

约束条件下的巡线机器人逆运动学求解

李恩, 梁自泽, 谭民

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080)

摘要: 高压输电线路巡检机器人是一种多关节悬挂运动机构, 要实现其运动控制就需要根据机器人的本身机构特点和悬挂系统的运动约束条件进行运动学分析. 本文利用微分扭转法对巡线机器人的正向运动学进行了求解, 并通过对机器人悬挂系统的力学分析, 得到了机器人运动学的约束条件, 并在这种约束条件下, 采用了一种可用来进行实时控制的迭代循环坐标下降(CCD)算法, 来进行机器人的逆运动学求解. 这种迭代算法对于有运动约束系统的逆运动学求解具有较强的适用性, 而且它具有较好的收敛性和有效性, 适合于在线计算, 便于巡线机器人的实时运动控制.

关键词: 巡线机器人; 逆运动学求解; 约束条件; 悬挂系统; CCD 算法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Analysis of solution to the inverse kinematics of inspection robot for power transmission lines with constraints

LI En, LIANG Zi-ze, TAN Min

(Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science,
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The inspection robot of high-voltage power transmission lines is a mechanical system of multiple-joint suspending mechanism. In order to control the motion of the robot, kinematics analysis should be done on the basis of mechanical characters of the robot and the constraints for the suspending system. For the inspection robot of power transmission lines, the kinematics formulations are deduced by using the twist analysis method. Based on the mechanical analysis of the inspection robot of power transmission lines, the constraints of robot kinematics are obtained. A cyclic-coordinate descent (CCD) iterative algorithm is used to solve the inverse kinematics of the inspection robot with constraints. The recursion algorithm is compatible for inverse kinematics of systems with constraints. Furthermore, it is well convergent and efficient for calculation. This algorithm is compatible with on-line computation and advantageous to the dynamic control of inspection robot.

Key words: inspection robot for power transmission lines; inverse kinematics; constraints; suspending system; CCD algorithm

1 前言(Introduction)

高压输电线路作为电力输送的大动脉, 其安全稳定对于生产生活都具有非常重大的意义. 为了保证电力安全可靠的输送, 就要保证高压输电线路安全稳定的运行, 必须定期对高压输电线进行巡检. 目前高压电线的巡检方式主要以人工巡检为主, 而野外输电线路的分布复杂性使得巡检工作非常困难, 人工巡检有着诸多的不便, 甚至有些巡检任务无法完成, 带来安全隐患. 自动巡线机器人就是为了克服这些不便因素, 弥补人工巡检的不足来进行设计的.

输电线路的巡检任务主要是检查线路是否存在缺陷及杆塔、导线、避雷线、绝缘子和金具的状态等. 机器人要完成巡检任务, 不仅应该能在输电线上自由快速地行走, 还应该能够自主的跨越诸如防震锤、耐张线夹、悬垂线夹等各种障碍. 为了跨越这些障碍, 我们将巡线机器人的机构设计成三体结构, 如图1所示, 前后两个单体设计成手臂结构, 中间单体是机器人的本体. 在越障时, 始终有两个单体悬挂在线路上, 这样可以保证机器人运行的稳定性. 单体的驱动轮保证机器人可以在线路上行走, 它设计成中间

开合方式,在遇到障碍时,通过开合关节可以打行走轮,使其从线路上脱开,从而越过障碍。每个单体都有一个平移关节,以保证在越障时手臂可以根据要求进行伸缩。单体之间有两个连接关节,摆臂关节可使手臂在水平方向上旋转,转臂关节是为了保证两臂可以完成前伸抱线的动作。这两个关节通过抱闸控制设计成刚性柔性可转换关节,在越障时使之变为刚性,可以完成规划的动作;在正常行走时使之变为柔性,这样在重力的作用下,3个单体就可以自主调节,使3个行走轮较好地适应线路的形状,保证了机器人运行的稳定性。

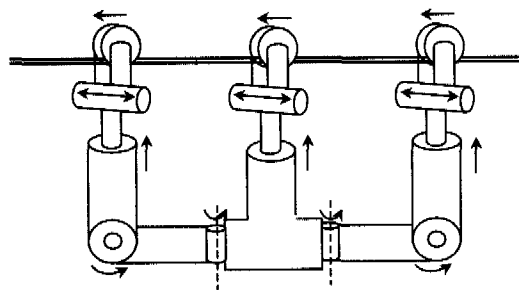


图1 巡线机器人示意图

Fig. 1 Sketch map of inspection robot

要使此机构在线路上运行,就要对其进行运动学分析。巡线机器人跟普通的工业机器人不同,它是悬挂在输电线路上的,当机器人一个单体运动时,在重力的作用下,另两个单体也会随之运动,以使机器人整体达到平衡。可见此系统是一个受约束系统,重力平衡是该系统的约束条件。本文就是分析在这种约束条件下的逆运动学的求解方法。

封闭形式的逆运动学解只是特定类型的结构简单的工业机器人才可能得到,对普通机器人来讲,很难直接求得逆运动学的封闭解。求解系统的逆运动学,通常有两种方法^[1],一种为转置 Jacobian 矩阵法,另一种为基于优化的方法。转置 Jacobian 矩阵法求解方便,计算量小,但它要求必须能够求出系统的 Jacobian 矩阵。在基于优化的方法中,循环坐标下降法(Cyclic-Coordinate Descent, CCD)^[2]是一种循环迭代方法,其原理简单,对系统没有特殊要求,而且它对系统在奇异位姿附近时的求解也是非常有效的。在本文中,由于机器人运动学方程中含有约束, Jacobian 矩阵不容易计算,所以采用的是基于 CCD 的迭代算法。

本文根据机器人运动的具体过程分为两种基本情况分别进行讨论,一种情况是前臂脱线,本体和后

臂挂线时,对其进行了模型的近似与简化,经分析,其约束是对悬点的重力总力矩为0。另一种情况是本体脱线,两臂挂线时,其约束有并联约束(几何约束)和力学约束两种。几何约束是运动维持两悬点的位置不变,力学约束是对过两悬点的铅垂面的重力的总力矩为0。在找到了约束条件之后,利用微分扭转法^[3]求得了运动学方程,然后结合末端位姿要求建立方程组。为了求得逆运动学的数值解,采用了优化方法和理论求解相结合的方式,得到了迭代 CCD 算法,并对实际问题进行了求解仿真,验证了机构设计的可行性。

2 约束条件下的巡线机器人逆运动学求解 (Solution to inverse kinematics of inspection robot with constraints)

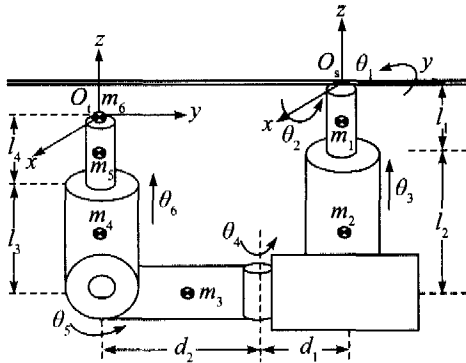
三单体巡线机器人在正常行走时,把单体间连接变为柔性,3个单体在重力的作用下,自主地适应高压电线的形状,需要控制的只是3个行走电机的同步问题,而不需要对机器人进行运动学分析与运动控制。巡线机器人在越障(包括防震锤、耐张线夹、悬垂线等)时,主要可分3步完成:首先本体和后臂抱线停止,前臂脱线、下移、前伸、抱线;然后前后臂抱线停止,中间本体脱线,前后臂驱动机器人前行、抱线停止,本体前伸抱线;然后前臂和本体抱线停止,后臂脱线,机器人前行、停止、后臂抱线,完成越障。在此过程中,机器人的基本姿态有2种:一种是中间本体和一只臂挂线,另一只臂脱线运动;另一种是两臂挂线,中间本体脱线运动。所有的越障运动都可以由这两个基本姿态完成,本文重点对这两种姿态下巡线机器人的运动学进行分析。

2.1 后臂和中间本体挂线,前臂脱线运动(Forearm loosens while midarm and reararm grasp the line)

在越障时,行走轮不改变手臂末端的位姿,而开合关节只是保证脱线抱线动作能够顺利进行,也不会改变手臂末端的位姿,所以可以把开合关节和行走轮作为抓手处理,不作为运动关节考虑。在这种情况下,此系统是一个并联串联机构,对其进行力学分析仍然比较复杂,为了进一步简化分析模型,在前臂运动时,松开本体和后臂的连接关节抱闸,使其变为柔性,这样在分析时如果不考虑连接关节的阻力的话,就可以只对前臂和本体进行力学分析,而不考虑后臂的影响,进而求取运动约束,进行前臂的运动学分析。

如图2所示,机器人运动的基坐标系应该建立在

相对于电线不动的本体悬点处,而工具坐标系应该建立在作为抓手处理的前臂轮处.在悬点处,由于前臂其他关节的运动,使得机器人在悬点处有两个自由旋转关节,即机器人可以绕 x 轴和 y 轴自由旋转.



O_0 为世界坐标系, O_1 为工具坐标系

图1 前臂越障示意图

Fig. 2 Sketch map of inspection robot when the forearm crosses obstacles

2.1.1 运动学方程(Kinematics equation)

在运动分析时,采用微分扭转(twist)的分析方法^[3],这种方法的优点在于不需要在每个关节都建立坐标系和寻找机器人的 D-H 参数,而只需要找到每个关节的微分扭转 ξ .

对旋转关节 $\xi = \begin{bmatrix} -\omega \times q \\ \omega \end{bmatrix}$, 对平移关节

$\xi = \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix}$, 其中 ω 为旋转关节的旋转轴方向矢量, q

为旋转轴上的任意一点坐标矢量,而 v 为平移关节的平移轴方向矢量.然后利用微分扭转指数公式,就可得到工具坐标的前向运动变换矩阵

$$g_{st}(\theta) = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} \wedge e^{\xi_n \theta_n} g_{st}(0), \quad (1)$$

其中 $g_{st}(\theta)$ 为关于关节变量 θ 从基坐标系到工具坐标系的齐次变换矩阵, $g_{st}(0)$ 为关于关节变量都为 0 时的齐次变换矩阵, ξ_i 为各关节的微分扭转, θ_i 为各个关节变量值,运算符“ $\wedge$ ”为从 6 维向量到 4×4 矩阵的运算^[3].

对于如图 2 所示的巡线机器人简化模型,可得各个微分扭转为

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_4 = \begin{bmatrix} -d_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\xi_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ -(l_1 + l_2) \\ d_1 + d_2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \xi_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

而初始态的齐次变换阵为

$$g_{st}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -(d_1 + d_2) \\ 0 & 0 & 1 & l_3 + l_4 - l_1 - l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.1.2 运动约束条件的求取(Solution of constraint condition)

前臂脱线之后,系统要保持平衡,机器人重心应在悬点正下方,即在悬点处重力力矩为 0,则有 $\sum \vec{G}_i \times \vec{L}_i = 0$ 其中 L_i 为重力 G_i 的力臂.不失一般性,假设机器人的每段连接臂质量分别都是均匀的,即重心位于在其几何中心上,则各重心的力臂矢量为

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_1 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \vec{L}_2 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_3 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_4 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} \begin{bmatrix} \alpha_4 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_5 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} \begin{bmatrix} \alpha_5 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_6 \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\xi_1 \theta_1} e^{\xi_2 \theta_2} e^{\xi_3 \theta_3} e^{\xi_4 \theta_4} e^{\xi_5 \theta_5} e^{\xi_6 \theta_6} \begin{bmatrix} \alpha_6 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

其中 $\alpha_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{l_1}{2} \end{bmatrix}^T$,

$$\alpha_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1 - \frac{l_2}{2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\alpha_3 = \begin{bmatrix} 0 & -d_1 - \frac{d_2}{2} & -l_1 - \frac{l_2}{2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\alpha_4 = \begin{bmatrix} 0 & -d_1 - d_2 & -l_1 - l_2 + \frac{l_3}{2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\alpha_5 = \begin{bmatrix} 0 & -d_1 - d_2 & -l_1 - l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2} \end{bmatrix}^T,$$

$$\alpha_6 = \begin{bmatrix} 0 & -d_1 - d_2 & -l_1 - l_2 + l_3 + l_4 \end{bmatrix}^T.$$

而重力 G 为 $G_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_i g \end{bmatrix}^T = m_i g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$,

($i = 1, 2, \dots, 6$).

$$\text{另取 } \vec{L}'_i \text{ 使得 } \begin{bmatrix} \vec{L}'_i \\ 1 \end{bmatrix} = e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} \begin{bmatrix} \vec{L}'_i \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ 即} \\ \vec{L}'_i = e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} \vec{L}'_i.$$

则有

$$\sum m_i g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} \vec{L}'_i = g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} \sum m_i \vec{L}'_i = 0.$$

对于 $R = e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} \in SO(3)$ 应有 $R(w \times v) = (Rw) \times (Rv)$, 对上式则有

$$(e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2})^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \sum m_i \vec{L}'_i = \\ \left(e^{-\dot{\theta}_2} e^{-\dot{\theta}_1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \times \sum m_i \vec{L}'_i = 0.$$

即

$$\begin{bmatrix} -c_1 s_2 \\ s_1 \\ c_1 c_2 \end{bmatrix} \times \sum m_i \vec{L}'_i = 0. \quad (2)$$

式(2)即为自由关节与受控关节的运动约束条件, $\vec{L}'_i$ 是 $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 的函数, 与 θ_1, θ_2 无关.

则若 $\sum m_i \vec{L}'_i = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}$, 则有

$$\begin{cases} \theta_2 = \arctan(-\frac{t_1}{t_3}), \\ \theta_1 = \arctan(\frac{t_2}{\sqrt{t_1^2 + t_3^2}}). \end{cases} \quad (3)$$

2.1.3 迭代 CCD 法求解逆运动学 (Solving inverse kinematics with iterative CCD algorithm)

从基坐标系到工具坐标系的齐次变换矩阵为 $g_{st}(\theta) = e^{\dot{\theta}_1} e^{\dot{\theta}_2} e^{\dot{\theta}_3} e^{\dot{\theta}_4} e^{\dot{\theta}_5} e^{\dot{\theta}_6} g_{st}(0)$ 此系统虽然有 6 个活动关节, 但由于有两个是受约束关节, 是一个欠自由度系统, 所以工具末端的位姿并不是任意的, 也就是如果给定完全确知的末端位姿, 其逆运动学不一定有解. 而实际上机器人在运动过程中末端位姿并不是严格确定的, 对末端的要求包括对末端位置的要求和末端行走轮轮槽的取向的要求. 这是因为机器人在越障的过程中, 只需要保证前轮的位置不与障碍物发生碰撞, 至于其姿态没有特殊的要求, 而在挂线的过程中, 只需要保证前轮的轮槽和电线在一个平面内即可, 而对其具体姿态不要求

确知. 可见确知量为轮槽的取向 s 和轮的位置 p_d , 其中轮槽的取向应在工具坐标系的 yo_z 平面内, 即与 x 轴垂直. 若齐次变换阵 $g_{st}(\theta) = \begin{bmatrix} n_\theta & o_\theta & a_\theta & p_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,

末端目标阵 $g_d = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则应有 $s \cdot n = 0$,

$p = p_d$ 而由于 θ_1 和 θ_2 具有如式(2)的约束关系, 在进行逆运动学求解时, 关节变量 θ_i 之间具有很强的耦合关系, 很难直接求得关节变量的理论值. 所以在进行逆运动学求解时, 需要利用优化的方法求解. 在此采用迭代 CCD 法来进行计算, 它采用理论求解和数值运算相结合的方式, 提高了运算效率.

CCD 算法的求解思想^[2]是把多元优化问题转化为一元函数的优化问题, 是在保持其他关节参量不变的前提下, 允许一个关节参量可变, 来求解使得误差范数最小的这个可变关节参量的值, 然后更换可变关节, 同样用这种方法计算, 如此不断更替循环可变关节, 直至得解. 对旋转关节, 所求的关节参量满足

$$\begin{cases} (k_1 - k_2) \sin \theta_i + k_3 \cos \theta_i = 0, \\ (k_1 - k_2) \cos \theta_i - k_3 \sin \theta_i < 0, \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$k_1 = w_p ({}^i p_d \cdot \omega_i) ({}^i p_\theta \cdot \omega_i) + w_0 [(n \cdot \omega_i) (n_\theta \cdot \omega_i) + (o \cdot \omega_i) (o_\theta \cdot \omega_i) + (a \cdot \omega_i) (a_\theta \cdot \omega_i)],$$

$$k_2 = w_p ({}^i p_d \cdot {}^i p_\theta) + w_0 (n \cdot n_\theta + o \cdot o_\theta + a \cdot a_\theta),$$

$$k_3 = \omega_i \cdot (w_p ({}^i p_\theta \times {}^i p_d) + w_0 (n \times n_\theta + o \times o_\theta + a \times a_\theta)).$$

其中 w_p 和 w_0 为末端位置和姿态的权值, ${}^i p_d = p_d - p_i$, ${}^i p_\theta = p_\theta - p_i$, p_i 为第 i 个关节原点.

对平移关节, 所求的关节参量满足

$$\theta_i = ({}^i p_d - {}^i p_\theta) \cdot \omega_i. \quad (5)$$

CCD 算法是用来解决关节间无约束的串联机器人的逆运动学的. 而在此运动模型中, 由于 θ_1 和 θ_2 是不能直接控制的, 而且是受 $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 约束的, 所以不可能实现保持其他关节量不变而只改变一个关节, 所以 CCD 法不能直接运用. 为了求解可控关节量, 可以先假定受约束关节保持不变, 利用 CCD 法求解可变关节量, 然后再根据约束求出关节改变后的受约束关节的值, 再用 CCD 法求解另一个可控关节量, 此过程循环迭代, 最终可得到逆运动学的解.

对此机器人运动模型, 迭代 CCD 法求解逆运动学的具体过程为: 先由式(3), 求得当其他关节量均为 0 时的 θ_1 和 θ_2 , 然后保持 $\theta_1, \theta_2, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 的值

不变,代入式(1),由式(4)或(5)求得 θ_3 ;将所求的 θ_3 代入式(3),求得 θ_1 和 θ_2 ,保持 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_6$ 不变,代入式(1),由式(4)或(5)求得 θ_4 ;依此循环进行下去,直至误差范数

$$\|e^{\hat{e}_1\theta_1}e^{\hat{e}_2\theta_2}e^{\hat{e}_3\theta_3}e^{\hat{e}_4\theta_4}e^{\hat{e}_5\theta_5}e^{\hat{e}_6\theta_6}g(\theta) - g_d\| < \varepsilon,$$

其中误差范数^[2]定义为

$$\|g_{st}(\theta) - g_d\|^2 = \|p_\theta - p\|^2 + (n_\theta \cdot n - 1)^2.$$

CCD法是收敛的^[2],由下一节的实验结果可知这种迭代CCD算法也是收敛的.而这种循环迭代的坐标下降法,与其他的优化算法(如遗传算法)比起来,运算量大大减小,运算效率得到了提高,通过下节的实验结果可以看出,算法的收敛速度也是比较快的,适合于实时运动控制.

2.2 前后臂挂线,中间本体脱线运动(Midarm looses while forearm and rear arm grasp the line)

中间本体脱线之后,前后两臂要把本体托住,则中间连接必须都变成刚性.这种位姿下机器人各运动关节既受到力学上的约束也受到几何上的约束.在力学约束上,机器人的重心要保持在两个悬点的连线的正下方,在几何约束上,由于两个悬点在电线上是固定不动的,在关节在运动时必须是在保持两悬点间距离不变的前提下进行的.这种情况下,机器人机构是一个并串联机构,则关节变量间所存在的并联约束就是它们的几何约束.

如图3所示,对于并联约束,从前臂关节得到的齐次变换矩阵为

$$g_{s1}(\theta_1) = e^{\hat{e}_{11}\theta_{11}}e^{\hat{e}_{12}\theta_{12}}e^{\hat{e}_{13}\theta_{13}}e^{\hat{e}_{14}\theta_{14}}e^{\hat{e}_{15}\theta_{15}}e^{\hat{e}_{16}\theta_{16}}g_{s1}(0). \quad (6)$$

从后臂关节得到的齐次变换矩阵为

$$g_{s2}(\theta_2) = e^{\hat{e}_{21}\theta_{21}}e^{\hat{e}_{22}\theta_{22}}e^{\hat{e}_{23}\theta_{23}}e^{\hat{e}_{24}\theta_{24}}e^{\hat{e}_{25}\theta_{25}}e^{\hat{e}_{26}\theta_{26}}g_{s2}(0). \quad (7)$$

由于机构的并联关系,从前后臂得到的变换矩阵应该只相差一个齐次变换阵,所以其约束表达式为

$$e^{\hat{e}_{11}\theta_{11}}e^{\hat{e}_{12}\theta_{12}}e^{\hat{e}_{13}\theta_{13}}e^{\hat{e}_{14}\theta_{14}}e^{\hat{e}_{15}\theta_{15}}e^{\hat{e}_{16}\theta_{16}}g_{s1}(0) = e^{\hat{e}_{21}\theta_{21}}e^{\hat{e}_{22}\theta_{22}}e^{\hat{e}_{23}\theta_{23}}e^{\hat{e}_{24}\theta_{24}}e^{\hat{e}_{25}\theta_{25}}e^{\hat{e}_{26}\theta_{26}}g_{s2}(0)g_{s1s2}. \quad (8)$$

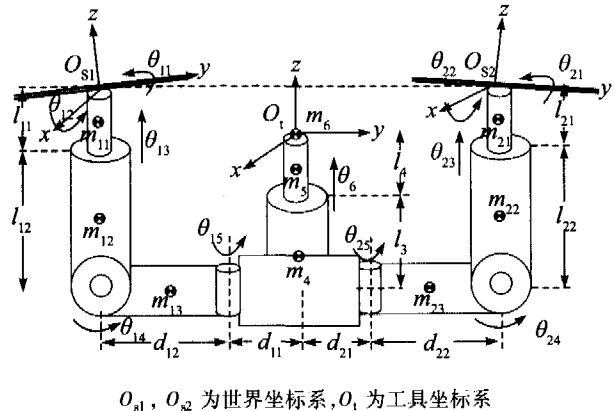
对于力学约束,重力关于两个悬点确定的直线轴axis的总力矩应为0,因此有 $\sum G_i \times \bar{L}_i = 0$.

其中 $\bar{L}_i$ 为重力作用点到axis轴所确定的铅垂面的法向量.实际上此力学约束所给出的只有一个方程,限于篇幅,此方程的推导过程和具体表达式不再赘述,可设其表示为

$$f(\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{25}, \theta_6) = 0. \quad (9)$$

类似于2.1的末端位姿矩阵要求,利用 s 和 p_d 进行逆运动学的求解.在这里,各关节变量之间是一种

更强的耦合关系,很难把这种耦合去掉,不能直接求得理论解.若采用遗传算法、神经网络^[4,5]等方法,由于此处为高维空间的求解,算法的收敛速度慢,复杂度高.此处仍采用CCD迭代法进行求解.与2.1不同的是,它属于并联机构,所以不能满足CCD法所要求的一个关节改变而其他关节不变的条件,所以迭代CCD法不能直接运用.为了对此种情况下的机器人进行逆运动学求解,可以将CCD法进行进一步的改变,先不考虑力学约束和并联约束,分别从两只手臂出发运用CCD法进行求解,再由约束求解受约束关节的值,这样循环迭代,直到得到逆运动学的解.



O_{s1}, O_{s2} 为世界坐标系, O_t 为工具坐标系

图3 中臂越障示意图

Fig. 3 Sketch map of the inspection robot when the middle arm crosses obstacles

其具体过程为:先固定 $\theta_{11} \sim \theta_{15}, \theta_{21} \sim \theta_{25}$ 为当前值不变,代入式(6)和(7),用CCD法求解出 θ_6 ,再由约束(8)(9)求得 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}$,再分别用CCD法求解出 $\theta_{13} \sim \theta_{15}$ 和 $\theta_{23} \sim \theta_{25}$,再由约束求出 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}$,然后再用CCD法求得 θ_6 .依此进行下去,直至 $\|g(\theta) - g_d\|^2 + \|g(\theta_2) - g_d\|^2 < \varepsilon$.

3 仿真运算结果(Result of computation)

为了验证迭代CCD法对逆运动学求解的有效性,对实际中的巡线机器人进行了前臂的逆运动学的数值求解计算.利用Matlab编写了逆运动学求解的程序,通过实验对迭代法进行验证.实验计算了两种情况下的逆运动学求解.一种是在跨越直线障碍(防震锤、悬垂线夹等)时,目标位置为 $(0, y, 0)$,轮槽向量为 $(0, 1, 0)$;另一种是在跨越带转弯的耐张线夹时,目标位置为 (x, y, z) ,轮槽向量为 (s_x, s_y, s_z) .

机器人参数:

$$d_1 = 28.4 \text{ cm}, d_2 = 37.5 \text{ cm},$$

$$l_1 = 53.8 \text{ cm}, l_2 = 42.4 \text{ cm},$$

$$l_3 = 47.6 \text{ cm}, l_4 = 51.2 \text{ cm}$$

$m_1 = 4.311 \text{ kg}$, $m_2 = 14.067 \text{ kg}$, $m_3 = 1.841 \text{ kg}$,
 $m_4 = 3.103 \text{ kg}$, $m_5 = 2.283 \text{ kg}$, $m_6 = 2.053 \text{ kg}$.

在这两种情况下,所求解到的关节向量以及误差范数与迭代次数的关系表如下:

表1 直线障碍求解结果

Table 1 Results for negotiating linear obstacle

末端目标	$p = (0, -75, 0)$ $s = (0, 1, 0)$							
逆运动学解	$\theta_1 = 19.50^\circ$, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = -0.46 \text{ cm}$, $\theta_4 = 0$, $\theta_5 = 2.26^\circ$, $\theta_6 = 22.99 \text{ cm}$							
迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8
误差范数	555.08	18.15	0.468	0.468	0.476	0.476	0.095	0.095

表2 45°转弯障碍求解结果

Table 2 Results for negotiating obstacle with a 45 degree swerving

末端目标	$p = (20, -80, -20)$ $s = (0.353, -0.612, -0.707)$								
逆运动学解	$\theta_1 = 10.93^\circ$, $\theta_2 = 1.27^\circ$, $\theta_3 = -9.20 \text{ cm}$, $\theta_4 = 20.43^\circ$, $\theta_5 = 11.19^\circ$, $\theta_6 = 4.54 \text{ cm}$								
迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
误差范数	695.9	658.1	452.6	67.65	21.79	20.75	4.75	4.73	0.18

由误差范数与迭代次数的对应表可以看出,这种迭代算法具有较好的收敛性,而且收敛的速度较快,实时性较好,适合于在线运算,对于巡线机器人的运动控制是有效的.经实验可知,对于机器人越障所需的各种位姿,都可求得其逆运动学解,即越障所需的各种位姿都是可达的,所以也验证了机构设计的可行性.

4 结论(Conclusion)

本文从巡线机器人系统的力学平衡条件出发,推导出了悬挂系统的运动约束条件,并结合机器人的运动学方程,用优化方法和理论求解相结合的方式,得出了迭代 CCD 的逆运动学求解方法,通过实验,验证了迭代 CCD 算法的收敛性和有效性,同时也验证了机构设计的可行性.本文的分析不仅对巡线机器人的运动控制具有直接的作用,而且对于悬挂系统的运动约束求解和有约束条件的逆运动学求解都具有一定的参考意义.

参考文献(References):

- [1] WELMAN C. *Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation* [D]. Vancouver, Canada: Master's thesis, Simon Fraser University, 1993.
- [2] WANG L C T, CHEN C C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1991, 7(4): 489-499.
- [3] MURRAY R, LI Z X, SASTRY S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation* [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994.

- [4] 姜春福,余跃庆,刘迎春.冗余度机器人运动模型的神经网络辨识及实现[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(3): 373-378.
(JIANG Chunfu, YU Yueqing, LIU Yingchun. Kinematic model identification and implementation of redundant robot based on neural networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 373-378.)
- [5] 张培艳,吕恬生,宋立博.基于径向基函数的 MOTOMAN 机械手运动学逆解[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(5): 523-525.
(ZHANG Peiyan, LÜ Tiansheng, SONG Libo. A RBF-network-based method for solving inverse kinematics of MOTOMAN manipulator [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2004, 23(5): 523-525.)
- [6] 张运楚,梁自泽,谭民.架空电力线路巡线机器人的研究综述[J]. *机器人*, 2004, 26(5): 467-473.
(ZHANG Yunchu, LIANG Zize, TAN Min. Mobile robot for over head powerline inspection—a review [J]. *Robot*, 2004, 26(5): 467-473.)

作者简介:

李 恩 (1979—),男,2002年6月毕业于西南科技大学,获工学学士学位,现为中科院自动化研究所硕士研究生,主要研究方向为:巡线机器人、智能控制, E-mail: en.li@163.com;

梁自泽 (1963—),男,副研究员,1986年、1989年毕业于清华大学自动化系,分别获工学学士和硕士学位,主要研究方向为:机器人控制;

谭 民 (1962—),男,1986年毕业于清华大学,1990年获中国科学院自动化研究所博士学位,中科院自动化研究所研究员,博士生导师,国家863计划自动化领域智能机器人主题专家组专家,中国自动化学会控制理论专业、机器人专业、技术过程的故障诊断与安全专业委员会委员,中国航空学会控制理论与应用专业委员会委员,《自动化学报》、《信息与控制》等编委,主要研究方向为:机器人控制、多机器人系统、系统可靠性及故障诊断。