

基于视频的杠铃轨迹跟踪与分析系统

邓宇¹⁾²⁾ 刘国翌¹⁾²⁾ 李华¹⁾

¹⁾(中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室, 北京 100080) ²⁾(中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 以普通摄像机拍摄得到的举重运动员的正侧面视频作为输入, 通过一种改进的模板匹配算法跟踪杠铃中心轨迹, 然后根据得到的杠铃中心位置计算举重运动中关键的技术参数, 最后输出包括技术参数和曲线图的技术分析报告。实验结果证明, 利用文中系统得到的结果准确可靠, 已应用于举重运动的实际训练。

关键词 视频 杠铃 跟踪 模板匹配 分析

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)12-1813-07

Video-based Tracking and Analysis System of Barbell's Trajectory

DENG Yu¹⁾²⁾, LIU Guo-yi¹⁾²⁾, LI Hua¹⁾

¹⁾Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, CAS, Beijing 100080)

²⁾Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Given lifter's video acquired with an ordinary camera in lateral view, the trajectory of the barbell's center can be tracked automatically through an improved template matching algorithm. Key technical parameters are computed by the position of barbell's center and a technique analysis report consisting of parameters and graphs is created. Experiments show that tracking and analysis results are exact and reliable. This system has been applied to the practical training in weight lifting, to help analysis and improve the lifter's technique.

Keywords video, barbell, tracking, template matching, analysis

1 引言

长期以来, 举重项目的训练与其他许多运动项目一样, 一直以主观和经验为主, 教练员多是凭观察和经验等定性方法对运动员的技术动作进行指导, 运动员通过多次重复性练习来掌握技术要领, 金牌的获得凝聚着教练员和运动员的心血和汗水。因此, 为教练员、运动员提供定量的辅助分析工具, 对促进训练水平的提高、高难度动作的创新具有重要意义^[1]。传统的运动捕捉和分析方法都是采取有标记点(marker)的方式捕捉运动员动作并进行分析, 如基于标记点的运动捕捉系统(Motion Capture), 其已应用于高尔夫球、网球、滑雪等体育

运动分析。在运动捕捉系统采集数据的基础上, Hodgins^[2]对人体的跑步、Zhao等人^[3]对芭蕾舞分别进行了模拟和分析。但Motion Capture系统是通过跟踪贴在人体关节点上的标记点来捕捉人的运动, 这种方法对运动员有诸多影响或限制。如: 需要在特定的实验环境下拍摄数据, 贴在运动员身上的标记点会影响动作的准确性, 系统操作复杂, 在实际比赛中也不能使用, 实用性不强。而且须采用特殊设备, 代价昂贵, 并且标记点对运动员造成的心理负担可能大于对身体的影响。因此, 寻求非接触、无妨碍的运动参数获取及分析方法, 具有实用价值, 受到运动员和教练员的欢迎。Carranza等人^[4]就采用了无标记点的方法对舞蹈动作进行了模拟。

本文介绍的杠铃轨迹跟踪与分析系统采用的是

基金项目: 国家科技攻关计划课题奥运科技专项(2001BA904B08), 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB318000)

收稿日期: 2005-07-25 改回日期: 2005-11-09

第一作者简介: 邓宇(1980~)男, 现为中国科学院计算技术研究所博士研究生。研究方向为数字图像处理、计算机视觉和计算机图像学。E-mail: xlengyu@ict.ac.cn

基于视频的方法。根据举重运动的特点,使用拍摄到的举重运动员的正侧面录像,对杠铃中心进行跟踪。杠铃中心位置是教练员衡量一个举重动作是否标准的重要依据,系统根据跟踪到的杠铃中心轨迹计算速度、功率等各项关键运动参数,并提供用户交互界面让教练员能够在跟踪过程中对关键帧画面进行操作。该系统无需复杂的设备,普通摄像机就可以完成跟踪任务。不受环境条件的限制,也不干涉运动员的动作,可在任意时刻、场所进行跟踪。

2 系统概述

系统采用 VC++6.0 作为开发平台,其工作流程如图 1 所示。为了方便使用,本系统对视频图像数据采集设备没有具体要求,普通摄像机和图像采集卡即可。首先,给定 1 段或者 2 段举重运动员的正侧面视频图像作为输入,系统对输入视频进行奇偶场分离,增加视频图像的清晰度。再对输入视频

的第 1 帧进行边缘提取,通过 Hausdorff 距离匹配得到跟踪过程中需要的模板图像。此时,如果开始输入为 2 段视频,则需要对 2 段视频的举重动作进行起点对齐,然后创建一个 Kalman 滤波^[5],开始对视频中的每一帧进行处理,处理过程中先用前一帧找到的杠铃中心更新 Kalman 滤波,再使用 Kalman 滤波对当前帧的杠铃中心点位置进行预测,定位“搜索窗口”,最后使用模板匹配(Template Matching)方法寻找这一帧视频图像中的杠铃中心位置。在跟踪过程中,教练员可以按照举重运动的技术特点对举重动作进行阶段分解,选取关键帧,并通过手工交互的方式得到关键帧中运动员的重要关节角度。在处理完整段视频图像序列后,根据获得的杠铃中心轨迹,计算举重运动中的关键技术参数,最后生成技术分析报告,报告中包括含有各项技术参数的表格、杠铃中心轨迹曲线以及杠铃中心在垂直方向上的速度曲线。对于输入的 2 段视频,系统在曲线图中以不同的曲线来表示不同视频的跟踪结果。

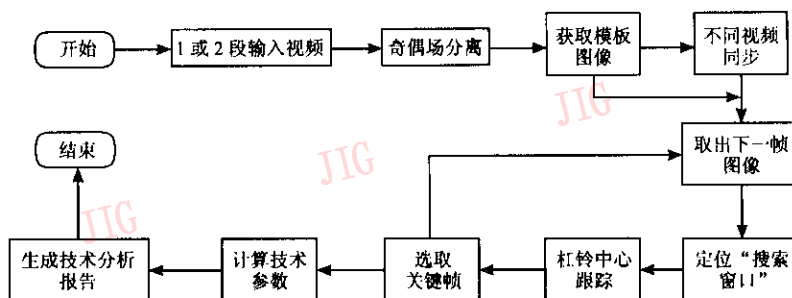


图 1 系统实现流程图

Fig. 1 Block diagram of the system

3 主要功能模块分析

3.1 奇偶场分离

在本系统中,输入数据是摄像机拍摄的举重运动员在训练或者实际比赛中举重动作的正侧面视频图像文件。现在普通摄像机对视频图像扫描只能达到每秒 25 帧和 50 场的帧频和场频,25Hz 的帧频能以最少的信号容量满足人眼的视觉残留特性,50Hz 的场频隔行扫描,把一帧分成奇、偶两场。

但是摄像机在工作的时候并非一帧一帧静止地拍摄,它所摄下的每一帧已经包含了 1/25s 以内的所有视觉信息,包括物体的位移。再加上拍摄的是运动场景,举重运动中杠铃上举的一段时间内杠铃的运动

速度非常得快,所以采集到的图像文件中的每一帧并不是一幅清晰的静止画面,而是一张模糊的图像,称为运动模糊。为了使图像能够变得清晰,在系统中,首先对输入的视频图像进行奇偶场分离,将同一帧图像分奇偶场交替显示,去除因奇偶场差异在图像上产生的交织干扰。这样每秒 25 帧的文件就会变为每秒 50 帧,图像的清晰度得到了一定的增强。

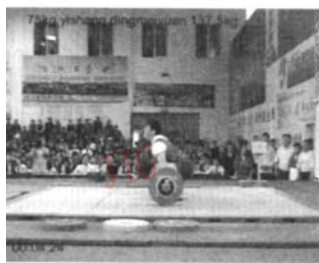
3.2 模板图像获取

系统是使用模板匹配方法跟踪杠铃中心的位置,使用这种方法的首要前提就是需要一个预先存储的图像模板(Template)。模板选取的好坏,将直接影响着随后匹配识别过程的结果。常用的办法可采用自动选取或者是人机交互的方式。系统采用自动选取的方式,根据杠铃的圆形外轮廓信息,能够自动寻找

到视频图像文件第 1 帧中杠铃的所在位置,并将杠铃所在区域的图像作为模板。整个过程首先通过边缘检测算法得到第 1 帧的二值化边缘图,然后使用光流,将非运动区域中的杂乱边缘过滤掉,最后使用 Hausdorff 距离,让自动生成的一组大小不同的圆环轮廓和得到的边缘图进行匹配,找到杠铃的正确位置。

3.2.1 边缘提取

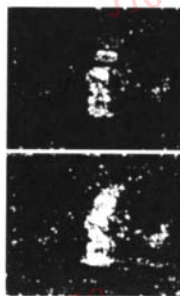
为使提取出的边缘具有较高的可信度,系统采用了 Canny 边缘检测算子^[6]提取图像边缘。Canny 边缘检测算法是相对较佳的边缘检测算法。它具有以下良好的特性:能检测出所有的真正边缘,并能保证检测出的边缘与实际边缘间的距离误差最小,同时对每一边缘仅响应一次。提取出的边缘如



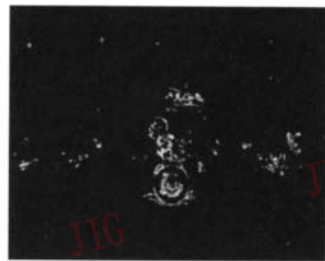
(a) 原始图像



(b) Canny 边缘提取结果



(c) F_x (上图) 和 F_y (下图)



(d) 过滤后的边缘图

图 2 边缘提取结果

Fig. 2 The result of edge extraction

3.2.2 Hausdorff 距离匹配

Hausdorff 距离^[8]是描述两组点集之间相似程度的一种度量,是两个点集之间距离的一种定义形式。

对于两个确定的点集 $A = \{a_1, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, \dots, b_q\}$,它们之间的 Hausdorff 距离的定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

其中,

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\|$$

这里,式(2)中的 $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 称为从 A 集合到 B 集合和从 B 集合到 A 集合的单向 Hausdorff 距离,式(1)称为双向 Hausdorff 距离。Hausdorff 距离的计算并不基于相应数据集上的明确的点对之间的距离运算,另外基于 Hausdorff 距离匹配的方法不需要进行复杂的图像分割匹配。所以这种方法已经大量应用于物体形状的识别^[9,10]。

图 2(b),由图可见利用 Canny 边缘检测算法对杠铃区域的边缘提取的比较完整。

从图 2(b)也可以发现杂乱边缘太多,而比较时只需要杠铃的边缘,过多杂乱边缘的存在将会影响寻找杠铃位置的准确性。为了过滤掉多余的边缘,采用 Lucas-Kanade 算法^[7]计算第 1 帧图像的光流,计算得到的光流矢量场(optical flow vector field) F 被分为两个标量场 F_x, F_y ,分别对应于光流的水平部分和垂直部分。由于举重运动主要是在垂直方向运动,由图 2(c)可以看出 F_y 中运动区域比 F_x 明显。于是使用 F_y 与图 2(b)做“与”操作,就可以滤掉图 2(b)中大部分的杂乱边缘,结果如图 2(d)所示。可以看出绝大部分的杂乱边缘都已经过滤掉了。

由图 2(d)可以看出,得到的杠铃轮廓为一个圆环,根据这个特点,系统事先创建一幅圆环的轮廓图(如图 3(a)),并与过滤后的边缘图计算 Hausdorff 距离。由于系统中杠铃边缘区域相对整幅图像来说,尺寸较小,为了加快识别速度,系统只选用了单向 Hausdorff 距离 $h(C, E)$,其中 C 为创建的圆环轮廓图中的轮廓像素点集合, E 为边缘提取过滤后的图像像素点集合。基本形式定义的 Hausdorff 距离易受突发噪声的影响,比如当待匹配轮廓部分可见的时候,使用基本形式定义的 Hausdorff 距离会使计算结果产生较大的偏差。所以系统对单向 Hausdorff 距离的计算公式做了改进,用归一化结果替代最大值,定义为

$$h(A, B) = \frac{1}{Num_A} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (3)$$

其中 Num_A 为集合 A 中点的个数。

系统首先用初始外径和内径(内径为外径的 1/2,这也是杠铃大小铃片的半径比例)创建一幅圆环轮廓

图 用圆环轮廓图在边缘图上进行平移匹配,在每一个位置计算 Hausdorff 距离 $h_{x,y}(C,E)$ (表示当前圆环中心在边缘图上的坐标)。上述 $h_{x,y}(C,E)$ 值中的最小值对应的 (x,y) 就是这个轮廓图在边缘图中最匹配的位置。然后,按照一定的增量增大半径创建新的轮廓图,再按照同样的方法找到在边界图中最匹配的位置。在重复 n 次这样的匹配过程以后,再把以前不同半径轮廓图的最优匹配位置对应的 $h_{x,y}(C,E)$ 进行比较,找到最小值,相应的 (x,y)

就是杠铃中心所在位置,对应的圆环轮廓的外径就是杠铃的半径,如图 3(b)所示。系统按照寻找到的杠铃区域作为图像模板(Template)。在实验中,以 35 个像素为初始外径,按照每次外径增大 2 个像素重复 20 次匹配过程,对 20 段举重运动视频进行测试,模板选取正确率达到 95%。图 3(c)为图 3(b)中白色方框所示范围的放大结果,黑色表示 20 次匹配过程中每次匹配的最优位置,白色表示最终确定的杠铃位置。图 3(d)为系统最后获取的图像模板。

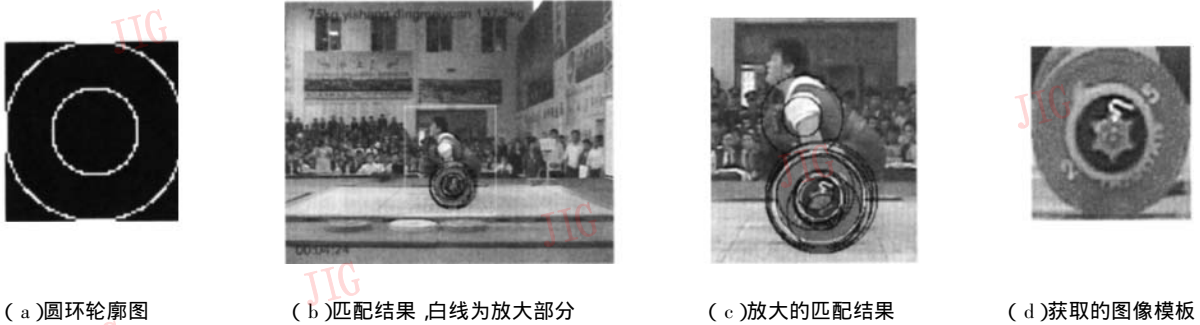


图 3 自动获取的图像模板

Fig. 3 Automatically extracted image template

3.3 定位“搜索窗口”

一般的模板匹配算法都是在整个图像范围内进行搜索匹配,这样的搜索机制耗时很长,效率不高,还容易产生错误的匹配结果。为了提高匹配速度,系统采用了“搜索窗口”技术,即在利用模板匹配方法进行杠铃中心跟踪之前,先将图像中杠铃所在的大概区域标识出,以使后续步骤中的模板匹配在该“搜索窗口”内进行。这样极大地缩小处理范围,减少不必要的匹配处理过程,从而提高识别速度。

系统使用的定位“搜索窗口”技术采用了 Kalman 滤波预测方法,首先创建一个 Kalman 滤波,并用由 3.2 节中方法找到的第 1 帧杠铃中心进行初始化,然后使用 Kalman 滤波对待处理图像中的杠铃中心位置进行预测,预测得到的杠铃中心位置为“搜索窗口”中心;“搜索窗口”的长宽由 Kalman 滤波给出的协方差估计得到;“搜索窗口”为一个长方形区域。

由于运动的连续性,同一举重运动视频序列中前后两帧的杠铃中心位置不会相差太远。所以待处理图像中的杠铃位置一定在长方形“搜索窗口”中,后续的模板匹配识别在该窗口中进行。

3.4 杠铃中心跟踪

系统采用模板匹配技术对杠铃中心进行识别跟踪,基于模板匹配的识别方法首先是将图像序列转换

为一组静态图像,然后在这些静态图像中搜索,并和预先存储的模板图像进行识别匹配,找到最佳匹配位置。

匹配识别时,预先按顺序从图像序列取出一帧视频图像,并按照 3.3 节中所述方法确定一个搜索窗口,称之为感兴趣区域(region of interest, ROI),感兴趣区域的面积显然大于模板图像面积。确定感兴趣区域后,运用模板匹配技术在视频图像感兴趣区域上计算图像模板与视频图像的匹配值。

假定感兴趣区域图像 I 的大小为 $W \times H$,模板图像 T 的大小为 $w \times h$ 。其中 $w < W, h < H$ 。很明显模板图像在感兴趣区域中的匹配位置肯定在一个 $(W - w + 1) \times (H - h + 1)$ 的范围内,系统自动创建一个 $(W - w + 1) \times (H - h + 1)$ 大小的匹配图像 R ,此匹配图中每个像素点的值为 T 和 I 的匹配值。匹配值的定义为

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} [\mathcal{T}(x',y') - \mathcal{I}(x+x',y+y')]^2}{\sqrt{\sum_{x',y'} \mathcal{T}(x',y')^2 \times \sum_{x',y'} \mathcal{I}(x+x',y+y')^2}} \quad (4)$$

其中 $x' = (0 \dots w - 1), y' = (0 \dots h - 1), (x,y)$ 为 R 上像素点的坐标。

模板图像 T 在感兴趣区域图像上从左上开始遍历一遍,进行平移匹配。相应的 R 中的像素值 $R(x,y)$ 按照式(4)计算得到,它度量了模板(Template)与感兴趣区域当前位置中的图像的相似

程度(平移匹配过程如图 4 所示)。于是, 系统所用的模板匹配技术的判别规则可归纳为: 在结束所有平移匹配之后, 对匹配图 R 进行全局搜索, 找到所有 $R(x, y)$ 中的最小值, 作为模板与感兴趣区域中之最匹配的对象的相关度的度量值 (x, y) 就为杠铃中心最匹配的位置。

图 5 是对举重视频文件进行跟踪的实例。图 5(a) 所示视频是在国家体育训练总局举重训练中心拍摄的国家女子举重队的训练录像, 图 5(b) 所示视频是 2004 年湖南永州全国女子举重锦标赛暨奥运会选拔赛拍摄的实际比赛录像。由图 5 可以看出, 系统对训练视频和实际比赛视频的处理结果都准确可靠, 具有实际应用价值。

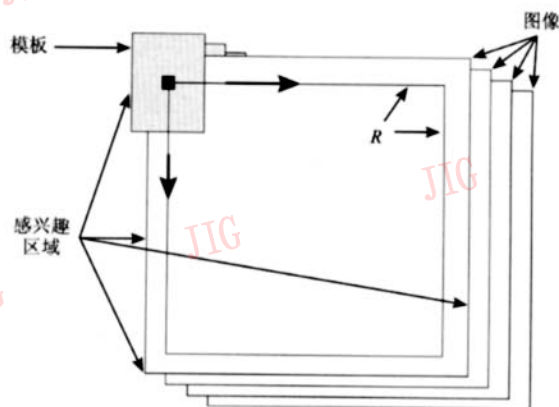
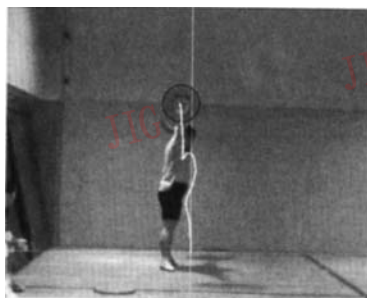


图 4 模板匹配算法示意图

Fig. 4 The graph of template matching algorithm



(a) 训练视频跟踪结果



(b) 比赛视频跟踪结果

图 5 不同视频的跟踪结果

Fig. 5 The tracking result of different videos

3.5 关键帧选取

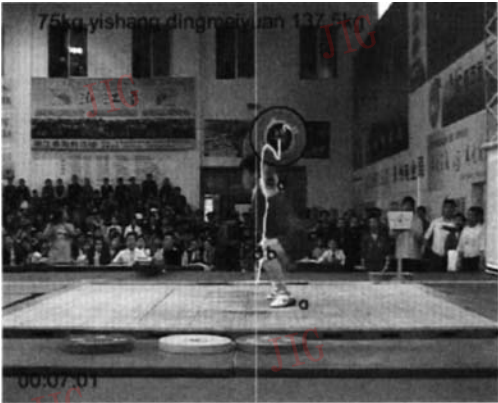
因抓举技术好坏是决定总成绩的关键因素, 系统主要对抓举技术动作进行分析, 将从杠铃离地瞬间开始到杠铃达到最高点这一动作阶段作为主要研究内容。这段动作又可以划分为 4 个阶段: (1) 第一发力阶段, 即所谓的伸膝提铃动作; (2) 过渡阶段, 即引膝提铃动作; (3) 第二发力阶段, 即最大发力阶段; (4) 惯性上升阶段。

各自阶段的杠铃中心轨迹和运动员身体上一些重要关节的角度可以反映在这个阶段举重技术运用的优劣和特点, 也在一定程度上反映了运动员的身体素质状况。教练员可以根据获得的数据对运动员的技术运用进行指导。所以, 系统中设计了用户交互界面, 可以在关键帧(每个动作阶段的起止位置) 上标出运动员的踝关节、膝关节、髋关节和肩关节, 系统会计算出各自的关节角度, 并将修改后的关键帧图像(如图 6(a)) 保存在指定位置, 图 6(b) 是放大的关节角度示意图。

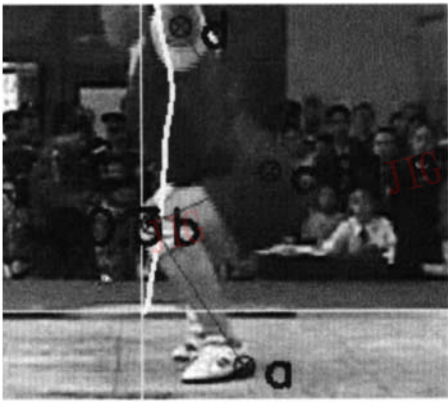
3.6 参数计算和结果比较

杠铃中心跟踪结束后得到每一帧的杠铃中心坐标, 但是这只是一组离散点。为了能够得到光滑的杠铃中心轨迹曲线, 系统采用的是三次样条插值^[11]对离散点进行曲线拟合, 得到一条平滑的杠铃中心轨迹曲线, 从而得到举重运动中所需的关键技术参数, 包括: 举杠铃过程中杠铃中心的位移、速度和时间; 不同动作阶段中运动员的运动学指标(时间、位移、速度和角度等)、动力学指标(做功、做功比、有效功率、平均功率等); 运动员与杠铃之间的位置关系。参数计算后, 系统会生成包括关键技术参数表格、杠铃中心点轨迹图、垂直方向上的杠铃中心速度曲线图在内的技术测试报告, 如表 1、图 7(a)、7(b) 所示为按照图 5(b) 数据所生成的技术测试报告。

在实际训练中, 一组简单的举重过程, 运动员每天需要重复地做上百次。教练员需要比较运动员在每次举重过程中的技术运用情况、总结改进之处。另外, 当教练员获得一些优秀举重运动员的比赛录



(a) 关键帧图像



(b) 计算出的关节角度

图 6 关键帧图像示例

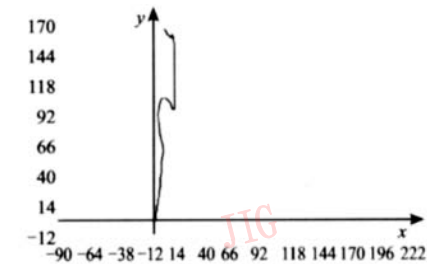
Fig. 6 Example of key frame image

表 1 关键技术参数表格

Tab. 1 The table of important technical parameters

	特征画面						
	特征画面 1	特征画面 2	特征画面 3	特征画面 4	特征画面 5	特征画面 6	特征画面 7
时间(frame)	19	35	48	55	61	66	80
杠铃水平移动(cm)	11	17	38	38	38	35	21
杠铃高度(cm)	50	214	215	247	260	313	330
杠铃中心点(m/s)	0.1	0.8	0.0	-0.0	-0.2	-0.0	-0.1
杠铃中心点(m/s)	1.8	-0.5	1.1	1.4	1.6	1.2	-0.0
膝关节角	124.1	78.2	62.2	99.3	115.0	134.2	155.2
髋关节角	73.8	131.2	70.7	86.6	105.9	128.4	154.0
铃人位置(cm)	49	28	33	32	27	22	7
杠铃上的垂直力(N)	254.4	0.0	420.8	1 965.5	933.7	614.2	0.0
杠铃上的垂直功率(W)	465.6	0.0	450.9	2 795.8	1 507.5	716.6	0.0

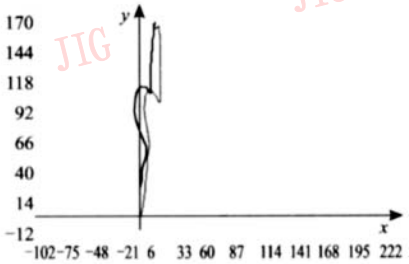
	动作阶段					
	动作阶段 1	动作阶段 2	动作阶段 3	动作阶段 4	动作阶段 5	动作阶段 6
时间比	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
做功(J)	1 703.1	131.5	446.7	465.2	301.9	62.0
做功比	0.5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
有效功效率	1.0	1.4	1.0	1.0	1.0	1.0
平均功率(W)	2 661.1	252.9	1 595.4	1 938.4	1 509.5	110.8



(a) 杠铃中心轨迹图



(b) 杠铃中心垂直方向速度曲线



(c) 杠铃中心轨迹比较

图 7 系统生成的各种分析曲线图

Fig. 7 The analytical graphs created by system

像时,也希望能够将自己运动员的技术动作和优秀运动员的动作进行比较,从中找到差距和不足。而事实上,如今教练员们还是只有依靠自己的眼睛去辨别和比较。系统能够对输入的两段视频图像同步处理,首先使用3.2节的方法找到各自的模板。再用手工交互的方式对两段视频图像序列的动作进行同步,然后采用3.3、3.4节中的方法对两段视频图像序列同步进行处理,得到视频图像序列的杠铃中心位置,最后绘制出杠铃中心轨迹和杠铃中心垂直方向速度的比较曲线图,不同运动员的曲线用不同粗细的曲线绘制,图7(c)为杠铃中心轨迹比较图。

通过技术测试报告,教练员可以研究举重运动员身体特征与最优动作技术的关系,研究在杠铃提升过程中人体重心与杠铃重心间的动态关系,研究不同动作阶段时间分配对提举效果的影响等内容。由于系统能够对视频图像进行实时处理,教练员可以根据得到的技术参数和杠铃中心轨迹及时对运动员的动作进行指导和调整。

教练员可以对同一运动员不同时刻的杠铃中心轨迹进行比较,分析运动员的身体状态和技术发挥程度,找到成绩不稳定的因素,提出改进意见,对国内外优秀运动员的杠铃中心轨迹进行比较,找到与他们的技术差异。例如图7(c)中可以看出一条曲线在杠铃上升阶段不是竖直向上,而在这个阶段中曲线的倾斜度越大,有效功率就越低,这样这条曲线对应的运动员可以有针对性地调整技术动作。

4 结 论

我国是一个体育竞技大国,而举重运动一直以来都是我国重点开展的一个运动项目,也是奥运会上的夺金大户。系统采用普通设备,操作简单,分析结果清楚,能够有效地辅助教练员的日常训练,在促进举重运动训练水平的提高,增加运动员的训练效率等方面都具有积极作用。另外,通过系统在举重运动中的应用,对其他相关运动项目的软件开发也具有启发和借鉴意义。

拍摄场地和拍摄内容,感谢国家体育总局体育科研院所卢德明老师和王向东老师的大力支持。

参考文献(References)

- 1 Lu De-ming. An analysis of some problem in improving athletic training level[A]. In : the 174th forum of XiangShan Science Confernece[C], Beijing , China , 2001 : 67 ~ 68. [卢德明, 影响运动技术训练水平提高的几个难题[A]. 见: 香山科学会议第174次学术讨论会文集[C]. 北京: 2001 67 ~ 68.]
- 2 Hodgins J K. Three-dimensional human running[A]. In : Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Automation [C], Minneapolis , USA , 1996 , 4 : 3271 ~ 3276.
- 3 Zhao Tao , Wang Tianshu , Shum Harry. Learning highly structured motion model for 3D human tracking[A]. In : Proceeding of the 5th Asian Conference on Computer Vision[C], Melbourne , Australia , 2002 , 1 : 144 ~ 149.
- 4 Carranza J , Theobalt C , Magnor M A , et al. Free-viewpoint video of human actors[J]. ACM Transactions on Graphics , 2003 , 22(3) : 569 ~ 577.
- 5 Welch G , Bishop G. An Introduction to the Kalman filter[R]. TR95-041 , USA , North Carolina , Chapel Hill : Department of Computer Science , University of North Carolina , 2003.
- 6 Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 1986 , 8(6) : 679 ~ 698.
- 7 Lucas B D , Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[A]. In : Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Intelligence[C], Vancouver , Canada , 1981 : 674 ~ 679.
- 8 Huttenlocher D P , Klanderman G A , Rucklidge W J. Comparing images using the hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 1993 , 15(9) : 850 ~ 863.
- 9 Olson C F , Huttenlocher D P. Automatic target recognition by matching oriented edge pixels[J]. IEEE Transactions on Image Processing , 1997 , 6(1) : 103 ~ 113.
- 10 Grauman K , Shakhnarovich G , Darrell T. Virtual visual hulls : example-based 3D shape inference from silhouettes[A]. In : Proceeding of the 2nd Workshop on Statistical Methods in Video Processing , in conjunction with ECCV [C], Prague , Czech Republic , 2004 : 26 ~ 37.
- 11 Jiang Chang-jin. Scientific Computing and C Program[M]. HeFei : University of Science and Technology of China Press , 1998 : 154 ~ 176. [蒋长锦著. 科学计算和C程序集[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998 : 154 ~ 176.]

致 谢 感谢国家体育总局举重训练中心提供