

文章编号: 1001-0920(2007)12-1433-04

梯度投影法多性能准则优化的应用研究

孙奎¹, 谢宗武¹, 刘宏^{1,2}, 黄剑斌¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150080; 2. 德国宇航中心 机器人及机电一体化研究所, 慕尼黑 D82230)

摘要: 提出了基于连续比例因子的梯度投影算法. 利用模糊推理规则动态求解多性能指标融合中的权系数, 并对卫星在轨自维护系统的冗余度机器人推拉帆板作业进行了数值仿真计算. 将所得到的结果与采用固定比例因子的梯度投影算法进行比较, 指出了固定比例因子方法存在的不足之处, 并通过仿真分析验证了连续比例因子算法的有效性.

关键词: 连续比例因子; 梯度投影法; 冗余度机器人; 模糊推理

中图分类号: TH112

文献标识码: A

Application of gradient projection method based on multiple performance criteria optimization

SUN Kui¹, XIE Zong-wu¹, LIU Hong^{1,2}, HUANG Jian-bin¹

(1. Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 2. Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center, Munich D82230, Germany. Correspondent: SUN Kui, E-mail: sun.kui@163.com)

Abstract: The gradient projection method based on continuous scale factor is presented. The weight factors of multiple performance criteria are obtained based on fuzzy inference system, and a numerical simulation on a redundant robot of the satellite on-orbit self-servicing system for pushing the solar array task is carried out. The results are compared with the ones based on fixed scale factors, and the shortcoming of the latter is pointed out. The simulation analysis shows the effectiveness of the proposed continuous scale factor algorithm.

Key words: Continuous scale factor; Gradient projection method; Redundant manipulator; Fuzzy inference

1 引言

冗余度机器人逆运动学问题有无穷多组解, 因而有必要引入一些优化准则加以约束. 冗余度机器人多性能融合优化综合了各个单一性能指标的优点, 更加全面地表现了冗余度机器人的优良性能. 梯度投影法是冗余度机器人求逆解最常用的方法之一, 但它存在一些问题使得算法不够稳定, 其中最关键的是比例因子的选取和多性能指标函数的构造^[1]. 目前常用的比例因子和多性能指标函数的系数多采用固定值的方式^[2], 通过多次试算得到合适的数值, 这样就不可避免地增大了系统的计算量.

本文以卫星在轨自维护系统的机器人为仿真对象. 机器人安装在卫星本体上, 工作任务是打开因为故障而不能展开的帆板、天线和擦拭由于污染而导致模糊的摄像机镜头^[3]. 机器人系统包括一个 4 自

由度机械臂与由 HIT-DLR 多指灵巧手构成的末端执行器, 当卫星可展开附件出现展开故障时, 可通过机械臂的宏观操作和 HIT-DLR 多指灵巧手的微观操作进行处理. 卫星帆板和天线分别通过 2 个铰链安装在卫星本体的侧壁上, 当进行卫星帆板和天线的故障操作时, 只需跟踪任务轨迹位置而不必考虑姿态, 因此机械臂具有一个冗余度.

本文利用所提出的连续比例因子方法及基于模糊推理规则的多性能指标融合方法, 对卫星在轨自维护系统地面条件下的帆板故障处理进行数值仿真计算. 仿真结果表明了所提出方法的可行性和有效性.

2 机器人正运动学问题

机器人坐标系如图 1 所示, D-H 参数如表 1 所示.

收稿日期: 2006-09-05; 修回日期: 2007-02-05.

基金项目: 国防科工委预研项目; 长江学者和创新团队发展计划项目.

作者简介: 孙奎(1974—), 男, 辽宁朝阳人, 博士生, 从事冗余度机器人控制、机器人技术的研究; 刘宏(1966—), 男, 合肥人, 教授, 博士生导师, 从事机器人灵巧手、空间机器人技术的研究.

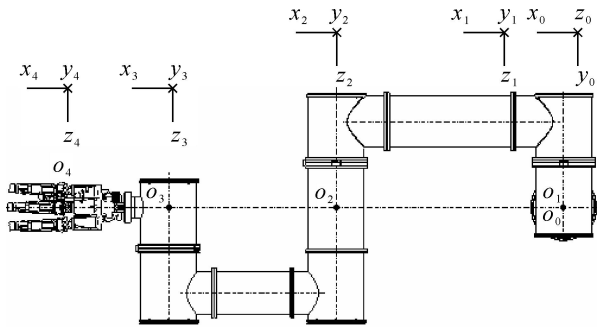


图 1 机器人坐标系

表 1 机器人的 D-H 参数

i	d_i	a_i	$\theta_i / (^\circ)$
1	$1(0^\circ)$	0	-90
2	$2(0^\circ)$	$l_1(530)$	0
3	$3(0^\circ)$	$l_2(390)$	0
4	$4(12^\circ)$	$l_3(200)$	0

由于结构限制,机器人的 4 个关节角变化范围分别为 $\pm 165^\circ$, $-30^\circ \sim +105^\circ$, $-225^\circ \sim +105^\circ$, $-135^\circ \sim 195^\circ$ 。

机器人在工作过程中,推拉帆板和天线工作相当于一个平面任务,关节 1 相对于推拉帆板和天线的工作而言是固定不动的。因此,只考虑机器人关节 2 至关节 4 的雅克比矩阵

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \end{bmatrix},$$

$$J_{11} = -l_1 s_2 - l_2 s_{23} - l_3 s_{234},$$

$$J_{12} = -l_2 s_{23} - l_3 s_{234},$$

$$J_{13} = -l_3 s_{234},$$

$$J_{21} = l_1 c_2 + l_2 c_{23} + l_3 c_{234},$$

$$J_{22} = l_2 c_{23} + l_3 c_{234},$$

$$J_{23} = l_3 c_{234}.$$

式中

$$s_i = \sin i, \quad s_{ijk} = \sin(i + j + k);$$

$$c_i = \cos i, \quad c_{ijk} = \cos(i + j + k).$$

3 优化性能指标函数的选取

求解冗余度机器人逆解时,最常用的性能指标为避奇异、避障、避关节极限和最大可操作性^[4]。经过分析,推拉帆板的工作过程不涉及避障问题,因此本文以避奇异和避关节极限作为性能指标函数。

避关节极限性能函数为

$$H_L = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{i - i_{\min}}{i - i_{\max}} \right)^2,$$

$$i = \frac{1}{2} (i_{\max} + i_{\min}),$$

式中 i_{\max} 和 i_{\min} 分别为第 i 个关节的最大值和最小值。

函数梯度为

$$\nabla H_L =$$

$$\left[\frac{1}{3} \frac{2(i_1 - i_{1\min})}{(i_1 - i_{1\max})^2} \quad \frac{1}{3} \frac{2(i_2 - i_{2\min})}{(i_2 - i_{2\max})^2} \quad \frac{1}{3} \frac{2(i_3 - i_{3\min})}{(i_3 - i_{3\max})^2} \right]^T.$$

避奇异性能函数为

$$H_S = \sin^2 \theta_3 \sin \theta_4.$$

函数梯度为

$$\nabla H_S =$$

$$[0 \quad \sin(2\theta_3) \sin^2 \theta_4 \quad \sin^2 \theta_3 \sin(2\theta_4)]^T.$$

融合这两个性能指标的性能函数构造为

$$H(\theta) = k_S H_S(\theta) + k_L H_L(\theta),$$

式中的 k_S 和 k_L 是两个性能指标的权系数。

4 梯度投影算法方案

4.1 基于固定比例因子的梯度投影算法

带有阻尼伪逆的固定比例因子梯度投影法公式为^[5]

$$\dot{X} = J^+ \dot{X} + k_b (I - J^+ J) (k_1 \nabla H_S - k_2 \nabla H_L). \quad (1)$$

其中

$$J^+ = J^T (J J^T + \lambda^2 I)^{-1};$$

$$\lambda^2 = \begin{cases} \frac{\sin^2(\theta_r / \lambda + \lambda/2) + 1}{2}, & \theta_r \geq \lambda; \\ 0, & \theta_r < \lambda; \\ 0, & \theta_r = 0. \end{cases}$$

式中: J^+ 为基于伪逆的雅克比矩阵广义逆, \dot{X} 为笛卡尔空间的速度向量, k_b 为固定比例因子, k_1 和 k_2 为性能指标的权系数, λ^2 为阻尼因子, λ 为机器人接近奇异位姿、开始启用阻尼时的奇异值 θ_r 的阈值。

4.2 基于连续比例因子的梯度投影算法

针对某一个性能函数,比例因子具有一定的取值范围才能保证算法的稳定性,而目前的试算方法计算量都比较大。文献[6]提出的均衡比例因子算法也有待改进之处,当性能函数的梯度向量在某种关节构形下为零时,可能导致齐次解部分趋于无穷大而使关节失控。而且该方法特解中没有采用阻尼伪逆形式,当关节接近奇异构形时有可能使关节速度趋于失控。因此,针对某一个性能函数,结合阻尼伪逆方法和改进的连续变化的比例因子方法,进行冗余机器人逆运动学求解是本文最初的动机。

本文对比例因子进行改进,使其成为关节速度特解的 2 范数与齐次解的 2 范数相结合的函数形式,所提出的梯度投影方程如下:

$$\dot{X} = J^+ \dot{X} + k_c (I - J^+ J) (k_S \nabla H_S - k_L \nabla H_L). \quad (2)$$

其中所提出的连续比例因子为

$$k_c = \frac{J^+ \dot{X}}{J^+ \dot{X} + (I - J^+ J) \nabla H}, \quad (3)$$

式中 α 为调整系数.

将伪逆矩阵中的阻尼因子简化为

$$k_i = \begin{cases} \frac{1}{\max(1 - r/\alpha, 0)}, & r \leq \alpha; \\ 0, & r > \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

本文提出的比例因子是雅克比矩阵、笛卡尔空间末端速度向量及待优化的性能函数的梯度的函数,它们都是连续变化的,因而保证了 k_i 的连续性.另外,当笛卡尔空间的末端速度为零时,它能使机器人关节空间速度也为零,这对于机器人的实际操作非常有意义.

4.3 性能指标函数权系数的模糊推理

4.3.1 权系数的求取

在线加权法处理多指标融合的优化过程中,权系数的大小反映了每个指标函数优化优先权的高低.本文为所提出的方法设计了两个双输入单输出模糊控制器^[7],分别用来求取权系数 k_S 和 k_L .

模糊推理系统中,分别取单一指标 H_S 和 H_L 及其变化量 ΔH_S 和 ΔH_L 作为系统的输入量,分别取 k_{Si} 和 k_{Li} 作为输出结果.

定义单一指标 H_S 和 H_L 的语言值为 S,M,B;单一指标变化量 ΔH_S 和 ΔH_L 的语言值为 NB,NM,NS,ZO,PS,PM 和 PB;权系数 k_{Si} 和 k_{Li} 的语言值为 Z,S,M,B.

模糊推理系统中,模糊推理采用 Mamdani 规则,解模糊采用 MIN-MAX-重心法.

k_{Si} 推理过程如表 2 所示, k_{Li} 推理过程如表 3 所示.

表 2 模糊推理规则 1

		H_S						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
H_S	S	B	B	B	B	B	B	M
	M	M	M	M	M	S	S	S
	B	S	S	S	Z	Z	Z	Z

表 3 模糊推理规则 2

		H_L						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
H_L	S	Z	Z	Z	Z	S	S	S
	M	S	S	S	M	M	M	M
	B	M	B	B	B	B	B	B

调整后的权系数为

$$k_S = k_{Si} / (k_{Si} + k_{Li}), \quad (5)$$

$$k_L = k_{Li} / (k_{Li} + k_{Si}), \quad (6)$$

且 $k_S + k_L = 1$.

4.3.2 梯度向量的规范化

在梯度投影法的多目标优化过程中,当单一目标的梯度向量的数量级不一致时,次要目标有可能覆盖主要目标,从而影响优化效果.针对该问题,本

文采用了规范化方法^[8,9].

规范化方法可表示为

$$G(\frac{\partial H_i}{\partial}) = \left[\frac{\frac{\partial H_i}{\partial}}{\left\| \frac{\partial H_i}{\partial} \right\|_2}, \dots, \frac{\frac{\partial H_i}{\partial}}{\left\| \frac{\partial H_i}{\partial} \right\|_2} \right]^T$$

经过上式处理后,各个单一目标梯度向量的 2 范数等于 1,即 $G(\partial H_i / \partial)_2 = 1$.经处理后的各个单一目标的梯度向量数量级相同,而且不会影响其方向矢量的性质.

4.4 任务轨迹及初始化位形的确定

本文取关节 1 和关节 2 的旋转轴线的交点为基坐标系的原点,帆板与卫星本体侧壁通过 2 个铰链连接,帆板手柄至 2 个铰链的回转半径为 500 mm.机器人通过手柄操作帆板使其绕铰链转动 90°,整个过程历时 8 s,其中匀加减速阶段为 2 s,取样周期为 0.02 s.

梯度投影法对机器人的初始位形有要求.最优初始位形的确定可采用优化方法^[6],在初始点的自运动流形曲面上求出使 $H(\cdot)$ 极大化或极小化的位形.将末端操作器置于初始位置,使得笛卡尔空间速度为零,在足够长的时间内使机械臂进行自运动,最终关节构形将达到一个平衡位置,此时必然有 $\nabla H = 0$;另外也可采用试算的方法,即任取一个初始位形,通过走一封闭路径,梯度投影法在一个循环即可达到最优初始位形.当性能函数比较复杂时,试算的方法比较有优势.

本文选用优化方法确定采用固定比例因子的初始位形为: $\theta_{20} = 60.14^\circ$, $\theta_{30} = -165.90^\circ$, $\theta_{40} = 57.26^\circ$;采用试算方法确定采用连续比例因子的初始位形为: $\theta_{40} = 66.71^\circ$, $\theta_{30} = -161.69^\circ$, $\theta_{40} = 40^\circ$.连续比例因子方法的机器人初始位形如图 2 所示.

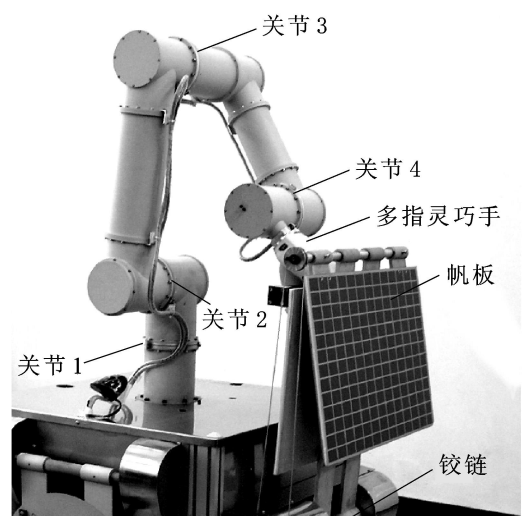


图 2 机器人初始构形

5 数值仿真及结果分析

本文采用固定比例因子及连续比例因子算法分别对推拉帆板作业进行仿真计算^[10]。

图3和图4分别为采用两种方法得到的关节角度和角速度曲线,图中实线和虚线分别为连续比例因子方法和固定比例因子方法得到的结果。图5为采用连续比例因子方法得到的机器人构形。

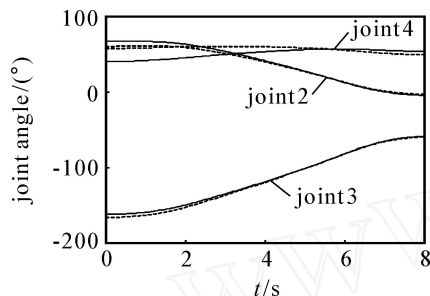


图3 关节角度

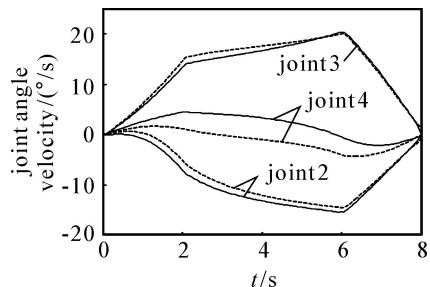


图4 关节角速度

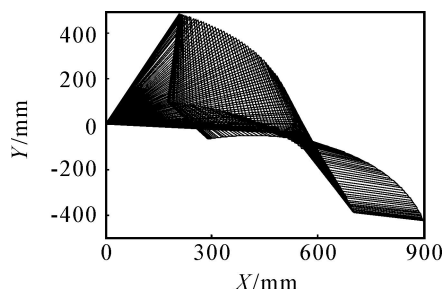


图5 基于连续比例因子的关节构形

从图4可以看出,采用固定比例因子的方案时,运动的末端点关节角速度不为零,即出现了终态自运动现象,这是采用固定比例因子的传统阻尼伪逆梯度投影算法固有的缺陷,而基于连续比例因子的方案则没有这种现象。终态自运动现象是由齐次解 $k(I - J^+ J) \nabla H$ 引起的,它只与机器人的构形和所选择的性能函数的梯度向量有关,而与操作空间的末端速度无关。运动结束时如果机器人远离奇异构形,固定比例因子算法会执行次级任务优化,因而产生了速度冲击,这种现象在实际工作中是很不利的。

本文提出的算法不存在这个问题,其齐次解部分可通过所提出的连续比例因子中引入的笛卡尔空间速度项进行处理,迫使算法在末端速度为零时,相

应的关节空间速度也为零。由此可见,本文提出的算法具有一定的优越性。

从仿真结果看,在整个作业过程中没有遇到奇异位形,各个关节角度也没有超限,从而证明了所提出的基于连续比例因子的方法和通过模糊规则确定性能准则的权系数的方法是可行的。

6 结 语

利用本文提出的连续比例因子,采用梯度投影法对地面条件下卫星在轨自维护系统中的机器人推拉帆板作业进行数值仿真,并将所提出的方法与采用固定比例因子的方法进行比较。仿真结果表明,采用固定比例因子的梯度投影法存在一定的缺陷,当末端执行器速度为零时,机械臂关节速度不为零;而基于本文提出的连续比例因子的求解方案则不存在此问题。仿真结果也证明了基于模糊推理规则的多性能指标函数的权系数求解方法是有效的。

参考文献(References)

- [1] Mark J. An empirical approach to performance criteria and redundancy resolution[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2004.
- [2] Chen J L, Liu J S. Avoidance of obstacles and joint limits for end-effector tracking in redundant manipulators [C]. 7th Int Conf on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore, 2002: 839-844.
- [3] Sun K, Xie Z W, Liu H, et al. A concept for the satellite on-orbit self-servicing [C]. IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Luoyang, 2006: 1025-1030.
- [4] 刘宇. 七自由度冗余手臂多性能准则优化及运动控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
(Liu Yu. Research on multiple performance criteria optimization and motion control of 7-dof redundant robot arm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.)
- [5] 杨明. 具有冗余自由度的机械臂逆运动学研究[D]. 天津: 南开大学, 2004.
(Yang Ming. Study on the inverse kinematics of the manipulator with redundancy [D]. Tianjin: University of Nankai, 2004.)
- [6] 吴瑞珉, 刘廷荣. 一种新的冗余度机器人梯度投影算法[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 76-80.
(Wu Rui-min, Liu Ting-rong. New gradient projection method of kinematically redundant manipulators [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 1999, 35(1): 76-80.)

(下转第 1440 页)

$$\text{SGF}(C, C, D) = 1/4;$$

$$\text{SGF}(D, C, D) = 1/2;$$

$$\text{SGF}(E, C, D) = 5/12.$$

最后由归一化处理得到各个因素的权重, 分别为

$$(w_A, w_B, w_C, w_D, w_E) = (0.294\ 38, 0.185\ 549, 0.111\ 508, 0.223\ 015, 0.185\ 549).$$

客观地进行因素权重分配的关键在于如何处理数据之间的相互关系, 并根据这些数据关系值进一步确定各因素的重要程度, 进而客观地得到各因素的权重. 由上述数据分析过程可知, 算法利用了模糊聚类分析方法和粗糙集的相关原理, 由于模糊数学所研究的对象与对象之间的关系具有模糊性, 粗糙集是处理模糊性与不确定性的有利工具, 而且在研究客观分配因素权重过程中, 最主要是要挖掘出数据集合之间的信息关系, 此过程具有很强的模糊性和不确定性. 因此, 该方法通过利用模糊数学和粗糙集的相关原理来解决客观分配因素权重的不确定性问题是行之有效的方法, 其结果与文献[1]相比, 更具有客观性和实用性.

5 结 语

从实例分析可知, 基于模糊粗糙集的因素权重分配方法完全依靠数据之间的信息关系来确定权重, 它不存在专家评估的主观性, 为知识表达系统进一步作出决策打下基础, 具有实用性. 文献[1]因为没有考虑分类的最佳选择, 从而影响了权重的计算, 导致最后算出的权重与该文献的结果不一致, 但总体权重分配还是相似的, 即因素 A 与因素 D 的权重总体上大于其他几个因素的权重. 从实例中的权重

数值可以看出, 因素 B 与因素 E 的权重相等, 从数据信息关系分析出发, 说明这 2 个因素的权重必须一样, 如果让具有丰富经验的专家给出权重值, 同样会给出权重相等的可能, 因此是符合实际的.

参考文献(References)

- [1] 黄定轩. 基于客观信息熵的多因素权重分配法[J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 12(4): 321-324.
(Huang Ding-xuan. Means of weights allocation with multi-factors based on impersonal message entropy[J]. Systems Engineering — Theory Methodology Applications, 2002, 12(4): 321-324.)
- [2] 陈文伟. 数据仓库与数据挖掘[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 137-143.
(Chen Wen-wei. Data warehouse and data mining[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2004: 137-143.)
- [3] 梁循. 数据挖掘算法与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 219-236.
(Liang Xun. Data-mining algorithms and applications [M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 219-236.)
- [4] 曾黄麟. 智能计算[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004: 14-156.
(Zeng Huang-lin. Intelligence computing [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004: 14-156.)
- [5] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 81-118.
(Xie Ji-jian. Fuzzy mathematics method and applications [M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2000: 81-118.)

(上接第 1436 页)

- [7] 周锐. 基于模糊逻辑的导弹复合控制系统优化设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(7): 825-828.
(Zhou Rui. Design of missile blended control system based on fuzzy logic[J]. Control and Decision, 2006, 21(7): 825-828.)
- [8] Christopher D C. Failure recovery in redundant serial manipulators[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2000.
- [9] 姜力, 蔡鹤皋, 刘宏. 基于滑模位置控制的机器人灵巧手模糊自适应阻抗控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 612-616.
(Jiang Li, Cai He-gao, Liu Hong. Fuzzy adaptive impedance control of dextrous robot hand based on sliding mode position control[J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 612-616.)
- [10] Wang H L, Li J W, Liu H. Practical limitations of an algorithm for the singular value decomposition as applied to redundant manipulators[C]. IEEE Conf on Robotics, Automation and Mechatronics. Bangkok, 2006:1-6.)