基于聚类 PSO 算法的舰载机舰面多路径动态规划

韩 维 司维超

（海军航空工程学院 飞行器工程系，烟台 264001） （海军航空工程学院 研究生管理大队，烟台 264001）

丁大春 宋 岩

（海军飞行学院 装备部，葫芦岛 125001） （海军航空工程学院 基础部，烟台 264001）

摘 要：对舰载机舰面多路径动态规划问题，提出了基于聚类粒子群（PSO，Particle Swarm Optimization）算法进行解决的方法. 首先建立了舰载机舰面多路径动态规划问题数学模型；其次，在建立航母舰面环境模型、舰载机“凸壳”模型、碰撞检测模型的基础上，利用聚类 PSO 算法进行问题求解；最后，通过编制程序对该解决方法予以实现. 仿真结果表明利用聚类 PSO 算法所求解的结果比较精确，且计算效率也符合实际要求. 因此基于聚类 PSO 算法对舰载机舰面多路径动态规划问题进行求解是可行的.

关 键 词：舰载机；多路径动态规划；聚类粒子群算法算法；优化

中图分类号：TP 202；E 9

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965（2013）05-0610-05

Multi-routes dynamic planning on deck of carrier plane based on clustering PSO

Han Wei

（Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China）

Si Weichao

（Graduate Student's Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China）

Ding Dachun

（Armament Department, Naval Fly Academy, Huludao 125001, China）

Song Yan

（Foundation Department, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China）

Abstract: To solve problem of multi-routes dynamic planning on deck about carrier plane, a method based on clustering particle swarm optimization (PSO) was proposed. The mathematic model of the problem was established. On the basis of establishing the whole environment modeling of aircraft carrier deck, the convex hull modeling of carrier plane and the collision detecting modeling, clustering PSO was used to solve the problem. In the end, the resolving method was realized by compiling program. Simulation show that the results meet the precision demands and the calculating efficiency also meets the practical demands. So using clustering PSO to resolve the problem of multi-routes dynamic planning on deck is feasible.

Key words: carrier plane; multi-routes dynamic planning; clustering particle swarm optimization (PSO); optimization

收稿日期：2012-06-08；**网络出版时间**：2012-11-26 11:39

网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121126.1139.006.html

基金项目：中国博士后科学基金资助项目（20090460114，201003758）；国家自然科学基金资助项目（60902054）

作者简介：韩 维（1970-），男，湖南湘潭人，教授，Luckydevilhan@163.com.

合理保障舰载机,对提高航母战斗力具有重要的意义[1]. 其中,舰载机为了在甲板的不同位置高效地完成保障作业,需要进行有序的移动. 但是由于甲板空间狭小,出于安全需要,舰载机必须规避各种障碍,寻求合理的路径进行移动.

在现代作战过程中,战斗节奏加快,舰载机在舰面的调运作业效率在很大程度上决定着战争的成败[2]. 因此舰载机调运方案的安全性和高效性显得尤为重要. 在保证舰载机尽量短的移动路程和严格满足碰撞避免以确保安全的约束下,如何根据当前环境,动态寻找合理的路径,以指导舰载机进行移动,则需要进一步研究. 另外,在舰面障碍区域发生变化后,如何对当前路径进行快速调整,给出备选路径,也同样需要研究.

目前,舰载机在甲板的移动过程一般仍采用人工指挥的方式,由甲板操作人员指挥舰载机或牵引车进行移动[3]. 这种方式不仅效率低,而且调运管理质量较低,有时甚至出现错误的指引.

为此本文以库兹涅佐夫为研究对象,通过对舰载机舰面移动问题进行建模,并利用聚类粒子群算法(PSO,Particle Swarm Optimization)[4]对该问题进行解决,从数学方面给以依据,一定程度上解决了人工指挥的缺陷.

1　舰载机多路径动态规划问题建模

在具体移动某架舰载机时,其起点 a_0、终点 a_n 以及当前舰面的障碍区域均是已知的,所要解决的问题便为在不与障碍区域发生碰撞的前提下,在可行区域搜寻一系列路径点,使得由这些节点所构成的一条或多条路径是全局近似最优的(距离最短). 数学模型建立如下.

目标函数

$$F = \min\{S(A_i)\} \tag{1}$$

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{in}) = ((x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}), \cdots, (x_{in}, y_{in}))$$

约束条件

$$\left.\begin{aligned} a_{i1} &= a_0 = (x_0, y_0) \\ a_{in} &= a_n = (x_n, y_n) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$a_{ij} \notin D \quad j = 1, 2, \cdots, n \tag{3}$$

$$l_{ij} \geqslant l_{\min} \quad j = 1, 2, \cdots, n-1 \tag{4}$$

$$\sum l_{ij} \leqslant L_{\max} \quad j = 1, 2, \cdots, n-1 \tag{5}$$

$$\frac{\boldsymbol{\Delta}_{ij}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Delta}_{i(j+1)}}{\| \boldsymbol{\Delta}_{ij}^{\mathrm{T}} \| \cdot \| \boldsymbol{\Delta}_{i(j+1)} \|} \geqslant \cos\phi \quad j = 1, 2, \cdots, n-1 \tag{6}$$

其中,F 为所要达到的目标,即在确保安全的情况下,保证舰载机总的移动距离最短;S 为舰载机沿某条路径的舰面移动距离;A_i 为第 i 条舰载机移动路径;a_{ij} 为第 i 条移动路径中第 j 个中间节点,其坐标为 (x_{ij}, y_{ij});n 为路径节点个数;a_0 为路径起始点;a_n 为路径终点. 在确定 n 值时,需要综合考虑路径起点、终点以及舰载机每步移动的路径段长度 l_{ij};D_z 表示当前状态下所有的障碍区域;l_{ij} 为舰载机第 i 条路径的第 j 个移动路径段的长度;$l_{\min}$ 为舰载机每次移动的最小路径段长度;$L_{\max}$ 为所要求的最大不能超过的路径长度;$\boldsymbol{\Delta}_{ij}$ 为第 i 条路径第 j 个路径段向量,即 $\boldsymbol{\Delta}_{ij} = (x_{ij} - x_{i(j-1)}, y_{ij} - y_{i(j-1)})^{\mathrm{T}}$;$\| \boldsymbol{\Delta}_{ij} \|$ 为向量 $\boldsymbol{\Delta}_{ij}$ 对应的长度;ϕ 为舰载机移动时最大的拐弯角.

由上可知,式(2)给出了路径起始点和终点,对于舰载机某次具体的移动来说,是固定的. 式(3)表示所规划的路径的任意节点都不能位于障碍区域内部,即不允许碰撞的发生. 式(4)表示舰载机在下次执行拐弯时所必须保持的最小直线移动距离,一般不希望舰载机频繁地转弯. 式(5)表示所规划某条路径的长度必须小于事先所规定的本次移动的最大距离. 式(6)表示所规划的路径必须满足舰载机最大拐弯角的要求,避免迂回行进和剧烈转弯[5].

2　舰载机多路径动态规划问题求解

由于舰面环境具有较大的不确定性,障碍、威胁等会随时间发生变化,预先规划好的最优路径可能因为环境的变化不再适用. 为解决该问题,一种有效的方法是:首先,预先规划出多条路径[6],可以根据不同需要从中动态选择最合适的. 其次,若以上路径均不满足要求,则需要将舰载机当前的位置、目标位置以及当前障碍物环境作为新的输入条件,进行再次规划,也即动态规划.

2.1　环境建模

1) 航母舰面环境的建立. 将舰面扩充为矩形区域,对不可达区域补齐阴影. 库兹涅佐夫号航母舰面模型如图 1 所示.

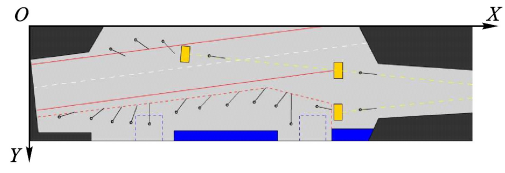
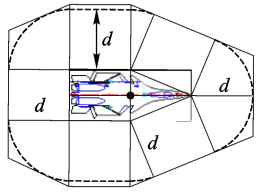


图 1　库兹涅佐夫航母舰面模型

图 1 中,坐标原点设在矩形区域的左上角,向右为 X 轴正方向,向下为 Y 轴正方向. 深色区域为固定障碍区域,浅色区域为舰载机移动区域.

2）障碍物模型的建立. 甲板上障碍物的选取重点考虑布放于甲板的其他舰载机,所以需要对舰载机进行建模. 为了方便计算,本文采用凸壳算法[7],将需要移动的舰载机简化为一点,而将其他障碍舰载机进行多边形扩充,建立障碍物多边形的缓冲区. 凸壳算法将障碍舰载机沿其边界向外侧法线方向平移一个缓冲距离 d(相当于舰载机机身轴线距离某侧机翼外端的距离),使得当前需要移动的舰载机在沿障碍物扩展后的多边形边界进行移动时,刚好不与障碍物发生碰撞. 舰载机凸壳模型如图 2 所示.



虚线为实际扩展后的边界;实线边界为简化后边界.

图 2 舰载机凸壳模型

在实际建立舰载机障碍区域模型时,可以分以下两方面进行简化:①将舰载机与甲板结合;②将多架距离较近舰载机进行合并.

3）碰撞检测模型的建立. 在规划路径时,必须保证舰载机不与障碍物发生碰撞,为此需要进行碰撞检测[8]. 碰撞检测依据为判断舰载机所处的路径点是否位于障碍区域内,若是则表示发生了碰撞. 判断所需的前提条件是:所有障碍区域均已知;路径点(x,y)也已知,则可以通过图 3 模型进行判断.

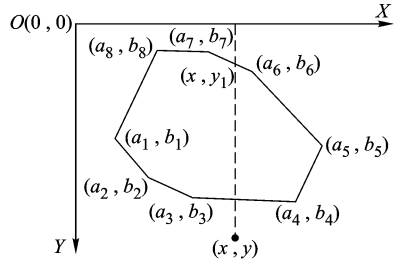


图 3 碰撞检测模型

当障碍区域确定后,其边界上每个节点坐标(a_i,b_i),$i=1,2,\cdots,8$ 均已知. 则碰撞检测步骤为:

① 明确障碍边界节点坐标及路径节点坐标;

② 依次遍历障碍区域的每个线段,判断其是否与路径节点(x,y)所在 X 轴有交点. 假设该线段两个端点分别为(a_i,b_i)和(a_j,b_j),路径节点(x,y)的横坐标为 x,则判断是否相交的依据为

$$(\max(a_i,a_j)\geqslant x)\ \text{and}\ (\min(a_i,a_j)<x)$$

$$(\max(a_i,a_j)>x)\ \text{and}\ (\min(a_i,a_j)\leqslant x)$$

若出现以上任意一种情况,则说明有交点.

③ 若②中存在交点,则按照比例求该交点.

$$y_k=\frac{(x-a_i)(b_j-b_i)}{(a_j-a_i)}+b_i$$

则所求交点坐标为(x,y_k).

④ 重复②和③,直至障碍区域的所有线段遍历完毕. 由于障碍区域为凸多边形,所以交点最多为 2 个,分别设为(x,y_0)和(x,y_1).

⑤ 判断当前路径节点(x,y)是否与该障碍区域发生碰撞. 依据为:若 $\min(y_0,y_1)\leqslant y\leqslant\max(y_0,y_1)$,则说明发生碰撞.

2.2 基于聚类 PSO 算法多路径动态规划求解方法

1）聚类 PSO 算法流程,如图 4 所示.

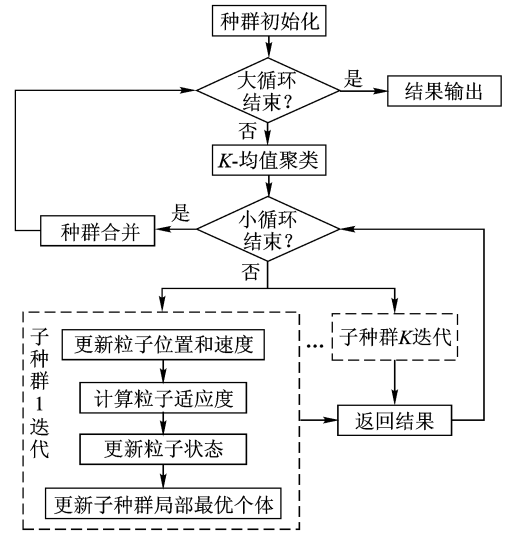


图 4 聚类 PSO 算法流程

2）聚类 PSO 算法基本参数设置. 除 PSO 算法常规参数外,其他参数设置如下:种群大小设置为 60;子种群个数设置为 2;大循环设定为 5 次,小循环设定为 30 次,独立运行 50 次,最终结果采用独立运行 50 次后平均值.

3）粒子位置(速度)向量维数动态设置. 在进行粒子寻优前,必须首先确定粒子位置(速度)向量的维数 n. 本文选取粒子移动的起点 $a_0=(x_0,y_0)$和终点 $a_n=(x_n,y_n)$的 X 轴距离$|x_n-x_0|$作为确定维数的依据,即

$$n=\text{round}\left(\frac{|x_n-x_0|}{l_{\min}}\right)+1$$

将$|x_n-x_0|$均分为 $n-1$ 份,由此可以依次确定每一个中间节点 $a_{ij}(j=1,2,\cdots,n)$的 X 坐标 x_{ij}.

4）粒子位置(速度)向量的初始化. 在粒子位置向量 $\boldsymbol{A}_i=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in})$初始化时,并不是随机初始化中间节点 a_{ij},而是对其运用碰撞检测机制,初始化为可行节点,从而使得每个粒子的位置向量所对应的路径都为可行路径,从而提高算

法效率. 在 2)中已经初始化了粒子位置向量中节点的 X 坐标,剩余需要再对节点的 Y 坐标进行初始化. 具体方法为:①除起点和终点外,依次选取每一个中间节点 a_{ij}的 X 坐标 x_{ij}所在直线. ②运用碰撞检测机制,给出该 X 坐标 x_{ij}所在直线与各个障碍区域的交点. ③对交点按照 Y 坐标进行排序,形成 Y 轴上的可行区域和不可行区域. ④在可行区域内随机初始化该中间节点的 Y 坐标 y_{ij}. ⑤将(x_{ij},y_{ij})作为中间节点 a_{ij}的坐标. 之后再转入下一节点,直至结束.

在粒子速度向量 $\boldsymbol{V}_i=(v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{in})$初始化时,需要注意其中起点对应的速度 v_{i1}和终点对应的速度 v_{in}必须为 0,因它们是固定不变的. 对于其他中间节点的速度 v_{ij},则按下式随机初始化:

$$v_{ij}=\mathrm{Random}(v_{i,\min},v_{i,\max})$$

5) 适应度函数的动态设置. 本文以式(1)作为粒子适应度函数. 已知粒子位置向量:

$$\boldsymbol{A}_i=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in})=((x_{i1},y_{i1}),(x_{i2},y_{i2}),\cdots,(x_{in},y_{in}))$$

则该粒子对应的适应度值为

$$F(\boldsymbol{A}_i)=\sum_{j=1}^{n-1}\sqrt{(x_{i(j+1)}-x_{ij})^2+(y_{i(j+1)}-y_{ij})^2}$$

6) 种群聚类. 在整个种群初始化完毕后,需要对其执行 K-均值聚类[9],划分为 K 个子种群. 聚类中心的选取是在整个种群中随机选取;聚类所划分的依据为各粒子与聚类中心的距离远近. 由于粒子位置向量是由一系列点组成,所以本文将各对应节点间距离的均值作为粒子间的距离. 设任意粒子的位置向量为

$$\boldsymbol{A}_i=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in})=((x_{i1},y_{i1}),(x_{i2},y_{i2}),\cdots,(x_{in},y_{in}))$$

某一聚类中心位置向量为

$$\boldsymbol{A}_O=(a_{O1},a_{O2},\cdots,a_{On})=((x_{O1},y_{O1}),(x_{O2},y_{O2}),\cdots,(x_{On},y_{On}))$$

则两者之间的距离定义为

$$\|\boldsymbol{A}_i-\boldsymbol{A}_O\|=\frac{1}{n}\cdot\left(\sum_{j=1}^{n}\sqrt{(x_{ij}-x_{Oj})^2+(y_{ij}-y_{Oj})^2}\right)$$

7) 执行多种群无迁移机制搜索. 针对每一个子种群执行一定次数搜索,其中每个粒子按照 PSO 算法的位置和速度更新公式进行更新. 在更新完毕后则执行碰撞检测机制,以判断新产生的节点是否与障碍区域发生碰撞,若产生碰撞则放弃该节点,在可行区域内重新进行更新;若不产生碰撞,则将新节点替换原始节点.

8) 粒子评价. 对各子种群产生的局部最优个体进行比较排序,形成最优个体序列. 若结果满足算法结束要求,则将该序列输出,其中序号为 1 的个体便为全局最优个体,其位置向量便为最优路径所需的节点,以此类推,可以给出多条备选路径;若结果不满足结束要求或大循环未结束,则将所有子种群合并为一个整体,再转到 5),直至算法结束.

2.3　仿真结果比较

1) 实例 1 仿真. 利用 Delphi6. 0[10]编制仿真程序进行仿真. 为方便说明,此处以库兹涅佐夫航母如下舰面环境为例作为初始输入,其中对相邻舰载机的障碍区域进行了合并. 假设待移动舰载机需要从 O'点移至 C 点. 如图 5 所示.

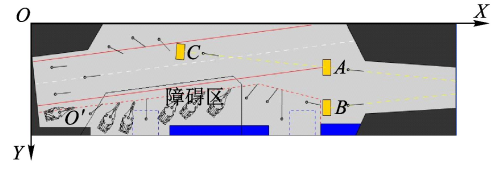


图 5　航母舰面障碍区域图

基于聚类 PSO 算法仿真如下:

① 初始化可行路径. 根据种群要求,需要初始化 40 条可行路径,如图 6 所示.

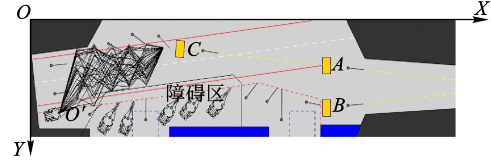
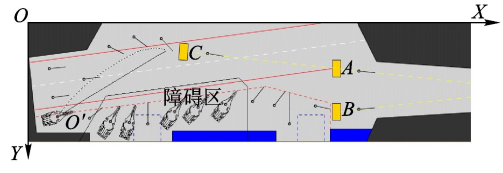


图 6　初始可行路径图

② 执行聚类 PSO 算法搜索. 此处要求给出 2 条备选路径,所以分 2 个子种群进行搜索. 另外,以上给出的最优路径仅仅是将各点连接起来的直线,可能会比较曲折,无法真实反映舰载机移动的轨迹,为此对全局最优(备选)路径进行平滑操作,即进行曲线拟合[11],从而得到比较真实的路径,如图 7 所示.



实线路径为全局最优路径;虚线路径为备选路径.

图 7　最优路径图

③ 实例数据结果. 以舰载机从 O'点移至 C 点为例,分别对 2 种算法进行 50 次独立运算,每次独立运算的大循环迭代次数为 5 次,小循环迭代次数为 30 次. 对 50 次独立运算的结果进行统计,计算所得的平均最优路径与实际最优路径长

度(线段 $O'C$ 的长度)比较如表 1 所示.

表 1 计算平均最优路径与实际最优路径比较

比较对象		长度/像素
实际最优路径		281.58
聚类 PSO	平均最优路径	281.65
	平均备选路径	286.91

2) 实例 2 仿真. 在 2.3.1 节中给出了静态环境下的仿真结果,此处给出在舰面障碍物环境发生动态变化时基于聚类 PSO 算法的路径动态规划结果. 假设舰载机在由 O' 点移至 C 点时,路径前方出现新障碍物,则系统根据 O' 点位置、C 点位置及当前舰面新的障碍物环境对舰载机的路径进行动态规划,如图 8 所示.

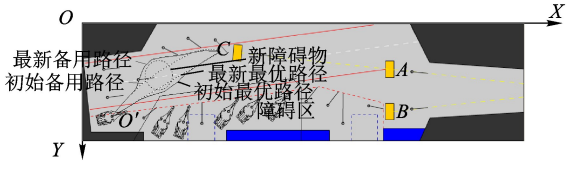


图 8 聚类 PSO 算法动态路径规划

3) 结果分析:① 由表 1 数据可知,舰载机在由 O' 移至 C 时,聚类 PSO 算法的全局最优路径的长度与实际最优路径长度之差为 $|281.65-281.58|=0.07$,所以比较接近. ② 由图 7 可知,当初始最优路径和备选路径均失效时,系统能够根据舰载机所在位置、目标位置和当前障碍物环境动态更新后续路径. 至于动态规划效率方面,可参见图 9. 聚类 PSO 算法规划一次路径所需时间约为 10 ~ 15 s,基本可以满足实际使用的需求.

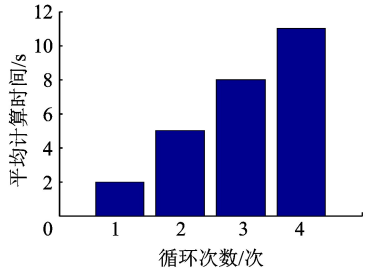


图 9 时间变化图

3 结 论

本文以库兹涅佐夫号航母为研究对象,通过将聚类 PSO 算法应用于求解舰载机多路径动态规划问题,所得结论如下:

1) 合理规划舰载机舰面移动路径对于提高其运作效率具有重要意义. 另外,在障碍环境发生变化时,能够立即给出舰载机移动的备选路径或进行动态二次规划,可以进一步提高效率.

2) 经仿真结果表明聚类 PSO 算法可以对舰载机多路径动态规划问题进行较好的求解. 算法所得结果精度也相对较高,且在出现新障碍物时,能够快速进行动态规划,其计算时间也满足实际使用的需求.

3) 本文所述方法可以作为研究其他航母类似问题的参考.

参考文献 (References)

[1] 韩维,王庆官. 航母与舰载机概论[M]. 烟台:海军航空工程学院出版社,2009:37-41
Han Wei, Wang Qingguan. Conspectus of aircraft carrier and carrier plane [M]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University Press, 2009: 37-41 (in Chinese)

[2] Commander, Naval Air Systems Command. CV flight/hangar deck NATOPS manual [R]. NAVAIR 00-80T-120, 2005

[3] Johnston J S. A feasibility study of a persistent monitoring system for the flight deck of US [D]. Alabama: Navy, Aircraft Carriers Department of the Air Force, Air University, 2009

[4] Serkan Hiranyaz, Turker Ince, Alper Yildirim. Fractional particle swarm optimization in multidimensional search space [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2010, 40(2): 298-318

[5] 孙诗南. 现代航空母舰[M]. 上海:科学普及出版社,2000:1-50
Sun Shinan. Modern aircraft carrier [M]. Shanghai: Popular Science Press, 2000: 1-50 (in Chinese)

[6] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008:70-79
Zheng Changwen, Yan Ping, Ding Mingyue, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 70-79 (in Chinese)

[7] 杨毅,刘亚辰. 一种基于凸壳的智能服务机器人路径规划算法[J]. 北京理工大学学报,2011,31(1):54-58
Yang Yi, Liu Yachen. A path planning algorithm based on convex hull for autonomous service robot [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(1): 54-58 (in Chinese)

[8] Prete J, Mitchell J S B. Safe routing of multiple aircraft flows in the presence of time-varying weather data[C]//Providence, RI: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2004: 1-21

[9] Kao Yu-cheng, Lee Szu-yuan. Combining *K*-means and particle swarm optimization for dynamic data clustering problems[C]// Proc of IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. [S.l.]: IEEE, 2009: 757-761

[10] 李光明,曹蕾. Delphi 6.0 程序设计教程[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:161-209
Li Guangming, Cao Lei. Delphi 6.0 programmers examination [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 161-209 (in Chinese)

[11] Saska M, Macas M, Preucil L, et al. Robot path planning using particle swarm optimization of Ferguson spines [C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 833-839

(编 辑:李 晶)