

一种人体运动重定向方法*

瞿 师¹, 冯晓萌¹, 于荣欢¹, 魏迎梅¹, 吴玲达^{1,2}

(1. 国防科学技术大学 信息系统工程重点实验室, 长沙 410073; 2. 装备指挥技术学院, 北京 101400)

摘 要: 提出人体下肢向量的概念,通过分析人体运动指出下肢向量能保持运动的主要特征,由此提出基于下肢向量特征不变性的人体运动重定向方法,以此提高运动捕获数据的可重用性。该方法面向人体下肢的运动重定向,能够将运动数据从原始骨骼模型重定向到具有不同骨骼长度比例的目标骨骼模型,同时保持原始运动的主要特征。实验结果表明,该方法具有较好的运动重定向效果和较快的计算效率。

关键词: 下肢向量; 人体运动; 重定向; 运动特征

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1353-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.042

Retargeting for human motion

QU Shi¹, FENG Xiao-meng¹, YU Rong-huan¹, WEI Ying-mei¹, WU Ling-da^{1,2}

(1. Science & Technology on Information System Engineering Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Equipment Command Technology, Beijing 101400, China)

Abstract: This paper presented the concept of human lower limbs vector, which could retain the primary feature of motion. After that, it presented a method of human motion retargeting based on fixity of lower limbs vector feature to reuse the existing motion capture data better. This motion retargeting method oriented human lower limbs, which retargeted the motion data from original human skeleton model to target human skeleton model which had different bone length. The retargeted motion retained the primary feature of original motion. The results of experiment show that this method has good motion retargeting effect and high computing efficiency.

Key words: lower limbs vector; human motion; retargeting; motion feature

0 引言

基于数据驱动的人体运动生成方法具有容易实现、生成的运动逼真度高等优点。基于数据驱动的人体运动生成的关键在于运动数据的获取,常用的方法是运动捕获方法,该方法通过运动捕获设备捕获表演者的运动信息。运动数据具有很强的针对性,一段给定的运动数据往往绑定于一个固定拓扑结构和骨骼长度的人体骨骼模型,当用该运动数据驱动其他人体骨骼模型时便会发生运动失真现象。运动数据的这一特性制约了其广泛应用,因为不可能对所有不同骨骼长度的人体进行运动捕获。为了解决这一问题,人们开始研究运动数据的处理技术,希望能够对原始人体骨骼模型的运动数据进行处理,使其能够正确驱动目标人体骨骼模型,并保持主要的运动特征,这就是运动重定向技术。

根据求解思路的不同,运动重定向的实现方法可以分为基于逆向运动学(inverse kinematics, IK)、时空约束和物理约束的方法。基于 IK 的方法是最基本的运动编辑技术^[1],其基本思路是首先根据运动捕获数据以及目标骨骼模型和原始骨骼模型的关系,确定目标骨骼模型末端效应器的位置约束,然后由 IK 求解器反算出中间关节的运动数据,从而得到新的运动。Gleicher^[2]将时空约束方法应用于运动重定向,设计了一个时

空约束求解器,通过优化求解,避免了大量的计算时间,提高了问题的求解速度,并保持了原运动的质量。以上运动重定向方法往往只考虑人体运动的几何位置约束,而没有去考虑物理约束,所以不适合于像跳跃、拳击、乒乓球等具有高度动态性能的运动。Tak 等人^[3]认为平衡是使得人体运动自然和真实的重要物理特性,并提出运动平衡滤波方法,他们认为平衡约束是重要的物理约束。Pullen 等人^[4]扩展了物理约束的范围,除了平衡约束还包括力矩约束和动量约束,并将运动重定向转换为基于逐帧卡尔曼滤波的约束状态估计问题。Tak 等人^[5]进一步添加了动力学和运动学约束,使用卡尔曼滤波器实现了基于物理的运动重定向方法,并对这一方法申请了美国国家专利。

1 人体下肢向量

在面向人体下肢的运动重定向过程中,为了保持运动的主要特征,本文提出人体下肢向量的概念。下肢向量是指从大腿根部指向脚跟的向量,具有长度和方向特征。下肢向量的长度为从大腿的根部到脚跟之间的距离,其方向为从大腿的根部指向脚跟。如图 1 所示,下肢向量包括右下肢向量 R 和左下肢向量 L 。通过引入下肢向量可以将大腿和小腿看做一个整体进行研究,即一块长度可变的骨骼。在人体骨骼模型中,胯骨相对根节点的位置是固定不变的,当根节点和下肢向量 L 、 R

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2011-10-27 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61070140)

作者简介: 瞿师(1982-),男,湖南汨罗人,博士研究生,主要研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术(qushi@nudt.edu.cn);冯晓萌,男,硕士研究生,主要研究方向为虚拟现实技术、模式识别;于荣欢,男,湖南怀化人,博士研究生,主要研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术;魏迎梅,女,副教授,硕导,主要研究方向为虚拟现实技术、计算机图形学;吴玲达,女,教授,博导,主要研究方向为多媒体技术、计算机视觉。

确定后就能直接得出脚的位置,因此下肢向量建立了脚和根节点的直接位置关系,使调整脚的位置更加直观简便,同时也方便了从脚的位置反算出根节点的位置。同时,下肢向量 L 和 R 的长度与方向确定后,可以使用几何方法很容易地计算大腿和小腿的关节旋转角度。

2 算法原理

对于第一类运动,当目标骨骼模型与原始骨骼模型具有相同的骨骼长度比例时,可以将运动数据直接赋给目标骨骼模型,然后对目标骨骼模型的根节点进行平移就可以实现运动重定向而保持运动不失真。如图2所示,对一个行走运动数据进行重定向,其中较高的骨骼模型为原始骨骼模型,较矮的骨骼模型为目标骨骼模型。目标骨骼模型所有骨骼的长度均是原始骨骼模型对应骨骼的60%,即它们具有相同的骨骼长度比例。运动重定向时仅仅对根节点的全局位置进行了平移处理。由图2可以看出,运动重定向的效果较好。

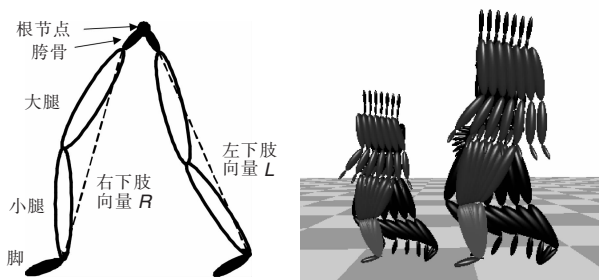


图1 下肢向量 图2 骨骼长度比例相同时的运动重定向

通常情况下,目标骨骼模型与原始骨骼模型并不具有相同的骨骼长度比例,运动重定向时如果只平移根节点的全局位置会产生失真现象,需要继续调整脚的位置。调整脚的位置可以通过调整下肢向量的长度和方向来实现。调整下肢向量的方法是保持下肢向量特征不变。在运动重定向过程中,下肢向量特征不变是指长度和方向特征均不发生变化,包含以下两个方面:a)下肢向量的方向特征不变,是指在重定向前后下肢向量方向不发生变化,通过平移两者可以重合;b)下肢向量的长度特征不变,是指在重定向前后下肢向量的长度之比不随时间变化,即重定向前下肢向量长度与重定向后下肢向量长度之比为常量。

如图3所示, L_i 、 L_{i+k} 是原始运动中第 i 帧和第 $i+k$ 帧的左下肢向量, L'_i 和 L'_{i+k} 是重定向后第 i 帧和第 $i+k$ 帧的左下肢向量。调整 L'_i 和 L'_{i+k} 使重定向前后的左下肢向量方向和长度特征不变,即, L_i 与 L'_i 方向相同、 L_{i+k} 与 L'_{i+k} 方向相同,而且 $|L'_i|/|L_i| = |L'_{i+k}|/|L_{i+k}|$ 。由空间几何知识可知,当 $r_i r_{i+k}$ 与 $r'_i r'_{i+k}$ 同向且 $|r_i r_{i+k}|/|r'_i r'_{i+k}| = |L_i|/|L'_i|$ 时, $f_i f_{i+k}$ 与 $f'_i f'_{i+k}$ 同向且 $|f_i f_{i+k}|/|f'_i f'_{i+k}| = |L_i|/|L'_i|$ 。此时,四边形 $r_i r_{i+k} f_i f_{i+k}$ 和四边形 $r'_i r'_{i+k} f'_i f'_{i+k}$ 是相似四边形,即对应角相等对应边成比例。由此可知,保持重定向前后下肢向量特征不变,能够保证任意两帧间根节点的位移和脚的位移两者具有相同的变化率,都等于下肢向量长度的变化率。在这种情况下,依据同一帧下肢向量长度在重定向前后的比例对目标骨骼模型的根节点进行平移,能够有效避免悬空、穿透、滑步和漂移等失真现象。

在运动重定向过程中,通过保持下肢向量特征不变,能够使重定向后的运动仍然保持原有的主要运动特征,如图4所

示,(a)为原始的跳起踢腿运动,(b)是将运动数据重定向到一个较小的人体骨骼模型后的运动,在重定向过程中保持下肢向量特征基本不变。图中虚线箭头为下肢向量。由图可以看出,重定向后的运动仍然保持了跳起踢腿的主要运动特征。

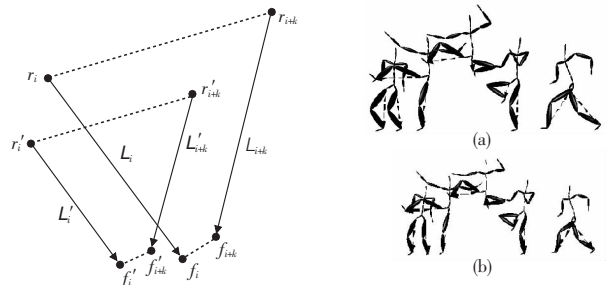


图3 下肢向量特征不变的运动重定向

图4 下肢向量特征不变对运动特征的保持

3 重定向算法

基于下肢向量特征不变的运动重定向算法主要包含以下六个步骤:

- 直接将原始运动数据赋给目标骨骼模型,此时会产生运动失真现象。
- 依据目标骨骼模型和原始骨骼模型的大小关系确定缩放比例因子 $scale$,用于对目标骨骼模型根节点和下肢向量的调整。
- 调整目标骨骼模型根节点的位置。
- 调整目标骨骼模型下肢向量的长度和方向,进而调整下肢的关节角度。
- 调整目标骨骼模型脚的方向,使之与原始骨骼模型保持一致。
- 调整目标骨骼模型根节点的位置。

缩放比例因子 $scale$ 由目标骨骼和原始骨骼的下肢长度比确定,即

$$scale = \frac{l_{target}}{l_{source}} \quad (1)$$

其中: l_{source} 表示原始骨骼模型大腿骨骼和小腿骨骼长度之和, l_{target} 表示目标骨骼模型大腿骨骼和小腿骨骼长度之和。

缩放比例因子 $scale$ 确定后,就可以对目标骨骼模型的根节点以及下肢向量进行调整。以 $Root = \{r_i | i = 1, \dots, n\}$ 表示原始骨骼模型根节点的全局位置,其中, $r_i = (x_i, y_i, z_i)$, i 为帧号,共 n 帧运动数据。以 $Root' = \{r'_i | i = 1, \dots, n\}$ 表示重定向后目标骨骼模型根节点的全局位置,其中, $r'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$, i 为帧号。目标骨骼模型根节点位置依据式(2)进行调整(以 x 坐标为例, y 坐标和 z 坐标的调整方法与 x 坐标相同)。

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cdot scale & i = 1 \\ x'_i = x'_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) \cdot scale & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

下肢向量的调整包括两个方面:a)下肢向量长度的调整,使其按照缩放比例因子 $scale$ 进行缩放;b)下肢向量方向的调整,使其与原始骨骼模型的下肢向量方向保持一致。如图5所示,以左下肢向量的调整为例,图中 L_i 为原始骨骼模型中的左下肢向量, L'_i 为运动数据直接赋给目标骨骼模型后的左下肢向量。左下肢向量的调整就是要调整 L'_i 的长度和方向,使其满足要求。

假设原始骨骼模型中左下肢向量 L_i 的长度为 d_i ,则目标

骨骼模型中左下肢向量 L'_i 的长度 d'_i 调整为

$$d'_i = d_i \cdot \text{scale} \quad (3)$$

由于目标骨骼模型中大腿骨骼的长度 l^{up} 和小腿骨骼的长度 l^{down} 均为已知,由余弦定理可计算出膝盖处的夹角 α 为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{l^{\text{up}} \cdot l^{\text{up}} + l^{\text{down}} \cdot l^{\text{down}} - d'_i \cdot d'_i}{2 \cdot l^{\text{up}} \cdot l^{\text{down}}}\right) \quad (4)$$

为了调整下肢向量 L'_i 的方向使其与 L_i 同向,需要计算 L'_i 和 L_i 之间的夹角 β 为

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_i \cdot L'_i}{|L_i| \cdot |L'_i|}\right) = \arccos\left(\frac{L_i \cdot L'_i}{d_i \cdot d'_i}\right) \quad (5)$$

其中: $L_i \cdot L'_i$ 为向量的点乘, $|L_i|$ 为对向量取模。

由于大腿和小腿的旋转角都作了调整,脚的方向也会发生变化,需要调整目标骨骼模型中脚的方向使其与原骨骼模型中脚的方向相同,可以采用调整下肢向量方向的方法对脚的方向进行调整。调整完脚的方向后,脚尖位置与约束面的距离会发生变化,因此还需要调整根节点的高度使脚尖与约束面的最近距离保持与原始运动中相同。为此将所有数据帧的根节点在垂直方向上增加 Δ 为

$$\Delta = \min(D_i) - \min(D'_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中: D_i 表示原始运动数据第 i 帧脚尖与约束面的距离; D'_i 表示调整脚的方向后第 i 帧脚尖与约束面的距离; $\Delta > 0$ 时表示抬高根节点的高度, $\Delta < 0$ 时表示降低根节点的高度。

4 实验结果与分析

为了验证本章算法的正确性和有效性,笔者进行了运动重定向实验。在实验中,样本运动数据来自 Carnegie Mellon 大学的 mocap 人体运动捕获数据库^[6]。

对行走运动进行面向下肢的运动重定向实验,采用基于下肢向量特征不变的运动重定向方法。行走运动包含 340 帧,原始骨骼模型和目标骨骼模型下肢的长度及比例如表 1 所示。

表 1 行走运动人体骨骼模型下肢参数

骨骼模型	腿长/m	大腿长度/m	小腿长度/m	大小腿长度比
原始骨骼模型	0.893	0.455	0.438	1.039 : 1
目标骨骼模型	0.536	0.195	0.341	0.572 : 1

图 6 所示为行走运动从原始骨骼模型重定向到目标骨骼模型的结果,其中(a)为原始运动,(b)为重定向后的运动,图中显示的是第 146、151、156、161、166、171、176 帧数据。从图中可以看出,运动重定向消除了悬空、穿透、滑步、漂移等失真现象。

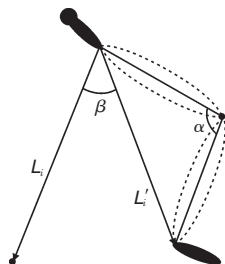


图 5 下肢向量调整

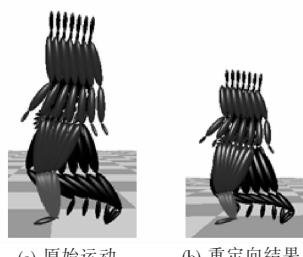


图 6 行走运动重定向

图 7 所示为运动重定向前后左脚跟的运动轨迹。由图中可以看出,运动重定向后的运动轨迹与原始运动轨迹形状相似,说明运动重定向后的运动保持了主要的运动特征。

为了进行运动重定向的效果对比,分别用基于时空约束方法^[2]和基于物理约束方法^[7]进行了运动重定向实验,并将实

验结果与本文方法的实验结果进行对比。表 2 所示为本文方法和基于时空约束方法的运动重定向效果对比。从表中可以看出,相对于基于时空约束方法,本文方法具有更好的运动重定向效果,这是因为在运动重定向过程中,本文方法除了对人体骨骼模型施加时空约束之外,还考虑了运动轨迹、下肢向量对运动的影响以及它们在运动重定向后对运动特征的保持。

表 2 本文方法和时空约束方法效果对比

运动	帧数	运动失真帧数/占比	
		本文方法	时空约束方法
跳远	453	8 (1.77%)	14 (3.09%)
跳起踢腿	352	4 (1.14%)	13 (3.69%)
后空翻	426	7 (1.64%)	16 (3.76%)

图 8 所示为本文方法与基于物理约束方法的运动重定向效率对比,图中是对一段跳舞运动的下肢重定向计算时间随运动帧数变化的统计曲线。由图中可以看出,本文方法具有更高的计算效率,随着运动数据帧数的增加,本文方法运动重定向时间基本呈线性变化,而基于物理约束的方法的运动重定向时间呈指数级增长。这是由于本文方法在运动重定向时避开了复杂的人体运动物理约束模型,而是从运动几何特征的角度对运动重定向进行约束,因此在较大程度上减少了计算量。

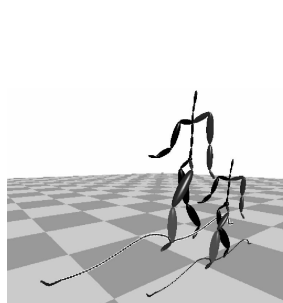


图 7 左脚跟运动轨迹

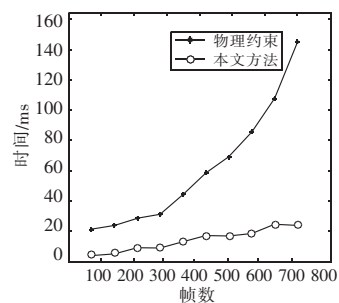


图 8 本文方法与基于物理约束方法的效率对比

5 结束语

本文提出了面向人体下肢的运动重定向方法,根据人体的运动特征,提出人体下肢向量的概念,通过保持下肢向量的长度特征和方向特征不变,使重定向后的运动仍然能保持运动的主要特征。与基于时空约束的方法相比,该方法具有更好的运动重定向效果;与基于物理约束的方法相比,该方法具有更快的计算效率。

参考文献:

- [1] 陈志华,马利庄,杨文山. 基于捕获数据的运动编辑技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(增刊): 295-299.
- [2] GLEICHER M. Retargeting motion to new characters[C]//Proc of ACM SIGGRAPH'98. New York: ACM Press, 1998: 33-42.
- [3] TAK S, SONG H S. Motion balance filtering[C]//Proc of the 21st European Conference on Computer Graphics. Cambridge: Blackwell Publishers, 2000: 437-446.
- [4] PULLEN K, BREGLER C. Motion capture assisted animation: texturing and synthesis[C]//Proc of ACM SIGGRAPH'02. New York: ACM Press, 2002.
- [5] TAK S, KO H S. A physically-based motion retargeting filter[J]. ACM Trans on Graphics, 2005, 24(1): 98-117.
- [6] [http://mocap.cs.cmu.edu/\[EB/OL\]](http://mocap.cs.cmu.edu/[EB/OL]).
- [7] LIU C, POPOVIC Z. Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations[J]. ACM Trans on Graphics, 2002, 21(3): 408-416.