基于粒子群算法的航天器姿态机动路径规划

杨思亮 徐世杰

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 研究航天器在星载设备受多种几何约束情况下,大角度姿态机动时的姿态路径规划问题. 采用罗德里格斯参数描述姿态,将姿态机动路径规划问题转化为点机器人的三维路径规划问题. 基于粒子群优化技术设计了航天器复杂约束下大角度姿态机动的路径规划算法. 数值仿真结果表明,该方法对于复杂约束下航天器姿态机动的运动规划是有效的.

关 键 词: 姿态约束; 路径规划; 姿态机动; 粒子群算法

中图分类号: V 448.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)01-0048-04

Spacecraft attitude maneuver planning based on particle swarm optimization

Yang Siliang Xu Shijie

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For spacecraft suffering from multiple celestial constraints in time-varying space enviroment, an on-board large angle attitude maneuver path planning based on particle swarm optimization was studied. The kinematics of the spacecraft was described by Rodrigues parameter. The full attitude was mapped to a point described in three-dimensional attitude space. Then the attitude path planning was transformed to the problem of three dimension path planning for point robots. The large angle attitude maneuver path planning algorithm based on particle swarm optimization for spacecraft with multiple celestial constraints was designed. It is necessary to change the attitude coordinate from the original reference frame to a proper reference frame which is more convenient in calculation for the path planning algorithm. Through the iterative program we can receive the feasible path. Numerical simulation results demonstrate the validity of the method.

Key words: attitude constraints; path planning; attitude maneuver; particle swarm optimization

航天器的姿态机动过程中,通常要满足热敏感元件避光、通讯、发电、防范碎片碰撞[1]等外部指向限制,以及姿态敏感器、执行机构正常工作所需的运动学和动力学限制. 其中外部空间的几何约束问题更为突出,特别是与时间相关的约束更增加了问题的复杂性.

针对存在约束的航天器姿态控制问题,文献[2]通过定义势能函数将几何约束引入控制律设计问题,从而使问题的解收敛于势能最小点. 该方法的主要缺点是其解容易陷入局部最小值,且对于复杂问题难于选择其势能函数. 文献[3]把外界约束简化成几何约束,并把三轴的姿态规划分开进行. 这种确定性方法仅适合处理 1～2个约束的情况,对更多、更复杂的约束只能用加权线性组合,不够可靠,并且忽略了进一步优化姿态运动指令的步骤,耗费的代价较大. 文献[4]利用遗传算法,把约束融入代价函数进行反复搜索求解. 其固有缺陷是规划时间长,不易在轨实现. 实际上,姿态机动自主规划的研究应从全局规划、容纳动态约束、保证自主实施的计算效率、优化可行解的性能指标几方面着手.

文献[5]于 1995年提出的粒子群优化算法 PSO(Particle Swarm Optimization)是一类基于群体智能的随机优化算法. 与一般的进化算法相比, PSO概念简单、容易实现,并且需要调整的参数少,目前广泛应用于函数优化、模式分类、优化调

收稿日期: 2009-01-04

作者简介: 杨思亮(1983-),女,辽宁沈阳人,博士生, yangsiliang@sa.buaa.edu.cn.

度、神经网络训练、模糊系统控制等领域. 本文将 PSO算法应用于带约束的航天器大角度姿态机动的路径规划中,使得航天器在完成给定的姿态机动过程中满足姿态约束条件. 数值仿真结果表明,文中采用的姿态路径规划算法对于航天器在复杂约束下姿态机动的运动规划是有效的.

1　基于粒子群算法的自主规划

1.1　姿态空间环境建模

本文采用 Rodrigues参数描述航天器的完整姿态,其意义[6]在于:在三维的姿态空间中,姿态机动路径的规划问题可转化成点机器人的三维路径规划问题,同时单个几何约束域转化为有向的单叶双曲面所包围的区域.

在罗德里格斯三维空间中(见图 1),点 ρ_s 和 ρ_d 分别表示姿态机动中的起始和终止姿态,单叶双曲面 $O_1, O_2, \cdots, O_k$ 代表 k个约束条件在姿态空间所形成的障碍物. 航天器姿态路径规划的目的就是要寻找 $P=\{\rho_s, \rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_m, \rho_d\}$,其中 $(\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_m)$为全局地图中一个点的序列,规划目标对点 ρ_j的要求是:该点为非障碍点,并与相邻点的连线上不存在障碍点.

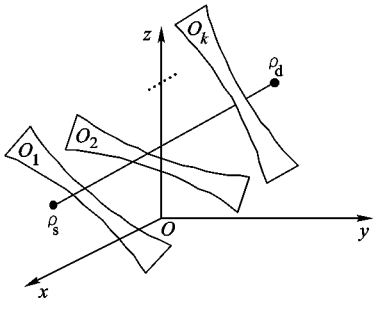


图 1　罗德里格斯空间中的姿态约束

为了方便研究,将原坐标系进行平移和旋转,建立如图 2所示的新坐标系 $O'x'y'z'$.新坐标系的原点即为 ρ_s点,$\rho_s\rho_d$方向为 z轴的正方向.

假设旋转轴为 N,旋转的角度为 θ,则坐标系 $O'x'y'z'$与 $Oxyz$之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} \eta_x^2\Delta_1+\Delta_3 & \eta_x\eta_y\Delta_1+\eta_z\Delta_2 & \eta_x\eta_z\Delta_1-\eta_y\Delta_2 \\ \eta_y\eta_x\Delta_1-\eta_z\Delta_2 & \eta_y^2\Delta_1+\Delta_3 & \eta_y\eta_z\Delta_1+\eta_x\Delta_2 \\ \eta_z\eta_x\Delta_1+\eta_x\Delta_2 & \eta_z\eta_y\Delta_1-\eta_x\Delta_2 & \eta_z^2\Delta_1+\Delta_3 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{\rho_s} \\ y_{\rho_s} \\ z_{\rho_s} \end{bmatrix} \right) \tag{1}$$

式中,$\eta_x=\cos(x,N)$;$\eta_y=\cos(y,N)$;$\eta_z=\cos(z,N)$;$\Delta_1=1-\cos\theta$;$\Delta_2=\sin\theta$;$\Delta_3=\cos\theta$.

ρ_d在坐标系 $O'x'y'z'$下的坐标为 $(0,0,h)$. 如图 2所示,在坐标系 $O'x'y'z'$中作立方体 $ABCDEFGH$,将 $O'\rho_d$进行 $m+1$等分,过每个等分点,作垂直于 z轴的 m个平面 Π_i $(i=1,2,\cdots,m)$. 这组平行平面族与路径 P的交点即为目标点序列 $(\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_m)$. 定义 ρ_s为 ρ_0,ρ_d为 ρ_{m+1},路径 P的长度 L_p为

$$L_p = \sum_{j=0}^{m} \sqrt{(x'_{\rho_j}-x'_{\rho_{j+1}})^2+(y'_{\rho_j}-y'_{\rho_{j+1}})^2+(z'_{\rho_j}-z'_{\rho_{j+1}})^2} = \sum_{j=0}^{m} \sqrt{(x'_{\rho_j}-x'_{\rho_{j+1}})^2+(y'_{\rho_j}-y'_{\rho_{j+1}})^2+\left(\frac{L_{\rho_s\rho_d}}{m+1}\right)^2} \tag{2}$$

式中,$L_{\rho_j\rho_{j+1}}$表示点 ρ_j与点 ρ_{j+1}间的距离.

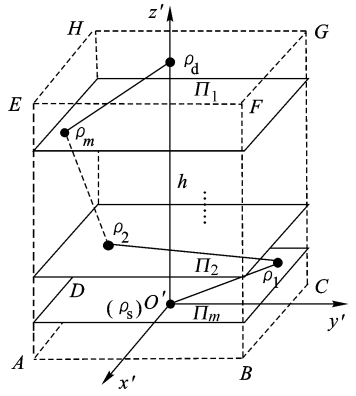


图 2　$O'x'y'z'$空间中姿态路径规划

姿态路径规划转变为对式(2)的函数进行优化,即在 $(x_{\rho_j}', y_{\rho_j}')$ $(j=1,2,\cdots,m)$的取值空间中寻找最小的 L_p. 障碍物的信息体现在对目标点 $(x_{\rho_j}', y_{\rho_j}', z_{\rho_j}')$ $(j=1,2,\cdots,m)$的约束中,即在优化计算过程中,实时判断目标点序列的有效性.

1.3　基于粒子群算法的姿态路径规划

定义 n个 m维的粒子,其每一维位置坐标 $(x_{i,j}, y_{i,j})$取值在相应平面 Π_j上,第 i个粒子的适应度函数选为

$$F_i(x,y) = \sum_{j=0}^{m} \sqrt{d+(x'_{i,j}-x'_{i,j+1})^2+(y'_{i,j}-y'_{i,j+1})^2} \tag{3}$$

式中,i为粒子序号;j为维序号;$d=\left(\frac{L_{\rho_s\rho_d}}{m+1}\right)^2$为定值;两端约束为 $x_{i,0}=x_{i,m+1}=0$;边界约束为 $x_j^{\min}\le x_{i,j}\le x_j^{\max}$,$y_j^{\min}\le y_{i,j}\le y_j^{\max}$. $x_j^{\min}$,$x_j^{\max}$,$y_j^{\min}$,$y_j^{\max}$的取值由平行平面族 $(\Pi_1, \Pi_2, \cdots, \Pi_m)$和地图边界的交点决定.

下面结合航天器复杂约束下姿态控制问题，给出姿态运动规划的粒子群算法：

步骤 1 根据 ρ_s，ρ_d 点的位置，由式 (1)进行坐标变换，获得新地图. 以下各步均在该地图中进行，得到最终路径后通过坐标反变换到原地图中.

步骤 2 由 Π_i 和地图的交点求出 $x_j^{\min}$，$x_j^{\max}$ 和 $y_j^{\min}$，$y_j^{\max}$，进而求出速度极值 $v_{xj}^{\max}$，$v_{yj}^{\min}$，本文中将其取为位置变化范围的 10%，即

$$\left.\begin{aligned} v_{xj}^{\max} &= (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \times 0.1 \\ v_{yj}^{\max} &= (y_j^{\max} - y_j^{\min}) \times 0.1 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

步骤 3 按照初始条件计算出规划空间中障碍的边界.

步骤 4 初始化粒子速度和位置，初始化的公式选用下面的形式：

$$\left.\begin{aligned} v_{xi,j}^0 &= -v_{xi,j}^{\max} + r \cdot 2v_{xi,j}^{\max} \\ v_{yi,j}^0 &= -v_{yi,j}^{\max} + r \cdot 2v_{yi,j}^{\max} \\ x_{i,j}^0 &= x_{i,j}^{\min} + r(x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}) \\ y_{i,j}^0 &= y_{i,j}^{\min} + r(y_{i,j}^{\max} - y_{i,j}^{\min}) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中，r 为 (0～1)之间的随机数，在位置初始化的过程中，要考虑到边界约束，并进行障碍验证，以确保初始化的每个粒子都是一条有效路径.

步骤 5 得到 $v_{xi,j}^0$，$v_{yi,j}^0$，$x_{i,j}^0$，$y_{i,j}^0$ 后，根据式 (3)求出各粒子的适应度 $F_{i,j}^0$ 以及 $p_{i,j}^0$ 和 $p_{g,j}^0$.

步骤 6 根据轨道参数，更新姿态路径规划空间中的障碍边界.

步骤 7 根据文献 [7]更新粒子各维的速度和位置 $v_{xi,j}^t$，$v_{yi,j}^t$，$x_{i,j}^t$，$y_{i,j}^t$，同时考虑到边界和障碍约束.

步骤 8 对每一个粒子，由式 (3)求其适应度 $F_{i,j}^t$，更新 $p_{i,j}^t$ 和 $p_{g,j}^t$.

步骤 9 转到步骤 6进行迭代，直到达到最大迭代次数 $N_{\max}$ 或满足精度要求 (收敛).

2 数值仿真

为了验证文中所提出的姿态路径规划方法，本文讨论一个空间望远镜的大角度姿态机动问题. 假设有效载荷单位矢量 n_p 在本体坐标系与偏航轴方向一致. 指向约束来自太阳，地球，月亮和木星. 这 4种约束可以表示为 $\arccos(n_p \cdot n_{sun}) > \theta_{sun}$，$\arccos(n_p \cdot n_{moon}) > \theta_{moon}$，$\arccos(n_p \cdot n_{earth}) > \theta_{earth}$，$\arccos(n_p \cdot n_{jupiter}) > \theta_{jupiter}$，其中，$\theta_{sun} = 15°$，$\theta_{mood} = 24°$，$\theta_{earth} = 58°$，$\theta_{jupiter} = 7°$，该数据取自文献 [8].

在航天器质心平移地心惯性坐标系中，太阳，月球，木星以及地球初始的单位方向矢量分别为 [0.2800 0.9450 0]，[0.9317 -0.2541 -0.2596]，[-0.1231 0.9137 -0.3873]，[-0.3125 0.8361 0.4509].

选择姿态机动过程的初始姿态和目标姿态的罗德里格斯表示分别为 ρ_s = [0.1604 2.2671 -1.1125]，ρ_d = [0.4192 0.4642 0.3872].

仿真结果如图 3～图 6所示.

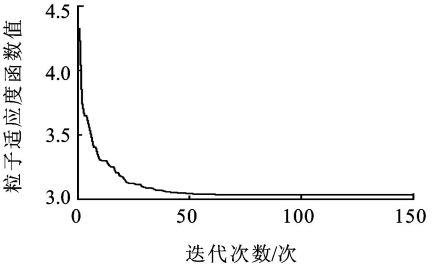


图 3 粒子适应度函数值随迭代次数的变化

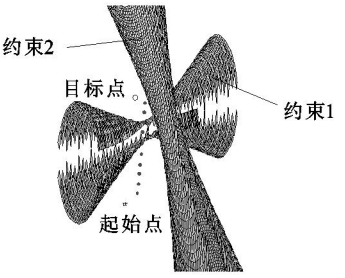


图 4 罗德里格斯空间中约束 1和约束 2与姿态规划路径的位置关系

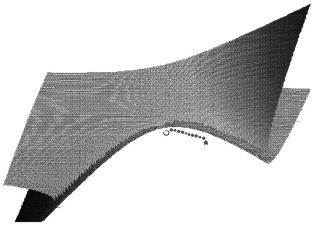


图 5 罗德里格斯空间中约束 3与姿态规划路径的位置关系

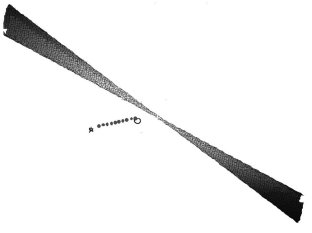


图 6 罗德里格斯空间中约束 4与姿态规划路径的位置关系

从图 3中可以看出粒子适应度函数值随迭代次数的增加逐渐减小，最后收敛于一个相对固定的数值，也就意味着整个寻优过程结束，找到了最优解. 从图 4～图 6中可以看到，所规划的姿态路径不与约束 1～4的映射相交，也就是说，当卫星沿着这条最短姿态路径进行姿态机动时，在消耗

燃料相对较少的情况下,能够满足所有的约束条件,保证望远镜不会因受到强光照射而损坏.

3 结　论

本文研究了航天器在星载设备受多种几何约束的情况下进行大角度姿态机动时的姿态路径规划方法.采用罗德里格斯参数描述姿态信息,在罗德里格斯参数空间中,将姿态机动路径规划问题转化为点机器人的三维路径规划问题.基于粒子群优化技术设计了带约束航天器大角度姿态机动的路径规划算法.数值仿真结果表明该方法对于航天器复杂约束下大角度姿态机动的运动规划是有效的.

参考文献 (References)

[1] Frakes J P, Henretty D A, Flatley T W, et al. SAMPEX science pointing with velocity avoidance[C]//The AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting Part 2 (of 2). Colorado Springs, CO: AAS/AIAA, 1992: 949 - 966

[2] Mcinnes C R. Large angle slew maneuvers with autonomous sun vector avoidance[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(4): 875 - 877

[3] Hablani H B. Attitude commands avoiding bright objects and maintaining communication with ground station[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, 22(6): 759 - 767

[4] Kornfeld R P. On-board autonomous attitude maneuver planning for planetary spacecraft using genetic algorithms[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Austin. Texas: AIAA, 2003: 11 - 14

[5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995: 1942 - 1948

[6] 仲维国,崔平远,崔祜涛. 航天器复杂约束姿态机动的自主规划[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1091 - 1097
Zhong Weiguo, Cui Pingyuan, Cui Hutao. Autonomous attitude maneuver planning for spacecraft under complex constraints[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1091 - 1097 (in Chinese)

[7] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京:科学出版社, 2004
Zeng Jianchao, Jie Jing, Cui Zhihua. Particle swarm arithmetic[M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)

[8] Giovanni M, Alessandro A Q. Spacecraft control with constrained fast reorientation and accurate pointing[J]. The Aeronautical Journal, 2004, 108(1080): 85 - 91

(编　辑:张　嵘)

(上接第 47页)

[7] 赵建福,林海,解京昌,等. 微重力条件下气/液两相流压降试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(4): 373 - 380
Zhao Jianfu, Lin Hai, Xie Jingchang, et al. Experimental study on pressure drop of two-phase gas-liquid flow at microgravity conditions[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(4): 373 - 380 (in Chinese)

[8] Yue M, Chung J N. An experimental study of critical heat flux (CHF) in microgravity forced-convection boiling[J]. Int J Multiphase Flow, 2001, 27(10): 1753 - 1767

[9] Wiesche S. Heat transfer from a rotating disk in a parallel air crossflow[J]. Int J Thermal Sciences, 2007, 46(8): 745 - 754

[10] Seghir-Ouali S, Saury D, Harmand S, et al. Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow[J]. Int J Thermal Sciences, 2006, 45(12): 1166 - 1178

[11] Chiu H C, Jang J H, Yan W M. Combined mixed convection and radiation heat transfer in rectangular ducts rotating about a parallel axis[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2007, 50(21/22): 4229 - 4242

[12] Song F, Ewing D, Ching C Y. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4721 - 4731

[13] Khan W I. Heat transfer and flow instability in a superconducting machine rotating at 3000 rpm[J]. Cryogenics, 1984, 24(1): 11 - 14

[14] 刘艺涛. 动载作用下水平和直角弯管内两相流动的数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2005
Liu Yitao. Numerical evaluation of two-phase flow in horizontal and orthogonal pipes under high-g condition[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (in Chinese)

[15] 张金红,阎昌琪,方红宇,等. 摇摆对水平管内气液两相流流型的影响[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 206 - 212
Zhang Jinhong, Yan Changqi, Fang Hongyu, et al. Effects of swinging on two-phase flow pattern of gas-liquid fluid flowing in horizontal pipes[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 206 - 212 (in Chinese)

[16] 栾锋,阎昌琪,曹夏昕. 摇摆对竖直管内气-水两相流流型的影响分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(增刊 1): 217 - 220
Luan Feng, Yan, Changqi, Cao Xiaxin. Analyzing the effect of swinging on two-phase flow pattern of gas-liquid fluid flowing in vertical tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(Supplement 1): 217 - 220 (in Chinese)

[17] Holman J P, Gaida W J, Tr. Experimental methods for engineers[M]. 5th ed, Singapore: McGraw-Hill, 1989: 41 - 42

[18] 马良军. 动载作用下管内两相流流动特性试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2007
Ma Liangjun. Experimental research on flow characteristic of two-phase pipe flow under high-g condition[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007 (in Chinese)

(编　辑:李　晶)