

利用加速传感器估算竞走运动员的步长与步频

唐建军,周阳

(北京体育大学 教育学院,北京 100084)

摘要:运动捕捉技术是体育训练和教学的有力助手,可以通过捕捉运动参数来辅助教练员对训练效果做出评价和调整.基于三轴加速度传感器提出一种计算竞走步长及步频的算法,实时捕捉运动员的三轴运动信息,并采用低通滤波法剔除采样数据中的噪声干扰.基于步态周期内加速度曲线求解步频值,并建立了竞走单步步长的计算模型.测试数据表明:计算的步长和步频值准确度高、误差较小;获取训练中竞走运动员每一步态的步长和步频值,可以检测运动员技术结构的稳定性.

关键词:三轴加速度传感器;运动捕捉技术;步长;步频;竞走

中图分类号:G821

文献标志码:A

运动捕捉技术融合计算机技术、传感器技术及图像处理技术^[1].该技术通过实时采集和解析物体运动过程中的三维加速度、角速度等运动信息,可以获取物体在各个时间单位内的运动参数值,进而准确监控物体的运动状态和运动强度.在体育训练中通过在训练场地合理安放多组视频监控设备,捕捉运动员运动姿态的图像,可以帮助教练员研究运动员的运动姿态^[2-3],准确分析训练中的各项运动参数,为技术诊断和科学训练提供技术支撑和指导.本文以竞走项目为例,探究运动捕捉技术在竞走训练领域的应用.

竞走运动是运动员水平向前的长距离耐力型项目.运动中,运动员单脚支撑与双腿支撑交替进行的周期性运动,双腿撑地是一只脚着地、另一只腿同一瞬间后蹬离地,从而形成竞走现象.运动员的竞走成绩水平与运动员的身体形态特征和竞走技术有着密切的关联,运动员的身高、下肢长度、屈膝角度、垂直瞬间的踝关节高度等因素客观上会影响运动员的竞走水平,身高越高,下肢长度越大,运动员的步长就越大,然而,下肢较长影响竞走动作的敏捷性,耗时较大,身体动作的加速度较小,导致步频较小,因此,运动员的身高和下肢长度对步长的影响,可以通过竞走的速度和步频反映出来.同样,屈膝角度、垂直瞬间的踝关节高度影响竞走的速度和节奏,也可以通过竞走的速度和步频反映出来.步长和步频是一对矛盾体,步长越大,步频就会相对变小,影响竞走成绩.因此,运动员的竞走步长取决于竞走的速度和节奏^[4-9].

竞走项目是我国的优势项目.其既要求运动员有优秀的体能,也要求运动员必须符合竞走规则.竞走时,运动员进行单脚支撑与双腿支撑交替进行的周期性运动,每一个周期是一个完整的复步运动,包括 2 个单步,即左单步和右单步,每个单步包括着地、支撑、蹬地 3 个阶段.2003 年之前,我国竞走技术采用“小步长高步频”的技术风格,之后,竞走规则变化,“小步长,快步频”的技术风格导致运动员屡屡犯规,成绩下降.同样,国外运动员借助身高的优势,采用“大步幅”的竞走模式都不是最佳比赛战术,大的步长,一定程度上限制了竞走速度和步频,整体竞走水平很难提高.之后,我国实行了“请进来,走出去”的新政策,通过与国外教练的交流学习,并且汲取我国传统竞赛经验,不断改进竞赛技术,认识到只有在提高步长的同时兼顾步频,才会有效提高竞走水平.因此,在全新的竞走规则,需要全新的技术风格,单纯的大步长或单纯的大步频都是不可取的,步长和步频需要统筹兼顾,合适稳定的步长、步频组合才能有效提高竞走成绩^[10],研究竞走运动员每一步

收稿日期:2018-08-30;修回日期:2019-01-13.

基金项目:国家“863”计划项目(2013AA064303)

作者简介:唐建军(1960—),男,重庆人,北京体育大学教授,博士生导师,研究方向为运动训练学.

通信作者:周阳(1989—),女,河南南阳人,博士研究生,研究方向为大众体育及运动捕捉技术.E-mail:1390467515@qq.com.

态周期的步长和步频,可以诊断技术上的优缺点,具有迫切的体育实用价值。

在竞走运动员的速度和步长研究中,具体到竞走过程中每一步态周期的竞走步长和速度的研究较少,大多采用全程平均速度和平均步长评估竞技能力^[11],忽视了竞赛过程中运动员速度和竞走步幅的波动变化,无法真实反映竞走动作结构的合理性以及步长、步频的稳定性。基于图像处理法解析视频图像,可以获取运动员的每一步态的运动信息^[12],但是视频录像大多用在竞走比赛中,日常训练时很少使用监控设备捕捉运动信息^[13]。

本文提出一种基于三轴加速度传感器计算运动员竞走步长和步频的方法,构建以 MPU6050 三轴加速度传感器模块、Intel Edison 处理器为核心的实验装置。该装置可以在训练时佩戴于运动员的腰部,进而捕捉竞走过程中每一步态的运动加速度信息。对采集的数据采用低通滤波剔除噪声点,进而计算步态周期的间隔采样点个数并建立步长计算模型。该模型可以计算出运动员在每一竞走周期内的单步步长和步频,进而检测竞走技术的稳定性和科学性,为诊断与纠正训练中不合理的竞走模式提供参考,进而帮助运动员构建最佳的步长步频组合,提高训练效率。

1 竞走项目的基本特征

竞走作为一项长距离周期性竞速运动项目,根据运动员单脚支撑与双腿支撑交替进行运动的特征,可将运动员一个完整的复步运动作为一个周期。每个复步周期包括一个左单步和一个右单步,一个完整的竞走周期就是有左单步和右单步连续进行组成的。

一个完整的竞走周期内,运动员的竞走技术主要体现在下肢腿部的动作结构上。就单腿而言,分为支撑阶段和腾空阶段。支撑阶段包括着地、直立、腾伸、离地;腾空阶段后摆、垂摆、前摆。从该脚着地到该脚再次着地所行走的距离即为单步步长。支撑阶段和腾空阶段的总时间即为一个周期的竞走时间。

2 实验装置

实验装置的 CPU 选用 Intel Edison 计算机模块。低功耗模式下,功率为 250 mW,工作电流在 200 mA 以下,采用 MPU6050 传感器模块捕捉运动员的三轴加速度信息,输出加速度值稳定性可达到 0.01g。实验装置运行 Linux 系统,采用 Eclipse C/C++ 集成开发环境,选用 C 语言开发数据采集程序,使用 GCC 编译调试,采用锂电池供电,供电电压为 3.3~4.5 V。采集的加速度数据及计算的步长、步频值存储在 Intel Edison 模块的 1 GB 内存中。训练完成后,数据通过串口上传到计算机。如图 1 所示,竞走过程中,运动信息存在噪声干扰。采用低通滤波滤除干扰。此外,竞走可穿戴装置内嵌 2.4 GHz WiFi 模块,在存在无线网络的训练场地,方便数据直接传送到计算机。

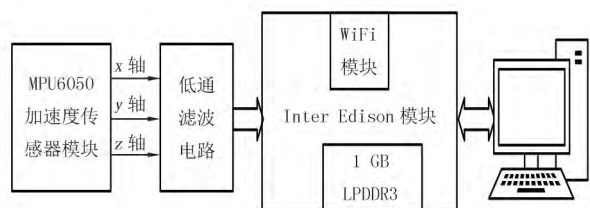


图 1 硬件系统结构图

Fig.1 Structure diagram of system hardware

3 竞走实验与数据处理

竞走步频是运动员 1 s 内竞走的步数,竞走过程中,运动员的竞走步频越大,每一步态周期就会越短,该步态周期内采集的加速度值个数就越少。此外,竞走步频越大,运动员身体动作相对剧烈,肢体抖动的越厉害,加速度值就会越大。此外,高步频会抑制竞走步长的提高。研究发现,不同的运动员竞走步长不同,同一名运动员竞走步长及步频也不是常数。因此,为了探究竞走步频与步态周期采样个数、竞走步长与竞走步频、加速度之间的关系,本文采取多人竞走、多组测试实验方案。

3.1 竞走实验

实验装置佩戴于测试者腰部,测试者由 10 名年龄在 22~32 岁的健康运动员组成,被测运动员的情况如表 1 所示。

测试场地为 400 m 环形跑道.由于被测运动员在弯道和直道上的行走状态不同,采用相同的估算方法估算步长和步频会产生较大的误差,考虑到竞走赛程中直道所占比例大,本文只研究直道上的实验数据.10 名测试者将实验装置佩戴于腰部进行竞走运动,每一竞走步态周期的加速度和步频数据实时保存于实验装置的 1 GB 内存中,每名测试者采集 40 组数据,共采集 400 组直道上的数据,实验结束后,测试数据通过串口上传至计算机.

3.2 数据处理及分析

如图 2 所示,竞走过程中,运动员单轴向(a_x, a_y, a_z)的加速度呈规律性变化,近似正弦周期,由于某一单轴上的加速度值容易受竞走过程

中身体抖动的干扰,产生噪声,因此,单纯采用某一分量作为检测值会产生较大误差,此外,竞走过程中, x, y, z 3 个轴向的矢量值会出现负值,以直接相加的方式求得的矢量和很难准确描述行走的真实状态,也不适宜作为检测值.因此为保证计算精确度,本文采用 x, y, z 3 个轴向矢量值的平方和的平方根作为竞走加速度的衡量值,即先将三个单轴向的矢量值分别平方,求三者之和,再将其和开方,得到正数平方根,该值就是当前竞走状态的加速度的衡量值.将该值称为 3 个轴向的合加速度

$$a_{\text{sum}} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

本文选择 a_{sum} 作为竞走状态的衡量值,既全面考虑了 3 个轴向的矢量值,又不会使三者相互抵消,相互影响,能够准确描述竞走状态.

从图 3 可以看出,原始采样数据波形含有尖峰脉冲,干扰峰值检测,需要滤波处理.考虑到采样数据中含有高频噪声,本文采用低通滤波剔除噪声干扰,如图 4 所示,因运动员身体抖动造成的多峰值波形也被平滑成单峰值,曲线变得平滑.

4 竞走步频与步长的检测算法

本文分析运动竞走过程中每一完整的步态周期,基于运动加速度的规律变化,分别估算竞走运动员在竞走过程中每一单步的步频和步长.

4.1 步频的计算方法

运动员竞走过程中,加速度值变化近似一个摆点规律移动的重复钟摆运动.钟摆往返运动一次,代表一个完整的竞走步态周期,即从运动员一只脚着地,到该只脚再次着地.每个步态周期是一个竞走复步,包括两个竞走单步.每个步态周期的加速度曲线都包括一个峰值,即两个加速度波峰之间距就代表一个复步.相邻波峰间隔的时间即一个复步(2 单步)所用的时间,也就是竞走复步步频的倒数.相邻波峰间隔的时间可用采样频率和波峰之间的采样总数求得,据此,可计算出竞走单步步频

$$\Delta t = N/H, \quad (1)$$

$$F = 2/(\Delta t) = 2H/N, \quad (2)$$

其中, H 是采样频率, N 是本次步态周期的波峰与相邻的波峰间的采样个数, Δt 是两波峰间的时间间隔,

表 1 用于建模的运动员情况

Tab.1 The conditions of athletes for modeling				
姓名	性别	年龄/a	身高/cm	运动等级
张 XX	女	18	161	一级
吴 XX	女	20	160	一级
周 XX	女	22	167	二级
刘 XX	女	22	163	二级
王 XX	女	24	165	二级
李 XX	男	18	168	一级
武 XX	男	19	171	二级
徐 XX	男	23	170	二级
王 XX	男	23	173	二级
李 XX	男	24	175	二级

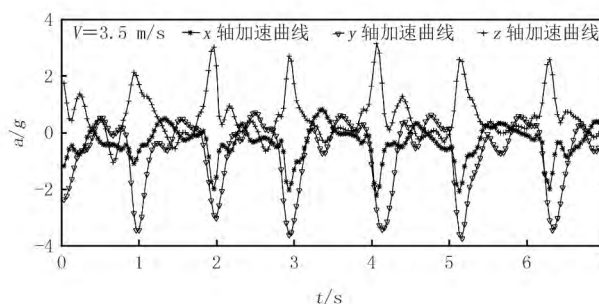


图 2 三轴加速度曲线

Fig.2 Triaxial acceleration curve

F 是本次步态的竞走单步步频.

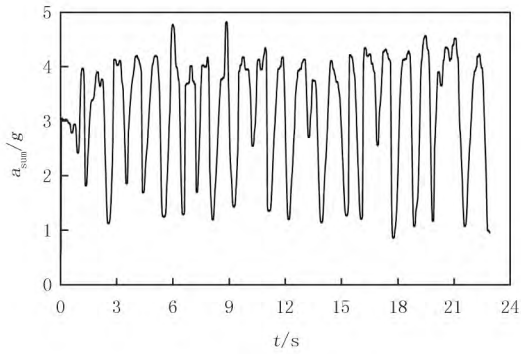


图3 原始 a_{sum} 数据波形
Fig.3 Original a_{sum} data waveform

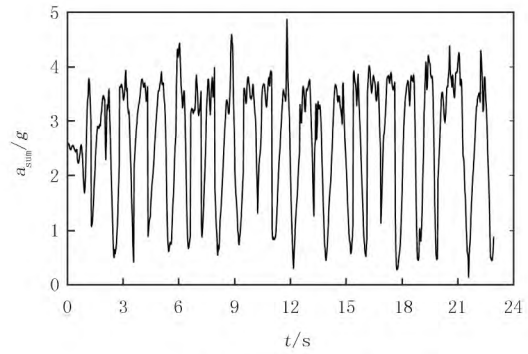


图4 滤波后的 a_{sum} 数据波形
Fig.4 Filtered a_{sum} data waveform

4.2 建立步长估算模型

运动员竞走保持快步频的节奏时,会限制步长的增加,容易陷入“快步频,小步长”的竞走模式.此外,竞走步频越大,身体运动越剧烈,加速度越大;反之加速度越小.因此,竞走步长的大小与步频和运动加速度有关.

采用 MATLAB 处理竞走实验采集的 400 组数据.由于同一运动员的竞走步态相差很小,图 5 中有很多点重合.

从图 5 可以看出,运动员竞走中,步长的大小与步频及运动加速度呈负相关变化,近似线性关系.步频越快,运动加速度越大,步幅越小.本文建立竞走步长的线性计算模型

$$L = MF + NA + P, \tag{3}$$

其中, F 表示该步态周期的竞走单步步频, A 表示步态周期的加速度峰值, L 表示该步态周期的单步步长, M, N, P 为计算模型的参数.理论上,运动员处于静止状态时, $F = A = 0$, 此时单步步长 $L = 0$, 即 $P = 0$, 但是该步长计算模型应用于运动员运动状态下, 参数 $P \neq 0$. 利用 MATLAB 工具对(1)~(3)式进行线性拟合.如图 6 所示, 拟合效果较好.

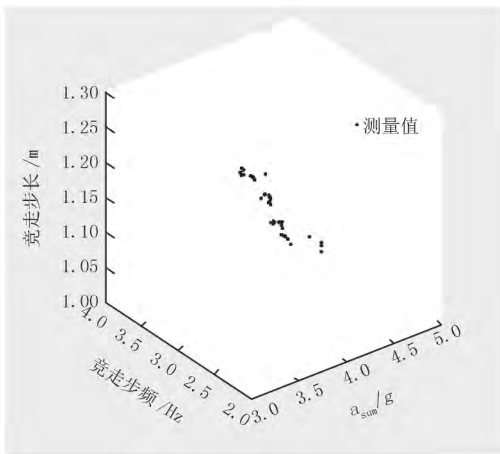


图5 步频、加速度与步长的关系
Fig.5 The relationship among step size, step frequency and acceleration

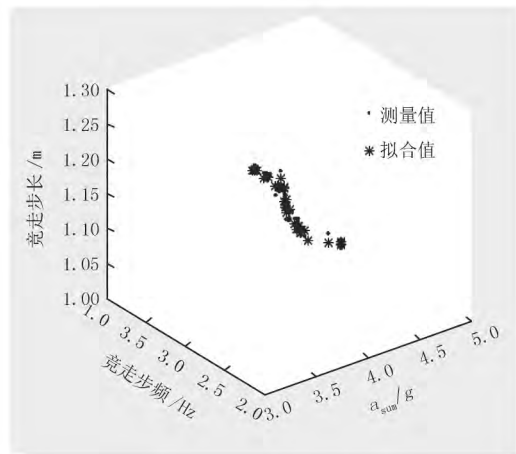


图6 拟合结果
Fig.6 Data fitting results

拟合误差如图 7 所示, 计算模型拟合的残差较小, 在 $-0.02 \sim 0.02$ m 范围内, 分布在零点两侧, 并在置信区间内, 相似度达到 $0.932 > 0.9$, 拟合有效. 拟合后的竞走步长计算模型

$$L = (1.8179 \text{ m}) - (0.1367 \text{ m})F - (0.0659 \text{ m})(A/g), \tag{4}$$

4.3 软件设计流程图

根据(2)式和(4)式可以实时计算每一步态的竞走步长,具体的软件设计流程图如图8所示.

4.4 算法验证及分析

为验证竞走步长与步频计算的准确性,本文进行多组竞走实验,实验场地仍为400 m操场跑道,同样,不考虑弯道上的数据,只研究运动员在直道上的测试数据.为了检验算法的可靠性和准确性,验证测试中的测试

者选用与表1不同的10名运动员,详见表2.

检验测试中,10名测试者仍将实验装置佩戴于腰部(见图9),竞走时,每一步态周期的加速度和采样个数被保存于实验装置的1 GB内存中,通过(4)式计算出每一步态的步长和步频,同样,步长和步频数据也保存于实验装置的内存中,测试结束后,测试数据通过串口上传到计算机.

实验结束后,10名测试者各被采集100组数据,共获得1 000组数据,测试数据如图10和图11所示.

从图10和图11可以看出,步长和步频的波动范围较大,并且同一实际步长对应多个估算步长,同一估算步长也对应多个实际步长,估算步频和实际步频也存在如此关系.这是不同被测运动员的竞走的技术风格不同,形成的步态周期不同.

此外,测试值和实际值存在偏差但是偏差较小.如表3所示.被测运动员的每一竞走步态周期的单步步长偏差在 $-0.02\sim 0.04$ m,步频误差在 $-0.02\sim 0.04$ Hz范围内,满足竞走步长和步频的捕捉要求.此外,还可以看出,被测运动员的单步步长及步频的最大误差均大于均值,这是由于采用平均值的估算方式忽略了单步步态变化的幅度,不能反映步长和步频的稳定性.这也说明了传统上采用全程平均值或某一赛程的(如1 km)的平均值评估竞走运动员的竞走水平是不够可靠.

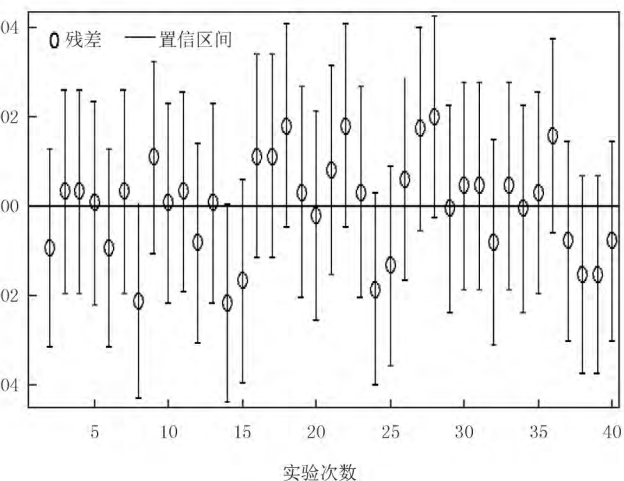


图7 数据拟合误差

Fig.7 Data fitting error

表2 用于验证的运动员情况

Tab.2 The conditions of athletes for testifying

姓名	性别	年龄/a	身高/cm	运动等级
陈XX	女	19	166	一级
朱XX	女	21	162	一级
杨XX	女	22	166	二级
李XX	女	22	163	二级
王XX	女	23	164	二级
李XX	男	20	172	一级
胡XX	男	21	174	一级
程XX	男	22	172	二级
刘XX	男	24	175	二级
周XX	男	25	176	二级

表3 实验结果误差分析

Tab.3 Error Analysis of Experimental Results

步长最大误差/m	步长均值误差/m	步频最大误差/Hz	步频均值误差/Hz
0.04	0.01	0.05	0.02

5 结 论

本文基于加速度传感器提出一种估算运动员竞走步长及步频的算法,根据运动员竞走时的三轴加速度,建立估算模型,该算法能够估算竞走运动员每一步态周期的竞走步长和步频,实验测试结果表明,竞走步长

及步频的估算准确度较高,每一竞走步态周期的单步步长偏差在 $-0.02\sim 0.04\text{ m}$ 之间,步频误差在 $-0.02\sim 0.04\text{ Hz}$ 范围内.该估算算法可以用来评估运动员的竞走技术,诊断竞走运动员在竞走比赛全程和日常训练中不同阶段的竞走水平,评估其技术的特征和稳定性,还可以用来为单个运动员设定个人最佳竞走水平状态时的步长和步频组合,通过跟踪观察竞走运动员在日常训练的竞走状态,有助于教练员和运动员掌握和了解自己的运动技术细节,筛选出该运动员在最佳竞走水平时的竞走步长和步频组合,按照此组合标准进行长期训练,保持竞走优势水平.对于竞走运动员日常训练具有重大的实用意义.

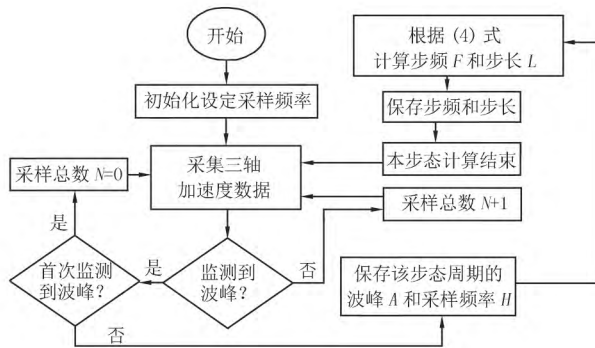


图 8 软件设计流程图

Fig.8 Software design flow chart



图 9 实验装置

Fig.9 experimental device

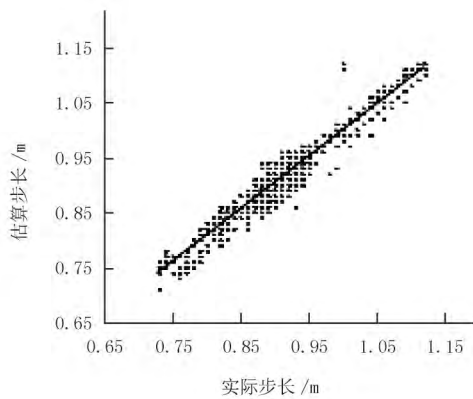


图 10 估算步长和实际步长

Fig.10 Estimated step size and actual step size

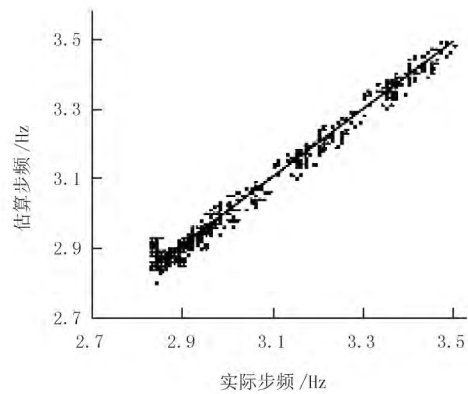


图 11 估算步频和实际步频

Fig.11 Estimated step frequency and actual step frequency

参 考 文 献

[1] 向泽锐,支锦亦,徐伯初,等.运动捕捉技术及其应用研究综述[J].计算机应用研究,2013(8):2241-2245.
 [2] 冯利正,陈健.运动捕捉技术在体育运动中的应用[J].杭州师范学院学报(医学版),2005(5):24-27.
 [3] 张俊峰.运动捕捉技术在运动训练中的应用[J].吉林体育学院学报,2005(4):69-72.
 [4] 王林,沈信生.我国竞走备战 2008 北京奥运会实力分析[J].北京体育大学学报,2005(12):1701-1703.
 [5] 李厚林.“复合钟摆”运动生物力学原理在竞走技术创新中的应用研究[J].西安体育学院学报,2013(2):196-203.
 [6] 胡好,王林,骆学锋,等.优秀竞走运动员技术训练结构与训练实施研究[J].中国体育科技,2011(2):8-20.
 [7] 周振华.我国男子 20 公里高水平竞走运动员专项训练负荷控制的研究[D].北京:北京体育大学,2013.
 [8] 全胜.中外优秀男子 20 公里竞走运动员竞走技术运动学特征的对比分析[D].北京:北京体育大学,2008.
 [9] 刘涛,张世浩.我国优秀女子 20 km 竞走运动员竞走技术三维摄像解析与研究[J].广州体育学院学报,2009(1):99-102.
 [10] 蒋宇乐,赵扬.中外女子 20 公里竞走后程技术差异[J].才智,2016(10):228-229.
 [11] 纪仲秋,余锋,李旭龙.我国 20 km 女子优秀竞走运动员竞走技术的生物力学研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013(6):645-648.

- [12] 查思静,周浩祥,游永豪,等.2014 年太仓竞走世界杯我国女子 10 km 队员竞走技术的运动学特征[J].南京体育学院学报(自然科学版),2015(5):22-26.
- [13] 郎雪梅,纪仲秋.我国优秀女子竞走运动员竞走技术的生物力学分析[J].中国体育科技,2003(4):32-33.

Estimating walking athlete's step length and step frequency based on the acceleration sensor

Tang Jianjun,Zhou Yang

(College of Education,Beijing Sport University,Beijing 100084,China)

Abstract: Sports capture technology is a powerful assistant for sports training and physical education teaching, which can capture the motion parameters and assist the coaches to evaluate and adjust the training effect. Based on the three-axis acceleration sensor, an algorithm is designed to calculate the walking step length and step frequency. The three-axis motion information of the athlete is captured, the noise interference of the sampled data is eliminated by the low-pass filtering method, the step frequency is solved based on the acceleration curve in the gait cycle, and the calculation model of the walking step is established. The test data show that the calculated step size and step frequency are high and the error is small. Obtaining the step size and step frequency of each gait can detect the stability of the technical structure of the walking race in the training and improve the training efficiency.

Keywords: tri-axial accelerometer; motion capture technology; step length; step frequency; walking

[责任编辑 杨浦 王凤产]

(上接第 34 页)

Research on two-stage classification model based on three-way decisions

Xu Jiucheng,Xu Zhanwei,Li Mengfan,Wang Nan

(College of Computer and Information Engineering;Henan Technology Research Center for Computational Intelligence and Data Mining, Henan Normal University,Xinxiang 453007,China)

Abstract: Aiming at the further division of the three-way decisions boundary domains, the problem of insufficient classification accuracy of the boundary knowledge of the three-way decisions caused by insufficient information, this paper proposes a new two-stage classification model based on three-way decisions(TWD-TP). In the first stage, the conditional probabilities of samples in three-way decisions are constructed by Bayesian rule, the required thresholds are obtained by solving the optimal loss function. Then the data sets are divided according to the three decision rules. However, the three-way decisions are based on the division of least-risk Bayes decision theory, including some misclassified samples in positive and negative domains. In the second phase, the samples of misclassification in positive domain and negative domain are introduced into the delayed decision domain as incremental information by class label index to construct new boundary domain, that is, reconstruction boundary domain. Finally, the classifier is used to perform classification verification on the reconstruction boundary domain objects. The experimental results show that the TWD-TP model proposed in this paper can not only filter out the samples with high misclassification features in the three-way decisions division, but also can correctly divide the previously undivided samples in the reconstruction boundary and improve the classification accuracy.

Keywords: three-way decisions; two-stage; incremental information; boundary domain

[责任编辑 陈留院 赵晓华]