arXiv:2301.02348v1 [cs.RO] 6 Jan 2023

# 工业机器人中基于运动基元的高速高精度空间曲线跟踪

Honglu He、Chen-lung Lu、Yunshi Wen、Glenn Saunders、Pinghai Yang、Jeffrey Schoonover、Agung Julius、John T. Wen

摘要——**工业机器人越来越多地应用于需要末端执行器工具紧密跟踪指定路径的场景，例如喷涂和焊接。性能与生产效率的目标可能彼此冲突：跟踪精度、路径速度和运动均匀性。工业机器人通过运动基元进行编程，运动基元由路径点以及连接这些路径点的预定义运动段组成，并设定路径速度、混合区等参数。机器人实际执行的运动取决于机器人关节伺服控制器和关节运动约束（速度、加速度等），而用户对此大多并不了解。如今，为使机器人达到预期性能而进行编程既耗时，又主要依赖人工，需要对运动基元中的大量耦合参数进行调节。性能还取决于其他参数的选择，包括可能存在的冗余自由度、目标曲线的位置以及机器人构型。本文提出一种系统方法，用于优化机器人的运动基元以提升性能。该方法首先选择静态参数，然后选择运动基元，最后迭代更新路径点，以最小化跟踪误差。最终的性能目标是在整个路径上满足跟踪精度和速度均匀性约束的前提下，最大化路径速度。我们通过仿真验证了该方法对于 ABB 和 FANUC 机器人的有效性，测试对象为两条具有挑战性的示例曲线；并通过 ABB 机器人进行了实验验证。与采用当前工业实践的基线相比，优化后的性能提升超过 200%。**

关键词-**工业机器人、运动基元、路径优化、冗余度解析、轨迹跟踪**

## 一、引言

工业机器人日益广泛地应用于喷涂 [1], 电弧焊接 [2], 深滚压[3], 表面磨削 [4], 冷喷涂 [5], 等领域。在这些应用中，安装于末端执行器上的工具中心点（TCP）坐标系需要在位置和方向上跟踪复杂的几何路径。在大多数应用中，任务性能由运动速度（完成任务所需的时间）、运动均匀性（沿路径的速度变化程度）和运动精度（沿路径的位置和方向跟踪误差的最大值）来衡量。工业机器人的编程通常有两种方式，分别是用于运动跟踪任务的：（1）运动基元方法，使用厂商专有机器人编程语言（例如， [6]–[11]），通过一系列预定义的运动基元组成程序；（2）流式设定点方法，通过外部命令模式将期望的关节位置作为设定点流式发送到底层关节伺服控制器（例如， [12]–[15]）。运动基元方法在工业领域的应用更为广泛。它利用预定义的运动基元分解期望运动，这些运动基元由路径点及其间的运动段组成。流式设定点方法不受少量运动基元的限制，但由于采样率较低，并且存在额外的滤波和延迟，其跟踪精度通常较差。

使用运动基元为工业机器人编写程序，使其沿复杂路径运动，最常见的方法是将其视作机床 [16], , 只关注 TCP 运动。有若干先进的离线编程软件（例如 [17]–[19]）可将密集的 TCP路径点集转换为特定机器人厂商的机器人程序。执行机器人程序时，机器人实际的运动取决于运动基元及其参数（路径点位置、沿运动段设定的路径速度、运动段之间混合区的大小），而这些又受到机器人关节伺服控制器和机器人关节运动约束（关节速度和加速度限制）的影响。机器人控制器和机器人关节约束在很大程度上对用户而言是未知的。因此，目前要通过编程使机器人达到预期性能，仍然需要耗时且大多依赖人工的运动基元参数调优，最终结果也可能远非最优。此外，还有其他参数带来的挑战：工具坐标系中的冗余滚转自由度、目标曲线与机器人基座之间的相对位姿，以及机器人构型（在具有 6 个自由度（DoF）的转动关节机器人中，8 种可能选择之一）。

流式设定点方法避免了运动融合，但实际机器人运动难以预测。这不仅是因为低级控制器和机器人运动约束未知，还因为流式操作中存在延迟和滤波。Tesseract [20]（基于 TrajOpt [21]）等运动规划工具会在满足跟踪误差和速度均匀性约束的条件下，优化机器人关节路径的路径速度。此类优化涉及大量变量，并受到计算耗时、存在局部极小值以及难以准确预测实际机器人运动等问题的困扰。

电气、计算机与系统工程，伦斯勒理工学院，heh6@rpi.edu luc6@rpi.edu weny2@rpi.edu 制造创新中心，伦斯勒理工学院，saundg@rpi.edu GE Research，美国，Pinghai.Yang@ge.com schoonov@ge.com 电气、计算机与系统工程，伦斯勒理工学院，agung@ecse.rpi.edu wenj@rpi.edu

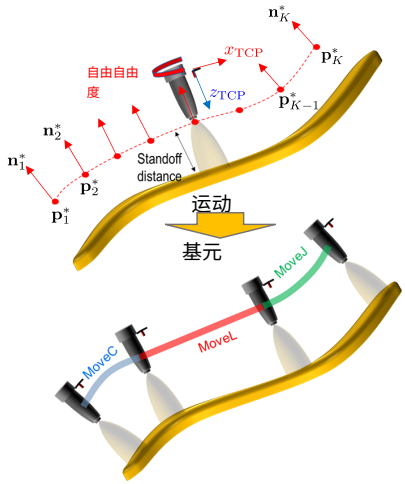



图 1：用于路径跟踪的运动基元方法示意图。

这项工作的一个关键动机是冷喷涂应用：该应用将颗粒高速喷射到表面上，以形成防护涂层 [5]。对于此类应用，工具中心点的速度需要高且均匀，以确保快速执行，并使沉积材料均匀分布。如图 1 所示，喷涂路径由密集的点序列 $\{\mathbf{p}_i^*\}_{i=1}^K$ 给出，这些点表示工具中心点的位置；沿负工具 $z$-轴方向的喷涂方向由表面法向量 $\{\mathbf{n}_i^*\}_{i=1}^K$给出。请注意，这些数据指定了每个点处工具中心点的 5 个自由度，其余自由度为绕工具 $z$-轴的旋转。一旦确定了 TCP 坐标系，便有多个对应的机器人关节构型（逆运动学解）。此外，曲线的位置和方向还有 6 个自由度，分别由质心的位置$\mathbf{p}_{curve}$ 和方向的角乘积表示 $\boldsymbol{\beta}_{curve}$参数化。运动基元方法首先选择所有这些自由参数，我们将这一步称为冗余度解析。随后，如图 1 所示，将 TCP 坐标系转换为运动基元，供机器人控制器执行。本文提出一种新的运动基元优化方法，将问题分解为一系列子问题。首先，我们结合进化算法和局部优化来解析冗余度；然后，使用贪心算法，以最少数量的运动基元拟合曲线；最后，通过迭代梯度下降算法更新路径点，以最小化最坏情况下的跟踪误差。为评估该方法，本文的工业界合作者提出了两条测试曲线：曲线一包含一系列高曲率运动，曲线二则是某涡轮风扇叶片样品的前缘。我们根据当前工业实践开发了一种基线方法。评估指标是在满足指定轨迹跟踪和路径速度均匀性约束的条件下所达到的平均路径速度。我们在 ABB IRB 6640 机器人上通过仿真（使用 RobotStudio）和物理测试平台实现了运动基元优化方法，并在一台 FANUC 仿真中的 M710iC-70 机器人（使用 RoboGuide）。在所有情况下，性能均较基线大幅提升，提升幅度在 200% 至 300% 之间。

**符号说明：** 全文中，$\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 表示工具中心点的笛卡尔位置，$(v, \omega)$ 表示工具中心点的线速度和角速度，$p_0 \in \mathbb{R}^3$ 表示机器人处于零位构型时的 TCP 位置，$\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^3$ 表示工具坐标系姿态的角乘积表示，$\mathbf{q} \in \mathbb{R}^6$ 表示机器人的关节位置。函数 $\text{fwd} : \mathbf{q} \to (\mathbf{p}\ \boldsymbol{\beta})$ 表示正运动学映射。我们还使用记号$\mathbf{p}(\mathbf{q})$ 和 $\boldsymbol{\beta}(\mathbf{q})$ 表示正向运动学。记号 $e_z(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^3$ 是一个单位向量，表示机器人基坐标系中 TCP 的 $z$ 轴。TCP 空间速度记为 $\begin{bmatrix}\omega \\ v\end{bmatrix} = J(\mathbf{q})\ \dot{\mathbf{q}}$，其中 $J$是雅可比矩阵。

**贡献：** 我们提出了一种计算一组运动基元及其各自参数的方法（更多详情见第 II 节），使工具中心点能够以足够的精度和速度均匀性（更多详情见第 III 节）尽可能快速地跟踪期望的位置和姿态。

## II. 运动基元及其执行

### A. 运动基元

通常，所有机器人编程语言都支持三种运动基元：MoveL、MoveC 和 MoveJ，具体介绍如下。

- MoveL：工具中心点在笛卡尔空间中沿直线移动，方向则以角乘积方式从当前位姿线性变化到期望位姿。该命令由初始和最终的 TCP 位置以及角乘积姿态参数化。
- MoveC：工具中心点在笛卡尔空间中沿圆弧移动，方向则以角乘积方式从当前位姿线性变化到期望位姿。该命令由初始和最终的 TCP 位置、中间 TCP 位置（用于定义圆弧），以及初始和最终的角乘积姿态、中间姿态（用于定义旋转方向）参数化。
- MoveJ：机器人在关节角空间中沿直线运动。因此，工具中心点的路径可能既不是直线，也不是圆弧。此命令由初始和最终关节角参数化。

### B. 混合

给定一系列运动基元线段后，将所需的工具路径混合起来，以避免急转弯 [22]。混合区的大小由运动基元指定。混合区越大，向下一线段的过渡越平滑，因此速度越高、越均匀，但路径点（运动段的交点）处的跟踪误差也会更大。较小的混合区有助于提高跟踪精度，但可能形成急角，需要降低速度并增大速度变化，以满足运动约束。在当前实践中，专家操作员会

对路径点、混合区域以及运动段的指令速度进行大量手动调整，以确保同时满足跟踪精度和周期时间要求。在我们的方法中，我们找出能够避免路径点附近速度变化过大的最小均匀混合区，从而平衡这两个目标。

## III. 规范与所提方法

根据冷喷涂应用，轨迹跟踪性能规范如下：**1. 位置跟踪精度：**工具中心点的最大位置跟踪误差小于 0.5 毫米。**2. 姿态跟踪精度：**工具 $z$轴的最大姿态跟踪误差小于 3°。

**3. 速度均匀性：**工具中心点速度的标准差小于 5%。

我们的方法将运动基元优化问题分解为三个步骤，如图 2 所示。

**1. 冗余度解析**：优化冗余自由度（曲线位姿：($\mathbf{p}_{curve}$, $\boldsymbol{\beta}_{curve}$)）、沿路径的冗余自由度以及机械臂构型。此过程的输出是工具中心点的完整 6 自由度参考路径及相应的关节路径。

**2. 运动基元规划**：生成一系列运动基元（路径点、混合区和路径速度），以跟踪参考路径。

**3. 路径点调整**：该运动序列在仿真或实验中执行。执行过程中的跟踪误差用于优化运动基元参数。以下将详细介绍这些步骤。

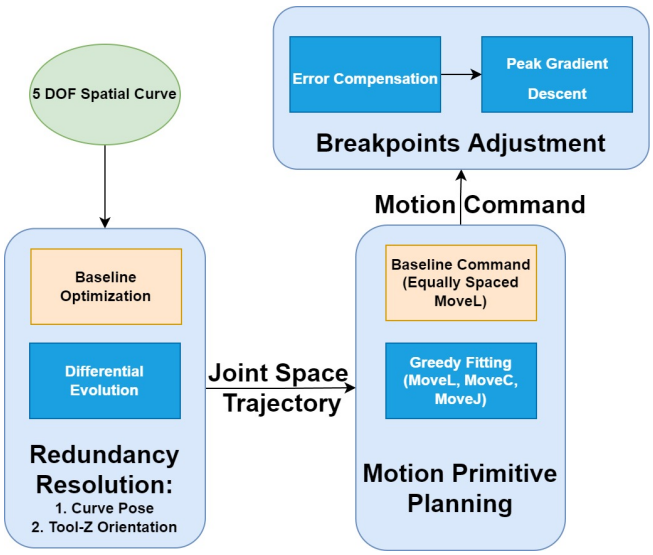



图 2：采用运动基元进行空间曲线跟踪的拟议工作流程。

### A. 冗余度解析

与计算机数控（CNC）机床不同，由于机器人关节约束（包括关节位置、速度和加速度限制），机器人位姿会显著影响 TCP 运动。机器人具有多个冗余自由度，可用于将机器人置于更有利的构型，同时不影响 TCP 运动：

- 工具方向：在轨迹的每个点处绕工具 $z$ 轴旋转。
- 曲线位姿：位置 $\mathbf{p}_{curve}$ 和方向 $\boldsymbol{\beta}_{curve}$ （6 自由度）。
- 机器人位姿：由于逆运动学映射不唯一，最多有八种关节配置可选。

我们的方法是，首先根据给定的曲线位姿和机器人位姿，求出完整的机器人关节路径，以此求解工具冗余自由度。在该关节路径的每个点上，我们可以根据关节速度限制和加速度限制求出路径速度限制。随后，我们选择曲线位姿和机器人位姿，使最低路径速度限制最大化。关节加速度限制由电机扭矩约束决定。由于机械臂惯性取决于构型，关节加速度限制也取决于构型（因此，伸展的机械臂加速度限制较低）。我们将通过仿真说明如何估算这一限制。

*1*）工具方向求解：对于给定的零件位置和方向（$\mathbf{p}_{curve}$, $\boldsymbol{\beta}_{curve}$）以及机器人位姿，我们在机器人基坐标系中有$\{\mathbf{p}_i^*, \mathbf{n}_i^*\}_{i=1}^K$，初始关节角为$\mathbf{q}_0$。我们选择冗余自由度，使 TCP运动保持在路径上，同时将关节运动的增量降至最低。由于关节运动与 TCP运动通过机械臂雅可比矩阵 $J(\mathbf{q})$相关，这一过程倾向于引导机器人避开奇异点，同时不影响 TCP跟踪。我们将增量优化表述为一个二次规划（QP）：给定$\mathbf{q}_{k-1}$, $k = 1, \ldots, K$，求出增量运动 $\delta q$，以移动到下一个点（$\mathbf{p}_k^*$, $\mathbf{n}_k^*$），同时避免关节运动过大并满足关节限位：

$$\begin{aligned} &\min_{\delta q} \left\| J_r(\mathbf{q}_{k-1})\delta q - \nu^* \right\|^2 + W_q \left\| \delta q \right\|^2 \\ &\text{subject to } q_{\min} \preccurlyeq \mathbf{q}_{k-1} + \delta q \preccurlyeq q_{\max} \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $(q_{min}, q_{max})$ 为关节限位，$W_q$ 为权重因子，$\nu^*$ 为 TCP 位置和表面法向量增量，$J_r$ 为将 $\delta q$ 映射到位置和表面法向量增量的降阶雅可比矩阵：

$$\nu^* := \begin{bmatrix} \mathbf{e_z}(\mathbf{q}_{k-1}) - \mathbf{n}_k^* \\ \mathbf{p}(\mathbf{q}_{k-1}) - \mathbf{p}_k^* \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$J_r(\mathbf{q}) := \begin{bmatrix} -\mathbf{e_z}(\mathbf{q})^\times & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} J(\mathbf{q}). \tag{3}$$

下一个关节位置只需在当前关节位置上加上 $\delta q$。由于雅可比映射对于有限增量只是近似的，我们通过写成 $\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_{k-1} + \alpha\delta q$ 来优化增量大小，并通过线搜索选择 $\alpha$：

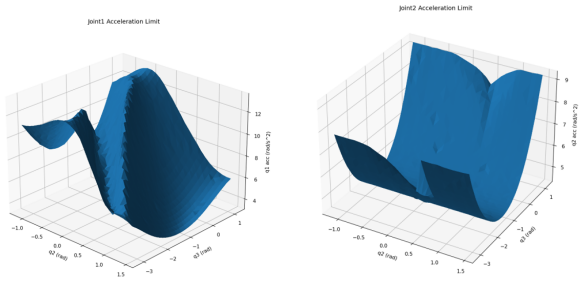
$$\min_{\alpha} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{e_z}(\mathbf{q}_k) - \mathbf{n}_k^* \\ \mathbf{p}(\mathbf{q}_k) - \mathbf{p}_k^* \end{bmatrix} \right\|.$$

所得关节角序列 $\{\mathbf{q}_k\}_{k=0}^K$ 现在可以完全确定工具中心点的位置和方向。

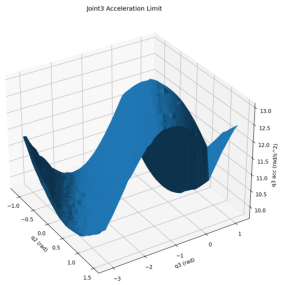
*2)* 轨迹遍历速度估计：机器人工具中心点的速度限制由其关节速度和加速度限制决定。工业机器人数据手册会提供关节速度限制 [23], ，但加速度限制取决于扭矩限制，因此会受到机器人动力学、负载和机器人构型的影响。由于工业机器人的动力学模型通常未知，我们使用供应商提供的动力学仿真（例如 ABB RobotStudio）进行粗略估计。由于机械臂惯性主要受肩关节和肘关节（关节 2 和 3）影响，我们假设球形腕关节（关节 4、5 和 6）具有恒定的关节加速度限制，而关节 1、2 和 3 的加速度限制取决于（$q_2, q_3$）。记录的结果如表 I 和图 3 所示。

| 关节 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\dot{q}_{max}\ (rad/s)$ | 1.745 | 1.571 | 1.571 | 3.316 | 2.443 | 3.316 |
| $\ddot{q}_{max}\ (rad/s^2)$ | * | * | * | 42.5 | 36.8 | 50.5 |

表 I：ABB IRB6640 关节速度和加速度限制。* = 取决于配置，见图 3。




(a) 关节 1　(b) 关节 2




(c) 关节3

图3：依赖于构型的关节加速度限制：记录关节1、2、3在不同关节2和3构型下的最大关节加速度。

关节加速度限制以依赖于（$q_2$，$q_3$）的查找表形式存储：$\ddot{\mathbf{q}}_{\max}(q_2, q_3)$。对于沿路径的每个机器人关节角点$\mathbf{q}_k$ （参见第 III-A.1 节），最大关节速度限制为

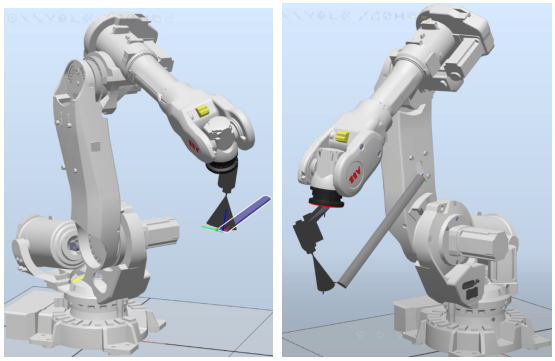
$$\dot{\mathbf{q}}_{\max_k} = \min\left(\dot{\mathbf{q}}_{\max}, \dot{\mathbf{q}}_{k-1} + \Delta t_k \ddot{\mathbf{q}}_{\max}(q_2, q_3)\right). \quad (4)$$

对于给定的（标量）路径速度 $v_d$，$\mathbf{p}_k = \mathbf{p}_{k-1} + v_d \Delta t_k$。因此，

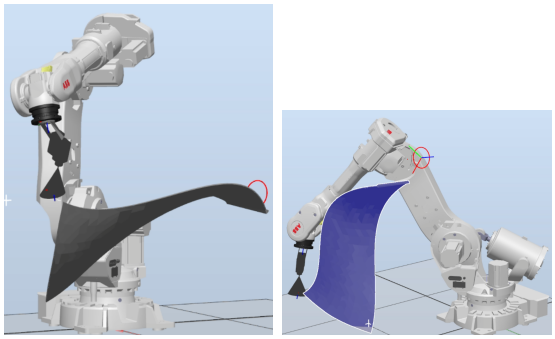
$$\Delta t_k = \frac{\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}}{v_d}. \quad (5)$$

因此，路径上点 $k$ 处的路径速度限制为

$$v_k = \left\| J(\mathbf{q}_k) \mathbf{q}_{\max_k} \right\|. \quad (6)$$



(a) 曲线1 基准位姿 (b) 曲线1 优化后位姿



(c) 曲线2 基准位姿 (d) 曲线2 优化后位姿

图 4：曲线1和曲线2（见第 IV-A 节）的基准曲线位姿（左）与优化后曲线位姿（右）

*3*）通过优化参数进行差分进化：路径速度限制由曲线位姿和机器人位姿参数化后，我们可以对其进行优化，以最大化最低速度限制：$(\min(\{\mathbf{v}_k\}_{k=0}^{K}))$ 可表示为

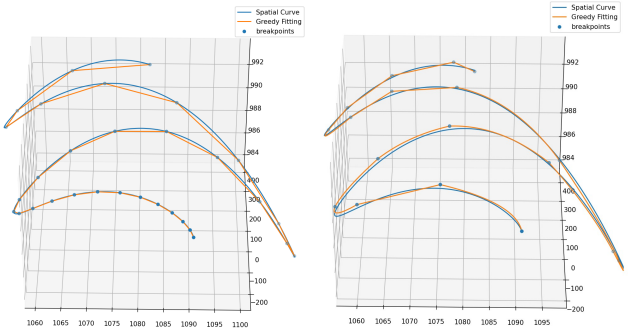
$$\max_{\mathbf{p}_{curve}, \boldsymbol{\beta}_{curve}, \mathbf{q}_0} \min_k v_k \quad (7)$$

其中 $v_k$ 由 (6) 给出。我们使用差分进化算法 [24] ，为两条示例曲线寻找全局优化解。优化后的位姿如图 4 所示，并与基线进行对比（见第 IV-B 节）。

### *B.* 采用贪心拟合的运动基元规划

现有的机器人CAD/CAM软件在给定空间曲线时仅使用 MoveL。为了利用 MoveC 和 MoveJ 的优势，我们开发了空间曲线（以关节空间和笛卡尔空间表示）贪心拟合方法。拟合过程沿轨迹依次进行，从初始点开始，通过二分搜索，在误差阈值内寻找尽可能长的基元类型。对于初始线段，所有回归均不受约束；后续序列则受到连续性约束（回归必须经过上一线段的端点）。图 5 展示了测试曲线上 30 个等间距 MoveL 指令与采用全部三种基元的贪心拟合的可视化结果。30 个线性线段会导致最大位置

跟踪误差达到 1.47 毫米，而贪心拟合仅使用 17 个线段，就能将最大位置跟踪误差控制在 0.3 毫米以下。




(a) 等间距的 MoveL　　(b) 贪心拟合

图 5：曲线拟合可视化。

### C. 路径点调整

基于运动基元执行机器人程序，可能会产生不符合性能规范的轨迹。我们可以使用下降算法迭代修改路径点，以减小轨迹跟踪误差。我们使用以下两种算法：

- 误差补偿：沿误差方向推动所有路径点。
- 基于多峰模型的梯度下降：使用近似轨迹计算数值梯度，并根据梯度下降调整路径点。为简化计算，我们仅对误差峰值处的点进行调整。

误差补偿在最初几次迭代中进行，旨在降低每个路径点处的跟踪误差，同时保持原有的运动基元选择：

$$\begin{bmatrix} {}^{bp\,j} \\ \boldsymbol{\beta}_{bp\,j} \end{bmatrix} = \mathbf{p}_{,,}\mathbf{p}_{,,}(\mathbf{p}_{,,}), \text{ 其 } \begin{bmatrix} {}^{bp\,j} \\ \boldsymbol{\beta}_{bp\,j} \end{bmatrix} + \gamma E \begin{bmatrix} {}^{b\,j} \\ \boldsymbol{\beta}_{bp\,j} \end{bmatrix} \qquad E \begin{bmatrix} {}^{bp\,j} \\ \boldsymbol{\beta}_{bp\,j} \end{bmatrix}$$

中 $(\mathbf{p}_{,,})$ 是 $j_{th}$ 路径点处的误差向量， $\gamma$ 为步长。

误差补偿步骤仅关注路径点处的误差，而路径点之间的跟踪误差可能大到无法接受。接下来，我们使用基于近似数值梯度的梯度下降方法，以减小最大的跟踪误差。对于给定的一组路径点，我们可以利用三次样条插值，高效地生成经过各路径点的预测关节轨迹。随后，可以通过扰动路径点并记录相应的跟踪误差，利用该预测轨迹求出数值梯度。由于轨迹误差主要受相邻路径点的影响，因此我们仅生成三对角梯度，并且只针对轨迹误差峰值进行计算。

## IV. 实现与评估

### A. 测试曲线

我们采用两条具有代表性的曲线。图 5 所示的曲线1是抛物面上的多频正弦曲线。这条曲线代表高曲率空间曲线。图 4 所示的曲线 2提取自通用风扇叶片模型的前缘，这是工业冷喷涂应用中的一个非典型案例。

### B. 基线

在咨询行业专家后，我们根据当前实践建立了基线性能。曲线位于机器人工作空间的中部，远离奇异点。通过选择沿曲线方向的工具 $x$ 轴来解决工具冗余。机器人位姿根据最大的可操作度指标来选择。运动基元基于间距相等的 MoveL 段。随后，我们搜索能够同时满足路径均匀性和轨迹跟踪约束的最大指令路径速度，将其作为基线性能。

### C. 仿真设置

RobotStudio [25] 是一款 ABB 机器人动力学仿真器，可提供接近真实的轨迹输出。我们通过 Python 接口 [26] 连接 RobotStudio 虚拟控制器，直接执行运动指令。为实现较高的恒定速度，我们相应地延长首条和末条指令轨迹：MoveL 和 MoveJ 分别在笛卡尔空间和关节空间中延长；MoveC 则沿圆弧延长，并在线性角度与乘积方向上延长。对于所有运动指令，我们先将混合区设为 10 毫米，再逐渐增大，直至速度曲线收敛，使机器人不会因混合而在路径点附近减速。

### D. 实验设置

图 6 展示了我们的实验设置，其中 ABB6640 机器人手持一把模拟喷枪。通过机器人控制器以 250Hz 记录关节轨迹 $\{\mathbf{q}_{exe,i}\}_{i=1}^{N}$。我们根据机器人的关节读数，通过正向运动学计算 TCP 位置和方向。为计算位置和姿态跟踪误差，对于每个记录的关节位置点$\mathbf{q}_{exe,i}$ ，我们计算

$$\mathbf{p}_{err,i} := \min_k \|\mathbf{p}(\mathbf{q}_{exe,i}) - \mathbf{p}_k^*\|, \tag{8}$$

$$\mathbf{n}_{err,i} := \min_k \arccos\left(\frac{\mathbf{e}_z^T(\mathbf{q}_{exe,i})\mathbf{n}_k^*}{\|\mathbf{e}_z(\mathbf{q}_{exe,i})\|\,\|\mathbf{n}_k^*\|}\right). \tag{9}$$

通过最大化 $i$ 上方的两个项，求得位置和姿态跟踪误差的最大值。

根据机器人手册，路径重复精度可达 1.06 毫米 [23]。为解决这一问题，对于每组基元指令，我们让机器人运行 5 次，并将记录的 5 条轨迹取插值平均值，作为执行轨迹。

### E. 结果

对于基线执行，为满足跟踪精度要求，我们对指令速度进行二分搜索，直至达到精度要求。对于优化轨迹，我们执行执行后优化，以降低跟踪误差，直至其收敛。如果仍未满足

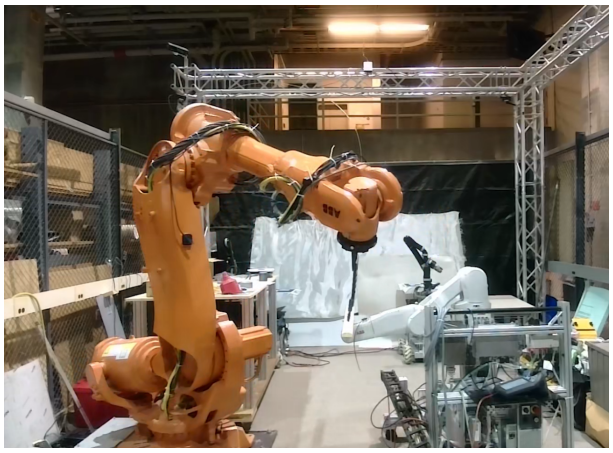


图 6：使用 ABB6640 机器人的实验设置

| 曲线1 | $max(\mathbf{p}_{err})$ mm | $max(\mathbf{n}_{err})$ ° | $\mu(v)$ mm/s | $\sigma(v)$ mm/s |
|---|---|---|---|---|
| 基线（仿真） | 0.49 | 0.18 | 124.01 | 1.02 |
| 基线（真实环境） | 0.46 | 0.21 | 103.11 | 0.85 |
| Bp调整（仿真） | 0.16 | 0.57 | 251.29 | 4.77 |
| Bp 调整（真实环境） | 0.38 | 0.56 | 248.77 | 4.33 |
| 优化（仿真） | 0.16 | 0.35 | 401.23 | 3.55 |
| 优化（真实环境） | 0.39 | 0.48 | 395.86 | 8.06 |
| 曲线2 | $max$（$\mathbf{p}_{err}$） mm | $max(\mathbf{n}_{err})$ ° | $\mu(v)$ mm/s | $\sigma(v)$ mm/s |
| 基线（仿真） | 0.42 | 0.26 | 406.10 | 0.92 |
| 基线（真实环境） | 0.47 | 0.28 | 299.97 | 2.36 |
| Bp调整（仿真） | 0.24 | 0.33 | 1089.64 | 51.88 |
| Bp 调整（真实环境） | 0.42 | 0.41 | 973.12 | 13.87 |
| 优化（仿真） | 0.44 | 0.67 | 1182.36 | 9.62 |
| 优化（真实环境） | 0.50 | 1.37 | 1101 | 13.58 |

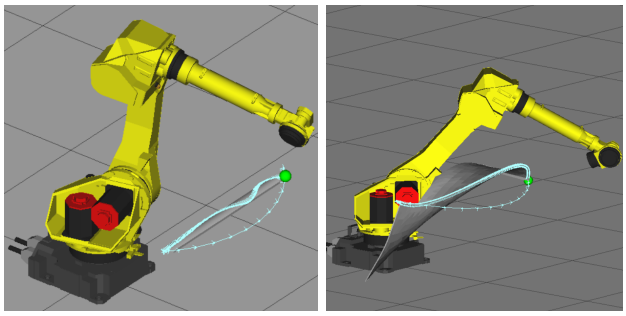
表二：RobotStudio 仿真与真实机器人实验的执行对比。

要求，我们会进一步降低指令速度，直至满足要求。

从基线结果可以看出，如果不进行任何优化，就必须降低速度以实现更高的精度。通过执行后优化简单地调整路径点，有助于提高遍历速度并减小跟踪误差。然而，在满足机器人关节速度和加速度约束的条件下优化所有冗余度，可以进一步提高遍历速度。最终优化结果显示，在跟踪精度满足要求的同时，曲线1的速度分别提高了 222%（仿真）和 283%（真实环境），曲线 2 的速度分别提高了 191%（仿真）和 267%（真实环境）。

### *F. FANUC*机器人实现

同一算法也通过 FANUC 机器人仿真程序 RoboGuide 应用于 FANUC M710iC-70机器人。结果如表三所示。在满足跟踪精度要求的同时，曲线1的速度提高了 323%，曲线2提高了 265%。这表明，该框架无需微调参数，便成功推广到了另一种机器人型号。



(a) 曲线1　　(b) 曲线 2

图7：RoboGuide中的FANUC M710iC-70机器人。

| 曲线1 | $max$(段落$_{err}$) mm | $max(\mathbf{n}_{err})$ ° | $\mu(v)$ mm/s | $\sigma(v)$ mm/s |
|---|---|---|---|---|
| 基线 | 0.48 | 1.93 | 98.78 | 1.02 |
| Bp 调整 | 0.25 | 1.82 | 319.31 | 7.77 |
| 曲线2 | $max$（$\mathbf{p}_{err}$） mm | $max$（$\mathbf{n}_{err}$） ° | $\mu(v)$ mm/s | $\sigma(v)$ mm/s |
| 基线 | 0.43 | 0.92 | 274.61 | 2.48 |
| Bp 调整 | 0.38 | 0.75 | 728.45 | 10.83 |

表二：RoboGuide 中的执行对比

## V. 结论与未来工作

我们提出了一套完整流程，用于生成工业机器人的运动基元指令，以高速、高精度跟踪高曲率空间曲线。当前的实验设置假定正向运动学已知且精确。未来，我们将考虑使用高精度扫描仪测量工具中心点的位置和方向的设置。此外，我们还将研究双臂配置下运动基元的优化，此时性能依据相对 TCP 坐标系进行评估。


## 致谢

本研究由 ARM 研究所项目 ARM-TEC-21-02-F-19 资助。作者谨向 Santiago Paternain 和 JonathanFried 致谢，感谢他们就该项目进行的宝贵讨论。


## 参考文献


[1] H. Chen、T. Fuhlbrigge 和 X. Li，“喷漆工艺的工业机器人自动路径规划：综述”，载于*2008 IEEE* 自动化科学与工程国际会议，2008 年，第 522–527 页。[2] X. Li、X. Li、S. S. Ge、M. O. Khyam 和 C. Luo，“自动焊缝跟踪与识别”，*IEEE*《工业电子学汇刊》，第 64 卷，第 9 期，第 7261–7271 页，2017 年。[3] S. Chen、Z. Wang、A. Chakraborty、M. Klecka、G. Saunders 和 J. Wen，“采用迭代学习运动与力控制的机器人深滚压”，*IEEE*《机器人与自动化快报》，第 5 卷，第 4 期，第 5581–5588 页，2020 年。[4] K. Ma、X. Wang 和 D. Shen，“具有恒定磨削力的机器人砂带磨削系统的设计与实验”，载于*2018* 年第 *25* 届机电一体化与机器视觉实践国际会议（*M2VIP*），2018 年，第 1–6 页。

[5] I. M. Nault、G. D. Ferguson 和 A. T. Nardi，“冷喷涂增材制造的多轴刀具路径优化与沉积建模”，《增材制造》，第 38 卷，文章编号 101779，2021 年。[在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420311519[6] Motoman, Incorporated，*Inform II* 用户手册。[7] ABB Robotics，*RAPID* 指令、函数和数据类型技术参考手册。[8] FANUC Robotics America, Inc.，*FANUC*机器人 *SYSTEM R-J3iB* 控制器 *KAREL* 参考手册。[9] Adept Technology, Inc.，*V+* 语言用户指南。[10] Staubli Faverges，*VAL3* 参考手册*V+* 语言用户指南。[11] KUKA Roboter GmbH，*SOFTWARE KR C1 / KR C2 / KR C3* 参考指南。[12] Yaskawa America, Inc.，*MotoPlus SDK*，2022 年。[在线]。可访问：https://www.motoman.com/en-us/products/software/development/motoplus-sdk[13] ABB Robotics，外部引导运动应用手册。[14] Staubli Faverges，适用于所有控制系统的开放接口。 [在线]。可访问：https://www.staubli.com/en-us/robotics/emo2-019/openinterface-to-all-controlsystems[15] M. Sch¨opfer、F. Schmidt、M. Pardowitz 和 H. Ritter，“用于 KUKA 轻型机器人的开源实时控制软件”，载于*2010* 年第 *8* 届2010 年世界智能控制与自动化大会，第 444–449 页。[16] RoboDK Inc.，模拟机器人应用：为任意工业机器人编程搭配单一仿真环境的机器人。 [在线]. 可访问：https://www.robodk.com[17] ——，使用 *RoboDK* 进行机器人加工.[18] Hypertherm, Inc.，*RobotMaster*：机器人计算机辅助设计/计算机辅助制造（离线编程）. [在线]. 可访问：https://www.robotmaster.com,[19] OCTOPUZ，*RobotMaster*：机器人计算机辅助设计/计算机辅助制造（离线编程）. [在线]. 可访问：https://www.octopuz.com/,[20] ROS-Industrial，“Tesseract”，2022 年。 [在线]. 可访问：https://github.com/tesseract-robotics/tesseract[21] J. Schulman 和机器人学习实验室，“trajopt：用于运动规划的轨迹优化”，2013 年。 [在线]. 可访问：https://rll.berkeley.edu/trajopt/doc/sphinx build/html/[22]K. Min、C.-H. Lee、C. Yan、W. Fan 和 P. Hu，“五轴刀具路径的六维 B 样条拟合方法”，《国际先进制造技术杂志》，第 107 卷，第 5 期，第 2041–2054 页，2020 年 3 月。 [在线]. 可访问：https://doi.org/10.1007/s00170-020-05139-7[23] ABB Robotics，*IRB 6640* 产品规格.[24] R. Storn 和 K. Price，“差分进化——一种简单高效的启发式算法，用于连续空间的全局优化”，《全球优化杂志》，第 11 卷，第 4 期，第 341–359 页，1997 年 12 月。[在线]. 可访问：https://doi.org/10.1023/A:1008202821328[25] ABB Robotics，*RobotStudio* 操作手册.[26] J. Wason，“ABB 运动程序执行”，2022 年。 [在线]. 可访问：https://github.com/johnwason/abb motion program exec