

7-2-2020

## Processing Method of Space Locations of Virtual Human Based on Wavelet Transform and Kalman Filter

Liang Feng

*State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;*

Zhili Zhang

*State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;*

Xiangyang Li

*State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;*

Zhibo Tang

*State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;*

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.

---

## Processing Method of Space Locations of Virtual Human Based on Wavelet Transform and Kalman Filter

### Abstract

**Abstract:** For the problem of inadequate smoothness of space location coordinate and large error of acceleration information, *a processing method based on wavelet transform and Kalman filter was proposed to realize the valid control of virtual human' motion process after eliminating error points of motion data. Main acceleration information could be achieved based on the filter method of wavelet transform, and weak tracking Kalman filter was introduced to realize the amendment and smoothness of space location coordinates and acceleration information.* Compared to the conventional Kalman filter method, the proposed method could achieve more exact and smooth space location and acceleration information of virtual human and provide a more accurate information guarantee for further analysis of virtual human' motion process and estimation of virtual human' operating actions.

### Keywords

optical motion capture equipment, space location information of virtual human, wavelet threshold denoising, weak tracking Kalman filter

### Recommended Citation

Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang, Tang Zhibo. Processing Method of Space Locations of Virtual Human Based on Wavelet Transform and Kalman Filter[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 213-219.

# 基于小波变换和 Kalman 滤波的虚拟人空间位置处理

梁丰, 张志利, 李向阳, 汤志波

(第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025)

**摘要:** 为了实现对虚拟人运动过程的有效控制, 针对光学运动捕捉设备捕获的虚拟人空间位置数据平滑性不足和加速度误差大的问题, 在剔除了运动数据中错误点的基础上, 提出了采用基于小波变换和 Kalman 滤波的空间位置信息处理方法, 通过采用基于小波变换的滤波处理方法获取主要的加速度信息, 再基于弱跟踪 Kalman 滤波技术实现对空间位置坐标和加速度信息的修正和平滑处理。与 Kalman 滤波方法相比, 该方法可获得更为准确和平滑的虚拟人体空间位置和加速度位置信息, 为进一步分析虚拟人的运动过程、判断虚拟人操作动作提供了更准确的信息保障。

**关键词:** 光学运动捕捉设备; 虚拟人空间位置信息; 小波阈值去噪; 弱跟踪 Kalman 滤波

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0213-07

## Processing Method of Space Locations of Virtual Human Based on Wavelet Transform and Kalman Filter

Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang, Tang Zhibo

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** For the problem of inadequate smoothness of space location coordinate and large error of acceleration information, a processing method based on wavelet transform and Kalman filter was proposed to realize the valid control of virtual human' motion process after eliminating error points of motion data. Main acceleration information could be achieved based on the filter method of wavelet transform, and weak tracking Kalman filter was introduced to realize the amendment and smoothness of space location coordinates and acceleration information. Compared to the conventional Kalman filter method, the proposed method could achieve more exact and smooth space location and acceleration information of virtual human and provide a more accurate information guarantee for further analysis of virtual human' motion process and estimation of virtual human' operating actions.

**Keywords:** optical motion capture equipment; space location information of virtual human; wavelet threshold denoising; weak tracking Kalman filter

## 引言

近年来, 运动捕捉技术 (Motion Capture Technology) 的发展为人们开发感知性好、沉浸感

强的虚拟交互平台提供了更理想的硬件交互环境。尤其是 Kinect 体感摄像机等光学运动捕捉设备的出现和普及, 其体积小、价格低及对人体运动影响小等特点使得运动捕捉技术已逐渐开始从工厂、实验室走进人们的日常工作和生活, 以运动捕捉技术为核心的操作平台正显现出越来越强大的生命力。

当前, 光学运动捕捉技术的应用主要有 3 个方



收稿日期: 2014-06-04 修回日期: 2014-08-11;  
作者简介: 梁丰(1987-), 男, 湖北天门, 博士生, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真; 张志利(1966-), 男, 河南濮阳, 教授, 博导, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真; 李向阳(1984-), 男, 河南汝州, 讲师, 博士, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真。

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

面。一是在影视制作方面<sup>[1]</sup>，通过捕获人体运动数据，再对数据进行错误点修正和数据平滑等后期处理，驱动虚拟人运动从而完成影视或动画制作。二是在游戏制作方面<sup>[2]</sup>，通过捕捉操作人员的运动姿态，判断其是否满足游戏中相关姿态的设置条件，从而决定是否驱动游戏中虚拟人执行相应的操作。三是在虚拟操作训练方面<sup>[3-4]</sup>，通过捕捉和识别操作人员的操作姿态，结合虚拟样机的结构和操作特征，根据操作人员运动数据实时驱动虚拟人运动，并完成对装备的相关操作。这 3 种不同应用环境对运动捕捉数据的处理过程提出了不同的需求：影视制作方面对数据的精度要求高，但是对实时性要求低；游戏制作过程对运动数据处理过程的实时性要求高，但由于涉及的运动控制姿态数量少，并且为了便于人们的操作，对数据的精度要求不高；而虚拟操作训练方面需要对虚拟人运动过程进行实时控制，使得虚拟人在操作人员的控制下能完成对虚拟样机的操作，由于操作人员运动和操作过程复杂，因此这对数据的精度也提出了很高的要求。

针对光学运动捕捉设备捕捉的人体运动数据在复杂装备虚拟维修、训练等方面的应用，很多学者对数据中的错误点和噪声实时处理方法进行了研究，主要采用了 Kalman 滤波<sup>[5]</sup>、样本示例学习<sup>[6]</sup>、滑动中指滤波<sup>[7]</sup>、经验模式分解<sup>[8]</sup>、累进迭代近似<sup>[9]</sup>及基于约束的运动数据处理<sup>[10-12]</sup>等。这些方法主要是通过信息滤波处理或者根据骨骼拓扑结构关系实现对各关节空间位置的修正和平滑，较少关注关节的速度及加速度等信息。此外，基于约束的方法还难以对虚拟人体在虚拟环境中的空间位置坐标进行平滑处理。

本文主要针对光学运动捕捉设备获得的人体空间位置数据平滑性不足和加速度误差大的问题及由此引发虚拟人在大范围移动过程中常出现的抖动、失真等现象，在剔除运动捕捉数据中虚拟人空间位置数据错误点的基础上，提出基于小波变换和 Kalman 滤波的方法对运动数据中的噪声进行处理，通过基于小波变换的方法提取运动过程中主要

的加速度信息，再基于弱跟踪 Kalman 滤波实现对虚拟人空间位置坐标、速度及加速度信息的修正。

## 1 研究背景

根据人体生理结构和虚拟人运动过程需求，虚拟人体骨骼结构一般可简化为 24 个关节及其连接的 23 块骨骼，其拓扑结构如图 1 所示。在对虚拟人体运动过程进行分析的过程中，常选用人体的重心(hip 点，一般位于人体的腰部)作为根节点，用其空间位置坐标表示虚拟人体所处的空间位置，并基于该关节的空间位置坐标及其他各关节相对于其父关节的空间位置和旋转矩阵计算出各关节在虚拟空间中的位置状态。因此，获得准确、平滑的虚拟人空间位置信息(hip 点在虚拟环境中的空间位置坐标)不仅是分析虚拟人在虚拟空间中进行大范围移动过程的需要，而且也是分析和计算其他关节运动状态的基础。

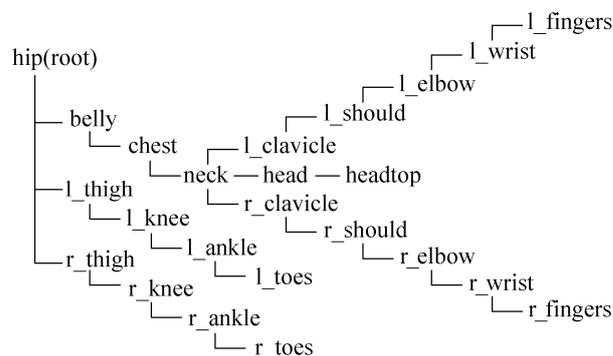


图 1 虚拟人体骨骼拓扑结构

基于光学运动捕捉设备捕获操作人员的运动信息主要是通过捕捉操作人员穿戴的光学标记点(Marker)在捕捉空间中形成的散乱数据信息，采用模板匹配、空间仿射变换及标识点跟踪等方法剔除散乱数据中错误的光学点、标识出各 marker 点空间位置信息<sup>[13]</sup>，最后根据骨骼结构和数据模型计算出操作人员各关键关节的空间位置<sup>[14]</sup>。由于捕获的 marker 点数据中常会出现伪点，marker 点间相距较近时可能引起错误的模板匹配，此外还有捕捉、计算精度及模型误差等多方面因素的影响，使得最终输出的关节空间位置数据中存在着

一定的误差, 并且计算获得的加速度信息中误差较大, 这加大了计算机对操作人员操作姿态识别和运动过程分析的难度。

为了便于对操作人员的运动过程进行分析, 有助于计算机对操作人员运动过程和操作目的的判断, 达到构建出更为逼真合理的虚拟操作训练环境的目的, 根据人体短时间内的运动具有连贯性、平稳性这一特点<sup>[15]</sup>, 在剔除捕获的虚拟人空间位置坐标数据中错误点的基础上, 进一步对数据进行滤波去噪处理, 从而获得准确、可靠的空间位置坐标、移动速度和加速度信息, 这对分析和预判虚拟人运动状态, 构建交互性、沉浸感好的虚拟操作、训练环境具有重要的意义。

## 2 捕获的空间位置坐标数据预处理

本文采用 Natural Point 公司开发的 Arena 运动捕捉系统对虚拟人运动数据进行捕捉。该系统可以 100 帧/s 的速度记录人体运动过程, 并实时输出被捕获人员的根节点空间坐标、各关节长度及旋转四元数等信息。

### 2.1 运动捕捉数据的处理过程

虚拟人的空间位置坐标可用 hip 点在虚拟环境世界坐标系中各坐标的投影值( $x, y, z$ )表示。由于采样时间间隔  $T$  很短, 因此速度与加速度的获取可采用下式近似计算:

$$v(t) = \frac{s(t+T) - s(t)}{T} \quad (1)$$

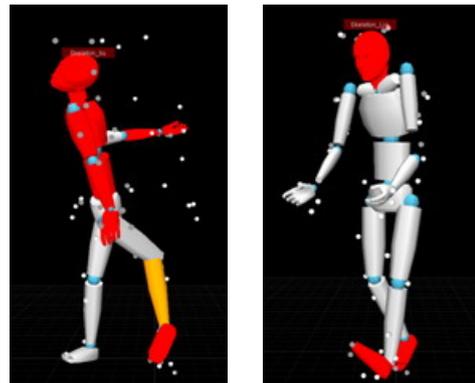
$$a(t) = \frac{v(t+T) - v(t)}{T} \quad (2)$$

式中:  $s(t)$  为  $t$  时刻虚拟人在  $x, y$  或  $z$  坐标轴上的投影值;  $v(t)$  为  $t$  时刻虚拟人在  $x, y$  或  $z$  坐标轴上的运动速度;  $a(t)$  为  $t$  时刻虚拟人在  $x, y$  或  $z$  坐标轴上的加速度。

### 2.2 空间位置坐标数据中错误点处理

通过对大量的运动捕捉数据进行分析可以发现, 在基于光学运动捕捉系统控制虚拟人进行操作训练的过程中, 由于捕捉的 marker 数量发生增减、

marker 点位置设置变化等多种原因, 常会导致操作人员的运动状态与所捕捉虚拟人的运动过程不符(如图 2 所示), 从而致使输出的运动捕捉数据出现错误。错误数据的产生, 常会使得虚拟人的操作训练过程出现难以预料的情况。因此在对数据进行分析处理前, 首先需要剔除捕捉数据中的错误点。



(a) 骨骼匹配错误 (b) marker 点匹配错误

图 2 运动数据中错误点出现的情况

由于光学运动捕捉系统的捕捉范围有限, 操作人员难以以较快速度在捕捉空间内进行移动。通过实验发现, 操作人员在捕捉空间内的移动速度往往不超过人体的正常步行速度  $V_1(1.5 \text{ m/s})$ 。为了保证数据的准确性和连续性, 根据操作人员的最快移动速度对捕捉的空间位置坐标数据进行处理。其中, 用  $(x(t), y(t), z(t))$  表示  $t$  时刻虚拟人的空间坐标位置,  $(x'(t), y'(t), z'(t))$  表示  $t$  时刻光学运动捕捉设备所输出的虚拟人空间坐标位置, 空间位置坐标数据中错误点的处理过程如图 3 所示。

在图 3 所示的错误点处理过程中, 当捕捉的虚拟人空间位置坐标相对于上一时刻虚拟人的空间位置坐标变化超过  $V_1$  时, 根据变化情况将前一时刻的位移值加上或减去最大变化幅度, 从而实现下一时刻虚拟人运动数据的计算。通过该方法对运动数据中的错误点进行处理, 一方面可以控制虚拟人相邻时刻空间位置间的变化幅度; 另一方面, 当捕捉的虚拟人从错误运动状态向正常运动状态转变时, 有助于实现虚拟人运动状态的自然过渡。

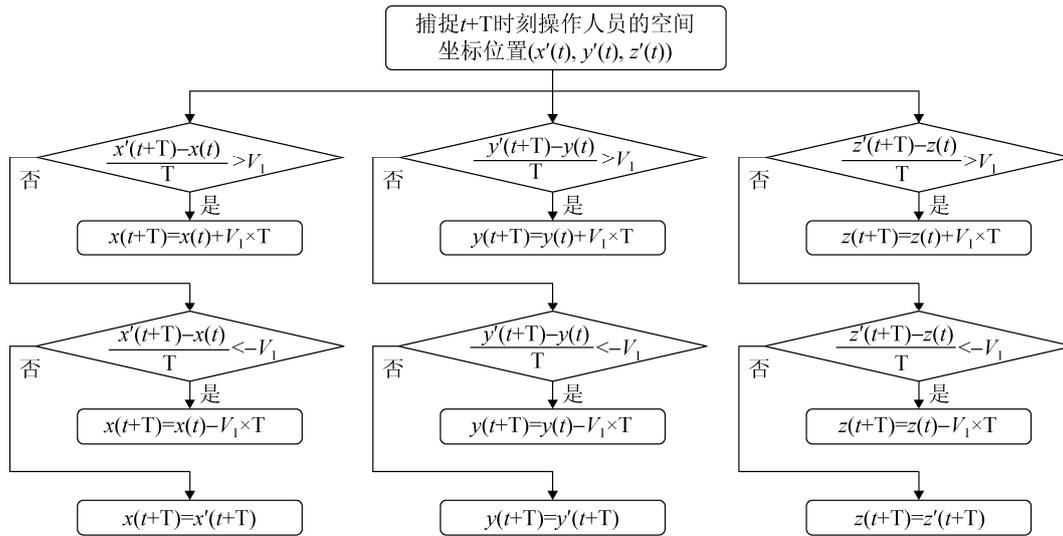


图 3 运动捕捉数据的处理过程

### 3 基于小波变换和 Kalman 滤波的虚拟人运动信息处理方法

为了获得准确、平滑的虚拟人运动数据,常采用 Kalman 滤波对运动数据进行处理。基于 Kalman 滤波方法对运动数据进行处理,可以提高空间位置坐标、运动速度及加速度的精度,但是空间位置坐标变化曲线的平滑性仍有待提高。采用经典滤波理论对运动加速度进行滤波后再计算速度和位移等运动信息,虽可以获得较为准确的加速度信息和虚拟人较为平滑的运动曲线,但由于滤波带宽的限制使得加速度中一部分有用信息被屏蔽,致使最终输出的速度和位移信息会随着时间的推移,累积误差逐渐增大。为此,本文提出基于小波变换和 Kalman 滤波的虚拟人运动信息处理方法,首先采用小波阈值去噪获取虚拟人主要的加速度信息,然后在此基础上利用弱跟踪 Kalman 滤波方法对位移、速度及加速度信息进行修正,从而获得更为准确和平滑的运动数据。

#### 3.1 基于小波阈值去噪的加速度处理方法

小波分析在噪声滤除方面的应用十分广泛。与传统加窗 Fourier 变换的滤波方法相比,小波变换具有时频局部化和多分辨率的性质,不仅能对平稳信号进行分析,还能有效提取非平稳信号中的瞬

态、稳态等特征<sup>[16]</sup>。设捕获的加速度信号为  $a(n)$ , 其采样序列为

$$a(n) = f(n) + e(n) \quad (3)$$

式中:  $f(n)$  为有用信号;  $e(n)$  为噪声信号,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。  $a(n)$  的小波去噪是在选定基本小波函数后,对  $a(n)$  进行小波分解的基础上进行的,通过对分解获得的各尺度时间-频带信号基于阈值进行滤波处理,以消除  $a(n)$  中线性叠加的噪声分量  $e(n)$ , 其滤波过程如下:

$$a(n) \xrightarrow{\text{DWT}} \{c_{i,j}\} \xrightarrow{\text{Threshold}} \{\hat{c}_{i,j}\} \xrightarrow{\text{IDWT}} \hat{a}(n) \quad (4)$$

式中:  $c_{i,j}$  为  $a(n)$  经过离散小波变换(DWT, Discrete Wavelet Transform)后得到的小波系数;  $\hat{c}_{i,j}$  为经过阈值滤波后的小波系数;  $\hat{a}(n)$  为经过离散小波逆变化(IDWT, Inverse Discrete Wavelet Transform)后所得到的滤波信号; 其中,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $j$  为分解的层数。

在实际应用中,主要可分为以下 3 步: (1)需要选择合适的小波函数和确定小波分解的层数  $K$ , 并对信号进行  $K$  层小波分解; (2)选择合适的阈值对每一层小波系数进行阈值量化处理; (3)根据小波分解的第  $K$  层尺度系数和经过阈值化处理的小波系数,进行信号重构。

基于 Arena 运动捕捉系统对操作人员运动过程中的空间位置数据进行捕捉,计算出其在  $x$  轴上的运动加速度信息。选择小波基为 dB4, 分解层数

取为 5, 阈值选用默认阈值, 采用软阈值对加速度信号进行去噪, 其处理结果如图 4 所示。

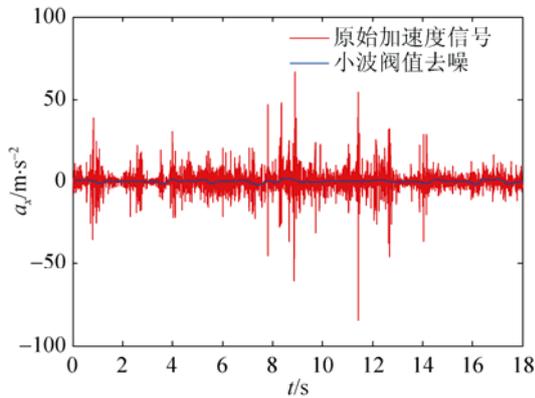


图 4 基于小波阈值去噪的 x 轴加速度处理结果

从图 4 可以发现, 基于小波阈值去噪的加速度处理方法可以过滤掉加速度信号中大部分的噪声信号, 从而获得主要的加速度信息。

### 3.2 基于弱跟踪 Kalman 滤波的运动信息处理

基于小波阈值去噪的滤波方法可以获得较为准确的加速度信息。但由于在滤波过程中过滤掉了高频的细节信号, 使得通过积分计算出的虚拟人速度和位移信息会存在累积误差。因此, 在基于小波阈值去噪对虚拟人运动加速度信息进行处理时, 提出采用一种弱跟踪 Kalman 滤波方法实现虚拟人运动信息的实时修正。

虚拟人在操作运动的过程中, 在  $x$ ,  $y$  及  $z$  坐标轴的运动信息可用状态量  $X$  表示,  $X$  为 3 维向量:

$$X = \begin{Bmatrix} s \\ v \\ a \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $s$ ,  $v$  及  $a$  为虚拟人在  $x$ 、 $y$  或  $z$  坐标轴上的位移、速度和加速度。动态方程为:

$$X_{k+1} = \Psi X_k + \Delta \varepsilon_k \quad (6)$$

式中,  $\Psi$  为  $3 \times 3$  维的状态转移矩阵;  $\varepsilon_k$  为 1 维的加速度噪声, 其均值为 0, 方差矩阵  $E(\varepsilon_k \varepsilon_k^T) = Q_k (Q_k > 0)$ ;  $\Delta$  为干扰矩阵, 为  $3 \times 1$  维。根据位移、速度及加速度间的关系,  $\Psi$  和  $\Delta$  具体如下:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于在计算机输出虚拟人 hip 关节的空间坐标数据中存在一定的计算误差, 因此, 运动信息量测方程为:

$$w_k = H_k X_k + v_k \quad (8)$$

式中:  $w_k$  表示  $k$  时刻输出的空间位置坐标;  $H_k$  为  $1 \times 3$  的观测矩阵;  $v_k$  为均值为 0 的测量噪声, 方差矩阵为  $E(v_k v_k^T) = R_k (R_k > 0)$ , 并与  $\varepsilon_k$  独立, 即有  $E(v_l \varepsilon_m^T) = 0$ , 对一切  $l, m$  成立。由于  $s$  为观测值, 即  $w_k = s$ , 则有  $H_k = H = (1 \ 0 \ 0)$ 。

基于小波阈值去噪的加速度信息和弱跟踪 Kalman 滤波方法对运动信息的处理过程如下:

1) 计算运动的预测值

$$\hat{X}_{k+1/k} = \Psi \hat{X}'_{k/k} \quad (9)$$

$$P_{k+1/k} = \Psi P_{k/k} \Psi^T + \Delta Q_k \Delta^T \quad (10)$$

式中:  $\hat{X}'_{k/k} (1:2,1) = \hat{X}_{k/k} (1:2,1)$ ,  $\hat{X}'_{k/k} (1:2,3) = \hat{a}_k$ ;  $\hat{a}_k$  为基于小波阈值去噪后获得的加速度信息;  $P_{k+1/k}$  为预测误差矩阵。

2) 引入弱跟踪因子  $\beta$ , 计算增益矩阵

$$K_{k+1} = \beta P_{k+1/k} H^T (H P_{k+1/k} H^T + R)^{-1} \quad (11)$$

3) 计算滤波值

$$\hat{X}_{k+1/k+1} = \hat{X}_{k+1/k} + K_{k+1} (w_{k+1} - H \hat{X}_{k+1/k}) \quad (12)$$

4) 计算滤波误差

$$P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} H) P_{k+1/k} \quad (13)$$

基于 Kalman 滤波的运动信息处理方法, 可以在使用滤波处理后的加速度信息对下一时刻的运动信息进行预测的同时, 实现对预测误差的实时修正。由于相邻时刻间的累积误差较小, 因此选择弱跟踪因子  $\beta$ , 其中  $\beta \in (0, 1)$ , 可以实现在对运动数据进行实时修正的同时, 提高运动数据的平滑性。

## 4 应用实例

基于 Arena 运动捕捉系统对操作人员在某一虚拟维修操作过程中的运动数据进行捕捉, 一共获得了 40 845 组虚拟人空间位置坐标数据, 其中虚拟人的某些运动状态如图 5 所示。

在剔除运动捕捉数据中错误点的基础上, 计算出虚拟人在各坐标轴上的速度和加速度信息。经过对大量的虚拟人空间位置坐标进行分析, 令采样时间间隔  $T=0.01\text{ s}$ , 可取  $Q_k=(17\text{ m/s}^2)^2$ ,  $R_k=(5.2\times$

$10^{-3}\text{ m})^2$  和  $\beta=0.1$ 。分别采用经典 Kalman 滤波和本方法分别对通过捕捉获得的虚拟人在各坐标轴上空间位置坐标、速度和加速度进行处理, 得到的部分虚拟人运动数据对比见图 6。

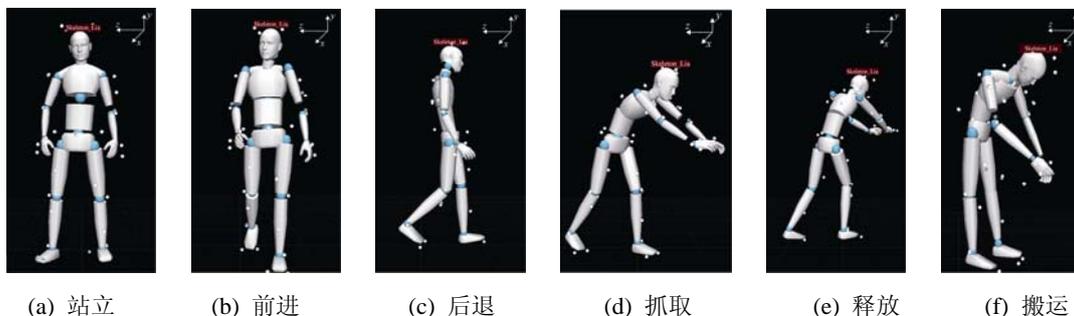


图 5 操作人员的操作训练过程

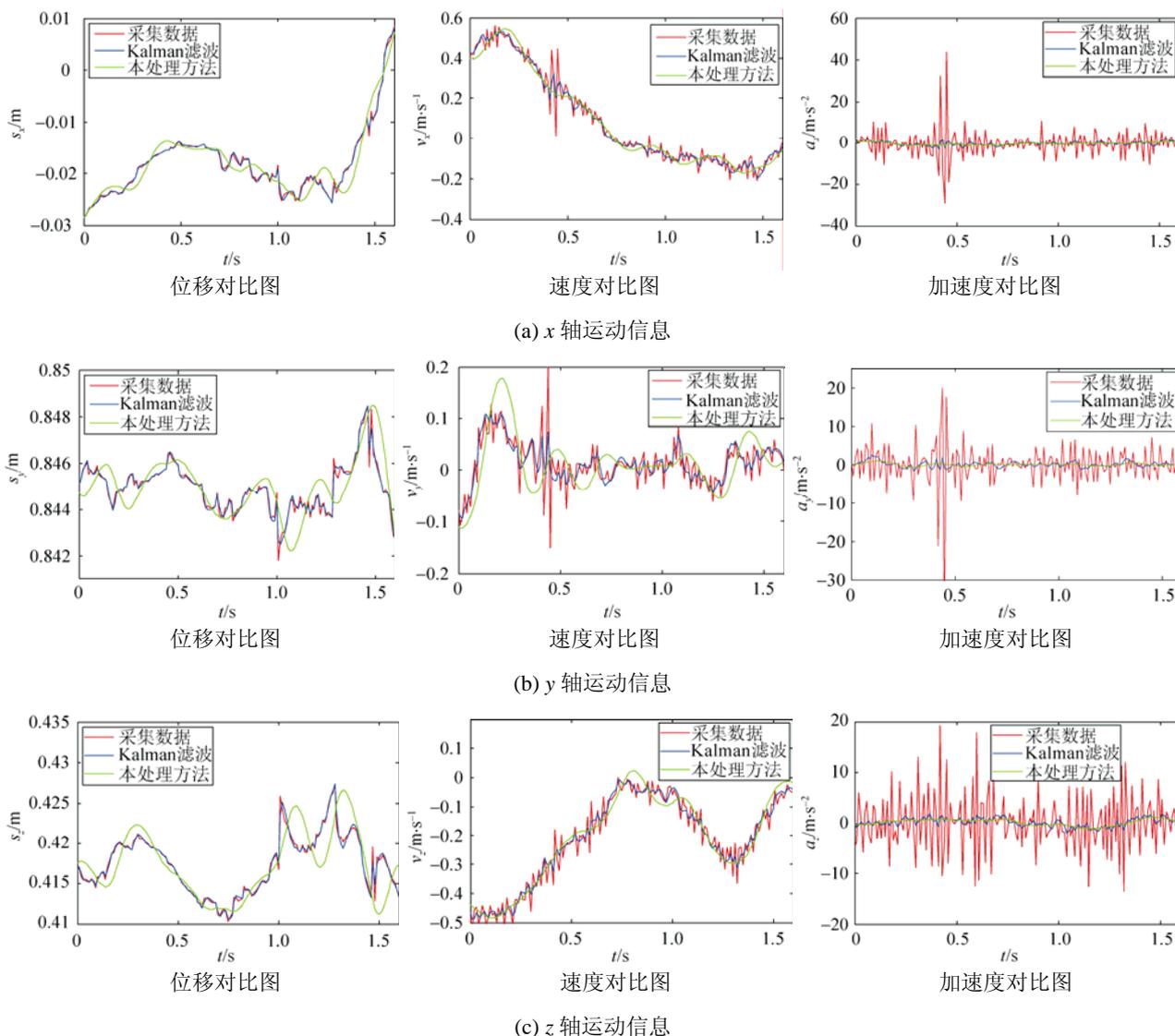


图 6 虚拟人运动数据对比图

从图 6 可以发现, 经典 Kalman 滤波与本方法均可实现对虚拟人空间位置信息的处理, 能正确反映出人员的运动过程。与采集数据相比, 两种方法在加速度数据处理上误差基本相同, 在速度与位移方面基于 Kalman 滤波所得的数据具有更小的误差。但由于采集数据中本身就含有大量的噪声信号, 因此这不足以说明 Kalman 滤波在速度及位移信息的处理上具有更高的精度。在平滑性方面, 本方法在加速度、速度及位移的处理上均要优于 Kalman 滤波。

由于人体肌肉的伸缩是一个自然的变换过程, 虚拟人在运动过程中往往具有较好的平稳性, 因此认为本方法所获得的加速度信息具有更高的可信度。其次, 根据虚拟人在运动过程中的加速度变化情况, 短时间内的速度与位移变化应分别满足一阶可导与二阶可导, 因此认为本方法获得的数据与原始采集数据及 Kalman 滤波方法相比更能准确地反映虚拟人的运动过程。

## 5 结论

为了获得更为真实准确的虚拟人运动信息, 有助于计算机对虚拟人的运动过程进行分析和理解, 针对在实验过程中发现的光学捕捉设备捕获虚拟人空间位置数据平滑性不足等问题, 在剔除了空间位置信息中错误点的基础上, 提出了基于小波变换和 Kalman 滤波的空间位置信息处理方法。

该方法一方面基于小波变换获得了主要的加速度信息; 另一方面根据加速度、速度及位移间的关系, 基于弱跟踪 Kalman 滤波实现了对小波变换带来的累积误差的修正。通过与 Kalman 滤波方法相比, 本方法不仅可以获得准确的空间位置坐标、速度及加速度信息, 而且实现了对运动信息的平滑, 获得的数据更为符合人体实际的运动过程。通过本方法对虚拟人运动信息进行处理, 可为进一步分析虚拟人的运动过程、判断虚拟人操作动作提供更准确的信息保障。

## 参考文献:

[1] 潘志庚, 吕培, 徐明亮, 等. 低维人体运动数据驱动的

- 角色动画生产方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(12): 1775-1783.
- [2] 刘登志, 卢书芳, 万贤美. 实时三维人体卡通运动的设计与实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(6): 985-992.
- [3] Wang Chengfeng, Ma Qin, Zhu Dehai, et al. Real-time control of 3D virtual human motion using a depth-sensing camera for agricultural machinery training [J]. *Mathematical and Computer Modelling* (S0895-7177), 2013, 58: 782-789.
- [4] Jane Hwang, Gerard J Kim. Provision and maintenance of presence and immersion in hand-held virtual reality through motion based interaction [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds* (S1546-4261), 2010, 21: 547-559.
- [5] Shin H J, Lee J, Shin S Y, et al. Computer puppetry: an importance-based approach [J]. *ACM Transactions on Graphics* (S0730-0301), 2001, 20(2): 67-94.
- [6] Lou H, Chai J. Example-based human motion denoising [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (S1077-2626), 2010, 16(5): 870-879.
- [7] 容志能. 惯性运动捕捉系统中传感数据的传输与处理[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] Shi Pingan, Ye Jiawei. Measured data processing method for relative motions between two side-by-side ships [J]. *TELKOMNIKA: Indonesian Journal of Electrical Engineering* (S1693-6930), 2013, 11(1): 73-82.
- [9] Lin Hongwei. Adaptive data fitting by the progressive-iterative approximation [J]. *Computer Aided Geometric Design* (S0167-8396), 2012, 29(7): 463-473.
- [10] 邱世广, 周德吉, 范秀敏, 等. 虚拟操作仿真环境中基于运动捕捉的虚拟人实时控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 523-528.
- [11] Alessandra Martins Coelho, Vania Vieira Estrela. Data-driven motion estimation with spatial adaptation [J]. *International Journal of Image Processing* (S1985-2304), 2012, 6(1): 54-67.
- [12] 吴升, 张强, 肖伯祥, 等. 一种有效的光学运动捕捉数据处理方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(5): 790-798.
- [13] 魏小鹏, 刘瑞, 张强, 等. 基于模板匹配的人体运动捕捉数据处理方法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2368-2372.
- [14] 侯永隆, 宁涛, 王可. 基于光学运动捕捉的虚拟人体标定技术[J]. 图学学报, 2013, 34(5): 126-131.
- [15] 王军, 胡永刚, 韩崇昭. 被动式光学运动捕捉系统丢点检测与补偿 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 12(34): 2374-2378.
- [16] 赵葵, 芮延年, 陈欢, 等. 基于小波变换的数据运动捕捉在虚拟人运动建模中的应用[J]. 苏州大学学报(工科学版), 2006, 26(4): 45-48.