

硕 士 研 究 生 读 书 报 告



题目 预测人体运动协调模式在

计算机图形学中的应用

作者姓名 俞晨昊

作者学号 21651191

指导教师 李启雷

学科专业 软件工程

所在学院 软件学院

提交日期 二○一七年 四月

Modeling of Predictive Human Movement Coordination Patterns for Applications in Computer Graphics

Major Subject: Software Engineering

Advisor: Qilei Li

By

Chenhao Yu

Zhejiang University, P.R. China

2017

**摘要**

人体运动的规划是可以被高度预测的。在一系列动作中，最终任务目标的预期是通过整体运动规律来调节个体的动作。一个例子是一系列的步骤，这是协调与把握的对象在步骤序列结束时。相对于自然人类运动的这个属性，计算机图形中的实时动画系统通常通过单个预先存储的运动的连续级联来模拟复杂的活动，其中只有在完成目标之前的运动被适应。我们提出一种基于学习的技术，模拟人类的高度适应性预测运动协调，以行走和到达的协调为例。所提出的用于人类运动的实时合成的系统通过连续的运动连接来模拟复杂的活动，其通过使用逐步回归方法从轨迹数据学习的运动元的叠加近似。运动元然后通过可嵌入控制架构的非线性动力系统（动力元）的稳定解来逼近。我们提出了一个控制架构，可以产生高度自适应的预测性全身运动，以便以高度人性化的外观走动。我们证明，生成的行为是非常强大的，即使存在强烈扰动，需要在线插入额外的步骤来完成所需的任务。

**关键词**:计算机动画，运动元，运动协调，动作序列，预测

**Abstract**

The planning of human body movements is highly predictive. Within a sequence of actions, the anticipation of a final task goal modulates the individual actions within the overall pattern of motion. An example is a sequence of steps, which is coordinated with the grasping of an object at the end of the step sequence. Opposed to this property of natural human movements, real-time animation systems in computer graphics often model complex activities by a sequential concatenation of individual pre-stored movements, where only the movement before accomplishing the goal is adapted. We present a learning-based technique that models the highly adaptive predictive movement coordination in humans, illustrated for the example of the coordination of walking and reaching. The proposed system for the real-time synthesis of human movements models complex activities by a sequential concatenation of movements, which are approximated by the superposition of kinematic primitives that have been learned from trajectory data by anechoic demixing, using a step-wise regression approach. The kinematic primitives are then approximated by stable solutions of nonlinear dynamical systems (dynamic primitives) that can be embedded in control architectures. We present a control architecture that generates highly adaptive predictive full-body movements for reaching while walking with highly human-like appearance. We demonstrate that the generated behavior is highly robust, even in presence of strong perturbations that require the insertion of additional steps online in order to accomplish the desired task.

**Keywords:** computer animation, movement primitives, motor coordination, action sequences, prediction.

**1引言**

计算机动画的一个核心问题是复杂行为的在线综合，其中包括个别行为的序列，这些行为必须适应不断变化的环境约束。当达成目标的位置发生动态变化时，协调行走和到达的在线规划就是一个例子。

 在计算机图形学中解决这个问题的一个突出的方法是运动捕获示例动作[WP95，GSKJ03，AFO03]之间的自适应插值。其他方法基于全身运动的学习低维参数化，其嵌入在用于在线生成运动的数学框架（例如[HPP05，SHP04，RCB98，WFH08，LWS02]）中。已经提出了几种方法将段动作流分为单独的动作，其中各个动作的模型在线适应，以便实现附加的约束，避免障碍或终端执行器的正确定位（[KGP02，RGBC96，PSS02]）。最近利用这些动作序列中的约束之间的依赖关系来产生更逼真的动画。在[FXS12]中，捕获的动作示例根据优先级“控制器堆栈”进行混合。在[SMKB14]中，控制器的瞬时混合权重对于当前操作中涉及的不同身体部位的预先规定不同，不同控制器的优先级由其顺序排列。在[HK14]中，通过混合捕获的动作，通过“反向混合优化”来确定权重，来进行最后一步的运动加上手臂的合成。在这个研究中，手臂指向与最后一步的手臂摆动运动混合。根据作者介绍的经验规则，手指指向原语的选择取决于步态阶段。

基于物理的动画是在线生成运动的另一种方法（例如[ST05，FP03]）。复杂的动作序列被分割成单独的动作，其特征在于优化问题的解决方案，来自力学和附加约束（接触，摩擦或指定的过渡点）（[AMJ07，LHP05，MLPP09]）。虽然这些方法为个人行为产生了高度适应性的行为，但是在个体行为之间产生自然而然的过渡的问题是非常重要的。因此，在过渡点（例如[WZ10]）可能出现人为因素（例如犹豫，剧烈运动） 。

不同于这些方法，熟练的人体运动行为已被证明是高度预测性的。在复杂的活动中，行动目标和相关约束会影响在行为流之内的约束之前已经存在很长时间的动作，从而允许在复杂动作序列上产生平滑和优化的行为。例如，在最近关于步行和到达的协调的研究中进行了调查。人类受试者不得不走向抽屉并抓住位于抽屉不同位置的物体。人类在对象接触之前已经显着地优化了他们的行为，这与在达成行动期间最大终端状态舒适度的假设相一致[WS10，Ros08]，并且为达到目标而调整到达之前的步骤。

人类和动物的全身运动是根据肌肉协同作用或运动原理组织的[Ber67，FH05]。这些原始特征是在不同行动中协调参与可用自由度的子集。一个例子是在行走期间达到的全身运动的周期性和非周期性成分的协调，其中行为研究揭示了这些成分之间的相互耦合[CG13，CMCH96，Ros08，MB01]。通过考虑这样的生物约束可以改善机器人和计算机图形中的合成运动的现实主义和人的相似性[FMJ02]。

我们提出一个基于学习的框架，使一些这些属性适用于计算机图形学中的实时动画。底层架构简单，并且通过基于非线性动力系统[GMP + 09，PMSG09]制定的动态运动原语来逼近复杂的全身运动。这些原语由运动学原语构成，通过无人区别的无人区别的轨迹集学习。类似于机器人技术[GRIL08，BRI06]中的相关方法，该方法通过少量学习动力运动原语[OG11，GMP + 09]的组合产生复杂的运动。我们通过高度自适应在线生成具有协调臂运动的多步序列来展示这种方法。

**2系统架构**

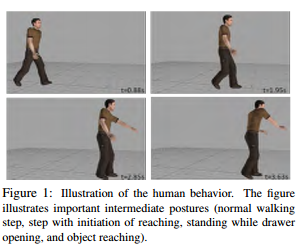
我们的工作是基于执行抽屉开放任务的单个人类对象的运动捕获数据。在下文中，简要描述该数据集。然后介绍了所提出算法的不同关键要素：通过动态图元的运动生成，逐步回归的协调建模，以及在线混合和控制算法。

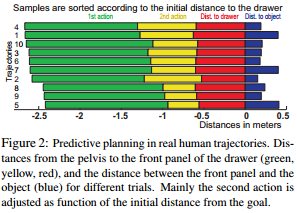
2.1运动捕捉数据

我们的系统是基于执行抽屉开放任务的单个人类对象的运动捕获数据，朝向抽屉走走，然后到达抽屉中的物体。物体距离抽屉的距离和物体的位置有变化[LRSS13]（图1）。这些训练序列包括三个后续的动作或动作：1）正常步行步骤; 2）缩小的步骤，左脚开始朝向抽屉。该步骤显示出高度的适应性，并且通常被调整以便在最后一个动作期间为了达到运动而从抽屉（最大舒适度）创建最佳距离; 3）放置时抽屉开口和物体到达。在每次试验开始时，向参与者表明了抽屉中的对象位置。 （详见[LRSS13]）。

在这些动作序列中分析骨盆和抽屉或物体之间的距离揭示了人类运动规划的预测性质，

如图2所示根据到抽屉的初始步行距离排列的距离。虽然第一步的长度和在最后一步中的抽屉的距离是相对恒定的，但是在第二步中进行主要的距离调整。

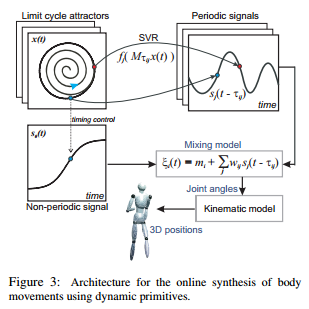




第一步的长度与抽屉的初始距离不存在显著的相关关系（线性回归：R2 = 0.08，P = 0.429），而相关距离的抽屉后第一步和第二步的长度是非常重要的（R2 = 0.95，P = 1.4·10−6）。

2.2通过学习动态图元来完成实时运动的合成

序列中各个动作的建模利用了一种基于学习的方法，我们在运动之前以及其他复杂的人体运动[GMP + 09]成功实施。 系统架构如图3所示。



基于运动捕捉数据，我们以无监督的方式学习了三种动作的时空分量，应用消音分类[OG11，CdEG13]）。 我们之前已经表明，这种方法导致人体轨迹的高度紧凑的近似，几乎完全近似于通常具有少于五个学习的源功能。 动画角色的骨架模型有17个关节。

关节角度轨迹由归一化四元数表示（利用指数图表示，c.f。[Mai90]，3个变量指定每个四元数）。 角度由以下形式的消声混合模型近似：



索引i指定关节角分量，索引j指定源信号sj。 参数wi j和τij指定源分解模型的混合权重和时间延迟，它们通过分类算法与其他参数一起估计。 参数mi指定关节轨迹的平均值。

为了在线生成运动，通过将非线性动力系统（规范动力学）的解映射到源函数sj上来生成源函数。 为了数学上的便利，我们选择了一个极限循环振荡器（Hopf振荡器）作为规范动力学。 对于一对状态变量[x（t），y（t）]，可以通过微分方程系统（ω定义本征频率）来表征：



最后一个术语指定一对输入信号xp（t）和yp（t）的耦合项，k是耦合强度。 对于k = 0，该公式产生稳定的极限循环。 状态空间变量x和y通过非线性映射到源函数sj上

通过支持向量回归（使用径向基函数内核和LIBSVM Matlabr库[CL01]）学习的映射函数fj（x，y）。 将来自极限循环振荡器的吸引子解的学习源函数sj（t）和相应的状态[x（t），y（t）]用作训练数据。

耦合项（对于k> 0）允许不同动态基元的耦合，如果它们由另一个振荡器的状态变量指定。我们在其他地方讨论过，这种形式的耦合，对于参数的适当约束，可以保证这种基元网络的解决方案的稳定性。可以使用相关稳定性条件收缩理论[LS98，PMSG09]。

在我们的架构中，我们使用了一个领先的振荡器，其他振荡器以所描述的形式（耦合图的星型拓扑结构，耦合从星形的中心到叶片单边）耦合到这个领先的振荡器。本文详细研究了这种耦合形式的稳定性[PMSG09]，可以看出，这种动力学只有一个指数稳定的解决方案。主要振荡器的状态也用于非周期性源功能的控制。

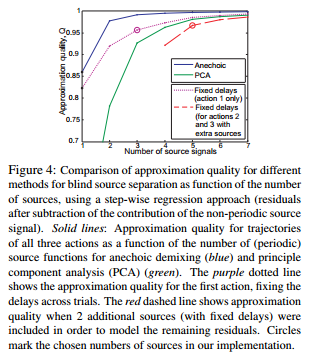
从在线生成的源信号，使用等式（1）计算关节角度。利用Hopf振荡器的吸引子解决方案位于状态空间中的圆的事实，延迟可以由状态空间（x，y）的变量的适当旋转代替。通过这种方式，我们获得了没有明确时间延迟的动力学，避免了设计合适的控制器的困难。通过混合混合权重wi j和轨迹平均值mi来产生不同的运动风格。

2.3逐步回归方法对个人行为进行塑造

为了通过协调的行走和到达来对步进序列进行建模，我们使用描述的消声混合近似训练数据，使用逐步回归方法，该方法为三种不同的组件动作引入了不同类型的源函数。

到达是非周期性的运动，因此需要引入非周期性的源函数。 为了在线生成这样的函数，根据关系φ（t）=mod2π（arctan（y（t）/ x（t））），确定0 ≤φ<2π）。 非周期性源信号由s0（t）= cos（φ（t）/ 2）定义，相应的延迟设置为零。 训练序列的三个动作模拟如下：

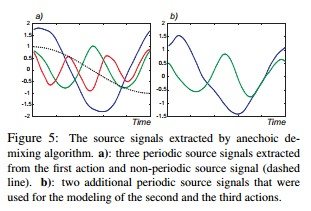
第一动作：确定非周期性来源的权重，以解释训练轨迹的非周期性部分。 然后从轨迹数据中减去该分量，并且使用来自[CdEG13]的算法通过电波分解来确定周期性源功能，其已经被修改以便将属于相同源功能的所有时间延迟约束为相等。 该约束简化了不同运动风格之间的混合，因为源的延迟与样式相同，因此不必混合。 与无约束的消声模型相比，该约束需要为相同近似质量引入更多的源（参见图4）。 除了非周期性之外，可以使用三个周期性源，以足够的精度建模第一步。



第二动作：为了模拟第二个高适应性步骤，需要五个周期性来源。 前三个周期源与用于第一动作近似的源相同，也是相应的延迟。 优化权重以最小化剩余的近似误差。 然后从培训数据中减去这三个周期来源（和非周期性来源）的贡献，并从残差中获得两个额外的定期来源（跨试验）。

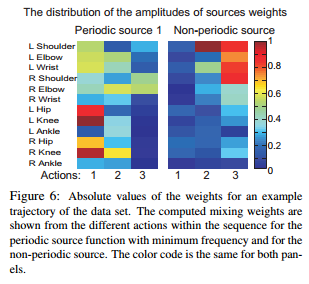
第三个动作：为了近似这个动作，我们使用了相同的非周期性和五个周期性的源信号，具有相同的时间延迟，被用于第二个动作的建模，而这些来源的权重被重新估计。

估计的源功能如图5所示。虚线表示非周期源。



上图所示的源功能用于近似所有三个动作，而下面的两个功能仅用于动作2和3。 图4示出了作为第一和第二动作的源功能的数量的函数的近似质量，比较了不同条件下的正常消声分类[OG11]，我们的算法与恒定延迟[CdEG13]和使用PCA的重建。 近似质量的度量被定义为，其中X是具有原始信号的样本的矩阵，X带标记是重构信号。 特别地，对于延迟的限制的模型仍然实现比PCA显着更好的近似质量。 第一动作的重建误差（图4中的紫色圆圈）为95.6％，而用于动作2和3的两个附加源的重建误差为整个数据集（红色圆圈）的96.7％。

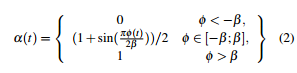
在图6中分别描述了单个轨迹的权重的幅度的绝对值，对于承载最大变化量的两个源信号。 这是非周期性源和频率最低的周期性源。 该图显示，原始图像明显有助于人体的不同自由度。 非周期性源主要有助于臂的关节角度，而周期性源功能强烈影响髋关节和腿关节。 这清楚地反映了运动原语在人体全身运动中的组织。 该图还显示了源的贡献在步骤之间变化。 在第一个动作中，第一个周期性源的贡献是主导的，而在第二个和最后一个动作中，非周期性源函数作为主要贡献，反映了非周期性的到达运动。



2.4在线混合搅拌重量

如图6所示，混合权重在序列内的不同动作之间变化。为了对不同动作之间的平滑过渡进行建模，因此在各个动作之间的转换时，必须以在线方式平滑地插入混合权重。

对于与周期性源相关联的权重，根据关系W（t）=（1-α（t））Wprev +α（t）Wpost，对应的权重矩阵被线性地混合，其中Wprev是步骤中的权重矩阵在过渡之前，Wpost过渡后的一个。每个角度轨迹的平均值相应变形：m（t）=（1-α（t））mprev +α（t）mpost，其中mprev是转换前的步骤中的平均值，mpost为过渡后的一个。时间相关混合权重α（t）由引导振荡器的相位变量φ（t）构成。确定转换点，其中权重在相位φ= 0的后续动作之间切换，混合权重由等式给出（这里，关于仅两个附加动作，我们使用约定：∈[-2π; 0]先前的动作，下一个的∈[0;2π]：

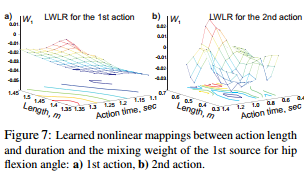


参数β=π/ 5决定了插值间隔的宽度，并被选择以保证自然的转换。 此值在以前的工作中得出，优化了其他场景的转换[GMP + 09]。

与非周期性来源相关联的权重必须单独处理，因为它们在转换之前和之后都可以具有不同的符号。 由于该源的定时完全由引导振荡器的相位φ（t）决定，所以我们通过允许这些权重的符号变化仅在该相位超过零（φ（t）= 0）的点处约束混合。 斜坡状非周期性源以使得s0（0）= 1和s0（T）= -1（T是吸引子状态中的引导振荡器的振荡的持续时间）的方式被归一化。 以下变形规则W（t）=符号（φ（t））[（α（t）-1）Wprev +α（t）Wpost]确保平滑过渡，使得该源的权重会聚在 对ξtrans=（mprev + mpost）/ 2 +（Wpost -Wprev）/ 2的值的动作。

2.5学习阶梯参数和混合权重之间的映射

为了使生成的行为对于不在训练数据和动态环境变化的条件进行高度适应性，我们设计了一种在线控制算法，用于分别对每个动作混合权重W。 为此，我们学习了非线性函数，将步长的长度和持续时间映射到混合权重上。 为了学习这种高度非线性映射，我们使用局部加权线性回归（LWLR，[AMS97]）。 图7示出了第一周期性源的权重的一些示例。



所需的步长在线从总计到抽屉的距离计算。 优化了第二动作步长的长度，以便为第三动作产生最佳（最大舒适）的距离，从人类数据估计为约0.6m。 然后使用线性加权方案在起始位置和抽屉D之间的总距离在前两个动作之间重新分配，指定权重参数γ的相对贡献。 然后根据关系D1 =（D-0.6m）γ和D2 =（D-0.6m）（1-γ）分布剩余距离D-0.6m，其中我们基于人类数据拟合γ= 0.385。 这种方法是由人类的预测计划优化最终状态舒适度，即最终到达行动的距离[LRSS13]的假设的动机。

我们通过引入额外的正常步骤（对应于动作1）的方法来扩展算法，在目标距离超过可以通过三动作序列而无伪造的建模距离的情况下。 如果目标和代理人之间的距离太短，不能引入长时间的步骤，而是引入了可变数量的短步骤，如在行动2中。

**3结果**

图8中显示了由我们的算法生成的两个示例序列，对于不在训练集中的目标对象的距离。

更系统的评估表明，算法可以在没有引入额外的步骤的情况下，为2.34和2.94 m之间的目标距离创建自然的协调序列。如果指定的目标距离超过此间隔，我们的系统会自动引入额外的步态步骤，使系统适应距离超过3米的目标距离。这说明为目标距离3.84和4.62米的两个生成序列的例子。有3个动作，没有人造物的目标距离的最大可实现范围约为60厘米，而添加另一个步骤则将该范围增加到约78厘米。添加两个或多个正常的步态步骤，我们的方法能够模拟自然寻找的动作，即使距离超过5米的目标距离。接下来说明第一种类型的三个动作的序列，其次是针对目标距离5.3m的动作2和3。

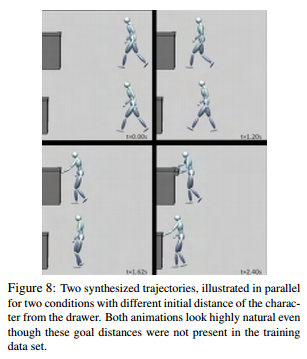
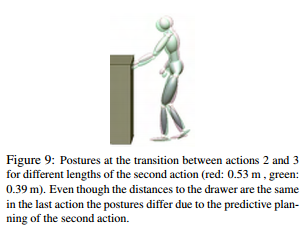
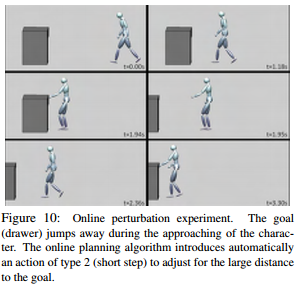


图9示出了与人类一样，第二动作和第三动作之间的转变的姿势取决于前一步骤。 在一种情况下，作用2的步长为0.53m和0.39m，而最后一步的距离相同（0.6m）。 这说明实际上，达到的姿势在多个步骤中以预测的方式被修改，其中预测规划在最后动作开始时修改姿势，即使与该动作的目标对象的距离相同。 由于相关的控制变量（距离对象的距离）对于这两种情况都是相同的，所以不能预测的规划方案将在这里预测最后一个动作的相同行为。



抽屉在接近的行为中跳过很远的距离，以至于不能再按原来计划的步数达到。 （图10）。 在线规划算法通过自动引入附加步骤来适应这种情况，从而使行为成功实现。 即使这种情况不是训练数据集的一部分，行为也是非常自然的。



**4 结论**

我们提出了一种多步骤人类运动的在线动画方法，这种动画来源于生物系统的概念。所提出的系统实现了多步序列的预测规划，包括周期性的非周期运动，其再现关于人类运动规划的实验中观察到的关键性质。规划是预测性的，并优化了执行最后行动期间的“舒适性”。提出的系统利用运动原语的概念，以实现上肢和下肢的周期性和非周期性行为的灵活和高度自然的协调，并实现序列中后续动作之间的平滑过渡。第一次，我们的架构被实现为产生目标导向的运动。我们的方法与[HK14]中提出的全身运动混合方法不同，为了增加过渡的自然性，有必要引入依赖于步态的经验规则。未来的工作将扩大我们对其他类型运动的方法，包括例如在行走时完成的适应性手臂达到运动。

**引用**

[AFO03] O. Arikan, D.A. Forsyth, and J. F. O’Brien. Motion synthesis from annotations. ACM Trans. on Graphics, SIGGRAPH ’03, 22(3):402–408, 2003.

[AMJ07] Y. Abe, Da Silva M., and Popovi ´c J. Multiobjective control with frictional contacts. ACM SIGGRAPH/Eurograph. Symp. on Comp. Anim., 2007.

[AMS97] C. G. Atkeson, A. W. Moore, and S. Schaal. Locally weighted learning. A.I. Review, 11:11–73, 1997.

[Ber67] N.A. Bernstein. The coordination and regulation of movements. Pergamon Press, N.Y., Oxford, 1967.

[BRI06] J. Buchli, L. Righetti, and A. J. Ijspeert. Engineering entrainment and adaptation in limit cycle systems - from biological inspiration to applications in robotics. Biol. Cyb., 95(6):645–664, 2006.

[CdEG13] E. Chiovetto, A. d’Avella, D. Endres, and M. A. Giese. A unifying algorithm for the identification of kinematic and electromyographic motor primitives. Bernstein Conference, 2013.

[CG13] E. Chiovetto and M. A. Giese. Kinematics of the coordination of pointing during locomotion. Plos One, 8(11), 2013.

[CL01] C.-C. Chang and C.-J. Lin. LIBSVM: a library for support vector machines, 2001. Software available at http://www.csie.ntu.edu. tw/~cjlin/libsvm.

[CMCH96] H. Carnahan, B. J. McFadyen, D. L. Cockell, and A. H. Halverson. The combined control of locomotion and prehension. Neurosci. Res. Comm., 19:91–100, 1996.

[FH05] T. Flash and B. Hochner. Motor primitives in vertebrates and invertebrates. Curr. Opin. Neurobiol., 15(6):660– 666, 2005.

[FMJ02] A. Fod, M. J. Mataric, and O. C. Jenkins. Motor primitives in vertebrates and invertebrates. Auton. Robots, 12(1):39–54, 2002.

[FP03] A. Fang and N. S. Pollard. Efficient synthesis of physically valid human motion. ACM Trans. on Graphics, 22(3):417–426, 2003.

[FXS12] A. W. Feng, Y. Xu, and A. Shapiro. An example-based motion synthesis technique for locomotion and object manipulation. Proc. of ACM SIGGRAPH I3D, pages 95– 102, 2012. [GMP+09] M. A. Giese, A. Mukovskiy, A. Park, L. Omlor, and J. J. E. Slotine. Real-time synthesis of body movements based on learned primitives. In D. Cremers et al., editor, Stat. and Geom. Appr. to Vis. Mot. Anal., LNCS5604, pages 107–127. Springer, 2009.

[GRIL08] A. Gams, L. Righetti, A. J. Ijspeert, and J. Lenarcic. A dynamical system for online learning of periodic movements of unknown waveform and frequency. Proc. of the IEEE RAS / EMBS Int. Conf. on Biomed. Robotics and Biomechatronics, pages 85–90, 2008.

[GSKJ03] M. Gleicher, H. J. Shin, L. Kovar, and A. Jepsen. Snaptogether motion: Assembling run-time animation. ACM Trans. on Graphics, SIGGRAPH ’03, 22(3):702–702, 2003.

[HK14] Y. Huang and M. Kallmann. Planning motions for virtual demonstrators. In Intelligent Virtual Agents, pages 190– 203. Springer, 2014.

[HPP05] E. Hsu, K. Pulli, and J. Popovic. Style translation for human motion. ACM Trans. on Graphics, 24:1082–1089, 2005.

[KGP02] L. Kovar, M. Gleicher, and F. Pighin. Motion graphs. Proc. of SIGGRAPH 2002, pages 473–482, 2002.

[LHP05] K. Liu, A. Hertzmann, and Z. Popovi ´c. Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. ACM Trans. on Graphics, 23(3):1071–1081, 2005.

[LRSS13] W. M. Land, D. A. Rosenbaum, S. Seegelke, and T. Schack. Whole-body posture planning in anticipation of a manual prehension task Prospective and retrospective effects. Acta Psychologica, 114:298–307, 2013.

[LS98] W. Lohmiller and J. J. E. Slotine. On contraction analysis for nonlinear systems. Automatica, 34(6):683–696, 1998.

[LWS02] Y. Li, T. Wang, and H.Y. Shum. Motion texture: A two level statistical model for character motion synthesis. Proc. of SIGGRAPH 2002, pages 465–472, 2002.

[Mai90] P.-G. Maillot. Using quaternions for coding 3D transformations. In A. S. Glassner, editor, Graphic Gems, pages 498–515. Academic Press, Boston, MA, 1990.

[MB01] R.G. Marteniuk and C. P. Bertram. Contributions of gait and trunk movement to prehension: Perspectives from world- and body centered coordinates. Motor Control, 5:151–164, 2001.

[MLPP09] U. Muico, Y. Lee, J. Popovi ´c, and Z. Popovi ´c. Contactaware nonlinear control of dynamic characters. ACM Trans. on Graphics, 28(3):Art.No.81., 2009.

[OG11] L. Omlor and M. A. Giese. Anechoic blind source separation using wigner marginals. J. of Machine Learning Res., 12:1111–1148, 2011.

[PMSG09] A. Park, A. Mukovskiy, J. J. E. Slotine, and M. A. Giese. Design of dynamical stability properties in character animation. Proc. of VRIPHYS 09, pages 85–94, 2009.

[PSS02] S.I. Park, H.J. Shin, and S.Y. Shin. On-line locomotion generation based on motion blending. Proc. of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symp. on Comp. Animation, pages 105–111, 2002.

[RCB98] C. Rose, M. Cohen, and B. Bodenheimer. Verbs and adverbs: Multidimensional motion interpolation. IEEE Comp. Graphics and Appl., 18(5):32–40, 1998.

[RGBC96] C. Rose, B. Guenter, B. Bodenheimer, and M. Cohen. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. Int. Conf. on Comp. Graph. and Interactive Techniques, Proc. ACM SIGGRAPH’96, 30:147– 154, 1996.

[Ros08] D. A. Rosenbaum. Reaching while walking: reaching distance costs more than walking distance. Psych. Bull. Rev., 15:1100–1104, 2008.

[SHP04] A. Safonova, J. Hodgins, and N. Pollard. Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces. ACM Trans. on Graphics, 23(3):514–521, 2004.

[SMKB14] A. Shoulson, N. Marshak, M. Kapadia, and N.I. Badler. Adapt: The agent development and prototyping testbed. IEEE Trans. on Visualiz. and Comp. Graphics (TVCG), 99:1–14, 2014.

[ST05] W. Shao and D. Terzopoulos. Artificial intelligence for animation: Autonomous pedestrians. Proc. ACM SIGGRAPH ’05, 69(5-6):19–28, 2005.

[WFH08] J. M. Wang, D. J. Fleet, and A. Hertzmann. Gaussian process dynamical models for human motion. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2):283–298, 2008. [WP95] A. Witkin and Z. Popovi ´c. Motion warping. Proc. ACM SIGGRAPH’95, 29:105–108, 1995.

[WS10] M. Weigelt and T. Schack. The development of end-state comfort planning in preschool children. Exper. Psych., 57(6):476–782, 2010.

[WZ10] C.-C. Wu and V. Zordan. Goal-directed stepping with momentum control. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symp. on Comp. Animation (SCA) 2010, 2010.