

基于速度约束算法的动态布料模拟

孙晓鹏¹⁻⁴, 赵巍巍¹, 刘小丹¹⁻³

SUN Xiao-peng¹⁻⁴, ZHAO Wei-wei¹, LIU Xiao-dan¹⁻³

1. 辽宁师范大学 计算机与信息技术学院, 辽宁 大连 116029

2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024

3. 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058

4. 大连大学 辽宁省智能信息处理重点实验室, 辽宁 大连 116622

1. Department of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China

2. School of Mechanical & Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

3. State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

4. Liaoning Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China

E-mail: camus_zq@163.com

SUN Xiao-peng, ZHAO Wei-wei, LIU Xiao-dan. Dynamic cloth simulation based on velocity constraint. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(31): 191-194.

Abstract: Based on mass spring cloth model, a velocity constraint algorithm produced by velocity filter is presented. The algorithm focuses on the super-elasticity in the dynamic cloth simulation. As the condition of super-elasticity happening, a velocity constraint inequality is built. If the mass's velocity dissatisfies the inequality, the authors need to restrict and modulate the velocity, avoiding the super-elasticity. This paper also analyses the forces on the model mass, and improves the model for the best efficient. The simulation results show that the new algorithm has good performance and is easy to implement.

Key words: cloth simulation; mass-spring model; super-elasticity; explicit Euler method

摘 要: 针对三维布料动态模拟中质点-弹簧模型易发生超弹性现象的问题, 基于速度过滤的思想, 提出了质点速度约束方法。该方法建立了一个速度约束不等式, 作为超弹性现象是否发生的判断依据; 并对不满足约束条件的质点速度进行约束调整, 进而避免了超弹性现象的发生。此外, 对质点-弹簧模型的内力和外力进行了分析, 并对外力中的风力模型进行改进, 优化了计算流程, 提高了计算速度。实验证明该方法易于实现, 稳定性强, 并产生了较好的视觉效果。

关键词: 布料模拟; 质点-弹簧模型; 超弹性; 显式欧拉法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.31.055 文章编号: 1002-8331(2008)31-0191-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391.41

目前, 布料的模拟多应用力学原理, 采用微分方程和布料的物理属性(如质量、弹性等)相结合的物理模型进行描述。质点-弹簧模型是一种普遍应用的物理模型, 不过该模型最大的缺陷是容易发生超弹性现象, 即弹簧的拉力率太大, 导致布料模型产生了很大的拉伸、甚至撕裂断开等不真实的效果。Provot^[1]等人提出了通过改变拉力率来避免超弹性的方法, 但这些方法存在着迭代过程收敛性差、计算复杂度高不足之处^[2]。

采用速度约束算法, 在一定程度上避免了超弹性现象的发生。首先对 Choi 等人^[3]的质点-弹簧模型进行了优化; 然后通过对优化模型的内外力进行受力分析, 分别给出力的求解公式, 并对外力中的风力模型进行了改进; 最后结合显式欧拉法和速度约束算法对布料模型进行数值求解, 得到模型质点的运

动位置, 并实现布料动态模拟。实验结果表明, 该方法避免了超弹性现象, 视觉效果得到了很大的改善。

1 相关研究工作

Breen 等人在 1994 年的工作^[4]中, 通过分析布料的物理特性, 最先提出了布料的质点-弹簧模型。1995 年, Provot 等人采用的质点-弹簧模型^[5]描述了三种弹簧, 分别处理结构力(拉力和压力)、剪切力和弯曲力。该模型有效地模拟了布料的拉伸、悬垂和弯曲等动画效果。2002 年, Choi 等人^[3]针对布料褶皱模拟的要求, 将模型中弹簧连接关系分为两种, 如图 1: 类型 1 弹簧和类型 2 弹簧。类型 1 弹簧处理拉力和剪切力; 类型 2 弹簧用以处理压力和弯曲力。该模型采用不同的刚度处理这两类弹

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60873110); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室资助项目(No.A0602); 辽宁省智能信息处理重点实验室资助项目(No.2006-6)。

作者简介: 孙晓鹏(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算机辅助设计、计算机图形学; 赵巍巍(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 刘小丹(1957-), 男, 教授, 主要研究方向为数字图像处理、计算机图形学、数字化印刷。

收稿日期: 2008-06-30 **修回日期:** 2008-09-01

簧,稳定有效地实现了轻薄布料的模拟。2006年,文献[5]为了避免超弹性等问题,提出用刚性杆替代弹簧的思想改进质点—弹簧模型。

质点—弹簧模型产生超弹性问题的根本原因是:在布料模拟的建模过程中,为了简化模型和算法,进行了线性弹性的假设。但是如图2所示,布料在一定的形变范围内近似地表现为线性弹性;超出了这个范围,弹簧的劲度系数将随着受力增大而急剧增加,质点的位置偏移量也将急剧增大。所以,采用线性的质点—弹簧模型只能模拟较小尺度的形变,一旦受力超限,就将产生“超弹性”现象,例如,形变集中在受力点附近,将使受力点附近的弹簧形变过大,而其余部分的弹簧形变很小;再如,在发生大的形变前布料已经破裂。

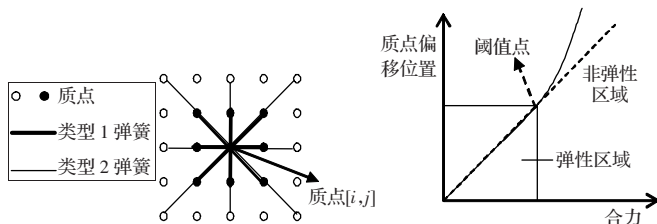


图1 Choi等人采用的质点—弹簧模型

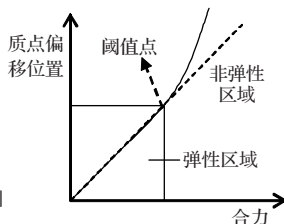


图2 质点受力和位置偏移量关系图

当然,增大弹簧系数可以避免超弹性现象的发生。不过,在同样的外力作用下,弹簧劲度系数越大,拉力率就越小。这种方法要求时间步长 h 不超过弹簧振子的自然周期^[6],即 $h \leq a\pi\sqrt{m/k}$,其中 m 是质点质量, a 是给定系数。但弹簧劲度系数 k 的增加将导致布料模拟的稳定性降低,为保持稳定性势必减小时间步长 h ,最终导致布料模拟的时间复杂度提高^[1]。

1995年,Provot等人基于逆向动力学方法改善了布料模型在大形变条件下的失真。Provot只对拉力率超过指定阈值(如弹簧自然长度的10%)的弹簧进行处理,将其最大拉力率限制为该阈值,使得线性质点—弹簧模型表现出了一定的非线性特征。并且当模型中与某些质点相连的弹簧出现超弹性问题时,这种方法只适用于局部地调整这些质点的位置,而在调整这些质点位置的过程中还可能造成邻域内的其他弹簧发生超弹性现象^[2]。

基于速度过滤器(Velocity Filter, VF)的思想,对质点—弹簧模型中质点的速度进行约束,在一定程度上解决了超弹性问题。VF的思想较早的应用出现在2002年,Bridson^[7]等人将VF思想应用于网格模型自交的问题,在布料的碰撞检测和处理方面取得了很好的效果。2007年,Rony^[2]等人基于VF的思想提出一种新的快速投影方法,实现了布料不可延展性的有效模拟。基于VF思想解决超弹性问题的研究工作还未见到有文献公开发表。

2 优化的质点—弹簧模型及其受力分析

对Choi等人的质点—弹簧模型进行优化,优化后的模型结构图如图3所示,类型1弹簧的拉力可以保持质点间初始状态的距离,剪切力可以防止布料在自身平面过度或不真实的变形,而类型2弹簧的压力和弯曲力的作用是防止布料过分的 unnatural 弯曲,与超弹性现象是否发生无关,因此,本文在布料弯曲和褶皱模拟精度要求不高的情况下,不考虑类型2弹簧的作用,实现了布料的飘动和悬垂等动态模拟。同时,这种优化方法

避免了弯曲力的计算,提高了整体的模拟速度。

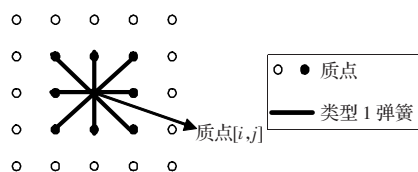


图3 本文使用的质点—弹簧模型

2.1 模型的内力分析

布料模型所受的内力由两部分组成:弹簧弹力和附加阻尼力。即 $F_{INT} = F_s + F_{D0}$ 其中, F_{INT} 代表内力, F_s 代表弹簧弹力, F_{D0} 代表阻尼力。

弹簧弹力的计算满足胡克定律,根据胡克定律:在弹性限度内,弹簧的弹力和弹簧的伸长(或缩短)的长度成正比。两个邻接质点 u 与 v 间的弹力 $F_s(u, v)$ 由下式求得:

$$F_s(u, v) = k_s \left(1 - \frac{L}{|X_{u,v}|}\right) X_{u,v}$$

其中, k_s 是弹簧的刚度系数(或劲度系数), L 是弹簧的自然长度, X_u, X_v 是质点 u 和 v 的位置, $X_{u,v} = X_v - X_u$ 。

附加阻尼力代表布料的刚度,可以表现出不同材质的布料,并防止平面内震动等不实现象出现,但是附加阻尼力过大将导致布料真实感的降低。参照文献[6]的工作,定义线性阻尼如下:

$$F_D = k_D (V_v - V_u)$$

其中, k_D 是阻尼系数, V_u, V_v 是质点 u 和 v 的速度。

2.2 模型的外力分析

布料所受的外力通常由风力、重力和空气阻力等构成,表示为 $F_{EXT} = F_G + F_W + F_A$ 。其中, F_{EXT} 代表外力, F_G 代表重力, F_W 代表风力, F_A 代表空气阻力。当模拟物体不同时,其外力的构成也不同。例如,在模拟飘扬的旗帜时,风力的表示最重要,模拟自然悬垂的布料则只需要考虑重力和空气阻力。

空气运动流场^[8-9]计算风力的方法过于复杂,不能满足实时模拟的要求。根据流体力学方法^[10],通过计算风力作用在布料模型每个三角面上的力,可以得到风力对三角面的三个顶点(即质点)的作用力,这样布料模型中的每个质点所受到的风力应为它所在的每个三角面受力的合力。风作用在每个三角面上的力为:

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 S$$

其中, $\frac{1}{2} \rho v^2$ 是单位流体的动能, ρ 是空气密度, C_d 是布料稀疏程度系数, S 是垂直于流速方向上三角形面积。

对上述方法略作改进,引入三角面中质点的法向量,直接求解出风作用在每个质点上的力 F_W :

$$F_W = -\frac{1}{2} \rho |V_v - V_{wind}| C_d (V_v - V_{wind}) \cdot N_{normal}$$

其中, N_{normal} 是质点 v 的法向量(是所有通过质点 v 的三角面的法向量的平均), V_v 是质点 v 的速度, V_{wind} 是风的速度。如图4所示,调节风力参数可以改变风力的方向和大小。

布料的重力是质量相同的所有质点的重力之和,每个质点的重力 F_G 是个常数:

$$F_G = M * g$$

其中, M 表示每个质点的质量, g 表示重力加速度。

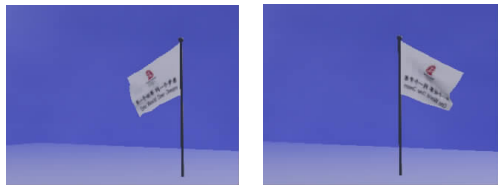


图4 风力的大小和方向不同时的旗帜飘动情况

根据 Stocke 的阻力定律^[1],空气阻力 F_A 和质点速度 V 的 N 次幂成正比。据此,空气阻力 F_A 近似表示为:

$$F_A = -Mk_A \|V_v\| \hat{V}_v$$

取 $N=1$,得 $F_A = -Mk_A V_v$ 。其中, k_A 是正阻尼系数, \hat{V}_v 是质点 v 的速度方向。

3 模型受力求解和速度约束

首先采用显式欧拉法^[12]对内力和外力统一求解,得出模型中各质点的运动速度;然后采用速度约束算法对计算所得的质点速度进行约束,避免超弹性现象的发生;最后,将约束后的质点速度代入显式欧拉公式,最终确定出质点的位置。

首先,显式欧拉法是要根据质点 v 在 t 时刻的受力 F_v^t 计算出 $t+h$ 时刻的速度 V_v^{t+h} ,公式表示为:

$$\begin{cases} V_v^{t+h} = V_v^t + F_v^t \frac{h}{M} \\ V_v^{t+h} = X_v^t + V_v^{t+h} h \end{cases}$$

其中, V_v^t 、 X_v^t 分别是 t 时刻质点 v 的速度和位置, h 是时间步长。

其次,依据 VF 思想对质点速度进行约束调整,其基本思想为:已知前一时刻质点位置,通过约束质点在下一时刻的速度,使其满足公式(1),以保证弹簧在下一时刻的伸长不超出给定的阈值范围。

$$|X_{u,v}^t| = |X_{u,v}^t + V_{u,v}^t h| \leq (1+\lambda)L \quad (1)$$

其中, L 为弹簧自然长度, λ 为给定的阈值。例如当 $\lambda=0.1$,弹簧的最大伸展长度被约束为不能超过其自然长度的 10%。取 $\lambda \in [0.01, 0.15]$ 时,速度约束算法可以有效避免超弹性现象,视觉效果也很真实。

为确定出质点 v 在 t 时刻的速度,设 s 为两质点之间弹簧, u, v 是弹簧 s 两端的质点,并已知在 t 时刻质点 u 约束后的位置 X_u^t 和速度 V_u^t 。具体算法过程描述如下:

- 步骤 1 输入: V_v //约束前质点 v 的速度
- 步骤 2 计算: $X_{u,v} = X_v - X_u^t$ //约束前质点 u 和 v 的相对位置
- 步骤 3 计算: $V_{u,v} = V_v - V_u^t$ //约束前质点 u 和 v 的相对速度
- 步骤 4 如果质点 u, v 的速度之差 $V_{u,v}$ 不满足约束公式(1),执行步骤 5;否则,输出: $V_v^t = V_v$,并跳过步骤 5 和步骤 6;
- 步骤 5 求出满足公式(1)的 $V_{u,v}$ 的最大速率解 $\max(V_{u,v})$;
- 步骤 6 输出: $V_v^t = V_u^t + \max(V_{u,v}) \hat{V}_{u,v}$ //经约束后质点 v 的速度, $\hat{V}_{u,v}$ 是 $V_{u,v}$ 的反方向

最后,经速度约束处理后,将质点 v 在 t 时刻的速度 V_v^t 代入到显式欧拉公式中解出质点 v 在 $t+h$ 时刻的位置 X_v^{t+h} 。

4 实验结果分析

分别模拟了风中飘动的旗帜和无风状态下自然下垂的布

料,实验平台为 OpenGL 图形库和 VC++6.0 开发环境。

首先,图 5 比较了无速度约束和有速度约束两种情况下旗帜在风中飘动的模拟效果,图 5(a)所示的无速度约束情况下,旗帜出现了过度伸展的超弹性问题;而图 5(b)所示的有速度约束情况下,旗帜避免了超弹性现象的出现。

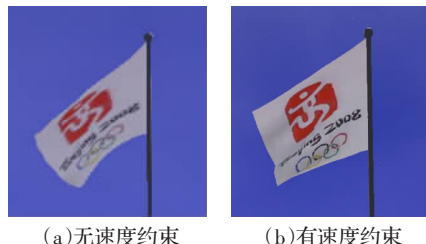


图5 有无速度约束的效果对比

另外,还进行了一点固定悬垂布料网格的动态模拟实验,即固定布料一角,释放另外一角,计算布料网格震荡下落的动态序列。图 6 为无速度约束的布料网格震荡下落对应的动态序列的部分帧,图 7 为有速度约束的布料网格震荡下落对应的动态序列的部分帧。可以看出,在无速度约束情况下,悬挂点附近的网格发生了很大的形变;而在有速度约束的情况下,布料在悬挂点附近的网格处没有过分的伸长,同时布料整体的位置偏离幅度不大,更接近布料悬垂的真实视觉效果。

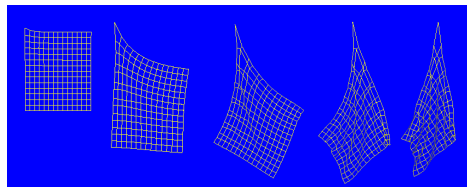


图6 无速度约束情况下的布料网格帧序列

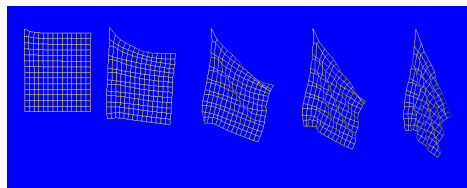


图7 有速度约束情况下的布料网格帧序列

图 8 为无速度约束情况下,两点固定和一点固定点的布料悬垂状态图,可以看到布料出现明显的不真实的过度拉伸。在动态模拟实验中,布料上下反复震荡后最终达到平衡位置时,布料上部仍然出现过度下垂的现象。图 9 为有速度约束情况下,布料悬垂状态,在一定程度上避免了超弹性现象的发生,动态模拟实验中布料经较短时间的震荡后,较快地达到平衡位置,与图 8 相比,布料悬垂效果更为真实。

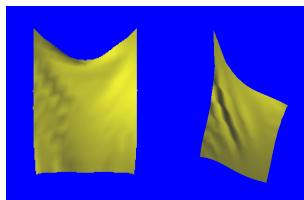


图8 无速度约束情况下的渲染效果图

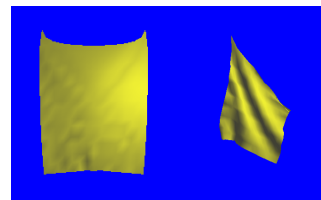


图9 有速度约束情况下的渲染效果图

5 结论

基于速度约束思想,给出了质点—弹簧模型超弹性问题的解决方法。该方法属于全局性的算法,在确定模型的质点位置之前,先对速度进行约束,从而避免了超弹性的发生。通过对质点—弹簧模型的优化,降低了模型内力求解的复杂度;计算复杂度较低的显式欧拉法对模型进行数值求解,提高了模拟效率。实验结果表明,该方法较好地改善了布料动态模拟的视觉效果。

不过,由于该方法属于全局性的算法,当超弹性现象仅发生在布料局部质点上时,对所有质点都进行速度约束判断和修正,工作效率较低,更高效的考虑应该只仅仅进行局部的修正;另外,显式欧拉法适用于精度要求不高的动画模拟,当对动画模拟的精度要求较高时,应该采用 Runge-Kutta 法^[13]对受力模型进行求解。

参考文献:

- [1] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior[C]//Wayne A D, Prusinkiewicz P. Proceeding of Graphics Interface '95. Quebec: Canadian Human-Computer Communications Society, 1995: 147-155.
- [2] Goldenthal R, David H, Raanan F, et al. Efficient simulation of in-extensible cloth[C]//ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007). New York: ACM, 2007(49).
- [3] Choi K, Ko H. Stable but responsive cloth[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 604-611.
- [4] Breen D, House D, Wozny M. Predicting the drape of woven cloth

using interacting particles[C]//Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: Orlando, 1994: 365-372.

- [5] 李长锋, 修毅. 织物三维动态模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(9): 1372-1376.
- [6] 漆安慎, 杜婵英. 力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [7] Bridson R, Fedkiw R P, Anderson J. Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 594-603.
- [8] Gay K L, Ling L, Damodaran M. A quasi-steady force model for animating cloth motion[C]//Proceedings of the IFIP TC5/WG5.2/WG5.10 CSI International Conference on Computer Graphics: Graphics Design and Visualizations. IFIP Transactions, Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1993: 357-363.
- [9] Ling L, Damodaran M, Gay K L. A model for animating cloth motion in air flow[C]//TENCON'94. IEEE Region 10's Ninth Annual International Conference, Theme: "Frontiers of Computer Technology", Singapore, 1994: 118-122.
- [10] 潘武明. 力学—计算机辅助教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 顾尔丹, 许端清, 王靖斌, 等. 结合一种面-面碰撞检测算法的服装动态模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1036-1040.
- [12] 白峰杉. 数值计算引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [13] Voline P, Magnenat-Thalmann N. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation[C]//Proceedings of the Conference on Computer Graphics International. Washington: IEEE Computer Society, 2001: 265-274.

(上接 183 页)

由上述实验的结果可见,与线性 PCA 相比,核 PCA 方法的检测精度确有提高。而测试精度与核参数有关。

5 结论

使用核 PCA 进行新颖人脸检测。与其它方法比较,该方法对人脸图像数据库提供了一个较高的正常/异常分类性能。前文已提及,为减小个别训练数据的位置对决策超平面的影响,可以使超球面以某一个概率包含训练数据,从而减小超球面的半径,以提高识别精度。这个概率的选择与实际应用密切相关,也是进一步的研究内容。

参考文献:

- [1] Li S Z, Jain A K. Handbook of face recognition[M]. New York: Springer, 2004: 1-15.
- [2] Markou M, Singh S. Novelty detection: a review, part 1: statistical approaches[J]. Signal Processing, 2003, 83(12): 2481-2497.
- [3] Markou M, Singh S. Novelty detection: a review, part 2: neural net-

work based approaches[J]. Signal Processing, 2003, 83(12): 2499-2521.

- [4] Scholkopf B, Smola A J. Learning with kernels[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2002: 201-220.
- [5] Scholkopf B, Williamson R C, Smola A J, et al. Support vector method for novelty detection[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2000, 12: 582-588.
- [6] Scholkopf B, Platt J C, Shawe-Taylor J, et al. Estimating the support of a high-dimensional distribution[J]. Neural Computation, 2001, 13: 1443-1472.
- [7] Tax D M J, Duin R P W. Support vector domain description[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20: 1191-1199.
- [8] Tax D M J, Juszczak P. Kernel whitening for one-class classification[C]//LNCS 2388: Proc of 1st IWPR with SVM, 2002: 40-52.
- [9] Rasmussen C E, Williams C K I. Gaussian processes for machine learning[M]. [S.l.]: MIT Press, 2006.
- [10] Shawe T J, Cristianini N. Kernel methods for pattern analysis[M]. [S.l.]: China Machine Press, 2004.