

基于遗传算法和 B 样条曲线的平滑避障路径规划^①

王 宪, 盛 巍, 宋书林, 平雪良

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 无锡 214122)

摘 要: 传统的避障路径规划中常常存在不连续点, 提出一种新的平滑避障路径规划的方法—遗传算法和 B 样条曲线法。首先, 先通过碰撞侦测, 能够侦测出前进路径中的障碍物, 然后通过遗传算法再结合 B 样条曲线规划出平滑的避障路径。该算法可以避免运动过程因打滑而造成与目标位置的误差, 解决机器人在静态环境中全局、局部路径规划和规划路径中存在不连续点的问题。仿真和实验结果证明了算法的有效性。

关键词: 遗传算法; B 样条曲线; 路径规划; 避障

Smoothing Obstacle Avoidance Path Planning Based on Genetic Algorithms and B-spline Curve

WANG Xian, SHENG Wei, Song Shu-Lin, PING Xue-Liang

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Traditional path planning and obstacle avoidance of discontinuities often exist. This paper presents a new obstacle avoidance path planning for a smooth approach-genetic algorithms and B-spline curve. First of all, first through the collision detection, can detect obstacles in the path ahead, then the genetic algorithm combined with B-spline curve and then map out a smooth obstacle avoidance path. The algorithm can avoid skidding caused by movement and target location error, solve the robot in a static environment, global, local path planning and path planning problem of discontinuity exists. Simulation and experimental results show the effectiveness of the algorithm.

Key words: genetic algorithms; B-spline; path planning; obstacle avoidance

1 前言

机器人中的路径规划是指: 在具有障碍物的环境中, 按照一定的评价标准, 寻找一条从起始状态到目标状态的无碰撞路径。一般来说, 路径规划往往需要考虑时间、距离、或者最少的能源消耗等原则, 从而找出最优解或次优解。在国外的路径规划研究中, 在配置空间 (Configuration Space)^[1]或在几何空间中采用多边形描述障碍物, 从而产生一连串的直线所构成的避障路线^[2]; 或者在直线交接处采用曲线连接, 避免路径的不连续, 然而由于连接处的不连续而使得机器人的运动方向突变^[3]。而人工势场优化算法中, 虽然能有效解决类似的问题, 但却容易产生局部最优解的问题。近些年, 遗传算法已经被广泛地用在机器人的路径规划中^[4-6, 25-27]。然而大部分的路径规划都没有考

虑到机器人机械结构的限制, 并且只是以产生最短路径为目标, 致使规划出的路径为线段的集合, 并非为连续平滑的曲线, 往往会造成应用上的困扰。本文结合遗传算法和 B 样条曲线生成算法, 产生出连续、平滑的避障曲线, 以供机器人路径规划之用, 从而避免因运动方向突变, 对减速齿轮的伤害和减速打滑而带来的位置误差。

2 平滑避障路径规划

传统的遗传算法的方式以近乎“盲目”的随机方式搜寻最佳解, 往往造成效果不好。因此陆续有学者将问题的相关知识, 如障碍物与控制点的相对位置等信息, 融入演化过程中, 或结合其他算法^[11-18, 25-27], 大幅改善使用遗传算法解决路径规划问题的能力。但是随

① 收稿时间:2011-05-26;收到修改稿时间:2011-07-19

着工业应用的不断深入，避障路径的平滑性的问题越来越被重视。而一些绘图曲线的应用能较好的解决平滑路径规划的问题，其中以 B 样条曲线最广为人知。

本文算法思路：使用遗传算法产生出所需要的控制点后，利用这些控制点来完成 B 样条曲线，使曲线在图形中能被建立出来。再根据前后控制点的直线距离为适应度，判断与侦测该控制点群所形成的路径是否与环境中的障碍物发生碰撞。当发生碰撞的时候，所需要修正的部分为发生碰撞的临近控制点，由于 B 样条曲线的特性，修正附近控制点并不会影响到整体路径，在修正时较容易。

2.1 B 样条曲线

B 样条曲线^[7]的特性之一为曲线会落在曲线阶数的控制点所形成的凸多边形内。例如阶数为 2 时，任两个相邻最近点所连的多边形必为直线，故曲线为控制点所连成的折线；当阶数为 3 时，任三个相邻的控制点则连成三角形，曲线即落在所有控制点所形成的三角形连接区域中。此外阶数越高，曲线愈显得平直^[19-24]。

本文中使用了最为广泛的 3 阶 B 样条曲线作为平滑路径产生的方法，并且将环境中的障碍物以若干个三角形所形成的集合表示，则路径与障碍物之间的碰撞侦测可简化为判断两个平面三角形的位置关系。3 阶 B 样条曲线和控制点见的关系如下列公式 (1) 所示：

$$S_i(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 P_i 、 P_{i+1} 、 P_{i+2} 、 P_{i+3} 为控制点，利用公式，可以得到本次实验中所需要的平滑曲线路径。

2.2 碰撞侦测

碰撞侦测的流程图如图 1 所示，先利用遗传算法中染色体的每个基因集合形成的控制点依次建立数个三角形，并将环境中的障碍物切割成若干个三角形接着判断 B 样条所形成的三角形与障碍物三角形之间是否产生碰撞。使用边界检测的方式来判断两个三角形是否会产生包含，如果回复为否，即可确认此这两个三角形并不会发生碰撞，如果回复是真，则表示这两个三角形有机会发生碰撞，需进一步分析。接下来计算两个三角形各个线段之间是否会相交。如果回复是

真，则表示这两个三角形有交错现象，且会发生碰撞；如果回复为否，即可确认此这两个三角形并不会发生碰撞。最后为重叠侦测，如果回复是真，则表示这两个三角形会发生碰撞；如果回复为否，即可确认此这两个三角形并不会发生碰撞。

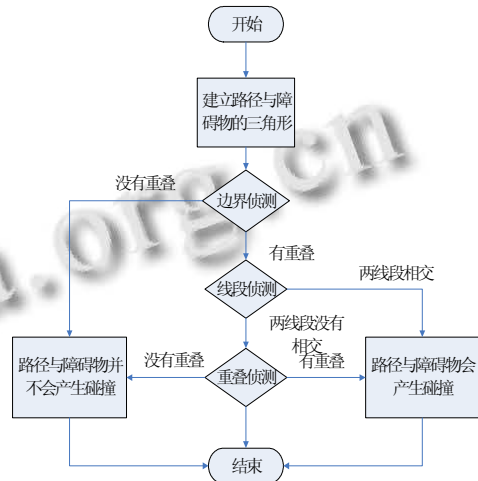


图 1 碰撞侦测的流程图

2.2.1 边界侦测

边界侦测的判断方式是如图 2 所示。假设目前有两个三角形：分别为蓝色三角形 A 与红色三角形 B (其中红色三角形 B 为机器人，蓝色三角形 A 为障碍物)，取出三角形 A 的 3 个顶点中，X 方向坐标的最大值 AXmax 与最小值 AXmin，和 Y 方向坐标的最大值 AYmax 与最小值 AYmin。接着利用这四个值产生蓝色三角形的包覆矩形 (Bounding Box)；同理求出红色三角形的包覆矩形。接着判断这两个三角形产生的包覆矩形 (Bounding Box) 是否有重叠的关系，若发生重叠，则表示两个矩阵中间的三角形可能会有重叠，

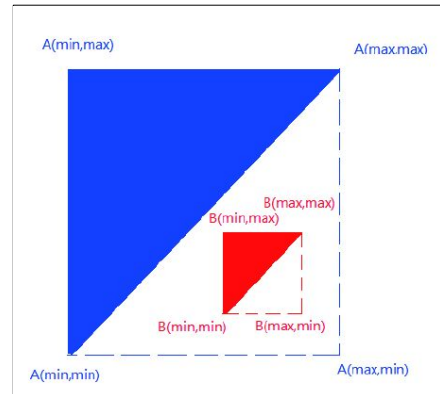


图 2 使用边界判断会产生误判的情况

则导致路径在规划时可能会碰到障碍物，(即当障碍物出现在机器人前进的路径中会阻碍其前进；而当障碍物出现在机器人的后退的路径中，就不会阻碍其前进)，需要再进一步分析；若没有发生重叠，则表示包含在这个两个包覆矩阵中间的三角形并不会发生重叠的关系，可免去其他的判断，降低整体运算过程所消耗的时间。

2.2.2 线段侦测

此一部分主要是弥补前面的边界判断的不足。在边界判断中，利用很粗略的方法作为碰撞的判断，但若出现两个三角形的位置为图 2，则会产生误判，此时就需要线段侦测来进一步的处理。

假设已知四个点 A、B、P、S 的坐标分别为 (A_x, A_y) 、 (B_x, B_y) 、 (P_x, P_y) 及 (S_x, S_y) ，若 \overline{AB} 与 \overline{PS} 相交于点 C，则利用 \overline{AB} 斜率，可得：

$$\frac{C_y - A_y}{C_x - A_x} = \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \quad (2)$$

由于 C 点也落在 \overline{PS} 上，可以利用参数式表达为：

$$C_x = P_x + t(S_x - P_x), \quad C_y = P_y + t(S_y - P_y) \quad (3)$$

将 (3) 中的和带入式 (2) 中，可得：

$$\frac{P_y + t(S_y - P_y) - A_y}{P_x + t(S_x - P_x) - A_x} = \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \quad (4)$$

最终将 t 求出，得到：

$$t = \frac{(P_x - A_x)(B_y - A_y) - (P_y - A_y)(B_x - A_x)}{(S_y - P_y)(B_x - A_x) - (S_x - P_x)(B_y - A_y)} \quad (5)$$

求出的 t 值介于 0 到 1 之间，则表示与有相交，则路径会发生碰撞；反之，则表示与并无相交点。

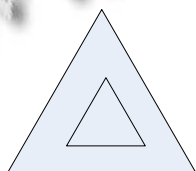


图 3 使用边界侦测与线段侦测无法侦测的情况

2.2.3 重叠侦测

完成前面的边界侦测与线段侦测后，目前还不能判断两个三角形一定会发生碰撞，需进一步探讨分析。

最后一个步骤的分析是判断两个三角形是否有重叠。若有重叠，则表示产生出的路径必定发生碰撞，若无重叠，则路径并不会发生碰撞的可能发生。

如图 4 所示，目前有两个控制点，分别在多边形内部与多边形外部。若控制点所放出的射线和多边形的线段碰撞次数为 0 和偶数，则表示该控制点在多边形的外部；若控制点所放出的射线和多边形的线段碰撞次数为奇数，则表示该控制点在多边形的内部。如图 5 所示，有 2 种较为特殊的情况必须额外考虑：

- ① 最上、下层的边界包含了起点的端点和终点的端点，也就是顶点位置。
- ② 控制点所放出的射线会经过斜率为 0 的边界。若发生上述两种情况，则一样将碰撞的次数加 1。

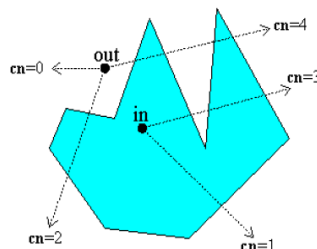


图 4 重叠侦测判断方式

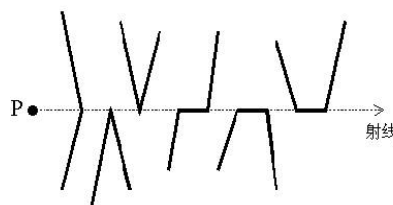


图 5 重叠侦测特例

使用了以上三种侦测方式后，就能够相当准确的判断包覆路径的三角形与环境中的构成障碍物的三角形的关系。

2.3 遗传算法 (GA) [8-10]

2.3.1 基因编码

在本文中，每个基因以坐标的方式储存，来提供给 B 样条曲线描绘路径中的控制点，另外在每一个基因中还包含了一些可用的额外信息，来记录环境中的三角形与目前路径所形成的三角形的所有信息。此信息在 2.1 节中的判断碰撞的过程中已经得到路径与障碍物之间的关系，并选择要用哪一种方式使得目前已发生碰撞的路径能够避开障碍物，达到避障的目的。信息编码如 2.1 如下：

表 1 三角形碰撞信息

三角形端点 有碰撞	A 点发生碰撞	B 点发生碰撞	C 点发生碰撞
三角形线端 有碰撞	线段 AB 碰撞	线段 AC 碰撞	线段 BC 碰撞

其中 A 点为路径所形成的三角形的第一个点，信息都存储在 A 点中。

2.3.2 初始路径产生

为使在无障碍物的工作环境中，能在最短的时间内找到最短直线来连接起点与终点，因此路径在初始时，除了其中一条初始路径的控制点会平均分布在起点与终点的直线路径中，其余初始路径的产生方式皆由起点与终点之间随机分布的控制点决定，以达到路径多样性的特点。当有障碍物时，遗传算法依照初始路径来做部分修正，可以大幅缩短所需的演化时间。

2.3.3 适应度函数

每条路径的优劣评价通过适应度函数来给出。本文中，以路径长度和障碍物相交程度作为评价指标，并使所求解向这些指标渐小的方向进化，所以这里的适应度函数又被称为代价函数。目前所使用的公式为

$$fit = distance \times C_d + punish \times C_p \quad (6)$$

其中，distance 表示路径的所有控制点中依次所形成的欧几里德距离，其公式为：

$$distance = \sum_0^{n-2} \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (7)$$

而 punish 则是 2.1 节利用碰撞侦测所产生的结果。在路径所形成一连串的三角形中，若是其中有三角形与障碍物发生碰撞，则 punish 加 1。全部三角形都侦测后，再将最后所得到 punish 值与 distance 值做加法运算，所得到为适应度的值。为了区分会产生碰撞的路径，在的设定上为一极大值，表示这条路径会发生碰撞，就算路径长度相当短，也是不能够让机械臂安全的到达指定的位置，而这种路径就不能被采用。则是调整路径长度对于适应值变化的参数。本文中设定的适应值越小，则表示该路径越靠近最佳值。

2.3.4 复制

每当一个染色体的适应值函数计算出来后，接下来则进入到复制部分。我们选用复制的方式为 Holland 所提出的轮盘式选择法 (Roulette Wheel Selection)。

轮盘式选择法是将每一个染色体视为轮盘上的一个区域，区域面积的大小则与该个体的适应值好坏成正比，适应值越好则区域面积也越大，被挑选的概率也就相对提高。而概率小的染色体也有一定的机会被挑选出，以防止收敛速度过快而落入区域最佳值。挑选出来的染色体则会放入交配池中，并交给交配运算符作为交配时选择的依据。

2.3.5 交配

交配为遗传算法中的让染色体之间能够达到多样性的运算符之一，一般交配的方式有单点交配、多点交配等，较常使用的方式则为单点交配。本次研究所使用的交配方式为单点交配。一开始从交配池中随机挑选出两条染色体，分别为 A 染色体和 B 染色体，由于染色体在本次实验中的长度并不固定，所以将取较短的染色体来当作切割的基准。若 A 染色体长度较 B 染色体短，扣除红色部分的起点与终点之外，在黄色的部分随机选取一点，来当作切割的基准点。而 B 染色体也会利用此点来做切割的动作。切割后把 A 染色体上半部与 B 染色体下半部分结合，A 染色体下半部与 B 染色体上半部结合，来达到染色体多样性的结果。

2.3.6 突变

突变与交配同为让染色体达到多样性的运算符之一，其最大的不同为交配并不会改变基因中的数量，而是在两两之间互相交换资讯；而突变是在单一染色体中改变其内容，让路径能有较大的变异性。所有染色体中，除了起点与终点外，其他的每个基因都有突变的可能性，也因此让每个基因都有被改变的机会。

突变除了能让路径有机会避开障碍物，也能让目前安全的路径能够在缩短其距离，让目前的路径能够更接近最佳解的路径。本次实验中使用几种突变方式，分别为安全随机扰动、区域随机扰动、插入控制点、以及移除控制点四种方式

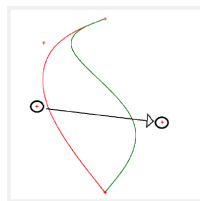


图 6 安全随机扰动产生的路径

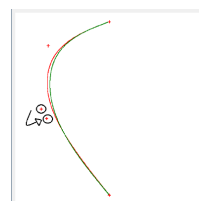


图 7 区域随机扰动产生的路径

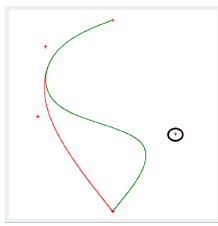


图 8 插入控制点后所产生的路径

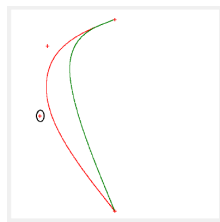


图 9 删除控制点后所产生的路径

避障路径。



图 10 实验中所使用的环境图形

3 实验与仿真

3.1 实验器材

硬件平台：INTEL Core TM 2 Duo CPU T6600，2GB 的 RAM 的平台上，采用 Window Xp 操作系统。
 软件平台：Microsoft Visual 2007。

3.2 遗传算法的相关参数的设定

染色体数目：100 条染色体。

基因数目：15 个基因，包括 3 个起始点的控制点、3 个终点控制点、9 个可变动的控制点。

起点位置：环境的中间上面，坐标为 (300,30)。

终点位置：环境的中间下面，坐标为 (300,570)。

Generation：可执行的迭代数最多为 300 次。

Selection 保留值：每次将保留 50%的染色体，其他 50%则由交配与突变来产生。

Crossover 概率：每次随机挑选出来的两条染色体进行交配的几率为 80%。

Mutation 概率：每个基因会产生突变的几率为 10%。

结束条件的迭代数：当每个世代的最好的适应度连续 50 次都没改变，就人物找到最适合的解，并停止运算。

3.3 仿真结果

实验环境：中间存在一个 U 字型的障碍物如图 10 所示，起点位于环境上方中间的位置，终点位于环境下方中间的位置。

实验目的：此障碍物是为了验证算法是否能够避开两个障碍物，并且能够在左右两边都有障碍物的情况下，找出连接起点至终点的平滑避障路径。

表 3.1 列出了实验分别执行 20 次后所得的实验结果与数据。图 11 和图 12 分别为 20 次实验中，适应度最佳和适应度最差的实验结果所产生的避障路径。而图 13 和图 14 则为 20 次实验中，迭代数最佳与最差的

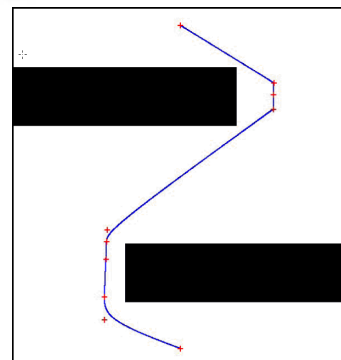


图 11 实验中适应值最佳的避障路径

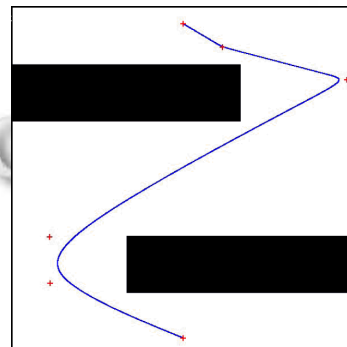


图 12 实验中适应值最差的避障路径

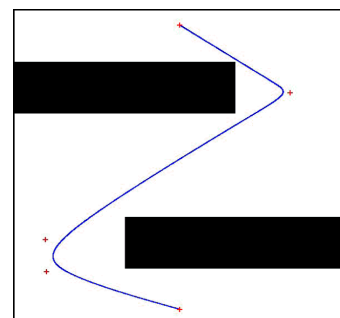


图 13 实验中迭代数最佳的避障路径

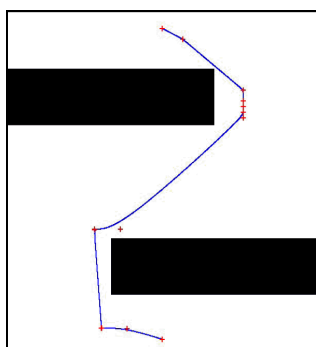


图 14 实验中迭代数最差的避障路径

表 2 实验中最佳与最差适应度

最佳适应度 (迭代数)	最差适应度 (迭代数)	平均适应度 (迭代数)	标准差 (迭代数)
26 (75)	36 (204)	29.9(109.1)	3.0418(29.0116)

3.3 本方法与其他方法的比较

本算法与混合人工势场—遗传算法的机器人避障路径规划的算法作比较，因为混合人工势场—遗传算法^[26]在机器人避障路径规划中，对避免局部最优解、寻优速度、全局搜索中在同类遗传算法结合其他算法中有一定的优势。

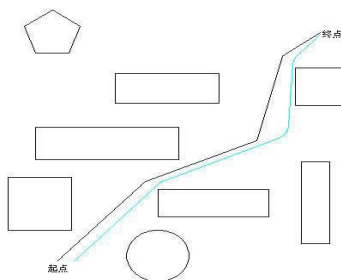


图 15 为本算法与混合人工势场—遗传算法的避障路径规划对比试验

表 3 本算法与混合人工势场—遗传算法的避障路径规划的结果

	路程 (cm)	时间 (t)	最大速度 (cm/s)
1、	284.63	3.016	146.2
2、	288.09	2.982	124.7

通过上面的实验结果可以分析出，在起点和终点位置相同的情况下，两种算法的路程和时间上并没有太大的差别，但是最大速度上有较大的差距。说明本

算法在保证避障的前提下，能保持比较平稳、高速的运行。

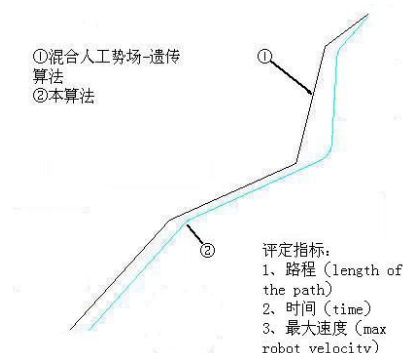


图 16 为本算法与混合人工势场—遗传算法的避障路径规划对比试验(示意图)

4 结论

本文结合遗传算法与 B 样条曲线用于平滑避障路径规划，利用 B 样条曲线的特点，并结合了三角形碰撞侦测来简化路径和障碍物之间的碰撞侦测的复杂度，通过碰撞侦测中的信息来躲避障碍物；对于路径中发生绕圈或者转角处过于尖锐的问题，算法也有较好的解决方法。通过实验仿真证明了算法的有效性。

参考文献

- 1 Lozano-Perez T. spatial Planning:A Configuration Approach. IEEE Transactions on Computer,1983,C-32(2):108-120.
- 2 Latombe JC. Robot Motion Planning. Norwood, Kluwer MA. Academic Publishers,1991.
- 3 Piegl LA, Tiller W. The NURBS BOOK. 2nd ed. Springer-Verlag, NEW York, 1997.
- 4 Sugihara K, Smith J. Genetic Algorithms for Adaptive Motion Planning of an Autonomous Mobile Robot. Proceedings of IEEE international Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997. 138-143.
- 5 Ashiru I, Czarnecki C, Routen T. Characteristics of a Genetic Based Approach to Path Planning for Mobile Robots. Network J. and Computer Applications, 1996, 19:149-169.
- 6 Gallardo D, Colomina O, Florez F, Rize R. A Genetic Algorithm for Robust Motion Planning. Proc. of the 11th international conference on Industrial and Engineering Applications of artificial Intelligence and Expert Systems, 1998, 2: 115-121.

- 7 De Boor C. A Practical Guide to Splines.114–115. Springer-Verlag, 1978.
- 8 Holland JH. Adaptation in Natural and Artificial System, 1975.
- 9 Lawrence D. Genetic Algorithm and Simulated Annealing, 1987.
- 10 Goldberg DE. Genetic Algorithms—in Search, Optimization and Machine Learning, 1985.
- 11 Tu J, Yang S. Genetic Algorithm Based Path Planning for a Mobile Robot. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, Sept. 2003.1221–1226.
- 12 李克东,刘国栋,任华.基于蚁群算法的机器人路径规划.微计算机信息,2009,25.
- 13 朱庆保.复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法.自动化学报,2006,32(4):586–593.
- 14 庄晓东,孟庆春,高云,等.复杂环境中基于人工势场优化算法的最优路径规划.机器人,2003,25(6):531–535.
- 15 岳富占,崔平远,崔祐涛.基于改进蚁群算法的星球探测机器人路径规划技术.控制与决策,2006,21(12):1438–1449.
- 16 陈雄,袁杨.一种机器人路径规划的蚁群算法.系统工程与电子技术,2008,30(5):952–955.
- 17 Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics–B,1996, 26(2):29–41.
- 18 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展.控制与决策,2004,19(12):1321–1326.
- 19 Tian LF, Collins C. An Effective Robot Trajectory Planning Method using a Genetic Algorithm. Mechatronics, 2004,14(5):455–470.
- 20 Namgung I, Duffy J. Two Dimensional Collision-Free Path Planning using Linear Parametric Curve. Journal of Robotic Systems, 1998,14(9):659–673.
- 21 Jolly KG, Sreerama R, Vijayakumar KR. A Bezier Curve Based Path Planning in a Multi-Agent Robot Soccer System without Violating the Acceleration Limits. Robotics and Autonomous Systems, 2009,57(1):23–33.
- 22 Namgung I. A global Collision-Free Path Planning using Parametric Parabola Through Geometry Mapping of Obstacles in Robot Work Space. Journal of Mechanical Science and Technology,1996,10(4):443–449.
- 23 Magid E, Keren D, Rivlin E, Yavneh I. Spline-Based Robot Navigation. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China,Oct. 2006. 2296–2301.
- 24 Eren H, Chun CF, Evans J. Implementation of the Spline Method for Mobile Robot Path Control. Proceedings of the 16th, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 1999,2:739–744.
- 25 张帆,周庆敏.基于遗传算法的移动机器人路径规划仿真.微计算机信息,2008,24.
- 26 况菲,王耀南.基于混合人工势场—遗传算法的移动机器人路径规划仿真研究.系统仿真学,2006,18.
- 27 陈华华,杜歆,顾伟康.基于神经网络和遗传算法的机器人动态避障路径规划.传感技术学报,2004,17.

(上接第 58 页)

参考文献

- 1 毛盾,郭丙君.基于模糊 PID 控制的 Cuk 变换器研究.自动化仪器与仪表,2010,3.
- 2 范晓聪,方建安.基于模糊 PID 控制的光伏并网发电系统设计.机电工程 2010.9.9.
- 3 嵇保健,赵健锋.DC/DC 变换器数字控制方法研究.电力电子技术,2010,4.4.
- 4 梁琬.PWM/PFM 型降压 DC–DC 电压变换器的研究与设计[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2010.
- 5 夏顺贵,等.DC/DC 变换器的模糊控制方法研究[硕士学位论文].无锡:江南大学,2008.
- 6 Prodie A, Maksimovic D. Mixed-signal Simulation of Digitally Controlled Switching Converters. IEEE Workshop on Computers in Power Electronics,2002,(3–4).
- 7 蔡自兴,等.模糊控制原理及应用.北京:清华大学出版社,2007.
- 8 刘曙光,等.模糊控制技术.北京:中国纺织出版社,2001.
- 9 Peterehev AV. Digital Pulse-width Modulation Control in Power Electronic Circuit:Theory and Applications. Berkeley, USA, University of California, Berkeley, 2005.
- 10 邱涛.基于 DSP 的双 PWM 变频调速系统研究[硕士学位论文].广州:广东工业大学,2006.
- 11 张强.风力发电并网变流器工程问题研究[博士学位论文].合肥:合肥工业大学,2006.
- 12 许颇,张崇巍,张兴.三相光伏并网逆变器控制及其反孤岛效应.合肥工业大学学报,2006.9. 9.
- 13 侯庆明.中小型永磁直驱风力发电控制系统的设计和仿真[硕士学位论文].沈阳:沈阳工业大学,2006.