

6-4-2020

Motion Reconstruction and Simulation Using Sparse Inertial Sensors

Lijun Cui

1. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;

Tianyu Huang

1. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;

Feng Feng

2. Equipment Department of China PLA Air Force, Beijing 100854, China;;

Zhang Jie

3. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Motion Reconstruction and Simulation Using Sparse Inertial Sensors

Abstract

Abstract: A method was proposed to reconstruct high-dimensional full-body motion sequences from low-dimensional control data collected by sparse inertial sensors. The approach *solved the mapping problem from low dimension to high dimension. A numerical similarity- geometrical similarity-time continuity model was setup to ensure the reconstructed motion candidates in numerical-logical similarity. The gap between angle and angular acceleration was eliminated by acceleration reconstruction. An energy function was introduced to optimize the reconstructed results which guaranteed the accuracy.* The analysis and comparison experiments show that the proposed method can reconstruct nature and credible motions in real-time and can be applied in low-cost full-body motion capture by using few inertial sensors.

Keywords

motion capture, motion reconstruction, low-dimensional control signals, motion database, motion retrieval

Authors

Lijun Cui, Tianyu Huang, Feng Feng, Zhang Jie, Yang Kai, and Liu Dong

Recommended Citation

Cui Lijun, Huang Tianyu, Feng Feng, Zhang Jie, Yang Kai, Liu Dong. Motion Reconstruction and Simulation Using Sparse Inertial Sensors[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2261-2267.

基于少量惯性传感器的姿态重建与仿真

崔丽君¹, 黄天羽¹, 冯枫², 张杰³, 杨凯⁴, 刘陈⁵

(1. 北京理工大学软件学院, 北京 100081; 2. 空军装备部 107 办公室, 北京 100854; 3. 中国航空工业集团成都飞机设计研究所, 四川 成都 610091; 4. 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854; 5. 中国航天科工集团公司, 北京 100048)

摘要: 提出了一种基于少量惯性传感器的姿态重建方法, 将输入的低维角加速度信息作为控制信号, 以高维欧拉角运动数据库为基础, 重建出高维的人体全身姿态序列。通过建立数字相似性-几何相似性-时间持续性模型, 对加速度进行重构, 保证候选重建姿态的在数字-逻辑上相似性的统一。通过引入最优化能量函数, 求解最优重建姿态序列。通过分析和对比实验, 表明方法能够重建出真实可信的人体姿态序列。本研究使用少量惯性传感器控制, 能产生持续的全身关节的姿态序列, 通过减少传感器数量, 达到降低系统成本的目的。

关键词: 运动捕捉; 姿态重建; 低维控制信号; 运动库; 运动检索

中图分类号: TP393.0 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 10-2261-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710005

Motion Reconstruction and Simulation Using Sparse Inertial Sensors

Cui Lijun¹, Huang Tianyu¹, Feng Feng², Zhang Jie³, Yang Kai⁴, Liu Dong⁵

(1. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Equipment Department of China PLA Air Force, Beijing 100854, China; 3. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China; 4. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing 100854, China; 5. China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100048, China)

Abstract: A method was proposed to reconstruct high-dimensional full-body motion sequences from low-dimensional control data collected by sparse inertial sensors. The approach solved the mapping problem from low dimension to high dimension. A numerical similarity-geometrical similarity-time continuity model was setup to ensure the reconstructed motion candidates in numerical-logical similarity. The gap between angle and angular acceleration was eliminated by acceleration reconstruction. An energy function was introduced to optimize the reconstructed results which guaranteed the accuracy. The analysis and comparison experiments show that the proposed method can reconstruct nature and credible motions in real-time and can be applied in low-cost full-body motion capture by using few inertial sensors.

Keywords: motion capture; motion reconstruction; low-dimensional control signals; motion database; motion retrieval

引言

单兵是部队战斗力的最基本单元, 提高单兵训



收稿日期: 2015-10-08 修回日期: 2015-11-04;
基金项目: 国家自然科学基金(61202243);
作者简介: 崔丽君(1989-), 男, 山东潍坊, 硕士, 研究方向为计算机仿真、行为建模与仿真; 黄天羽(通讯作者 1979-), 女, 山东潍坊, 博士, 副教授, 研究方向为计算机仿真、行为建模与仿真、虚拟现实。

练水平和装备水平有利于部队整体战斗力的提高。动作捕捉技术已广泛应用于步态分析、生物力学、人机工程、人机交互与控制、医学分析等领域, 动捕技术贴近单兵训练实际需求, 应用动捕技术可以有效提高单兵装备研制、训练效能评估及验证、以及单兵训练时的科学性和动态监控能力, 然而高成本已经成为了阻碍这项技术在单兵训练领域的应

<http://www.china-simulation.com>

• 2261 •

用和普及,研究低成本、满足广泛应用环境的运动捕捉技术将成为新一代人机交互发展的迫切要求。

惯性动捕设备有着成本低、应用限制少等特点,通过少量传感器,基于一定规模的运动库可以实现动作重建来达到动作捕捉的目的。此方法并不是简单的搜索,其难点是在使用少量传感器时,传感器传出的信号与运动库中的原始信息相比存在维度低、抖动大、属性不匹配的问题,且搜索效率低,搜索结果不准确,无法达到实用水平。为了解决以上难点,提出了一种基于运动库的姿态重建方法,将外部输入的少量惯性传感器低维控制信号重建为高维全身姿态,该过程实现了基于少量传感器和运动数据库的运动捕捉。通过建立数字相似性-几何相似性-时间持续性的相似性模型,保证了候选重建姿态的在数字-逻辑上相似性的统一,从而达到增强姿态重建准确性的目的。通过引入最优能量函数,保证了重建姿态的持续连贯和真实可信。主要贡献为:

(1) 提出了一个基于少量惯性传感器的姿态重建方法,解决了低维角加速度在高维角度运动数据库上信息检索的跨越问题。

(2) 提出了数字相似性-几何相似性-时间持续性的相似性模型,保证了重建姿态的在数字-逻辑上相似性的统一。

(3) 在目前国际同领域最先进的工作^[1]的基础上,提高了算法的适应性和稳定性,并将平均重建误差(cm)由 9 左右降低到 6.5 左右。

1 相关工作

1.1 基于传感器的运动交互技术

宾夕法尼亚大学 Badler^[2]提出了基于少量传感器的运动控制技术,他使用 4 个磁传感器和逆运动学算法实时控制虚拟人。Slyper 等^[3]提出了基于少量加速度计来识别和播放虚拟人的上半身运动; Kelly^[4]使用 6 个加速度计实现网球运动数据查询。

与本研究工作类似的工作有, Kim^[5]使用六自由度的 InterSense IS-900 系统(包括 6 个六自由度传

感器)捕获人体 3D 运动的位置和方向数据。上述方法通过多种类型传感器、多种类型数据共同作为捕捉控制信息,实现联机运动控制。Guo^[6]使用 4 个 Wiimote 传感器通过建立融合的隐马尔科夫模型来识别动作。Kruger^[11]使用少于 6 个惯性传感器通过构建联机邻接图来重建运动,但在数据库连贯动作加速度数据噪声大、检索结果与真实动作几何空间相似性和运动平滑相似性差时,能量计算部分将失效,方法将退化成为简单的 KD 树搜索。本研究使用少量惯性传感器,实现数字-逻辑相似性统一的问题的运动重建,适应更加粗糙的数据库数据,保证了重建方法的稳定性,有效降低了重建误差,从而得到更好的重建效果。重点通过与它对比来验证所提出方法的有效性。

1.2 基于数据驱动的运动生成技术

本研究中,基于数据驱动的运动生成技术用于对已有的运动数据进行建模,作为运动捕捉中少量传感器数据的信息补充。

基于数据驱动的运动研究方法分为三类:基于模型的运动生成方法^[7],基于运动图的运动生成方法^[8],基于插值的运动生成方法^[9]。基于线性和非线性降维的运动合成技术也是一种基于低维数据的人体运动研究方法。与本文方法不同的是,该方法通过线性或者非线性的数学降维方法,在运动预处理^[10]和运动合成^[11]通过计算低维嵌入来控制运动数据。本文重点研究基于少量输入数据的高维运动重建技术。

本文主要研究基于少量、单一传感器类型的姿态重建方法,重点解决低维角加速度在高维角度运动数据库上信息检索的跨越问题,从而实现实时的运动重建。

2 重建方法框架

基于少量惯性传感器的姿态重建方法用少量惯性传感器输出控制信号,通过在已有运动数据库上联机检索出匹配姿态,通过优化约束,重建出连

续的姿态变化,从而达到实时运动捕捉的目的。假定连续的传感器控制信号流定义为 $S = (\dots, s^{t-2}, s^{t-1}, s^t, \dots)$, s^t 为 t 时刻从传感器获得的加速度数据,输出的运动数据流定义为 $R = (\dots, r^{t-2}, r^{t-1}, r^t, \dots)$, r^t 为 t 时刻全身关节的位置数据,则重建的问题可以描述为满足相似性模型 E 约束。

$$R = E(S) \tag{1}$$

其中 E 定义为数字相似性 N 、几何相似性 G 、时间连续性 T 的函数, $E = f(N, T, G)$ 。重建方法中,相似性模型 E 是通过构建联机连接图实现的,该网络与联机懒惰邻接图(OLNG)结构^[1]相似。通过对原有懒惰邻接图(OLNG)的改进,提高了该方法在运动库与动作执行者动作匹配率低的情况下的有效性。在该结构中,通过 k -最近邻检索,达到数字相似性 N 的目的;通过路径有向边的构建,达到时间连续性 T 的目的;通过加速度重构,达到几何相似性 G 的目的。基于少量惯性传感器的姿态重建方法框架如图 1 所示。

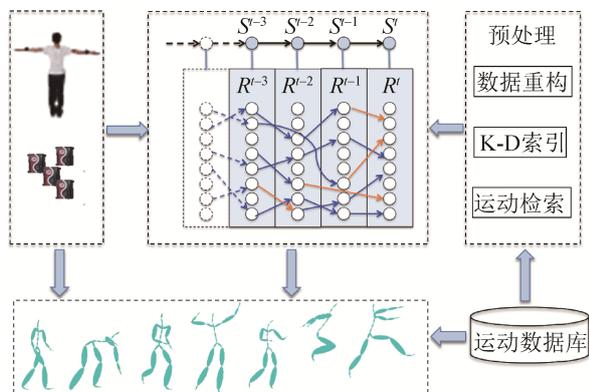


图 1 基于少量惯性传感器的姿态重建方法框架
Fig. 1 Framework of the motion reconstruction method using sparse inertial sensors

3 姿态相似性模型构建

高维姿态的重构是以低维控制信号为检索条件,在高维运动数据库检索出满足姿态相似的运动数据,并实时的输出。因此,检索出相似姿态是本发明方法的一个重要环节。本论文提出的姿态相似性,包含姿态数字相似性 N 、几何相似性 G 和时间连续性 T ,姿态相似函数表示为 $E = f(N, T, G)$ 。姿

态的相似本质上是逻辑和数字相似性的统一,对姿态各关节信息进行运算,使两段运动的差异满足一定的阈值,称其为姿态的数字相似;如果 2 个运动在几何空间中每一帧的姿态相似,即视觉上相似,称其为运动几何相似。距离函数中对运动的数字比较并不能真实地反应运动的逻辑相似性,即数字相似的运动不一定满足逻辑相似性。通过数值相似性 N 和几何相似性 G 共同约束达到逻辑和数字相似性的统一。时间连续性 T 用来保证姿态在时间上的连贯性,使得重建结果更加平滑和自然。

3.1 数字相似性构建

姿态的数字相似性即两个姿态在数值计算时,其差异值满足一定的阈值条件。姿态重建方法依赖于少量惯性传感器提供的控制信号,这些信号将被当作检索条件。为了保证较好的计算实时性,采用 k -最近邻算法来实现基于 k - d 树结构的运动数据库检索^[1],为数据建立索引,然后进行快速匹配,因为实际数据一般都会呈现出簇状的聚类状态,通过合理的索引结构可以大大加快检索的速度。由于作为检索条件的信号仅选择了少量关节作为参考,且仅在加速度层次上进行了姿态数值相似度的比较,不能描述一个完整全身姿态,因此,如果直接选取与检索条件最为相似的片段用于姿态重建,很难得到较为理想的结果。联机邻接图结构可以用于存储 k 个检索结果,这一结构允许利用片段的时间连续性,来弥补少量加速度控制信号相比较所带来的不足。

控制信号连续不断地被输入系统中,这些控制信号构成了一个连续数据流 $(\dots, s^{t-2}, s^{t-1}, s^t, \dots)$,此处 s^t 表示 t 时刻所捕捉的控制信号,对应于该时刻人体关节在三维空间中的加速度,因此 s^t 是由多个数据构成的一个低维数据。为了保证运动重建的联机性能,检索操作逐帧进行,即对于每一帧控制信号的输入,会触发一次对运动库的 k -最近邻检索。 R^t 表示 t 时刻的检索结果集合, R^t 的大小为 k ,包含了对应于控制信号 s^t 的 k 个最近邻检索结果。针

对连续的控制信号输入,不断执行 k -最近邻检索操作,得到一组数值相似结果构成的数据流 $(\dots, R^{t-2}, R^{t-1}, R^t, \dots)$ 。这一过程可以由公式(2)来表示。基于 k -最近邻的联机邻接图如图 2 所示。 E_N 利用欧氏距离同时考虑各个关节的权重,得到与控制信号在数值上最为相近的检索结果。

$$R = E_N(S) \quad (2)$$

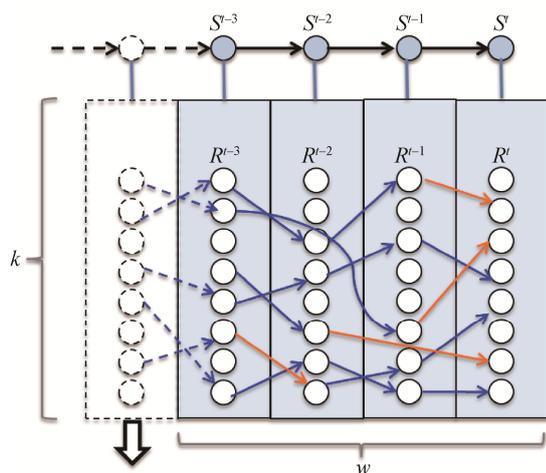


图 2 姿态相似性邻接图构建

Fig. 2 Construction of the motion similarity neighborhood graph

3.2 时间持续性构建

人体运动是人体姿态在时间轴上连续不断地变化,因此时间连续性是人体运动的一个重要特征,也是姿态相似的一个重要度量。

控制信号流与检索结果流是随着时间序列连续不断产生的。为了保证实时性能,分析从当前 t 时刻往前 w 窗口长度的控制信号及相应的检索结果,即分析 (s^{t-w+1}, \dots, s^t) 和 (R^{t-w+1}, \dots, R^t) 。在 w 时刻内, k -最近邻的检索结果将包含 $k \times w$ 个数值相似数据。为了表示前后帧之间的持续性,通过绘制有向边的方式来体现运动的持续连贯,如图 2 中蓝色线条所示。有向边说明了前后帧之间是逻辑连续的,绘制有向边时优先考虑时间连续性,即相邻两时刻的检索结果中,如果其中检索结果其在数据库中的编号是连续的,即视为时间连续,即可组成一条有向边。在姿态重建优化过程中,存在有向

边是重建能量函数的一个重要参数和结果度量。这一过程可以由公式(3)来表示。 E_T 利用 3.1 中的检索结果,通过分析其在数据库各个文件中的序号来得到与控制信号动作相近同时又较为平滑的进一步结果。

$$R = E_T(S) \quad (3)$$

3.3 几何相似性构建

数值相似性和几何相似性同时约束,可以保证姿态的逻辑和数字相似性的统一。由于输入的控制信号仅有加速度信息,本方法通过重构 k -最近邻 w 窗口内的角加速度,来达到计算几何特征的目的。重构加速度的计算即速度在时间上的微分计算。对于 k -最近邻 w 窗口内的所有数据进行加速度计算,其时间复杂度是 $O(k^2w^2)$ 。为了保证实时性,在本方法中几何相似性 G 作为数值相似性 N 和时间连续性 T 的补充。因此我们仅在绘制有向图,当考虑时间连续性不能得到有向边时,对邻接图内未组成有向边的节点的角加速度进行重构,再以角加速度与检索信号最相近为原则绘制有向边,如图 3 中红色线条所示。有向边相连即可形成路径,选取当前时刻最优的路径片段作为当前检索信号所对应的全身姿态。其过程可以由公式(4)来表示。 E_G 利用检索结果的欧拉角信息,重构加速度,得到一个较为平滑的序列,处理 3.2 不能得到理想结果的情况。

$$R = E_G(S) \quad (4)$$

3.4 相似性代价定义

在构建有向路径时定义有向路径的最低节点数 $M, M \in [3, w]$,一般选取 $M = w$;当利用时间连续性不能找到一条长度为 w 的有向路径时,且实时性要求较高时,选取 $M, M \in [3, w)$,会得到较优的结果。

利用时间连续性这一原则找到了一组路径,规定了路径的最低节点数之后,当在这组路径中能够找到一条长度为 M 的路径时,将不再进行其他长度小于 M 的路径的处理,即不再进行加速度重构,最终获得的候选路径数目 $I(I \ll k)$ 。当不能找到满

足给定长度的路径时, 将选择节点数目最多的路径进行加速度重构, 并得到长度为 M 的路径。由此, 通过 $R = E_{(N,T,G)}(S)$ 约束将获得 k 个长度为 M 的候选路径。

得到候选有向路径后, 根据帧相似度 $dist$ 、有向边长度 Len 以及路径节点数目 M 等因素, 定义路径代价 c , 计算公式由公式(5)给出。其中 $dist$ 为检索结果与控制信号的欧式距离。

$$c = \sum_{i=1}^M dist_i / M \quad (5)$$

为了增加结果复用率, 提高系统实时性, 当时间推进到 $t+1$ 时刻时, 处于 $t-w-1$ 时刻的节点将从内存中被删除, 而处于 $t-w$ 时刻到 t 时刻的结果将被复用。即不管这些结果是否为候选路径, 都将成为 $t+1$ 时刻重建新路径的基础, 同时规定新的路径必须包含当前控制信号的检索结果, 然后再依照前面的方法来绘制有向边。

4 实验结果与分析

为有效评估方法准确性, 本实验采用虚拟传感器, 即利用已有动捕文件, 通过拓扑关系计算出真实传感器所在位置的加速度信息, 作为输入的控制信号, 此动捕文件作为重建结果的对比文件。

实验采用 HDM05 数据作为运动库的数据源^[2]。用于重建的姿态主要包括: 走(W: Walk), 跑(Ru: Run), 由走到跑(WR: Walk to Run), 拾取(G: Grab), 放下(De: Deposit), 舞(Da: Dance), 踢(K: Kick), 投掷(T: Throw), 抡胳膊(R: Rotate), 跳绳(RS: Rope Skip), 随机(WE: Whatever)。对运动捕捉数据按照 30 帧/秒进行少量采样, 运动数据库规模约 1 000 000 帧。根据欧拉角及骨骼拓扑结构计算出算法所需关节的空间坐标、速度以及加速度等信息。将加速度降维, 使之与控制信号维度一致, 并为加速度建立 k-d 树索引。

得到候选路径后, 利用与 Kruger^[1]方法类似的简化能量函数从中选择最佳路径, 并将最佳路径的最左片段加入已完成重建的动作序列末端, 合成新的动作序列。运动序列在输出前进行平滑处理, 以

保证重建姿态序列的稳定和自然。

实验使用 Matlab 实现了重建算法, 并在 Intel Core i5 Duo 3.2 和 8GB Memory 上对方法进行验证。为了验证基于少量惯性传感器的姿态重建方法的正确性和准确性, 分别在重建误差率、传感器数量、优化特性等方面分别与 Kruger^[1]所提方法进行对比实验, 本论文方法定义为加速度重构, Kruger^[1]方法定义为加速度未重构。其中重建误差率为测试数据与结果数据各关节距离的 RMS(平方平均数)。

4.1 传感器数量对姿态重建误差的影响

基于少量惯性传感器的运动重建通过减少传感器的数量达到成本的降低。本实验分别针对 1~6 个传感器进行对比实验, 分析传感器数量对姿态重建误差的影响。其中 6 个传感器穿戴方法为: 4 个传感器在表演者的四肢肢端, 2 个传感器穿戴在头部和胸部。结果如图 3 所示, 其中 1-R 代表 1 传感器重构, 1-UR 代表 1 传感器未重构, 从结果可以看出本方法可以较明显的降低重建误差。

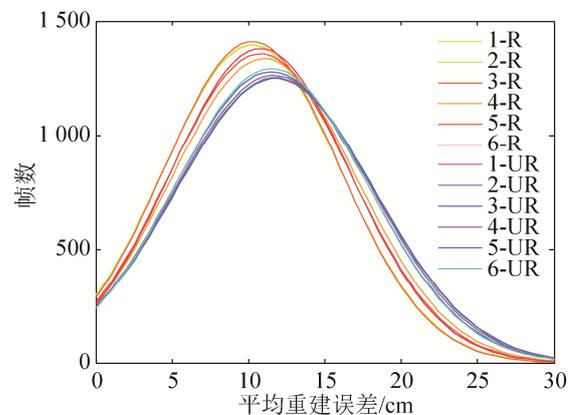


图 3 传感器数量不同重建误差率的统计分析

Fig. 3 Statistical analysis of the reconstruction error rate for a given number of sensors

4.2 不同姿态平均重建误差率分析

为了验证重建方法对不同运动姿态重建的敏感度, 实验针对不同的类别姿态进行实验。在 DB_a 类数据库上, 穿戴 4 个传感器, 对 11 种不同类动作分别 20 次姿态重建实验, 其平均重建误差率如图 4 所示。动作简单、重复性强的动作重建误差较

大,且本方法对不同动作的重建误差均有不同程度的提升。不同类动作输出的连续重建帧数、加速度重构帧数、重构比例、邻接图中的重构路径数统计结果如表 1 所示。从结果中可以看出,如果仅考虑时间连续性,邻接图中有向路径生成比例低,加速度重建建立有向路径的平均需求达到 95% 以上,这是因为 k-最近邻搜索仅在数值上进行比较,很多不符合姿态的动作被选为候选动作帧后很难在时间持续上做到连续匹配,由此可以见加速度重构的方法能够实现数字-逻辑相似性统一的检索和重建。以重建某一舞蹈动作为例,统计其每一帧重建误差结果如图 5 所示,可以看到加速度重构可以较好的降低“跳帧”现象,得到较好的重建结果。

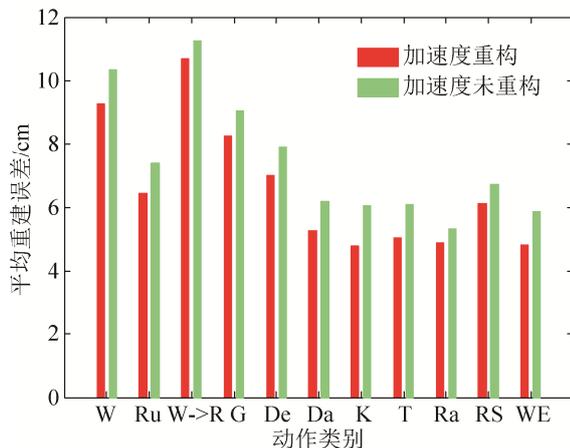


图 4 加速度重构对重建误差率的影响

Fig. 4 Influence of the acceleration reconstruction on the reconstruction error rate

表 1 加速度重构的数据统计

Tab. 1 Statistical data of acceleration reconstruction

动作	总帧数	重构帧数	重构比例%	重构路径数
W	2 460	2 428	98.7	19 417
Ru	730	719	98.5	5 752
WR	1 116	1 098	98.4	8 777
G	894	882	98.7	7 056
De	864	842	97.4	6 736
D	2 425	2 379	98.1	19 025
K	989	953	96.4	7 612
T	691	683	98.8	5 457
Ra	1 583	1 557	98.4	12 449
RS	671	654	97.5	5 232
WE	1 052	1 037	98.6%	8 296

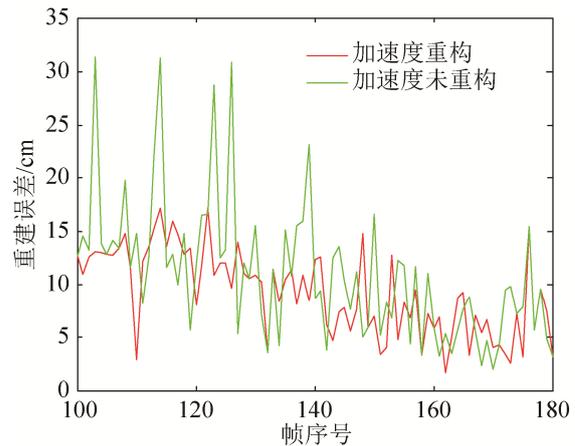


图 5 加速度重构对重建误差率的影响

Fig. 5 Influence of the acceleration reconstruction on the reconstruction error rate

5 结论

提出了一种基于运动库的姿态重建方法,将外部输入的少量惯性传感器低维控制信号重建为高维全身姿态,解决了低维角加速度在高维角度运动数据库上信息检索的跨越问题。为了保证重建姿态的在数字-逻辑上相似性的统一,提出了基于联机邻接图的数字相似性-几何相似性-时间持续性的相似性模型。通过 k-最近邻检索,达到数字相似性的目的;通过路径有向边的构建,达到时间连续性的目的;通过加速度重构有向边的构建,达到几何相似性的目的。

基于少量惯性传感器的姿态重建技术研究作为新的人机交互手段,因其成本低和限制少的特点,可以进一步满足不断发展的动作捕捉应用普及需求。该技术能够广泛应用于步态分析、生物力学、人机工程、人机交互与控制、医学分析等领域,贴近单兵训练实际需求。

虽然提出的数字相似性-几何相似性-时间持续性的相似性模型能够很好地解决重建过程中产生的歧义,但由于输入信号较少,其作为动作捕捉应用的精确性仍然低于全关节动作捕捉传感系统。另外该方法依赖于运动数据库中的姿态数据,考虑到新姿态的合成会影响联机性能,未在该方面做讨论,这将是基于少量传感器运动捕捉的难点,也是

未来工作的重点。

参考文献:

- [1] Tautges J, Zinke A, Krüger B, et al. Motion Reconstruction Using Sparse Accelerometer Data [J]. *ACM Transactions on Graphics (S0730-0301)*, 2011, 30(3): 171-179.
- [2] Badler N I, Hollick M J, Granieri J P. Real-Time Control of a Virtual Human Using Minimal Sensors [J]. *Presence Teleoperators & Virtual Environments (S1054-7460)*, 1993, 2(1): 82-86.
- [3] Slyper R, Hodgins J K. Action Capture with Accelerometers [C]// *Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. France: Eurographics Association, 2008: 193-199.
- [4] P Kelly, C Ó Conaire, NE O'Connor, et al. Human Motion Reconstruction Using Wearable Accelerometers [C]// *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. France: Eurographics Association, 2010: 56-57.
- [5] Kim H, Lee S H. Reconstructing whole-body motions with wrist trajectories [J]. *Graphical Models (S1524-0703)*, 2013, 75(6): 328-345.
- [6] Guo C, Liu J, Fan X, et al. An Online Full-Body Motion Recognition Method Using Sparse and Deficient Signal Sequences [J]. *Mathematical Problems in Engineering (S1024-123X)*, 2014, 25(1): 105-124.
- [7] Tejera M, Hilton A. Learning Part-Based Models for Animation from Surface Motion Capture [C]// *3D Vision -3DV 2013, 2013 International Conference on*. USA: IEEE, 2013: 159-166.
- [8] L Váša, Brunnett G. Rate-distortion optimized compression of motion capture data [J]. *Computer Graphics Forum (S0167-7055)*, 2014, 33(2): 283-292.
- [9] Carvalho S R, Boulic R, Vidal C A, et al. Latent motion spaces for full-body motion editing [J]. *Visual Computer (S0178-2789)*, 2013, 29(3): 171-188.
- [10] Mentar M, Marcelo K. Analyzing Locomotion Synthesis with Feature-Based Motion Graphs [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics (S1077-2626)*, 2012, 19(5): 774-786.
- [11] Lee D, Choi K S. Efficient rolling shutter distortion removal using block-based motion interpolation [C]// *Consumer Electronics (ISCE 2014), The 18th IEEE International Symposium on*. USA: IEEE, 2014: 1-4.
- (上接第 2260 页)
- [4] 朴成日, 沈治河. 基于作战协同航母编队兵力配置方法 [J]. *指挥控制与仿真*, 2013, 35(4): 32-35. (Pu Chengri, Shen Zhihe. Force allocation method for aircraft carrier formation based on operational synergy [J]. *Command, Control and Simulation*, 2013, 35(4): 32-35.)
- [5] 程启月. 联合作战决策模式的风险评估与控制 [J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(10): 6-12. (Cheng Qiyue. Risk assessment and control of joint operational decision model [J]. *Fire and Command Control*, 2013, 38(10): 6-12.)
- [6] 王清印, 吕瑞华. 区间数的标准表示及其四则运算法则与泛灰数的内在联系 [J]. *数学的实践与认识*, 2005, 35(6): 216-222. (Wang Qingyin, Lv Ruihua. Standard representation of interval numbers and the inner relation between the four arithmetic and the universal grey number [J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2005, 35(6): 216-222.)
- [7] 刘洋, 胡晓峰. 基于仿真数据的作战体系结构层次分析 [J]. *军事运筹与系统工程*, 2014, 28(1): 65-69. (Liu Yang, Hu Xiaofeng. Hierarchical analysis of combat architecture based on simulation data [J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2014, 28(1): 65-69.)
- [8] 王国良, 申绪润, 叶礼邦, 等. 作战目标仿真逼真度分析方法研究 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(2): 6-10. (Wang Guoliang, Shen Xujian, Ye Libang, et al. Research on simulation method of combat target fidelity [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32 (2): 6-10.)