

布料人体快速连续碰撞检测与响应*

林凌¹, 张明敏¹, 潘志庚², 邱凯佳¹

¹(浙江大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310012)

²(杭州师范大学 数字媒体与人机交互研究中心, 浙江 杭州 311121)

通讯作者: 张明敏, E-mail: zmm@cad.zju.edu.cn, http://www.zju.edu.cn

摘要: 碰撞检测是 3D 虚拟服装中的重要环节,而在布料和人体模型的分辨率比较高的情况下,常规的碰撞检测算法往往无法达到实时.使用深度图像进行实时的连续碰撞检测,并结合法线图像进行碰撞响应.首先从指定的摄像机为人体预先渲染生成前后部深度图像与法线图像;然后对于要检测碰撞的布料质点,计算其深度值,并将其位置变换到图像空间,然后根据图像空间坐标从深度图像中读取深度值,通过与质点的深度值进行比较即可判断质点是否与人体碰撞,若发生碰撞,则通过修改的 DDA 直线光栅化算法在质点前一步与后一步位置确定的深度图像坐标区间内搜索插值参数,该插值参数用来计算碰撞接触点以及接触点处的法线,以支持连续碰撞响应.实验结果表明,该算法的预处理速度快,在布料和人体的分辨率都比较高的情况下也可以获得实时的碰撞检测与响应.

关键词: 布料仿真;虚拟服装;基于图像的碰撞检测;碰撞响应;虚拟试衣,深度图,法向图,修正的 DDA 扫描线光栅化

中文引用格式: 林凌,张明敏,潘志庚,邱凯佳.布料人体快速连续碰撞检测与响应.软件学报,2015,26(Suppl.2):1-7. http://www.jos.org.cn/1000-9825/15010.htm

英文引用格式: Lin L, Zhang MM, Pan ZG, Qiu KJ. Image-Based detection and response of continuous fast collision between cloth and human body. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(Suppl.2):1-7 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/15010.htm

Image-Based Detection and Response of Continuous Fast Collision Between Cloth and Human Body

LIN Ling¹, ZHANG Ming-Min¹, PAN Zhi-Geng², QIU Kai-Jia¹

¹(Digital Media & Interaction Research Center, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

²(Institute of Information Science and Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Collision detection is a key step in 3D virtual clothing, and it is difficult to be made real-time using generic collision detection algorithms with relatively high resolution of cloth and human body. This paper exploits depth and normal maps to efficiently detect and resolve collisions between cloth and body. First, body mesh is rendered from prepositioned cameras to generate depth and normal maps. Secondly, the depth of cloth node is computed and then the node is transformed to depth image space. Thirdly, depth is retrieved from the depth map according to the image coordinate of the cloth node and it is compared with the node's depth to determine whether collision happens or not. Lastly, if collision happens, an interpolation parameter is determined by searching the depth image space in the coordinate interval determined by the cloth node positions in previous and current integration step using a modified DDA line rasterization algorithm, and the interpolation parameter is later used to compute the contact point and contact normal which is necessarily for continuous collision response. Experimental results show that the algorithm takes little time in the preprocessing step and is able to provide real-time collision detection and response even when the resolution of cloth mesh and human body is relatively high.

Key words: cloth simulation; virtual clothing; image-based collision detection; collision response; virtual try-on, depth map, normal map, modified DDA line rasterization

* 基金项目: 国家自然科学基金(61173124, 61170318, 61332017)

收稿时间: 2014-01-03; 定稿时间: 2014-04-18

布料仿真已成为图形学研究领域的热门话题,现在已经取得了研究成果.布料仿真注重真实感、稳定性和计算效率.Terzopoulos 等人^[1]最早提出了一个通用物理模型来模拟橡胶和布料等柔性材料;Baraff 和 Witkin^[2]引入半隐式积分方法,在仿真过程中既可选取大步长又能保持较高稳定性,但在每一步都要解一个大型的线性方程组,效率不高;Choi 和 Ko^[3]专注于布料的屈曲(buckling)特性,提高了布料的真实感和效率,并使用二阶 BDF 半隐式积分方法保证了仿真的稳定性.近年来,在抗拉伸布料的模拟以及基于多分辨率的布料仿真方面也取得了不少成果,Ye^[4]通过引入即时冲量来约束弹簧长度以防止弹簧出现过度拉伸,模拟出了抗拉伸的布料效果;Feng^[5]和 Narain^[6]基于低分辨率的布料网格进行仿真,并在动态仿真过程中自适用地增加布料细节,在速度和效果上取得了较好的平衡.

布料仿真技术的进步以及计算机硬件性能的提高促进了虚拟服装的发展.虚拟服装主要包括动态布料的仿真以及布料与人体之间的碰撞检测,而碰撞检测与处理是其中开销最大的环节.已有的研究中提出了不少碰撞检测的方法,如 OBB 层次包围盒^[7],该方法在每一步需定位最有可能与布料接触的面片,然后与它们进行求交测试来支持连续碰撞检测,开销比较大,达不到实时性要求.对于处理布料与静态人体之间的碰撞,为人体计算距离场(distance field)^[8]是较常用的方法,其可以快速定位人体表面与布料质点的最近点和最近距离,进而快速进行碰撞检测,其缺点是距离场的计算非常耗时,一般是预先计算,但如果人体是动态的,使用距离场就达不到实时.为了进一步提高效率,基于图像空间的碰撞检测技术^[9]渐渐发展起来,其优点是预处理快、碰撞检测效率高;Vassilev^[9]最先使用该方法处理动态人体与布料之间的碰撞,但没有处理连续碰撞检测,且其仅通过判断布料质点在包围盒空间中的 z 坐标的正负来决定使用前部或者后部深度图来进行碰撞检测的方法不够稳定.本文提出了一种基于深度图和法线图的快速连续碰撞检测方法,通过优化前后法向图的选择策略,提高了碰撞检测和响应的稳定性,实验结果表明,本文的方法可以提供实时稳定的碰撞检测及响应.

1 布料的建模

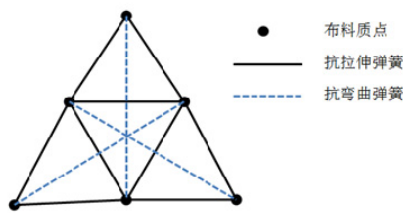


Fig.1 The mass-spring system
图1 布料的质点-弹簧模型

本文使用的布料模型是质点-弹簧模型^[10]及 Choi 的屈曲模型^[3].如图 1 所示,布料由一系列有质量的质点和连接这些质点的无质量的弹簧组成,根据弹簧的作用可分为两种弹簧:抗拉伸弹簧与抗弯曲弹簧,布料网格中三角形的边被当作抗拉伸弹簧,连接两个相邻三角形公共边相对的两个质点的虚拟弹簧被称为抗弯曲弹簧.抗拉伸弹簧只在被拉伸的时候起作用,而抗弯曲弹簧则只在被压缩的时候起作用,这样可以模拟出更具褶皱感的布料.

本文使用显式欧拉积分方法迭代求解布料各质点的状态,即位置和速度,详见公式(1).

$$a_{n+1} = M^{-1}F_n, v_{n+1} = v_n + a_{n+1}\Delta t, p_{n+1} = p_n + v_{n+1}\Delta t \quad (1)$$

其中, M 是对角质量矩阵; F_n 是第 n 步各质点所受的合力向量; a_n 表示第 n 步质点的加速度向量; v_n 表示第 n 步质点的速度向量; p_n 表示第 n 步质点的位置向量; Δt 表示积分时间步长;关于力的计算以及时间步长的选取标准可参考文献[11].

2 算法的设计与实现

在第 1 节中,每一步迭代求解之后,会得到布料上各质点的速度和位置,此时需要进行碰撞检测与响应.本文使用基于图像空间的方法进行碰撞检测与碰撞响应,首先需要根据摆放好的摄像机,正交投影离线渲染人体网格以生成前后深度图和前后法线图;然后根据质点的当前位置计算出质点的深度值,并从预先生成的前后部深度图上取得对应的深度值,进行深度值比较即可判断是否发生了碰撞.若发生碰撞,则根据该质点在前一步的位置(为了进行连续碰撞检测,也需要保存质点在前一步的位置信息)和质点的当前位置计算出接触点以及接触点处的法线,最后结合质点的速度进行碰撞响应.

2.1 摄像机的摆放

渲染生成深度图与法线图之前,要把摄像机摆放到合适的位置,首先计算出人体的轴向包围盒(如图 2 所示),假设其长度、宽度和高度分别为 L 、 W 、 H ,包围盒的中心为 C ,则前部摄像机的位置为 $C+W/2$,后部摄像机的位置为 $C-W/2$,朝向包围盒中心,前后裁剪面为 $0, W$;投影区域选择为方形,其边长 ϕ 设为包围盒长度和高度中的较大值,即 $\max(L, H)$,则左右裁剪面为 $-\phi/2, \phi/2$;上下裁剪面为 $\phi/2, -\phi/2$. 从包围盒的顶部看,前部摄像机的参数如图 3 所示,后部摄像机除了位置不一样,其他参数与前部摄像机相同.



Fig.2 The AABB box
图 2 人体的包围盒

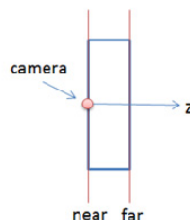


Fig.3 The camera parameters
图 3 摄像机参数

2.2 生成深度图

为了生成人体前部和后部的深度图,需从摄像机进行两次离线渲染而得到.首先从前部摄像机渲染之后读取深度缓存到前部深度图内存;然后设置后部摄像机为当前相机,再次进行渲染,读取深度缓存到后部深度图内存以备用,图 4 是图 2 中的人体的前部和后部深度图.

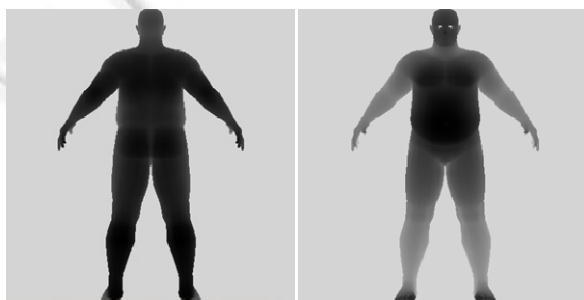


Fig.4 The front and back depth image
图 4 前部和后部深度图

2.3 生成法线图

法线图的生成方法与深度图略有不同,因为法线向量有 3 个坐标分量,假设法线都是归一化的,则各分量的范围为 $[-1.0, 1.0]$.若把范围 $[-1.0, 1.0]$ 线性映射到 $[0.0, 1.0]$,则可以将顶点法线作为顶点的颜色进行渲染,读取颜色缓存就可以得到法线图,当从法线图中读法线时只需要将颜色映射回 $[-1.0, 1.0]$ 即可.公式(2)是从法线映射到颜色和颜色映射到法线的式子,图 5 是图 2 中人体的前部与后部法线图.

$$C = 0.5N + 1, N = 2C - 1 \quad (2)$$

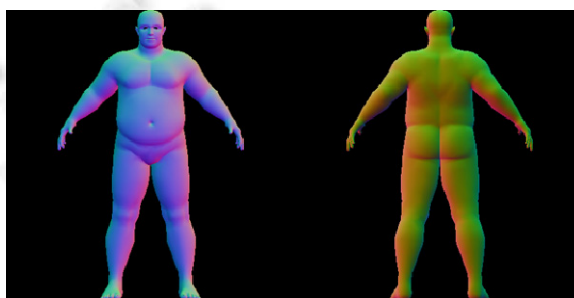


Fig.5 The front and back normal image
图 5 前部和后部法线图

2.4 连续碰撞检测

如图6所示,质点由位置 P_t 经过时间 dt 时间运动到位置 P_{t+dt} , 此时可检测到与人体发生碰撞;非连续碰撞检测一旦检测到碰撞即将质点拉回前一步的位置 P_t , 而实际的碰撞应该发生在 t 与 $t+dt$ 之间某个时间点上, 所示不够准确, 因为用来进行碰撞响应的接触点和接触点处的法线都与实际的值存在误差(如图6(左)所示), 若时间步长 dt 越大, 则误差也会越大, 为了获得较好的准确性, 宜采用连续碰撞检测方法; 如图6(右)所示, 连续碰撞检测会在时间 t 与 $t+dt$ 之间搜寻出准确的接触点与法线, 从而提高碰撞检测的准确性. 在效果上, 非连续碰撞检测会使布料在某些区域出现凹凸不平的现象(如图7(左)所示), 这是由于碰撞后的接触点直接由前一步的位置决定而造成的, 连续碰撞检测则可避免这一现象(如图7(右)所示).

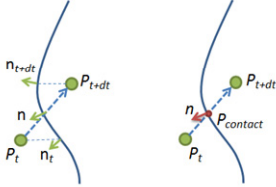


Fig.6 The non-continuous (left) and continuous (right) CD
图6 非连续(左)与连续(右)碰撞检测原理

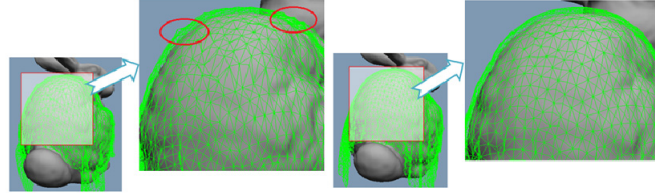


Fig.7 The non-continuous (left) and continuous (right) CD
图7 非连续(左)与连续(右)碰撞检测效果

在布料模拟过程中, 可以根据第2.2节中生成的深度图进行连续碰撞检测, 连续碰撞检测的流程是: 检测该质点是否与人体表面发生碰撞, 若发生碰撞, 则计算出准确的接触点以及接触点处的法线进行碰撞响应; 对于布料中的任一质点, 假设其当前位置为 P , 前一步位置为 P' , 则算法描述如下.

- (1) 首先判断点 P 是否在人体的包围盒内(如图2所示), 若不在, 则无碰撞发生, 否则, 进入下一步.
- (2) 将质点位置 P 从世界空间变换到包围盒空间(如图8(左)所示)得到 $Q(X_{bbox}, Y_{bbox}, Z_{bbox})$, 然后从包围盒空间变换到前部和后部图像空间(如图8(右)所示)得到 $P_{front}(X_{front}, Y_{front}, Z_{front})$ 和 $P_{back}(X_{back}, Y_{back}, Z_{back})$, 进入下一步, 各个坐标分量的计算见公式(3).

$$\left. \begin{aligned} Q = P - \Theta, Z_{front} &= (W - Z_{bbox}) / W, Z_{back} = Z_{bbox} / W, \\ X_{front} &= (X_{bbox} + \phi / 2) / \phi \times mapsize, X_{back} = (\phi / 2 - X_{bbox}) / \phi \times mapsize, \\ Y_{front} &= Y_{back} = Y_{bbox} / \phi \times mapsize \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $\Theta = (C_x, C_y - H/2, C_z - W/2)$ 是包围盒空间的坐标原点, C 是包围盒的中心, H 和 W 分别是包围盒的高度与宽度, ϕ 是正交投影面的边长, $mapsize$ 是图像的大小.

- (3) 从深度图像中读取相应的深度值, 见公式(4).

$$z_{front} = fdm[X_{front}, Y_{front}], z_{back} = bdm[X_{back}, Y_{back}] \quad (4)$$

其中, fdm 为前部深度图像, bdm 为后部深度图像, 若 $z_{front} > Z_{front}$ 或者 $z_{back} > Z_{back}$, 则无碰撞发生, 算法退出, 否则进入下一步.

- (4) 计算碰撞的接触点 C_p 以及接触点处的法线 N : 首先按照第(2)步的方法将质点前一步的位置 P' 变换到图像空间, 得到 $P'_{front}(X'_{front}, Y'_{front}, Z'_{front})$ 和 $P'_{back}(X'_{back}, Y'_{back}, Z'_{back})$, 然后在前后部深度图像上可以分别确定两条直线, $L_{front}: P'_{front}, P_{front}$ 和 $L_{back}: P'_{back}, P_{back}$, 假设接触点在图像空间中的坐标为 $C'_p(X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$, 则其必在 L_{front} 或者 L_{back} 上, 且要满足条件 $Z_{cp} = dm[X_{cp}, Y_{cp}]$. 因此, 可以在这两条直线上寻找满足该条件的点, 关于搜索的具体算法, 我们在 DDA 直线光栅化算法^[12]的基础上略进行了修改. 以 L_{front} 为例, 对于直线上的每一个像素点 (x, y) , 计算其深度值 z , 若 $z = fdm[x, y]$, 则 (x, y, z) 即为所求, 将其加入到候选点集, 并计算出相应的插值参数 $t = \|(x, y) - (P_x, P_y)\| / \|(P_x, P_y) - (P'_x, P'_y)\|$ (其中, $\|\cdot\|$ 表示求两点间的欧拉

距离, $t \in [0, 1]$), 搜索 L_{back} 的方法类似. 根据 C'_p 以及插值参数 t , 可以计算出接触点和法线: $C_p = tP + (1-t)P'$, $N = normal_map[X_{cp}, Y_{cp}]$ (注: C'_p 所在的深度图决定使用前部还是后部法线图). 另外, 因为接触点可能有多个, 选择离质点前一步位置 P' 最近的接触点即可.

(5) 根据第(4)步中得到的接触点和接触点处的法线进行碰撞响应, 碰撞响应在第 2.5 节中加以描述.

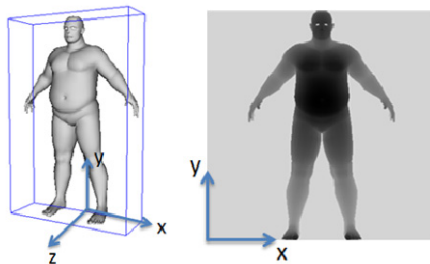


Fig.8 The ABB (left) and image (right) coordinate system

图 8 包围盒空间(左)和图像空间(右)坐标系

2.5 碰撞响应

碰撞响应根据碰撞检测的结果来决定布料质点下一步的运动状态, 以避免布料穿透人体以及模拟布料与人体表面之间的摩擦. 本文通过把发生碰撞的质点的位置修改为接触点的位置来避免穿透, 另外, 通过修改质点的速度来模拟摩擦力. 假设质点的当前速度为 V , 与人体表面的接触点为 C_p 以及接触点处的法线为 N , 则质点新的位置 P' 和新的速度 V' 的计算见公式(5).

$$P' = C_p, V_n = N \times (V \cdot N), V' = (V - V_n) \times (1.0 - C_{fric}) - V_n \times C_{res} \quad (5)$$

其中, $C_{fric} \in [0.0, 1.0]$ 是摩擦系数, $C_{res} \in [0.0, 1.0]$ 是碰撞反弹系数, V_n 是法线分量上的速度, 碰撞响应的效果是布料不会穿透人体, 而且根据设定的摩擦系数和反弹系数从人体表面弹起或者滑动.

3 实验

实验在 CPU 主频为 2.93GHz, 内存为 4GB, 显存为 512MB 的 PC 上进行. 算法只检测布料网格上的点与接触物体之间的碰撞, 而不检测布料网格上的边. 为了避免边穿透物体, 算法在为接触物体离线渲染生成深度图与法线图时, 把人体上的顶点沿该顶点的法线方向偏移一个距离 ϵ , ϵ 的值取决于碰撞接触面处的曲率, 在我们的实验中取 $\epsilon=0.01$ 可以取得较好的效果. 如图 9(左)所示, 当 ϵ 取值过小时, 布料网格上有一部分边会穿透到接触表面, 尤其是在接触面曲率较大的区域更加明显; 而当 ϵ 取值过大时(如图 9(中)所示), 会导致布料悬空在接触面上方, 并未与接触面接触, 产生不好的效果; 图 9 右侧显示的则是 ϵ 值刚好适中时的效果.

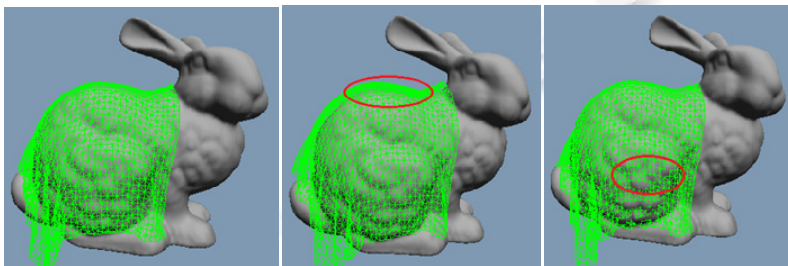


Fig.9 The effect of ϵ , too small (left), too large (middle), moderate (right)

图 9 不同 ϵ 取值的效果, 左: ϵ 过小, 中: ϵ 过大, 右: ϵ 适中

由实验结果可以看出, 算法的预处理速度很快, 为顶点数大于 6K 和面片数大于 12K 的人体生成深度图与法线图只需要 20ms, 而且只需要生成 1 次; 碰撞检测与响应的的时间只与布料的粒子数有关而与物体的分辨率无关,

见表 1,实验 2 中处理碰撞的时间比实验 1 少,而实验 1 中被碰撞物体所含的顶点数和面片数却比实验 2 中的多得多.如图 10 和图 11 所示.另外,由于算法的效率较高,在每步迭代中,碰撞检测与响应的的时间占据的比例大为减少,节省下来的时间可以用来提高布料的真实感,如进行更精确的布料物理运算.

表 1 实验结果

实验	布料粒子数	物体分辨率(顶点数/面片数)	生成深度图与法线图的时间(ms)	碰撞检测与响应的的时间(ms)	布料仿真的时间(ms)	每步迭代总时间(ms)	碰撞检测与响应占用的时间(%)	布料仿真占用的时间(%)
图 10	2 400	34834/69664	109	5.45	54.60	60.05	9.08	90.92
图 11	1 851	6311/12576	20	3.90	50.70	54.60	7.14	92.86

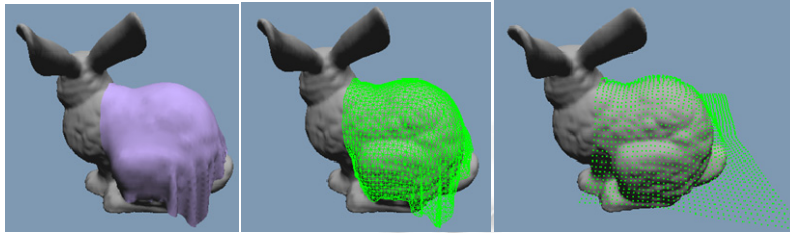


Fig.10 Covering cloth to the body of rabbit

图 10 将布料覆盖到兔子体表

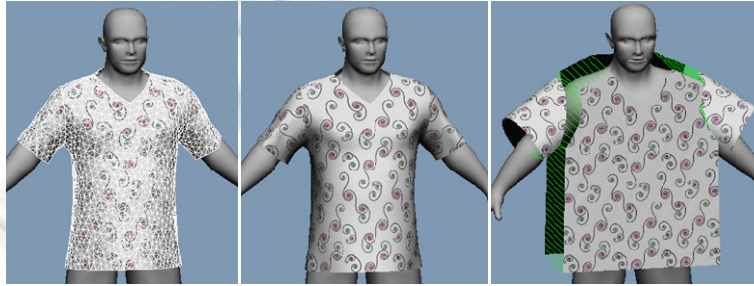


Fig.11 Stitching a shirt to virtual human

图 11 将衬衫缝合到人体身上

为了与常规的碰撞检测算法以及原算法进行性能对比,我们分别用经典的 Rapid 碰撞检测库以及 Vassilev^[9]的基于图像空间的碰撞检测算法实现了实验 1 中的程序.时间性能比较见表 2,本文算法在处理碰撞检测与响应的速度要比 Rapid 快很多.由于我们的算法要进行连续碰撞检测,所以在效率上要比 Vassilev 算法稍低,不过时间仅相差 1ms 左右,但在碰撞检测的准确性及仿真效果方面,我们的算法比 Vassilev 算法要好,如图 7(左)所示,由于 Vassilev 算法是非连续碰撞检测算法,会使布料在某些区域出现凹凸不平的现象,因为碰撞后的接触点直接由前一步的位置决定,而本文的连续碰撞检测算法通过在前一步位置与后一步位置之间插值,避免了该现象,取得了更好的碰撞检测效果,如图 7(右)所示.

表 2 算法性能比较(基于实验 1)

算法	碰撞检测与响应的的时间(ms)	布料仿真的时间(ms)	每步迭代总时间(ms)	碰撞检测与响应占用的时间(%)	布料仿真占用的时间(%)
本文算法	5.45	54.60	60.05	9.08	90.92
Vassilev 算法	4.20	54.60	58.80	7.14	92.86
Rapid	180.40	54.60	235.00	76.77	23.23

4 结束语

本文基于深度图像检测布料与虚拟人体之间的碰撞,并结合法线图像进行碰撞响应.通过修改的 DDA 直线光栅化算法在深度图像空间的坐标区间内搜索插值参数实现了连续的碰撞检测与响应.该算法实现简单,预处理速度快,碰撞检测与响应的效率也比较高,可推广到动态人体与衣服之间的碰撞检测.

References:

- [1] Terzopoulos D, Platt JC, Bar H. Elastically deformable models. *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'87)*, 1987,21:205–214.
- [2] Baraff D, Witkin A. Large steps in cloth simulation. In: *Proc. of the SIGGRAPH'98*. 1998. 43–54.
- [3] Choi KJ, Ko HS. Stable but responsive cloth. *ACM Trans. on Graphics*, 2002,21:604–611.
- [4] Ye J. Simulating inextensible cloth using impulses. *Computer Graphics Forum*, 2008,27(7):1901–1907.
- [5] Feng WW, Yu Y, Kim BU. A deformation transformer for real-time cloth animation. *ACM Trans. on Graphics (TOG)*, 2010,29(4): 108.
- [6] Narain R, Samii A, O'Brien JF. Adaptive anisotropic remeshing for cloth simulation. *ACM Trans. on Graphics (TOG)*, 2012,31(6): 152.
- [7] Ramírez E, Navarro H, Carmona R, *et al.* Optimizing collision detection based on OBB trees generated with a genetic algorithm. In: *Proc. of the IV Ibero-American Symp. in Computer Graphics*. 2009. 97–103.
- [8] Lee SH, Park T, Kim JH, *et al.* Adaptive synthesis of distance fields. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(7):1135–1145.
- [9] Vassilev T, Spanlang B, Chrysanthou Y. Fast cloth animation on walking avatars. In: *Proc. of the Eurographics on Computer Graphics Forum*. 2001.
- [10] Lee Y, Yoon S, Oh S, *et al.* Multi-Resolution cloth simulation. *Computer Graphics Forum*, 2010,29(7):2225–2232.
- [11] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *Graphics Interface*, 1995,147–154.
- [12] Li L, Zhou Y, Liu C, *et al.* State-of-the-Art line drawing techniques. In: *Computer Informatics, Cybernetics and Applications*. Springer-Verlag, 2012. 1249–1257.



林凌(1987—),男,江西赣州人,硕士,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实.



潘志庚(1965—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为虚拟现实,多媒体,图形学,游戏.



张明敏(1965—),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为虚拟现实,图像处理.

邱凯佳(1990—),男,硕士,主要研究领域为虚拟现实.