

# 仿人机器人复杂动作设计中人体运动数据提取及分析方法

张利格<sup>1</sup> 毕树生<sup>1</sup> 高金磊<sup>1</sup>

**摘要** 提出了仿人机器人复杂动作设计中人体运动数据提取及分析方法. 首先, 通过运动捕捉系统获取人体运动数据, 并采用运动重定向技术, 输出人-机简化模型的数据; 然后, 对运动数据进行分析 and 运动学解算, 给出基于人体运动数据的仿人机器人逆运动学求解方法, 得到仿人机器人模型的关节角数据; 再经过运动学约束和稳定性调节后, 生成能够应用于仿人机器人的运动轨迹. 最终, 通过在仿人机器人 BHR-2 上进行刀术实验验证了该方法的有效性.

**关键词** 仿人机器人, 运动捕捉, 人-机简化模型, 数据提取及分析, 逆运动学求解

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2010.00107

## Human Motion Data Acquiring and Analyzing Method for Humanoid Robot Motion Designing

ZHANG Li-Ge<sup>1</sup> BI Shu-Sheng<sup>1</sup> GAO Jin-Lei<sup>1</sup>

**Abstract** The methods of human motion data acquiring and analyzing for humanoid robot based on human motion capture are presented in this paper. Firstly, human motion data are obtained through a motion capture system, and the data of simplified human-humanoid model are outputted using motion redirection technique. Secondly, inverse kinematic solving method of humanoid robot based on human motion data is presented, and the joint angle of humanoid robot is obtained. Thirdly, motion trajectory adapting to humanoid robot is obtained after kinematic constraints and stability adjustment. Finally, the effectiveness of the proposed method is illustrated by simulations and experiments of Chinese Kungfu "sword" using a 32 DOF (Degree of freedom) humanoid robot.

**Key words** Humanoid robot, motion capture, simplified human-humanoid model, data acquiring and analyzing, inverse kinematics solving

人们希望仿人机器人能够像人类一样做复杂、灵活的动作, 只有这样, 才能完成与人类协同作业或者代替人类作业的使命. 但是, 对于人类的复杂动作, 如人类舞蹈和体育运动等, 采用建立运动解析方程并求解运动轨迹的方法进行全身动作设计难度极大, 运动方程解析式不仅复杂, 建立困难, 而且有时难以求解, 甚至无解, 可操作性很差. 基于这些原因, 产生了基于人体运动数据的仿人机器人动作设计方法. 目前, 这种方法已成为实现仿人机器人的复杂动作设计的有效手段.

运动捕捉是一项在国际上广泛应用的高新技术, 目前应用于动画制作、体育训练、康复医疗、虚拟现实等许多领域<sup>[1-2]</sup>. 随着计算机、传感器等相关技术上的飞速发展, 运动捕捉技术日趋完善, 进入了实用化阶段, 其应用范围也越来越广. 同时也进入到机器人领域, 被用来进行机器人的运动规划、遥操作、人机工程学等方面的研究. 尤其在仿人机器人复杂动作设计方面, 体现出了较高的应用价值.

Takano 等<sup>[3]</sup> 提出了通过捕捉到的人体动作特征符号来进行动作模式划分、动作识别及仿人机器人动作生成, 进而建立运动模式数据库的方法. Kim 等<sup>[4]</sup> 通过捕捉人体上肢运动, 提出了表征人体上肢运动的数学表示方法, 应用此方法能够使仿人机器人做出与人体上肢相似的运动. Nakazawa 等<sup>[5-6]</sup> 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, 也研究了通过动作捕捉系统来获取人体运动, 并根据动作特征进行分解, 最终合成仿人机器人写实风格动作的方法. Yamane 等<sup>[7-8]</sup> 通过捕捉人体运动数据, 研究了仿人机器人的步态动力学仿真和基于人体运动数据的仿人机器人全身动作设计方法, Pollard 等<sup>[9]</sup> 通过捕捉演员的舞蹈动作, 提出了满足机器人的关节运动范围、运动速度等的解决方法, 实现了仿人机器人上半身的舞蹈表演. Nakaoka 等<sup>[10-11]</sup> 提出了一种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. 在文献 [12-13] 中作者提出了基于运动捕捉系统的仿人机器人动作设计方法, 可以实现与人体运动相似的仿人机器人动作.

在上述基于人体运动捕捉系统的仿人机器人动作设计中, 大部分研究工作的重点是在运动捕捉数据与仿人机器人模型的运动学匹配和动力学匹配方

收稿日期 2008-10-24 录用日期 2009-07-28  
Manuscript received October 24, 2008; accepted July 28, 2009  
教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-06-0165) 资助  
Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-06-0165)

1. 北京航空航天大学机器人研究所 北京 100191  
1. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191

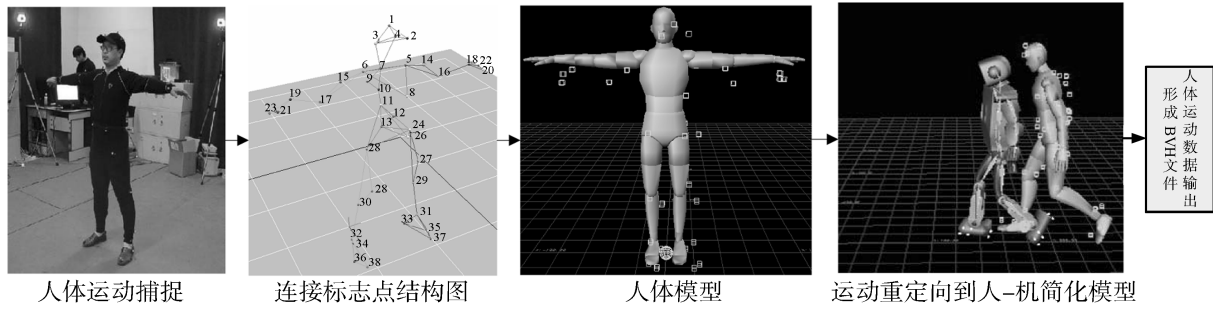


图1 人体运动数据提取过程

Fig. 1 Process of human motion data acquiring

面,而对于运动捕捉数据的前期分析与处理工作却鲜有报道.由于运动捕捉系统下的坐标系设置、关节角度定义等与仿人机器人模型不同,所以捕捉到的数据与仿人机器人进行运动学匹配所需要的关节数据还有很大差距.因此,在运动学匹配前,对运动捕捉数据进行分析 and 处理,利用已有信息得到能够应用于仿人机器人的关节数据,为运动学和动力学匹配提供最逼真和可靠的数据源,对于实现与人体动作高度相似的仿人机器人动作设计具有重要意义.为此,本文提出了基于运动捕捉系统的仿人机器人复杂动作设计中人体运动数据提取及分析方法,应用运动重定向技术实现从人体运动数据到仿人机器人的映射,并给出了基于人体运动数据的仿人机器人逆运动学求解方法.最终得到适用于仿人机器人的关节角数据.经过运动学和动力学匹配后,通过实验验证了方法的正确性.

## 1 系统介绍

采用美国 Motion Analysis 公司的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 12 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,精度可达到 0.2mm.通过运动捕捉系统提取人体运动数据的过程如图 1 所示.

## 2 人体运动数据提取

人体的运动姿态是相邻肢体间不同空间角度的组合,所以人体运动姿态检测的关键就是相邻肢体间相对空间角度的检测.光学运动捕捉系统得到的是标志点的空间坐标,这并不能用于仿人机器人动作设计,必须从捕捉到的运动数据中提取有用的关节角数据.

### 2.1 人-机简化模型建模

人体实际模型的关节运动相互耦合,运动关节

多达几百个,而仿人机器人的每条腿或臂的关节数一般只有 6 个,所以必须要建立人体模型和仿人机器人模型间的对应关系.通过对人体运动机理研究发现,完成人体基本运动的模型可以简化成由几十个关节组成.在运动捕捉系统内部,通过对人体运动模型进行简化,得到与仿人机器人模型具有相同关节数目的简化模型,这里称之为与仿人机器人相适应的简化人体模型,简称人-机简化模型,这样就可以建立起模型之间的运动学对应关系.人-机简化模型通过 MaYa 软件来建造,它具有与仿人机器人实体相同的自由度数目和关节结构,骨骼长度也和仿人机器人实体对应部位几何长度相等,建模时根据人体实际模型的特点,采用层次结构,用以反映关节间的相互耦合关系.图 2 所示为人-机简化模型和人-机简化模型的骨架结构.

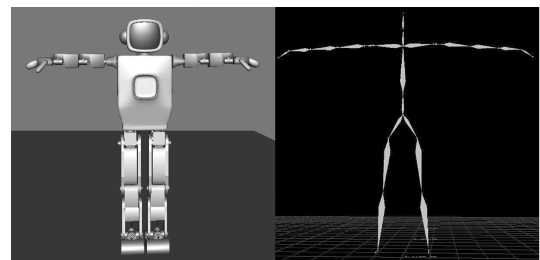


图2 人-机简化模型和人-机简化模型骨架结构

Fig. 2 Simplified human-robot model and the skeleton structure

### 2.2 运动重定向及输出 BVH 文件

运动重定向的概念最初来自关节动画的制作.它能将一个角色的动画赋给另一个具有相同关节结构但具有不同关节长度的角色,并保持原有动画的质量,因而非常适合运动捕捉动画重用的处理.本文利用动画制造专业软件 FilmBox,采用运动重定向的方法,使运动捕捉系统得到的人体标识点的运动轨迹重定向到人-机简化模型上,如图 1,从而完成了人体运动数据到人-机简化模型的映射,最终输出生物视觉等级数据 (Bio vision hierarchical data,

BVH) 文件, 其中记录了完整的骨骼模型信息以及每帧详细的关节动作信息. 数据包含两部分, 一部分描述了骨骼间的“父子关系”及骨骼的初始姿态, 如图 3(a); 另一部分描述了每帧各关节的关节角运动数据, 如图 3(b). 采用“子关节”局部坐标系相对于“父关节”局部坐标系的欧拉角表示, 欧拉角的次序为 ZXY.

```

HIERARCHY
ROOT Hips
{
  OFFSET 0.00 0.00 0.00
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Xrotation Yrotation
  JOINT Chest
  {
    OFFSET 0.000000 6.275751 0.000000
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT Neck
    {
      OFFSET 0.000000 14.296947 0.000000
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    }
  }
}

MOTION
Frames: 2
Frame Time: 0.04166667
-9.533684 4.447926 -0.566564 -7.757381 -1.735414 89.207932 9.763572
6.289016 -1.825344 6.106647 3.976997 -3.706973 -6.474916
-14.391472 -3.461282 16.504230 3.973544 -3.805107 22.204674
5.55497 -28.283911 6.862538 6.191492 4.448771 -16.592816
2.951538 -3.418231 7.634442 11.325822 5.149696 -23.069189
18.352753 -15.051558 7.514462 8.397663 2.953842 -7.213992
2.494318 -1.543455 2.970936 -25.086460 -4.195537 -1.752307
7.093068 -1.507232 2.633332 3.858087 0.258802 7.892136
12.803010 -28.692566 2.151862 9.164188 8.006427 -5.641034
-12.596124 4.366460
-8.489557 4.285263 -0.621559 8.244940 -1.784412 90.041962 8.849357
5.557910 -1.926571 5.487280 4.119726 -4.714622 -5.790886
-15.218462 -3.167648 15.823254 3.871795 -4.378940 22.399654
2.244878 -29.421873 6.918557 6.131992 4.521327 -18.013180
3.059388 -3.768287 8.079588 10.124812 5.808083 -22.417845
-15736264 -18.827469 8.070700 9.689109 2.417364 -7.600882
2.505005 -1.625679 2.430162 -27.579708 -3.852241 -1.8.0524
12.520144 -1.653632 2.688550 4.545600 0.296320 8.031574
13.837914 -28.922058 2.077955 -9.176716 7.166249 -5.170825
-13.914465 4.369435
  
```

(a) BVH 文件数据第一部分

(a) First part of BVH file

-9.533684	4.447926	-0.566564	-7.757381	-1.735414	89.207932	9.763572
6.289016	-1.825344	6.106647	3.976997	-3.706973	-6.474916	
-14.391472	-3.461282	16.504230	3.973544	-3.805107	22.204674	
5.55497	-28.283911	6.862538	6.191492	4.448771	-16.592816	
2.951538	-3.418231	7.634442	11.325822	5.149696	-23.069189	
18.352753	-15.051558	7.514462	8.397663	2.953842	-7.213992	
2.494318	-1.543455	2.970936	-25.086460	-4.195537	-1.752307	
7.093068	-1.507232	2.633332	3.858087	0.258802	7.892136	
12.803010	-28.692566	2.151862	9.164188	8.006427	-5.641034	
-12.596124	4.366460					
-8.489557	4.285263	-0.621559	8.244940	-1.784412	90.041962	8.849357
	5.557910	-1.926571	5.487280	4.119726	-4.714622	-5.790886
	-15.218462	-3.167648	15.823254	3.871795	-4.378940	22.399654
	2.244878	-29.421873	6.918557	6.131992	4.521327	-18.013180
	3.059388	-3.768287	8.079588	10.124812	5.808083	-22.417845
	-15736264	-18.827469	8.070700	9.689109	2.417364	-7.600882
	2.505005	-1.625679	2.430162	-27.579708	-3.852241	-1.8.0524
	12.520144	-1.653632	2.688550	4.545600	0.296320	8.031574
	13.837914	-28.922058	2.077955	-9.176716	7.166249	-5.170825
	-13.914465	4.369435				

(b) BVH 文件数据第二部分

(b) Second part of BVH file

图 3 BVH 文件数据

Fig. 3 BVH file

### 3 人体运动数据分析与解算

获取的人体运动数据不能直接应用到仿人机器人, 原因如下:

- 1) 在对人-机简化模型建模时定义了骨骼各关节的局部坐标和绝对坐标系, 如图 4 所示, 可以看出与仿人机器人的参考坐标系完全不同, 如图 5 所示;
- 2) BVH 数据文件中的关节角度是每一帧“子关节”局部坐标系相对于“父关节”局部坐标系的欧拉角, 而机器人运动控制中所用的关节角为笛卡儿坐标系下关于自身局部坐标系转过的角度.

鉴于以上原因, 必须将 BVH 文件中的数据转换为适合仿人机器人模型的数据, 才能进行下一步的运动学匹配工作. 由于人-机简化模型具有与仿人机器人实体相同的自由度数和关节结构, 骨骼长度也和仿人机器人实体对应部位几何长度相等. 所以, 若想使提取出的人体运动数据能用于仿人机器人, 可以通过关节节点的绝对空间坐标来匹配人-机简化模型与仿人机器人模型间的运动数据. 首先运用欧拉角变换方法将 BVH 文件中的数据转换成人-机简化模型各关节节点的绝对空间坐标; 然后, 利用

已求得的节点绝对空间坐标, 通过逆运动学方法解算出仿人机器人各关节角.

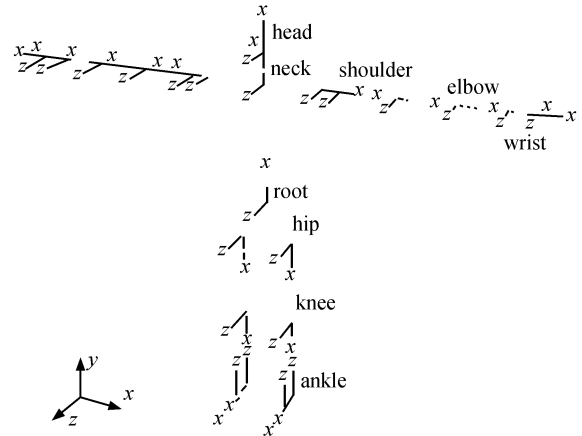


图 4 人-机简化模型的局部坐标系

Fig. 4 Local coordinates of simplified human-robot model

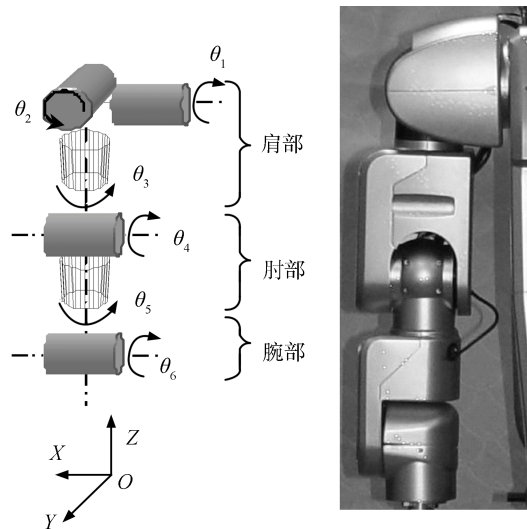


图 5 仿人机器人手臂自由度示意图

Fig. 5 Sketch map of humanoid robot arm's DOF

#### 3.1 求解人-机简化模型关节节点空间坐标

人-机简化模型各关节的局部坐标系及绝对坐标系如图 5 所示. 根据欧拉角的表示方法, “子关节”局部坐标系相对于“父关节”局部坐标系的旋转矩阵为

$$R = Rot(z, \theta_z)Rot(x, \theta_x)Rot(y, \theta_y) \quad (1)$$

式中,  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别表示绕  $X, Y, Z$  轴的旋转角度. “子关节”相对于“父关节”沿  $X, Y, Z$  轴的平移用  $T_x, T_y, T_z$  来表示, 则“子关节”相对于“父关节”的转换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设齐次坐标  $\mathbf{v}_{i+1}$  为“子关节”在自身局部坐标系中的坐标, 齐次坐标  $\mathbf{v}_i$  为“子关节”在“父关节”局部坐标系中的坐标, 则有

$$\mathbf{v}_i = M\mathbf{v}_{i+1} \quad (3)$$

若要求出各关节相对于世界坐标系的空间坐标, 可依此类推.

例如, 右臂腕关节的绝对坐标为

$$\mathbf{v}_w = M_{\text{root}}M_{\text{neck}}M_{\text{shoulder}}M_{\text{elbow}}M_{\text{wrist}}\mathbf{v}_o \quad (4)$$

式中,  $M_{\text{root}}$  为根关节相对于绝对坐标系的转换矩阵,  $M_{\text{neck}}$  为颈部相对于根关节的转换矩阵,  $M_{\text{shoulder}}$  为肩部相对于颈部的转换矩阵,  $M_{\text{elbow}}$  为肘部相对于肩部的转换矩阵,  $M_{\text{wrist}}$  为腕部相对于肘部的转换矩阵.  $\mathbf{v}_o = [0, 0, 0, 1]^T$  是关节在其局部坐标系下的位置矢量.

同理, 可求得肩关节的绝对坐标  $\mathbf{v}_s$ , 肘关节的绝对坐标  $\mathbf{v}_e$ .

### 3.2 仿人形机器人关节角解算

以右臂为例, 利用上面解算出的人-机简化模型关节的空间坐标, 结合逆运动学求解方法, 解算出仿人机器人模型的关节角数据. 仿人机器人的每只手臂有 6 个自由度, 肩部 3 个, 肘部 2 个, 腕部 1 个, 分别用  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  来表示六个关节角, 这六个关节角都是相对初始姿态转过的角度, 如图 6 所示. 设定机器人手臂的初始姿态为: 大臂由肩垂直向下. 关节的运动范围见表 1.

表 1 仿人机器人上肢各关节运动范围

Table 1 Joint angle ranges of humanoid robot arm

关节角(度)	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
最大值	180	10	90	90	90	90
最小值	-90	-120	-90	0	-90	-90

设  $\mathbf{e}_6$  为腕关节在局部坐标系中的坐标, 则臂的末端(腕)相对于绝对坐标系的坐标为

$$\mathbf{P}_6 = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)A_4(\theta_4)A_5(\theta_5)A_6(\theta_6)\mathbf{e}_6 \quad (5)$$

其中,  $A_i(\theta_i)$  描述连杆间的转换矩阵.

由于人-机简化模型具有与仿人机器人模型相同的自由度数目和关节结构, 骨骼长度也和仿人机器人模型对应部位几何长度相等, 所以其对应的关

节空间坐标也相等. 但求得的人-机简化模型关节点空间坐标是相对于其自身绝对坐标系的, 需转化到仿人机器人模型绝对坐标系下的空间坐标, 转换矩阵为

$$R_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则有

$$\mathbf{P}_6 = R_0\mathbf{v}_w \quad (7)$$

同理, 可得肘关节相对于绝对坐标系的坐标为

$$\mathbf{P}_4 = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)A_4(\theta_4)\mathbf{e}_4 \quad (8)$$

肩关节相对于绝对坐标系的坐标为

$$\mathbf{P}_3 = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)\mathbf{e}_3 \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{e}_4, \mathbf{e}_3$  分别为肘关节和肩关节在其自身局部坐标系中的坐标.

通过捕捉到的人体运动数据, 求得人-机简化模型肘关节和肩关节的坐标为

$$\mathbf{v}_e = M_{\text{root}}M_{\text{neck}}M_{\text{shoulder}}M_{\text{elbow}}\mathbf{v}_o \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_s = M_{\text{root}}M_{\text{neck}}M_{\text{shoulder}}\mathbf{v}_o \quad (11)$$

同理, 有

$$\mathbf{P}_4 = R_0\mathbf{v}_e \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_3 = R_0\mathbf{v}_s \quad (13)$$

结合肢体间的几何约束条件

$$f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \quad (14)$$

将式 (7), (12)~(14) 联立, 可求得仿人机器人的六个关节角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ .

## 4 仿人机器人动作生成

求得的关节角数据仍不能直接应用在仿人机器人上, 这是由于仿人机器人模型与人体模型的运动学约束不同, 要通过运动学匹配将获取的人体动作数据转化为满足运动学约束的仿人机器人运动数据<sup>[12]</sup>. 机器人上肢在空中运动, 其运动学约束条件只包括关节范围, 自由度的数目以及肢体间避免发生干涉. 由于仿人机器人脚与地面之间接触, 因此下肢动作的运动学约束条件除了以上几个方面外, 还必须包括地面接触约束条件, 它是影响仿人机器人稳定性的关键因素. 稳定性调节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. 运动学匹配和稳定性调节完成后, 最终得到仿人机器

人运动轨迹, 具体方法见文献 [12–13]. 仿人机器人动作生成的过程如图 6 所示.

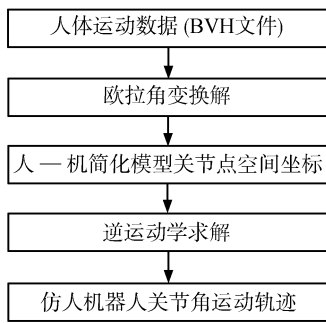


图 6 仿人机器人动作生成过程

Fig. 6 The procedure of humanoid robot motion data acquiring

## 5 实验

用仿人机器人 BHR-2<sup>[14]</sup> 来验证方法的有效性, 它具有 32 个自由度, 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 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.

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 (mm)	220	541	540	315	315	135
质量 (kg)	1.1	17.2	3.5	5.8	3.9	1.5

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. 图 7 (a) 为武术运动员表演的刀术动作中的关键姿势. 图 7 (b) 为对应的经过运动重定向之后人-机简化模型的关键姿势. 对比图 7 (a) 和图 7 (b) 可知, 得出人-机简化模型的动作可以表现出刀术动作的主要动作特征, 能够实现相当接近人体的动作. 图 7 (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.

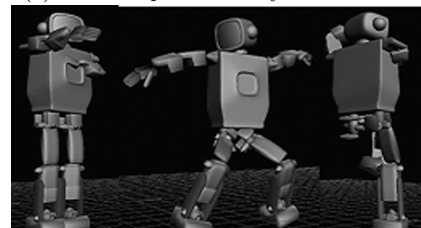
以仿人机器人右臂肩关节为例, 图 8 中实线为采用本文方法得到的右臂肩  $X$  方向关节角轨迹, 可以看出, 轨迹平滑连续, 为可用数据. 但是由于仿人机器人与人体模型的运动学约束不同, 此关节角轨迹还不能直接应用于仿人机器人. 经过运动学匹配和稳定性调节后, 关节角轨迹更加平滑, 并且超出关节范围的点经过处理后在关节角范围之内 (如点  $a$ ); 在角度变化剧烈的阶段, 通过改变运动的节奏, 放慢

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, 与人体动作非常接近.



(a) 人体表演的刀术动作

(a) "Sword" performed by human actor



(b) 人-机简化模型表演的刀术动作

(b) "Sword" performed by model



(c) 仿人机器人表演的刀术动作

(c) "Sword" performed by humanoid robot

图 7 人和仿人机器人表演的刀术动作

Fig. 7 "Sword" performed by human actor and humanoid robot

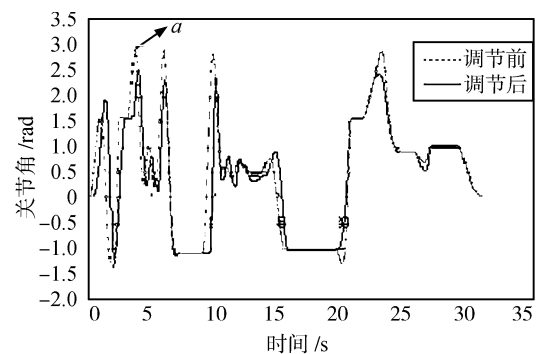


图 8 运动学匹配和稳定性调节前后肩关节轨迹对比图

Fig. 8 Comparison of angle trajectories with and without kinematics mapping and stability adjustment

## 6 结论

本文主要讨论了基于运动捕捉系统的仿人机器人复杂动作设计中人体运动数据提取及分析方法, 主要结论如下:

1) 采用运动捕捉系统获取的人体运动数据不能直接应用到仿人机器人, 与进行运动学匹配所需要的关节数据还有很大差距, 需对运动捕捉数据进行分析 and 处理。

2) 通过建立人-机简化模型使人体的运动数据映射到仿人机器人, 提出了基于人体运动数据的仿人机器人逆运动学求解方法, 得到仿人机器人的关节角轨迹。

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。

## 致谢

感谢北京理工大学智能机器人研究所黄强教授对研究工作的指导和支持。

## References

- 1 Ji Bai-Hua, Yuan Xiu-Gan, Wen Wen-Biao. Interactive method and experiment in 3D human motion data abstraction. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2000, **26**(1): 91–94  
(季白桦, 袁修干, 温文彪. 三维人体运动数据提取的人机交互方法及实验. 北京航空航天大学学报, 2000, **26**(1): 91–94)
- 2 Zhuang Yue-Ting, Liu Xiao-Ming, Pan Yun-He, Yang Jun. 3D human skeleton reconstruction from motion image sequence. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2000, **12**(4): 245–251  
(庄越挺, 刘小明, 潘云鹤, 杨骏. 运动图像序列的人体三维运动骨架重建. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, **12**(4): 245–251)
- 3 Takano W, Yamane K, Nakamura Y. Capture database through symbolization, recognition and generation of motion patterns. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007. 3092–3097
- 4 Kim S, Kim C H, Park J H. Human-like arm motion generation for humanoid robots using motion capture database. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2006. 3486–3491
- 5 Nakazawa A, Nakaoka S, Ikeuchi K. Matching and blending human motions using temporal scaleable dynamic programming. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Osaka, Japan: IEEE, 2004. 287–294
- 6 Nakazawa A, Nakaoka S, Shiratori T, Ikeuchi K. Analysis and synthesis of human dance motions. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. Washington D. C., USA: IEEE, 2003. 83–88
- 7 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*. San Francisco, USA: IEEE, 2000. 688–694
- 8 Nakazawa A, Nakaoka S, Ikeuchi K, Yokoi K. Imitating human dance motions through motion structure analysis Intelligent robots and system. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2004. 2539–2544
- 9 Pollard N S, Hodgins J K, Riley M J, Atkeson C G. Adapting human motion for the control of a humanoid robot. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brown, USA: IEEE, 2002. 1390–1397
- 10 Nakaoka S, Nakazawa A, Yokoi K, Hirukawa H, Ikeuchi K. Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dance. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, China: IEEE, 2003. 3905–3910
- 11 Nakaoka S, Nakazawa A, Yokoi K, Ikeuchi K. Leg motion primitives for a dancing humanoid robot. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Tokyo, Japan: IEEE, 2004. 610–615
- 12 Zhang L G, Huang Q, Lv S S, Shi Y, Wang Z J, Jafri A R. Humanoid motion design considering rhythm based on human motion capture. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2006. 2491–2496
- 13 Huang Q, Peng Z Q, Zhang W M, Zhang L G, Li K J. Design of humanoid complicated dynamic motion based on human motion capture. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada: IEEE, 2005. 3536–3541
- 14 Wang G, Huang Q, Geng J H, Deng H B, Li K J. Cooperation of dynamic patterns and sensory reflex for humanoid walking. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, China: IEEE, 2003. 2472–2477



**张利格** 北京航空航天大学机器人研究所博士后。2004 年获北京理工大学机电学院博士学位。主要研究方向为仿生机器人, 运动规划和动力学分析。本文通信作者。E-mail: zhanglige@buaa.edu.cn  
(ZHANG Li-Ge Postdoctor at the Robotics Institute, Beihang University. She received her Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2004. Her research interest covers biomimetic robot, motion planning, and dynamic analysis. Corresponding author of this paper.)



**毕树生** 北京航空航天大学机器人研究所教授。主要研究方向为仿生机器人、微操作机器人和全柔性机构。E-mail: ssbi@buaa.edu.cn  
(BI Shu-Sheng Professor at the Robotics Institute, Beihang University. His research interest covers biomimetic robot, micromanipulator, and full compliant mechanism.)



**高金磊** 北京航空航天大学机器人研究所硕士研究生。主要研究方向为机器人技术。E-mail: jlgao@buaa.edu.cn  
(GAO Jin-Lei Master student at the Robotics Institute, Beihang University. His main research interest is robotics technology.)