

# 运动数据的风格化处理综述

张焰<sup>1</sup> 费广正<sup>2</sup> 韩红雷<sup>2</sup> 朱永峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国传媒大学计算机学院, 北京 100024

<sup>2</sup> 中国传媒大学动画学院, 北京 100024

**摘要:** 随着运动捕捉技术的兴起, 计算机动画技术得到了空前的发展。运动捕捉的关键是对运动数据进行编辑, 如何高效地利用运动捕捉数据来进行动画创作, 使数据实时交互地在计算机动画中应用逐渐成为研究的热点。而运动数据的风格化处理利用了运动编辑技术, 可以在保持原始运动真实感的同时, 在一定程度上还原动画的夸张性和表现力, 满足不同用户对运动风格的需求。本文中, 我们将对运动数据的风格化处理技术作一个较全面的综述, 并根据不同的原理和处理方法进行分类, 主要从四个方面重点讨论这些常用的技术, 并分析它们的优势和不足以及可能的改进。

**关键词:** 计算机动画 运动捕捉 运动编辑 运动风格化

## Survey of Motion Capture Data Stylizing

ZhangYan<sup>1</sup> FeiGuangZheng<sup>2</sup> HanHongLei<sup>2</sup> ZhuYongFeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Computer School, Communication University of China, Beijing, 100024

<sup>2</sup>Animation School, Communication University of China, Beijing, 100024

**Abstract:** With the popularity of Motion Capture Systems, Computer Animation has made great progress in recent years. As the key of motion capture is motion editing, how to use motion capture data to generate animation more efficiently and apply it to computer animation at an on-line interactive rate gradually becomes a hotspot of research. The stylizing of motion data, which meets the needs for motion style of different users, makes use of motion editing technology to revert the exaggeration and expression of animation to some extent while preserving the realistic of original motion. This paper will survey a variety of techniques which developed in motion stylizing, we define a taxonomy of these methods that is categorized by the mechanism and the principle employed to stylize. We will mainly emphasize on these common techniques from four aspects, and analyze their performance or possible improvements.

**Keywords:** computer animation; motion capture; motion editing; motion stylizing

\* 本课题受到国家自然科学基金(60403037)资助。张焰, 1983年生, 硕士研究生, 主要研究方向计算机图形学, 运动捕捉和运动编辑。Email: [lazio-zyme@163.com](mailto:lazio-zyme@163.com)。费广正, 1973年生, 副教授, 主要研究方向为计算机动画、虚拟现实等。韩红雷, 1980年生, 助教, 主要研究方向为计算机动画, 游戏引擎。朱永峰, 1979年生, 硕士研究生, 主要方向计算机图形学, 运动捕捉和运动编辑非真实感图形学。

## 1. 引言

真实感的运动捕捉及处理技术已经成为当前三维计算机动画研究领域的热点。人体具有 200 个以上的自由度和非常复杂的运动，人的个性、表情也千变万化，利用计算机技术表现这些特点极具挑战性。而运动捕捉技术可以比较容易地得到真实的人体运动。但很多时候，艺术家需要对捕捉到的数据进行某种程度的夸张或者艺术化处理，这就需要对运动数据进行某种编辑。另外，由于人类对自身的运动非常熟悉，不协调的运动很容易被观察者所察觉，所以寻找一种有效的运动风格化方法对于解决这个问题来说至关重要。

运动捕捉技术的难点在于如何对现有的真实的运动数据进行处理，即运动编辑。“逼真”虽然可以带来视觉上的准确，却失去了动画本身所固有的优势——夸张和表现力。在基于运动捕捉的动画中该问题显得更为严重，因为运动数据提供了角色所有的动作和姿态，动画师根本没有机会加入自己想要的风格。同时由于数据来源于真实世界，运动捕捉序列也就缺乏传统动画的特殊表现力，所以如何进行风格化处理就成为制约运动捕捉技术应用的瓶颈。

每个运动都有自己特定的风格。风格是对某个运动状态的抽象表达，而运动状态又是骨骼中各个关节自由度集合的函数，因此风格同样是对关节参数集合的抽象。不同风格之间既有内在的相关性，又有视觉外观上的差异性，这些区别也都表现在关节参数的变化上。通过风格化的运动编辑，可以提取不同运动风格的特征，实现风格的转移和改变，使角色具有更大的灵活性，在不受动画师干预的情况下对环境做出正确的反馈和适应，同时还可以充分利用不同类型的运动数据。

综上所述，由于人们对运动数据进行风格化处理的需求，极大地促进了研究者对该领域的研究，也出现了许多振奋人心的研究成果。本文将综述运动风格化处理技术的发展状况和关键技术，并按照不同的运动编辑方法，将风格化编辑技术分为四类，分别对它们进行分析。

## 2. 基于约束的风格化编辑

基于约束的运动编辑将某些必须保持或者修改的特征作为约束条件，并在运动中明确表达这些特征，通过基于约束的优化求解方法来产生符合要求的动作序列。时空约束方法最早由 Witkin 和 Kass [1] 在 1988 年提出，根据用户指定的运动路线和姿态约束对运动曲线进行时域或者频域上的编辑。用户修改角色的关键帧姿态，应用样条曲线拟合姿态的改变量得到偏移，再将其叠加到原始运动数据上得到新动画。时空约束通常转化为求解一个目标函数表征身体最低能耗的优化问题，但是计算代价高，难以控制，不适合计算机动画的交互特性，而 Gleicher [24] 允许用户直接在运动中设置角色的姿态，时空约束的递归求解方案会根据整个运动序列快速地确定最佳位置。该方法可以交互式编辑运动，类似传统的关键帧技术和反向运动学方法。但是系统不能对运动风格进行数学抽象，同时忽略了牛顿定律，因为物理约束会使最优化问题的求解更加复杂。这需要在依赖于复杂约束的高质量编辑和简单快速的问题求解之间做出平衡，显然作者选择了后者。

除了对角色姿态进行约束，运动路径同样适用于风格化编辑。但是当前的编辑工具，无论是基于逆向运动学，信号处理（运动混合，变形和位移映射），还是基于约束优化（时空的和物理的），都不能有效地解决路径变换问题。Gleicher [26] 将路径作为运动的一种抽象，通过对运动位移映射算法进行简单的扩展，并加入时空约束处理来保持细节，更好地控制了路径，避免了对几何约束的破坏，比如滑步。

运动重定位技术[25]研究如何在结构相同但身体各部分尺寸不同的角色之间匹配运动，该方法产生的匹配结果保持了原始运动必要的质量，将相对特殊的运动特征看作是必须保持的约束，通过时空约束求解方案计算这些带有约束的匹配运动，同时保持原始运动信号的频率特征。但是实用性的获得导致匹配的运动质量下降，同时对数学模型的选择也严重受到求解效率的影响。

层次化方法[15]的引入使时空约束问题的求解多了一种选择。该方法在层次化的曲线拟合技术中加入了新的反向动力学方案，用来调整角色的姿态来满足每一帧的约束。通过在一个多分辨率框架中使用多级 B 样条曲线进行拟合，这样做的目的在于用多分辨率表示法来找到运动目标重定位或运动拟合问题的解，自适应地增加运动细节并在一定范围内满足约束，同时加快了插值的速度。而使用单层的样条插值曲线可能会因为引进的波动使运动细节受到干扰而无法保留。该方法的局限是无法处理跨越多帧的帧间约束。

基于物理的运动编辑技术通常采用基于动力学的关节角色模型来模拟物理真实感，它的优点在于可以生成符合物理特性的真实的运动序列，实现比关键帧或运动捕捉技术更为精确的交互。而复杂的求解过程成为物理真实感的主要制约因素。Popovic 和 Witkin[33]对角色动画序列变形的同时保持其重要的物理属性，通过使用动态的时空约束公式，算法保持了原有运动序列的真实性，而没有以牺牲用户对编辑过程的控制为代价。由于生物运动的复杂性，手动设计风格参数十分困难，Liu[9]提出了一种新颖的基于物理的运动表达方式，通过引入非线性反向最优化方法来提取真实运动中的物理参数。

有不少角色动画系统使用某种形式的表演作为交互的手段，将真实的或者夸张的人体运动风格直接映射到角色上。此类技术包括全身的表演，例如运动捕捉或表演动画；身体轮廓的使用[22]，各种形式的电脑人偶[28][31]，以及利用先模仿后修改的方法将演员或动画师的动作映射到角色的系统[10]。而当角色与表演者的尺寸比例不同时，将一个表演者的运动映射到目标角色上会更加困难[25][35]，这种情况下产生的角色运动并不能精确地复制表演者的运动。SHIN[13]提出了一个基于重要性的计算机人偶模型，给出了将运动捕捉传感器的观测值转移到尺寸比例都不同的动画角色身上的完整解决方案，改进了之前的方法。

随着在约束中合成运动的动力学和运动学方法越来越成熟，对约束的指定就成为一个瓶颈，特别是初学的动画师。运动涂鸦[27]实现了一种基于手绘风格的运动路径编辑方法，可以为角色在二维和三维环境中建立手绘草图模型。系统中的 2D 画笔输入与前面介绍的技术不同，主要利用手绘输入而非用户的表演。系统最初的输入是需要创建运动的角色，然后通过绘制一系列连续的线段、弧形和环型的方式来创建运动，将这些输入进行分析并映射成为一组参数化的输出运动。但是由于 3D 映射带来的歧义性，系统不支持 3D 空间中完整的姿态词汇，也不适用于包含运动细节的动画。

### 3. 基于统计和学习的风格化编辑

运动捕捉数据往往缺少结构化的描述，统计学习方法适合于对运动数据的全局控制，关注动作的统计学特征和有意义的属性，系统能够从运动捕捉序列中提取一般性或代表性的运动规则和模式。但是统计学模型并非针对运动本身的特性，可能使一些看起来是细节而实际上很重要的运动特性丢失，从而导致生成的运动风格失真。

Brand 和 Herzmann[3]通过从运动捕捉序列的多样性集合中学习运动模式的方法来解决风格化运动合成问题，引入了风格机 (style machine)：一个可以产生风格化运动序列的统计模型，而只需要调整少数的风格化参数，同时支持新风格的合成与再合成，以及已有数据的风格识别。风格机使用隐式马尔科夫链模型 (HMM) 来学习舞蹈动作和运动数据的风格，并且在 HMM 中加入一个用来将参数多样化的多维风格化变量  $v$ ，得到了称为风格化隐式马尔科夫链模型 (SHMM)。通过将 SHMM 的熵值最小化，可以在运动数据库中分解模型，风格和附加属性，最终产生不同风格的新舞蹈动作。Davis 和 Kannappan[16]对给定的一个角色按照指定强度表演的运动捕捉序列，通过强度到系数的映射，学习动作中的基本规则来选择最“富有表现力”的特征对运动进行夸张。Grochow 等人[12]提出了基于人体姿态学习模型的反向运动学系统。给定一系列约束，系统可以实时地产生最相似的姿态来满足这些约束。该方法使用扩展的高斯过程隐式变量模型表示一个在所有可能的姿态空间上的概率分布，优先选择与训练数据的姿态空间最相似的。

主元分析法(PCA)作为一种统计学方法也是人体动画中常用的降维手段。Barbic[17]利用 PCA 和 基于概率的 PCA 降维后基的差异，对运动序列进行分割。Safonova[5]在生成物理真实感的人体动画中，则利用

PCA 作为一种降维方法,为逆向运动学和动作编辑的优化问题做了简化,PCA 也可以应用于运动合成。将运动表示为基本元素的线性组合已经成为广泛使用的动画融合技术,但是这种方法不能很好地适用于创建不存在于运动数据库的风格,动画师只能调整 PCA 参数来得到一些难以辨别的运动风格。这样在保证真实性的前提下,每次都要通过运动捕捉来得到一个新的完整运动。Urtasun[30]扩展了 PCA 方法:对于所有的循环和非循环的运动,给定一个 PCA 分解和一个没有被分解过的运动,将它映射到 PCA 空间并计算马氏距离,将速度或跳跃距离相同的运动存入数据库,用于合成新的速度或距离都不同的运动。但是系统没有考虑曲线运动的合成,与逆向运动学相结合来避免滑步现象也有待于进一步的研究。

创建计算机动画中的运动通常有两种方法:关键帧和运动捕捉。关键帧技术费时费力,但是允许动画师对角色的动作进行精确的控制;运动捕捉数据提供了一个完整的包含所有真实运动细节的数据集合,但是动画师无法有效控制结果。而运动纹理技术[29]将关键帧动画和运动捕捉数据的优势结合在一起,合成与原始数据有相似统计特征的人体运动。动画师通过设置某些自由度的一部分关键帧来控制原始的粗糙动画,在需要使用运动捕捉数据的信息为将要生成动画的自由度填充细节,这个过程称为给运动增加“纹理”,没有用来生成动画的自由度将被合成。

## 4. 基于信号处理的风格化编辑

从信号处理的角度来看,运动捕捉数据是对身体各个关节运动信号的采样,可以通过对数据的各个频率进行增强或者削弱,以加大或减少人体关节的运动幅度。最早将信号处理引入运动编辑的是运动信号处理[3],Bruderlin 和 Williams 综合运用图象和信号处理领域的技术,通过将运动参数作为采样信号应用于运动编辑,每个信号包含了某个自由度在每一帧上的值,该方法对关节模型的自由度操作实现了高层控制。运动信号处理包括多分辨率运动滤波,基于动态时间变形的多目标运动插值,波塑形和运动位移映射。

将多分辨率滤波的方法应用于关节模型的动机在于不同频率的信息表现不同的运动特征。Lee 等人[20]将多分辨率运动分析作为一个统一的框架来简化各种运动编辑任务。由于方向空间的非线性特征,该方法利用层次位移映射和固定坐标的运动滤波为包含方向和位置的运动数据生成多分辨率表达式,通过不同级别上的系数控制,统一解决运动修改,混合和连接产生的问题,简化了多分辨率的运动编辑。同时,在四元数表示旋转的情况下, Lee 等人[21]设计了一种通用的线性时不变旋转滤波器,并在此基础上给出了多分辨率运动信号分析的一般方法:通过指数映射和对数映射在单位四元数集合  $S^3$  和线性空间  $R^3$  之间建立映射关系,滤波先在线形空间  $R^3$  上进行然后再转换到了  $S^3$ ,并证明这样构造的旋转滤波器具有线性时不变性(LTI),因此是一种通用的旋转滤波方法。

Inkwell[19]是一个实验性的 2.5 维关键帧动画系统,通过参数化数字滤波可以实现平稳的或尖锐的滤波效果,或者给参数加上“扰动”。Inkwell 使用三阶无限冲激响应滤波器(IIR),通过三个分别控制增益、衰减量和振荡幅度的滑块来调整,这些参数分别控制运动的大小,幅度和延迟。卡通动画滤波器[18]通过给原始信号施加了一个平滑的,反向的和时间转移的二次导数(速率)信号,将任意输入的运动信号调节为更加生动和活泼的运动进行输出,用户只需要设置滤波器的强度。滤波后的运动具有预测,连续,夸张,挤压和拉伸的效果。

自从运动捕捉技术出现,傅立叶变换就被用来操作运动数据了。傅立叶理论通常用来分析连续的周期函数。许多运动捕捉数据(比如走和跑的循环)都是近似的周期函数。在运动数据中,近周期现象和偏离周期的小幅变化是明显的也是重要的,因为它们使角色的运动各具特色。Perlin 的著作[14]详细地描述了近周期概念,他把一个富于表情的运动模拟成一个基本运动加上噪声的形式,由于噪声函数引导的扰动导致了角色在不同表情下动作的不同。Unuma 等人[32]基于情感对人体运动进行建模,将人体运动的实验数据进行傅立叶级数扩展来提取风格元素,并作为对人体运动内插值和外插值的基础。该方法将运动捕获数据变换到频域进行处理,对频率系数进行插值和缩放,生成能表达虚拟人情感的动画。Amaya 等人[4]也引入

一个从“普通的”运动产生“情感化”动画的模型。通过使用信号处理技术，计算某种特定情感的变换式，并将其应用到已有的关节模型运动来产生动作相同但情感不同的运动。这种变换比较速度（时间）和空间振幅（范围）两个元素来捕捉普通运动和情感运动之间的不同。

风格转移是将一个输入运动转换为一种新风格同时保存它原始的内容。Hsu 等人[11]通过比较输入运动与输出运动之间相同内容的不同表现来学习风格转移。输入风格与输出风格之间的关系通过一个线性时不变(LTI)模型来描述[34]，这不同于用离散状态或者约束来表现内容的方法。而迭代的运动变形(IMW)算法利用时间和空间上的变形来计算风格不同的运动之间的相关性并调整运动。调整好的运动通过系统识别技术计算转移模型，该模型可以接收输入的风格并生成输出风格的运动。但是和大部分的融合和统计学方法一样，该模型同样不能生成物理正确的运动。

## 5. 基于插值和变形的风格化编辑

插值和变形的的方法都是基于动作序列的参数化描述来产生新的动作，在运动编辑中广泛使用。它们可以作为一种数据简化技术——通过插值把离散的数据连接起来或通过变形修改角色的外形和姿态，可以生成新的运动风格或连接不同的运动，大大拓展了运动数据库。

Rose 等人[7]介绍了一个在运动捕捉或者传统动画中提取的样本运动之间进行插值的技术。这些运动由情感表现力或控制行为来刻画，这样的参数化运动和控制这些运动的参数分别称作“动词”和“副词”。动词之间可以平滑过渡并组合为一幅“动词图”，虚拟角色可以在系统之内的动词之间进行无缝过渡。原先的技术难以在运动插值过程中保持原始运动的美感，并且难以得到样本。该方法结合径向基函数和低阶多项式在样本运动间中建立插值空间，用动词和副词进行运动参数化。“卡通捕捉和重定位”技术[8]从传统的动画卡通中跟踪运动并重定位到三维模型，二维手绘和照片上。卡通捕捉将数字化的卡通变换为一个卡通运动表达，组合使用仿射变换和关键形状插值，同时跟踪卡通层次上非刚体形状的改变。该方法定义了两种不同的捕捉，一个是根据卡通角色的轮廓，另一个直接应用于没有标识的视频，两者都基于最小二乘法。卡通重定位将捕捉到的信息输出到不同的媒体，生成一个同时具有新外观和原始卡通动作的动画。

Witkin 和 Popovic[2]将运动变形技术应用于运动编辑，通过运动参数曲线的变形来编辑运动捕捉或者关键帧动画。类似于传统的关键帧技术，动画师交互地定义一系列类似关键帧的约束来产生平滑的变形，同时维持原始运动的良好结构。运动片断通过参数曲线的叠加和混合进行连接，这表明整个运动数据库都可以通过一个单独的运动捕捉序列来生成，只需要使用一些关键帧来设定运动变形即可。运动变形也存在一些标准关键帧技术具有的局限，比如难以在关键帧之间增强几何约束；同时，过度的变形可能会导致视觉上的扭曲或不自然。Li 等人[23]提出一种在运动捕捉的三维刚体模型中注入传统二维动画变形的的方法。动画师通过重新绘制角色在关键帧的姿态比如轮廓线，将变化传递到整个动画序列中。这种变化可分为两类：通过骨骼动画直接修改（整体的）的和必须改变角色网格几何特征的（局部的）。为此系统在角色与草图之间创建密度图变形和基于模型三维结构的插值方法（MFFD），将草图中的像素和三维数据联系起来。在非关键帧时刻并不需要变形，而是去近似草图，通过计算出每一帧处角色的变形，可以生成最终的动画。但是系统只能对关键帧进行变形，无法调整与时间相关的参数来改变风格，比如速度，轨迹。

## 6. 结束语

基于运动捕捉数据的动画研究，已经成为近年来计算机图形学领域的一大热点，被广泛地应用于影视、游戏、教育，甚至国防等领域。而运动控制和运动编辑的主要目的就是简化用户对运动的处理，同时又不失去对运动的控制，运动风格化处理技术在此基础上应运而生，既加强了运动编辑的能力，又赋予用户更大的创作空间，实现了从已有的运动数据库中生成不同风格运动的效果，提高了运动数据重用的效率，适

应了计算机动画快速发展的需求。研究者长久以来的努力已经解决了众多风格化编辑的难题，本文从运动编辑技术的原理出发，将风格化编辑分为基于约束的、基于信号处理的、基于统计和学习的和基于插值变形的四个方面，并分别讨论了运动风格化技术的发展状况和常用方法，前两者属于正向求解问题，而后两者属于逆向求解。同时较为详细地比较了各种技术的优势和不足以及可能的改进，希望能对相关领域的研究人员和工程技术人员有所帮助。

## 参考文献

- [1] Andrew Witkin and Michael Kass. Spacetime constraints. In John Dill, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, volume 22, pages 159–168, August 1988.
- [2] Andrew Witkin and Zoran Popović. Motion warping. In Robert Cook, editor, *SIGGRAPH 95 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 105–108. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1995. held in Los Angeles, California, 06-11 August 1995.
- [3] Armin Bruderlin and Lance Williams. Motion signal processing. In Robert Cook, editor, *SIGGRAPH 95 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 97–104. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1995.
- [4] AMAYA, K., BRUDERLIN, A., AND CALVERT, T. 1996. Emotion from motion. In *Graphics Interface '96*, 222–229.
- [5] A. Safonova, J. K. Hodgins, N. S. Pollard. Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 514521.
- [6] BRAND, M., AND HERTZMANN, A. 2000. Style machines. In *Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000)*, ACM SIGGRAPH, Annual Conference Series, 183–192.
- [7] Charles Rose, Michael F. Cohen, and Bobby Bodenheimer. Verbs and adverbs: Multidimensional motion interpolation. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 18(5), September – October 1998. ISSN 0272-1716.
- [8] Christoph Bregler, Lorie Loeb, Erika Chuang, Hrishi Deshpande: Turning to the masters: motion capturing cartoons. *ACM SIGGRAPH*, San Antonio, 2002. 399~407
- [9] C. Karen Liu, Aaron Hertzmann, and Zoran Popovic. Learning physics-based motion style. with nonlinear inverse optimization. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 05)* 24, 3 (2005), 1071–1081.
- [10] DONTCHEVA, M., YNGVE, G., AND POPOVIĆ, Z. 2003. Layered acting for character animation. *ACM Transactions on Graphics* 22, 3 (July), 409–416.
- [11] E. Hsu, K. Pulli, and J. Popovic, “Style translation for human motion,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, pp. 1082–1089, 2005.
- [12] GROCHOW, K., MARTIN, S. L., HERTZMANN, A., AND POPOVIĆ, Z. 2004. Style-based inverse kinematics. *ACM Transactions on Graphics* 23, 3 (Aug.), 522–531.
- [13] Hyun Joon Shin, Jehee Lee, Michael Gleicher, and Sung Yong Shin. Computer puppetry: An importancebased approach. *ACM Transactions on Graphics*, 20(2):67–94, April 2001.
- [14] Ken Perlin. Real time responsive animation with personality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(1):5–15, March 1995.
- [15] Jehee Lee and Sung Yong Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, pages 39–48, August 1999.
- [16] J. W. Davis and V. S. Kannappan. Expressive features for movement exaggeration. In. *SIGGRAPH Conference Abstracts and Applications*, page 182. ACM, 2002.

- [17] J. Barbic, A. Safonova, J. Pan, C. Faloutsos, J. K. Hodgins, N. S. Pollard. Segmenting motion capture data into distinct behaviors. *In: Proceedings of the 2004 ACM conference on Graphics interface*, London, Ontario, Canada, 2004:185-194.
- [18] Jue Wang, Steven Drucker, Maneesh Agrawala, Michael Cohen. The Cartoon Animation Filter. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006)*, July 2006.
- [19] Litwinowicz, P.C. Inkwell: a 2.5-d animation system. *Computer Graphics*, 1991,25(4):113~122.
- [20] Lee J H, Shin S Y Multiresolution motion analysis with applications. *In Proceedings of The international workshop on Human Modeling and Animation*, Seoul, 2000. 131-143
- [21] Lee J H, Shin S Y General construction of time-domain filters for orientation data[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, 8 (2):119-128
- [22] LEE, J., CHAI, J., REITSMA, P. S. A., HODGINS, J. K., AND POLLARD, N. S. 2002. Interactive control of avatars animated with human motion data. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002)* 21, 3 (July), 491-500.
- [23] LI Y., GLEICHER M., XU Y.-Q., SHUM H.-Y. Stylizing motion with drawings. *In Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (2003)*, pp. 309-319.
- [24] Michael Gleicher. Motion editing with spacetime constraints. In Michael Cohen and David Zeltzer, editors, *Proceedings 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 139–148, apr 1997.
- [25] Michael Gleicher. Retargeting motion to new characters. In Michael Cohen, editor, *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 33–42. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July 1998.
- [26] Michael Gleicher. Motion path editing. *In Proceedings 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*. ACM, March 2001.
- [27] Matthew Thorne, David Burke, Michiel van de Panne, Motion doodles: an interface for sketching character motion, *ACM Transactions on Graphics (TOG) Volume 23 , Issue 3 (August 2004)*, Special Issue: *Proceedings of the 2004 SIGGRAPH Conference*, Pages: 424 – 431.
- [28] OORE, S., TERZOPOULOS, D., AND HINTON, G. 2002. A Desktop Input Device and Interface for Interactive 3D Character Animation. *In Proc. Graphics Interface*, 133-140.
- [29] PULLEN, K., AND BREGLER, C. 2002. Motion capture assisted animation: Texturing and synthesis. *ACM Transactions on Graphics* 21, 3 (July), 501–508.
- [30] R. Urtasun, P. Ghardon, R. Boulic, D. Thalmann, and P. Fua, “Style-based Motion Synthesis,” *Computer Graphics Forum*, vol. 23, no. 4, pp. 1–14, 2004.
- [31] STURMAN, D. J. 1998. Computer puppetry. *IEEE Computer Graphics and Applications* 18, 1 (Jan-Feb), 38-45.
- [32] UNUMA, M., ANJYO, K., AND TEKEUCHI, R. 1995. Fourier principles for emotion-based human figure animation. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95)*, ACM SIGGRAPH, Annual Conference Series, 91–96.
- [33] Zoran Popovic and Andrew Witkin. Physically based motion transformation. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, pages 11–20, August 1999.
- [34] LJUNG, L. 1999. *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. Prentice Hall PTR.
- [35] BADLER, N., HOLLICK, M. J., AND GRANIERI, J. P. 1993. Real-time control of a virtual human using minimal sensors. *Presence* 2, 1, 82–86.