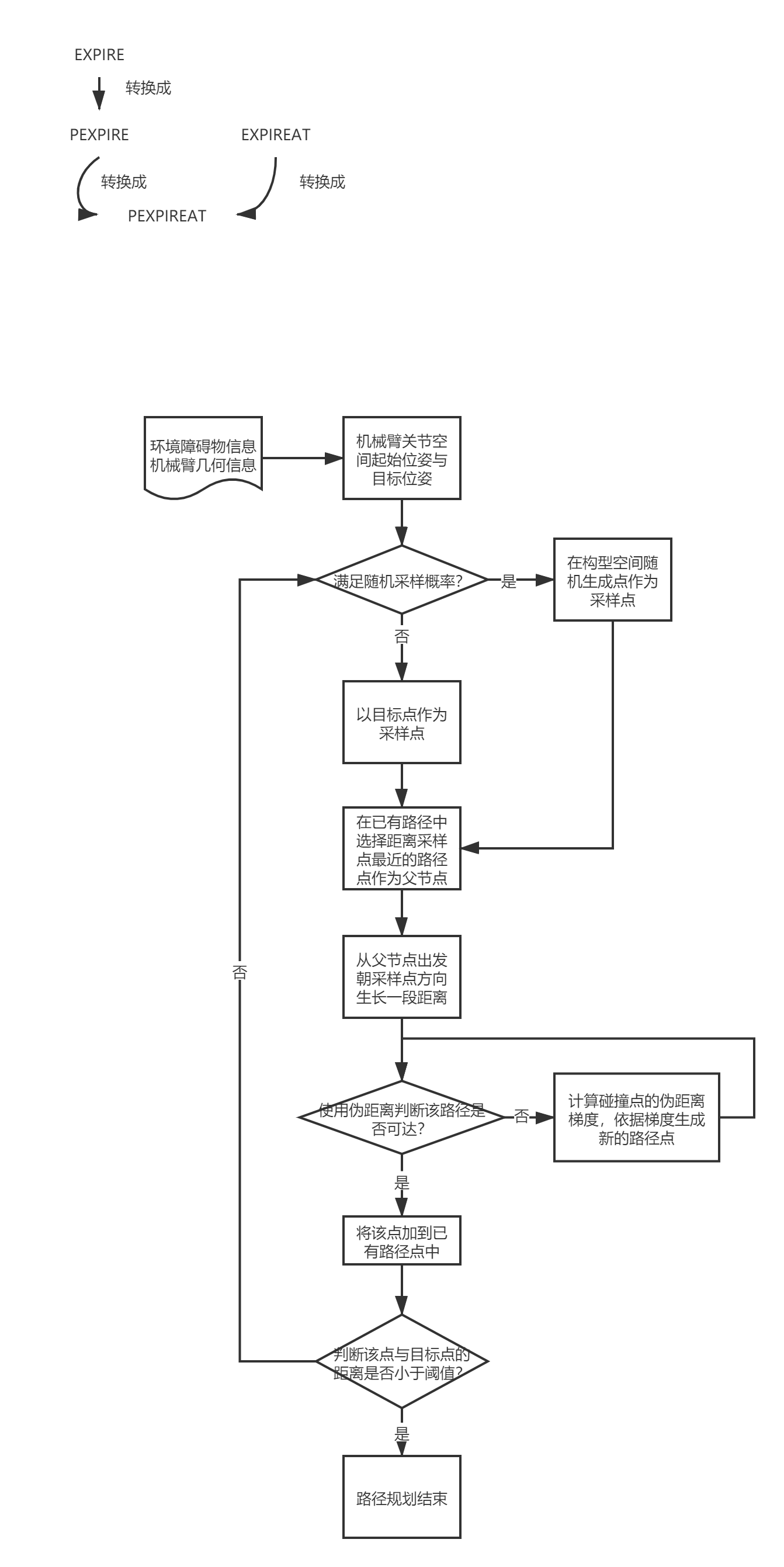
**说 明 书 摘 要**

本发明提供了一种基于伪距离函数的工业机器人路径规划方法。通过凸多面体对机械臂连杆以及工作环境障碍物进行包络，并记录下凸多面体的顶点。以传统RRT（Rapid-explosion Random Tree）算法为基础在机器人的关节空间进行路径规划。首先确定路径的起点与终点，然后以一定的概率选择关节空间中的随机点或者终点作为采样点，在原有的路径点中选择与采样点最近的一点为父节点，并朝采样点方向生长一段距离生成新的路径点；将父节点与新路径点之间的路径离散化，利用机械臂的运动学方程将关节空间的关节参数映射成工作空间几何外形，使用GJK算法判断机械臂是否与环境障碍物发生碰撞，如果发生碰撞则计算碰撞点的伪距离对各关节参数的梯度，将碰撞点沿梯度方向做出修正作为新的路径点。该算法与传统RRT相比生成的路径更优，鲁棒性更好，在障碍物较多或存在狭窄通道的环境下优势更加明显。

**摘 要 附 图**



**权 利 要 求 书**

1. 一种基于伪距离的路径规划方法，包括如下步骤：

步骤1：用凸多面体对障碍物以及机械臂进行包络；

步骤2：输入起始点关节构型以及目标点关节构型；

步骤3：以一定概率生成随机点或者以目标点作为采样点，选择已有路径点中与采样点最近的点作为父节点沿采样点方向生长一段距离产生新的路径点；

步骤4：把父节点与新路径点之间的路径离散化，通过机械臂的运动学方程把机械臂关节空间的关节参数映射成机械臂工作空间的几何外形；使用GJK算法判断机械臂是否与环境障碍物发成了碰撞；

步骤5：如果发生了碰撞在碰撞点计算伪距离对机械臂各个关节的梯度，将碰撞点沿着梯度方向进行修正；如果没有发生碰撞，将该点加入到已有路径中；

步骤6：判断新路径点与目标点的距离是否小于设定阈值，如果小于则路径生成完毕，否则返回步骤3；

2、根据权利要求1所述的基于伪距离函数的工业机器人路径规划方法，其特征在于使用凸多面体对障碍物以及机械臂进行包络，将机械臂的几何外形以及环境中障碍物以凸多面体顶点的形式记录下来。

3、根据权利要求1所述的基于伪距离函数的工业机器人路径规划方法，其特征在于步骤5中如果新路径点与父节点之间的路径发生碰撞，则通过伪距离计算发生碰撞的机械臂连杆与障碍物之间的浸入距离，并计算碰撞点伪距离关于机械臂各个关节参数的梯度，将碰撞点沿梯度方向做出调整生成新的路径点。

**说 明 书**

基于伪距离函数的工业机器人路径规划方法

**技术领域**

本发明涉及一种基于伪距离的工业机器人路径规划方法，用于在离线编程环境下，给定机械臂起始、终止位姿以及环境障碍物，快速生成一系列关节空间的位姿点，构成一条无碰撞路径。

**背景技术**

相对于多轴数控机床，机器人具有成本低、柔性好和工作空间大等优势，为大型复杂零件的制造提供了新的思路。将工业机器人的应用范围从简单的重复性任务扩展到高精度的铣削加工领域，对制造行业具有重要意义。

缺乏标准的后处理软件是开展高精度机器人加工的一个主要障碍。在铣削应用中，机器人的运动路径通常从商业CAM软件的五轴铣削模块生成的刀位文件转化而来。但是，一个标准的工业机器人有六个自由度，典型的铣削任务只需要五个自由度（其中的三个用于定位刀尖点的位置，两个用于确定刀轴的方向），使用六轴工业机器人开展五轴铣削任务将造成一个冗余的自由度，因而有必要对该冗余自由度进行优化以确定唯一的机器人路径。

对现有的技术进行检索发现，很多研究机构和学者从机器人的灵巧性、关节极限和传动比等因素出发，提出了一系列的铣削机器人位姿优化的指标和算法。这些指标和算法均聚焦于提升机器人的运动学或动力学性能，而忽略了由于机器人弱刚性造成的被加工工件质量差这一问题。

**发明内容**

针对现有技术的不足，本发明提供了一种机器人位姿优化方法，可消除其冗余自由度，实现机器人铣削路径的离线生成，提高工件的加工质量。该方法适用于标准的商用六轴工业机器人的铣削加工。

为实现这一目的，本发明在读取商用CAM软件生成的离散刀位文件后，在每一个刀位点建立以机器人整体刚度性能指标最大化为目标、以机器人关节极限、灵巧性和路径光顺性为约束、以冗余欧拉角为优化变量的一维机器人位姿优化模型，使用离散搜索算法求解该模型，获取最优的机器人位姿。最后输出对应机器人系统的可执行代码。

所述刀位文件，包含刀尖点位置、刀轴方向以及加工工艺信息，一般可由通用的CAM软件如UG生成；

所述机器人整体刚度性能指标，在铣削刀具上选取一系列特征点，根据特征点受力变形的平方和来估计机器人的整体刚度，它的几何含义是刀尖点在受到大小相同、方向不同的力时，特征点变形平方和最大值的倒数，它具有坐标不变性。整体刚度性能指标的定义如下：



式中，  表示指标值，  表示矩阵的最大特征值， 。 是柔度矩阵，其中  是雅克比矩阵，  表示机器人各旋转关节的旋转刚度。 ，其中  是指刀具坐标系原点指向第  个特征点的向量，  是  的反对称阵，即 。上述所有向量均在工件坐标系中描述。

所述机器人位姿优化模型在第  个刀位点的表达式如下：



式中，下标  表示第  个刀位点，  表示冗余的欧拉角， 表示各机器人各关节转角，  表示解析的机器人运动学逆解。  和  表示机器人各关节转角下界和上界，  表示机器人各关节角速度的最大值，  和  为用户指定的参数。不等式 ，  和  分别描述了机器人关节极限约束、路径光顺约束和机器人灵巧性约束。

所述离散搜索算法，将  在  之间  等分，对于， ，计算其所有可行的运动学逆解（最多8组），将满足约束条件的逆解取出以计算整体刚度性能指标值，保留使得指标值最大的运动学逆解，若它优于当前最优解，则替代之，直到遍历所有的。最终输出第  个刀位点下的最优机器人位姿。

所述机器人可执行代码，为对应机器人系统的编程语言，如Motoman 机器人的JOB文件。

**附图说明**

通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述，本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显：

图1为本发明流程。

图2为一条五轴数控铣削加工路径。

图3为工件坐标系与刀具坐标系的关系。

图4为离散搜索算法流程图。

图5为优化后机器人关节角度变化。

**具体实施方式**

下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明，但不以任何形式限制本发明。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

以下结合附图对本发明的实施详细说明，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

如图1所示，本实施例的具体流程包括：首先，从商用CAM软件生成的刀位文件中读取刀位信息。然后，针对第  个刀位点，以机器人整体刚度性能最优为目标，以机器人关节极限、路径光顺性和机器人灵巧性为约束，建立机器人位姿优化模型。最后，使用离散搜索算法求解该模型，获取机器人在第  个刀位点的最优位姿。重复这一过程，直到遍历所有的刀位点，最终输出对应机器人系统的可执行文件。

在以下实施例中，以UG软件CAM模块生成的一条五轴数控铣削加工路径（图2）为例，使用本发明提出的方法，进行机器人位姿优化。具体步骤如下：

1） 读取刀位文件，计算机器人末端刀具可行位姿

离散刀位点可以表示为集合形式，其中第  个刀位点  的前三个分量表示刀尖点在工件坐标系中的坐标，后三个分量表示刀具轴线方向在工件坐标系中的坐标。设在第  个刀位点，刀具坐标系与工件坐标系的位姿如图3所示，图中工件坐标系到刀具坐标系的变换矩阵可表示为一个六维向量  的函数，其中 ，  和  表示z-y-z型欧拉角，即

****

式中， 和  分别表示旋转和平移变换。给定刀位点，可确定的值，其中：



2） 建立一维机器人位姿优化模型

据前述，  取值任意，可结合机器人运动学逆解，建立如下只与欧拉角  相关的机器人位姿优化的一维模型：



式中，整体刚度性能指标  的计算公式为



3） 离散搜索算法求解一维优化模型

如图4离散搜索算法流程图所示，将  在  之间  等分，对于， ，计算其所有可行的运动学逆解 ，将满足约束条件的逆解取出以计算整体刚度性能指标值 ，保留使得指标值最大的运动学逆解，若它优于当前最优解 ，则替代之，直到遍历所有的。最终输出第  个刀位点下的最优机器人位姿 。

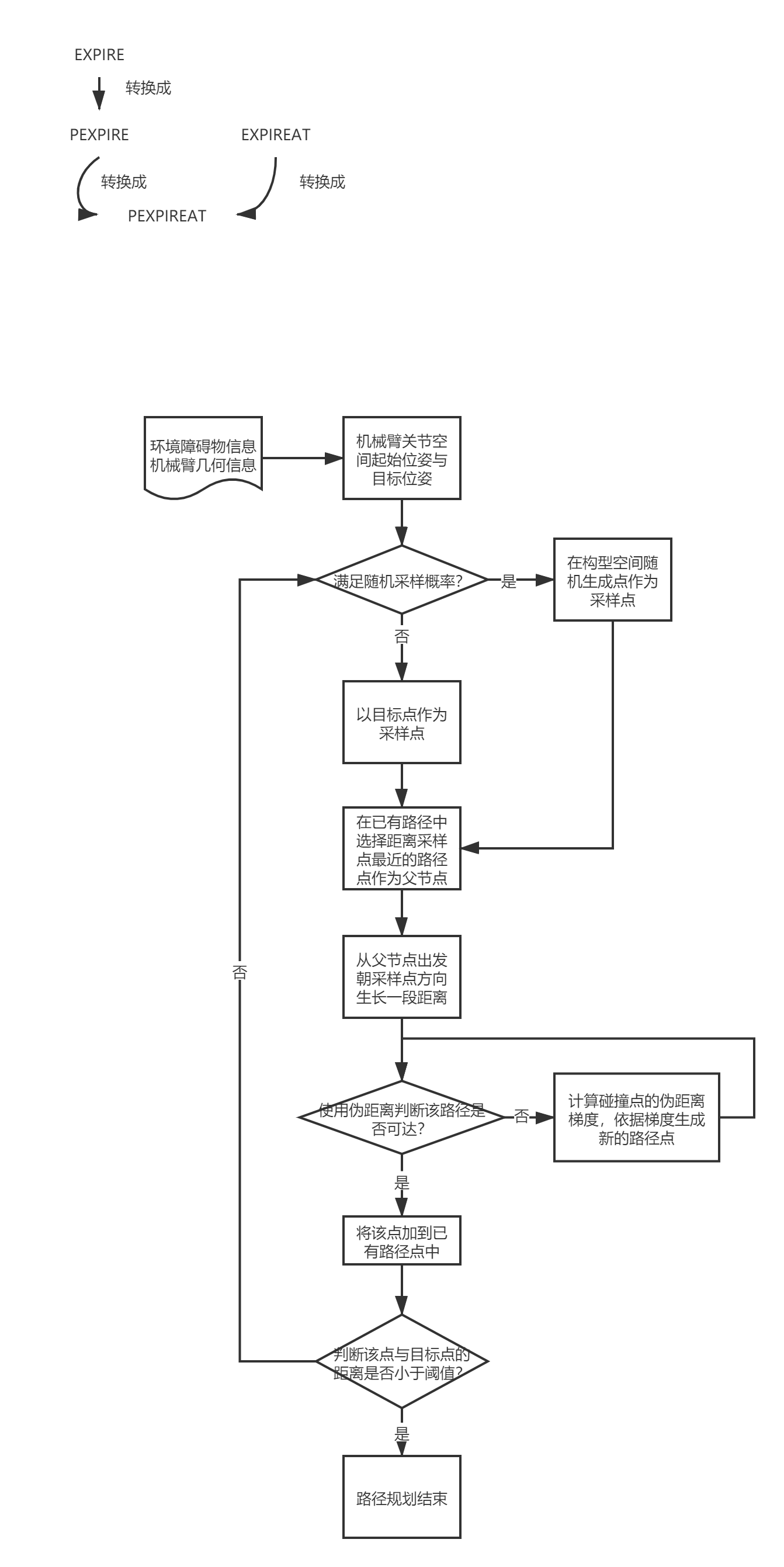
4） 重复前述过程，遍历所有的刀位点

5） 实验结果

如图5优化后机器人各关节角度变化所示，针对图1所示的刀位信息，本发明成功优化出对应的机器人位姿，据此可转化为对应的机器人可执行文件，如Motoman机器人的JOB文件。使用该机器人路径开展铣削加工，可使得工业机器人具有较高的整体刚度性能，从而提高加工精度。

以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是，本发明并不局限于上述特定实施方式，本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改，这并不影响本发明的实质内容。

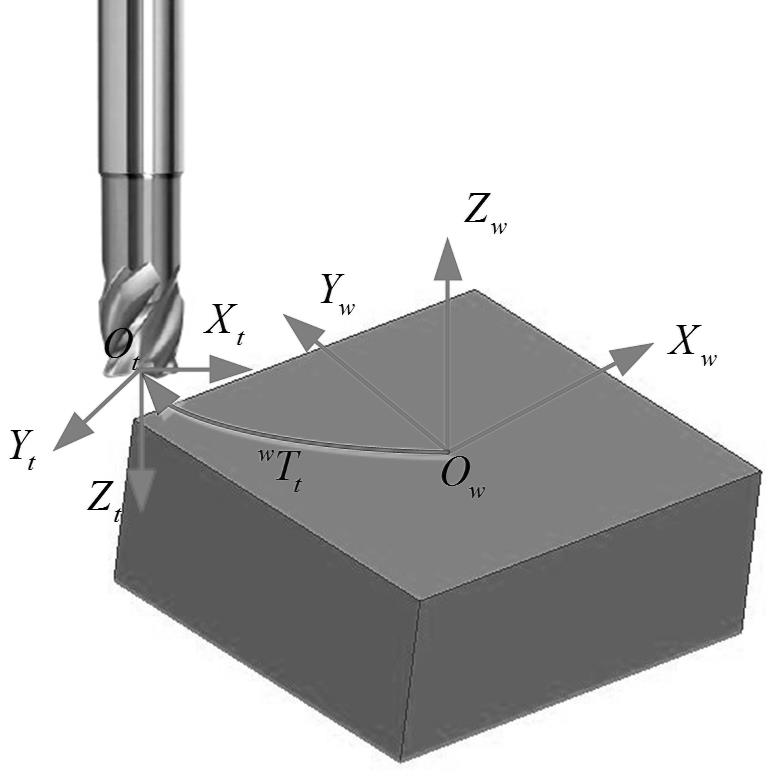
**说 明 书 附 图**



**图 1**



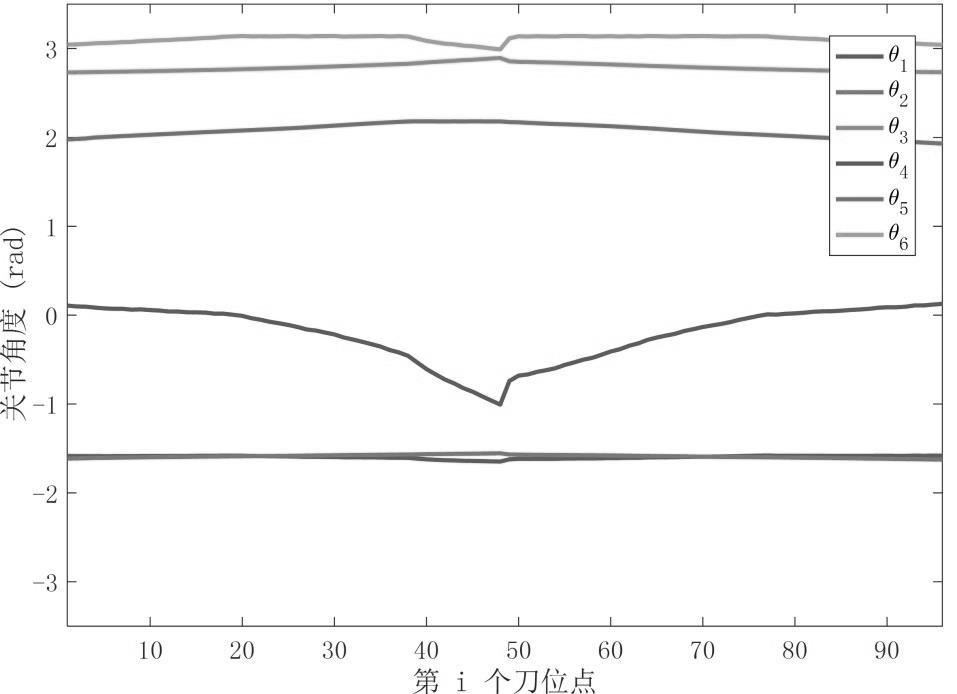
**图 2**



**图 3**



**图 4**



**图 5**