

了相应改进,从而完成曲线形套装的路径规划,并避免了被套零件局部凸凹变化引起搜索停滞不前和算法假失败情况。

2 曲线形套装路径规划算法

2.1 曲线形套装的特征分析

平动式装配是零件只做直线式或曲线式平移运动,零件本身不要改变方向便能进行装配。而当零件要套入一个弯曲的轴或零件时,套装零件装配到目标点除了要顺着被套零件曲线形移动还要配合调整自身的方位角。下面结合 EAST 三环套装来说明曲线形套装的特点。

EAST(原名 HT-7U)是国家将来研究核聚变的实验装置,属于国家大科学工程^[7]。目前正在进行 EAST 总装前期零件的检验和装配规划,其关键部件的装配主要采用一种三环套装方案^[8],方案规划了真空室、冷屏、纵场的装配方案。其中真空室近似环形,在真空室外壁水平方向留有 16 个不相同的管口,垂直方向上下也各有 16 个不相同的管口,在每个管口边缘附有高约 50mm 的领圈。整个冷屏由 16 个形状一致的 1/16 冷屏安装件组成,1/16 冷屏安装件内环窄,外环宽,每个 1/16 冷屏安装件都是从真空室 1/16 缺口处套入,真空室与冷屏安装件的装配间隙很小,套装时两边最窄处不足 20mm。冷屏安装完之后,与冷屏有相似形状的 1/16 纵场安装件也按同样的方式在冷屏套上之后再行套装。三个装配件的几何形状分别如图 1 所示。各部件由于尺寸大、吨位重,装配过程中严格要求不能发生碰撞,以免产生变形。



图 1 真空室、冷屏和纵场的几何形状

图 2 是冷屏套装过程示意图。图中假定冷屏的内外壁以两个质点表示,则冷屏从起始点 A、A' 套装到 B、B', 套装过程中冷屏要绕过管口缺口和领圈,如图 2 放大区冷屏外壁 A 点开始朝目标移动的一段轨迹。这种装置装配件的套装属于一种比较复杂的套装,已经不再是光滑的环形套装而成为了曲线形的套装。这种套装的主要特点有:

(1) 装配间隙小,套装零件活动范围小。这样套装时能够连续平移的距离小,并且旋转角度也不能过大。

(2) 被套零件有局部不规则的凸凹变化。套装时有可能需要局部比较小的回退。

(3) 套装的路径呈曲线形。真空室整体是一个近似环形,但在环形体的上下和外壁的管口装有领圈,使套装时的间隙比较小,局部凸凹变化,从而使套装的路径变成曲线形。因此套装时要根据被套零件的几何形状,对套装零件要求多次改变方向并配合旋转。

目前基于虚拟现实技术和仿真技术建立了 EAST 装配仿真环境,但还只能对三环套装方案进行交互式的路径规划,需要人工控制行车对部件进行起吊,当系统通过碰撞检测算法检验出下一步套装部件即将发生碰撞时,则会提醒用户,只能人为地操纵套装部件改变一定方向或者旋转一定角度才能继续进行平移,由于在套装时装配间隙较小,只能控制行车以很慢

的速度运动。整个装配规划过程便非常耗费人力和时间。

2.2 A* 搜索算法

在自动装配路径规划中,A* 搜索算法是一种比较常用的方法,它的一般过程可概述为^[9]:

- (1) 将起始点放入到 open 表中;
- (2) 在 open 表中取出第一个搜索节点;
- (3) 判断 open 表是否为空。如果为空,算法失败;
- (4) 判断当前点是否是目标,如果是目标,算法成功结束;
- (5) 将运动体移动到这个节点上,判断是否与障碍物干涉,运动体回退,放弃当前点,并将其从 open 表中删除,转到步骤(2);
- (6) 将当前点放入到 closed 表中;
- (7) 扩展当前节点,并将新产生的节点放入到 open 表的尾部;
- (8) 根据启发函数对 open 表排序;
- (9) 转到步骤(1)。

在二维空间或者三维空间下使用 A* 搜索算法,扩展节点是非常重要的,在装配路径规划研究中,对 A* 搜索算法也进行过一些改进^[4,5]。虽然这些改进减少了算法搜索空间和复杂性,提高了算法的效率和成功率,但不能调整装配零件的方位角,因此不能直接用于解决曲线形套装的路径规划问题。

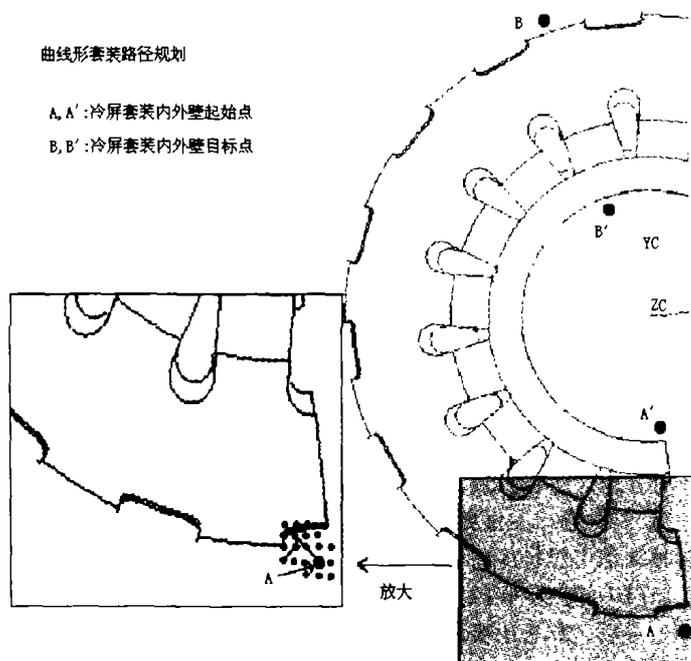


图 2 冷屏间套装过程

2.3 可调整方位角的改进 A* 算法

从曲线形套装的特点可以看出,它其实是曲线形平动和绕零件中心旋转两种操作的叠加,目前的 A* 搜索算法是以固定步长或者变步长向四周扩展节点,可以解决曲线形平动装配问题。而如果对扩展节点方法加以改进,扩展节点时分别以一定的位置和角度偏移量加以扩展,因此搜索到的最佳节点既可能是平移也可能是旋转,从而使零件在平移遇到障碍物时可以让自身旋转。但这样扩展则会引出新的问题:(1) 原来周边扩展的与障碍物干涉的点经过旋转之后可能没有了干涉,因此就要重新扩展周边点。(2) 扩展节点是旋转操作,代价的计算问题,可以用当前节点的代价作为初始代价。(3) 如果角度要绕多个轴旋转,则问题复杂度会呈指数上升,因此实际问题中尽量减少旋

表 1 几种碰撞检测算法对冷屏套装时花费的时间比较

碰撞检测	静态部件的三角形个数	运动部件的三角形个数	平均碰撞时间
OpenInventor 中的碰撞检测算法	63780	4990	62s
八叉树碰撞检测算法	63780	4990	56s
UG 硬干涉检查	对应的 CAD 模型	对应的 CAD 模型	2s(包括通信时间)

转方向。(4)如果被套装零件有局部凸凹变化,要防止搜索停滞不前或者算法假失败情况,这里是不从 open 表删除当前节点,而是对其代价增加一个适当值。

对于曲线形套装,使用 A* 算法既要达到目标又要防止上述问题,因此对 A* 算法加以改进,首先增加 deleted 表,open、closed、deleted 表定义为包含如下变量的结构:

$PointSet(int\ px,int\ py,int\ pz,float\ pxr,float\ pyr,float\ pzt,$
 $float\ pt,int\ pid);$

其中 px,py,pz 分别为扩展后的 x,y,z 坐标, pxr,pyr,pyz 分别是绕 x,y,z 轴的旋转角度, pt 存储代价值, pid 用于标识平移和旋转两种操作,1:表示平移,2:表示旋转。

启发式函数仍然可使用计算当前点和终点距离的公式。改进后的 A* 搜索算法主要步骤可以概述如下:

- (1)将起始点放入到 open 表中;
- (2)判断 open 表是否为空。如果为空,算法失败;
- (3)在 open 表中取出第一个搜索节点;
- (4)如果 pid 等于 1,将套装零件平移到这个点,检测与被套装零件是否干涉,如果干涉,套装零件回退,放弃当前点,将当前点从 open 表删除,并增加到 deleted 表中,转到步骤(2);
- (5)如果 pid 等于 2,将套装零件旋转 pr 角度,检测与被套装零件是否干涉,如果干涉,套装零件回旋,放弃当前点,将当前点从 open 表删除,并增加到 deleted 表中,转到步骤(2);
- (6)将当前点加入到 closed 表中,并将当前点对应 open 表的 pt 项增加一个适当增量;
- (7)判断当前点是否是目标,如果是目标,算法成功结束;
- (8)扩展新的节点。如果当前节点是旋转操作,则进行平移和旋转扩展;如果是平移操作,对于旋转扩展则首先判断 open 表是否有该节点的旋转扩展,如果没有才扩展,对于位移扩展则首先判断 open 表和 deleted 表任一表中是否存在该扩展,都不存在时才进行扩展。将新产生的节点放入到 open 表的尾部;
- (9)根据启发函数对 open 表排序,对于代价相等的节点可以根据优先级排序;
- (10)转到步骤(2)。

最后,算法中要注意套装的起点和终点不能有干涉现象,否则会出现算法失败或者不收敛现象。

2.4 快速碰撞检测

利用 A* 搜索算法进行装配路径规划,每一步搜索中都要进行一次碰撞检测,因此碰撞检测算法的效率对提高整个装配规划的效率有至关重要的作用,而用于装配规划的碰撞检测算法又要求有很高的精确度,否则会造成难以挽回的损失。目前虽然有对碰撞检测算法的速度进行改进的方法,但是这些算法效果并不明显而且难以实现,基于并行的碰撞检测算法^[9]则要求要有相应的并行化环境。当前还处于研究阶段,没有成熟的并行碰撞检测算法得以应用。因此作者利用 CAD 软件的硬干涉检查代替虚拟环境中的碰撞检测算法。使用基于 TCP/IP 的 socket 通信技术负责 CAD 软件与虚拟环境的通信。装配路径规划时,首先打开利用 CAD 软件的二次开发编写的一个集 CAD 模型加载、移动、旋转、干涉检查和与虚拟场景通信的程序,并与虚拟场景连接。虚拟场景可以控制 CAD 软件中相应部

件的加载、移动、旋转、干涉检查,并要求两者的坐标定义、参数尺寸、初始位置一致。作干涉检查时,先让 CAD 模型进行相对位移或者旋转,然后作硬干涉检查,如果没有干涉则返回 0,否则 CAD 模型进行回退或者回旋,然后返回 1。如果返回 0,虚拟场景中的部件则进行相应的平移或旋转,否则不对虚拟场景中的部件进行任何操作。表 1 是几种碰撞检测算法对冷屏套装时花费的时间比较。

3 算法实现

该路径规划方法在 EAST 的冷屏套装中得以成功实现,首先假定真空室水平安装在 EAST 装配大厅,在真空室的缺口处设置冷屏的起点和初始角度,在系统中指定目标点,如图 3 所示,由于真空室是水平放置,套装时 z 轴方向不会发生位移,另外由于冷屏套装到真空室缺口的左半周时,冷屏主要绕 z 轴作顺时针旋转,因此在规划左半周套装时,open、closed、deleted 表只需定义成包含如下变量的结构:

$PointSet(int\ px,int\ py,float\ pzt,float\ pt,int\ pid);$

当对 open 表排序时,对于代价相等的旋转节点优先顺时针旋转,对于启发式函数选用距离函数,即根据当前点和终点计算两点之间的距离,并设置平移步长 10mm,每次旋转角度为 5° ,然后根据改进后的 A* 搜索算法,规划了一个 1/16 冷屏左半周的套装。规划当中,由于算法允许冷屏可以沿原来经过的点返回,因此能够顺利避开领圈高约 50mm 的障碍。规划结果如图 4 所示,图中的曲线即为套装路径规划之后冷屏中心点的行走轨迹。从图 4 中可以看出算法规划出来的路径比较曲折,因此可以根据如文献[10]提到的一些原则再进行适当的优化,最后得到套装的装配路径。

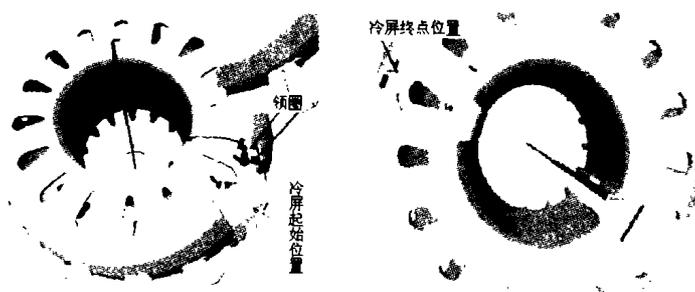


图 3 冷屏起点和终点位置



图 4 冷屏套装规划结果

由于对 A* 搜索算法进行了改进,曲线形套装路径规划中避免了被套装零件局部凸凹变化引起搜索停滞不前和算法假失败情况。并由于使用了 CAD 软件的硬干涉检查功能代替虚拟场景中的碰撞检测算法,加快了碰撞检查的速度,从而提高了套装路径规划的效率。上述例子中,真空室的半径即真空室中心点到回环外壁和内壁之间的中点位置为 1.7m,也就是冷屏套装时冷屏中心经过的大概位置,因此左半圈的套装路径长度约有 5.34m,在进行的一个 1/16 冷屏规划中平均用时 30 分钟,而以前手动规划则要视用户的熟练程度,平均花费时间超过 1 个小时,因此算法能够较好地满足对 EAST 三环套装方案的自动规划要求。算法除了效率上提高之外,从应用中还可以看出算法具有以下一些特点:

(1)可以顺利地避开局部凸凹引起的障碍,如周边扩展的与目标靠近的几个点都不可达,即使部件旋转也会检测到冲突,因而在这种情况下套装零件能够安全回退,不会出现假失败情况。

(2)算法中能使套装零件尽可能不回退,算法中对已经搜索过的节点的代价增加一个适当值,以便选择当前节点附近没有经过的节点,避免搜索停滞不前的现象。

4 结论

论文针对曲线形套装的特点,在传统 A* 搜索算法基础上进行了扩充和改进,解决了曲线形套装路径规划问题,并且算法能够顺利避开局部凸凹引起的障碍和防止算法假失败情况。又由于使用 CAD 软件的硬干涉检查功能代替现有碰撞检测算法,因此该路径规划算法对套装的路径规划有比较高的效率。可该算法还有一些缺点和不足:(1)对于曲线形套装,由于难以找到最好的启发式函数,目前算法规划出来的装配路径能保证

是可行的但不能保证是最优的;(2)算法允许零件回退,对于起始点离目标点很近,但套装到目标点需要经过比较远的点才能到达的套装情况,目前算法还不能正确规划出来。因此对于更复杂的曲线形套装,算法还有待于进一步研究和改进。

(收稿日期:2005 年 3 月)

参考文献

- 1.王志文,郭戈.移动机器人导航技术现状与展望[J].机器人,2003;25(5):470-474
- 2.李磊,叶涛等.移动机器人技术研究现状与未来[J].机器人,2002;24(5):475-480
- 3.H Hirukawa, Y Papegay, T Matsui. A Motion Planning algorithm for convex polyhedra in contact under translation and rotation[C]. In: Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994;4:3020-3027
- 4.M Foskey, M Garber, M Lin et al. A Voronoi-Based Hybrid Motion Planner[C]. In: IEEE/RSJ International Conf on Intelligent Robots and Systems, 2001
- 5.田立中,付宜利等.装配路径规划中基于动态坐标的 A* 搜索算法[J].计算机集成制造系统 CIMS, 2002;8(4)
- 6.储林波,王伟,马玉林.基于方向匹配的装配路径规划算法[J].南京航空航天大学学报, 1999;31(6):650-654
- 7.Y X Wan, P D Weng, J G Li et al. HT-7U Superconducting Tokamak: Physics design, engineering Progress and schedule[C]. In: 19th IAEA Fusion Energy Conference, France, 2002-10
- 8.HT-7U 总装工艺规程.上海家隆电子高能物理开发有限公司, 2003-11
- 9.范昭炜,万华根,高曙明.基于并行的快速碰撞检测算法[J].系统仿真学报, 2000;12(5):548-552
- 10.王世伟,谭建荣等.虚拟环境中面向装配设计的数据场景图研究[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2003;15(1):76-80

(上接 109 页)

表 4 类别文章数开放性测试结果

人工分类	自动分类	正确分类	查全率(%)	查准率(%)	F ₁ 值(%)	
自然环境	73	61	52	71.23	85.25	77.61
城市建设	34	32	27	79.41	84.38	81.82
农业	227	204	192	84.58	94.12	89.10
副业	93	87	79	84.95	90.80	87.78
工业	127	113	101	79.53	89.38	84.17
运输	68	53	49	72.06	92.45	80.99
电信	20	15	14	70.00	93.33	80.00
财税	71	63	55	77.46	87.30	82.06
金融	68	65	60	88.24	92.31	90.23
第三产业	151	134	115	76.16	85.82	80.70
外贸	87	80	73	83.91	91.25	87.43
中国文化	56	35	32	57.14	91.43	70.33
报纸	33	29	27	81.82	93.10	87.10
出版	35	32	29	82.86	90.23	86.57
文学艺术	148	138	128	86.49	92.75	89.51
自然科技	41	32	27	65.85	84.38	73.97
教育	101	82	78	77.23	95.12	85.25
医药卫生	95	83	70	73.68	84.34	78.65
体育	102	95	83	81.37	87.37	84.26
历史	53	49	40	75.47	81.63	78.43
世界	159	130	95	59.75	73.08	65.74
各洲	107	89	79	73.83	88.76	80.61
日报言论	51	39	34	66.67	87.18	75.56

表 5 分类器整体性能

	微平均(%)	宏平均(%)
查全率	76.95	76.07
查准率	88.45	88.53
评估值	82.30	81.65

从表中可以看出,分类器性能特别是查准率,还是比较令人满意的。(收稿日期:2004 年 8 月)

参考文献

- 1.Jiawei Han, Micheline Kamber. 范明, 孟小峰等译. 数据挖掘概念与技术[M]. 机械工业出版社, 2001
- 2.陈京民. 数据仓库与数据挖掘技术[M]. 电子工业出版社, 2002
- 3.David Hand. 张银奎译. 数据挖掘原理[M]. 机械工业出版社, 2003
- 4.刘明吉, 王秀峰, 饶一梅等. Web 文本信息的特征获取算法[J]. 小型微型计算机系统, 2002;23(6):683-686
- 5.陈明. 神经网络模型[M]. 大连理工大学出版社, 1995
- 6.Fabrizio Sebastiani. Machine Learning in Automated Text Categorization[J]. ACM Computing Surveys, 2002;34(1)
- 7.Y Yang, X Liu. ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 1999
- 8.Y Yang, J Pedersen. A comparative study on feature set selection in text categorization[C]. In: Proc of the 14th International Conference on Machine Learning, Nashville, TN, Morgan Kaufmann, 1997;412-420