载于：RoboCup 2022：机器人世界杯第二十五届。LNCS 13561，Springer，2023年5月。

arXiv:2302.02956v2 [cs.RO] 7 Feb 2023

RoboCup 2022 成人组冠军 NimbRo：升级感知、捕获步态与基于相位的行走中踢球

Dmytro Pavlichenko、Grzegorz Ficht、Arash Amini、Mojtaba Hosseini、Raphael Memmesheimer、Angel Villar-Corrales、Stefan M.Schulz、Marcell Missura、Maren Bennewitz 和 Sven Behnke

德国波恩大学计算机科学系自主智能系统，http://ais.uni-bonn.de
pavlichenko@ais.uni-bonn.de，

摘要。 到2050年击败人类世界冠军，是人形机器人联赛的宏大目标，也为RoboCup参赛队进一步改进和开发系统提供了强大动力。本文介绍了我们系统的升级，这些升级助力NimbRo 队在 RoboCup 2022 仿人机器人成人组联赛中赢得足球锦标赛、临时组队比赛和技术挑战赛。凭借在这些比赛中的出色表现，队伍获得了人形机器人联赛最佳人形机器人奖。此次升级包括：视觉模块的硬件升级、结合捕获步的平衡行走，以及引入基于相位的行走中踢球。

1 引言

仿人机器人成人组联赛致力于实现 RoboCup 的愿景：到 2050 年，由机器人组成的队伍击败人类足球世界冠军。因此，参赛队伍面临着提升系统性能的挑战，以实现



图1. 左：NimbRo 成人组机器人：NimbRo-OP2 和 NimbRo-OP2X。右：NimbRo 团队参加在泰国曼谷举行的 RoboCup 2022。

这一宏伟目标。受 COVID-19疫情影响，过去两年没有举办线下 RoboCup 锦标赛。为参加 RoboCup 2022，我们升级了视觉感知模块，配备了更好的摄像头和更强大的图形处理器，并改进了深度神经网络，以增强比赛感知和定位能力。我们基于捕捉步态框架改进了步态，进一步提升行走的稳定性。最后，引入基于相位的行走中踢球，让我们在与对手近距离对抗时能够更好地控球。我们使用了三台 NimbRo-OP2X 机器人和一台 NimbRo-OP2。我们的机器人在仿人机器人成人组联赛的所有比赛中均获得第一名，包括主赛事足球比赛、临时组队比赛和技术挑战赛。因此，我们的机器人赢得了人形机器人联赛的最佳人形机器人奖。我们的团队如图 1 所示。我们在 RoboCup 2022 比赛中的精彩表现可在线查看[1]。

2 NimbRo-OP2(X) 人形机器人硬件

为参加曼谷的比赛，我们准备了四台性能出色的机器人：一台 NimbRo-OP 2 [2] 和三台 NimbRo-OP2X 机器人。这两个平台的硬件[2] 和软件[3], 均完全开源, 并有数篇出版物 [6,7] 提供了对复现该平台有帮助的信息。如图 1 所示，这些机器人在名称、设计和特性方面有相似之处，但并不完全相同。两个平台都采用相似的关节布局，具有 18 个自由度（DoF）：每条腿 5 个自由度、每条手臂 3 个自由度，头部由 2 个自由度驱动。与参加人形机器人联赛的其他人形机器人不同，它们的腿采用并联运动学结构，可锁定脚相对于躯干的俯仰角 [4]。执行器通过内置六轴惯性测量单元（3 轴加速度计和 3 轴陀螺仪）的 CM740微控制器板，接收来自基于ROS的控制框架的指令。由于硬件采用现成消费级技术, 这些机器人只需类似尺寸研究平台的一小部分成本即可购得 [4] ，例如: ASIMO [15], HRP-2 [9],和 HUBO [12]。

除了更新 OP2 执行器控制器固件以支持基于电流的扭矩测量外，其硬件与 RoboCup 2019 比赛期间相比并无变化 [13]。OP2X 机器人经过升级，以弥补 2019 年比赛中暴露出的弱点。场地尺寸扩大后，从较远距离感知物体变得颇具挑战，因为物体往往只呈现为单个像素。为解决这一问题，我们将 200 万像素的 Logitech C905 摄像头更换为 500 万像素的 C930e摄像头。图像采集分辨率提高后，物体感知能力大幅提升。分辨率的提高需要更强的计算能力，因此我们将每台 OP2X 机器人的图形处理器升级为 Nvidia RTX A2000。得益于机器人的模块化设计，实施这些改动十分直接。

[1] RoboCup2022 NimbRo精彩集锦视频：https://youtu.be/DfzkMawtSFA[2] NimbRo-OP2X硬件：https://github.com/NimbRo/nimbro-op2[3] NimbRo-OP2X软件：https://github.com/AIS-Bonn/humanoid_op_ros

3 比赛场景的视觉感知

我们的视觉感知模块同时受益于硬件和软件的改进。首先，升级配备广角镜头的摄像头和图形处理器；其次，支持动态分辨率，并改进此前的深度卷积神经网络，以识别与足球相关的物体，包括足球、球门柱、机器人、场地边界和线段。

升级后的图形处理器使我们能够为网络输入使用更高分辨率的图像，同时不会降低帧率。此外，与之前使用的罗技C905摄像头相比，新摄像头能够提供质量更高且水平视场更宽的图像。我们在图 2 中通过从同一场景捕获的图像对两款摄像头进行了比较。

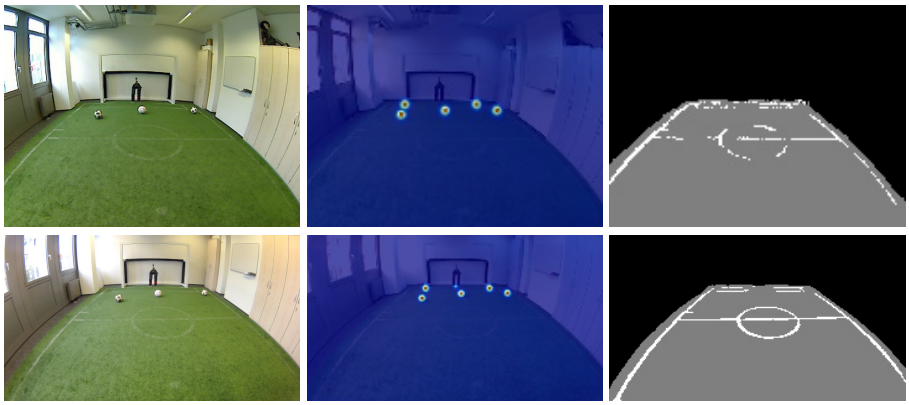

图 2。 由 Logitech C905 摄像头拍摄的图像示例、热图以及 NimbRoNet2 的分割预测（第一行）。由 Logitech C930e 摄像头拍摄的同一场景图像、热图以及新模型的分割预测（第二行）。

受我们之前的感知模型（NimbRoNet2） [13], 启发，我们使用了一个改编自 [1]的深度卷积神经网络。我们的模型采用非对称 U-Net 架构 [14]，由一个经过预训练的 ResNet18 模型 [8] 作为编码器，以及一个具有特征金字塔结构的解码器组成；其中我们仅使用 $1/4$ 分辨率，并采用三个跳跃连接。与 NimbRoNet2 的 19ms 运行时间相比，该轻量化模型通过使用双线性上采样，将推理时间缩短至 13ms。此外，如图 2 所示，新模型取得了更好的性能。视觉感知网络包含两个预测头：目标检测和分割。对于目标检测，我们使用热图表示目标位置。随后，我们应用后处理步骤，从估计的热图中提取目标位置。

我们采用均方误差损失来训练热图，以表示球、球门柱和机器人的位置。此外，我们使用交叉熵损失来训练模型预测背景、场地的分割，

以及线条的分割。因此，总损失是上述两种损失的线性组合。正如 RoboCup 2022 中所宣布的，不再使用单一的球，而是选定了 17 个球[4]作为可能的选择，其中三个球用于比赛。为应对这一挑战，我们通过在图像中随机替换球为已公布的球来进行数据增强。

我们的处理流程能够覆盖整个场地，并检测到远离机器人的物体。此外，由于定位模块依赖地标（线、中圈和球门柱），视觉感知模块的改进使我们能够在新场地中更精确地定位。新场地增设了罚球区线，我们只需对定位模块进行少量修改，例如提高中圈和球门柱的权重。

4 具有斜向踢球能力的稳健全向步态

4.1 捕获步行走

我们的机器人采用捕获步框架 [11]进行行走。该框架将开环步态模式 [10], 与正弦摆动模式相结合，以生成腿部摆动动作；同时还包含一个平衡控制层，该层将机器人建模为线性倒立摆（LIP），并计算下一步的时间和位置，以吸收扰动并使机器人回到开环稳定极限环。LIP 的参数根据机器人开环行走时记录的质心数据拟合得出。随后，通过在一个步态周期内调整正弦腿部摆动的幅度，使 LIP 计算出的落脚位置得以实现。脚步的时间安排会调节中央模式发生器的频率，从而减慢或加快步伐，使脚能够在指定时间着地。今年，我们所有的机器人首次都配备了支持捕获步的行走功能。捕获步在与对手争抢球时发生碰撞后恢复平衡、通过无缝集成的行走中踢球动作移动球后恢复平衡，以及赢得推搡恢复挑战赛方面，都发挥了特别重要的作用。图 3 和图 4 分别展示了横向推力恢复和矢状面推力恢复的示例曲线。

4.2 平衡状态估计

与任何真实系统一样，惯性测量单元和关节传感器中都存在固有噪声。在存在这些噪声的情况下估计与平衡相关的状态变量是一项关键任务，因为控制与状态估计密切相关。

在 2022 年比赛之前 [11], , 质心（CoM）的运动完全通过关节编码器、运动学和躯干姿态估计器的组合进行估算。最终输出随后会经过平滑处理，并使用 Golay 滤波器，同时提供速度和加速度估算值。尽管这种方案在一定程度上有效，但并不理想。噪声还会在后续进一步得到抑制

[4] https://humanoid.robocup.org/hl-2022

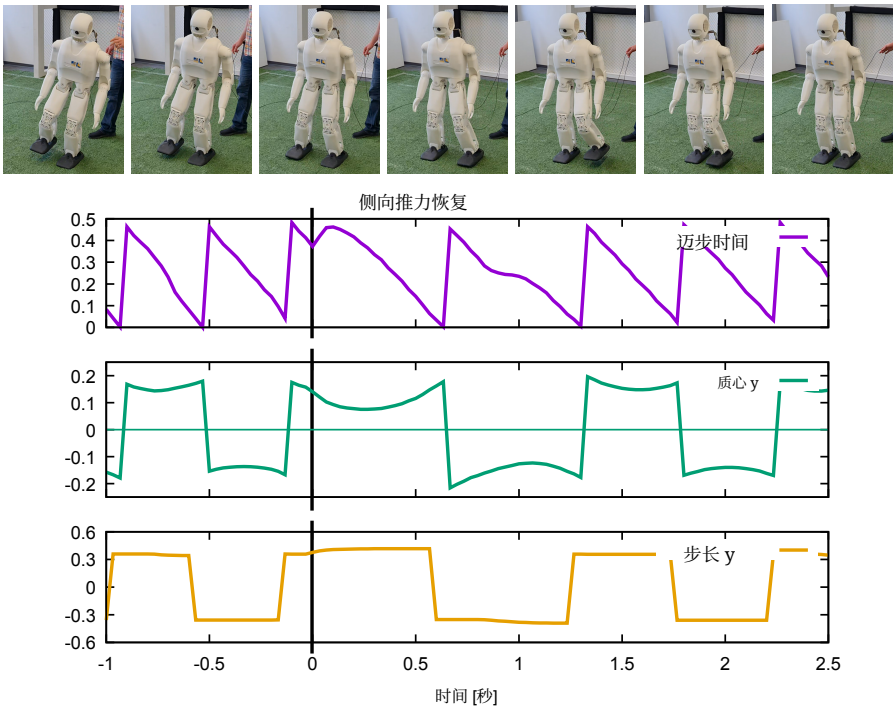

图 3. 侧向推力恢复示例。从上到下依次绘制了步态剩余时间、侧向质心（CoM）位置和侧向步长。推力发生在时间 0。步态时序立即调整，以延长步态持续时间。质心靠近支撑脚，随后在约 0.6 s 时返回支撑交换位置，此时实际执行捕获步。捕获步的步长从默认的 30 cm 调整为 35 cm。在 1.25 s 执行捕获步后，步态恢复至标称值。

后处理中，平衡相关的动态效应也会一并处理，导致机器人在较高行走速度下倾向于采用开环行走。

我们采用了 [5]中的直接质心控制器（DCC）理念，使用卡尔曼滤波器估计矢状面$\mathbf{c} = [c\ \dot{c}\ \ddot{c}]$ 和侧向$\mathbf{c}_x$平面上的质心状态，并使用来自惯性测量单元（IMU）的、未经旋转且已去除重力偏置的躯干加速度 $g\ {}^{G}\ddot{x}_t$ 补充测量模型$\mathbf{z}_k$：

$$\begin{bmatrix} {}^{G}\ddot{x}_t \\ {}^{G}\ddot{y}_t \\ {}^{G}\ddot{z}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{T}\ddot{x}_t \\ {}^{T}\ddot{y}_t \\ {}^{T}\ddot{z}_t \end{bmatrix} \mathbf{R_t} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}_{k,x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ {}^{G}\ddot{x}_t \end{bmatrix} + \mathbf{v}_{k,x}. \tag{1}$$

与 DCC 不同，质量位置不考虑肢体动力学 [3]，并等同于机体坐标系中的一个固定点。这种简化有利于感知方案，因为躯干的加速度与固定于躯干的质心直接相关。因此，捕获步直接作用于估计状态，从而实现精确且一致的平衡控制，不受行走速度影响。

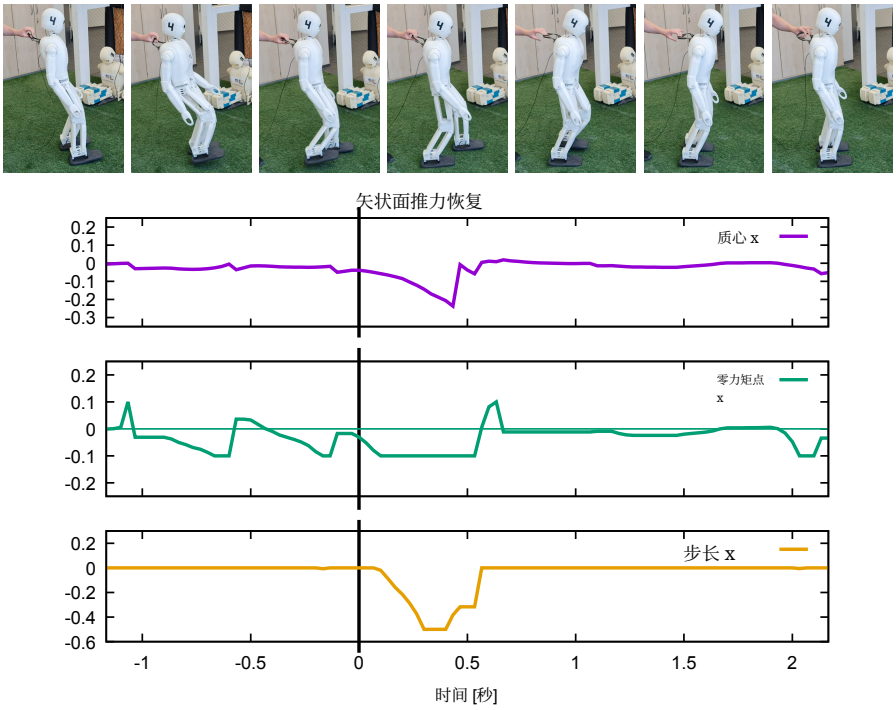

图 4. 矢状面推力恢复示例。从上到下依次绘出了矢状面质心（CoM）位置、矢状面零力矩点（ZMP）坐标和矢状面步长。在时间 0，机器人受到向后的推力。零力矩点立即移至脚跟处的物理极限位置，并调整步长以迈出后退步。0.5 秒时，第一步捕获步完成，机器人仍有少量后向动量，该动量在第二个恢复步中被消除，步态也恢复至标称值。

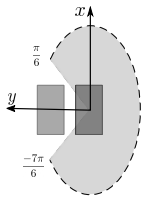

图 5. 右腿的可行踢球方向。虚线边界表示球相对于脚的最佳位置；根据配置的侧踢和正面踢球最佳距离，该位置显示为椭圆。

4.3 基于相位的行走中踢球

我们在 [13]中提出了“行走中踢球”方法，并将其应用于 NimbRo-OP2(X) 平台，以参加 RoboCup 2019。该方法无需为执行踢球动作而不必要地停下，从而提升了比赛的整体节奏。

然而，先前介绍的方法存在一些需要解决的局限性。踢球的力度取决于脚在球后方的位置是否准确；球距离最佳距离越远，踢出的球就越无力。为了朝预期方向射门，机器人必须先转向该方向，然后才能执行向前踢球。为了有效控球，机器人首先必须将脚对准球后方。

在 RoboCup 2022 中，我们针对上述局限性进行了改进，以进一步提升比赛节奏。我们的方法使机器人能够朝可行的方向踢球，同时在实际踢球前调整脚在球后方的位置。该方法还增强了球与脚之间距离未达到最佳距离时的踢球力度。如果腿部在物理上无法朝某个方向移动，那么该方向就不是可行的踢球方向。图 5 展示了 NimbRo-OP2 机器人的可行踢球方向。

我们定义踢球坐标系，使 x 轴沿踢球方向，坐标系原点位于踢球脚的中心。踢球轨迹的公式在该坐标系中表示，之后转换到机器人的局部坐标系，并应用于腿部的矢状面和横向轨迹，使机器人除了向前踢球外，还能进行斜向踢球和侧向踢球。我们创建两种摆动轨迹：踢球摆动 s_{kick} 和调整摆动 s_{adj}。前者将摆动轨迹应用于踢球动作，后者则通过摆动轨迹调整脚与球之间的 y 偏移量。图 6 展示了生成的摆动轨迹[5]的三个示例。摆动轨迹 s 的函数定义如下：

$$
\begin{aligned}
g\left(\phi, y_0, y_f, c\right) &= y_0 + \left(y_f - y_0\right)\left(6\left(1-\phi\right)^2\phi^2 c + 4\left(1-\phi\right)\phi^3 + \phi^4\right), \\
s\left(\phi, \alpha, \phi_p, c\right) &= \begin{cases} g\left(\frac{\phi}{\phi_p}, 0, \alpha, c\right) & 0 \le \phi < \phi_p \\ g\left(\frac{\phi-\phi_p}{1-\phi_p}, \alpha, 0, 1-c\right) & \phi_p \le \phi \le 1 \end{cases},
\end{aligned}
\tag{2}
$$

其中， y_0 和 y_f 分别是四次贝塞尔曲线g的起始域和终止域。相位变量 ϕ 的函数 s 表示一条摆动曲线，该曲线在相位 ϕ_p 达到峰值振幅 α，并在该相位结束时回到 0，同时遵循由 c定义的曲率。随后，踢球轨迹和摆动轨迹的公式如下：

$$
\begin{aligned}
s_{fw}(\phi) &= s\left(\phi, \alpha_{fw}, \phi_{fw}, c_{fw}\right), \\
s_{bw}(\phi) &= s\left(\phi, \alpha_{bw}, \phi_{bw}, c_{bw}\right), \\
s_{kick}(\phi) &= s_{fw}(\phi) + s_{bw}(\phi), \\
s_{adj}(x) &= s\left(\phi,\ \alpha_y,\ \phi_{adj},\ c_{adj}\right),
\end{aligned}
\tag{3}
$$

其中， s_{kick} 表示用于踢球的摆动轨迹， s_{adj} 表示踢球前的调整摆动轨迹。 $\alpha_{fw} = \alpha_x + 0.8(\alpha_{opt} - \alpha_x)$是相对于最佳摆动幅度 α_{opt} 以及踢球坐标系中的球位置计算得出的前摆幅度， $\alpha_{bw} = \alpha_{fw} - \alpha_{opt}$ 是

[5] 在线行走踢球图：https://www.desmos.com/calculator/v7wlvjtchl

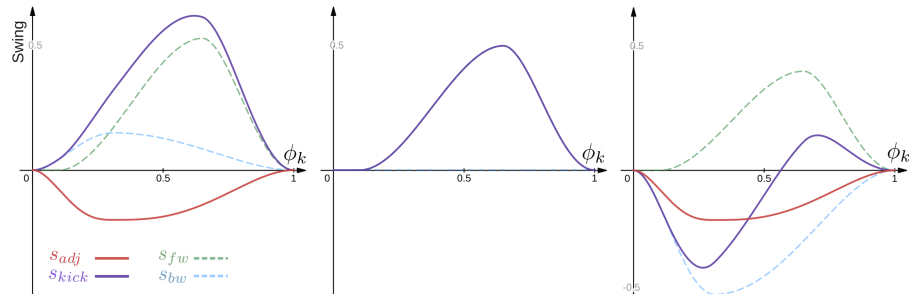

图 6. 行走中踢球的摆动轨迹。 ϕ_k 为踢球阶段（类似于[13]的图 6 中的 x_K ）。 s_{fw}、 s_{bw}、 s_{kick}和 s_{adj} 分别是在公式（3）中定义的向前摆动、向后摆动、踢球摆动和调整摆动。从左到右给出三个示例：球距离比最佳距离更远，且沿 y轴有所偏移；球位于最佳距离处，且没有 y偏移；球靠近脚，且有 y偏移。

后摆幅度，而 c_{fw}、 c_{bw}和 c_{adj} 分别是前摆、后摆和调整摆动的曲率增益。

采用基于相位的行走中踢球，行为在踢球前有更多自由度来调整机器人状态，因此能够更快地做出决策。这在一对一对抗中尤为有利，因为对手也位于球后方并试图踢球。

5 行为控制

为了控制高层行为——引导机器人移动到球后、避开障碍物，并触发朝向对方球门的行进中踢球——我们采用了一种简单的力场方法。由于步态 [10] 的全向控制层，我们可以将机器人视为全向质点，并通过方向输入向量对其进行控制：向量方向决定行走方向，长度决定行走速度。该向量还包含一个独立的转向分量，它不受平面上的二维行走方向影响。利用这一接口，我们只需将把机器人拉向球后位置的力与将机器人推离障碍物的力相加，就能得到合适的步态控制向量。垂直于机器人—球连线和机器人—障碍物连线的力，分别有助于绕过球和绕开障碍物。机器人的朝向由一组独立的力控制：先将机器人转向球，再在机器人接近球后位置时将其转向球目标点。通过调整各个力的强度参数，我们可以快速使行为控制器适应不同类型的机器人。今年，我们所有机器人的构造都非常相似，因此能够对所有机器人使用相同的参数。图 7 展示了行为控制中各组成部分的可视化结果。我们没有专门的守门员行为，因为我们认为安排两名积极参与比赛的场上球员效率更高。

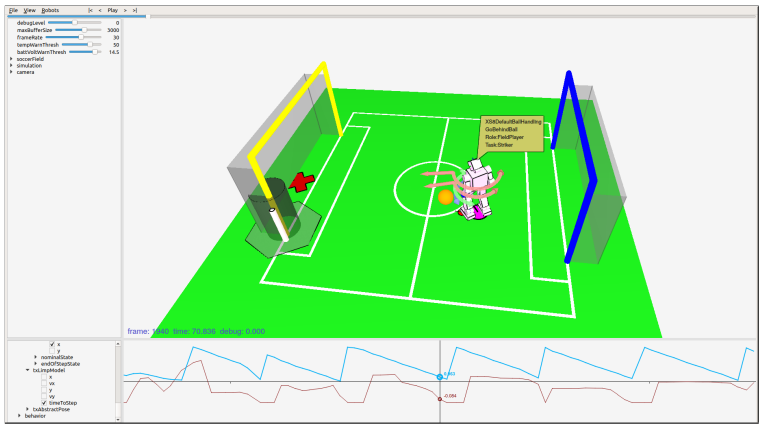

图 7。 NimbRo 队的图形化调试与诊断工具。3D 可视化区域能够一目了然地提供大量信息，例如：机器人的全身状态估计、定位信息以及观测物体。橙色球体代表球。红色十字标记机器人应将球踢向的位置。小红圈表示球后位置。机器人模型周围绘制的箭头组表示不同控制层的输出，其中最上方的箭头表示控制机器人的力。白色竖条表示球门柱，周围的灰色圆柱体代表障碍物。该工具内置绘图器，并提供用于运行期间参数调节的滑块。

6 调试与诊断

随着足球软件日益复杂，开发有助于调试并支持全面诊断硬件故障的可视化工具非常重要。图 7 展示了图形分析器的屏幕截图。OpenGL 三维场景显示了机器人的全身状态估计、其在足球场上的定位、球和球门柱等观测结果、比赛控制器提供的比赛状态、机器人的角色和任务，以及行为控制器和步态控制器的输出信息。障碍物以黑色圆柱体标示。我们的工具还包含一个绘图器，用于显示不易直观呈现的变量，例如屏幕底部绘图区中蓝色曲线所示的、预计距离下一次支撑交换的时间。调试工具与机器人之间的通信接口可无缝接入我们的 ROS 基础设施。

7 技术挑战赛

本节介绍我们参加技术挑战赛所采用的方法。技术挑战赛是成人组联赛中的一项独立赛事。在 25 分钟的时段内，机器人必须完成四项单独的任务：推搡恢复、跑酷、高踢球和移动球射门。严格的时间限制要求解决方案具备出色的稳健性和可靠性。

7.1 推搡恢复

在这项挑战中，机器人必须原地行走，同时连续承受来自前方和后方的三次推搡。推力由摆锤产生，摆锤会撞击机器人质心所在的高度。排名依据摆锤重量与摆锤回缩距离的组合值，并按机器人质量进行归一化。得益于捕捉步态框架，我们的机器人成功抵御了 3 千克和 5 千克摆锤的推搡，并赢得了这项挑战。

7.2 跑酷

在这项挑战中，机器人必须登上一个平台，然后再下来。平台越高，机器人的排名越靠前。我们使用手动设计的动作完成了这项挑战。由于我们的机器人采用平行腿运动学，因此采用侧向跨步登上平台对我们更有利，因为这样能让机器人拥有更大的活动能力。动作中包含受控地跌落到平台上，使脚能够落在更靠近平台中心的位置，从而为上升后续阶段中的另一只脚留出空间。在这一阶段，我们降低了执行器的增益，使机器人落到平台上时产生阻尼效应。随后，通过一系列质心转移，让另一只脚也踏上平台，从而达到稳定站姿（图 8）。我们没有从平台上下来，因为这一动作会给电机带来很大的负载。我们的机器人成功登上了 30 厘米高的平台，在这项挑战中获得第二名。

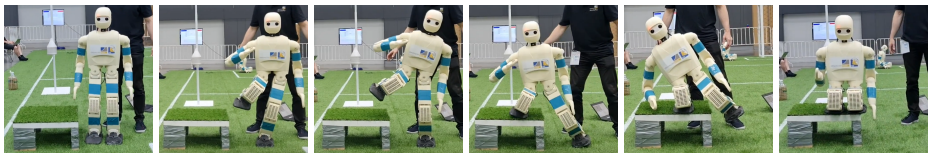

图 8. 技术挑战：跑酷。

7.3 高踢球

在这项挑战中，目标是将球踢过障碍物得分。各队根据成功踢球时所跨越的障碍物高度排名。球从罚球点开始，障碍物位于球门线上。为了可靠地将球踢过障碍物，我们先以较小的力度踢球，让球靠近障碍物。然后，我们采用一种踢球动作，将脚尽可能低地触球，并利用形似“铲子”的脚型将球踢过障碍物。我们的机器人以踢过16厘米高障碍物的成绩获得第一名。

7.4 移动球射门

在这项挑战中，机器人必须将移动中的球踢进球门得分。机器人静止在罚球点，球位于角球区。由一名人类将球传给机器人。各队根据三次连续尝试中的进球数排名。为了可靠地将移动中的球踢进球门，我们根据一系列球检测结果计算出球的速度和加速度，并据此估算球到达的时间。这样，机器人便能在合适的时机开始踢球，也就是球正朝脚靠近时（图9）。我们的机器人在这项挑战中获得第一名，连续三次尝试均成功进球。

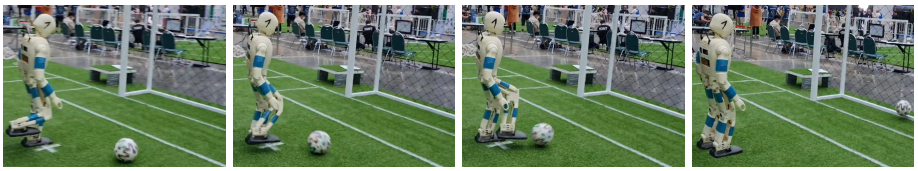

图 9. 技术挑战：移动球射门。

8 足球比赛表现

在 RoboCup 2022 成人组足球比赛中，机器人在一块 9×14 米长的足球场上自主进行二对二足球比赛。除正式比赛外，还有临时组队比赛，不同队伍的机器人组成临时联队，参加二对二比赛。我们的机器人表现出色，赢得了成人组锦标赛；该赛事包括六场循环赛和决赛，总比分为 43:2，并以 7:1 赢得决赛。我们的机器人还赢得了临时组队比赛，以 22 分大幅领先第二名队伍的 5.5 分，并在三场比赛中取得 15:3 的总比分。在比赛期间，我们的机器人共参加了 10 场比赛，总比分为 58:5，总比赛时长为 200 分钟。

9 结论

本文介绍了我们对人形足球机器人软硬件组件的改进。这些改进助我们在曼谷举行的 RoboCup 2022 成人组联赛中赢得所有可参加的比赛：主锦标赛、临时组队比赛和技术挑战赛；我们的机器人在每项挑战赛中都取得了得分。比赛期间，我们的机器人始终表现出色，因此获得了最佳人形机器人奖。改进的组件包括：升级后的感知模块、捕获步态以及基于相位的行走中踢球。这些创新提升了定位和球感知能力，使行走更加鲁棒，控球也更加灵活，从而助力我们赢得 RoboCup 2022 成人组人形机器人联赛冠军。

致谢
这项工作部分由 H2020 项目 EUROBENCH（GA 779963）资助。

参考文献

1. Amini, A., Farazi, H., Behnke, S.：多个人形机器人的图像实时姿态估计。载于：RoboCup 2021：机器人世界杯第二十四届。第91–102页。Springer LNCS 13132（2022） 2. Ficht, G., Allgeuer, P., Farazi, H., Behnke, S.：NimbRo-OP2：用于研究的成年型3D打印开放式人形机器人平台。载于：第17届IEEE-RAS国际人形机器人会议（Humanoids）（2017） 3. Ficht, G., Behnke, S.：具有惯性约束的人形机器人的快速全身运动控制。载于：IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）。第6597–6603页（2020） 4. Ficht, G., Behnke, S.：双足人形机器人硬件设计：技术综述。Current Robotics Reports **2**(2)，201–210（2021） 5. Ficht, G., Behnke, S.：平衡人形机器人运动的直接质心控制。载于：第25届国际攀爬与步行机器人会议（CLAWAR）。第242–255页（2022） 6. Ficht, G., Farazi, H., Brandenburger, A., Rodriguez, D., Pavlichenko, D., Allgeuer, P., Hosseini, M., Behnke, S.：NimbRo-OP2X：成人尺寸的开源3D打印人形机器人。载于：第18届IEEE-RAS国际人形机器人会议（Humanoids）（2018） 7. Ficht, G., Farazi, H., Rodriguez, D., Pavlichenko, D., Allgeuer, P., Brandenburger, A., Behnke, S.：Nimbro-OP2X：经济实惠、成人尺寸、用于研究的3D打印开源人形机器人。《国际人形机器人学报》**17**(05)（2020） 8. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J.：用于图像识别的深度残差学习。载于：IEEE国际计算机视觉与模式识别会议（CVPR）。第770–778页（2016） 9. Hirukawa, H., Kanehiro, F., Kaneko, K., Kajita, S., Fujiwara, K., Kawai, Y., Tomita, F., Hirai, S., Tanie, K., Isozumi, T. 等：HRP开发的人形机器人平台。《机器人与自主系统》第165–175页（2004） 10. Missura, M., Behnke, S.：采用柔顺关节的自稳定全向行走。载于：IEEE-RAS国际人形机器人会议（Humanoids）人形足球机器人研讨会。美国亚特兰大（2013） 11. Missura, M., Bennewitz, M., Behnke, S.：捕获步：人形机器人的鲁棒行走。《国际人形机器人学报》**16**(6)，1950032:1–1950032:28（2019） 12. Park, I.W., Kim, J.Y., Lee, J., Oh, J.H.：人形机器人平台HUBO的机械设计。Advanced Robotics **21**(11)，1305–1322（2007） 13. Rodriguez, D., Farazi, H., Ficht, G., Pavlichenko, D., Brandenburger, A., Hosseini, M., Kosenko, O., Schreiber, M., Missura, M., Behnke, S.：RoboCup 2019成人组冠军NimbRo：深度学习感知、行走中踢球、推搡恢复与团队协作能力。载于：RoboCup 2019：机器人世界杯第二十三届。第631–645页。Springer LNCS 11531（2019） 14. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.：U-Net：用于生物医学图像分割的卷积网络。载于：医学影像计算与计算机辅助干预（MICCAI）。第234–241页。Springer（2015） 15. Shigemi, S., Goswami, A., Vadakkepat, P.：ASIMO与本田的人形机器人研究。《人形机器人：参考资料》第55–90页（2018）