

仿人机器人运动规划研究进展^①

夏泽洋^② 陈 恩 熊 璟 付成龙

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘 要 在分析仿人机器人运动规划特性的基础上,对仿人机器人运动规划涉及的路径规划和步态规划两大问题及其典型方法进行了阐述和分析。对基于博弈论思想的离线足迹规划和基于传感信息融合的在线滚动路径规划两种路径规划策略进行了剖析,同时对几何约束法、模糊逻辑法、神经网络法、遗传算法、自然步态法等5种常用的离线步态规划方法和3类在线姿态调整及控制方法即基于动力学模型的方法、基于倒立摆模型的方法、不基于模型的方法的算法思想和实验应用进行了分析与评价。最后对仿人机器人运动规划评价方法和运动规划研究的发展进行了讨论。

关键词 双足步行,运动规划,路径规划,足迹规划,博弈论,步态规划

0 引 言

与轮式移动机器人和多足移动机器人相比较,仿人机器人在对复杂非结构化地形的适应能力和运动控制的灵活性等方面表现出了更好的特性,同时,仿人机器人复杂的本体结构、数学模型和运动环境对其运动规划提出了更高的要求 and 更复杂的研究内容,因而对仿人机器人运动规划的研究、分析和评价就显得更加重要。

仿人机器人的运动规划主要有三个方面的研究内容:路径规划、步态规划和任务作业规划^[1]。路径规划就是在全局环境下的离散的足迹序列规划;步态规划是仿人机器人运动规划的底层规划任务,其结果表征为机器人各自由度的运动轨迹,其目的就是在已经规划的足迹系列基础上实现机器人的最终移动任务。由于受到整体研究水平的局限,仿人机器人的任务作业目前仅限于一些简单的运动,如上肢的目标抓取及移动、简单的与人协作作业等,因而任务作业规划目前还不是仿人机器人运动规划的主要研究问题。本文主要对仿人机器人路径规划和步态规划的各类典型算法及其应用情况进行分析和评价。

1 仿人机器人运动规划的特性分析

仿人机器人的运动规划表现出了以下5个特

性:

(1)环境模型的多维及复杂性。仿人机器人的运动路径规划是基于三维环境的规划。仿人机器人双足步行运动的特性使它可以跨越避开某些障碍物,甚至可以在障碍物上行走。因而对其环境的表述及数学表达方式更加复杂^[2]。而普通轮式移动机器人的环境模型通常为二维模型。

(2)复杂的运动学及动力学模型。轮式移动机器人的运动规划是在位形空间(configuration space)中进行的,在该空间中它被视为质点,其状态参数就是它的位置和方向,其运动学及动力学模型相对简单,所以它的运动规划问题就蜕化为基于时间序列上的路径规划问题^[3]。而仿人机器人在步行过程中频繁的支撑相转换和本体结构的多自由度耦合问题导致动力学建模和运动学解算非常复杂,这对运动规划策略的有效性和实时性提出了更高的指标。

(3)苛刻的稳定步行约束条件。仿人机器人本体系统双足步行的运动稳定性是其运动规划必须考虑的重要因素。双足步行中支撑相频繁转换导致机器人的开链和闭链结构交替出现,同时步行中存在连续的及离散的动态干扰。上述变拓扑及混杂(diverse topology and hybrid)的固有特性^[4,5],使得直接应用经典理论来分析仿人机器人稳定性的研究变得异常艰难。

(4)路径规划的离散性。从运动轨迹角度来看,轮式移动机器人的运动规划最终获得的是一条连续

^① 863 计划(2006AA04Z253)和国家自然科学基金(50575119)资助项目。

^② 男,1980年生,博士生;研究方向:仿人机器人系统设计,仿人机器人运动规划与控制;联系人,E-mail:zeyang_xia@iecc.org (收稿日期:2007-02-06)

平滑路径,而仿人机器人的路径规划获得的是离散的足迹序列。在一个规划周期内,经过膨化处理的环境中连通的任何两点在路径规划上对于轮式移动机器人来说也是有效连通的^[5],而仿人机器人则需要考虑在单腿支撑时摆动足的可达区域约束(见图1(a))^[1]。

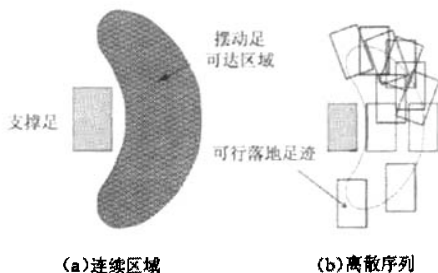


图1 摆动足可达落地区域

(5) 规划问题的高复杂度。Jean^[6]和 La Valle等^[7]指出规划问题的复杂度与机器人的自由度成指数关系,与环境中障碍物的规模成多项式关系。所以规划问题随着机器人自由度增多会出现维数灾难问题(dimension curse),特别是对于可能高达30多个自由度的仿人机器人来说,规划问题的高复杂度导致的潜在规划失败是一个必须面对的问题,这对于规划的完备性提出了更高的要求^[8]。

2 路径规划

根据机器人与环境的信息交互情况,仿人机器人的路径规划方法可以分为以下两类:基于博弈论思想的离线路径规划方法和基于传感信息融合的在线滚动路径规划方法。

2.1 基于博弈论思想的离线足迹规划

Kuffner和 Chestnutt等^[1,9-11]提出了一种经典的基于博弈论思想的足迹规划策略,它是一种全局静态环境下的基于环境模型的规划算法。它之所以被称为基于博弈论思想的规划策略,是因为在该策略中机器人通过选择合适的控制输入来降低实现运动目标的代价,而障碍物由于自身的存在及运动增加了这个代价,同时机器人和障碍物没有信息交互,基于这个前提的规划问题被认为是机器人和环境中的障碍物的一个非合作零和博弈问题(non-cooperative zero-sum game)^[12]。

该规划算法的核心思想就是通过一种启发式搜

索(heuristic search)方式规划出一个从原始足迹位置到目标足迹位置的离散足迹序列,其规划原理如图2所示。

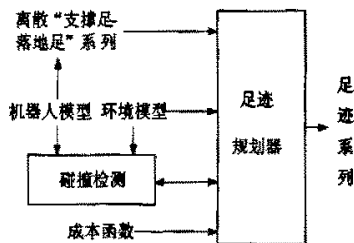


图2 规划算法原理

已知的静态环境模型信息是规划算法的输入之一。同时规划算法需要一组离散的满足机器人的运动学模型约束的“支撑足迹位置-可行落地足迹”序列,该序列中不同的落地足迹是为了实现机器人的前进、停止、后退、转弯等动作(如图1b中分布于可达区域边缘的足迹系列)。在该足迹序列基础上构造从初始位姿 Q_{init} 开始的搜索树。该序列中的可行落地足迹数量非常重要,它决定了搜索树的分支因子(branching factor)^[13]。在构建搜索树的时候,对每个落地足迹在环境模型信息的支持下进行检查,剔除搜索树中导致碰撞的节点。最后搜索算法返回一个优化的足迹序列,这个优化建立在规划算法定义的节点成本函数(node cost function)之上。节点成本函数决定了树中各节点即落地足迹的优先权,节点成本函数的构建通常考虑的因素有从起始位姿 Q_{init} 到当前位姿 Q_{cur} 的成本和从当前位姿 Q_{cur} 到目标位姿 Q_{goal} 的成本。

目前这个规划方法在静态障碍物环境中的 H6, H7, Asimo 等机器人上得到了成功应用^[9-11],它奠定了离散足迹规划策略的思想基础。但是该算法目前仍存在不足之处,那就是其计算复杂度高,实时性很差^[1]。

为了充分利用仿人机器人双足步行跨越障碍物及步行于障碍物之上的能力,Yasar等^[14,15]提出了一种改进的足迹规划方法,这种方法的主要思想类似于 Kuffner 的方法,但是它的规划算法并不要求一个确定的“支撑足迹位置-可行落地足迹”序列作为输入,而是对于具体某一个支撑足位置根据环境地图计算出有限的落地足迹,其中可能包括跨越障碍物或者行走于低的大平面障碍物之上的足迹。这个方法大大减少了搜索树中的节点数量,提高了规划

算法的有效性和实时性。

2.2 基于传感信息融合的在线滚动路径规划

基于传感信息融合的在线滚动路径规划方法是一种实时足迹规划方法,主要用于动态非结构化环境,即环境中可能有移动的障碍物,机器人步行的目标区域或者任务作业的目标物体也可能是运动的。

它的主要思想是:首先利用传感器信息对运动的障碍物进行建模预测(匀速运动模型、变速运动模型或者随机运动模型等);预测是在局部环境下进行,其结果用来更新局部环境信息;然后利用某种算法在该局部环境边缘找到全局目标区域的一个映射,此映射作为该局部环境下的目标区域;再在该局部环境下进行足迹规划;在一个滚动周期之后(此时机器人未必已经步行到该局部目标区域),利用新的传感信息重复上述步骤,直到机器人到达全局目标区域。通常使用的传感器有视觉传感器等。

用滚动规划策略来解决动态环境下路径规划问题不仅可以适应环境的动态变化,而且用规划空间内路径的局部最优代替全局最优,大大降低了问题的求解规模,具有很好的实用性和实时性。Philipp等^[16]将这种方法应用在机器人 Asimo 上,取得了很好的实验效果,这种滚动路径规划方法在轮式移动机器人上也有很广泛的应用^[17]。

另外 Li 等^[18]也提出了基于人工势场的全局最优搜索算法(best-first search)搜索机器人全局路径,Sabe 等^[19]将人工势场的方法引入到了仿人机器人的路径规划中。以上方法取得了不错的规划效果,但没有将足迹规划嵌入在实时的路径规划之中。

3 步态规划

仿人机器人的步态规划主要通过离线的步态规划和在线的姿态调整及控制来协同实现。

3.1 离线步态规划方法

常用的步态规划方法有几何约束规划法、模糊逻辑规划法、神经网络规划法、遗传算法规划法和自然步态规划法等。这些方法都是基于零力矩点(zero moment point, ZMP)稳定性判据的规划方法^[20]。

(1) 几何约束规划法

几何约束规划法是步态规划中的常规方法,它的核心思想是首先规划机器人身体关键点的移动曲线,再求解约束方程得到机器人在行走过程中各个关节的运动轨迹。同时根据已有的轨迹及机器人物理参数计算出 ZMP 位置,通过调整髋关节和踝关节

的运动限制,把 ZMP 控制在稳定区域内,从而得出机器人行走的完整步态参数。几何规划算法虽然在动力学建模上相对复杂一点,但是它的物理含义非常明确,只要满足机器人步行的稳定性判据,步态规划就能成功。该方法已经在 Honda 系列机器人上得到成功应用, Jong, Kajita, Huang 和 Chevallereau 等^[21-24]在研究中也都使用了类似的方法。陈恩等^[25-28]在研究中成功地应用了基于关键姿态的步态规划方法,即首先根据几何约束预设步行周期中的若干个关键姿态,然后进行样条曲线插值获得完整的轨迹参数,同时还针对机器人样机 THBIP-I 对该方法作了系列改进,实现了跨越简单障碍和上下台阶的步态。目前绝大部分得到成功应用的步态规划方法都是基于几何约束法的改进或者针对具体规划对象和环境的变种。

但是在规划的过程中,为了使计算过程和运动分析变得简单,几何约束规划法一般把三维的步态规划分解成两个平面问题;在力学分析上,它用简单的平面静力学质点系代替复杂的三维动力学多刚体系;同时在设定关键关节的运动轨迹的时候,并没有根据机器人本体的物理特性进行优化,其优化多依靠实验经验。所以该方法在实现机器人行走的平稳快速性方面受到了局限。

(2) 模糊逻辑规划法

模糊逻辑规划法是用计算的近似来获取智能的提高。它以事先确定的步态初始参数为输入变量,配合实时的传感器信息(如实时的身体姿态和 ZMP 位置数据),通过接口生成模糊控制的输入,根据预先确定的控制规则,通过分析模糊控制的规则库,产生所需要的步态参数,即各个主动关节的转角、角速度和角加速度参数。

但是由于仿人机器人自身变姿态的不确定性和环境的复杂多变,模糊控制规则的设定非常复杂,所以目前该方法没有得到很理想的实验效果^[29,30]。

(3) 神经网络规划法

神经网络规划法是在步行周期内进行循环采样,采集的各输入变量值经神经网络处理成输出变量的取值。该方法通常采用如下的结构:以各个关节的广义坐标及其微分为输入参数的神经节点(通常为各关节的角度和角速度,有时加上角加速度);设定一定数量的中间神经节点,这些中间的神经节点是隐藏的,它们均与所有的输入节点相联,并遵循一定的函数映射关系;以所需要求得的各个关节的驱动力矩为输出节点,每个输出节点都与所有的中

间节点相联,按照各自的权重,产生对输出节点的影响。神经网络结构的中间隐藏层是整个系统的关键。其中各个输入节点的函数映射关系决定于中间节点,同时中间节点的多少决定了神经网络系统的精确性^[31]。

神经网络系统应用于仿人机器人的步态规划,可以避免由于精确描述仿人机器人物理模型而产生的复杂的计算问题,但同时也带来了另外一个复杂的计算问题:现在的神经网络模型非常臃肿,计算复杂度非常高;同时机器人的决策系统又没有真正人类的神经结构,而且每一种不同的步态规划都需要针对于它的训练。所以该方法在应用上仍然有很多需要解决的问题^[32]。

(4) 遗传算法规划法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法^[33]。遗传算法规划法在使用时,首先设计一个带有反馈补偿的前馈控制系统,根据这个特定的控制系统实现各个关节的力矩控制。因为实现遗传算法需要把所求的问题参数化求解,所以只能先假设某个关节的运动曲线,再用多次函数插值实现问题的参数化,最后利用遗传算法,根据稳定性条件或其他寻优条件确定问题的各个参数,达到步态规划的目的^[34]。

遗传算法规划法目前有以下两个问题:(1)被规划关节的运动规律曲线是未知的,即使假设已知,其关节运动曲线通常也不是初等函数,插值误差很大;(2)计算复杂度高。一个14自由度的机器人,假设其关节运动轨迹为最简单的二次曲线,至少需要有84条基因的遗传算法才能完成其步态规划。因此,它并不适合直接用于步态规划,而是常常用来做步态的后续优化,即把已经初步规划好的步态做函数插值参数优化。

Cheng等^[35]用遗传算法来优化机器人的动态行走,设计的步态控制器通过6个插值点来确定关节的轨迹,利用遗传算法来优化插值点及插值参数。Capi等^[36]利用遗传算法实现了一个有滑移关节的仿人机器人的步态优化,该遗传算法以能量消耗最低为优化目标,实现了低能耗的平滑行走。

(5) 自然步态规划法

自然步态规划法要应用自然动力学的准则^[37],即不需要规划机器人的关节轨迹,也不需要轨迹跟踪,步态完全是两足机器人的机械系统和控制系统与环境相互作用而自发产生的。所以机器人在本体

结构上必须要有与之相适应的机构,因此自然步态规划法与仿人机器人的本体结构设计是密切相关的。使用这种规划方法的机器人有3个特点:具有膝关节的骸骨结构;具有踝关节帮助身体重心移动的被动自由度;摆动腿在行走过程中完全被动摆动。自然步态适用于机器人在理想的表面上进行动态行走,这样的行走可以节省相当的能量,是一种非常好的规划方法,但目前距离实际稳定应用尚有距离^[38]。

自然步态规划只适合于稳定的动态行走,并且只能在已知的理想路面上实现。因为无论是踝关节的被动前摆还是膝关节的被动前摆,都涉及到动能和势能的转换,这就要求行走的速度不能太慢。在未知的地面上使用自然步态,如果没有良好的在线步态调整,必然导致动能和势能的转换不一致,从而导致机器人失稳。

(6) 其他步态规划方法

还有通过中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)产生节律运动的步态规划方法^[39],这种方法试图从人的运动神经控制系统的工作原理出发寻找步态规划的解决方案。另外还有应用强制学习的规划方法,机器人和环境交互学习状态-动作函数,通过尝试不同的动作来选择更适合达到规划目标的动作,这个方法已经比较成功地用于机器人步态的局部参数调整^[40]。对于步态规划方法的分类有很多^[37],但是大部分方法可归为以上各类之中或者是综合了以上各类方法的规划思想。

3.2 在线姿态调整及控制方法

离线步态规划只是在理论上定义了行走模式,机器人在实际行走时,必然会产生轨迹跟踪误差。由于双足步行的开环结构本质不稳定的特性,很小的误差就会导致整个系统的不稳定。因此必须实时地检测机器人的行走状态数据,并且根据一定的算法来调整机器人的当前姿态对已规划的步态进行在线修正。姿态调整的第一个目标是尽量减小实际的ZMP与理论的ZMP的偏差,使机器人尽量按照规划的运动模式行走。同时,姿态调整也有助于解决摆动腿落地冲击和双腿支撑期闭链机构的柔顺性问题。目前得到有效应用的步态调整方法有基于动力学模型的姿态调整及控制方法、基于倒立摆模型的姿态调整及控制方法以及不基于模型的姿态调整及控制方法等。

(1) 基于动力学模型的姿态调整及控制方法

机器人在步行过程中,实际ZMP与期望ZMP之

间不可避免地存在误差 Δ_{ZMP} , 这个误差和机器人的总惯性力 F_I 及机器人所受的地面反力 F_R 对机器人身体形成的翻转力偶是导致机器人行走失稳的实质因素。因此, 从力学平衡的角度考虑, 为了克服该翻转力偶, 就需要从期望惯性力、期望 ZMP、总实际地面反力、总实际地面反力中心 4 者入手。通常采用了地面反力控制、模型 ZMP 控制以及摆动足着地位置的控制方法^[41]。

地面反力控制, 即通过改变支撑脚的姿态, 使实际地面反力中心向期望 ZMP 移动, 减小两者偏差, 进而减小翻转力矩。模型 ZMP 控制, 即控制期望 ZMP 的位置移动到一个合适的位置, 减小期望 ZMP 和实际地面反力中心的距离, 进而减少机器人受到的翻转力矩。上述两种控制会导致机器人上身的位置变化, 则期望的上肢与摆动足的位姿也发生变化, 因此这时摆动足着地位置也需要相应地调整, 这就是摆动足着地位置控制。这种控制只是使机器人上身和脚的相对位置回到理想行走模式的状态, 它本身不能恢复机器人的姿态。赵建东^[42]在模型 ZMP 控制中成功应用了基于 ZMP 误差的踝关节自调节模糊控制器。

(2) 基于倒立摆模型的姿态调整及控制方法

Sugihara 等^[43]将仿人机器人简化为一阶倒立摆模型(如图 3 所示), 认为机器人行走周期中其摆动相、支撑相以及过渡相的阻抗(刚度和阻尼)是变化的。为了使机器人在支撑相具有较好的刚性, 在过渡相和摆动相具有较好的柔性, Sugihara 等提出了变阻抗倒立摆(variable impedance inverted pendulum)的控制思想, 即通过变化机器人在不同行走相内的阻抗, 来实现稳定行走的步态。

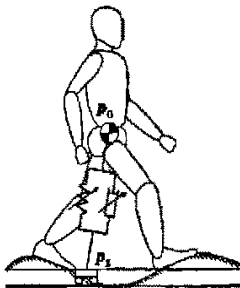


图 3 变阻抗一阶倒立摆模型

Jong 等^[44]也提出了类似的算法, 不同的是他将摆动腿和支撑腿等效成两个独立的倒立摆(如图 4), 通过改变两者的阻抗特性来使机器人实现稳定

的行走姿态。Napoleon 等^[45]建立了机器人下肢和上身二阶倒立摆模型和最小相位系统, 并用线性二次方程最优化控制方法设计了机器人控制器。另外, 德国慕尼黑工业大学研制的仿人机器人 Johnnie^[46]也采用了类似的倒立摆模型的阻抗控制策略。

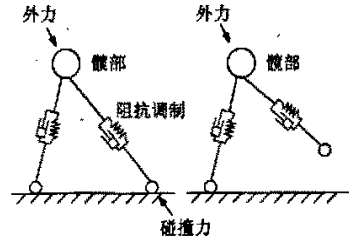


图 4 变阻抗倒立摆模型

(3) 不基于模型的姿态调整及控制方法

由于获得一个优化的模型非常困难, 上述两种基于模型的姿态调整方法有了一定的局限性, 同时它的计算也非常复杂。

Huang^[47]认为仿人机器人为了实现稳定行走, 必须有良好的离线规划步态和基于传感器信息的实时调整控制, 因此设计了一个包含躯干姿态控制器、实际 ZMP 控制器和着地时间控制器的复合姿态控制器(如图 5 所示)。

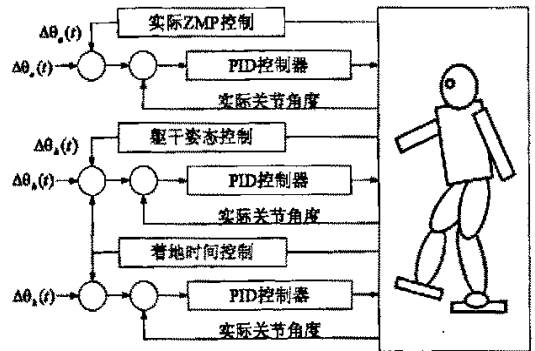


图 5 复合姿态控制器

1) 躯干姿态控制器。如果机器人的实际躯干姿态与期望的姿态相比向前或者向后倾, 则整个机器人就会向前或者向后翻倒。为了使躯干保持期望的姿态, 可以控制髋关节、膝关节和踝关节。由于髋关节距离躯干最近, 最有效的办法就是控制髋关节。躯干的实际姿态可通过安装在其上的陀螺仪测得。

2) 实际 ZMP 控制器。Huang 提出了 ZMP 有效稳定区域的概念。当六维力/力矩传感器检测出实

际 ZMP 处于有效稳定区域内时,实际 ZMP 控制器不开启;当六维力/力矩传感器计算出实际 ZMP 处于有效稳定区域外时,控制其将对踝关节进行修正,该修正量为实际 ZMP 到有效稳定区域的最短距离的函数。

3)着地时间控制器。机器人在行走时,如果摆动腿着地过晚或过早,则向前或向后翻转的力矩就会增加,机器人就有向前或向后翻转的趋势。为了使机器人摆动腿在规划的時刻着地,就需要对摆动腿在竖直方向的位置进行修正。该修正量是地面反力的函数,地面反力可由六维力/力矩传感器测得,然后根据逆运动学计算得到各运动关节的校正量。

另外,Li 等^[48]先规划下肢运动以及 ZMP 轨迹,然后根据六维力/力矩传感器测量并计算实际 ZMP,通过离线调节躯干运动,来补偿下肢关节运动轨迹和减小 ZMP 误差。Tawara 等^[49]根据关节位置误差改变采样时间(控制周期),使得关节产生不同的加速度,减小 ZMP 误差,使得机器人脚和重心均按规划好的轨迹移动,以适应不规则地面的行走。以上方法均在仿真平台或步行实验中取得了较好的效果。

以上各在线姿态调整及控制方法目前仍有很大的改善空间,主要有:(1)各控制器的参数设定很多都建立在实验经验之上,没有严格的理论依据,没有对碰撞过程进行机理建模;(2)各控制器都针对特定的地面或者外部干扰情况,不具备对不同情况的鲁棒和适应性;(3)缺乏完善的传感器信息融合算法。

4 仿人机器人运动规划评价方法

轮式移动机器人的运动规划通常简单地从时间和空间的角度来评价,即评价是否规划得时间最短、路线最短^[3]。这种评价方法显然不再适用于仿人机器人。仿人机器人的运动规划需要建立多层面的量化评价函数。

首先路径规划结果是否是该环境下的最优路线,在非结构化环境下是否运动风险最小,其足迹系列是否给底层步态规划提供了最优规划输入;步态规划是否输出了实现该足迹运动的最佳步态;能耗最小,用时最少,稳定裕度最大等。3.1 节足迹规划算法中,被搜索可行足迹的成本评价函数也包含了最优足迹的思想,但是这个成本评价函数是从单步规划的角度来分析的。仿人机器人运动规划评价的前提是该运动规划结果已经存在并且有效,其评价

是独立于规划算法之外的。建立该评价体系时至少应该考虑的因素有:全局环境信息、机器人运动学和动力学约束、运动能量消耗、运动风险评估。目前虽然不少研究者提出了关于仿人机器人的步态规划优化的指标^[50],但这些优化只是基于底层步态规划的,仿人机器人的融合全局运动和底层步态的运动规划评价系统还有待建立。

5 结论

本文对仿人机器人运动规划所涉及的路径规划和步态规划的各类典型算法及实验应用情况进行了深入分析和评价。特别是对基于博弈论思想的离线足迹规划和基于传感信息融合的在线滚动路径规划两种路径规划策略进行了剖析。同时对多种基于 ZMP 稳定判据的离线步态规划算法和在线步态调整及控制算法及其实验应用进行了分析和比较。

仿人机器人作为一个多自由度变拓扑的混杂系统,其运动规划的内容非常复杂。目前关于仿人机器人的运动规划研究基本上都是从路径规划和步态规划两个内容上独立进行的:路径规划中考虑步态规划的约束,而步态规划只是将路径规划结果作为规划输入。这种方法虽然能够获得仿人机器人的运动规划结果并在实验上有不错的表现,但是从理论分析上不能保证给出最优的规划结果,这就要求建立系统化的仿人机器人运动规划评价体系。仿人机器人的运动规划研究的进一步发展对非结构化环境建模、智能搜索、复杂动力学系统建模以及智能控制等多个基础理论领域提出了新的问题和挑战。

参考文献

- [1] Kuffner J J, Nishiwaki K, Kagami S, et al. Motion planning for humanoid robots. *Transactions in Advanced Robotics*, 2005, 15: 365-374
- [2] Chestnutt J, Kuffner J J, Nishiwaki K, et al. Planning biped navigation strategies in complex environments. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Humanoid Robotics*, Munich, Germany, 2003. 322-329
- [3] Latombe J C. *Robot motion planning*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [4] 付成龙,陈昱. 双足机器人稳定性与控制策略研究进展. *高技术通讯*, 2006, 16(3): 319-324
- [5] 付成龙. 平面双足机器人动态步行的截面映射稳定性判据与应用. [博士学位论文]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2007

- [6] Jean F. Complexity of nonholonomic motion planning. *International Journal of Control*, 2001, 74(8): 776-782
- [7] La Valle S M. Planning algorithms. Chicago: University of Illinois, 2004
- [8] Goldberg K. Completeness in robot motion planning. In: 1st Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, 1994. 120-129
- [9] Kuffner J J, Nishiwaki K, Kagami K, et al. Online footstep planning for humanoid robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003. 324-332
- [10] Kuffner J J, Nishiwaki K, Kagami K, et al. Footstep planning among obstacles for biped robots. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. 500-505
- [11] Chestnutt J, Lau M, Cheung G, et al. Footstep planning for the Honda Asimo humanoid. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. 631-636
- [12] Zhang H, Kumar V, Ostrowski Jim. Motion planning with uncertainty. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Leuven. Belgium, 1998. 638-643
- [13] Bonet B, Geffner H. Planning as heuristic search. *Artificial Intelligence*, 2001, 129(1-2): 5-33
- [14] Ayaz Y, Munawar K, Malik M B, et al. Human-like approach to footstep planning among obstacles for humanoid robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct 2006. 129-136
- [15] Ayaz Y. Autonomous footstep planning for humanoid robots: [Masters Thesis]. Pakistan: National University of Sciences and Technology, 2005
- [16] Philipp M, Chestnutt J, Chuffer J, et al. Vision-guided humanoid footstep planning for dynamic environments. In: Proceedings of IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005. 13-18
- [17] 李秀明. 复杂环境中移动机器人滚动规划策略与实现:[博士学位论文]. 上海:上海交通大学自动化系, 1998
- [18] Li T Y, Chen P F, Huang P Z. Motion planning for humanoid walking in a layered environment. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sep 2003. 3421-3427
- [19] Sabe K, Fukuchi M, Gutmann J S, et al. Obstacle avoidance and path planning for humanoid robots using stereo vision. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. 592-597
- [20] Vukobratovic M, Borova, Surdilovic D. Zero-moment point - proper interpretation and new application. In: Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2001. 237-244
- [21] Jong H P, Yong K R. ZMP trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots. In: Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1998. 90-95
- [22] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17:280-289
- [23] Kajita S, Yamaura T, Kobashi A. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on Automation*, 1992, 8(4): 84-101
- [24] Chevallereau C, Austin Y. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*, 2001, 19: 557-569
- [25] 刘莉,汪劲松,陈恳等. THBP-I 拟人机器人研究进展. 机器人, 2002, 24(3):262-267
- [26] Xu K, Chen K, Wang J S, et al. A new method of gait generation for a biped walking robot. In: Proceedings of Second IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tokyo, Japan, Nov 2001
- [27] 徐凯,陈恳,刘莉等. 基于主支撑腿运动优化的仿人机器人快速步态规划算法. 机器人, 2005, 27(3):203-209
- [28] Fu C L, Shuai M, Xu K, et al. Planning and control for THBP-I humanoid robot. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, June 2006. 1066-1071
- [29] Pratt J. Virtual model control of a biped walking robot: [Doctoral Dissertation]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995
- [30] Jong H P. Fuzzy-logic zero-moment-point trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots. *Journal of Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 134 (1): 189-203
- [31] Salafian A W, Zheng Y F. Gait synthesis for a biped robot climbing sloping surfaces using neural networks Part II: Dynamic Learning. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1992. 2601-2606
- [32] 谢涛,徐建峰,李霞. 神经网络及误差补偿在 HIT-III 双足机器人步态规划中的应用. 中国机械工程, 2003, 14 (2):131-134
- [33] Holland J J. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Cambridge, MA: MIT Press, 1992
- [34] 柯显信,龚振邦,吴家麒. 基于遗传算法的双足机器人上楼梯的步态规划. 应用科学学报, 2002, 20(4): 341-345

- [35] Cheng M Y, Lin C S. Genetic algorithm for control design of biped locomotion. *Journal of Robotic System*, 1997, 14(5): 365-373
- [36] Capi G, Nasu Y, Barolli L, et al. Application of genetic algorithms for biped robot gait synthesis optimization during walking and going up-stairs. *Advanced Robotics*, 2001, 15(6): 675-694
- [37] 马培荪,曹曦,赵群飞. 两足机器人步态综合研究进展. *西南交通大学学报*, 2006, 41(4): 407-414
- [38] Espiau B, Sardain P. The biped robot BIP2000. In: Proceedings of International Conference on Advanced Robotics, 2000, 971-976
- [39] Matsuoka K. Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators. *Biol Cybern*, 1987, 413(56): 345-353
- [40] Hamid B. Biped dynamic walking using reinforcement learning. University of New Hampshire, 1996
- [41] Kazuo H, Masato H, Haikawa Y, et al. The development of Honda humanoid robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998, 1321-1326
- [42] 赵建东. 仿人机器人行走误差自调整模糊控制研究: [博士学位论文]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2004
- [43] Sugihara T, Nakamura Y. Contact phase invariant control for humanoid robot based on variable impendent inverted pendulum model. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003. 1: 51- 56
- [44] Jong H P, Hoam C. Impedance control and modulation for stable footing in locomotion of biped robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999. 1786-1791
- [45] Napoleon, Nakaura S, Sampei M. Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002. 2437-2442
- [46] Löffler K, Pfeiffer F. Sensors and control concept of walking "Johnnie". *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(3-4): 229-239
- [47] Huang Q, Nakamura Y, Inamura T. Humanoid walk with feed forward dynamic pattern and feedback sensory reflection. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001. 4220-4225
- [48] Li Q H, Takarishi A, Kato I. A biped walking robot having a ZMP measurement system using universal force-moment sensors. In: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1991. 1568-1573
- [49] Tawara T, Furuta T, Okumura, et al. Generalized ZMP compensation—whole-body behaviors for humanoid robots. In: Proceeding of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2001. 415-420
- [50] 胡凌云. 双足机器人步态优化与学习算法的研究: [博士学位论文]. 北京:清华大学计算机科学与技术系, 2006

Advances in research on motion planning for humanoid robots

Xia Zeyang, Chen Ken, Xiong Jing, Fu Chenglong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

The paper surveys research advances in motion planning for humanoid robots, which has been a focus of robotics research in recent years. Features of motion planning for humanoid robots are discussed. Two aspects of humanoid motion planning, path planning and gait planning, are analyzed. Two path planning strategies, the game theory based footstep planning and the sensor based path replanning, are introduced. Five algorithms for offline gait planning, namely geometric constraint method, fuzzy logic method, neural network method, hereditary algorithm method and natural gait method, and three algorithms for online gesture modification, namely dynamic model based method, inverted pendulum model based method and non-model based method, are introduced. Finally the assessment of motion planning for humanoid robots is discussed. Above analysis and estimation aim to provide a systematical overview on motion planning for humanoid robots.

Key words: biped walking, motion planning, path planning, footstep planning, game theory, gait planning