文章编号:1671-4598(2026)10-0096-08 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.10.013 中图分类号:TP216+.1 文献标识码:A

弹目交会自动测试系统设计与实现

李远照
(北京中海技创科技发展有限公司,北京 100071)

摘要:针对弹丸打击空中靶标时,弹目交会特征参数的测量难度大、效率低、精度差、部署复杂、机动性差等问题,设计与实现了一套基于机器视觉的弹目交会自动测试系统;采用图像采集、目标识别跟踪、自动控制等多种技术,构建了空中靶标在目标区域内的自动跟踪采集设备,实现了弹目交会时视频图像的目标跟踪、自动采集和数据存储;采用双目交会测量、图像分析处理、空间坐标转换、数据曲线拟合等多技术融合,研制了数据处理软件,实现了弹目交会区域内弹丸的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等参数的分析和计算,并自动生成结果;经现场测试和验证,结果表明,弹目交会自动测试系统有效提高了测试效率和测量精度,部署简便,机动性好,大幅降低使用人员的设备使用难度。此外,系统对其它类型弹丸的弹目交会特征参数测量,具有较好的技术参考价值。

关键词:弹目交会;数据采集;图像处理;测试软件;机器视觉;交会测量

Design and Implementation of an Automatic Testing System for Projectile-Target Intersection

LI Yuanzhao
(Beijing Zhonghaijichuang Technology Development Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: To address existing problems such as high measurement difficulty, low efficiency, poor precision, complicated deployment and poor mobility in measuring the characteristic parameters of projectile-target intersection when projectiles strike aerial targets, a machine vision-based automatic testing system for projectile-target intersection is designed and implemented, which adopts the technologies including image acquisition, target recognition and tracking, as well as automatic control, constructing an automatic tracking and acquisition device for aerial targets within the target area , thus achieving target tracking, automatic acquisition and data storage of video images during projectile-target intersection. With the integration of binocular intersection measurement, image analysis and processing, spatial coordinate transformation, data curve fitting and other technologies, a data processing software is developed, which can analyze and calculate key characteristic parameters within the projectile-target intersection area, such as the projectile's flight trajectory, intersection position, intersection velocity, intersection spacing and intersection angle, automatically generating the results. Through field testing and verification, the results show that the proposed automatic testing system for projectile-target intersection effectively improves test efficiency and measurement precision, with a simple deployment and excellent mobility, significantly reducing the difficulty of equipment operation for users. In addition, the system can provide an important technical reference for measuring projectile-target intersection characteristic parameters of other types of projectiles.

Keywords: projectile-target intersection; data acquisition; image processing; testing software; machine vision; intersection measurement

0 引言

空中弹目交会是指弹丸与靶标在空中相遇交会的全过程。弹丸的射击试验、训练、在役考核、毁伤评估等场景,通常需要获得弹目交会区域的全过程视频以及测量弹丸在弹目交会区域的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等特征参数,用于分析和评估弹丸的性能、毁伤效能[1-2]。目前,弹目交会参数测量

收稿日期:2026-07-02; **修回日期**:2026-07-17。
作者简介:李远照(1980-),男,大学本科,高级设计师。
引用格式:李远照.弹目交会自动测试系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2026,34(10):96-103.

方法主要包括雷达测量、光学测量、光幕测量、声靶测量、板靶接触测量等传统测试方法[3-5]。

雷达测量法易受环境电磁干扰、布站复杂、设备昂贵；光学测量法设备繁多，不利于现场布设和机动、转运；光幕测量法只测弹丸、测量区域固定、布站受限；声靶测量法易受环境噪声干扰，仅适用于超高速弹丸；板靶接触测量法只能测终点、无法测动态的弹目交会过程，不能测速、角度等参数且人工效率低，有安全风险[6-7]。以上 5 种传统测量方法存在机动性差、布设复杂，且无法拍摄弹目交会的过程视频。此外，弹丸射击训练或试验通常在偏远场地，不能改变弹丸的技术状态且要求测试设备机动便携、部署简单、操作方便，能够保留弹目交会全过程视频，便于事后现场视频回放和分析，以上方法均不能较好的满足要求[8-10]。

因此，本文针对上述背景需求，设计了一种基于光学双目交会测量技术的改进型弹目交会自动测试系统，将红外相机、可见光相机、高精度云台、定位通信模块进行高度集成设计，形成一体便携式设备，实现弹目交会过程的目标自动跟踪和视频采集与存储，基于双目交会测量、图像处理分析、空间坐标转换等多种技术融合，实现弹目相对运动参数与交会特征的分析和计算。本系统在以下几个方面展现出显著的优势[11-14]：

1）测试流程简化：本系统按照场地勘探→设备布设→数据导出→数据计算→报告生成的顺序执行弹目交会测量，实现全过程自动化处理，减少了测试过程的人为干预。

2）设备部署方便：本系统的功能模块高度集成，设备组成较少，硬件均为一体化便携式结构，便于机动携行使用，可适应各类训练场地的机动部署要求。

3）可组合可扩展：本系统采用模块化、标准化和通用化设计，功能模块可按需组合，也可按需扩展，可有效满足各类弹目交会的测试要求。

4）测试信息齐全：本系统能够获得弹丸在弹目交会区域的飞行轨迹、飞行速度、交会位置、交会间距、交会角度、命中情况等参数以及过程视频，满足弹丸射击训练或实验的数据要求。

5）广泛的适用性：本系统采用红外＋可见光图像相融合，在通视的白昼环境（红外＋可见光融合，视频图像信息丰富）或黑夜环境（依靠红外相机工作，视频图像信息较少）下均可正常使用。

1　系统结构及原理

依据标准化、模块化和通用化设计原则，将弹目交会自动测试系统主要由 2 台自动跟踪采集设备、1 台数据处理终端（运行数据处理软件）、2 台便携电源等组成。其中自动跟踪采集设备通过红外图像和可见光图像融合技术实现空中目标的实时识别和跟踪及高精度云台的控制，实现弹目交会全过程视频的采集、处理、存储和传输；数据处理终端导入两个自动跟踪采集设备的弹目交会全过程视频以及设备的位置坐标、相机的焦距、视场角、云台姿态等相关参数，基于物体小孔成像原理，融合双目交会测距、空间坐标转换、曲线拟合技术、视频图像分析和处理等多种技术，通过数据处理软件分析和计算弹丸在弹目交会区域内的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等交会特征参数。弹目交会自动测试系统的系统结构及原理如图 1 所示。

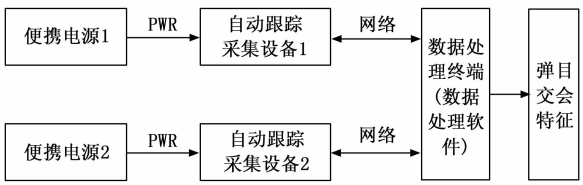

图 1　弹目交会自动测试系统结构及原理图

两台便携电源分别为 2 台自动跟踪采集设备提供 DC24V 电源，实现 12 小时的长时间连续工作，数据处理终端通过网络远程控制自动跟踪采集设备的工作状态（设备的开始、停止、暂停、恢复等）和视频图像实时浏览。在进行空中弹目交会测试时，设备部署方式如图 2 所示。将 2 台自动跟踪采集设备分别放置测试场地的 P_1、P_2 位置（用户可根据测试场地和空中目标活动区域进行调整 P_1、P_2 两者间距），初始摆放时，光轴方向均对准空中目标中心位置 M，A 点为 M 在地面的垂直投影点，以垂直于 P_1A 的 OP_1 为 X 轴，以垂直于 P_2A 的 OP_2 为 Y 轴，OP_1、OP_2 交会点 O 为原点，平面 OP_1P_2 的垂直线 OZ 为 Z 轴，构建用于数据解算的世界坐标系。将空中目标 M 的周围区域（该区域为指定长度的正方体空间，由用户根据需要设置，但空间不能超过两台自动跟踪采集设备摄像机视场的最大重叠区

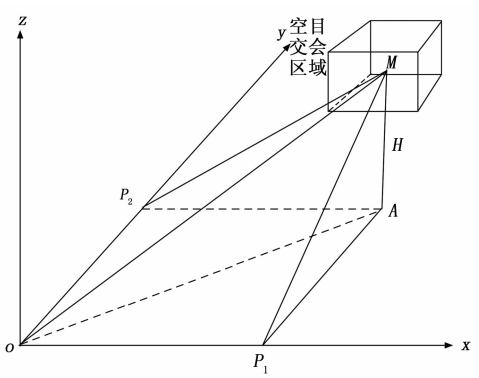

图 2　弹目交会自动测试系统部署示意图

域）定义为空中弹目交会区域（此区域以空中目标为中心随目标运动而变动）。两台自动跟踪采集设备布设完成后，先由人工选定空中目标的图片区域，后面则由自动跟踪采集设备执行所选目标的自动跟踪。当自动跟踪采集设备识别到弹丸飞入弹目交会区域后，自动触发视频图像的开始存储，当弹丸飞出弹目交会区域或命中目标后，自动触发视频图像的停止存储，视频段即为弹丸的空中交会全过程视频。此工作机制无需人工干预，由自动跟踪采集设备自动采集和存储空中弹目交会过程的视频图像，且支持多次弹丸弹目交会过程的视频采集。在测试结束后，将两台自动跟踪采集设备中的弹目交会视频及相关参数（如自动跟踪采集设备的坐标、相机的焦距、帧率、视场、云台的姿态等）通过高速网络导出至数据处理终端，通过数据处理软件分析和计算弹丸在弹目交会区域的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等弹目交会特征参数，并生成测试结果报告。

2 系统硬件设计

弹目交会自动测试系统硬件主要包括 2 台自动跟踪采集设备、2 套便携电源和 1 台数据处理终端，其中便携电源和数据处理终端硬件均选用成熟产品，便携电源选用 DC24V 锂电电源，数据处理终端硬件选用 ThinkPad P43S 笔记本电脑。因此，本节主要针对自动跟踪采集设备进行设计[15-16]。

自动跟踪采集设备主要由自动跟踪采集主机、高精度云台和三脚架、电缆等配套附件组成。其中自动跟踪采集主机主要由红外相机模组、可见光相机模组、图像处理单元、数据存储模块、电源管理模块、北斗定位模块、数据通信模块、外部接口模块等硬件模块组成，由图像处理单元的嵌入式处理软件实现各模块的资源调度和控制以及输入输出数据处理。自动跟踪采集主机根据空中目标位置变动自动计算变化角度，通过串口发送指令控制高精度云台俯仰和旋转，实现空中目标的自动识别和跟踪。自动跟踪采集设备的模块组成及工作原理如图 3 所示。

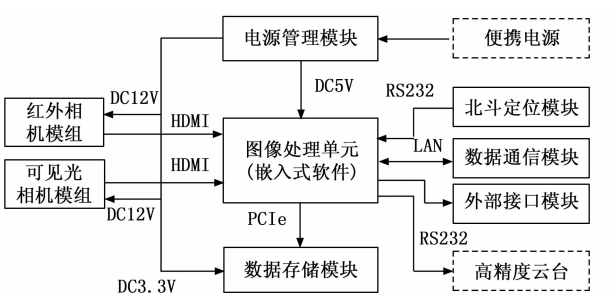

图 3 自动跟踪采集设备组成及原理图

由便携电源输出 DC24 V 为自动跟踪采集设备供电，通过电源管理模块输出其他硬件模块所需的 DC12 V、DC5 V、DC3.3 V，由北斗定位模块获取自动跟踪采集设备部署位置的坐标，由数据通信模块实现与数据处理终端之间的数据通信（支持有线和无线两种方式），由红外相机模组实现空中目标的探测和红外成像，可见光相机模组实现可见光成像，由北斗定位模块实现设备的位置定位、时间授时和信号同步，由图像处理单元负责视频图像的接收、融合、识别、分析和处理，通过 RS232 发送指令控制高精度云台的转动，实现所选空中目标的自动识别和运动跟踪。在黑夜环境下使用时，通过红外相机模组实现弹丸的视频采集和存储；在白昼环境下使用时，则通过红外相机模组和可见光相机模组的图像融合实现弹丸的视频采集。红外相机模组实时探测弹丸是否进入弹目交会区域，如果进入交会区域则自动触发视频开始存储，当弹丸击中目标或飞出弹目交会区域后，自动触发视频停止存储，将此过程视频存储为一个单独的视频文件。试验完成后，将视频文件通过网口或移动存储介质导出，由数据处理终端进行分析、处理和计算弹目交会特征参数[17-18]。

一般典型训练情况下，空中弹目交会区域为边长 100 m 的立体空间，设备架设在距目标区域中心点 500 m 处，目标区域的高度为 500 m，弹丸末端速度最大 1.5 Ma，为了达到计算精度，通常要求在交会区域能抓取至少 10 幅弹丸图片。根据此要求，本文中选用红外相机模组主要指标：帧率 60 fps，分辨率 640×640，像素间距 15 μm，焦距 25～200 mm 可调，响应波段 3.7～4.8 μm；可见光相机模组主要指标：帧率 60 fps，分辨率 3 840×2 160，像素间距 5 μm，焦距 20～200 mm 可调；云台转动范围：水平 360°旋转，垂直－90～＋90°，转动精度≤0.01°。根据物体小孔成像原理可知，得到相机的可监视区域计算公式如下：

$$H = \frac{p \times h \times L}{f} \tag{1}$$

其中：p 为像素分辨率，h 为像素间距，f 为相机焦距，L 为设备架设在距目标区域中心点距离。根据式（1）得到红外相机的监视区域范围为 2.4～240 m，可见光相机的监视区域为 21.6～270 m，两相机可抓拍到弹丸在交会区域内的最少图像帧数为 60×100/（1.5×340）＝11 帧。因此，所选硬件能够满足末端速度 0.1～1.5 Ma 的交会测试需求[19-20]。

考虑到设备的便携性、机动性、灵活性、部署简单等要求，自动跟踪采集设备采用三段可拆卸式结构设计，即自动跟踪采集主机、云台和三脚架三部分可拆卸，上下可通过螺钉快速固定和装配，以适应部队

野外的各种训练使用场景。自动跟踪采集主机采用小型化、一体化加固设计，内部高度集成制冷红外相机模组、可见光相机模组、图像处理单元、数据存储模块、电源管理模块、北斗定位模块、数据通信模块等硬件模块。自动跟踪采集设备的整体结构设计效果如图 4 所示。



图 4　自动跟踪采集设备设计效果图

嵌入式处理软件运行在图像处理单元内，实现自动跟踪采集设备部署的位置坐标、时间授时、红外成像图片、可见光成像图片、云台姿态等多源异构数据的接收、分析、融合、处理和传输以及高精度云台控制、所选目标的跟踪等功能，主要包括时间授时、目标选定、目标跟踪、触发控制、云台控制、图像处理、数据存储、数据传输、数据导出等功能模块。嵌入式处理软件各功能模块之间的逻辑流程如图 5 所示。

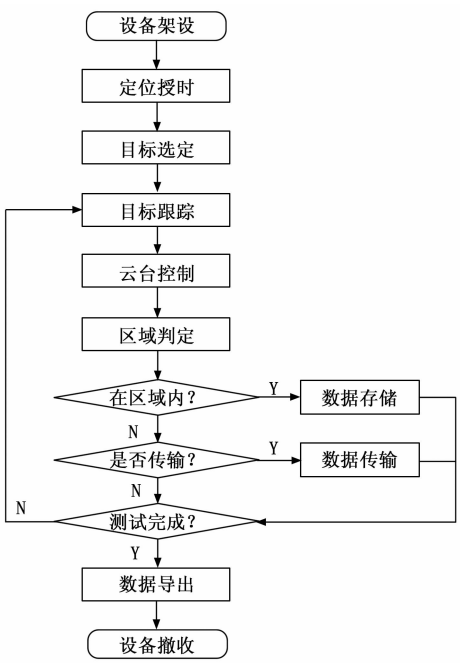

图 5　嵌入式处理软件逻辑流程图

1）设备架设：根据测试场地环境和空中目标运动区域，选取合适位置架设两台自动跟踪采集设备。

2）定位授时：设备上电后，静置 6 min 左右，等待相机初始化，完成两台设备位置定位和北斗时间授时（双目数据时间同步基准）。

3）目标选定：在视频预览画面中框选需要跟踪的空中目标，并设定空中弹目交会区域的范围。

4）目标跟踪：两台自动跟踪采集设备通过运动目标跟踪算法同时跟踪所选定目标，并计算目标变化位置。

5）云台控制：根据空中目标位置实时解算角度，向云台发送控制指令和调整姿态，使目标时刻处于交会区域中心。

6）区域判定：实时接收红外相机图片，通过运动目标跟踪算法检测弹丸否进入或离开弹目交会区域，并触发图像开始或停止存储。

7）数据存储：将弹目交会过程视频保存为独立的视频文件。

8）数据传输：弹目交会测试过程，可通过 LAN 或 WLAN 网络将视频图片发送到数据处理终端。

9）数据导出：将两台自动跟踪采集设备的弹目交会过程视频导出到数据处理终端进行分析、计算和处理。

10）设备撤收：测试完成后，将自动跟踪采集设备撤收。

嵌入式处理软件如何实现目标跟踪及触发存储是其中的关键。本文由红外相机执行目标跟踪和触发控制，采用基于视频图像的背景建模（帧间差分＋ViBe 背景提取）＋形态学滤波＋轮廓检测目标分割＋Kalman 滤波运动目标跟踪方法，具体算法实现如下：

1）图像灰度处理：将输入图像先转为单通道灰度图，灰度归一化处理，消除光照轻微波动干扰。

2）前景运动目标提取：通过 ViBe＋算法将图像中运动目标（前景）和不动的背景分开，输出二值前景掩码。

3）形态滤波去除噪点：使用腐蚀操作消除洗消白点，使用膨胀操作填充空洞，连接断裂目标，使用开运算去掉噪点，使用闭运算填充空洞。

4）轮廓检测与运动目标分割：对滤波后二值掩码查找连通域轮廓，过滤小噪点轮廓，保留有效运动物体，提取外接矩形。

5）Kalman 滤波目标跟踪：建立状态方程预测下一帧位置，观测值为当前轮廓质心，修正预测值。

6）如果检测到目标，则存储当前的视频图像，循环 1）～5）步骤；如果没有检测到目标，则停止存储视频图像。将视频保存为独立文件。

3 系统软件设计

数据处理软件运行在数据处理终端，实现多源异构数据的导入、融合、分析、计算和处理。依据软件层次化、模块化以及模块间高内聚、低耦合设计原则，将数据处理软件划分为用户登录、参数设置、远程控制、数据导入、数据通信、参数计算、结果生成等功能模块，其功能组成如图 6 所示。

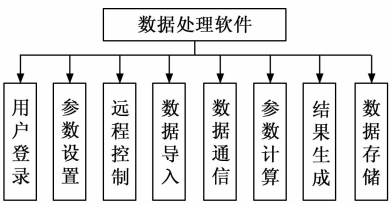

图 6 数据处理软件功能组成图

1）用户登录：对用户输入的用户账号、登录密码和使用权限进行检查，软件自动核验是否为合规用户。

2）参数设置：在测试场地架设时对两台自动跟踪采集设备的焦距、视场角、帧率、光轴以及目标选取、弹目交会区域等相关参数进行设置。

3）远程控制：通过 LAN 或无线网络实时接收和浏览两台自动跟踪采集设备发送的视频图像，远程控制设备的工作状态。

4）数据导入：通过 LAN 从两台自动跟踪采集设备导出弹目交会过程视频以及设备的坐标、相机的焦距、帧率、视场角、云台姿态等相关参数。

5）数据通信：支持有线 LAN 和无线（根据测试场景需求选择其中一种）两种方式实现数据处理终端与 2 台自动跟踪采集设备之间进行数据传输。

6）参数计算：基于弹目交会过程视频和相关参数，利用双目测距原理、空间坐标转换、曲线拟合技术、图像分析处理等技术计算弹丸在弹目交会区域的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等特征参数。

7）结果生成：将弹目交会特征参数的计算结果以 Word 文件形式生成测试报告。

8）数据存储：采用关系数据库与文件系统相结合实现系统数据的存储和管理。

数据处理软件采用三层结构化的软件技术架构设计，分为交互层、处理层和数据层，层内则由高内聚、低耦合的功能模块组成，上层功能模块通过接口调用下层功能模块并通过接口返回结果。数据处理软件的总体设计架构如图 7 所示。

1）交互层：本层主要由使用人员与数据处理软件进行人机交互的可视化软件界面组成，实现人机交互和操作控制、外部数据输入、数据处理结果的输出和显示，主要包括用户登录界面、功能选择界面、参数设置界面（集成参数设置、视频预览等交互）、远程控制界面（集成视频浏览、远程控制等交互）、参数计算界面（集成数据导入、结果生成等交互）。

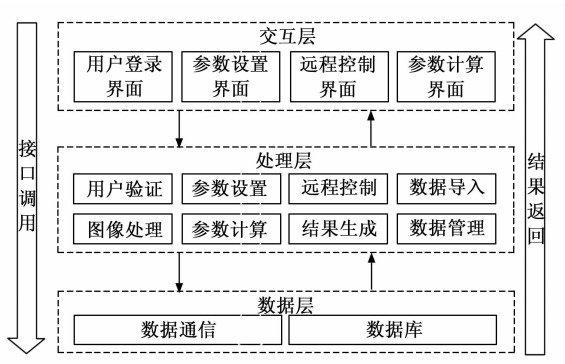

图 7 数据处理软件架构设计图

2）处理层：本层由各数据逻辑处理模块组成，实现对各类输入数据的逻辑事务处理和处理结果输出，主要包括用户验证、参数设置、远程控制、数据导入、图像处理、参数计算、结果生成、数据管理等数据处理功能模块。

3）数据层：该层主要由数据库和数据通信组件组成，实现数据的通信、获取、存储、管理和访问。数据库主要包括参数配置库、测试结果库、用户信息库等组成，实现系统数据的结构化存储和管理功能。数据通信组件实现与自动跟踪采集设备之间的网络数据通信、数据导出等功能。

数据处理软件各功能模块之间按照用户登录→参数设置→远程控制→数据导入→参数计算→结果生成的顺序执行，其逻辑流程如图 8 所示。

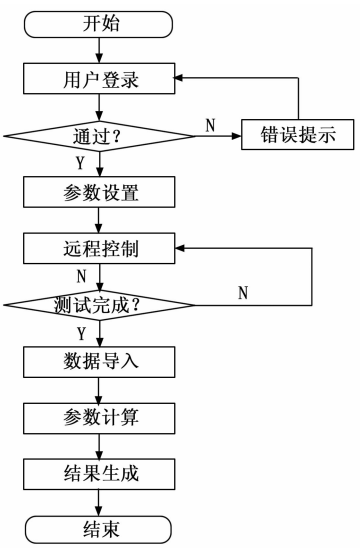

图 8 数据处理软件逻辑流程图

经数据处理软件分析和计算后，主要输出弹丸的飞行轨迹、交会位置、交会速度、交会间距、交会角度等交会特征参数以及交会时段的视频段。

1）飞行轨迹：弹丸在交会区域内飞行的轨迹曲线。由图像识别目标的像素点所对应的离散空间点通过最小二乘曲线拟合方法拟合成连续曲线，得到飞行轨迹曲线。

2）交会位置：发生交会时弹丸与目标所在的空间位置。由图像识别弹丸与目标交会时所在的像素点，通过双目交会定位计算得到对应的空间坐标。

3）交会速度：发生交会时弹丸与目标的瞬间速度。相机帧频 F（fps）固定，交会点上一点时刻 T_0 图像目标位置为 L_0，交会点时刻 T_1 图像目标位置为 L_1，T_0 与 T_1 之间的图像帧数为 n，世界坐标单位长度与图像像素间距的比例为 S_p（m/pix），则交会速度如公式（2）所示：

$$V=\frac{(L_1-L_0)\times F\times S_p}{n\times(T_1-T_0)} \tag{2}$$

4）交会间距：发生交会时弹丸与目标之间的直线距离。由交会位置 P_1（x_1，y_1，z_1）和 P_2（x_2，y_2，z_2），则交会间距 L 如公式（3）所示：

$$L=\sqrt{(x_2^2-x_1^2)+(y_2^2-y_1^2)+(z_2^2-z_1^2)} \tag{3}$$

5）交会角度：发生交会时弹丸速度矢量与目标速度矢量的夹角。交会速度矢量 v_1、v_2，交会夹角 θ，根据向量叉乘得到：

$$\cos\theta=\frac{v_1\cdot v_2}{|v_1||v_2|} \tag{4}$$

以上交会特征参数计算，关键是将目标在图像中的像素点变换到世界坐标系对应的空间位置坐标，本文采用双目视觉测量原理实现两者转换，即利用目标物体在两幅图像的位置不同，计算图像的视差图，然后通过相似三角形原理可获取目标的三维信息。双目相机成像模型如图 9 所示。

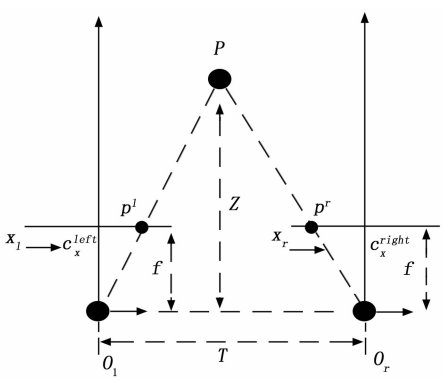

图 9　双目相机成像模型

其中：O_l 和 O_r 是左右两个相机的位置，P 是空间中一点，P 在相机 O_l 中的成像点是 P_l，在相机 O_r 中的成像点是 P_r，线段 x_l 和 x_r 分别为 P_l 和 P_r 到相机成像面边界的距离，则点 P 在左右相机中的视差 d 为：

$$d=|x_l-x_r| \tag{5}$$

假设 P_l 和 P_r 两点之间的距离为 s，T 为左右两相机之间的基线距离，则由图 9 可知距离 s 为：

$$s=T-(x_l-x_r) \tag{6}$$

由三角形相似原理可得：

$$\frac{T-(x_r-x_r)}{Z-f}=\frac{T}{Z} \tag{7}$$

其中：f 为相机的焦距，Z 为空间点 P 到两个相机基线的距离，则解得距离 Z 为：

$$Z=\frac{fT}{x_r-x_r} \tag{8}$$

由上可知，对于空间中任意一点 P，都可以计算出相应的视差 d，视差 d 根据 P 点位置的不同而大小不同，即可形成视差图。由式（8）可知，若已知两相机之间的距离 T 和相机焦距 f，即可通过视差图求得图像的深度图和世界坐标系下的三维坐标。

从二维平面的成像图像到三维世界的场景，两者之间需经过像素坐标系（以图像左上角为原点）→图像物理坐标系（以图像中心为原点）→相机坐标系（以相机光心为原点）→世界坐标系（物体所在空间）的坐标转换。根据物体小孔成像原理和坐标转换关系可知，世界坐标系的空间点 P（X_w，Y_w，Z_w）与图像平面上以像素为单位的点 Z（u，v）存在以下转换关系：

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1/d_x&0&u_0\\0&1/d_y&v_0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f&0&0&0\\0&f&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}&\boldsymbol{T}\\0^T&1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha_x&0&u_0&0\\0&\alpha_y&v_0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}&\boldsymbol{T}\\0^T&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_1\boldsymbol{M}_2X_w \tag{9}$$

其中：f 为摄像机的焦距，（u_0，v_0）为图像的中心坐标，$\boldsymbol{R}$ 为两个相机在世界坐标系旋转变换矩阵，$\boldsymbol{T}$ 为两个相机在世界坐标系的偏移向量，$0=(0,0,0)^T$，d_x，d_y 分别为像素点在 X 轴与 Y 轴的物理尺寸且 $a_x=f/d_x$，$a_y=f/d_y$，$\boldsymbol{M}_1$、$\boldsymbol{M}_2$ 分别为摄像机内参数矩阵和外参数矩阵（采用张正友标定法计算获取）。通过空间点与像素点的转换关系可知，若已知世界坐标系点 P（X_w，Y_w，Z_w），则可求出该点对应在图像上的像素坐标 Z（u，v），反之亦然。

双目视觉测量的关键是找到空间点 P 在两个相机中的成像点 P_l 和 P_r，并计算视差值。目前，通常有像

素匹配、特征匹配等方法实现两幅图片中 P_l 和 P_r 匹配，但计算量大、处理效率低。考虑到弹丸/靶机在目标区域飞行或爆炸的热源特征，红外成像图经灰度转换、形态运算和轮廓提取即可快速识别和定位弹丸在红外图像的像素点（取轮廓中心点），再通过变换矩阵（相机标定得到）叠加到可见光图像中，得到弹丸在可见光图像上的成像位置。

4 试验结果与分析

为了方便对测试系统进行测试与验证，本文通过两台无人机（具备 GPS 定位和激光测距功能）分别模拟弹目空中交会过程中的弹丸和目标，对弹目交会自动测试系统的功能和性能进行测试和验证。无人机 A 下方挂载空中靶标（红外波长：3.7～4.8 μm），在指定空域内按照设置的圆形轨迹飞行；无人机 B 下方挂载热源（用于模拟弹丸飞行产生的热源），按照规划的路径模拟弹丸的飞行过程。

在进行 2 台自动跟踪采集设备架设时，先将无人机 A 处于空中悬置状态，将自动跟踪采集设备 1 放置在位置 P_1，自动跟踪采集设备 2 放置在位置 P_2，均相对于原点 200 m，两台自动跟踪采集设备相机光轴方向对准无人机 A 空中靶标所在位置，同时通过红外或可见光视频预览界面进行人工圈选无人机 A，其部署方式如图 2 所示。在数据处理终端参数设置界面设置相应的测试参数，参数设置值如表 1 所示。

表 1 测试参数设置表

序号	参数名称	参数值
1	可见光相机焦距	100 mm
2	红外相机焦距	100 mm
3	可见光视场角度	30°
4	红外视场角度	15°
5	可见光相机帧频	60 Hz
6	红外相机帧频	60 Hz
7	交会区域大小	边长为 30 m 的正方体空域

测试参数设置完成后，无人机 A 在高度为 50 m、半径为 30 m 圆圈（中心点投影位置距离原点 200 m 处），按照设定的标准速度开始循环飞行，两台自动跟踪采集设备开始实时跟踪无人机 A。通过遥控器控制无人机 B 从不同方向与无人机 A 在交会区域进行会面和飞出。为了试验数据方便对比，共选取了 4 个典型交会点进行试验（如表 2 标准值栏所示），在指定位置，以指定速度和角度进行弹目交会模拟。在完成 4 次弹目交会过程的模拟测试试验后，将 4 次弹目交会视频导入至数据处理终端，通过数据处理软件进行分析和计算，其测试结果如表 2 所示。

表 2 测试结果数据表

次数 \ 参数		交会速度 /(m/s)	交会位置 /m	交会角度 /(°)
1	标准	10.00	(170.0,200.0,50.0)	30.00
	测试	10.10	(170.4,200.3,50.1)	29.68
2	标准	20.00	(230.0,230.0,50.0)	45.00
	测试	20.23	(230.5,230.5,50.4)	45.16
3	标准	30.00	(230.0,200.0,50.0)	60.00
	测试	30.16	(230.3,200.5,50.2)	59.23
4	标准	40.00	(200.0,170.0,50.0)	30.00
	测试	40.32	(200.1,170.3,50.3)	30.42

由表 2 可知，标准值为在指定位置，以指定速度和角度控制无人机进行交会模拟试验，测试值则由数据处理软件计算得出。其中交会位置为相对于世界坐标系原点的坐标值。

由于设备定位偏差、相机光轴微小偏移、标定残差等因素，无法构建完全理想的针孔成像模型与空间坐标系，因此测试值与标准真值存在小幅偏差。对四组试验数据综合分析可见：系统解算得到的交会速度、三维坐标、交会夹角等核心参数误差控制在合理区间，完全满足低空弹目交会试验的测量精度要求；后续可通过升级高精度定位单元、精细化相机标定、配套高精度测距设备优化底层输入参数，进一步压缩测量误差，提升系统测量精度。

5 结束语

本文设计的弹目交会自动测试系统，主要面向末端速度 0.1～1.5 Ma、空域高度 0.1～3 km 低空弹丸交会场景，在传统双目光学测量基础上引入中波制冷红外成像，采用红外－可见光图像融合算法提升复杂环境下目标跟踪稳定性与全天候适配能力；设备内置空域触发采集机制，实现交会视频全自动录制存储，由软件分析、计算并自动生成测试结果，大幅削减人工操作环节，显著提升野外测试效率。

弹目交会自动测试系统采用高集成一体化便携式结构设计，转运架设灵活便捷，野外机动性能优异，可适配各类偏远试验测试场地，在弹丸性能鉴定、野外实装训练、在役装备考核等场景具备广阔的推广应用价值。同时系统方案可拓展用于地面机动靶标末端运动信息采集，文中硬件架构、双目视觉解算、自动跟踪采集一体化等设计思路，可为其它各类弹丸弹目交会参数检测系统开发提供完整技术参考。

参考文献：

[1] 周长春，汪罗珍. 瞬时速度的测量原理及测量方法 [J].

中国教育技术装备，2002（12）：13－14.
[2] 邵　伟. 基于线阵CCD的图像测速系统研究［D］. 天津：天津城市建设学院，2012.
[3] 赵　成，高　晔. 一种多特征联合分布的Camshift目标跟踪算法［J］. 计算机与数字工程，2024，52（3）：665－670.
[4] 朱安民，陈燕明. 基于特征点一致性约束的实时目标跟踪算法［J］. 深圳大学学报（理工版），2013，30（3）：228－234.
[5] 李清嘉. 双目交会测量中的多参数标定方法研究［D］. 天津：中国民航大学，2014.
[6] 杨丽丽. 摄像测量技术在机动目标运动参数解算中的应用［D］. 西安：西安电子科技大学：2014.
[7] 崔彦平. 运动目标姿态与速度测量的理论及实验研究［D］. 天津：天津大学，2007.
[8] 唐仁圣. 空中目标实时跟踪算法研究及系统设计［D］. 重庆：重庆大学，2004.
[9] 李叶茂. 多摄像头目标跟踪研究［D］. 西安：西安电子科技大学，2023.
[10] 段学虎，刘海英，陈好男，等. 杂乱环境中改进的目标检测跟踪算法［J］. 齐鲁工业大学学报，2022，36（2）：46－52.
[11] 吴洪臣，陈晓荣，李柏杨. 多线程半全局立体匹配工件内部检测方法［J］. 中国机械工程，2025，36（11）：1342－1348.
[12] 杨景豪，刘　巍，刘　阳，等. 双目立体视觉测量系统的标定［J］. 光学精密工程，2016，24（2）：300－308.
[13] 黄鹏程，江剑宇，杨　波. 双目立体视觉的研究现状及进展［J］. 光学仪器，2018，40（4）：81－86.
[14] 杨震濠，康国华，袁新宇. 点线特征融合的失效目标双目视觉位姿测量［J］. 航天控制，2024，42（1）：65－70.
[15] 杨　军，陈令烨，陈立邦. 低对比度条件的双目立体视觉测距［J］. 液晶与显示，2025，40（4）：528－536.
[16] 汪凌阳，朱璠婷，蒋文萍. 基于机器视觉的机械臂双目测距系统研究［J］. 应用技术学报，2022，22（4）：383－387.
[17] ZHANG Z Y. A flexible new technique forcamera calibration［J］. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2000，22（11）：1330－1334.
[18] HUANG G，CHEN J. Pyramid stereo matching network for binocular triangulation ranging［C］//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，2018：5490－5498.
[19] XU H T，LIU X. A real-time ranging method based on parallel binocular vision［C］//10th International Symposium on Computational Intelligence and Design，IEEE，2017：183－186.
[20] PANTILIE C，NEDEVSCHI S. Cost volume aggregation with attention for real-time binocular triangulation ranging［J］. IEEE Robotics and Automation Letters，2023，8（5）：2712－2719.

（上接第 95 页）

[26] CHEN Y，ZHANG C，CHEN B，et al. Accurate leukocyte detection based on deformable-DETR and multi-level feature fusion for aiding diagnosis of blood diseases［J］. Computers in Biology and Medicine，2024，170：107917.
[27] OUYANG D，HE S，ZHANG G，et al. Efficient multi-scale attention module with cross-spatial learning［C］//ICASSP 2023－2023 IEEE International Conference on Acoustics，Speech and Signal Processing（ICASSP）. Rhodes Island，Greece：IEEE，2023：1－5.
[28] ZHANG H，XU C，ZHANG S. Inner-IoU：more effective intersection over union loss with auxiliary bounding box［J］. ArXiv Preprint ArXiv：2311.02877，2023.
[29] TONG Z，CHEN Y，XU Z，et al. Wise-IoU：bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism［J］. Arxiv Preprint Arxiv：2301.10051，2023.
[30] KINGMA D P，BA J. Adam：a method for stochastic optimization［J］. Arxiv Preprint Arxiv：1412.6980，2014.
[31] 朱　豪，周顺勇，刘　学，等. 基于深度学习的单阶段目标检测算法综述［J］. 工业控制计算机，2023，36（4）：101－103.
[32] SOHAN M，SAI RAM T，RAMI REDDY C V. A review on yolov8 and its advancements［C］//International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics. Springer，Singapore，2024：529－545.
[33] WANG C Y，YE I H，LIAO H Y M. YOLOv9：learning what you want to learn using programmable gradient information［C］//European Conference on Computer Vision. Milan，Italy，2024：1－21.
[34] WANG A，CHEN H，LIU L H，et al. YOLOv10：real-time end-to-end object detection［EB/OL］. ArXiv：2405.14458，2024.
[35] KHANAM R，HUSSAIN M. YOLOv11：an overview of the key architectural enhancements［EB/OL］. ArXiv：2410.17725，2024.
[36] 季星宇，黄陈蓉，姚军财，等. 结合分支特征和排斥损失的绝缘子检测研究［J］. 计算机工程与应用，2025，61（7）：141－152.
[37] 关燕鹏，傅芃博，要会娟. 基于MHD-YOLO的轻量化绝缘子缺陷检测算法［J］. 电子测量技术，2026，49（1）：80－89.