

冬奥冰壶六足机器人研究

高峰¹, 齐臣坤¹, 陈先宝¹, 尹科², 赵越², 高岳²

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学人工智能研究院教育部人工智能重点实验室, 上海 200240)

摘要: 冰壶六足机器人是北京 2022 年冬奥会组委会需求的唯一进入冬奥会赛场的机器人。开发该机器人的目的是借助北京冬奥会展示我国机器人的自主创新能力和水平。我们重视独特设计创意, 通过模仿冰壶运动员投掷冰壶的“行为特征”来设计和开发冰壶六足机器人。冰壶六足机器人设计面临多项挑战, 要解决模仿人投掷冰壶行为的六足机器人的构形综合、投掷冰壶任务链与机器人行为链关联特征建立、机器人击打冰壶行为规划等问题。研制的冰壶六足机器人在北京 2022 年冬奥会冰立方冰壶赛场上顺利完成击打冰壶表演。

关键词: 六足机器人; 冰壶; 机构构形; 伺服驱动; 机器人行为控制

中图分类号: TH112, TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2022)-05-0533-05

On the Six-Legged Curling Robot at the Winter Olympic Games

GAO Feng¹, QI Chenkun¹, CHEN Xianbao¹, YIN Ke², ZHAO Yue², GAO Yue²

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. MoE Key Lab of Artificial Intelligence, AI Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The six-legged curling robot is the only robot to enter the Winter Olympic Games site required by Beijing Organising Committee for the 2022 Olympic Winter Games. The purpose of developing this robot is to demonstrate the independent innovation ability and level of robots in China at the Beijing Winter Olympic Games. By imitating the behavioural characteristics of a curling player throwing a curling stone, we find unique ideas to design and develop a six-legged curling robot. The design of the six-legged curling robot faces many challenges, including the configuration synthesis of the six-legged robot imitating the human curling behaviour, the establishment of the correlation characteristics between the curling task chain and the robot behaviour chain, and the trajectory planning of the robot hitting the curling stone. The developed six-legged curling robot successfully completed the performance of hitting curling stone at the Ice Cube for the Beijing 2022 Winter Olympic Games.

Keywords: six-legged robot; curling stone; mechanism type; servo driving; robot behaviour control

1 引言 (Introduction)

冰壶六足机器人是北京 2022 年冬奥会组委会需求的唯一进入冬奥会赛场的机器人, 开发该机器人旨在借助北京冬奥会展示我国机器人的自主创新能力。2021 年在科技部科技冬奥专项的支持下, 我们充分发挥丰富的想像力和创造力, 挑战该项艰巨、紧迫和重大的任务, 寻觅和诠释冰壶六足机器人的独特设计创意, 即模仿冰壶运动员投掷冰壶的“行为特征”来设计六足冰壶机器人, 最终通过冬奥会展示出这些创意。

2018 年平昌冬奥会后, 国际上开始出现轮式有源驱动冰壶机器人研究文章^[1-2]。轮式冰壶机器人不是直接模仿人击打冰壶的行为, 而是利用轮式机

器人的车轮与冰面摩擦驱动冰壶的运动。设计出模仿人投掷冰壶行为的六足机器人, 是前人尚未系统研究的科学问题, 是一个从无到有的研究过程。模仿人投掷冰壶的行为必须突破多任务、多功能、多末端输出的冰壶机器人设计面临的多项挑战, 必须攻克机器人的关键基础部件的核心技术, 要解决模仿人投掷冰壶行为的六足机器人的构形综合^[3]、投掷冰壶任务链与机器人行为链关联特征建立、机器人击打冰壶行为规划等问题。

2 冰壶六足机器人构形 (Configuration of the six-legged curling robot)

在冰壶比赛中人的行为主要有两大功能, 即能

在冰面上行走和投掷冰壶。行走功能的作用主要是使人在冰面上移动来寻找起滑架等。而投掷冰壶功能的行为复杂，即一条腿支撑身体、另一条腿蹬踏起滑架；一只手握持冰刷接触冰面来平衡身体保持稳定、另一只手握持冰壶手柄来控制冰壶的速度和方向；双目瞄准目标后蹬踏滑行掷出冰壶。

冰壶机器人设计的关键是模仿人投掷冰壶的行为。如图 1 所示，机构构形方案采用 6 条腿，包括 2 条前腿、2 条中腿、2 条后腿，再加上一个安装有视觉相机的机械臂。在投掷冰壶过程中，六足机器人前部双腿转化为人手的功能，完成抱壶和旋转壶的运动；中部双腿的膝盖和前部双腿的肘关节复合成四点接触冰面，形成人支撑腿的功能；后部双腿蹬踏起滑架，实现推动机器人加速和滑行的功能；另外，前部双腿在机器人滑行过程中完成二次推壶的任务。投掷冰壶动作结束后，机器人从投掷冰壶的构态转换成站立构态，完成冰面行走和寻找起滑架任务。6 条腿分成前、中、后 3 组，各组具有不同功能和各自异构性，又有相互内在的联系和一致性。

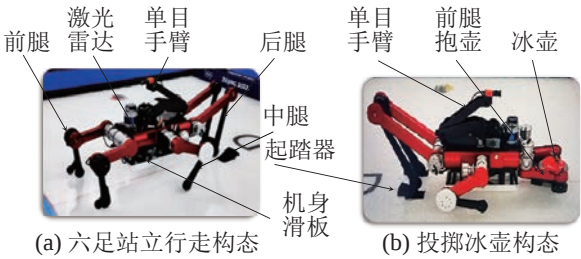
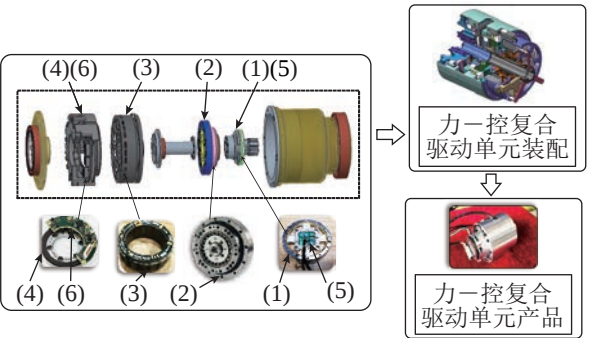


图 1 冰壶六足机器人的站立行走和投掷冰壶构态

Fig.1 Configurations of standing and walking, and curling stone throwing of the six-legged curling robot



(1) 力矩传感器 (2) 谐波减速器 (3) 直流伺服电机 (4) 编码器 (5) 信号放大与处理器 (6) 伺服驱动器

图 2 力-控复合驱动单元产品

Fig.2 Product of the force-control composite driving unit

开发冰壶六足机器人关键基础部件的技术瓶颈之一是“力-控”复合驱动单元，如图 2 所示。该复合驱动单元是把力矩传感器、谐波减速器、直

流伺服电机、编码器、力信号放大处理器、电机伺服驱动器等部件都设计在一个部件中，不仅要求复合驱动单元有一个主轴贯穿其中，结构完整、轻量化、精度合理匹配，而且要非常紧凑。“力-控”复合驱动单元的开发是冰壶六足机器人研制的基础和前提。

3 冰壶六足机器人行为链 (Behaviour chain of the six-legged curling robot)

构建冰壶六足机器人行为链，需要研究清楚人投掷冰壶的任务链。图 3 所示为人投掷冰壶的任务链，包括 7 个子任务，即冰面行走寻找起滑架、一条腿支撑身体、另一条腿踏在起滑架上、一只手用冰刷触冰面来辅助支撑身体、另一只手握冰壶手柄接触冰面、双目瞄准目标、蹬踏一滑行一推转冰壶等子任务。

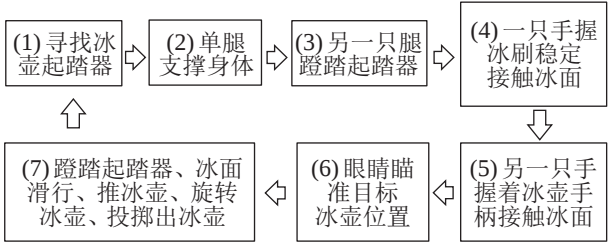


图 3 人投掷冰壶的任务链

Fig.3 Task chain of the curling stone delivery by human

为了模仿人投掷冰壶的行为特征，同时还要体现冰壶六足机器人的特性，设计了冰壶六足机器人的拟人行为链，如图 4 所示。冰壶六足机器人处于六足位姿站立于冰面上，通过 3-3 构态在冰面倒退行走来寻找起滑架；在前、后 4 足站立时将 2 条中腿由后方反转至前方，用中腿和后腿 4 足站立并将前腿收拢向内旋转至抱壶状态；利用中腿和后腿 4 足站立将机器人身体底部放置于冰面上，再通过中腿和后腿以及机身底部在冰面上的交替支撑使机器人后腿移至起滑架；在后腿 2 足踏实起滑架并且 2 只中足和机身底部接触冰面后抬高相机手臂，利用视觉测量目标冰壶的颜色和位姿坐标，根据测量的目标位姿坐标利用中、后腿 4 足调整机器人的身体方位；在后腿 2 足踏实起滑架并且机身底部接触冰面时将 2 条中腿翻转至后方，然后根据人投壶时旋转冰壶旋向和转速的经验利用前腿旋转冰壶；在中腿 2 个膝关节和机身底部接触冰面时，按 7 次多项式和给定的冰壶位置、速度、加速度和加速度导数规划的后腿 2 足轨迹蹬踏起滑架，驱动身体和冰壶在冰面滑行，再根据 7 次多项式规划通过前腿二

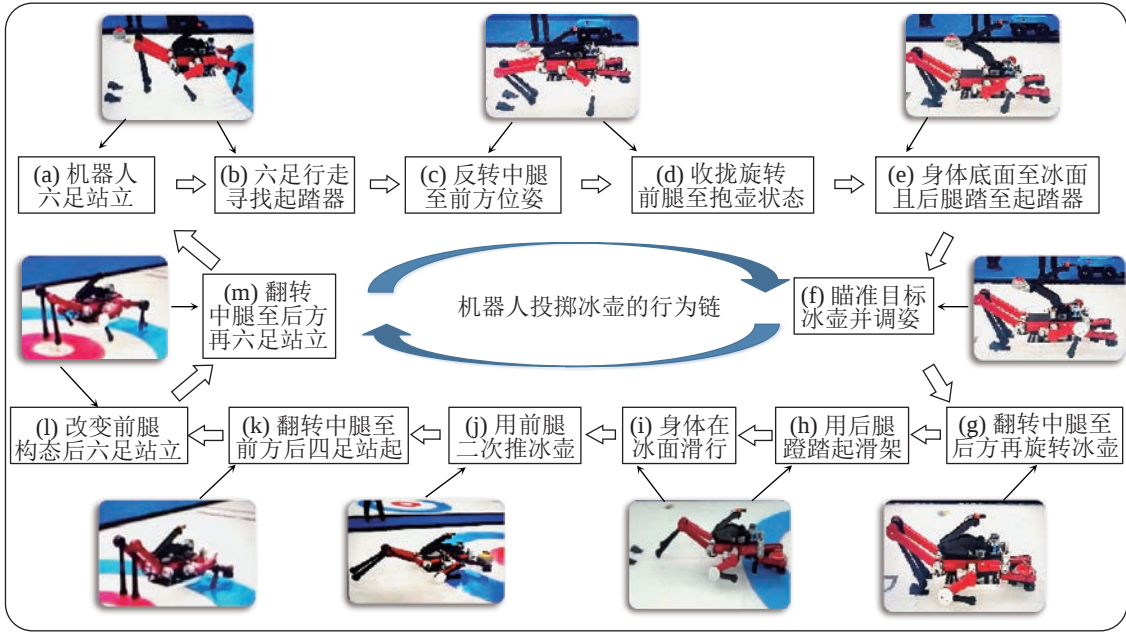


图 4 冰壶六足机器人的拟人行为子链分解

Fig.4 Sub-chain decomposition of humanoid behaviours of the six-legged curling robot

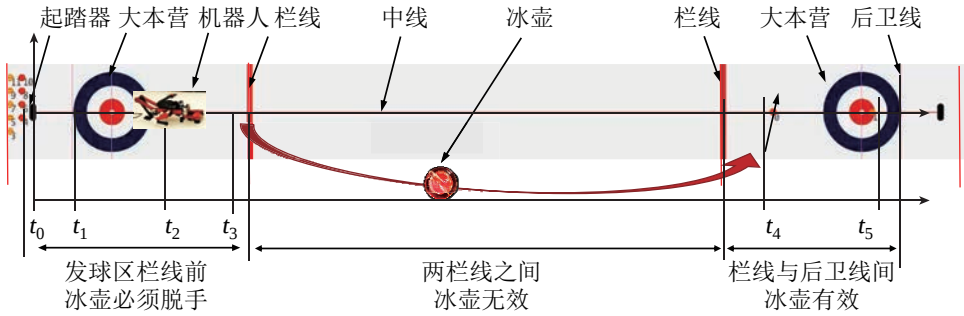


图 5 机器人投掷冰壶的场地区域划分

Fig.5 Area division of the curling stone delivery by the robot

次推冰壶来实现规划要求的速度, 完成投掷冰壶过程; 翻转中腿至前方后实现中、后腿 4 足在冰面稳定起身站立; 改变前腿构态实现 6 足站立后, 将中腿翻转至后方再保持 6 足站立和行走。这是所设计规划的冰壶六足机器人拟人投掷冰壶的行为链。

4 冰壶六足机器人投壶轨迹规划 (Trajectory planning of curling stone delivery by the six-legged curling robot)

为了更好地实现冰壶六足机器人拟人投掷冰壶的行为链, 必须合理规划冰壶六足机器人关键行为子链的运动。图 5 所示为机器人投掷冰壶的场地区域的划分。在起滑架至栏线之间机器人必须掷出冰壶, 这要求规划好机器人蹬踏起滑架的运动轨迹和冰壶转速以及两前臂二次推壶的运动轨迹; 在中间区域, 冰壶根据脱离机器人的位置、速度、角速度大小和方向克服冰面摩擦力无动力滑行; 在后续区

域, 投掷的冰壶停至大本营期望的位置或击打指定的冰壶将其撞至希望的位置。在图 6 中, 当机器人机身底部接触冰面并且后腿 2 足踏实起滑架时, 根据人投壶时旋转冰壶旋向和转速的经验参数, 利用前腿旋转冰壶; 在中腿 2 个膝关节和机身底部接触冰面时, 按给定冰壶运动参数规划出两后腿足端的 7 次多项式轨迹, 蹬踏起滑架 (见图 6(a)), 驱动身体和冰壶在冰面滑行 (见图 6(b)); 最后按 7 次多项式规划前腿轨迹, 实现二次推冰壶, 从而完成冰壶投掷 (见图 6(c))。

如图 6 所示, 机器人投掷冰壶的过程可以分为两后腿足端蹬踏起滑架推动身体和冰壶运动、冰面滑行、两前腿足端二次推壶 3 个阶段, 而两后腿足端蹬踏起滑架和两前腿足端推壶轨迹都是按 7 次多项式和给定的冰壶位置、速度、加速度和加速度导数规划的, 如式 (1) 所示。定义 q_j 为机器人本体与后足或前足端的相对位移, t_0 、 t_1 、 t 分别为规

划开始、结束和当前时刻, $q_0, q_1, v_0, v_1, a_0, a_1, j_0, j_1$ 分别为冰壶在 t_0, t_1 两个时刻的位置、速度、加速度、加加速度。将这些参数代入式 (1) 及其关于时间 t 的 1 阶、2 阶、3 阶导数方程, 可以建立关于 c_i ($i=0, 1, 2, \dots, 7$) 的 8 个方程组, 从而可以求出 c_i , 实现 3 阶导数可控的冰壶驱动运动规划。

$$q_j = c_0 + c_1(t - t_0) + c_2(t - t_0)^2 + c_3(t - t_0)^3 + c_4(t - t_0)^4 + c_5(t - t_0)^5 + c_6(t - t_0)^6 + c_7(t - t_0)^7 \quad (1)$$



图 6 机器人投掷冰壶关键任务行为子链

Fig.6 Behaviour sub-chain of critical tasks of the curling stone delivery by the robot

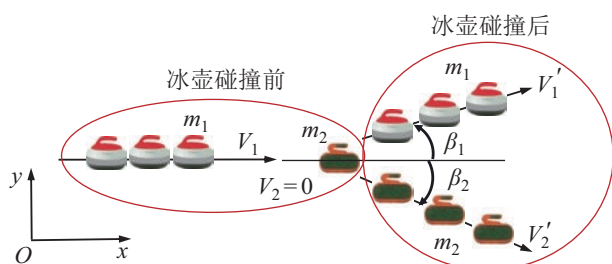


图 7 机器人掷壶后冰壶运动

Fig.7 Motion of the curling stone after delivery by the robot

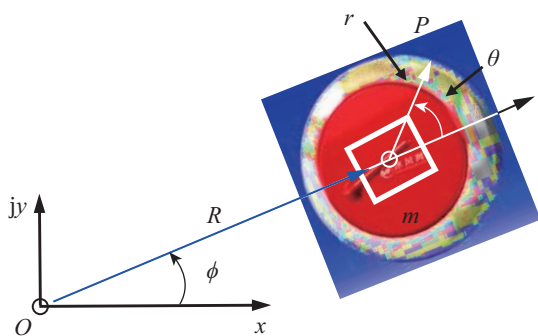


图 8 机器人掷壶后冰壶滑行轨迹描述

Fig.8 Trajectory description of the curling stone after delivery by the robot

图 7 所示为机器人掷壶后冰壶在碰撞前后的运动。利用图 8 所示的冰壶运动模型, 用一个 3 自由度的导杆机构来描述冰壶运动, 其中导杆 R 绕坐标原点 O 转动、滑块在导杆上滑动、冰壶 r 绕滑块上的铰链转动, 这样可以用 3 自由度的导杆机构替代冰壶来研究其运动。在图 8 中, 冰壶上任意一

点 P 的位移矢量 $\mathbf{P}$ 、速度矢量 $\dot{\mathbf{P}}$ 、加速度矢量 $\ddot{\mathbf{P}}$ 由式 (2)~(5) 以复数向量形式表示, j 为复数的虚数单位。

$$\mathbf{P} = \mathbf{R} + \mathbf{r}, \quad \dot{\mathbf{P}} = \dot{\mathbf{R}} + \dot{\mathbf{r}}, \quad \ddot{\mathbf{P}} = \ddot{\mathbf{R}} + \ddot{\mathbf{r}} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{R} = R e^{j\phi}, \quad \mathbf{r} = r e^{j(\phi+\theta)} \quad (3)$$

这里 ϕ 为 $\mathbf{R}$ 矢量与坐标轴 x 的夹角, θ 为 $\mathbf{r}$ 矢量与 $\mathbf{R}$ 矢量的夹角。式 (3) 两边对时间 t 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \dot{R} e^{j\phi} + R \dot{\phi} e^{j(\phi+\frac{\pi}{2})} \\ \dot{\mathbf{r}} &= r(\dot{\phi} + \dot{\theta}) e^{j(\phi+\theta+\frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 两边对时间 t 求导, 可得

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{R}} &= \ddot{R} e^{j\phi} + 2\dot{R}\dot{\phi} e^{j(\phi+\frac{\pi}{2})} + R\ddot{\phi} e^{j(\phi+\frac{\pi}{2})} + R\dot{\phi}^2 e^{j(\phi+\pi)} \\ \ddot{\mathbf{r}} &= r(\ddot{\phi} + \ddot{\theta}) e^{j(\phi+\theta+\frac{\pi}{2})} + r(\dot{\phi} + \dot{\theta})^2 e^{j(\phi+\theta+\pi)} \end{aligned} \quad (5)$$

在图 8 中, 将式 (2)(4) 中描述的 P 点速度分别在 $\mathbf{R}$ 矢量和垂直于 $\mathbf{R}$ 矢量的方向上投影, 得式 (6) 所示的分速度:

$$\begin{aligned} v_P^R &= \dot{R} + r(\dot{\phi} + \dot{\theta}) \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ v_P^T &= R\dot{\phi} + r(\dot{\phi} + \dot{\theta}) \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式 (7) 定义角 λ :

$$\tan \lambda = \frac{v_P^T}{v_P^R} \quad (7)$$

因为冰壶所受的冰面摩擦力与式 (6)(7) 的速度方向相反, 因此可以建立:

$$\begin{aligned} F_f &= \sqrt{(F_f^T)^2 + (F_f^R)^2} = mgf \\ F_f^R &= F_f \cos \lambda \\ F_f^T &= F_f \sin \lambda \end{aligned} \quad (8)$$

其中 m 、 g 和 f 分别表示冰壶质量、重力加速度和冰壶与冰面之间的摩擦系数, F_f 、 F_f^R 、 F_f^T 分别表示冰壶所受的总摩擦力、沿 $\mathbf{R}$ 矢量方向上的摩擦力分量和垂直于 $\mathbf{R}$ 矢量的方向上的摩擦力分量。

当冰壶转角 θ 分别取 0 和 π 时, 由式 (6)(7) 得角 λ 如下:

$$\begin{aligned} \tan \lambda_1 &= \frac{R\dot{\phi} + r(\dot{\phi} + \dot{\theta})}{\dot{R}}, \quad \theta = 0 \\ \tan \lambda_2 &= \frac{R\dot{\phi} - r(\dot{\phi} + \dot{\theta})}{\dot{R}}, \quad \theta = \pi \end{aligned} \quad (9)$$

当冰壶转角 θ 分别取 0 和 π 时, 因为冰壶前后两部分与冰面摩擦系数不相等, 故分别设冰壶前半部分与冰面摩擦系数为 f_1 、冰壶后半部分与冰面摩

擦系数为 f_2 , 通常 $f_2 = \eta f_1$, 其中 η 为 2 个摩擦系数之间的倍数, 得摩擦力如下:

$$F_{f_1} = \frac{1}{2}mgf_1, \quad F_{f_2} = \frac{1}{2}mgf_2 \quad (10)$$

其中 F_{f_1} 和 F_{f_2} 分别为冰壶前半部分和后半部分与冰面之间的摩擦力。将式 (10) 所描述的摩擦力分别在 $\mathbf{R}$ 矢量方向和垂直于 $\mathbf{R}$ 矢量的方向上投影, 得

$$\begin{aligned} F_{f_1}^T &= F_{f_1} \cos \lambda_1, & F_{f_1}^R &= F_{f_1} \sin \lambda_1 \\ F_{f_2}^T &= F_{f_2} \cos \lambda_2, & F_{f_2}^R &= F_{f_2} \sin \lambda_2 \end{aligned} \quad (11)$$

由以上各式可以建立冰壶运动动力学方程:

$$\begin{aligned} I_A \ddot{\theta} &= -(F_{f_2}^T + F_{f_1}^T)r \\ ma^T &= F_{f_2}^T - F_{f_1}^T \\ ma^R &= -F_{f_2}^R - F_{f_1}^R \end{aligned} \quad (12)$$

其中 a^R 和 a^T 分别为在 $\mathbf{R}$ 矢量方向和垂直于 $\mathbf{R}$ 矢量的方法上的加速度, $\ddot{\theta}$ 为冰壶绕质心 A 的角加速度, I_A 为冰壶绕质心 A 的转动惯量。

由图 7 可知, 根据机器人掷壶后冰壶在碰撞前后的运动位置和速度要求, 先利用式 (12) 求解出机器人掷壶要求达到的冰壶运动位置和速度以及转速的大小与方向, 再通过图 6 和式 (1) 求解出在机器人投掷冰壶过程中两后腿足端蹬踏起滑架推动身体和冰壶运动、冰面滑行、两前腿足端二次推壶 3 个阶段的运动参数, 完成冰壶位置、速度、加速度和加速度导数的规划。图 9 为冰壶六足机器人在北京冬奥会冰立方冰壶馆的掷壶表演。



图9 冰壶六足机器人在北京冬奥会掷壶表演

Fig.9 Curling stone throwing show by the six-legged curling robot at the Beijing 2022 Winter Olympic Games

5 后记 (Postscript)

当进入北京冬奥会冰立方冰壶馆后, 在 2 月 16 日午夜确定 18 日中午冰壶六足机器人在冰壶馆赛

场公开面对全世界媒体表演, 我们只有 2 个晚上后半夜可以在冰立方冰壶赛场投壶练习, 共试投冰壶 13 次, 全部击中目标冰壶, 为我们 18 日中午的机器人公开表演增强了自信心。在 2 月 18 日中午的冰壶六足机器人公开表演中, 机器人投壶 6 次, 六击六中, 圆满完成了北京冬奥会之旅。

开发冰壶六足机器人有 3 个惊人的地方: (1) 从立项到完成的时间短, 冰壶六足机器人是 2021 年 9 月 9 日科技部正式批准立项, 2022 年 2 月 18 日完成表演; (2) 国际上首次成功开发出模仿人投掷冰壶行为的冰壶六足机器人; (3) 北京冬奥会冰立方冰壶馆击打冰壶表演, 出现令人出乎意料的精准。对于这段冬奥之旅, 我们给出的关键词是“难忘”, 冰壶六足机器人的研究充满了许多难忘之事, 是我们一生都不会厌倦的研究方向, 希望能够一直研究下去, 当然还有滑雪、滑冰机器人, 但开发冰壶六足机器人是我们的最爱和高光时刻^[4]。在未来, 我们将把更多的人工智能技术融入冰壶六足机器人的感知、规划和决策系统, 开展冰壶六足机器人之间以及与人之间的冰壶比赛。

参考文献 (References)

- [1] Park H, Oh J H. Robots for the PyeongChang 2018 Winter Olympic Games[J]. Science Robotics, 2018, 3(16). DOI: 10.1126/scirobotics.aat5217.
- [2] Won D O, Müller K R, Lee S W. An adaptive deep reinforcement learning framework enables curling robots with human-like performance in real-world conditions[J]. Science Robotics, 2020, 5(46). DOI: 10.1126/scirobotics.abb9764.
- [3] Tian Y, Gao F. Efficient motion generation for a six-legged robot walking on irregular terrain via integrated foothold selection and optimization-based whole-body planning[J]. Robotica, 2018, 36(3): 333-352.
- [4] Gao F, Li S, Gao Y, et al. Robots at the Beijing 2022 Winter Olympics[J]. Science Robotics, 2022, 7(65). DOI: 10.1126/scirobotics.abq0785.

作者简介:

高峰 (1956-), 男, 博士, 教授。研究领域: 机构学, 并联机器人, 腿式机器人。

齐臣坤 (1977-), 男, 博士, 副教授。研究领域: 机器人控制, 并联机器人, 腿式机器人。

陈先宝 (1981-), 男, 博士, 助理研究员。研究领域: 机构学, 并联机器人, 腿式机器人。