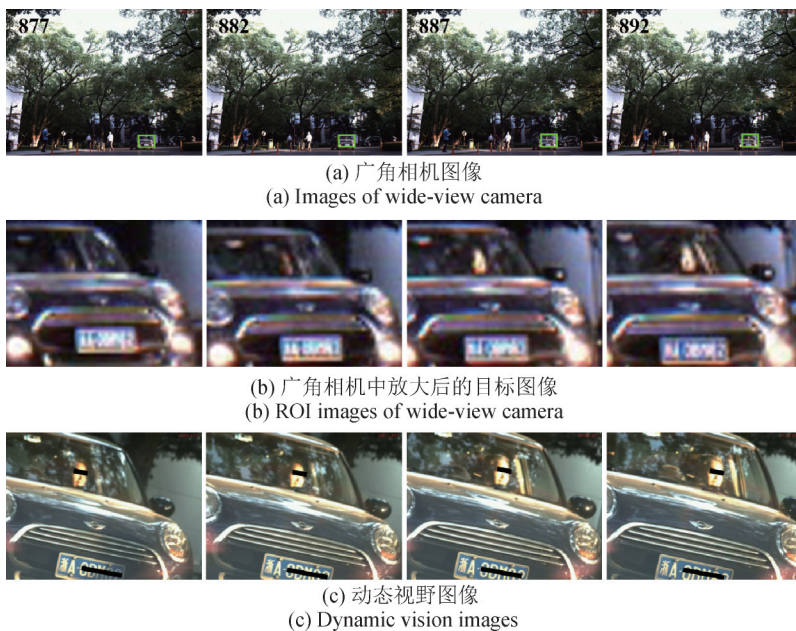


图9 车辆跟踪实验效果图

Fig.9 Experiment of vehicle tracking



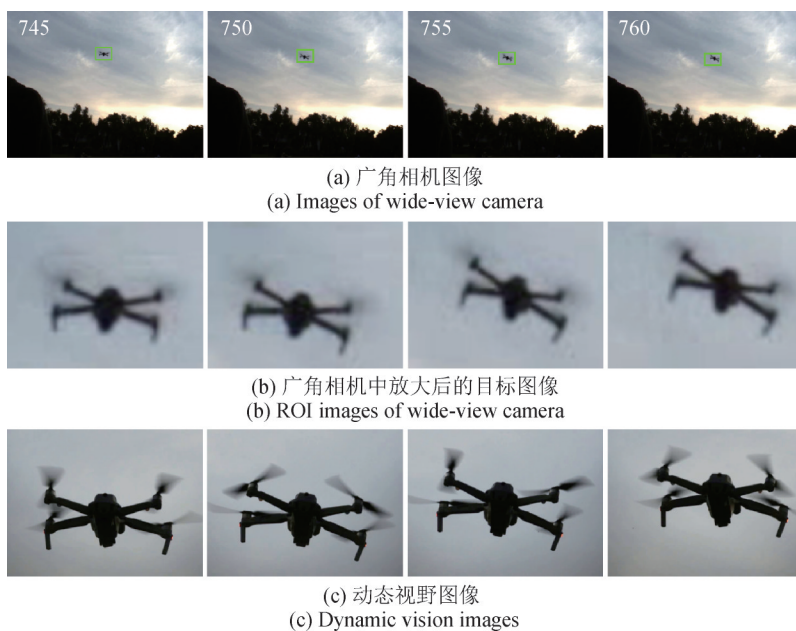


图10 空中小目标跟踪实验效果图

Fig.10 Experiment of air small target tracking.

## 2) 车辆跟踪

车辆信息（如车牌号码、驾驶员面部细节等）在智慧交通、监控安防等应用场景中有着重要的价值，作为道路行驶车辆的唯一标识，其对于车辆和车主身份信息的识别具有不可替代的作用。图9（a）为广角相机中车辆目标的检测和跟踪效果；原始图像中目标车辆放大后，获得图9（b）所示结果，车牌信息和车内驾驶员的面部细节均无法得到准确辨认。如图9（c）所示，通过二维振镜采集到的高倍率相机动态跟踪画面，能清晰识别出车牌号码，甚至可以透过反光较强的前挡风玻璃看清楚车内驾驶员的面部细节，显示出了本系统的优越性。

## 3) 空中小目标跟踪

随着无人机技术的发展，低空空域内的安全问题日渐显现，对空中小目标的检测和跟踪具有非常重要的意义。图10（a）目标在广角相机图像中所占像素点极少，且运动速度较快（65 km/h），通过放大，得到图10（b），可勉强根据形状辨认出其为无人机，但型号、机械细节等重要信息无法获得。利用本文设计的基于二维振镜的动态目标实时跟踪与高保真信息采集系统可以轻松获取无人机机身的细节信息，无论是无人机的型号、机械结构，甚至侧翼的信号灯都清晰可见，如图

10（c）。且动态跟踪画面中捕捉到的覆盖4/5目标体积的帧数大于总帧数的95%，可以实现对高速运动的空中小目标的稳定可靠跟踪与高保真细节信息采集。

## 5 结论

针对现有视觉跟踪平台存在的不足之处，本文从系统方案设计、系统数学建模、目标检测与跟踪算法设计、系统性能验证与应用分析等多个方面开展研究工作，设计了一种基于二维振镜的新型视觉跟踪平台，实现了动态目标的实时追踪与高保真信息采集。实验证明，本系统的应用场景十分广泛，其特殊的双相机协同工作模式和极快速的动态响应特性，使其拥有了传统云台不具备的功能，很好地弥补了现有视觉跟踪平台的不足，在智能监控、智慧交通、国防军工等领域中具有广阔的应用前景和极高的研究价值。

## 参考文献

- [1] 尹宽, 李均利, 李丽, 等. 复杂情况下自适应特征更新目标跟踪算法[J]. 光学学报, 2019, 39 (11): 227-242.  
YIN K, LI J L, LI L, et al. Adaptive feature update object-tracking algorithm in complex situations [J]. Acta optica sinica, 2019, 39(11): 227-242. (in Chinese)
- [2] ELHOSENY M. Multi-object detection and tracking

- (MODT) machine learning model for real-time video surveillance systems[J]. *Circuits, systems, and signal processing*, 2020, 39: 611–630.
- [3] JIMÉNEZ-BRAVO D M, MURCIEGO Á L, MENDES A S, et al. Multi-object tracking in traffic environments: a systematic literature review[J]. *Neurocomputing*, 2022, 494(14): 43–55.
- [4] FUJIWARA N, JIANG M, TAKAKI T, et al. Super-telephoto drone tracking using HFR-video-based vibration source localization[C]//2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2019: 2239–2244.
- [5] HU S, LU W, SHIMASAKI K, et al. View and scanning-depth expansion photographic microscope using ultrafast switching mirrors[J]. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2022, 71: 1–13.
- [6] 赵鹏, 王阿川, 浦昭邦. 基于多分辨率动态轮廓线的面积测量与跟踪方法[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 537–542.
- ZHAO P, WANG A C, PU Z B. An area measurement and tracking scheme based on a multi-resolution dynamic contour[J]. *Chinese journal of lasers*, 2006, 33(4): 537–542. (in Chinese)
- [7] LIU S, LIU D, SRIVASTAVA G, et al. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking[J]. *Complex and intelligent systems*, 2021, 7(4): 1895–1917.
- [8] 谢家阳, 王行健, 史治国, 等. 动态云台摄像机无人机检测与跟踪算法[J]. *智能系统学报*, 2021, 16(5): 858–869.
- XIE J Y, WANG X J, SHI Z G, et al. Drone detection and tracking in dynamic pan-tilt-zoom cameras[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2021, 16(5): 858–869. (in Chinese)
- [9] 孙鹏飞, 郭喜庆, 杨敬嫻. 二自由度云台的机器视觉控制[J]. *光电工程*, 2012, 39(10): 135–142.
- SUN P F, GUO X Q, YANG J X. Controlling of 2-DOF PZT with machine vision[J]. *Opto-electronic engineering*, 2012, 39(10): 135–142. (in Chinese)
- [10] ZHANG R, WU L, YANG Y, et al. Multi-camera multi-player tracking with deep player identification in sports video[J]. *Pattern recognition*, 2020, 102: 107260.
- [11] OKUMURA K, OKU H, ISHIKAWA M. High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011: 6186–6191.
- [12] ARIKI Y, TAKIGUCHI T, YANO K. Digital camera work for soccer video production with event recognition and accurate ball tracking by switching search method[C]//2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2008: 889–892.
- [13] SENOO T, YAMAKAWA Y, HUANG S, et al. Dynamic intelligent systems based on high-speed vision[J]. *Journal of robotics and mechatronics*, 2019, 31(1): 45–56.
- [14] 李桂存, 方亚秣, 纪荣祎, 等. 基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 206–212.
- LI G C, FANG Y M, JI R Y, et al. High-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and position sensitive detectors[J]. *Chinese journal of lasers*, 2019, 46(7): 206–212. (in Chinese)
- [15] 周远, 陈英, 蒋国保, 等. 旋转双棱镜目标跟踪的非线性问题分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 218–230.
- ZHOU Y, CHEN Y, JIANG G B, et al. Nonlinearity problem analysis of target tracking based on rotational double prisms[J]. *Acta optica sinica*, 2021, 41(18): 218–230. (in Chinese)
- [16] 冯斌, 史元元, 武耀霞, 等. 基于转镜同步跟踪系统的研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 600–604.
- FENG B, SHI Y Y, WU Y X, et al. Research on synchronized tracking system based on rotating mirror[J]. *Journal of applied optics*, 2018, 39(5): 600–604. (in Chinese)
- [17] CAO R, FU J, YANG H, et al. Robust optical axis control of monocular active gazing based on pan-tilt mirrors for high dynamic targets[J]. *Optics express*, 2021, 29(24): 40214–40230.
- [18] HU S, SHIMASAKI K, JIANG M, et al. A simultaneous multi-object zooming system using an ultrafast pan-tilt camera[J]. *IEEE Sensors journal*, 2021, 21(7): 9436–9448.
- [19] 陈法领, 丁庆海, 常铮, 等. 自适应特征融合的多尺度核相关滤波目标跟踪[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 109–120.
- CHEN F L, DING Q H, CHANG Z, et al. Multi-scale kernel correlation filter algorithm for visual tracking based on the fusion of adaptive features[J]. *Acta optica sinica*, 2020, 40(3): 109–120. (in Chinese)
- [20] 张哲, 孙瑾, 杨刘涛. 融合相关滤波与关键点匹配的跟踪算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 259–267.
- ZHANG Z, SUN J, YANG L T. Tracking algorithm based

on correlation filter fusing with keypoint matching [J].  
Acta optica sinica, 2019, 39(2): 259-267. (in Chinese)

- [21] 梁锡宁, 杨刚, 余学才, 等. 一种动态模板匹配的卡尔曼滤波跟踪方法[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 29-33.

LIANG X N, YANG G, YU X C, et al. Object tracking algorithm based on combining dynamics template matching and kalman filter [J]. Opto-electronic engineering, 2010, 37(10): 29-33. (in Chinese)

- [22] CHEN S Y. Kalman filter for robot vision: a survey [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 59(11): 4409-4420.

(本文编辑: 田艳玲)



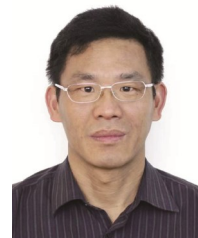
**第一作者:** 曹彦鹏 (1981—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为红外成像、多源信息融合、视觉检测、无损检测。



**作者简介:** 赵博闻 (1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为动态视觉成像、多源信息融合、深度学习。



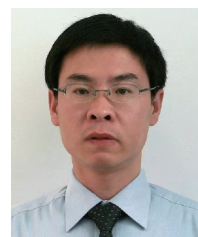
**作者简介:** 沈凝 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为动态视觉成像。



**通讯作者:** 杨将新 (1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为产品精度与质量工程、检测与控制、智能制造。



**通讯作者:** 陈剑 (1983—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为人工声学超材料、极端环境激光超声检测、相控阵超声成像。



**通讯作者:** 居冰峰 (1972—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超精密加工技术、微纳测量、精密机电系统。2014年国家自然科学基金杰出青年科学基金获得者, 2015年入选教育部长江学者奖励计划。