

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.010

# 基于可穿戴惯性测量的滑雪运动员 姿态测量与水平评估方法

张艺佳, 姚小兰, 韩勇强, 李佩璋, 张浩, 曹洪卿, 方勛洋

(北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

**摘要:** 运动量化分析是科学化滑雪训练的重要发展方向, 而滑雪过程中人体运动模式的数字化表达是科学量化分析的基础和依据。设计并搭建了基于可穿戴 MEMS 惯性测量单元的人体运动捕捉与姿态重构系统, 结合人体多刚体运动模型实现了滑雪过程的人体重构, 并应用于高山滑雪运动中回转动作的辅助训练。同时, 针对基于多自由度模拟滑雪训练平台的室内训练场景, 提出了一种适用于滑雪回转运动的数字化评估方法。该方法利用动作捕捉系统和姿态重构系统提取滑行者五种滑行特征数据, 并通过与高水平运动员运动参数的相似性度量和线性拟合实现对滑雪运动员技术参数的评估, 以辅助科学训练。最后在室内 Olymp 模拟滑雪训练台上进行实验, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 动作捕捉; 微惯性测量单元; 可穿戴传感器; 辅助训练

**中图分类号:** TP212.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2021)06-0074-07

## A Method for Attitude Measurement and Level Evaluation of Skiers Based on Wearable Inertial Measurement

ZHANG Yi-jia, YAO Xiao-lan, HAN Yong-qiang, LI Pei-zhang, ZHANG Hao, CAO Hong-qing, FANG Xu-yang

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The movement quantitative analysis is an important development direction of scientific skiing training, and the digital expression of the human movement pattern in skiing is the foundation and basis of scientific quantitative analysis. In this paper, a human motion capture and posture reconstruction system based on wearable MEMS inertial measurement unit is designed and built, and the reconstruction of human body in skiing process by combining with the multi-rigid motion model of human body is realized, which has been applied to the assist training of the giant slalom in alpine skiing. In addition, aiming at the indoor training scene based on the multi-degree-of-freedom simulation ski training platform, a digital evaluation method suitable for skiing slewing movement is proposed, which extracts five sliding features of skiers with the motion capture and posture reconstruction system. The technical parameters of skiers can be evaluated by similarity measurement and linear fitting with the sports parameters of high level skiers, which can assist scientific training. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by experiments on an indoor Olymp simulated ski training platform.

**收稿日期:** 2020-12-06; **修订日期:** 2021-02-02

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFF0300800)

**作者简介:** 张艺佳(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事运动识别与训练指导方面的研究。

**通信作者:** 韩勇强(1983-), 男, 副研究员, 主要从事惯性导航、协同导航、多源信息融合等方面的研究。

**Key words:** Motion capture; Micro inertial measurement unit; Wearable sensors; Assist training

## 0 引言

滑雪时,身体姿态的控制能力是一种特殊的专项能力,这种能力对于滑雪成绩有着重要的影响。一套适用于滑雪训练的运动捕捉与重构系统不仅可以实时捕捉滑雪者的身体姿态,还可以搭配数字化评估方法帮助滑雪训练者找到自身与高水平运动员的差距,发现自身动作不足,纠正发力错误,在普及滑雪运动的同时提高大众对滑雪运动的热情。另外,一套可靠的运动捕捉及评分系统为滑雪训练者的科学训练提供了强有力的工具。

动作捕捉技术经过几十年的发展,主要分为两大类:基于视频设备的动作捕捉和基于传感器的动作捕捉。基于视频设备的动作捕捉系统成本高、便携性低、易受干扰<sup>[1]</sup>,随着惯性传感器的成本越来越低,基于传感器的动作捕捉系统逐步得到发展。目前,国外市场上一些公司推出了较为成熟的动作捕捉产品:如荷兰 Xsens 公司推出的 MVN 产品<sup>[2]</sup>、美国 Innalabs 公司推出的 3DSuit 产品<sup>[3]</sup>和英国 Vicon 公司推出的 Vicon Motion Syetem。国内关于动作捕捉也有一定的发展,如北京诺亦腾公司推出的戴若犁团队研发设计的 Noitom<sup>[4]</sup>和中国科学院传感网络与应用联合研究中心吴健康教授研发的 MMocap<sup>[5-8]</sup>。

目前,动作捕捉系统广泛应用于体育训练领域。H. Ghasemzadeh 等将可穿戴姿态检测设备应用于高尔夫训练中,采集高尔夫挥杆动作过程中手腕的旋转角度<sup>[9]</sup>。M. Sharma 等将可穿戴姿态检测设备应用于网球运动中,分析每个阶段的动作标准性<sup>[10]</sup>。R. Samir 等将可穿戴检测设备装在运动员手臂上,识别运动员是棒球运动中的投掷动作还是排球运动中的击打动作<sup>[11]</sup>。J. Chan 等将可穿戴姿态检测设备应用于舞蹈训练中,方便老师指导学生提升技能<sup>[12]</sup>。但是目前适用于滑雪运动的运动捕捉与重构系统较少,且缺少滑雪运动的量化分析,而运动量化分析是科学化滑雪训练的重要发展方向,人体滑雪过程中运动模式的数字化表达是科学化量化分析的关键步骤。

本文针对高山滑雪运动设计了一套基于惯性传感器的可穿戴式运动捕捉与重构系统,对人体 11 个节点的运动数据进行实时捕捉与重构。该设备既可以应用于户外,也可以应用于室内。同时,结

合人体多刚体运动模型实现了滑雪过程的人体重构。最后,针对目前缺少滑雪运动的量化分析和评估研究的现状,提出了一种适用于高山滑雪运动中回转动作的数字化评估方法,用于滑雪训练者滑行特点分析及辅助训练。

## 1 可穿戴人体姿态检测设备

本运动捕捉与重构系统为自主研发系统,其工作流程图如图 1 所示。

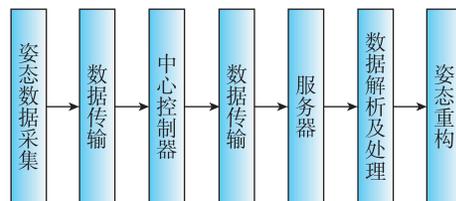


图 1 系统流程图

Fig. 1 System flow chart

本运动捕捉与重构系统的参数如表 1 所示。

表 1 动作捕捉设备参数

Tab. 1 Motion capture device parameters

参数类型	参数
节点数	11
供电方式	有线连接/移动电源
供电电压/V	3.3~5
电流/mA	<25
尺寸/cm	2.4×2.4×1
输出角度量程/(°)	±180
姿态测量稳定度/(°)	0.01
数据输出频率/Hz	120
数据传输方式	无线传输

11 个姿态采集模块分别穿戴在人体 11 个主要节点上,穿戴位置如图 2 所示。腕部还穿戴一个中心控制器,负责接收 11 个节点的姿态数据并发往服务器端。

## 2 人体建模与姿态复现

基于惯性传感器的人体运动建模分为骨骼模型建立和人体运动学模型建立。由于人体结构复



图2 姿态检测模块佩戴位置

Fig. 2 Posture detection module wearing position

杂,因此对人体模型作如下建模假设:

- 1) 忽略皮肤变形给人体运动带来的影响;
- 2) 将人体骨骼抽象为刚体,各个关节定义关节轴;
- 3) 关节坐标系与传感器坐标系和骨骼坐标系视为同一个坐标系。

建立包含 11 个节点和 5 条父子继承关系线的骨骼模型,5 条父子关系线分别为:

- 1) 骨盆—胸腔—头部;
- 2) 骨盆—胸腔—左大臂—左小臂;
- 3) 骨盆—胸腔—右大臂—右小臂;
- 4) 骨盆—左大腿—左小腿;
- 5) 骨盆—右大腿—右小腿。

骨骼模型如图 3 所示。

定义 2 个坐标系,分别是世界坐标系和传感器坐标系。世界坐标系以 X 轴为水平方向,Y 轴为垂直方向,Z 轴垂直于 XY 平面向上;传感器坐标系以上一关节与本关节的连线为 X 轴,关节的轴线方向为 Z 轴,另外一个为 Y 轴,逆时针为正,顺时针为负。

在人体初始姿态标定之后,姿态的求解主要由

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\gamma - \cos\beta \sin\alpha \sin\gamma & \sin\alpha \cos\gamma + \cos\beta \cos\alpha \sin\gamma & \sin\beta \sin\gamma \\ -\cos\alpha \sin\gamma - \cos\beta \sin\alpha \cos\gamma & -\sin\alpha \sin\gamma + \cos\beta \cos\alpha \cos\gamma & \sin\beta \cos\gamma \\ \sin\beta \sin\alpha & -\sin\beta \cos\alpha & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

当姿态发生平移变换时,位置矩阵  $\mathbf{P}$  表示为

$$\mathbf{P} = [P_x \quad P_y \quad P_z]^T \quad (6)$$

其中,  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  分别为三维向量在 X、Y、Z 轴的平移量。

根据姿态的实际运动,将肢体段  $j$  在关节  $j-1$  坐标系中的姿态及位置的变换用齐次变换阵  ${}^{j-1}\mathbf{T}$  表示

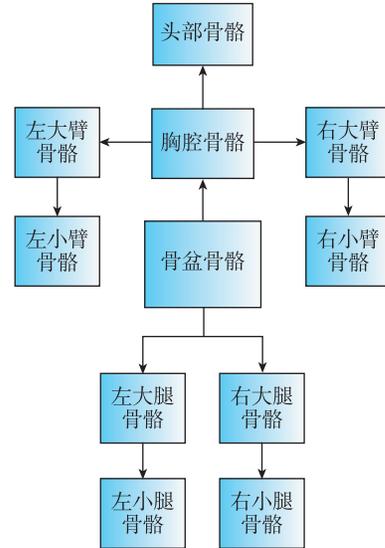


图3 骨骼模型图

Fig. 3 Skeletal model diagram

旋转矩阵及位置矩阵构成,旋转矩阵表示为

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为三维向量绕 X、Y、Z 轴旋转的角度; $\mathbf{R}_x$ 、 $\mathbf{R}_y$ 、 $\mathbf{R}_z$  分别为三维向量绕 X、Y、Z 轴旋转得到的旋转矩阵,总旋转矩阵表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \quad (4)$$

由式(1)~式(4)得到总旋转矩阵

$${}^{j-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^{j-1}\mathbf{R} & {}^{j-1}\mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  ${}^{j-1}\mathbf{R}$  为肢体段  $j$  在父关节  $j-1$  坐标系下的旋转矩阵; ${}^{j-1}\mathbf{P}$  为肢体段  $j$  在父关节  $j-1$  坐标系下的位置矩阵。

通过上述分析可得,关节系  $j$  在关节系  $i$  的齐次变换阵为

$${}^i T = {}^{i-1} T {}^{i-2} T \cdots {}^1 T \quad (8)$$

根据式(8)完成在规定坐标系下姿态的表示与转换。

在人体运动 3D 显示的具体实现过程中,选择 Unity 3D 作为开发工具,基于惯性数据的运动重构图如图 4 所示。

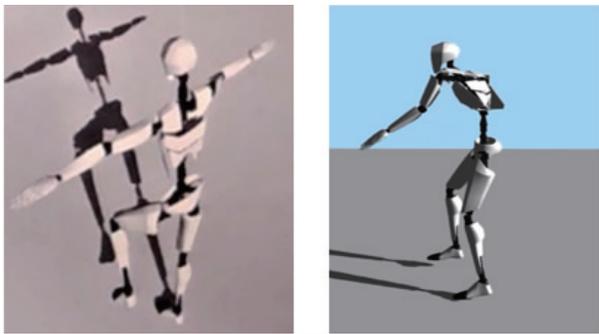


图 4 基于惯性数据的运动重构图

Fig. 4 Motion reconstruction images based on inertial data

### 3 滑雪辅助训练

本文所述动作捕捉系统不仅可以用于室外滑雪环境,还可用于室内模拟滑雪训练台,为滑雪者提供滑雪关键技术分析,同时搭配数字化评分方法,可以用于滑雪训练者滑行特点分析及辅助训练。

本文以室内模拟滑雪训练台为例,提供了一种基于运动捕捉系统、适用于回转运动的数字化滑雪水平评分方法。采用 SkyTechSport 公司的 Olymp 模拟滑雪训练台进行实验,其外观如图 5 所示。



图 5 模拟滑雪训练台

Fig. 5 Top view of simulated ski training platform

训练者穿戴运动捕捉系统在模拟滑雪训练台上进行回转运动,动作捕捉系统捕捉训练者姿态并将其实时显示。

#### 3.1 滑雪关键技术分析

本文定义滑雪者在模拟训练台的中间位置至最左端至中间位置至最右端再至中间位置的过程

为一次回转运动,定义回转速度为

$$v = \frac{R_l + R_r}{t} \quad (9)$$

其中,  $R_l$  为滑雪者在一次回转运动中从模拟训练台的中间位置至最左端位置的距离;  $R_r$  为滑雪者在一次回转运动中从模拟训练台的中间位置至最右端位置的距离;  $t$  为训练者完成一次回转运动所需的时间。

人体 3 个基准面分别为矢状面、额状面和水平面,如图 6 所示。

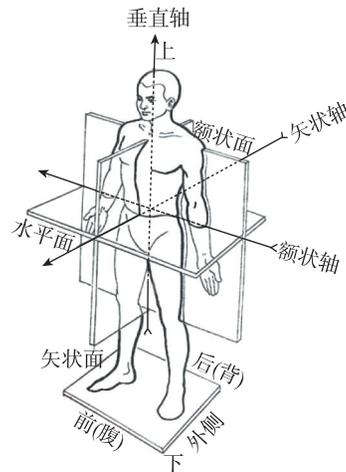


图 6 人体基准面

Fig. 6 Human datum level

实验分别采集滑雪教练、中等滑雪水平和无滑雪经验者三种滑雪水平的滑雪者在训练台上的姿态数据,同时记录训练者每做一次回转运动的平均速度。

提取五种能够体现滑雪者身体素质和滑雪能力的特征,如表 2 所示。

表 2 滑雪特征参数表

Tab. 2 Table of ski features parameters

数目	特征参数	对应身体素质
1	回转速度	全身协调性 <sup>[13]</sup> 下肢爆发力 <sup>[13]</sup> 膝关节伸展程度 <sup>[13]</sup>
2	左回转滑板最大倾角(立刃角度)	下肢力量 <sup>[14]</sup> 全身协调性 <sup>[14]</sup>
3	右回转滑板最大倾角(立刃角度)	下肢力量 <sup>[14]</sup> 全身协调性 <sup>[14]</sup>
4	矢状面上背部与垂直轴的平均夹角	上身稳定性 <sup>[15]</sup> 核心力量 <sup>[15]</sup>
5	额状面上背部与垂直轴的最大夹角	上肢力量 <sup>[16]</sup> 核心力量 <sup>[16]</sup>

其中,矢状面上背部与垂直轴的夹角如图7所示。

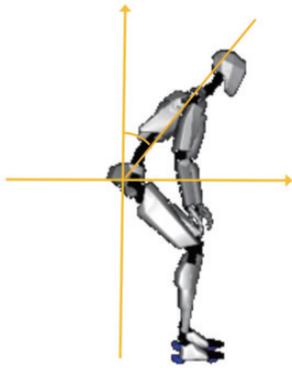


图7 矢状面上背部与垂直轴的夹角

Fig. 7 Angle between dorsal and vertical axis in sagittal plane

额状面上背部与垂直轴的夹角如图8所示。

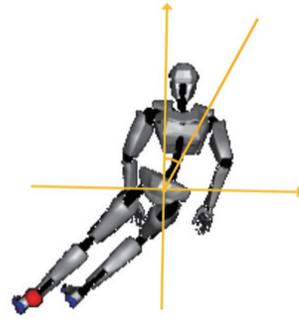


图8 额状面上背部与垂直轴的夹角

Fig. 8 Angle between dorsal and vertical axis of coronal plane

实验采集的三种水平滑雪者的滑板最大倾角、矢状面上背部与垂直轴的夹角、额状面上背部与垂直轴的夹角如图9所示。

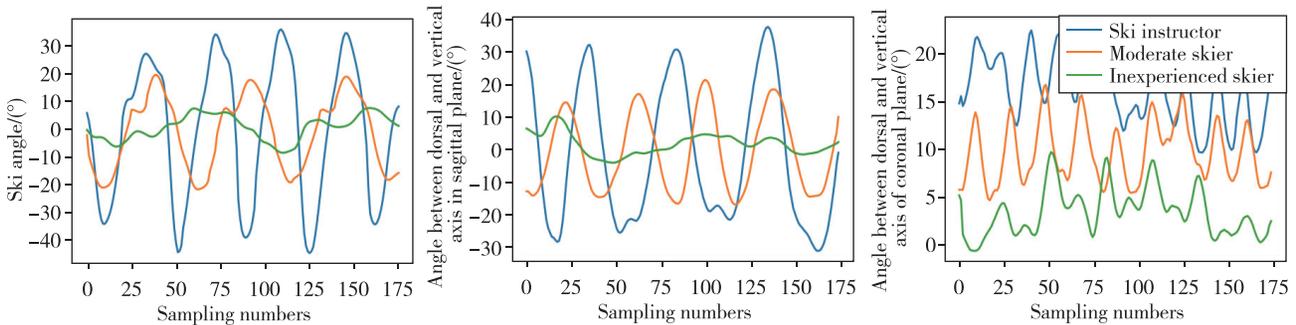


图9 不同水平滑雪者的滑行特征

Fig. 9 Skiing features of skiers at different levels

由数据分析可得,水平越高的滑雪者全身协调性越好、下肢爆发力越大、下肢动作幅度越大,表现出左右回转时小腿倾角大,即立刃角度大;水平越高的滑雪者上半身越稳定,表现为上身前倾且重心下压,矢状面上背部与垂直轴的平均夹角大;水平越高的滑雪者身体核心力量越大,上肢左右晃动幅度越大,靠上身事先倾斜带动下肢倾斜进行回转运动,表现出额状面上背部与垂直轴的最大夹角大。

### 3.2 滑雪水平评分

本文提出了一种适用于高山滑雪运动中回转动作的数字化滑雪水平评分方法。

提取滑雪教练员的5个标准滑行特征,按表2顺序分别记为  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ ,提取任意滑雪者的滑行特征,按上述顺序分别记为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ ,采用欧式距离法对比任意滑雪者与滑雪教练员动作接近程度,相似性度量公式如式(10)所示

$$d(X, Y) = \left( \sum_{i=1}^5 (x_i - y_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

针对上述相似性度量结果,对采集到的滑雪者的特征进行线性拟合,其中,高水平教练员为100分,中等水平滑雪者为80分,无经验滑雪者为40分,根据拟合结果得到最终综合评分公式。

以本实验采集的数据为例,根据上述评估方法得出的拟合公式为

$$S = -1.2d + 100 \quad (11)$$

其中,  $S$  为综合评分;  $d$  为相似性度量结果。

根据此评分方法,滑雪者在训练台上每做一次回转动作,系统都会实时给出该次回转运动的评分,分值越高,动作越接近滑雪教练员。

为验证该评分方法的可行性,实验召集9人分别在模拟训练台上滑行,3人为滑雪教练员,3人为中等水平滑雪者,3人为无经验滑雪者。滑行前,根据滑雪者的滑雪经验及水平分别给出9人的主观评分范围,滑行时由评分系统给出客观评分,如表3所示。

表3 滑雪者评分表

Tab. 3 Table of skiers' scores

滑行者	滑雪水平	主观评分	系统评分
1	高水平教练员	90~100	96
2	高水平教练员	90~100	94
3	高水平教练员	90~100	96
4	中等水平滑雪者	75~90	83
5	中等水平滑雪者	75~90	80
6	中等水平滑雪者	75~90	79
7	无经验滑雪者	30~60	48
8	无经验滑雪者	30~60	44
9	无经验滑雪者	30~60	56

由表3可以看出,系统评分结果均在主观评分范围内,该评分方法具有可行性。

### 3.3 滑雪训练建议

对于高山滑雪训练者,本文提出如下建议:

1)对于平均回转速度较慢的滑雪者,加强膝关节的伸展练习和下肢爆发力的练习;

2)对于滑板倾斜角度小、上身稳定性不好的滑雪者,加强核心部位(腰-盆骨-髌关节)的肌肉群力量训练,可以通过悬吊训练和瑞士球训练等提高身体稳定性和控制能力;

3)对于回转时上肢动作幅度较小的滑雪者,加强上肢力量练习和腰腹部位的力量练习,可以通过引体向上和俯卧撑等练习增强上肢带动下肢运动的能力。

## 4 结论

本文针对高山滑雪运动,设计并搭建了运动捕捉与重构系统,主要贡献和意义如下:

1)设计并搭建了基于可穿戴MEMS惯性测量单元的人体运动捕捉与姿态重构系统,并结合人体多刚体运动模型实现了滑雪过程的人体重构,为高山滑雪运动效能的深入分析提供了数据基础。

2)创新性地提出了一种面向高山滑雪运动中回转动作水平分析的关键技术指标量化提取算法,并提出了一种基于关键技术指标的数字化评估方法,为运动水平科学分析与运动训练辅助指导提供数据支撑。未来在动作捕捉系统的基础上,可以进一步研究数据采集与处理技术,深化高水平选手的精细化训练指导。

3)针对滑雪训练者的不同特点,提出有针对性

的训练建议,帮助训练者提高专项能力。

### 参考文献

- [1] Jegham I, Khalifa A B, Alouani I, et al. Vision-based human action recognition: an overview and real world challenges[J]. Digital Investigation, 2020, 32:200901.
- [2] Roetenberg D, Luinge H, Slycke P. Xsens MVN:full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors[J]. Xsens Motion Technologies Bv, 2009.
- [3] Zhang X, Shi Y, Zhang Y. A CAN-based inertial sensor network for lower limb exoskeleton[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP). IEEE, 2015: 473-476.
- [4] 李杰. 基于运动传感的人体姿态实时捕获系统研究[D]. 南昌:华东交通大学,2016.  
Li Jie. Research on real-time capture system of human posture based on motion sensing[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016(in Chinese).
- [5] Zhang Z Q, Wu J K. A novel hierarchical information fusion method for three-dimensional upper limb motion estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(11):3709-3719.
- [6] Zhang Z Q, Wong W C, Wu J K. Ubiquitous human upper-limb motion estimation using wearable sensors [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(4):513-521.
- [7] Tao G, Sun S, Huang S, et al. Human modeling and real-time motion reconstruction for micro-sensor motion capture[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Environments Human-Computer Interfaces & Measurement Systems. IEEE, 2011.
- [8] Li G, Wu Z, Meng X, et al. Modeling of human body for animation by micro-sensor motion capture[C]//Proceedings of 2009 2<sup>nd</sup> International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM). IEEE, 2009: 98-101.
- [9] Ghasemzadeh H, Loseu V, Guenterberg E, et al. Sport training using body sensor networks: a statical approach to measure wrist rotation for golf swing [C]//Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Body Area Networks. Los Angeles, California. Beussels: ICST, 2009: 2-9.
- [10] Sharma M, Srivastava R, Anand A, et al. Wearable motion sensor based phasic analysis of tennis serve for performance feedback[C]// Proceedings of 42<sup>th</sup> International Conference on Acoustics, Speech and Signal

- Processing. New Orleans, LA, USA. IEEE, 2017; 5945-5949.
- [11] Samir R, Derek P, Timothy U. Wearable IMU for shoulder injury prevention in overhead sports[J]. Sensors, 2016, 16(11):1847.
- [12] Chan J C P, Leung H, Tang J K T, et al. A virtual reality dance training system using motion capture technology[J]. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2011, 4(2):187-195.
- [13] 庞孟. 我国青年优秀越野滑雪运动员 V2 滑行技术运动学分析[D]. 石家庄:河北师范大学, 2020.  
Pang Meng. Kinematics analysis of V2 coasting technique of young elite cross-country skiers in China[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2020 (in Chinese).
- [14] 陈希. 高山滑雪大回转项目运动员核心力量的训练研究[J]. 科学大众(科学教育), 2012(11):168-169.  
Chen Xi. Study on core strength training of giant slalom athletes in alpine skiing[J]. Science Public (Science Education), 2012(11):168-169(in Chinese).
- [15] 任立刚. 高山滑雪回转技术的教学与训练方法研究[J]. 赤子(上中旬), 2015(8):334-335.  
Ren Ligang. Research on teaching and training methods of alpine skiing slewing technique[J]. Naked(upper middle), 2015(8):334-335(in Chinese).

(编辑:孟彬)