

Research on Key Technologies of Humanoid Robot

Fenghua Wu, Liande Li, Hao Wang, Yueyong Wang, Jiao Jiang, Si Chen

Shenyang City University, Shenyang Liaoning
Email: 80660614@qq.com

Received: Jul. 27th, 2017; accepted: Aug. 8th, 2017; published: Aug. 16th, 2017

Abstract

Robot is the application of multidisciplinary and technical combination in recent years with the rapid development of artificial intelligence. Humanoid robot becomes one of the hotspots of research because of its difficulty such as the limitation of cognition on environment and itself, the large number of DOFs and the under-actuation. So there is still a long distance from its theoretical research to practical application. In this paper some key technologies about humanoid robot are presented including simultaneous localization and mapping (SLAM), optimal design and simulation, footprint planning and modeling, stable control and application, object recognition and tacking. Both existing achievements and future trends are discussed to provide reference for further investigation.

Keywords

Humanoid Robot, SLAM, Optimal Design, Footprint Planning, Stable Control, Object Recognition

仿人机器人关键技术研究

吴峰华, 李连德, 王昊, 王悦勇, 姜娇, 陈思

沈阳城市学院, 辽宁 沈阳
Email: 80660614@qq.com

收稿日期: 2017年7月27日; 录用日期: 2017年8月8日; 发布日期: 2017年8月16日

摘要

机器人是近年来随着人工智能的进步而得以迅速发展的多学科和技术相交叉结合的应用领域, 仿人机器人是其中技术含量最高的研究热点之一。仿人机器人由于对外界环境和自身状态的认知限制、其自由度

数量多、欠驱动等特点,其理论研究和实验室测试与实际应用之间的距离还相差很远。本文介绍了仿人机器人同时定位与地图构建(SLAM)、优化设计与仿真、足迹规划与建模、稳定控制与应用、目标识别与追踪等关键技术的发展现状以及未来展望,为仿人机器人的进一步研究提供参考依据。

关键词

仿人机器人,同时定位与地图构建,优化设计,足迹规划,稳定控制,目标识别

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

仿人机器人是国际上机器人领域研究的长期热点,其发展水平代表了目前机器人学界的尖端技术和探索前沿[1]。目前仿人机器人的总体情况是种类繁多、研究目标各异、大都仅用于研究与宣传。虽然仿人机器人研究团队众多且不乏先进成果,但是研究水平极高且不断推陈出新的关节驱动机器人在应用方面仍主要停留在实验室环境与科技教育领域内。伴随相关技术领域的不断突破,仿人机器人在机械性能、运动能力、环境感知、智能决策等各个方面都取得了长足的进步,但大都处于实验室研究状态,距离普遍性质的实际应用还有比较远的距离。本文从机器人同时定位与地图构建(SLAM)、仿人机器人优化设计与仿真、仿人机器人足迹规划与建模、仿人机器人稳定控制与应用、仿人机器人目标识别与追踪等几个方面论述仿人机器人研究进展与未来展望。

2. 仿人机器人关键技术研究现状

2.1. 机器人同时定位与地图构建(SLAM)

实现移动机器人的完全自治从系统框架上要解决两方面的问题:其一,完成对自身位置与姿态的辨识;其二,侦测并建模周围环境。这两方面可以概括为“定位”与“地图构建”[2]。因为“定位”和“地图构建”间的相关性,在一些研究者的努力下形成了同时定位与地图构建(Simultaneous localization and mapping, SLAM)领域[3] [4] [5] [6] [7]。该领域的主要研究内容是在对机器人和其作业环境状态都不具备先验信息的前提下,使机器人在运动过程中通过合理的表征手段建模并描述周围环境并同时确定自身的方位[8] [9]。

针对移动机器人 SLAM 问题的研究主要包括数据关联问题[10] [11]、闭环问题[12] [13]、一致性问题[14] [15]、环境特征的提取与表示[16] [17]以及目标检测[18] [19]等。卡尔曼滤波器(KF)及扩展卡尔曼滤波器(EKF)、粒子滤波器(PF)是目前移动机器人导航领域中较为经典的 SLAM 问题解决方法。后来为了降低计算复杂度和更好地处理数据关联问题, Doucet 等人提出了著名的 Rao-Blackwellized Particle Filter (RBPF)算法[20]。在此基础上美国卡耐基梅隆大学的 Monte Merlo 等人提出了基于 RBPF 的 Fast-SLAM 算法并成功应用于实际机器人[21] [22]。

Sebastian Pütz 等[23]提出了基于点云技术的移动机器人三维网格曲面导航系统实现 SLAM,并提出用于识别障碍物的判据。包括目标距离、场地高差、场地平整度等。但这些判据主要针对轮式机器人,例如场地平整度判据考虑机器人邻域内各个方向的曲面角度。大于某一阈值即判定为障碍物。而对于仿

人机器人来说,有些不平坦的障碍是可以跨越的,甚至可以在障碍物上行走。因此可以将该方法用于仿人机器人,利用机器人运动学模型求解自身结构参数结合场地曲面形状构造步行机器人场地平整度以更合理地规划仿人机器人的足迹。

2.2. 仿人机器人优化设计与仿真

仿人机器人是一个多关节且具有冗余自由度的复杂系统,其本体结构的合理设计对于仿人机器人完成预期任务至关重要[24],如何最优化仿人机器人的本体结构,是需要持续研究的课题。此外,仿人机器人本体的材料工艺关系着机器人承重的大小与能耗的多少,进而影响到仿人机器人的运动范围和作业能力,是仿人机器人的一个重要研究领域[25]。在研制仿人机器人的过程中,应该考虑采用先进材料,进一步减小本体重量以及提高零件制造精度和装配精度。关于驱动方案的选择,目前普遍采用电机驱动,经减速器减速后驱动机器人关节[26],也有一些研究者在研制人造肌肉[27],通过空气气囊的充气和排气来带动关节运动。

考虑到不同用途机器人对不同机器人结构方案的开放性要求,大都运用模块化设计思想[28],对机器人结构进行模块化设计。机器人模块可以很方便的用到其它类型的仿人机器人上,方便机器人的安装和维护,提高机器人部件的互换性。人类运动是不需要消耗很多能量的,因此按照人体运动学原理来设计机器人结构,以减少机器人能量消耗,延长机器人一次充电持续作业的时间,无疑是重要的研究课题。

由于目前类人机器人的研究开发耗资巨大,很难在应用上推广。随着机器人研究的深入和发展,仿真系统和虚拟样机技术作为机器人设计和研究的工具,将会发挥越来越重要的作用。在类人机器人研究中,通常应用 OpenGL 的图形仿真功能,并结合 VC 编程环境,建立具有人机交互功能的机器人仿真系统,进行机器人仿真[29]。或者利用 PRO /EN GINEER 强大功能,以及它和 ADAMS 等仿真软件的接口来进行机械和控制一体化虚拟样机设计[30]。利用仿真系统和虚拟样机技术,不但可以缩短设计周期,降低设计成本,而且容易发现设计中的缺陷和不足,尽早地采取补救措施,还能方便研究人员对新理论、新方法进行验证。

2.3. 仿人机器人足迹规划与建模

智能移动机器人路径规划问题一直是机器人研究的核心内容之一[31]。并在传统轮式移动机器人领域已经得到了较为深入的研究和应用[32]。阿尔及利亚胡阿里·布迈丁科技大学机器人产品研究中心采用基因算法与自适应模糊控制实现了室内环境下两轮机器人优化路径规划与验证[33]。基因算法用于以避免碰撞为目标的离线路径优化,并采用三次 Hermite 多项式插补平滑;自适应模糊控制用于路径追踪,采用卡尔曼滤波器对多传感器信息融合以获取机器人实时位置与角度。该方法采用 RobuTER 机器人进行了验证。法国巴黎大学智能机器人学院[34]融合了基于暂态的 RRT 算法和基于动态域的 RRT 算法以及代表机器人和地面之间相互作用的准静态测量变量形成一种新的 RRT 算法对机器人在崎岖路面的移动进行路径规划。稳定性的计算是将机器人的位姿采用线性互补问题(LCP)描述成接触现象,采用收敛速度较快的 Lemke 法求解。得到了比其他类似 RRT 算法性能更优越的结果。该方法要求机器人在崎岖地面移动速度慢,并保持平稳。德国多特蒙德理工大学控制理论与系统工程学院[35]提出了新的拓扑结构实现机器人在线路径规划与优化。首先通过最小化目标函数进行全局优化,形成初始路径。目标函数主要变量是路径长度、消耗时间或控制能耗。移动机器人每一帧动作特征以及与障碍物之间的距离作为路径规划的约束条件。但是目标函数往往为非凸函数,障碍物的存在使得优化过程非常容易陷入显著的局部极小值。因此该研究团队又提出了拓扑结构不同的其他优化候选路径集,可供从一系列路径中选出一条全局最优路径。

但是由于仿人机器人具有高自由度的本体结构和复杂的运动学及动力学模型，因此直接将轮式移动机器人的路径规划方法应用于仿人机器人并不能体现出仿人机器人对于复杂非结构化地形的适应能力和运动的灵活性[36]。例如：仿人机器人能够跨越一定高度的障碍物，甚至在某些障碍物上步行。因此，对于相同的场景环境，步行机器人与轮式机器人的合理路径规划不尽相同。

足迹规划是一种基于全局环境信息的、用于仿人机器人的路径规划方法[32] [37]。足迹规划方法的概念模型最早由 Kuffner 等提出[38]。仿人机器人足迹规划的核心思想是：在一组“支撑足迹—落地足迹”序列(即足迹转换模型)的基础上，构造以初始位姿为根节点的搜索树；通过环境地图和机器人模型及位姿信息完成碰撞检测；然后构建节点成本函数，使用启发式搜索(heuristic search)算法规划出从原始足迹位置到目标区域的一个离散足迹系列；最后以预规划好的姿态转换轨迹来实现机器人在上述足迹序列上的姿态转换，完成机器人的运动规划任务[39]。

2.4. 仿人机器人稳定控制与应用

稳定性是双足机器人跑步运动的重要研究课题。研究者针对不同的对象和目的，使用不同的方法判定机器人跑步运动的稳定性，然后将这些方法应用到控制策略中，以实现稳定的跑步运动控制。从目前的研究来看，这些方法可分为分段稳定判定方法(Piecewise Stability Criterion, PSC)和周期轨道稳定判定方法(Period-Orbit Stability Criterion, POSC)。分段稳定性判定方法将跑步运动周期分为支撑期和飞行期两个阶段，通过分别判定各运动阶段的稳定性来判定整个跑步过程的稳定性；周期轨道稳定性判别方法则将整个步态周期视为整体，从有限状态机(Finite State Machine, FSM)或状态流形(State Manifest, SM)的角度，对极限环(Limit Cycle, LC)的稳定性进行分析和判定。

分段稳定性判定常用的有 ZMP 判据、质心角动量判据等。ZMP 是指脚掌与地面接触面上的一点，地面反作用力在此点的等效力矩的水平分量为零[40]。ZMP 判据最初是针对双足步行提出的，但一些研究人员将其应用到双足跑步领域，主要用于判断采用平足(Flat Foot)的仿人机器人的跑步稳定性[41]。Kajita S.等人[42]将机器人简化为无质量弹簧腿的倒立摆，在支撑阶段遵守 ZMP 稳定准则，在腾空阶段则根据弹道模型得到飞行轨迹。2003 年，日本索尼公司发布了机器人 QRIO 的跑步录像，随后在 2004 年底，本田公司发布了 ASIMO 的跑步录像。出于商业机密的考虑，这两家公司均未公布技术细节，但从录像可以明显看出，这两款机器人都采用了平足，并且在跑步过程中脚底面与地面始终保持平行，由此可推断出其仍然遵守 ZMP 稳定性准则[41]。北京理工大学的黄强和李朝晖等人[43]也将跑步过程分为支撑阶段和飞行阶段，在支撑阶段限制机器人足与地面完全接触，遵守 ZMP 稳定准则；而在飞行阶段时，则遵循质心角动量判据，将机器人质心的偏转约束在较小的范围内，防止机器人在空中过度翻转而失稳。

如果机器人采用点状足(Point Foot)或弧形足(Arc Foot)，其着地时与地面接触的形状不是面，而是点或线。由于不存在支撑平面，ZMP 稳定判据不再适用。在这种情况下双足跑步是一种周期行为，即系统的状态变量每隔一个跑步周期重复一次，在状态空间中表现为周期轨道[1]。庞加莱回归映射(Poincare Return Map, PRM)是分析周期轨道稳定性的有力工具，它将周期轨道的稳定性转化为平衡点的稳定性来进行分析。对跑步而言，其稳定步态在相空间中表现为稳定的极限环，如果在极限环附近对状态量引入较小的扰动，并计算敏感矩阵的特征值，则所有的特征值都将在单位圆内。J. W. Grizzle 等人[40]用扩展的庞加莱映射方法，从混杂系统的角度分析了点状足双腿机器人的动态步行问题，并在 RABBIT 上实现了动态跑步。由于双足机器人动力学模型的复杂性，通常无法得到庞加莱映射的解析形式，只能借助于数值方法计算庞加莱回归映射，因此目前这种方法仅适用于欠驱动(点状足)的平面双足机器人。

此外，斯坦福大学的 Muhammad E.等人[44]提出平衡跑步指标(Equilibrium Running Index, ERI)的概念来衡量双足机器人跑步过程中的稳定性，但是该指标仅适用于伸缩腿型平面双足机器人，而对于旋转型

膝关节双足机器人未必适用。国防科技大学的绳涛[45]从 Lyapunov 稳定性理论出发提出失衡度(Lost Balance Degree, LBD)的概念作为欠驱动双足步行的稳定判据。清华大学的付成龙[46]在分析 ZMP 稳定判据和庞加莱回归映射判据各自不足的基础上,提出截面映射(Section-Map)双足步行稳定性理论。后面这两种新的步行稳定性理论可以进一步扩展并应用到双足机器人跑步运动稳定性判定上来。

2.5. 仿人机器人目标识别与追踪

最早的机器人目标识别研究起始于上世纪六十年代的几何模型识别方法[47]。后来经过改进出现了 SCERPO 物体识别系统[48]、三维目标识别方法[49]、基于几何特征散列法的目标识别方法[50]、构建透视投影变换不变量的平面目标识别方法[51]。由于基于几何特征方法存在缺陷,因此,基于几何特征不变量的物体识别方法近年来没有新的更大发展。在上世纪九十年代,基于全局表象(Apppearance)的物体识别方法得到了广泛应用。其基本原理是把像素灰度值连接成特征向量。由于原始图像数据构成的特征向量维数太高,所以人们提出了基于各种准则的子空间降维方法,如 PCA (Principal Component Analysis, 主成分分析) [52]、ICA (Independent Component Analysis, 独立成分分析)和 LDA (Linear Discriminant Analysis, 线性判别分析)等。

基于全局表象的方法,对光照变化、遮挡和非线性弹性形变比较敏感,因此基于局部特征的方法得到了更加广泛的研究和应用,这种方法被证明更加适合于目标识别,它对光照、遮挡、形变等类内变化更加鲁棒[53]。按照是否考虑图像中各局部的空间联系,基于局部特征的目标识别方法可大致分为两类:基于结构与部件(parts and structure)模型的识别方法[54]和基于“特征袋”模型的识别方法。基于结构与部件模型的识别方法基本思想是将目标模型转化为具有几何联系的若干组件的集合。如何确定各目标组件间的内在联系,是结构和部件模型的核心问题。这些联系模型往往需要很高的计算量,这成为制约其应用的瓶颈之一。

近来,“特征袋”模型在文档分析和信息检索的应用中取得了巨大成功,受此启发,大量学者将这一模型用于目标识别。由于该模型的简单性和在现实图像识别中的高性能,得到了广泛关注。其基本思想是将图像描述成一组无序局部特征的集合。先对图像提取若干局部特征,然后将这些特征映射到一个码本,该码本通常由某些聚类方法生成。最后将图像表示成码字出现频率的直方图。由于“特征袋”模型能够结合各种兴趣点检测[55] [56]和局部图像块描述方法[53] [55],对图像进行有效的表示,从而获得了较好的识别效果,因此,该方法成为当前目标识别的主流方法。

目标跟踪是为了获取目标的位置、运动轨迹等信息,这些信息为目标行为识别与分析等高层视觉提供可靠的依据。目前,各国研究者在该方面展开了深入的研究,但依然存在很多难以解决的问题,例如针对目标可能存在的尺寸、光照、遮挡、非刚性运动等方面的变化,目前还没有一个通用的解决方案。目标跟踪研究一开始集中在跟踪滤波领域,利用 Bayes 滤波理论来解决跟踪预测问题。可用位置坐标、速度、尺度以及旋转角度等构成表征目标信息的状态量,用状态转移模型来实现状态预测,用状态观测模型来对状态置信度进行评价,对预测值做出修正。在线性模型、噪声服从高斯分布时,通常由 Kalman 滤波给出 Bayes 滤波的最优解;在非线性情况下,可用扩展 Kalman (EKF)、无迹 Kalman (UKF)等得到次优解;对于更复杂的情况,则通过基于 Monte Carlo 原理[57] [58]的粒子滤波(Particle Filter, PF)算法取得良好的效果,PF 通过一组随机加权样本近似 Bayes 滤波,是解决非线性非高斯模型下状态估计问题的有力工具。

模板匹配是一种经典的目标识别方法。基本思想是先确定目标模板,然后度量目标模板与备选目标位置的相似度,通过最优化的评价函数,判断取得最大值的备选位置,作为目标在当前图像帧中的最优估计位置。模板一般具有个体独特性,可实现目标与其他物体或环境的区分,但存在着适应能力差、匹

配性能不高等缺点。有些算法则采取局部性目标模板,如 Lucas-Kanade 光流法[59]是一种基于局部模板匹配的识别方法,根据匹配结果获得相邻帧图像目标位置的偏移,具有较好的抗光照和遮挡性能,但依然对目标的姿态变化非常敏感。

模板匹配因为匹配性能不高,计算量大而限制了它的应用。相比之下,利用目标的视觉特征匹配具有更大的优势。提取良好可分性的特征,可以更好地实现对目标与背景的精确分割,这是实现鲁棒跟踪前提。研究者将统计分类等算法应用于目标跟踪领域,取得了不错的效果。一般情况下,这类算法可通过离线或在线的方式学习产生特定的目标分类器,将问题简化为目标和背景的分类问题,达到快速而且理想的检测或跟踪效果。文献[60]同时强调目标与背景的重要性,利用具有良好可分性的像素颜色特征进行跟踪。Avidan 通过支持向量机离线学习目标与背景特征,称为 SVM-Tracking [61]算法。他还提出基于像素特征的 Ensemble Tracking [62] (集成学习)方法,通过 Adaboost 将弱分类器组合成强分类器,利用强分类器计算下一帧置信图(Confidence Map),通过 Meanshift 算法来找到目标位置。在实验中,特征向量由 11 维组成(包括 8 维局部 HOG, 3 维 R,G,B 值)。Grabner [63] [64] [65]等提出了基于在线 Adaboost 的跟踪算法。

此外,根据特征提取的尺度不同,还分为基于点的跟踪[44]、局部线索的跟踪[66] [43]、整体区域的跟踪;根据跟踪效果以及场景的不同,还可分为自适应目标跟踪[67]与慢自适应目标跟踪,短时目标跟踪和长期目标跟踪等。目标跟踪虽然已经有部分成果进入实用化阶段,但仍面临巨大的挑战。受跟踪目标多样性,跟踪环境复杂性以及跟踪需求多样性的影响,跟踪算法的差异很大。

3. 结语

本文介绍了仿人机器人同时定位与地图构建(SLAM)、优化设计与仿真、足迹规划与建模、稳定控制与应用、目标识别与追踪等关键技术的发展现状以及未来展望,为仿人机器人的进一步研究提供参考依据。

轮式机器人 SLAM 技术已经具有较成熟的发展和應用,可以加以借鉴,用于解决仿人机器人对环境的识别,尤其是识别障碍物,利用机器人运动学模型求解自身结构参数结合场地曲面形状构造步行机器人场地平整度以更合理地规划仿人机器人的足迹。

仿人机器人本体结构设计是对于机器人的整体技术具有深远影响的技术。可以建立具有人机交互功能的机器人仿真系统,进行机器人仿真。再利用仿真软件接口进行机械和控制一体化虚拟样机设计,不但可以缩短设计周期,降低设计成本,而且容易发现设计中的缺陷和不足,尽早采取补救措施。并且方便研究人员对新理论、新方法进行验证。

仿人机器人的足迹规划不同于其他类别移动机器人的路径规划。可以采取的方法是先规划出从原始足迹位置到目标区域的一个离散足迹系列;寻优后以预规划好的姿态转换轨迹来实现机器人在上述足迹序列上的姿态转换,完成机器人的运动规划任务。

仿人机器人步行或跑步的稳定性是机器人正常运行的前提。ZMP 稳定判据和庞加莱回归映射判据是比较经典的方法,但都存在缺陷,近年改进方法很多,但受到使用范围和条件的限制。这方面的研究同样是持续课题。

仿人机器人目标识别与跟踪在很大程度上取决于目标本身的特征。近年来各种方法层出不穷。其中“特征袋”模型应用较为广泛。各领域研究人员仍在不断推出新的成果。

参考文献 (References)

- [1] 吴伟国. 面向作业与人工智能的仿人机器人研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015(7): 1-19.

- [2] 弋英民, 刘丁. 动态环境下基于路径规划的机器人同步定位与地图构建[J]. 机器人, 2010(1): 83-90.
- [3] Smith, R. and Cheeseman, P. (1986) On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty. *The International Journal of Robotics Research*, **5**, 56-68. <https://doi.org/10.1177/027836498600500404>
- [4] Smith, R., Self, M. and Cheeseman, P. (1988) A Stochastic Map for Uncertain Spatial Relationships. *4th International Symposium on Robotics Research*, Santa Clara, 467-474.
- [5] Smith, R., Self, M. and Cheeseman, P. (1990) Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics. *Autonomous Robot Vehicles*, **1**, 167-193.
- [6] Durrant-Whyte, H.F. (1988) Uncertain Geometry in Robotics. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **4**, 23-31. <https://doi.org/10.1109/56.768>
- [7] Crowley, J.L. (1989) World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, **2**, 674-681.
- [8] Durrant-Whyte, H. and Bailey, T. (2006) Simultaneous Localization and Mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **13**, 99-110.
- [9] Eustice, R.M. (2005) Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. <https://doi.org/10.1575/1912/1414>
- [10] Kaess, M. and Dellaert, F. (2009) Covariance Recovery from a Square Root Information Matrix for Data Association. *Robotics and Autonomous Systems*, **57**, 1198-1210.
- [11] Booij, O., Zivkovic, Z. and Kröse, B. (2009) Efficient Data Association for View Based SLAM Using Connected Dominating Sets. *Robotics and Autonomous Systems*, **57**, 1225-1234.
- [12] Williams, B., Cummins, M., Neira, J., et al. (2009) A Comparison of Loop Closing Techniques in Monocular SLAM. *Robotics and Autonomous Systems*, **57**, 1188-1197.
- [13] Jauregi, E., Irigoien, I., Sierra, B., et al. (2011) Loop-Closing: A Typicality Approach. *Robotics and Autonomous Systems*, **59**, 218-227.
- [14] Li, H.P., Xu, D.M., Zhang, F.B., et al. (2009) Consistency Analysis of EKF-Based SLAM by Measurement Noise and Observation Times. *Acta Automatica Sinica*, **35**, 1177-1184.
- [15] Castellanos, J.A., Martinez-Cantin, R., Tardós, J.D., et al. (2007) Robocentric Map Joining: Improving the Consistency of EKF-SLAM. *Robotics and Autonomous Systems*, **55**, 21-29.
- [16] Movafaghpour, M.A. and Masehian, E. (2007) Poly Line Map Extraction in Sensor-Based Mobile Robot Navigation Using a Consecutive Clustering Algorithm. *Robotics and Autonomous Systems*, **60**, 1078-1092.
- [17] Lee, J. and Ko, H. (2008) Gradient-Based Local Affine Invariant Feature Extraction for Mobile Robot Localization in Indoor Environments. *Pattern Recognition Letters*, **29**, 1934-1940.
- [18] Bakar, M.N.A. and Saad, A.R.M. (2012) A Monocular Vision-Based Specific Person Detection System for Mobile Robot Applications. *Procedia Engineering*, **41**, 22-31.
- [19] Lee, D., Kim, G., Kim, D., et al. (2012) Vision-Based Object Detection and Tracking for Autonomous Navigation of Underwater Robots. *Ocean Engineering*, **48**, 59-68.
- [20] Doucet, A., Cz de Freitas, J.F., Murphy, K., et al. (2000) Rao-Blackwellized Particle Filtering for Dynamic Bayesian Networks. In: *Proceedings of the Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, 176-183.
- [21] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., et al. (2002) FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem. In: *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, American Association for Artificial Intelligence Menlo Park, Edmonton, 593-598.
- [22] Hahnel, D., Brugard, W., Fox, D., et al. (2003) An Efficient FastSLAM Algorithm for Generating Maps of Large-Scale Cyclic Environments from Raw Laser Range Measurements. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, 27-30 October 2003, **1**, 206-211.
- [23] Pütz, S., Wiemann, T., Sprickerhof, J. and Hertzberg, J. (2016) 3D Navigation Mesh Generation for Path Planning in Uneven Terrain. *IFAC-Papers on Line* 49-15, 212-217.
- [24] 林海峰, 王姮, 张华. 剥离去污机器人作业方式研究与仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2014(6): 226-230.
- [25] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 张自强. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015(13): 27-44.
- [26] 张雷, 蒋刚, 戴强, 唐开强. 一种具有人造皮肤的仿人表情机器人结构设计[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 206-210.
- [27] 刘昱, 王涛, 范伟, 王渝, 黄清珊. 气动人工肌肉驱动仿人肩关节机器人的设计及力学性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2015(6): 607-611.

- [28] 周冬冬, 王国栋, 肖聚亮, 洪鹰. 新型模块化可重构机器人设计与运动学分析[J]. 工程设计学报, 2016(1): 74-81.
- [29] 陈赛旋, 沈惠平, 孙少明, 曹凯, 陈兵. 仿人机器人平地行走步态规划与仿真[J]. 机械设计, 2014(12): 31-36.
- [30] 肖乐, 殷晨波, 谢从华. 仿人机器人在复杂环境中的行走研究[J]. 计算机仿真, 2015(4): 281-285.
- [31] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010(7): 961-967.
- [32] GimId, M. (1987) Interactive Design of 3D Computer-Animatod Legged Animal Motion. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **7**, 39-51. <https://doi.org/10.1109/MCG.1987.276895>
- [33] Bakdi, A., Hentout, A., Boutami, H., Maoudj, A., Hachour, O. and Bouzoui, B. (2017) Optimal Path Planning and Execution for Mobile Robots Using Genetic Algorithm and Adaptive Fuzzy-Logic Control. *Robotics and Autonomous Systems*, **89**, 95-109.
- [34] Jun, J.Y., Saut, J.P. and Benamar, F. (2016) Pose Estimation-Based Path Planning for a Tracked Mobile Robot Traversing Uneven Terrains. *Robotics and Autonomous Systems*, **75**, 325-339.
- [35] Rösmann, C., Hoffmann, F. and Bertram, T. (2017) Integrated Online Trajectory Planning and Optimization in Distinctive Topologies. *Robotics and Autonomous Systems*, **88**, 142-153.
- [36] 夏泽洋, 陈恳. 仿人机器人足迹规划建模及算法实现[J]. 机器人, 2008(3): 231-237.
- [37] Van de Panne, M. (1997) From Footprints to Animation. *Computer Graphics Forum*, **16**, 211-223. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00181>
- [38] Kuffner, J.J., Nishiwaki, K., Kagami, S., et al. (2005) Motion Planning for Humanoid Robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, **15**, 365-374.
- [39] Lim, M.S., Oh, S.R., Son, J., et al. (2000) Human-Like Real-Time Grasp Synthesis Method for Humanoid Robot Hands. *Robotics and Autonomous Systems*, **30**, 261-271.
- [40] Goswami, A. (1999) Postural Stability of Biped Robots and the Foot Rotation Indicator (FRI) Point. *The International Journal of Robotics Research*, **18**, 523-533. <https://doi.org/10.1177/02783649922066376>
- [41] 付成龙, 陈恳. 双足机器人稳定性与控制策略研究进展[J]. 高技术通讯, 2006, 16(3): 319-324.
- [42] Kajita, S., Nagasak, T., Yokoi, K., et al. (2002) Running Pattern Generation for a Humanoid Robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, 11-15 May 2002, 2755-2761. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013649>
- [43] Li, Z.H., Huang, Q., Li, K.J., et al. (2004) Stability Criterion and Pattern Planning for Humanoid Running. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 26 April-1 May 2004, 1059-1064.
- [44] Muhammad, E. and Kenneth, J. (2007) A Physical Model and Control Strategy for Biped Running. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, 10-14 April 2007, 3982-3988.
- [45] 绳涛. 欠驱动两足机器人控制策略及应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 1-2.
- [46] 付成龙. 平面双足机器人的截面映射稳定性判据与应用[D]. 北京: 清华大学, 2006: 1-2.
- [47] Roberts, L.G. (1965) Machine Perception of 3-D Solids. In: *Optical and Electro-Optical Information Processing*, 159-197.
- [48] Lowe, D.G. (1987) The Viewpoint Consistency Constraint. *International Journal of Computer Vision*, **1**, 57-72. <https://doi.org/10.1007/BF00128526>
- [49] Huttenlocher, D.P. and Ullman, S. (1987) Object Recognition Using Alignment. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, London, June 1987, 102-111.
- [50] Lamdan, Y., Schwartz, J.T. and Wolfson, H.J. (1988) Object Recognition by Affine Invariant Matching. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Ann Arbor, 5-9 June 1988, 335-344. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1988.196257>
- [51] Rothwell, C., Forsyth, D., Zisserman, A. and Mundy, J. (1993) Extracting Projective Structure from Single Perspective Views of 3D Point Sets. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, Berlin, 573-582. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1993.378159>
- [52] Murase, H. and Nayar, S.K. (1995) Visual Learning and Recognition of 3-d Objects from Appearance. *International Journal of Computer Vision*, **14**, 5-24. <https://doi.org/10.1007/BF01421486>
- [53] Mikolajczyk, K. and Schmid, C. (2005) A Performance Evaluation of Local Descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **27**, 1615-1630. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
- [54] Fischler, M. and Elschlager, R. (1973) The Representation and Matching of Pictorial Structures. *IEEE Transactions on Computers*, **22**, 67-92. <https://doi.org/10.1109/T-C.1973.223602>
- [55] Lowe, D.G. (2004) Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key Points. *International Journal of Computer*

- Vision*, **60**, 91-110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [56] Mikolajczyk, K. and Schmid, C. (2004) Scale and Affine Invariant Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision*, **1**, 63-86. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000027790.02288.f2>
- [57] Doucet, A., Godsill, S. and Andrieu, C. (2000) On Sequential Monte Carlo Sampling Methods for Bayesian Filtering. *Statist Computer*, **10**, 197-208. <https://doi.org/10.1023/A:1008935410038>
- [58] Kwon, J. and Lee, K.M. (2009) Tracking of a Non-Rigid Object via Patch-Based Dynamic Appearance Modeling and Adaptive Basin Hopping Monte Carlo Sampling. *IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*, Miami, 20-25 June 2009, 1208-1215.
- [59] Bouguet, J. (2000) Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm. Intel Corporation Microprocessor Research Labs Tech Rep.
- [60] Hua, C., Wu, H. and Chen, Q. (2006) A Pixel-Wise Object Tracking Algorithm with Target and Background Sample. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, Hong Kong, 20-24 August 2006, 739-742.
- [61] Avidan, S. (2004) Support Vector Tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **26**, 1064-1072. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2004.53>
- [62] Avidan, S. (2007) Ensemble Tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **29**, 261-271. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.35>
- [63] Grabner, H. and Bischof, H. (2006) On-Line Boosting and Vision. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 17-22 June 2006, 260-267. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.215>
- [64] Grabner, H., Bischof, H. and Grabner, M. (2006) Real-Time Tracking via On-line Boosting. *BMVC*, 47-56. <https://doi.org/10.5244/C.20.6>
- [65] Grabner, H., Leistner, C. and Bischof, H. (2008) Semi-Supervised On-Line Boosting for Robust Tracking. *Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision*, Marseille, 12-18 October 2008, 234-247. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88682-2_19
- [66] Adam, A., Rivlin, E. and Shimshoni, I. (2006) Robust Fragments-Based Tracking Using the Integral Histogram. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 17-22 June 2006, 798-805. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.256>
- [67] Nummiaro, K., Koller-Meier, E. and Gool, L.V. (2003) An Adaptive Color-Based Particle Filter. *Image & Vision Computing*, **21**, 99-110.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: airr@hanspub.org