

作者简介:王欣*(1972-),女,博士,副教授,E-mail:yihj2008023@126.com;王殿龙(1962-),男,教授,博士生导师.

提出一种基于遗传算法(GA)的双机吊装动作规划方法^[10].该方法规划效率高,但存在算法收敛性差及动作序列质量难控制等不足.Wang、张玉院等提出基于蚁群算法的单、双台起重机动作规划方法^[11-12],考虑碰撞、位姿距离、起重机动作优先级等约束.该方法能够规划出较优的动作序列,但蚁群算法中启发式因子等参数较难控制且计算时间较长.2012年,刘园园采用 RRT-Connect 及 RRT-MultiPhrase 算法(一种改进的 RRT 算法)对双机吊装进行动作规划^[13],实现了双机行走、转弯等较难协同动作,但其中解决双机吊装系统单封闭链问题只是将规划结果进行简单判断,即判断两台起重机吊点之间距离与被吊物长度差值是否在设定的误差范围内,若结果不满足即舍弃,导致规划过程做较多无用功,规划效率较低.

可见,以上方法都采用正向求解思路,即先从起重机或系统整体的角度出发来建立模型,再构建位姿空间,最后采用规划算法进行动作规划.正向求解虽能实现双机吊装系统动作规划,但存在规划效率较低、规划动作不优等不足.而本文将在刘园园研究^[13]基础上,以被吊物及起重机下车为驱动对象,采用逆向求解进行双机吊装动作规划.主要思路是以被吊物及起重机下车为动作规划对象,采用改进的 RRT-Connect++ 算法^[14]先随机采样被吊物位姿,再在被吊物吊点确定的站位环中随机采样起重机下车位姿,这样所得位姿变量满足单封闭链约束,剩余起重机位姿变量通过求解封闭链方程得到,同时在扩展动作时考虑非完整运动学约束.最后,在双机吊装系统动作规划平台上采用两个双机吊装案例验证该改进算法的可行性及其规划的高效性.

1 双机吊装系统单封闭链问题求解

根据机构学思想,可以将双机吊装系统看成单封闭链系统,即由主起重机、被吊物、溜尾起重机、地面首尾相接构成的一个封闭环路,如图 1 所示.此封闭链结构存在于多起重机协同吊装、多机器人协同搬运等问题中.封闭链问题增加系统建模难度,并在动作规划的位姿空间中易形成分散的、低维度的子空间导致动作规划的效率较低.因此,此问题越来越引起研究者的关注.早在 2005 年,Cortés Mastral 已对多机器人协同搬运问题

中的封闭链约束采用随机环路产生器(random loop generator,RLG)算法进行求解^[7].该算法先参数化位姿空间,并将位姿变量分为主动和被动变量,然后通过随机采样算法规划主动变量,求解封闭链方程得到被动变量.此算法能很好地解决有封闭链约束的随机采样规划问题,且计算时间短,但其中主动、被动变量的划分具有的不确定性,对动作规划效果影响较大.

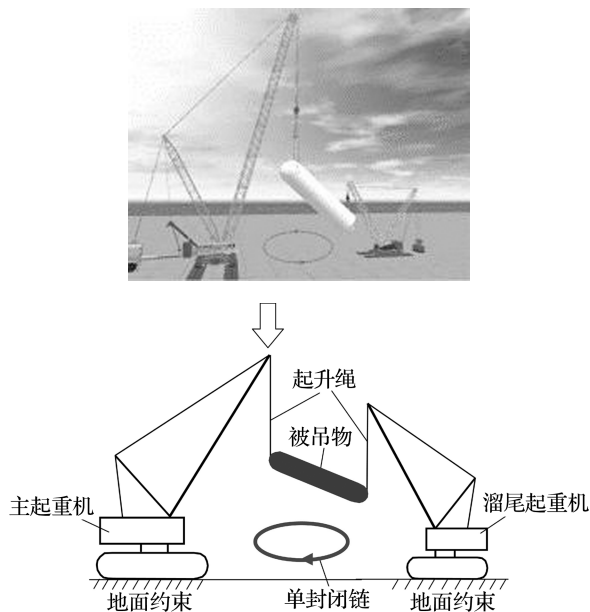


图 1 双机吊装系统单封闭链结构示意图

Fig. 1 The single close-chain configuration of dual-crane lifting system

在此,本文采用 RLG 算法的优点,结合双机吊装系统的特点,将被吊物及起重机下车位姿作为主动变量,其他位姿为被动变量.主动变量由动作规划算法求得,再通过封闭链方程求解得到起重机其他位姿变量.在求解时假定双机吊装系统各部分为刚体,并要求起升绳始终竖直,具体求解过程如下:

首先建立如图 2 所示坐标系 $OXYZ$,由起重机的动作特点及其本身结构的几何关系,易知在已知起重机下车位姿 (x, z, φ) 及被吊物吊点位置 (x_{lc}, y_{lc}, z_{lc}) 情况下,可以求得起重机转台相对下车角度 θ 、臂架仰角 ϕ 、起升滑轮到吊点竖直距离 h ,其中 (x, z) 是起重机回转中心坐标, φ 是起重机下车与 X 轴正方向夹角.而被吊物位姿定义如下:简化被吊物为一长度为 L' 的刚体(按设备轴线),同时为简化吊点位置计算复杂度,用主吊点

处位姿表示被吊物位姿,在主吊点处建立局部坐标系 $O'X'Y'Z'$,如图2所示,其中 α_{le} 是被吊物的轴线与 X 轴正方向(水平方向)的空间夹角(范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$); β_{le} 是被吊物的轴线与水平面 XOZ 的夹角(即被吊物仰角,范围为 $[0^\circ, \alpha_{le}]$;若 α_{le} 为钝角,则范围为 $[0^\circ, 180^\circ - \alpha_{le}]$); γ_{le} 是常量,取值为 $+1$ 或 -1 , $+1$ 表示溜尾吊点在 Z 轴正方向, -1 则反之。

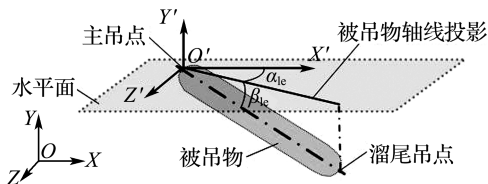


图2 被吊物位姿

Fig. 2 The lifted equipment configuration

因此,主动变量为被吊物位姿 $(x_{le}, y_{le}, z_{le}, \alpha_{le}, \beta_{le}, \gamma_{le})$ 及主、溜尾起重机下车位姿 (x_i, z_i, φ_i) , $i = 1, 2$,主、溜尾起重机转台相对下车角度和臂架仰角、起升滑轮到吊点竖直距离为被动变量。故可构建双机吊装系统的位姿为 $(x_1, z_1, \varphi_1; x_2, z_2, \varphi_2; x_{le}, y_{le}, z_{le}, \alpha_{le}, \beta_{le}, \gamma_{le})$ 。

具体的封闭链方程求解过程如下:

已知被吊物主吊点处位姿 $(x_{le}, y_{le}, z_{le}, \alpha_{le}, \beta_{le}, \gamma_{le})$,为规划算法随机采样所求得,其中被吊物起始、就位位姿是给定的,并已知两吊点在被吊物轴线上的距离 L 。

由主、溜尾吊点间相对位置关系,可求得溜尾吊点位置 (x_{lt}, y_{lt}, z_{lt}) 为

$$\begin{aligned} x_{lt} &= x_{le} + L \cdot \cos \alpha_{le} \\ y_{lt} &= y_{le} - L \cdot \sin \beta_{le} \\ z_{lt} &= z_{le} + L \cdot \gamma_{le} \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha_{le} - \sin^2 \beta_{le}} \end{aligned} \quad (1)$$

再由主、溜尾吊点位置,结合所给的被吊物重量和主、溜尾起重机起重性能数据确定的最大、最小作业半径 $R_{\max}, R_{\min}$,确定主、溜尾起重机的站位环,见图3阴影部分,其中坐标原点 O 是被吊物吊点投影位置。然后在站位环中随机采样,得到主、溜尾起重机的下车位姿 (x_i, z_i, φ_i) , $i = 1, 2$ 。

对于主起重机,确定下车位姿和已知主吊点位置后,即可求解转台相对下车角度 θ_1 、主起重机臂架仰角 ϕ_1 、主起升滑轮到吊点竖直距离 h_1 ,具体见式(2)~(4):

$$\theta_1 = \arctan((z_1 - z_{le}) / (x_1 - x_{le})) - \varphi_1 \quad (2)$$

$$\phi_1 = \arccos(|\sqrt{(x_1 - x_{le})^2 + (z_1 - z_{le})^2} - x| / \sqrt{L_m^2 + h_m^2}) + \arctan\left(\frac{h_m}{L_m}\right) \quad (3)$$

$$h_1 = \{L_m^2 + h_m^2 - [[(x_1 - x_{le})^2 + (z_1 - z_{le})^2]^{1/2} - x]^2 - z^2\}^{1/2} + H_m - y_{le} \quad (4)$$

式中: x 为主臂架铰点相对起重机回转中心坐标 (x, z) 的横坐标(m); z 为主臂架铰点相对起重机回转中心坐标 (x, z) 的纵坐标(m); h_m 为主滑轮到主臂轴线的竖直距离(m); H_m 为主起重机下车高(m); L_m 为主臂长度(m)。

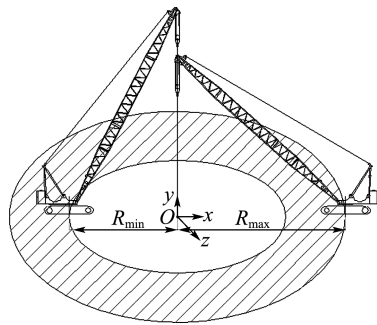


图3 起重机站位环示意图

Fig. 3 Sketch map of the location loop of crane

对于溜尾起重机,当求得溜尾吊点位置和溜尾起重机下车位姿后,剩余位姿变量求解与主起重机的计算公式相同。

2 双机吊装系统动作规划算法

对双机吊装系统进行动作规划时,采用改进的 RRT-Connect++ 算法^[14]直接规划主动变量,再由封闭链方程求解被动变量,从而得到双机系统的整体位姿变量。

RRT-Connect++ 算法主要流程是:初始化(建立位姿空间)—随机采样—选生长点(距离最近原则)—选择动作输入—扩展树—判断是否满足(加入树中),如图4所示。它的特点是生长点在选择动作输入后,能够进行多步扩展直至达到随机点或遇到障碍。同时,为增加规划出较优动作序列的机会又能保持树节点较少,在树扩展操作中每隔 k 步生成的树节点加入树中,扩展过程如图5所示。通过此策略,在下一个迭代周期中算法提供了中间节点向优质区扩展的可能,同时也提高了两棵树中间节点相连的可能性。

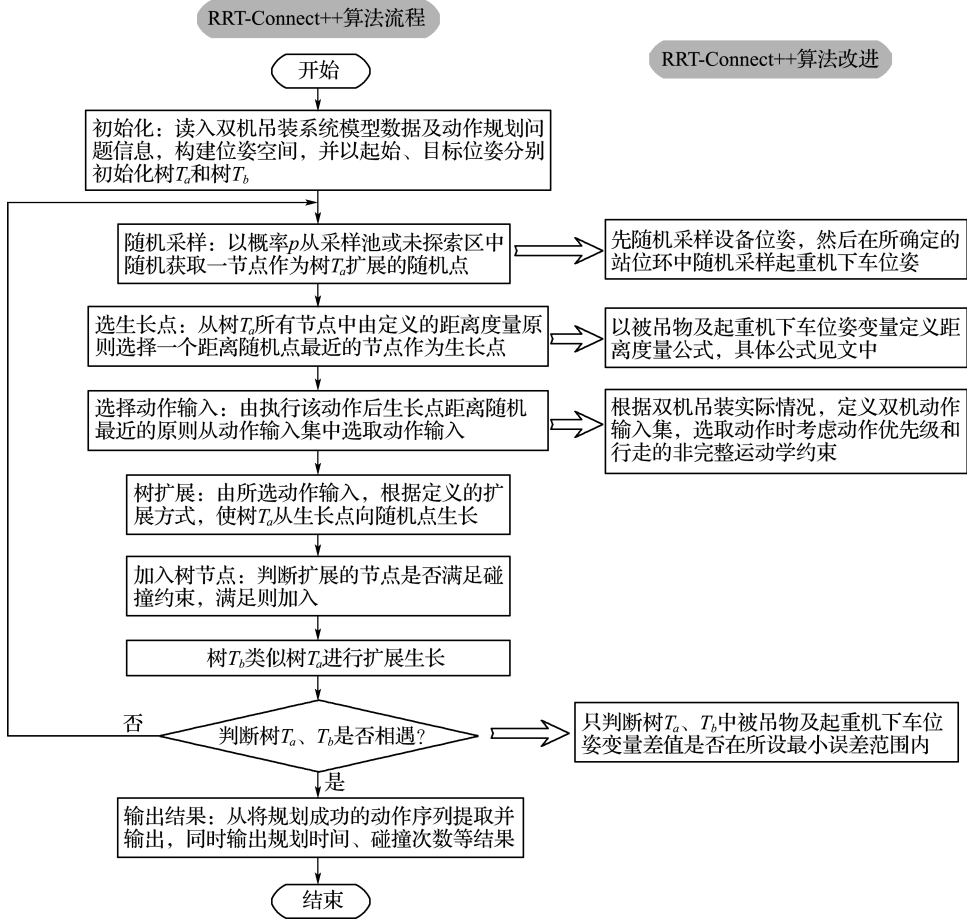


图4 RRT-Connect++算法流程和对它的改进

Fig. 4 Flow chart and its improvement of the RRT-Connect++ algorithm

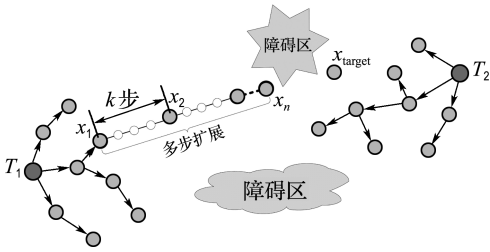


图5 RRT-Connect++算法树节点扩展

Fig. 5 Expansion of the trees nodes for the RRT-Connect++ algorithm

另外，为使 RRT-Connect++ 算法与本文双机吊装系统建立的模型相对应，需在算法的随机采样、选择生长点及动作输入、判断两树相遇等方面进行改进，如图 4 所示。具体的改进如下：

(1) 随机采样中，先到位姿空间随机采样被吊物位姿，继而可由被吊物吊点位置、被吊物重量及起重机起重性能数据确定两台起重机的站位环，然后在站位环中随机采样起重机下车位姿，见

图 3。

(2) 选择生长点步骤中，采用两位姿间距离最短原则，距离是将各个位姿变化前后轨迹长度相加之和，即长度变量直接相减，角度变量取平均弧长，计算公式见式(5)、(6)：

$$l = |x_1^i - x_1^{i+1}| + |z_1^i - z_1^{i+1}| + \bar{R}_1 \cdot |\varphi_1^i - \varphi_1^{i+1}| + |x_2^i - x_2^{i+1}| + |z_2^i - z_2^{i+1}| + \bar{R}_2 \cdot |\varphi_2^i - \varphi_2^{i+1}| + |x_{le}^i - x_{le}^{i+1}| + |y_{le}^i - y_{le}^{i+1}| + |z_{le}^i - z_{le}^{i+1}| + L \cdot |\alpha_{le}^i - \alpha_{le}^{i+1}| + L \cdot |\beta_{le}^i - \beta_{le}^{i+1}| \quad (5)$$

$$l' = 2L \left| \sqrt{\sin^2 \alpha_1^i - \sin^2 \beta_1^i} - \sqrt{\sin^2 \alpha_1^{i+1} - \sin^2 \beta_1^{i+1}} \right| \quad (6)$$

式中： $\bar{R}_1$ 、 $\bar{R}_2$ 分别是主、溜尾起重机两位姿的平均作业半径；当 $\gamma_{le}^i \neq \gamma_{le}^{i+1}$ 时， l 需再加上 l' 。

(3) 动作输入集定义中，根据双机实际吊装情况，定义双机动作输入集，选取动作时遵循两节点距离最短及代价最小原则。

(4) 定义两节点相遇原则：为减少计算量，只

判断两树最近节点位姿中的被吊物及起重机车位姿变量差值是否在所设定的误差 δ 范围内,其他位姿变量不予判断。

此外,在生长树扩展时,即当已知双机吊装系统某一时刻的位姿(主动变量),需选择动作输入,由状态转移方程,求得下一时刻系统位姿。而在求解状态转移方程时,需考虑起重机行走的非完整运动学约束。非完整运动学约束是一种用微分方程表示的但不可积分的约束,存在于起重机行走转弯时。对于单台起重机非完整运动学约束问题,文中建立类似轮式机器人运动学模型^[13],即给定起重机沿履带方向速度,分解为平面坐标系的分速度,见图 6。假定 t 时刻起重机车位姿变量为 (x_t, z_t, φ_t) ,履带方向速度为 v ,则 $t+1$ 时刻下车位姿变量 $(x_{t+1}, z_{t+1}, \varphi_{t+1})$ 求解公式为

$$x_{t+1} = x_t + v \times \cos \varphi_t$$
$$z_{t+1} = z_t + v \times \sin \varphi_t$$
$$\varphi_{t+1} = \varphi_t + \Delta\varphi$$

(7)

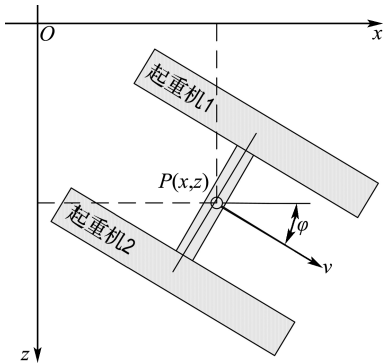


图 6 起重机行走、转弯运动学简化模型
Fig. 6 Simplified model for the traveling and turning of crane

根据双机吊装系统所定义的位姿,并考虑起重机的非完整运动学约束,定义其动作输入集 u 为 $(v_1, \Delta\varphi_1; v_2, \Delta\varphi_2; \Delta x_{le}, \Delta y_{le}, \Delta z_{le}, \Delta\alpha_{le}, \Delta\beta_{le}, 1/-1)$,其中 v_1, v_2 是主、溜尾起重机沿履带方向速

度,其他变量(除 $1/-1$)为各位姿的增量,即动作步长,如动作集 $(0, 0; -0.1, 0; 0, 0, 0, 0, 0.1, 1)$ 表示设备沿主吊点翻转,溜尾起重机跟随,动作步长都为 0.1。

这样,双机吊装系统的主动变量值可由改进的 RRT-Connect++ 算法随机采样得到,同时考虑两台起重机非完整运动学约束求得状态转移方程,再根据封闭链方程求得被动变量。

3 案例分析

为验证本文对双机吊装系统求解思路的可行性和规划的高效性,将列举两个双机吊装案例。主、溜尾起重机型号都是 LIEBHERR。案例中主起重机最大起重能力为 750 t,臂长为 63 m;溜尾起重机最大起重能力为 400 t,臂长为 42 m;被吊物长 25 m,直径 4 m,质量为 380 t。迭代次数不超过 5 000,否则规划失败。

以下案例的计算机配置为 CPU 主频:2.20 GHz,内存:2 GB。

3.1 案例 1

案例 1 要求两台起重机实现被吊物的翻转、竖直动作,同时要求无碰撞。起始时被吊物为水平状态,距离地面 10 m;就位时被吊物与竖直方向夹角为 83° (避免溜尾起重机与被吊物发生碰撞),溜尾起重机为协助完成吊装任务行走了一段距离。双机吊装系统起始、就位位姿如表 1 所示,定义的双机吊装系统动作输入集如表 2 所示。

对案例进行重复 100 次动作规划,所得实验结果平均值如下:成功率 100%;碰撞检测 797.8 次;树节点 193 个;规划时间 0.535 s。与文献[13]中的第三章案例一对比,所进行的碰撞检测次数及规划出的树节点数都较少,表现出较高的规划效率。图 7 为双机吊装系统仿真界面截图,显示所规划的起重机及被吊物轨迹。

表 1 案例 1 双机吊装系统起始、就位位姿

Tab. 1 Initial and target configurations of dual-crane lifting system for Case 1

项目	(x_1, z_1)	φ_1/rad	(x_2, z_2)	φ_2/rad	(x_{le}, y_{le}, z_{le})	α_{le}/rad	β_{le}/rad	γ_{le}
起始位姿	(0, -77 m)	0	(5 m, -27 m)	1.57	(10 m, 10 m, -70 m)	1.57	0	1
就位位姿	(0, -77 m)	0	(5 m, -53 m)	1.57	(10 m, 35 m, -70 m)	1.57	1.45	1

表 2 案例 1 双机吊装系统动作输入集

Tab.2 Motion input set of two crane lifting system for Case 1

$v_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\varphi_1/\text{rad}$	$v_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\varphi_2/\text{rad}$	$\Delta x_{le}/\text{m}$	$\Delta y_{le}/\text{m}$	$\Delta z_{le}/\text{m}$	$\Delta\alpha_{le}/\text{rad}$	$\Delta\beta_{le}/\text{rad}$	γ_{le}
0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	1
0	0	-0.01	0	0	0.1	0	0	0.1	1
0	0	-0.10	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	1
0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	1

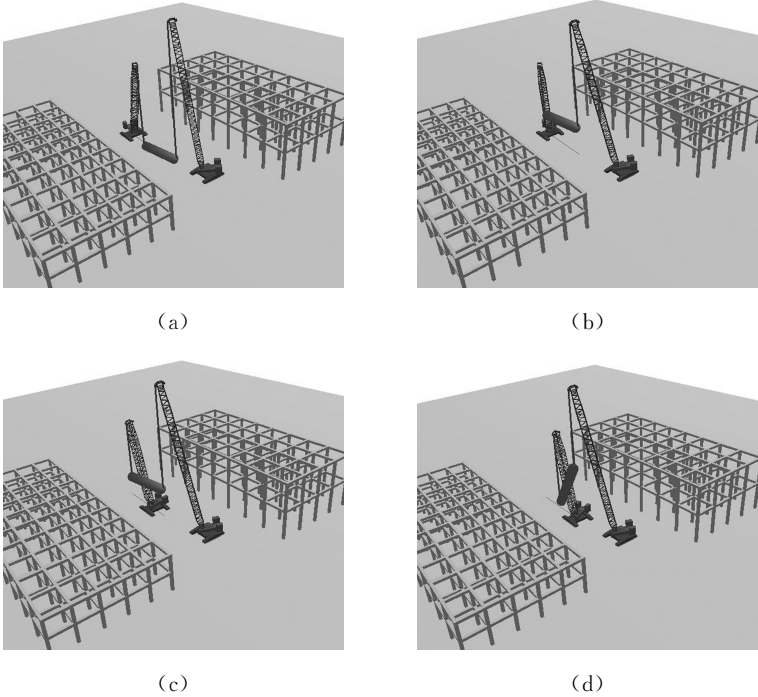


图 7 案例 1 双机吊装系统仿真截图

Fig.7 The screenshots of dual-crane lifting system simulation

3.2 案例 2

案例 2 要求两台起重机在有障碍物环境中将被吊物由起始位置平移到就位位置,吊装中起重 机需进行转弯绕开起始、就位位置间存在的突出 障碍物.双机吊装系统起始、目标位姿见表 3,定 义的双机吊装系统动作输入集如表 4 所示.

同样,对该案例进行重复 100 次动作规划,所

得实验结果平均值如下:成功率 100%;碰撞检测 6 391.44 次;树节点 1 781.13 个;规划时间 16.78 s.图 8 为双机吊装系统仿真界面截图,显示所规 划的起重机及被吊物主吊点动作轨迹.此结果显 示碰撞检测及树节点数都较多,但都在可接受范 围内,规划效率相对较高并且该算法规划的动作 轨迹较优.

表 3 案例 2 双机吊装系统起始、就位位姿

Tab.3 Initial and target configurations of dual-crane lifting system for Case 2

项目	(x_1,z_1)	φ_1/rad	(x_2,z_2)	φ_2/rad	(x_{le},y_{le},z_{le})	α_{le}/rad	β_{le}/rad	γ_{le}
起始位姿	(-10 m,5 m)	1.57	(23 m,7 m)	1.57	(0 m,5 m,-10 m)	0	0	1
就位位姿	(10 m,-70 m)	1.57	(43 m,-72 m)	1.57	(20 m,5 m,-85 m)	0	0	1

表 4 案例 2 双机吊装系统动作输入集

Tab. 4 Motion input set of dual-crane lifting system for Case 2

$v_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\varphi_1/\text{rad}$	$v_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\varphi_2/\text{rad}$	$\Delta x_{\text{le}}/\text{m}$	$\Delta y_{\text{le}}/\text{m}$	$\Delta z_{\text{le}}/\text{m}$	$\Delta\alpha_{\text{le}}/\text{rad}$	$\Delta\beta_{\text{le}}/\text{rad}$	γ_{le}
-0.1	0	-0.1	0	0.1	0	0	0	0	1
-0.1	0	-0.1	0	0	0	-0.1	0	0	1
0	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	1
0	-0.1	0	-0.1	0	0	0	0	0	1

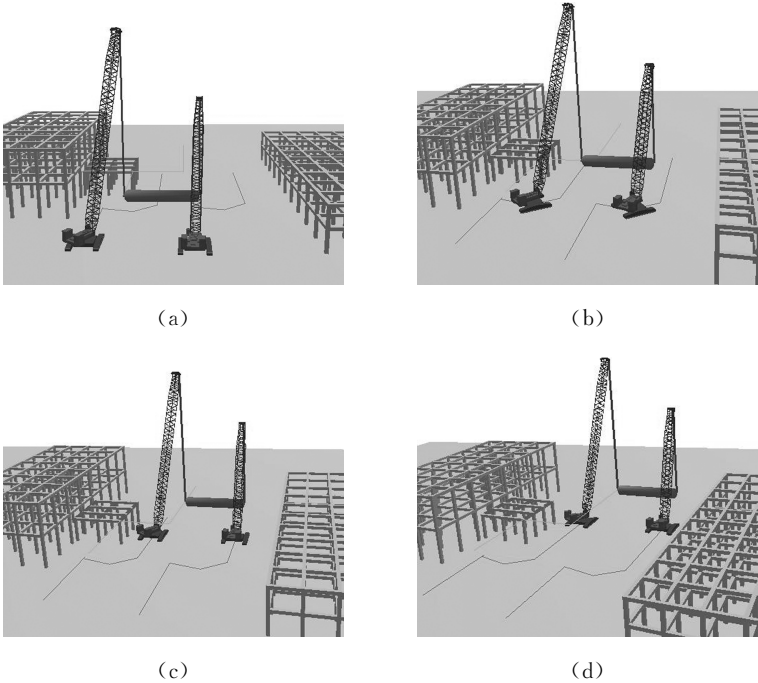


图 8 案例 2 双机吊装系统仿真截图

Fig. 8 The screenshots of dual-crane lifting system simulation for Case 2

4 结 论

本文通过逆向求解的思路构建了双机吊装系统模型,并对 RRT-Connect++ 算法进行了改进,通过改进的算法规划得到主动变量,再利用主动变量求解封闭链方程得到被动变量.文中所给出的两个案例中,算法对双机实现被吊物翻转、行走避障平移的吊装任务表现出较高的规划效率,并能找到较优的动作序列,充分验证了该求解思路的高效性和可行性,有效改善了由于单封闭链结构和起重机非完整运动学约束等导致的规划效率低、动作不优的问题,同时算法考虑了碰撞、起重性能、双机吊装系统特性等约束,为吊装方案的制订提供了更安全、更全面、更灵活的动作规划信息.

参考文献:

[1] Souissi R, Koivo A J. Modeling and controlling of

two co-operating planar cranes [C] // **International Conference on Robotics and Automation**. Piscataway:IEEE, 1993:957-962.

[2] Zhang C, Hammad A. Collaborative agent-based system for multiple crane operation [C] // **24th International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISARC 2007)**. Madras:I. I. T. , 2007:193-198.

[3] Wang X, Wang H, Wu D. Interactive simulation of crawler crane's lifting based on OpenGL [C] // **International Design Engineering Technical Conference and Information in Engineering Conference**. New York:ASME, 2008:1533-1540.

[4] Wu D, Lin Y, Wang X, *et al.* Design and realization of crawler crane's lifting simulation system [C] // **International Design Engineering Technical Conference and Information in Engineering Conference**. New York:ASME, 2008:1523-1531.

[5] Hung W H, Kang S C. Physics-based crane model

- for the simulation of cooperative erections [C] // **9th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality**. Sydney: ASCE, 2009:237-246.
- [6] Chi H L, Kang S C. A physics-based simulation approach for cooperative erection activities [J]. **Automation in Construction**, 2010, **19**(6):750-761.
- [7] Cortés Mastral J. Motion planning algorithms for general closed-chain mechanisms [D]. Toulouse: LASS, 2005.
- [8] Perez A, Karaman S, Shkolnik A, *et al.* Asymptotically optimal path planning for manipulation using incremental sampling-based algorithms [C] // **IROS' 11 - 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: Celebrating 50 Years of Robotics**. Piscataway: IEEE, 2011:4307-4313.
- [9] Reddy H R, Varghese K. Automated path planning for mobile crane lifts [J]. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, 2002, **17**(6):439-448.
- [10] Deen Ali M S A, Babu N R, Varghese K. Collision free path planning of cooperative crane manipulators using genetic algorithm [J]. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2005, **19**(2):182-193.
- [11] Wang X, Zhang Y Y, Wu D, *et al.* Collision-free path planning for mobile cranes based on ant colony algorithm [J]. **Key Engineering Materials**, 2011, **467**:1108-1115.
- [12] 张玉院. 移动式起重机无碰撞路径规划的设计与实现[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- ZHANG Yu-yuan. Design and implementation of collision-free path planning for mobile crane [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 刘园园. 基于 RRTConnect 算法的双履带起重机械路径规划研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- LIU Yuan-yuan. Path planning for two crawler cranes' heavy lifting based on RRTConnect [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 林远山. 计算机辅助起重机选型及吊装过程规划研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- LIN Yuan-shan. Research on computer aided crane selection and lifting planning [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)

A motion-planning method for dual-crane lifting based on inverse-solving

WANG Xin^{*1}, YI Huai-jun¹, WU Di², WANG Dian-long¹, SUN Ji-sheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: It makes motion-planning more difficult that the cranes cooperate in dual-crane lifting. Especially, the single close-chain problem between cranes and lifted equipment, non-holonomic problem while the cranes are turning, both lead to low planning efficiency and un-optimal planning motion sequences. For the problem of single close-chain and non-holonomic constraint in dual-crane lifting system, a way based on inverse-solving, driven by lifted equipment and crane carriage is used. The model of dual-crane lifting system is established in view of lifted equipment, and the configuration variables are separated into two sets: active variables and passive variables. The improved motion-planning RRT-Connect++ algorithm directly acts on the active variables while the passive ones are obtained by solving single close-chain equations. The feasibility and efficiency of the extended planning are shown by two cases study.

Key words: motion-planning; dual-crane lifting; single close-chain constraint; non-holonomic constraint; improved RRT-Connect++ algorithm