

# 仿人机器人复杂动态动作设计及相似性研究

张利格<sup>1</sup> 黄强<sup>1</sup> 杨洁<sup>1</sup> 时有<sup>1</sup> 王志杰<sup>1</sup> JAFRI Ali Raza<sup>1</sup>

**摘要** 提出了一种基于人体运动的考虑节奏相似性的仿人机器人复杂动态动作设计方法. 首先, 把人体的运动分割成基本动作段, 给出了运动学约束, 讨论了复杂动态动作的稳定性调节方法. 然后, 提出了考虑运动节奏的仿人机器人模仿人体动作的相似性函数, 并给出了满足运动学约束和动力学稳定性、具有高相似性的运动轨迹求解方法. 最后, 通过在仿人机器人 BHR-2 上进行中国功夫“刀术”实验验证了该方法的有效性.

**关键词** 仿人机器人, 相似性, 节奏, 动力学稳定性, 运动学约束  
**中图分类号** TP24

## Design of Humanoid Complicated Dynamic Motion with Similarity Considered

ZHANG Li-Ge<sup>1</sup> HUANG Qiang<sup>1</sup> YANG Jie<sup>1</sup> SHI You<sup>1</sup> WANG Zhi-Jie<sup>1</sup> JAFRI Ali Raza<sup>1</sup>

**Abstract** This paper explores a method of designing humanoid motion with rhythm considered based on human motion capture. Firstly, human motion is segmented into primitive motions. Secondly, the kinematics constraints and stability adjustment method are formulated. Thirdly, the similarity evaluation with rhythm considered is made, and a method to derive humanoid motion with high similarity is presented. Finally, an experiment of Chinese swordsmanship was performed using our developed humanoid robot BHR-2 to illustrate the effectiveness of this method.

**Key words** Humanoid robot, similarity, rhythm, dynamic stability, kinematics constraint

## 1 引言

基于人体运动的仿人机器人动作设计是近年来机器人领域的研究热点之一<sup>[1~3]</sup>. 由于仿人机器人的模型与人体模型不同, 捕捉到的运动数据必须经过修改来满足其运动学和动力学约束. Pollard<sup>[4]</sup> 等人通过捕捉人体舞蹈动作, 讨论了仿人机器人上肢舞蹈表演. Yamane<sup>[5]</sup> 等人通过捕捉人体数据, 研究了仿人机器人动力学仿真. Nakaoka<sup>[6]</sup> 等人提出了通过获取人体的舞蹈动作, 提取基本动作的象征符号, 以此生成仿人机器人动作的方法. Nakazawa<sup>[7]</sup> 等人提出了通过匹配人体动作关键帧来混合仿人机器人动作的方法. Ruchanurucks<sup>[8]</sup> 等人通过记录人体运动实现了物理约束下仿人机器人运动轨迹的优化. Noritate<sup>[9]</sup> 等人提出了基于动作产生系统的仿人机器人静态动作设计方法.

以上所述只是讨论了在相对较低速度下仿人机器人动作的产生方法. 如果运动速度很快, 仿人机器人动态稳定性便成为了关键问题. 另外, 仿人机器人的动作可视为对人体动作的模仿, 如何保证与人体动作具有高度的相似性也是将要研究的一个重要课

题.

在论文 [10] 中我们提出了基于运动捕捉系统的仿人机器人运动学匹配方法, 通过这种方法, 可以设计出与人体运动相似的仿人机器人动作. 但对于快速运动中仿人机器人的动力学稳定性并未作深入研究. 而且, 该文的相似性函数只考虑了某一时刻, 并不能反映连续时刻的相似性. 此外, 人体运动的节奏会使动作美观大方, 可观赏性强, 所以运动节奏也应作为评价仿人机器人动作是否与人相似的标准之一. 因此, 评价仿人机器人动作不仅要考虑空间上与人体动作的相似, 还要考虑到时间上的节奏相似性.

为此, 本文提出了一种考虑动态稳定性和节奏相似性的仿人机器人动作设计方法. 首先, 根据动作特征对人体运动进行分段. 然后, 讨论了基于这些动作段的运动轨迹产生方法. 最后, 提出了在满足运动学约束和动力学稳定性的前提下, 具有高度节奏相似性的仿人机器人运动轨迹产生算法.

## 2 系统介绍

### 2.1 仿人机器人模型

本文的研究对象是我们开发的仿人机器人 BHR-2, 如图 1 所示. 其高 1.6m, 重 63kg, 共有 32 个自由度. 其中每条腿有: 髋关节 3 个自由度, 膝关节 1 个自由度, 踝关节 2 个自由度; 每条胳膊有: 肩关节 3 个自由度, 肘关节 1 个自由度, 腕关节 2 个自由度; 手部 3 个自由度; 头部有 2 个自由度.

收稿日期 2006-6-27 收修改稿日期 2006-9-19  
Received June 27, 2006; in revised form September 19, 2006  
国家 863 计划 (2003AA420010) 资助项目  
Supported by the National High Technology Research and Development Program (2003AA420010)  
1. 北京理工大学机电工程学院智能机器人研究所 北京 100081  
1. Intelligent Robotics Institute, Department of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081  
DOI: 10.1360/aas-007-0522



图1 BHR-2 仿人机器人  
Fig.1 BHR-2 humanoid robot

## 2.2 系统构成

选择红外被动式数字光学运动捕捉系统获取人体运动数据. 该系统使用 8 个光学摄像头, 表演者全身贴有 38 个标记点, 捕捉系统以每秒 100 帧的速率记录下所有标记点的空间坐标, 以获取人体运动数据.

基于人体运动的仿人机器人动作设计方案包括: 人体运动捕捉, 运动学匹配, 动力学匹配, 仿真和本体实验, 如图 2 所示. 仿人机器人的模型与人体模型不同, 人体运动数据通过运动学匹配才能转化为满足运动学约束的仿人机器人运动数据. 动力学匹配是对运动学匹配后的数据进行处理, 使其符合机器人动态稳定性条件, 用来驱动仿人机器人完成稳定运动的处理过程, 下节将对这两个方面进行详细讨论.

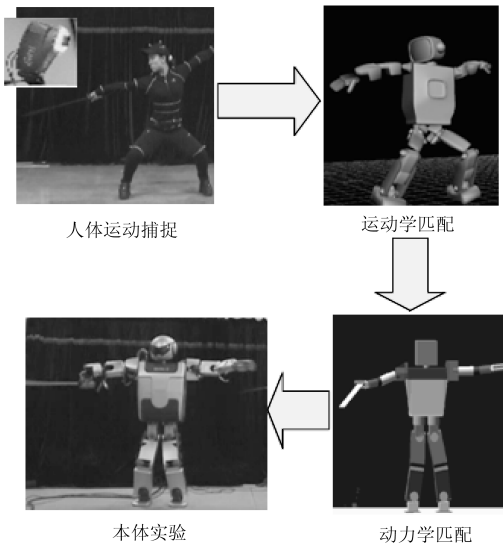


图2 系统构成  
Fig.2 Composition of the system

## 3 仿人机器人运动轨迹的生成

人体的运动被认为是由一系列基本动作段组成, 它们是组成运动序列的最小单元, 文中简称“基段”. 一个“基段”可能会在整个表演动作中重复, 它体现了这个运动的基本特征.

### 3.1 “基段”的分割

通过对武术、舞蹈等人体动作进行分析, 发现一些典型的动作频繁出现, 并且表演者会有节奏地在某一时刻以某一姿势停顿, 把停顿姿势称为关键姿势, 相邻两个关键姿势之间的过渡动作被称为“基段”. “基段”可以根据整个身体的动作分割, 也可以按照某个肢体的动作分割, 这是因为各个肢体的动作不同, 停顿的时刻也可能不同, 在这种情况下, 就要对这些部位分别进行“基段”的分割.

本文中, 仿人机器人将要模仿中国功夫“刀术”. 刀术是以缠头裹脑等招术为基本动作, 如图 3 所示, 加上劈、砍、挂、撩、扎、点、云、崩等刀法所组成的套路. 刀术的风格是勇猛快速, 激烈奔腾, 紧密缠绕, 雄健剽悍. 刀术表演中的亮相动作即为关键姿势, 所以根据亮相动作对刀术进行“基段”的分割. 注意上肢和下肢的分割是独立进行的. 上肢在空间运动, 不会与周围环境发生干涉, 可以直接根据亮相动作分割. 图 3 是上肢进行“基段”分割的部分结果, 图中曲线是人体右臂第六个关节的角速度. 速度为零的区域为亮相阶段. 下肢的动作与上肢相比, 亮相时刻不同, 并且与地面接触, 进行“基段”分割时, 应结合地面接触条件. 刀术动作中下肢的关键姿势主要有 4 种: 双脚支撑 (并步), 前跨步 (一脚在前, 一脚在后), 侧跨步, 金鸡独立, 如图 4 所示. 每个关键姿势由一些关键参数决定, 在表 1 中:  $P_w$  - 腰位置,  $D_l$  - 步长,  $D_w$  - 步宽,  $H_a$  - 脚踝高度. 对下肢进行运动学和动力学匹配时, 将对这些关键参数进行调节. 任意两个关键姿势之间的过渡动作都可以作为下肢的“基段”.

表1 下肢关键姿势参数  
Table 1 Key pose parameters of legs

关键姿势	关键参数
双脚支撑	$P_w$
前跨步	$P_w, D_l, D_w$
侧跨步	$P_w, D_w$
金鸡独立	$P_w, D_l, D_w, H_a$

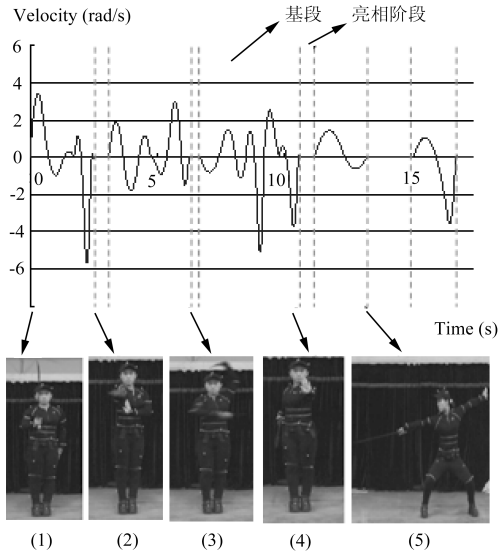


图 3 刀术动作中上肢分段结果

Fig. 3 Segmentation result of arms in “sword”



图 4 刀术动作中下肢关键姿势

Fig. 4 Key pose of legs

### 3.2 仿人机器人运动学约束

完成“基段”分割后,进行运动学匹配,使人体数据转化为满足运动学约束的仿人机器人运动数据. 上肢在空中运动,其运动学约束只包括关节范围,自由度数目以及肢体间避免发生干涉. 由于仿人机器人脚与地面接触,因此下肢动作的运动学约束除了以上几方面外,还必须包括地面接触约束条件. 这是由于仿人机器人腿部各关节长度与人体不相等,而且也不成等比例关系,如果直接应用提取的人体运动数据将会产生滑步、踏空、陷入等问题,导致机器人摔倒和部件损坏. 运动学约束主要包括以下几方面,即(1~3):

$$q_{ri \min} \leq q_{ri} \leq q_{ri \max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\begin{cases} d_{jk} \neq 0 \\ d_{jk} = \min[(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 + (z_j - z_k)^2]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} z_{rf} = z_{lf} = 0 \\ \mathbf{P}_r + \mathbf{F}_{rw} = \mathbf{P}_l + \mathbf{F}_{lw} = \mathbf{P}_w \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $n$  是自由度的数目,  $q_{ri}$  是第  $i$  个关节角,  $(q_{ri \min}, q_{ri \max})$  是第  $i$  个关节角的范围.  $(x_j, y_j, z_j)$  和  $(x_k, y_k, z_k)$  为仿人机器人肢体任意两点  $P_j, P_k$  空间坐标,  $d_{jk}$  为两点间的最短距离,如图 5 所示. (3) 表示了地面接触限制, 式中  $z_{lf}, z_{rf}$  为仿人机器人左右脚在  $Z$  方向的空间坐标值,  $\mathbf{P}_l, \mathbf{P}_r$  为机器人左右脚的位置矢量,  $\mathbf{F}_{lw}, \mathbf{F}_{rw}$  代表机器人左右脚与腰之间的运动位置关系,  $\mathbf{P}_w$  为机器人腰的位置矢量,如图 6 所示. 方程表示在双脚与地面接触的情况下,对基于左右脚的空间坐标分别进行运动学计算,所得到的腰的空间坐标必须相等.

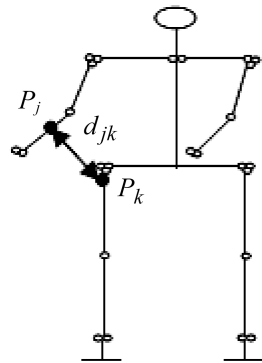


图 5 肢体约束条件

Fig. 5 Constraints between different parts

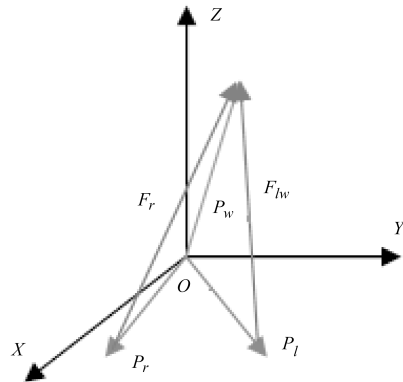


图 6 地面接触约束条件

Fig. 6 Contact constraints with ground

### 3.3 仿人机器人稳定性调节

经过运动学匹配后的数据需要进行稳定性调节,才能使仿人机器人稳定行走. 使用 Vukobratovic<sup>[11]</sup> 提出的 ZMP (Zero moment point) 准则来调节仿人机器人的稳定性. 支撑腿的足部与地面接触形成的凸多边形支撑区域定义为稳定区域. 稳定裕度是仿人机器人两足步行稳定程度的一种量化描述,其量

化参数是 ZMP 与稳定区域边界的最短距离, 如图 7 所示. 如果 ZMP 在稳定区域内, 则机器人可以稳定行走. 为了保证机器人有较高的稳定性, ZMP 应该保持在一个理想的稳定区域中, 把这个理想的稳定区域定义为有效稳定区域, 在它内部所有 ZMP 的稳定裕度全部大于由外界环境干扰而导致的该 ZMP 位置变化量. 有效稳定区域的描述见 (4). 式中,  $r_x(zmp), r_y(zmp)$  分别表示 ZMP 坐标在  $x$  和  $y$  方向的稳定裕度;  $R_x, R_y$  分别表示干扰造成的 ZMP 位置在  $x$  轴和  $y$  轴的变化量.

$$\Omega = \{(x_{zmp}, y_{zmp}) | r_x(zmp) \geq R_x, r_y(zmp) \geq R_y, R_x > 0, R_y > 0\} \quad (4)$$

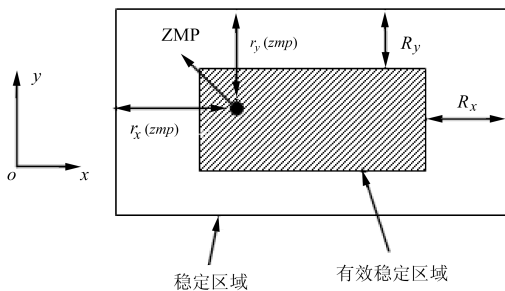


图 7 稳定区域和稳定裕度

Fig. 7 Stability region and stability margin

上肢质量相对躯干较小, 对姿态稳定性影响也较小, 如果对上肢姿态进行较大的调节将会使仿人机器人上身动作产生较大变形, 影响全身动作相似性, 不适合稳定性调节. 踝的轨迹在运动学匹配过程中已经做了修改, 如果调节踝的位置, 下肢动作变形会较大, 而且脚踝距离地面比较低, 对稳定性影响较小. 所以只是通过调节腰的位置来调节稳定性. 首先确定腰部的调节范围, 腰部的调节范围根据足部在地面上的稳定区域确定, 调节范围如 (5). 在调节区域内设定  $x, y$  方向的调节步长, 进行 ZMP 和有效稳定区域的计算, 通过遍历得到一个既满足 ZMP 在有效稳定区域内, 又满足运动学约束条件的腰位置集合.

$$\begin{cases} x_w \min \leq x_w \leq x_w \max \\ y_w \min \leq y_w \leq y_w \max \\ z_w \min \leq z_w \leq z_w \max \end{cases} \quad (5)$$

### 3.4 轨迹生成

运动学匹配和稳定性调节完成后, 按一定顺序连接这些“基段”, 就可以得到仿人机器人的运动轨迹. 注意在对两个“基段”进行连接时要保证机器人

能平滑地由一种姿态过渡到另外一种姿态. 上肢对稳定性的影响不大, 连接“基段”时, 只需保证在临界点的位置和速度相等. 但是对于下肢来说, 如果在临界点两种步态的位置, 速度, 加速度不相同, 机器人会因惯性力太大而不能满足 ZMP 稳定性, 从而发生翻倒, 造成机器人部件的损毁, 所以在临界点速度和加速度也应该相等. 边界条件如下.

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_{i-1}, \dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{i-1}, & \text{上臂} \\ \theta_i = \theta_{i-1}, \dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{i-1}, \ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i-1}, & \text{下肢} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i$  分别为第  $i$  个“基段”临界点的角度, 角速度和角加速度. 改变连接的顺序, 将会得到不同的运动轨迹. 因为在每个“基段”中运动学匹配和稳定性调节都已完成, 所以改变连接顺序后这些工作无须再做. 通过这种方法可以灵活地产生不同的动作, 并且不需要再进行运动学匹配和稳定性调节.

## 4 相似性与节奏分析

通过运动学和动力学匹配后得到的仿人机器人动作可能与人体大不相同, 而我们希望其能够尽量相似地模仿人体的动作, 所以还要对仿人机器人的动作进行相似性评价.

评价仿人机器人与人动作的相似性, 可以用两者末端执行器之间的位置关系或角度关系两种方式来表达. 由于人的肢体长度与仿人机器人不同, 即使两者末端执行器的位置一样, 姿势也可能相差很大. 所以, 采用角度关系来评价仿人机器人与人动作间的相似性. 只有连续时刻的相似性才能够反映仿人机器人是否很好地模仿了人体的动作. 此外, 仿人机器人在模仿人体动作时也要保持运动的节奏, 节奏使动作协调美观, 节省能量. 而速度反映了动作的节奏, 它会根据节奏时快时慢, 因此速度对相似性的影响不可忽视, 因为它体现了节奏上的相似.

在运动捕捉系统内部, 通过简化人体运动模型, 使人体模型具有与仿人机器人模型相同的关节数目, 这样就可以建立起模型之间的运动学对应关系.

设分割后的“基段”序列为:  $1, 2, \dots, j, \dots, m$ , 对任意“基段” $j$ :

用  $T^h_j$  表示人体完成  $j$  所用时间, 对  $j$  按时间间隔  $\Delta T^h = T^h_j/k$  采样, 采样个数为  $k$ ;

用  $T^r_j$  表示仿人机器人完成  $j$  所用时间, 对  $j$  按时间间隔  $\Delta T^r = T^r_j/k$  采样, 采样个数为  $k$ .

对任意“基段” $j$  的相似性函数定义为

$$S_j(Q_{ri}, Q_{hi}) = \alpha \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{i=n} K_i \cdot \beta_i} + (1-\alpha) \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{i=n} \dot{\beta}_i} \quad (7)$$

其中,  $\beta_i = \| Q_{ri}(t^r) - Q_{hi}(t^h) \| / \Delta Q_{ri}(t^r)$  表示空间上相似性;  $\dot{\beta}_i = \| \dot{Q}_{ri}(t^r) - \dot{Q}_{hi}(t^h) \| / \Delta \dot{Q}_{ri}(t^r)$  表示时间上相似性;  $\Delta Q_{ri}(t^r) = |Q_{ri}(t^r)_{max} - Q_{ri}(t^r)_{min}|$  表示仿人机器人第  $i$  个关节角在采样点的最大值与最小值的差;  $\Delta \dot{Q}_{ri}(t^r) = |\dot{Q}_{ri}(t^r)_{max} - \dot{Q}_{ri}(t^r)_{min}|$  表示仿人机器人第  $i$  个关节角速度在采样点的最大值与最小值的差;  $Q_{ri}(t^r) = [q_{ri}(t^r_1), q_{ri}(t^r_2), \dots, q_{ri}(t^r_k)]^T$  表示仿人机器人在运动学和稳定性调节后第  $i$  个关节角在采样点取值;  $Q_{hi}(t^h) = [q_{hi}(t^h_1), q_{hi}(t^h_2), \dots, q_{hi}(t^h_k)]^T$  表示人体第  $i$  个关节角在采样点取值.  $K_i$  是每个关节对相似性的影响比例系数,  $n$  是自由度数目.  $\alpha$  是指权重,  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

相似性函数第一项体现了空间上静态动作的相似性, 第二项体现了动态的节奏和韵律相似性. 如果  $\alpha = 1$ , 那么相似性函数只是体现了静态的相似性;  $\alpha = 0$  则只体现了动态韵律上的相似. 对于不同的运动形式,  $\alpha$  的取值也不同. 比如像太极这种舒缓匀速的动作,  $\alpha$  的取值偏大; 但像刀术这种快速的动作, 节奏性很强,  $\alpha$  的取值偏小.  $0 \leq S_j \leq 1$ ,  $S_j$  越大, 表明相似性越高,  $S_j = 1$  表明仿人机器人的动作达到了与人最大的相似.

基于以上分析, 满足运动学约束和动力学稳定性的条件下, 高度相似的仿人机器人运动可以归结为以下问题

$$\max S_j(Q_{ri}, Q_{hi}) \quad (8)$$

其中,  $S_j(Q_{ri}, Q_{hi})$  是相似性函数,  $(Q_{ri}, Q_{hi})$  应满足 (1), (2), (3) 和 (6) 的约束条件. 为了求解 (8) 式, 提出了以下算法, 如图 8 所示. 最后, 在保证稳定性的前提下, 选择具有最高相似性值的轨迹进行仿人机器人实体实验.

## 5 仿真及实验

用仿人机器人 BHR-2 来验证方法的有效性, 机器人具体参数见表 2. 每个关节由具有谐波减速器的直流电机驱动, 32 个直流伺服电机由奔腾系列工业控制计算机集中控制. 工控机底板上有 4 个扩展板, 其中两个是负责 A/D, D/A 转换和计数, 另外一个为力传感器处理板, 还有一个是 Memolink (Memory link) 板, 负责与另外一台计算机通信. 操作系统采用 RT-Linux. 以仿人机器人 BHR-2 表演

中国功夫刀术进行实验验证, 为了防止机器人摔倒, 应用了实时传感反射控制<sup>[12, 13]</sup>.

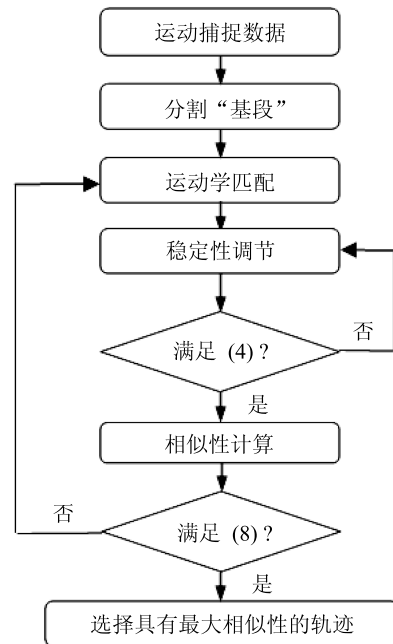


图 8 仿人机器人运动轨迹求解算法

Fig. 8 Algorithm for humanoid motion

表 2 仿人机器人参数

Table 2 Parameters of humanoid robot

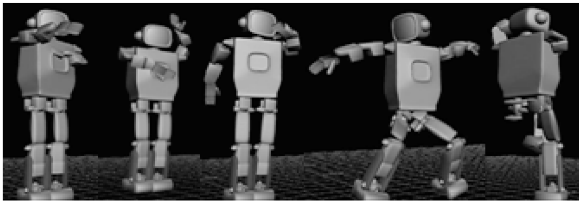
参数	头	躯干	臂	大腿	小腿	足
长度 (cm)	22	54.1	54	31.5	31.5	13.5
重量 (kg)	1.1	17.2	3.5	5.8	3.9	1.5

图 9(a) 是人体表演的部分刀术亮相动作; 图 9(b) 是经过运动学匹配后仿人机器人模型表演的对应刀术动作; 图 9(c) 是仿人机器人实体表演的刀术动作. 可以看出, 仿人机器人动作与人体动作相似. 图 10 是仿人机器人在没有考虑动力学稳定性之前的稳定裕度, 图中 ZMP 点有时落在稳定区域之外, 这样将导致机器人倾倒. 图 11 是稳定性调节后的稳定裕度, 可看出 ZMP 几乎位于稳定区域的中间地带, 这种情况下机器人才能稳定行走, 在某些点稳定裕度还是比较小, 这是因为此时刀术动作速度很快, 仿人机器人为了保证速度牺牲了稳定性. 图 12 是仿人机器人运动学匹配和稳定性调节前后下肢髋关节角轨迹的对比, 可以看出, 调节后关节角轨迹更加平滑, 超出关节范围的点经过处理后在关节角范围之内 (如点 a), 在角度变化剧烈的阶段, 通过改变运动的节奏, 放慢了速度. 在刀术动作收势时, 运动速

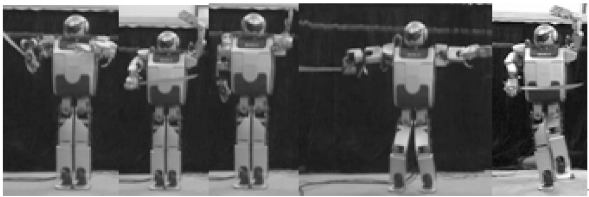
度比较慢,而且动作幅度小,这时关节角轨迹基本一致,相似性值接近为 1. 仿人机器人的刀术表演动作共分为 9 个动作“基段”,每个“基段”的相似性值如表 3 所示. 相似性函数中取  $\alpha = 0.4$ ,这是根据多次实验总结得到的. 整体动作的相似性可以通过对各个“基段”求平均得到. 可以看出有时相似性值会比较小,这是因为人体的某些动作不仅非常快,而且幅度很大,而仿人机器人的机械结构限制了自身的关节角范围,为了满足运动学约束和动力学稳定性,某些关键帧的动作已经做了修改. 在这种情况下,仿人机器人的动作会和人的动作有比较大的差异.



(a) 人体表演的刀术亮相动作



(b) 运动学匹配后,仿人机器人模型表演的刀术动作



(c) 仿人机器人表演的刀术动作

图 9 人和仿人机器人表演的刀术动作

Fig. 9 “sword” performed by human and humanoid robot

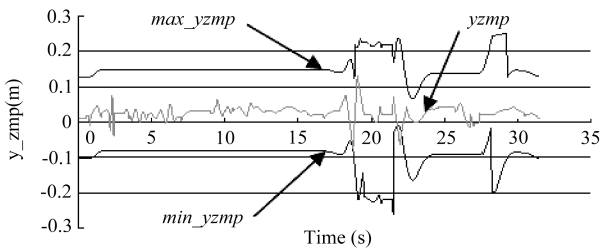


图 10 稳定性调节前  $y$  方向稳定裕度

Fig. 10 Stability margin without dynamic stability

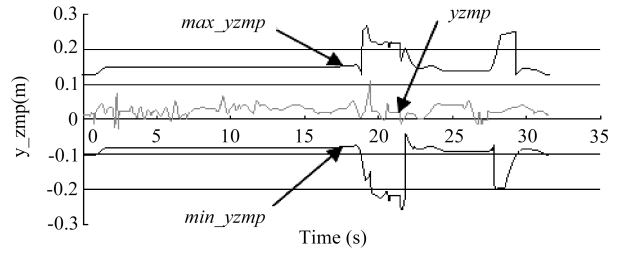


图 11 稳定性调节后  $y$  方向稳定裕度

Fig. 11 Stability margin considering dynamic stability

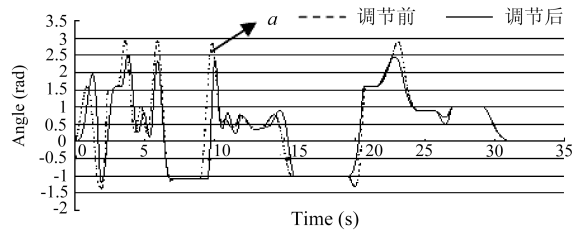


图 12 运动学匹配和稳定性调节前后关节角轨迹对比图

Fig. 12 Comparison of angle trajectory between with and without kinematics mapping and stability adjustment

表 3 每个“基段”相似性值

Table 3 Similarity in each primitive motion

“基段”	相似性值 ( $S_j$ )	重复次数	平均 (S)
刺刀	0.821	2	0.730
缠头裹脑	0.673	2	
藏刀	0.743	2	
撩刀	0.566	3	
甩刀	0.772	2	
劈刀	0.714	1	
架刀	0.685	1	
金鸡独立	0.643	1	
收势	0.963	2	

## 6 结论

在本文中,主要讨论了考虑节奏相似性的仿人机器人复杂动态动作的设计方法,主要结论如下.

- 1) 提出了基于“基段”的运动轨迹产生方法.
- 2) 推导了考虑节奏的相似性函数,并且提出了满足运动学约束和动力学稳定性,具有高相似性的仿人机器人动作设计方法.
- 3) 通过仿人机器人 BHR-2 表演中国功夫刀术验证了方法的有效性.

## References

- 1 Mori T, Tsujioka K, Sato T. Human-like action recognition system on whole body motion-captured file. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and System. IEEE, 2001. 2066~2073
- 2 Moldenhauer J, Boesnach I, Beth T. Analysis of human motion for humanoid robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 312~317
- 3 Kanehiro F, Inaba M, Inoue H. Action acquisition framework for humanoid robots based on kinematics and dynamics adaption. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1999. 1038~1043
- 4 Pollard S, Hondgins J, Riley M J, Atkeson C. Adapting human motion for the control of a humanoid robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2002. 1390~1397
- 5 Yamane K, Nakamura Y. Dynamics filter-concept and implementation of on-line motion generator for human figures. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2000. 688~695
- 6 Nakaoka S, Nakazawa A, Yokoi K, Hirukawa H, Ikeuchi K. Generating whole body motion for a biped humanoid robot from captured human dances. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 3905~3910
- 7 Nakazawa A, Nakaoka S, Ikeuchi K. Matching and blending human motions using temporal scaleable dynamic programming. In: Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 287~294
- 8 Ruchanurucks M, Nakalka S, Kudoh S, Ikeuchi K. Generation of humanoid robot motions with physical constraints using hierarchical B-spline. In: Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 674~679
- 9 Noritata K, Kato S, Yamakita T, Itoh H. A motion generation system for humanoid robots-taiji motion. In: Proceedings of International Symposium Micromechatronics and Human Science. 2003. 265~269
- 10 Zhao Xiao-Jun, Huang Qiang, Peng Zhao-Qin, Zhang Li-Ge. Kinematics mapping of humanoid motion based on human motion. *Robot*, 2005, 4: 358~361  
(赵晓军, 黄强, 彭朝琴, 张利格. 基于人体运动的仿人型机器人动作的运动学匹配. *机器人*, 2005, 4: 358~361)
- 11 Vukobratovic M, Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1969, BME-16(1): 1~6
- 12 Hunag Q, Nakamura Y. Sensory reflex control for humanoid walking. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(5): 977~984
- 13 Huang Q, Yokoi K, Kajita S, Kaneko K, Arai H, Koyachi N, Tanie K. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280~289



**张利格** 北京理工大学智能机器人研究所博士研究生. 研究方向为机器人技术和运动规划. 本文通信作者.

Email: ligezhang@eyou.com

(**ZHANG Li-Ge** Ph.D. candidate at Beijing Institute of Technology. Her research interest covers robotics technology and motion planning. Corresponding author of this paper.)



**黄强** 北京理工大学教授、博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授, 研究方向为机器人技术和仿生技术.

(**HUANG Qiang** Professor at Beijing Institute of Technology. His research interest covers robotics technology and bionics technology.)



**杨洁** 北京理工大学智能机器人研究所博士研究生. 研究方向为机器人技术和运动规划.

(**YANG Jie** Ph.D. candidate at Beijing Institute of Technology. Her research interest covers robotics technology and motion planning.)



**时有** 北京理工大学智能机器人研究所硕士研究生. 研究方向为机器人技术和运动规划.

(**SHI You** Master student at Beijing Institute of Technology. His research interest covers robotics technology and motion planning.)



**王志杰** 北京理工大学智能机器人研究所硕士研究生. 研究方向为机器视觉和运动规划.

(**WANG Zhi-Jie** Master student at Beijing Institute of Technology. His research interest covers machine vision and bionics technology.)



**JAFRI Ali Raza** 北京理工大学智能机器人研究所博士研究生. 研究方向为机器人技术和运动规划.

(**JAFRI Ali Raza** Ph.D. candidate at Beijing Institute of Technology. His research interest covers robotics technology and motion planning.)