



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403029

引用格式: 历建宇, 梁东雪, 曹春梅, 等. 人工智能三维运动分析系统在跳台滑雪项目中的应用[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(6): 2389-2396.

Li Jianyu, Liang Dongxue, Cao Chunmei, et al. Application of artificial intelligence-based three-dimensional motion analysis system in ski jumping[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2389-2396.

自动化技术、计算机技术

人工智能三维运动分析系统在跳台滑雪项目中的应用

历建宇¹, 梁东雪², 曹春梅¹, 张栋^{2*}

(1. 清华大学体育部, 北京 100084; 2. 首都体育学院体育人工智能研究院, 北京 100091)

摘要 为探究人工智能三维运动分析应用于分析跳台滑雪飞行距离影响因素和优化运动员技术动作的可行性, 在 2022 年国际雪联洲际杯北京站比赛中对 16 名运动员的起跳阶段动作进行固定范围拍摄, 使用人工智能三维运动分析系统对拍摄视频进行自动三维动作解析。该分析系统可以获取运动员起跳阶段的生物力学参数, 通过对比人工与智能系统在处理人体关节点三维坐标时间序列时的相关系数及差值, 对该系统应用于跳台滑雪的可行性进行验证, 其结果的多重相关系数大于 0.91, 差值平均值小于 1.48 cm。最后对国外高水平运动员和国内运动员技术动作参数进行比较, 并采用 *t* 检验和皮尔逊相关系数法分析起跳阶段身体姿态参数与运动表现的相关关系。结果显示运动员出台速度与蹬伸开始踝角、膝角相关, 最终成绩与蹬伸开始踝角相关, 提示中国运动员应注重起跳阶段的充分蹬伸、把握起跳时机, 能够显著提高运动表现。可见该系统能够对跳台滑雪技术分析做到精准反馈, 且可获得世界冠军运动员生物力学参数以构建冠军模型为中国运动员提供训练参考。

关键词 人工智能; 深度学习; 跳台滑雪; 生物力学

中图分类号 TP181;

文献标志码 A

Application of Artificial Intelligence-Based Three-Dimensional Motion Analysis System in Ski Jumping

LI Jian-yu¹, LIANG Dong-xue², CAO Chun-mei¹, ZHANG Dong^{2*}

(1. Division of Sports Science and Physical Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Institute of Artificial Intelligence in Sports, Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100091, China)

[Abstract] To explore the feasibility of using AI (artificial intelligence) three-dimensional motion analysis for analyzing the influencing factors on the distance of ski jumping and optimizing athletes' technical movements, a study was conducted during the 2022 FIS Continental Cup Beijing event. Sixteen athletes' take-off phase motions were captured within a fixed range using AI-based three-dimensional motion analysis system. This system automatically parsed the videos to obtain biomechanical parameters of the athletes' take-off phase. By comparing the correlation coefficients and differences between manually processed data and AI-generated data of the three-dimensional coordinates of body joints over time, the validation of the equipment for ski jumping was conducted. The multiple correlation coefficient was found to be greater than 0.91, with an average difference value of less than 1.48 cm, indicating the reliability of the system. Furthermore, a comparison was made between the technical parameters of high-level foreign athletes and domestic athletes. Using *t*-tests and Pearson correlation coefficient analysis, the relationship between body posture parameters during the take-off phase and sports performance was examined. The results reveal correlations between take-off speed and angles of ankle and knee during the take-off phase, and between the final score and ankle angle during take-off, suggesting that Chinese athletes should focus on achieving full extension during take-off and timing their jumps appropriately to significantly enhance sports performance. Overall, the system demonstrated precise feedback for ski jumping technique analysis. Additionally, it enabled the acquisition of biomechanical parameters from world champion athletes to construct a champion model, providing valuable training references for Chinese athletes.

[Keywords] artificial intelligence; deep learning; ski jumping; biomechanics

收稿日期: 2024-04-24; 修订日期: 2024-12-13

基金项目: 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2020YFF0304605)

第一作者: 历建宇(1999—), 男, 汉族, 吉林白山人, 硕士研究生。研究方向: 运动训练与机能监控。E-mail: jy-li22@mails.tsinghua.edu.cn。

* 通信作者: 张栋(1985—), 男, 汉族, 河北武邑人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。研究方向: 运动训练与机能监控、体育人工智能。E-mail: zhangdong2023@cupes.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

跳台滑雪是技能主导类的竞速项目,运动员在助滑、起跳、飞行、着陆阶段的身体姿态和技术动作是决定跳台滑雪运动员运动表现的重要因素^[1]。由于起跳阶段的动作姿态决定了飞行阶段的气动特性,错误的起跳动作无法在飞行阶段加以修正,所以起跳阶段是跳台滑雪全过程中最为关键的阶段^[2]。而构建冠军运动员生物力学姿态模型可为跳台滑雪运动员取得优异成绩提供技术支持^[3]。但构建跳台滑雪模型中,面临实地测试中的各种困难,例如运动范围广、瞬时速度快、低温环境等。所以,近些年风洞流场模拟测试、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)、仿真模拟等技术的应用为跳台滑雪训练提供了相关支持^[4-7]。例如,通过风洞模拟测试结合运动员起跳阶段身体姿态生物力学参数采集,帮助运动员评估气动阻力和纠正错误技术动作^[8]。对人/板多体系统飞行阶段气动特性进行 CFD 模拟,探究理论最佳飞行姿态^[9-11]。由于上述技术手段注重模拟环境,与真实运动场景差距较大,为此,视频全景分析技术和基于超宽带(ultra-wide band, UWB)的生物力学系统被研究人员不断开发并应用于跳台滑雪科学化测量中^[12],但视频全景分析存在人工标记任务量大、处理速度慢,难以实时反馈于日常训练等问题。基于 UWB 的生物力学系统需要运动员在运动全程穿戴传感器,对人/板多体系统各阶段气动特性仍存在部分影响。

为科学采集实际条件下运动员参数,基于计算机视觉的机器学习技术在人体动作捕捉方面的迅速发展为跳台滑雪的动作姿态分析提供了新的可能性^[13-14],传统的机器学习难以精准捕捉人体复杂的非线性结构及连续运动帧之间的时空关系,无法对跳台滑雪技术动作进行及时准确的分析^[15]。而现有的深度学习方法多采用卷积神经网络、循环神经网络等,利用已有的人工标记数据集进行模型训练,随后将视频输入经过训练的神经网络,进行人体动作姿态的识别与捕捉^[16-19]。当前,通过多台摄像机同步多视角拍摄人体动作姿态,并结合深度学习算法能够快速、精准获取人体关节位点和关键标记点的三维空间坐标^[20-24]。为解决跳台滑雪非实验室条件下科学测量评价的局限性,大连锐动科技有限公司研发基于计算机视觉的人工智能三维运动分析(Fastmove 3D motion AI)系统,已应用于标枪、铁饼、速度滑冰运动员的技术动作分析^[25-26],但在跳台滑雪运动应用的精度和可行性尚待验证。

本文研究将 Fastmove 3D motion AI 系统应用于跳台滑雪比赛中,对 2022 年国际雪联洲际杯暨北京

奥运测试赛的运动员起跳阶段专项技术生物力学姿态进行分析,在此过程中对人工与智能系统处理人体关节三维坐标时间序列时的相关系数及差值进行对比,以验证大范围运动场景下应用人工智能三维动作分析系统的可行性,并为中国跳台滑雪备战 2026 年米兰冬奥会提供训练策略建议。

1 研究方法

1.1 测试对象

本文研究的测试对象为 2022 年北欧两项国际雪联洲际杯获得前 10 名的国外北欧两项运动员和 6 名中国优秀北欧两项运动员(表 1),比赛成绩如表 1 所示。

1.2 Fastmove 3D motion AI 系统的数据分析原理

Fastmove 3D motion AI 系统分为硬件和软件两部分。首先,视频图像采集通过高速摄像机拍摄获取,为避免摄像机的数量和位置引起的遮挡对图像细节特征捕捉的影响,以及计算量的局限对动作捕捉精度的影响,采用 4 台高速摄像机固定范围拍摄方式。其次,硬件设备所采集的数据送入软件部分进行分析。算法技术流程图如图 1 所示,主要采用卷积神经网络深度学习模型进行图像中人体关键点的追踪。首先通过已有大量专业标注数据集进行深度学习生成专项训练形成捕捉人体关节中心点的神经网络模型。然后将所采集的数据送入训练好的模型进行自动人体动作姿态分析^[27-28]。该深度学习网络融合的光流特征的检测、时间约束模块等进行目标的检测和跟踪,减少了背景等因素对目标检测的影响。最终建立了人体关节中心点在外轮廓内的位置概率分布图,获取了人体三维空间坐标以计算相应生物力学参数。该系统使用的深度学习方法添加了光流法进行目标追踪,有效提高跟踪效率,并且增加相邻运动帧的时间约束,提高模型识别准确性。

1.3 实验数据采集

采用固定范围拍摄的方法获取 16 名运动员跳台滑雪比赛时的运动视频图像(图 2)。采用 4 台 Zcam E2 高速摄像机(拍摄频率:60 帧/s,分辨率:1 920 × 1 080),在助滑-起跳过渡的位置进行三维视频拍摄,利用 28 点辐射型直接线性变换(direct linear transform, DLT)框架进行空间标定,拍摄范围以涞源跳台滑雪科研训练基地 K90 跳台的出台位置为原点,覆盖助滑过程的最后 7 m,起跳后 3 m,总计约 10 m 的有效运动区域,4 台主光轴夹角范围 60° ~ 120°使运动员活动的全部范围在镜头画面内(本次测试中夹角为 90°),固定位置后不再调整摄

表1 2022年国际雪联洲际杯前10名运动员和6名中国优秀运动员基本信息和成绩

Table 1 Presents the basic information and performance of the top 10 athletes in the 2022 FIS Continental Cup and 6 Chinese outstanding athletes

运动员编号	国籍	年龄	出台速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	距离/m	距离得分	姿态得分	环境风补偿分	总得分
W01	奥地利	25	90.2	98.5	67.0	52.0	2.4	121.4
W02	日本	21	90.1	99.0	68.0	52.5	0.8	121.3
W03	奥地利	22	90.6	96.0	62.0	50.0	4.9	116.9
W04	日本	22	89.7	95.5	61.0	50.5	5.1	116.6
W05	捷克	25	90.7	96.5	63.0	52.0	-0.9	114.1
W06	捷克	18	90.2	97.5	65.0	52.0	-4.4	112.6
W07	德国	23	90.8	94.0	58.0	47.5	3.6	109.1
W08	德国	22	89.9	92.5	55.0	51.0	2.9	108.9
W09	奥地利	23	90.4	94.5	59.0	51.0	-1.7	108.3
W10	奥地利	21	89.7	93.5	57.0	51.0	-0.6	107.4
平均值		22.20	90.2	95.6	61.5	50.9	1.21	113.7
标准差		2.04	0.39	2.16	4.33	1.44	3.1	5.27
C01	中国	22	89.9	88.0	46.0	48.5	0.7	95.2
C02	中国	18	89.3	78.5	27.0	43.0	-0.9	69.1
C03	中国	17	89.7	78.5	27.0	42.5	-1.4	68.1
C04	中国	21	89.3	87.5	45.0	25.5	-2.6	67.9
C05	中国	27	89.7	76.0	22.0	45.5	-2.5	65.0
C06	中国	22	89.1	75.5	21.0	42.5	-2.6	60.9
平均值		21.17	89.5	80.7	31.3	41.3	-1.6	71.0
标准差		3.54	0.31	5.63	11.25	8.06	1.31	12.21

注:编号中的W为世界精英运动员;C为中国运动员。

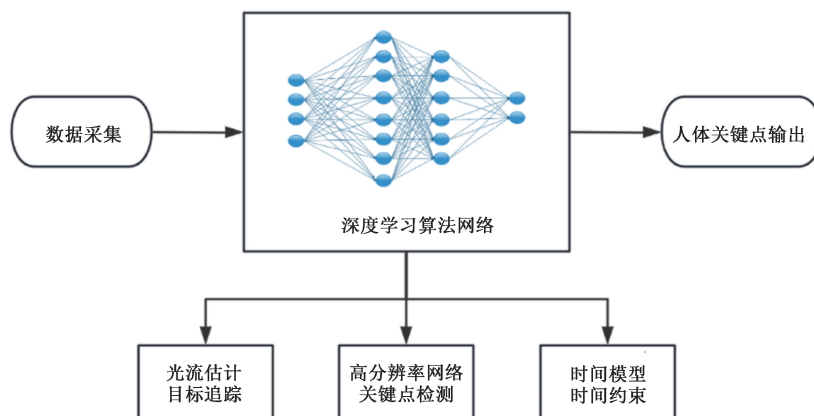


图1 Fastmove 3D motion AI 技术路线

Fig. 1 Fastmove 3D motion AI technical route

相机位置,直至拍摄完成,设置帧率为 60 Hz,快门速度为 $1/1\ 000\ \text{s}$,手动对焦。正式拍摄前,在运动员活动范围中心架设通用标定框架,确保框架在 4 台摄像机画面中完整呈现,最佳占据比例为 80% ~ 90%;以运动员前进方向水平轴为 X 轴,左手方向水平轴为 Y 轴,垂直方向为 Z 轴,设置至少 3 个 Marker 点的地面标记物用于确定原点、X 轴、Y 轴。正式拍摄时,清理标定框架和地面标记物,拍摄 2022 国际雪联洲际杯比赛中男子运动员的起跳阶段动作姿态。

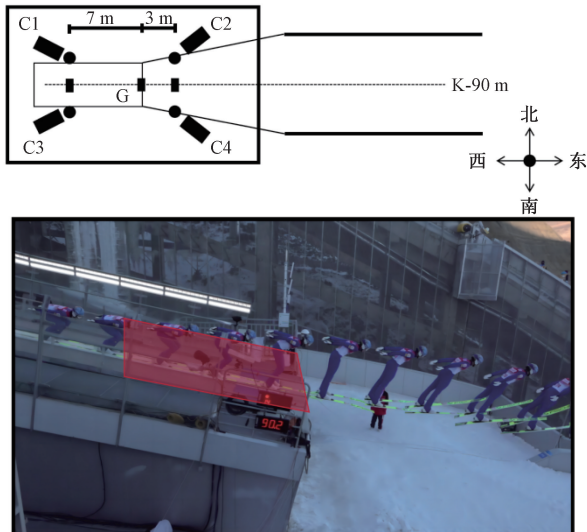
1.4 数据处理与统计分析

本文研究分别使用 Fastmove 3D motion AI 自动

解析和人工解析的方式提取并计算所采集影像中的生物力学参数。

首先使用人工智能三维运动分析系统对比赛视频进行自动解析。系统算法能够提取 21 个人体关节中心点的三维空间坐标,用于计算生物力学参数。这些参数包括踝角,指膝、踝关节中心点连线和脚跟、脚尖连线的夹角;膝角,指髌、膝、踝关节中心点的夹角;髌角,指肩、髌、膝关节中心点的夹角等。

然后使用人工解析的方式进行分析,所采用的视频分析系统为 Dartfish。由专业研究人员对获得的原始视频进行人工逐帧和逐点标注解析。



C1 ~ C4 表示 4 部采集视频的摄像机
图 2 标定设置及摄像机架设方位

Fig. 2 Calibration configuration and camera deployment orientation

最后,采用组间独立样本 t 检验,对出台速度、飞行距离、姿态分数与最终成绩与所有运动员动作姿态特征进行皮尔逊相关分析,采用统计软件 SPSS27.0 进行统计学分析。

2 结果

2.1 Fastmove 3D motion AI 系统应用跳台滑雪有效性验证

对比赛中 16 名北欧两项运动员视频进行智能系统自动解析和人工解析,自动解析的人体关节点三维坐标-时间曲线与人工解析的人体关节点三维坐标-时间曲线的相关系数均高于 0.91,自动解析曲线与人工解析曲线的平均差值小于 1.48 cm,除左、右髌、膝 XYZ 坐标外,其余人体关节点三维坐标两曲线差值均小于 2.00 cm(表 2)。

2.2 Fastmove 3D motion AI 系统应用跳台滑雪的分析结果

2022 年国际雪联洲际杯中前 10 名运动员和中国优秀运动员跳台滑雪单项成绩(表 1)中,中国运动员在出台速度($p = 0.002$)、距离分数($p = 0.001$)、姿态分数($p = 0.032$)及总得分($p < 0.001$)与世界精英水平上存在较大差距;以总得分为因变量,距离分数和姿态分数为自变量构建回归模型发现,距离分数与姿态分数对总得分的影响权重分别为 0.779、0.320,结果显示决定影响跳台滑雪成绩的因素中,距离分数更为关键。

对 2022 年北欧两项国际雪联洲际杯获得前 10 名的国外北欧两项运动员和 6 名中国优秀北欧两项

表 2 人工处理与 Fastmove 3D motion AI 系统在人体关节点三维坐标时间序列分析中的相关系数及差值对比

Table 2 Comparison of correlation coefficients and differences in the analysis of three-dimensional coordinates of human body joints over time using Fastmove 3D motion AI

标定位置	X 轴坐标		Y 轴坐标		Z 轴坐标	
	相关系数	差值/cm	相关系数	差值/cm	相关系数	差值/cm
头顶点	0.999 9	0.15	0.999 9	0.16	0.957 5	0.17
下颌	0.999 9	0.34	0.999 9	0.27	0.960 8	0.23
胸骨	0.999 8	0.43	0.999 7	0.39	0.987 3	0.44
左肩	0.999 8	0.14	0.999 8	0.18	0.987 9	0.26
左肘	0.999 8	1.21	0.999 7	1.45	0.986 8	1.37
左手	0.999 8	1.83	0.999 6	2.18	0.986 8	1.76
左腕	0.999 9	0.75	0.999 7	0.84	0.983 5	1.57
左髌	0.999 4	3.81	0.996 5	3.69	0.919 6	3.57
左膝	0.999 5	4.13	0.998 4	4.48	0.923 4	4.97
左踝	0.999 9	0.52	0.999 9	0.64	0.955 9	1.37
左脚尖	0.999 8	2.21	0.997 5	2.53	0.963 6	1.12
左脚跟	0.999 7	2.1	0.999 8	2.31	0.983 3	0.48
右肩	0.999 9	0.36	0.999 9	0.39	0.977 5	0.87
右肘	0.999 9	0.51	0.999 8	0.54	0.986 7	0.54
右手	0.999 9	0.46	0.999 8	0.59	0.978 4	1.26
右腕	0.999 9	0.75	0.999 8	0.65	0.985 3	0.73
右髌	0.999 4	3.45	0.996 4	4.85	0.911 5	3.87
右膝	0.999 5	5.64	0.997 5	4.65	0.926 7	3.78
右踝	0.999 9	0.62	0.999 9	0.37	0.978 7	0.57
右脚尖	0.999 8	0.35	0.997 1	0.43	0.988 5	0.84
右脚跟	0.999 7	0.55	0.998 7	0.67	0.997 8	0.65

运动员录像进行自动解析,获得运动员蹬伸开始、起跳时刻和离台时刻生物力学参数(图 3)。从图 3 可知,世界精英运动员蹬伸开始踝角小于(平均为 $48.98^\circ \pm 4.65^\circ$)中国优秀运动员(平均为 $55.44^\circ \pm 3.69^\circ$),结果对比显示在蹬伸开始时,更小的踝角有利于获得更高的运动成绩(表 3);结合三维动作捕捉系统分析发现蹬伸开始时较小的踝角,可获得更大的踝关节屈曲程度,有利于踝关节背屈伸肌肉充分做功,起跳流畅性更优。

结合起跳阶段生物力学参数与运动表现相关性结果分析得出,与跳台滑雪出台速度高度负相关的动作姿态指标为蹬伸开始膝角、踝角;与最终成绩高度负相关的动作姿态指标为蹬伸开始踝角。起跳蹬伸开始阶段的膝角和踝角与运动表现的高度相关说明,跳台滑雪运动员的下肢功能特征是运动成绩的重要影响因素,较小的膝角、踝角使运动员蹬伸幅度更大,有利于增加起跳阶段驱动力。

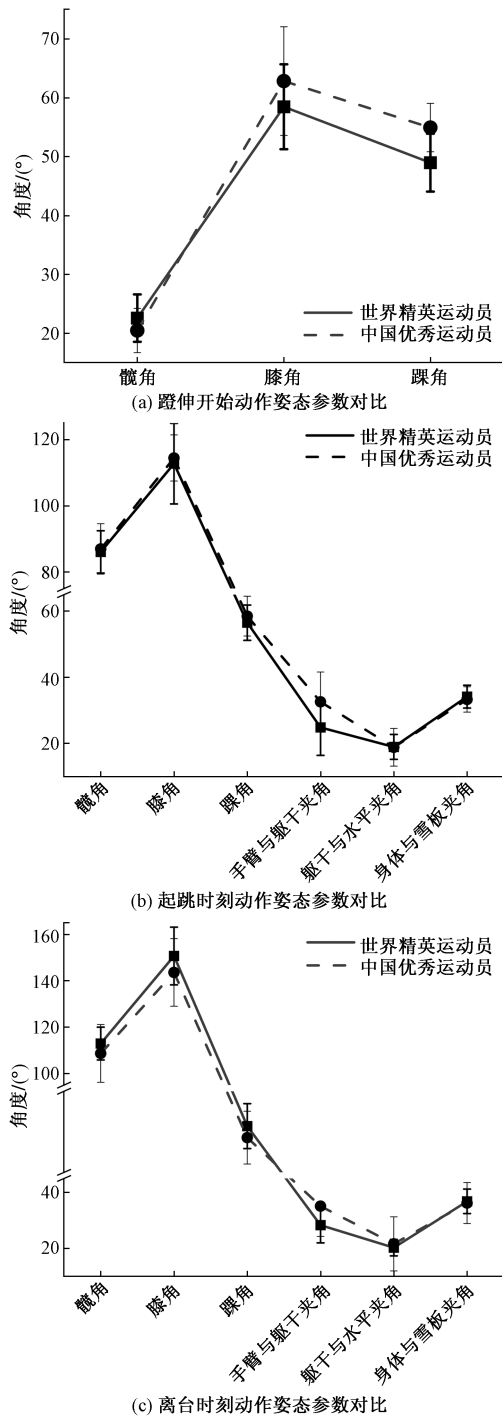


图3 世界精英运动员与中国优秀运动员蹬伸开始、起跳时刻、离台时刻动作姿态参数对比

Fig. 3 Comparison of action posture parameters between world elite athletes and Chinese athletes (take-off starta, take-off moment, departure moment)

3 讨论

3.1 Fastmove 3D motion AI 系统应用跳台滑雪有效性验证

研究表明, Fastmove 3D motion AI 系统应

用跳台滑雪自动解析的人体关节坐标与时间的相关曲线和人工解析的曲线的相关系数均高于 0.91,其中,自动解析曲线与人工解析曲线在人体关节的 X、Y 坐标表现优异,相关系数均高于 0.99,在 Z 坐标上表现良好,仅存在髌、膝部位的相关系数低于 0.95,这可能与起跳过程运动员的专项动作有关。自动解析曲线和人工解析曲线的差值进一步提供了有效证据,除左、右髌 XYZ 坐标外,其余人体关节两曲线差异均小于 2.0 cm,验证了 Fastmove 3D motion AI 系统捕捉人体关节的准确性。4 台摄像机放置于运动员助滑、起跳阶段的两侧,有效解决了单侧拍摄时,对侧身体部位存在遮挡时间较长的问题,避免了自动解析的人体关节三维坐标出现较大误差,是本次研究中自动解析与人工解析人体关节三维坐标-时间曲线精度较高的原因。而髌、膝关节由于跳台滑雪专项技术要求,需要运动员在起跳阶段快速蹬伸,动作速度快,动作幅度大,对捕捉算法的精准性造成一定困难,而起跳阶段髌、膝、踝关节等下肢部位能力是决定跳台滑雪运动表现的关键制约因素,更为精准的客观数据能够为训练提供参考。

上述结果验证了 Fastmove 3D motion AI 系统应用于跳台滑雪大范围运动场景下捕捉人体关节三维坐标的准确性,今后应更新算法,针对髌、膝关节提高自动解析获得的人体关节三维坐标的精度,且可考虑增加摄像机数量,实现对跳台滑雪全过程的应用。

3.2 Fastmove 3D motion AI 系统在跳台滑雪项目中的应用

跳台滑雪大范围运动场景、高速的运动形式使其科学测量与评价具有较大挑战,其室外严寒、阵风、地势等环境因素对仪器设备硬件适应能力提出较高要求,对拍摄的图像与视频采集以及分析提出了高要求。本次研究应用的 Fastmove 3D motion AI 系统能够很好地对实际场景中跳台滑雪运动员的身体动作特征进行捕捉分析。通过对起跳阶段身体运动学指标进行差异分析发现,高水平运动员起跳时身体重心前倾,膝关节蹬伸能力较强,膝关节伸展角速度、大腿水平前移速度和身体相对滑雪板的水平位移速度均显著高于普通运动员^[29-30],能够在起跳阶段获得更大的驱动力。此外,高水平运动员起跳阶段踝角相对较小,离台时身体重心位置相对靠前,有利于在起跳过程中保持垂直方向速度的同时,使身体姿态前倾获取足够的身体前翻角动量,达到最佳升阻比^[3,31]。2022 年国际雪联洲际杯中获得前 10 名运动员与中国运动员蹬伸、离台

表3 2022年国际雪联洲际杯起跳阶段运动表现与运动学参数的皮尔逊相关系数分析结果
Table 3 Pearson correlation coefficient analysis results between take-off phase athletic performance and kinematic parameters in the 2022 FIS Continental Cup

动作姿态特征指标	出台速度		飞行距离		姿态分数		最终成绩	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
蹬伸开始髋角	0.100	0.712	0.370	0.159	-0.058	0.830	0.244	0.362
蹬伸开始膝角	-0.564	0.023*	-0.303	0.253	-0.408	0.117	-0.412	0.113
蹬伸开始踝角	-0.635	0.008**	-0.465	0.070	-0.492	0.053	-0.573	0.020*
起跳瞬间髋角	0.047	0.862	0.165	0.541	-0.111	0.683	0.089	0.742
起跳瞬间膝角	-0.236	0.378	-0.027	0.922	-0.167	0.536	-0.106	0.696
起跳瞬间踝角	-0.277	0.299	-0.240	0.370	-0.293	0.271	-0.320	0.227
起跳瞬间手臂与躯干夹角	-0.149	0.628	-0.097	0.753	-0.416	0.157	-0.211	0.489
起跳瞬间躯干与水平夹角	0.398	0.127	0.261	0.330	0.298	0.262	0.298	0.262
起跳瞬间身体与雪板夹角	0.468	0.067	0.356	0.176	0.226	0.400	-0.358	0.173
离台瞬间髋角	0.273	0.306	0.419	0.106	0.119	0.661	0.394	0.131
离台瞬间膝角	0.142	0.599	0.269	0.313	0.162	0.550	0.273	0.307
离台瞬间踝角	0.002	0.995	0.245	0.361	0.045	0.868	0.177	0.512
离台瞬间手臂与躯干夹角	-0.092	0.777	-0.182	0.571	-0.439	0.153	-0.300	-0.343
离台瞬间躯干与水平夹角	0.239	0.372	0.223	0.406	-0.017	0.950	0.168	0.534
离台瞬间身体与雪板夹角	0.282	0.290	0.340	0.297	0.079	0.772	0.302	0.256

注：*表示 $P < 0.05$ ；**表示 $P < 0.01$ 。

时刻膝角角度变化分别为 $54.29^\circ \pm 9.73^\circ$ 、 $49.97^\circ \pm 8.12^\circ$ ，踝角角度变化分别为 $7.54^\circ \pm 5.16^\circ$ 、 $3.57^\circ \pm 6.39^\circ$ ，与世界精英运动员相比，中国运动员蹬伸开始膝、踝关节角度相对较大，离台瞬间膝、踝关节角度相对较小导致下肢蹬伸幅度较小，下肢快速蹬伸不够充分难以产生足够的身体前翻角动量，相对于世界精英运动员增加了人/板系统在速度方向上的迎风面积，空气阻力相对较大，从而影响离台后的飞行距离^[32]。起跳阶段身体姿态参数与运动表现的相关性分析结果显示，起跳阶段中蹬伸开始膝角、踝角与竞技表现显著相关。上述研究结果可能是因为中国的北欧两项部分运动员是通过跨项选材从越野滑雪选拔而来，以往训练中更加注重力量耐力训练，对跳台滑雪所需要的下肢专项爆发力相对较弱导致的。在后续的备战周期中应针对下肢爆发力进行专项训练，同时注重髋、膝、踝关节的柔韧性训练，重视关节深层小肌群的功能性力量训练。此外，起跳过程中髋关节过快的屈伸，容易导致运动员上半身趋近直立形态，着陆过程中踝关节活动过大会影响着陆瞬间运动员整体的稳定性，所以在重视柔韧性训练的同时，加强关节肌肉力量的训练，针对性增强髋、膝、踝关节稳定性，帮助运动员稳定各阶段的动作姿态^[33-34]。

综上所述，该系统可做到快速、精确反馈，当日提供个体运动员的动作姿态分析报告，支持运动过程中完整的关节角度、关节点位移等相关参数的重建，包括助滑技术、起跳时刻、离台瞬间的髋角、膝角、踝角、手臂与躯干夹角、躯干与水平夹角、身体

与雪板夹角和离台瞬间速度等。这些精确的动作特征快速捕捉、识别与分析与不同时刻图像剪影叠加的可视化反馈是其他手段难以达到的，能够高精度、高效率地实现训练及赛事后即时分析。传统的跳台滑雪技战术分析主要依赖教练员的个人经验，而应用该系统可从日常训练和正式比赛中精确获取并分析运动员的各项生物力学参数，为教练员在备战期间提供客观数据支撑。下一阶段系统的完善重点是进一步优化算法，在比赛中获取更多优秀运动员的动作特征丰富已有数据集，最终的目标是将训练、比赛实践情况精准反馈于运动员和教练员，并提供世界精英运动员的冠军动作模型以作为训练参考。

4 结论

Fastmove 3D motion AI 系统能够在实际比赛场景下精准捕捉运动员动作姿态特征，快速提供其生物力学参数和运动表现指标，实现在非实验室条件下不佩戴传感器同样可获得准确运动学数据，完善了起跳阶段身体运动学参数和运动表现分析的相关性分析研究。后续研究中应将该系统与基于UWB的生物力学系统配合使用，实现跳台滑雪的多参数联合采集，提升算法识别的精度、处理能力和鲁棒性；利用好中国举办的国际赛事大量采集世界精英运动员和中国优秀的动作技术特征，进行组间和组内比较，为训练策略的制定提供科学指导。

参 考 文 献

[1] 胡齐, 刘宇. 运动员姿态对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响

- [J]. 医用生物力学, 2021, 36(3): 407-414.
- Hu Qi, Liu Yu. Effects of athlete's posture on aerodynamic characteristics during flight in ski jumping[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2021, 36(3): 407-414.
- [2] Rebne M O S, Fløtlien S B, Kyle R M, et al. Injuries in elite women's ski jumping: surveillance through the 2017-18 FIS World Cup season[J]. British Journal of Sports Medicine, 2020, 54(1): 44-48.
- [3] 曹峰锐, 伍颢, 唐伟棣, 等. 跳台滑雪起跳和早期飞行阶段生物力学研究进展[J]. 北京体育大学学报, 2022, 45(1): 35-44.
- Cao Fengrui, Wu Xie, Tang Weidi, et al. A systematic review of research on the biomechanics of take-off and early flight of ski jumping[J]. Journal of Beijing Sport University, 2022, 45(1): 35-44.
- [4] Meili W, Reisenberger E, Mayer M, et al. Aerodynamics of ski jumping: experiments and CFD simulations[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41(6): 949-964.
- [5] Jung A, Staat M, Muller W. Flight style optimization in ski jumping on normal, large, and ski flying hills[J]. Journal of Biomechanics, 2014, 47(3): 716-722.
- [6] Sumner J, Watters C S, Masson C. CFD in wind energy: the virtual, multiscale wind tunnel[J]. Energies, 2010, 3(5): 989-1013.
- [7] Lee K, Park M, Kim K. Optimization of ski jumper's posture considering lift-to-drag ratio and stability[J]. Journal of Biomechanics, 2012, 45(12): 2125-2132.
- [8] Virmavirta M, Kivekäs J. Aerodynamics of an isolated ski jumping ski[J]. Sports Engineering, 2019, 22(1): 1-6.
- [9] 胡齐, 陈骐, 张文毅. 滑雪板夹角对跳台滑雪飞行阶段气动特性的影响[J]. 体育科学, 2018, 38(7): 42-49.
- Hu Qi, Chen Qi, Zhang Wenyi. Effect of the ski opening angle on the aerodynamic characteristics during flight in ski jumping[J]. China Sport Science, 2018, 38(7): 42-49.
- [10] 胡齐, 刘宇. 姿态不对称对跳台滑雪飞行阶段气动特性的影响[J]. 体育科学, 2020, 40(10): 41-49.
- Hu Qi, Liu Yu. Effects of posture asymmetry on the aerodynamic characteristics during flight in ski jumping[J]. China Sport Science, 2020, 40(10): 41-49.
- [11] Yu B, Andrews J G. The relationship between free limb motions and performance in the triple jump[J]. Journal of Applied Biomechanics, 1998, 14(2): 223-227.
- [12] 伍颢, 曲毅, 刘思平, 等. 跳台滑雪技术生物力学智能分析与反馈系统的研发与应用[J]. 中国体育科技, 2021, 57(12): 3-8.
- Wu Xie, Qu Yi, Liu Siping, et al. An intelligent motion capture and feedback system developed for ski jumping technique analysis[J]. China Sport Science and Technology, 2021, 57(12): 3-8.
- [13] Gabbett T J, Jenkins D G, Abernethy B. Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2012, 15(1): 80-86.
- [14] Mooney R, Corley G, Fodfrey A, et al. Inertial sensor technology for elite swimming performance analysis: a systematic review[J]. Sensors, 2015, 16(1). DOI: 10.3390/s16010018.
- [15] 夏时洪, 魏毅, 王兆其. 人体运动仿真综述[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(8): 1354-1361.
- Xia Shihong, Wei Yi, Wang Zhaoqi. A survey of physics-based human motion simulation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(8): 1354-1361.
- [16] Ruslan S, B J T, Antonio T. Learning with hierarchical-deep models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(8): 1958-1971.
- [17] Geiger M, Supiot A, Pradon D, et al. Minimal detectable change of kinematic and spatiotemporal parameters in patients with chronic stroke across three sessions of gait analysis[J]. Human Movement Science, 2019, 64: 101-107.
- [18] Mirowski P, Lecun Y. Dynamic factor graphs for time series modeling[C]//European conference on Machine Learning. Heidelberg: Springer, 2009: 128-143.
- [19] 刘志海, 代振锐, 田绍鲁, 等. 非接触式三维重建技术综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 9897-9908.
- Liu Zhihai, Dai Zhenrui, Tian Shaolu, et al. Review of non-contact three-dimensional reconstruction techniques[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 9897-9908.
- [20] 苑廷刚, 王国杰, 姜自立, 等. 2018年上海钻石联赛苏炳添最后10m冲刺视频全景技术分析及其对苏炳添进步的启示[J]. 北京体育大学学报, 2019, 42(1): 147-156.
- Yuan Tinggang, Wang Guojie, Jiang Zili, et al. Video panoramic technology analysis of Su Bingtian's last 10 m sprint in 2018 Shanghai diamond league and enlightenment of Su Bingtian's progress[J]. Journal of Beijing Sport University, 2019, 42(1): 147-156.
- [21] 苑廷刚, 王国杰, 何卫, 等. 视频图像多重处理技术在体育科研领域中的应用和发展[J]. 中国体育科技, 2022, 58(11): 92-102.
- Yuan Tinggang, Wang Guojie, He Wei, et al. Application and development of video image multiple processing technology in sports scientific research[J]. China Sport Science and Technology, 2022, 58(11): 92-102.
- [22] 霍波, 李彦锋, 高腾, 等. 体育人工智能领域关键技术的研究现状和发展方向[J]. 首都体育学院学报, 2023, 35(3): 233-256.
- Huo Bo, Li Yanfeng, Gao Teng, et al. Research status quo and progress on the key technologies of artificial intelligence in sports[J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 2023, 35(3): 233-256.
- [23] Yichen W, Yamashita H. Lineup optimization model of basketball players based on the prediction of recursive neural networks[J]. International Journal of Economics and Management Engineering, 2021, 15(3): 287-293.
- [24] 赵立新, 邢润哲, 白银光, 等. 深度学习在目标检测的研究综述[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 12787-12795.
- Zhao Lixin, Xing Runzhe, Bai Yinguang, et al. Review on survey of deep learning in target detection[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 12787-12795.
- [25] 张马森, 曲毅, 崔婧, 等. 运动捕捉人工智能系统在速滑项目中的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5674-5680.
- Zhang Masen, Qu Yi, Cui Jing, et al. Application of artificial intelligence system for motion capture in speed skating[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5674-5680.
- [26] 吕钢, 孙凯扬, 买毅强, 等. 空气动力学距离对标枪运动员运动表现的影响: 优秀女子标枪运动员吕会会投掷技术的个案研究[J]. 中国体育科技, 2021, 57(1): 52-57.
- Lü Gang, Sun Kaiyang, Mai Yiqiang, et al. The effect of aerody-

- namic distance on the performance of javelin throwers: a case study on the throwing technique of an elite Chinese women javelin thrower LYU Huihui[J]. *China Sport Science and Technology*, 2021, 57(1): 52-57.
- [27] Mordatch I, Lowrey K, Andrew G, et al. Interactive control of diverse complex characters with neural networks [C]//Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems Cambridge. Montreal: MIT Press, 2015: 3231-3240.
- [28] Lewandowski N B, Bengio Y, Vincent P. Modeling temporal dependencies in high-dimensional sequences: application to polyphonic music generation and transcription [C]//Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning. New York: ACM Press, 2012: 1881-1888.
- [29] Virmavirta M, Isolehto J, Komi P, et al. Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106ce; hsp sp = 0.16/m) [J]. *Journal of Biomechanics*, 2009, 42(8): 1095-1101.
- [30] Janura M, Cabell L, Svoboda Z, et al. Kinematic analysis of the take-off and start of the early flight phase on a large hill (HS-134 m) during the 2009 nordic world ski championships [J]. *Journal of Human Kinetics*, 2011, 27: 5-16.
- [31] 刘钰, 张栋, 陈聪航, 等. 我国北欧两项运动员运动功能特征对跳台滑雪专项技术和运动表现的影响 [J]. *首都体育学院学报*, 2022, 34(2): 141-151.
- Liu Yu, Zhang Dong, Chen Conghang, et al. The influence of motor function characteristics on ski jumping technique and sport performance in Chinese nordic combined athletes [J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 2022, 34(2): 141-151.
- [32] 张栋, 邹晓双, 刘钰, 等. 动作姿态对北欧两项运动员跳台滑雪助滑和起跳气动阻力的影响 [J]. *中国体育科技*, 2023, 59(9): 3-12.
- Zhang Dong, Zou Xiaoshuang, Liu Yu, et al. Effects of movement and postures on aerodynamic drag during ski jumping in run and take-off phases in nordic combined athletes [J]. *China Sport Science and Technology*, 2023, 59(9): 3-12.
- [33] 张栋, 资薇, 陈聪航, 等. 中国北欧两项运动员核心竞技能力特征及训练策略分析 [J]. *首都体育学院学报*, 2022, 34(3): 321-332.
- Zhang Dong, Zi Wei, Chen Conghang, et al. Analysis of core athletic ability characteristics and training strategies of Chinese Nordic combined athletes [J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 2022, 34(3): 321-332.
- [34] 何鹏飞, 董范, 姜自立. 整合性神经肌肉训练对提高女子运动员运动表现及预防运动损伤的影响 [J]. *体育科学*, 2017, 37(2): 66-75.
- He Pengfei, Dong Fan, Jiang Zili. Effect of integrative neuromuscular training on sport performance and injury prevention of female athletes [J]. *China Sport Science*, 2017, 37(2): 66-75.