

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)10-1537-07

索引信息: 朱云峰,章毓晋,何永健. 基于图割及动态片结构的3维人脸多视图体重建[J]. 中国图象图形学报,2010,15(10):1537-1543

# 基于图割及动态片结构的3维人脸多视图体重建

朱云峰<sup>1),2)</sup>, 章毓晋<sup>1),2)</sup>, 何永健<sup>3),4)</sup>

<sup>1)</sup>(清华大学清华信息科学与技术国家实验室,北京 100084) <sup>2)</sup>(清华大学电子工程系,北京 100084)

<sup>3)</sup>(西安通信学院,西安 710106) <sup>4)</sup>(西安交通大学人工智能与机器人研究所,西安 710049)

**摘要:**针对3维人脸重建问题提出了一种新颖的多视图体重建方法,以解决目前3维人脸重建方法只适用于小样本集合,大范围推广时精度难以保证的弱点。该方法创新之处在于将基于特征点匹配的重建方法与立体重建方法结合引入到图割优化框架,并应用于3维人脸重建。本文两个重要改进工作是设计动态片结构描述来进行颜色一致性估计以及设计新的动态图结构以去除半个体素尺寸的重建误差。实验中分别采用8张、16张和30张存在亮度变化的人脸多视图图像验证算法。实验结果逼真,同时避免了传统重建方法结果受限于样本集分布的问题。

**关键词:**多视角体重建;图割;3维人脸重建;基于动态片颜色一致性估计;动态图结构

## Multi-view stereo reconstruction of volumetric human face via graph-cuts and dynamic patch structure

ZHU Yunfeng<sup>1),2)</sup>, ZHANG Yujin<sup>1),2)</sup>, HE Yongjian<sup>3),4)</sup>

<sup>1)</sup>(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2)</sup>(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084) <sup>3)</sup>(Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106)

<sup>4)</sup>(Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** In this paper, a novel approach is proposed to reconstruct human face model from multi-view images with volumetric scene representation. This method focuses on improving the reconstruction results without the limit of the representative ability of 3D facial model samples. Our main contribution is to combine feature points based reconstruction and volumetric based reconstruction into the framework of Graph Cuts when applying facial reconstruction. Two considerations contribute to the improvement of final results. First, a dynamic patch based photo consistency estimation is designed to get the value of the photo-consistency constrain. Second, a dynamic weighted graph is constructed in order to avoid half voxel size error. We evaluate the performance on a real dataset, in which multi-view face images (8, 16, about 30) are captured by moving digital camera under changed illumination. The results indicate our approach have significant improvements.

**Keywords:** multi-view stereo reconstruction; graph-cuts; 3D facial reconstruction; dynamic patch-based photo consistency estimation; dynamic graph structure

## 0 引言

3维人脸重建作为非适定问题,目前其求解的

主要想法是引入适当的先验知识来限制3维重建容许的曲面解的集合。应用在人脸重建中的立体视觉方法主要有:从明暗恢复形状(SFS)<sup>[1]</sup>,从运动恢复结构(SFM)<sup>[2-4]</sup>,从轮廓恢复形状(SFC)<sup>[5]</sup>,结构

基金项目:国家自然科学基金项目(60872084)。

收稿日期:2008-11-17;改回日期:2009-06-08

第一作者简介:朱云峰(1981—),男,清华大学电子工程系博士研究生。主要研究方向为基于图像的渲染、人脸表情分析。

E-mail: zhu-yf06@mails.tsinghua.edu.cn。

光<sup>[6]</sup>等。这些方法结合人脸结构的先验知识,减小了稠密重建的误差,从而得到精度较高的人脸模型数据。最常见的人脸先验模型有一般人脸模型<sup>[7]</sup>与基于样本的 3 维形变模型(3DMM)<sup>[8]</sup>。上述先验模型和重建方法的结合是近几年有关 3 维人脸重建文章的主要思路,尤其以从运动恢复结构与 3 维人脸形变模型结合为热点。从运动恢复结构方法建立在短基线假设条件下,它的基础是基于图像空间的特征点匹配。但在匹配过程中,点匹配关系需要在一定视角范围内得到保持,而且不同视角下的目标自遮挡问题也很难建模。基于线形叠加类的 3 维形变模型或基于特征点光滑插值的一般人脸模型虽然在小数据库上取得较好的观察效果,但其广泛推广能力一直未得到证实。激光三角法和结构光方法作为主动 3 维数据获取方法,以其精度高的优点被硬件化<sup>[9]</sup>并应用于 3 维人脸重建,但因硬件成本高,后处理烦琐,很难为普通用户使用。

近年来,除了传统的基于图像空间的方法被用于多视角 3 维稠密重建,基于场景空间的重建框架也得到越来越多的关注<sup>[10]</sup>。目前多视角 3 维稠密重建方法大致可以分为两类:一类是基于图像空间恢复视差图进而融合多幅视差图的方法<sup>[11]</sup>;另一类是基于场景空间的体积法<sup>[12]</sup>。多视图体重建方法属于第 2 类。多视图体重建方法又根据不同优化策略分为两大类:一类是贪婪算法<sup>[13-14]</sup>;一类是基于能量最小化的方法。后者主要有基于变分方法的优化<sup>[15]</sup>与基于图割的组合优化<sup>[16]</sup>的两种分类。由于多视图体重建方法在多视角融合、解决遮挡、融合边缘及特征点方面有较大优势<sup>[10]</sup>,本文方法尝试将该框架引入到 3 维人脸重建问题中将其转化为 3 维分割问题。接着,重点改进了多视图体重建中颜色一致性估计环节,并在采用全局图割优化时改进了图的结构。另外,采用的框架能够方便地将传统方法的稀疏重建特征点信息包含在颜色一致性估计及图割时节点与源和汇的权重设计中。以上 3 个方面的改进以及本文重建方法不依赖 3 维人脸样本数据是本文方法的主要贡献。

## 1 基于图割的多视图体重建

多视图体重建的方法主要有空间雕刻法(space carving)<sup>[13]</sup>、水平集方法(level sets)<sup>[15]</sup>以及基于体积的图割方法(volumetric graph cuts)<sup>[16]</sup>。实质上这

种分类是根据场景空间采用的不同分割优化方法进行归类的。近年来,后两种优化方法在图像分割及体重建方法中逐渐成为主流方法<sup>[10]</sup>。下面首先简单介绍这两类方法的思路。

### 1.1 基于图割的曲面重建方法

首先介绍基于变分优化的重建方法。这类方法将曲面重建定义为寻找最优分割曲面使得定义的能量函数最小,数学描述如下: $S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$  作为曲面的参数表达,3 维重建可以表达为寻找合适函数或曲面  $S$  来最小化能量函数  $\min E; E = \iint_S c(S) dudv$  的变分问题。这类问题的求解可以采用显式和隐式表达两种方式,其中显式表达采用多边形网格描述 3 维曲面,隐式表达基于水平集方法将曲面嵌入到更高一维的曲面函数零水平上。此类方法需要处理复杂的曲面拓扑结构变化及曲面采样点选取问题,并在求解过程采用梯度下降法得到局部最优解。Boykov 与 Kolmogorov<sup>[17]</sup>提出:当  $c(S)dS$  是一个黎曼几何度量时,  $\iint c(S)dS$  同样能采用图割方法进行优化。基于图割的方法在空间中以体素作为节点,将代价函数定义在相邻节点的边上,依靠目标轮廓约束将重建曲面限定在初始表面和终止曲面之间,并将初始表面上的节点与一个假定的源连接,终止表面上的点与一个假定的汇连接,那么寻找最优曲面的过程就可以定义为利用组合优化方法在图中的源和汇之间寻找最小割(如图 1 所示,寻找最小割的过程中最小化代价函数)。另外,读者可通过 Kolmogorov 的主页下载该优化算法源程序<sup>[17]</sup>。

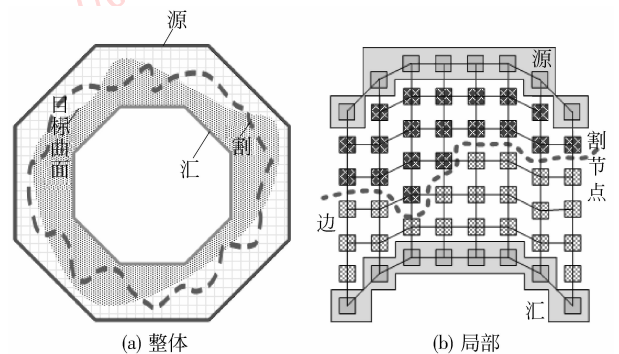


图 1 图割图示

Fig. 1 Illustration of graph cuts

近年来,3 维重建的一个新思路是将图像空间与场景空间相融合。其融合策略可针对不同的输入数据类型进行调整,其限制是人脸同一重建区域至

少同时被两个或以上相机观测到,且该区域的光照变化不能过大。文献[18]虽然已经提及融合的思想,但其自标定、准稠密重建过程采用视频帧,而稠密重建过程采用水平集方法结合采样后的多视角图像。随之而来的一个问题是:当输入的图像本身就是宽基线的多视角图像时,该文的准稠密重建过程就不适用了。此外,基于水平集方法的收敛性仍有待研究。基于上述考虑,本文在体重重建框架下采用图割优化算法并引入融合策略提取最优分割曲面。

### 1.2 基于体重建的 3 维人脸重建步骤

如图 2 所示,体重重建方法分主要 5 个步骤。在将体重重建方法引入到 3 维人脸重建应用过程中,本文的改进工作主要集中在后两个部分。虽然摄像机参数获取及初始化重建对于本文算法也至关重要,但目前已有不少关于这方面研究的文章<sup>[19-20]</sup>,本文不再累述。场景空间的颜色一致性估计是 3 维体空间分割的重点,它将寻找 3 维重建曲面的过程转化为通过颜色一致性描述后的体素空间寻找最优分割面。而采用何种优化算法得到最优曲面则成为另外一个重点。针对这两个重点问题的主要工作如下:在颜色一致性估计时不仅考虑了可见性的约束,而且结合了初始化重建曲面的法向量信息。这一改进工作减小了无关视图对一致性描述的影响,提高了一致性描述的精度。另外一个改进工作集中在 3 维图结构的设计上,一方面需要在计算精度和时间损耗之间寻找一个折中,一方面要能够方便地引入图像空间与场景空间的融合策略。基于上述考虑,接下来本文首先给出基于 Visual Hull 算法<sup>[19]</sup>的初始化重建结果,进而描述本文的两个重点方法。

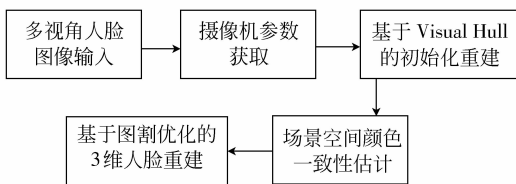


图 2 算法步骤

Fig. 2 Flowchart of the proposed method

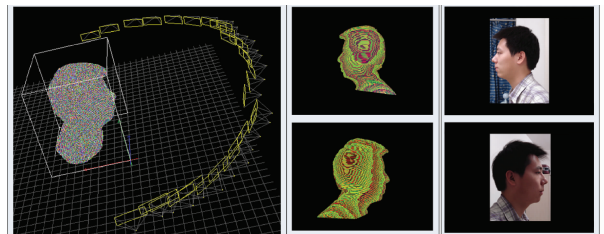
## 2 颜色一致性估计及图割优化算法改进

可视外壳算法 (visual hull)<sup>[19]</sup> 利用了目标的轮廓信息。轮廓信息使重建曲面包含于不同视角下目

标轮廓向空间投影后相交的凸包曲面内 (即可视外壳内)。因此,可视外壳算法被普遍使用在体重重建方法的初始化阶段<sup>[10,16]</sup>。由可视外壳算法得到的初始曲面单元一般采用体素描述,在计算曲面单元法向量时可以利用匹配方体 (matching cubes) 算法<sup>[21]</sup> 将其转换为多边形表达,并根据包含空间某点的所有面片的平均法向量作为该点的法向量。已知初始曲面及其法向量后,将重建工作转化为 3 维曲面分割的一个重要环节就是颜色一致性估计。该步骤的颜色一致性假设条件在空间雕刻算法<sup>[13]</sup> 一文中得到了详细描述,并被广泛采用<sup>[10,15-16]</sup>。

### 2.1 基于动态片结构的颜色一致性估计

在颜色一致性估计之前,首先需要明确可见性这一概念。Visual Hull 算法得到的空间体表面体素并不是在所有观测相机中都是可见的,因此描述该体素在不同视角图像中投影后颜色一致性信息之前,首先要明确该体素在哪些视角图像中是可以观测到的,这就是可见性估计的定义。本文所采用的方法如图 3(a) 所示,当得到目标初始重建结果后,就能够根据相机的内外参数在屏幕上以与真实相机相同的视角观察目标,这时利用 Z-buffer 技术就可以从显存中获取模型在每个视角下的投影图像,将空间曲面单元编号,并将编号编码为 RGB 颜色 (如图 3(b)),从而建立图像与可见曲面单元可见性的对应关系 (如图 3(c))。该对应关系不仅描述了曲面单元在哪些观测相机中可见,而且能够描述其可见强度 (正视时观测强度最大,不可见时观测强度为零,观测强度采用体素在对应视图中不被遮挡的投影点像素个数  $n$  描述,其最大值计为  $n_{max}$ )。实验中本文方法直接从显存中读取初始重建曲面在不同观测视角投影后的分层深度图 (图 3(b)),通过体素编号与其投影颜色的对应关系即可判断某一体素在某视角中是否能观测到,这就给出了可见性估计。



(a) OpenGL 虚拟相机成像 (b) 显存中得到的分层深度图 (c) 对应视角的真实图像

图 3 基于 GPU Z-Buffer 的可见性估计

Fig. 3 GPU Z-Buffer based visibility estimation

上面提到在描述初始重建结果的可见性时本文采用的曲面最小单元为体素(如图 3)。体素描述方式有结构及相邻关系描述简洁等优点,然而在颜色一致性估计时体素在不同视角图像中投影均为不规则形状,这就只能统计一幅视图中的体素投影区域的平均颜色。为了采用更为鲁棒的归一化相关系数(NCC)来描述不同视图中投影面片的一致性,需要对体素进行空间采样。针对上述问题,本文设计动态片结构将体素空间描述局部转换为点集描述,这样能够在多个视图间采用 NCC 描述颜色一致性。动态片结构如图 5 所示。

图 4 和图 5 中  $P$  代表动态片结构(dynamic patch),  $N(P)$  是  $P$  的法向量(也是体素的法向量),  $V$  代表视角方向。在计算颜色一致性时本文选取体素观测强度最大的前 3 个视角,如图 4 中下方 3 个视图,计为  $R(P)$ 。在选择不同视图的个数时应考

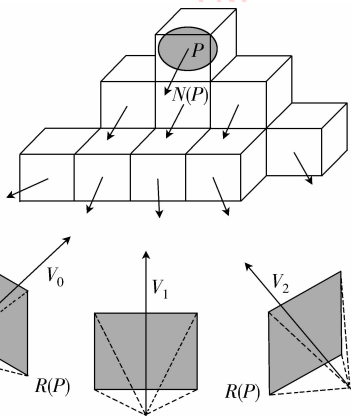


图 4 体素表达

Fig. 4 Voxels description

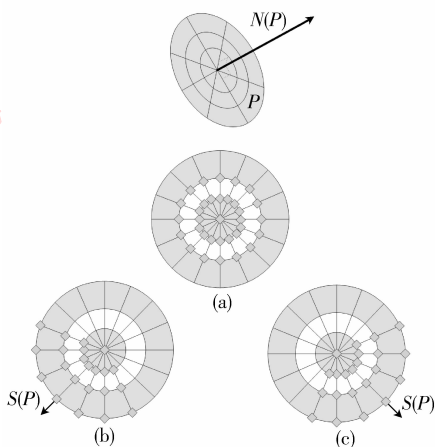


图 5 动态片结构

Fig. 5 Dynamic patch structure

虑 3 方面因素: 1) 若体素只能在两个视图中可见则选取这两幅视图; 2) 若该体素在任何观测视图中都不可见则剔除该体素; 3) 若该体素在大于 3 幅视图中均可见时, 选取体素观测强度最大的前 3 幅视图进行颜色一致性估计。考虑第 3 个因素的原因是为了在更多利用视图信息时减少不相关视图信息影响, 实验中发现选取 3 幅视图在重建效果及运算速度得到均衡。在选择好可见视图后, 利用视角方向及体素的法向量方向计算一致性描述规则如下: 当  $-N(P)$  与  $V$  夹角小于  $30^\circ$  时, 图 5(a) 上的点被激活; 当  $-N(P)$  与  $V$  夹角大于  $30^\circ$  且小于  $60^\circ$  时,  $-N(P)$  与  $V$  两个方向向量构成的平面与动态片  $P$  相交, 其交线方向记为  $S(P)$ , 如图 5 所示, 该交线方向即是圆盘上的一条轴的方向, 此时  $-S(P)$  与  $V$  夹角大于  $30^\circ$  且小于  $60^\circ$ , 该轴向周边的点被激活; 如图 5(b)(c) 所示, 激活点在图中用小方点表示。将激活点集计为  $P$ , 该点集在  $R(P)$  中投影后的像素  $p_{ij}$  集合为  $P_j(j=1, 2, 3)$ ,  $c_j = \frac{1}{|P_j|} \sum_i I_j(p_{ij})$  为视角  $j$  内的片投影像素颜色的均值, 于是

$$NCC(p, R(p)) = \frac{1}{3} \sum_{m \neq l} (\hat{c}_m^T \cdot \hat{c}_l);$$

$$(m = 1, 2, 3; l = 1, 2, 3)$$

其中

$$\hat{c}_m = \frac{c_m}{\|c_m\|}$$

$$c_m = [I_m(p_{1,m}) - c_m, \dots, I_m(p_{n,m}) - c_m]^T$$

式中,  $p_{ij}$  的下标代表第  $j$  幅视图中投影后的点集中第  $i$  个点,  $n$  表示点集中点的个数,  $c_m$  为第  $m$  个视图中所有点的平均颜色(RGB 3 个通道上分别计算),  $I_m(p_{i,m})$  表示第  $m$  个视图中第  $i$  个投影点在图像中的颜色值。归一化相关系数计算出的值域为  $[-1, 1]$ , 为方便后续定义 3 维图结构上的流量, 将颜色一致性描述值平滑映射到  $[0, 1]$ , 映射函数  $\phi(p) = f(NCC(p, R(p)))$  为  $f(x) = 1.0 - \exp\left(-\left(\tan\left(\frac{\pi}{4}(x-1)\right)\right)^2\right) / \sigma^2$ , 此平滑映射函数并不是唯一选择。实验中  $\sigma$  取 0.92, 该值范围在  $(0.8 \sim 0.99)$  较好。通过上述计算可得到初始重建表面体素的颜色一致性估计, 接下来将初始表面向内均匀收缩一层并保持其表面法向量不变继续计算该层的颜色一致性估计, 如此反复向内收缩直至达到指定的收缩层数。在得到收缩范围内所有体素



体素  $v$  的初始法向量: 在初始法向量的小邻域内搜索, 使得观测强度最大的 3 个或 2 个相机内颜色一致性描述达到最大, 此时的法向量即为最终估计。邻域的定义实验中采用简单的球面描述, 即以初始法向量始端为球心, 与初始法向量夹角小于设定角度  $\theta$  的所有空间向量的采样, 即始点相同, 终点在一个部分球面上, 如图 8, 初始法向量为  $N$ , 搜索值为  $N_s$ 。搜索这一步骤之所以放在实验阶段, 是因为它不是必须的算法步骤。但实验中增加该步骤, 可改善实验结果, 但计算损耗也会成倍增大。

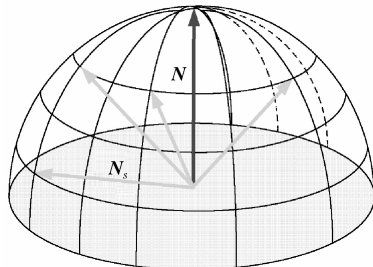


图 8 搜索范围示意图

Fig.8 Illustration of normals search

### 3.2 实验结果及参数

图 9 包括了重建结果的 3 个视角投影图像、目标对象与之相近的视角图像, 图 10 分别采用 30, 16, 8 幅图像重建结果, 表 1 为实验参数。可以看到, 本文方法在光照明显变化情况下, 对于人脸脸颊、头发、人眼、眉毛等区域重建效果是令人满意的。



(a) 对象 A 相机采集图像



(b) 对象 A 利用 34 幅图像重建结果 (170×200×180)

图 9 对象 A 重建结果

Fig.9 Reconstruction results A



(a) 对象 B 相机采集图像 (b) 30 幅图像重建结果 (160×200×210) (c) 16 幅图像重建结果 (160×200×210) (d) 8 幅图像重建结果 (160×200×210)

图 10 对象 B 重建结果

Fig.10 Reconstruction results B

表 1 实验参数

Tab.1 Experiments parameters

NCC 映射系数 $\sigma$	动态片圆环/直径个数	法向搜索角度/半球面径线/纬线个数	收缩层数
0.92	20 / 36	10° / 10 / 10	8
(T-link) $\Gamma_s$ (表层和最里层)	(T-link) $\Gamma_s$ (中间层)	对象 A 重建时间/h	对象 B 重建时间 (8 幅/16 幅/32 幅)/h
8 × 体素大小 三次方	3 × 体素大小 三次方(源) 1 × 体素大小 三次方(汇)	5.6	6.1/ 7.3/ 10.1

## 4 结论

将基于图割优化的体重建方法引入到 3 维人脸体重建中, 改变了目前 3 维人脸重建仅仅利用图像空间和先验知识的局限。本文方法重建效果逼真, 可以采用空间体素、多边形网格等多种方法描述 3 维人脸曲面。本文在颜色一致性描述时引入动态片结构, 从而利用曲面法向量及观测视角信息给出了

更加鲁棒的颜色一致性描述,这点在眼睛、眉毛、头发等重建区域得到验证。在图结构设计中引入了动态新增节点,这样就在不增大空间分辨率情况下减少半个体素的重建误差,同时与单纯增大空间分辨率相比,减小了颜色一致性描述值的计算量。目前,本文方法在大约  $200 \times 200 \times 200$  的空间分辨率下,计算用时在 3 h 左右。增加法向量搜索调整后,计算时间在 7 h 左右(CPU 2.8G, 2G 内存)。用时可能是本文方法的不足,但基于空间体重建的框架,耗时最大的一致性估计算法模块是可以并发执行的,因此该方法利用 GPU 及多核处理器的潜力是巨大的。另外,目前 3 维人脸重建的最大问题在于实验能否在大范围推广时仍然保证重建精度的问题,本文方法是解决这一矛盾的一个有益尝试。后续将研究人脸在时间轴上动态变化(表情变化)情况下,3 维人脸的重建问题,这也将为 3 维人脸表情动画及人脸表情分析方面的研究引入新的思路。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Dovgand R, Basri R. Statistical symmetric shape from shading for 3D structure recovery of faces [ C ] // Proceedings of European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer, 2004:99-113.
- [ 2 ] Zhang Z Y, Liu Z C, Adler D, et al. Robust and rapid generation of animated faces from video images: a model-based modeling approach [ J ]. International Journal on Computer Vision, 2004, 58(2):93-120.
- [ 3 ] Xin L, Wang Q, Tao J H. Automatic 3D face modeling from video [ C ] // Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA: IEEE, 2005: 1193-1199.
- [ 4 ] Dimitrijevic M, Ilic S, Fua P. Accurate face models from uncalibrated and ILL-Lit video sequences [ C ] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE, 2004: 1034-1041.
- [ 5 ] Wang C H, Yan S C, Li H, et al. Automatic, effective, and efficient 3D face reconstruction from arbitrary view image [ C ] // Proceedings of Advances in Multimedia Information Processing 5th Pacific Rim Conference on Multimedia. Berlin, Germany: Springer, 2004: 553-560.
- [ 6 ] Zhang L, Snavely N, Curless B, et al. Spacetime faces: high resolution capture for modeling and animation [ J ]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3):548-558.
- [ 7 ] Chowdhury A R, Chellappa R. Face reconstruction from video using uncertainty analysis and a generic model [ J ]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 91(1-2):188-213.
- [ 8 ] Blanz V, Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces [ C ] // Proceedings of Computer Graphics Proceedings. New York, NY, USA: ACM Press, 1999:187-194.
- [ 9 ] Cyberware. Model 3030 Color 3D Scanhead [ EB/OL ]. (1999-08-08) [ 2009-06-08 ]. <http://www.cyberware.com/products/scanners/3030.html>.
- [ 10 ] Seitz S M, Curless B, Diebel J, et al. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms [ C ] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, NY, USA: IEEE, 2006:519-526.
- [ 11 ] Merrell P, Akbarzadeh A, Wang L, et al. Real-time visibility-based fusion of depth maps [ C ] // Proceedings of IEEE 11th International Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA: IEEE, 2007:1-8.
- [ 12 ] Seitz S M, Dyer C R. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring [ J ]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(2):151-173.
- [ 13 ] Kutulakos K N, Seitz S M. A theory of shape by space carving [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2000, 38(3): 199-218.
- [ 14 ] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis [ C ] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE, 2007:1-8.
- [ 15 ] Labatut P, Keriven R, Pons J P. Fast level set multi-view stereo on graphics hardware [ C ] // Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission. Washington, DC, USA: IEEE, 2006: 774-781.
- [ 16 ] Vogiatzis G, Torr P H S, Cipolla R. Multi-view stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(12):2241-2246.
- [ 17 ] Boykov Y, Kolmogorov V. Computing geodesics and minimal surfaces via graph cuts [ C ] // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA: IEEE, 2003:26-33.
- [ 18 ] Lhuillier M, Quan L. A quasi-dense approach to surface reconstruction from uncalibrated images [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3): 418-433.
- [ 19 ] Laurentini A. The visual hull concept for silhouette-based image understanding [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(2):150-162.
- [ 20 ] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [ M ]. Cambridge University Press, 2003.
- [ 21 ] William E L, Harvey E C. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm [ J ]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):163-169.