

DOI: 10.19333/j.mfkj.20240907301

基于带状纱线模型的机织物参数化仿真

姜珂¹, 宋明明¹, 彭佳佳², 刘锋¹, 卢致文¹

(1. 太原理工大学 轻纺工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 苏州工学院 纺织服装与设计学院, 江苏 苏州 215500)

摘要:为提升机织物仿真的真实感效果,降低因反复试织打样产生的资源损耗,针对仿真过程中织物建模复杂、模拟效率较低等问题,提出了一种基于带状纱线模型的织物建模方法,结合真实纱线图像的纹理映射,实现机织物真实感快速仿真。通过将传统管状纱线模型简化为带状,利用 Catmull-Rom 曲线拟合纱线路径,根据纱线排列模型、织物组织模型对织物几何模型进行构建,同时通过参数化调整完善整体织物形态;通过采集纱线真实图像及图像预处理等步骤,配合纱线表面光照模型及阴影调整,利用 PBR 技术对纱线纹理进行真实感渲染。结果表明,该方法在简化机织物仿真流程的同时能够实时准确地预览纱线在织物中的呈现效果,提高机织物的设计效率。

关键词:带状纱线模型;机织物;纹理映射;三维仿真;图像处理

中图分类号:TS 105.1 **文献标志码:**A

Simulation of woven fabric based on ribbon yarn model

JIANG Ke¹, SONG Mingming¹, PENG Jiajia², LIU Feng¹, LU Zhiwen¹

(1. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi 030600, China;

2. School of Textile Garment and Design, Suzhou University of Technology,
Suzhou, Jiangsu 215500, China)

Abstract: To enhance the realism of woven fabric simulation and reduce resource consumption caused by repeated trial weaving and sampling, a fabric modeling method based on a ribbon yarn model is proposed to address issues such as the complexity of fabric modeling and low simulation efficiency during the simulation process. By combining texture mapping of real yarn images, this method achieves rapid and realistic simulation of woven fabrics. The traditional tubular yarn model is simplified into a ribbon shape, and Catmull-Rom curves are used to fit the yarn paths. The geometric model of the fabric is constructed based on the yarn arrangement model and the fabric weave pattern, while parametric adjustments are applied to refine the overall fabric morphology. Through steps such as capturing real yarn images and image preprocessing, along with the yarn surface lighting models and shadow adjustments, physically based rendering (PBR) technology is employed to achieve realistic rendering of yarn textures. The results demonstrate that this method simplifies the woven fabric simulation process while enabling real-time and accurate previews of yarn appearance within the fabric, thereby improving the design efficiency of woven fabrics.

Keywords: ribbon yarn model; woven fabric; texture mapping; 3D simulation; image processing

机织物在服装、家纺、产业用等多个领域中被广泛使用^[1],精准模拟其组织结构和形态特征对于机织物设计和预测织造效果至关重要。采用虚拟仿真

技术在打样前先完成对机织物组织结构、形态及织造效果的模拟,能够有效地减少产品试织次数,降低资源损耗^[2]。

收稿日期:2024-09-24

基金项目:山西省哲学社会科学规划课题(2023YY051);织绣技艺非遗数字化保护与传承四川省文化和旅游厅重点实验室(2024SYSZC06);山西省本科生教改项目(J20230211)

第一作者:姜珂,硕士生,主要研究方向为纺织服装数字化,E-mail:18624420319@163.com。

通信作者:卢致文,副教授,博士,主要研究方向为服装数字化与智能化,E-mail:luzhiwen@tyut.edu.cn。

目前机织物仿真方法主要分为配色模纹法^[3-4]、纱线设计法^[5-6]、曲线建模法^[7-8]以及真实感图像法^[9-11]。配色模纹法是根据织物组织、纱线排列和经纬密度等因素生成织物模拟图像,广泛运用于色织物仿真,操作简单,但存在织物模拟质感平淡、不能模拟花式纱线织物等局限^[12]。纱线设计法通过对纱线颜色、线密度、捻度、毛羽感等参数进行设计,仿真模拟出纱线条干后再进行织物模拟,可以有效提升织物模拟真实感效果,但由于纱线外观效果依靠人为绘制,导致仿真效果与真实织物之间仍存在较大差距。曲线建模法是基于 Peirce 模型及其修正理论,利用三角函数曲线或样条曲线对纱线屈曲形态或截面形状进行模拟^[13],进而构建整体织物结构,虽然能够通过数学方程对纱线交织及屈曲形态进行计算,但模型构建过程通常较为复杂、模拟效率较低。真实感图像法侧重于织物的真实感模拟,通过纱线真实图像预处理、调整表面光照及阴影效果等方式提高对织物真实感的仿真,虽然模拟效果的真实得到了大幅提升,但构建的织物模型参数可调性较差^[14],局部仍存在毛羽感效果、纱线间交错形态模拟不佳等问题。综上所述,减少织物模拟时间,探索通用的织物外观模拟方法是机织物仿真研究的关键。

本文提出了一种机织物快速仿真方法,创新性地 将纱线模型由传统的管状简化为带状,通过建立 纱线排列模型、织物组织模型及设置经纬密度、起伏 程度参数使得机织物模型具有高度可调性,结合纱 线真实图像完成机织物的真实感仿真,以期在织物 设计初期即可基于纱线特征对织物的实际效果进行 预测。

1 机织物模型构建

1.1 纱线排列模型

纱线排列模型是基于纱线基本特征,用以系统地描述织物中纱线的排列形式或规律。纱线排列模型 P 中储存了组成织物的所有经纱 J 和纬纱 W 的信息,即 $P=[J,W]$ 。单根纱线的信息储存在数组 Y 中,即 $Y=[d,M]$,其中 d 为纱线直径, M 为纱线纹理。根据纱线特征及排列得到经纱数组 $J=[Y_1 \cdots Y_i \cdots Y_m]$ 及纬纱数组 $W=[Y'_1 \cdots Y'_j \cdots Y'_n]$,其中 m 为经纱根数, Y_i 为第 i 根经纱信息; n 为纬纱根数, Y_j 为第 j 根纬纱信息。因此得出纱线排列模型 P 的一般形式为 $P=[Y_1 \cdots Y_i \cdots Y_m, Y'_1 \cdots Y'_j \cdots Y'_n]$ 。

1.2 织物组织模型

织物组织模型描述了织物中经纬纱线相互交织的规律。织物因交织产生花型变化的本质在于纱线

的沉浮,结合纱线模型中包含的经纬纱线信息,借助布尔矩阵表示织物组织点,将经浮点用“1”表示,纬浮点用“0”表示,所形成的矩阵称为织物组织矩阵 S ,一般形式如式(1)所示:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{i1} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mj} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵 S 中每个元素 S_{ij} 代表织物组织点,取值为 0 或 1。通过将由 m 根经纱 n 根纬纱组成的织物组织转换为 m 行 n 列的布尔矩阵进行描述,进而将织物中组织点、经纬纱的排列变化规律转化为矩阵进行运算处理。

1.3 带状纱线模型

纱线模型通常被构建为三维柱形体,然而在实际织造过程中,纱线截面沿经向不断产生变化,难以用理想化模型精准表示^[15]。为了有效提高织物仿真效率,减少模拟纱线碰撞带来的建模运算量,本文参照已有研究^[16],提出了一种带状纱线模型。通过将纱线整体近似为圆柱体,提取柱体纵向截面,得到该矩形的高度为纱线长度 l ,宽度为纱线直径 d 。用单个矩形代表组成织物的单根纱线,通过添加控制点对矩形形态进行控制,以模拟纱线因交织产生的起伏,纱线几何模型示意图如图 1 所示。

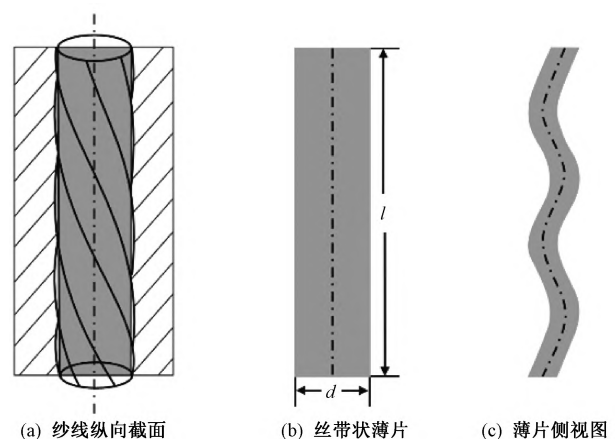


图 1 纱线几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of yarn geometric model.

(a) Longitudinal section of yarn; (b) Ribbon shaped thin sheet; (c) Side view of thin sheet

利用 Catmull-Rom 曲线对织物中纱线路径进行拟合,该样条曲线能够通过控制点精确拟合纱线路径,并在控制点间实现平滑过渡处理,能够很好地模拟带状纱线的特殊形态。Catmull-Rom 曲线的样条

函数式如下:

$$p(t) = \frac{1}{2} [1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_{\alpha+1} \\ p_{\alpha+2} \\ p_{\alpha+3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: p_α 为控制点; α 为控制点个数 ($\alpha \geq 4$); t 为插值参数, $t \in [0, 1]$ 。

带状纱线模型在模拟纱线交织时能够有效减少模拟纱线碰撞带来的运算量, 显著提升建模效率。相较于三维管状纱线模型, 带状纱线模型能够较好地克服柱形体在纹理渲染时的接缝问题, 使得机织物仿真真实感效果更好。以不同机织物组织为例, 将带状纱线模型按织物组织规律进行排列与交织, 得到不同组织的模拟效果图, 如图 2 所示。带状模型能够清晰反映织物间纱线的三维交错关系, 同时为毛羽类纱线纹理渲染提供了有效载体。

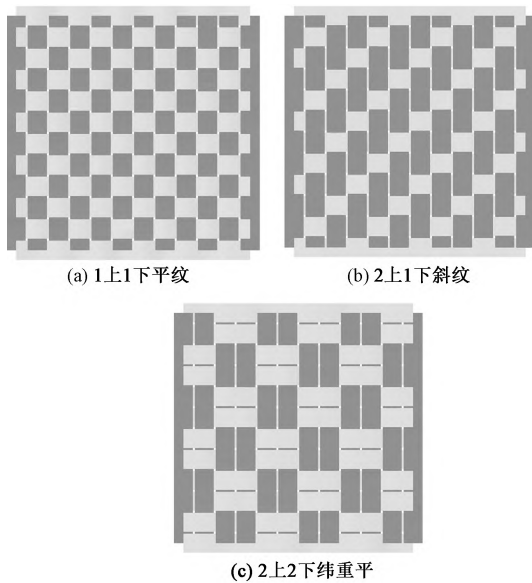


图 2 基于带状纱线模型的不同机织物组织模拟
Fig. 2 Simulation of different woven fabric structures based on ribbon yarn model. (a) Plain weave; (b) 2/1 twill weave; (c) 2/2 weft-faced rib weave

1.4 织物模型参数设置

机织物经纬纱线排列及织物组织最为显著地影响着织物宏观视觉风格。此外, 织物经纬密度、纱线起伏程度等因素也会对织物外观产生影响^[17]。因此可通过设置不同织物模型参数, 灵活调整织物结

构, 使其具备更高的可调性。

1.4.1 经纬密度调整参数

在模拟不同机织物组织时, 通过纱线间隔系数 k 对织物经纬密度 (k_j, k_w) 进行调整。假设相邻 2 纱线直径分别为 d_1, d_2 , 则纱线调整后的间距 G 为:

$$G = \frac{(d_1 + d_2)}{2} k \quad (k \geq -1) \quad (3)$$

由式(3)可知, 纱线间距 G 也与纱线直径 d 密切相关, 当 k 值一定时, 相邻纱线直径之和越大, 纱线间距 G 越大, 织物密度越小。当 k 取正值时, 纱线排列较为疏松, 织物风格较为粗犷, 纱线间交错遮挡少, 能够更加清晰地展现表面纹理细节。当织物经纬密度相同时 ($k_j = k_w$), 观察经纬均为同直径大小的相邻 2 纱线间距, 此时有 $G_1 = G_2, G_3 = G_4$, 织物组织模拟效果如图 3(a) 所示。当经纬密度不同时 ($k_j \neq k_w$), 显然 $G'_1 \neq G'_2, G'_3 \neq G'_4$, 此时织物组织具有较小经密、较大纬密, 织物组织模拟效果如图 3(b) 所示。随着 k 取值不断减小, 纱线排列逐渐紧密, 织物风格较为细腻精致, 花型外观效果明显。对于毛羽较为丰富的纱线, k 的取值通常为负值, 如图 3(c) 所示, 尽管存在模型穿插现象, 但后期贴图处理后的模拟效果能够更好地模拟实际织物中纱线毛羽交错及挤压的视觉效果。

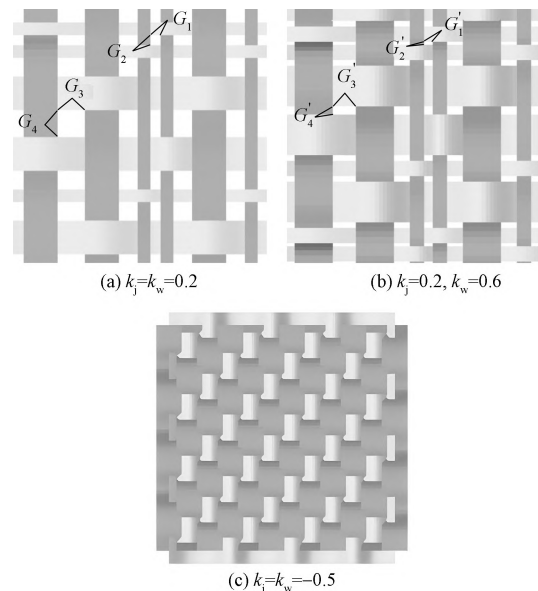


图 3 不同经纬密度的织物组织模拟图

Fig. 3 Simulation of fabric structures with different warp and weft densities

1.4.2 起伏程度调整参数

纱线起伏程度 H 用于调整经纬纱线表面的起伏变化, 通过偏移曲线控制点位置影响纱线路径。

H 的取值范围为 $[0, 1]$, 织物经向与纬向的起伏程度分别由 H_j 与 H_w 进行控制, 且 $H_j + H_w = 1$ 。图 4 所示为不同起伏程度的斜纹组织模拟图, 不同直径纱线在起伏系数的影响下的起伏量也不同, 与实际织物效果接近。通过调整纱线起伏参数 H , 织物模拟效果由原来的二维平面网格转变为三维立体结构, 整体织物更具层次感与立体感。

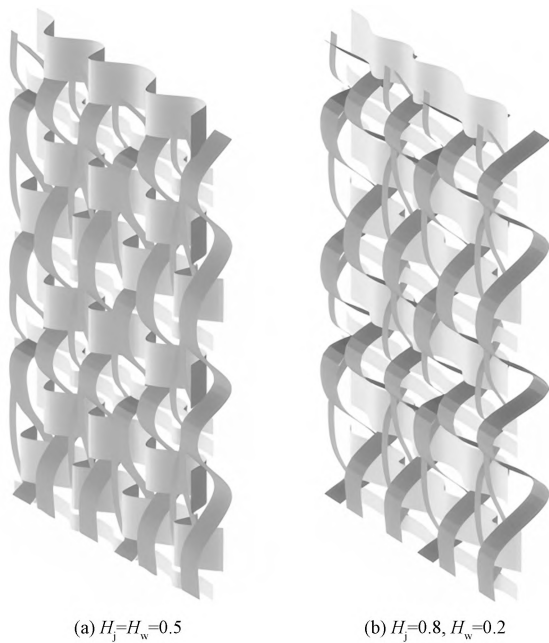


图 4 不同起伏程度的织物组织模拟图

Fig. 4 Simulation diagrams of fabric structures with different degrees of surface undulation

2 机织物模拟真实感增强

2.1 纱线图像处理

为去除采集图像中除纱线主干及毛羽外的无关部分, 需要对获取的纱线图像进行处理。如图 5 所示, 首先对原始纱线图像进行裁剪, 以去除大部分背景信息; 接着对图像进行灰度化处理, 将彩色图像转换为较为合理的灰度图像; 采用大津法进行自动阈值二值化处理, 对纱线主体与背景进行识别和分割, 提取出纱线轮廓和纹理特征, 公式如下:

$$\sigma_B^2(T) = w_0(T)w_1(T)[\mu_0(T) - \mu_1(T)]^2 \quad (4)$$

式中: $\sigma_B^2(T)$ 为类间方差; $w_0(T)$ 和 $w_1(T)$ 分别为前景和背景的概率; $\mu_0(T)$ 和 $\mu_1(T)$ 分别为前景和背景的平均灰度值。

通过将纱线图像转换到频域, 使用二维傅里叶变换(Two-Dimensional Fourier Transform, 2-DFT)对频谱图中的峰值位置和频率信息进行分析, 确定纱线纹理的最小循环单元, 见式(5):

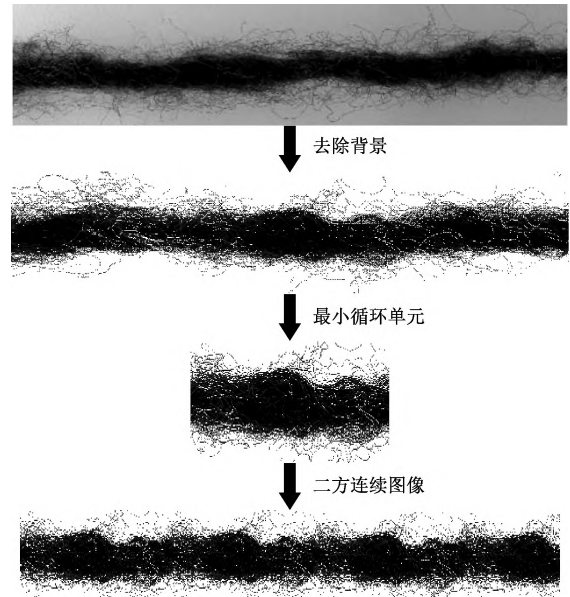


图 5 真实纱线图像处理流程

Fig. 5 Processing flow of real yarn images.

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (5)$$

式中: x, y 为空间域的坐标变量; $f(x, y)$ 为图像在空间域的像素值; u, v 为频域中的频率变量; $F(u, v)$ 为图像在频域的变换结果; M 和 N 分别为图像的宽度和高度; i 为虚数单位, $i^2 = -1$ 。

将纱线纹理最小循环单元沿水平方向进行复制, 形成纱线纹理的二方连续图像。基于真实纱线纹理二方连续图像进行的渲染, 能够在减少需要处理的纹理数据量和提高渲染速度的同时, 使得仿真模拟效果更加逼真。

2.2 织物效果渲染

基于物理的渲染(Physically-Based Rendering, PBR)即通过模拟光与物体表面相互作用的过程, 以达到更加接近真实世界中的视觉效果。将预处理后的纱线纹理图像转化为贴图应用到带状模型上, 通过控制粗糙度、金属度、透明度等属性, 得到与真实织物相近的材质。同时为了确保纱线表面的光照效果及阴影细节, 采用 BRDF 函数对 PBR 材质上的反射及散射效果进行捕捉, 从而准确地将 PBR 材质映射到带状模型上。由于带状模型具有无体积特性, 相较于管状模型更容易产生波纹或其他渲染阴影, 采用 Variance Shadow Maps (VSM) 技术对像素是否处于阴影中进行估算, 以提高阴影形成质量和柔和度。

针对纱线之间复杂的遮盖和交错关系, 采用深度写入和深度测试技术来更新深度缓冲区中像素的深度值, 以确保在后续的深度测试中能够正确比较

纱线像素的深度关系,实现纱线之间正确的遮挡效果。为了保证纱线边缘与背景之间过渡自然,在实际渲染阶段采用标准的 Alpha 混合模式计算最终颜色:

$$C_{\text{final}} = \beta C_{\text{src}} + (1 - \beta) C_{\text{dst}} \quad (6)$$

式中: C_{final} 是最终的颜色值; C_{src} 是源颜色值,即前景色; C_{dst} 是目标颜色值,即背景色; β 是源颜色的 Alpha 值,用于确定前景色的不透明度。

3 结果与讨论

为验证模型有效性及仿真流程的可行性,在几种常见的简单及变化组织机织物的基础上,经纬纱选用 20 余种具有不同颜色、直径、纹理等特征的纱线,借助 JavaScript 语言进行编程,并在 WebGL 环境下通过 Three.js 库实现织物模型构建及模拟过程,机织物真实感仿真流程如图 6 所示。

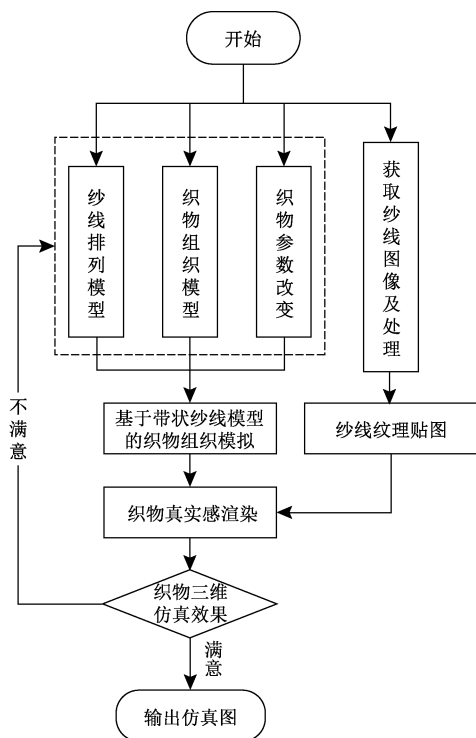
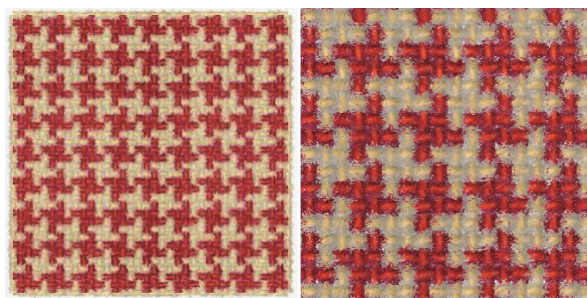


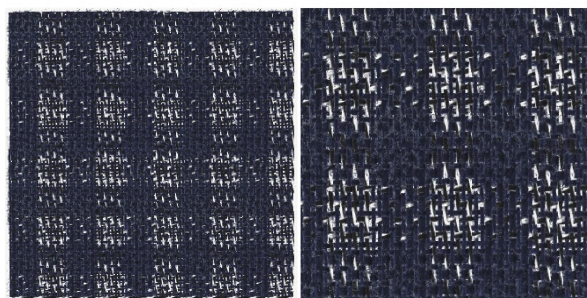
图 6 机织物仿真流程图

Fig. 6 Flowchart of woven fabric simulation

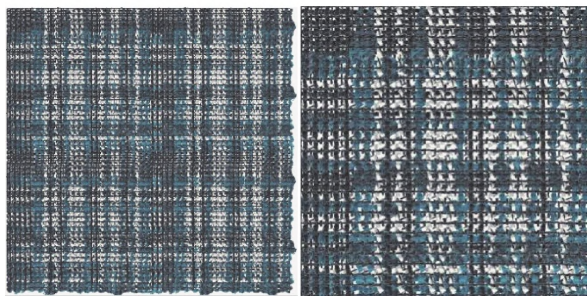
由图 7 中的织物模拟效果(左)及其局部细节放大(右,放大比例为 1:2)图可知,仿真结果具有较强的立体感和真实感,能够较为真实地呈现织物本身质感和毛羽效果、模拟织物形态及表面纹理细节,有效验证了模型的适用性与可调节性。



(a) $k_j=-0.5, k_w=-0.5, H_j=0.4, H_w=0.6$



(b) $k_j=0.2, k_w=-0.6, H_j=0.6, H_w=0.4$



(c) $k_j=-0.5, k_w=-0.5, H_j=0.5, H_w=0.5$

图 7 仿真参数设置及模拟效果图

Fig. 7 Simulation parameter settings and simulation effect images

4 结论

本文提出了一种用于机织物仿真的带状纱线模型,根据织物组织结构、纱线交织规律等信息及织物密度、纱线起伏等参数对整体织物几何模型进行构建与调整,结合纱线真实纹理映射及渲染处理,最终实现了机织物简单及变化组织的仿真模拟。结果表明,本文提出的仿真方法能够基于给定纱线特征,较为精准地对其外观纹理效果进行预测;在保证织物模拟真实感的同时,有效提升了仿真模拟速度。本文机织物仿真的带状纱线模型未来有望应用实际设计生产中,设计人员通过实时交互模拟即可快速生成不同风格类型的织物组织模拟图像,但本文并未对多层机织物组织等复杂组织的模拟进行探讨,未来仍需进行更多拓展研究以提高带状纱线模型模拟机织物的适用性。

参考文献:

- [1] 孙丹,郭丹,杜霏宇,等. 基于平纹变化组织的配色模纹麻织物设计[J]. 毛纺科技,2023,51(11):7-11.
SUN Dan, GUO Dan, DU Peiyu, et al. Color effect hemp fabric design based on plain derivative weave [J]. Wool Textile Journal, 2023, 51 (11): 7-11.
- [2] 尚静雨,蒋高明,李炳贤. 简单大提花织物的三维仿真[J]. 毛纺科技,2024,52(4):11-17.
SHANG Jingyu, JIANG Gaoming, LI Bingxian. 3D simulation of woven simple jacquard fabrics [J]. Wool Textile Journal,2024, 52 (4): 11-17.
- [3] 睦建华,周洋,俞海峰,等. 织物配色模纹的计算机设计[J]. 棉纺织技术,2005,33(11):21-24.
SUI Jianhua, ZHOU Yang, YU Haifeng, et al. Computer design on fabric color effect [J]. Cotton Textile Technology, 2005, 33(11):21-24.
- [4] 施国生,梁道雷. 纱线和织物外观模拟图形的统计特性研究[J]. 纺织学报,2004, 25(2):39-40,5.
SHI Guosheng, LIANG Daolei. A research of statistical characteristics of yarns and fabric external appearance imitative figures [J]. Journal of Textile Research, 2004, 25(2):39-40,5.
- [5] ZHAO S, LUAN F, BALA K. Fitting procedural yarn models for realistic cloth rendering [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4):1-11.
- [6] 张增康. 基于图像分析的纱线毛羽参数测试技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2018.
ZHANG Zengkang. Research of yarn hairiness parameters measurement technique based on image analysis [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018.
- [7] 郑天勇,吴珍,赵媛媛,等. Peirce 机织物几何结构模型的探讨[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2014,26(3):1-5.
ZHENG Tianyong, WU Zhen, ZHAO Yuanyuan, et al. Study on Peirce woven fabric geometry model [J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2014, 26 (3): 1-5.
- [8] 王旭,储长流,倪庆清,等. 运用 MAXScript 语言的单层机织物结构三维建模[J]. 纺织学报,2019,40(1):159-165.
WANG Xu, CHU Changliu, NI Qingqing, et al. Three-dimensional modeling on single-layer woven fabric structure using MAXScript language [J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(1):159-165.
- [9] 潘如如,李忠健,唐佩君,等. 应用纱线序列图像的色纺机织物仿真[J]. 棉纺织技术,2019,47(1):16-20.
PAN Ruru, LI Zhongjian, TANG Peijun, et al. Application of yarn sequence image for the simulation of colored spun woven fabric [J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47 (1): 16-20.
- [10] ÖZDEMİR H, BASER G. Computer simulation of plain woven fabric appearance from yarn photographs [J]. Journal of the Textile Institute, 2009, 100 (3): 282-292.
- [11] ÖZDEMİR H, BASER G. Computer simulation of woven fabric appearances based on digital video camera recordings of moving yarns [J]. Textile Research Journal, 2008, 78(2):148-157.
- [12] 郭炜杰. 基于分形的花式线及其织物外观效果模拟的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2010.
GUO Weijie. A new method to simulate fancy yarn and fabric based on fractal theory [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010.
- [13] 谷大鹏,杨育林,齐效文,等. 机织物三维仿真中组织模块化快速构建[J]. 纺织学报, 2014, 35 (1): 134-138.
GU Dapeng, YANG Yulin, QI Xiaowen, et al. Fast modular construction of weave in woven fabric three-dimensional simulation[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(1):134-138.
- [14] 张宁,李忠健,潘如如,等. 采用色纺纱图像的真实感色织物模拟[J]. 纺织学报,2017,38(5):37-42.
ZHANG Ning, LI Zhongjian, PAN Ruru, et al. Simulation of realistic yarn-dyed fabric using colored spun yarn images [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(5):37-42.
- [15] 谷大鹏,杨育林,范兵利,等. 平纹机织物空间参数化模型及仿真[J]. 纺织学报,2012,33(10):37-42.
GU Dapeng, YANG Yulin, FAN Bingli, et al. Space parametric model and simulation of plain woven fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(10): 37-42.
- [16] MING M S, JIA J P, CHEN Y C, et al. Rapid simulation of knitted fabrics based on a ribbon yarn model [J]. Textile Research Journal, 2024. DOI:10.1177/00405175241268795.
- [17] 王旭,毕松梅. 基于 Photoshop 软件的色织物视觉仿真建模技术[J]. 安徽工程大学学报,2013,28(1):38-40.
WANG Xu, BI Songmei. Visual simulation design technique on yarn dyed fabric by Photoshop software [J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2013, 28(1):38-40.