

# 基于超宽带技术的运动目标跟踪 高精度定位系统设计

李强

(江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 为克服运动目标不断变化导致跟踪定位精度较低的问题, 设计基于超宽带技术的运动目标跟踪高精度定位系统; 图像采集模块由 FPGA 单元、VGA 显示单元、帧缓存单元以及图像采集单元构成, 以此实现运动目标跟踪与定位中的图像采集, 在超宽带技术模块中, 设计超宽带运动目标定位所需的天线、定位基站、移动节点, 完成超宽带动态组网, 实现硬件系统的设计; 基于硬件系统采集到的图像, 实施图像灰度化处理、形态学滤波处理, 以增强图像中有用的信息, 设计 TLD 运动目标跟踪算法, 随着运动目标开始运动, TLD 模型会不断学习跟踪的运动目标, 获取目标在距离、景深、角度等层面的改变, 并不断学习、识别, 达到良好的跟踪效果, 基于超宽带技术设计运动目标动态定位算法, 依据跟踪结果实现运动目标的高精度定位, 完成软件系统的设计; 实验测试结果表明, 该系统在中、远距离目标跟踪与定位实验中跟踪错误率低于 0.60%、2.4%, 沿着 S 型运动时, 路线弯折处的定位误差较低, 与实验运动目标的飞行路线相贴合, 具有良好的定位能力。

**关键词:** 图像传感器; 超宽带技术; 运动目标跟踪; 高精度定位系统; TLD 模型

## Design of High-precision Positioning System for Moving Target Tracking Based on Ultra Wideband Technology

LI Qiang

(Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** To overcome the low tracking and positioning accuracy caused by moving targets, a high-precision positioning system for moving target tracking based on ultra wideband technology is designed. The image acquisition module consists of an FPGA unit, VGA display unit, frame buffer unit, and image acquisition unit, which achieves image acquisition in moving object tracking and positioning. In the ultra wideband technology module, it designs the antenna, positioning base station, and mobile node for the ultra wideband moving object positioning, completes the ultra wideband dynamic networking, and achieves the hardware design of the system. The collected images of the hardware system are implemented the image graying processing and morphological filtering processing to enhance the useful information in the image, and design the tracking algorithm of the TLD moving target. With the target moving, the TLD model will continuously learn the tracking moving target, obtain the target changes in the distance, depth of field, angle and other levels, and continuously learn and identify to achieve good tracking results, the dynamic positioning algorithm for moving targets based on ultra wideband technology is adopted to achieve the high-precision positioning for moving targets based on the tracking results, and complete the software design of the system. The experimental results show that the tracking error rates of the system in medium and long distance target tracking and positioning experiments are below 0.60% and 2.4%, and the positioning error at the corner of the route is relatively low when moving along the S-shape, which is in line with the flight path of the experimental moving target, and it has a good positioning ability.

**Keywords:** image sensor; ultra wideband technology; moving object tracking; high precision positioning system; TLD model

## 0 引言

计算机技术的迅速发展催生了数字图像处理技术, 通过使用摄像机获取外界环境并将其转化为数字信号, 进行数字图像处理以实现对图像的分析 and 处理。数字图像处理是计算机视觉研究的基础技术之一, 能够应用于运动目标的检测、跟踪和定位等方面。计算机视觉具有广阔的应用前景, 涵盖了不同领域、学科和众多技术的高技术课题,

同时也是智能机器人的核心技术之一。其实质是在目标动态检测的基础上运用现代滤波器进行实时追踪, 并对运动物体进行定位和运动状态的预测和估计<sup>[1-2]</sup>。在工业生产、物流运输、公共安全等领域, 实时监控和定位移动目标至关重要, 设计高精度的运动目标跟踪定位系统可以实时获取目标的位置和轨迹信息, 提供可靠的监控与安全保障。然而, 由于应用场景交界处容易受到信号干扰等因素的影响, 导致获取的位置信息可能存在一定的偏差。因此, 需

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-12-08。

作者简介: 李强(1982-), 男, 硕士, 讲师。

引用格式: 李强. 基于超宽带技术的运动目标跟踪高精度定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 327-333.

要设计一种能够克服这些问题的运动目标跟踪定位系统。

对于此类问题的研究，目前学者们已经取得了十分丰富的研究成果，涌现出了多种实现途径，如相关滤波器、深度学习等。文献 [3] 提出一种柑橘果园机器人仿生眼的目标跟踪与定位系统，设计基于 CAM shift 的目标跟踪算法实现了持续性目标跟踪。测试结果表明，该系统能够满足实际应用，准确性与鲁棒性都较高。文献 [4] 提出一种基于区块链技术的地面移动目标智能跟踪系统，系统以 DM6446 信号处理器为基础信息处理元件，结合相关软件执行环境与硬件设备实现了目标对象的实施跟踪与定位。通过对比实验，发现该系统信息处理时间得到缩短，DIA 指标值却更高。文献 [5] 提出一种双目视觉运动目标跟踪定位系统，通过背景差分法、CamShift 算法、双目视觉以及 FAST 角点检测算法实现了目标的检测、跟踪与定位。测试结果表明，该系统能够有效解决跟踪丢失问题，同时有着良好的实时性。

但是以上系统在实际应用中存在跟踪定位精度不足的问题，为此，设计一种基于超宽带技术的运动目标跟踪高精度定位系统。通过 FPGA 单元、VGA 显示单元、帧缓存单元以及图像采集单元组建图像采集模块，基于天线、定位基站、移动节点，完成超宽带定位基站模块的设计。对采集到的图像进行灰度化处理，增强图像的清晰度，采用 TLD 模型跟踪运动目标，提高定位精度，利用超宽带技术实现运动目标的精准定位。

## 1 运动目标跟踪高精度定位系统设计

### 1.1 硬件设计

#### 1.1.1 图像采集模块设计

图像采集模块由 FPGA 单元、VGA 显示单元、帧缓存单元以及图像采集单元构成，能够实现运动目标跟踪与定位中的图像采集。

在图像采集单元中，选用的图像传感器为 CMOS 图像传感器，通过其采集运动目标的图像。选用的图像传感器具体型号为 MT9M011 摄像头，其数据输出格式为 Bayer 彩色格式，分辨率可达  $1\ 280 \times 1\ 024$ <sup>[6]</sup>。为 MT9M011 摄像头配置 8 个寄存器，具体情况如表 1 所示。

表 1 配置的寄存器与设定值

序号	配置寄存器	描述	设定值
1	0x05 Hex	水平消隐	0x0086
2	0x06 Hex	垂直消隐	0x0032
3	0x08 Hex	曝光时间	硬件开关
4	0x02 Hex	写模式 B	0x0002
5	0x2A Hex	绿 1 增益	0x00B1
6	0x2B Hex	蓝增益	0z02CF
7	0x2C Hex	红增益	0xz02CF
8	0x05 Hex	绿 2 增益	0x00B5

由于 MT9M011 摄像头输出的数据为 Bayer 彩色格式，

需要通过插值算法对仅含单一颜色分量的图像像素数据进行还原，使其成为包含 R、G、B 三种颜色分量的图像像素数据<sup>[7]</sup>。

设计一种简单、节省硬件资源的插值算法，这种算法针对的是四个相邻的像素点，在转换前后，蓝色分量与红色分量均保持不变，而绿色分量则成为 4 个像素中 2 绿色分量的均值，最终合并成为一个三十位的 RGB 像素，该插值算法的像素转换原理<sup>[8]</sup>如图 1 所示。

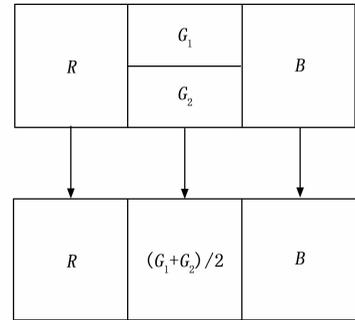


图 1 像素转换原理

在 FPGA 单元中，通过 FPGA 主芯片处理采集的数字信号，并对该芯片进行配置，配置情况如图 2 所示。

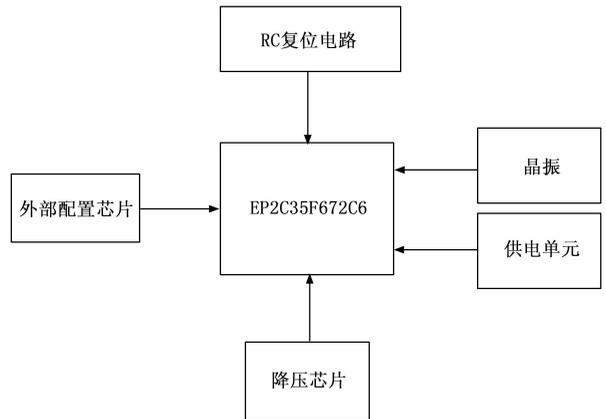


图 2 FPGA 主芯片配置情况

为该芯片配置 50 MHz 晶振，将其作为振荡器产生时钟，为芯片提供采样时钟频率。通过内核电源 VCCIN 实施供电，首先利用降压芯片 LM7805 将电压降至 5 V，接着利用降压芯片 LM2676 将电压降至 3.3 V，最后利用降压芯片 LM1117 将电压降至 1.2 V，最终实现芯片供电。为芯片配置 RC 复位电路，作为其复位模块<sup>[9]</sup>。配置 EPCS16 作为 EP2C35F672C6 的外部配置芯片，用于程序的存储，其存储空间为 16, 777, 21 6 Bits，通过 AS 配置模式对该存储器进行配置。

在帧缓存单元中，通过外部存储器实现图像数据的帧缓存。选用的外部存储器为 SDRAM 存储器，具体型号为 IS42S1600。

在 VGA 显示单元中，通过 VGA 接口、D/A 转换芯片实现缓存图像数据的显示。其中 D/A 转换芯片负责将 EP2C35F672C6 输出的数字信号转换为模拟数据。

### 1.1.2 定位基站模块设计

在超宽带技术模块中，设计超宽带运动目标定位所需的天线、定位基站、移动节点，完成超宽带定位基站的设计。

发射天线（接收天线）、接收天线使用的 UWB 收发芯片型号为 DW1000，将其传输速率调整为 6.8 Mbps，频段定为较低频段的 2 号频段（带宽是 500 MHz，中心频率是 3.99 GHz），以实现较大的运动目标定位范围。利用 SMA 头连接 DW1000 与 UWB 天线，天线保持竖直。

在发射天线（接收天线）、接收天线的工作中，还需要设计基站与移动节点，其中基站放置于运动目标跟踪与定位的场地周围，而移动节点则安装于运行目标上。定位基站的结构设计如图 3 所示。

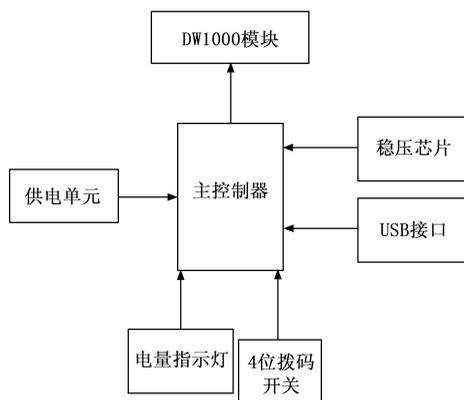


图 3 定位基站的结构设计

其中主控制器选用 STM32F103，其与 DW1000 模块之间的通信通过 SPI 接口来完成。采用 18650 锂电池来供电，以方便定位基站的部署，并配置电量指示灯与稳压芯片。用户可以通过 4 位拨码开关对各基站编号（ID）进行配置，可支持 16 个 ID。并为基站配置 USB 接口以便对基站进行调试。在使用定位基站时，可以将其安装于墙壁或三脚架上。

移动节点的设计具体如下：同样将 STM32F103 作为其主控制器，则其与 DW1000 模块之间的通信也是通过 SPI 接口来完成的。直接使用 3.3 V 电源实现其供电。利用馈线连接移动节点与 UWB 天线，天线保持竖直。

依据实际情况确定基站与移动节点的实际投入个数。其中基站通过集中式组网方式完成动态组网。在这种组网方式下，应用 MDS-MAP 算法实施坐标解算，以完成组网。

## 1.2 软件设计

### 1.2.1 图像预处理方法

在图像预处理模块中，对采集图像实施一系列预处理，以增强图像中有用的信息，具体包括图像灰度化处理、形

态学滤波处理。

在图像灰度化处理中，使用的处理方法是加权平均法，也就是对 RGB 3 个颜色分量分别赋予不同的权值，对加权后进行求取<sup>[10]</sup>。灰度值的计算公式具体如下：

$$\epsilon = 0.3R + 0.95G + 0.11B \quad (1)$$

通过形态学滤波处理能够消除噪声，并实现空洞的填补。分别实施开运算操作与闭运算操作。其中开运算操作是先实施腐蚀操作，再实施膨胀操作。在确保不明显改变图像形状和面积的基础上，能够去除一些细小孤立的点，将纤细点处的区域分离开来。该操作的表达式如下式：

$$\nu = \epsilon(\omega \ominus \nu) \oplus \nu \quad (2)$$

式（2）中  $\nu$  指的是开运算结果图像； $\omega$  是指处理前的图像； $\nu$  指的是结构元素。

闭运算操作是先实施膨胀操作，再实施腐蚀操作。通过闭运算操作能够将裂缝填平，连接邻近目标<sup>[11]</sup>，完成图像的预处理，表达式如下式：

$$\vartheta = (\omega \oplus \nu) \ominus \nu \quad (3)$$

通过上述步骤完成采集图像的预处理，便于后续的运动目标跟踪与定位。

### 1.2.2 基于 TLD 的运动目标跟踪方法

通过对图像进行预处理可以有效调整图像的清晰度，使目标在图像中更加明显和突出，提高运动目标跟踪的有效性。在运动目标检测与跟踪模块中，设计一种 TLD 运动目标跟踪算法。在该算法中，在运动目标移动的过程中，TLD 模型会不断地学习被跟踪的运动目标，并获得目标在距离、景深、角度等层次上的变化，并对其进行持续的学习和识别，即可实现良好的运动目标跟踪效果。通过该算法可以同时实现多个运动目标的追踪。

TLD 运动目标跟踪算法是一种运动目标检测与跟踪相结合的算法，能够实现自适应从而达到精准地跟踪效果<sup>[12]</sup>。算法由综合单元与 TLD 模型构成，其中 TLD 模型由跟踪器、检测器、学习单元构成，同时，跟踪器和检测器是平行工作的，它们的运行结果会被传送到学习单元，然后再对运动目标进行追踪和检测，并且对其进行实时的更新，以确保在运动目标外观产生变化的情况下也能很好地实现其跟踪。该算法的具体运行流程如下：

1) 在初始跟踪阶段，将图像预处理结果向检测器传输，由检测器实施图像分析与检测。

2) 但在检测过程中，检测器可能会出现错误，这时，学习单元就会对错误进行修正。学习单元的作用是为检测器提供正、负两个样本集，利用这些样本对检测器进行评估和分析，然后将分析结果传送给综合单元，由综合单元对其进行综合，从而对目标的位置信息进行预测<sup>[13]</sup>。

综合单元与 TLD 模型相结合，能够为设计算法带来适用性强、可靠的效果。在检测器中，为判定正负样本，输入预处理后的图像信息，给出目标模型，具体如下式：

$$N = \vartheta\{q_1^+, q_2^+, \dots, q_m^+, q_1^-, q_2^-, \dots, q_n^-\} \quad (4)$$

式(4)中 $q^+$ 、 $q^-$ 指的是归一化处理以后的图像块,均会随着跟踪而出现数量上的增加。

检测器由3个子模块构成,分别为最近邻检测子模块、集合检测子模块、方差检测子模块。当被检测的图像进入检测器后,需要通过以上3个子模块,首先通过方差检测子模块,最后通过最近邻检测子模块。

经过上述各子模块的顺序后,就可以得到前景目标的图像。其中,在方差检测子模块中,需要先计算被检测图像块的方差,并设置一个阈值,将其设置为方差的二分之一,当方差计算结果大于该阈值,说明通过了方差检测,反之则直接抛弃<sup>[14]</sup>。在集合检测子模块中,采用的分类方法为随机森林检测法,因此该子模块又可以被称为随机森林检测子模块。

在最近邻分类检测子模块中,归一化处理在上一子模块中被执行,然后匹配到目标模型。如果匹配成功,那么判定当前图像块中包含有被跟踪目标。该模块按以下方式运行:

- 1) 归一化图像块,将尺寸设置为 $15 \times 15$ ;
- 2) 对目标模型与归一化后图像块的相关相似度实施计算,计算公式具体如下:

当新产生了一个经过归一化处理的图像块 $q$ ,计算 $q$ 与目标模型 $N$ 的相关相似度,具体公式如下:

$$S^E(q, N) = \frac{S'^E}{S'^E + S''^E} \quad (5)$$

式(5)中 $S'^E$ 指的是 $q$ 与目标模型 $N$ 的最近邻正相似度; $S''^E$ 是指 $q$ 与目标模型 $N$ 的最近邻负相似度。

如果相关相似度符合下面的公式,那么这个图像就是一个正样本,反之,这个图像就是一个负样本。

$$S^E(q, N) > \chi \quad (6)$$

式(6)中, $\chi$ 表示设置阈值。

在移动靶标翻转或伸展引起的形变过程中,需要对其目标模型 $N$ 进行更新。依次经过以上三个子模块的图像区域,将其图像信息存储到 $dbb^{[15]}$ 。跟踪模块采用了BF光流和NCC跟踪失败检测两种方法。

BF光流算法是将前一帧中运动目标的像素点 $a$ 和均匀抽样后的特征点相结合,对下一帧中的运动目标和位置 $b$ 点进行预测。然后进行向前方向跟踪,直接从上一帧到下一帧中的目标点,并获得被标记为 $c$ 的第3个位置信息点。这样就可以得到两条前进和后退的路线,并将 $c$ 和 $a$ 进行对比。当距离大于设置的阈值,则认为前向跟踪行为是正确的,此时已经可以抛弃一部分跟踪并不准确的点。

接着进入到NCC匹配中,通过NCC跟踪失败检测法对 $a$ 点邻近的 $10 \times 10$ 的图像块与 $a$ 点预测出的跟踪结果所邻近的 $10 \times 10$ 的图像块实施模板匹配,获取匹配相似度,选择匹配相似度大于中值的点作为继续使用的跟踪点<sup>[16]</sup>。

在此基础上,根据所选取的跟踪点,对下一帧中目标盒子的尺寸和位置进行预测。归一化处理预测点所对应的

图像块尺寸,并将其按比例缩小到 $15 \times 15$ ,然后进行分类,计算各图像块和目标模型的保守性,如果它超过设定的阈值,则判定该跟踪是有效的。

在学习单元中,通过P-N学习模块实现检测器的错误的识别并标出。P-N学习模块中含有3个部分,分别为分类器训练、生成样本、检查一致性。

综合单元主要负责计算重叠度,以度量两个图像块在空间域上的相似度。重叠度计算公式具体如下:

$$\zeta = \chi \frac{\zeta_{50\%}}{\zeta_{50\%} + \zeta} \quad (7)$$

式(7)中 $\zeta_{50\%}$ 指的是50%最近邻重叠度; $\zeta$ 是指最近邻重叠度。

运行该算法前,需要实施初始化处理,具体初始化步骤如下。

#### 1) 选定跟踪块:

在第一帧中,采用一个文件来设定初始跟踪图像区域的尺寸和坐标,或者用鼠标来标示跟踪目标的边界框。

#### 2) 扫描窗口:

对整个图像进行扫描,即以运动目标的图像分块为基础,经过尺度转换得到所需的图像。在对一个窗口进行扫描时,将进行了尺度转换后的图像作为一个扫描窗口,并设定了如下的扫描原则:以左上方为起始点,步长为该图像块宽度的0.1倍,由左到右,按0.1倍的高度从上到下进行扫描,直到覆盖整个图像为止<sup>[17]</sup>。

在此基础上,确定了最小扫描窗口的大小,得到了一系列的图像分块。扫描全部图像块后对它们的重叠度进行计算。

#### 3) 初始化 boxes:

在整幅图像中寻找与目标图像块 $box$ 最小距离的10个窗口,其中最小距离即为当前帧中目标的位置,以此作为跟踪结果,定义如下式:

$$D_{\min} = \frac{\zeta_{\max} \cap S_{\max}^R}{\zeta} \quad (8)$$

式(8)中, $\zeta_{\max}$ 表示目标图像块盒的最大交叠程度; $S_{\max}^R$ 表示与目标图像块盒的最大相似性。

把10个窗口合并到 $good\_boxes$ 容器中,重叠度小于0.2的图像分块都被放进 $bad\_boxes$ 容器中,这样就可以全部过滤。使用 $BBhull$ 函数求出了扫描窗口的最大边缘。

#### 4) 初始化分类器:

当一幅图像很大,经过一次扫描后,会形成大量的块状图像,这就要求对图像进行分类。针对TLD的运动目标跟踪算法,将3种分类器作为检测器的3个子模块进行串联。

从第2帧起,对整个图像块进行3种分类,只有将这些分类器都通过,才能确定有应用价值的图像块。

首先,初始化方差和最近邻分类器,然后,针对第一帧获得的所有图像块,标准化过程和辐射转换过程处理包

含移动对象的相应的图像块, 并且存储在方差分类器中, 作为正样本集。在这种情况下, 可以将剩余的图像块看作是负标记<sup>[18]</sup>。在初始集分类器中, 抽取正样本标记的特征值, 在初始化时将其作为初值, 进行样本训练和后验概率的初始化。通过运动目标检测与跟踪算法, 初步判断目标区域, 从而实现运动目标的精确定位。

### 1.2.3 基于超宽带技术的运动目标定位方法

超宽带技术是一种无线通信的技术, 主要通过非连续、短时的脉冲信号进行通信, 在极短的时间内发送大量的低功率脉冲, 实现高速的数据传输。它的频率范围非常广泛, 可以达到几百兆赫兹甚至几个千兆赫兹, 因此被称为“超宽带”。为此, 基于 1.2.2 小节的定位基站模块, 设计一种基于超宽带技术的运动目标动态定位算法, 依据运动目标的跟踪结果实现运动目标的高精度定位。

该算法采用的超宽带天线组合方式为改进后的单发双收。单发双收就是利用一个发射天线  $B$  向探测区域直接发射脉冲信号  $a(t)$ , 并利用 2 个接收天线  $W_1$ 、 $W_2$  接收运动目标的反射回波  $y_{Ri}(t)$ 。通过处理两个方向的  $y_{Ri}(t)$ , 获取各方位的对应径向位置, 利用余弦定理完成运动目标定位, 也就是依据三圆定位原理完成运动目标的定位。为实现快速定位功能, 在改进中采用超宽带收发合一技术, 直接共用一个发射天线与接收天线, 即  $B = W_1$ , 并以其为原点构建坐标系。此时通过二圆交汇定位即可完成超宽带技术下的运动目标动态定位。在二圆交汇定位坐标系中, 构建如下方程组:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 = U_1^2 \\ (C - X)^2 + Y^2 = U_2^2 \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中  $(X, Y)$  是运动目标定位结果;  $U_1$  是指目标与发射天线  $B$  的距离即目标与接收天线  $W_1$  的距离;  $(C, 0)$  是  $W_2$  的坐标;  $U_2$  指的是目标与接收天线  $W_2$  之间的距离<sup>[19]</sup>。则运动目标的具体坐标为:

$$\begin{cases} X = \frac{C^2 - U_2^2 + U_1^2}{2C} \\ Y = \pm \sqrt{U_1^2 - \frac{C^2 - U_2^2 + U_1^2}{2C}} \end{cases} \quad (10)$$

在该超宽带技术运动目标动态定位算法中, E1 区域是发射天线  $B$  即接收天线  $W_1$  的探测区域, E3 是接收天线  $W_2$  的探测区域, 而 E2 则是 E1 与 E3 重叠的区域。当运动目标位于 E1 区域时, 发射天线  $B$  即接收天线  $W_1$  能够实现运动目标的有效检测, 当运动目标位于 E3 区域时, 接收天线  $W_2$  能够实现运动目标的有效检测, 而当运动目标位于 E2 区域时,  $B = W_1$  和  $W_2$  均能够实现运动目标的有效检测。则通过探测 E2 区域的运动目标即可获得两个方向径向距离的对应时延, 其中  $B = W_1$  的时延用  $\delta_1$  来表示,  $W_2$  的时延用  $\delta_2$  来表示。通过  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  这两个时延即可计算  $U_1$  与  $U_2$ , 彻底实现对于运动目标的定位。其中将 E2 区域称为超宽带运动目标定位区<sup>[20]</sup>。其中  $U_1$  的计算公式具体如下:

$$U_1 = D_{\min} \cdot \frac{\delta_1}{2} \quad (11)$$

$U_2$  的计算公式具体如下:

$$U_2 = D_{\min} \cdot \left( \delta_2 - \frac{\delta_1}{2} \right) \quad (12)$$

依据公式 (9) ~ (12) 即可获取运动目标的定位结果, 就此实现基于超宽带技术的运动目标跟踪定位。

## 2 系统测试

### 2.1 实验平台搭建

对于设计的基于超宽带技术的运动目标跟踪高精度定位系统, 搭建实验平台对其性能进行测试。搭建的实验平台包括四旋翼无人机与 PC 机。

其中 PC 机的配置情况具体如下: 操作系统: Ubuntu16.0; cpu 型号: Inter (R) Core (TM) i7-870; 显卡: Nvidia 1080TiTan 12 GB; 内存: 64 GB; 软件环境: Python3.6、TensorFlow、Pytorch。

实验中的四旋翼无人机尺寸为  $159 \times 203 \times 56$  mm, 速度最高可达 10 m/s, 以该无人机为运动目标, 实验场地为室外, 背景为室外环境, 包括天空、树木、房屋等。

### 2.2 实验设计

根据 MT9M011 摄像头与四旋翼无人机的距离共设计两个实验, 第一个实验是中距离目标跟踪与定位实验, 运动目标的飞行高度为 13 m, 摄像头与四旋翼无人机之间距离约为 15 m。第二个实验是远距离目标跟踪与定位实验, 运动目标的飞行高度为 20 m, 摄像头与四旋翼无人机之间距离约为 30 m。实验过程中保持摄像头稳定, 硬件平台保持固定。

在两个实验中, 共设置四种运动目标跟踪与定位的运动场景, 第一种是四旋翼无人机沿着  $u$  轴运动, 第二种是四旋翼无人机沿着  $v$  轴运动, 第三种是沿着斜线运动, 第四种是沿着 S 型运动。

### 2.3 实验过程

利用设计系统对实验运动目标实施检测、跟踪与定位。首先利用图像采集模块实施四种实验中运动目标跟踪与定位中的图像采集, 并将采集数据作为实验数据集, 对设计系统的性能进行测试。实验数据集的数据量为 2.5 GB, 共含 9 856 帧图像数据, 其中第一个实验采集的图像帧数为 3 536 帧, 第二个实验采集的图像帧数为 6 120 帧。

对实验数据集实施图像灰度化处理以及形态学滤波处理。接着利用设计的 TLD 运动目标跟踪算法实施运动目标检测与跟踪。最后利用设计的运动目标动态定位算法实施四旋翼无人机的高精度定位。其中在第一个实验中, 第一种运动场景的运动目标定位结果如表 2 和图 4 所示。

其中在定位中, 共设置了 4 个 UWB 基站, 各 UWB 基站的设置坐标如下:

- 1) UWB 基站 A: (4, 0, 0);
- 2) UWB 基站 B: (14, 16, 0);

表 2 运动目标定位结果

序号	时间	定位结果/m
1	00:05	(-18.42, -14.23, 13.00)
2	00:34	(-34.52, -32.58, 13.00)
3	01:25	(-69.52, -71.20, 13.00)
4	01:57	(-82.32, -84.52, 13.00)
5	02:21	(-154.20, -148.36, 13.00)
6	02:45	(-168.52, -159.52, 13.00)
7	02:57	(-186.32, -182.57, 13.00)
8	03:14	(-218.52, -210.78, 13.00)

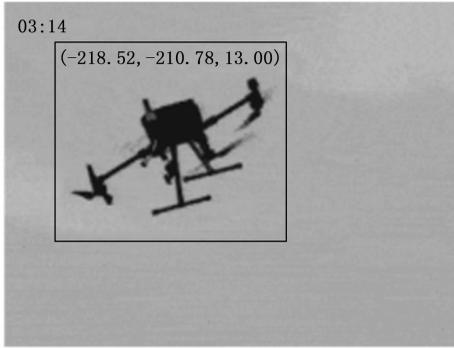


图 4 第 1 934 帧运动目标定位结果

- 3) UWB 基站 C: (10, 16, 0);
- 4) UWB 基站 D: (0, 0, 0).

首先对设计系统在各实验中以及在各运动场景下的跟踪错误率进行测试。跟踪错误率越低表示设计系统的跟踪准确度越高。跟踪错误率的计算公式具体如下:

$$W_E = \frac{\sum \frac{R_T - W_Q}{W_Q}}{\rho} \quad (13)$$

式 (13) 中  $R_T$  指的是跟踪窗口实际面积;  $\rho$  是视频帧数;  $W_Q$  指的是运动目标面积。

对设计系统在各实验中以及在各运动场景下的定位误差进行测试。在测试中, 将柑橘果园机器人仿生眼的目标跟踪与定位系统与基于区块链技术的地面移动目标智能跟踪系统作为对比测试系统, 共同进行测试。在测试, 分别用系统 1 (文献 [3] 系统)、系统 2 (文献 [4] 系统) 表示这两种对比系统。

## 2.4 实验结果分析

### 2.4.1 运动目标跟踪错误率实验结果分析

设计系统与系统 1、系统 2 在  $u$  轴运动场景 (场景 1)、 $v$  轴运动场景 (场景 2)、斜线运动场景 (场景 3)、S 型运动场景 (场景 4) 四种运动场景下的第一次跟踪错误率测试结果如表 3 所示。

根据表 1 测试结果, 在中距离目标跟踪与定位实验中, 4 种运动场景下设计系统的跟踪错误率均低于 0.60%, 在 3 种测试方法中最低。而系统 1、系统 2 的跟踪错误率在四种

运动场景下均高于设计系统, 其中系统 2 的跟踪错误率最高。在四种运动场景中, 沿着 S 型运动时的跟踪错误率最高, 沿着斜线运动时的跟踪错误率次之, 沿着  $u$  轴与  $v$  轴运动时的跟踪错误率较低。

表 3 第一个实验的跟踪错误率测试结果

运动场景	跟踪错误率/%		
	设计系统	系统 1	系统 2
1	0.25	1.24	1.38
2	0.29	1.02	1.50
3	0.37	1.52	1.85
4	0.58	2.95	3.52

为了避免测试结果的偶然性, 对设计系统与系统 1、系统 2 进行第二次实验, 四种运动场景下的跟踪错误率测试结果如图 5 所示。

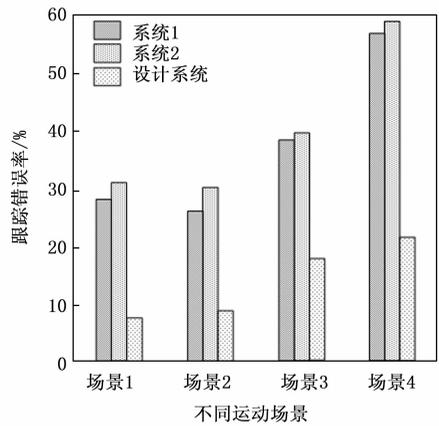


图 5 第二个实验的跟踪错误率测试结果

在远距离目标跟踪与定位实验中, 可以看到设计系统与系统 1、系统 2 的跟踪错误率相比中距离目标跟踪与定位实验均有一定上升, 其中设计系统的增幅大于系统 1、系统 2。比较三种测试系统可以发现, 在四种运动场景中, 仍然是设计系统的跟踪错误率最低, 不超过 2.4%, 同时比较四种运动场景可以发现, 仍然是沿着 S 型运动时的跟踪错误率最高。

### 2.4.2 运动目标定位误差实验结果分析

由于沿着 S 型运动时的跟踪错误率最高, 因此, 测试三种系统在中距离目标跟踪与定位实验中沿着 S 型运动时的运动目标定位误差, 其中路线弯折处的运动目标定位误差测试结果如图 6 所示。

根据上图测试结果, 在中距离目标跟踪与定位实验中, 沿着 S 型运动时, 设计系统的路线弯折处的定位误差最低, 与四旋翼无人机的飞行路线最为贴合, 而系统 1、系统 2 路线弯折处的定位误差均高于设计系统。

三种测试系统在远距离目标跟踪与定位实验中沿着 S 型运动时路线弯折处的运动目标定位误差测试结果如表 4 所示。

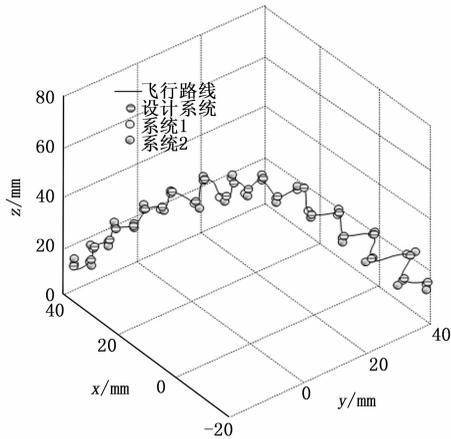


图 6 路线弯折处的运动目标定位误差

表 4 路线弯折处的运动目标定位误差

测试项目	运动目标定位误差/m		
	设计系统	系统 1	系统 2
最低误差	(0.002 3, 0.001 2, 0.000 5)	(0.005 7, 0.006 5, 0.003 2)	(0.003 5, 0.004 5, 0.000 25)
最高误差	(0.006 5, 0.003 9, 0.000 42)	(0.009 8, 0.001 02, 0.006 8)	(0.009 9, 0.008 7, 0.000 65)
平均误差	(0.003 6, 0.002 2, 0.001 6)	(0.007 5, 0.008 0, 0.004 5)	(0.004 8, 0.005 7, 0.0039)

根据表 4 测试结果，在远距离目标跟踪与定位实验中，三种系统的运动目标定位误差均高于中距离目标跟踪与定位实验，其中设计系统在沿着 S 型运动时的运动目标定位误差最低，最低仅为 (0.002 3, 0.001 2, 0.000 5)，而系统 1、系统 2 的运动目标定位误差均高于设计系统，表明设计系统具有较高的定位可靠性。

### 3 结束语

为了解决运动目标跟踪与定位误差大的问题，设计了一种基于超宽带技术的运动目标跟踪高精度定位系统。设计了由 FPGA 单元、VGA 显示单元、帧缓存单元以及图像采集单元构成的图像采集模块，实现了运动目标图像的连续采集。在此基础上，通过 TLD 运动目标跟踪算法，获取运动目标在距离、景深、角度等层面的改变并不断学习、识别，既实现了多个运动目标的追踪，也实现了自适应地运动目标跟踪，提升了跟踪精度。基于超宽带技术与穿墙探测雷达的运动目标动态定位算法，依据运动目标的跟踪结果实现了运动目标的高精度定位。实验结果表明，设计系统的定位误差最小，具有良好的定位能力。

### 参考文献：

- [1] 蔡苗红, 伍光新, 姚 元, 等. 双多基地协同定位与跟踪 [J]. 现代雷达, 2022, 44 (8): 75-81.
- [2] 熊 川, 赵海盟. 基于像素分类的复杂场景中运动目标跟踪算法 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (3): 241-245.
- [3] 陈继清, 徐关文, 强 虎, 等. 柑橘果园机器人仿生眼的目标跟踪与定位系统 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (27): 11166-11172.
- [4] 宗 华. 基于区块链技术的地面移动目标智能跟踪系统设计 [J]. 电子设计工程, 2022, 30 (7): 170-174.
- [5] 李鹏飞, 田 瑜, 张 蕾, 等. 双目视觉运动目标跟踪定位系统的设计 [J]. 测控技术, 2018, 37 (4): 72-77.
- [6] 苏 昂, 陆伟康, 张仕林, 等. 基于目标运动模型的无人机对地视觉目标跟踪 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (14): 243-251.
- [7] 吕 晨, 程德强, 寇旗旗, 等. 基于 YOLOv3 和 ASMS 的目标跟踪算法 [J]. 光电工程, 2021, 48 (2): 70-80.
- [8] 侯 淋, 杨顺华. 光电雷达多目标跟踪技术发展分析 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (8): 65-70.
- [9] 程淑红, 王 迎. 遮挡和光照变化下的单鱼目标跟踪 [J]. 计量学报, 2021, 42 (2): 171-177.
- [10] 王忠立, 李文仪. 基于点云分割的运动目标跟踪与 SLAM 方法 [J]. 机器人, 2021, 43 (2): 177-192.
- [11] 尚欣茹, 温尧乐, 奚雪峰, 等. 孪生导向锚框 RPN 网络实时目标跟踪 [J]. 中国图象图形学报, 2021, 26 (2): 415-424.
- [12] 许营坤, 陈天阳, 陈胜勇, 等. 一种融合运动特征嵌入的多目标分割跟踪算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44 (6): 1304-1310.
- [13] 王德鑫, 常发亮. 六足机器人动态目标检测与跟踪系统研究 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (12): 180-185.
- [14] 张立国, 马子荐, 金 梅, 等. 基于非局部感知网络的运动目标跟踪方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (4): 376-384.
- [15] 张玉涛, 张梦凡, 史学强, 等. 基于深度学习的井下运动目标跟踪算法研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (10): 151-155.
- [16] 马剑飞, 丁 凯, 颜冰, 等. 基于水下运动平台的磁性目标跟踪与特征反演 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (9): 1951-1961.
- [17] 戴煜彤, 陈志国, 傅 毅. 相关滤波的运动目标抗遮挡再跟踪技术 [J]. 智能系统学报, 2021, 16 (4): 630-640.
- [18] 曹海源, 黎 伟, 冯苏茂. 基于方位角测量的地面运动目标定位与精度分析 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (4): 105-110.
- [19] 何 敏, 回丙伟, 易梦妮, 等. 基于目标增强和视觉跟踪的红外运动点目标半自动标注算法 [J]. 红外技术, 2022, 44 (10): 1073-1081.
- [20] 王 森. 被动定向浮标阵卡尔曼滤波目标跟踪研究 [J]. 声学技术, 2023, 42 (1): 127-130.