

(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
2019 年 11 月 21 日 (21.11.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/219013 A1

(51) 国际专利分类号:
G06T 17/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/086890

(22) 国际申请日: 2019 年 5 月 14 日 (14.05.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201810460079.4 2018 年 5 月 15 日 (15.05.2018) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。清华大学深圳研究生院 (GRADUATE SCHOOL AT SHENZHEN, TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城清华园区, Guangdong 518055 (CN)。

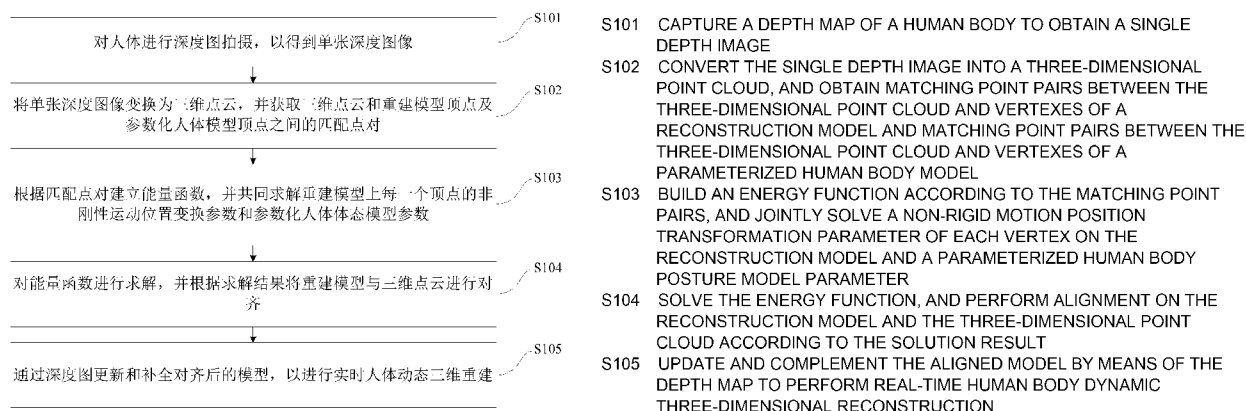
(72) 发明人: 刘焯斌 (LIU, Yebin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。戴琼海 (DAI, Qionghai); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。方璐 (FANG, Lu); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。徐枫 (XU, Feng); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (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, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION METHOD AND SYSTEM FOR JOINT OPTIMIZATION OF HUMAN BODY POSTURE MODEL AND APPEARANCE MODEL

(54) 发明名称: 联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统



(57) Abstract: A three-dimensional reconstruction method and system for the joint optimization of a human body posture model and an appearance model. The method comprises the following steps: capturing a depth map of a human body to obtain a single depth image (S101); converting the single depth image into a three-dimensional point cloud, and obtaining matching point pairs between the three-dimensional point cloud and vertexes of a reconstruction model and matching point pairs between the three-dimensional point cloud and vertexes of a parameterized human body model (S102); building an energy function according to the matching point pairs, and jointly solving a non-rigid motion position transformation parameter of each vertex on the reconstruction model and a parameterized human body posture model parameter (S103); solving the energy function, and performing alignment on the reconstruction model and the three-dimensional point cloud according to the solution result (S104); and updating and complementing the aligned model by means of the depth map to perform real-time human body dynamic three-dimensional reconstruction (S105). The method can effectively improve the timeliness, robustness and accuracy of reconstruction, features high expandability, and is simple and easy to implement.

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,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, 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:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统, 其中, 方法包括以下步骤: 对人体进行深度图拍摄, 以得到单张深度图像(S101); 将单张深度图像变换为三维点云, 并获取三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对(S102); 根据匹配点对建立能量函数, 并共同求解重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数(S103); 对能量函数进行求解, 并根据求解结果将重建模型与三维点云进行对齐(S104); 通过深度图更新和补全对齐后的模型, 以进行实时人体动态三维重建(S105)。该方法可以有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性, 扩展性强, 简单易实现。

联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统

相关申请的交叉引用

- 5 本申请要求清华大学于 2018 年 05 月 15 日提交的、发明名称为“联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统”的、中国专利申请号“201810460079.4”的优先权。

技术领域

- 10 本发明涉及计算机视觉和计算机图形学技术领域，特别涉及一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统。

背景技术

- 15 人体动态三维重建是计算机图形学和计算机视觉领域的重点问题。高质量的人体对象动态三维模型，如人体，动物，人脸，人手部等，在影视娱乐、体育游戏、虚拟现实等领域有着广泛的应用前景和重要的应用价值。但是高质量三维模型的获取通常依靠价格昂贵的激光扫描仪或者多相机阵列系统来实现，虽然精度较高，但是也显著存在着一些缺点：第一，扫描过程中要求对象保持绝对静止，微小的移动就会导致扫描结果存在明显的误差；第二，造假昂贵，很难普及到普通民众日常生活中，往往应用于大公司或国家统计局部门。第三，速度慢，往往重建一个三维模型需要至少 10 分钟到数小时的时间，重建动态模型序列的代价更大。
- 20

- 相关技术中，动态人体重建方法集中于三个方面的研究，一是重建对象的动态外观表面，但由于外观表面丰富多样，一般需要采集复杂的设备输入，如通过多摄像机阵列进行采集重建。二是对人体体型和姿态的重建，一般经过体型和姿态进行参数化，重建的变量大大减少，现有技术在单个深度相机下可实时重建，但该类方法无法获得对象表面外观三维模型。三是逐帧动态融合表面的重建方法虽然可实现无模板的动态三维重建，但仅仅使用非刚性表面形变方法，跟踪重建的鲁棒性低。
- 25

发明内容

- 本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。
- 30 为此，本发明的一个目的在于提出一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，该方法有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性，扩展性强，简单易实现。

 本发明的另一个目的在于提出一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统。

为达到上述目的，本发明一方面实施例提出了一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，包括以下步骤：对人体进行深度图拍摄，以得到单张深度图像；将所述单张深度图像变换为三维点云，并获取所述三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对；根据所述匹配点对建立能量函数，并共同求解所述重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数；对所述能量函数进行求解，并根据求解结果将所述重建模型与所述三维点云进行对齐；通过深度图更新和补全对齐后的模型，以进行实时人体动态三维重建。

本发明实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，通过实时非刚性对齐的方法，逐帧地融合动态对象表面三维信息，为了实现鲁棒地跟踪，实现在无首帧关键帧三维模板条件下的鲁棒性实时人体对象的动态三维重建，从而有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性，扩展性强，简单易实现。

另外，根据本发明上述实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法还可以具有以下附加的技术特征：

进一步地，在本发明的一个实施例中，所述能量函数为：

$$E_{mot} = \lambda_{data}E_{data} + \lambda_{bind}E_{bind} + \lambda_{reg}E_{reg} + \lambda_{prior}E_{prior},$$

其中， E_{mot} 为运动求解总能量项， E_{data} 为数据项，里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项， E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项， E_{reg} 为局部刚性运动约束项，作用于非刚性运动数据项， E_{pri} 为人体体态运动的正则项，用于约束解算出来的人体姿态的合理性， λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

进一步地，在本发明的一个实施例中，其中，

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

$$E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$$

其中， $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向， u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标， P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合， $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向， τ_1 、 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式，所述局部刚性运动约束项中， i 表示模型上

第 i 个顶点, $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合, T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用, $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果, 所述人体体态和非刚性运动一致性约束项中, $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标, 所述人体姿态运动正则项中, w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

进一步地, 在本发明的一个实施例中, 深度图投影公式为:

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中, u, v 为像素坐标, $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值, 所述 $\mathcal{K}$ 为深度相机内参矩阵。

进一步地, 在本发明的一个实施例中, 根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型顶点, 其中, 计算公式为:

$$\hat{v}_i = T_{v_i}v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = \text{rot}(T_{v_i})n_{v_i},$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} \alpha_{i,j} T_{b_j} v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in \mathcal{B}} \alpha_{i,j} \text{rot}(T_{b_j}) n_{v_i}$$

其中, T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵, 包括旋转和平移两部分; $\text{rot}(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分; $\mathcal{B}$ 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合; $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重, 表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱; T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵, $\text{rot}(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

为达到上述目的, 本发明另一方面实施例提出了一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统, 包括: 深度相机, 用于对人体进行深度图拍摄, 以得到单张深度图像; 匹配模块, 用于将所述单张深度图像变换为三维点云, 并获取所述三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对; 运动解算模块, 用于根据所述匹配点对建立能量函数, 并共同求解所述重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数; 求解模块, 用于对所述能量函数进行求解, 并根据求解结果将所述重建模型与所述三维点云进行对齐; 模型更新模块, 用于通过深度图更新和补全对齐后的模型, 以进行实时人体动态三维重建。

本发明实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统, 通过实时非刚性对齐的方法, 逐帧地融合动态对象表面三维信息, 为了实现鲁棒地跟踪, 实现在无首帧关键帧三维模板条件下的鲁棒性实时人体对象的动态三维重建, 从而有效提高重建的实时性、鲁

棒性和准确性，扩展性强，简单易实现。

另外，根据本发明上述实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统还可以具有以下附加的技术特征：

进一步地，在本发明的一个实施例中，所述能量函数为：

$$E_{mot} = \lambda_{data}E_{data} + \lambda_{bind}E_{bind} + \lambda_{reg}E_{reg} + \lambda_{prior}E_{prior},$$

其中， E_{mot} 为运动求解总能量项， E_{data} 为数据项，里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项， E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项， E_{reg} 为局部刚性运动约束项，作用于非刚性运动数据项， E_{pri} 为人体体态运动的正则项，用于约束解算出来的人体姿态的合理性， λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

进一步地，在本发明的一个实施例中，其中，

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

$$E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$$

其中， $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向， u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标， P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合， $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向， τ_1 、 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式，所述局部刚性运动约束项中， i 表示模型上第 i 个顶点， $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合， T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用， $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果，所述人体体态和非刚性运动一致性约束项中， $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标，所述人体姿态运动正则项中， w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

进一步地，在本发明的一个实施例中，深度图投影公式为：

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中， u, v 为像素坐标， $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值，所述 $\mathcal{K}$ 为深度

相机内参矩阵。

进一步地，在本发明的一个实施例中，根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型顶点，其中，计算公式为：

$$\begin{aligned} \hat{v}_i &= T_{v_i} v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = \text{rot}(T_{v_i}) n_{v_i}, \\ \tilde{v}_i &= \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} T_{b_j} v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} \text{rot}(T_{b_j}) n_{v_i} \end{aligned}$$

其中， T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵，包括旋转和平移两部分； $\text{rot}(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分； B 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合； $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重，表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱； T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵， $\text{rot}(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

附图说明

本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解，其中：

图 1 为根据本发明一个实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法的流程图；

图 2 为根据本发明一个实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统的结构示意图。

具体实施方式

下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

下面参照附图描述根据本发明实施例提出的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法及系统，首先将参照附图描述根据本发明实施例提出的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法。

图 1 是本发明一个实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法的流程图。

如图 1 所示，该联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法包括以下步骤：

在步骤 S101 中，对人体进行深度图拍摄，以得到单张深度图像。

例如，本发明实施例可以采用单个深度相机对目标人物进行拍摄以得到视频帧率的动态深度图像序列。也就是说，使用深度相机对动态人体进行拍摄，获得连续的单张深度图像序列。

在步骤 S102 中，将单张深度图像变换为三维点云，并获取三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对。

可以理解的是，获取深度相机内参矩阵，根据内参矩阵将深度图投影到三维空间中生成一组三维点云。

进一步地，在本发明的一个实施例中，深度图投影公式为：

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中， u, v 为像素坐标， $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值， $\mathcal{K}$ 为深度相机内参矩阵。

具体而言，获取深度相机的内参矩阵，根据内参矩阵将深度图投影到三维空间中变换为一组三维点云。其中，变换的公式为： $u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v))$ ，其中， u, v 为像素坐标， $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值， $\mathcal{K}$ 为深度相机内参矩阵。在获取匹配点方面，使用相机投影公式将三维模型的顶点投影到深度图像上以获得匹配点对。

在步骤 S103 中，根据匹配点对建立能量函数，并共同求解重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数。

可以理解的是，根据匹配点对构造并解算能量函数获得非刚性运动和人体参数化体态信息。

进一步地，在本发明的一个实施例中，能量函数为：

$$E_{mot} = \lambda_{data} E_{data} + \lambda_{bind} E_{bind} + \lambda_{reg} E_{reg} + \lambda_{prior} E_{prior},$$

其中， E_{mot} 为运动求解总能量项， E_{data} 为数据项，里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项， E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项， E_{reg} 为局部刚性运动约束项，作用于非刚性运动数据项， E_{pri} 为人体体态运动的正则项，用于约束解算出来的人体姿态的合理性， λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

进一步地，在本发明的一个实施例中，其中，

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

$$E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$$

其中, $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向, u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标, P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合, $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向, τ_1 、

- 5 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式, 局部刚性运动约束项中, i 表示模型上第 i 个顶点, $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合, T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用, $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果, 人体体态和非刚性运动一致性约束项中, $\hat{x}_i$ 和 $\hat{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标, 人体姿态运动正则项中, w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

- 具体而言, $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向, u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标, P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合。数据项 E_{data} 保证经过非刚性运动驱动后的重建模型和参数化人体体态模型与从深度图获得的三维点云尽可能的对齐; $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动
- 15 后的模型顶点坐标及其法向。 τ_1 、 τ_2 和 τ_3 三个示性函数决定了对应点选择的模式, 当对应点来自重建模型时 $\tau_1 = 1$, 当对应点来自参数化人体模型时 $\tau_2 = 1$, 当对应点来自重建模型且其受参数化模型驱动时 $\tau_3 = 1$ 。

- 其中, 数据项 E_{data} 保证经过非刚性运动驱动后的重建模型和经过人体姿态驱动的人体体态模型与从深度图获得的三维点云尽可能的对齐; 局部刚性运动约束项 E_{reg} 可以在使模型整体受局部刚性约束运动的同时保证较大幅度的合理的非刚性运动也能被很好的解算出来, 从而使模型更精确的与三维点云对齐; 人体体态模型和非刚性运动一致性约束项 E_{bind} 用于保证解算出来的人体体态模型和非刚性运动尽可能的一致, 从而可以保证最终解算出来的非刚性运动即符合人体骨架动力学模型, 又充分的与从深度图中获得的三维点云对齐; 人体姿态运动正则项 E_{prior} 使用高斯混合模型来约束人体姿态的正确性, 不正常的解算姿态
- 25 会导致该项能量较大, 直至姿态解算正确。

进一步地, (1) 在局部刚性运动约束项 E_{reg} 中, i 表示模型上第 i 个顶点, $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合, T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和

x_j 的驱动作用, $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果, 即要保证模型上邻近顶点的非刚性驱动效果要尽可能的一致。 $\rho(|W_i - W_j|^2)$ 是一个鲁棒惩罚函数, W_i 和 W_j 分别代表人体参数化人体体态模型对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用, 当模型表面两个相邻顶点受参数化人体体态模型驱动效果相差较大时, 该鲁棒惩罚函数值较小, 当两个相邻顶点受参数化体模型驱动效果相差较小时, 该鲁棒惩罚函数值较大, 通过该鲁棒惩罚函数, 可以在使模型整体受局部刚性约束运动的同时保证较大幅度的合理的非刚性运动也能被很好的解算出来, 从而使模型更精确的与三维点云对齐;

(2) 在人体体态和非刚性运动一致性约束项 E_{bind} 中, $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标, 其中, $\tilde{x}_i = T(x_i)x_i$, 该约束项用于保证解算出来的参数化人体体态模型和表面非刚性运动尽可能的一致, 从而可以保证最终解算出来的非刚性运动既符合人体骨架动力学模型, 又充分的与从深度图中获得的三维点云对齐。

(3) 体姿态运动正则项 E_{prior} 使用高斯混合模型来约束人体体态的正确性, 不正常的解算姿态会导致该项能量较大, 直至姿态解算正确。其中, w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

在步骤 S104 中, 对能量函数进行求解, 并根据求解结果将重建模型与三维点云进行对齐。

进一步地, 在本发明的一个实施例中, 根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型顶点, 其中, 计算公式为:

$$\hat{v}_i = T_{v_i}v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = rot(T_{v_i})n_{v_i},$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} T_{b_j} v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} rot(T_{b_j}) n_{v_i}$$

其中, T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵, 包括旋转和平移两部分; $rot(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分; B 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合; $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重, 表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱; T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵, $rot(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

具体而言, 共同求解重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和人体体态参数。最终求解获得的信息为每一个三维模型顶点的变换矩阵和人体体态参数, 即每个骨骼的单独的变换矩阵。为了实现快速线性求解的要求, 本发明实施例的方法对利用指数映射方法对变形方程做如下近似:

$$\hat{v}_i = T_{v_i} v_i = (I + \hat{\xi}) T P_{v_i} v_i$$

其中, $T P_{v_i}$ 为截至上一帧的模型顶点 v_i 的累积变换矩阵, 为已知量; I 为四维单位阵;

$$\text{其中, } \hat{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y & v_1 \\ w_z & 0 & -w_x & v_2 \\ -w_y & w_x & 0 & v_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 令 } T P_{v_i} v_i = p, \text{ 即上一帧变换后的模型顶点,}$$

则经过变换有:

$$(I + \hat{\xi})p = \begin{bmatrix} 1 & -w_z & w_y & v_1 \\ w_z & 1 & -w_x & v_2 \\ -w_y & w_x & 1 & v_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & p_z & -p_y \\ 0 & 1 & 0 & -p_z & 0 & p_x \\ 0 & 0 & 1 & p_y & -p_x & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix},$$

5 对于每个顶点, 要求解的未知参数即为六维变换参数 $x = (v_1, v_2, v_3, w_x, w_y, w_z)^T$ 。

骨骼运动的线性化方式与非刚性运动相同。

在步骤 S105 中, 通过深度图更新和补全对齐后的模型, 以进行实时人体动态三维重建。

可以理解的是, 使用深度图来更新和补全对齐后的模型并且进一步优化参数化人体模板的人体体形参数。

具体而言, 使用深度图像对对齐后的三维模型进行更新和补全, 将新获得的深度信息融合到三维模型中, 更新三维模型表面顶点位置或为三维模型增加新的顶点, 使其更符合当前深度图像的表达。由于更新后的模型融合了新的信息, 使用新的模型对参数化人体体形进行更加精确的求解。

15 综上, 本发明实施例使用一个深度相机即可同时重建动态人体外观表面模型 (比如人体服饰, 衣帽, 背包等) 以及动态人体内部体态模型, 为实时重建方法, 并且仅需提供单个深度相机输入, 系统具有设备简单, 方便部署和可扩展等有点, 所需的输入信息非常容易采集, 并且可以实时的获得动态三维模型。该方法求解准确鲁棒, 简单易行, 运行速度为实时, 拥有广阔的应用前景, 可以在 PC 机或工作站等硬件系统上快速实现。

20 根据本发明实施例提出的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法, 通过实时非刚性对齐的方法, 逐帧地融合动态对象表面三维信息, 为了实现鲁棒地跟踪, 实现在无首帧关键帧三维模板条件下的鲁棒性实时人体对象的动态三维重建, 从而有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性, 扩展性强, 简单易实现。

其次参照附图描述根据本发明实施例提出的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统。

图 2 是本发明一个实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统的结构示意图。

如图 2 所示,该联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统 10 包括:深度相机 100、匹配模块 200、运动解算模块 300、求解模块 400 和模型更新模块 500。

其中,深度相机 100 用于对人体进行深度图拍摄,以得到单张深度图像。匹配模块 200 用于将单张深度图像变换为三维点云,并获取三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对。运动解算模块 300 用于根据匹配点对建立能量函数,并共同求解重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数。求解模块 400 用于对能量函数进行求解,并根据求解结果将重建模型与三维点云进行对齐。模型更新模块 500 用于通过深度图更新和补全对齐后的模型,以进行实时人体动态三维重建。本发明实施例的系统 10 可以有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性,扩展性强,简单易实现。

进一步地,在本发明的一个实施例中,能量函数为:

$$E_{mot} = \lambda_{data}E_{data} + \lambda_{bind}E_{bind} + \lambda_{reg}E_{reg} + \lambda_{prior}E_{prior},$$

其中, E_{mot} 为运动求解总能量项, E_{data} 为数据项, 里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项, E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项, E_{reg} 为局部刚性运动约束项, 作用于非刚性运动数据项, E_{pri} 为人体体态运动的正则项, 用于约束解算出来的人体姿态的合理性, λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

进一步地,在本发明的一个实施例中, 其中,

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

$$E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$$

其中, $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向, u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标, P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合, $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向, τ_1 、 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式, 局部刚性运动约束项中, i 表示模型上第 i 个顶点, $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合, T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运

动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用, $T_{x_i x_j}$ 和 $T_{x_j x_i}$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果, 人体体态和非刚性运动一致性约束项中, $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标, 人体姿态运动正则项中, w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

5 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 深度图投影公式为:

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中, u, v 为像素坐标, $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值, $\mathcal{K}$ 为深度相机内参矩阵。

进一步地, 在本发明的一个实施例中, 根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型
10 顶点, 其中, 计算公式为:

$$\hat{v}_i = T_{v_i} v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = \text{rot}(T_{v_i}) n_{v_i},$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} T_{b_j} v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} \text{rot}(T_{b_j}) n_{v_i}$$

其中, T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵, 包括旋转和平移两部分; $\text{rot}(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分; B 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合; $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重, 表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱; T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵,
15 $\text{rot}(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

需要说明的是, 前述对联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法实施例的解释说明也适用于该实施例的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统, 此处不再赘述。

20 根据本发明实施例提出的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统, 通过实时非刚性对齐的方法, 逐帧地融合动态对象表面三维信息, 为了实现鲁棒地跟踪, 实现在无首帧关键帧三维模板条件下的鲁棒性实时人体对象的动态三维重建, 从而有效提高重建的实时性、鲁棒性和准确性, 扩展性强, 简单易实现。

在本发明的描述中, 需要理解的是, 术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系, 仅是为了便于描述本发明和简化描述, 而不是指示或暗示所指的系统或
25 元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作, 因此不能理解为对本发明的限制。

此外, 术语“第一”、“第二”仅用于描述目的, 而不能理解为指示或暗示相对重要性或者

隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中，“多个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

5 在本发明中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系，除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

10 在本发明中，除非另有明确的规定和限定，第一特征在第二特征“上”或“下”可以是第一和第二特征直接接触，或第一和第二特征通过中间媒介间接接触。而且，第一特征在第二特征“之上”、“上方”和“上面”可是第一特征在第二特征正上方或斜上方，或仅仅表示第一特征水平高度高于第二特征。第一特征在第二特征“之下”、“下方”和“下面”可以是第一特征在第二特征正下方或斜下方，或仅仅表示第一特征水平高度小于第二特征。

15 在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

20

尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本发明的限制，本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

25

权利要求书

1、一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，其特征在于，包括以下步骤：
对人体进行深度图拍摄，以得到单张深度图像；

5 将所述单张深度图像变换为三维点云，并获取所述三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对；

根据所述匹配点对建立能量函数，并共同求解所述重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数；

对所述能量函数进行求解，并根据求解结果将所述重建模型与所述三维点云进行对齐；

10 以及

通过深度图更新和补全对齐后的模型，以进行实时人体动态三维重建。

2、根据权利要求 1 所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，其特征在于，所述能量函数为：

$$E_{mot} = \lambda_{data}E_{data} + \lambda_{bind}E_{bind} + \lambda_{reg}E_{reg} + \lambda_{prior}E_{prior},$$

15 其中， E_{mot} 为运动求解总能量项， E_{data} 为数据项，里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项， E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项， E_{reg} 为局部刚性运动约束项，作用于非刚性运动数据项， E_{pri} 为人体体态运动的正则项，用于约束解算出来的人体姿态的合理性， λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

20 3、根据权利要求 2 所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法，其特征在于，其中，

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

25 $E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$

其中， $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向， u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标， P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合， $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向， τ_1 、 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式，所述局部刚性运动约束项中， i 表示模型上

第 i 个顶点, $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合, T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用, $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果, 所述人体体态和非刚性运动一致性约束项中, $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标, 所述人体姿态运动正则项中, w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

4、根据权利要求1所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法, 其特征在于, 深度图投影公式为:

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中, u, v 为像素坐标, $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值, 所述 $\mathcal{K}$ 为深度相机内参矩阵。

5、根据权利要求1-4任一项所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建方法, 其特征在于, 根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型顶点, 其中, 计算公式为:

$$\hat{v}_i = T_{v_i}v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = \text{rot}(T_{v_i})n_{v_i},$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} T_{b_j}v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} \text{rot}(T_{b_j})n_{v_i}$$

其中, T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵, 包括旋转和平移两部分; $\text{rot}(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分; B 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合; $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重, 表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱; T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵, $\text{rot}(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

6、一种联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统, 其特征在于, 包括:

深度相机, 用于对人体进行深度图拍摄, 以得到单张深度图像;

匹配模块, 用于将所述单张深度图像变换为三维点云, 并获取所述三维点云和重建模型顶点及参数化人体模型顶点之间的匹配点对;

运动解算模块, 用于根据所述匹配点对建立能量函数, 并共同求解所述重建模型上每一个顶点的非刚性运动位置变换参数和参数化人体体态模型参数;

求解模块, 用于对所述能量函数进行求解, 并根据求解结果将所述重建模型与所述三维点云进行对齐; 以及

模型更新模块, 用于通过深度图更新和补全对齐后的模型, 以进行实时人体动态三维重建。

7、根据权利要求 6 所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统，其特征在于，所述能量函数为：

$$E_{mot} = \lambda_{data}E_{data} + \lambda_{bind}E_{bind} + \lambda_{reg}E_{reg} + \lambda_{prior}E_{prior},$$

其中， E_{mot} 为运动求解总能量项， E_{data} 为数据项，里面包含了非刚性运动跟踪的数据项和参数化人体体态模型的数据项， E_{bind} 为参数化人体体态和非刚性运动一致性约束项， E_{reg} 为局部刚性运动约束项，作用于非刚性运动数据项， E_{pri} 为人体体态运动的正则项，用于约束解算出来的人体姿态的合理性， λ_{data} 、 λ_{reg} 、 λ_{bind} 和 λ_{pri} 分别为对应各个约束项的权重系数。

8、根据权利要求 7 所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统，其特征在于，其中，

$$E_{data} = \sum_{(v_c, u) \in P} \tau_1(v_c) * \psi(|\tilde{n}_{v_c}^T(\tilde{v}_c - u)|^2) + (\tau_2(v_c) + \tau_3(v_c)) * \psi(|\hat{n}_{v_c}^T(\hat{v}_c - u)|^2),$$

$$E_{bind} = \sum_{(v_c, u) \in P} |T(x_i)x_i - \hat{x}_i|^2,$$

$$E_{reg} = \sum_i \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \rho(|W_i - W_j|^2) |T_{x_i}x_j - T_{x_j}x_j|^2,$$

$$E_{prior} = -\log(\sum_j w_j N(\theta; \mu_j, \delta_j)),$$

其中， $\tilde{v}_c$ 和 $\tilde{n}_{v_c}$ 分别表示经过非刚性运动驱动后的模型顶点坐标及其法向， u 表示同一匹配点对中三维点云的位置坐标， P 表示从重建模型和参数化人体体态模型上到三维点云观测的对应点集合， $\hat{v}_c$ 和 $\hat{n}_{v_c}$ 分别表示经过人体体态参数驱动后的模型顶点坐标及其法向， τ_1 、 τ_2 和 τ_3 均为示性函数以决定对应点选择的模式，所述局部刚性运动约束项中， i 表示模型上第 i 个顶点， $\mathcal{N}(i)$ 表示模型上第 i 个顶点周围的邻近顶点的集合， T_{x_i} 和 T_{x_j} 分别代表已知非刚性运动对模型表面顶点 x_i 和 x_j 的驱动作用， $T_{x_i}x_j$ 和 $T_{x_j}x_j$ 代表作用在 x_i 和 x_j 上的非刚性运动同时作用在 x_j 上的位置变换效果，所述人体体态和非刚性运动一致性约束项中， $\hat{x}_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 分别代表受非刚性运动驱动后的模型顶点坐标，所述人体姿态运动正则项中， w_j 、 μ_j 和 δ_j 分别表示高斯混合权重以及高斯模型的均值和方差。

9、根据权利要求 6 所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统，其特征在于，深度图投影公式为：

$$u_i = \mathcal{K}^{-1}(u, v, d(u, v)),$$

其中， u, v 为像素坐标， $d(u, v)$ 为深度图像上像素 (u, v) 位置处的深度值，所述 $\mathcal{K}$ 为深度

相机内参矩阵。

10、根据权利要求 6-9 任一项所述的联合优化人体体态与外观模型的三维重建系统，其特征在于，根据非刚性运动和人体体态模型参数驱动模型顶点，其中，计算公式为：

$$\hat{v}_i = T_{v_i} v_i, \quad \hat{n}_{v_i} = \text{rot}(T_{v_i}) n_{v_i},$$

5

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} T_{b_j} v_i, \quad \tilde{n}_{v_i} = \sum_{j \in B} \alpha_{i,j} \text{rot}(T_{b_j}) n_{v_i}$$

其中， T_{v_i} 为作用于顶点 v_i 的变形矩阵，包括旋转和平移两部分； $\text{rot}(T_{v_i})$ 为该变形矩阵的旋转部分； B 为对顶点 v_i 有驱动作用的骨骼的集合； $\alpha_{i,j}$ 为第 j 个骨骼对第 i 个模型顶点的驱动作用的权重，表示该骨骼对该顶点驱动作用的强弱； T_{b_j} 为第 j 个骨骼自身的运动变形矩阵， $\text{rot}(T_{b_j})$ 为该变形矩阵的旋转部分。

10

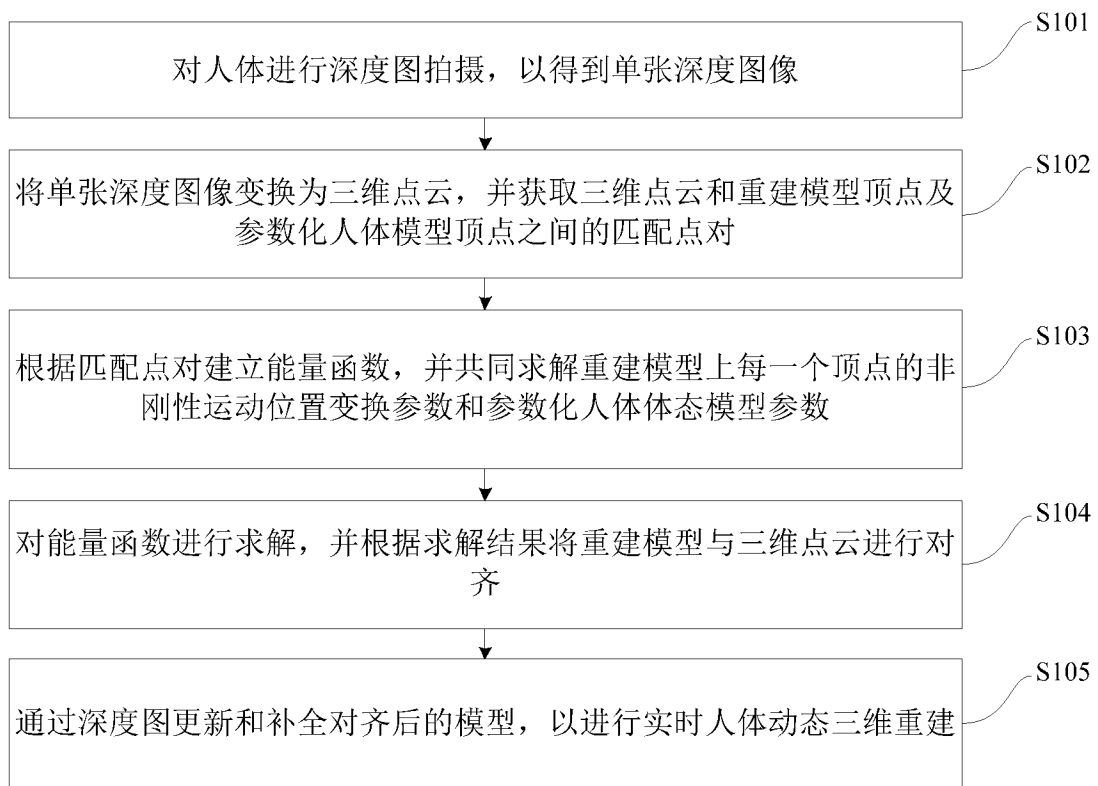


图 1

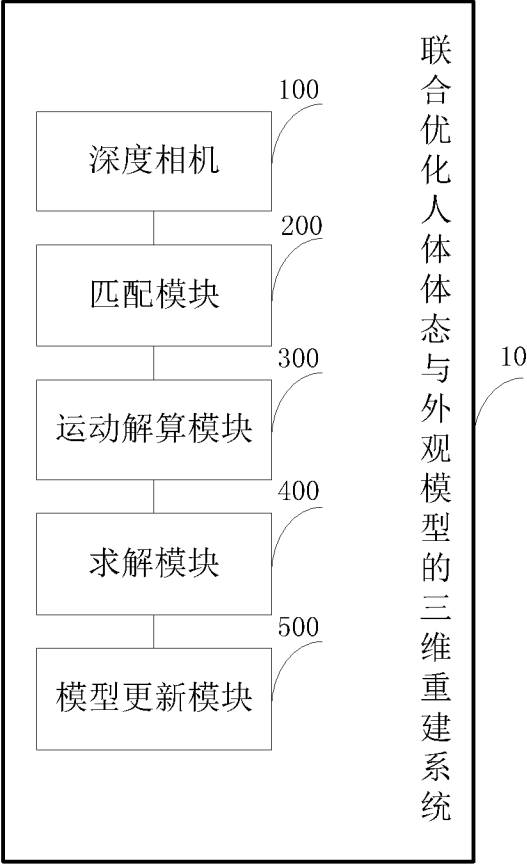


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/086890

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 17/00(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, CNPAT, CNKI, IEEE: 三维重建, 三维重构, 深度相机, 深度图, 变换, 三维空间, 三维点云, 匹配, 配准, 人体, 能量函数, three-dimensional reconstruction, 3D, depth camera, depth image, convert, three-dimensional point cloud, match, human, body, energy

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 108665537 A (TSINGHUA UNIVERSITY ET AL.) 16 October 2018 (2018-10-16) claims 1-10	1-10
X	CN 103198523 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 10 July 2013 (2013-07-10) claims 1-8, description, paragraphs [0025]-[0058], and figures 1-2	1, 6
A	CN 102842148 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 26 December 2012 (2012-12-26) entire document	1-10
A	CN 107833270 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 23 March 2018 (2018-03-23) entire document	1-10
A	US 2017330375 A1 (HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.) 16 November 2017 (2017-11-16) entire document	1-10



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

16 July 2019

Date of mailing of the international search report

29 July 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
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/CN2019/086890

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108665537	A	16 October 2018	None			
CN	103198523	A	10 July 2013	US	2014320491	A1	30 October 2014
CN	102842148	A	26 December 2012	None			
CN	107833270	A	23 March 2018	None			
US	2017330375	A1	16 November 2017	WO	2016123913	A1	11 August 2016
				EP	3249613	A1	29 November 2017
				CN	105989625	A	05 October 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/086890

A. 主题的分类

G06T 17/00(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, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 三维重建, 三维重构, 深度相机, 深度图, 变换, 三维空间, 三维点云, 匹配, 配准, 人体, 能量函数, three-dimensional reconstruction, 3D, depth camera, depth image, convert, three-dimensional point cloud, match, human, body, energy

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
PX	CN 108665537 A (清华大学 等) 2018年 10月 16日 (2018 - 10 - 16) 权利要求1-10	1-10
X	CN 103198523 A (清华大学) 2013年 7月 10日 (2013 - 07 - 10) 权利要求1-8, 说明书第[0025]-[0058]段, 图1-2	1、6
A	CN 102842148 A (清华大学) 2012年 12月 26日 (2012 - 12 - 26) 全文	1-10
A	CN 107833270 A (浙江大学) 2018年 3月 23日 (2018 - 03 - 23) 全文	1-10
A	US 2017330375 A1 (HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.) 2017年 11月 16日 (2017 - 11 - 16) 全文	1-10

☐ 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

2019年 7月 16日

国际检索报告邮寄日期

2019年 7月 29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

受权官员

王洋

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)53961523

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/086890

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	108665537	A	2018年 10月 16日	无			
CN	103198523	A	2013年 7月 10日	US	2014320491	A1	2014年 10月 30日
CN	102842148	A	2012年 12月 26日	无			
CN	107833270	A	2018年 3月 23日	无			
US	2017330375	A1	2017年 11月 16日	WO	2016123913	A1	2016年 8月 11日
				EP	3249613	A1	2017年 11月 29日
				CN	105989625	A	2016年 10月 5日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)