

## 高维构型空间线性图元的自适应连续碰撞检测

吴鸿敏, 张国英, 管贻生, 陈 新

(广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 为了高效地建立无碰撞路径地图, 针对如何在构型空间中构建无碰撞线性图元的问题, 提出了自适应连续碰撞的检测算法。该算法在对线性图元进行连续碰撞检测之前, 通过对比同一构型下两物体间欧氏距离的最小值及不同构型下物体最大移动距离的关系, 来决定是否对线性图元采取二等分分割的细分检测, 有效地减少了冗余的碰撞检测次数, 提高地图构建效率。利用高维机器人系统进行仿真验证, 在给定机器人起始和终止构型的情况下规划出无碰撞路径, 所提的自适应碰撞检测算法相比于固定检测精度的方法的计算效率提高 25.1% ~ 84.1%。

**关键词:** 构型空间; 概率路径地图; 自适应碰撞检测; 运动规划; 多机器人系统

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2017)-06-0769-07

## Adaptive Continuous Collision Detection for Linear Segments in High Dimensional Configuration Space

WU Hongmin, ZHANG Guoying, GUAN Yisheng, CHEN Xin

(School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to efficiently build the collision-free roadmap, an adaptive continuous collision detection algorithm is proposed to construct the collision-free linear segments in configuration space. Before performing continuous collision detection for the linear segments, the proposed method compares the minimal Euclidean distance of two static objects in a fixed configuration and the maximal displacement distance of specific objects in different configurations, to determine whether or not to bisect the linear segments for fine detection. So, the times of redundant detections are reduced effectively, and the mapping efficiency is improved. The proposed method is demonstrated by planning the collision-free path between the given starting and terminal configurations for a high dimensional robot simulation system. As a result, the computational efficiency of the proposed adaptive collision detection method is 25.1%~84.1% higher than the methods of fixed detection resolution.

**Keywords:** configuration space; probabilistic roadmap; adaptive collision detection; motion planning; multiple robots system

### 1 引言 (Introduction)

目前, 多工业机器人工作站的控制思路几乎都受限于跟踪预先示教规划好各自的运动路径, 即在静态结构化环境下进行运动规划。动态环境下的无碰运动规划方法主要有无碰构型空间 C-space (configuration space) 规划法、单元分解法、路径地图法、人工势场法以及概率地图和快速扩展随机树<sup>[1-3]</sup>等基于采样的规划方法。其中, 构型空间规划法使用最为普遍。所谓**构型空间规划法**, 就是

根据系统中变量的个数构建同等维数的构型空间, 可以形象地描述每一点表示系统的一个状态。借助构型空间的概念, 文[4-8]从不同的应用角度提出了基于采样的概率路径地图 PRM (probabilistic roadmap) 运动规划法, 该方法通过在构型空间中随机取样, 并检查所取样点是否符合给定条件, 把构型空间分割成无碰构型空间、碰撞构型空间及边界构型空间, 然后通过构建无碰构型空间中由路标点  $V$ 、边图元  $E$  构成的连通图  $(V, E)$ , 将连续空间

基金项目: 国家自然科学基金 (51375095); 国家基金委广东省联合基金重点项目 (U1401240); 国际科技合作专项 (2015DFA11700); 广东省自然科学基金重点项目 (S2013020012797); 广东省前沿与关键技术创新专项资金 (2014B090919002, 2015B010917003, 2016B090911002, 2015B090922003)。

通信作者: 管贻生, ysguan@gdut.edu.cn 收稿/录用/修回: 2017-02-14/2017-06-11/2017-06-29

的规划问题转换成拓扑空间的规划问题,使路径规划问题的复杂度与环境的复杂程度和规划空间的维数无关,而主要依赖于概率路径地图的构建与连通,以规划出机器人由初始构型到目标构型的无碰撞路径.另外,PRM 运动规划器的发展依赖于良好的碰撞检测器对连通图中随机取样构型点的边图元(局部路径,通常由直线描述)进行连续碰撞检测.潘佳<sup>[9]</sup>等把构型空间的构建与优化问题转换为机器学习问题,然后使用主动学习对近似构型进行高效与全面计算,最后使用基于并行图形处理器(GPU)的算法来加速构型空间内的优化计算操作,该研究充分体现了机器人构型空间运动规划的重要性.采用此类方法进行运动规划时无疑需要对静态障碍物、外围设备及机器人本体进行几何描述,以用于连通图构建过程中路标点及连续边图元的碰撞检测.

静态碰撞检测主要是找出 2 个不同状态下系统物体间是否存在碰撞的情况,而动态碰撞检测要求系统在连续构型状态下都能保持无碰,就机器人而言,要求检测机器人在连续路径过程中保持无碰.主要有以下 4 种方法<sup>[10]</sup>.

- 特征跟踪:特征是指两刚体关键的顶点、轮廓和面等,通过检测特征对间是否连续地保持分离来判定是否碰撞.特征的选择主要依赖于运动的物体,并且所选特征需具有良好的转换关系.特征检测广泛应用于在线实时碰撞检测,如:借助外围传感器数据对环境进行建模实现特征跟踪.但是,在实际工作环境中对于具有串行运动链的机器人操作臂,难以实现特征跟踪的碰撞检测.

- 包围体层次树:此方法首先是定义好刚体不同厚度的包围体(轴对齐包围盒、方向包围盒、扫掠球包围体、离散有向多面体)层次树,用于逼近描述几何刚体.然后,采用层次树展开的遍历方式进行多机器人碰撞检测<sup>[11-12]</sup>.当障碍物与机器人层次包围树的距离逐渐缩小时,机器人的包围体体积也逐渐减小.当相对距离大于固定的检测精度时,定义为无碰撞状态;反之,为碰撞状态.检测过程中,如果包围树层次树父节点不存在碰撞,则无须对子节点进行检测,有效地提高碰撞检测的速度.此方法广泛用于静态碰撞检测、固定精度的动态检测,但对于连续动态的碰撞检测具有一定局限性.

- 扫描体:扫描体相交法主要是把各自机器人的运动路径离散成多段,并对机器人每段图元所扫描过的区域进行几何描述,如图 1 所示.然后,检

测不同机器人间路径图元的扫描体是否发生碰撞.此方法需要利用几何模型描述机器人的扫描体,是非常困难的且耗时高,特别对于具有 6 自由度的机器人操作臂更是如此.故此方法用于多机器人动态碰撞检测具有一定局限性.

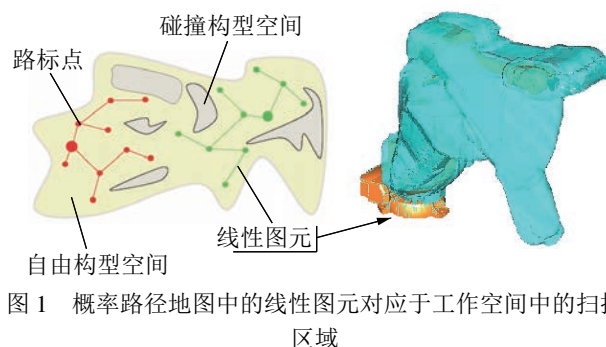


图 1 概率路径地图中的线性图元对应于工作空间中的扫描区域

Fig.1 The swept volume zone in workspace is corresponding to a linear segment in PRM

- 轨迹优化:机器人轨迹参数化的方法可实现无碰运动规划,主要是利用时间参数把机器人运动路径描述成多项式的形式,然后,通过构造关于时间的离散控制系统调度方式,避免机器人间的碰撞<sup>[13-14]</sup>.而对于机器人与静态物的路径规划避碰,文[15]提出基于给定任务点的机器人控制系统,通过启发式算法实现任务点的分配及把路径规划问题转换成旅行商问题,通过迭代的方法有效地实现了多机器人最小加工周期时间的无碰路径规划.但是,对于高维的机器人路径点(位置与姿态)难以构建完备的参数化多项式,所建立的非线性问题是非完备的,存在无解的情况.

目前已有许多较成熟的算法应用于静态碰撞检测,如:包围盒层次树算法<sup>[16]</sup>.但是,对于连续碰撞检测在实际实用中仍存在大量的问题,另外,绝大部分的 PRM 规划器依然采用固定检测精度  $\varepsilon$  的静态包围树层次(BVH)方法进行碰撞检测,造成难以选择合适的检测精度值,严重耗时,无法保证绝对的无碰撞.

本文针对机器人高维构型空间的概率地图线性图元连续碰撞检测的问题,提出了自适应动态调整取样精度的方法,优化 PRM 无碰构型空间连通图的构建,避免了上述提到的难以选取碰撞精度的问题.该方法通过对比同一构型下两物体间欧氏距离的最小值及不同构型下物体最大的移动距离的关系,自适应动态调整检测精度以决定概率地图中两无碰路标点间是否需要二等分分割,高效地实现线性图元的碰撞检测.

## 2 动态碰撞检测 (Dynamic collision detection)

### 2.1 固定精度的动态碰撞检测

为了把静态层次包围树检测技术<sup>[17]</sup>扩展到动态碰撞检测中, 首先, 定义不同包围厚度  $d$  的  $n$  自由度机器人连杆膨胀几何模型系列, 如图 2 所示. 包围盒检测技术要求各机器人连杆的碰撞检查构型间的欧氏距离必须不大于  $2d$ , 即机器人模型各连杆上点的运动距离不大于  $2d$ , 否则, 有可能出现遗漏的检测区域. 为了提高检测的效率, 实际应用中往往取逼近  $2d$  的区域点作为检测点. 因而, 关于构型空间中线性图元的连续碰撞检测, 问题是如何检测图元的中间过渡的碰撞状态以实现用最少的检测次数达到所需的检测精度.

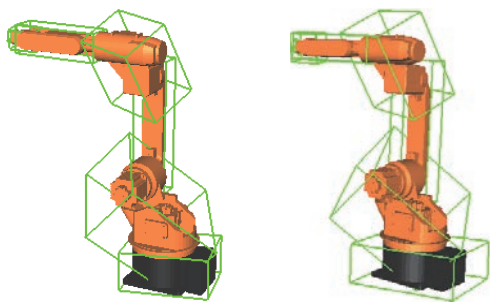


图 2 不同厚度包围盒模型

Fig.2 The bounding boxes with different thickness

由计算机图形学可知, 几何刚体可以定义成 3 维点集的形式, 以便于碰撞检测. 简单来说, 假设某系统的刚体由包围盒层次树描述, 只做平移运动, 那么刚体由起始构型  $\Phi_a$  运动到目标构型  $\Phi_b$  的最大的偏置距离为长方体 8 组顶点欧氏距离的最大值  $T(\Delta\Phi)$ . 当移动距离为  $2d$  时, 映射到构型空间的运动距离  $\Delta\Phi_{\text{step}}$  为

$$\Delta\Phi_{\text{step}} = \frac{\Delta\Phi}{T(\Delta\Phi)} 2d \quad (1)$$

同理, 对于旋转关节, 若不考虑连杆的宽度, 连杆的最外端点由起始构型  $\Phi_a$  运动到目标构型  $\Phi_b$  的偏置距离, 如图 3 所示, 定义为:  $r - r \cos(\Delta\Phi/2)$ .

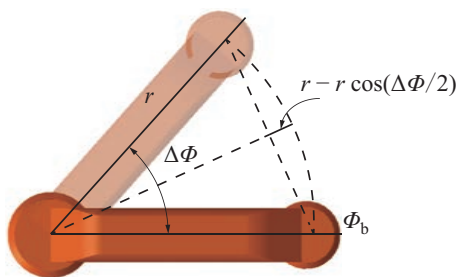


图 3 旋转刚体的偏置距离

Fig.3 The displacement distance of rotational object

那么, 就串联机器人而言, 结合已知各关节的正向运动学, 可以得到各关节最大的偏置距离:

$$\Gamma(\Delta\Phi) = \sum_{i=1}^n r_{i,n} \left( 1 - \cos \frac{\Delta\Phi}{2} \right) \quad (2)$$

等式 (2) 中,  $r_{i,n}$  表示是刚体  $i$  相对于旋转轴的最大欧氏距离; 考虑连杆  $n$  时不考虑连杆  $n+1$  的影响; 当  $\Delta\Phi$  较小时, 余弦函数接近 1, 定义  $\Delta\Phi \in [-\pi, \pi]$ . 为了提高检测的效率, 通常定义当最大偏置距离作为检测值时为最优, 即假设构型空间中  $\Phi_a$  到  $\Phi_b$  是线性图元, 那么最优检测构型步长  $\Delta\Phi_{\text{step}}$  为

$$\Delta\bar{\Phi}_{\text{step}} = \frac{\Delta\Phi}{\Gamma(\Delta\Phi)} 2d \quad (3)$$

$$\Delta\Phi_{\text{step}} = \Delta\bar{\Phi}_{\text{step}} \frac{2d}{2d + \Gamma(\Delta\bar{\Phi}_{\text{step}})} \quad (4)$$

从而, 通过递增的方式动态检测构型空间中线性图元是否实现连续无碰撞, 直到检测完线性图元的所有离散点. 若未发现碰撞, 则定义该线性图元为连续无碰的, 否则定义为碰撞. 实现的伪代码如下, 其中  $\text{Detect}(\Phi)$  表示给定构型  $\Phi$  下给定精度的碰撞检测.

#### 算法: 固定精度检测

**Given:**  $\Phi_a, \Phi_b$

- 1 Create Bounding Volumes
- 2 **if** ( $\text{Detect}(\Phi_a) \parallel \text{Detect}(\Phi_b)$ ) **then**  
    **return collision**
- 3 **while** ( $\Phi_a < \Phi_b$ ) **do**  
4      $\Phi_a = \Phi_a + \Delta\Phi_{\text{step}}$   
5     **if** ( $\text{Detect}(\Phi_a)$ ) **then**  
       **return collision**
- 6 **end while**
- 7 **return no collision**

### 2.2 自适应精度的动态碰撞检测

根据前面所述机器人包围盒层次树的碰撞检测方法, 可以通过预先给定固定的度量精度  $\varepsilon$  (通常为欧氏距离) 直接地验证高维构型空间中线性图元连续的碰撞状态. 也就是将线性图元分割成长度为  $\varepsilon$  的等分子图元, 再对子图元逐一地进行检测, 直到检测完所有的子图元或检测存在碰撞为止. 但是, 这样做耗时严重, 并且难以选择  $\varepsilon$ .

一般地, 要求给定固定精度的  $\varepsilon$  值较小, 否则会出现碰撞的漏检情况, 但这样会造成严重的多余检测. 因此, 本文针对固定度量精度存在的问题提出了自适应调整碰撞精度的算法, 所提算法在对线



性图元进行检测之前, 对系统中刚体间的几何距离进行比较, 以决定是否对线性图元采取二等分处理来进行细分检测, 很大程度地减少了碰撞检测的次数, 提高检测效率。

首先, 假设工作站内机器人连杆及障碍物为刚体  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , 它们在工作空间内的某确定状态可以通过  $n$  维元组描述  $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 并且所有的物体都定义为可移动的. 那么  $R_i(q)$  表示为刚体  $R_i$  在构型  $q$  下的状态; 定义  $\alpha_{ij}(q)$  为  $R_i(q)$  和  $R_j(q)$  在构型  $q$  下欧氏距离的最小值, 当且仅当  $\alpha_{ij} = 0$  时,  $R_i(q)$  与  $R_j(q)$  相交或重叠。

每一个刚体  $R_i$  都可以定义为三角面片的集合, 对于  $m$  个不重复的三角面片顶点从构型  $q_a$  到构型  $q_b$  的运动路径的集合定义为:  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\}$ . 对于某一路径图元  $\pi_m$ , 定义  $\beta_i(q_a, q_b)$  作为刚体  $R_i$  点集合移动距离的最大值, 当且仅当  $\beta_i = 0$  时, 表示刚体由状态  $R_i(q_a)$  转换到  $R_i(q_b)$  是保持静止的. 从而, 若考虑系统中任意两刚体  $R_i$  与  $R_j$  在构型空间中由状态  $q_a$  沿着路径图元  $\pi_m$  到达状态  $q_b$  确保连续无碰, 需要具备以下条件:

$$\beta_i(q_a, q_b) + \beta_j(q_a, q_b) < \alpha_{ij}(q_a) + \alpha_{ij}(q_b) \quad (5)$$

即, 若 2 个刚体由构型  $q_a$  运动到  $q_b$  时各自移动的最大距离之和小于 2 个刚体在起始构型处最小距离之和, 那么可以断定这 2 个刚体在构型  $q_a$  与  $q_b$  间连续无碰. 具体的证明过程如下:

假设式 (5) 成立, 如果  $R_i$  与  $R_j$  发生碰撞, 那么沿着图元  $\pi_m$  在某中间构型  $q_c$  时至少存在一点  $p_i$  ( $p_i \in R_i$ ) 与  $p_j$  ( $p_j \in R_j$ ) 重合. 定义  $\mu_i(q, q')$  为刚体  $R_i$  上点  $p_i$  沿着图元  $\pi_m$  移动的距离; 定义  $\mu_j(q, q')$  作为刚体  $R_j$  上点  $p_j$  沿着图元  $\pi_m$  移动的距离.  $p_i$  与  $p_j$  在构型  $q' = q_c$  处重合, 如图 4 所示. 根据组成三角形简单的边长约束条件 (对于构型  $q_b$  也是同理) 可得

$$\mu_i(q_a, q_c) + \mu_j(q_a, q_c) \geq \alpha_{ij}(q_a) \quad (6)$$

$$\mu_i(q_c, q_b) + \mu_j(q_c, q_b) \geq \alpha_{ij}(q_b) \quad (7)$$

由于

$$\mu_i(q_a, q_c) + \mu_i(q_c, q_b) = \mu_i(q_a, q_b) \quad (8)$$

$$\mu_j(q_a, q_c) + \mu_j(q_c, q_b) = \mu_j(q_a, q_b) \quad (9)$$

那么, 式 (8) 加上式 (9), 可得:

$$\mu_i(q_a, q_b) + \mu_j(q_a, q_b) \geq \alpha_{ij}(q_a) + \alpha_{ij}(q_b) \quad (10)$$

由前面定义刚体的最大移动距离可得

$$\beta_i(q_a, q_b) \geq \mu_i(q_a, q_b) \quad (11)$$

$$\beta_j(q_a, q_b) \geq \mu_j(q_a, q_b) \quad (12)$$

综上所述,

$$\beta_i(q_a, q_b) + \beta_j(q_a, q_b) \geq \alpha_{ij}(q_a) + \alpha_{ij}(q_b) \quad (13)$$

满足不等式 (13) 的两刚体沿着图元  $\pi_m$  连续运动必定发生碰撞, 从而式 (5) 得以证明. 反之若两刚体间的几何关系不能满足三角形的边长约束条件, 则表明两刚体不存在碰撞的可能性。

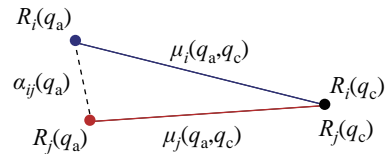


图 4 三角形边长约束

Fig.4 The constraint of triangle sides

利用前面的方法, 若系统内沿着图元  $\pi_m$  由  $q_a$  到  $q_b$  都满足式 (5), 证实  $\pi_m$  对应欧氏空间无碰撞运动. 若存在碰撞, 需要在构型空间中对图元  $\pi_m$  进行离散处理, 如图 5 所示。

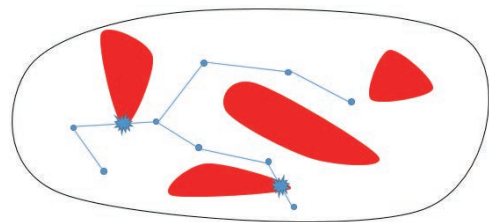


图 5 构型空间线性图元碰撞

Fig.5 Collision of linear segments in C-space

在实际建立 PRM 的过程中发现, 由启发式经验可知, 若检测到两构型间路径图元发生碰撞, 其图元中心区域的构型发生碰撞的概率高达 90% 以上, 故本算法采用此经验值对碰撞图元进行二等分处理, 直到检测到无碰撞为止, 算法伪代码如下:

算法: 自适应碰撞检测  $[q_a, q_b]$

Given:  $R_i, R_j, [q_a, q_b]$

```

1  Init(Q)
2  while (Q ≠ ∅) do
3    Q = QueryOrder()
4    pop_out([q_a, q_b]) from Q
5    if (β_i(q_a, q_b) + β_j(q_a, q_b) ≥ α_ij(q_a) + α_ij(q_b))
6      then
7        q_mid = (q_a + q_b)/2
8        if (Detect(q_mid)) then
9          return collision

```

```

8      else
9          insert  $[q_a, q_{mid}]_{ij}, [q_{mid}, q_b]_{ij}$  into  $Q$ 
10     end while
11     return no collision

```

该算法主要用于检测构型空间中 2 个无碰构型间  $[q_a, q_b]$  线性图元的碰撞状态. 首先, 定义图元  $[q_a, q_b]_{ij}$  为所需进行检测的构型对序列, 并存放在  $Q$  中, 若  $Q$  存在待检测数据, 表明刚体  $R_i$  与  $R_j$  间仍然存在碰撞检测的必要, 其图元排序方法 *Query Order()* 详见 2.3 节. 然后, 在每次检测后都将删除  $Q$  中优先级最高的子图元, 若存在碰撞, 就需要对检测图元进行二等分离散, 增加中间构型点  $q_{mid}$ , 若构型  $q_{mid}$  碰撞, 即  $\alpha_{ij}(q_{mid}) = 0$ , 返回所检测图元  $[q_a, q_b]_{ij}$  碰撞; 若构型  $q_{mid}$  无碰, 增加检测子图元  $[q_a, q_{mid}]_{ij}$ 、 $[q_{mid}, q_b]_{ij}$  到  $Q$ , 反复操作; 当  $Q$  为空时, 停止检测, 返回图元  $[q_a, q_b]_{ij}$  无碰撞. 此自适应二等分图元碰撞检测方法, 将不会遗留任何碰撞.

碰撞检测算法都需要给定相应的检测精度, 以使得检测停止. 本文定义自适应精度为  $\sigma$ , 该精度不同于固定精度检测算法的  $\varepsilon$  值.  $\sigma$  的值不是线性图元的检测精度, 而是决定着是否需要对线性图元进行二等分分割. 将该值与同一构型下不同刚体间的最小距离进行比较, 若  $\alpha_{ij}(q) \geq \sigma$ , 表明需要对所检测图元进行二等分割处理; 否则, 当  $\alpha_{ij}(q) < \sigma$  时, 返回检测的碰撞状态. 由实验测试可知,  $\sigma$  可以取得较小值, 以避免漏检的情况, 且不影响检测的效率.

### 2.3 优先级检测

2.2 节中提到若对每段图元都遵守上述的方式进行检测, 将会严重耗时. 那么, 需要对检测的离散段图元及所有刚体对  $R_1, R_2, \dots, R_n$  进行相应的优先级排序. 总的来说, 就是如何优先检测最有可能发生碰撞的刚体对所对应的图元段.

由式 (5) 可知, 假设

$$\xi = \beta_i(q_a, q_b) + \beta_j(q_a, q_b) - \alpha_{ij}(q_a) - \alpha_{ij}(q_b) \quad (14)$$

由式 (14) 可知  $\xi$  越大, 刚体  $R_i$  与  $R_j$  由构型  $q_a$  到  $q_b$  碰撞的可能性越大; 反之, 则碰撞可能性低. 从而, 根据  $\xi$  的大小对待检测刚体对排序.

对于离散图元的排序, 计算出高维向量间的欧氏距离 (2 阶范数):

$$\|q_b - q_a\|_2 = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (q_b(i) - q_a(i))^2} \quad (15)$$

从而, 把图元端点构型的 2 阶范数的大小映射为构型空间线性图元的长度距离. 距离值越大, 检测优先级越大; 反之, 优先级越小.

### 3 运动物体移动距离最大值及静态物体间距离最小值的计算 (Calculation of the maximal distance between two moving objects and the minimal distance between the two static objects)

所提出的碰撞检测算法依赖于给定构型下两物体的最小距离及各物体沿着给定路径图元的最大移动距离. 随着计算机图形学的高速发展, BVH (bounding volume hierarchy) 广泛应用于运动刚体间的碰撞检测及最短距离计算. 本文在计算静态构型的最小距离  $\alpha_{ij}(q)$  时采用了现有的开源库 (PQP), 代码开源安装包见文 [18].

在计算刚体最大移动距离  $\beta_i(q_a, q_b)$  时, 由 2.1 节可知, 刚体可以定义成空间点云形式, 对于旋转关节, 3 维点云在空间中绕固定轴旋转, 可以“安全地”定义其最大的移动距离等于由点形成的最小包围球体半径. 对于  $n$  个自由度的串联操作臂而言, 机器人由构型  $q_a$  运动到构型  $q_b$ , 连杆  $R_i$  的最大移动距离描述为

$$\beta_i(q_a, q_b) = \sum_{k=1}^i r_{i,k} |q_{b,k} - q_{a,k}|, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

其中, 常量  $r_{i,k}$  是旋转连杆  $R_i$  点云包围球体的最大半径值, 球体中心位于旋转轴上.

针对 3 维空间中的机器人操作臂, 本节将提出当关节  $k$  为旋转关节时计算常量  $r_{i,k}$  的一般化方法. 首先, 根据不同的构型参数, 连杆  $R_i$  点云的包围球体取得不同的半径值; 然后, 假设所有旋转关节  $k$  的运动范围都是  $2\pi$  (空间中全范围运动); 因此, 计算得到的  $r_{i,k}$  不依赖于构型空间中的线性图元, 且只需在前处理阶段计算 1 次即可.

当  $k = i$  时, 计算刚体所有顶点到旋转轴  $i$  中心的距离, 定义  $r_{i,k}$  为所有中心距离的最大值.

对于每个  $k < i$ , 为了确保刚体在不同的构型取值下都能满足条件, 根据文 [19] 中提到的方法计算由刚体  $i$  点云得到的最小包围球体, 球心为  $c(i, k)$ , 半径为  $s(i, k)$ , 如图 6 所示.

对于机器人而言, 当前连杆的最大移动距离与前一连杆运动相关, 即满足:

$$r(i, k) = s(i, k+1) + |c(i, k+1) - c(i, k)| \quad (17)$$

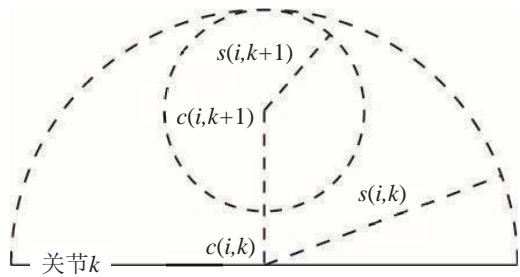


图 6 计算常量参数  $r(i, k)$   
Fig.6 Computation of the constant parameter  $r(i, k)$

4 仿真与验证 (Simulation and verification)

由于所提出算法旨在验证构型空间线性图元的连续碰撞检测, 尚未考虑路径规划, 故本文参考文[4-5]中所提到的 PRM 运动规划器对以下 3 个算例分别建立构型空间, 给定系统的初始构型 (图 (a)) 及目标构型 (图 (b)), 然后在构型空间中随机规划出可行的路径进行验证。

仿真说明: 此仿真平台采用 2.10 GHz i3-5015U CPU 和 4.00 GB RAM 的笔记本电脑; 动画仿真采用 Open Inventor 开源库; 物体间最小距离采用 PQP 开源库; 仿真场景中的球体和长方体属于静态障碍物、机器人工业 6 自由度操作臂和 2 自由度变位机; 蓝色曲线为对应机器人的运动轨迹。

算例 1: 1 台 6 自由度工业操作臂位于由 2 个球体和 1 个长方体构成的结构化环境中, 障碍物由 Open Inventor 开源库函数直接生成, 如图 7 所示。

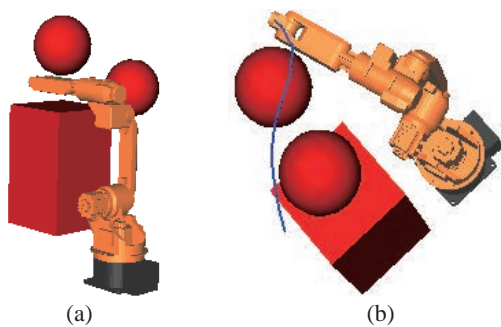


图 7 算例 1: 操作臂与静态障碍物  
Fig.7 Case 1: The robot and the static obstacles

算例 2: 1 台 6 自由度工业操作臂和 1 台 2 自由度变位机, 在旋转面两边对称地竖有圆柱形障碍物, 机器人初始构型位于障碍物之间, 在给定变位机旋转和摆转的同时, 操作臂动态规划无碰路径到达目标位置, 如图 8 所示。

算例 3: 2 台 6 自由度工业操作臂, 2 个静态球体及 1 台 2 自由度变位机, 其在旋转面两边对称地

竖有圆柱形障碍物。机器人初始构型位于障碍物之间, 在给定变位机旋转和摆转的同时, 操作臂动态规划无碰路径到达目标位置, 如图 9 所示。

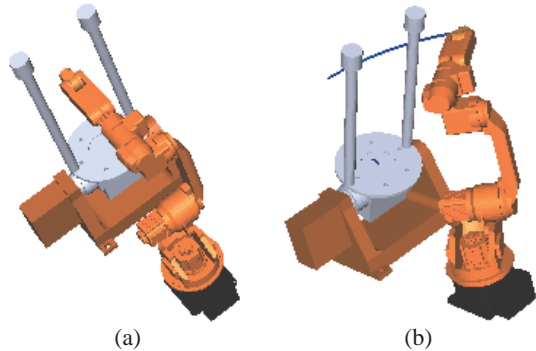


图 8 算例 2: 操作臂与变位机  
Fig.8 Case 2: The robot and the positioner

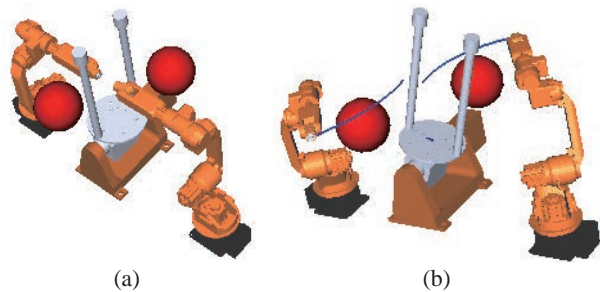


图 9 算例 3: 双操作臂、变位机与静态障碍物  
Fig.9 Case 3: The dual robots, the positioner and the static obstacles

表 1 固定精度与自适应精度比较  
Tab.1 Comparison of the fixed and adaptive resolutions

参数	算例 1	算例 2	算例 3
构型空间维数	6	8	14
三角面片数量	17632	19688	36908
固定精度 $t$ /ms	$\epsilon = 0.01$	0.392	0.511
	$\epsilon = 0.001$	2.828	0.691
	$\epsilon = 0.0001$	20.443	2.515
自适应精度 $t$ /ms	$\sigma = 0.01$	0.291	0.245
	$\sigma = 0.001$	2.118	0.331
	$\sigma = 0.0001$	13.278	0.401

通过对比不同的仿真场景, 采用所提的 2 类方法进行仿真验证, 验证结果如表 1 所示。其中, 构型空间维数描述的是不同仿真场景中系统自由度的数目; 三角面片数量描述了系统中所有物体需要三角面片几何逼近的数量;  $\epsilon$  表示固定检测精度值,  $\sigma$  表示自适应检测中最小的检测精度值; 针对不同的检测方法, 给定相同的检测精度时, 记录完成检测所需的时间  $t$  (ms)。表 1 中后 3 列的仿真结果表明同等条件下自适应动态碰撞检测的所需时间更

短、效率更高, 能有效地提高高维构型空间线性图元连续碰撞检测的效率。

## 5 结论与讨论 (Conclusion and discussion)

本文针对高维构型空间中线性图元连续碰撞检测的问题, 提出了自适应动态碰撞检测算法。此算法具有一般性, 可用于不同领域, 尤其适合于多机器人或高维复杂制造系统中路径规划的 PRM 规划器。并且不会遗留任何的碰撞, 相比于传统固定检测精度算法, 解决了效率低及实现难度大的缺点。

在多次仿真验证中发现, 当机械臂与障碍物的距离特别小时, 需要通过降低碰撞条件, 以获得较优的效果。在原碰撞条件的前提下, 作者增加了“安全系数  $\tau$ ”, 当  $\tau$  满足式 (18) 时, 才表示为碰撞。从而,  $\tau$  值越大, 所检测的线性图元越安全, 无碰撞路径越远离障碍物。

$$\beta_i(q_a, q_b) + \beta_j(q_a, q_b) \geq \alpha_{ij}(q_a) + \alpha_{ij}(q_b) - \tau \quad (18)$$

本文所提算法通过二等分的方式对线性图元进行离散化, 具有一定的局限性。主要体现在当要求得出构型空间中线性图元从起始构型到目标构型所发生碰撞的顺序时, 这并不是很好的选择; 另外, 由于本文算法中的碰撞检测条件依赖于两刚体间的最小距离及运动刚体的最大移动距离, 故而当两刚体的距离保持足够小且移动距离较大时, 该算法将严重耗时。

## 参考文献 (References)

- [1] LaValle S, Kuffner J. Randomized kinodynamic planning[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400.
- [2] Jaillet L, Cortes J, Simeon T. Sampling-based path planning on configuration-space costmaps[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(4): 635-646.
- [3] Xie B Y, Zhuo J, Liu Y. Motion planning of reaching point movements for 7R robotic manipulators in obstacle environment based on rapidly-exploring random tree algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 63-69.
- [4] Latombe J C. Robot motion planning[M]//The Springer International Series in Engineering and Computer Science, vol.124. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012.
- [5] Saha M, Roughgarden T, Latombe J C, et al. Planning tours of robotic arms among partitioned goals[J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25(3): 207-223.
- [6] Isto P, Saha M. A slicing connection strategy for constructing PRMs in high-dimensional cspaces[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1249-1254.
- [7] Kannan A, Gupta P, Tiwari R, et al. Robot motion planning using adaptive hybrid sampling in probabilistic roadmaps[J]. Electronics, 2016, 5(2): 16-17.
- [8] Schwarzer F, Saha M, Latombe J C. Exact collision checking of robot paths[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2004, 7(5): 25-41.
- [9] 潘佳, Dinesh M. 运动规划的高效配置空间构建与优化[J]. Engineering, 2015, 1(1): 46-57.  
Pan J, Dinesh M. Efficient configuration space construction and optimization for motion planning[J]. Engineering, 2015, 1(1): 46-57.
- [10] Schwarzer F, Saha M, Latombe J C. Adaptive dynamic collision checking for single and multiple articulated robots in complex environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 338-353.
- [11] Larsen E, Gottschalk S, Lin M C, et al. Fast distance queries with rectangular swept sphere volumes[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 3719-3726.
- [12] Wang H Y, Liu S G. A collision detection algorithm using AABB and octree space division[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989(26): 2389-2392.
- [13] Canny J. Collision detection for moving polyhedral [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(2): 200-209.
- [14] Schweikard A. Polynomial time collision detection for manipulator paths specified by joint motions[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 7(6): 865-870.
- [15] Spensieri D, Carlson J S, Ekstedt F, et al. An iterative approach for collision free routing and scheduling in multirobot stations [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2015, 13(2): 1-13.
- [16] 王伟, 马峻, 刘伟, 等. 基于 OBB 包围盒的碰撞检测研究与应用[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 180-183.  
Wang W, Ma J, Liu W, et al. Research and application of collision detection based oriented bounding box[J]. Computer Simulation, 2009, 26(9): 180-183.
- [17] Baginski B. Efficient dynamic collision detection using expanded geometry models[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1997: 1714-1720.
- [18] UNC GAMMA Group. Proximity query packages[EB/OL]. [2016-11-13]. <http://gamma.cs.unc.edu>.
- [19] Welzl E. Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids)[M]//New Results and New Trends in Computer Science. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1991: 359-370.

## 作者简介:

吴鸿敏 (1991 -), 男, 博士生。研究领域: 多机器人协调无碰运动规划, 自主操作, 人机共融。

张国英 (1980 -), 女, 博士生, 讲师。研究领域: 机器人机构学, 混联机器人综合性能设计。

管贻生 (1966 -), 男, 博士, 教授。研究领域: 仿生机器人, 模块化机器人, 智能制造与自动化。