

仿人机器人相似性运动研究进展*

柯文德^{1,2}, 彭志平¹, 蔡则苏², 陈珂¹

(1. 广东石油化工学院 计算机科学与技术系, 广东 茂名 525000; 2. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对仿人机器人模仿人体运动问题,从运动轨迹角度比较了基于运动解析方程方法与基于人体运动相似性方法的特点,阐述了相似性运动系统基本结构,分析了图像捕捉与处理、相似性特征处理、相似性运动约束与优化等模块功能,阐述了相似性运动中的人体运动捕获与处理、运动关节解算、运动模型简化与重定向、关键姿势处理与相似度评价、关节空间位姿计算、动力学匹配约束等方面的研究现状,最后提出了研究展望。

关键词: 仿人机器人; 相似性; 捕获; 关键姿势; 约束

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2570-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.003

Research progress on similarity locomotion of humanoid robot

KE Wen-de^{1,2}, PENG Zhi-ping¹, CAI Ze-su², CHEN Ke¹

(1. Dept. of Computer Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming Guangdong 525000, China; 2. School of Computer Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aimed to the locomotion imitation problem of following human being on humanoid robot, this paper compared the method based on locomotion analytic equation to that one based on similarity human locomotion for designing the motion tracks of humanoid robot, which illustrated the basic structure of similarity locomotion system, the image capture and dealing, similarity feature dealing, locomotion constraint and optimization. It also described the research developments, including locomotion capturing and dealing, calculation of joints, locomotion simplified model and retargeting, key pose dealing and evaluation of similarity degree, space pose calculation of joint, dynamics march. Finally it showed the forecast and drew the conclusion.

Key words: humanoid robot; similarity; capture; key pose; constraint

0 引言

仿人机器人动作规划描述了实现某动作所需关节自由度的运动轨迹,以及实现该轨迹所需输入力矩变化,在此之上形成适应特定环境及要求的运动规划,并最终上升为任务级别的决策规划^[1]。可见,构建运动轨迹是仿人机器人动作设计的基础。传统构建运动轨迹的方法是通过求解运动解析方程获取机器人关节运动轨迹而实现的,以双足动作设计为例,Kanako等人^[2]分析了仿人行走姿势与双足运动鲁棒性的特点,结合单足尖支撑、腰部高度更改、膝关节延展生成高度模仿自然人摆动腿动作的仿人机器人强鲁棒性行走;Yao等人^[3]基于差分方程约束的非完整模型规划仿人机器人双足步态,通过可绕轴、可扩展、可收缩的重复不连续约束生成行走轨迹数据;伊强等人^[4]采用参数化步态优化方法,将复杂关节轨迹的规划问题转换为分段多项式系数组成的有限参数向量的优化问题,得到了快速和慢速两组光滑无振动的优化步态;Harada等人^[5]提出了无碰撞行走的两步规划法,由约束状态时间函数对每个行走片段施加参数化时间约束,并采用B-样条插值函

数对生成的无碰撞行走轨迹进行平滑处理等。

以上研究方法基于求解运动解析方程思想,其优点是易于满足机器人机械约束、运动学及动力学稳定性等条件,运动轨迹平滑性好,在设计得当时,能实现一定程度的低能量消耗。例如,Hu等人^[6]采用基于EDA_S_Q(spline-based estimation of distribution algorithm with Q-learning)方法优化得到低能耗行走步态;Tlalolini等人^[7]将单腿支撑期分为绕脚尖旋转和在摆动空间中自由运动两个子相,利用三阶多项式对关节轨迹进行描述,得到力矩最优的一组关节轨迹等。

但是由运动解析方程求解而获取的运动模式在步态柔顺性、行走速度、能量耗费等方面难以与人体自然步态相比,例如,仿人机器人Honda Asimo的上述指标在数值上与人类自然步态相比存在数量级差别,Cornell University通过控制机器人连杆以惯性方式自由摆动模仿人体自然行走过程,降低关节力矩,其能耗仅为Asimo的1/10,但步态综合性能仍与人体自然步态存在较大差别^[8];另外,该方法在设计复杂动作(如人类舞蹈、体育运动等全身动作)时难以建立并求解运动解析方程。

收稿日期: 2013-01-15; **修回日期:** 2013-03-22 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61075076,61272382);广东省自然科学基金资助项目(S2012010009963,8152500002000003);广东省高等学校科技创新项目(2012KJCX0077);广东高校石化故障诊断与信息化控制工程中心开放基金资助项目(512009)

作者简介: 柯文德(1976-),男,广东茂名,副教授,博士,主要研究方向为计算机系统结构、机器人、人工智能等(wendeke@163.com);彭志平(1969-),男,福建泉州人,教授,博士,主要研究方向为智能主体、机器人等;蔡则苏(1966-),男,江苏睢宁人,副教授,博士,主要研究方向为计算机软件理论、机器人、人工智能等;陈珂(1964-),男,黑龙江牡丹江人,副教授,硕士,主要研究方向为生物信息技术、机器人、人工智能等。

由于仿人机器人与人体具有较接近的肢体结构,为使其较好地模仿和复现人体自然柔顺的运动轨迹、适应复杂多变的外部环境并优化运动能量消耗,学者们提出了基于人体运动相似性的仿人机器人动作规划方法^[9],其基本思想是捕获特定场合下的人体离散或连续运动轨迹并应用在仿人机器人动作设计上。该方法已成为当前仿人机器人领域的研究热点之一。

1 相似性运动系统

仿人机器人相似性运动系统一般由图像捕捉与处理、相似性特征处理、相似性运动约束与优化三部分模块构成^[10, 11],如图1所示。

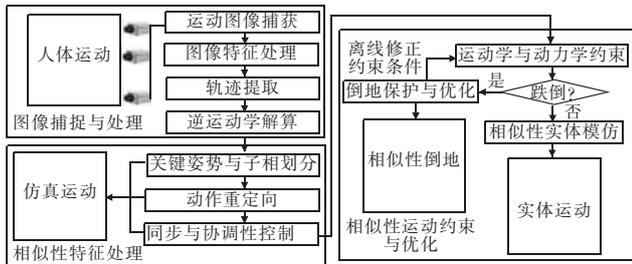


图1 相似性运动系统

图像捕捉与处理模块包括:(a)人体运动子模块,用于展示人体关节运动轨迹;(b)运动捕获子模块,采用高速光学摄像头获取人体连续运动的各关节移动轨迹并存储在图像数据库中;(c)图像特征处理模块,用于消除图像畸变与噪声;(d)轨迹提取子模块,从图像中提取各关节运动轨迹,生成各关节的时间运动序列;(e)逆运动学子模块,用于计算主要关节的平面位置,求出关节的角度、速度与加速度等参数。

相似性特征处理模块包括:(a)关键姿势与子相划分子模块,从运动轨迹中划分出关键姿势,确定相邻关键姿势为基本子相;(b)动作重定向子模块,将划分后的关键姿势与基本子相重定向到人-机简化模型上;(c)同步与协调性控制子模块,实现机器人各相关关节间同步运动与整体动作协调;(d)仿真模块,用于展示仿人机器人与人体运动相似的仿真实验效果,体现出相似性运动的转换程度。

相似性运动约束与优化模块包括:(a)运动学、动力学子模块,用于约束机器人运动以满足运动学与实际物理条件约束,计算运动能量消耗,并与相似性人体运动进行比较;(b)跌倒判断子模块,用于判断机器人运动过程是否失稳倒地;(c)倒地保护与优化子模块,对机器人倒地过程进行优化控制,以保护机器人硬件不受损坏;(d)相似性实体模仿子模块,在实际环境中演示机器人相似性运动。

2 相似性运动研究现状分析

2.1 人体运动捕获与处理

人体运动捕获通过运动捕获设备将人体演示动作记录下来进行分析与特征提取。常用的捕获方式有:(a)机械电动式,人体佩戴机械骨骼服装并在关节连接处设置运动角度传感器与位移测试设备,以获取运动姿势参数,其优点为姿势参数测试原理简单、服装构造较易、实时效果较好;缺点为姿势受限于机械服装体积、重量等因素,且数据精度不高;(b)光学式,在人体关节位置贴上光学标示,由多摄像机环绕并拍摄运动视频,提取二维视频运动参数并作三维运动重构,其优点为捕获

速度随摄像机处理能力提高而加快,精度较高;缺点为受场地影响较大,需配合多个摄像机协同解决运动遮挡问题;(c)电磁惯性感应式,演示人体关节位置佩戴传感接收器,运动时的电磁波信号变化则被传至处理器处理,以计算接收器的方向与位置,其优点为电磁波定位速度快且鲁棒性好,不受运动遮挡制约,缺点为电磁波易被金属屏蔽,人体姿势演示范围受缆线长度等限制,难以捕获大范围空间的运动姿势;(d)声学式,运动人体处于超声波接收器组构成的接收三角形中,运动姿势开始时将激活超声波发生器发送声波,由声波到达接收器的相位差或时间差计算出移动距离与方向,其优点为成本不高,缺点为易受场地噪声与屏蔽物品影响,捕获数据相对于运动滞后。

以光学式捕获为例,分为有模型与无模型的人体运动捕获两种方法,涉及人体运动记录与检测、目标识别与跟踪、场景再现、二维—三维运动数据转换等。

有模型的人体运动捕获方法的基本思想是将已建立的人体运动模型投影到捕获的实际人体运动图像中,由评价函数判断两者相似程度,以驱动对已有模型的参数搜索或生成。重复该过程直到相似度处于允许范围内,此时的模型参数将成为人体运动参数。该方法在模型选取上有棍图模型^[12]、线带模型^[13]、2D模型^[14]、3D模型^[15]等。其中棍图模型以点和线段表示关节与骨骼,通过拟合图像构造人体姿势;线带模型在基本模型上进行线带状扩展;2D模型通过平面区域的连接或时空切片中肢体投影等方式表示人体关节运动轨迹;3D模型以二维视频序列为基础恢复三维运动形态及特征。基于有模型的人体运动捕获方法主要依靠先验知识处理图像遮挡,对运动过程跟踪的精确度较高,能较好地分析人体运动过程,但其缺点在于人体模型的建立与初始化多依靠手工方法标记,易受图像噪声与累积误差等因素影响,处理过程较为耗时,难以满足实时性要求。

无模型人体运动捕获方法无须在姿势估计时进行模型匹配处理,人体姿势参数的获取是基于对运动特征跟踪、分析与推理过程实现的。常用方法有:(a)形状分析法^[16],所建立的人体模型仅作为捕获运动图像的启发知识,通过分析并标记出人体运动轮廓特征点而得到运动姿势参数,原理较简单,实时性强,但处理结果精确度不高,受运动环境与光照程度制约;(b)识别法^[17],对数据库的运动特征数据训练,建立从学习特征到人体姿势的映射关系,对数据库搜索以获得相关运动参数,其处理速度较快、鲁棒性强,但仅能对已有姿势识别,处理结果精确度不高;(c)特征跟踪法^[18],对初始化运动帧作特征点标记,并在后续帧建立起特征点之间的对应关系,得到人体运动姿势特征参数,无须考虑特征点的全局关系,速度较快,但对于图像中的遮挡与重叠等情况难以处理,跟踪效果不理想。

2.2 基于逆向运动学的运动关节解算

运动学主要从空间位置、运动轨迹、角度、角速度、角加速度等方面分析演示人体动作的时空特点。按照运动数据处理方式,可分为正向运动学(forward kinematics)与逆向运动学(inverse kinematics)两种^[19, 20]。其中正向运动学是通过演示人体的关节角度求解肢体的空间位姿,适用于计算重心位置、判定肢体环境碰撞等情况;逆向运动学处理过程与正向运动学相反,通过末端执行器位姿求解关节角度,适用于处理演示人体运动捕获图像。

逆向运动学求解方法可分为解析值法与数值法两种^[21],

其中,解析值法与机器人机械结构相关,采用高次多变量非线性方程组描述关节角、连杆位姿之间的关系,求解过程复杂,计算量大,解析值难以获得。相对而言,数值法基于正向运动学,采用试错与修正误差的方法进行求解,求解方法直观,计算速度较快,在实际中经常被采用。

数值法基本原理^[21]如图2所示。

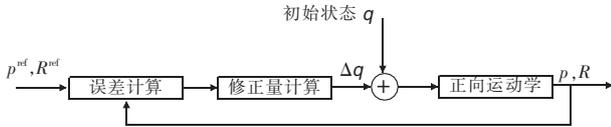


图2 数值法基本原理

其基本步骤^[21]如下:

- a) 确定演示人体期望目标位姿 (p^{ref}, R^{ref}) ;
- b) 为躯干一目标肢体设定关节角矢量 q ;
- c) 通过正向运动学求解当前肢体位姿 (p, R) ;
- d) 求解出当前肢体与目标肢体之间的距离 $(\Delta p, \Delta R) = (p^{ref} - p, R^T R^{ref})$;
- e) 当距离为0,即满足 $d(\Delta p, \Delta R) = \|\Delta p\|^2 + \|\ln \Delta \omega\|^2 \rightarrow 0$ 时,停止计算;
- f) 当距离大于指定阈值,即满足 $(\Delta p, \Delta R) > (p_T, E_T)$ 时,解出修正值 Δq ;
- g) 修正关节角矢量为 $q = q + \Delta q$,转步骤 c)。

其中, (p^{ref}, R^{ref}) 为世界坐标系的目标位置与姿态。

在步骤 f) 中,若随机选择某组数据而使得 $d(\Delta p, \Delta R)$ 减小,则以该组数更新关节角。不断迭代该过程,以逐渐逼近目标关节角。

2.3 运动模型简化与重定向

捕获的人体运动数据数量庞大,逐帧处理时效率低下;同时,人体骨骼数量为206块,远超仿人机器人机械关节数量,在将人体骨骼运动轨迹应用到机器人连杆运动时需建立人一机器人简化模型,即通过去除人体次要关节运动形态,建立起人体主要关节一机器人关节之间的轨迹对应关系^[22]。建立简化运动模型需要考虑实际机器人关节数量,关节数量过少则会丢失重要的运动特征,关节数量过多则会增大求解难度与复杂度。一般来说,建立通用简化模型时需从头、腰、臂、腿等部位分析人体关键关节运动特征,根据关节耦合特点建立对应层次结构的运动链。

运动重定向则是在运动模型简化后,将人体各关节运动轨迹映射到仿人机器人对应关节上,其目的是防止演示人体运动特征变化时导致机器人相似性运动失真,即如何实现将人体运动模型应用到仿人机器人时,既能适合机器人自身特征,运动流畅自然,又能保留演示人体的运动特征效果。Gleicher^[23]最早提出了运动重定向的思想,对运动时空约束问题进行全局优化处理,由B样条曲线实现重定向角度转换,注重运动整体效果,选择关键帧而非逐帧处理,降低帧处理费用同时保留了人体运动特点;Choi等人^[24]提出一种逆向比率控制方法,通过求解雅可比矩阵并结合基于逆运动学的中间关节骨架模型实现运动重定向,由于需要从雅可比矩阵的多组解中获得最优解,因此需帧间的关节角度变化不大,人体运动数据存在一定的轨迹重复特点,该方法能使目标运动模型体现出连续运动效果;Tak等人^[25]在Choi的研究基础上作进一步改进,在目标模型的末端执行器上施加演示人体末端执行器空间位置软约束,由

每帧中人体末端执行器的空间位置驱动目标模型,并通过相似度函数评价两者间的关节角度与空间位置差异,实现对目标模型的运动参数调节;Dariush等人^[26]针对预先记录下的动作实现离线调整的运动重定向,从改进人机交互的角度提出了在线无运动标示的动作转换方法;张利格等人^[27]采用层次结构反映关节间的相互耦合关系,通过MaYa软件来建造人一机简化模型,以及FilmBox软件实现运动重定向,最终输出生物视觉等级数据(Bio vision hierarchical data, BVH)文件等。

2.4 关键姿势处理与相似度评价

人体运动在某时刻暂停时所体现出的姿势被称为关键姿势。当关节角速度 $v_{key} \rightarrow 0$, 满足 $\dot{\varphi}_i^H(t) \leq v_{key}$ 时,则可判定在 t 时刻关节角 i 姿势为关键姿势,相邻关键姿势形成运动子相, v_{key} 被称为关键姿势阈值速度。对关键姿势的处理主要体现在三个方面:(a)提取,例如,Ju等人^[14]借助单台可移动摄像机,结合检测与运动轨迹跟踪,从连续图像运动序列中提取关键姿势,并实现具有鲁棒性的人体三维动作恢复;(b)识别与匹配,例如,谷军霞等人^[28]提出了一种基于人体行为三维模型的二维行为识别算法,在关键姿势集中为每一帧的二维观测样本寻找与之最匹配的三维关键姿势帧,由行为分类器对二维观测样本序列对应的三维关键姿势序列进行识别;Connaghan等人^[29]提出一种以单台摄像机记录打网球运动过程并采用精确识别系统自动识别网球关键击打动作的方法;(c)分类,例如,Hsieh等人^[30]采用新型分组方案构造模型空间,用于人体关键姿势的分类识别,并采用模型驱动方法将封闭区域划分为多个单对象,以解决封闭的人体运动轨迹分段问题;Hsieh等人^[31]提出一种人体运动分段算法,通过可变形三角形方法将人体姿势根据不同身体部位进行分段,形成关键姿势集合等。

相似度用来描述人体演示关键动作与仿人机器人对应动作之间的相似程度,可通过两者终端执行器位置相似与关节运动角度相似两种形式表示^[32]。但由于人体演示者与仿人机器人之间肢体躯干比例的差异,具有相同终端执行器位置的人体与仿人机器人的动作可能存在很大差异,其相似效果不理想,因此多采用关节运动角度相似形式进行相似度描述,两者关节变化可通过在关节角度差、角速度差和角加速度差三种情形上建立相似度函数表现,即 $\Delta\varphi_i^{H-R}(t) = \varphi_i^H(t) - \varphi_i^R(t)$ 、 $\Delta\dot{\varphi}_i^{H-R}(t) = \frac{d\varphi_i^H(t)}{dt} - \frac{d\varphi_i^R(t)}{dt}$ 、 $\Delta\ddot{\varphi}_i^{H-R}(t) = \frac{d^2\varphi_i^H(t)}{dt^2} - \frac{d^2\varphi_i^R(t)}{dt^2}$,则在运动周期 $[0, T]$ 中,用 $S_i^{H-R}(t) = f(\Delta\varphi_i^{H-R}(t), \Delta\dot{\varphi}_i^{H-R}(t), \Delta\ddot{\varphi}_i^{H-R}(t))$ 描述相似度,其中, f 为相似度函数。

例如,文献[27]从运动节奏控制角度提出相似度定义:

$$S_i^{H-R}(\varphi_i^H, \varphi_i^R) = \alpha \times (1 + \sum_{i=1}^n K_i \times \beta_i)^{-1} + (1 + \alpha) \times (1 + \sum_{i=1}^n \beta_i)^{-1} \quad (1)$$

其中: α 为权重值, β_i 为空间相似性。

文献[32]从运动轨迹一致性角度提出了相似度定义:

$$S_i^{H-R}(\varphi_i^H, \varphi_i^R) = \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varphi_i^H - \varphi_i^R}{\varphi_{i_{max}}^R - \varphi_{i_{min}}^R} \right)^2 \right]^{-1} \quad (2)$$

其中: φ_i^H, φ_i^R 分别为人体与机器人对应关节角度; $\varphi_{i_{max}}^R, \varphi_{i_{min}}^R$ 分别为机器人第 i 关节转动范围的最大值与最小值;当 $S \rightarrow 1$ 时,表明两者关节角度运动轨迹一致。

文献[33]从时空角度提出了相似度定义:

$$S_i^{H-R}(t) = \tau \times \left(1 + \frac{|\varphi_i^H(t) - \varphi_i^R(t)|}{\varphi_{i_{max}}^R - \varphi_{i_{min}}^R} \right)^{-1} +$$

$$(1-\tau) \times \left(1 + \frac{|\dot{\varphi}_i^R(t) - \dot{\varphi}_i^H(t)|}{\dot{\varphi}_{i_{\max}}^R - \dot{\varphi}_{i_{\min}}^R} \right)^{-1} \quad (3)$$

其中: τ 为变换系数且 $0 \leq \tau \leq 1$,当 τ 趋向1时,表示动作趋于静止,当 τ 趋向0时,表示动作趋于快速转换; $0 < S \leq 1$, S 越接近1,表明相似度越高。

2.5 机器人关节空间位姿计算

仿人机器人关节空间位姿由正向运动学计算获得,即通过人体关节运动角度变化计算出机器人关节运动的空间位姿,该过程由齐次变换的链乘法则实现^[21]。设机器人世界坐标原点为其初始站立位置,其 x 、 y 、 z 轴分别指向前方、右侧与上方,世界坐标系为 Σ_w ,机器人第 i 关节局部坐标系为 Σ_i ,该坐标系随运动姿势而变化,单位转动矩阵为 $R_i = [e_{ix} \ e_{iy} \ e_{iz}]$,其中 e_{ix} 、 e_{iy} 、 e_{iz} 为单位矢量且分别平行于 Σ_w 的 x 、 y 、 z 轴,当第 i 关节从空间位姿 r_i 变换到 r_j 时,满足转动关系:

$$r_j = R_i r_i \quad (4)$$

从局部坐标系转换为世界坐标系满足:

$$p_w = p_i + R_i^T p_i \quad (5)$$

其中: p_w 、 p_i 分别为 Σ_w 与 Σ_i 坐标系中的空间位姿,则齐次变换矩阵为

$$T_i = \begin{bmatrix} R_i & p_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

T_i 实现了将 Σ_i 坐标系中的空间位姿转换到 Σ_w 中。

对式(4)~(6)迭代扩展,齐次变换的链乘法则为

$$T_N = T_1^{-1} T_2^{-1} T_3^{-1} \dots T_N^{-1} T_N \quad (7)$$

T_N 为 Σ_w 中第 N 关节位姿的齐次变换矩阵。

在母连杆坐标系 Σ_i 中,当前连杆坐标系 Σ_j 的原点为 b_j ,转动轴矢量为 a_j ,关节角为 q_j ,则 Σ_j 相对于 Σ_i 的齐次变换矩阵为

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} e^{a_j q_j} & b_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(7)链乘法则,可得 Σ_j 的位姿 (p_j, R_j) 为

$$p_j = p_i + R_i b_j \quad (9)$$

$$R_j = R_i e^{a_j q_j} \quad (10)$$

2.6 动力学匹配约束

仿人机器人是动力学耦合系统,其双足运动体现开环与闭环交替形态,具有多变量、非线性控制特点,在执行人体相似性运动时需由动力学方法分析关节力/力矩变化与平衡控制,以优化运动形态。动力学分为正向动力学与逆向动力学。其中,正向动力学由机器人关节受力与力矩,计算出关节的位移、速度与加速度等轨迹量;逆向动力学则由关节轨迹量,计算出其受力与力矩变化。动力学分析方法有牛顿—欧拉(Newton-Euler)方法^[34]、拉格朗日(Lagrange)方法^[35]、高斯(Gauss)方法^[36]、罗伯特—威登堡(Robert-Wittenburg)方法^[37]、凯恩(Kane)方法^[38]等。

仿人机器人执行相似性运动时,需根据动力学分析其特定运动形态,控制力/力矩变化。以机器人双足平衡控制为例阐述动态稳定性,根据步态轨迹确定压力中心(center of pressure)轨迹,由动力学模型生成连续的重心变化轨迹,通过逆向动力学计算出关节运动角度,使其满足COG轨迹与足迹轨迹。例如,文献[39]由最优控制器对简化模型与精确的全身模型之间的ZMP(zero moment point)误差进行补偿,生成仿人机器

人在螺旋盘梯上的稳定相似性双足行走动作;文献[40]设计并应用三维方向传感器与六轴扭矩传感器以构建满足非结构化地形的仿人机器人双足步行机制;文献[41]捕获并分析人体平衡动作机理,用于构造基于倒立摆的平衡控制器,实现了受干扰情况下的双足行走与全身运动的平衡控制;文献[42]基于积分控制与倒立摆模型,提出一种受扰自恢复平衡控制器,维持了仿人机器人在受外力扰动时的直立姿势等。

3 研究展望

由以上分析笔者认为,仿人机器人相似性运动从其构建到应用过程受到诸多关键因素综合影响,对以下问题的解决将提高相似性运动设计效果:

1) 人体实时运动图像采集与运动图像无损传输之间的矛盾

实时运动图像采集平台是人体运动场景信息获取手段以及相似性动作的来源,其获取的图像质量状况直接决定了后续处理方法的设计和实现难度。传统实时图像数据传输方法是通过限制传输码率的有损压缩方法实现的,不满足高质量人体运动图像捕获要求,如何实现高速实时无损人体运动图像数据采集和存储是相似性运动中人体运动图像捕获方面迫切需要解决的难题。例如,针对光学式捕获情形,可采用基于摄像机阵列的图像采集方法,利用其大视场高分辨率的优点以提高图像采集性能,并采用FPGA集成电路^[43-46]阵列协同方式,并行控制多块SD存储设备,通过摄像机阵列进行实时无损图像数据采集和存储。

2) 运动多样性与同类特征图像匹配检索之间的矛盾

传统的基于运动相似性的仿人机器人动作规划系统并未考虑运动图像的自动分类存储与检索问题,造成运动图像获取与动作规划脱节,尤其在海量图像检索时匹配困难。因此,若能采用基于内容的图像特征匹配方法,对捕获的人体运动图像数据按照特征存储归类并检索,即通过表征出图像色彩、形状、纹理及轮廓等不同内容的重要特征用于图像索引,计算出待查询图像与目标图像的相似性^[47, 48]。例如,在人体运动图像的特征矢量提取与检索过程中,可采用脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural networks, PCNN)对图像平滑、分割、边缘检测及目标检索,其基本思想是非线性调制耦合和阈值指数衰变机制^[49, 50];在识别目标时,可采用归一化转动惯量(normalized moment of inertia, NMI)等方法实现,其基本思想是通过计算图像的归一化转动惯量为不变特征而识别目标^[51]。

3) 人体运动轨迹提取问题

传统的提取运动区域的方法一般采用基于空域信息算法、时域信息算法或者时空混合算法,处理步骤简单,精度较低,并不适用于处理高精度人体运动图像序列的运动轨迹提取。以光学式捕获为例,针对人体在关节位置佩戴显著光学标示情形,可考虑采用如基于光流的时空联合运动区域划分算法等以获取运动轨迹时域信息^[52, 53],利用快速数值算法求出运动轨迹边缘处的光流法向分量分布,并采用运动轨迹区域判决函数对边缘区域进行聚类。

4) 关键姿势层次结构问题

现有研究多将关键姿势间视为同等平行关系,并未考虑其层次分解情形^[27]。根据机器人关键姿势涉及角度数量,可构建起多级关键姿势层次结构,其基本思想是将机器人运动的所

有关节角速度为0时定义为一级关键姿势(即根节点),按层划分直到某一关节角速度为0。关键姿势的级别越高,姿势分解效果越明显。随着周期缩短,相邻运动子相相似程度趋高。因此,通过选择关键姿势级别与运动子相变换幅度,实现机器人与人体运动的同步关联效果,进而通过同步控制同层次的关键姿势,形成多级关键姿势与人体对应姿势的整体时空协调。

5) 运动约束及优化问题

由于仿人机器人与人体在骨骼结构与长度、关节比例、转角幅度、速度等方面的差异,经由逆运动学计算的人体运动数据应用在机器人上时需施加运动学与物理条件约束以及控制优化,以适应实际环境。尽管目前已提出了一些约束控制方法,如梯形速度曲线约束法、三维人体运动约束法、多接触受限与平衡约束法、肢体纠缠约束法、遗传步态约束法等^[54-58],但还应考虑约束中的肢体碰撞、稳定性、奇异性、滑步、踏空、陷入、正向运动、侧向运动等,以及未倒地时的地面冲击接触控制和倒地时的地面冲击接触优化等情形。

6) 相似性运动的学习问题

相似性运动的学习体现在两方面:a)从当前捕获姿势中自调整并优化运动轨迹以适应新的目标环境,通过学习有助于降低对同类不同目标环境反复捕捉运动轨迹的工作量;b)对混合环境下多类相似性动作融合的学习,即具备环境判断能力,自选择运动形态、自调整并优化运动轨迹。在学习过程中,其策略搜索空间随机器人运动关节数量增多以及外部环境差异而增大,可通过空间降维方法提高学习速度与收敛性^[59,60]。

7) 相似性理论体系尚不完善

评判仿人机器人运动相似性效果的依据不仅考虑完全相似度,还应该考虑在同类差异化环境下的次优相似度,即允许一定程度牺牲相似性以适应同类差异化目标环境,并建立新环境下的协调性相似、同步相似,安全阈值、有效性度量指标、运动异常的保护机制、统计等理论模型。其中,安全阈值体现为保证稳定性、多异类差异化环境适应性以及能量消耗允许等指标下的调整后运动与标准运动的偏差度安全阈值;有效性度量体现为某一相似度下的综合运动指标(包括力、力矩、角度、速度、角速度、关键姿势、基本子相、运动周期等)有效性变化情况;运动异常保护机制用于防止运动过程中出现机器人肢体间碰撞、肢体与环境的异常碰撞等问题;由于仿人机器人相似性动作无法以理论分析方法导出,相似性统计模型用于通过实验测定运动参数后,经过数理统计法求得各变量之间的(近似)函数关系。

4 结束语

在实现仿人机器人自然柔顺动作、运动能量优化与复杂动作的设计上,基于人体运动相似性方法比基于运动解析方程求解方法更有优势。该方法涉及从人体运动图像捕获、特征处理、运动简化与重定向、运动学与动力学约束及优化等过程,研究者进行了大量工作并取得了相关成果。本文从相似性运动设计过程分析了这些研究成果并提出了研究展望,有助于进一步推动仿人机器人研究领域的发展。

参考文献:

[1] 钟秋波. 类人机器人运动规划关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

- [2] KANAKO M, MITSU HARU M, FUMIO K, *et al.* Human-like walking with toe supporting for humanoids[C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011: 4428-4435.
- [3] YAO N, TAKUBO T, OHARA K, *et al.* Gait planning for a biped robot by a nonholonomic system with difference equation constraints[C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010: 4471-4476.
- [4] 伊强, 陈恩, 刘莉, 等. 考虑综合步行约束的仿人机器人参数化3D步态规划方法[J]. 机器人, 2009, 31(4): 342-350.
- [5] HARADA K, HATTORI S, HIRUKAWA H, *et al.* Two-stage time-parametrized gait planning for humanoid robots[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2010, 15(5): 694-703.
- [6] HU Ling-yun, ZHOU Chang-jiu, SUN Zeng-qi. Estimating biped gait using spline-based probability distribution function with Q-learning[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1444-1452.
- [7] TLALOLINI D, CHEVALLEREAU C, Aoustin Y. Optimal reference walking with rotation of the stance feet in single support for a 3D biped[C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Intelligent System. 2008: 1091-1096.
- [8] 汤哲. 人形机器人的步态研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [9] DO M, ASFOUR T, DILLMANN R. Towards a unifying grasp representation for imitation learning on humanoid robots[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011: 482-488.
- [10] KE Wen-de, HONG Bing-rong, CUI Gang, *et al.* Study of key pose of movement similarity on humanoid robot[J]. Information Technology Journal, 2012, 11(11): 1612-1618.
- [11] 柯文德, 彭志平, 洪炳镕, 等. 基于运动相似性的仿人机器人上阶梯行走研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(12): 60-64.
- [12] 杨文武. 计算机辅助卡通角色动作姿势编辑与插值[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [13] 胡琴. 基于标志点的三维人体步态捕获技术研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2008.
- [14] JU S X, BLACK M J, YACCOB Y. Cardboard people: a parameterized model of articulated image motion[C]//Proc of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. 1996: 38-44.
- [15] DEUTSCHER J, BLAKE A, REID I. Articulated body motion capture by annealed particle filtering[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2000: 126-133.
- [16] HARITAOGLU I, HARWOOD D, DAVIS L S. W4: real-time surveillance of people and their activities[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 809-830.
- [17] AGARWAL A, TRIGGS B. 3D human pose from silhouettes by relevance vector regression[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2004: 882-888.
- [18] 罗忠祥, 庄越挺, 潘云鹤, 等. 基于视频的运动捕获[J]. 中国图象图形学报: A版, 2002, 7(8): 752-758.
- [19] GLERCHER M. Retargetting motion to new characters[C]//Proc of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1998: 33-42.
- [20] GROCHOW K, MARTIN S, HERTZMANN A, *et al.* Style-based inverse kinematics[J]. ACM Trans on Graphics, 2004, 23(3): 522-531.
- [21] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 管贻生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007: 50-56.

- [22] GONG Guang-hong, LI Ning. Measure of human body sports and data correct[J]. *Measure Technology*, 2003, 22(4): 21-23.
- [23] GLERCHER M. Retargeting motion to new characters [C]//Proc of ACM SIGGRAPH'98 Conference. 1998:33-42.
- [24] CHOI K J, KO H S. On-line motion retargeting[J]. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 2000, 11(5): 223-235.
- [25] TAK S, KO S H. Example guided kinematics [C]//Proc of International Conference on Computer on Computer Graphics and Imaging. 2000:19-23.
- [26] DARIUSH B, GIENGER M, ARUMBAKKAM A, *et al.* Online and markerless motion retargeting with kinematics constraints [C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008:191-198.
- [27] 张利格, 黄强, 杨洁, 等. 仿人机器人复杂动态动作设计及相似性研究[J]. *自动化学报*, 2007, 33(5): 522-528.
- [28] 谷军霞, 丁晓青, 王生进. 基于人体行为3D模型的2D行为识别[J]. *自动化学报*, 2010, 36(1): 46-53.
- [29] CONNAGHAN D, CONAIRE C O, KELLY P, *et al.* Recognition of tennis strokes using key postures [C]//Proc of Signals and Systems Conference. 2010:245-248.
- [30] HSIEH J W, CHEN S Y, CHUANG C H, *et al.* Occluded human body segmentation and its application to behavior analysis [C]//Proc of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2010:3433-3436.
- [31] HSIEH J W, CHUANG C H, CHEN S Y, *et al.* Segmentation of human body parts using deformable triangulation[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(3): 1083-4427.
- [32] 赵晓军, 黄强, 彭朝琴, 等. 基于人体运动的仿人型机器人动作的运动学匹配[J]. *机器人*, 2005, 27(4): 358-361.
- [33] 柯文德, 崔刚, 洪炳榕, 等. 参数化优化的仿人机器人相似性前向倒地研究[J]. *自动化学报*, 2011, 37(8): 1006-1013.
- [34] 邵兵, 吴洪涛, 程世利, 等. 基于李群李代数的主被动关节机器人动力学及控制[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(3): 253-257.
- [35] 王剑. 仿人机器人在线运动规划方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- [36] 廖一寰, 李道奎, 唐国金. 基于混合规划策略的空间机械臂运动规划研究[J]. *宇航学报*, 2011, 32(1): 98-103.
- [37] 孙宏丽. 机械系统刚—柔—液耦合多体动力学递推建模研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [38] 夏丹, 陈维山, 刘军考, 等. 基于Kane方法的仿鱼机器人波状游动的动力学建模[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(6): 41-49.
- [39] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, *et al.* Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003: 1620-1626.
- [40] LOFFLER K, GIENGER M, PFEIFFER F. Sensor and control design of a dynamically stable biped robot [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003:484-490.
- [41] KUDOH S, KUMURA T, IKEUCHI K. Stepping motion for a human-like character to maintain balance against large perturbations [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2006:2661-2666.
- [42] STEPHENS B. Integral control of humanoid balance [C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2007:4020-4027.
- [43] AVCI A, De COCK J, BEERNAERT R, *et al.* Reduced complexity multi-view video coding scheme for 2D camera arrays [C]//Proc of 3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video. 2011:1-4.
- [44] BLUM J R, SUN Hai-jian, OLMOS A, *et al.* End-user viewpoint control of live video from a medical camera array [C]//Proc of the 5th ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras. 2011:1-6.
- [45] FIGULI P, HUBNER M, GIRARDEY R, *et al.* A heterogeneous SoC architecture with embedded virtual FPGA cores and runtime core fusion [C]//Proc of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems. 2011:96-103.
- [46] VIPIN K, FAHMY S A. A threat-based Connect6 implementation on FPGA [C]//Proc of International Conference on Field-Programmable Technology. 2011:1-4.
- [47] 韩光, 赵春霞, 陆建峰, 等. 面向彩色图像的尺度和旋转不变性特征提取方法及应用[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(3): 398-405.
- [48] NAEIMIZAGHIANI M, ABDULLAH S N H S, BATAINEH B, *et al.* Character recognition based on global feature extraction [C]//Proc of International Conference on Electrical Engineering and Informatics. 2011:1-4.
- [49] CHACON M I, MENDOZA J A. A PCNN-FCM time series classifier for texture segmentation [C]//Proc of Fuzzy Information Processing Society. 2011:1-6.
- [50] WANG Xin-chun, YE Qing, YUE Kai-hu, *et al.* A new image segmentation algorithm based on PCNN and maximal correlative criterion [C]//Proc of the 10th IEEE International Conference on Signal Processing. 2010:873-876.
- [51] BOZEK J, GRGIC M, SCHNABEL J A. Validation of rigid registration of mammographic images [C]//Proc of ELMAR. 2011:11-16.
- [52] SAKAINO H. A Semitransparency-based optical-flow method with a point trajectory model for particle-like video [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2012, 21(2): 441-450.
- [53] LIAO S K, LIU B Y. An edge-based approach to improve optical flow algorithm [C]//Proc of the 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. 2010:2154-7491.
- [54] 张斌. 基于多约束的机器人关节空间轨迹规划[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(21): 1-6.
- [55] LAN San-fan, HO M F, HUANG C L. Human motion parameter capturing using particle filter and nonparametric belief propagation [C]//Proc of IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation. 2008:37-40.
- [56] HAYET J B, ESTEVES C, ARECHAVALETA G, *et al.* Motion planning for a vigilant humanoid robot [C]//Proc of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2009:196-201.
- [57] BOUYARMANE K, KHEDDAR A. FEM-based static posture planning for a humanoid robot on deformable contact support [C]//Proc of the 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2011: 487-492.
- [58] HO E S L, KOMURA T, RAMAMOORTHY S. Controlling humanoid robots in topology coordinates [C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010:178-182.
- [59] SUTTON R S, PRECUP D, SINGH S. Between MDPs and semi-MDPs a framework for temporal abstraction in reinforcement learning [J]. *Artificial Intelligence*, 1999, 112(1): 181-211.
- [60] MANNOR S, MENACHE I, HOZE A, *et al.* Dynamic abstraction in reinforcement learning via clustering [C]//Proc of the 21st International Conference on Machine Learning. 2004:560-567.