

文章编号:1006-2467(2018)01-0045-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.01.008

双臂机器人自碰撞检测及其运动规划

吴长征¹, 岳义^{1,2}, 韦宝琛¹, 刘殿富³

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245; 3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对双臂机器人运动规划过程中的自碰撞问题,提出了基于空间向量几何距离的机械臂自碰撞检测方法;改进了传统的人工势场法,并用线性结构的斥力场描述机械臂各杆件之间的相互关系,用于构造多杆碰撞检测的描述指标;利用线性斥力场描述的结构得到一种新的双臂机器人无自碰撞运动规划算法.结果表明,与传统的人工势场法相比,所提出的无自碰撞运动规划算法能够将线性斥力场引入无自碰撞规划算法中,并作为算子用于计算避免自碰撞的规划调整量,其结构简单、计算方便.同时,结合实际的双臂机器人物理参数,通过预先给定机器人运动轨迹的模拟,验证了无自碰撞运动规划算法的有效性.

关键词: 双臂机器人; 自碰撞; 碰撞检测; 运动规划; 势场法

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

Self-Collision Detection and Motion Planning for Dual-Arm Robot

WU Changzheng¹, YUE Yi^{1,2}, WEI Baochen¹, LIU Dianfu³

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Factory, Shanghai 200245, China; 3. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: A method based on geometric distance of space vector is proposed for the self-collision detection in motion planning of dual-arm robots. In terms of this, a linear repulsion force field which is improved from the artificial potential field method is used to describe the position relationship and collision quota among the links. Then a novel self-collision-free motion planning is derived by combining with the linear form of repulsion potential field. Compared with the traditional artificial potential filed planner, the improved linear force field can directly act as an operator to plan the trajectory of the dual-arm robot with properties that are simple and easy to be handled. Finally, a case study demonstrates the effectiveness of the motion planning algorithm with the real parameters of a dual-arm robot.

Key words: dual-arm robot; self-collision; collision detection; motion planning; potential field

双臂机器人凭借其灵巧的协作性能,在人/机协作加工、航空和航天等领域的应用越来越广泛.在双

臂协同操作的运动规划中,既要防止其与外界环境的碰撞,又要防止其自身碰撞对机体的破坏.由于在

收稿日期:2016-12-20

基金项目:航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2015-36)资助

作者简介:吴长征(1992-),男,湖北省麻城市人,硕士生,主要从事机器人运动规划研究.

通信作者:韦宝琛,男,助理研究员,电话(Tel.):021-34206534;E-mail: weibaochen@sjtu.edu.cn.

运动过程中双臂机器人各杆件的相互位置是时变的,所以相比于与外界环境的碰撞,双臂的无自碰撞运动的规划更加复杂。

目前,针对双臂的无自碰撞运动规划大多采用基于 C 空间采样的规划方法^[1-2],但具有一定的随机性,也不能绝对保证无自碰撞运动规划成功,甚至对于同一个规划目标也可能得到完全不同的规划路径^[3]。无自碰撞运动规划主要分为碰撞检测和运动规划,且重要环节是碰撞检测。现有的碰撞检测方法主要包括基于空间几何模型^[4-5]、基于图像^[6]和基于传感器^[7]等方法。由于基于图像的碰撞检测方法是在虚拟环境下利用图形处理器(GPU)进行检测的,而基于传感器的碰撞检测方法需要附加传感器,且其检测精度及可靠性受外界的影响较大,所以在实际的机器人运动规划中大多采用基于空间几何模型的碰撞检测方法,但其检测效率依赖于所建立的几何或数学模型。

在碰撞检测的基础上,相关学者针对机械臂的无碰撞运动规划进行了大量研究。Oussama^[8]提出人工势场法和基于人工势场法的实时避碰方法,定义了 2 次型表达形式的人工势场,并结合动力学方程提出了机械臂避碰的伺服控制算法,这种方法及其改进方法^[9-10]已在实际中得到了应用。

近年来,基于采样的运动规划方法^[11]也广泛用于无自碰撞运动规划中,如快速扩展随机树法(RRT)^[12]和随机路图法(PRM)^[13]等,但这些算法都是在高维空间进行随机搜索以避免障碍而实现无障碍路径规划的,具有随机性且不能保证规划的无障碍路径最优。为此,Zucker 等^[14]提出采用协变哈密顿优化运动规划(CHOMP)算法,以改善基于采样规划的轨迹的质量。另外,针对样本轨迹的优化还提出了一些改进方法^[15-16]。但是,优化算法的加入将增大计算量,从而降低运动规划的实时性。

本文分析了双臂机器人协同操作中左、右臂之间的关系,在笛卡尔空间中利用空间向量的几何距离建立机械臂自碰撞检测模型,提出了全部(9 种)位置关系下自碰撞检测的计算方法;改进了传统的人工势场法的非线性形式,采用线性结构的斥力场描述机械臂各杆件之间的相互关系,并将其作为算子引入计算中,以用于计算避免自碰撞的规划调整量;同时,采用线性斥力场构造多杆碰撞的描述指标,并结合碰撞检测和无碰撞调整提出了无自碰撞运动规划算法。另外,结合双臂机器人实际参数的模拟,验证了无自碰撞运动规划算法的有效性。

1 双臂机器人自碰撞检测

双臂机器人自身连杆的碰撞包括单臂中各连杆的碰撞以及左、右臂各连杆之间的碰撞。由于在机器人运动过程中单臂各连杆具有关节极限,左、右臂各连杆之间的碰撞属于自碰撞的情况,故本文只考虑左、右臂各连杆之间的碰撞情形。

双臂机器人连杆模型如图 1 所示。其中,左、右臂均为串联结构,通过本体基座相联接,左臂的杆件数目为 m ,右臂的杆件数目为 n ,上标 r 表示右臂, l 表示左臂。

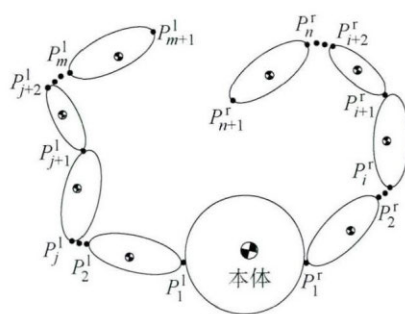


图 1 双臂机器人连杆模型

Fig. 1 Link model of dual-arm robot

在双臂机器人运动的过程中,各关节点的位置不断变化,各连杆在空间的相互位置关系也不断调整。本文仅以右臂第 i 根连杆和左臂第 j 根连杆的空间相互位置关系为例加以说明。设 P_i^r 、 P_j^l 分别为右臂第 i 个关节中心点和左臂第 j 个关节中心点, P_i^r 、 P_j^l 分别为点 P_i^r 、 P_j^l 的坐标向量;简化的杆件为圆柱体,取每根连杆的关节点的连线 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 与 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 作出两线段的公垂线段 $\overline{M_i N_j}$ 。其中:垂点 M_i 在右臂第 i 根杆上;垂点 N_j 在左臂第 j 根杆上; M_i 和 N_j 分别为点 M_i 和 N_j 的坐标向量。通过分析垂点 M_i 和 N_j 是否分别在线段 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 与 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 内,得到 6 个点 P_i^r 、 P_j^l 、 P_{i+1}^r 、 P_{j+1}^l 、 M_i 、 N_j 在空间的 9 种相互位置关系如图 2 所示。

由图 2 的几何关系所得各点坐标向量之间的关系为

$$M_i = P_i^r + k_1 (P_{i+1}^r - P_i^r) \quad (1)$$

$$N_j = P_j^l + k_2 (P_{j+1}^l - P_j^l) \quad (2)$$

式中, k_1 和 k_2 均为实数。采用 d 表示空间线段 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 与 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 之间相隔最近的两点间距(最近距离),若两连杆间距最近的点未发生碰撞,则对应的两杆也未发生碰撞。根据 k_1 和 k_2 取值的不同(即 M_i 和 N_j 在两杆上的位置),可以将机器人双臂自碰撞检测计

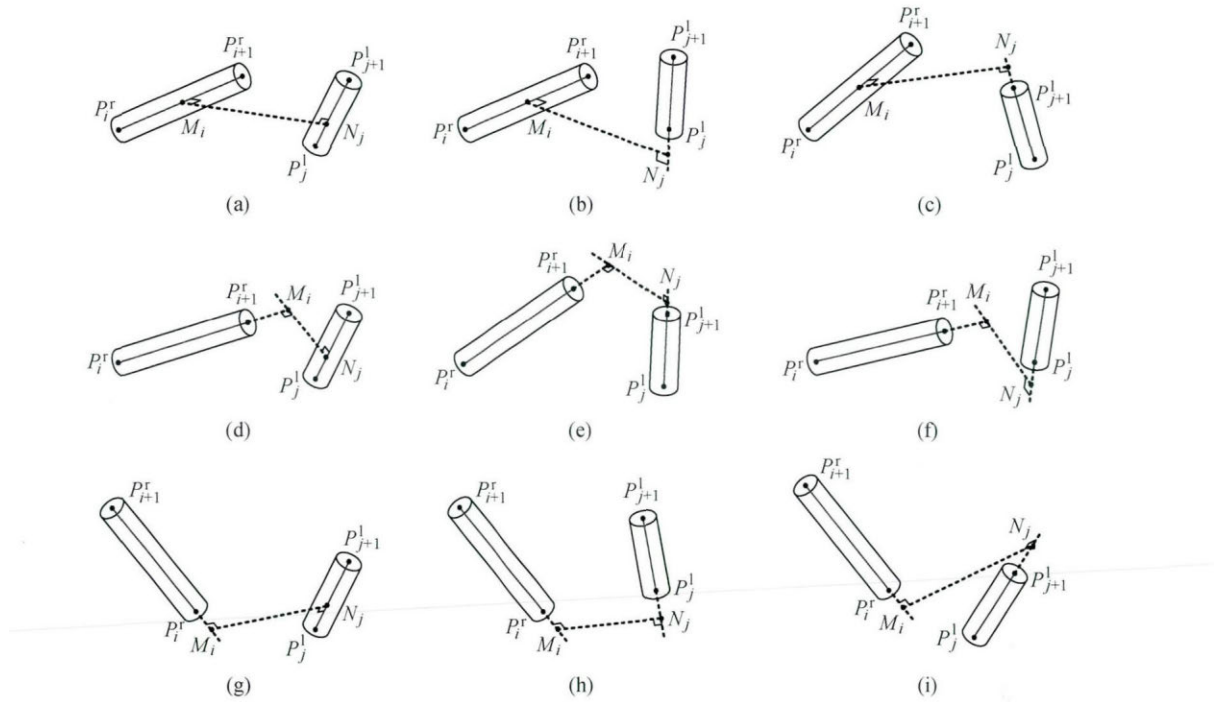


图2 双臂机器人碰撞检测的9种情况

Fig. 2 Nine cases of dual-arm robot collision detection

算分为以下9种情况。

(1) $0 \leq k_1 \leq 1$ 且 $0 \leq k_2 \leq 1$, 对应于图 2(a) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 上, N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 上, 此时,

$$d = |\overline{M_i N_j}| = \text{norm}(\mathbf{M}_i - \mathbf{N}_j) \quad (3)$$

(2) $0 \leq k_1 \leq 1$ 且 $k_2 < 0$, 对应于图 2(b) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 上, N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_j^l , 此时,

$$d = |\overline{M_i P_j^l}| = \text{norm}(\mathbf{M}_i - \mathbf{P}_j^l) \quad (4)$$

(3) $0 \leq k_1 \leq 1$ 且 $k_2 > 1$, 对应于图 2(c) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 上, N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_{j+1}^l , 此时,

$$d = |\overline{M_i P_{j+1}^l}| = \text{norm}(\mathbf{M}_i - \mathbf{P}_{j+1}^l) \quad (5)$$

(4) $k_1 > 1$ 且 $0 \leq k_2 \leq 1$, 对应于图 2(d) 中的情况, 表示 M_i 在线段 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_{i+1}^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 上, 此时,

$$d = |\overline{P_{i+1}^r N_j}| = \text{norm}(\mathbf{P}_{i+1}^r - \mathbf{N}_j) \quad (6)$$

(5) $k_1 > 1$ 且 $k_2 > 1$, 对应于图 2(e) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_{i+1}^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_{j+1}^l , 此时,

$$d = |\overline{P_{i+1}^r P_{j+1}^l}| = \text{norm}(\mathbf{P}_{i+1}^r - \mathbf{P}_{j+1}^l) \quad (7)$$

(6) $k_1 > 1$ 且 $k_2 < 0$, 对应于图 2(f) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_{i+1}^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_j^l , 此时,

$$d = |\overline{P_{i+1}^r P_j^l}| = \text{norm}(\mathbf{P}_{i+1}^r - \mathbf{P}_j^l) \quad (8)$$

(7) $k_1 < 0$ 且 $0 \leq k_2 \leq 1$, 对应于图 2(g) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_i^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 上, 此时,

$$d = |\overline{P_i^r N_j}| = \text{norm}(\mathbf{P}_i^r - \mathbf{N}_j) \quad (9)$$

(8) $k_1 < 0$ 且 $k_2 < 0$, 对应于图 2(h) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_i^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_j^l , 此时,

$$d = |\overline{P_i^r P_j^l}| = \text{norm}(\mathbf{P}_i^r - \mathbf{P}_j^l) \quad (10)$$

(9) $k_1 < 0$ 且 $k_2 > 1$, 对应于图 2(i) 中的情况, 表示 M_i 在 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 的延长线上并靠近点 P_i^r , N_j 在 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 的延长线上并靠近点 P_{j+1}^l , 此时,

$$d = |\overline{P_i^r P_{j+1}^l}| = \text{norm}(\mathbf{P}_i^r - \mathbf{P}_{j+1}^l) \quad (11)$$

由上述分析及计算公式能够得到杆件的相互关系, 从而为无自碰撞运动规划提供参考。

在上述分析中, 考虑到机器人的结构和关节的连接顺序, 将杆件的相互位置关系细化为 9 种 (NAO 机器人分为 3 种情况^[17]), 以便于实现代码编写。同时, 简化了杆件模型, 只在笛卡尔空间中进行计算, 以规避高维 C 空间碰撞检测中障碍物无法完整表达的问题^[3], 其计算均为解析形式, 具有简单快速的优点。

2 双臂机器人无自碰撞运动规划

2.1 无自碰撞运动规划的基础

在双臂机器人运动规划时,除需考虑不发生碰撞外,还应该满足一个要求,即当检测到碰撞将要发生时机械臂能够自动调整以避免碰撞的发生,并尽可能满足期望位姿.由于在运动过程中机器人左、右臂的位姿是时变的,所以还需要进行动态预测.

双臂的自碰撞不同于机械臂与环境之间的静态碰撞,需要从速度的角度分析运动过程中各杆件之间的相互关系.本文分别针对机器人右臂第 i 杆与左臂第 j 杆进行分析,如图 3 所示.

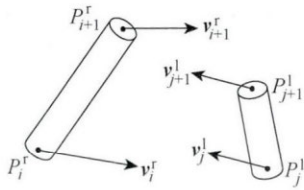


图 3 运动过程中左、右臂杆件的速度描述

Fig. 3 Velocity description of dual-arm robot

图 3 中各特征点的速度表达式分别为:

$$\mathbf{v}_i^r = [\dot{x}_i^r \quad \dot{y}_i^r \quad \dot{z}_i^r]^T = \mathbf{J}_i^r \dot{\mathbf{q}}_i^r \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_{i+1}^r = [\dot{x}_{i+1}^r \quad \dot{y}_{i+1}^r \quad \dot{z}_{i+1}^r]^T = \mathbf{J}_{i+1}^r \dot{\mathbf{q}}_{i+1}^r \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_j^l = [\dot{x}_j^l \quad \dot{y}_j^l \quad \dot{z}_j^l]^T = \mathbf{J}_j^l \dot{\mathbf{q}}_j^l \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{j+1}^l = [\dot{x}_{j+1}^l \quad \dot{y}_{j+1}^l \quad \dot{z}_{j+1}^l]^T = \mathbf{J}_{j+1}^l \dot{\mathbf{q}}_{j+1}^l \quad (15)$$

式中: \mathbf{v}_i^r 和 \mathbf{v}_{i+1}^r 分别为点 P_i^r 和 P_{i+1}^r 的速度; \mathbf{v}_j^l 和 \mathbf{v}_{j+1}^l 分别为点 P_j^l 和 P_{j+1}^l 的速度; \mathbf{J}_i^r 和 \mathbf{J}_{i+1}^r 均为 $3 \times i$ 的矩阵(按照离散化分析,只需考虑笛卡尔空间的线速度,故为 $3 \times i$ 的矩阵),表示从右臂的第 1 个关节到第 i 个关节的速度雅可比矩阵; \mathbf{J}_j^l 和 \mathbf{J}_{j+1}^l 均为 $3 \times j$ 的矩阵,表示从左臂的第 1 个关节到第 j 个关节的速度雅可比矩阵;

$$\dot{\mathbf{q}}_i^r = [\dot{\theta}_1^r \quad \dot{\theta}_2^r \quad \cdots \quad \dot{\theta}_i^r]^T$$

$$\dot{\mathbf{q}}_j^l = [\dot{\theta}_1^l \quad \dot{\theta}_2^l \quad \cdots \quad \dot{\theta}_j^l]^T$$

分别为右、左臂杆件关节的角速度向量.因此,在进行运动规划时,结合前、后 2 个时刻的杆件位置关系所得无自碰撞运动规划算法为

$$\min \frac{1}{2} \|\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d\| \quad (16)$$

$$d(\overline{P_i^r P_{i+1}^r}, \overline{P_j^l P_{j+1}^l}) > d_{\text{saf}} \quad (17)$$

式中: $\dot{\mathbf{q}}$ 表示实际关节角速度向量; $\dot{\mathbf{q}}_d$ 表示期望关节角速度向量; P_i^r 为 P_i^r 调整后的坐标点; P_j^l 为 P_j^l 调整后的坐标点; $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$.

式(16)表示碰撞调整尽可能使规划后的关节空

间与期望的关节空间的差别最小,式(17)表示自碰撞规避后的杆件检测的最近距离应大于设定的安全距离 d_{saf} .

将上述避障算法引入速度的近似表达式中,则调整后的坐标向量分别为:

$$\mathbf{P}_i^{r'} = \mathbf{P}_i^r + \mathbf{v}_i^r \Delta t = \mathbf{P}_i^r + \mathbf{J}_i^r \dot{\mathbf{q}}_i^r \Delta t \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{i+1}^{r'} = \mathbf{P}_{i+1}^r + \mathbf{v}_{i+1}^r \Delta t = \mathbf{P}_{i+1}^r + \mathbf{J}_{i+1}^r \dot{\mathbf{q}}_{i+1}^r \Delta t \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_j^{l'} = \mathbf{P}_j^l + \mathbf{v}_j^l \Delta t = \mathbf{P}_j^l + \mathbf{J}_j^l \dot{\mathbf{q}}_j^l \Delta t \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{j+1}^{l'} = \mathbf{P}_{j+1}^l + \mathbf{v}_{j+1}^l \Delta t = \mathbf{P}_{j+1}^l + \mathbf{J}_{j+1}^l \dot{\mathbf{q}}_{j+1}^l \Delta t \quad (21)$$

$$\Delta t = t_{k+1} - t_k \quad (22)$$

在计算完从上一时刻 t_k 到下一时刻 t_{k+1} 的碰撞情况后,如果不发生自碰撞,则机械臂不需要进行轨迹调整,仍然按照期望轨迹行进;如果计算出下一时刻将发生碰撞,则需要调整路径.在此避障算法中进行如下处理:

(1) 将左臂处理成静态障碍(即下一时刻与上一时刻的位置和姿态一样),得到右臂的调整值;

(2) 将右臂处理成静态障碍(即下一时刻与上一时刻的位置和姿态一样),得到左臂的调整值.

2.2 线性结构的斥力场

为计算避碰自调整过程中的调整量,需要引入斥力场,斥力场的描述如图 4 所示.图中: d_{saf}^l 和 d_{saf}^r 分别为左臂和右臂的安全距离; d_{dan}^l 和 d_{dan}^r 分别为左臂和右臂的危险距离; r^l 和 r^r 分别为左、右臂杆件的半径.为保证机器人的安全运动(无碰撞发生),在危险区禁止机械臂及障碍物进入,且尽量不进入相对安全区(机械臂碰撞调整的缓冲区).危险区禁止进入的设定是为了防止相对安全区不能完全完成调整,此时,机器人自动停止运行,虚拟斥力为无穷大.

在实际情况中,根据机械臂的几何参数设定 d_{saf}^l 、 d_{saf}^r 和杆件的最大直径,而且所计算的安全距离 d_{saf} 为左、右臂安全距离之和,危险距离 d_{dan} 为左、右

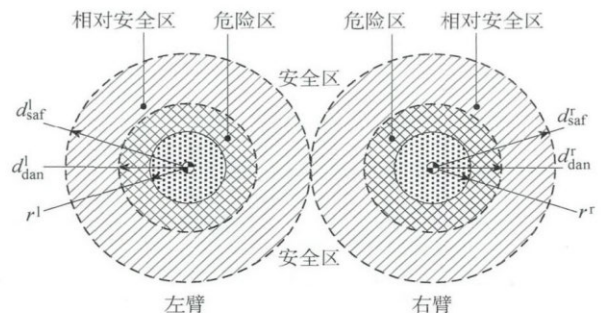


图 4 杆件的斥力场模型

Fig. 4 Repulsion force field model for links

臂危险距离之和,即:

$$d_{\text{saf}} = d_{\text{saf}}^l + d_{\text{saf}}^r \quad (23)$$

$$d_{\text{dan}} = d_{\text{dan}}^l + d_{\text{dan}}^r \quad (24)$$

在传统的人工势场法^[8]中,斥力势场可描述为

$$f = \begin{cases} 0, & d > d_{\text{saf}} \\ \frac{1}{2}\sigma\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{\text{saf}}}\right)^2, & d \leq d_{\text{saf}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: f 为虚拟斥力; σ 为安全系数。

利用式(25)进行运动规划是将避碰问题转化为一个二次规划问题,通过解决优化问题而实现运动过程中的避碰^[8-10]。

本文将斥力势场的非线性结构改进为线性描述,定义线性形式的斥力场为

$$f = \begin{cases} 0, & d > d_{\text{saf}} \\ s(d_{\text{saf}} - d), & d_{\text{dan}} \leq d \leq d_{\text{saf}} \\ \infty, & d < d_{\text{dan}} \end{cases} \quad (26)$$

式中, s 为安全系数(根据场景要求自行设定)。当

$d < d_{\text{dan}}$ 时 f 为无穷大,在运动过程中应避免这种情况。

2.3 斥力场作用下的双臂机器人避碰调整

图5所示为双臂机器人杆件避碰的动态调整过程及调整前后的规划轨迹。其中,将起始时刻定为参考时刻, $P_i^{r,n}$ 为右臂第 i 个关节在参考时刻后第 n 个单位时刻的位置, $P_j^{l,n}$ 为左臂第 j 个关节在参考时刻后第 n 个单位时刻的位置, $P_i^{r,n'}$ 为调整路径后右臂第 i 个关节在参考时刻后第 n 个单位时刻的位置, $P_j^{l,n'}$ 为调整路径后左臂第 j 个关节在参考时刻后第 n 个单位时刻的位置。

图6所示为杆件避碰调整过程中的斥力场的关系,图中: C_j^l 和 C_i^r 分别为左、右臂杆件的控制点,即两杆件上距离最近的点,可由式(1)~(11)求得; n 为两杆的接近向量,从点 C_i^r 指向 C_j^l ,其位置坐标的表达式为

$$n = C_j^l - C_i^r \quad (27)$$

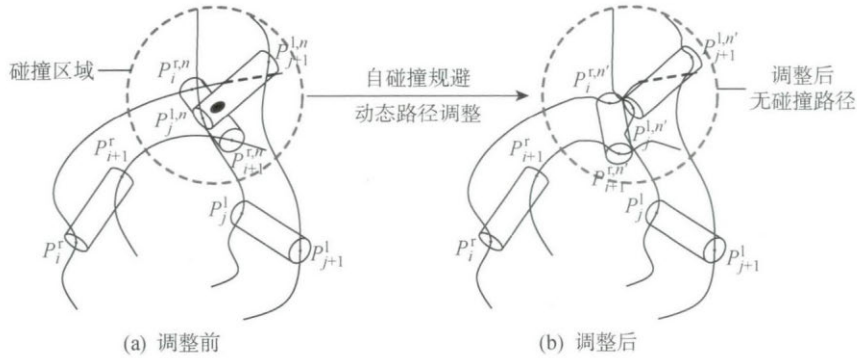


图5 杆件避碰的调整过程及轨迹

Fig. 5 Adjustment processing and trajectory of links

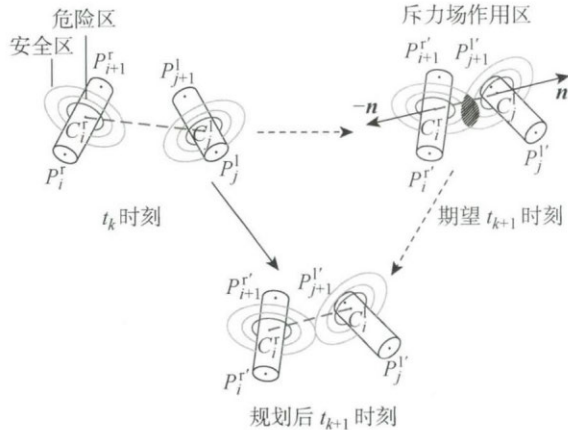


图6 杆件避碰调整前后斥力场的关系

Fig. 6 Relationship of links in repulsion force field around the adjustment

由图6可见,在 t_k 时刻,右臂第 i 杆与左臂第 j 杆的控制距离大于最小安全距离,而在期望的 t_{k+1} 时刻,右臂第 i 杆与左臂第 j 杆的控制距离小于最小安全距离(若仍按期望轨迹运动将碰撞)。此时,需要调整运行轨迹以防止机器人杆件发生自碰撞。在虚拟斥力的作用下,规划过程的杆件可自行调整,杆 $\overline{P_i^r P_{i+1}^r}$ 沿 $-n$ 方向移动,杆 $\overline{P_j^l P_{j+1}^l}$ 沿 n 方向移动,最终使得右臂第 i 杆与左臂第 j 杆的控制距离等于最小安全距离。

利用斥力场作用下的避障算法所得调整后 t_{k+1} 时刻的坐标向量分别为:

$$P_i^{r'} = P_i^r - n \frac{n \mathbf{v}_{C_i^r}^r}{n \mathbf{v}_{C_i^r}^r - n \mathbf{v}_{C_j^l}^l} (d_{\text{saf}} - d) =$$

$$P_i^r - \frac{n \mathbf{v}_{C_i^r}^r}{n \mathbf{v}_{C_i^r}^r - n \mathbf{v}_{C_j^l}^l} \frac{f}{s}$$

$$\begin{aligned}
P_j^l &= P_j^l + n \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} (d_{\text{saf}} - d) = \\
&P_j^l + \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} \frac{f}{s} \\
P_{i+1}^r &= P_{i+1}^r - n \frac{n v_{C_i^r}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} (d_{\text{saf}} - d) = \\
&P_{i+1}^r - \frac{n v_{C_i^r}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} \frac{f}{s} \\
P_{j+1}^l &= P_{j+1}^l + n \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} (d_{\text{saf}} - d) = \\
&P_{j+1}^l + \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} \frac{f}{s} \\
C_i^r &= C_i^r - n \frac{n v_{C_i^r}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} (d_{\text{saf}} - d) = \\
&C_i^r - \frac{n v_{C_i^r}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} \frac{f}{s} \\
C_j^l &= C_j^l + n \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} (d_{\text{saf}} - d) = \\
&C_j^l + \frac{n v_{C_j^l}}{n v_{C_i^r} - n v_{C_j^l}} \frac{f}{s}
\end{aligned}$$

其中,均引入改进的虚拟斥力 f 作为算子,以便于计算规划过程中的调整量。

2.4 无自碰撞运动规划算法

在斥力场作用下的双臂机器人避碰调整过程中,引入改进的线性斥力作为算子,量化了运动规划中的调整指标,能够求出从碰撞状态到无碰撞状态轨迹的调整量,比传统的非线性势场法^[8]和 C 空间采样的规划方法^[1,3,11]更加方便.对于单一杆件的碰撞检测,相应杆件的调整方式(仅以右臂第 i 根杆件为例)分别为:

- (1) 当第 i 根杆件为末端杆件时,只需调整其在 t_{k+1} 时刻的坐标就能够避免下一时刻自碰撞的发生;
- (2) 当第 i 根杆件为非末端杆件时,第 i 根杆件

的调整方式相同,而从第 $i+1$ 根杆件开始需要逐个通过逆解的判断来确定调整方式.在末端姿态不变情况下,若第 i 根杆件调整后末端逆解能够实现,则从第 i 根杆件后的杆件不需要改变,否则,重复此操作。

在双臂机器人运动的过程中,若多根杆件同时发生碰撞,则从远离末端的碰撞杆件开始逐步进行调整,使所有杆件均不在斥力场相互作用区域之内.对于多根杆件碰撞的情况,构造分析指标并将其命名为合斥力,其值为

$$F = \sum f_{ij} \quad (28)$$

式中, f_{ij} 为右臂 i 杆与左臂 j 杆的斥力.当 $F=0$ 时,所有杆件的斥力均为 0,此时,所有杆件均无碰撞情况发生.由此可见,只有在规划过程中确保 $F=0$,才能够得到无自碰撞运动轨迹。

3 模拟验证

在双臂机器人无自碰撞运动规划算法的模拟验证中,所用双臂机器人的左、右臂均采用 DLR 机械臂结构,单臂均为 7 自由度,参数均为真实双臂物理结构参数.双臂机器人的虚拟样机如图 7 所示。

根据 DH 坐标系的建立方法^[18]所建双臂机器人的各坐标系如图 8 所示.其中, θ 为关节角; d_i 为

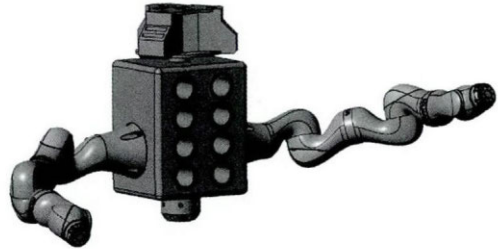


图 7 双臂机器人虚拟样机

Fig. 7 Virtual prototyping of dual-arm robot

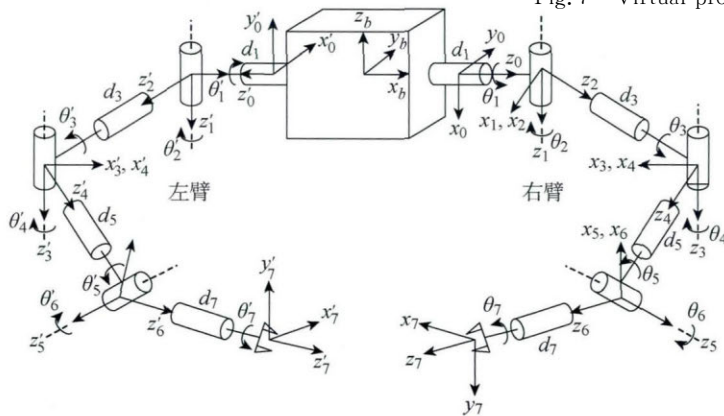


图 8 双臂机器人的 DH 坐标系

Fig. 8 DH coordinate system of dual-arm robot

坐标系 $i-1$ 与坐标系 i 原点之间沿 z_{i-1} 方向的距离. 表 1 列出了双臂机器人的单臂 DH 参数 (左、右臂的 DH 参数相同). 其中: a_i 表示 x_i 方向上坐标系 i 与坐标系 $i-1$ 的距离; α_i 表示 z_{i-1} 轴与 z_i 轴绕 x_i 轴的夹角.

通过设定有自碰撞发生的轨迹来验证所提出的自碰撞检测检测方法的有效性. 设定初始状态时左、右臂的关节角为

$$\theta_{l_sta} = \theta_{r_sta} = [0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]$$

终止状态时左、右臂的关节角分别为:

$$\theta_{r_end} = [97.966^\circ \ 84.403^\circ \ 22.945^\circ \ 147.889^\circ \ 38.993^\circ \ 79.501^\circ \ -36.002^\circ]$$

$$\theta_{l_end} = -[97.966^\circ \ 84.403^\circ \ 22.945^\circ \ 147.889^\circ \ 38.993^\circ \ 79.501^\circ \ -36.002^\circ]$$

机械臂杆件的参数分别为:

表 1 双臂机器人的单臂 DH 参数
Tab. 1 DH parameters of dual arm robot

i	a_i/m	$\alpha_i/(\circ)$	$\theta_i/(\circ)$	d_i/m
1	0	-90	θ_1	0.145
2	0	90	θ_2	0
3	0	-90	θ_3	0.415
4	0	90	θ_4	0
5	0	-90	θ_5	0.405
6	0	90	θ_6	0
7	0	0	θ_7	0.150

$$r^r = r^l = 0.05 \text{ m}, \quad d_{\text{dan}}^r = d_{\text{dan}}^l = 0.075 \text{ m},$$

$$d_{\text{saf}}^r = d_{\text{saf}}^l = 0.1 \text{ m}$$

将左、右的对称机械臂进行从初始状态运动到终止状态的关节均匀插值, 其期望关节角的变化规律如图 9 所示. 由图 9 可见: 在时刻 $t=0 \sim 50$ 内各关节通过均匀插值; 在 $t=50 \sim 62$ 内, 关节 1~3 及 5~7 的关节角保持不变, 关节 4 通过均匀插值, 其关节角从 87.889° 变化到 147.889° .

利用 MATLAB 软件中 Peter Corke 编写的机器人工具箱^[19], 在期望关节角变化的条件下绘制杆件的运动轨迹, 并模拟各杆件的运动情况. 图 10 示

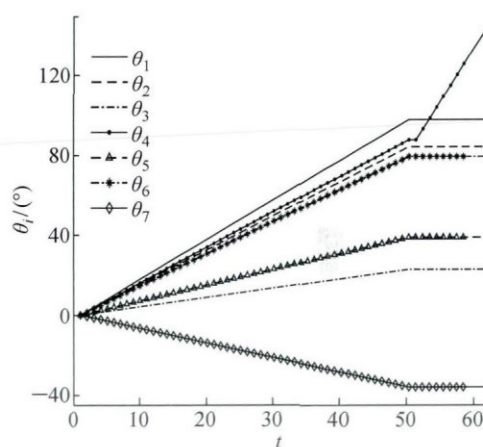


图 9 期望关节角的变化规律

Fig. 9 Desired joint space with time varying

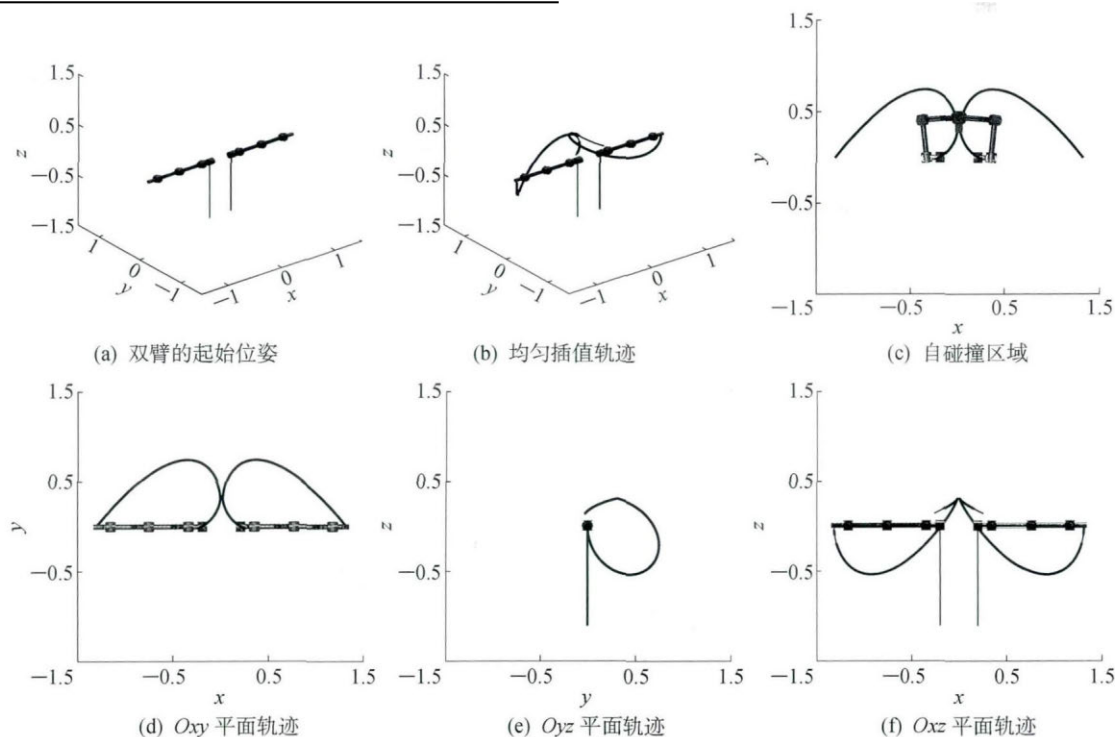


图 10 均匀插值的双臂机器人运动轨迹

Fig. 10 Trajectory of dual-arm robot with linear interpolation

出了双臂机器人的运动轨迹,其中标记了发生自碰撞的区域。

当双臂机器人运动过程中不进行自碰撞检测时,能够明显观察到左臂与右臂在期望轨迹会发生碰撞,碰撞区域如图 10(c)所示。由无自碰撞检测算法检测到时刻 $t=41\sim 59$ 内,随着期望关节角的变化将发生自碰撞。

采用本文提出的无自碰撞运动规划算法对双臂机器人进行路径规划,所得无碰撞路径如图 11 所

示。对比图 10 与 11 可见,不进行自碰撞检测的路径会发生明显的自碰撞,实行自碰撞检测后的路径能够避开原有的自碰撞区域,并行进到期望的终止位置。图 12 示出了实行无自碰撞运动规划后的关节空间变化情况,与图 9 对比可见避碰过程中关节角度的调整。在 $t=41\sim 59$ 内为无自碰撞的路径调整,其调整过程基本平稳,有效规避了自碰撞,从而验证了本文提出的基于改进线性斥力场法的无自碰撞运动规划算法的有效性。

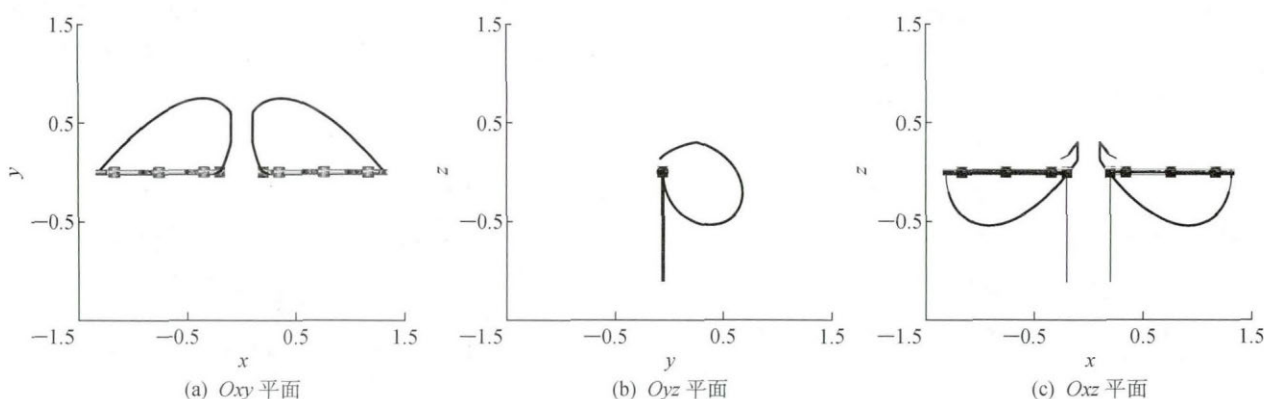


图 11 无自碰撞运动规划后的双臂机器人路径

Fig. 11 Collision-free path planning of dual-arm robot

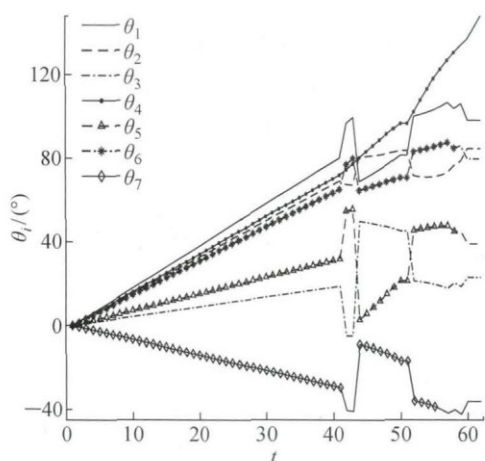


图 12 实行无自碰撞规划后的关节角变化规律

Fig. 12 Joint space after self-collision-free planning

4 结 语

本文利用空间向量几何距离将机器人双臂的位置关系分为 9 种,并给出了 9 种位置关系下的自碰撞检测算法,避免了基于 C 空间采样的规划检测中障碍物无法完整表达的问题。针对双臂机器人的无自碰撞运动规划问题,改进了传统的人工势场法并将其作为算子引入避碰调整中用于计算规划调整

量,构造了多杆碰撞的描述指标,提出了无自碰撞运动规划算法。同时,根据实际的双臂机器人 DH 参数,通过预先给定机器人运动轨迹进行模拟,利用无自碰撞运动规划算法重新进行运动轨迹规划。结果表明,规划后的机器人避开了自碰撞区域,从而验证了所提自碰撞运动规划算法的有效性。

参考文献:

- [1] COHEN B, CHITTA S, LIKHACHEV M. Single- and dual-arm motion planning with heuristic search [J]. *Journal of Robotics Research*, 2014, 33(2): 305-320.
- [2] FEI Y Q, DING F Q, ZHAO X F. Collision-free motion planning of dual-arm reconfigurable robots[J]. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, 2004, 20(4): 351-357.
- [3] CHOSSET H, LYNCH K M, HUTCHINSON S, et al. Principles of robot motion: Theory, algorithms, and implementations[M]. Massachusetts, USA: MIT Press, 2005.
- [4] KUFFNER J, NISHIWAKI K, KAGAMI S. Self-collision detection and prevention for humanoid robots [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Washington, USA: IEEE, 2002: 2265-2270.

- [5] PARK C. Self-collision detection & avoidance algorithm for a robot manipulator[J]. **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)**, 2015, 5(4): 139-142.
- [6] 陈友东, 宴亮, 谷平平. 双机器人系统的碰撞检测算法[J]. **北京航空航天大学学报**, 2013, 39(12): 1644-1648.
CHEN Youdong, YAN Liang, GU Pingping. Detection collision algorithm for two-manipulator system [J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2013, 39(12): 1644-1648.
- [7] 邹益胜. 虚拟样机环境下实时碰撞检测算法研究[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2009.
- [8] OUSSAMA K. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 1986, 5(1): 90-98.
- [9] 姜力, 周扬, 孙奎, 等. 七自由度冗余机械臂避障控制[J]. **光学精密工程**, 2013, 21(7): 1795-1801.
JIANG Li, ZHOU Yang, SUN Kui, *et al.* Obstacle avoidance control for 7-DOF redundant manipulators [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2013, 21(7): 1795-1801.
- [10] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2011, 43(1): 50-55.
YU Zhenzhong, YAN Jihong, ZHAO Jie, *et al.* Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2011, 43(1): 50-55.
- [11] ELBANHAWI M M. Sampling-based robot motion planning: A review[J]. **IEEE Access**, 2014, 2(1): 56-77.
- [12] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning[J]. **Algorithmic & Computational Robotics New Directions**, 1998: 293-308.
- [13] KAVRAKI L, SVESTKA P, LATOMBE J, *et al.* Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1996, 12(4): 566-580.
- [14] ZUCKER M, RATLIFF N, DRAGAN A, *et al.* CHOMP: Covariant hamiltonian optimization for motion planning[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2013, 32(9/10): 1164-1193.
- [15] KARAMAN SFRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning [J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2011, 30(7): 846-894.
- [16] SCHULMAN J, DUAN Y, HO J, *et al.* Motion planning with sequential convex optimization and convex collision checking [J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2014, 33(9): 1251-1270.
- [17] Aldebaran Robotic. Self-collision avoidance—NAO Software 1.14.5 documentation [EB/OL]. [2016-11-23]. <http://doc.aldebaran.com/1-14/naoqi/motion/reflexes-collision-avoidance.html?highlight=self%20collision>.
- [18] SICILIANO B. Robotics: Modelling planning and control [M]. First edition. London: Springer, 2009.
- [19] CORKE P. Robotics, vision and control [M]. First edition. Berlin, Germany: Springer, 2011.