即将在*AdvancedRobotics*第 00 卷，第 00
期，2025年12月，1–11 页发表

全文论文

基于多目标黑箱优化的各种机械臂构型分析

Kento Kawaharazuka[a]*、Keita Yoneda[a]、Takahiro Hattori[a]、Shintaro Inoue[a] 和 Kei Okada[a]

[a]东京大学信息科学与技术研究生院机械信息学系，日本东京文京区本乡 *7-3-1*。（收稿日期：*201X*年*00*月；录用日期：*201X*年*00*月）

arXiv:2601.02704v1 [cs.RO] 6 Jan 2026

这是一篇预印本文章，其最终确定版本已发表于《ADVANCED ROBOTICS》2025年刊，版权归 Taylor & Francis 和日本机器人学会所有，在线发布地址为：http://www.tandfonline.com/ArticleDOI; https://doi.org/10.1080/01691864.2025.2607670。

迄今为止，人们已经开发出各种6自由度（DOF）和7自由度机械臂。经过长期发展，它们的关节构型和连杆长度比一直是通过经验确定的。近年来，机器人基础模型的开发日益活跃，为支持这些模型，人们不断提出各种机械臂。然而，这些机械臂的结构均不完全相同，因为不同机器人之间的关节顺序和连杆长度比存在差异。因此，为了探讨机械臂的最优结构，我们从末端执行器可达性和关节扭矩两个角度进行了多目标优化。我们分析了现有机械臂结构在优化采样结果中的位置，并为未来的机械臂设计提供了参考。

关键词： 黑盒优化、机械臂、设计优化

1. 引言

多年来，人们开发了各种各样的6自由度和7自由度机械臂。这些机械臂历史悠久，最早可追溯至1961年Unimate [1], 这一世界上第一台工业机械臂的诞生。此后，人们提出了许多机械臂，发展至如今用于机器人基础模型的ALOHA [2] [3–5]。Unimate的关节排列顺序为YPSPY（其中，滚转记为R，俯仰记为P，偏航记为Y，滑动记为S；该顺序从机械臂的基座开始描述。串联机械臂的初始状态定义为所有连杆均竖直向上伸展的构型，并根据此状态下的运动方向确定关节类型（R、P、Y、S）。）尽管有些机器人采用了滑动关节，但此后开发的大多数通用机械臂都由滚转、俯仰和偏航关节组成。在6自由度机械臂中，ALOHA [2], COBOTTA [6],和xArm 6 [7] 的关节排列顺序为YPPYPY。此外，近期使用的ARX [8] π_0 [9] 关节顺序为YPPPRY，而myCobot [10] 采用YPPPYR的顺序。对于7自由度机械臂，Franka Emika Panda [11] 的关节顺序为YPYPYPR，而Sawyer [12]和Kinova Gen3 [13] 的关节排列顺序为YPYPYPY。如上所示，不同机器人的关节排列顺序各不相同，连杆长度的比例也相应有所差异。

机械臂的结构传统上是通过经验确定的。然而，随着各种机械臂构型不断发展，许多研究开始着重优化本体结构设计，以确定最有效的构型。在 [14], , 提出了一种基于工作空间最大化和连通良好工作空间概念的6自由度机械臂最优关节构型

*通讯作者。电子邮箱：kawaharazuka@jsk.imi.i.u-tokyo.ac.jp

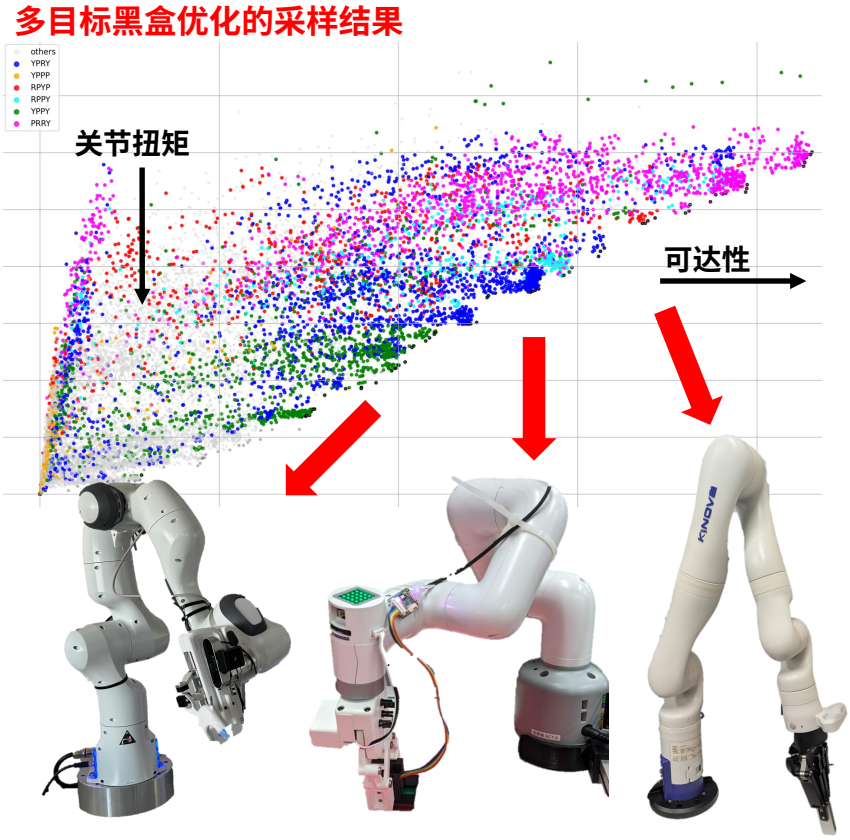

图1. 研究概念：本研究从末端执行器可达性和关节扭矩的角度进行多目标优化，探讨各种关节结构，包括近年来积极开发的多种机械臂。

。在 [15], , 研究者采用启发式方法提取了若干种7自由度机械臂的关节构型，并根据奇异性规避、工作空间优化、运动学简洁性和机械可行性对其进行评估。对于工业机器人， [16]采用遗传算法优化模块的数量、类型及其相对位置，以满足指定的任务点。在 [17], , 研究者采用遗传算法对6自由度机械臂的电机与齿轮比进行多目标优化，旨在减轻本体重量，同时最大化可操作性。在 [18], , 研究者通过穷举搜索优化模块化机器人的设计，使其能够执行任务，同时满足关节角度限制、扭矩限制和避碰等约束。在 [19], , 研究者采用进化策略优化模块布置，以尽可能降低所需力矩并最大化可操作性，同时跟踪指令轨迹。此外， [20, 21]提出了一种帕累托最优解，通过遗传算法进行多目标优化，以尽可能降低控制误差和所需力矩，从而能够根据任务和用户偏好进行本体结构适配。

这些研究可根据采用的不同方法进行分类。例如，有些研究采用解析优化 [14, 15] 和黑盒优化 [16–20]。此外，有些研究侧重于评估任务无关的通用性能 [14, 15]，另一些则进行任务特定优化 [16–20]。过去，解析方法用于优化任务无关的性能 [14, 15]。另一方面，近期研究日益侧重于使用黑盒优化方法 [16–20]，针对特定任务开展更复杂的多目标优化。解析优化存在一些局限，例如无法考虑关节角度限制和连杆碰撞。此外，这类方法只关注可达性，不考虑包含关节扭矩的多目标优化。相比之下，现代黑盒优化方法能够考虑多种约束并进行多目标优化。然而，这些研究大多聚焦于任务特定优化，鲜有工作致力于开展统一的多目标

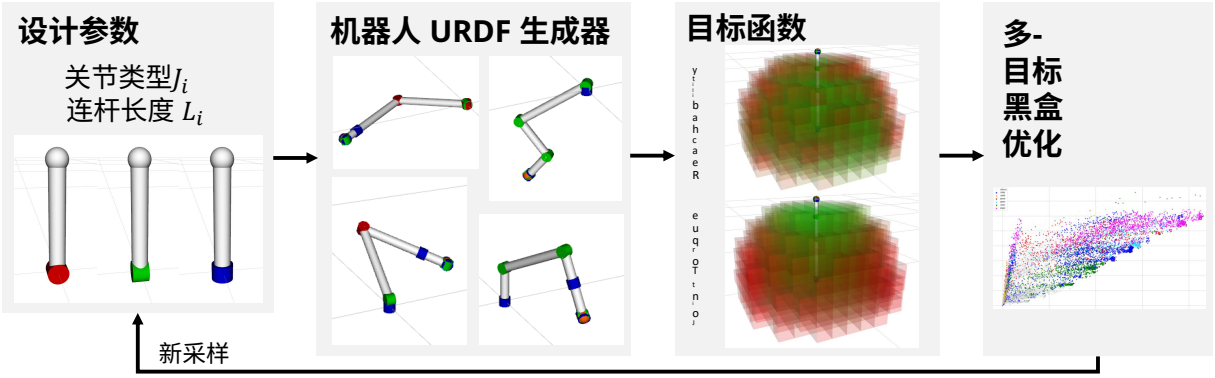

图2. 系统概览：本研究对关节类型和连杆长度进行参数化，自动生成URDF文件，并从末端执行器可达性和关节扭矩的角度执行多目标优化，以探讨各种机械臂的结构。

优化 通用机械臂结构的综述，全面讨论了多种机械臂
rse manipulator 目前已开发的结构。

为弥补这一空白，本研究从末端执行器可达性和关节扭矩的角度，对通用的6自由度和7自由度机械臂进行多目标优化，并全面分析各种机械臂结构（图1）。优化将离散关节类型和连续连杆长度作为参数，施加一定约束，并采用树结构帕尔岑估计器（TPE） [22]进行多目标优化。这种方法明确了现有机械臂结构在优化采样中的位置，并为未来的机械臂设计提供了参考。

本文其余部分安排如下。第2节介绍本研究中的设计参数、约束、目标函数及多目标优化的具体细节。第3节展示6自由度和7自由度机械臂的多目标优化结果，并根据目前已开发机械臂的采样结果讨论研究发现。第4节进一步讨论本研究的结果，第5节给出结论。

2. 基于多目标黑盒优化的多种机械臂构型设计

本研究的整体框架如图2所示。首先，确定关节类型和连杆长度的设计参数。其次，将各个以xacro（XML宏）文件描述的关节组合起来，自动生成机器人的 URDF（统一机器人描述格式）。最后，计算目标函数——末端执行器可达性和关节扭矩，并根据这些标准进行多目标优化。

2.1 机械臂的设计参数

本研究考虑的设计参数如图3所示。这里，机械臂原点与工作空间原点重合。此外，在所有关节角均设为0的初始姿态下，机械臂沿垂直方向笔直向上延伸。关节类型根据这一初始姿态确定。

对于一个 N^{joint} 自由度机械臂，关节类型和连杆长度作为设计参数。每个关节 J_i $(1 \leq i \leq N^{joint})$ 从三种类型中选择：滚转、俯仰和偏航。连杆长度 $L_i (1 \leq i \leq N^{joint})$ 表示为范围 $[0, L^{max}]$ 内的一个值。通过包含各关节的 xacro 文件来构建机械臂的 URDF。每个关节的 xacro 文件包含参数，例如该关节之后的连杆长度、电机质量和连杆质量。电机质量表示为 m_{motor}，连杆质量表示为 $\pi r^2 L_i \rho$，其中 r 表示连杆半径， ρ 表示连杆密度。此外，所有关节的关节角度限制均设定在范围 $[-\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi]$ 内。

这些设计参数受到若干约束。首先，不能连续设置偏航关节，因为一个偏航关节后接另一个偏航关节是冗余的。

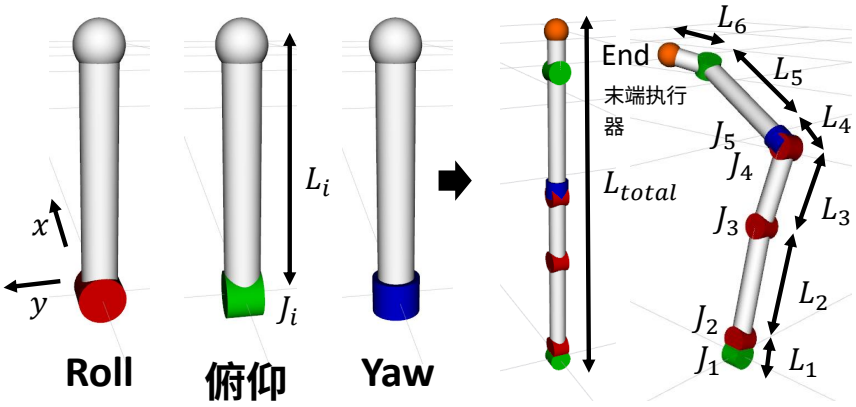

图 3. 本研究采用的设计参数：关节类型 J_i 和连杆长度 L_i 作为设计参数进行变化。

其次，在偏航关节后接滚转关节或俯仰关节，可以通过旋转偏航关节实现相同的运动。因此，这些情况统一为俯仰关节。综上，如果 J_i 是偏航关节，那么 J_{i+1} 必须是俯仰关节。此外，连杆总长度，即机械臂的整体长度，固定为 L_{total}。这些约束的具体实现将在第2.3节讨论。

2.2 可达性与关节扭矩的目标函数

下面介绍本研究优化过程中采用的目标函数。本研究基于两项准则进行多目标优化：末端执行器可达性 [23] 和关节扭矩（图 4）。当然，也可以考虑其他方面，但由于难以将其可视化，而且本研究基于位置和力定义的评价函数具有最广泛的适用性，因此优化针对这两个方面进行。

首先，评估所用的工作空间定义如下。

$$x \in [x^{\min}, x^{\max}], \quad y \in [y^{\min}, y^{\max}], \quad z \in [z^{\min}, z^{\max}] \tag{1}$$

该工作空间以间隔 d_{voxel} 均匀划分为体素，所有体素的集合记为 $\mathcal{V}$。对于每个体素 $i \in \mathcal{V}$，令 $\boldsymbol{p}_i$ 为该体素的中心位置。此外，对于每个体素 i，生成 N_{rand} 个随机末端执行器姿态，并在位置 $\boldsymbol{p}_i$ 改变姿态的同时求解逆运动学。逆运动学求解的成功率定义为可达性得分 E_i^{reach}，其公式如下：

$$E_i^{reach} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{rand}} S_{ij}}{N_{rand}} \tag{2}$$

其中，若体素 i 中的第 j 个随机姿态对应的逆运动学问题成功求解，则 $S_{ij} = 1$；否则 $S_{ij} = 0$。所用的逆运动学算法遵循 [24, 25], 中提出的方法，该方法还考虑了关节角度限制以及连杆之间的碰撞检测。由于求解结果取决于初始条件，若逆运动学求解失败，则使用随机初始关节角最多重试 $N_{ik} = 5$ 次。此外，对于每个体素 i，成功求得的逆运动学解所需关节扭矩的平均值的范数 $E^{torque}{}_i$ 按如下方式计算：

$$E_i^{torque} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{rand}} S_{ij}} \sum_{j=1}^{N_{rand}} S_{ij} \|\boldsymbol{\tau}_{ij}\| \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{\tau}_{ij} \in \mathrm{R}^{N_{joint}}$ 是体素 i 中第 j 个解所需的关节力矩向量，而 $\|\cdot\|$ 表示

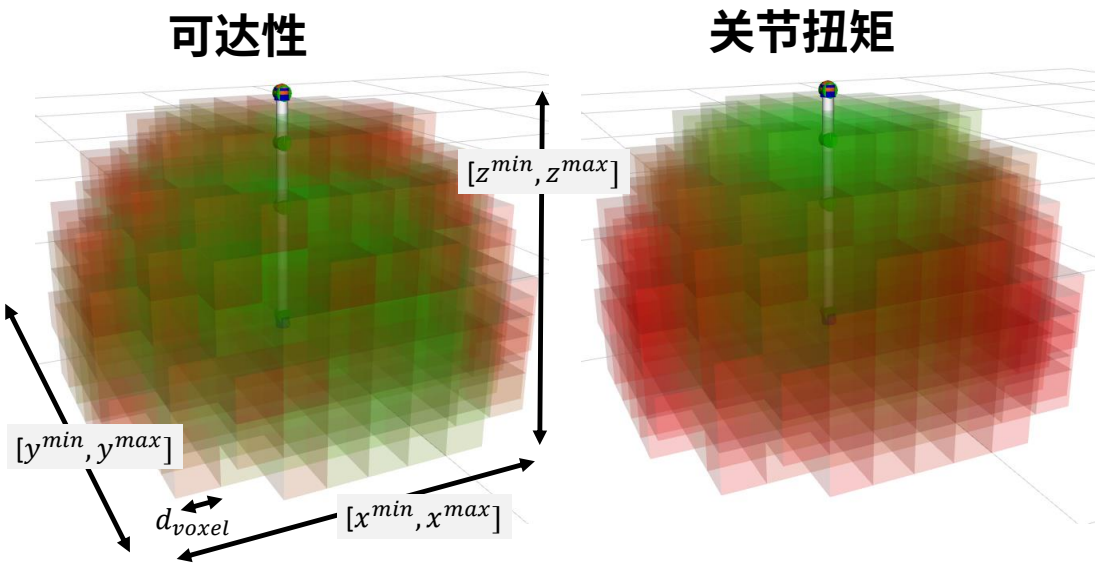

图4。多目标优化的目标函数：左图显示末端执行器可达性，右图显示必要的关节扭矩。

L2范数。最后，按如下方式计算整个工作空间的总体可达性和关节力矩得分。

$$E^{reach} = \sum_{i \in \mathcal{V}} E_i^{reach}, \quad E^{torque} = \sum_{i \in \mathcal{V}} E_i^{torque} \tag{4}$$

例如，图4展示了具有YPPPYP关节结构的机械臂的可达性和关节扭矩分布。参数设置如下：$x^{\min} = -0.5, x^{\max} = 0.5, y^{\min} = -0.5, y^{\max} = 0.5, z^{\min} = -0.1, z^{\max} = 0.5, d_{voxel} = 0.1$，以及$N_{rand} = 30$。对于可视化中的每个体素，可达性以红色表示$E_i^{reach} = 0$，以绿色表示$E_i^{reach} = 1$。此外，关节扭矩以绿色表示$E^{torque}{}_i = 3.0$ Nm，以红色表示$E^{torque}{}_i = 10.0$ Nm（后续实验中也将采用这种可视化方法）。在此示例中，原点附近的可达性较高，并随着距原点距离的增加而降低。此外，关节扭矩随着机械臂沿z方向伸展而降低，并随着其沿x方向或y方向伸展而增加。

2.3 多目标黑箱优化

基于前文所述的设计参数和目标函数，进行多目标优化。对于多目标优化，使用树结构帕尔岑估计器（TPE）[22]。具体而言，采用考虑参数间依赖关系的多变量TPE [26], 。这样便能从采样结果中发现多种设计解。

这里，J_i 被视为有三个选项的分类变量，而L_i 被视为连续变量。优化的目标是最大化E^{reach} 并最小化E^{torque}。在此过程中，必须考虑第 2.1 节所述的约束。首先，为确保俯仰关节跟随偏航关节这一规则，当J_i 为偏航时，无论选择了哪个选项，都会将J_{i+1} 设为俯仰。这是因为 Optuna [27] 的实现存在限制，无法动态修改分类变量的选项。接下来，由于连杆总长度固定为L_{total}，L^{max} 会根据L_i 进行动态调整。对于$i = 1$，L^{max} 设为$L^{max} = L_{init}^{max}$（其中L_{init}^{max}为常数）。对于$i > 1$，L^{max} 将动态更新

如下所示。

$$L_i^{remain} = L_{total} - \sum_{j=1}^{i-1} L_j \tag{5}$$

$$L_i^{max} = \min(L_{init}^{max}, L_i^{remain}) \tag{6}$$

此外，为确保连杆总长度保持为L_{total}，最后一段连杆的长度设为$L^{N_{joint}} = L_{N_{joint}}^{remain}$。因此，实际优化的参数为$J_i (1 \leq i \leq N_{joint})$和$L_i (1 \leq i \leq N_{joint} - 1)$。对于其他参数，多目标优化的初始随机试验次数设为$N_{init}^{trial} = 100$，优化试验总次数设为$N_{total}^{trial} = 20000$。

3. 实验

本研究的实验设置如下所述。首先，通过改变关节数量$N_{joint} = \{6, 7\}$进行两项实验。对于与目标函数计算相关的参数，考虑到通用性和计算成本，采用以下数值：$x^{\min} = -0.5, x^{\max} = 0.5, y^{\min} = -0.5, y^{\max} = 0.5, z^{\min} = -0.1, z^{\max} = 0.5, d_{voxel} = 0.2$和$N_{rand} = 30$。对于其他参数，考虑到常见的机械臂构型，设定以下数值：$m_{motor} = 0.5$ kg,$\rho = 1.0 \times 10^3$ kg/m^3, $r = 0.015$ m，$L_{total} = 0.6$ m，以及$L_{init}^{max} = 0.3$ m。每项实验均展示多目标优化的采样结果，并详细讨论若干结构示例。

3.1 *6*自由度机械臂的多目标优化

的实验结果$N_{joint} = 6$ 如图 5 所示。在采样结果中，不同颜色表示前四个关节构型的变化。帕累托最优解以黑色圆框标出。观察到的六种主要构型为 PRRY、RPYP、YPRY、RPPY、YPPY和YPPP。其中，帕累托最优解中可达性最高的关节构型（PRRY、RPYP和YPRY）展示在图 5 下方。此外，采样得到的非帕累托最优解中可达性最高的关节构型（YPPY和YPPP）也一并展示。由于RPPY与PRRY 关于x轴和y轴对称，二者几乎完全相同，因此省略了前者。

一个普遍观察到的趋势是，即使在相同的关节结构中，提高可达性通常也会使两个自由度位于原点附近（肩部），一个俯仰或滚转关节位于中间位置（肘部），而三个自由度位于末端执行器处（腕部）。这一发现与文献[14]中的报告一致。

具体的关节构型将在下文讨论。PRRY 兼具较高的总体可达性和较低的所需力矩。具体而言，PRRY在y轴附近的力矩较低，而RPPY 在x轴附近的力矩较低。RPYP 将偏航关节置于中间，使末端执行器能够实现多种姿态。然而，在靠近机身的位置，其可达性会降低。这种结构反映了两种动机之间的冲突，从而导致一种犹豫不决的构型。一种动机是通过初始滚转-俯仰-偏航确定三维方向，并将俯仰关节置于中间；另一种动机则是将滚转-俯仰-偏航的全部三个自由度分配给末端执行器。YPPY 在偏航关节之后设置了两个连续的俯仰关节，因此容易受到重力效应的影响。然而，其总体可达性仍然相当高。这种构型被用于 ALOHA、COBOTTA 和 xArm 6 等机械臂中。安装在 Boston Dynamics 的 Spot 等四足机器人平台上的机械臂 [28]也采用了这种结构。YPPP 是 ARX 和 myCobot 所采用的构型。与YPPY类似，它会直接受到重力效应的影响。由于具有三个连续的俯仰关节，其可达性相对较低，但提供了最简单、最直观的运动学。

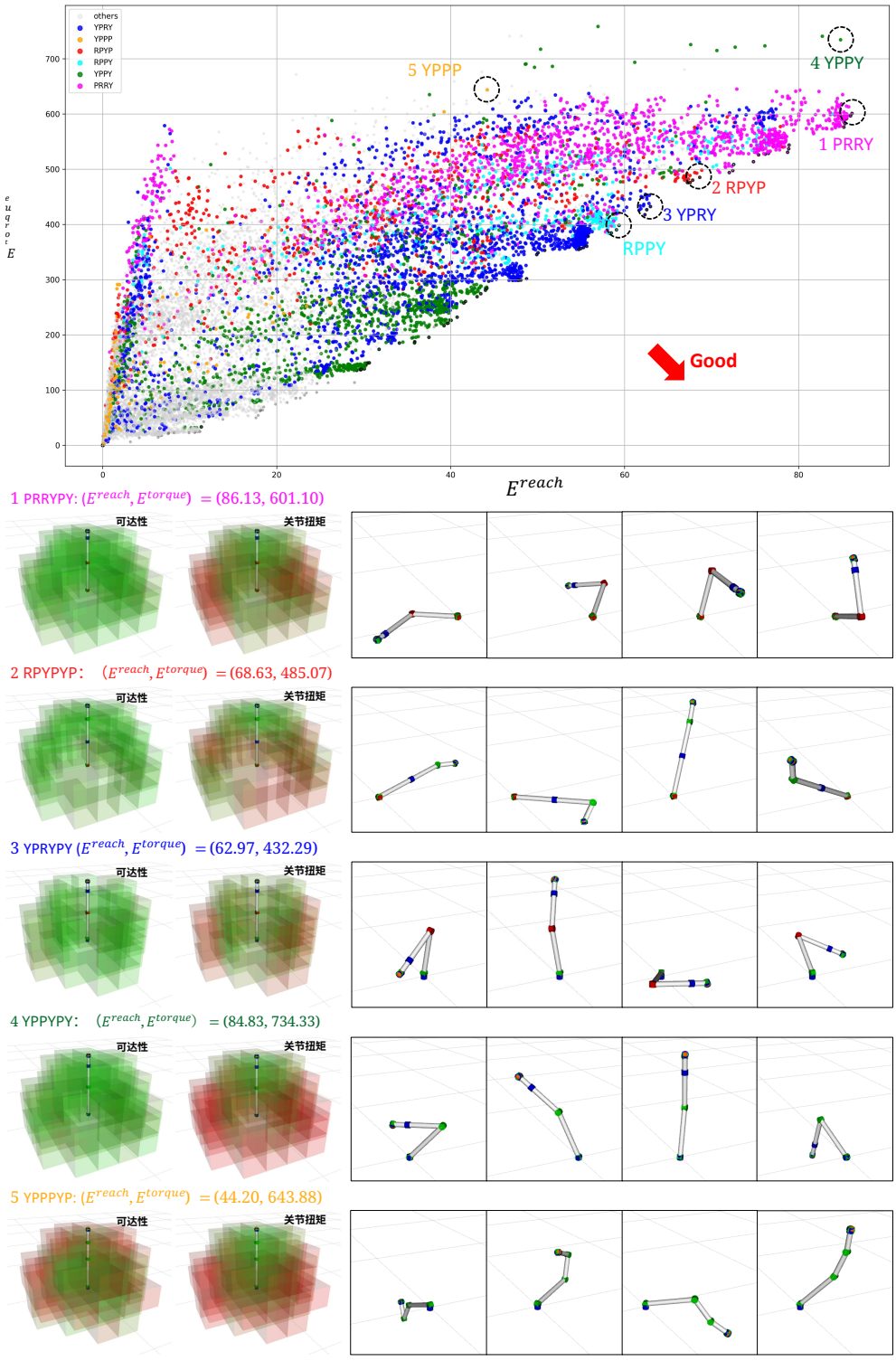

图5. 6自由度机械臂的优化结果：上图以不同颜色显示采样结果，颜色根据前四个关节类型的差异进行编码。下图展示了部分解，包括末端执行器可达性、关节扭矩，以及通过随机设定关节角生成的四种姿态。

3.2 7自由度机械臂的多目标优化

的实验结果如$N_{joint} = 7$所示。观察到的主要关节构型包括PRRY、YPRR、YPRY、YPPP、YPPY、YPYP和YPRP。请注意，在6自由度和7自由度情形下，关节构型的颜色分配可能不同。在这些构型中，帕累托最优解（PRRY 和YPRP）中可达性最高的关节构型如图6所示。

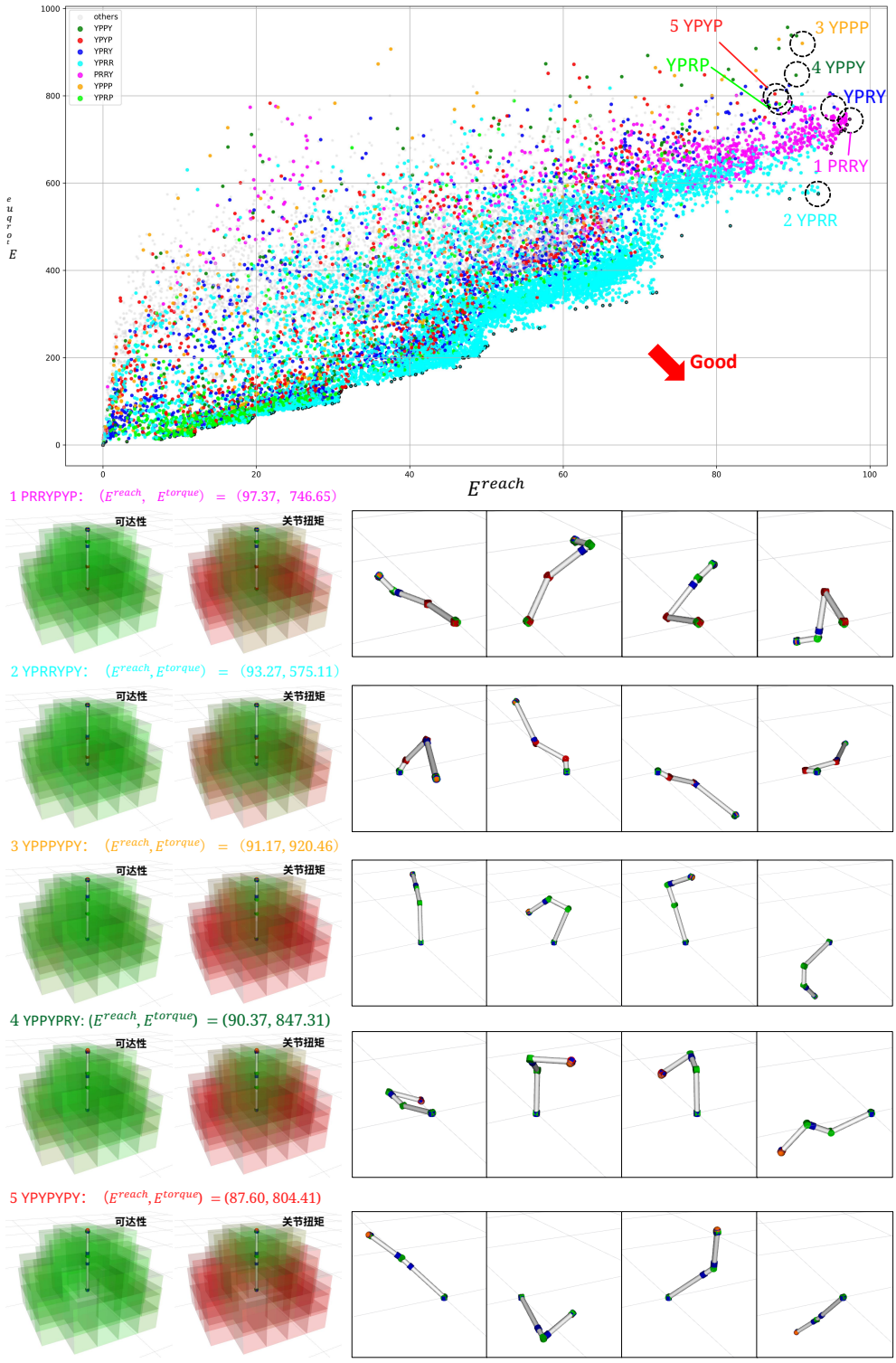

图6。7自由度机械臂的优化结果：上图展示了采样结果，并根据前四个关节类型的差异进行颜色编码。下图展示了部分解，包括末端执行器可达性、关节扭矩，以及通过随机分配关节角生成的四种姿态。

图6的下图。此外，还展示了采样得到的非帕累托最优解中可达性最高的关节构型（YPPP，YPPY，以及YPYP）。

总体而言，7自由度情形中观察到的趋势与6自由度情形略有不同。与6自由度情形一样，两个自由度集中在原点（肩部）附近，三个自由度位于末端执行器（腕部）处；不过，剩余两个自由度的分布有两种截然不同的方式：

一种是将它们集中在肘部附近，使整个连杆机构按1:1的比例分为两部分；另一种则是将它们更均匀地分布，形成1:1:1的比例。

下文将讨论具体的关节构型。PRRY 具有较高的可达性，且所需力矩较低，这与 6自由度情形的结果一致。随着末端执行器的自由度增加，可达性会提高，但所需力矩也会增大。YPRR 是在 6自由度 PRRY 基础上增加了一个基座偏航关节。由于第一个偏航关节所受力矩并不显著，所需力矩与 6自由度 PRRY基本相同，而可达性有所提升。YPPP、YPPY和YPYP的关节结构简单直观，但与 6自由度情形一样，更容易受到重力效应的影响。这三种结构的性能相近，其中YPYP所需力矩最低。YPYP是工业机器人中最常见的结构之一，Franka Emika Panda、Sawyer 和 Kinova Gen3 等机械臂均采用了类似的构型。此外，采用YPRP 结构的机器人是 Robai Cyton Gamma[29]。

4. 讨论

下面对获得的结果进行总结和讨论。首先，关于采样结果的趋势，6自由度机械臂在不同关节结构的性能上表现出显著差异，在可达性和力矩方面各具特点。相比之下，7自由度机械臂在不同关节结构下均表现出较高的可达性，且未观察到显著差异。这凸显了关节构型对于6自由度机械臂的重要性。此外，6自由度机械臂的连杆长度比总体上较为相似，而7自由度情形下则呈现出更大的变化。

接下来，关于具体的关节构型，帕累托最优解中的许多构型在现实中的机械臂上并不常见。尤其是，PRRY 结构对于6自由度和7自由度机械臂均表现出最高的可达性和最低的力矩。这种结构可以理解为一种水平移动、通过俯仰关节旋转的SCARA型机器人。该构型将力矩集中在第一个俯仰关节上，并减小施加于后续滚转关节的力；与连接至YPP结构的更传统机械臂相比，它减少了所需的一个俯仰关节力矩。相比之下，YPPP 和YPPY 等常见机械臂结构更容易受到重力效应的影响，但其运动学简单，运动直观且易于理解。传统机器人采用较高的传动比，虽缓解了这些问题，但低传动比直驱电机的发展，未来可能会加速对能进一步减小重力影响的结构的需求。

本研究仅从末端执行器可达性和关节扭矩的角度进行了多目标优化。然而，实际上，可制造性和运动学简洁性等因素也十分重要。综合考虑这些因素，以确定最优结构，将具有重要意义。与依赖人类直觉相比，基于数据的优化能够为未来的机器人设计提供有趣的见解。此外，未来的另一项挑战是，在不仅包含转动关节，还包含移动关节、闭环结构和线驱动机构的情况下，确定最优结构。

5. 结论

本研究从末端执行器可达性和关节扭矩的角度进行多目标优化，以分析各种机械臂结构。设计参数包括离散的关节类型和连续连杆长度，并对关节序列和总连杆长度施加了额外约束。研究采用多变量树结构帕尔岑估计器（TPE）高效地进行多目标优化。优化结果揭示了多个此前尚未探索过的新型机械臂结构，同时也明确了现有机械臂结构在优化采样中的位置。6自由度与7自由度机械臂在采样结果和帕累托最优解方面的差异—

也带来了有趣的见解。鉴于电机技术的快速发展，本研究为未来的机械臂设计提供了有价值的指导。当然，未来仍面临若干有趣的挑战，例如需要预先设定某些参数，以及尚未考虑运动学简洁性或可制造性。尽管如此，本研究仍为不同关节结构的性能提供了广阔的视角。

参考文献

[1] Jr George C Devol。程序控制物品转移，1961年。美国专利 2,988,237。[2] Tony Z. Zhao、Vikash Kumar、Sergey Levine 和 Chelsea Finn。利用低成本硬件学习精细的双手操作。载于*2023*年*Robotics: Science and Systems*，2023 年。[3]R. Bommasani 等人。《基础模型的机遇与风险》。arXiv 预印本 arXiv:2108.07258，2021年。[4] Roya Firoozi、Johnathan Tucker、Stephen Tian、Anirudha Majumdar、Jiankai Sun、Weiyu Liu、Yuke Zhu、Shuran Song、Ashish Kapoor、Karol Hausman、Brian Ichter、Danny Driess 等人。《机器人基础模型：应用、挑战与未来》。*TheInternational Journal of Robotics Research*，2024年。[5] K. Kawaharazuka、T. Matsushima、A. Gambardella、J. Guo、C. Paxton 和 A. Zeng。《基础模型在现实世界机器人中的应用：综述》。*Advanced Robotics*，2024年。[6] DENSO WAVE。COBOTTA协作机器人。https://www.denso-wave.com/en/robot/ product/collabo/cobotta.html。访问日期：2025年2月28日。[7]UFactory。xArm 6协作机器人。https://www.ufactory.cc/ xarm-collaborative-robot/。访问日期：2025年2月28日。[8] Fangzhou Infinite。ARX Robot。https://arx-x.com/。访问日期：2025年2月28日。[9] Kevin Black、Noah Brown、Danny Driess、Adnan Esmail、Michael Equi、Chelsea Finn、Niccolo Fusai、Lachy Groom、Karol Hausman、Brian Ichter 等人。 \pi 0：用于通用机器人控制的视觉-语言-动作流模型。*arXiv* 预印本 *arXiv:2410.24164*，2024年。[10]Elephant Robotics。myCobot 280 M5Stack。https://www.elephantrobotics.com/en/ mycobot-en/。访问日期：2025年2月28日。[11] Franka Robotics。Franka Emika Panda。https://franka.de/。访问日期：2025年2月28日。[12] Rethink Robotics。Sawyer协作机器人。https://robotsguide.com/robots/sawyer。访问日期：2025年2月28日。[13] Kinova Robotics。Kinova Gen3超轻型机器人。https://www.kinovarobotics.com/ product/gen3-robots。访问日期：2025年2月28日。[14] B. Paden 和 S. Sastry。6R机械臂的最优运动学设计。*The International Journal of RoboticsResearch*，第7卷第2期，第43–61页，1988年。[15] J. M. Hollerbach。七自由度机械臂的最优运动学设计。载于机器人研究：第二届国际研讨会，第215–222页，1985年。[16] G. Yang 和 I. Chen。模块化机器人构型的基于任务的优化：最小化自由度方法。*Mechanism and Machine Theory*，第35卷第4期，第517–540页，2000年。[17] Y. Xiao、Z. Fan、W. Li、S. Chen、L. Zhao 和 H. Xie。基于约束多目标进化算法的机械臂设计优化。载于*2016*年工业信息学国际会议，第199–205页，2016年。[18] S. B. Liu 和 M. Althoff。通过模块化机器人优化自动化性能。载于*2020*年*IEEE*国际机器人与自动化会议，第4044–4050页，2020年。[19] M. Lei、E. Romiti、A. Laurenz 和 N. G. Tsagarakis。用于同时优化模块化可重构机械臂设计与安装位姿的任务驱动计算框架。载于*2024*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，2024年。[20] K. Kawaharazuka、T. Makabe、K. Okada 和 M. Inaba。基于多目标黑箱优化的日常辅助模块化机器人设计。载于*2023*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第9970–9977页，2023年。[21] K. Kawaharazuka、K. Okada 和 M. Inaba。使用黑箱多目标优化的转动关节与移动关节机器人设计优化。载于*2024*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第4571–4577页，2024年。[22] J. S. Bergstra、R. Bardenet、Y. Bengio 和 B. K´egl。超参数优化算法。载于*2011*年神经信息处理系统会议，第2546–2554页，2011年。

[23] F. Zacharias、C. Borst 和 G. Hirzinger。捕捉机器人工作空间结构：表征机器人能力。载于*2007年IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第3229–3236页，2007年。[24] T. F. Chan 和 R. V. Dubey。一种用于冗余关节机械臂避开关节限位的加权最小范数解方案。*IEEE*机器人学与自动化汇刊，第11卷第2期，第286–292页，1995年。[25] H. Sugiura、M. Gienger、H. Janssen 和 C. Goerick。面向人形机器人的全身运动控制实时避碰。载于*2007年IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第2053–2058页，2007年。[26] S. Falkner、A. Klein 和 F. Hutter。BOHB：大规模稳健高效的超参数优化。载于第*35*届国际机器学习会议，第1437–1446页，2018年。[27] T. Akiba、S. Sano、T. Yanase、T. Ohta 和 M. Koyama。Optuna：新一代超参数优化框架。载于第*25*届*ACM SIGKDD*知识发现与数据挖掘国际会议，2019年。[28] Boston Dynamics。Spot机器人。https://www.bostondynamics.com/spot。访问日期：2025年2月28日。[29] Robai。Cyton Gamma 1500机械臂。https://www.cdiweb.com/datasheets/robai/ cyton-gamma-1500-brochure.pdf。访问日期：2025年2月28日。