

具有手/脚融合功能的四足步行机器人的工作空间研究^①

王良文^{②*} 李安生^{*} 唐维纲^{**} 杜文辽^{*} 王传鹏^{*}

(^{*} 郑州轻工业学院机电工程学院 郑州 450002)

(^{**} 郑州宇通重工有限公司 郑州 450002)

摘 要 针对四足步行机器人运动学正解的解析法求解困难,以几何法求解为基础,采用网格划分的方式,联合 Matlab,VB,SolidWorks 软件,进行了具有手/脚融合功能的四足步行机器人变姿态下的工作空间研究。研究表明,这类机器人依结构条件形成运动可行域,依整体稳定性条件形成约束空间,该约束空间随机器人姿态与抓取重量的改变而变化,而运动可行域与约束空间交集形成工作空间。在论述机器人工作空间与稳定性关系的基础上,给出了机器人稳定性判据,对机器人总质心求解过程进行了描述,开发了工作空间自动计算系统,以实例进行了说明。并通过仿真及实际抓取,对理论进行了验证。该类机器人是在并联机构上运载串联机构形成组合机构的结构模式,上述理论对于该类组合机构的工作空间研究具有普遍意义。

关键词 四足机器人,工作空间,手/脚融合,稳定性,几何法

0 引言

近年来,多足步行机器人研究成为机器人领域的研究热点^[1,2]。具有手脚融合功能的四足步行机器人的开发拓展了多足步行机器人的应用。郑州轻工业学院与华中科技大学联合开发的机器人 ZQROT-I 的一个腿具有手/脚融合的功能,该腿称为工作臂。当机器人执行抓取动作时,三条腿支撑机体,工作臂用于抓取物体;当其行走时,工作臂执行腿的功能。为了实现其抓取功能,需要对其工作臂可达到的工作空间进行分析,以获得机器人进行抓取运动规划与控制的依据。另外,摆动腿的运动空间的正确确定,可使机器人的足尖点在运动中能够在可达范围内灵活调整,并合理选择支撑点,使机器人具有更高的避障和越障能力。因此说,研究机器人的工作空间很有必要。本项目以 ZQROT-1 为对象,进行了具有手/脚融合功能的四足步行机器人的工作空间研究。

1 相关工作

通常,机器人的工作空间是指机器人末端执行机构上某个参考点的可达区域。机器人工作空间研究一直受到关注。Yang 等采用微分几何方法研究了三自由度球面并联机构的工作空间^[3],而且采用不同的参数化方法进行了数字化方位工作空间分析^[4]。Bonev 等研究了具有对称结构的球面并联机构的工作空间问题^[5],Jiang 等研究了 Gough-Stewart 平台的工作空间问题^[6],Chao 等基于四元数和微分几何,研究了机器人方位工作空间^[7]。从总体上看,工作空间的分析方法有:(1)几何绘图法。谢烽等人用几何绘图法求解了机器人的工作空间^[8];(2)几何法、解析法或者两者结合。如 Khier^[9]、Abdel^[10]等人利用雅克比矩阵求解了一类多关节机器人的工作空间,刘辛军^[11]等以并联机器人的运动学反解为基础,利用 AutoCAD 平台求得了并联机器人的位置工作空间;(3)数值法。如 Haug^[12]等提出的使用延拓的方法对工作空间的边界曲线进行映射(该方法不但适用于开链机器人,对并联机构也同

① 国家自然科学基金(50875246)和河南省高校科技创新团队支持计划(2012IRTSTHN013)资助项目。

② 男,1963 年生,博士,教授;研究方向:机器人机构设计,机器人动力学分析与综合等;联系人,E-mail:w_liangwen@sina.com
(收稿日期:2013-05-29)

样适用),以及采用概率分布统计的方法,主要有网格法^[13]、Monte Carlo 法^[14]等;(4)仿真法。如赵燕江^[15]提出的基于 Matlab 的机器人工作空间求解方法,该方法利用 Matlab/Simulink 中的 SimMechanics 工具箱,根据机器人的结构进行建模,利用仿真的形式跟踪手臂末端轨迹,并记录其末端点到达的位置坐标,绘制和计算出机器人工作空间。

上述方法各有各的特点,适用于不同的机构及应用场合。

对机器人工作空间的求解,研究最多的是串联机器人的工作空间,并联机器人工作空间研究的较少。本文研究的具有手/脚融合功能的四足步行机器人,在地面、三条支撑腿、机体间形成了并联机构,而工作臂为多关节的串联机构,整体上形成了一种并联机构加串联机构的组合机构型式。而三条支撑腿具有冗余驱动的特征,且在工作臂可达空间内,工作空间受约束于机器人整体稳定性。而机器人稳定性依赖机器人自身结构、运动姿态、抓取物体重量等多因素的影响。对该类机器人工作空间的研究很少见到报道。同时,本文研究的机器人构型为类似爬行动物的四足机器人,具有冗余驱动的特征。它的三条支撑腿上安装有 9 个伺服电机,其中 6 个为主动驱动,其余 3 个为冗余驱动。陈学东教授^[16]在对这类机器人的正运动学分析中,经过复杂的推导后,获得了一个 16 次的非线性方程求冗余驱动角。获取冗余驱动角是正运动学分析和求解机器人工作空间的基础。而由阿贝尔定理可知,对于 5 次及以上的一元高次方程没用通用的代数解法,只有数值解。而使用数值方法求解高次方程,在初值选择时,对虚根、重根、增根和遗根现象等方面都要进行处理。因此,该类机器人运动学正解的解析法求解无法获得,而采用数值迭代解也面临诸多困难。为此,本文以该类机器人运动学正解的几何法为基础,采用网格划分的方式,联合 Matlab、VB、SolidWorks 等软件的一些功能,研究该类机器人在满足稳定性的基础上,在立足点固定时的工作空间问题。本研究综合了几何法、数值法、仿真法等手段。

2 具有手/脚融合功能的机器人结构

具有手/脚融合功能的四足机器人 ZQROT-I 的结构见图 1。图 1 中, Σ_o 为参考坐标系, Σ_c 为固定在机器人机体上的原点 c 与机器人机体几何中心重合的坐标系,1、2、3 腿为支撑腿, A_1 、 A_2 、 A_3 为其支撑

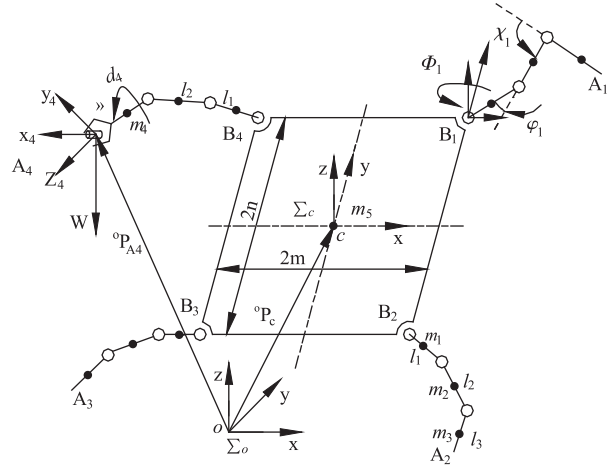


图1 机器人 ZQROT-I 的结构简图

点。4 腿为工作臂(也是抬动腿,以下均称工作臂)。 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 分别为腿 1 的髋关节、大腿关节、小腿关节的旋转角。腿 2、腿 3 有类似的 3 个运动角(从略)。腿 4 为工作臂,有 4 个运动角。除了与其它 3 个腿类似的 3 个运动角外,还有末端的旋转角,以 λ 在图上标示。机架的长度为 $2m$,宽度为 $2n$ 。4 个腿的髋部杆的质量均为 m_1 ;大腿杆的质量均为 m_2 ;3 个站立腿的小腿杆质量均为 m_3 (图 1 中只标示了腿 2),而工作臂本部分的质量为 m_4 ;被抓取物体的质量以 W 表示。图 2 为机器人 ZQROT-I 的结构装配模型^[17]。

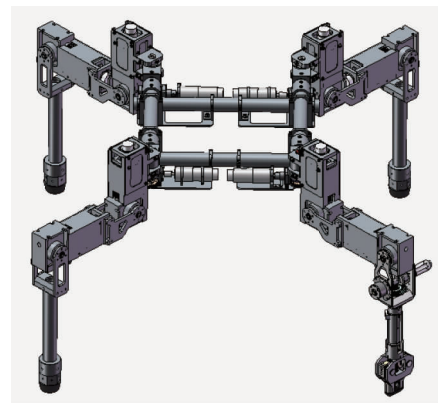


图2 ZQROT-I 的总模型装配图

3 机器人工作空间研究相关理论与模型

在该类机器人工作臂可达空间内,工作空间受约束于机器人整体稳定性所形成的约束空间,且约

束空间具有时变特征;该类机器人在结构上采用冗余驱动,其正运动学求解十分困难;机器人形成的并联机构加串联机构的组合机构型式,使工作空间求解过程需要采用分机构求解后迭加的模式。以下对相关问题分别描述。

3.1 机器人的稳定性形成约束空间

该四足步行机器人的工作过程必需满足整体稳定性要求。在求得机器人工作臂末端运动空间及机器人机体总质心位置后,要用稳定性判据进行判断,只保留可行性数据,以形成机器人的工作空间。

为了定义和分析机器人的步态稳定性,McGhee 和 Frank 给出了在水平地面上爬行的四足机器人的稳定裕度的概念^[18]。

Messuri 和 Klein(1985 年)考虑机器人重心的能量,定义了能量稳定裕度的概念;Yoneda 和 Hirose(1996 年)给出了类似于能量稳定性区域的翻转稳定性区域;而 Hirose(1998 年)引入了改善的能量稳定性区域。为了在静态稳定性的基础上生成爬行步态,Hirose 等给出了对角线原理^[16]。

考虑到本文研究对象 ZQROT-I 的行走和抓取动作都是准静态的过程,在此采用静态的稳定性判据,根据对角线原理对机器人的稳定性进行评估。

机器人在步行过程中,只要其重心的垂直投影始终被它交替变化的立足点所组成的多边形所包围,则机器人是静态稳定的。如图 3,并参见图 1,三个点 A_1^0, A_2^0, A_3^0 分别为机器人的三个立足点在 Σ_0 中 xoy 平面上投影的位置, C^0 是机器人总的质心点在 xoy 平面上的投影点。由 A_1^0, A_2^0, A_3^0 围成了一个三角形的稳定区域,当机器人的质心投影 C^0 位于这一区域内时,机器人是静态稳定的,否则机器人的重心将超出稳定区间导致机器人失稳。

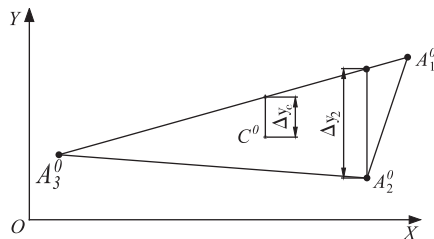


图 3 机器人静态稳定性的几何描述

记机器人在行走和抓取过程中,在 xoy 平面内的立足点坐标分别为 $A_1^0(x_1, y_1)$, $A_2^0(x_2, y_2)$ 和 $A_3^0(x_3, y_3)$, A_1^0 和 A_3^0 为一对对角腿。 $C^0(x_c, y_c)$ 为质心投影坐标,很容易得到通过 A_1^0 和 A_3^0 的直线方程

$$y = \frac{y_1 - y_3}{x_1 - x_3}x + \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 - x_3} \quad (1)$$

在图 3 中,如果质心投影 $C^0(x_c, y_c)$ 和机器人另外一个立足腿 A_2^0 在同一侧,则说明这三个立足点所构成的三角形区域可能包围机器人重心,否则,机器人的重心就在该区域之外,机器人就会处于失稳状态。对图 3 所示的状态,令

$$\Delta y_c = y_c - \frac{y_1 - y_3}{x_1 - x_3}x_c - \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 - x_3} \quad (2)$$

$$\Delta y_2 = y_2 - \frac{y_1 - y_3}{x_1 - x_3}x_2 - \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 - x_3} \quad (3)$$

由点的位置判断可知:若 $\Delta y_c \Delta y_2 = 0$, 机器人处于临界稳定状态;若 $\Delta y_c \Delta y_2 > 0$, 机器人处于静态稳定状态;若 $\Delta y_c \Delta y_2 < 0$, 机器人处于失稳状态^[18]。

上述条件在机器人可达空间内形成约束空间,只有满足约束空间的相关条件,机器人才能正常工作。而约束空间,受影响于机器人的总质心,总质心又随机器人姿态与抓取物体的重量变化而时变。

在实际应用机器人工作空间来规划机器人的运动时,我们可以给机器人稳定性判据一个安全裕度。考虑到机器人存在诸如关节间隙、结构形变、运动误差、工作载荷变化、运动惯性等,考虑安全裕度也是十分必要的。比如设定 $\Delta y_c \Delta y_2 > \varepsilon$, 这个 ε 可以根据机器人的结构、运动速度、工作环境等条件设定。本文取 $\varepsilon = 0$, 从理论上研究极限情况。

3.2 四足机器人总质心位置求解

具有手/脚融合功能的四足机器人属于模块化结构设计,各个部分之间的连接属于刚性连接。在求解机器人总质心之前,需要先求解机器人各个部件的质心点在统一坐标系下的位置,在这里将 Σ_0 设置为统一坐标系,则机器人总的质心点位置为

$$\begin{aligned} x_{com} &= \sum_{i=1}^k m_i x_i / \sum_{i=1}^k m_i \\ y_{com} &= \sum_{i=1}^k m_i y_i / \sum_{i=1}^k m_i \\ z_{com} &= \sum_{i=1}^k m_i z_i / \sum_{i=1}^k m_i \end{aligned} \quad (4)$$

机器人 ZQROT-I 的模块化结构主要包含髋关节、大腿关节、站立腿小腿关节、抓取腿小腿关节、机身及控制系统等。参见图 1 与图 2,记机器人的髋关节、大腿关节、站立腿小腿关节、抓取腿小腿关节和机身的质量(包含控制系统)分别为 m_1, m_2, m_3, m_4 和 m_5 , 而各部件质心点的坐标与机器人的运动姿态相联系,通过一系列变换,就有运动过程中机器人总的质心位置变化规律^[19]。

3.3 四足步行机器人正运动学分析的几何法

求解机器人工作臂的运动空间,需要对机器人进行正运动学分析。如前所述,在四足步行机器人运动分析中,面临求解冗余驱动关节角等问题。本文作者提出了多足步行机器人正运动学分析的计算机辅助几何法,利用多足步行机器人内部的结构约束关系,建立 SolidWorks 模型进行求解^[20]。

作者提出的机器人正运动学分析的计算机辅助几何法根据机器人的理论模型在 SolidWorks 中进行三维参数化建模,并在装配体文件中对机器人进行组装。而在 SolidWorks 的装配体中,除了设定为固定的零件,都具有 6 个自由度,而零件的位置和姿态会根据零件的受约束状态的不同而发生变化。此时,机器人的三维模型具有机器人的基本配合关系,具有 6 个自由度,但同时受到机器人各杆件间的结构约束,形成了最为基本的约束关系,这种约束关系不会因为机器人主动驱动关节角度等变化而变化。当对机器人的立足点位置和机器人主动关节角度给定合适的值,机器人的 6 个自由度都将受到约束, SolidWorks 会在机器人的内部基本结构约束和主动驱动约束下,将机器人驱动到满足以上条件下的姿态和位置。在这个过程中,被动驱动角度自动地发生变化。通过在 SolidWorks 中标定坐标系,利用系统的测量功能,就可以获得机器人正运动学的分析结果,并用数值矩阵表达机器人相对于固定坐标系的位置和姿态。本方法与思想,为进行机器人工作臂的运动空间分析提供了理论基础。

3.4 机器人工作臂工作空间求解思想与过程

从机构构型上看,三条腿支撑的机器人为冗余驱动的并联机构。而工作臂为串联机构连接在机体上。该机器人的工作空间求解需要对机器人的串联与并联两个机构进行分析并综合,其过程包含以下 6 个步骤:

(1) 机器人的参数化建模:

采用基于 VB 驱动 SolidWorks 的方法建立机器人的参数化驱动三维模型。

根据四足机器人理论模型,首先在 SolidWorks 中进行机器人各个零部件的三维建模,并进行初步装配。这里的初步装配是指让各个关节之间形成旋转约束,而没有限制机器人主动驱动关节角度和立足点位置,此时机器人具有 6 个自由度,能利用 SolidWorks 中的移动零部件和旋转零部件命令让机器人随意移动和旋转。

通过对机器人杆件和机架的尺寸进行参数设

计,实现部件参数化。

该过程在 SolidWorks 中进行实体建模,再进行初步的装配,后续的工作在 VB 中进行。

(2) 机器人姿态的运动分析过程:

在该机器人的运动分析中,采用几何法求解机器人机体的位姿。

打开 SolidWorks 软件,运行程序自动导入装配体,驱动零部件尺寸,对立足点位置和主动驱动关节角度进行约束。此时机器人被驱动到目标位姿,对设定参数进行测量,得到四足机器人运动学正解。

(3) 确定机器人的所有姿态:

先确定立足点位置,并保存装配体此时的姿态,再驱动某条腿上某个主动驱动关节的角度值。在驱动该关节角度时,机器人其它关节的位置也会随之被驱动,就会展示出一个姿态,这个姿态也就是在立足点确定时的一个姿态。若对每一主动驱动角度,在其结构可行范围内进行网格划分后对其进行独立驱动,就可以得到机器人在立足点位置确定时,所有姿态的变化情况。

(4) 计算工作臂的可达空间:

得到机器人机体的正解信息之后,采用网格划分机器人工作臂的关节角度值,按照数值解法求解机器人工作臂末端的位置,该位置的集合就是机器人在该条件下的运动可达空间。

(5) 计算总质心:

以上计算可达空间必须考虑到随着机器人姿态、工作臂末端位姿及被抓取重量的变化,机器人总的质点位置会发生变化,而导致机器人的失稳。要完成对机器人所有姿态下的总体质心计算。

(6) 评估机器人稳定性,形成工作臂的工作空间:

根据计算出的工作臂末端运动可达空间进行机器人的稳定性判断,剔除失稳对应的数据,并保留有效的数据,该数据的集合为机器人工作空间。对保留的有效数据,通过 VB 对 Matlab 的 M 文件的调用,得到机器人工作臂末端工作空间的云图。

求解在机器人立足点位置确定时的机器人工作空间的计算流程如图 4 所示。图 4 所示计算流程,能够在机器人固定立足点位置的前提下,得到机器人机架姿态和机器人机架中心点的位置,以及在相应的姿态下机器人工作臂工作空间的位置集合。

4 机器人工作空间计算系统开发

根据四足机器人工作空间的求解方法构建了求

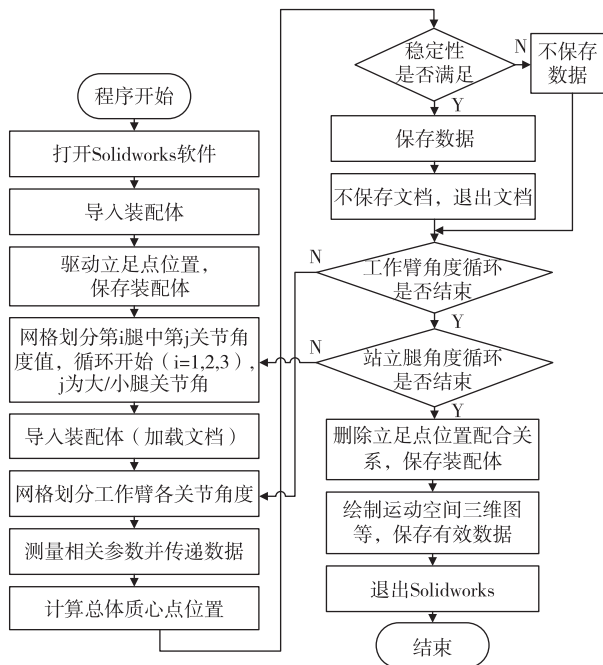


图 4 机器人工作臂的工作空间计算流程

解系统,图 5 为机器人工作空间的求解系统的界面。

在计算系统中,已知量是机器人机体尺寸、机器人各杆件尺寸、机器人立足点位置、主动驱动关节角度(参见图 1,为 3 个站立腿的大腿关节角 φ_i 及小腿关节角 χ_i ,而髋关节的关节角 ϕ_i 为冗余驱动角)的运行范围,工作臂各个关节角的运行范围,各个杆件的质心点位置,被动驱动关节角度值和计算状态下的机器人工作臂的关节角度值,抓取物体的重量等。

各个杆件的质量、各个杆件的质心点在其初始端所设定坐标系内的值是通过实验测定的。计算状

态下的机器人工作臂的关节角度值,是通过程序的数据传递实现的而被动驱动关节,即髋关节的三个角度值要在机器人的姿态给定后,通过机器人正运动学分析系统自动进行测量。被抓取物体的重量通过计算系统的界面输入。

其中标记为“1 大腿关节”的按钮为驱动腿 1 大腿关节处的角度值,并对其他角度被动驱动后所得到的姿态进行测量和计算,得到主动驱动角度在变化过程中机器人的姿态。类似的“1 小腿关节”等按钮都具有相同的作用。在对最后一个主动驱动关节,“3 小腿关节”驱动完成后,系统会对所有的有效数据进行统计并输出三维图形。此外,本系统是以初始姿态为基准的,在初始状态下,通过初始定位,将机器人的立足点位置给予确定,同时得到机器人的初始姿态。机器人的主动驱动角度值将以该初始姿态为基准,在给定的范围(图 5 中以角度增量和减量表示)内进行变动,变动的范围可以进行改变。该范围受具体机器人的结构及运动条件约束,迭代计算的密度也可以根据步长改变。

在命令按钮中,标记为“初始定位”按钮的作用是驱动机器人的杆件长度和立足点位置并保存机器人经过驱动后的状态。这样,在后续的角度驱动中,不再变化机器人的尺寸和立足点位置,将会提高程序运行效率。而标记有“退出系统”的按钮是起到退出程序的作用。

在程序设计中,为了提高效率,机器人的主动驱动关节角度值并不是所有的数值都是已知的,而是需要利用 SolidWorks 的 API 函数对其进行测量。

角度值单位为(°) 长度单位为(mm) 质量单位为(g)									
	x	y	z	起始角度	结束角度	计算步长			
髋部杆长度	67.5	立足腿1坐标	210	434.50	0	工作腿髋关节	-90	40	15
大腿杆长度	232	立足腿2坐标	421.78	-401.78	0	工作腿大腿关节	-30	90	30
小腿杆长度	359	立足腿3坐标	-315.75	-479.37	0	工作腿小腿关节	-90	90	30
机架长度	376	髋部杆质心点位置	63	0	0	工作腿旋转关节	0	360	60
机架宽度	325	大腿杆质心点位置	201	0	0	机架质量	8681	髋部杆质量	1516
		小腿杆质心点位置	194	0	0	大腿杆质量	1471	小腿杆质量	73.79
		工作腿杆质心点位置	0	0	-168	抓取部分质量	1359	抓取物质量	1000

角度减量	角度增量	步长	角度减量	角度增量	步长	满足条件的姿态数		
腿1大腿关节	-10	20	5	腿1小腿关节	-10	30	5	15828
腿2大腿关节	-10	20	5	腿2小腿关节	-10	30	5	输出总质心位置
腿3大腿关节	-10	20	5	腿3小腿关节	-10	30	5	输出工作空间

初始定位 1大腿关节 1小腿关节 2大腿关节 2小腿关节 3大腿关节 3小腿关节 退出系统

图 5 机器人工作臂的工作空间计算界面

根据程序设计流程的思想方式,机器人的9个关节角度只有一个角度是主动驱动的,而其余8个角度都是在SolidWorks中被动驱动的,需要对其进行测量。除了对机器人髋关节角度进行测量,还需要对机器人的大腿和小腿关节进行测量。大腿关节角度就是髋关节杆和大腿关节杆之间的相对位置。用SolidWorks中的API测量函数可以得到这些角度中的锐角。实际上,该锐角的形成有4种可能,分别是大腿关节杆在髋关节杆上方时与髋关节杆形成的一个锐角和一个钝角,以及大腿关节杆在髋关节杆下方时与髋关节杆形成的一个锐角和一个钝角,需要给出其他的条件对角度具体位置进行判断。

通过类似的方式也可以确定机器人大腿关节杆和小腿关节杆之间的值。该数据传递后,按照计算流程(图4)所示的过程可以得到机器人的工作空间。

5 机器人工作空间求解实例

参见图1,输入图5所示的数据。通过程序计算,可以得到机器人在立足点固定的情况下,主动驱动角度的每变动一次,机器人机架的姿态、机架中心点位置、机器人总质心位置、满足稳定性约束条件下的工作臂末端位置等都会被记录下来,而且机器人总体质心位置和这些工作臂末端位置被绘制成云图直接输出。图6是该实例下的机器人工作臂末端工作空间位置的云图。

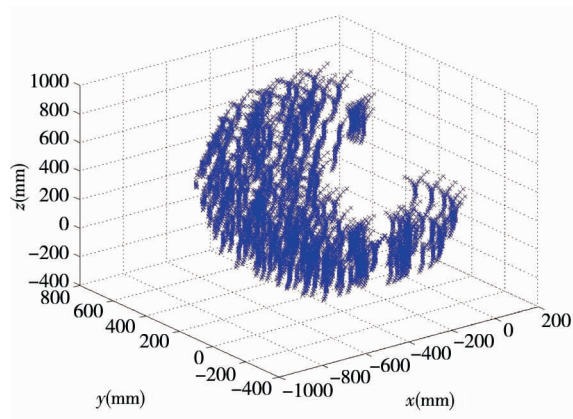


图6 机器人工作臂末端工作空间位置云图

需要特别说明的是:杆件1质心点在其坐标系中的位置(mm): $[63, 0, 0]$;杆件2质心点在其坐标系中的位置(mm): $[201, 0, 0]$;杆件3质心点在其坐标系中的位置(mm): $[194, 0, 0]$;工作腿(手脚融

合腿,图1中用4腿表示)质心点在其坐标系中的位置: $[0, 0, -168]$ 。此处的坐标系,为运动分析时,采用D-H变换所建立的各连杆坐标系^[19]。

6 仿真验证

在此采用ADAMS软件,对机器人ZQROT-I完成物体抓取过程进行仿真^[21]。

6.1 ADAMS 实体建模与参数设置

采用在SolidWorks中建立机器人模型,导入ADAMS软件中,对其添加约束与驱动。机器人在抓取物块过程中产生接触碰撞问题需要重点关注。

6.2 抓取过程的运行规划

根据机器人与待抓取物体的相对位置关系,将机器人抓取物块的运动过程设计为若干步态,通过逆运动学计算得到各步态对应的各组数据,包括机架运动时,在每个位置上各个关节的驱动角及站立腿立足点的位置。

6.3 仿真过程及分析

机器人按照设置步态进行仿真运动,抓取到物块的仿真图像如图7。仿真完成后,利用ADAMS中的PostProcessor模块可以得到各关节的转速、转矩、加速度等数据曲线,并可对其进行处理。通过这些数据可以对机器人位置移动的准确性、运动中的稳定性等进行分析。

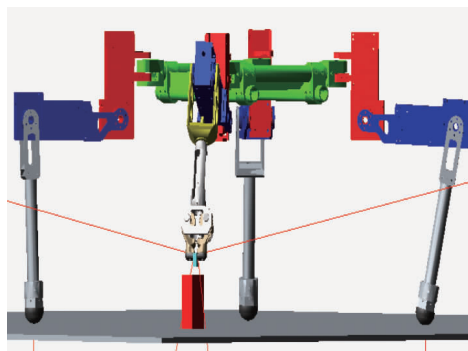


图7 ZQROT-I 抓取物块时的仿真图像

机器人ZQROT-I工作臂工作时,将显著改变机器人整体的质心,从而影响机器人整体的稳定性。利用ADAMS仿真,能够很好地模拟研究其工作过程的失稳状态。图8显示机器人ZQROT-I的工作臂抬腿角度过大时,超越了机器人的有效工作空间,从而使机器人整体产生的失稳状态。对仿真中机器人失稳姿态的数据分析表明,与图6表述的工作空

间位置基本吻合。

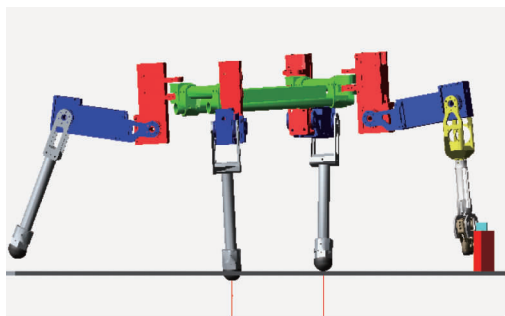


图 8 机器人 ZQROT-I 处于失稳状态

7 实际抓取实验

我们根据图 6 所表述的相关数据,将机器人与待抓取物体安置在机器人运动的可行区域内,对目标进行抓取实验。图 9 显示了通过调整机器人质心抓取机器人的不稳定性。因为机器人调整工作臂姿态幅度较大,使机器人总体质心处于稳定工作区域的边界附近,机器人整体不太稳定。这也证明了本文计算系统的正确性。

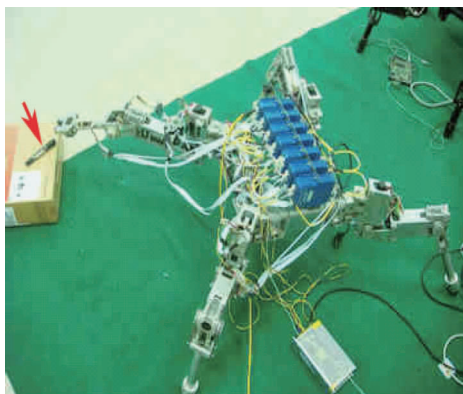


图 9 调整质心与手臂,机器人整体不太稳定

8 结 论

(1)分析图 6 可知,机器人工作臂末端位置点的组合和常见的三个自由度的串联机器人所形成的工作空间类似。但该工作空间的特点是其中中心点会随着机器人姿态的变化而变化。

(2)该类机器人的工作臂在运动可行域内,考虑受约束于稳定性的影响后,形成工作空间。而稳

定性受机器人姿态及所抓取物体重量变化的影响。对于确定结构的机器人,当立足点确定后,在运动可行域所形成的工作空间将是确定的。不考虑所抓取物体重量,其稳定性条件形成的约束空间也是确定的。而考虑所抓取物体重量的变化,其稳定性条件将形成可变约束空间。其运动可行域与约束空间交集以外部分即是工作空间。

(3)本文的研究过程,综合应用了几何法、数值法、仿真法等,为解决同类问题提供了参考。相关理论通过仿真及实际抓取实验得到了验证。

(4)研究机器人的工作空间,可以对机器人抓取作业起到指导作用,同时也可以为机器人的步态设计提供一个可以运行的区域,为实现机器人的其他功能动作提供参考依据。

目前对手脚融合功能的机器人可采用在机体上安装摄像机捕捉物体图像,确定待抓取物体与机器人的相对位置,引导工作臂进行抓取。在此情况下判定待抓取物体是否在工作臂的工作空间内,并自动规划路径,实现最优步态,是需要进一步研究的工作。

参考文献

- [1] Wang L W, Chen X D, Wang X J, et al. Motion error compensation of multi-legged walking robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(4): 639-645
- [2] Jonas B, Jerry P, Nicholas R. Editorial: special issue on legged locomotion. *International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(2): 139-140
- [3] Yang G L, Ho E, Lin W, et al. A differential geometry approach for the workspace analysis of spherical parallel manipulator. In: *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Tianjin, China, 2004. 2060-2065
- [4] Yang G L, Lin W, Mustafa S K, et al. Numerical orientation workspace analysis with different parameterization methods. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Robotics*, Bangkok, Thailand, 2006. art 4018833
- [5] Bonev I, Gosselin C. Analytical determination of the workspace of symmetrical spherical parallel mechanisms. *IEEE Trans Robot*, 2006, 22(5): 1011-1017
- [6] Jiang Q, Gosselin C. Determination of the maximal singularity-free orientation workspace for the Gough-Stewart platform. *Mech Mach Theory*, 2009, 44(6): 1281-1293
- [7] Chao C, Daniel J. Parameterization and evaluation of robotic orientation workspace: a geometric treatment. *IEEE Trans Robot*, 2011, 27(4): 656-673

- [8] 谢烽,陈鹿民,张存鹰. 空间六自由度多关节机器人工作空间研究. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2009, 24(1):50-54
- [9] Khair N C, Philippe H, Etienne C. Mobile arm for disabled people assistance manipulability measure for redundancy solve. *Intell Robot Syst*, 2006, 47(1):33-54
- [10] Abdel M, Karim Y, Harn J, et al. Interior and exterior boundaries to the workspace of mechanical manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2000, 16(5):365-376
- [11] 刘辛军,张立杰,高峰. 基于 AutoCAD 平台的六自由度并联机器人位置工作空间的解析法求解方法. 机器人, 2000, 22(6):457-464
- [12] Haug E J, Wang J Y, Wu J K. Dextrous workspaces of manipulators. *Analytical Criteria Mech Struct*, 1992, 20(3):321-361
- [13] Cleanry K, Arai T. A prototype parallel manipulator: kinematics constructure, software, workspace results and singularity analysis. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 1991, Sacramento, CA, 1991. 566-571
- [14] 刘九庆,王晨. 笃斯越桔采摘机械手工作空间分析. 林业机械与木工设备, 2008, 36(10):34-35
- [15] 赵燕江,张永德,姜金刚等. 基于 Matlab 的机器人工作空间求解方法. 机械科学与技术, 2009, 28(12):1657-1661
- [16] 陈学东,孙翊,贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制. 武汉:华中科技大学出版社, 2006
- [17] 王良文,王新杰,陈学东等. 具有手脚融合功能的多足步行机器人结构设计. 华中科技大学学报, 2011, 39(5):18-22
- [18] McGhee R B, Frank A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 1968, 3:331-351
- [19] 唐维纲. 四足机器人运动学正解几何法及其工作空间研究:[硕士学位论文]. 郑州:郑州轻工业学院机电工程学院, 2012
- [20] Wang L W, Tang W G, Wang X J, et al. Computer aided geometric method of forward kinematics analysis of multi-legged walking robots. *Advanced Materials Research*, 2011, 317-319:829-834
- [21] 王新杰,张小辉,王良文等. 具有手脚融合功能的四足步行机器人抓取姿态下的运动仿真. 机械设计, 2012, 29(12):34-38

Workspace research on quadruped robots with hand-foot-integrated function

Wang Liangwen^{*}, Li Ansheng^{*}, Tang Weigang^{**}, Du Wenliao^{*}, Wang Chuanpeng^{*}

(^{*} Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450002)

(^{**} Zhengzhou Yutong Heavy Industries Co, Ltd., Zhengzhou, 450052)

Abstract

Based on the computer aided geometric method, the workspace of posture-varying quadruped robots with hand-foot-integrated function was studied by using the grid partition way combined with the software of Matlab, VB, SolidWorks, to solve the difficulty that the analytic method is hard to obtain a forward kinematics positive solution of quadruped walking robots. The study shows that the motion feasible region forms from the structure conditions of the robots, the constraint space comes from the robot overall stability conditions, the constraint space changes with the robot posture and the grabbing weight, and the intersection part of the motion feasible region and the constraint space forms work space. Based on the discussion about the relation between workspace and robot stability, the stability criterion of the robots is given, and the solution process of the total centroid position of the robots is described. The automatic computing system of workspace was developed and an example was illustrated. The above theory was verified through simulation and actual capture. In this kind of robots, the parallel mechanism carries serial mechanism to form the structure of combined mechanism model, and the proposed theory is of universal significance for workspace research of this kind of combined mechanism.

Key words: quadruped robot, workspace, hand-foot-integrated function, stability, geometric method