

工业机器人路径规划的双目标优化策略

胡佳, 汪峥

(东南大学自动化学院, 江苏南京 210096)

摘要:工业机器人路径规划之后,采用B样条曲线对得到的无碰撞离散路径进行拟合得到一条连续、光滑运动路径。路径规划与曲线拟合问题的性能指标分别为路径与障碍物的距离和曲线的光滑度,两者之间可能存在矛盾。设计了一个模糊控制器,对该问题的数学模型进行改进,以期望性能指标作为输入,路径移动距离作为输出,通过调整路径的移动距离和方向,对这两个问题的优化过程进行控制,从而得到可行解。仿真结果验证了该方法的正确性。算法具有一定的通用性,同样适用于解决其他存在矛盾的综合优化问题。

关键词:工业机器人;路径规划;曲线拟合;模糊控制器

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2009)05-0016-03

Bi-objective Optimization of Path Planning for Manipulators

HU Jia, WANG Zheng

(School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: B-spline curve is used to fit a collision free sequence into a continuous smooth path after path planning of manipulator. The performance criteria of path planning and curve fitting are the distance between path and obstacles and the smoothness of the curve respectively. They may contradict with each other. A fuzzy controller is designed to improve the mathematical model with expectation performance criteria as its input and path moving distance as its output to adjust moving distance and direction of the path and control the optimization processes of the two problems to find the acceptable solution. Simulation results show the correctness of this method. It is a common method, and is equally applicable to other problems which contradict with each other.

Key words: manipulator; path planning; curve fitting; fuzzy controller

0 引言

传统上,工业机器人控制分为离线运动规划和在线伺服跟踪,分级控制有利于简化问题并得到更好的优化目标^[1,2]。运动规划又分为路径规划和轨迹规划,路径规划的目的是确定一条符合工作要求的无碰撞的工作空间几何路径,其结果是一条由若干个离散位形组成的离散路径,需要对离散路径进行拟合得到连续光滑的路径。

路径规划得到的离散路径距离障碍物最远,但这条路径可能拐点多不光滑,曲线拟合会使得路径尽可能光滑,但拟合后的路径可能会离障碍物很近。所以路径规划和曲线拟合之间存在矛盾。文中基于模糊控制方法提出控制路径规划和曲线拟合这两个互相影响

优化过程的方案,得到同时符合两个预期性能指标的光滑路径。

1 初始最优路径的选取

在进行优化之前,首先在工业机器人的工作空间选取一条初始最优路径。文中采取文献[3~5]中的方法选取最优路径。

最后得到的最优路径为:起始点 Q_s , 终止点 Q_g , 起始点和终止点之间共有 $N-1$ 个中间节点。以点 i 为弧头,点 j 为弧尾的边的权值为:

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}}, 1 \leq i \leq N-1, 1 \leq j \leq N-1 \quad (1)$$

式中, $d_{i,j}$ 为这条边到障碍物的距离。那么,求解最大距离问题的数学模型可以表示为:

$$\min_{P_i \in P} \left\{ \sum \omega_{i,j} \mid \omega_{i,j} \in P_i \right\} \quad (2)$$

式中, P 表示路图中从起点到终点所有路径的集合, P_i 表示从起点到终点的一条路径。

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50505006)

作者简介: 胡佳(1985-),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为计算机集成制造;汪峥,副教授,研究方向为制造系统控制与设计、离散事件动态系统等。

2 路径的曲线拟合及光滑度的计算

上文得到的路径是由一系列的离散路径点构成的,需要对这些路径点进行拟合以得到一条光滑路径。文中采用文献[6,7]介绍的三次B样条曲线进行拟合,拟合后得到的连续路径为:

$$q = f(s) = \sum_{j=1}^{N+1} b_j(s) V_j \quad 0 \leq s \leq N \quad (3)$$

式中, q 为 2×1 维列向量,是由参数 s 表示的连续路径; V_j 为 2×1 维列向量,是各路径点的坐标;参数 s 为伪位移; $b_j(s)$ 为3次B样条函数的基函数。得到连续路径 q 之后,需要计算其光滑度 S 。

在路径上选取 N_q 个点,计算点 i ($1 \leq i \leq N_q$) 处路径的曲率 K_i :

$$K_i = \frac{|\ddot{q}_i|}{(1 + \dot{q}_i^2)^{3/2}} \quad (4)$$

式中 \dot{q}_i 表示路径 q 在点 i 处的一阶导数, \ddot{q}_i 表示路径在点 i 处的二阶导数,则光滑度 S :

$$S = \frac{K_1 + K_2 + \dots + K_{N_q}}{N_q} \quad (5)$$

3 双目标并行优化问题的数学模型

路径规划的双目标综合优化问题可表示为:已知工业机器人在工作空间的一条离散路径,在满足边界条件和约束条件的情况下,确定一条合适的拟合路径,使机器人在运动过程中与障碍物的距离最大并且路径最光滑。令 $X = (V_0, \dots, V_N)$, 则其数学模型如下式所示:

$$\begin{cases} (P_1) \min J_1(X) = \min_{P_i \in P} \sum \omega_{i,j} \mid \omega_{i,j} \in P_i \\ (P_2) \min J_2(X) = \min S \\ \text{s. t. } ((\sum_{j=1}^{N+1} b_j(s) V_j)_i - V_i)^T \cdot \\ ((\sum_{j=1}^{N+1} b_j(s) V_j)_i - V_i) - \delta \leq 0, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

式中, (P_1) 为路径优化问题, (P_2) 为曲线拟合问题; $J_1(X)$ 、 $J_2(X)$ 分别表示路径规划和曲线拟合的性能指标, $J_1(X)$ 为离散路径各段与障碍物距离的倒数和, $J_2(X)$ 表示曲线拟合得到的路径的光滑度, δ 表示曲线拟合误差的可接受上限。

若曲线不光滑,需要调整曲率较大的点,使路径与障碍物距离变小,若要求距离足够大,则曲线不光滑,故很难同时得到两个优化问题的最优解,需要将问题弱化,即

求解这两个互相耦合问题的可行解,找到决策变量,使性能指标满足期望性能指标,这两个性能指标不一定是每个优化问题的最优性能指标。

令 J_1^* 表示路径与障碍物距离倒数和的上限, J_2^* 表示曲线光滑度的上限,需要找到不超过这两个上限的可行解,即求解满足 $J_1(X) - J_1^* \leq 0$ 和 $J_2(X) - J_2^* \leq 0$ 的 X 。同时转换约束条件使其成为性能指标的一部分。

综上所述,这两个互相耦合问题可改写成如下形式:

$$\begin{cases} (P_1') \min Z_1(X) = \max\{0, J_1(X) - J_1^*\} \\ (P_2') \min Z_2(X) = \max\{0, J_2(X) - J_2^*\} + \\ \max\{0, ((\sum_{j=1}^{N+1} b_j(s) V_j)_i - V_i)^T \cdot \\ ((\sum_{j=1}^{N+1} b_j(s) V_j)_i - V_i) - \delta\} \end{cases} \quad (7)$$

式中, J_1^* 和 J_2^* 为期望性能指标;当路径与障碍物距离的倒数和小于给定值时, $Z_1(X) = 0$;当光滑度小于给定值并且拟合精度达到要求时, $Z_2(X) = 0$,这也是 Z_1 、 Z_2 的最优值,即 Z_1 、 Z_2 同时为0是可以实现的。

4 控制策略

这个两目标并行优化问题的控制框图如图1所示。在这个控制框图中,如果 Z_1 和 Z_2 大于0,则需要调整路径,其原则是距离障碍物尽量远同时路径尽量光滑,其方法就是对路径上曲率比较大的点进行修正,修正路径的方法如下:在曲率过大的点 M 处做曲率圆,设圆心为 D ,使点 M 向圆心移动,移动距离由模糊控制器决定,移动到新的路径点 M' 后,用B样条插值得到新的拟合曲线,计算其曲率是否达到期望值。在调整路径的同时还要计算各新的路径点与障碍物的距离,如果距离过小或者碰到障碍物,则停止调整。

在图1中,模糊控制器的设计采用文献[8,9]介绍的方法。由图1可以看出,模糊控制器的输入为 $M = \max\{0, Z_1(X)\}$ 和 $H = \max\{0, Z_2(X)\}$, 输出为 L , 即各个点需要移动的距离。

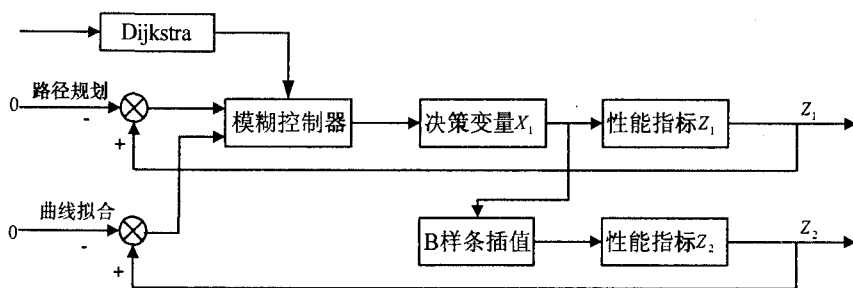


图1 两目标并行优化问题的控制框图

5 仿真研究

5.1 初始结果的计算

对于决策变量 X , 初始值为:

$$X = \{(0,0), (1,7), (2,7), (3,7), (4,8), (5,8), (6,8), (7,9), (8,9), (9,9), (10,10)\}$$

机器人工作空间共有 6 个障碍物, 分别由 6 个圆包围, 圆心坐标 O_k 以及圆的半径 r_k 分别为:

$$\begin{cases} O_k = \{(2,0.5), (2.5,4.5), (2.5,8.5), \\ (4.5,6.5), (5.5,9.5), (7.5,7.5)\}, \\ r_k = \{1.1, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7\} \end{cases}$$

其中, $k = 1, 2, \dots, 6$.

在迭代过程中进行路径调整会使路径与障碍物距离变小, J_1 将变大; 路径将会变光滑, 即 J_2 将变小。取期望性能指标 $J_1^* = 1.5, J_2^* = 0.24$; B 样条插值的拟合误差上限取 $\delta = 0.2$, 则由式(7) 得到:

$$Z_1 = 0, Z_2 = 0.3513$$

5.2 模糊控制器参数的选取及仿真结果

取 $KM \in [0, 12], KH \in [0, 8]$; 同样, 取输出 $KL \in [0, 8]$ 。 KM 的模糊子集个数取为 5 个, 分别为 $\{S2, S1, CE, B1, B2\}$, KH 的模糊子集个数取为 7 个, 分别为 $\{S3, S2, S1, CE, B1, B2, B3\}$, 输出 KL 模糊子集个数取为 7 个, 分别为 $\{S3, S2, S1, CE, B1, B2, B3\}$, 隶属度函数都取为三角型。模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

KM \ KH	S2	S1	CE	B1	B2
S3	S3	S3	S3	S2	S1
S2	S3	S3	S2	S1	S1
S1	S3	S2	S2	S2	S2
CE	S2	S1	S2	S2	CE
B1	CE	CE	CE	B3	B2
B2	B2	B2	B1	B1	B1
B3	B3	B3	B2	CE	CE

量化因子 k_M, k_H 以及比例因子 k_L 的值需要经过多次仿真才能确定, 第一次仿真时, 参数分别取为: $k_M = 5, k_H = 20, k_L = 1$; 迭代次数 $k = 30$, 部分仿真结果如表 2 所示。

第一次迭代时输出 L 的值过大, 使第二次迭代的输入 $KH = k_H \times Z_2$ 超出模糊论域范围, 这时设定输入取其上限。由表 2 可知, 每次迭代的输出反馈量过大, 优化过程发散, 需要调整比例因子 k_L , 取 $k_L = 0.02$, k_M, k_H 不变, 进行第二次仿真, 数据结果如表 3 所示, 图示结果如图 3 所示, 图 2 中 k 表示迭代次数。

表 2 $J_1^* = 1.5, J_2^* = 0.24$ 时的第一次仿真结果

迭代次数	1	4	7	10	14
Z_1	0	0.6068	0.6009	0	0.2905
Z_2	0.3513	3.7401	2.0652	3.6162	2.1496
L	5.3723	5.3723	5.3723	5.3723	5.3723
迭代次数	17	20	24	27	30
Z_1	0.2574	0.4945	0.6318	0.2482	0.2445
Z_2	1.9009	2.4967	3.0923	2.0012	1.4490
L	5.3723	5.3723	5.3723	5.3723	5.3723

表 3 $J_1^* = 1.5, J_2^* = 0.24$ 时的第二次仿真结果

迭代次数	0	1	2	3
J_1	0.9856	1.2031	1.2203	1.2337
Z_1	0	0	0	0
J_2	0.5913	0.3785	0.3642	0.3267
Z_2	0.3513	0.1385	0.1242	0.0867
L	0.1074	0.0445	0.0515	0.0410
迭代次数	4	5	6	7
J_1	1.2538	0.2853	1.3371	1.4222
Z_1	0	0	0	0
J_2	0.2806	0.2651	0.2535	0.2400
Z_2	0.0406	0.0251	0.0135	0
L	0.0223	0.0152	0.0410	0.0312

由结果可以看出, 此次仿真经过 7 次迭代实现了收敛, 说明了模糊控制器参数合理, 文中提出的优化算法是可行的。

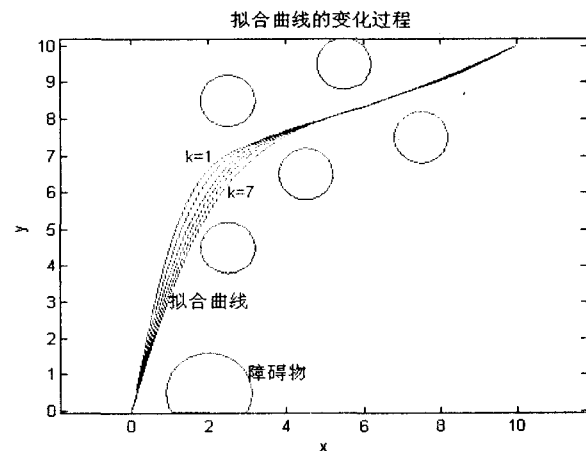


图 2 迭代过程中的曲线变化示意图

6 结束语

文中首先建立了工业机器人路径规划的双目标优化问题的数学模型, 根据得到的数学模型设计了路径规划和曲线拟合的并行优化方案, 并利用模糊控制调整离散路径点的移动实现了两个性能指标的并行优化, 最后通过仿真验证了优化方案的正确性。

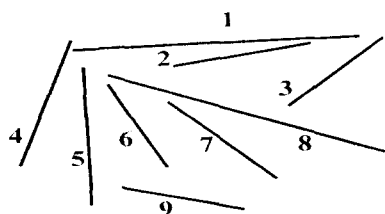


图 5 实验模板

实验表明,文中的方法可以在保持与标准 Hough 变换同样精度的前提下,相对提高直线检测的效率。在无噪声的情况下,相对于标准 Hough 变换,文中方法可以提高速度达 3 到 4 倍,在加噪声的情况下,可以基本不增加 Hough 变换的计算次数,相对标准 Hough 变换,速度能提高到 6 到 7 倍。由于实验采用 MATLAB 验证,其搜索策略没有得到最大的发挥,其平均时间在整个算法中占到 0.31,其搜索范围仅仅在扫描线的范围上进行了限制,因此从理论上文中的方法在速度上还有很大的提高余地。

此外,应当充分利用直线上的长度特征,在直线相交的情况下,提高选取候选基元的正确率,提高直线检测的鲁棒性,待算法完善后,将采用其他语言改写,这将是下一步工作的重点。

4 结束语

在基于 Freeman 链码的直线特征的基础上,利用直线走向特征,初步对图像的主基元进行分类,在同类基元数组中,利用直线的主基元的位置特征,缩小搜索邻近基元的搜索范围,在搜索范围内利用直线的主基元的长度特征,作为条件,确定邻近基元,通过当前基元和邻近基元的倾斜角,约束当前基元上的像素点参与 Hough 变换的极角范围,从而减少 Hough 变换的浮

点运算的次数,提高直线检测的效率。文中的思想还可用在表格框线的旋转角度上,在该转角范围内提取表格的所有框线。

参考文献:

- [1] Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988,44(1):87-107.
- [2] Brucker P, Drexel A. Resource-constrained project scheduling notation, classification, models, and methods[J]. European Journal of Operational Research, 1999,112(1):3-41.
- [3] Tagzout S, Achour K, Djekoune O. Hough transform algorithm for FPGA implementation[J]. Signal Processing System, 2000(10):384-393.
- [4] 张大朴,李玉山,刘洋,等.采用拟梯度方向信息的随机哈夫变换直线检测[J].计算机科学,2006,33(4):208-210.
- [5] 易玲.基于分级的快速度霍夫变换直线检测[J].微计算机信息,2007,23(11):406-408.
- [6] Freeman H. Boundary encoding and processing[M]//In: Picture Processing and Psychopictorics. New York: Academic, 1970:241-266.
- [7] Jang Jeong-Hun, Hong Ki-Sang. Fast line segment grouping method for finding globally more favorable line segments[J]. Pattern Recognition, 2002(35):2235-2247.
- [8] Boldt M, Weiss R, Riseman E. Token-based extraction of straight lines[J]. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1989,19(6):1581-1594.
- [9] Nacken P F M. A metric for line segments[J]. IEEE Trans. PAMI, 1993,15(12):1312-1318.
- [10] 周绍光,辛梓,田林亚.利用数字影像中直线的结构特征检测直线段[J].计算机工程与应用,2004(22):71-74.

(上接第 18 页)

参考文献:

- [1] Shin K G, McKay N D. Minimum-Time Control of Robotic Manipulators with Geometric Path Constraints[J]. IEEE Trans on Automat Control, 1985,30(6):531-541.
- [2] Lin Chun-Shin, Chang Po-Rong, Luh J Y S. Formulation and Optimization of Cubic Polynomial Joint Trajectories for Industrial Robots[J]. IEEE Trans Robot Automat, 1983,28(12):1066-1067.
- [3] Kavraki L E, Svestka P, Latombe J C, et al. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces[J]. IEEE Trans Robot Automat, 1996,41(4):566-579.
- [4] 王建滨,马培荪,徐军.超冗余度机械臂的路径安全性优化研究[J].上海交通大学学报,2003,37(5):710-714.
- [5] 陈益富,卢潇,丁豪杰.对 Dijkstra 算法的优化策略研究[J].计算机技术与发展,2006,16(9):73-75.
- [6] 李衷怡,徐欣康.基于 B 样条曲线的断层离散数据平滑算法[J].计算机技术与发展,2007,17(10):16-18.
- [7] 王建滨,马培荪,徐军.基于超冗余度机械臂动力学的时间最优轨迹规划[J].上海交通大学学报,2002,36(9):1360-1364.
- [8] 石辛民,郝整清.模糊控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2008:93-117.
- [9] 李红岩,侯媛彬,王秀.实现温度自动调节的模糊控制器设计[J].计算机技术与发展,2006,16(3):149-151.