西南石油大学2023年

机器人建模与仿真项目研究报告

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称： | 基于LIP+ZMP模型的双足机器人步态规划 |
| 专业年级： | 2020级机械电子工程 |
| 姓名： | 陈健 |
| 学号： | 202031761338 |

填写日期： 2023年 5 月 11 日

西南石油大学机电工程学院

|  |
| --- |
| **1、项目研究的意义**  双足机器人的研究意义在于它们可以模拟人类的步态和姿势，具有广泛的应用前景可以用于危险环境下的探测、救援任务、工业生产线上的操作、医疗康复、娱乐等领域。此外，通过对双足机器人的研究，可以促进机器人技术的发展和进步，进而推动人工智能和自主控制技术的发展。  并且与轮式、履带式、爬行式等机器人相比，双足机器人的使用场景更加复杂，应用领域更加广泛，有更好的适应性，可在非结构性地面行走，在一些特定的环境代替人进行作业，完成指定的工作。如传统的轮式机器人越障能力差、地形适应能力差、转弯效率低，或转外半径大，容易打滑，不够不平稳。而履带式机器人对地形的要求也很高，对高地落差较大的地形无能为力，不及双足机器人灵活方便。双足式机器人几乎可以适应各种复杂地形，能够跨越障碍，有着良好的自由度、动作灵活、自如、稳定。 |
| **2、研究目标、研究内容及研究方案**  2.1研究目标  建立双足的运动学模型，完成步态规划，在SolidWorks里完成双足机器人的建模，在adams里实现双足机器人的平稳直线行走，拐弯行走的仿真。  2.2 研究内容  2.2.1模型建立  经过在网上浏览资料，参看有关双足机器人的论文后，发现他们大都线性倒立摆模型作为双足行走的简化模型。  在对仿人机器人近似化处理时，我们假设：  （1）机器人所有质量集中于质心；  （2）假设机器人腿无质量；  只考虑机器人前后（x方向）和上下（z方向）的运动而忽略左右运动，即二维运动。这里认为腿是一个可伸缩的杆（简化掉中间的关节），脚与地面是球面平面副，整个机器人简化为二维倒立摆（inverted pendulum）模型。如图1。   |  | | --- | | 图 1二维倒立摆模型：一个点质量和一个可伸缩无质量腿  将倒立摆模型的各个关节的局部坐标系在空间中的相对关系建模如下图2：    图2 |   2.2.2步态规划  在平地上运动时，假设了倒立摆的质心只在水平方向沿水平约束线运动，而在垂直方向的运动被忽略。假设腿可以无限伸长，那么倒立摆的质心将沿着水平线一直运动下去。因此，腿上的伸缩力的垂直分量与重力大小相等，方向相反，而质心在在水平方向的运动由的水平分量决定。对于具有2条腿的双足机器人来说，其水平的运动模式可以简化为具有2条腿的线性倒立摆模型在水平方向上的运动，双腿交替运动的过程示意图3如下所示：    图3  通过控制两条腿迈步的步长以及切换的时间来控制倒立摆的运动状态。为了让两条腿交替的循环下去，需要引入轨道能量来表征和度量机器人的运动状态。如图4。   |  | | --- | | 图4 |   只有当初速度足够大，才能越过速度零点（b），否则就会原路返回（a）。因为在线性倒立摆的运动中，轨道能量守恒。只有E大于0时线性摆才能越过势能零点（x=0）。  但是这种模型是在机器人的腿可以无限伸长的基础上建立的，而我们的模型无法满足这个要求，因此采用三维线性倒立摆模型。三维线性模型直观上可以看作是在x，y方向上的两个二位线性倒立摆的组合。  2.2.3 步行单元  在二维线性倒立摆的步行模式生成中允许任意的支撑腿切换时间，但是在三维的线性倒立摆中，需要在 x 轴和 y 轴方向上同时切换支撑腿，因此不能简单的采用与二维线性倒立摆一样的处理办法了。假设支撑腿的切换周期固定，并记每一步的支撑时间为T。在时间段 [0, T] 内，定义三维线性倒立摆的轨迹如下图5所示的一段曲线，它是关于 y 轴对称的一段双曲线，我们称之为步行单元。   |  | | --- | | 图5 |   （a）空间中的轨迹 （b） 速度的时间历程  给定 和 ，则步行单元由其终止位置 唯一确定。终止速度 可由下面的计算过程得到。  其中，  此方法的本质是是给定参考落脚点，每步的时间，初末状态，通过计算修正落脚点，实现一步的运动。初始状态是确定的，无法任意给定。  2.2.4落脚点设置  落脚点是通过设置步长和步宽来定义的。具体如图6。    图6  对此落脚的点可以描述为：  表示前进方向上的步长，表示y方向上的步宽，由此可得第n步落脚点（）为：  第n个支撑阶段的初末运动参数：  和分别表示第n步的步长和步宽，和分别表示第n步的x和y方向上的速度。  2.2.5 期望得到上述末状态，需要调整落脚点。  在地面固定坐标系中，调整落脚点后的解为：  于是整个步态运动可以先通过对周期步行参数质心的初始位置和初始落脚点借用倒立摆方程计算出下一步的落脚点，在通过和调整实际落脚，循环操作就可以实现机器人的连续运动。  2.2.6 ZMP稳定行走控制  因为双足机器人的运动可以简化成桌子-小车模型，即一个有质量的小车在桌脚很小的桌子上运动，尽管桌脚的面积很小，桌子呈现头重脚轻的情况，容易倾倒。但我们可以控制小车在桌面上做加速运动，产生对应的加速度来获得桌子的瞬时平衡，此刻ZMP是在桌子支撑脚的范围内的。图中所示为沿着 方向运动的桌子小车模型，在三维环境中，我们还需要一个沿着方向运动的桌子小车模型，情况是相似的，因此，这里我们以方向的桌子小车为例来进行分析。    图7  因此为了保证机器人不会侧翻，需要绕ZMP的力矩为0，即。该公式表示小车产生的加速度等效到ZMP点的力矩作用要能抵消小车的质量收到重力作用后在ZMP点处产生的力矩作用，这样才能保证桌子是平衡的。  为了让机器人保持平衡，采用给定ZMP来求解质心的运动过程。对于x方向的水平加速度可以先定义一个微分：  然后把作为ZMP方程的输入，得到如下的系统的状态方程：  对于y方向上的同理，这样就把步态模式生成器构造成了一个ZMP跟踪系统，可以预测控制，跟踪期望的ZMP位置。如下图8。    图8 引入了ZMP的动态步行  2.3 研究方案  一、阅读论文，借助论文了解对腿在运动时各关节的运动变化规律，建立matlab机器人模型如图9。    图9  添加示教窗口，可以控制各关节的转动，以便更好地理解行走过程中腿的运动姿态。  然后建立机器人倒立摆模型，约束各关节的转动范围。整个行走过程分为两部分，伸腿和支撑，在伸腿时，腿部应建立两个倒立摆，大腿小腿各一个，放下支撑时可看作一个倒立摆。以此规律建立运动模型，运动轨迹如图10所示。    图10  然后采用五项插值法对运动轨迹求逆解，得到每个关节的转动变化曲线，如图11。    图11  然后采用函数拟合，去拟合出每个关节转动变化曲线，用来作为adams的驱动函数。将SolidWorks里的模型导入到adams里，添加对应的连接副，把拟合出的函数表达式添加到驱动里作为驱动函数，运行仿真。对身体质心x,y,z方向上的位移进行测量，查看下蹲，行走时质心的稳定情况，如图12所示。    图12  从上图可以看出，在前6秒蹲下运动的过程中，质心运动平稳，但是在6秒后即抬腿运动时，质心发生严重侧偏。原因是在前面建立运动模型时，我只考虑了双腿在x平面的关节转动，即只考虑了前后摆。这样就会造成当一条腿抬起来时，整个机器人的重心会偏向抬腿的一侧，整个模型会左右翻倒，但是此时支撑腿无法提供左右侧摆的力来平衡重心。  （二）引入zmp,修改数学模型，对髋关节和踝关节增添左右侧摆的转动（Roll）。以此来平衡重心，如图13所示。    图13  这样在抬腿迈步时就会对重心进行一个平衡，使重心稳定在一条线上。并在原先的模型基础上引入zmp模型，用来预测控制脚步的生成。  先构模型预测控制的函数，并对模型进行验证，查看其可行性。如图14。    图14  从上图中可以看出期望ZMP和实际ZMP基本重合，质心稳定在一条平滑的直线上，无太大抖动变化，说明模型可行。  然后建立双腿模型，每个腿都有大腿的Roll，Pitch，Yaw和小腿的Roll，Pitch，Yaw  还有膝关节的Knee。在计算中发现腿部在Yaw方向上几乎没有旋转，为减少数据的处理，删除了yaw的计算。（前后摆为pitch，左右摆为roll，旋转为yaw）  修改后左右腿关节变化曲线如图15所示。    图15  从图中曲线可以发现，在行走时，双腿是会左右侧摆来平衡重心的。因此在adams里的模型连接副也要换成球副，才能同时提Pitch和Roll方向上的转动。将matlab计算出来的角度数据保存成.txt格式，方便后续直接导入到adams里。  将数据导入到adams里，采用插值分拟合函数，如图16。    图16  然后再添加驱动时选择所有函数下的CUBSPL( 1st\_Indep\_Var , 2nd\_Indep\_Var , Spline\_Name , Deriv\_Order)，让关节按照导入的数据运动。然后对机身质心CM在y方向上进行测量运动过程中CM的高度变化，如图17。    图17  从图中看出CM在运动过程中高度并不稳定，变化抖动非常严重。观察仿真时模型的运动状态，可以看到虽然添加了Roll方向上的转动，但是在行走过程中，抬腿时还是会发生侧偏。仔细分析后发现，可能是因为建模原因，双腿位置不应该放在身体两侧，放在两侧导致了即使在Roll方向上转动所提供的力矩也无法将重心稳定在一条腿上。  采用给质心施加一个单向里来抵消y方向上的重力问题，并采用pid控制力的大小，让质心CM尽量稳住在一个高度上。效果如图18。    图18  可以看出，添加了pid控制的单项力试图去抵消因单腿无法平衡的重，效果并不好，机身的质心CM还是不能持在同一水平面上。  问题出现在脚面对地面的吸引力上，因为在建模时都考虑的过于理想化，都只考虑了行走过程中只需要保持身体，脚平面和地面平行就能稳定重心，但是在仿真时才发现脚平面根本无法与地面保持平行，因为身体重心会把脚掌压翻，脚掌就无法提供力矩稳定重心了，导致模型在行走时腿无法抬起，走路一摇一摆的。  对脚掌添加平行约束，让其始终与地面平行。解决了支撑力的问题。运行仿真，对其质心，脚踝进行轨迹跟踪，效果如图19。    图19  这时可以看出质心基本稳定在一条直线上，并且脚踝也符合人的运动轨迹。  后处理分析如图20。    图20  图中\_16表示运动的距离，\_17表示质心CM的高度，\_18表示CM的左右摆动情况，从图可以看出，在平地中行走，该机器人能有良好的稳定性。 | |
| **3、研究结果及其分析**  历经半个月完成了双足机器人的步态规划到能够在adams里平稳行走。但是此时并不是真正意义上的平稳，因为此时的平稳是建立在脚掌的平行约束上。去掉约束，还是会有腿抬不起来身体平衡不了的问题。  后面会改进仿真的机器人模型，会考虑单腿支撑时的平衡问题，分析行走过程中单腿的受力情况；并尝试添加pid控制力矩的方法来控制左右摆动，结合matlab联合仿真调试；改进ZMP和学习其它模型来更好的控制步态。  参考文献  Shuuji Kajita, Hirohisa Hirukawa et al. Introduction to Humanoid Robots, 2004. （中文译名《仿人机器人》——梶田秀司著） | |