



机械工程学报
Journal of Mechanical Engineering
ISSN 0577-6686, CN 11-2187/TH

《机械工程学报》网络首发论文

题目：空间多机器人协同运动规划研究
作者：关英姿，刘文旭，焉宁，宋春林
网络首发日期：2018-09-20
引用格式：关英姿，刘文旭，焉宁，宋春林. 空间多机器人协同运动规划研究. 机械工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20180919.1102.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

空间多机器人协同运动规划研究

关英姿¹ 刘文旭¹ 焉宁² 宋春林¹

(1. 哈尔滨工业大学航天工程系 哈尔滨 150001;

2. 中国运载火箭技术研究院研究发展中心 北京 100076)

摘要: 面向空间在轨装配任务提出基于优先级的多机器人协同运动规划方法。多机器人系统包括一个七自由度操作机器人和一个 13 自由度超冗余照明机器人。采用两种规划方法规划高优先级的操作机器人: 关节空间点到点的离线路径规划和基于伪逆的笛卡尔空间在线运动规划。针对低优先级的超冗余照明机器人, 将操作机器人视为已知障碍, 采用基于 A* 算法和末端轨迹跟随的可重构运动规划方法, 将运动规划分解为末端路径规划和机器人各关节对轨迹的跟随问题, 并验证算法的可重构性。采用具有一定结构形式的机器人模型进行仿真实验, 仿真结果表明: 提出的各个机器人的运动规划方法均能有效满足任务需求, 且照明机器人的运动规划算法具有可重构性, 多机器人系统基于优先级的协同策略能够满足空间在轨装配任务需求。

关键词: 在轨装配; 多机器人; 协同运动规划; 超冗余机器人

中图分类号: TG156

Research on Cooperative Motion Planning of Space Multi-robots

GUAN Yingzi¹ LIU Wenxu¹ YAN Ning² SONG Chunlin¹

(1. Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. R&D Centre, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract: A multi-robots cooperative motion planning method based on priority is proposed for space on-orbit assembly task. The multi-robot system is composed of a 7-DOF manipulator and a 13-DOF super redundant lighting robot. Two methods are used to plan high-priority manipulators: off-line path planning from point to point in joint space and on-line motion planning in Cartesian space based on pseudo-inverse. For the low-priority super-redundant lighting robot, the manipulator is regarded as a known obstacle, and a reconfigurable motion planning method based on A* algorithm and trajectory tracking is proposed. The motion planning is decomposed into terminal trajectory planning and tracking of robot joints, and the reconfiguration of the algorithm is verified. Simulation experiment is conducted using two robot models with certain structure. Simulation results show that the motion planning method of each robot can meet the task requirements effectively, the motion planning algorithm of lighting robot is reconfigurable. The cooperative strategy based on priority of multi-robot system can meet the requirements of space on-orbit assembly task.

Key words: On-orbit assembly; Multi-robots; Cooperative motion planning; Super-redundant robot

0 前言

空间机器人技术是大型空间结构在轨装配的一项关键技术。与单机器人系统相比, 多机器人系统通过机器人之间的协同使在轨装配工作性能提升、工作效率加快、鲁棒性更好, 因此多机器人系统应运而生, 成为空间机器人技术领域的研究热点、难点。多机器人协同运动规划是多机器人系统研究中的关键技术, 近年来, 国内外诸多学者针对多机器

人系统的协同机制进行了大量的研究。Latombe 等^[1]将多机器人协同运动规划方法分为集中式和非集中式, 非集中式方法中又包括统一协调式规划和分布式规划。在统一协调式协同机制中, 多机器人路径的协调策略主要有基于优先级的方法、速度调整和协调图法、几何修正法等。Benniwitz^[2]通过动态调整优先级顺序, 得到多机器人的协同规划路径。空间超冗余机器人自由度较多, 逆运动学求解困难, 低冗余度机器人中基于雅可比伪逆矩阵的方法, 应用于超冗余度机器人求运动学逆解时计算量巨大、甚至无法求解^[3]。采用数值迭代的方法是求解超冗余机械臂运动学的有效方法之一, 如模糊算法^[4]、

*通讯作者: 15541809386@163.com

神经网络算法^[5]等,但是往往不能给出精确解且求解时间有较大的不确定性,不能应用于实时性要求较高的场合。研究者们又提出了脊线模态法^[6],将超冗余机器人的运动学转换为脊线的运动学,这种方法需要自定义脊线形式,拟合机器人结构,对于已具备特定结构形式的超冗余机器人适用性不好,且计算复杂度高。为进一步提升超冗余度机器人的避障能力,研究者们^[7-9]提出了一种称为跟随末端轨迹的运动规划方法,主要思想是保证机器人关节点在一条规划好的路径曲线上移动。其中, PALMER 等^[7]通过序列二次规划算法实现了机器人的关节点与路径曲线匹配。王俊刚等^[9]提出迭代步长顺序查找方法实现机器人的关节点与路径曲线匹配,但仅实现了机器人理想运动学模型下的运动。借鉴上述思想,本文面向在轨装配任务,采用基于优先级的上层协同机制,完成空间多机器人的协同运动规划。针对操作机器人采用关节空间点到点的离线路径规划和基于伪逆的笛卡尔空间在线运动规划。同时采用上述迭代步长顺序查找法^[9],给出一种算法可重构的超冗余机器人运动规划方法,通过顺序搜索与杆长距离最接近的离散点,将机器人关节点与路径离散点匹配,通过空间几何方法反求超冗余机器人的关节角,采用具有特定结构的机器人模型验证算法可行性。

1 空间多机器人系统及任务描述

面向在轨装配任务的空间多机器人系统包括一个7自由度的操作机器人和一个13自由度的照明机器人。照明机器人采用模块化可重构设计,在3组单自由度杆件的基础上,通过最多五组二自由度可重构模块附加其长度。两种机器人模型示意图如图1和图2所示。两机器人固定在空间基座上,基端点距离为1.4米。

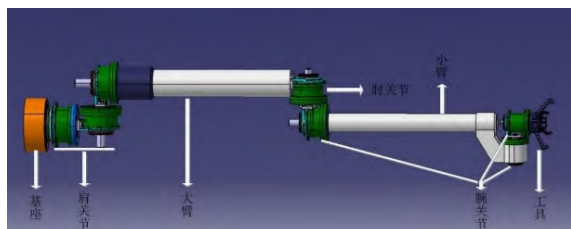


图1 操作机器人示意图



图2 照明机器人示意图

空间在轨装配的任务对象为以六边形平板单元组成的大型空间天线,任务过程为将天线单元组装在已经成型的天线框架上。操作机器人末端配有双目视觉相机,通过观测天线框架上的靶标,为装配任务提供闭环反馈。照明机器人末端配有照明灯,为操作机器人的目标探测识别提供照明。鉴于篇幅限制,将研究重点放在目标探测过程的协同运动规划,给出协同策略以及两机器人单独的运动规划方法和实施过程。

2 多机器人系统协同运动规划

2.1 多机器人协同规划方案

本文采用统一协调式规划方法中基于优先级的协调策略^[10-11],即事先指定每个机器人的优先级,按照优先级从高到低的顺序依次进行运动规划。“协调”体现在低优先级机器人的运动规划过程中,协调与规划同时进行。在低优先级机器人的规划中,把已经规划完成的、高优先级的机器人视为障碍物,这样高优先级机器人的运动轨迹确定下来,低优先级机器人的工作环境也随之确定下来。这种方法将多机器人规划问题转化为单机器人的规划问题,降低了路径搜索的空间维度以及计算代价,对各个机器人的路径搜索方法没有严格的要求。

在轨装配任务中,多机器人的协同体现在视觉探测过程中操作机器人与照明机器人的运动协调。本文将操作机器人赋予高优先级,在照明机器人的运动规划中,由操作机器人随时间序列产生的多条运动轨迹构成障碍空间。由此,低优先级照明机器人的运动规划转换为在确定空间下的静态避障运动规划问题。以下分别提出两种机器人的运动规划方法。

2.2 操作机器人运动规划方法

根据D-H建模方法,定义操作机器人的各关节坐标系如图3所示。

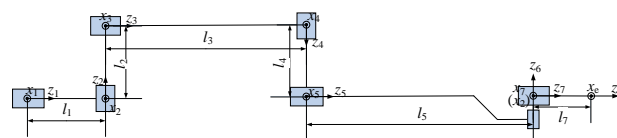


图3 操作机器人各关节坐标系

2.2.1 关节空间点到点路径规划方法

在已知机器人初始关节状态 θ_0 和终端关节状态 θ_f 后,机器人的运动规划问题可以描述为:规划

关节运动^[12]:

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{f}(t) \quad (1)$$

使其满足

$$\boldsymbol{\theta}(0) = \boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\theta}(t_f) = \boldsymbol{\theta}_f \quad (2)$$

考虑机器人运动的平滑性, 添加下面的角速度边界约束:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(0) = 0, \dot{\boldsymbol{\theta}}(t_f) = 0 \quad (3)$$

利用包含四个参数的三次多项式对关节角函数进行参数化:

$$\Theta_i(t) = a_{i3}t^3 + a_{i2}t^2 + a_{i1}t + a_{i0}, \quad i = 1, \dots, 7 \quad (4)$$

为了避免系数计算过程中的可能出现的奇异性问题, 对时间 t 进行归一化处理, 令

$$\hat{t} = \frac{t}{T} \quad (5)$$

其中 T 为运动时间。多项式函数可以写成下式:

$$\hat{\Theta}_i(\hat{t}) = \hat{a}_{i3}\hat{t}^3 + \hat{a}_{i2}\hat{t}^2 + \hat{a}_{i1}\hat{t} + \hat{a}_{i0}, \quad i = 1, \dots, 7 \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\Theta}}_i(\hat{t}) = 3\hat{a}_{i3}\hat{t}^2 + 2\hat{a}_{i2}\hat{t} + \hat{a}_{i1}, \quad i = 1, \dots, 7 \quad (7)$$

计算得到上式中各参数后, 可以从归一化的关节角和角速度获得实际的关节角和角速度^[13], 并求取最大值(或最小值), 利用最大值(或最小值)求取运动时间, 得到关节运动轨迹:

$$\Theta_i(t) = \hat{\Theta}_i(\hat{t}), \quad \dot{\Theta}_i(t) = \dot{\hat{\Theta}}_i(\hat{t})/T \quad (8)$$

2.2.2 基于伪逆的冗余机械臂笛卡尔空间运动规划方法

根据机器人末端相对于期望状态的位置误差和姿态误差可以规划机器人末端的期望运动速度和角速度^[14], 如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{ed} \\ \boldsymbol{\omega}_{ed} \end{bmatrix} = \boldsymbol{K} \begin{bmatrix} {}^0\boldsymbol{r}_{et} \\ \Delta\boldsymbol{\Psi}_{et} \end{bmatrix} \quad (9)$$

\boldsymbol{v}_{ed} 和 $\boldsymbol{\omega}_{ed}$ 是机器人末端相对于平台的期望相对速度和相对角速度, \boldsymbol{r}_{et} 是目标相对于机器人末端的位置矢量, 按式(10)计算:

$$\boldsymbol{r}_{et} = \boldsymbol{r}_t - \boldsymbol{r}_e \quad (10)$$

其中, \boldsymbol{r}_t 是目标在基座固连坐标系下的位置矢量, 根据立体视觉相机的测量值计算。 ${}^0\boldsymbol{r}_e$ 是机器人末端的位置矢量。 $\Delta\boldsymbol{\Psi}_{et}$ 是机器人末端相对于目标的姿态偏差。

采用伪逆法计算关节角速度:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^T [\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^T]^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{ed} \\ \boldsymbol{\omega}_{ed} \end{bmatrix} \quad (11)$$

再考虑关节最大转动角速度约束调整 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$, 使规划结果满足机器人的运动要求。

2.3 照明机器人运动规划方法

超冗余的照明机器人采用跟随末端轨迹的运动规划方法, 规划过程分为两个阶段: 首先基于 A* 算法规划一条自起始点至目标点的末端路径, 然后实现机器人关节的轨迹跟随。轨迹跟随的策略是: 使机器人的关节点保持在一条规划好的路径曲线上移动。

2.3.1 照明机器人的运动学模型

定义照明机器人各关节坐标系如图 4 所示。而末端路径跟随的特点是强调关节的位置, 因此将可重构模块的两个正交关节视为相交于一点, 照明机器人简化至具有 9 个关节, 8 根连杆, 以此为对象研究运动规划算法并给出由于模型简化带来的轨迹误差。

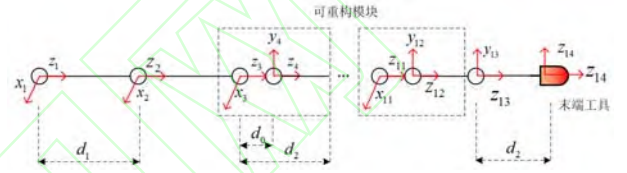


图 4 照明机器人各关节坐标系

2.3.2 障碍物建模及末端路径规划

A* 算法是一种典型的启发式搜索算法^[15]。首先采用栅格法对环境进行建模, 将照明机器人的运动空间模拟成三维栅格地图。障碍物建模采用逐个网格检测的方法。在 A* 算法的栅格地图中, 依此检测每个单元栅格与操作机器人各个连杆轴线之间的距离, 若该距离小于某一阈值, 则当前网格视为障碍网格, 否则, 视为可通行网格。根据上述协同策略, 通过等间隔采样, 选取操作机器人多个时刻下的运动轨迹构成照明机器人的障碍空间。

通过路径搜索得到离散路径点, 为防止照明机器人运动过程中发生抖动, 采用三次 B 样条曲线拟合离散点^[16], 并对路径曲线进行离散化, 得到平滑后的离散点。选取三次 B 样条曲线的理由是: 通过待拟合的离散点; 二阶导连续, 能够保证运动平顺; 易于离散化处理。

2.3.3 末端轨迹跟随

因已将路径曲线离散化处理, 故问题转化为, 在任意时刻处机器人的关节点与路径离散点的间距最小。采取的路径点匹配搜索策略是, 向前进的方向依次寻找最接近杆长的离散点。

设 $k_i (i = 1, 2, \dots, 9)$ 代表第 i 个关节点, 某一时刻, k_i 与某个路径离散点匹配, 该路径离散点称为 p_{k_i} , 其中 k_i 的值等于该离散点对应的序号。

由于照明机器人的前两个连杆只能做平面运

动,因此将第3个关节点视为已知可控的基端点 k_3 ,设其在任意时刻,基端点 k_3 与某个路径离散点 p_{k_3} 重合,以 p_{k_3} 为基础寻找与 $k_3 \sim k_9$ 对应的路径离散点。

已知机器人的上一个关节点的条件下,寻找下一个关节点是一维搜索问题,即寻找 k_i ,使其满足:

$$\min \|p_{k_i} - p_{k_{i-1}}\| - l_{i-1} \quad (12)$$

搜索过程如下:

在时刻 t ,有:

$${}^t\bar{a}l_{i-1} = {}^t k_i - {}^t k_{i-1}, (i=2,3,\dots,9) \quad (13)$$

表示第 $i-1$ 根连杆两端的关节点所匹配的路径离散点的差值的估计值,可知 $t=0$ 时有 ${}^0\bar{a}l_{i-1} = \frac{l_{i-1}}{\Delta k}$,其中 l_{i-1} 为杆长, Δk 为路径离散点间距。

由式(13)可得到 ${}^t k_i$ 的估计值 ${}^t \bar{k}_i$:

$${}^t \bar{k}_i = {}^t k_{i-1} + {}^t \bar{a}l_{i-1} \quad (14)$$

将其作为迭代初值向前或向后搜索,直至找到真正的距离 ${}^t k_{i-1}$ 最近的离散点 ${}^t k_i$ 。此时 ${}^t \bar{a}l_{i-1}$ 更新为:

$${}^t \bar{a}l_{i-1} = {}^t k_i - {}^t k_{i-1}, (i=2,3,\dots,9) \quad (15)$$

下一个采样时刻 $t+1$,基端点 k_3 控制机器人向前运动,所有连杆也作一个微小调整,同时关节点沿着路径离散点往前进方向移动几乎相同距离,有如下关系式:

$${}^{t+1} k_i - {}^{t+1} k_{i-1} \approx {}^t k_i - {}^t k_{i-1} \quad (16)$$

由上式可得到 $t+1$ 时刻的估计值 ${}^{t+1} \bar{k}_i$:

$${}^{t+1} \bar{k}_i = {}^{t+1} k_{i-1} + {}^t \bar{a}l_{i-1} \quad (17)$$

再次利用 t 时刻的搜索方法,将 $t+1$ 时刻的关节点与路径离散点匹配。

2.3.4 由关节点坐标反求关节角

根据照明机器人的关节点坐标求解相邻坐标系之间的转动角度。

设第 $j+1$ 个关节点在参考坐标系下的坐标为

$${}^0 P_{j+1} = [{}^0 x_{j+1}, {}^0 y_{j+1}, {}^0 z_{j+1}, 1]^T \quad (18)$$

通过坐标变换,可得第 $j+1$ 个关节点在第 j 个坐标系 $X_j Y_j Z_j$ 下的坐标为:

$$\begin{aligned} {}^j P_{j+1} &= {}^{j-1} T_j^{-1} \cdot {}^{j-2} T_{j-1}^{-1} \cdots {}^0 T_1^{-1} \cdot {}^j P_{j+1} \\ &= [{}^j x_{j+1}, {}^j y_{j+1}, {}^j z_{j+1}, 1]^T \end{aligned} \quad (19)$$

解得关节角数值:

$$\begin{cases} \theta_j = \text{abs}(\arcsin(\frac{{}^j x_{j+1}}{d_j})) \\ \alpha_j = \text{abs}(\arcsin(\frac{{}^j y_{j+1}}{d_j \cdot \cos(\theta_j)})) \end{cases} \quad (20)$$

根据关节坐标的正负来确定关节角的符号。为避免

出现多解,限定:

$$\theta_j \in (-180^\circ, 180^\circ), \alpha_j \in (-90^\circ, 90^\circ) \quad (21)$$

2.4 仿真结果及分析

设定操作机器人与照明机器人的起始位姿和规划目标点,按照等间隔采样方式给出操作机器人的运动轨迹,给出照明机器人末端点的运动轨迹,以及协同运动轨迹。

2.4.1 操作机器人运动规划仿真结果

图5-图6为操作机器人的末端位置和关节角变化曲线。

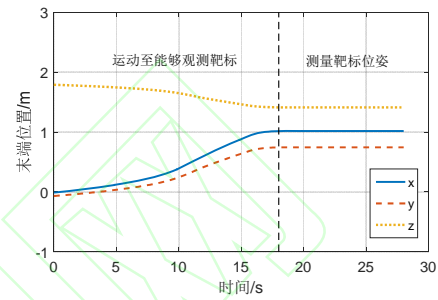


图5 操作机器人末端位置曲线

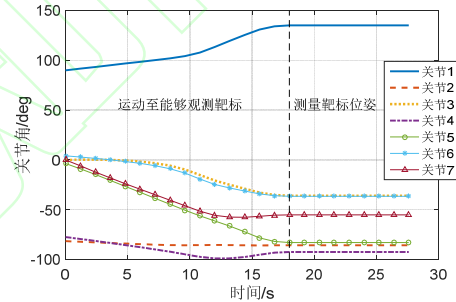


图6 操作机器人关节角变化曲线

2.4.2 照明机器人运动规划仿真结果及误差分析

图7给出了照明机器人理想末端轨迹和实际末端轨迹,轨迹偏差如图8所示。

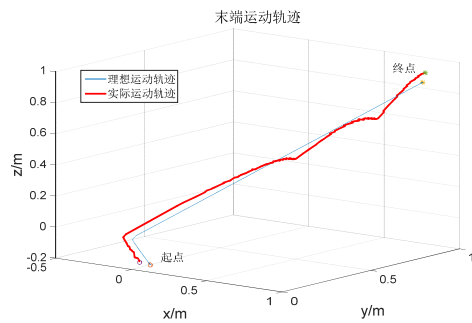


图7 照明机器人末端运动轨迹

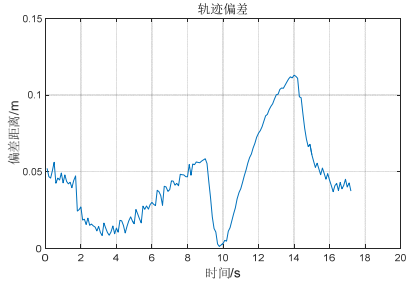


图 8 照明机器人末端轨迹偏差

图 9 为照明机器人关节角变化曲线。

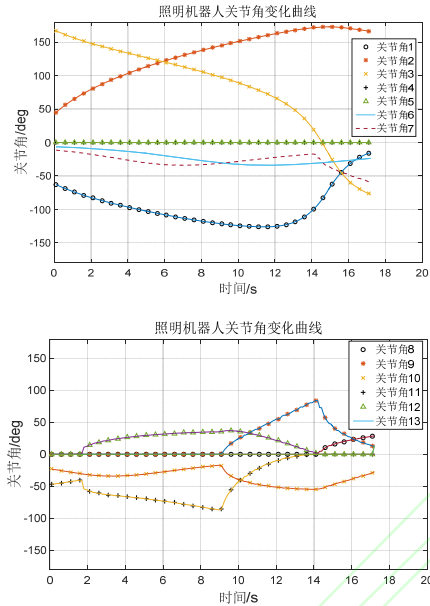
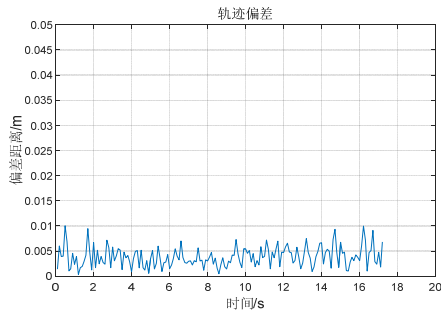


图 9 照明机器人关节角变化曲线

仿真结果表明，照明机器人末端的实际运动围绕理想轨迹前进，轨迹偏差不差过 120mm。此偏差由于机械结构与理想化的运动模型不一致引起。在实际结构中，二自由度模块的两个正交关节并非交于一点，其间距离为 $d_0=120mm$ ，导致机器人末端轨迹产生偏差。理论分析可知，照明机器人的实际机械结构越接近理想运动模型，相应的末端轨迹偏差将越小，即该偏差随着 d_0 的减小而减小。因此计算出 $d_0=0mm$ 的理想模型情况下照明机器人的末端轨迹偏差，仿真结果如图 10 所示。

图 10 $d_0=0mm$ 时照明机器人末端轨迹偏差

仿真结果表明， $d_0=0mm$ 时，照明机器人末端运动轨迹偏差小于 10mm。此时的偏差来源有：轨迹跟随过程中匹配的最接近杆长的离散点不严格等于杆长。

2.4.3 协同运动规划仿真结果

给出操作机器人与照明机器人的协同运动规划仿真结果。如图 11 所示，蓝色曲线是等间隔采样下次操作机器人的多条运动轨迹，它们构成照明机器人的障碍空间。红色曲线代表照明机器人的末端运动轨迹，黑色圆圈代表待观测靶标，黄色曲线代表灯光照射距离示意。

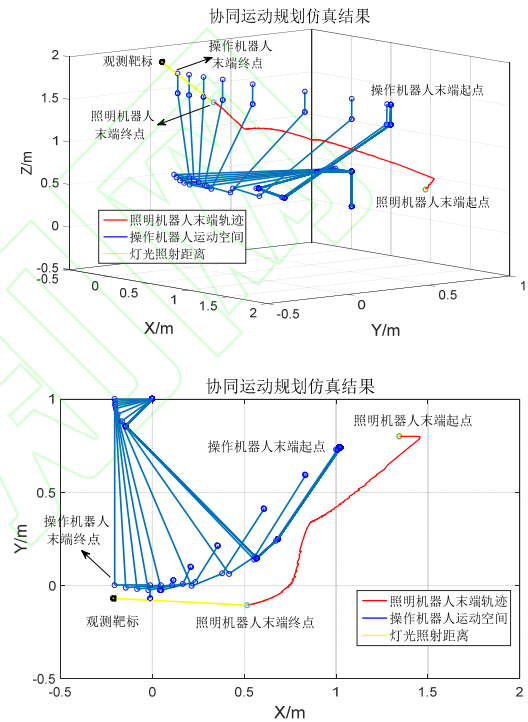


图 11 协同运动规划仿真结果

仿真结果表明：提出的多机器人协同运动规划策略能满足空间在轨装配任务需求。

3 照明机器人可重构运动规划算法

末端轨迹跟随的重点是保证机器人的关节点与规划好的路径曲线尽量重合。跟随过程与机器人的关节点个数无关，因此末端轨迹跟随算法具有可重构性。

照明机器人的可重构模块最大数量为 5 个，在任务规划初期，首先附加一个可重构模块，此时照明机器人具有 7 个自由度，以此为例进行仿真分析。图 12-图 13 为末端运动轨迹及其偏差。

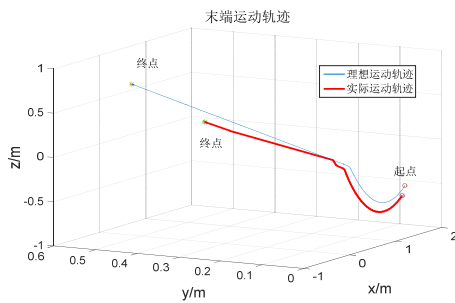


图 12 7DOF 照明机器人末端运动轨迹

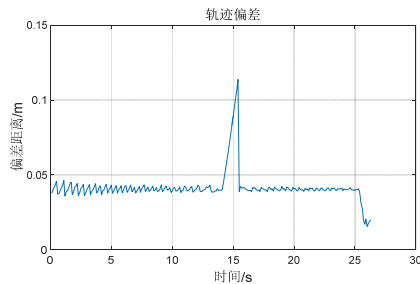


图 13 7DOF 照明机器人轨迹偏差

7 个关节角的变化曲线如图 14 所示:

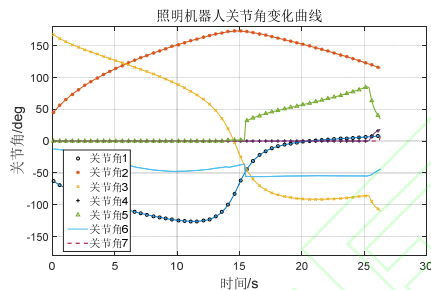


图 14 7DOF 照明机器人关节角变化曲线

仿真结果表明,照明机器人为 7 个自由度时,由于总长度的限制,无法运动至指定的目标点执行任务,但轨迹偏差水平与 13 自由度时保持一致。因此在面向任务的规划中将照明机器人附加 5 个可重构模块,仿真结果如 2.4 节所述。根据仿真结果及分析得出结论:照明机器人在运动学建模、运动学逆求解、运动规划算法方面具有可重构性。为了保证机器人顺利完成任务,可根据任务约束附加合适数量的可重构模块。

4 结论

本文介绍了一种面向空间在轨装配任务的多机器人系统协同运动规划方法,采用基于优先级的协同策略,先后对多个机器人进行运动规划;在低优先级照明机器人的运动规划中将高优先级操作机器人视为障碍物,通过三维空间内的 A* 算法规划无障碍路径,再匹配机器人关节点与路径点求解关节角。

通过仿真实验表明,提出的各个机器人的运动规划方法均能有效完成任务需求,且照明机器人的运动规划方法能够应用于关节数量不同的机器人,算法具有可重构性。后续将进一步研究超冗余机器人的动态环境下的运动规划方法,并将其应用于环境可变的在轨装配任务。

参考文献

- [1] Todt E, Rausch G, Suarez R. Analysis and classification of multiple robot coordination methods[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA. IEEE, 2000:3158-3163 vol.4.
- [2] Bennewitz M, Burgard W, Thrun S. Optimizing schedules for prioritized path planning of multi-robot systems[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings. IEEE, 2001:271-276 vol.1.
- [3] 屈云飞,陈卫东,曹其新.面向托卡马克第一壁检测的超冗余机械臂运动学分析[J].上海交通大学学报,2014,48(07):922-928.
QU Yunfei, CHEN Weidong, CAO Qixin. Kinematics Analysis of Hyper-Redundant Manipulator Used for Inspection of First Wall of Tokamak[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(07):922-928.
- [4] Alavandar S, Nigam M J. Neuro-fuzzy based approach for inverse kinematics solution of industrial robot manipulators[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2008, 3(3): 224-234.
- [5] Nanda S K, Panda S, Subudhi P R S, et al. A novel application of artificial neural network for the solution of inverse kinematics controls of robotic manipulators[J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 2012, 4(9): 81.
- [6] Chirikjian G S, Burdick J W. An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990. Proceedings. IEEE, 1990:625-631 vol.1.
- [7] Palmer D, Cobos-Guzman S, Axinte D. Real-time method for tip following navigation of continuum snake arm robots[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2014, 62(10):1478-1485.
- [8] Conkur E S. Path following algorithm for highly redundant manipulators[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2003, 45(1):1-22.
- [9] 王俊刚,汤磊,谷国迎,朱向阳.超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法及其性能分析[J].机械工程学报,2018,54(3):18-25.
WANG Jungang, TANG Lei, GU Guoying, ZHU Xiangyang. Tip-following Path Planning and Its Performance Analysis for Hyper-redundant Manipulators. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 18-25.
- [10] 申浩宇,吴洪涛,陈柏,等.基于主从任务转化的冗余度机器人避障算法[J].机器人,2014,36(4):425-429.
SHEN Haoyu, WU Hongtao, CHEN Bo, et al. Obstacle

- Avoidance Algorithm for Redundant Robots Based on Transition between the Primary and Secondary Tasks[J]. Robot, 2014, 36(4):425-429.
- [11] 王梅. 多关节自治机器人系统分布式协作运动规划方法研究[D].杭州: 浙江大学,2007.
- WANG Mei. Distributed Cooperative Motion Planning for Autonomous Multi-joint Robot System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [12] 张文佳, 尚伟伟. 2 自由度绳索牵引并联机器人的高速点到点轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 1-8.
- ZHANG Wenjia, SHANG Weiwei. High-speed Point-to-point Trajectory Planning of a 2-DOF Cable Driven Parallel Manipulator. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 1-8.
- [13] Xu W, Liu Y, Liang B, et al. Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2008, 51(3):303-331.
- [14] Xu W. F.,Li C., Liang B, et al. The Cartesian path planning of free-floating space robot using particle swarm optimization[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008,5, (3):301-331.
- [15] 贾庆轩;陈钢;孙汉旭;郑双奇. 基于 A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.
- JIA Qingxuan;CHEN Gang;SUN Hanxu;ZHENG Shuangqi. Path Planning for Space Manipulator to Avoid Obstacle Based on A* Algorithm. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109-115.
- [16] 毛征宇,刘中坚.一种三次均匀 B 样条曲线的轨迹规划方法[J]. 中国机械工程, 2010,21(21):2569-2572+2577.
- MAO Zhengyu, LIU Zhongjian. A Trajectory Planning Method for Cubic Uniform B -spline Curve[J].China Mechanical Engineering, 2010,21(21):2569-2572+2577.

作者简介: 关英姿, 女, 1968 年出生, 教授, 博士。主要研究方向为任务规划、飞行器动力学与控制、飞行器总体设计等。

E-mail: guanyz@hit.edu.cn