机器学习算法原理

李广创

目 录

[目 录 II](#_Toc10039859)

[第一章 绪论 3](#_Toc10039860)

[1.1 研究背景及意义 3](#_Toc10039861)

[1.2 国内外研究现状 4](#_Toc10039862)

[1.2.1 避障路径规划 4](#_Toc10039863)

[1.2.2 位姿规划 6](#_Toc10039864)

[第二章 焊接机械臂运动学建模 8](#_Toc10039865)

[2.1 空间运动的数学基础 9](#_Toc10039866)

[2.1.1 刚体的位姿描述 9](#_Toc10039867)

[2.1.2 齐次变换 10](#_Toc10039868)

[2.2 焊接机械臂运动学分析 12](#_Toc10039869)

[2.2.1 DH坐标系 12](#_Toc10039870)

[2.2.2 正运动学分析 14](#_Toc10039871)

[2.2.3 逆运动学分析 16](#_Toc10039872)

[2.3 本章小结 19](#_Toc10039873)

1. 绪论
   1. 研究背景及意义

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置。根据国际标准化组织（ISO）的定义，它是一种多用途的、可重复编程的自动控制操作机（Manipulator），具有三个或更多可编程的轴，模仿人类手臂的功能来完成各种自动化作业。为了适应不同的用途，机器人最后一个轴的机械接口，通常是一个连接法兰，可接装不同工具或称末端执行器。它综合了机械工程、电子工程、计算机技术、自动控制技术以及人工智能的最新成果，是机电一体化技术的典型代表。工业机器人在经历了诞生、成长、成熟后，成为制造业中必不可少的核心装备。机器人技术的高速发展，已经对改善生产环境、提高人民生活质量乃至促进整个国民经济的发展起到了不可替代的作用。

工业制造领域中应用最广泛的机器人是焊接机器人，从2017年的数据来看，焊接机器人在所有工业机器人的使用占比中超过30%。焊接机器人主要包括机器人和焊接设备两部分。机器人由机器人本体和控制柜（硬件及软件）组成。而焊接装备，以弧焊及点焊为例，则由焊接电源，（包括其控制系统）、送丝机（弧焊）、焊枪（钳）等部分组成[1]。

目前，焊接机器人工作方式一般采用人工示教的方式进行，也即操控者利用示教器人工规划出一条路径进行程序存储，工作时再将这些程序进行复现，如此便能实现高精度的重复作业。这种方式有着明显的缺点：1）示教编程的过程繁琐，往往需要有经验的工人不断地反复调整，才能示教出一条满意的运动路径。2）由于焊接现场的工作环境恶劣，工人长期在这种环境下工作会严重地影响身体健康。3）示教程序不具备可移植性，当机器人工作的环境发生变化时，例如：工作环境中出现了新的障碍物，则需要人工重新示教规划出一条合理的路径。由于人工示教规划路径的缺点，使得焊接作业的周期延长，生产成本大大提高，而且难以满足小批量定制化的市场需求。因此，目前急需焊接机器人具备智能运动规划的能力。

本文通过研究焊接机器人的避障路径规划和焊接位姿规划，使机器人能自动地根据环境信息避开障碍物到达焊接的起点，然后根据焊缝的坐标信息实现正确的位置插补，并自动求解最优姿态。通过这种方法可以有效避免人工示教规划路径所带来的问题，对实现机器人的智能焊接有较大的现实意义。

* 1. 国内外研究现状
     1. 避障路径规划

工业焊接机械臂实现智能焊接的一个关键问题是避障路径规划，也即机械臂在有障碍物约束的环境下，能够自主地从当前位姿快速无碰撞地运动到给定的焊接起始位姿，这个过程可以定义为路径规划问题。

路径规划是指给定起始位置和终点位置，在机器人的工作空间中寻找到一条符合一定约束的路径，如：无碰撞，路径最短等。具体的案例可以是为移动机器人规划出到达指定地点的最短路径，或者是为机械臂规划出一条无碰撞的运动轨迹，从而实现物体抓取等。目前空间机械臂避障路径规划的方法一般有人工势场法，A\*算法，遗传算法，PRM算法，RRT算法等。

人工势场法最先由khatib[2]年提出，该算法的原理是在空间中加入虚拟的力场，其中障碍物产生斥力场，而目标产生引力场，机器人在两个力场的作用下产生运动，其求解的方法通常采用梯度下降法[3,4,5]。该方法的优点是计算量相对较小，容易做到实时避障，人工势场法的缺点是，容易产生局部极小值，当机器人在某个位置引力场和斥力场达到均衡时，机器人不能再朝向目标点运动。针对这些问题，谢龙[6]提出在避障的问题上引入了动力学定律，将引力场作用于机械臂末端和斥力作用于机械臂与障碍物的最近点，能够使得机械臂实现动态避障.罗天洪[7]等人在传统引力斥力场的基础上，加入斥力场扰动机制来调整斥力场的影响方式，从而有效地避免传统人工势场法中陷入局部极小的问题。

A\*算法是一个启发式搜索算法，在每一个可达的位置设置一个路径增量，路径增量的计算由两部分构成，一是从起点到当前点的路径长度，另一个是从当前点到终点的估算路径。机器人从起点一直朝着路径增量最少的相邻点移动，直到到达终点。Cohen B J[8]和Cohen[9]采用A\*算法分别对7自由度单臂和双臂机器人进行运动规划。汪首坤[10]等人将变步长分段搜索的方法引进A\*算法中，用于解决传统方法上可能出现的搜索数据量大和搜索死循环的问题。赵金龙[11]，宗成星[12]等人采用A\*算法在机械臂的工作空间中规划处一条可行路径，然后采用三次样条插值函数进行路径的平滑。贾庆轩[13]等人根据机械臂的几何特性分析出机械臂与障碍物发生碰撞的极限条件，然后在此基础上使用A\*算法进行避障路径规划。

遗传算法最先由J.Holland年提出，它是对生物进化论的自然选择过程进行模拟，其基本原理是将求解的问题视为一个种群，在种群内对染色体进行选择、交叉和变异的操作，是一种应用广泛的求最优解的方法。Machmudah[14]以采用六次样条曲线进行关节空间的插值，并且采用遗传算法和粒子群算法以时间最优和避障为约束规划出最优轨迹。张智[15]等人提出凸多面体集模型进行快速碰撞检测，在规划算法方面采用遗传算法计算关节空间中的N个插值点形成可达路径。祁若龙[16]，汪明辉[17]等人内插中间点的方式，采用遗传算法优化这些中间的在关节空间的速度、加速度，使得机械臂满足避障的要求下，同时满足机械臂运行的平滑。

概率路标法（PRM）[18]是一种基于随机采样的方法，它的规划过程分两步，首先在空间中以采样的方式构建可连接的无碰撞地图（采样阶段），然后在地图中查询最短路径（查询阶段）；采样阶段在空间中随机产生N个无碰撞点，然后将每个采样点与其周围的K个点进行无碰撞连接便完成了地图的构件，在该无碰撞的联通地图中使用诸如A\*等算法查找一条无碰撞路径，该方法是概率完备但不是最优的，对于规划路径非最优的问题，许多研究者对算法进行了优化，提出诸如PRM\*等算法。使用随机采样的方法可以有效避免栅格法在高维规划问题上建图慢、存储数据过大的问题

快速扩展随机树（RRT）算法最先由Lavalle[19]提出，也是属于随机采样算法的一种，它的基本原理是以起始点为根节点建立一棵随机搜索树，通过在状态空间中进行随机采样，然后沿着采样点的方向上产生新节点，如果在扩展过程中该节点没有与障碍物发生碰撞，则将该节点加入到树中，直到新加入的节点到达目标点则完成树的构建，从目标点反向查询便可得到可达路径，RRT算法是概率完备但不是最优的。该方法的优点是不需要对障碍物进行精确建模，因此很合适与高维空间的机械臂路径规划，其缺点是在高维空间中进行随机采样导致效率较低。

针对这些问题，JJ Kuffner和SMLavall[20]提出了双向RRT算法（RRT-connect），该算法同时在初始点和目标点建立随机搜索树，一棵树进行随机搜索产生新节点，另一棵树对新节点进行启发式的连接。通过这种方式可以较大程度地减少计算量。Karaman和Frazzoli[21]提出RRT\*算法，该算法计算每个新加入节点的代价，并且根据代价选择节点的连接和进行节点的重构，该算法被证明是渐进最优的。Kim[22]等人针对空间7自由度机械臂的避障问题，将无遮挡和无冲突约束策略引进RRT，提高了其避障性能。Xie B[23]提出嵌套的RRT算法，将一种RRT算法嵌套与另一种RRT算法中，可以用于解决运动规划的容错问题。Stilman[24]研究了受约束的关节空间的采样方法，提出了切空间采样和一阶收缩采样。曹毅[25]等人针对空间串联机械臂提出了一种窗口RRT算法，在算法中引入了平面墙和窗口函数用于解决树的扩展分支过多，随机性强的问题。阳涵疆[26]等人将RRT算法应用于串并联混合的机械臂中，先后搜寻串并联机械臂的无碰撞路径，然后将两个搜索的路径结合生成最终的路径。Keselman[27]提出Forage-RRT算法，该算法先采用大步长搜索构建路径树并从中选出最优节点，然后以此为出发点采用小步长搜索目标点。张云峰[28]在RRT的生长中引入偏置和贪婪策略从而加快随机树的生长，并且采用GPP法删除多余节点。

* + 1. 位姿规划

当机械臂无碰撞地运行到焊接的起始位姿后，需要沿着给定的焊接路径进行焊接，这个过程需要对机械臂的末端执行器（焊枪）进行位姿规划。焊枪的位姿变化和速度波动对工件的焊接质量有着重要的影响，可能会造成焊接的不均匀，而且较大的速度波动可能会对机械臂本身造成一定的冲击。本文对焊接机械臂的位姿规划算法进行研究。

位姿规划也称为笛卡尔空间轨迹规划，轨迹规划按照规划的空间可以分为笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划，针对点到点的运动（Point to Point，PTP），一般采用关节空间轨迹规划即可，例如：搬运，抓取等。关节空间的轨迹规划一般以关节的平滑性、时间最优、能量最优、冲击最优[29,30,31]为研究目标，由于规划的结果是关节角度与时间的关系，可以直接进行等时插补后发送给电机进行运动控制，不需要求解逆运动，因此计算量相对小，但是末端轨迹具有不确定性。

对于有连续路径要求的任务（Continuous Path，CP），则必须在笛卡尔空间进行轨迹规划，例如：弧焊，喷涂等。笛卡尔空间的轨迹规划是针对末端执行器进行规划，规划的结果是位置和姿态与时间的关系，对位姿进行等时插补后，还需要将结果进行逆运动求解才能进行关节的控制，计算量相对较大。

机器人在笛卡尔空间下的规划一般分为位置规划和姿态规划，同时需要保持规划的轨迹在速度上连续平滑。对于位置规划，直线轨迹规划和圆弧轨迹规划是最基础的规划方法，许多复杂的运动轨迹都可以用这两种规划方法进行拟合。很多学者在此基础规划上做进一步的研究，李振娜[32]等人针对直线和圆弧规划中路径长度约束的问题，提出将S形速度曲线进行分段，根据给定的路径长度自动地选择合适的速度曲线进行轨迹插补。沈雅琼[33]等人针对直线和圆弧位姿插补的过程中容易引起奇异点的问题，通过引入关节属性判断插补的轨迹是否经过奇异点，从而有效地克服奇异性和欧拉角带来的问题。对于直线-直线、直线-圆弧的过渡优化问题，文献[34,35]采用三次样条曲线进行过渡，避免了机器人在不同轨迹的连接处频繁地启停。对于任务要求更高的规划场景中，需要采用更加复杂的自由曲线进行位置的拟合。空间曲线一般采用样条曲线进行描述，例如B样条曲线以及进一步扩展的NURBS曲线。李宏胜[36]等人采用NURBS来拟合工作空间中的自由曲线，并且结合正弦速度曲线进行轨迹生成。李林峰[37]针对直线和圆弧规划中精度不足的问题，提出采用三次均匀B样条曲线进行拟合。文献[38,39]给出了根据中间插值点来反求B样条曲线控制点的方法。

在笛卡尔空间中描述姿态的方法比描述位置的方法要复杂许多，姿态的描述方法一般有旋转矩阵、欧拉角、轴/角以及单位四元数，对于工业机器人来说，任何描述姿态的方法最终都要转化为旋转矩阵进行计算。早期的工业机器人采用欧拉角进行姿态规划，但欧拉角存在万向死锁已经插补速度非线性的问题，在高精度的机械臂上已经很少使用，单位四元数可以视为对轴/角描述的归一化，由于其不存在奇异值以及插值角与姿态存在线性的关系，在机器人姿态规划中应用较广泛。季晨[40]采用单位四元数通过在单位球面上构造三次B样条曲线的方式实现多姿态插补中保持良好的光滑性。乔正[41]等人采用单位四元数描述姿态，并采用梯形速度规划和三次B样条曲线插值得到连续平滑的运动曲线。李宏胜[42]基于正弦加速度曲线并采用单位球面线性插值来进行圆弧轨迹的位姿规划。

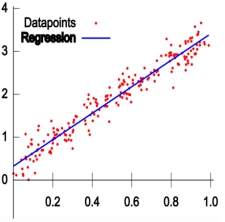
综上可知，在机器人的避障规划方面，经过国内外大量学者的研究，机械臂的避障路径规划问题已经有了较为成熟的方案，但在实际的使用场景中，需要考虑规划的实时性，在障碍物较多的环境下依然存在规划速度慢、成功率不高、规划出路径代不是最优等问题。而在位姿规划方面，单纯的位置规划比较成熟，一般是在直线、圆弧、曲线等插值方法的基础上引入加减速控制策略，使得规划出的运动轨迹连续平滑。但在焊接过程中也需要进行姿态规划，使得焊接的过程避免碰撞，同时综合焊接质量和关节转动的平滑性得到最优姿态，这方面的研究较少。

1. 线性回归与逻辑回归
   1. 线性回归

线性回归的思想是：线性回归的模型假设非常简单直观，它想用一条直线或一个超平面来拟合所有的样本点。因此，属于线性模型。（当然也可以理解为每个特征的线性组合）

* + 1. 模型的公式

其中表示参数向量；表示特征向量。



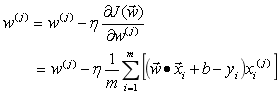
* + 1. 损失函数

很多机器学习问题都可以转化为对一个目标函数进行优化的问题，这里的目标函数称为损失函数，每个样本的预测值与真实值比较，都存在一个偏差，线性回归中，假设每个样本的损失是偏差的平方，所有样本的损失累加起来就是整个模型的损失；这种损失称为均方差损失（RMSE），具体的公式为：

* + 1. 参数求解

确定了需要优化的目标函数以后，模型的训练过程就变成纯粹的函数优化问题，我们希望调节参数C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps6.png，使得上述目标函数的值最小，也即总体样本的损失之和最小；因此可以运用梯度下降法，牛顿法，拟牛顿法等来求解；下面只介绍梯度下降法求解参数的过程：

1. 随机初始化所有参数C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps7.png,C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps8.png
2. 对于每个参数C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps9.png，执行下面的公式，每一轮迭代将所有的C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps10.png都进行更新！



1. 如果每个参数的更新值都小于C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps12.png，则算法结束，否则继续执行2）。

ggg

* + 1. 线性回归的正则化

在优化损失函数的时候，为了防止模型过分拟合，可以在损失函数后面加上正则化项；常见的正则化项有L1、L2正则化。

* L1正则化为：

C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps13.png

带L1正则化的线性回归也称为Lasso回归，Lasso回归除了能减缓过拟合外，还具有特征选择的功能，因为它在做优化的时候，很容易使某些不重要特征的权重为0。

* L2正则化为：

C:\Users\李广创\AppData\Local\Temp\ksohtml19992\wps14.png

带L1正则化的线性回归也称为岭回归。

正则化项还可以用于很多以损失函数为优化目标的模型，如逻辑回归，神经网络，xgb等，以后不再赘述。

* 1. 焊接机械臂运动学分析
     1. DH坐标系

为了表示机器人末端的位姿，可以在各个关节处建立坐标系，末端坐标系在基坐标系下的描述可以表示末端执行器的位姿；通常采用DH法来建立坐标系，以下图的关节、连杆的序号来举例说明DH坐标系的建立过程。

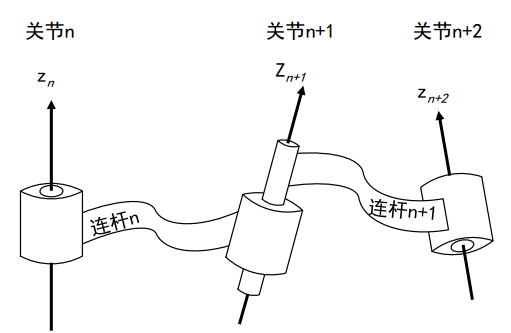


图2-3 DH法连杆的定义

Figure 2-3 Definition of the DH method link

1、建立坐标系：

1. 确定z轴

对于旋转关节，z轴位于垂直于关节旋转的方向；对于滑动关节：z轴位于沿着关节移动的方向。注意，z轴的方向可以有两个（上或下）



图2-4 Z轴方向的确定

Figure 2-4 Determination of the Z-axis direction

1. 确定x轴

在确定轴之前，首先需要确定和轴；此时轴的确定需要分三种情况讨论：

（1）和轴异面：这时轴沿着与的公垂线指向；

（2）和轴相交：和的叉积方向确定轴；也就是根据右手准则，拇指的方向为轴

（3）和轴平行：类似于第一种情况，但此时与的公垂线有无数条，最优的选择是沿着一条与共面的方向作为轴。

图2-5 X轴方向的确定

Figure 2-5 Determination of the X-axis direction

1. 确定y轴

根据与的叉乘方向确定y轴：。



图2-6 Y轴方向的确定

Figure 2-6 Determination of the Y-axis direction

2、坐标系n到坐标系n+1的变换步骤：

各个关节处的坐标系建立完毕后，可以用统一的方式来表示坐标系n到n+1的变换过程：

1. 绕轴旋转，使得和互相平行。
2. 沿着轴平移的距离，使得和共
3. 沿着轴平移的距离，使得和的原点重合。
4. 将轴绕轴旋转，使得和的轴对准，这时坐标系n和坐标系n+1完全相同。通过上面这4个步骤，坐标系n完全变换到坐标系n+1.

注意到，对于结构确定的机械臂，上面变换过程的4个参数中，、、是确定的，是机械臂关节转动的角度；这4个变换步骤的所有变换过程都是基于当前坐标系的变换，因此变换过程适用于“右乘”的原则，可以得出变换的表达为：

(2.13)

3、根据变换矩阵，确定机械臂末端执行器相对于参考系的位姿。

以第1个坐标系为参考系，假设末端执行器的初始位姿与参考系完全重合，也就是初始时刻的位姿是4×4的单位阵，经过n个连续的变换过程，最终末端执行器的姿态表达为：

(2.14)

* + 1. 正运动学分析

假设有一个构型已知的机械臂，给定各个关节的转动角度，那么计算机械臂末端执行器的位姿就称为机械臂的正运动学问题。首先根据焊接机器人的机械结构，建立DH坐标系和DH表：



图2-7 六自由度焊接机械臂的DH坐标系

Figure 2-7 DH six degrees of freedom of the manipulator coordinate system of the welding

表2-1 六自由度焊接机械臂的DH表

Table 2-1 DH Table of Six Degrees of Freedom Welded Manipulator

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 变换矩阵 |  |  |  |  | 角度范围 |
|  | **+0** | **d1** | **0** | **90** | **-150~150** |
|  | **+0** | **0** | **a2** | **0** | **-150~30** |
|  | **+90** | **0** | **0** | **90** | **-70~50** |
|  | **+0** | **d4** | **0** | **-90** | **-150~150** |
|  | **-90** | **0** | **0** | **90** | **-90~90** |
|  | **+90** | **d6** | **0** | **0** | **-180~180** |

DH表中，，，。根据DH坐标系和DH表，以上一个坐标系为参考系，则当前坐标系在上一个坐标系下的齐次变换矩阵为：

为了描述末端执行器相对于参考坐标系的位姿表示，则将所有的变换矩阵进行连乘。因此，机械臂的位姿方程如下式所示，此式为机械臂的正运动学方程。

(2.15)

* + 1. 逆运动学分析

如果要将机械臂的末端执行器放在一个期望的位姿，就必须知道机器人每个关节的转动角度才能进行运动控制；也就是给定机械臂所需的位姿，求解机械臂关节的转动角度，这个过程称为机械臂的逆运动学。

机械臂逆运动的求解往往比较困难，可能出现无解析解或存在多解的情况；对于6自由度的旋转关节机械臂来说，当下面的条件之一被满足时，机械臂有闭合形式的逆运动学解：

1) 三个连续的转动关节的轴交于同一点。

2) 三个连续的转动关节的轴平行。

本文建模所用的机械臂满足上述的第一个条件，也就是机械臂的后三个关节的坐标系都交于一点，形成“球形腕”的结构，这种构型的机械臂在求解逆运动的时候比较方便，这也是很大一部分工业机械臂所采用的构型；对于这种类型的机械臂，前3个关节控制“腕点”的位置，如图2-7中的；后3个关节空“腕点”姿态，因此可以实现位置和姿态计算过程的解耦。

基于这个原理，提出基于一种位置姿态分离的机械臂逆运动学的求解算法，其求解过程如下：

1. 计算手腕的位置：

(2.16)

1. 根据的位置，求解拟人臂的各个关节坐标



图2-9 几何法求解前3个关节的逆运动

Figure 2-9 Geometric method to solve the inverse motion of the first three joints

(2.17)

(2.18)

(2.19)

(2.20)

(2.21)

(2.22)

(2.23)

1. 根据正运动学方程计算手腕处的姿态

为求解方便，在坐标系的后面建立一个辅助坐标系，由坐标系变换到坐标系的变换矩阵为：

(2.24)

(2.25)

取3×3的分块矩阵即为旋转矩阵，也即手腕处的姿态

(2.26)

1. 根据，计算

末端执行器的姿态是已知的数值矩阵，而已经在第二步求出，因此也是一个已知的数值矩阵；带入上式便可求取，假设求取的结果为：

(2.27)

1. 根据，求解逆运动，解



图2-10 后三个关节角的逆运动求解

Figure 2-10 Solving the inverse motion of the last three joint angles

(2.28)

以坐标系为基准坐标系，求解末端执行器相对于坐标系的位姿，事实上，通过正运动学方程，可以发现它的分块矩阵与ZYZ欧拉角的旋转矩阵是一致的，这说明构成关于参考坐标系的ZYZ角度集合；因此，可直接用ZYZ欧拉角的逆解作为球形腕的逆解。

当时：

(2.29)

(2.30)

(2.31)

当：

(2.32)

(2.33)

(2.34)

由于坐标系4变换到坐标系，坐标系先绕着旋转了，再沿着平移L3的距离；因此：

(2.35)

由于计算手腕处位置的逆解，得到4个解，而计算手腕处的姿态的逆解，得到2个解；因此，一共有8组可能的解。在实际使用的时候，可以设置约束条件进行筛选，比如，得出的解是否在关节允许的范围之内，或者从上次的关节角运动到当前关节角，选取运动量最小的解作为合理的解。

* 1. 本章小结

本章主要对空间机械臂的运动学问题进行研究，首先描述了刚体在空间中位置和姿态的表示方法，以及刚体在进行平移和旋转过程的齐次变换矩阵表示；然后采用DH法建立机械臂的数学模型，根据DH坐标系和DH表推导了机械臂的正运动学方程，最后，针对工业界常用的球形腕机械臂，推导了一种位置和姿态分离的逆运动求解方法。