

结合平衡控制的动作过渡算法

许威威 潘志庚 葛云芳

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 为了有效地利用运动捕获数据来驱动虚拟人物,研究了动作过渡中的约束求解问题.该运动学约束求解可由解析的IK算法快速完成,但需对每帧附加约束,以保证解的连续性;同时,为了使生成的动作更加真实,提出了一种在动作过渡的关键点求取平衡姿势的方法,并通过构造偏移映射,将其叠加到已生成的动作过渡序列图象上,从而较好地模拟了动态平衡过程.

关键词 人体动画 动作过渡 逆序运动学 偏移映射 层次B样条

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0901-05

Motion Transition with Balance Control

XU Wei-wei, PAN Zhi-geng, GE Yun-fang

(State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Reusing Motion Capture data to instruct Virtual Human is an effective way to improve the reality of Human Animation. However, there are gaps between captured motion clips, and motion transition is used to fill them. This paper presents novel method to meet the kinematic and dynamic constraints that should be satisfied during transition. An analytical IK algorithm is adopted to solve the position constraints and an additional constraint, "Swivel angle" constraint, is added to guarantee the continuity of solution. Since the algorithm only need to search the feasible range of "Swivel angle", it improves the precision of the solution and the computation efficiency. This paper also presents a simplified way to simulate balancing during transition. To meet the balancing requirement during the motion transition, balance pose is computed at "key points" of transition with a BFGS nonlinear constraint optimizing algorithm, displacement mapping is then built and added to original transition motion sequence.

Keywords Human animation, Motion transition, Inverse kinematics, Displacement mapping, Hierarchical B-spline

0 引言

运动捕获(Motion Capture)是当前人体动画的研究热点之一.为了有效地利用运动捕获数据来驱动虚拟人物,以得到视觉上真实的人体动画,如今已出现了运动编辑、运动信号处理、动作过渡等一系列算法^[1~5].其中动作过渡算法用于解决在获取的不同人体动作之间进行衔接的问题,但这类算法在计算动作过渡序列时,要求满足运动学与力学约束,例

如支撑脚不能在地面上滑动,人体在过渡过程中要保持平衡等.由于这些约束一般在多帧动画中都要得到满足,因而称之为时空约束(Spacetime Constraints)^[6].

动作过渡算法可分为在线和离线两类.其中在线算法,由于力图要达到实时,这就需使用相对简单的算法进行插值,因而对运动数据制作的要求较高;而离线的动作过渡算法则提供了复杂约束的求解能力与较强的编辑功能,因而可生成更真实的过渡序列图象,虽然离线算法不能实时生成过渡序列图象,

但是由于存在有效的算法,能重用生成的动作序列,因此对交互式应用同样有重要意义。

Rose 等应用时空约束来对动作过渡过程中需满足的约束进行建模^[1],并使用逆向运动学(IK)和优化求解来得到动作过渡序列。为避免每帧图象单独求解逆向运动学问题时,会引起解突变的问题,文献[3]采用 B 样条来拟合关节角度,并将求解角度问题转为求解 B 样条控制顶点的问题;而 Wiley 等,则将具有不同时间长度的运动数据映射到一个统一的时间段^[7],然后在该时间段上,对运动数据进行采样和插值,但是由于所采用的映射过于简单,因而不适合于生成复杂的动作过渡;Rose 等使用关键时间来记录运动数据中的关键时刻(例如行走中脚后跟着地的时刻)^[8],并利用关键时间对动作过渡的时间窗口及约束进行了统一管理,虽然文献[8]的方法可以生成有效的动作过渡,但是对动作数据的制作要求较高。

本文的动作过渡算法是由用户指定时空约束来求解满足要求的动作过渡序列,与文献[3]不同的是,本文是使用一种解析的算法来求解 IK 问题,同时通过施加附加的约束来解决 IK 算法会产生角度突变问题,与文献[3]的方法相比,本文求解方法的计算量大大减少,因而能够满足实时要求。同时,即使在优化中使用了力矩最小的约束,在动作过渡中,也会有不符合物理规律或不自然的动作出现。为解决此问题,本文将人体平衡概念引入动作过渡中,提出在动作过渡的关键点上求取平衡姿势,并通过构造偏移映射(Displacement Mapping)将平衡信息叠加到已生成的动作序列上,再通过动作过渡序列进行后处理,以便生成视觉上更真实的动画。

1 解析 IK 算法

动作过渡中的运动学约束,如支撑脚不能滑动等,可以作为 IK 问题求解。IK 算法的一个关键问题是,关节链中存在冗余自由度,如果不附加约束条件,那么求出的解在帧之间会有跳变。一般人体四肢运动链中的冗余自由度(以手臂运动链为例)常表现为一个“肘圆”(elbow circle)^[4,9],即当肩和手腕的位置给定后,肘部仍旧可以绕着一个圆运动,而肘部在该圆上转动的角度则称为旋转角(Swivel Angle)。本文利用旋转角约束来解决 IK 算法解的跳变问题。

人体四肢运动链如图 1 所示,其中, S_1 为肩关

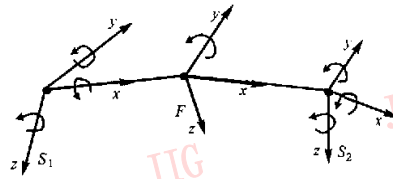


图 1 人体四肢运动链示意图

节或大腿根关节, F 为肘关节或膝关节, S_2 为腕关节或脚踝关节。肩关节和腕关节均为 3 个自由度的关节,其自由度分别用角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 表示。肘关节为一个自由度的关节,其自由度记为角度 θ_4 。则人体四肢运动链可表示为

$$T_1 A T_y B T_2 = G \quad (1)$$

式中, T_1, T_y, T_2 分别为 3 个关节的旋转矩阵, G 为目标矩阵, A 为从 F 到 S_1 的变换阵, B 为从 S_2 到 F 的变换阵,可以分别表示为

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} R_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3) & 0 \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} & T_y &= \begin{bmatrix} R_y(\theta_4) & 0 \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_2 &= \begin{bmatrix} R_2(\theta_5, \theta_6, \theta_7) & 0 \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} & A &= \begin{bmatrix} R_A & t_A \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} R_B & t_B \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} & G &= \begin{bmatrix} R_G & t_G \\ 0, 0, 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

给定目标矩阵 G ,对式(1)进行简单运算,即可以得到下式

$$T_1 A T_y B T_2 [0, 0, 0, 1]^T = R_1 R_A R_y R_2 t_B + R_1 t_A = t_G \quad (3)$$

将式(3)两边分别与自身点积,利用旋转矩阵的正交特性,可得到

$$2t_A^T R_1 R_A R_y R_2 t_B = t_G^T t_G - t_A^T t_A - t_B^T t_B \quad (4)$$

因为 R_y 中的各项均为 θ_4 的三角函数,所以上式可化为 $a \cos \theta_4 + b \sin \theta_4 = c$ 的等式,并可将其转为二次多项式求解,然后从求得两个解中去掉不合理解,即可确定 θ_4 。从式(3)、式(4)可以看出,给定末端执行器的目标位置,就可确定 θ_4 。

肘关节的冗余自由度如图 2(a)所示, e, s, t_G 为肘、肩及腕的位置, L_1, L_2, L_3 为上臂、前臂的长度和肩到目标位置的距离。肘圆所在平面以目标位置到肩的连线 st_G 为法向量 n , φ 为肘在该圆上的旋转角(图 2(b)),为了定义该肘圆所在平面,需要用户给定一个向量 p ,并定义 p 在该肘圆平面上的投影向量 u 对应 $\varphi=0$ 。

$$\begin{aligned} n &= t_G / \|t_G\| \\ u &= (p - (p \cdot n)n) / \|p - (p \cdot n)n\| \end{aligned} \quad (5)$$

可用上式来计算 p 在肘圆平面上的投影向量 u ,

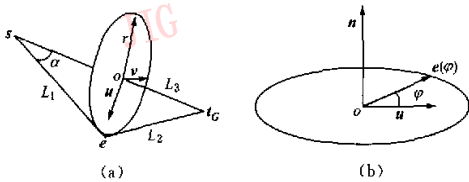


图 2 肘部冗余自由度

为了完全确定该平面,可使用 $v=n \times u$ 来构成平面坐标系,肘圆中心 o 和半径 r 可以由下式计算(假定 s 为坐标原点)

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{(L_2^2 + L_1^2 - L_3^2)}{2L_2L_1} \\ o &= (L_1\cos\alpha)n \\ r &= L_1\sin\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

若给定旋转角 φ ,则肘关节的位置 $e(\varphi)$ 可由式(7)直接求出

$$e(\varphi) = o + r\cos(\varphi)u + r\sin(\varphi)v \quad (7)$$

求出 $e(\varphi)$ 后,肩关节的旋转矩阵 T_1 也随之确定.图 3 中 e, w 为肩关节未旋转时的肘和腕位置(注意,此时肘关节已旋转了一个角度),那么, T_1 实际上就是从 $\triangle sew$ 到 $\triangle set_G$ 的变换矩阵.如能给定欧拉角顺序,则可以很容易求出肩关节的 3 个旋转角.

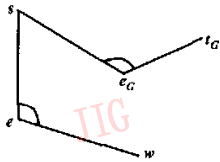


图 3 肩关节旋转矩阵求解

如果需要末端执行器满足朝向要求,那么只要求出 $T_2 = (T_1AT_1B)^{-1}G$,同样,又要给定欧拉角顺序,就可以求出腕关节的 3 个角度.

用数值优化算法来求解 IK 问题,目标函数一般可写为形如下式的约束优化形式

$$g(\theta) = (q(\theta) - q_d)^2 \quad \theta_{il} \leq \theta_i \leq \theta_{iu} \quad (8)$$

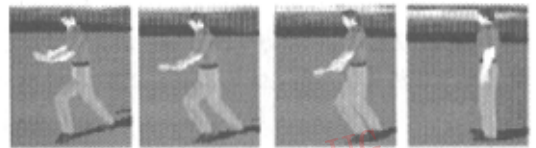
如果不附加约束,则求出的解会在可行解空间内跃变,虽然可通过修改目标函数来求得所需要的解,例如,可将式(8)中的目标函数改写为

$$g(\theta) = w_1(q(\theta) - q_d)^2 + w_2(\theta - \theta_d)^2 \quad (9)$$

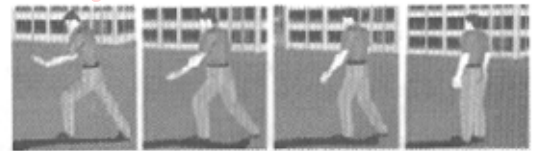
式中, w_1, w_2 为权重, θ_d 为与约束 θ 的解最接近的期望值,但是优化算法需要对运动链所有的关节角度进行搜索,而且很难取到一个合适的 θ_d .利用上述解析算法,关节链中所有关节的角度约束都可以转化

为肘关节旋转角的可行范围,由于算法只需在肘关节旋转角的可行范围内搜索,从而将多个自由度的问题变成了一个自由度问题,这样求解的效率和精确性都得到提高.为了解决动作过渡中,每帧图象单独求解 IK 问题会带来解的突变问题,为此,本文通过对肘关节旋转角的取值施加约束,即要求每一次求解时,旋转角的值与上一次解的旋转角最为接近,这相当于可行解中的取值约束,从而有效保证了关节旋转角度在各帧之间的连续性.第 1 个旋转角可以通过动作过渡所给的起始帧求出.

图 4 是虚拟人物从初始姿势(图 4(a)和图 4(b)的第 1 幅)过渡到站立姿势的结果图,图 4(a)指定右脚为支撑脚,图 4(b)指定左脚为支撑脚.图 5 为相应的骨架过渡图,从图中可以看出,支撑脚的位置约束得到了很好的满足,并且算法求出的解具有较好的连续性.



(a) 以右脚为支撑脚



(b) 以左脚为支撑脚

图 4 从起始姿势过渡到站立的形象

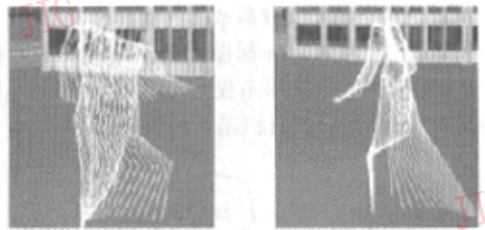


图 5 动作过渡中的骨架图(对应图 4)

2 动作过渡过程中的平衡控制

虽然动作过渡是一个动态过程,从理论上说,其

平衡过程也应该是动态的,但是,动态平衡的模拟需要对动作物理过程的深入了解.本文对平衡的模拟采用了一种简化方式,即首先通过选取动作过渡序列中的关键点来进行静态平衡姿势计算,然后通过平衡姿势与当前姿势的差值来构造偏移映射,并将偏移映射叠加到动作序列上来模拟动态平衡过程.

所谓平衡控制,其目的是使人体质心投影在支撑点所确定的支撑区域内,这是因为在动作过渡的过程中,支撑点一般是在支撑脚上或者是场景中与虚拟人物相互作用的物体上.由于人体的支撑脚与地面是一个面接触,其支撑点可以在支撑脚上前后移动,因此首先需要对支撑区域进行定义.

定义 支撑区域为由所有边缘支撑点在地面上的投影点所构成的最大凸包多边形.

当支撑物体与地面为面接触时,边缘支撑点指的是构成该面多边形的顶点;当支撑物体与地面是点接触时,则边缘支撑点就是该点.考虑到虚拟人物与环境进行交互时,支撑点情况一般比较复杂,本文需要用户在优化前,用交互方法指定支撑点.这样,求解人体平衡姿势就可以表达为一个约束优化问题:

$$g(\theta) = \tilde{\omega}_1 \sum_{i=0}^{n-1} \|(P(\theta) - P_i) \times (P(\theta) - P_{i+1})\|^2 + \tilde{\omega}_2 (\theta - \theta_f)^2 + \tilde{\omega}_3 (e(\theta) - e)^2$$

$$\theta_n \leq \theta_i \leq \theta_m \quad (10)$$

其中, $\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \tilde{\omega}_3$ 为权系数.

该目标函数第1项中, $P(\theta)$ 为人体质心位置, $P_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 为支撑多边形顶点,这两个坐标均为向地面投影后的坐标;第2项要求优化后的姿势接近当前人体姿势, θ_f 为当前人体的各个关节角度;第3项用于满足支撑脚或者其他的位置约束.本文使用 BFGS 与 Rosen 梯度投影相结合的约束优化算法来求解上述目标函数^[11]. BFGS 和 Rosen 梯度投影法都要求计算目标函数的梯度,而式(10)中

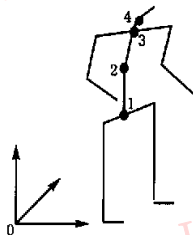


图6 人体躯干运动链示意图

的目标函数中的第1项质心位置,由于对关节角度的梯度有一定的复杂度,因此下面给出简便的人体躯干质心对关节角度的梯度计算公式.记 R_i^j 为从第 i 个坐标系到第 j 个坐标系的变换阵,第0个坐标系代表世界坐标系, M_i 为运动链第 i 段质心的相对位置, m_i 为第 i 段的质量,则人体躯干质心在世界坐标系中的位置 M_w 可写为:

$$M_w = \frac{m_1(R_1^0)M_1 + m_2(R_2^0R_2^1)M_2 + m_3(R_3^0R_3^1R_3^2)M_3 + m_4(R_4^0R_4^1R_4^2R_4^3)M_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad (11)$$

下式用于计算运动链末端位置对角度的导数, r_i 为第 i 个关节的关节点, μ_i 为第 i 个关节的转轴(图7).

$$\frac{\partial r}{\partial \theta_i} = \mu_i \times (r - r_i) \quad (12)$$

利用式(12), M_w 的导数可写为

$$\frac{\partial M_w}{\partial \theta_i} = \frac{\sum_{j=1}^4 m_j \mu_j \times \left(\left(\prod_{k=j}^i R_k^{k-1} \right) M_i - r_i \right)}{\sum_{i=0}^4 m_i} \quad (13)$$

若将关节的转轴约定为关节坐标系的轴,则 r_i 与 μ_i 可以从 R_i^0 中抽取.对于具有多个自由度的关节,可将其视为关节点重合的多个单自由度关节的复合,这样既可以简化处理,又不丧失关节的自由度.式(10)中 $e(\theta)$ 的导数可以用类似方法求得.图8是使用该算法对人体姿势进行优化后得到的结果.

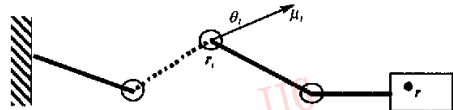


图7 运动链示意图



(a) 不平衡姿势 (b) 优化生成的平衡姿势

图8 平衡姿势计算结果图象

在用第1节算法生成的动作序列中,一般有多帧图象上的人体会处于不平衡状态,本文选取其中一些对整体动作影响比较大的帧来进行平衡姿势计

算,并将其与原来姿势的差值用于构造偏移映射。图9(a)是采用第1节算法生成的过渡序列图象,图9(b)是采用层次B样条构造的偏移映射叠加到

原始过渡序列图象上的结果。从图9中可以看出,叠加了偏移映射的动作过渡序列图象,其视觉真实感明显好于原始的动作过渡序列图象。



(a) 未经平衡处理的序列图象



(b) 经过平衡处理的序列图象

图9 从站立到坐的过渡序列图象

3 结论与展望

本文研究了动作过渡中的约束求解问题,即过渡中的运动学约束采用实时的解析IK算法求解,并利用“肘圆”来保证各帧图象之间解的连续性。为保持运动过渡中人体的平衡,本文采用偏移映射的方式来对插值生成的动作序列进行后处理。本文的进一步工作是研究如何有效地重用算法生成的动作序列图象。

参考文献

- 1 Bruderlin A, Williams L. Motion signal processing [J]. Computer Graphics, 1995,30(3):97~104.
- 2 Gleicher M. Retargetting motion to new characters [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 98 [C], ACM Siggraph Orlando, FL, 1998:33~42.
- 3 Rose C F, Guenter B, Bodenheimer B *et al.* Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 96 [C], ACM Siggraph, New Orleans, Louisiana, 1996:147~154.
- 4 Jehee Lee, Sung Yong Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 99 [C], ACM Siggraph, Los Angeles, August 1999:39~48.
- 5 Witkin A, Popovic Z. Motion warping[J]. Computer Graphics, 1995,30(3):105~108.
- 6 Witkin A, Kass M. Spacetime constraints [J]. Computer Graphics, 1988(4):22:159~168.

- 7 Wiley D J, Hahn J K. Interpolation synthesis for articulated figure motion[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1997,17(6):39~45.
- 8 Rose C, Cohen M, Bodenheimer B. Verbs and adverbs: multidimensional motion interpolation [J]. IEEE Computer Graphics & Application, 1998,18(5):32~40.
- 9 Tolani D, Goswami A, Balder N. Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs [J]. Graphic Model, 2000,62(5):353~388.



许威威 1975年生,博士研究生。主要研究方向为虚拟现实、智能虚拟环境、人体动画。



潘志庚 1965年生,研究员,博士生导师。主要研究方向为虚拟现实、分布式图形、智能虚拟环境。



葛云芳 1978年生,硕士研究生。主要研究方向为虚拟现实、智能虚拟环境。