



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104813340 B

(45)授权公告日 2018.02.23

(21)申请号 201380057671.5

(22)申请日 2013.09.03

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104813340 A

(43)申请公布日 2015.07.29

(30)优先权数据

61/696,816 2012.09.05 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2015.05.04

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/IL2013/050743 2013.09.03

(87)PCT国际申请的公布数据

W02014/037939 EN 2014.03.13

(73)专利权人 体通有限公司

地址 以色列特拉维夫

(72)发明人 I·维尔夫

(74)专利代理机构 北京邦信阳专利商标代理有限公司 11012

代理人 梁栋

(51)Int.Cl.

G06K 9/00(2006.01)

(56)对比文件

GB 2351426 A, 2000.12.27,

US 2010/0111370 A1, 2010.05.06,

CN 101657825 A, 2010.02.24,

审查员 李欢

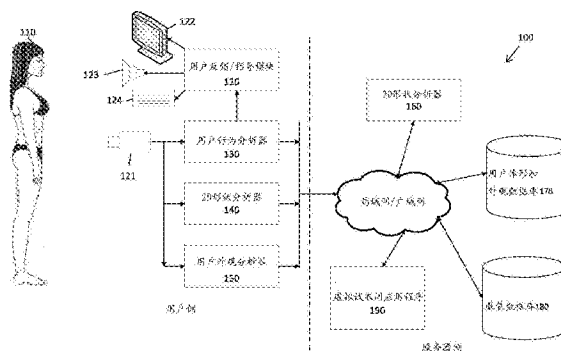
权利要求书1页 说明书13页 附图19页

(54)发明名称

从2D图像序列导出准确身体尺寸测量的系统和方法

(57)摘要

本发明涉及从二维(2D)图像序列导出用户的准确身体尺寸测量的方法,其包括以下步骤:
a)通过获取摄像机捕捉的所述用户的原始2D图像序列,扫描所述用户的身体;b)通过利用用户行为分析器(UBA),在扫描之前和扫描期间跟踪所述用户的位置、姿势/旋转和姿态,分析所述用户的行为;c)通过使用2D形状分析器(2DSA),从所述图像序列提取和编码2D形状数据描述符;d)接收所述2D形状数据描述符以及用户的位置、姿势和旋转数据,并且将它们集成到3D形状模型中,其中所述集成包括分配旋转值给所述图像序列,其中所述值是相对于完全正面位置的绝对值或者相对于所述序列中的参考图像的相对值。



1. 一种从2D图像序列导出用户的准确身体尺寸测量的方法,其包括以下步骤:

a. 通过利用用户反馈和指导模块在扫描过程之前和期间向所述用户提供指令,指导所述用户贯穿所述扫描过程在指定的区域中机动;

b. 通过在所述扫描过程期间获取摄像机捕捉的所述用户的原始2D图像序列,扫描所述用户的身体;

c. 在所述扫描过程之前和期间跟踪所述用户的位置、姿势/旋转和姿态,包括所述用户距离所述摄像机的距离,分析所述用户的行为,其中利用通过输入装置手工提供的用户高度和所述图像中主体的高度,所述用户距离所述摄像机的距离被从2D图像确定;

d. 从所述图像序列提取和编码2D形状数据描述符;和

e. 将所述2D形状数据描述符以及所述用户的位置、姿势和旋转数据集成到3D形状模型中,其中所述集成包括分配旋转值给所述图像序列,其中所述值是相对于整个前部位置的绝对值或者相对于所述序列中参考图像的相对值。

2. 根据权利要求1的方法,其中所述用户反馈和指导模块包括多个场景内容和一个或多个用户行为分析算法,用于检测场景和摄像机设置和用户行为中的常见问题和/或验证所述用户正在遵循所述用户反馈和指导模块提供的指令。

3. 根据权利要求1的方法,其中通过跟踪包括头顶部、足底部的至少一个身体关键点随后确定所述距离。

4. 根据权利要求1的方法,其中分配旋转值给所述图像序列包括以下至少之一:从正面位置跟踪所述用户的手、跟踪所述用户的剪影图像的演化宽度序列并且利用插值技术估计中间的旋转角度,或者跟踪身体剪影内部的可视特征和细节。

5. 一种从2D图像序列导出用户的准确身体尺寸测量的系统,其包括:

a. 用户反馈和指导模块,用于通过在扫描过程之前和期间向所述用户提供指令,指导所述用户贯穿所述扫描过程在指定的区域中机动;

b. 摄像机,用于通过在所述扫描过程期间捕获所述用户的原始2D图像序列来扫描所述用户的身体;

c. 用户行为分析器,通过在身体扫描之前和期间跟踪所述用户的位置、姿势/旋转和姿态,用户距离所述摄像机的距离,分析所述用户的行为,其中利用通过输入装置手工提供的用户高度和所述图像中主体的高度,所述用户距离所述摄像机的距离被从2D图像确定;

d. 2D形状分析器,用于从所述图像序列提取和编码2D形状数据描述符;和

e. 处理单元,其被编程用于将所述2D形状数据描述符以及所述用户的位置、姿势和旋转数据集成到3D形状模型中,其中所述集成包括分配旋转值给所述图像序列,其中所述值是相对于完全正面位置的绝对值或者相对于所述序列中的参考图像的相对值。

6. 根据权利要求5的系统,其中所述用户反馈和指导模块包括多个场景内容和一个或多个用户行为分析算法,用于检测场景和摄像机设置和用户行为中的常见问题和/或验证所述用户正在遵循所述用户反馈和指导模块提供的指令。

从2D图像序列导出准确身体尺寸测量的系统和方法

技术领域

[0001] 本发明涉及身体扫描和服装系统领域。更具体地,本发明涉及用于身体扫描以通过自动尺寸推荐和增强现实可视化改善服装购买体验的系统和方法。

背景技术

[0002] 全身扫描仪——激光扫描仪/深度摄像机阵列(比如微软公司的Kinect)可以被用于捕捉身体表面上的三维(3D)点,它们可以被用于将身体形状表示为点形式(例如点云)、表面形式(三角形网格)或者其他模型。可以分析这种模型来提取所需的测量值。例如,可以根据身体比例计算腰部位置并且在腰部高度的横截面能够用于提取点列表或者表示在该点的周界的轮廓。然后从所述3D点列表/轮廓计算周长。

[0003] 构造全身扫描仪的成本和复杂性对于在商店中大规模部署和/或消费者在家使用而言是不可行的。因此,若干现有技术描述了如何从单个二维(2D)图像(通常是正面图)和可选地几个其他额外的受控姿势视图(例如侧视图)提取具体的身体测量值。例如考虑腰围,显然一个或两个视图不能提供足够的信息而无需进一步假设或者近似——例如,在腰部区域的身体的椭圆截面来计算确切腰围。显然,这样的近似在涉及真实主体时不能提供确切的测量。

[0004] 此外,这些方法有赖于用户假想确切姿势的能力并且另外不能产生完全的3D模型。通过诸如受控转盘或者身体上标记的手段控制/测量用户的确切姿势增加了复杂水平,这阻止这些方法在家中或者在多个商店位置使用。

[0005] 本发明的目的是提供一种系统,该系统能够用单个静态二维摄像机捕捉运动中的人类主体的2D图像序列,从多个这样的2D图像提取2D形状或者尺寸相关的描述符并且将所述描述符集成到3D尺寸测量和/或3D形状要素中。

[0006] 随着继续描述,本发明的其他目标和优点将变得明显。

发明内容

[0007] 本发明涉及从二维(2D)图像序列导出用户的准确身体尺寸的方法,其包括以下步骤:a)通过获取摄像机捕捉的所述用户的原始2D图像序列,扫描所述用户的身体;b)通过在扫描之前和扫描期间跟踪所述用户的位置、姿势/旋转和姿态,分析所述用户的行为;c)通过使用2D形状分析器(2DSA),从所述图像序列提取和编码2D形状数据描述符;d)接收所述2D形状数据描述符以及用户的位置、姿势和旋转数据,并且将它们集成到3D形状模型中,其中所述集成包括分配旋转值给所述图像序列,其中所述值是相对于整个前部位置的绝对值或者相对于所述序列中的参考图像的相对值。

[0008] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括提供用户反馈和指导模块(UFGM),用于在扫描期间和用户交互,包括在扫描期间提供初始以及进一步的用户指导/帮助。

[0009] 根据本发明的实施例,用户行为分析器被进一步用于验证用户正在遵循用户反馈和指导模块提供的指令。

[0010] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过用户外观分析器(UAA)提取和编码用户的可视非形状描述符,其中所述非形状描述符表示和所述用户的外观相关的属性,并且可包括肤色、头发颜色和发型。

[0011] 根据本发明的实施例,所述UAA进一步包括提取和编码用户的面部外观描述符。

[0012] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括提取3D尺寸测量值,这些测量值和用户外观数据一起将被存储在用户体形和外观数据库中,因此当之前已扫描的用户经由虚拟试衣间应用程序的界面登录到系统中时,存储的用户身体尺寸特征能够被用于过滤/查找服装数据库和推荐将良好适合所述用户的服装和其特定尺寸。

[0013] 根据本发明的实施例,分析所述用户的行为是基于二进制身体剪影图像,该图像是从前景检测过程和图像序列获取,其中用户行为分析的一个关键属性是所述用户的参考地板位置。

[0014] 根据本发明的实施例,贯穿扫描过程,请求用户在指定的区域机动。例如,地板标记可以用于指导用户通过扫描过程。

[0015] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括估计用户的图像高度和用户的实际高度之间的距离作为单个尺寸值,该单个尺寸值可以通过输入装置手工提供给系统,或者距离/位置能够从图像序列被自动提取。

[0016] 根据本发明的实施例,通过UBA分析用户行为的过程包括以下步骤:a)通过搜索二进制身体剪影图像中的底行,用于检测所述用户的足部位置并且提取所述用户距检测的足部的距离,从而检测用户位置,其中所述用户位置由y底部坐标和x重心确定;b)利用足部尺寸的平均值和(可选的)身体旋转角度将足部距离的底部转换为身体中心距离,由此分配确切的距离值到旋转中心,以及c)一旦检测到底行,构造围绕所述用户的足部的计算窗口并且将x重心转换为地板上(on-floor)水平位置。

[0017] 根据本发明的实施例,y底部坐标和x重心都在时域上滤波,从而避免在足部区域处目标段的不稳定而影响位置准确性。

[0018] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过应用人体检测和跟踪技术,检测靠近水平重心(x)、在二进制形状的顶部的用户头部的头。

[0019] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过应用手检测算法,检测用户的手。根据本发明的实施例,手检测算法开始于从估计的肩部位置搜索手臂,然后向上移动来检测作为手臂形状的端点的手。

[0020] 根据本发明的实施例,通过处理二进制身体剪影图像使得它变薄为1像素宽的骨骼图像来获得手检测算法,在骨骼图像中,指尖在从中心身体位置跟踪的手臂骨骼的端部处被检测为1连接的像素。

[0021] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过跟踪检测的用户的手引导用户旋转一整圈,使得一旦在正面位置检测到两只手,就通过应用数字图像相关和跟踪(DIC/DDIT)方法来逐帧跟踪它们,DIC/DDIT方法采用跟踪和图像对准技术用于图像变化的准确2D和3D测量以及在手和头部剪影合并时的预测。

[0022] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过跟踪二进制图像的演化宽度序列并且利用插值技术估计中间的旋转角度,检测作为身体旋转的关键的用户身体剪影宽度演化。

[0023] 根据本发明的实施例,通过2DSA分析2D形状的过程包括以下步骤:a) 在多个旋转序列图像检测用户的特定身体部分的位置;和b) 在每个所述图像测量所述身体部分的边缘或者轮廓点。

[0024] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括从2D形状数据构造3D尺寸度量和形状数据。

[0025] 根据本发明的实施例,分析用户的行为进一步包括验证用户的图像不超过摄像机的视场。

[0026] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括UFGM 120,UFGM 120包括多个场景内容和用户行为分析算法,用于检测场景和摄像机设置和用户行为中的常见问题。

[0027] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括跟踪特殊服装图案和肌理中身体剪影内的可视内容。

[0028] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括通过利用建议引擎向用户提供服装建议。

[0029] 根据本发明的实施例,所述建议包括利用非形状用户特性(比如肤色、眼睛颜色、头发颜色)。

[0030] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括根据扫描的用户2D形状数据和/或计算的3D形状数据构建替身。

[0031] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括,该替身包括非形状用户特性(比如肤色、眼睛颜色、头发颜色)。

[0032] 根据本发明的实施例,所述替身被用于在扫描过程期间用户的可视化。

[0033] 根据本发明的实施例,所述替身被用于选择的服装在用户身上的可视化,其中所述可视化是静态或者通过利用预定义/随机产生的运动之一使替身行动而是动态的。

[0034] 根据本发明的实施例,所述替身可视化被修改,以改进在扫描期间的用户体验。

[0035] 根据本发明的实施例,所述替身可视化被修改,以改进在购买阶段期间的服装显示。

[0036] 根据本发明的实施例,所述方法进一步包括扫描用户和分析3D形状数据以产生某些健康相关的参数/度量,比如用于医疗应用的肥胖、脂肪分布。

[0037] 根据本发明的实施例,重复进行扫描并且比较用户3D形状数据和参考扫描或者一个或更多之前的扫描,使得所述比较过程产生某些形状参数的重大变化的指示。

[0038] 在另一方面,本发明涉及用于从2D图像序列导出用户的准确身体尺寸测量的系统,其包括:a) 摄像机,用于通过捕获所述用户的原始2D图像序列来扫描所述用户的身体;b) 用户行为分析器(UBA),通过在身体扫描之前和期间跟踪所述用户的位置、姿势/旋转和姿态,分析所述用户的行为;c) 2D形状分析器(2DSA),用于从所述图像序列提取和编码2D形状数据描述符;和d) 处理单元,其被编程用于接收所述2D形状数据描述符以及用户的位置、姿势和旋转数据,并且将它们集成到3D形状模型中,其中所述集成包括分配旋转值给所述图像序列,其中所述值是相对于完全正面位置的绝对值或者相对于所述序列中的参考图像的相对值。

[0039] 根据本发明的实施例,所述系统进一步包括用户反馈和指导模块,用于在扫描期间和用户交互,包括在扫描期间提供初始以及进一步的用户指导/帮助。

[0040] 根据本发明的实施例,所述系统进一步包括用户外观分析器(UAA),用于提取和编码用户的可视非形状描述符。

[0041] 根据本发明的实施例,所述系统进一步包括用户形状和外观数据库,用于存储用户身体的3D尺寸测量值和用户外观数据。

[0042] 根据本发明的实施例,所述系统进一步包括服装数据库,用于存储服装相关的数据。

[0043] 根据本发明的实施例,所述系统进一步包括服装建议引擎(GRE),用于向用户提供服装建议。

附图说明

[0044] 在附图中:

[0045] 图1示意性图解说明根据本发明的实施例的通过虚拟试衣间应用用于身体扫描和服装选择的系统;

[0046] 图2是流程图,其大体图解说明现有技术中已知的前景检测的方法;

[0047] 图3描述扫描过程要求的分析用户行为的方法;

[0048] 图4图解说明从足部图像位置检测提取用户距离;

[0049] 图5A和5B描述根据本发明的实施例,作为身体旋转检测线索的手检测和跟踪;

[0050] 图6A和6B示意性图解说明作为身体旋转关键的身体剪影宽度演化;

[0051] 图7描述根据本发明的实施例的2D形状分析器;

[0052] 图8A-8C示意性图解说明能够由图像分析方法执行的垂直腰部位置的若干线索。

[0053] 图9A-9D图解说明将剪影端点转换为划界角度扇区的原理;

[0054] 图10A和10B显示根据本发明的实施例,如何从图像序列获得准确的横截面形状;

[0055] 图11描述从2D形状数据构造3D尺寸度量和形状数据;

[0056] 图12描述服装行业通常要求的身体躯干尺寸测量;

[0057] 图13A-13C示意性图解说明根据本发明的实施例,从生成的3D数据构造3D模型表示;

[0058] 图14示意性图解说明根据本发明的实施例的服装建议引擎(GRE);

[0059] 图15示意性图解说明根据本发明的实施例的示例尺寸计算流程;

[0060] 图16示意性图解说明根据本发明的实施例的发布尺寸建议的过程;

[0061] 图17示意性图解说明描述服装适合用户身体的方式的示意热图示例。

具体实施方式

[0062] 本发明涉及一种方法,该方法采用通过自然身体运动捕获的2D图像序列来计算多个线性和周界身体尺寸测度(即身体扫描仪),这些尺寸测度能够充当自动尺寸建议的基础,用于更有效的店内或者家中购物体验。这些尺寸测度能够进一步被用于选择和/或修改最佳描述用户的身体形状用于增强现实可视化的替身,该可视化是关于选择的服装在用户的身体上会如何适合或者呈现的可视化。此外,扫描方法能够被用于获取点云或者充当详细身体形状模型的其他密集3D表示。所需的测量值从该模型导出。3D表示能够被转换为表面模型(如三角形),表面模型由上面描述的增强现实应用程序的渲染引擎使用。

[0063] 设想的是,身体扫描仪能够被用于任何地方,例如在零售店或者购物中心或者在用户的家里。用户在脱衣服的状态下站在地板上,通常是穿着紧身套装,其中目的是获取准确完整的身体测量值,包括姿势和肩部角度。通常,试穿服装不用作寻找不合身或者获取个人的反馈的基础。用户的身体扫描测量值被转换为计算机程序用于分析。程序比较用户的测量值和选择的服装的特征,比如在某些关键位置测量的服装尺寸、织物弹性、服装合身&容限。系统的分析会导致完美适合用户的服装。

[0064] 在下面的详细描述中,参考构成其一部分的附图,并且其中通过图解说明特定实施例或者示例显示。可以组合这些实施例,可以其他实施例,并且可以进行结构变化而不脱离本发明的精神或者范围。因此,下面的详细描述不是用于限制,并且本发明的范围由所附的权利要求及其有些等同物限定。本领域技术人员将从下面的描述容易认识到可以使用在此说明的结构和方在此法的替代实施例,而不脱离在此描述的本发明原理。

[0065] 现在参考附图,其中将描述本发明的各方面和示例计算操作环境。图1和以下的讨论意欲提供在其中实施本发明的合适计算环境的简要大体描述。虽然在连同运行在个人计算机的操作系统上的虚拟试衣间应用一起执行的程序模块的一般背景中描述本发明,但是本领域技术人员将认识到本发明也可以结合其他程序模块实施。

[0066] 通常程序模块包括例程、程序、组件、数据结构和执行特殊图像处理任务的其他类型的结构。此外,本领域技术人员将认识到可以利用其他计算机系统配置实践本发明,包括手持装置、多处理器系统、基于微处理器或者可编程消费电子产品、迷你计算机、主机计算机等等。也可以在分布式计算环境中实践本发明,在分布式计算环境中,可以由通过通信网络(例如用户侧和服务侧)链接的远程处理装置执行任务。在分布式计算环境中,程序模块可以位于本地和远程储存存储装置两者中。

[0067] 图1根据本发明的实施例描述系统100,其用于从2D图像序列导出准确的身体尺寸测量值。通常,系统100被用于身体扫描和通过虚拟试衣间应用程序进行的服装选择。系统100包括用户反馈和指导模块(UFGM) 120、摄像机121、用户行为分析器(UBA) 130、2D形状分析器(2DSA) 140、用户外观分析器(UAA) 150、3D形状分析器(3DSA) 160、虚拟试衣间应用程序190和服装数据库180。

[0068] 用户110位于摄像机121的前面,利用UFGM 120驱动的显示器122和扩音器123,以在用户身体的扫描过程期间提供初始以及进一步的用户指导/帮助。输入装置,比如键盘124、触摸屏或者声音命令模块可以用于开始扫描过程、输入用户ID、免除用户对测量的许可。

[0069] 摄像机121连接到UBA 130,其在扫描之前和扫描过程跟踪所述用户110的位置、姿势/旋转和姿态,验证用户的图像不超过摄像机的视场并且用户正在遵循UFGM 120提供的简单指令。这些简单指令可包括“进入扫描区域”、“举起你的手”、“转身”等等。

[0070] 摄像机121还连接到2DSA 140,其从摄像机121捕获的图像序列的每个图像提取和编码2D形状数据。

[0071] 摄像机121还连接到UAA 150,其提取和编码用户特定的可视非形状描述符,其中所述非形状描述符可包括肤色、头发颜色和发型。这些描述符可以被虚拟试衣间应用190用于增强替身的可视外观,以类似用户——例如,具有和用户相似的肤色、具有和用户相似的面部等等。

[0072] 可视非形状描述符可进一步用于基于这些描述符中的一个或多个生成着装建议。例如,建议的服装颜色和/或纹理/图案可改善肤色,头发颜色和眼睛。

[0073] 系统100的每个元件能够由单独的模块,比如USB网络摄像头、LCD显示器、连接的麦克风、键盘、个人计算机等等实现。但是,通过引入功能强的消费电子装置,本发明的某些实施例能够基于这种装置。在特定的例子中,系统100的所有元件能够由用户的基于计算机的装置实现,比如笔记本电脑、平板计算机(如苹果公司的iPad)或者甚至比如三星公司的Galaxy电话这样的智能电话。

[0074] 根据本发明的实施例,系统100的某些模块能够在远程服务器中实现,比如3DSA 160和服装数据库180。3DSA 160接收2D形状描述符和用户位置、姿势和旋转数据,并且将它们集成到3D形状模型中和/或提取3D尺寸测量值,这些测量值和用户外观数据一起将被存储在用户体形和外观数据库170。当之前已扫描的用户登录到系统100中时(例如经由虚拟试衣间应用程序190的界面),他的已存储身体尺寸特征能够被用于过滤/查找服装数据库180和推荐将十分适合所述用户的服装和其特定尺寸。在更好地与当前购物体验配合的另一个使用情况中,用户将选择网络商店上的服装并且接收尺寸建议以及描述服装将适合身体的方式的示意热图(例如,这样的示意热图在图17中呈现)。

[0075] 服装数据库180包括数字表示服装比如衬衫、裤子、裙装等等的数据以及它们的属性,比如尺寸、长度、宽度、颜色等等,如制衣业通常限定的。例如,为了将服装添加到数据库180,系统100可以进一步包括服装检测模块(未显示)。为了为检测的服装提供正确的比例和透视病情可选地去除或者减少可能由于摄像机视角和服装所处于其上的平面导致的失真,应该使用本领域已知的失真纠正技术,比如使用具有已知尺度的物体作为参考物体(例如压缩磁盘),或者校准图案,比如棋盘图案。

[0076] 根据本发明的实施例,3D形状信息被进一步用于构建替身,该替身最佳描述用户的体形,用于选择的衣服会如何适合用户的身体或者在用户身上呈现的增强现实可视化。为了更有力的呈现,从UAA 150获取的用户外观信息可以以肤色/头发颜色以及类似面部的形式被嵌入替身中,只要用户在扫描过程期间选择要被捕获的其面部。由于这种用户的基于计算机的装置的日益增加的计算能力,3DSA 160能够被包括在这种装置上,进一步降低在服务器侧上的计算资源和带宽要求。

[0077] 图2描述用于前景检测的方法,其通常用于检测图像序列的变化,如现有技术公知的。由于扫描过程将在室内进行并且摄像机121(图1)在该过程中将是静态的,背景去除技术是合适的。背景建模(步骤220)将背景模型构造为视频图像的移动平均,这些视频图像不包括前景物体——在用户进入场景之前或者通过禁止在帧间差异高的那些区域平均,因此用信号表示用户存在或者运动。背景模型的示例图像由数字211指示。

[0078] 一旦背景模型是稳定的(如数字211指示的),对于每个新捕获的视频帧,背景去除(步骤230)计算视频帧(如数字210指示的)和背景模型图像211之间的逐个像素绝对差。差图像(如数字212指示的)然后由自适应阈值处理(步骤240),该自适应阈值将其阈值全局或者局部地(每图像位置)设置为刚好在噪音和照明变化水平之上,以获得二进制图像(示例二进制图像由数字213指示)。二进制滤波步骤250可以使用已知技术比如连接组件滤波或者形态过滤来消除小的噪音区域和物体内部的小孔。

[0079] 图3根据本发明的实施例以流程图形式图解说明作为扫描过程的一部分的由UBA

130分析用户行为的过程。为了获取用户3D形状数据,用户行为信息可包括:

[0080] -地板上的用户位置;

[0081] -相对于地板的用户姿势或者旋转;和

[0082] -如UFGM 120指示的要求的姿态的验证。

[0083] 在下面的描述过程中,假设扫描过程针对用户的躯干,用于测量比如腰部、臀部和胸部的这样的周界和/或获取描述躯干区域的3D点云。在特定实施例中,执行躯干扫描,其中用户假设“仙人掌”位置使得躯干区域贯穿扫描过程是未遮挡的——如图2和3中的图像210概述的。

[0084] 基于从前景检测过程(如图2中的图像213)获取的二进制身体剪影和来自摄像机121(图1)的视频图像分析用户行为。

[0085] 根据本发明的实施例,用户行为分析的一个关键属性是人类主体的参考地板位置。在一个实施例,请求人类主体贯穿扫描过程在指定的区域中活动,可选地地板标记可以被用于贯穿扫描过程指导用户。替代地,系统能够估计距主体的图像高度和主体的物理高度的距离,作为可手工输入到系统中的单个尺寸值(例如经由图1中所示的键盘124)。但是,为了更好的准确性,对于完全自动操作和不太合作的主体,系统从2D图像序列提取距离/位置。

[0086] 由UBA 130分析用户行为可包括以下步骤:

[0087] 足部检测(步骤310),搜索二进制剪影的底行。基于发生在扫描过程开始时的摄像机校准,描述地板表面的每个图像行(y)坐标能够被转换为距摄像机的距离。例如,图4更详细说明从足部图像位置检测提取用户距离。校准的距离线280、290、300和310被显示为具有距离值的水平线。线之间的垂直足部位置能够被插值。为了将确切的距离值分配到旋转中心,系统利用足部尺寸和(可选的)身体旋转角度的平均值将足底距离转换为身体中心距离。

[0088] 一旦检测到底行,围绕足部构造计算窗口(如虚线400指示的)并且x重心转换为地板水平位置(来自摄像机校准)。这完成用户位置检测(步骤320)。

[0089] 为了避免在足部区域的物体段的不稳定而影响位置准确性,y底部坐标和x重心在时域上被滤波,例如通过使用5帧平均滤波器或者其他合适的平均滤波器。

[0090] 可以通过检测和跟踪头部以类似方式根据头顶位置估计用户距离,如本分明描述的。这些用于距离跟踪的方法——仅仅来自足部检测或者仅仅来自头部检测——都要求知道摄像机距地板的高度及其倾斜。虽然在固定的摄像机安装比如在试衣间中这是容易获得的,但是我们可能希望支持家中应用,此时测量摄像机高度并且控制/测量其倾斜对于一次性用户可能是烦人的。在这种情况下,人们可以组合根据本发明的实施例,以便跟踪头部和足部位置,因此导出在每个测量帧的用户距离而无需摄像机高度/倾斜值。

[0091] 如果用户太接近摄像机,这可能导致用户剪影的剪切和增加的透视失真,用户反馈UFGM 120将向用户提供警告。类似地,如果用户太接近后面的墙,这可能导致难以转身,将发送另一个警告。UFGM 120(图1)包括多个场景内容和现有技术中已知的用户行为分析算法,用于检测场景、摄像机设置和用户行为中的共同问题,比如:照明太暗或者太亮、背景太杂乱、动态背景,比如摄像机视场中的TV监视器或者计算机屏幕、运动的阴影、运动的投光灯,摄像机倾斜等等。

[0092] 基于二进制剪影,头部检测模块(步骤330)能够找到用户的头部作为二进制形状的顶部,靠近水平重心(x)。进一步的头部位置验证/精细定位能够基于欧米伽(Ω)形检测器或者其他已知的以人们的头肩部分的 Ω 形状特征为基础的人类检测和跟踪技术。

[0093] 一旦检测到头部和足部,可获得整个形状的大体比例并且该比例可用于某些身体部分的位置的初始猜测。手检测模块(步骤340)开始于从估计的肩部位置搜索手臂,然后向上移动以检测手作为手臂形状的端点。替代地,二进制形状(例如参见示例图像213)能够变薄为1像素宽的骨骼图像,在骨骼图像中,指尖能够在从中心身体位置跟踪的手臂骨骼的端部处被检测为1连接的像素。

[0094] 已经验证来自足部剪影的用户位置之后,系统继续(步骤370)验证来自手位置的身体姿势,并且然后引导用户旋转整圈(可以由UFGM 120完成引导)。图像序列连续性能能够在手跟踪中被利用。一旦在正面位置检测到两只手,它们就被逐帧跟踪(例如使用相关搜索或者其他普通的数字图像相关和跟踪(DIC/DDIT)方法,这些方法采用跟踪和图像对准技术用于图像变化的准确2D和3D测量)以及在手和头部剪影合并时的预测。

[0095] 为了将2D图像形状数据整合到3D尺寸/形状,要求给序列图像分配旋转值(绝对值——相对于完全正面位置或者相对值——相对于所述序列中的参考图像)。

[0096] 图5A和5B描述作为身体旋转检测线索的手检测和跟踪,其中图5A描述在第一位置的用户110的身体而图5B描述在另一位置的用户110的身体,该另一位置相对于图5A的第一位置旋转。数字510指示用户的头,而数字511和512指示用户的手。假设手511和512之间的3D距离在短暂旋转期间保持固定,身体旋转检测模块(步骤380)跟踪图像距离的演化以便提供旋转角度估计。可以独立地或者组合使用其他身体旋转线索,从而提高准确性。

[0097] 例如,可以跟踪身体剪影内部的可视内容——比如服装图案和皮肤肌理。可应用的技术包括特征点检测和跟踪[Carlo Tomasi和Takeo Kanade的文献“Detection and Tracking of Point Features”,Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132,1991年4月]。可以从计算可视运动的“光流”场和将运动模型拟合到向量场[John L.Barron,David J.Fleet和Steven Beauchemin(1994),“Performance of optical flow techniques”,International Journal of Computer Vision(Springer)]估计身体旋转。这种技术能够通过如下描述的面部旋转跟踪来增强。

[0098] 面部检测模块(步骤350)聚集于头部检测模块(步骤330)检测的头上的面部搜索。面部检测器比如Viola-Jones面部检测器能够被应用于图像,从而检测各种正面姿势的面部,并且也已经被扩展以检测侧面面部。提供最佳分数的特定分类器提供面部姿势的感觉。通过检测多个面部界标和从相对位置以及距离比例估计姿势,可以进一步增加准确度。

[0099] 图6A和6B示意性图解说明作为身体旋转关键的身体剪影宽度演化,其中图6A显示在第一位置的身体剪影,而图6B显示相对于图6A的第一位置旋转的另一位置中的身体剪影。例如,具有最窄腰部范围(最小中的最小)的图像可被分配 90° ,并且具有最宽臀部范围(最大中的最大)的图像可被分配 0° 。系统然后跟踪宽度序列的演化并且利用插值估计中间的旋转角度,比如:

[0100] -线性插值——假设恒定的角速度;

[0101] -基于宽度的插值——假设腰部/臀部的椭圆截面;

[0102] -跟踪身体剪影内部的可视细节的运动,利用已知的光流技术或者如上所述的特

征点

[0103] 检测和跟踪,并且利用椭圆截面模型求解旋转。

[0104] 上述通过UBA 130分析用户行为的过程描述基于逐帧的用户行为分析。分割和分析错误可导致噪音测量和/或在隔离帧的伪造值。所有用户参数可以在时域上(随时间)被平滑,以提供所述参数的优良估计。作为一个特定示例,中值滤波器或者其他在统计学中已知的健壮估计器能够被应用于身体旋转角度序列,从而减少随机角度错误并且过滤异常值。

[0105] 图7以流程图形式描述根据本发明的实施例通过2DSA 140分析2D形状的过程。为了更清楚,我们在特定尺寸测量——腰围的背景下描述2D形状分析器。

[0106] 根据本发明的实施例,2D形状分析要求在多个旋转系列图像检测腰部图像位置,并且然后测量在每个这种图像处的边缘或者轮廓点。

[0107] 根据图7,子序列选择模块(步骤710)采用来自UBA 130(如以上关于图3描述的)用户行为数据(步骤702)来从视频图像序列(步骤700)和从前景检测模块(如以上关于图2描述的)获取的其前景图像对应物(步骤701)选择图像子序列。这允许跳过不相关的图像(例如当没有用户位置数据可用时或者用户不处于正确姿势时),以及跳过冗余图像(在用户不移动或者旋转非常慢时)。

[0108] 垂直腰部位置模块(步骤720)然后为子序列的选择图像检测腰部的垂直图像位置,如以下关于图8A-8C中显示的图像描述的。

[0109] 剪影端点检测模块(步骤740)然后在与所述腰部垂直图像位置关联的图像行搜索左和右,并且检测左右剪影端点作为二进制图像的黑白交叉点。利用本领域公知的子像素边缘/零交叉检测从灰度图像获取端点的子像素精度。

[0110] 在优选实施例中,时域垂直位置滤波器(步骤730)和时域端点位置滤波器(步骤750)被应用于来自前面步骤的序列,以减少噪音和忽略异常。

[0111] 时域垂直位置滤波器(步骤730)被应用于垂直腰部位置的时间序列,例如,如{yWaist_0,yWaist_1,...}指示的,其中_0,_1等等是图像索引。

[0112] 时域端点位置滤波器(步骤750)被应用于左腰部位置的时间序列,例如,{xLft_0,xLft_1,...},其中_0,_1等等是图像索引并且对于右腰部位置的时间序列,情况是类似的。

[0113] 对于每个需要的周界值比如臀部、胸部等等,该过程重复。为了提高效率,由于这些身体位置是提前知道的,所以图7中的过程能够被容易地修改以在图像序列的单次处理过程期间获得多个时间序列。

[0114] 在需要点云形式的完整3D模型的情况下,剪影的整个轮廓被横切并且转换为一系列边缘点,其位置如上所述以自像素精度计算。

[0115] 图8A-8C示意性图解说能够由图像分析方法执行的垂直腰部位置的若干线索。对于若干身体形状或者体形(例如参见图8A),腰部被定义为躯干的最窄点。 $[ymin,ymax]$ 图像行坐标的范围基于整个身体剪影尺寸定义,并且进行针对最小 $[x_left,x_right]$ 间隔的搜索。为了更好的结果,主体的手应该离开身体,或者上举(例如,如图8C中显示的用户的位置)或者在45度,以避免干扰测量。对于更胖的个人,根据身体宽度函数,腰部位置可能是不清楚的。因此,能够使用垂直腰部检测的另一个方法,用于检测用户剪影内部的可视特征点,比如用户的肚脐(如图8B中示意显示的)。在没有腰部位置的可视线索是足够稳定时,系

统根据人体测量的数据计算腰部位置,例如人体测量的数据提供平均腰部高度作为用户高度的分数。

[0116] 除了检测“自然”的解剖学位置(例如腰部、胸部等等),在标准身体位置处提取到用户的尺度,如将用户尺度匹配到特定服装尺度所请求的。例如,对于某些服装,腰线被定义为距离肩部45厘米——我们将沿着身体定位完全相同的点并且在那个点测量周长。

[0117] 由于人体部分的外观的宽度变化,根据一个实施例,该身体部分的图像集合被收集,选择合适的图像特征(比如类似哈尔(Haar-like)的特征或者用于物体识别中的类似数字图像特征),并且利用已知的AdaBoost算法或者类似机器学习算法的实现训练一连串简单分类符。这些步骤能够离线执行。在系统运行期间,从整个图像尺寸估计肚脐区域并且该连串分类符被应用,在不同比例扫描区域用于特征检测。

[0118] 图8C演示用于垂直腰部位置的另一个实施例,根据该实施例,基于剪影分析,肩部高度和胯部高度被检测并且在这两个值之间按比例定义垂直腰部位置。肩部高度和胯部高度由点划线801和802分别指示,并且定义的腰部位置由线803指示。

[0119] 图像搜索类似腰线的特定躯干高度线,通过使用人体测量的信息进一步限制坐围线/臀围线和胸线。例如,对于99%的所有女性,女性腰部点位于女性高度的0.578和0.652之间。因此,知道了输入的(例如在用户到系统的对准过程期间)主体性别和高度以及摄像机参数允许我们计算腰部区域的垂直图像范围并且仅仅在该垂直图像范围进行如上所述的一个或更多腰部检测过程。类似的人体测量数据有助于搜索其他身体关键点,比如肩、颈、手腕等等。

[0120] 图9A-9D图解说明将身体剪影900的端点转换为划界角度扇区的原理。我们将假设针对摄像机的正交(或者平行)投影模型,其可以针对在大约摄像机高度或者远处摄像机(相对于身体尺度)的身体部分被证明。对于其他情况,能够相对于摄像机光轴在特定身体部分的每个仰角用实验方法获得修正因子,并且修正因子被用于修正导出的尺寸测量和导出的3D轮廓点。

[0121] 其他修正因子涉及某些身体尺寸测量的定义。例如,沿着身体3D形状的对角切片定义颈围并且特定的修正因子被应用于该测量。

[0122] 假设校准的摄像机,能够才摄像机焦点(如图9B中的数字906指示的)背投影每个图像点,以描述空间中的光线。左右端点(如图9B-9D中的数字901和902分别指示的)定义角度扇区,其在正交假设/近似下位于和地板平行的平面中。剪影900在特定高度(比如腰部、臀部等等)的身体截面由所述角度扇区划界。其他特定高度的示例由数字904和905指示。

[0123] 摄像机校准在现有技术中是已知的。可以从制造者获取摄像机视场和光学畸变数据。例如,在使用智能电话比如苹果公司的iPhone 4S时,安装的根据本发明的身体测量应用程序可以利用针对摄像机参数的已知应用编程接口(API)询问该装置。

[0124] 替代地,能够利用校准图案/物体获得固有的摄像机参数(视场、畸变/失真、光心)和外来的摄像机参数(位置和取向)。也可以获得开源的校准软件包。

[0125] 理想地,摄像机光轴应该平行于地板表面。当不是这种情况时,能够检测倾斜,并且从可视信息比如地板和墙交点的位置估计倾斜或者从装置上的传感器测量倾斜。一旦获得倾斜信息,就将它并入测量方程以补偿这种倾斜。

[0126] 当然,单个限制(如从身体的单个2D图像获取的)告诉我们非常少的关于实际身体

尺寸的信息,因为在腰部水平的实际身体截面可以是图9B中显示的形状之一,比如902,903,904或者另一形状。注意另一视图(如侧视图)降低不确定性并且允许解决假设椭圆截面的身体周长。但是,对于真实的人体,这种近似不够准确,不足以提供适当的尺寸建议或者可视化。

[0127] 图10A和10B显示如何从自由旋转用户的图像序列获得准确的横截面形状(和周长)。该图描述了椭圆轮廓指定的3个姿势。它们由数字911、912和913指示。椭圆轮廓911描述从第一参考姿势导出的边界区。随着用户旋转(逆时针方向),其剪影端点改变并且为已旋转的横截面生成额外的角度扇区比如椭圆轮廓912和913(虚线)。

[0128] 显然,为了生成横截面形状,系统必须将所有的角度扇区转换为相同的参考帧,其被随意选择为第一或者其他位置。人体相对于参考位置的平移和旋转定义欧几里得变换(Euclidean transformation)。这些运动参数从上面关于图3描述的用户行为分析模块获得。

[0129] 回到图10A,在欧几里得变换之后,角度扇区921、922和923(如实线指示的)指定对身体截面形状的3个限制。系统现在知道关于所述形状的更多信息,因为它位于全部3个扇区的共同区域中。

[0130] 利用多个图像(例如,对于5秒旋转,那个系统可以获得超过100个图像),系统重复在参考坐标系计算划界角度扇区,应用相应的欧几里得变换到每个扇区并且和累积划界形状相交的过程。随着增加越来越多的身体视图,扇区的布尔交集包围该形状越来越紧,直到获得凸形截面。能够使用已知的多边形相交技术计算布尔交集。这个在计算机图形领域已知的“物体-空间”方法具有以任意精度计算形状的优点。

[0131] 替代地,根据本发明的“基于图像的”方法将角度扇区逐个绘制到高分辨率位图中,该位图最初包围整个测量区域(如矩形930指示的)并且递归地应用和前面位图的布尔交集,如图10B中的系列示例黑白图像显示的。

[0132] 图11以流程图形式描述从2D形状数据存储构造3D尺寸度量和形状数据(步骤1100)。对于2DSA 140(图1)分析的每个2D图像,利用用户位置和旋转角度(步骤1115)检索剪影端点坐标(步骤1105)。用户位置和旋转角度被用于计算2D欧几里得变换矩阵(步骤1120)。步骤1100构造摄像机坐标中的划界角度扇区,其利用所述矩阵被移位和旋转到参考坐标系。步骤1140利用现有技术已知的凸多边形填充技术绘制角度扇区的内部。绘制分辨率(例如5像素/cm)必须精细到足以避免数字化错误。步骤1150执行新绘制的角度扇区和目前为止累积的形状覆盖位图的布尔相交。

[0133] 当如上所述已经处理整个旋转序列时,可获得截面形状并且通过步骤1160其轮廓能够被横切。该轮廓可以由轮廓点数组表示(步骤1170),轮廓点可以转换为3D点云,然后在多个高度以图形的截面累积。替代地,通过步骤1180计算轮廓长度并且它充当腰部的周长值。获得的3D形状模型可以存储在数据库中(步骤1190)。

[0134] 图12描述服装行业通常要求的身体躯干尺寸测量。可以根据在举起手臂(所谓的“仙人掌”)位置的单个用户旋转计算若干关键测量:半身/胸部、腰部和臀部。

[0135] 其他身体尺寸测量要求用户假设不同的姿势。例如,在用户的手到其身体侧面的情况下,可能获得袖长和颈围测量。

[0136] 另外的身体尺寸本质上是线性的。这些尺寸包括下裆、手臂和高度。利用校准,能

够从单个帧提取这样的测量值,依赖于用户行为分析器130(图1)来为该测量值选择完全正面/后面的图像。测量腿对于牛仔服和其他紧身服装是重要的。由于腿在整个身体旋转期间遭受虚实遮挡,所以对本发明方法的修改会从那些帧构建膝盖或者脚踝形状而无遮挡。由于在膝盖或者脚踝的腿截面是几乎圆形的,所以对于120度或者旋转运动的单个腿轮廓的可视性足以准确估计腿的周长。

[0137] 图13A-13C示意性图解说明根据本发明的实施例,从生成的3D数据构造3D模型表示。对于从使来自图像帧序列的剪影轮廓相交获得的一系列连续点,重复关于图11描述的过程,在高度值序列生成点云(图13A)。这种点云能够被转化为完全3D身体扫描仪格式。此外,现有技术以及若干可购买的软件产品显示如何将点云转化为一系列多边形(参见图13B中的图示三角形网格),这些多边形充当表面模型(参见图13C),表面模型更适合用于虚拟试衣间应用和虚拟着装模拟。

[0138] 图14描述根据本发明的实施例的服装建议引擎(GRE)175。GRE 175比较用户的身体测量值(例如周长和长度)和选择的服装的测量值并且提供关于最佳尺寸适合的建议。

[0139] GRE 175从用户的身体尺寸测量数据库(例如用户体形和外观数据库170)接收用户的测量值以及从服装数据库180接收服装测量值。服装数据到数据库180的插入可以手工完成或者通过服装检测模块自动完成。GRE 175可以进一步接收数字174指示的用户购买历史。每个服装类型(例如衬衫、裤子、裙装等等)要求比较不同的周长和长度组,测量值的数量可以根据每个零售商改变。将和顾客尺度比较的每个服装的实际尺寸也取决于比如弹性、方便穿着和容差的参数。在图15中显示说明根据本发明的实施例的示例尺寸计算流程。

[0140] 在已经计算服装的测量值,并且将其和顾客的身体测量值比较之后,发出尺寸建议,例如如图16中描述的以及图17中的数字620指示的热图给出的合身图示。

[0141] 现在参考图16,仅仅为了图解说明,发出尺寸建议的过程可以包括以下步骤:

[0142] 首先,GRE 175检查身体测量值(例如通过检查数字601-606指示的用户臀部、腰部和胸部的一组周长和长度)。在这个例子中,找到的周长尺寸是胸部尺寸=38,腰部尺寸=38和臀部尺寸=40。

[0143] 在下一个步骤(607),GRE 175检查是否所有的身体测量值在服装的尺寸范围内(不大于或者不小于)。如果是,则在下一个步骤(608),它检查身体测量值的尺寸之间的差是否不大于两个尺寸。如果是,则在下一个步骤(609),它检查 $\pm 3\text{cm}$ 范围中的身体胸部点是否在图案的胸部点的垂直轴上。直到此时,如果对于步骤607-609的任何一个核査的回答为否、则不获得建议(步骤611)。如果在步骤609,回答为是,则在下一个步骤610,GRE 175检查是否身体测量值大小之间的差不大于一个尺寸。如果为是(步骤613),则提供完全合身的建议(例如尺寸40——最大尺寸),并且系统使在用户(例如模拟用户外观的替身)的身体图上的服装可视。如果为否(步骤612),则提供针对最大合身的的建议(例如尺寸40),但是没有必要是如在步骤613中的完全合身的建议。对于步骤312,系统也使在用户(例如模拟用户外观的替身)的身体图上的服装可视。

[0144] 重要的是,以上用于发出尺寸建议的步骤可以仅仅指广泛得多的逻辑的一部分,该逻辑能够包括额外或者其他规则。例如,在上面描述(参见步骤608)的两个尺寸间隔差仅仅是来自大规则集的一个示例规则,这些规则能够用于提高尺寸建议过程的效率。

[0145] 根据本发明的实施例,系统能够被配置为从扫描的2D形状数据和/或计算的3D形

状数据以及可选的非形状用户特性(比如肤色、眼睛颜色、头发颜色)构建替身。如上文提到的,替身被用于用户在扫描过程期间的可视化(想法是呈现跟随用户行为的图形——从而改善体验并且通过不显示摄像机捕获的实际图像可选地产生隐私的感觉)。

[0146] 替身被进一步用于用户的选择服装的可视化。所述可视化可以是静态或者通过利用预定义/随机产生的运动之一使替身行动而是动态的。替身显示可被修改(比如实际苗条),以改善在扫描期间的用户体验或者改进在服装购买阶段期间的服装显示。

[0147] 根据本发明的身体测量过程能够被用在时尚零售行业之外的不同领域。一个这样的领域是健康业。肥胖正在变为明显的健康风险并且因此强制提供监测肥胖的手段。体重指数(BMI)是广泛用于测量肥胖的简单度量。但是,BMI不反映脂肪的分布。

[0148] 根据本发明的一些实施例,身体测量过程能够适合于医学应用——扫描用户和分析3D形状数据来产生某些健康相关的参数/度量,比如肥胖、脂肪分布。在一个实施例,重复进行扫描(比如每月一次),并且比较用户3D形状数据和参考扫描或者一个或过多之前的扫描。比较过程产生某些形状参数的显著改变的指示。

[0149] 如本领域技术人员将理解的,图中描述的布置导致如下的系统:其能够利用单个静态2D摄像机捕获运动中的人类主体的2D图像序列,从多个这样的2D图像提取2D形状或者尺寸相关的描述符,并且将所述描述符集成到3D尺寸测量和/或3D形状要素中。

[0150] 根据本发明的实施例,为了获得准确的服装属性,比如服装在若干区域(比如颈部区域、腹部区域、袖子等等)的长度和宽度,应该考虑摄像机相对于服装所处的参考平面的角度。要求这样以便消除可能由于摄像机镜头和服装所处平面之间的非平行位置(或者非最佳捕获角度)而产生的任何失真。如上文所述的本发明实施例能够被实现为计算机过程(方法)、计算系统或者制造品,比如计算机程序产品或者计算机可读介质。计算机程序产品可以是计算机系统可读的计算机存储介质并且编码计算机指令程序,用于执行计算机过程。

[0151] 此外,关于所描述的示例过程,并非需要达到所有过程状态/步骤,状态/步骤也不必以所示的顺序执行。此外,能够并行执行被图示为顺序执行的某些过程状态。

[0152] 类似地,虽然某些示例可提到个人计算机(PC)系统或者数据装置,但是其他计算机或者电子系统也能够被使用,例如而不限于,平板计算机、能够联网的个人数字助理(PDA)、智能电话等等。

[0153] 如本文使用的,术语“例如”、“举例来说”、“可选地”意欲被用于引入非限制的例子。虽然某些参考针对某些例子系统组件或者服务做出,但是其他组件或者服务也可以被使用和/或示例组件能够组合为较少的组件和/或分成另外的组件。此外,本文描述和说明的示例技术意欲是说明性和示例性的,并且绝不限要求保护的发明范围。

[0154] 已经给出所有以上描述和例子用于说明的目的,并且不意欲以任何方式限制本发明。能够采用许多不同的机制、分析方法、电子和逻辑元件,所有都不超出本发明的范围。

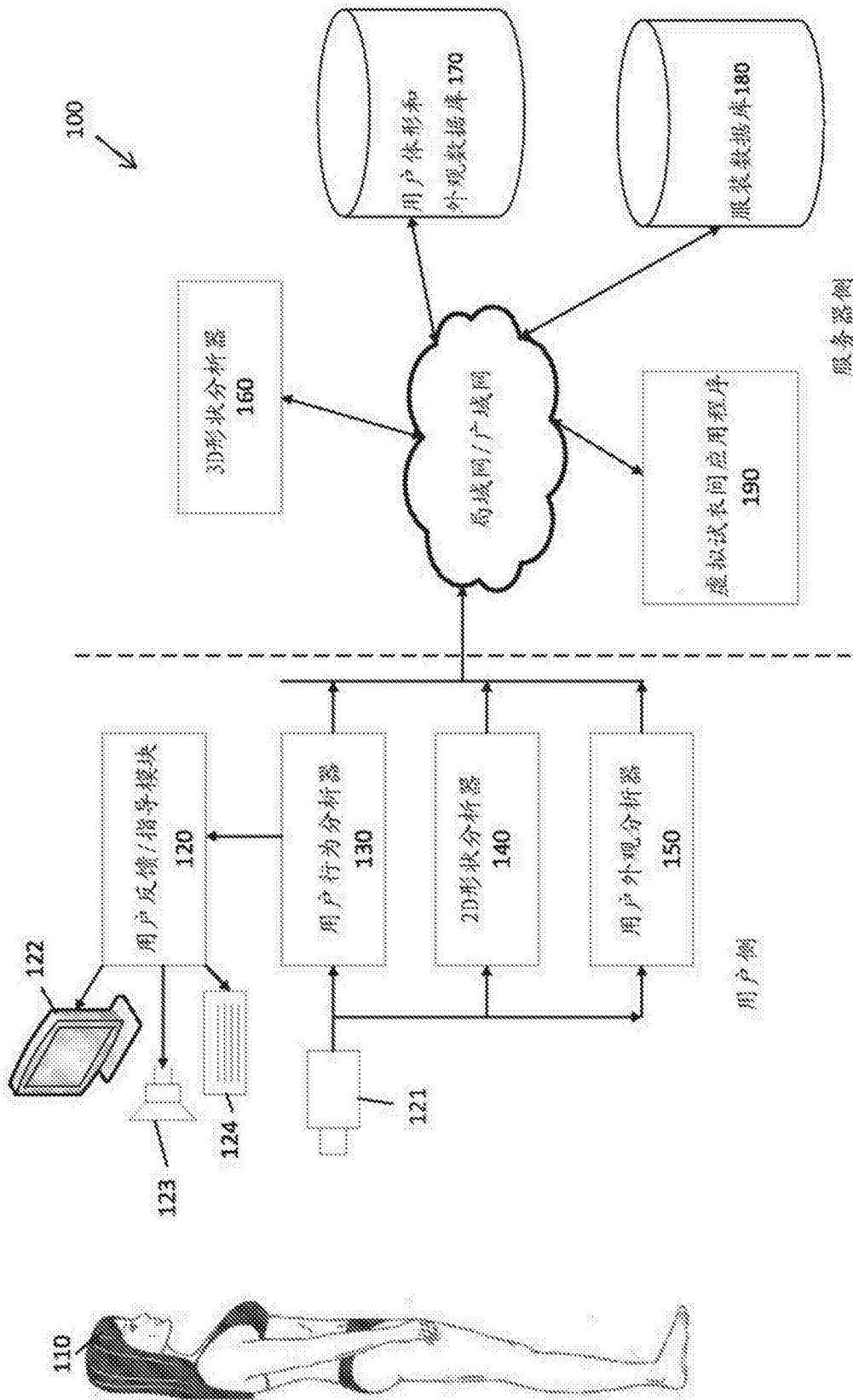


图1

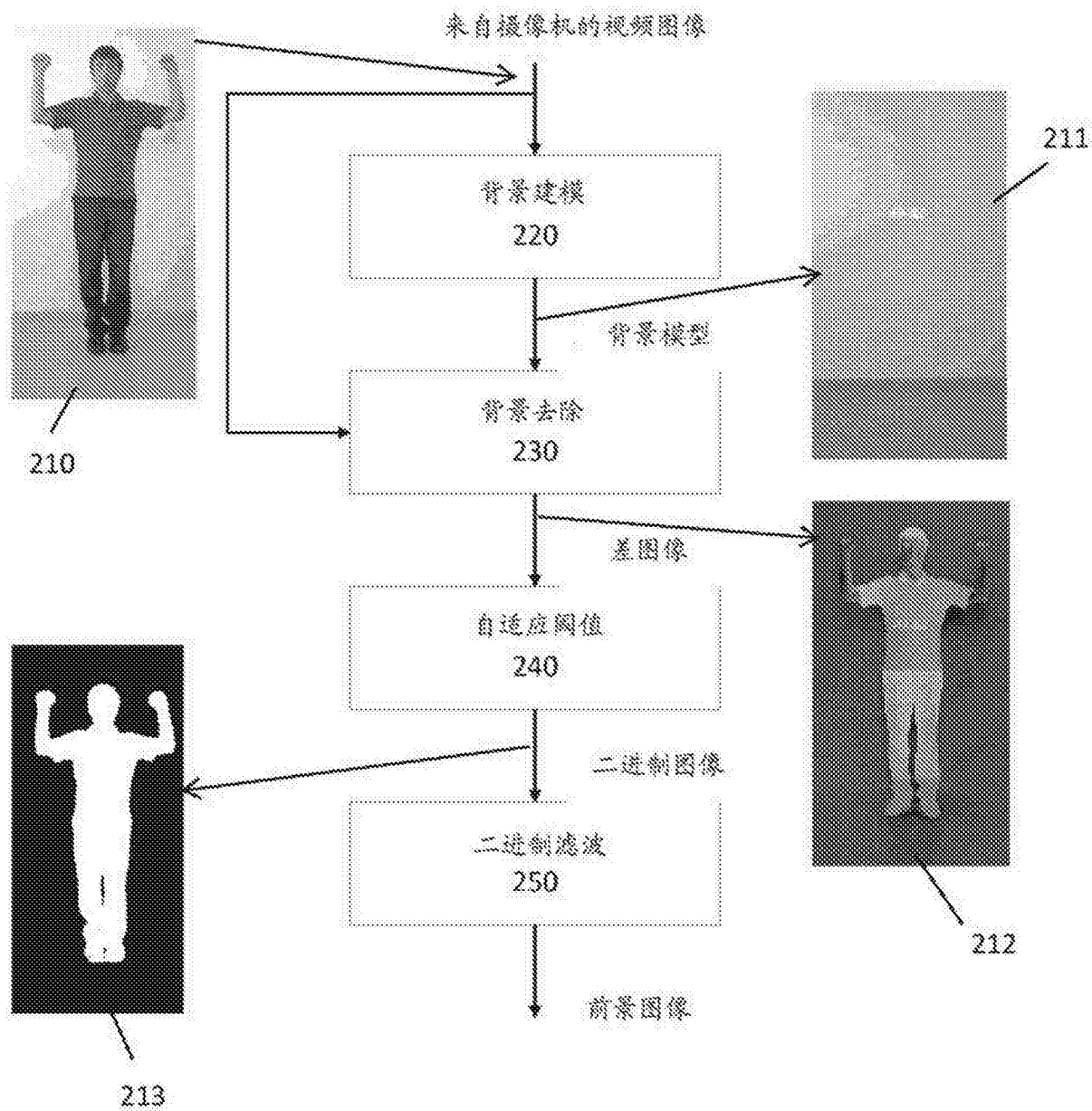


图2

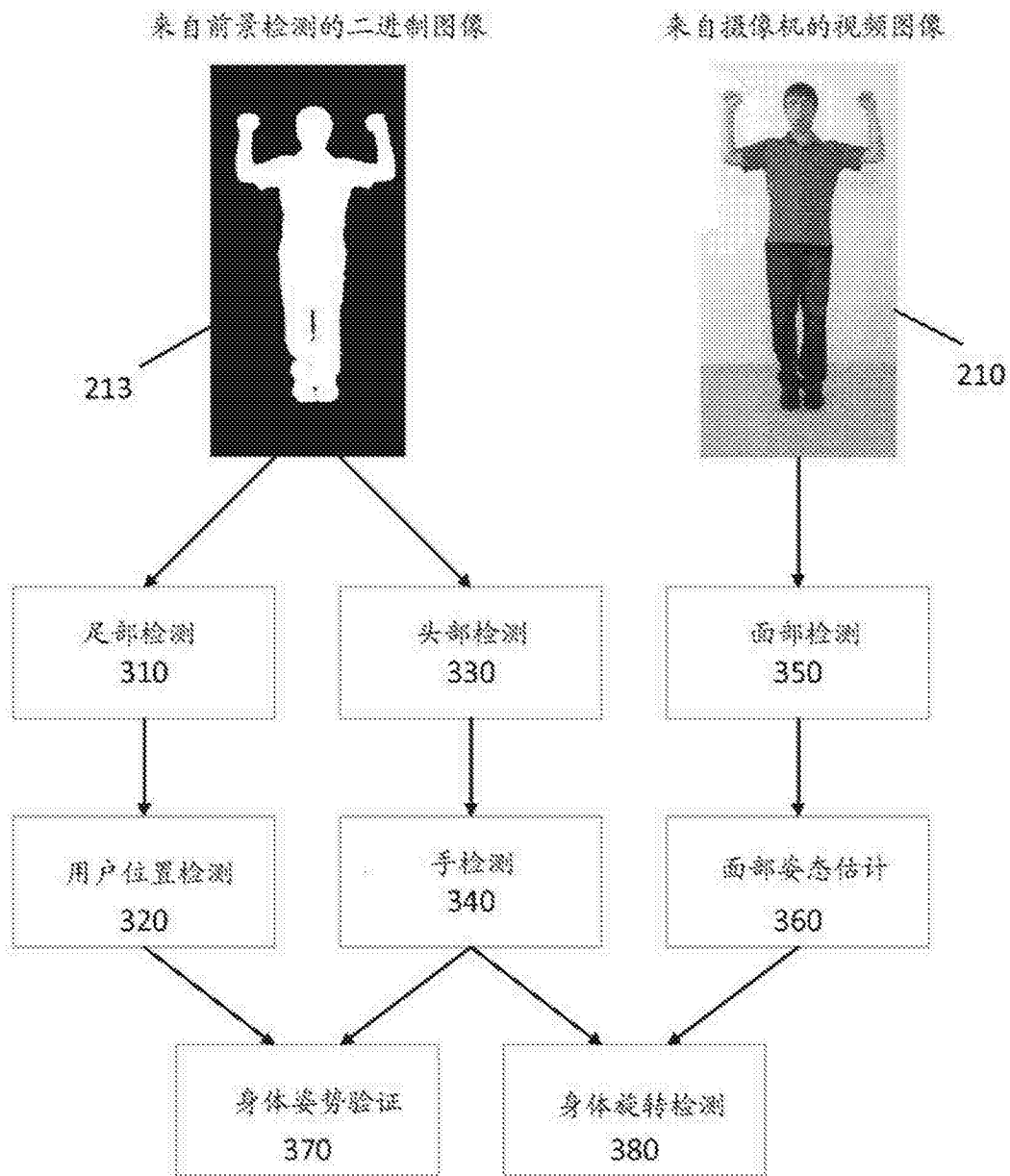


图3

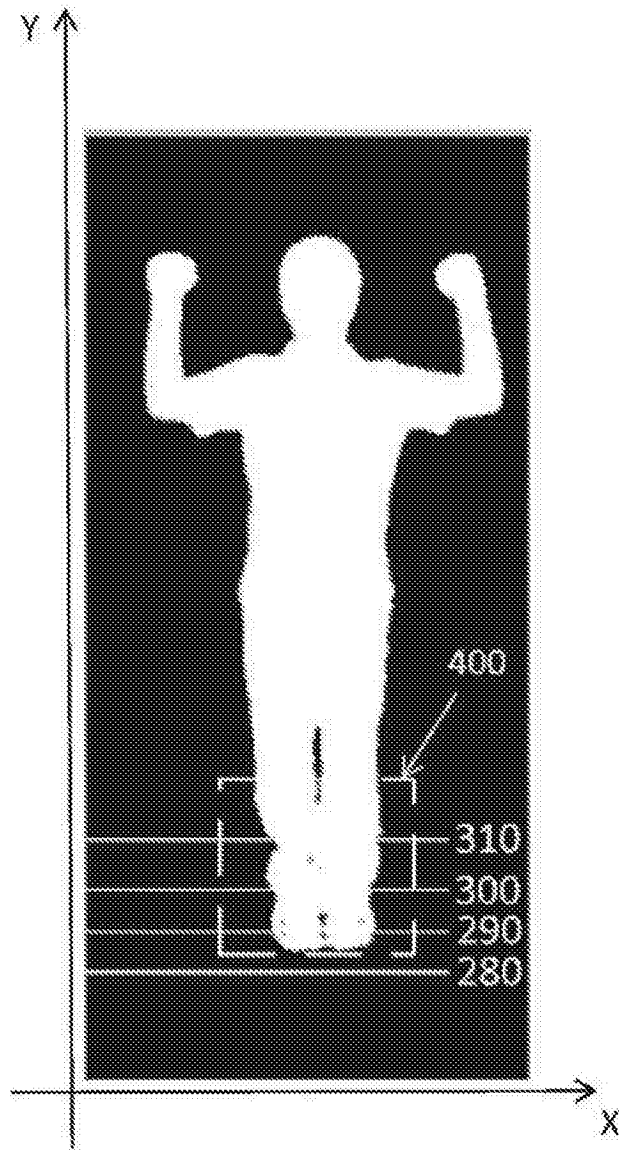


图4

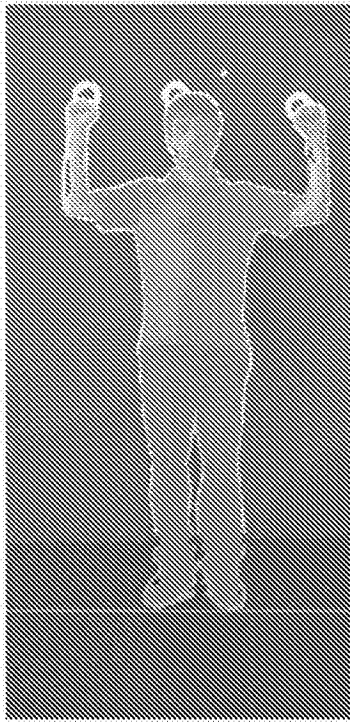


图5A

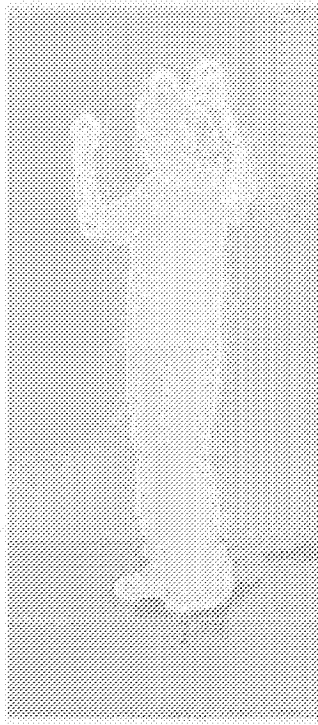


图5B

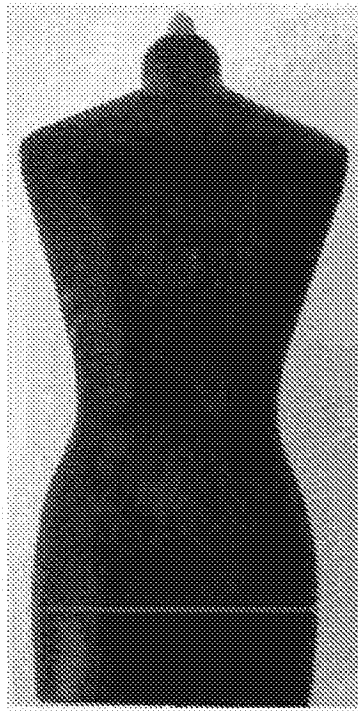


图6A

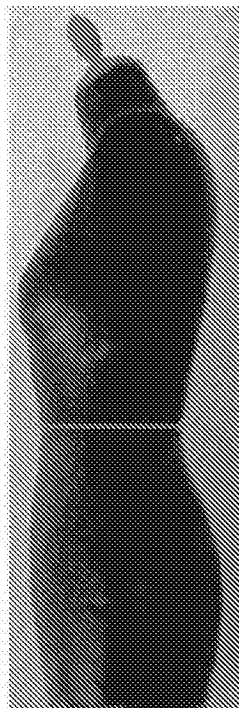


图6B

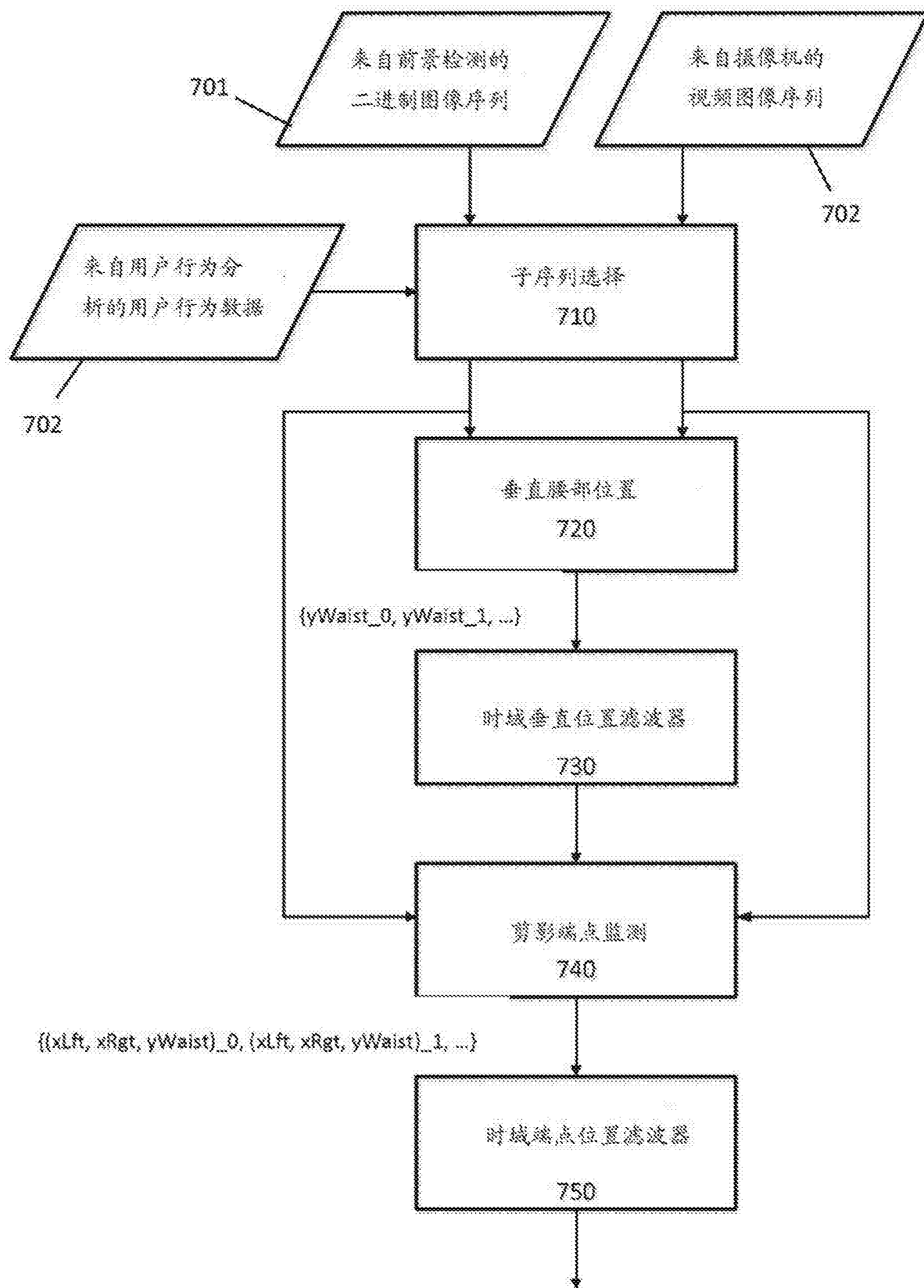


图7

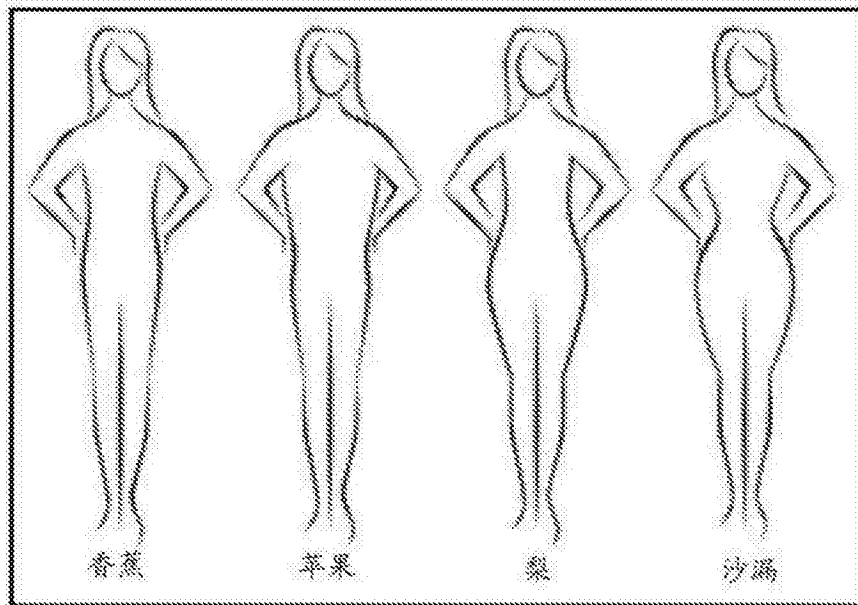


图8A



图8B

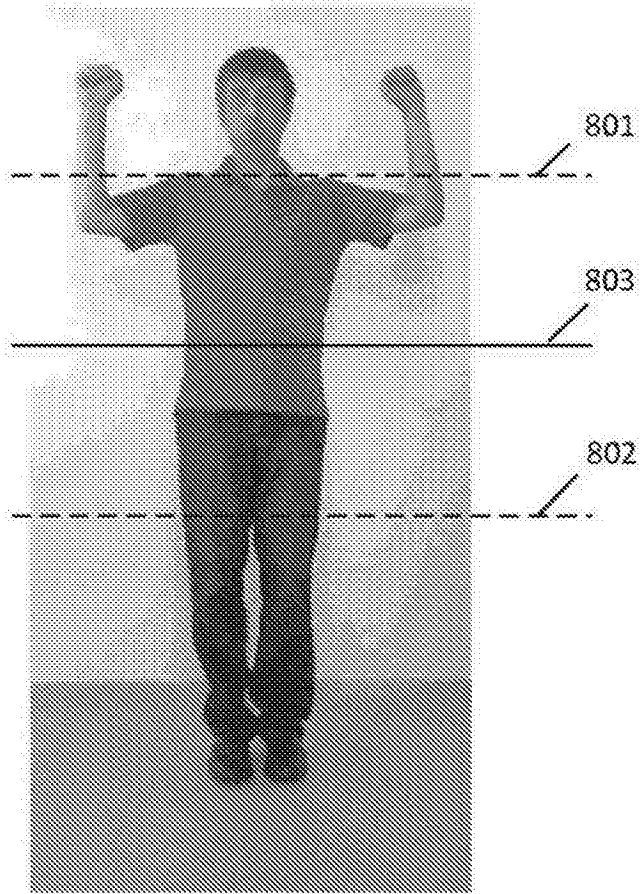


图8C

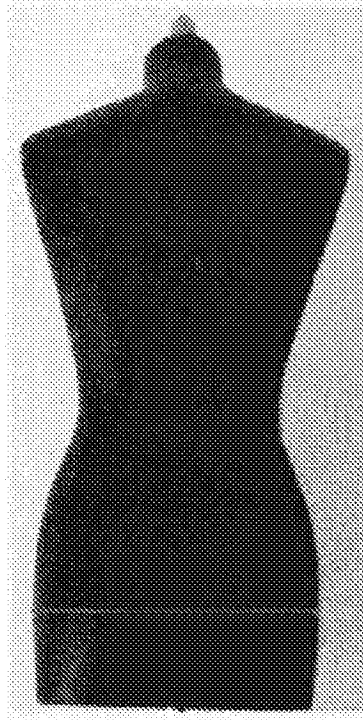


图9A

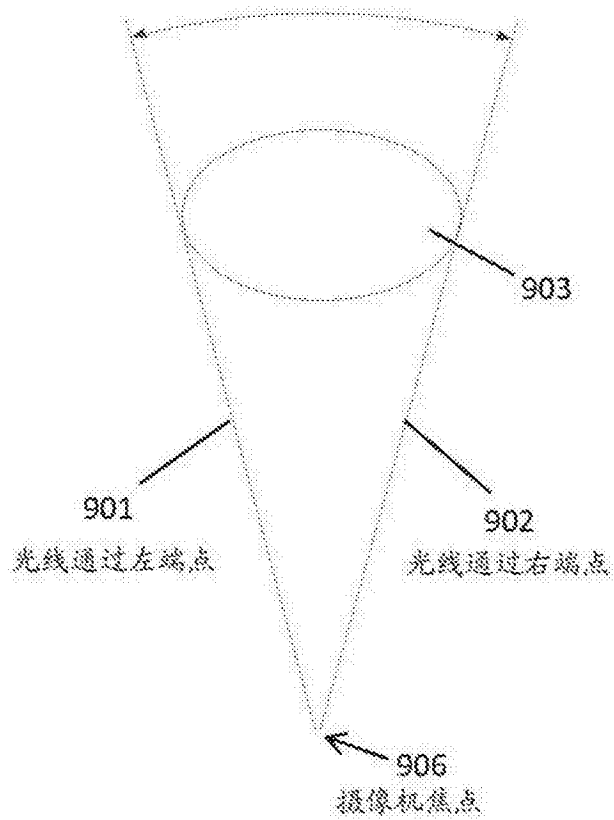


图9B

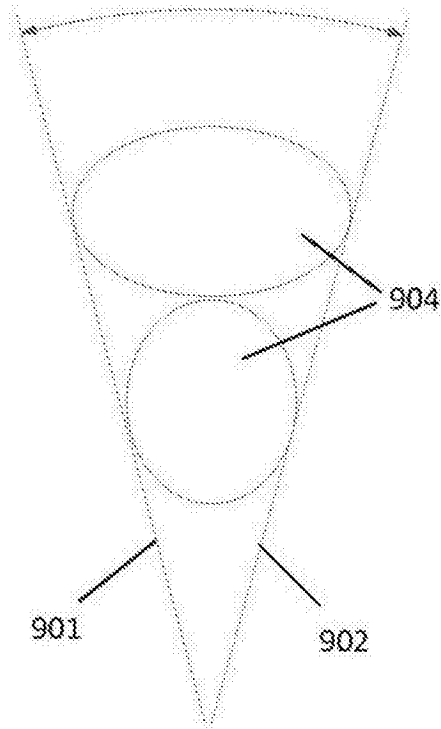


图9C

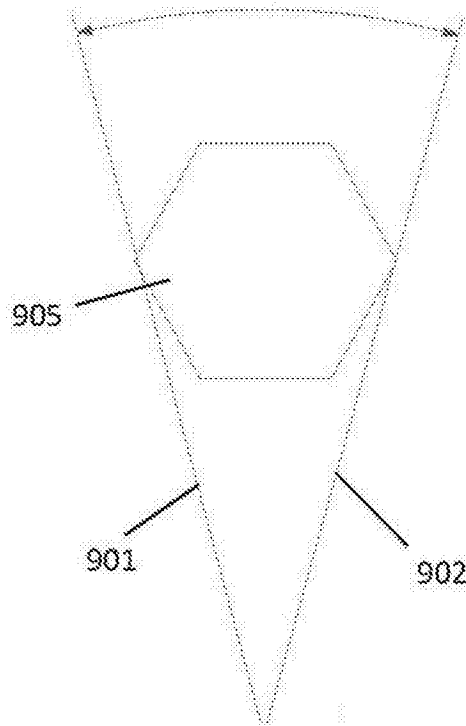


图9D

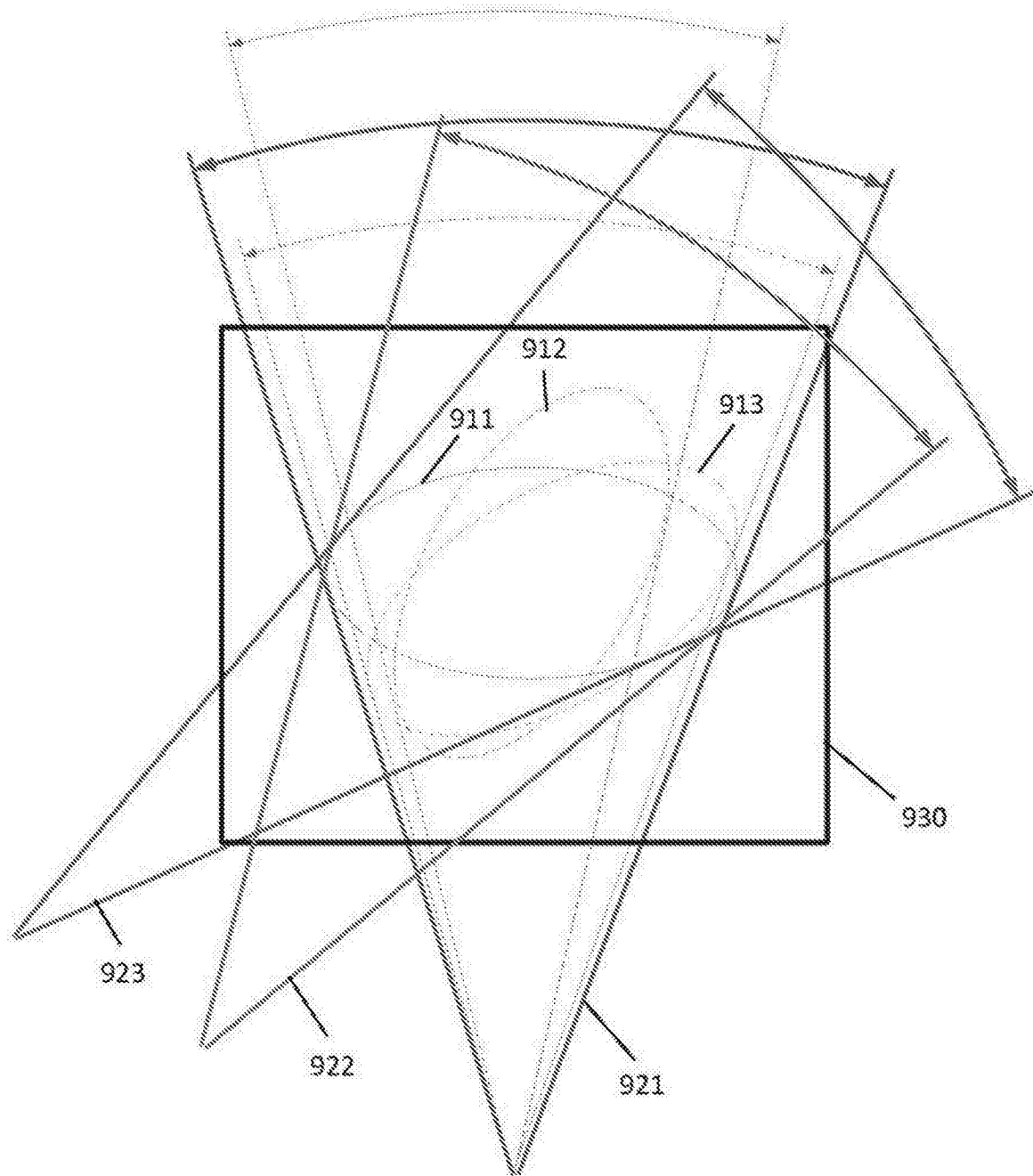


图10A

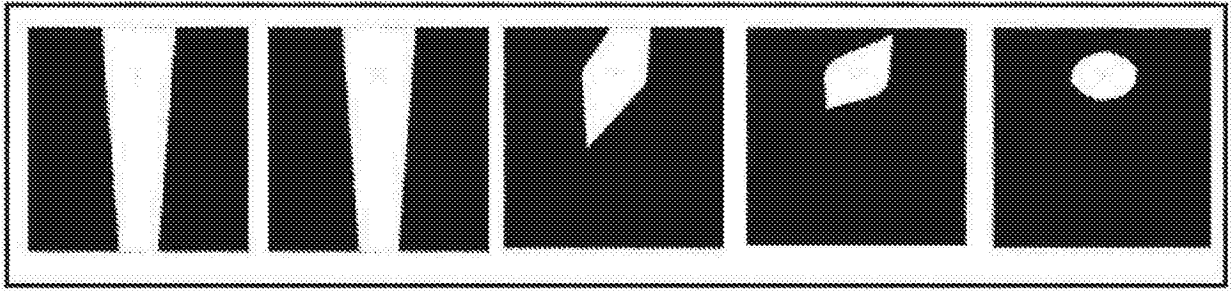


图10B

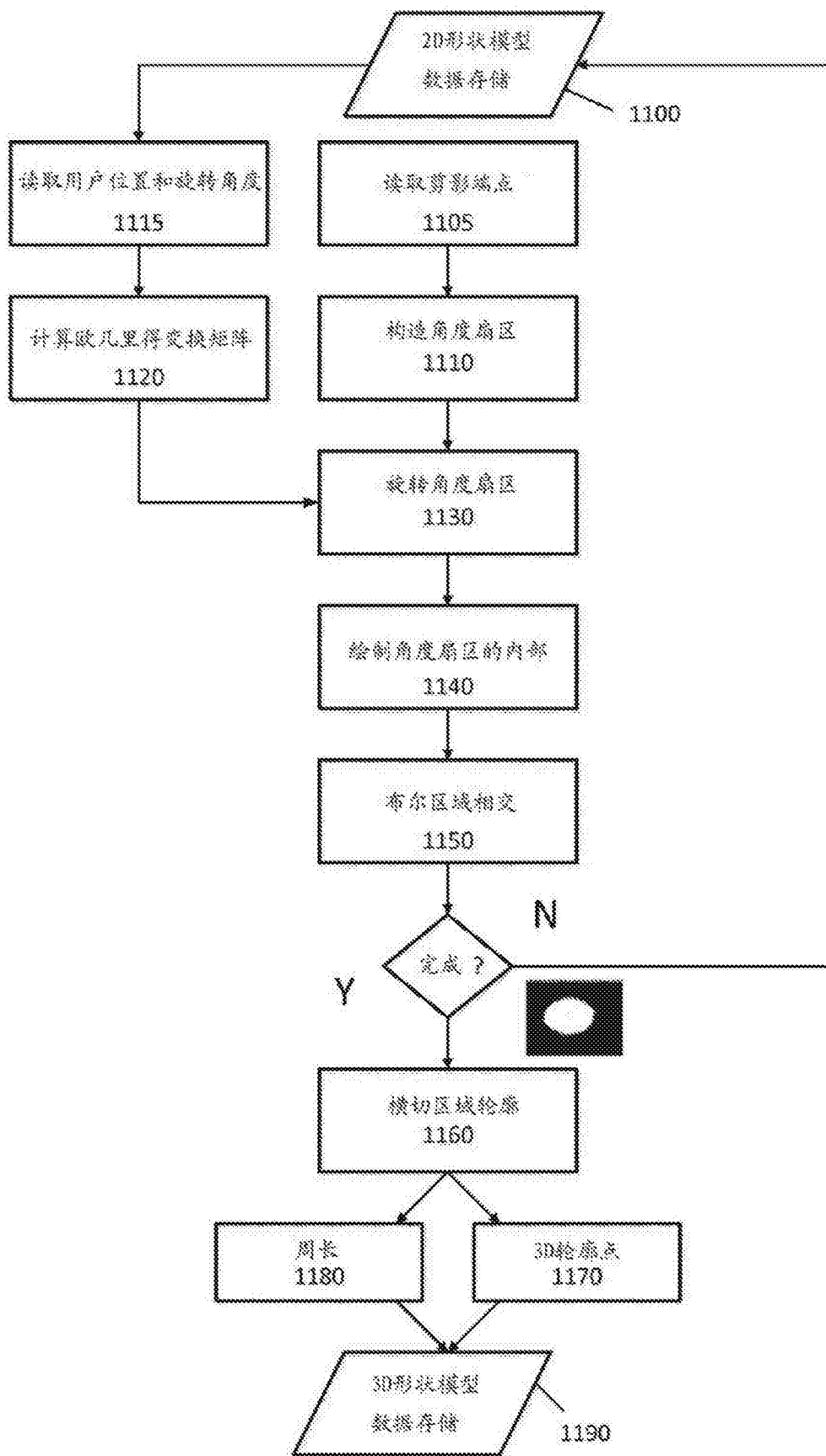


图11

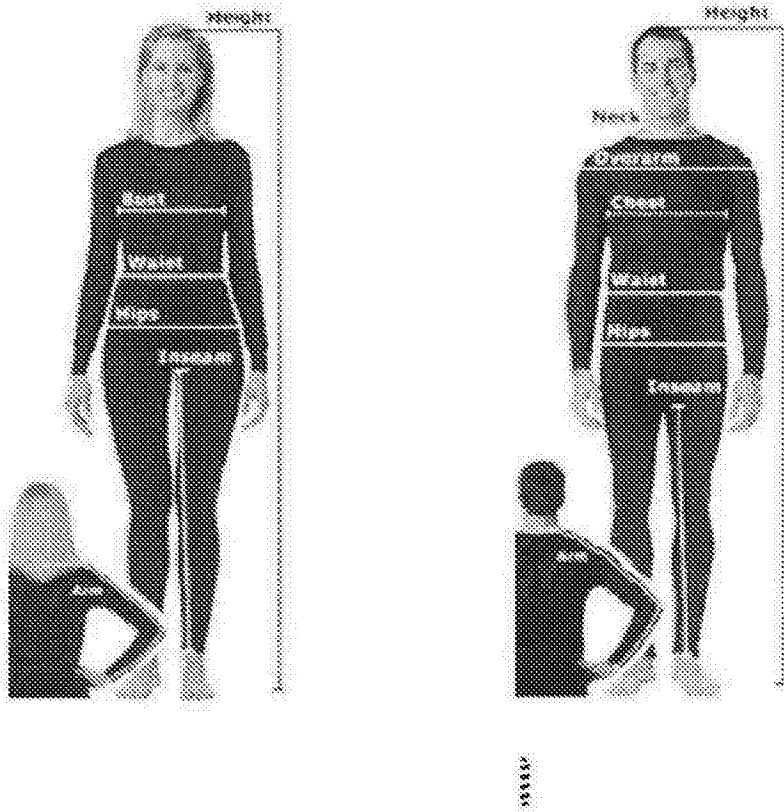


图12

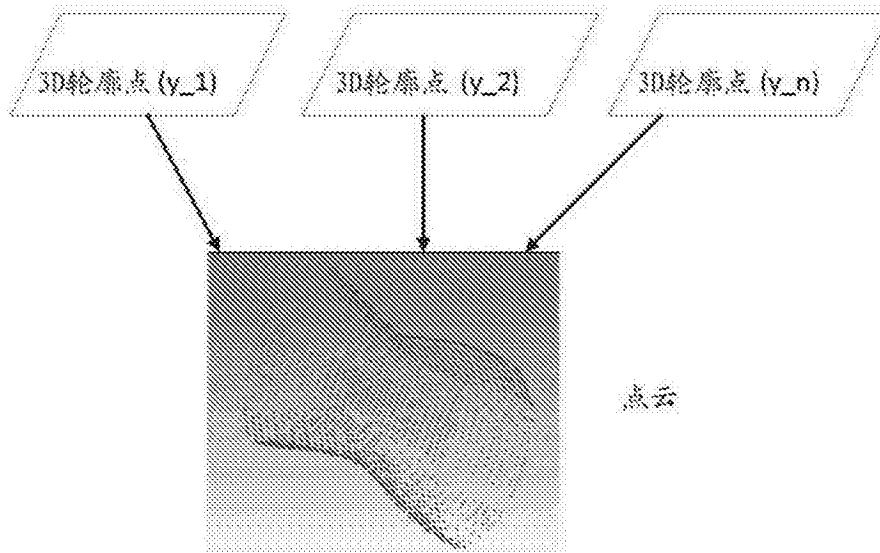
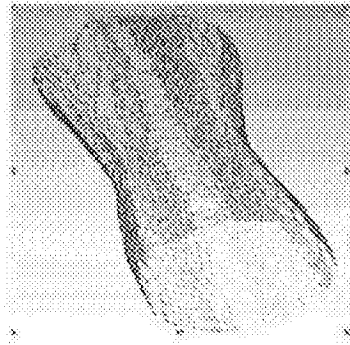
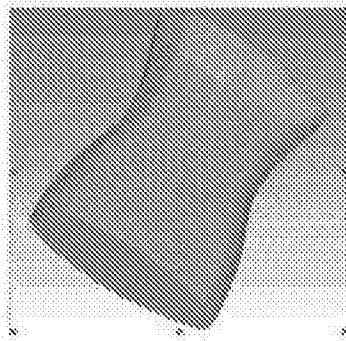


图13A



三角形网格

图13B



表面

图13C

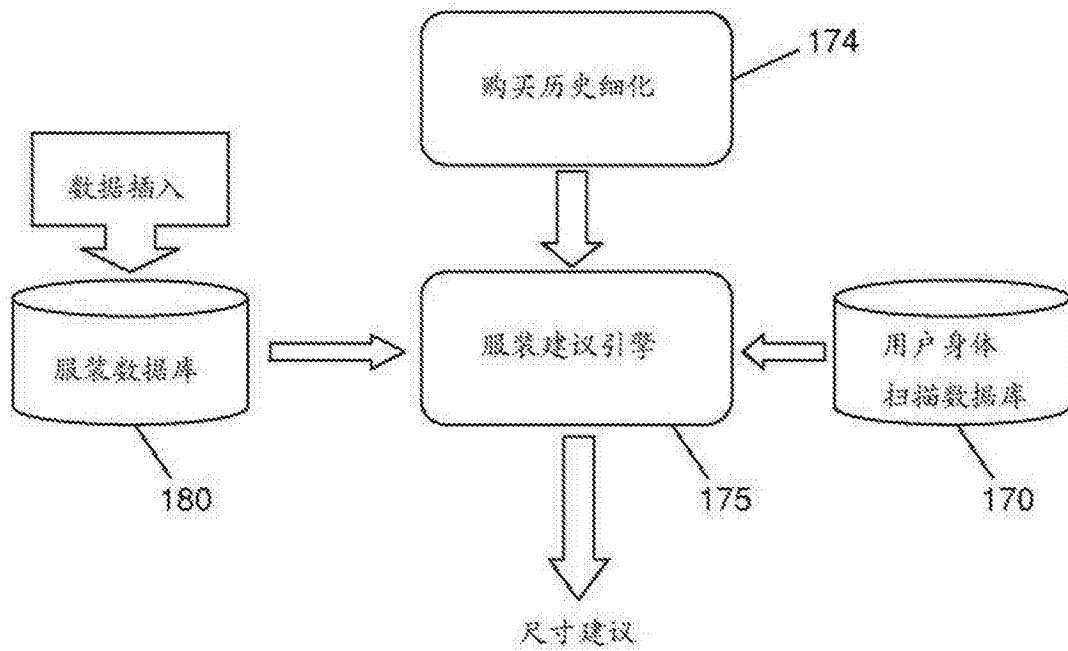


图14

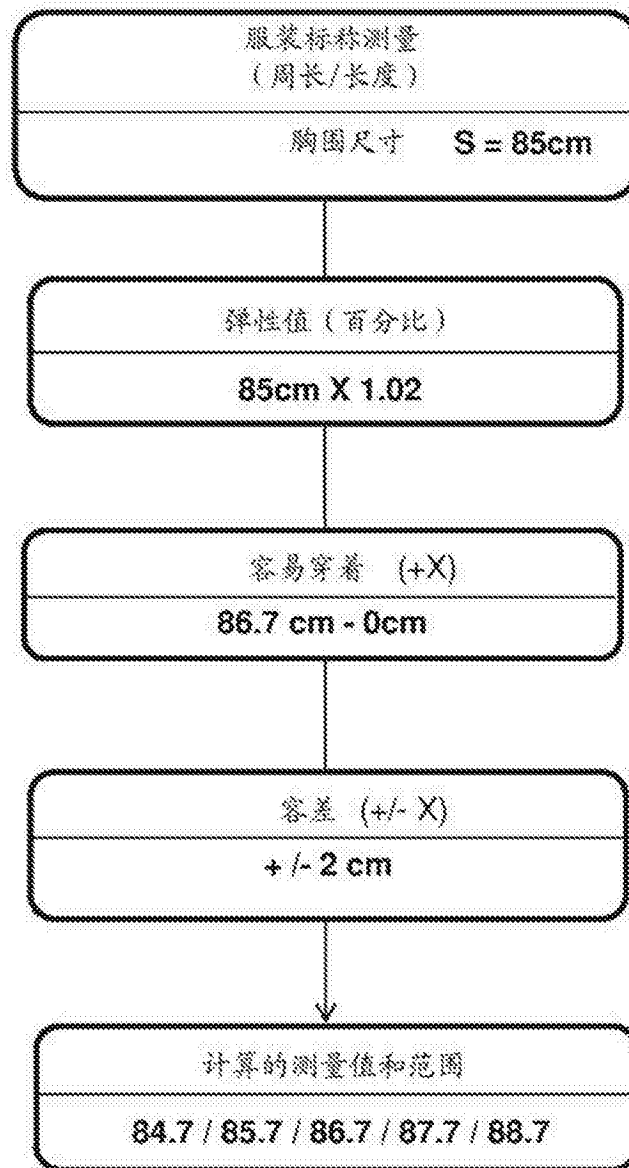


图15

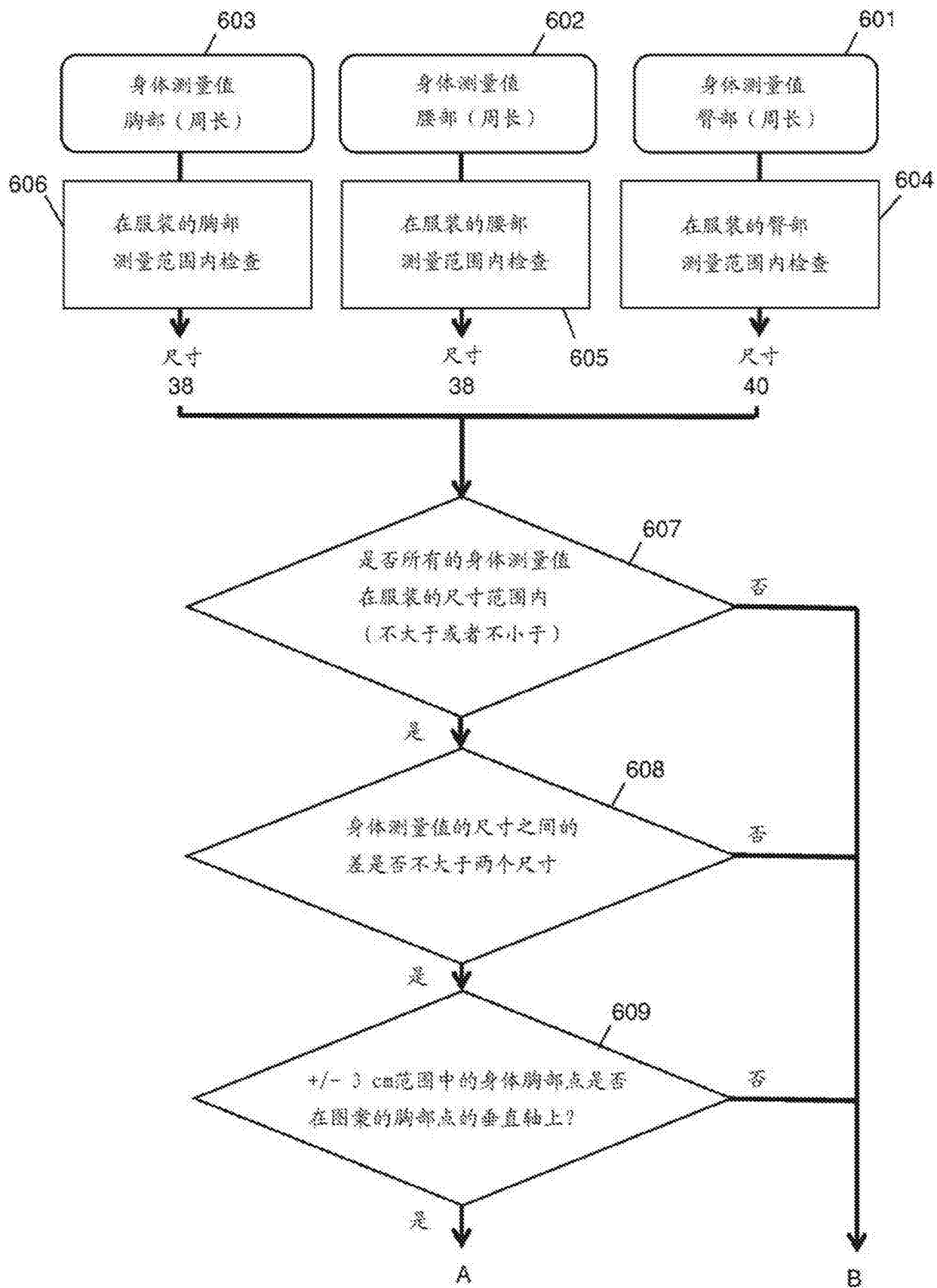


图16

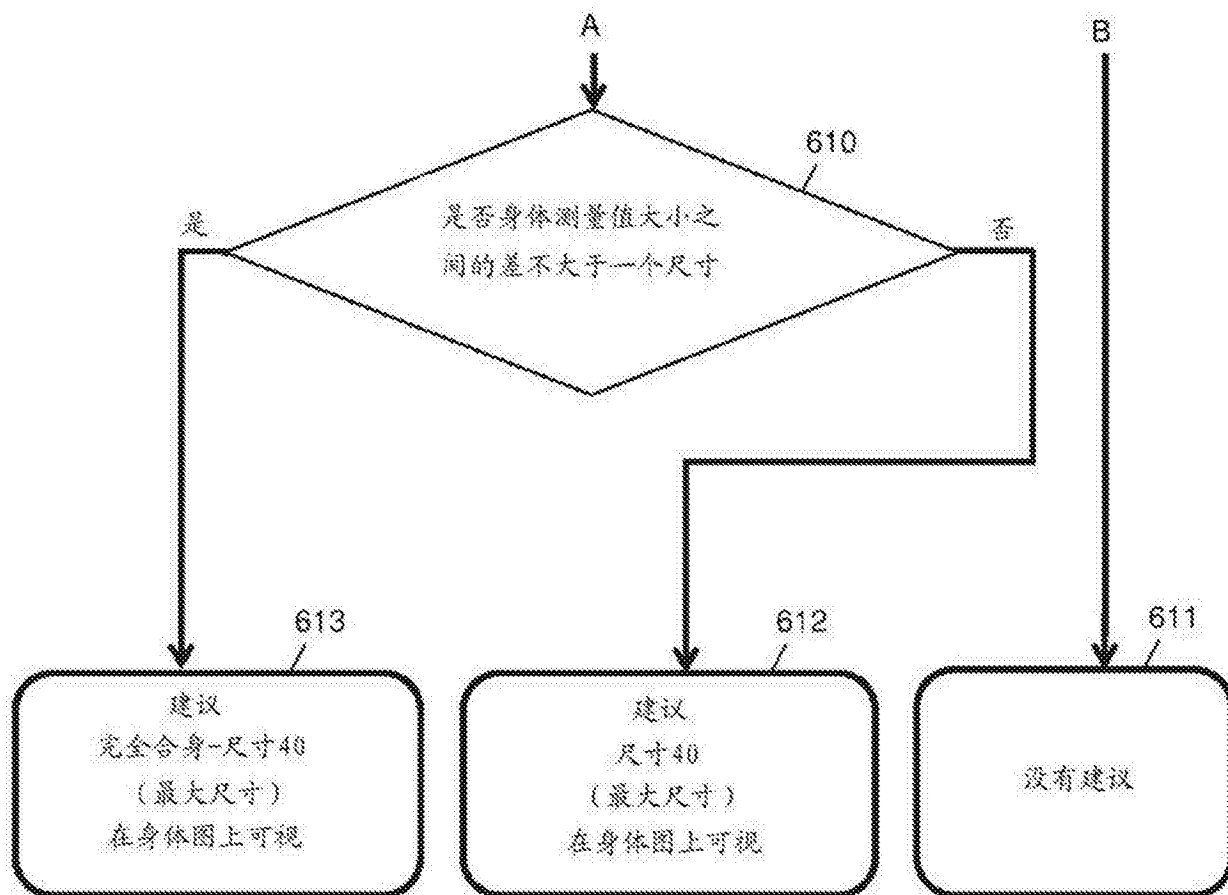


图16 (继续)

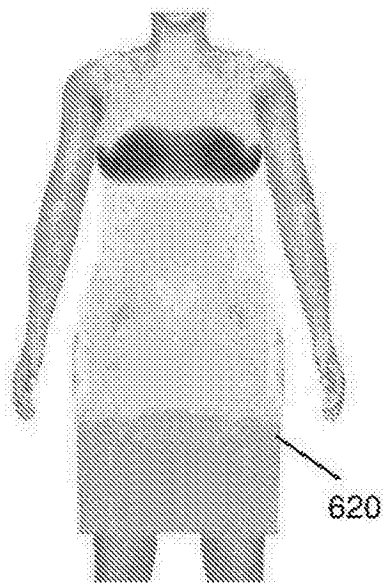


图17