

人体几何建模方法综述

王 鑫 杨延红 陈胜勇

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310023)

摘 要 人体建模是计算机图形学与计算机视觉领域的重要研究课题,而人体几何建模则是人体建模的基础。人体几何建模技术发展至今,已经出现了大量的实现方法。回顾和总结了人体几何建模领域一些最新的研究成果,将其分为直接建模方法、2D 图片识别方法、模板匹配方法、统计综合建模 4 大类,并且对人体几何建模方法的未来发展趋势进行了展望。

关键词 人体几何建模,直接建模,2D 图片识别,模板匹配,统计综合建模

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Survey of Human Body Geometry Modeling Methods

WANG Xin YANG Yan-hong CHEN Sheng-yong

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

Abstract Human body modeling is an important research topic in computer graphics and computer vision area. The geometry modeling is the foundation of the human body modeling. Up to now, the body geometry modeling technology has a large number of implementation methods. This paper reviewed and summarized the latest research achievements of human body geometry modeling domain. And it can be divided into four categories; direct modeling method, 2D image recognition method, template matching method and statistics-based model synthesis method. The future development trend of the human body geometry modeling method was also discussed.

Keywords Human body geometry modeling, Direct modeling, 2D image recognition, Template matching, Statistics-based model synthesis

人体建模是计算机图形学、计算机视觉和虚拟现实等领域一个非常活跃的分支,该分支交叉了计算机图形学、计算机视觉、机器人学、人工智能、机器学习等学科。它研究的是通过利用各种计算机技术模拟真实的人体,在计算机中以三维立体的方式逼真地显示人体模型^[1]。其研究成果广泛应用于多媒体技术、人体仿真、视频游戏、虚拟试衣等多个领域。

人体的几何建模是人体建模的核心问题,它研究的是如何逼真地显示人体表面各方面的详细特征信息与外观数据,

以对重现的三维模型进行渲染与编辑^[2]。随着技术发展和需求提升,人们对人体几何模型的逼真性要求越来越高。同时,人体几何模型的构建也不仅仅只是局限于对特定姿势的重建。

1 人体几何建模方法

本文对近年来国际上人体几何建模研究方法作了全面的分类与总结,介绍了不同实现方法的基本原理与研究现状,并进行了分析与对比比较,如表 1 所列。

表 1 人体几何建模方法优缺点的比较

方法	优缺点	优点	缺点
直接建模方法	3D 扫描法	精确度比较高	针对于特定的姿势、耗时长
模板匹配方法	骨骼建模法	建立模型非常逼真	对操作人员要求比较高、耗时长
2D 图片识别方法		成本低、操作简单	建立的 3D 人体模型不精确
模板匹配方法	参数化建模法	操作简单、易于实现	受人体几何模型的约束、精确度比较低
配方法	模板拟合方法	方法简单易行	精确度不高,无法表达各部位之间的变换关系
统计综合建模方法		能产生系统中不存在的人体模型、建模效果较好	维护数据库的成本较大,具有一定的局限性

本文受国家自然科学基金:不确定情况下多角色交互性运动合成技术研究(61303142),国家自然科学基金:超精度视频内容三维重建(61173096),国家自然科学基金:反映个体特征的柔性四维连续活动模型(61103140),浙江省自然科学基金:面向多角色动画的语义化运动合成技术研究(Y1110882),浙江省自然科学基金:鲁棒高阶能量全局优化理论与实景弱纹理立体视差计算(Y1110688),浙江省自然科学基金:机器人自主视觉行为规划和复杂环境三维建模(R1110679),教育部高等学校博士学科点专项科研基金:基于环境客观适应性和主体能动性相结合的机器人视觉行为研究(20113317110001)资助。

王 鑫(1984—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为计算机视觉、计算机图形学,E-mail: xinw@zjut.edu.cn;杨延红(1990—),女,硕士生,主要研究领域为计算机视觉;陈胜勇(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机视觉、图像分析与处理、机器人智能技术。

2 直接建模方法

直接建模(Direct Modeling)方法是用最直接的方式对现有的人体进行重建,它的最大优点是不参考任何人体尺寸参数对所建立的三维模型进行编辑与修改^[3]。现在国际上比较流行的三维建模软件如 3DMax、Maya、Poser 等都可以对人体进行构建,但是利用这些三维建模软件构造人体模型不仅需要专业的三维建模经验,而且会耗费大量时间。这种方法构建出的人体模型一般用于游戏中,且建模过程较为繁琐、局限性比较大。本文不对使用现有软件构建三维人体模型的方法展开讨论,而是将直接建模方法进行分类,将其分为 3D 扫描法和基于骨骼的人体建模方法。

2.1 3D 扫描法

三维人体扫描是测试人员站在 3D 人体扫描仪前在一定时间内保持特定的姿势,通过对人体进行扫描并且使用三维建模软件对扫描的数据进行处理转换为空间点,以点数据显示虚拟的模型,具有扫描迅速、重现外观数据准确等优点^[4]。

在 20 个世纪 90 年代中后期,三维人体扫描设备在欧美市场上出现,它们多数是采用结构光扫描或激光扫描等技术^[5]。通过对特定姿势的人体进行扫描获得多个视角的数据;再使用扫描前标记在身体部位的标记点注册点云数据^[6],以此得到比较完整的人体点云数据;最后从点云数据中提取人体网格模型^[7]。

随着 3D 图形捕获技术和 3D 人体扫描技术的发展,人体三维测量技术也已步入商业领域^[8]。比如,Bodymetrics^[9]和 Styku^[10]是使用深度相机建立人体模型的商业系统。毫无疑问,3D 人体扫描法是各种人体外形数据获取方法中最精确的方法之一。但传统的三维人体扫描通常需要接受过专业训练的人员进行操作,速度较慢,成本相对较高,扫描设备体积较大,通常是针对人体的某一个特定的姿势获得人体外观数据,因此很难直接满足人们在不同应用环境下的需求,这使得后续人体建模工作研究的重点转向一些三维人体模型的渲染与编辑。

2009 年以来,深度摄像机(如 Kinect)的出现加速了三维重建技术的研究。与传统的扫描设备相比,它不仅能捕获动态数据,同时也能输出所捕获图像的深度值^[11]。Kinect 设备的出现在计算机图形学和计算机视觉研究领域有着非凡的意义,这意味着一种廉价且快速获取三维点云的方法被人们发现,但是 Kinect 扫描获得的三维数据也有一些缺点,如所获得的数据不完整、充满噪声、没有拼接在一起、精度低、单面积扫描范围小等。为此,很多研究者对 Kinect 在不同使用环境下获取比较满意的数据做了相对应的研究^[12]。

3D 人体扫描法研究的工作主要集中在点云配准和模板拟合点云问题。图 1 示出了三维扫描重建算法流程。

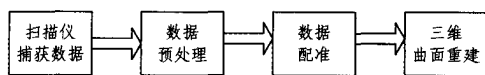


图 1 三维扫描重建流程

三维模型配准算法——迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法自提出以来,就成为了比较典型的配准算法。该算法第一要满足的条件是要有两个初始模型,然后选择这两个模型上满足一定条件的对应点,利用这些对应点来迭代完成模型之间的变换,如此迭代下去。图 2 是 ICP 算法示意图。

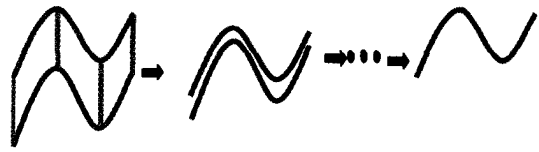


图 2 ICP 算法示意图

Izadi 等人^[13]使用单个移动的 Kinect 设备来获取扫描物体的点云数据,并用迭代最近点算法解决了点云配准问题和模板拟合点云问题。周瑾等人^[14]则利用 4 个固定的 Kinect 来获取点云数据,并用迭代最近点算法解决了点云配准问题和模板拟合问题。Li 等人^[15]则要求用户在单个 Kinect 前旋转,随后采用非刚体配准和泊松融合方法来处理获取的点云数据并实现渲染。

Li 等人^[16]首先利用三维扫描仪扫描得到一个比较精确的静态的参考模板网格,然后利用嵌入变形方法将模板与各帧数据进行拟合。Pekelny 等人^[17]首先通过人工分割获得第一帧数据,然后通过跟踪识别每帧数据中各部分模块,累积捕获的人体几何信息。通过同时优化实现数据的配准与骨架模型。Chang 等人^[18]则提出了一种关节物体全局配准算法。Zeng 等人^[19]假设人体在轻微的运动时是准刚性(quasi-rigid)的条件下,提出使用部分模型方法(model-to-part method)注册变形图形以对齐新的对象,最后使用泊松重建^[7]的方法进行人体表面重建。这种方法虽然效率较高,却限定人体姿势与样例,人体尺寸不能超出预先规定的外观数据范围。Wang 等人^[20]从深度视频序列图像中结合运动学约束,使用圆柱分段表示人体模型,开发了一个易于操作的三维人体重建系统,但是该方法不能很好地显示人体细节部分。

2.2 基于骨骼的人体建模法

骨骼建模也称为分层建模,原始的分层建模仅仅只包含皮肤和骨骼。1989 年,Chadwick 等人^[21]首次加上了肌肉层。分层建模除了要求对人体的表层建模外,也包含了如肌肉、骨骼、皮下组织等,之后再通过代数信息及物理原理将皮肤覆盖在它们的表层。

刘洋^[22]将人体分为树形结构关系,用获得的骨架信息将模板人体分段刚性地变形到目标位置。Stoll 等人^[23]结合基于物理的布料模型,从多视点视频数据中重建人体的表面几何模型。该方法重建的人体角色不仅包括基于骨骼表示的实际的身体部位,还包括了基于实物的服装仿真模型。

此类方法的缺点在于其要求建模人员对人体结构和计算机图形学有一定的了解,所以本方法建出的人体模型非常逼真,但是它得不到推广使用。

3 2D 图片识别法

2D 图片识别方法是指从图像中,通过自动或人工交互的方式恢复出三维实体的几何模型或场景等技术^[24]。

Lin 等人^[25]利用人体不同视角的二维图像上的轮廓信息计算出人体的三围尺寸,以此选取模板模型,通过变形重建三维人体。Kraevoy 等人^[26]使用隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)对轮廓上的点和 3D 模板上的点进行匹配,在图片中推测深度信息和遮挡信息以得到准确的人体模型。Chen 等人^[27]通过直接从现有基于高斯过程隐变量模

型(Gaussian Process Latent Variable Model, GPLVM)的框架下,学习从单一视图的二维轮廓进行3D人体模型重建。Zhou等人^[28]提出了使用图片修饰技术,用单幅图像结合人体语义参数,通过3D人体模板变形实现对二维图像编辑,来达到重塑变形人体的目的。Hasler等人^[29]提出使用双线性模型分别表示人体形状和姿势,且形状和姿势的变形单独通过仿射变换进行转化。Straka等人^[30]在非线性约束条件下,根据图像轮廓使用 Gauss Seidel type solver 迭代解决人体表面模型。Jang等人^[31]在基于图像建模方法的基础上,提出了使用单台 Kinect 设备在解决自遮挡的前提下,用一幅深度图像结合几幅彩色图像建立人体模型,但该方法不能建立完整的人体模型,且建模的精度有限。

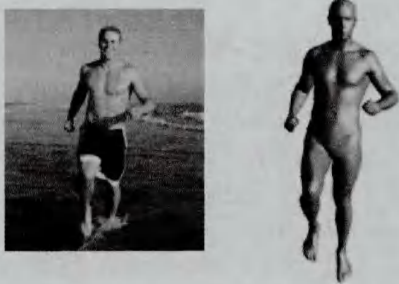


图3 用单幅图像对人体形状和姿势进行评估^[32]

Jain等人^[33]在Anguelov^[34]提出的三维人体SCAPE(Shape Completion and Animation of People, SCAPE)模型的基础上,通过姿态和形状拟合单视图和多视图视频镜头模型。一旦模型进行了拟合,语义上有意义的身体形状属性,如身高、体重或腰围,就可以由用户以交互方式来修改虚拟人几何形态,进而对演员的所有视频帧进行图像变形,最终实现了对任意视频序列中的演员进行实时重塑。Balan等人^[35]提出了利用多视角图像,结合SCAPE人体模型库通过函数优化完成人体建模的方法;Guan等人^[32]通过在数据库中寻找与照片中提取的人物的骨架、几何轮廓信息相匹配的对象,实现了从单张照片重建三维人体模型。Zuffi等人^[36]定义了可变形结构(Deformable Structures, DS)模型来延伸图形结构(Pictorial Structures, PS)以及捕获非刚性形变部分,然后结合SCAPE模型和人体部分轮廓表示人体模型。

基于2D图片识别的三维建模技术因成本低、获取方便、操作简单等优势,得到研究者的高度重视。但2D图像只含有人体的轮廓信息,不具有人体的深度信息,因此不能得到精确的3D人体模型。视频图像建模的主要缺点是需要多视角数据,有些则对辅助设备的依赖性比较大,且在光照条件差时其建模质量不能得到保障。

4 模板匹配法

模板匹配法是首先在系统中建立一个基础的三维模型,然后其它模型以此为基础进行变换,以达到我们想要的效果。将基于模板对人体形态进行重建的方法分为参数化建模方法、模板拟合建模方法。

4.1 参数化建模

参数化人体建模是依据人体测量学的相关原理和方法确定人体外形参数,结合计算机图形学轴变形技术实现人体建

模。其通过修改相应的主要造型特征值来表达真实人体复杂的外部几何特征,从而使设计人员能够更高层、更抽象地进行人体模型设计^[37]。对参数化人体建模方法的研究主要集中在两个方面:1)尽可能减少人机交互;2)使建立的模型更加逼真。

Chu等人^[38]基于统计学概念的建模方法上扩展参数化建模方法。通过在数据库中寻找有关人体尺寸和人体形状模型实现人体建模。Baek等人^[39]通过基于特征点的形状分析技术捕获人体形状参数,然后通过修改对应参数得出需要的人体模型。随后Baek等人^[40]又在统计模型的基础上提取人体形态参数,通过获得的身体尺寸参数产生对应的三维人体模型。Freifeld等人^[41]通过学习SCAPE模型中的人体形状和姿势变化参数,建立了2D人体轮廓模型。Zhou等人^[28]则使用单幅图像结合人体语义参数实现对二维图像进行编辑,来重塑人体。图4是参数化修改人体模型示意图^[28]。

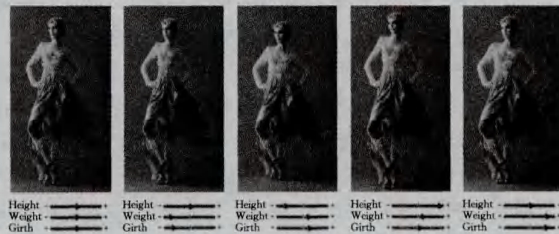


图4 参数化修改人体模型

参数化人体建模方法能减少数据处理量,提高建模的效率和质量^[47],辅助模型修改,满足人们对个性化人体模型的需求等。由于人体几何模型的约束,该方法只能通过修改模型的参数来反映模型的变化,因此对于没有参数定义的部分则显得束手无策。

4.2 模板拟合方法

模板拟合建模是事先在系统中建立一个基础模型(或称标准模型),随后对获得的其它人体模型以此为基础进行变换。

Mao等人^[42]提出了建立一个新的虚拟人体手绘(Virtual Human Sketcher, VHS)接口,对不同的人体模型通过模板变形来拟合二维手绘轮廓。Liao等人^[43]在假设人体运动是局部连续条件下,利用特征点的对应关系,用体积法结合部分表面信息重建运动的3D人体模型,但是无法处理图像缺失部分。Li等人^[16]使用模板作为几何和拓扑重建的近似,实现目标的动态匹配。Jun等人^[44]通过建立函数来描述人体的肥胖程度,分别结合纤瘦和肥胖人体模板以及不同的人体扫描数据库(夏天和冬天)来评估人体模型。Zollhofer等人^[45]首先通过扫描模板模型来避免场景假设,用非线性变形模型获取精确的人体细节。

这类方法由于操作简单,被现在的一些在线试衣系统广泛采用。但是此类方法的精确度不高,与参数化建模方法类似,大多数此类建模方法无法建立人体各部位间的变换关系。

5 统计综合建模

统计综合建模法即使用数据库实现对人体建模的建模方法,它是通过对扫描的模型生成同类的拓扑网格结构,最后通过这些网格结构变形来生成所需模型的网格结构。其主要应

用主成分分析法(Principal Component analysis, PCA)代替之前提到的三维扫描技术和模型获取技术。图 5 示出了基于统计模型建模的过程。

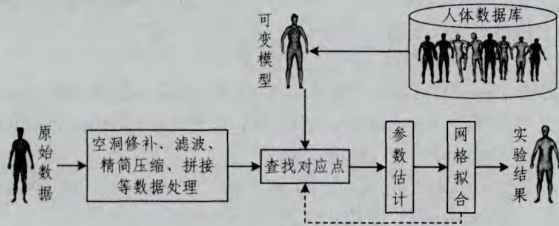


图 5 基于统计模型建模的过程

2003 年,Allen 等人^[46]提出了建立拓扑一致的三维人体数据库方法。该算法是通过在 250 个不同测试者的三维扫描数据上手工标记三维特征点,然后使用基于能量优化的方法将模板网格向所有扫描模型对齐。进一步利用典型的 PCA 降低维度的方法,建立起人体参数化模型。然而,这种方法只适用于特定的人体姿势。2005 年 Anguelov 等人^[34]结合人体形参数化的思想,进一步提出了 SCAPE 三维人体数据库模型。该方法由于考虑了人体的不同姿势和体型参数的影响,在近几年的研究以及应用非常广泛。但是,该方法不能干预人体各部分肌肉的形状和变形,使得人体建模的精确度达不到预期的效果。图 6 示出通过学习参数对人体进行建模的过程^[35]。

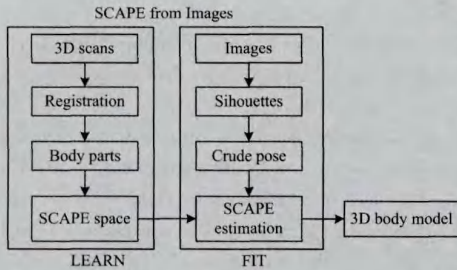


图 6 通过学习参数对人体进行建模的过程

Bălan 等人^[47]进一步通过着衣者的轮廓使用可视壳在多幅图像和视频下估计着衣下的人体模型。Hasler 等人^[48]提出网格局部平移和旋转不变的编码方法,同时考虑了人体的体型和姿势对人体几何模型的影响,构建了一个有 550 个模型的欧洲人体数据库。随后,Hasler^[49]则利用类似的思想,从着衣的人体扫描数据中恢复出近似的人体几何数据,其建模结果如图 7 所示^[49]。

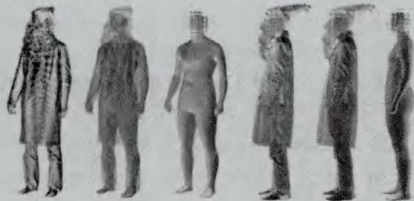


图 7 从宽松着衣评估人体形状

Richter 等人^[50]使用该模型,结合人体姿势追踪、形状分割、图像变形技术建立了实时人体形状变形系统。Neophytou 等人^[51]使用人体体型和姿势统计数据集,结合人体体型和姿势变形技术(Shape and Pose Space Deformation, SPSD),即形状和姿势空间的组合权重模拟人体姿势和体型的变化。Wu-

hrer 等人^[52]使用非线性优化技术从统计数据模型中推断出人体形状,来拟合给出的测量数据。Chen 等人^[53]通过参数化模板拟合的方法使用单个深度相机实时重建人体动画。Tong 等人^[54]则是使用 3 台 Kinect 及一个旋转平台从 3 个方位获取扫描数据,然后利用全局约束结合 SCAPE 模型实现人体建模,该方法的缺点是只实现了静态的人体建模。

Weiss 等人^[55]使用单台 Kinect 获取扫描人体的 4 个不同视角下的扫描数据,结合 SCAPE 模型,通过拟合扫描数据的轮廓信息和深度数据估计人体的体型和姿势。Zheng 等人^[56]则利用这些数据库来获取视频中每一帧的 3D 人体模型。图 8 为其利用人体数据库的人体建模结果^[56]。Kwok 等人^[57]则利用体积拟合的方法来恢复近似的人体模型。



图 8 人体着衣运动原始数据与重建结果

另外,Chen 等人^[58]提出了 TenBo(TENsor-based human Body model)模型,与 SCAPE 模型不同的是,该模型通过联合人体的形状和姿势变化空间对人体进行建模。与 SCAPE 模型相比,TenBo 模型的建模结果更为精细。图 9 为两模型建模的对比结果。

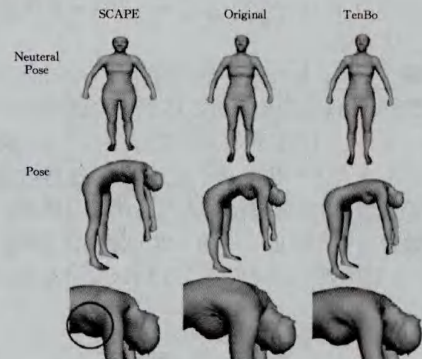


图 9 SCAPE 模型与 TenBo 模型结果的对比

Loper 等人^[59]则通过解决人体稀疏的标记(Marker-based motion capture, Mocap)的位置,使用参数化人体模型评估人体姿势和体型,并通过测试不同人体标记集对人体姿势和体型精确度的对比,来获得新的标记集表示人体软组织变形。图 10 为使用不同标记数量的建模结果及误差分析^[59]。



图10 参考模型和标记数量误差

总之,在基于统计模型的工作中,将已确定的标准模型进行刚体配准、网格变形、模型拟合等处理,得到最终人们需要的人体体型数据。但是,由于受人体模型数据库的影响,人体建模的自由度受到了限制,人体的建模效果受数据库的基数影响,数据库越庞大,建模效果越精确。相对来讲,这种方法的交互方式比较简单,其缺点就是要对所建立的数据库进行维护,消耗成本较大,因此也具有一定的局限性。

6 未来展望

从本文讨论可以看出,随着计算机技术的发展,人体几何建模方法取得了很大进展。然而,该技术仍具有宽广的发展前景,其最根本的原因是在人体的建模过程中很多问题难以得到根本解决。

计算机图形学和计算机视觉中一些经典的算法无法从根本上得到解决,扫描数据丢失深度以及数据库需要维护等基本性问题;由于人体自身形状复杂及运动多样化的影响,现有方法的鲁棒性得不到保障;现有算法要得到比较精细的结果,大都通过添加约束来进行一定优化,因此,时间、空间复杂度过高的问题也得不到根本解决;虽然现有的算法大都依赖于一些理想的假设情况,但是还没有一种建模方法能精确地重现三维人体模型,更不用说把预想的人体模型效果逼真地表达出来。

可以预计,人体几何建模领域下一步的研究工作重点仍将是解决上述问题。

结束语 三维人体几何建模的研究是一个非常复杂的问题,其发展至今不仅仅是计算机图形学学科研究的问题,也融入了机器人学、人工智能、计算机视觉以及机器学习等学科的研究成果。由于人体形状本身千差万别,且这些数据又存在着较强的相似性,因此许多研究者也会对现有的方法进行不同程度的改善。本文对近几年的三维人体几何建模方法进行了综述,并以其所使用的建模方法作为区分标准对这些方法加以讨论。

参考文献

[1] 董淑英,周玉生.复杂系统仿真与人体仿真探讨[J].计算机仿真,2010(5):1-4
 [2] 陈逸帆,孙守迁,王鑫.人体几何形态的参数化建模技术研究[C]//人体断面数据获取与图像处理研讨会论文集.2005
 [3] 宋智广.基于自定义专家系统的直接建模技术研究[J].新技术新工艺,2011(9):94-96
 [4] 徐继红,张文斌.非接触式三维人体扫描技术的综述[J].扬州职业大学学报,2006,10(3):49-53

[5] Kakadiaris I A, Metaxas D. Three-dimensional human body model acquisition from multiple views [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(3): 191-218
 [6] Wuhrer S, Xi P, Shu C. Human shape correspondence with automatically predicted landmarks [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(4): 821-830
 [7] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction [C]//Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006: 7
 [8] Yamauchi K, Sato Y. 3D human body measurement by multiple range images [C]//Pattern Recognition, 2006: 833-836
 [9] Bodymetrics[OL]. <http://www.bodymetrics.com/>
 [10] Styku[OL]. <http://www.styku.com/business/benefits/>
 [11] Microsoft kinect[OL]. <http://www.xbox.com/kinect>, 2010
 [12] Maimone A, Fuchs H. Reducing interference between multiple structured light depth sensors using motion [C]//Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW), 2012: 51-54
 [13] Izadi S, Kim D, Hilliges O, et al. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera [C]//Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2011: 559-568
 [14] 周瑾,潘建江,童晶,等.使用 Kinect 快速重建三维人体[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(6):873-879
 [15] Li H, Vouga E, Gudym A, et al. 3D self-portraits [J]. ACM Trans Graph, 2013, 32(6): 187
 [16] Li H, Adams B, Guibas L J, et al. Robust single-view geometry and motion reconstruction [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(5): 175
 [17] Pekelny Y, Gotsman C. Articulated object reconstruction and markerless motion capture from depth video [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(2): 399-408
 [18] Chang W, Zwicker M. Global registration of dynamic range scans for articulated model reconstruction [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(3): 26
 [19] Zeng M, Zheng J, Cheng X, et al. Templateless quasi-rigid shape modeling with implicit loop-closure [C]//Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013: 145-152
 [20] Wang R, Choi J, Medioni G. Accurate full body scanning from a single fixed 3d camera [C]//3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012: 432-439
 [21] Chadwick J E, Haumann D R, Parent R E. Layered construction for deformable animated characters [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1989, 23(3): 243-252
 [22] 刘洋.基于 RGB-D 序列的人体动态建模方法[J].计算机与现代化, 2014(6): 61-65
 [23] Stoll C, Gall J, De Aguiar E, et al. Video-based reconstruction of animatable human characters [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(6): 139
 [24] 束搏,邱显杰,王兆其.基于图像的几何建模技术综述[J].计算机研究与发展, 2015, 47(3): 549-560
 [25] Lin Y L, Wang M J J. Constructing 3D human model from front and side images [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5): 5012-5018
 [26] Kraevoy V, Sheffer A, van de Panne M. Modeling from contour drawings [C]//Proceedings of the 6th Eurographics Symposium on Sketch-Based interfaces and Modeling, 2009: 37-44
 [27] Chen Y, Cipolla R. Learning shape priors for single view reconstruction [C]//Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009: 1425-1432

(下转第 118 页)

- [21] Bresler M, Prua D, Hlavac V. Modeling flowchart structure recognition as a max-sum problem [C] // 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). IEEE, 2013; 1215-1219
- [22] Blagojevic R V. Using data mining for digital ink recognition [D]. ResearchSpace@ Auckland, 2011
- [23] 胡兴鸿, 施大鹏, 冯桂焕. 一种手写图文分离方法 [J]. 计算机与现代化, 2013(12): 145-148
- [24] Holmes G, Donkin A, Witten I H. Weka: A machine learning workbench [C] // Proceedings of the 1994 Second Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems, 1994. IEEE, 1994; 357-361
- [25] Carton C, Lemaitre A, Couasnon B. Fusion of statistical and structural information for flowchart recognition [C] // 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2013
-
- (上接第 108 页)
- [28] Zhou S, Fu H, Liu L, et al. Parametric reshaping of human bodies in images [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(4): 126
- [29] Hasler N, Ackermann H, Rosenhahn B, et al. Multilinear pose and body shape estimation of dressed subjects from image sets [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2010; 1823-1830
- [30] Straka M, Hauswiesner S, Ruther M, et al. Rapid skin: Estimating the 3d human pose and shape in real-time [C] // 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT). 2012; 41-48
- [31] Jang I Y, Cho J-H, Lee K H. 3D human modeling from a single depth image dealing with self-occlusion [J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 58(1): 267-288
- [32] Guan P, Weiss A, Balan A O, et al. Estimating human shape and pose from a single image [C] // Computer Vision. 2009; 1381-1388
- [33] Jain A, Thormählen T, Seidel H P, et al. Moviereshape: Tracking and reshaping of humans in videos [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(6): 148
- [34] Anguelov D, Srinivasan P, Koller D, et al. SCAPE: shape completion and animation of people [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3): 408-416
- [35] Balan A O, Sigal L, Black M J, et al. Detailed human shape and pose from images [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2007; 1-8
- [36] Zuffi S, Freifeld O, Black M J. From pictorial structures to deformable structures [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012; 3546-3553
- [37] Wang C C, Chang T K, Yuen M M. From laser-scanned data to feature human model: a system based on fuzzy logic concept [J]. Computer-Aided Design, 2003, 5(3): 241-253
- [38] Chu C H, Tsai Y T, Wang C C L, et al. Exemplar-based statistical model for semantic parametric design of human body [J]. Computers in Industry, 2010, 61(6): 541-549
- [39] Baek S Y, Lee K. Parametric human body modelling system for virtual garment fitting [J]. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 2013, 5(2/3): 242-261
- [40] Baek S Y, Lee K. Parametric human body shape modeling framework for human-centered product design [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(1): 56-67
- [41] Freifeld O, Weiss A, Zuffi S, et al. Contour people: A parameterized model of 2D articulated human shape [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2010; 639-646
- [42] Mao C, Qin S F, Wright D. A sketch-based approach to human body modelling [J]. Computers & Graphics, 2009, 33(4): 521-541
- [43] Liao M, Zhang Q, Wang H, et al. Modeling deformable objects from a single depth camera [C] // Computer Vision. 2009; 167-174
- [44] Jun L, Ming-min Z, Zhi-geng P, et al. Creating real body model of dressed human based on fat extent of body [C] // Multimedia Tools and Applications. 2014; 1-16
- [45] Zollhöfer M, Nießner M, Izadi S, et al. Real-time Non-rigid Reconstruction using an RGB-D Camera [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(4): 156
- [46] Allen B, Curless B, Popović Z. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2003, 22(3): 587-594
- [47] Balan A O, Black M J. The naked truth: Estimating body shape under clothing [M] // Computer Vision-ECCV 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008; 15-29
- [48] Hasler N, Stoll C, Sunkel M, et al. A statistical model of human pose and body shape [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 337-346
- [49] Hasler N, Stoll C, Rosenhahn B, et al. Estimating body shape of dressed humans [J]. Computers & Graphics, 2009, 33(3): 211-216
- [50] Richter M, Varanasi K, Hasler N, et al. Real-time reshaping of humans [C] // 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT). 2012; 340-347
- [51] Neophytou A, Hilton A. Shape and pose space deformation for subject specific animation [C] // 3D Vision-3DV 2013. 2013; 334-341
- [52] Wuhler S, Shu C. Estimating 3D human shapes from measurements [J]. Machine vision and applications, 2013, 24(6): 1133-1147
- [53] Chen Y, Cheng Z Q, Xu K, et al. Full-body geometry and motion capture from a single depth camera [C] // SIGGRAPH Asia 2013 Posters. 2013; 10
- [54] Tong J, Zhou J, Liu L, et al. Scanning 3d full human bodies using kinects [J]. Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(4): 643-650
- [55] Weiss A, Hirshberg D, Black M J. Home 3D body scans from noisy image and range data [C] // Computer Vision (ICCV). 2011; 1951-1958
- [56] Zheng J, Zeng M, Cheng X, et al. SCAPE-based human performance reconstruction [J]. Computers & Graphics, 2014, 38: 191-198
- [57] Kwok T-H, Yeung K-Y, Wang C C. Volumetric template fitting for human body reconstruction from incomplete data [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(4): 678-689
- [58] Chen Y, Liu Z, Zhang Z. Tensor-Based Human Body Modeling [C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2013; 105-112
- [59] Loper M, Mahmood N, Black M J. MoSh: motion and shape capture from sparse markers [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(6): 220