

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 10 月 27 日 (27.10.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/222091 A1

(51) 国际专利分类号:
G06T 17/20 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/088913

(22) 国际申请日: 2021 年 4 月 22 日 (22.04.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 杭州相芯科技有限公司(FACEUNITY TECHNOLOGY CO., LTD) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市滨江区滨安路1197号3幢436室, Zhejiang 310000 (CN)。

(72) 发明人: 周昆(ZHOU, Kun); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

陈翔(CHEN, Xiang); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 杨振杰(YANG, Zhenjie); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路147号黄鸿年科技综合大楼215室/邱启旺, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: METHOD FOR GENERATING CHARACTER BAS-RELIEF MODEL ON BASIS OF SINGLE PHOTO

(54) 发明名称: 一种基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法

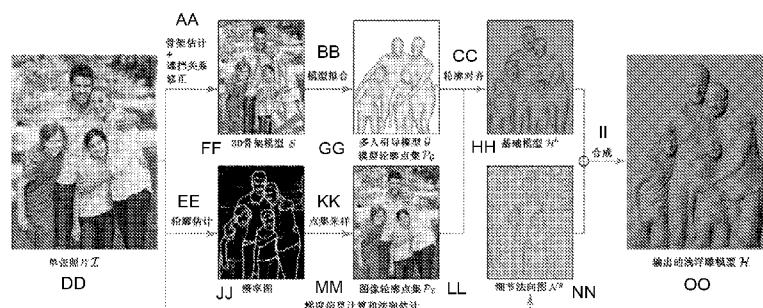


图 1

- AA Skeleton estimation + occlusion relationship correction
- BB Model fitting
- CC Contour alignment
- DD Single photo I
- EE Contour estimation
- FF 3D skeleton model S
- GG Multi-person guide model G model contour point set PG
- HH Basic model Hb
- II Synthesis
- JJ Probability graph
- KK Point set sampling
- LL Image contour point set Px
- MM Gradient information calculation and normal estimation
- NN Detail normal graph Ng
- OO Outputted bas-relief model H

(57) Abstract: Disclosed is a method for generating a character bas-relief model on the basis of a single photo. In the method, a 3D human body skeleton is constructed on the basis of an input photo, and a complex human body self-occlusion and mutual occlusion relationship is analyzed by means of a 3D skeleton layer so as to construct a 3D human body guide model. The present invention also provides a contour matching-based deformation algorithm, so that a generated low-frequency basic shape model is accurately aligned with an image space, and on the basis of such, the low-frequency basic shape model is fused with high-frequency detail features in an

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

一 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

image, thereby obtaining a bas-relief model. The interaction manner of the present invention is simple, direct, and efficient, so that an ordinary user can quickly construct a human body bas-relief model from a photo photographed by said user or a network photo. The present invention is applicable to a variety of different single-person or multi-person photos, and has high universality and stability. Theoretical analysis and experimental results show that 3D visual perception of the bas-relief model generated by the present invention is realistic, and is practical and has application prospects.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法。该方法基于输入照片构建3D人体骨架, 并通过3D骨架层来解析复杂的人体自遮挡和相互遮挡关系, 构建3D人体引导模型。本发明还提出了一种基于轮廓匹配的形变算法, 使得生成的低频基础形状模型与图像空间准确对齐, 并在此基础上将低频基础形状模型与图像中的高频细节特征进行融合, 从而得到浅浮雕模型。本发明的交互方式简单、直接、高效, 可以使普通用户快速地从自己拍摄的照片或网络照片中构建出人体浅浮雕模型。本发明适用于各种不同的单人或多人照片, 具有较高普适性和稳定性。理论分析和实验结果表明, 本发明生成的浅浮雕模型3D视觉感知逼真, 极具实用性和应用前景。

一种基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法

技术领域

本发明涉及计算机图形学的几何建模领域，尤其涉及一种基于单张照片的多人物浅浮雕模型生成方法。

背景技术

浅浮雕是一种历史久远的艺术呈现，其形式生动且内涵深刻。在数字化时代，3D 浅浮雕模型的生成配合 AR/VR 和数字化制造技术，在社交、建筑、艺术创作、数字媒体等领域有独特价值。

目前，浅浮雕模型的自动生成方法都是 3D 形状出发，通过各类自适应的深度压缩方法将模型高度变浅来达成目的。以照片作为输入的浅浮雕模型生成方法往往针对某类简单物体，或者需要大量的用户交互来完成，耗时耗力。当前方法无法针对单张人物照片来生成高质量的浅浮雕模型，这个问题在家庭照等多人照片中尤其突出。在多人照中，人物之间往往存在复杂且情绪饱满的肢体交互。虽然现有的神经网络类工作可以高效地生成粗略的单人模型，但这类方法无法准确预测多人之间复杂的空间遮挡关系。

发明内容

本发明的目的在于针对现有技术的不足，提供一种针对单张人物照片的浅浮雕模型生成方法，在少量用户交互的基础上即可生成多人浅浮雕模型，并确保空间关系的准确和几何细节特征的高保真度。

本发明的目的是通过以下技术方案来实现的：

一种基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法，包括以下步骤：

步骤一：给定单张包含单人或者多人的照片，生成所有人物的 3D 骨架并通过用户交互对所有人物 3D 骨架中骨骼之间的错误遮挡关系进行修正；再利用修正后正确的遮挡关系作为约束，求解正确的 3D 骨架关节点坐标生成遮挡关系正确的 3D 骨架；再基于遮挡关系正确的 3D 骨架分别拟合每个人物的参数化人体模型作为 3D 人体引导模型；

步骤二：采用非刚性平面形变函数将 3D 人体引导模型的轮廓与照片中人物的轮廓进行对齐并优化非刚性平面形变函数，再利用优化的非刚性平面形变函数在图像空间对 3D 人体引导模型的法向图进行扭曲获得扭曲法向图，并基于扭曲法向图求解最小二乘问题获得人体浅浮雕的低频基础模型；其中，所述 3D 人体引导模型的轮廓为 3D 人体引导模型中按照法向相对图像视角朝外和朝内的两组三角形面片的共同边界在图像空间中的投影；优化非刚性平

面形变函数采用的能量方程为:

$$\min_{Z,f} \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq} \|R_r - f(Q_q)\|^2 + \lambda \|L(f)\|^2 - \xi \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq},$$

其中, Z_{rq} 表示 3D 人体引导模型的轮廓与照片中人物的轮廓之间的相关性系数, 同时要求满足约束 $Z_{rq} \in \{0,1\}$, $\sum_{q=1}^{K_2+1} Z_{rq} = 1$, 以及 $\sum_{r=1}^{K_1+1} Z_{rq} = 1$. R_r 表示照片中人物轮廓的第 r 个点坐标, Q_q 表示 3D 人体引导模型轮廓的第 q 个点坐标, K_1 、 K_2 分别为照片中人物轮廓和 3D 人体引导模型轮廓的点集数目。 f 为非刚性平面形变函数; λ 、 ξ 为权重, 均为实数, $\|*\|$ 为正则化函数, $L(f)$ 表示非刚性平面形变函数 f 平滑性的约束项。

步骤三: 从照片中提取高频细节特征并生成细节法向图, 细节法向图与步骤二生成的低频基础模型合成获得最终的人体浅浮雕模型; 其中, 所述高频细节特征为照片的灰度值金字塔每一层的梯度信息, 细节法向图为所有层的梯度信息的均值。

进一步地, 所述步骤一中, 所有人物的 3D 骨架生成方法为:

使用神经网络从照片中获取每个人物的 2D 姿态;

使用神经网络从每个人物的 2D 姿态分别预测 3D 骨架;

基于所有人物的 3D 骨架, 优化计算所使用照片的相机内外参数, 使得 3D 骨架与照片中 2D 关节点在图像空间对齐, 获得所有人物的 3D 骨架;

优化能量如下:

$$E(K, T_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{v \in \mathcal{S}_i} \|p - \pi_K(T_i v)\|^2 + \sum_{i=1}^N (t_z^i - \bar{t}_z)^2,$$

优化变量为相机内参数 K 和外参数即每个人物 3D 骨架的相似变换矩阵 T_i , 包括缩放系数、旋转矩阵和平移矩阵 $\mathbf{t}^i = [t_x^i, t_y^i, t_z^i]^T$, t_x^i, t_y^i, t_z^i 分别表示 x, y, z 三个方向的平移参量; v 为 3D 骨架的关节点坐标, $\mathcal{S}_i$, $i = 1, \dots, N$ 为每个人物的 3D 骨架关节点坐标集合, N 为照片中的人物数; p 为 v 对应的在照片中的 2D 关节点坐标, π_K 为基于相机内参数 K 的投影函数, $\|*\|$ 为正则化函数。 $\bar{t}_z$ 表示给定照片中的 N 个人物 z 方向平移参量的均值。

进一步地, 所述步骤一中, 利用修正后正确的遮挡关系作为约束, 求解正确的 3D 骨架关节点坐标生成遮挡关系正确的 3D 骨架具体为:

通过优化下述能量来重新计算 3D 骨架的关节点位, 生成遮挡关系正确的 3D 骨架:

$$E(z) = \|Lz - Lz^{(0)}\|^2 + \omega \sum_{f,b \in \text{occpairs}} (\bar{z}_f - \bar{z}_b + d_{\text{gap}})^2$$

其中, L 是图拉普拉斯算子对应的矩阵, $\mathbf{z}$ 和 $\mathbf{z}^{(0)}$ 是所有关节点优化前后的 z 坐标向量, $\bar{z}_j = (1 - \alpha)z_{j_0} + \alpha z_{j_1}$ 为第 j 根骨骼的交点 z 坐标, α 是交点在骨骼两个端点之间的插值参数, 下标 $0,1$ 为骨骼的两个端点坐标索引, Occpairs 表示照片中相交的骨骼对, 下标 f, b 分别表示相交的前后两根骨骼, ω 表示权重, d_{gap} 表示深度间隙, 用于补偿骨骼厚度。

进一步地, 所述步骤一中, 基于遮挡关系正确的 3D 骨架分别拟合每个人物的参数化人体模型作为 3D 人体引导模型, 具体为: 采用拟合能量优化每个人物的姿态参数 θ_i 和形状参数 β_i 如下:

$$\theta_i^*, \beta_i^* = \arg \min_{\theta, \beta} \sum_{v \in \mathcal{S}'_i} \|\mathbf{v} - \text{joint}_v^{\text{smpI}}(\theta_i, \beta_i)\|^2$$

其中, $\mathbf{v}$ 是 $\mathcal{S}'_i$ 上的关节点, $\mathcal{S}'_i, i = 1, \dots, N$ 为遮挡关系正确的每个人物的 3D 骨架关节点坐标集合, $\text{joint}_v^{\text{smpI}}$ 是 $\mathbf{v}$ 在参数化人体骨架模板中的关节点。

优化计算得到姿态参数 θ_i^* 和形状参数 β_i^* 之后, 利用参数化模板生成每个人物对应的 3D 人体模型 $\mathcal{G}_i = \text{body}^{\text{smpI}}(\theta_i^*, \beta_i^*)$, 作为 3D 人体引导模型。

进一步地, 所述步骤二中, 使用神经网络的多尺度边缘检测方法从照片中提取人物的轮廓。

进一步地, 所述步骤二中, 优化非刚性平面形变函数时还包括: 用户指定表示特殊姿态的 3D 人体引导模型的轮廓和照片中人物的轮廓中正确对应的点作为关键点对, 将指定的关键点对之间的相关性系数固定为 1 作为变量的硬约束形式加入优化条件。

进一步地, 所述步骤二中, 低频基础模型中人物的头部、毛发、手和脚采用其他方法重建, 具体为:

通过从照片中提取面部标志再利用三维面部表情模型生成深度图重建头部的低频基础模型;

通过在照片中绘制毛发、手和脚区域的掩模, 再估计掩模的边界梯度信息, 并利用边界梯度信息作为边界条件求解拉普拉斯问题, 获得的高度场作为毛发、手和脚的低频基础模型并利用泊松编辑与其他基础模型进行融合。

进一步地, 所述步骤三中, 所述细节法向图与步骤二生成的低频基础模型合成获得最终的人体浅浮雕模型具体为:

$$E(\mathcal{H}) = \delta \sum_{(u,v)} (\mathcal{H}_{(u,v)} - \mathcal{H}_{(u,v)}^b)^2 + (1 - \delta) \left[\left(\mathbf{T}_{(u,v)}^u \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 + \left(\mathbf{T}_{(u,v)}^v \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 \right]$$

其中, $\mathcal{H}$ 为合成后的浅浮雕模型, $\mathcal{H}_{(u,v)}^b$ 为低频基础模型 $\mathcal{H}^b$ 中 (u, v) 像素位的高度, $\mathcal{H}_{(u,v)}$ 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 中 (u, v) 像素位的高度, $\mathcal{N}_{(u,v)}^g$ 为细节法向图 $\mathcal{N}^g$ 中 (u, v) 像素位的法向量, T^U 和 T^V 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 的 U, V 两个方向的表面切向量, δ 为权重, 为实数; 优化所得高度场即为最终浅浮雕模型。

本发明的有益效果是: 本发明创新地提出了一种针对单张照片的人物浅浮雕模型生成方法, 在少量用户交互的基础上即可生成多人浅浮雕模型, 并确保人物空间关系的准确性和几何细节特征的高保真度。本发明方法生成的浅浮雕模型 3D 视觉感知逼真, 适用于各类单人或多人照片, 具有较高普适性、鲁棒性和实用性。

附图说明

图1是基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法流程图。

图2是图像遮挡关系解析的示意图, 其中, a 为原始图像遮挡关系, b 为错误遮挡关系, c 为正确遮挡关系。

图3是骨骼交点解析的示意图, 其中, 下标 i 表示骨骼 l_i , 下标 j 表示骨骼 l_j , a 为无交点, b 为 l_i 位于 l_j 之上, c 为 l_j 位于 l_i 之上。

图4是(照片)图像空间和3D人体引导模型轮廓提取的示意图, 其中, a 为基于神经网络的多尺度边缘检测方法获取照片的轮廓概率图, b 为从轮廓概率图中采样的点集, c 为k-means算法获得轮廓的均匀采样点集, d 为从3D人体引导模型中提取的轮廓。

图5是点对齐示意图, 其中, a 为初始状态, 图中, 直径小的点表示原始位置(3D引导模型的轮廓点), 直径大的点表示目标位置(2D轮廓点), 二者间的连线表示相关性系数, b 为相关性系数矩阵 Z , 其中, 最后一行和最后一列是关键点的额外标记; c 为应用优化后的非刚性平面形变函数的对齐结果。

图6是3D人体引导模型的轮廓与照片的2D轮廓在图像空间对齐示意图。 a 为初始状态, 其中, 直径小的点表示3D引导模型的轮廓点, 直径大的点表示2D轮廓点, b 为未使用关键点约束的轮廓对齐结果, c 为使用关键点约束的轮廓对齐结果, d 为用户在用户交互界面选择关键点的示意图, 其中选择肘关节处的轮廓点作为关键点。

图7是浅浮雕基础形状生成的示意图; 其中, a 为3D人体引导模型, b 为从3D人体引导模型渲染的法向图, c 为扭曲法向图, d 为由扭曲法向图重建的基础模型, e 为头部、毛发、手和脚等的生成示意, f 为完整的基础模型。

图8是对基础模型和图像细节进行浅浮雕合成的示意图; 其中, a 为原始单张照片, b 为基

基础模型, c为细节法向图, d为最终的浅浮雕模型。

图9是采用本发明方法与现有方法的10张照片生成的浅浮雕模型对比结果;其中第一行为原始单张照片, b为采用本发明方法生成的浅浮雕模型, c为采用现有方法生成的浅浮雕模型。

具体实施方式

下面根据附图详细说明本发明。

本发明单张照片的人物浅浮雕模型生成方法, 其流程如图1所示, 具体包括以下步骤:

步骤一: 给定单张包含单人或者多人的照片, 生成遮挡关系正确的3D骨架和3D人体引导模型。

该步骤是本发明的核心之一, 分为以下子步骤。

(1.1) 使用神经网络从照片中获取每个人物的2D姿态。本实施例中采用OpenPose进行2D姿态估计;

(1.2) 使用神经网络从上一子步骤获得的2D姿态分别预测每个人物的3D骨架, 得到关节点坐标集合 $\mathcal{S}_i$, $i = 1, \dots, N$, 对应给定照片中的N个人物。

(1.3) 基于所有人物的3D骨架, 优化计算所使用照片的相机内外参数, 使得3D骨架与照片中2D关节点在图像空间对齐。其中, 优化能量如下:

$$E(K, T_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{v \in \mathcal{S}_i} \|p - \pi_K(T_i v)\|^2 + \sum_{i=1}^N (t_z^i - \bar{t}_z)^2,$$

优化变量为针孔相机参数K和外参数即每个人物3D骨架的相似变换矩阵 T_i (包括缩放、旋转和平移), 具体表示为 $T_i = [s_i R_i | t^i]$, R_i 为旋转矩阵、 $t^i = [t_x^i, t_y^i, t_z^i]^T$, t_x^i, t_y^i, t_z^i 为x,y,z三个方向的平移参量, s_i 为缩放标量。p为v对应的在照片中的2D关节点坐标, π_K 为基于针孔相机参数K的投影函数, $\|\cdot\|$ 为正则化函数。第一项为重投影误差约束, 使得3D骨架的每个关节点v在所求相机投影下与其相应的2D关节点p在图像空间保持一致; 第二项是正则项, 使得每个3D骨架的空间变换在深度平移上保持一致。 $\bar{t}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_z^i$, 表示给定照片中的N个人物z方向 (垂直于图像平面的方向) 平移参量的均值。该优化能量为非线性优化过程, 本实施例中设定相机参数K中的焦距初始值为500, $t = [0, 0, 400]^T$, s_i 不小于0.3, 本实施例中 s_i 为1。

(1.4) 基于3D骨架模型, 借助少量用户交互来修正骨骼之间的错误遮挡关系。由于每根骨骼是刚体, 图像上相交的两根骨骼之间有明确的前后遮挡关系。当上一子步骤中得到的3D骨架中存在错误的骨骼遮挡关系时, 用户可以简单切换两者前后关系, 系统则会对这样的骨骼对关系进行记录, 如图2所示。

(1.5) 基于用户指定的遮挡关系约束, 求解正确的3D骨架关节点坐标。此时系统会优

化下述能量来重新计算 3D 骨架的关节点位得到每个人物遮挡关系正确的 3D 骨架关节点坐标集合 $\mathcal{S}'_i$, $i = 1, \dots, N$:

$$E(z) = \|Lz - Lz^{(0)}\|^2 + \omega \sum_{f,b \in \text{occpairs}} (\bar{z}_f - \bar{z}_b + d_{\text{gap}})^2,$$

其中, 第一项约束 3D 骨架图结构所对应的拉普拉斯坐标变化, 第二项约束图像空间上重叠的骨骼对之间的前后遮挡关系, L 是图拉普拉斯算子对应的矩阵, 而 z 和 $z^{(0)}$ 是所有关节点优化前后的 z 坐标向量, $\bar{z}_j = (1 - \alpha)z_{j_0} + \alpha z_{j_1}$ 为第 j 根骨骼的交点 z 坐标, 交点关系示意如图 3 所示, 其中, α 是交点在骨骼两个端点之间的插值参数, 下标 0,1 为骨骼的两个端点坐标索引, Occpairs 表示照片中相交的骨骼对, 下标 f 、 b 分别是相交的前后两根骨骼的索引, ω 表示权重, 本实施例设为 0.1。 d_{gap} 表示深度间隙, 用于补偿骨骼厚度, 本实施例设为 15。

(1.6) 基于遮挡关系正确的 3D 骨架, 分别拟合每个人物的参数化人体模型作为浅浮雕生成算法的 3D 人体引导模型。拟合能量如下:

$$\theta_i^*, \beta_i^* = \arg \min_{\theta, \beta} \sum_{v \in \mathcal{S}'_i} \|v - \text{joint}_v^{\text{smpI}}(\theta_i, \beta_i)\|^2$$

其中, v 是 $\mathcal{S}'_i$ 上的关节点, $\text{joint}_v^{\text{smpI}}$ 则是 v 在参数化人体骨架模板中的关节点。优化计算得到姿态参数 θ_i^* 和形状参数 β_i^* 之后, 利用参数化模板 (本实施例中采用 SMPL 模型) 生成每个人物对应的 3D 人体模型 $G_i = \text{body}^{\text{smpI}}(\theta_i^*, \beta_i^*)$, $i = 1, \dots, N$ 作为后续步骤的 3D 人体引导模型。

步骤二: 基于非刚性形变将 3D 人体引导模型与给定照片的轮廓特征进行对齐, 生成人体浅浮雕的低频基础模型。

该步骤是本发明的核心之一, 分为以下子步骤。

(2.1) 基于三角面片的法向从 3D 人体引导模型中提取轮廓即 3D 轮廓并使用相机参数将其投影到图像空间, 具体为: 将 3D 人体引导模型的所有三角形面片按照法向相对图像视角朝外还是朝内分为两个组, 找到两个组的共同边界作为 3D 轮廓, 并将其投影到图像空间。

(2.2) 使用神经网络从照片中提取关键的轮廓信息即 2D 轮廓, 具体为: 首先基于神经网络的多尺度边缘检测方法获取照片的轮廓概率图, 然后使用 Fisher-Yates shuffle 和 k-means 算法获得轮廓的均匀采样点集, 如图 4 所示。

(2.3) 借助少量用户交互来指定稀疏的表示特殊姿态的在 3D 轮廓和 2D 轮廓中正确对应的点作为关键点对, 作为后续点匹配算法的约束条件。

(2.4) 基于非刚性点集匹配算法将 3D 人体引导模型的轮廓与照片中人物的 2D 轮廓在

图像空间进行对齐, 如图 5-6 所示。优化时, 最小化下述能量:

$$\min_{Z,f} \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq} \|R_r - f(Q_q)\|^2 + \lambda \|L(f)\|^2 - \xi \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq},$$

Z_{rq} 表示 3D 人体引导模型的轮廓与照片的 2D 轮廓之间的相关性系数, 同时要求满足约束 $Z_{rq} \in \{0,1\}$, $\sum_{q=1}^{K_2+1} Z_{rq} = 1$, 以及 $\sum_{r=1}^{K_1+1} Z_{rq} = 1$ 。Z 是 Z_{rq} 组成的矩阵, R_r 表示照片中人物轮廓的第 r 个点坐标, Q_q 表示 3D 人体引导模型轮廓的第 q 个点坐标, K_1 、 K_2 分别为照片中人物轮廓和 3D 人体引导模型轮廓的点集数目, 优选地, $K_1=1.2K_2$ 。 f 为非刚性平面形变函数。其中, 第一项衡量点集之间的近似保真度, 第二项约束非刚性平面形变函数 f 的平滑性, 具体优化时采用薄板样条的公式化形式来求解; 第三项惩罚异常值的数目, ξ 为权重, 本实施例设为 0.01。步骤 (2.3) 中用户指定的关键点对作为变量的硬约束形式加入优化条件, 具体为: 将指定的关键点对之间的相关性系数固定为 1, 并将包含关键点对中一点的相关性系数固定为 0。即 Z 矩阵中, 关键点对的 Z 值固定为 1, 关键点所在的行和列其他的 Z 值设为 0, 如图 5b 所示。

(2.5) 基于点匹配计算所得的非刚性平面型变函数 f 在图像空间对 3D 人体引导模型的法向图进行扭曲, 并基于扭曲法向图求解最小二乘问题来重建人体浅浮雕的基础模型 $\mathcal{H}^b$ 。

具体地, 如图 7 所示, 先在 3D 人体引导模型上生成不含头部、毛发、手和脚等的法向图, 利用非刚性平面型变函数 f 在图像空间对 3D 引导模型的法向图进行扭曲, 并基于扭曲法向图求解最小二乘问题并结合生成的头部、毛发、手和脚来重建人体浅浮雕的基础模型 $\mathcal{H}^b$ 。其中头部为通过从照片中提取面部标志再利用三维面部表情模型生成的深度图, 并将深度图结合至身体区域的基础模型中; 毛发、手和脚通过如下方法生成: 在图像中绘制掩模遮住这些区域并平滑边界, 再估计掩模的边界梯度信息利用边界梯度信息作为边界条件来求解拉普拉斯问题, 得到一个近似的高度场, 最后利用泊松编辑 (Poisson Editing) 与其他基础模型进行融合得到最终的基础模型 $\mathcal{H}^b$ 。

步骤三: 如图 8 所示, 从图像提取高频细节特征, 并与步骤二生成的低频基础模型进行合成, 获得最终的人体浅浮雕模型。首先将图像转为灰度表示的金字塔, 然后提取每一层 k 的梯度信息作为细节法向 $\mathbf{n}^k(u,v) = \text{normalize} \left([-\nabla \mathcal{I}_{gray}^k(u,v), 1]^T \right)$, (u,v) 为像素, $\nabla \mathcal{I}_{gray}^k(u,v)$ 表示灰度金字塔第 k 层中 (u,v) 像素位的梯度信息, normalize 为归一化函数。接着合成所有层细节法向获得整体的细节法向图 $\mathcal{N}^g$, 最后通过求解下述最小二乘问题将步骤二生成的浅浮雕低频基础模型与高频细节法向图进行合成:

$$E(\mathcal{H}) = \delta \sum_{(u,v)} (\mathcal{H}_{(u,v)} - \mathcal{H}_{(u,v)}^b)^2 + (1 - \delta) \left[\left(T_{(u,v)}^U \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 + \left(T_{(u,v)}^V \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 \right],$$

其中, $\mathcal{H}$ 为合成后的浅浮雕模型, $\mathcal{H}_{(u,v)}^b$ 为低频基础模型 $\mathcal{H}^b$ 中 (u, v) 像素位的高度, $\mathcal{H}_{(u,v)}$ 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 中 (u, v) 像素位的高度, $\mathcal{N}_{(u,v)}^g$ 为细节法向图 $\mathcal{N}^g$ 中 (u, v) 像素位的法向量, T^U 和 T^V 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 的 U, V 两个方向的表面切向量。此优化所得高度场即为最终浅浮雕模型。 δ 为权重, 本实施例中, 头部区域设定为 0.4, 身体区域设定为 0.1。

本发明的整个方法中, 仅需要在少量用户交互 (错误遮挡关系修正、表示特殊姿态的关键点、毛发、手和脚掩盖) 的基础上即可生成多人浅浮雕模型, 并确保人物空间关系的准确性和几何细节特征的高保真度。

图9是采用本发明方法与现有方法 (S. Tang, F. Tan, K. Cheng, Z. Li, S. Zhu, and P. Tan, “A neural network for detailed human depth estimation from a single image,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019, pp. 7750–7759.) 的10张照片生成的浅浮雕模型对比结果, 从图中可以看出, 本发明方法生成的浅浮雕模型3D视觉感知逼真, 适用于各类单人或多人照片, 具有较高普适性、鲁棒性和实用性。

权利要求书

1、一种基于单张照片的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤一：给定单张包含单人或者多人的照片，生成所有人物的 3D 骨架并通过用户交互对所有人物 3D 骨架中骨骼之间的错误遮挡关系进行修正；再利用修正后正确的遮挡关系作为约束，求解正确的 3D 骨架关节点坐标生成遮挡关系正确的 3D 骨架；再基于遮挡关系正确的 3D 骨架分别拟合每个人物的参数化人体模型作为 3D 人体引导模型；

步骤二：采用非刚性平面形变函数将 3D 人体引导模型的轮廓与照片中人物的轮廓进行对齐并优化非刚性平面形变函数，再利用优化的非刚性平面形变函数在图像空间对 3D 人体引导模型的法向图进行扭曲获得扭曲法向图，并基于扭曲法向图求解最小二乘问题获得人体浅浮雕的低频基础模型；其中，所述 3D 人体引导模型的轮廓为 3D 人体引导模型中按照法向相对图像视角朝外和朝内的两组三角形面片的共同边界在图像空间中的投影；优化非刚性平面形变函数采用的能量方程为：

$$\min_{Z, f} \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq} \|R_r - f(Q_q)\|^2 + \lambda \|L(f)\|^2 - \xi \sum_{r=1}^{K_1} \sum_{q=1}^{K_2} Z_{rq},$$

其中， Z_{rq} 表示 3D 人体引导模型的轮廓与照片中人物的轮廓之间的相关性系数，同时要求满足约束 $Z_{rq} \in \{0,1\}$ ， $\sum_{q=1}^{K_2+1} Z_{rq} = 1$ ，以及 $\sum_{r=1}^{K_1+1} Z_{rq} = 1$ 。 R_r 表示照片中人物轮廓的第 r 个点坐标， Q_q 表示 3D 人体引导模型轮廓的第 q 个点坐标， K_1 、 K_2 分别为照片中人物轮廓和 3D 人体引导模型轮廓的点集数目。 f 为非刚性平面形变函数； λ 、 ξ 为权重，均为实数， $\|\cdot\|$ 为正则化函数， $L(f)$ 表示非刚性平面形变函数 f 平滑性的约束项。

步骤三：从照片中提取高频细节特征并生成细节法向图，细节法向图与步骤二生成的低频基础模型合成获得最终的人体浅浮雕模型；其中，所述高频细节特征为照片的灰度值金字塔每一层的梯度信息，细节法向图为所有层的梯度信息的均值。

2、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤一中，所有人物的 3D 骨架生成方法为：

使用神经网络从照片中获取每个人物的 2D 姿态；

使用神经网络从每个人物的 2D 姿态分别预测 3D 骨架；

基于所有人物的 3D 骨架，优化计算所使用照片的相机内外参数，使得 3D 骨架与照片中 2D 关节点在图像空间对齐，获得所有人物的 3D 骨架；

优化能量如下：

$$E(K, T_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{v \in \mathcal{S}_i} \|p - \pi_K(T_i v)\|^2 + \sum_{i=1}^N (t_z^i - \bar{t}_z)^2,$$

优化变量为相机内参数K和外参数即每个人物 3D 骨架的相似变换矩阵 T_i ，包括缩放系数、旋转矩阵和平移矩阵 $t^i = [t_x^i, t_y^i, t_z^i]^T$ ， t_x^i, t_y^i, t_z^i 分别表示 x,y,z 三个方向的平移参量；v 为 3D 骨架的关节点坐标， $\mathcal{S}_i, i = 1, \dots, N$ 为每个人物的 3D 骨架关节点坐标集合，N 为照片中的人物数；p 为 v 对应的在照片中的 2D 关节点坐标， π_K 为基于相机内参数K的投影函数， $\|*\|$ 为正则化函数。 $\bar{t}_z$ 表示给定照片中的N个人物 z 方向平移参量的均值。

3、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤一中，利用修正后正确的遮挡关系作为约束，求解正确的 3D 骨架关节点坐标生成遮挡关系正确的 3D 骨架具体为：

通过优化下述能量来重新计算 3D 骨架的关节点位，生成遮挡关系正确的 3D 骨架：

$$E(z) = \|Lz - Lz^{(0)}\|^2 + \omega \sum_{f,b \in \text{occpairs}} (\bar{z}_f - \bar{z}_b + d_{\text{gap}})^2$$

其中，L 是图拉普拉斯算子对应的矩阵，z 和 $z^{(0)}$ 是所有关节点优化前后的 z 坐标向量， $\bar{z}_j = (1 - \alpha)z_{j_0} + \alpha z_{j_1}$ 为第 j 根骨骼的交点 z 坐标， α 是交点在骨骼两个端点之间的插值参数，下标 0,1 为骨骼的两个端点坐标索引，Occpairs 表示照片中相交的骨骼对，下标 f、b 分别表示相交的前后两根骨骼， ω 表示权重， d_{gap} 表示深度间隙，用于补偿骨骼厚度。

4、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤一中，基于遮挡关系正确的 3D 骨架分别拟合每个人物的参数化人体模型作为 3D 人体引导模型，具体为：采用拟合能量优化每个人物的姿态参数 θ_i 和形状参数 β_i 如下：

$$\theta_i^*, \beta_i^* = \arg \min_{\theta, \beta} \sum_{v \in \mathcal{S}'_i} \|v - \text{joint}_v^{\text{smpI}}(\theta_i, \beta_i)\|^2$$

其中，v 是 $\mathcal{S}'_i$ 上的关节点， $\mathcal{S}'_i, i = 1, \dots, N$ 为遮挡关系正确的每个人物的 3D 骨架关节点坐标集合， $\text{joint}_v^{\text{smpI}}$ 是 v 在参数化人体骨架模板中的关节点。

优化计算得到姿态参数 θ_i^* 和形状参数 β_i^* 之后，利用参数化模板生成每个人物对应的 3D 人体模型 $\mathcal{G}_i = \text{body}^{\text{smpI}}(\theta_i^*, \beta_i^*)$ ，作为 3D 人体引导模型。

5、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤二中，使用神经网络的多尺度边缘检测方法从照片中提取人物的轮廓。

6、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤二中，优化

非刚性平面形变函数时还包括：用户指定表示特殊姿态的 3D 人体引导模型的轮廓和照片中人物的轮廓中正确对应的点作为关键点对，将指定的关键点对之间的相关性系数固定为 1 作为变量的硬约束形式加入优化条件。

7、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤二中，低频基础模型中人物的头部、毛发、手和脚采用其他方法重建，具体为：

通过从照片中提取面部标志再利用三维面部表情模型生成深度图重建头部的低频基础模型；

通过在照片中绘制毛发、手和脚区域的掩模，再估计掩模的边界梯度信息，并利用边界梯度信息作为边界条件求解拉普拉斯问题，获得的高度场作为毛发、手和脚的低频基础模型并利用泊松编辑与其他基础模型进行融合。

8、根据权利要求 1 所述的人物浅浮雕模型生成方法，其特征在于，所述步骤三中，所述细节法向图与步骤二生成的低频基础模型合成获得最终的人体浅浮雕模型具体为：

$$E(\mathcal{H}) = \delta \sum_{(u,v)} (\mathcal{H}_{(u,v)} - \mathcal{H}_{(u,v)}^b)^2 + (1 - \delta) \left[\left(T_{(u,v)}^u \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 + \left(T_{(u,v)}^v \cdot \mathcal{N}_{(u,v)}^g \right)^2 \right]$$

其中， $\mathcal{H}$ 为合成后的浅浮雕模型， $\mathcal{H}_{(u,v)}^b$ 为低频基础模型 $\mathcal{H}^b$ 中 (u, v) 像素位的高度， $\mathcal{H}_{(u,v)}$ 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 中 (u, v) 像素位的高度， $\mathcal{N}_{(u,v)}^g$ 为细节法向图 $\mathcal{N}^g$ 中 (u, v) 像素位的法向量， T^u 和 T^v 为合成后的浅浮雕模型 $\mathcal{H}$ 的 U, V 两个方向的表面切向量， δ 为权重，为实数；优化所得高度场即为最终浅浮雕模型。

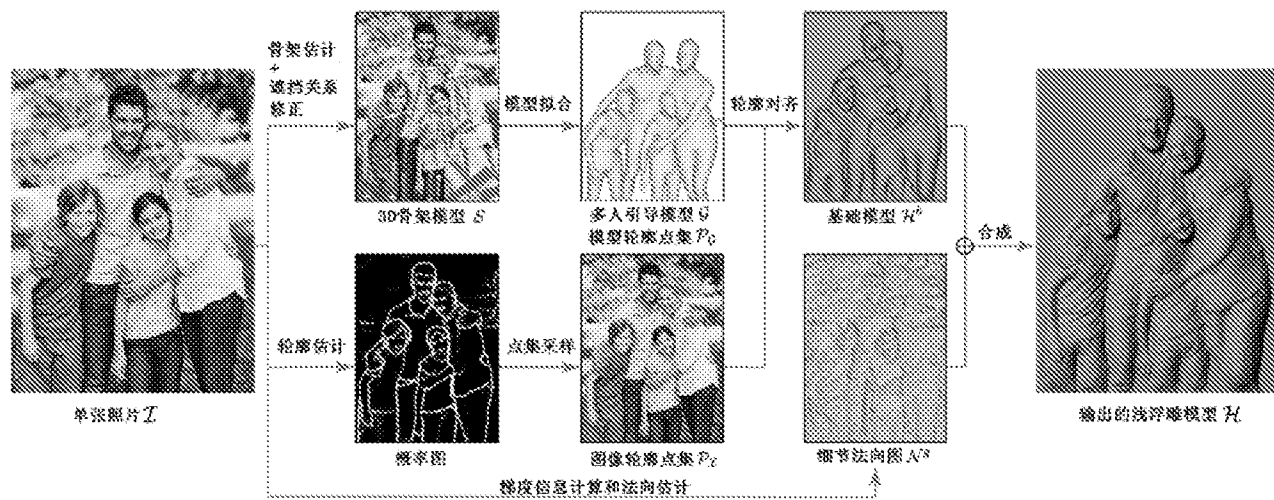


图 1

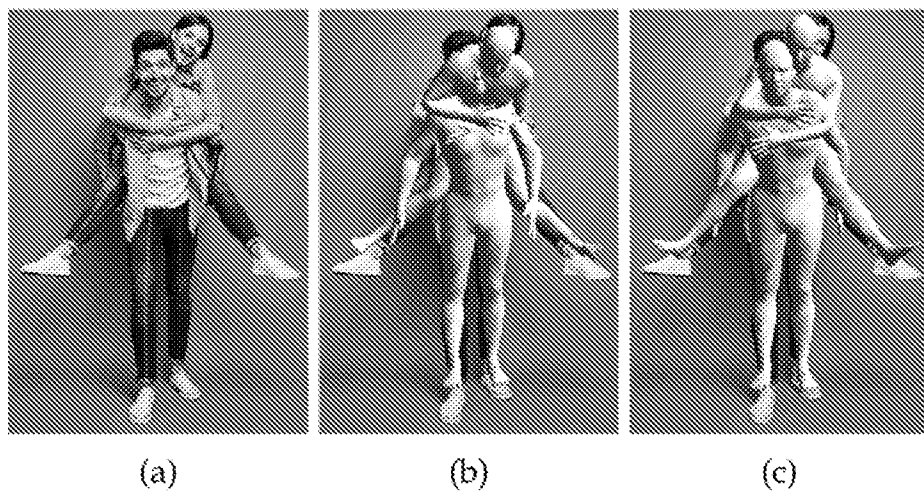


图 2

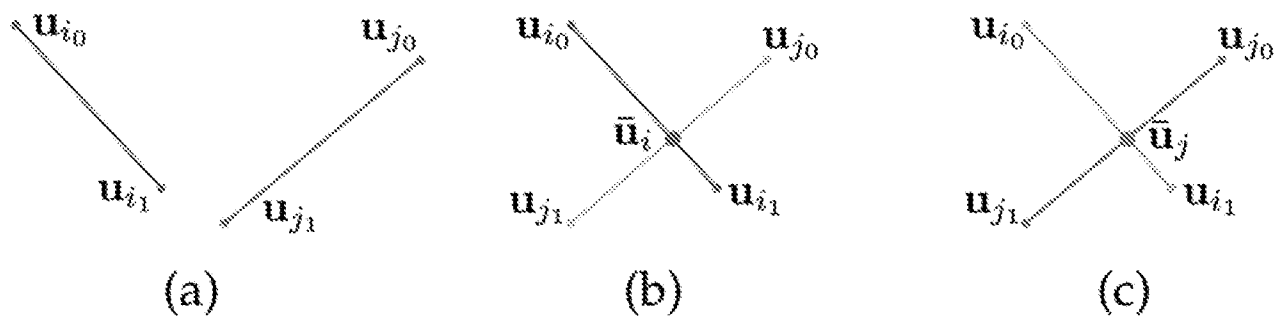


图 3

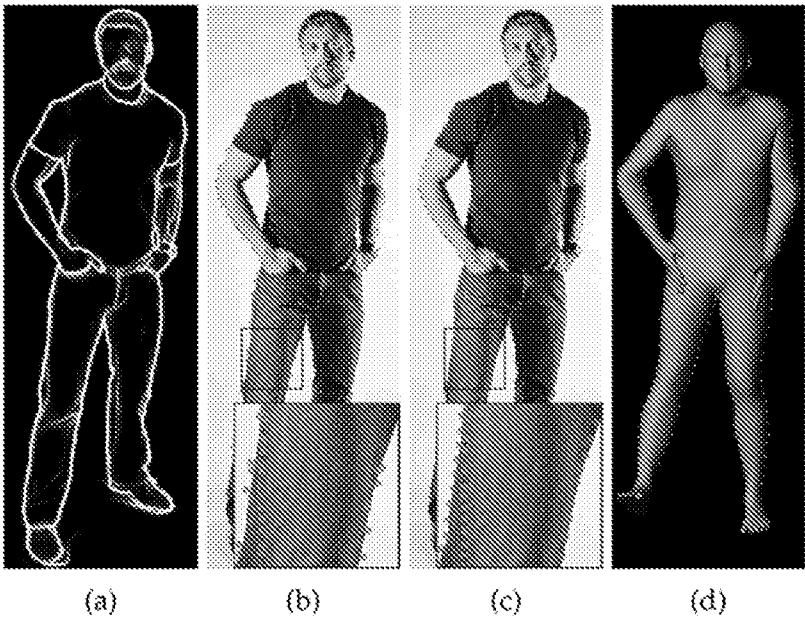


图 4

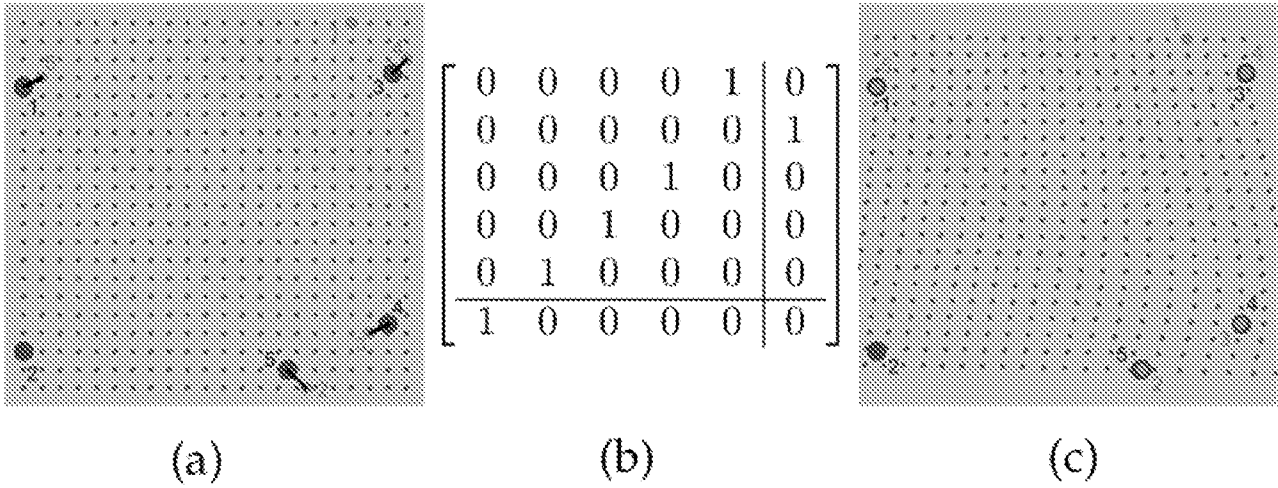


图 5

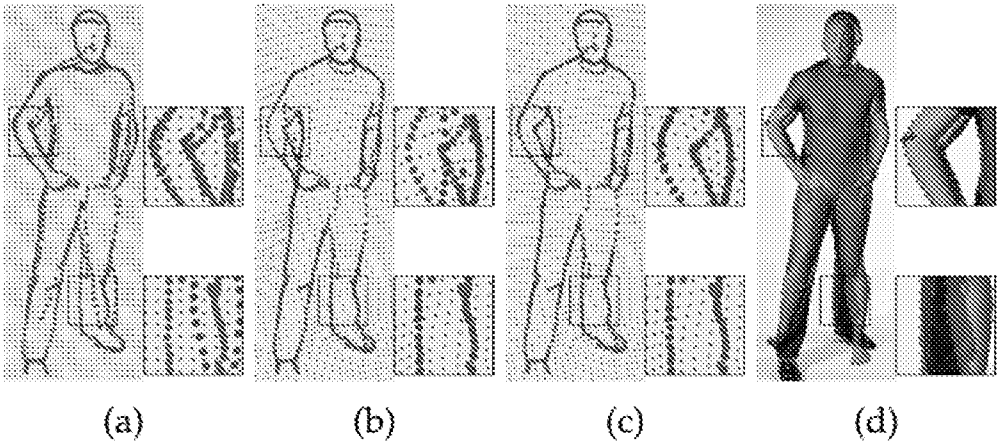


图 6

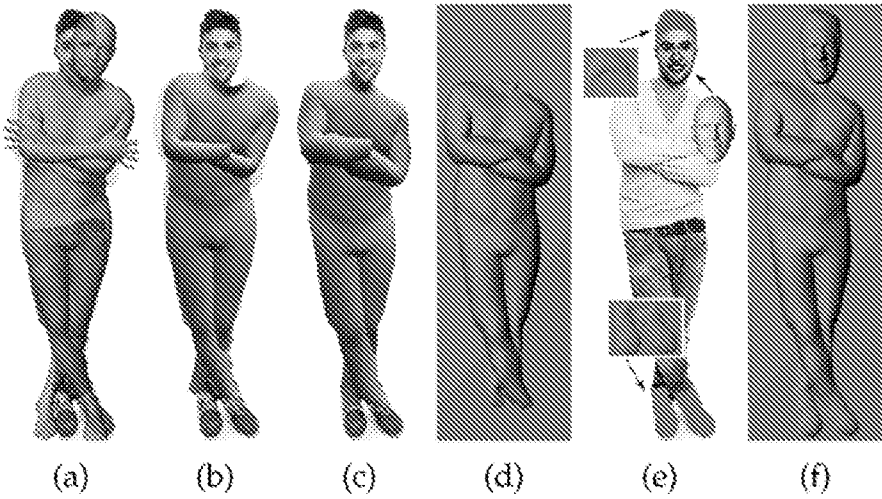


图 7

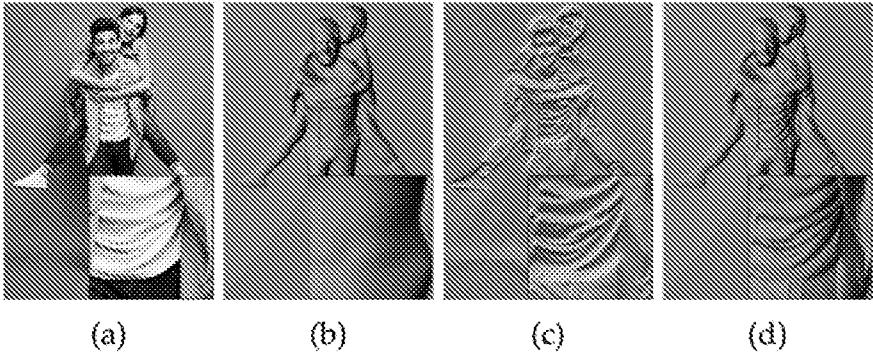


图 8

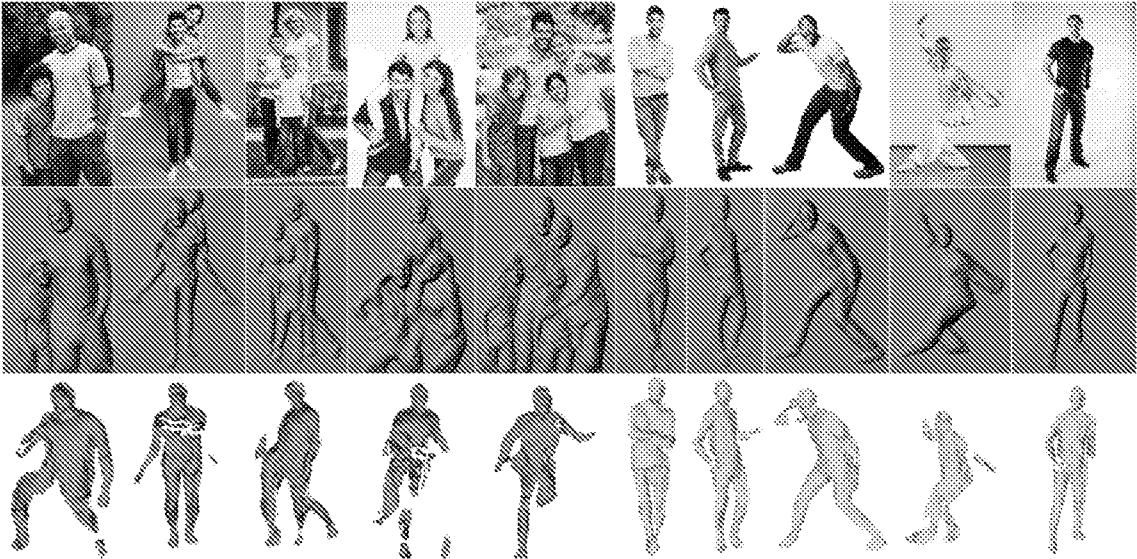


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/088913

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 17/20(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI; EPODOC; CNKI; CNPAT: 人物, 浮雕, 骨骼, 骨架, 模型, 轮廓, 高频, 3D, figure, human, model,

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 109523635 A (SHENZHEN SUANNI TECHNOLOGY INVESTMENT MANAGEMENT PARTNERSHIP ENTERPRISE (LIMITED PARTNERSHIP)) 26 March 2019 (2019-03-26) description, paragraphs [0004]-[0119]	1-8
A	CN 110751665 A (QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 04 February 2020 (2020-02-04) entire document	1-8
A	CN 110097626 A (ZHEJIANG SCI-TECH UNIVERSITY) 06 August 2019 (2019-08-06) entire document	1-8
A	GB 0228143 D0 (DELCAM PLC) 08 January 2003 (2003-01-08) entire document	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

07 January 2022

Date of mailing of the international search report

19 January 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/088913

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109523635	A	26 March 2019	None			
CN	110751665	A	04 February 2020	None			
CN	110097626	A	06 August 2019	None			
GB	0228143	D0	08 January 2003	GB	2387731	A	22 October 2003

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/088913

A. 主题的分类

G06T 17/20 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G06T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

WPI; EPDOC; CNKI; CNPAT: 人物, 浮雕, 骨骼, 骨架, 模型, 轮廓, 高频, 3D, figure, human, model,

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 109523635 A (深圳蒜泥科技投资管理合伙企业有限合伙) 2019年3月26日 (2019 - 03 - 26) 说明书第 [0004]-[0119]段	1-8
A	CN 110751665 A (齐鲁工业大学) 2020年2月4日 (2020 - 02 - 04) 全文	1-8
A	CN 110097626 A (浙江理工大学) 2019年8月6日 (2019 - 08 - 06) 全文	1-8
A	GB 0228143 D0 (DELCAM PLC) 2003年1月8日 (2003 - 01 - 08) 全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年1月7日

国际检索报告邮寄日期

2022年1月19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

丛磊

电话号码 (86-10)-53961305

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/088913

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109523635	A	2019年3月26日	无	
CN	110751665	A	2020年2月4日	无	
CN	110097626	A	2019年8月6日	无	
GB	0228143	D0	2003年1月8日	GB 2387731 A	2003年10月22日