

一种直接面向位移寻优的冗余度 机器人运动规划算法

姚玉峰, 赵建文, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150081, 哈尔滨)

摘要: 针对冗余度机器人梯度投影逆解算法和数值优化方法在处理位移层面附加作业任务时存在的不足, 基于自运动流形, 推导出直接面向位移寻优的冗余度机器人运动规划的新算法. 新算法将运动规划等效为两步来完成, 首先采用非冗余关节实现末端操作器的精确位姿跟踪, 然后利用附加作业对冗余关节位移的梯度来调整冗余关节, 再利用机器人的自运动来实现附加作业. 仿真结果表明, 新算法在有效完成主任务和附加任务的同时还具有更快的求解速度, 因此更适于冗余度机器人完成位移层面的附加作业任务.

关键词: 冗余度机器人; 自运动; 运动规划

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)11-0075-05

Displacement-Oriented Optimization Algorithm for Motion Planning of Redundant Manipulators

YAO Yufeng, ZHAO Jianwen, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150081, China)

Abstract: Aiming at the demerit of the gradient projection method and numerical optimization methods as performing additional work at displacement level, a novel two-step strategy of motion planning for redundant manipulators from the perspective of self-motion manifold is proposed, where a precise posture tracking of the end-effector is carried out by employing non-redundant joint, then the redundant joint is adjusted with the gradient of additional work on redundant joint displacement, and the additional work is performed via the self-motion of manipulator. The simulation result shows that this method can remarkably accelerate the solution process while performing the main task and additional task in a more efficient manner to suit the case of the additional work at the displacement level for redundant manipulator.

Keywords: redundant manipulators; self-motion; motion planning

梯度投影法具有通用性强、几何意义清晰等优点, 是冗余度机器人运动规划中应用最为普遍的方法, 但在计算量、位移误差、系数调整等方面尚存在不足之处, 因此学者们一直致力于对梯度投影法的完善工作. 例如, 文献[1]给出的二次计算的方法, 即先用梯度投影法得到优化不精确解, 再根据系统结

构特点采用固定关节法进行二次计算, 最终得到一组精确的优化解. 这种方法虽然克服了梯度投影法的计算量大等缺点, 但容易使关节速度产生较大波动, 所以依然不够完善. 文献[2]给出了一种改进的梯度投影算法, 它由末端操作器的位姿变化生成迭代过程中的参考速度, 从而保证了末端操作器按照

用户设定的精度收敛到期望位姿。

梯度投影法在本质上是基于速度层面的优化方法,适于速度级的运动规划,而对于精确轨迹跟踪、避障等作业,梯度投影法并不是最佳的选择,因此很多学者尝试利用各种数值方法来提高末端操作器的位姿跟踪精度^[3-4]。这些数值方法虽然克服了传统梯度投影法存在的末端位姿误差积累不足,但其跟踪精度与计算速度之间则存在着难以协调的矛盾,当要求操作器在线实现高精度跟踪时,数值方法仍然难以胜任。

鉴于这些方法的不足,一些学者开始从冗余度机器人的特有运动——自运动的角度来探索运动规划的新方法,但由于追求算法的通用性,而一般形式的空间冗余度机器人却难以得到自运动流形的解析解,因此一些从自运动角度出发完成逆解寻优的学者也多是基于控制方法^[5-6]或将算法保留在速度层面上^[7],但位置层面的附加作业性能仍然存在着不足。对于工程上常用的冗余度机器人,关节轴线间的几何关系较简单,大都可以得到自运动流形的解析形式^[8],因此可以由自运动流形来完成逆解寻优。本文从自运动流形角度出发,直接在位移层面上完成逆解寻优,给出了一种新的冗余度机器人运动规划算法。该算法克服了梯度投影法存在末端位移误差累积的不足,更适于冗余度机器人完成位移层面的附加作业。

1 运动规划算法

对于一些关节轴线几何关系较简单(平行或垂直)的机器人,其自运动流形可以由某一个关节或某几个关节的位移变量解析来表示,本文将这些关节定义为冗余关节,将各冗余关节位移组成的列矢量定义为自运动变量 θ_s ,其正运动学可以表示为以 θ_s 为参数的末端操作器的位姿矩阵,即

$$\mathbf{x} = f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\theta}_s)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ 为机器人关节角矢量。采用运动等效的思想,将末端操作器在附加作业约束下由 $\mathbf{x}$ 运动至 $\mathbf{x}'$ 并分解为:①将冗余关节锁定在某一位移,由其余关节的运动来实现末端操作器的位姿矩阵;②开放冗余关节,机构在 $\mathbf{x}'$ 处自运动,实现附加作业。

令机构在 $\mathbf{x}'$ 处的自运动流形为 C_{SM} ,当机器人共有 n 个臂形标志时, C_{SM} 一般表现为关节构型空间中的 2^n 条曲线(冗余自由度为1时)或曲面(冗余自由度大于1时),每条曲线或曲面都对应着一组不同的臂形标志组合。当要求机器人完成连续的任务

跟踪时,用户可以选择 C_{SM} 中的一条连续的曲线或曲面 C_M 来同时完成附加任务。将 C_M 表示为关于 θ_s 的参数方程形式

$$C_M = \{\boldsymbol{\theta} \mid \boldsymbol{\theta} = G(\boldsymbol{\theta}_s)\} \quad (1)$$

式中: G 为自运动流形算子。令 H_V 和 H 分别为附加作业性能指标值及其算子,则 H_V 可以表示为 $\boldsymbol{\theta}$ 的函数 $H(\boldsymbol{\theta})$,结合式(1)得

$$H_V = H[G(\boldsymbol{\theta}_s)]$$

当机器人的冗余自由度为1时, H_V 为关于 θ_s 的一元函数,因此很容易由 H_V 的预期变化方向得到 θ_s 的变化方向,当 $H(\boldsymbol{\theta})$ 符合极小化性能函数原则时,得到

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_s &= \boldsymbol{\theta}_{s0} - kH_V \left(\frac{dH_V}{d\boldsymbol{\theta}_s} \right)^{-1} \frac{dH_V}{d\boldsymbol{\theta}_s} \neq 0 \\ \boldsymbol{\theta}_s &= \boldsymbol{\theta}_{s0} \quad \frac{dH_V}{d\boldsymbol{\theta}_s} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_{s0}$ 为自运动变量的初值; k 为比例因子。在系数中引入 H_V 的目的是为了使 H_V 的值尽量按照指数规律下降,当 H_V 对 θ_s 的导数为0时, H_V 表现为一个小于启动阈值的常数,此时机构状态良好,不需要启动附加作业。因此,式(2)的几何意义表现为:在曲线自运动流形上确定 θ_s 的变化方向,使 H_V 的值减小。

当机器人的冗余自由度大于1时, H_V 为关于 θ_s 的多元函数, θ_s 的求解公式变为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_s &= \boldsymbol{\theta}_{s0} - kH_V \frac{\nabla H_V}{|\nabla H_V|} \mid \nabla H_V \mid \neq 0 \\ \boldsymbol{\theta}_s &= \boldsymbol{\theta}_{s0} \quad \mid \nabla H_V \mid = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

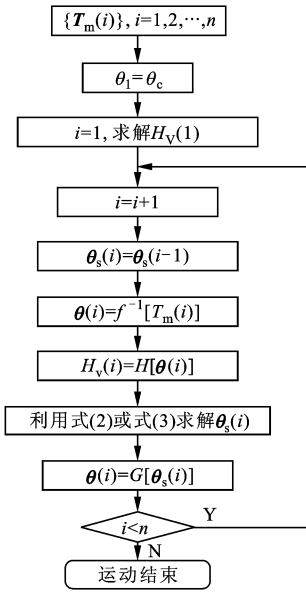
式(3)的几何意义表现为:在曲面自运动流形上确定 θ_s 的变化方向,使 H_V 的值以最快的速度减小。可以看出,该算法先用非冗余关节实现末端操作器的精确位姿跟踪,再通过附加作业性能评价函数对冗余关节位移的梯度来调整冗余关节,进而利用机器人的自运动实现附加作业。在具体工程应用时,该算法的流程如图1所示。

2 算法应用

为证实本文给出的运动规划算法的有效性并聚焦核心问题,以最简单的平面三自由度冗余机器人作为例进行避障作业的仿真,其机构简图如图2所示。

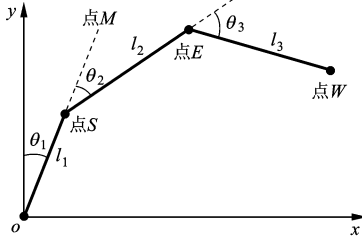
2.1 机构的自运动流形

当不考虑末端执行器姿态时,机器人有一个冗余自由度。选取1关节为冗余关节, θ_1 为自运动变量,假定机器人的臂长分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 ,令点 W 的坐



$T_m(i)$:待跟踪的位姿矩阵序列; n :跟踪点数目; θ_c :关节角初始值; f^{-1} :固定冗余关节后的逆解算子

图 1 运动规划算法流程图



$\theta_1 \sim \theta_3$:机器人的关节转角; $l_1 \sim l_3$:机器人的臂长

图 2 三自由度冗余机器人机构简图

标为 (x_w, y_w) ,将臂形标志定义为 $e=+1$ (左肘), $e=-1$ (右肘),如图 3 所示。

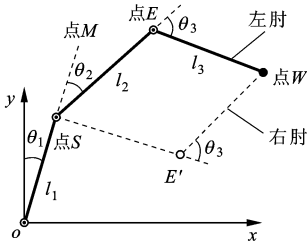


图 3 三自由度冗余机器人的 2 种臂形

令点 S 与点 W 之间的距离 $|SW|=a$,则 θ_3 的求解公式可以综合为

$$\theta_3 = e\{\pi - \arccos[(l_2^2 + l_3^2 - a^2)/(2l_2l_3)]\}$$

θ_2 可借助 $\angle WSM$ 和 $\angle WSE$ 之间的关系得到,即

$$\angle WSM = \arccos[(y_w - l_1 \cos \theta_1)/a] - \theta_1$$

$$\angle WSE = \arccos[(a^2 + l_2^2 - l_3^2)/(2al_2)]$$

$$\theta_2 = \angle WSM - \angle WSE$$

取 θ_1 为参数,由上述求解过程可知, θ_3, θ_2 均可以用 θ_1 表示,从而得到自运动流形的参数方程形式,并抽象地表示为

$$H(\theta, \theta_1) = 0 \quad \theta_1 \in (-\pi_b, \pi] \quad (4)$$

式(4)即为位置子流形的参数方程形式。取 $e=\pm 1$,可以得到 (x_w, y_w) 对应的自运动流形在关节构形空间中的 2 条曲线,当没有附加作业或附加任务的启动点距离构型较远时,可以将冗余关节锁定。

2.2 自运动流形的避障运动规划

以各杆件躲避圆形障碍为例,阐述算法的具体实现过程。如图 4 所示,选取 $e=1$ 且障碍物在各杆件顺时针方向,建立避障性能指标函数。

设障碍物圆心 C 到各杆所在直线的距离分别为 d_1, d_2 和 d_3 ,令圆形障碍物的半径为 r ,定义

$$d_{\min} = \min(d_1, d_2, d_3)$$

当 $d_{\min} > r$ 时,各杆件可以避开障碍。依据极小化性能函数的原则和人工势场理论,给出避障性能指标

$$H_0 = \begin{cases} k_p(d_{\min} - \lambda)^2 & d_{\min} \leq \lambda \\ 0 & d_{\min} > \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_p 为比例系数; λ 为避障距离的阈值。由式(5)可知,当 $d_{\min} \geq \lambda$ 时,各杆件均位于安全区,达到了避障效果,同时函数得到的极小值也符合极小化原则。

假定 $l_1 = l_2 = l_3 = 100 \text{ mm}$, $\theta_1 = \theta_2 = \pi/6$, $\theta_3 = \pi/2$,由正解算子容易得到点 W 的初始坐标为 $(186.6, 50)$,假定障碍物所在圆心的坐标为 $(85, 60)$,障碍物直径为 80,点 W 的期望位移为线段 WW' , W' 的坐标为 $(146.6, 10)$,如图 5 所示。

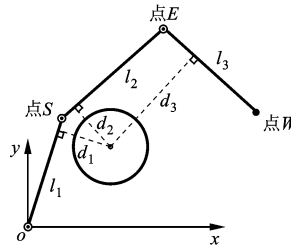
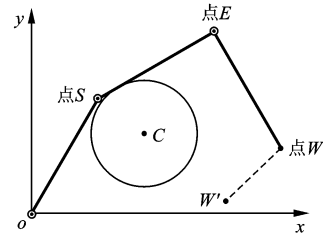


图 4 各杆件与障碍物的相对位置示意图



根据式(5),取 $k_p=1, \lambda=45, k=1$,将线段 WW' 等分为 10 段,跟踪其上面的 11 个插补点,按照图 1 给出的算法流程来完成附加避障作业。由图 6 可知,机构在完成主作业(跟踪末端位置参考点)的同时完成了附件作业(躲避障碍物)。

由图 7 可知,各关节角位移 δ 的变化平缓,虽然是在位置层面给出的逆解,但各关节速度波动不大。

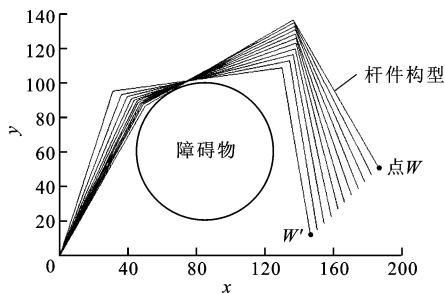


图6 各杆件在第1次仿真过程中的构型

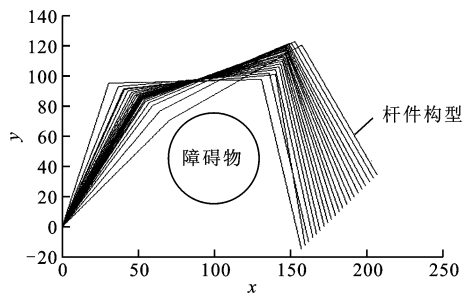


图9 各杆件在第2次仿真过程中的构型

各杆件到圆心 C 的最小距离 $d_{\min}$ 及 H_0 的变化如图8所示。

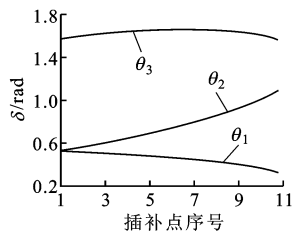


图7 各关节角位移在运动过程中的变化

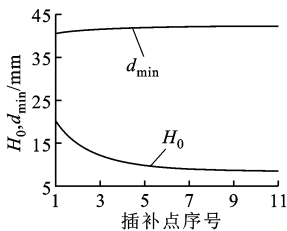


图8 2种指标值在运动过程中的变化

由图8可知, $d_{\min}$ 始终大于圆的半径, 即杆件没有与障碍物干涉, 性能指标值一直下降, 表示避障算法在持续起作用. 当 H_0 较大时, 下降速度较快, 当 H_0 较小时, 下降速度较慢, 即在保证避障要求得到满足后, 要及时释放冗余度资源, 以便有利于其他附加作业的完成.

2.3 算法应用分析

由于上述算法是在位移层面给出的, 因此在关节速度优化方面存在一些不足, 但通过相关参数的调整可以尽量抑制速度波动.

取 $\theta_1 = \pi/4, \theta_2 = \pi/12, \theta_3 = \pi/2$, 此时点 W 的初始坐标为 (207.27, 34.12). 假定障碍物所在圆心的坐标为 (100, 45), 障碍物直径为 60 mm, 点 W 的期望位移为线段 WW' , W' 的坐标为 (157.27, -15.88), 其他参数与图6仿真过程中的取值相同. 将线段 WW' 等分为 20 段, 跟踪其上的 21 个插补点, 仿真时间为 2 s. 由图9可知, 当杆件距离障碍物较近时, 冗余关节运动速度较快, 当杆件远离障碍物时, 冗余关节速度减慢, 当杆件再次接近障碍物时, 冗余关节速度又会变快.

图10给出了各关节角速度 $\omega_i (i=1, 2, 3)$ 的变化, 在初始时刻, 由于杆件与障碍物距离较近, 附加作业对机构运动影响较大, ω_i 出现了较大波动, 如图10a所示, 因此为减小 ω_i 的波动, 应尽量降低附

加作业对机构运动的影响. 由于避障距离的阈值 λ 的取值还有较大余量, 因此将 λ 减小为 40, 此时的波动显著减小, 如图10b所示.

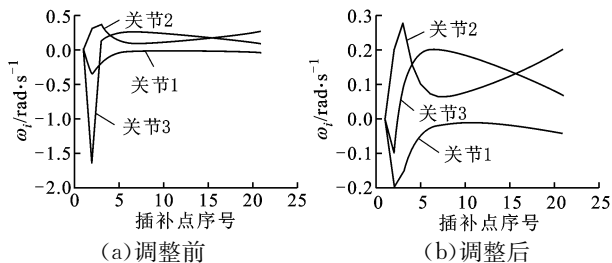


图10 各关节角速度的变化曲线

3 算法与梯度投影法的比较

由于梯度投影法是基于速度层面完成的逆解优化, 因此理论上当梯度投影法中各系数调整合理时, 可以在完成附加作业的同时得到更为理想的关节速度, 但在具体应用时, 梯度投影法中的系数往往调整困难, 有时还会造成算法不稳定. 使用传统的梯度投影算法, 按照文献[2]定义的放大系数 k 来调整 ψ 、 k_p 、 λ 值, 未得到更为理想的关节速度. 当取 $\psi = -1$, $k_p = 1$, $\lambda = 40$ 时, 使用梯度投影法可完成仿真实验, 期望点 W 沿 WW' 作匀速运动至 W' , 时间为 2 s, 采样周期为 10 ms. 由图11可知, 即便选取较小的采样周期, 梯度投影法也将产生较大的位置累积误差.

为比较不同算法的耗时量, 在主频为双核 2.0 GB 的 CPU 上运行 MATLAB 软件, 将 WW' 分为

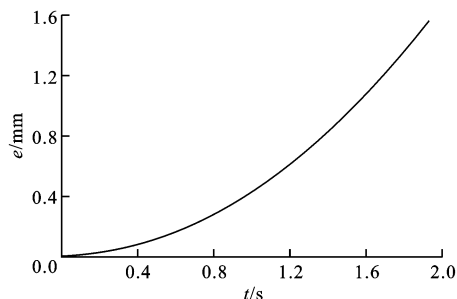


图11 末端轨迹与期望值的距离误差变化

200 段跟踪插补,用本文算法完成全段跟踪时需耗时 0.235 s,用梯度投影法则需耗时 0.328 s.在跟踪过程中,本文算法不需要计算伪逆阵,因计算量较小,但计算过程需分 2 次才能完成,变量赋值的次数较多.因此,从总体上来看,本文算法较梯度投影法的耗时只是略显优势,而采用文献[2]中给出的改进的梯度投影法进行仿真,当选取位置跟踪精度为 0.1 mm 时,共耗时 0.623 s,比本文算法所需的时间更长.

4 结 论

本文借助自运动流形直接在位移层面完成逆解寻优,给出了一种新的冗余度机器人运动规划算法.该算法克服了梯度投影法存在末端位移误差积累的不足,更适于冗余度机器人完成位移层面的附加作业,并由仿真结果验证了算法的有效性.

在参数调整方面,本文算法中的比例因子及性能指标只影响冗余关节的速度,因此调整起来较梯度投影法更为方便,由仿真结果验证了算法在参数调整方面的方便性.

在计算量方面,与改进的梯度投影法相比,本文算法不需要计算雅克比矩阵及其伪逆,与各种数值方法相比,本文算法也不需要迭代,因此本文算法比梯度投影法和其他数值方法的计算量更小.

参考文献:

- [1] 祖迪,吴镇炜,谈大龙. 一种冗余机器人逆运动学求解的有效方法 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(6):71-75.
ZU Di, WU Zhenwei, TAN Dalong. Efficient inverse kinematic solution for redundant manipulators [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6):71-75.
- [2] 赵建文. P2S5 型串并复合式冗余度机器人机构及运动规划研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院, 2007.
- [3] MAYORGA R V, SANDEEP C. A neuro-fuzzy approach for the motion planning of redundant manipulators [C]//2006 International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2006: 16-21.
- [4] KOKER R I. Reliability-based approach to the inverse kinematics solution of robots using Elman's networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(3):685-693.
- [5] ZERGEROGLU E, SAHIN H, OZBAY U. Robust tracking control of kinematically redundant robot manipulators subject to multiple self-motion criteria [J]. Robotica, 2008, 26(6): 711-728.
- [6] YE Ping, SUN Hanxu, JIA Qingxuan. Study on kinematics optimization of redundant manipulators [C]//2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Piscataway, NJ, USA:IEEE Computer Society, 2006:1-6.
- [7] MULLER A. Collision avoiding continuation method for the inverse kinematics of redundant manipulators [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, USA: IEEE Robotics and Automation, 2004:1593-1598.
- [8] 赵建文,杜志江,孙立宁. 7 自由度冗余手臂的自运动流形 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(9):132-137.
ZHAO Jianwen, DU Zhijiang, SUN Lining. Self-motion manifolds of a 7-DOF redundant robot arm [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9):132-137.

(编辑 管咏梅)

[本刊相关文献连接]

移动最小二乘增量式多视点云数据融合算法. 2009,43(9):46-50.

面向属性约束的自动信任协商模型. 2009,43(8):1-5.

改进的集中式协作用户选择方法. 2009,43(8):64-67.

一种迭代处理单元外部信息转移函数的精确计算方法. 2009,43(8):68-71.

利用往返时延抖动的网络拓扑推断算法. 2009,43(6):28-32.