

# 基于光电成像技术的运动员垂直 弹跳高度测试

邓雯, 马卫红

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 针对运动员弹跳过程持续时间短, 弹跳位置相对不固定, 弹跳高度测试操作复杂的问题, 提出一种基于线阵光电成像技术的运动员垂直弹跳高度测试方法; 首先构建大视场垂直弹跳高度测试系统, 线阵 CCD 相机进行实时获取, 得到目标弹跳轨迹图像; 然后对目标弹跳轨迹图像进行图像分析和处理, 高精度提取弹跳特征点, 从而获得运动员垂直弹跳的运动时间; 最后依据运动学公式, 实现运动员垂直弹跳高度的准确测试; 进行多组实验并分析实验数据, 结果表明在 1 500 mm 的弹跳测试范围内, 实验相对误差范围在 3% 以内, 证明了该方法的可行性。

**关键词:** 光电成像技术; 垂直弹跳高度; 目标弹跳轨迹图像; 线阵 CCD; 特征点提取

## Measurement of Vertical Bounce Height of Athletes Based on Optoelectronic Imaging Technology

DENG Wen, MA Weihong

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of short duration in athletes' jumping process, relatively unstable jumping position and complicated operation in jumping height test, a vertical jumping height test method for athletes based on linear photoelectric imaging technology is proposed. Firstly, a large field of view vertical bounce height test system is constructed, and the real-time bounce trajectory image of the target is obtained by the linear CCD camera. Then, the image of the target bouncing trajectory is analyzed and processed, and the bouncing feature points are extracted with high precision to obtain the movement time of the athlete's vertical bouncing; Finally, the accurate test of athletes' vertical bounce height is realized by the kinematics formula. Several groups of experiments are carried out, and the experimental data are analyzed. The results show that the relative error of the experiment is within 3% in the bounce test range of 1 500 mm, which proves the feasibility of this method.

**Keywords:** optoelectronic imaging technology; vertical bounce height; image of target bounce trajectory; linear array CCD; feature point extraction

## 0 引言

垂直弹跳在体育运动中是最常见的基本运动之一,也是评价人体下肢爆发力和弹跳能力的一种有效手段<sup>[1]</sup>,不但被用于测量排球、田径、足球、篮球、游泳等项目运动员的运动潜力,也被广泛应用于体能评估和国民体质测试中<sup>[2]</sup>。随着时代不断进步,体育运动一直在高速发展,运动员任何素质发展的不均衡,都有可能对运动员及运动员成绩产生不利影响。运动员垂直弹跳高度的获取方法有很多,因为所用的设备及计算方式各不相同,所以测量的难度及精度也各不相同。目前常用的方法包括:重心法<sup>[3]</sup>、腰点法<sup>[4]</sup>、腾空时间法<sup>[5]</sup>、离地速度法<sup>[6]</sup>、地面发力积分法<sup>[7]</sup>、摸高跳测试法<sup>[8]</sup>。重心法是通过动作分析系统获得人体重心的位置,进而计算垂直弹跳高度;腰点法通过腰部

或骨盆某点(被近似看做重心点)的位置获得高度;腾空时间法根据人体纵跳腾空时间计算最大腾起高度;离地速度法通过计算人体离地时刻的速度,进而计算最大垂直弹跳高度;地面反力积分法是利用地面反力,从而获得加速度,将时间作 2 次积分,求出人体在移动过程中的位移量,然后根据位移求出垂直弹跳高度。万祥林<sup>[9]</sup>等人的研究结果显示,计算垂直弹跳高度时,腰点法、腾空时间法、离地速度法和地面反力积分法都存在着一一定的系统误差。这些方法因测试设备、动作方式或计算方法的不同使获得的结果存在一定差异,因此需要选择测试准确且方便快捷的垂直弹跳测试方法来进行运动员垂直弹跳高度的测试。

针对运动员弹跳过程持续时间短,弹跳位置相对不固定,弹跳高度测试操作复杂的问题,本文将线阵光电成像技术应用到运动员弹跳高度的测试中,为弹跳高度的高精

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-06-06。

作者简介: 邓雯(1997-),女,硕士研究生。

马卫红(1976-),副教授。

引用格式: 邓雯,马卫红. 基于光电成像技术的运动员垂直弹跳高度测试[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 94-100.

度自动检测提供新方案。该测试方法采用柱面透镜扩大采集视场范围, 线阵 CCD 相机进行实时获取, 根据系统工作原理, 构建图像采集系统, 得到目标弹跳轨迹图像, 高精度获得图像特征点, 计算得到运动员垂直弹跳高度, 从而验证该方法的可行性。

## 1 垂直弹跳高度测试原理

图像采集系统主要是由上位机、线阵 CCD 相机、光学镜头、柱面透镜、照明系统及三脚架组成。运动员垂直弹跳高度图像采集系统结构示意图如图 1 所示。本文利用光学镜头与柱面透镜相结合的方法, 在一维线性光敏面上对三维空间中的弹跳目标进行成像。柱面透镜能够将点成像为成线, 扩大采集视场范围, 保证运动员的弹跳在整个视场范围内。测试时灯光环境弱, 为了使运动员脚踝骨处的反光标志点在弹跳范围内成像到线阵相机的光敏面上, 需要有背景光源的加入, 通过光源照明使线阵 CCD 的敏感面元对单行图像进行扫描和采集, 按照扫描时间的先后顺序, 对采集的图像做拼接处理, 即可实时获取弹跳轨迹图像。

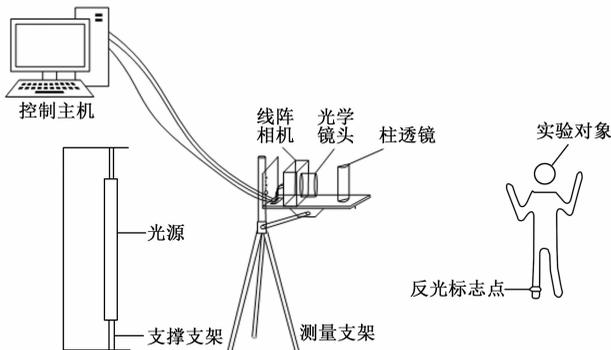


图 1 垂直弹跳高度图像采集系统结构示意图

在此基础上, 由图像采集卡将目标弹跳轨迹图像的持续信号输入到上位机, 然后经过图像处理与分析, 得到单像素宽度的弹跳轨迹图像, 高精度获得目标弹跳轨迹图像特征点坐标值, 结合线阵相机行频, 计算出运动员经过两个特征点之间的时间。最后依据运动学公式, 计算得到运动员的垂直弹跳高度。公式 (1) 为两个图像特征点之间的时间  $\Delta t$ , 公式 (2) 为运动员的垂直弹跳高度。

$$\Delta t = \frac{1}{f} \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$h = \frac{1}{2} g (\Delta t)^2 \quad (2)$$

式中,  $f$  为线阵相机的行频,  $t_1$  为目标落地点的时刻,  $t_2$  为目标最高点的时刻,  $h$  为运动员目标垂直弹跳高度。

## 2 图像处理与分析

### 2.1 图像预处理

通过线阵 CCD 相机直接采集到的目标弹跳轨迹图像, 受天气、光照、阴影和复杂环境等因素的影响, 难以实现对弹跳轨迹影像的有效识别和分离。目标点像素坐标的提

取一定会受到这些固有背景的影响。对图像进行预处理, 能够使最初的图像中所包含的数据量变小, 从而在处理过程中, 提高整个图像处理程序的运行速度。当前比较常用的方法有模板匹配、光流法、帧间差分法、背景差分法<sup>[10]</sup>等, 这些方法较为成熟并得到广泛应用。

由于运动员垂直弹跳高度测试是在静态背景下对目标进行检测, 无需使用固定的模板, 因此模板匹配不适合对图像进行预处理; 时间发生变化, 但是目标弹跳轨迹成像不发生变化, 因此光流法不适合对图像进行预处理, 同时该方法运算量大, 抗噪差; 帧间差分法取相邻的序列图像作为当前场景中的背景, 采用帧间差分来检测图像中的变化, 然后再对其进行滤波等后处理来实现对运动目标的识别, 因为本文使用了线阵 CCD 相机, 所以在实际应用中较难实现。背景差分法操作简单, 计算量小, 定位精度高, 通常对移动目标有最为完整的描述。在进行图像采集时, 背景是固定不变的, 背景差分法是一种较为有效的处理方法, 因此本文选择背景差分法来对运动目标进行检测, 消除固有背景对目标弹跳轨迹图像的影响。

背景差分法指的是将两张具有相同特点的图像相比较, 去掉同一区域, 并将具有不同灰度的区域与原始图像进行分离, 所得的信息就是运动目标。背景差分法适合于静态背景下对运动目标进行检测。其实现如公式 (3) 所示:

$$f_c(x, y) = f_a(x, y) - f_b(x, y) \quad (3)$$

其中:  $f_c$  为背景差分后的弹跳轨迹图像,  $f_a$  为目标弹跳轨迹图像,  $f_b$  为背景图像。

因此采用背景差分法, 利用当前图像与背景图像的差分来检测目标弹跳轨迹, 如图 2 所示, 从图中观察到所得的差分图像对比度高, 效果较好。



图 2 背景差分弹跳轨迹图像

### 2.2 图像增强

为了改善图像的视觉效果, 减少图像中的噪声, 提高目标弹跳轨迹与背景的对亮度, 进行图像增强。常用的图像增强方法有空间域算法、频率域算法和形态学处理算法。

#### 2.2.1 空间域算法和频域算法

图像增强有空间域法和频域法两种。空间域法的增强方法是以图像中的像素为目标, 来提高图像的灰度值; 频域增强法是利用傅里叶变换公式, 通过对图像的光谱进行改进, 从而达到对期望光谱进行增强或抑制的目的。频域增强法的实现过程为:

1) 对需要增强的图像进行傅里叶变换的计算;

- 2) 把它乘以一个转移函数;
- 3) 对所得的结果进行傅里叶逆变换, 获得一幅增强后的图像。

通过构建不同的频率滤波器, 使得图像在频域的某个区域内的分量被抑制, 而不影响其他分量, 进而改变图像的频率分布, 来实现图像增强。在频域中, 同态滤波既能够压缩图像的亮度范围, 又能增强图像的对比度。一幅图像表达为  $f(x, y)$ , 该图像是由照度分量  $i(x, y)$  和反射分量  $r(x, y)$  所表示的, 即:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (4)$$

根据以上基本步骤, 对  $f(x, y)$  进行图像增强如下所示:

- 1) 对式 (4) 两边取对数, 即

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (5)$$

- 2) 对式 (5) 两边进行傅里叶变换, 即

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (6)$$

3) 设频域增强函数为  $H(u, v)$ , 将其对  $F(u, v)$  进行处理, 即

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (7)$$

- 4) 对得到的结果进行反变换到空域, 即

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (8)$$

- 5) 对上式两边取对数, 即

$$g(x, y) = \exp | h_f(x, y) | = \exp | h_i(x, y) | \cdot \exp | h_r(x, y) | \quad (9)$$

根据上述算法原理编写程序, 验证使用同态滤波进行图像增强的效果, 图 3 为同态滤波图像处理结果。同态滤波能够很好的增强高频分量, 但是也会导致图像中的噪声变多。用频率域滤波进行图像增强处理, 需要进行空域和频域之间的变换, 从而导致计算量变大, 所以将该方法应用到实际中, 效率可能难以保证。



图 3 同态滤波图像处理结果

尽管滤波算法技术易于使用, 并且在技术上相当成熟, 但是它的降噪效果并不理想, 而且适应性比较差, 因此在本文中该算法不适合进行图像增强。所以需要选择图像增强效果更好的算法, 滤波去噪, 并保持目标图像的原有轮廓, 从而得到目标弹跳轨迹。

### 2.2.2 形态学处理算法

形态学处理算法是一种基于图像结构和几何形状分析的非线性图像处理算法, 它通过结构元素 (structuring element) 定量地修正待处理图像的几何特征, 降噪性能好、

算法结构简单<sup>[11]</sup>。在很多方面都有应用, 如噪声抑制、图像识别方面。形态学处理算法包括 4 种基本运算: 膨胀、腐蚀、闭运算以及开运算。膨胀运算将颗粒内部的微小空洞进行填补, 并将目标轨迹的周边的背景点进行合并, 使其目标轨迹的像素变少, 从而使得边界向外扩展。腐蚀运算主要功能是去除目标轨迹边界上的噪音和毛刺, 使其目标轨迹的像素变少, 从而使得边界向里收缩<sup>[12]</sup>。A 是目标弹跳轨迹图像, B 是结构元素。式 (10) 为膨胀操作, 式 (11) 为腐蚀操作。

$$A \oplus B = \{x | [(B)_x \cap \tilde{A}]A\} \quad (10)$$

$$AB = \{x | [(B)_x]A\} \quad (11)$$

膨胀和腐蚀运算经常一起用于图像处理, 形态学开运算是在进行膨胀运算之前, 先对所获得的目标弹跳轨迹图像进行腐蚀运算, 闭运算则恰好相反<sup>[13]</sup>。形态学开运算主要是为了将灰度图像中小于结构元素矩阵的细小区域和孤立点滤除掉, 平滑目标弹跳轨迹图像的目标轮廓边缘。形态学闭运算主要是为了灰度图像中小于结构元素矩阵的空洞区域填充, 连接, 达到平滑目标弹跳轨迹图像的目标轮廓边缘的目的<sup>[14]</sup>。开、闭运算与膨胀、腐蚀运算相比, 目标图像的原有特性能够更好地得到保持<sup>[15]</sup>。B 对 A 进行开运算和闭运算, 其定义式分别为 (12)、(13):

$$A \circ B = (AB) \oplus B \quad (12)$$

$$A \cdot B = (A \oplus B)B \quad (13)$$

使用大小为 3 的直线型结构元素对差分目标弹跳轨迹图像进行形态学运算。

为了得出哪一种方法比较好, 进行了它们之间图像增强的对比, 使用不同的方法对其进行图像增强。

在主观评价方面, 可以通过人眼观察和评判图像, 但是容易受到环境、心境等影响。因此进行客观评价, 计算使用不同方法得出的峰值信噪比数据, 从而进行对比, 公式 (14) 为 PSNR 的数学表达式:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - f'(i, j))^2} \quad (14)$$

式中,  $f$  为图像增强前的目标弹跳轨迹图像,  $f'$  为图像增强后的目标弹跳轨迹图像。

表 1 为不同的图像增强算法图像质量评价。

表 1 不同的图像增强算法图像质量评价

	PSNR/dB
同态滤波	20.707 4
开运算	23.711 2
闭运算	23.707 4
开闭运算	24.306 5
闭开运算	23.935 4

通过表 1 可以发现, 开闭运算的峰值信噪比最高。因此综合考虑, 选择大小为 3 的直线型结构元素对目标弹跳

轨迹图像进行开闭运算处理, 如图 4 所示。



图 4 图像增强目标弹跳轨迹图像

### 2.3 图像分割

一幅目标弹跳轨迹图像通常由前景区域和背景区域组成, 图像分割的目的是将背景区域和前景区域分开, 将目标弹跳轨迹图像从背景中分离出来, 提高特征提取的准确性, 同时节省处理时间, 从而提高整个系统的性能。在图像分割中, 阈值分割是一种非常有效的方法。阈值分割是根据图像像素的灰度级来进行分割的, 需要选择适合的阈值。可以将图像中的前景和背景分离开来。将图像中每个像素的灰度级与阈值进行对比, 大于阈值的像素点分配大灰度值 (如 255), 小于阈值的像素点分配小灰度值 (如 0), 从而把目标与背景进行分割<sup>[16]</sup>。常用的分割算法有 K-means 聚类<sup>[17]</sup>、迭代式阈值分割算法<sup>[18]</sup>和最大类间方差法<sup>[19]</sup>。本节对 3 种图像分割算法的原理和有效性进行了分析和验证。

#### 2.3.1 K-means 聚类算法

K-means 聚类具有实现形式较简单, 线性计算复杂度低等优点。由于其优势而被广泛应用于工业、医学、军事等领域, 但也存在缺点: 对初始聚类中心选择敏感、易陷入局部最优等。

在实际应用中, 聚类是一类无监督算法, K-means 算法是一种典型的具有代表性的方法。K-means 聚类算法是根据  $n$  个样本的相似度, 对其进行聚合, 得到  $k$  个集合。特征相似性较高时说明是相同集合之间的样本, 当相似性比较低时, 说明是不同集合之间的样本。K-means 算法的实现过程是:

1) 首先, 以  $k$  个样本为初始平均向量, 其中  $k$  是要划分的集合的数目。

2) 计算每个样本到均值向量之间的欧式距离, 并将样本归类到均值向量与其相距最小的集合中。

3) 在该集中的平均向量为该集中的全部向量的平均值时, 将该集合的均值向量重新计算, 式 (15) 为计算公式:

$$u_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (15)$$

4) 若更新后的集平均向量与更新之前有差异, 则返回至第二步, 直至没有再更新各集的向量平均为止, 就视为该算法结束。

为验证 K-means 聚类算法的有效性, 按照算法原理, 对程序进行编写, 实现了对目标的分割, 图 5 为 K-means 聚类算法处理结果。K-means 算法要求预先给定  $k$  的取值,

但对于非监督的聚类问题, 其分类数目未知, 因此难以确定  $k$  的大小; 此外, 该方法受到聚类中心和孤立点等因素的影响, 容易造成图像分割不准确。



图 5 K-means 聚类算法处理结果

#### 2.3.2 迭代式阈值分割算法

迭代式阈值分割算法是一种不需要人为干预能够实现二值分割的算法。该方法的基本思想是: 首先确定一个估计值为初始阈值, 然后根据一定的策略对该估计值进行修正, 直至选取出一个满意的阈值为止。在此基础上, 提出一个新的阈值优化方法, 该方法不但收敛速度快, 而且每次迭代都能获得更好的阈值。该算法的具体流程如下:

1) 计算得到弹跳高度图像的最大灰度值  $I_{\max}$  和最小灰度值  $I_{\min}$ , 则初始阈值表示为:

$$T_k = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} \quad (16)$$

2) 根据计算得到的阈值,  $T_k$  将图像分为两个部分, 分别是目标区域和背景区域, 同时分别计算出目标区域和背景区域的灰度平均值  $I_m$  和  $I_b$ ;

3) 根据步骤 2), 对新的阈值  $T_{k+1}$  进行确定:

$$T_{k+1} = \frac{I_m + I_b}{2} \quad (17)$$

4) 如果  $T_k = T_{k+1}$ , 则所得即为阈值; 否则就会跳回 2), 进行重复继续进行运算。

为验证迭代式阈值分割算法的有效性, 按照算法原理, 对程序进行编写, 实现了对目标的分割。图 6 为迭代式阈值分割图像处理结果。该方法首先设置一个阈值, 将一幅图像划分为两部分, 然后在此基础上, 通过对阈值的不断优化, 也就是根据现有阈值来优化局部阈值, 而不是根据整幅图像来计算阈值, 可能造成图像分割不准确。



图 6 迭代式阈值分割法处理结果

#### 2.3.3 最大类间方差法

最大类间方差法, 又叫大津法, 简称 OTSU。该方法首先将图像分成两个部分, 即目标和背景, 当两者之间的类间方差达到最大时, 即可作为分割阈值。当背景与物体

之间的类间方差较大时，则表示两个成分之间的差异较大，容易被识别；而方差较小则表示二者差异较低，不容易被识别，存在分错的可能性。进行图像分割时，能够将目标弹跳轨迹与背景有效分割，因此采用最大类间方差法可以有效地降低错分的可能性，提高准确率。

将目标弹跳轨迹图像的总像素数量设置为  $N$  个，有  $n_i$  个灰度值大小为  $i$  的像素数，可以将计算出不同灰度值的概率表示为：

$$q_i = \frac{n_i}{N} \quad (18)$$

阈值  $T$  能够将图像划分为两个部分，一个是背景区域  $A$ ，另一个是目标弹跳轨迹区域  $B$ ，灰度值在  $0 \sim k-1$  的为背景区域  $A$ ， $k \sim L-1$  的为目标弹跳轨迹区域  $B$ 。式 (19) 和式 (20) 分别为  $A$  和  $B$  在图像中的概率：

$$\omega_A = \sum_{i=0}^{k-1} q_i = \omega(k) \quad (19)$$

$$\omega_B = \sum_{i=k}^{L-1} q_i = 1 - \omega(k) \quad (20)$$

区域  $A$  和  $B$  的平均灰度分别为：

$$u_A = \frac{1}{\omega_A} \sum_{i=0}^{k-1} i q_i = \frac{u(k)}{\omega(k)} \quad (21)$$

$$u_B = \frac{1}{\omega_B} \sum_{i=k}^{L-1} i q_i = \frac{u - u(k)}{1 - \omega(k)} \quad (22)$$

式中， $u$  是整幅图像的平均灰度：

$$u = \sum_{i=0}^{L-1} i q_i = \sum_{i=0}^{k-1} i q_i + \sum_{i=k}^{L-1} i q_i = \omega_A u_A + \omega_B u_B \quad (23)$$

以上的计算都是和阈值  $T$  有关的，可以得到两个区域总的方差：

$$\sigma^2 = \omega_A(T)(u_A(T) - u)^2 + \omega_B(T)(u_B(T) - u)^2 \quad (24)$$

当目标弹跳轨迹与背景这两个区域存在最大的方差，说明成功地进行了图像分割，则可确定阈值  $T$ ：

$$T_m = \max[\sigma^2(T)] \quad (25)$$

为验证最大类间方差法分割算法的有效性，按照算法原理，对程序进行编写，进行阈值分割<sup>[11]</sup>。得到的最终阈值是 127。该算法处理结果如图 7 所示，取得了较好的图像分割结果。该方法弥补了迭代算法求解阈值的不足，在整幅图像中计算类间方差，并将其最大的值作为阈值，从而使得图像分割结果更准确。同时，大津法具有较高的运算速率。因此综合考虑，选择最大类间方差法进行图像分割。



图 7 最大类间方差法处理结果

## 2.4 图像细化

图像分割后得到具有一定宽度，平滑且连续的弹跳轨

迹图像，进行图像特征点的提取，需要得到单像素连续的弹跳轨迹图像，因此需要提取中心线。在不改变图像的拓扑性质的条件下，将目标图像从多个像素宽细化到具有单一像素宽度，这种图像处理方法被称为细化化<sup>[20]</sup>。图像细化算法是把一幅图像变得更加简洁而又保留其重要特性的一种算法。图像细化一般通过以下 3 个方面去进行判断：1) 原图像的连通性必须保持；2) 保留图像的端点；3) 对称细化。常用的中心线提取算法有：形态学细化法、Steger 算法<sup>[21]</sup>和中心轴变换法。

形态学细化法通过逐步去除边界，将一幅具有一定宽度的图像轮廓线变成只有一个像素宽的图像骨架<sup>[22]</sup>。在进行形态学运算时，不能出现末梢点误删的错误，也不能出现连接中断的情况。形态学细化法是像素级精度，由细化法提取出的骨架线，虽然可以满足单像素和连续的要求，但是其定位精度不能得到保障，而且得到的图像会产生毛刺，从而在提取图像特征点的时候会造成本干扰。Steger 算法基于 Hessian 矩阵，能够实现目标弹跳轨迹中心的亚像素定位。通过该方法提取的中心线在目标弹跳轨迹的拐点处会出现多余的像素点，误提取较多。因此选择中轴变换法提取弹跳轨迹中心线。

中轴变换法是对二值图像进行操作，获取目标的中轴，也称作骨架。中轴变换法是一种迭代算法，其主要思想是对骨架中的最小距离进行抽取，然后逐步地把边界点进行删除，从而获得该图像的中心线。图 8 为中轴变换法提取的目标弹跳轨迹中心线图像。

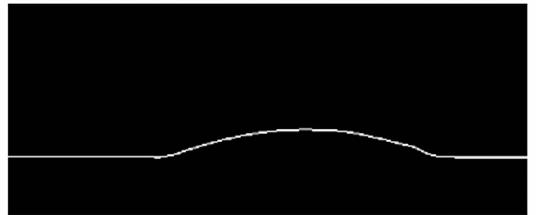


图 8 中轴变换法处理结果

中轴变换法提取中心线所得的图像，目标图像的中心线连续平滑且中心线为单像素宽度，因此适用于本文的中心线提取。

## 2.5 图像特征点的提取

对提取到的单像素弹跳轨迹中心线进行特征点提取，找到所有的像素坐标，将像素坐标按  $X$  从小到大排列，依次进行扫描，寻找目标落地点和目标最高点，在提取落地点的像素坐标  $(x_1, y_1)$  时，其领域内的坐标值大于该像素坐标，在提取落地点的像素坐标  $(x_h, y_h)$  时，其领域内的坐标值小于该像素坐标。图 9 为特征提取的目标弹跳轨迹图像。

## 3 图像采集系统调试

为了验证运动员垂直弹跳高度图像采集测试方法的可行性和正确性，搭建实验装置，如图 10 为搭建的图像采集系统平台，具体实验步骤：

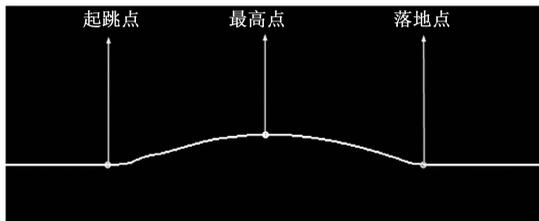


图 9 特征提取的目标弹跳轨迹图像

1) 选用上位机, 光学镜头, 柱面透镜, DALSA 黑白线阵 CCD 相机, 光源, 三脚架等器件并安装固定各器件的位置, 搭建出图像采集系统平台, 对实验装置进行调试。

2) 设置线阵 CCD 相机的行频为 5 000 Hz, 将线阵 CCD 连续扫描到的 5 000 行图像依时间先后进行拼接, 对相机各个参数进行设置, 触发线阵 CCD 相机进行垂直弹跳高度的图像采集, 即可获得目标弹跳轨迹图像, 图像的大小为 2 048×5 000。

3) 对目标弹跳轨迹图像进行分析和处理, 得到目标弹跳轨迹图像的特征点坐标, 结合相机行频, 计算出运动员经过两个特征点之间的时间;

4) 重复多组实验, 获取多组图片, 记录运动员采用不同起跳姿势所获得的目标垂直弹跳高度。

上位机



图 10 图像采集系统平台

图 11 为采集到的 2048×5000 大小的目标弹跳轨迹图像信息, 图像对比度良好。

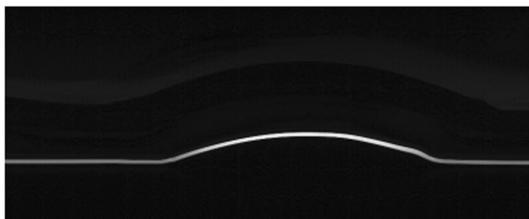


图 11 运动员垂直弹跳轨迹图像

#### 4 实验结果和分析

如图 10 所示, 运动员在弹跳测试范围内进行起跳, 运动员脚踝骨处的反光标志点成像到线阵相机的光敏面上, 实时获取目标弹跳轨迹图像; 然后使用背景差分法对原始图像进行预处理, 去除固有背景的影响, 然后选择开闭运

算对图像进行增强, 使用最大类间方差法对图像进行分割, 得到目标弹跳轨迹图像, 再使用中轴变换法得到单像素宽度的目标弹跳轨迹图像, 高精度地获取弹跳特征点; 最终运用运动学公式, 计算得到运动员的垂直弹跳高度。

本文进行运动员目标垂直弹跳高度的图像采集。垂直弹跳指人跳跃至最高点, 保持身体直立, 双脚离地高度。垂直弹跳主要分为原地垂直和助跑垂直。原地垂直即原地起跳, 双脚不能有任何移动。助跑垂直即可以有一段助跑, 可分为单脚起跳和双脚起跳。

为了验证本文设计的测试系统的适用性和垂直弹跳高度的准确性, 设计对比实验。本文的运动员垂直弹跳高度的信息在图像中是用像素来进行表达的, 因此与设计的基于像素分析的对比实验所计算的垂直弹跳高度进行比较。在进行对比实验高度测试的时候, 可以使用像素法, 像素法要求提前标定像素对应物空间尺度, 而且需要整个轨迹都处于物平面内。像素法主要是得到两个特征点, 然后计算之间的差值, 从而得到图像中的像素大小和实际空间的关系, 进而计算出对比实验的目标垂直弹跳高度。表 2~5 为运动员采用不同起跳姿势所获得的目标垂直弹跳高度以及误差。

表 2 原地单脚起跳的垂直弹跳高度

特征点像素坐标		本文获得弹跳高度/mm	对比实验获得弹跳高度/mm	误差/mm
$(x_1, y_1)$	$(x_2, y_2)$			
(1 862, 1 290)	(2 966, 1 446)	238.17	234.46	3.71
(1 666, 1 298)	(2 790, 1 473)	246.88	240.47	6.41
(2 072, 1 306)	(3 194, 1 471)	246.00	247.99	1.99
(1 788, 1 329)	(2 911, 1 499)	246.44	255.50	9.06
(2 021, 1 320)	(3 151, 1 488)	249.52	252.50	2.98
(1 745, 1 353)	(2 865, 1 513)	245.13	240.47	4.66

表 3 原地双脚起跳的垂直弹跳高度

特征点像素坐标		本文获得弹跳高度/mm	对比实验获得弹跳高度/mm	误差/mm
$(x_1, y_1)$	$(x_2, y_2)$			
(2 544, 1 247)	(4 017, 1 527)	423.99	420.83	3.16
(1 906, 1 226)	(3 383, 1 511)	426.30	431.35	5.05
(2 330, 1 208)	(3 843, 1 500)	447.33	438.86	8.47
(2 582, 1 171)	(4 079, 1 466)	437.92	443.37	5.45
(2 345, 1 213)	(3 820, 1 501)	425.14	432.85	7.71
(1 950, 1 210)	(3 438, 1 495)	432.67	441.87	9.20

表 4 助跑单脚起跳的垂直弹跳高度

特征点像素坐标		本文获得弹跳高度/mm	对比实验获得弹跳高度/mm	误差/mm
$(x_1, y_1)$	$(x_2, y_2)$			
(1 573, 1 111)	(3 298, 1 489)	581.47	568.12	13.35
(2 040, 1 107)	(3 758, 1 501)	576.76	592.17	15.41
(2 149, 1 117)	(3 861, 1 487)	572.74	556.10	16.64
(2 217, 1 119)	(3 918, 1 506)	565.41	581.65	16.24
(2 251, 1 117)	(3 955, 1 485)	567.40	553.09	14.31
(1 802, 1 095)	(3 509, 1 484)	569.40	584.65	15.25

表 5 助跑双脚起跳的垂直弹跳高度

特征点像素坐标		本文获得弹跳高度/mm	对比实验获得弹跳高度/mm	误差/mm
( $x_1, y_1$ )	( $x_2, y_2$ )			
(2 592,1 121)	(4 273,1 481)	552.19	541.07	11.12
(2 780,1 124)	(4 455,1 498)	548.25	562.11	13.86
(2 521,1 130)	(4 194,1 486)	546.95	535.05	11.90
(1 863,1 141)	(3 513,1 489)	532.01	523.03	8.98
(1 951,1 139)	(3 617,1 509)	542.38	556.10	13.72
(1 846,1 132)	(3 505,1 482)	537.83	526.04	11.79

表 2~5 分别为运动员采用 4 种不同起跳姿势进行垂直弹跳高度测试的实验数据, 实验中不同的起跳姿势所得的目标垂直弹跳高度有所不同。

以对比试验的实测数据作为真实的垂直弹跳高度, 为防止由于对比试验的不确定性而引起的实验数据出现偏差, 对 4 种不同起跳姿势的对比实验各进行两次, 并取其平均值, 在同一环境下进行垂直弹跳高度测试。公式 (26) 为相对误差。

$$\delta = \frac{\Delta}{H} \times 100\% \quad (26)$$

式中,  $\delta$  为相对误差,  $\Delta$  为误差, 为对比实验的垂直弹跳高度。

计算结果如表 6 所示。

表 6 运动员垂直弹跳高度检测数据

起跳方式	原地单脚	原地双脚	助跑单脚	助跑双脚
相对误差/%				
1	1.582 3	0.750 9	2.349 9	2.055 2
2	2.668 9	1.170 7	2.602 3	2.465 7
3	0.802 5	1.861 6	2.992 3	2.224 1
4	3.546 0	1.229 2	2.792 1	1.716 9
5	1.180 2	1.781 2	2.587 3	2.467 2
6	1.937 9	2.082 1	2.608 4	2.241 3

对表 6 的数据进行分析可知, 在 1 500 mm 的弹跳测试范围内, 运动员使用不同起跳姿势所获得的目标垂直弹跳高度的相对误差小于 3%。实验结果表明, 基于光电成像技术的运动员垂直弹跳高度测试装置能够对运动员垂直弹跳高度进行准确测量。因此可采用此方法进行运动员垂直弹跳高度测试, 满足体育测试的需要。

### 5 结束语

为解决现有测试方法成本高昂, 操作复杂等问题, 本文基于光电成像测试技术, 通过研究运动员垂直弹跳高度, 构建了运动员垂直弹跳高度的图像采集系统, 获取目标弹跳轨迹图像, 提取图像特征点, 解算运动员垂直弹跳高度, 实现对运动员垂直弹跳高度的测试。实验结果表明, 使用不同起跳姿势所获得的目标垂直弹跳高度的相对误差小于 3%, 验证了该方法的可行性。

### 参考文献:

[1] 赵西堂. 摆臂影响纵跳成绩的作用机制与理论假说 [J]. 中国

体育科技, 2016, 52 (2): 115-121.

[2] 李世明, 刘学贞. 纵跳理论研究进展 [J]. 北京体育大学学报, 2004, (1): 65-67.

[3] 林长地, 程亮. 少年男篮运动员下肢等速肌力与纵跳高度、速度的相关性分析 [J]. 山东体育科技, 2015, 37 (4): 72-76.

[4] 赵西堂, 孙平, 葛春林. 原地摆臂纵跳和抱头纵跳动力学特征的比较 [J]. 体育学刊, 2013, 20 (1): 139-144.

[5] GAVIN M, PURVIS, CHRIS C. Intersession reliability of vertical jump height in women and men [J]. Journal of strength and conditioning research, 2008, 22 (6): 1779-1784.

[6] ATTIA A, DHAHBI W, CHAOUACHI A, et al. Measurement errors when estimating the vertical jump height with flight time using photocell devices: the example of Optojump [J]. Biology of Sport, 2017, 34 (1): 63-70.

[7] 刘卫国, 刘学贞, 李强. 对普通人群几种不同形式纵跳的动力学分析 [J]. 北京体育大学学报, 2003, (1): 45-47.

[8] KLAVORA. Vertical-jump Tests: A Critical Review [J]. Strength and Conditioning Journal, 2000, 22 (5): 70-75.

[9] 万祥林, 李秋捷, 杨辰, 等. 5 种不同计算纵跳高度方法的比较 [J]. 北京体育大学学报, 2017, 40 (11): 62-66.

[10] 陈燕萍. 基于背景减除的运动目标检测算法研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.

[11] 林礼区, 向家伟. 形态滤波与平移不变量小波增强 EEMD 的故障诊断方法 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37 (9): 1359-1365.

[12] 张建民, 艾伟, 张学军, 等. 基于自适应形态学的探月雷达噪声压制方法 [J]. 移动通信, 2022, 46 (7): 51-56.

[13] 张成斌, 王开福. 基于形态开闭算子的高浓度椒盐噪声去除方法 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (2): 199-202.

[14] 文福林, 张凯, 蒲锋, 等. 一种基于噪声点邻域的形态学滤波算法研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (3): 71-74.

[15] 张斌, 胡庆荣, 韦立登, 等. 改进的形态学干涉图滤波方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40 (10): 2230-2236.

[16] 郭昊琰, 兰国峰, 赵辉, 等. 基于线阵相机的高速小目标提取算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (2): 262-268.

[17] 潘梓阳. 基于 K-means 聚类的车牌图像去污算法 [J]. 信息技术与信息化, 2023 (2): 38-41.

[18] 莫胜撼, 喻宁娜, 戴建树. 迭代法在焊缝图像阈值分割中的应用 [J]. 电焊机, 2015, 45 (2): 53-56.

[19] 陈雪鑫, 卜庆凯. 基于改进的最大类间方差法的水果图像识别研究 [J]. 青岛大学学报 (工程技术版), 2019, 34 (2): 33-38.

[20] 王妙妙. 一种高性能图像细化方法及其应用研究 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.

[21] 王志永, 于宇, 王武越, 等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (1): 84-89.

[22] 江宇博, 刘波. 小波模极大值法与数学形态学边缘检测细化结果 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (3): 165-168.