

一种基于多重影像实现真实感人脸三维重建的方法

侯文广¹, 陈大为², 丁明跃¹

(1. 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 香港理工大学工业中心, 香港九龙红磡)

摘 要: 基于立体视觉的基本原理, 本文提出通过投影不同类型的纹理实现真实人脸几何重建的方法, 第一类条纹状的纹理初步建立影像间的视差格网, 为第二类精细纹理影像的匹配提供预测值, 从而能够快速得到分布均匀且密集可靠的同名点. 完成几何重构的基础上, 提出基于外接球面实现纹理重建的方法, 借助于球面坐标进行纹理影像的选取和颜色处理, 减少了重建后纹理颜色的阶跃性变化, 达到了匀光的目的. 开发了专门的硬件系统, 实验表明本文的算法简单, 能够取得良好的重建效果.

关键词: 人脸重建; 三维重建; 影像匹配; 纹理映射; 立体视觉

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 04-0661-06

A Novel Way Achieving 3D Reconstruction of Actual Human Face Using Multi Images

HOU Wen-guang¹, CHAN Tai-wai², DING Ming-yue¹

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Image Processing and Intelligent Control Key Laboratory of Education Ministry of China, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Industrial Centre, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: A novel way achieving geometrical reconstruction of actual human face through projecting two types of texture on face in short time is advanced. The first type texture is stripe which is used to establish parallax grid between images. Taking into account of its results, the second type projecting texture is used to match by virtue of its abundant traits. After realizing geometrical reconstruction, the paper provides a general way about achieving actual texture reconstruction by the outer spherical surface surrounding object. In order to uniform color, it deals with parts of images in conjunct region and makes the color change meeting a certain function on condition of keeping their original information mostly. Results show this way can improve reconstruction quality and decrease complicity of algorithm.

Key words: human face; 3D reconstruction; image matching; texture mapping; stereoscopic vision

1 引言

与人体头面型特征相关的三维信息为众多研究领域提供了数据支持, 国内外的许多学者从各自的研究领域出发, 提出了很多人脸三维重建的方法, 大体可以分为基于几何的方法和基于影像的方法两类^[5]. 作为一种非接触性的测量手段, 基于影像的重建方法能够在瞬间获取被摄目标的几何和纹理信息. 故对于人体头面部此类状态不稳定目标的重建而言, 具有特殊的优势.

利用人脸的多幅影像, 通过提取的人脸轮廓对通用模型进行修正, 在最佳匹配的意义完成人脸的三维建模是基于形状匹配变形模型实现重构的基本思路^[12], 该

方法对通用人脸模型的依赖性强, 修正模型的复杂性和影像空间位姿估算的困难制约着其实用性. 基于熟知的立体视觉方法, 通过计算不同视角影像中同名像点的视差来恢复目标的几何形状, 具有严密的解析理论, 但需要有效解决匹配的问题. 由于匹配本质上是一个病态的问题, 主要原因是成像过程中失去了目标的深度信息, 同时也受到畸变、噪声等因素的影响. 基于先验知识的匹配就是运用附加的假设或约束将匹配从一个病态的问题转化为良性的问题. 尽管核线约束关系理论上可以将二维影像的匹配转换为一维的搜索过程, 但仍然没有从本质上改善匹配的难度. 文献[3]提出采用多基线的方法来解决影像匹配的问题, 极大地增加了获取影像的

收稿日期: 2007-12-02; 修回日期: 2007-12-20

基金项目: 中国博士后科学基金 (No. 20070410282); 国家自然科学基金 (No. 50478058)

数量,适用条件有限.文献[1]采用人工建立影像之间的对应网格,再基于统计方法进行稠密点的匹配,然后建立空间数据的三角网格模型,并实现了简单条件下的纹理重建.该文章较为完整地论述了基于多重影像的真实感三维人脸重建的方法,但实际需要人工给定匹配的初值来提高其成功率;而且没有提供需要使用多幅纹理影像才能完成纹理重建的方法.

考虑到匹配的困难在于视差网格的建立,本文提出通过快速投影不同类型纹理实现几何重建的方法,第一类纹理将影像的视差划分为条带,第二类纹理进行影像匹配时要利用第一类影像提供的结果,能够在提高匹配成功率的条件下不增加匹配算法的难度;在实现空间数据的三角剖分后,提出基于外接球面进行纹理映射的方法,具有良好的通用性.鉴于篇幅的限制,关于投影纹理的详细参数、影像匹配、利用同名像点计算目标点的空间坐标和三角剖分具体算法等内容,不做详细的论述.

2 基于不同的投影纹理实现几何重建

实现缺乏纹理目标的三维重建,一般采用基于投影器和数码摄影机的结构光方法.该方法中通常采用两类纹理,如图1所示,一种是黑白相间的条纹,另一种是单线条纹.利用投影器将黑白条纹投影到目标上,获取的影像带有明显的条纹状纹理,与投影器中的条纹影像构成三维重建所需要的立体像对.将单线条纹投影到目标中,当该直线从左至右每隔一定的间隔移动时,利用摄影机获取目标的序列影像,其效果相当于一组投影线扫过目标的整个表面,可以得到类似于投影黑白相间条纹的效果,尽管可以提高自动化的程度,但影像数量相当大且作业时间长.在基于黑白相间条纹的方法中,由于条纹有一定的宽度,会失去重建目标的细节信息;同时也由于目标表面形状的变化而引起影像中的曲线条纹出现重叠、断裂和交叉等现象,增加了同名线匹配的难度.对于单线条的方法而言,数据处理和对应点的搜索相对容易,且通过控制线条移动的长度可以实现比较精细的重建.



图1 结构光投影纹理的形式

本文的研究对象是人脸部的三维重建,由于受到作业时间的限制和重建精度的要求,采用了快速投影两类纹理的方法,第一类是彩色相间的条纹,第二类是精细纹理,分别投影到模特儿头部的影像如图2所示.对第一类影像进行匹配后,可以得到沿条纹方向密集的同名

点,而沿核线方向则相对较少,同名点的分布并不均匀,但可以将影像间的视差划分为条带,若已知核线条件,就可得到视差格网;由于获取两类影像时保持摄影机之间及目标的相对空间关系不变,于是也得到第二类影像的视差大致分布图,由于第二类影像的纹理信息比较丰富且基本可以确定视差的范围,故影像匹配的搜索速度快、可靠性强、成功率高.显然该方法结合了结构光和一般立体视觉的优点,且采用了彩色的条纹,影像处理中使用颜色信息作为判据,而同一颜色的条纹出现交叉重叠的现象相对较少,降低了同名线的搜索难度.缺点是该方法要求能够完成快速的数据获取,增加了硬件的要求.

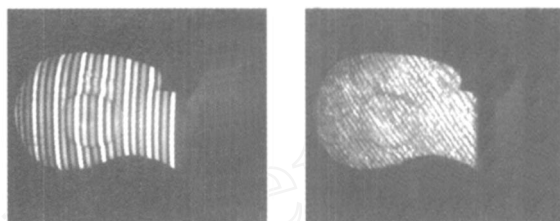


图2 投影条纹和精细纹理的影像

对于第一类影像的处理就是要提取彩色条纹的边缘并确定影像之间的同名线.本文首先提取影像中红绿蓝各个波段的影像,分别进行二值化、边缘提取、细化算法及边缘跟踪等处理,然后再将结果合成.由于提取边缘的主要目的是大致确定影像的视差范围,重点并不强调定位精度,一般的边缘提取算法均可适用.由于实际图像受到噪声、灯光及背景颜色的影响,少量的人工交互编辑可能是需要的.基于核线约束关系对第二类影像进行匹配时,判断左影像特征点位于第一类影像的哪两条特征线之间,然后确定在右影像中对应的同名区域,于是得到该特征点的预测区域.由于视差带的划分比较密,从而得到预测区域的范围很小.再基于最小二乘匹配的理论和方法,精确得到同名点的坐标.计算得到空间点坐标后,进行去噪和三角剖分,构建的 TIN (Triangulated Irregular Network, 不规则三角网) 是进行纹理映射和三维量测的基础.

3 纹理重建

纹理重建就是将目标的真实影像与三维坐标信息对应起来,构成生动具有真实纹理的逼真物体.实现目标的几何重构后,纹理影像的获取实际是对重构的点云进行多幅影像的摄取过程,判断空间点所对应的纹理影像并计算其对应的像点坐标,完成纹理映射后就实现了目标的纹理重建.

3.1 纹理坐标的获取

立体视觉的一般解算过程是依据摄影机的成像模型,在获取摄影机内外参数的情况下,根据影像的同名

点坐标,计算对应目标点的空间坐标.由于几何重建所使用的摄影机和采集纹理的摄影机可能不同,纹理采集的摄影机仅在已知其内外参数的情况下对目标摄影,而某个空间点在这幅纹理影像上的坐标一般是未知的.此时就是计算空间点坐标在实际纹理影像中的像点坐标 (x, y) ,该过程就是求解光线束和影像的交点.

对一幅纹理图像而言,在计算空间点的影像坐标时,如果所有的目标点都参与计算,这不符合正常的映射关系,因为只有一部分点是可见的,其余的点由于遮挡的原因不会成像,而且某些可见的点也可能更宜采用相邻影像上的纹理,如何判断某个三维点到底对应哪一幅图像的纹理坐标,本文提出基于参考球面的方法.如图3所示,首先是将空间点的三维坐标转换为球面坐标,此球面是套合整个目标的最小的外接球,球心为所有三维空间点的重心,并设定其坐标系与物体的空间坐标系一致.通过计算点云的重心到空间点的射线与球面的交点,可以得到每个点的球面坐标,此时每个点不但有一个唯一的空间坐标,而且对应唯一的经纬度坐标(物体的表面为凸曲面的情况),表示为 (B, L) , B 角的范围为 $0 \sim 360^\circ$,而 L 角的范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$.球面坐标主要用于纹理影像的选择和颜色的内插处理.

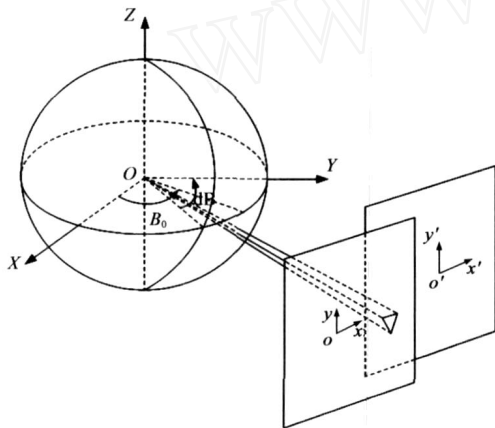


图3 纹理坐标的获取过程

纹理映射之前,遍历 TIN 中的三角形,计算球心到三角形三个顶点的射线,如果三条射线仅与某个纹理影像的平面有交点,则可以确定了该三角形对应的纹理坐标;如果三条射线至少与两个纹理影像的平面有交点,则该三角形对应于纹理影像的公共区域,应该进行纹理的内插处理;如果三条射线中至少有一条仅与一个纹理影像的平面有交点,而其余射线与两个或者以上的影像相交的情况时,则该三角形中对应于公共区域的纹理应该内插计算得到,而其余部分则直接取对应影像中的纹理.当然,其前提是纹理影像之间有一定的重叠度,不会出现三条射线分别与不同的纹理影像相交的情况.在计算空间点的影像坐标时,需要注意影像的像幅大小,判断各条射线与影像平面的交点是否落在其范围内.

3.2 基于 OpenGL 进行纹理映射

OpenGL 是美国 SGI 公司推出的一套开放式的三维图形软件接口标准.由于 OpenGL 的透视投影成像过程与摄影机的成像过程本质上是一致的,这就是准确地实现纹理映射的基础. OpenGL 提供了许多封装好的函数,使得这一过程变得十分模块化.基本步骤包括:定义纹理,控制滤波,说明映射方式,给出顶点纹理坐标和几何坐标,绘制场景等过程.通过 3.1 可获取 TIN 中各个三角形的顶点的纹理坐标,从而建立各三角形的纹理坐标和几何坐标之间的对应关系,容易实现纹理映射的过程.

3.3 颜色处理

由于整个目标的纹理由多个角度的摄影机所采集,每个角度所拍摄目标的范围、形状和背景不可能完全相同,造成了目标的同一个区域在不同影像上的灰度会出现明显的差异,如果直接完成纹理映射,则会出现明显的阶跃性边缘,如图4中的左图所示.作为过渡区域的纹理特征,不论是使用左影像还是右影像,总会使得过渡区域边缘存在颜色变化明显不连续的情况.在一般的情况下,此种颜色的局部差异不会对三维建模结果产生严重的影响,但是在作为一些特殊用途的时候,颜色的局部差异会造成视觉的不适和判断的错误.因此,有必要进行颜色的过渡处理,通常的处理方法是根据摄影环境的条件,利用色彩学的原理对每幅影像分别匀光处理,会造成一定的影像失真,而且有时效果并不理想.为了尽量保留原始的颜色信息,本文采用了仅对影像之间的重叠区域进行灰度内插处理的方法.

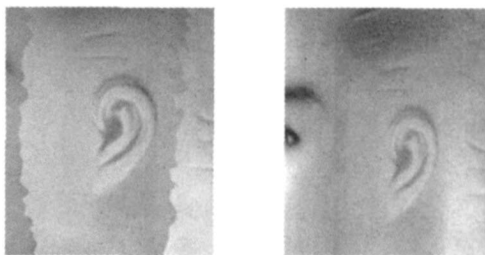


图4 纹理映射后颜色的阶跃变化和平缓变化

过渡区域颜色匀光问题也可从 TIN 出发,对每个三角形中的颜色进行调整,使得过渡区域中的三角形中像素灰度有一个渐进的变化,从而达到匀光的效果.本文采用的内插算法思想是:对空间点的球面坐标进行判断,若空间点的经纬度坐标与左影像主点对应的坐标差异越大,则左影像对此点灰度影响的权重越小,而右影像对此点灰度的影响越大;反之,则权重随之变化.

若选择两幅纹理影像,设两幅影像近似与坐标系的 Z 轴平行且像主点近似位于 XOY 平面内,计算纹理影像位于重叠区域边缘两个顶点的球面坐标,从而得到 4 个点的经纬度值.考虑其经度坐标,用 B_1, B_2, B_3, B_4 表

示,若 $B_1 > B_2 > B_3 > B_4$, 则可得过渡区域的中央经度为 $B_0 = (B_2 + B_3)/2$, 过渡区域的大小为 $dB = B_2 - B_3$. 然后遍历各个三角形, 根据顶点的经纬度坐标判断是否位于过渡区域.

若某个三角形位于过渡区域, 则该三角形对应纹理的颜色需要处理. 由于 TIN 对左右两幅图像的约束是显而易见的, 左右两幅影像上的同名像点一定对应于 TIN 中某个三角形中的一个点, 位于过渡区域的空间三角形一定对应于两幅影像中的三角形. 设纹理影像的内外参数均是已知的, 因此影像上任何一点在 TIN 中的位置也是可以计算得到. 设某个三角形的顶点坐标是 $(X_i, Y_i, Z_i) \ i = 1, 2, 3$, 通过共线条件关系计算得到对应在两幅纹理影像中的像点坐标分别为 $(x_i, y_i), (x_i, y_i), i = 1, 2, 3$, 则利用公式(1)可以计算得到 TIN 中三角形与其对应的两幅影像中的三角形之间的变换系数 $a_1, a_2, \dots, c_2, c_3$ 和 $a_1, a_2, \dots, c_2, c_3$.

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

求解得到过渡区域三角形顶点对应的影像坐标后, 就需要进行灰度的内插计算. 以左影像为基础, 遍历三角形中像点坐标 (x, y) , 根据公式(1)计算对应的空间点坐标, 表示为 (X, Y, Z) , 根据公式(2)计算右影像中对应的同名点 (x, y) , 该同名点位于右影像中对应的三角形内.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

计算空间点 (X, Y, Z) 对应的球面坐标 (B, L) . 根据公式(3)计算与过渡区域左边界的夹角.

$$= \left(B - B_0 + \frac{dB}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{2/dB} \quad (3)$$

然后按照公式(4)计算该点内插后的灰度值:

$$\begin{cases} G_3(x, y) = G_1(x, y) + \sin \cdot (G_2(x, y) - G_1(x, y)) \\ G_3(x, y) = G_2(x, y) + \cos \cdot (G_1(x, y) - G_2(x, y)) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $G_3(x, y)$ 为进行内插后的像素的灰度值, $G_1(x, y), G_2(x, y)$ 为左右同名点的灰度, 当 $G_2(x, y) > G_1(x, y)$ 时, 按正弦规律变化; 否则, 按余弦规律变化, 对过渡区域的每个三角形内的每个像素按照此规律进行处理.

如果将上述的影像称为左右影像的话, 则当两幅影像主点对应的纬度变化显著的话, 则称为上下影像. 采用与上述类似的方法, 根据过渡区域的纬度坐标进行灰度的内插处理, 再进行纹理映射, 原来明显的阶跃性边

缘已经被平滑掉了, 得到的是一个灰度平缓变化的结果, 如图4中的右图所示. 对于彩色的纹理影像而言, 对其各个波段的数据分别进行相应的处理, 再合成纹理影像, 可以达到匀光的目的.

4 试验与分析

为实现人头脸部的三维重建, 香港理工大学工业中心专门制作了如图5所示的硬件平台. 该系统选用了多台数码摄影机和投影仪, 部分摄影机用于获取目标的几何信息, 另一部分用于纹理重建. 主要的系统硬件有: 可 360° 旋转的三维控制场, 用于测量各个摄影机的内外参数; 投影各种纹理的投影仪; 数码摄影机; 灯光; 控制器; 计算机; 支架等.



图5 三维重建的硬件平台

在对目标进行摄影之前, 首先利用可 360° 旋转的三维控制场按照空间后方交会的算法获取各个摄影机的内外参数, 摄影机的空间参数在同一的空间参考系中. 在完成求解摄影机空间参数之后, 始终保持摄影机之间的空间位姿不变. 控制器具有实现多个摄影机同步、摄影机与投影仪同步及快速摄取多幅影像的功能.

4.1 模特儿头部的重建

将塑料制作的模特儿置放于平台中, 然后开启投影仪, 分别投影条纹状的纹理和精细纹理, 在投影仪开启的同时, 使用摄影机快速获取带投影纹理的影像, 然后关闭投影仪, 再获取其真实的纹理影像, 整个作业时间小于1秒, 摄影机的分辨率为 $1280 \text{ 像素} \times 1024 \text{ 像素}$. 按照本文的方法实现重建, 剔除噪声效果并进行三角剖分后的效果如图6所示, 完成纹理映射和颜色处理后的结果如图7所示, 重建效果十分逼真.

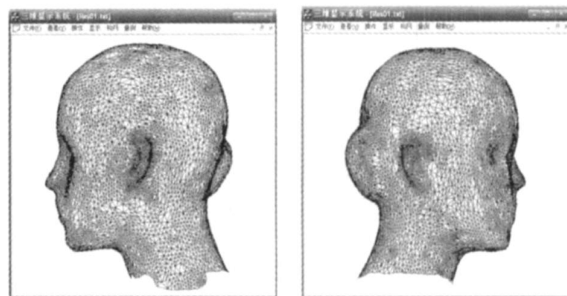


图6 模特儿头部点云三角剖分的结果

基于 OpenGL 的原理, 借助于模特儿头部的真实纹理理论上可以实现头部全部点的内插计算. 在重建的三

维图上,量测部分的特征距离(如眼角、嘴唇等特征点之间的空间距离),然后使用游标卡尺在实物上也量测同样的特征点距离,比较二者的差,估算重建点位的精度优于 1mm.

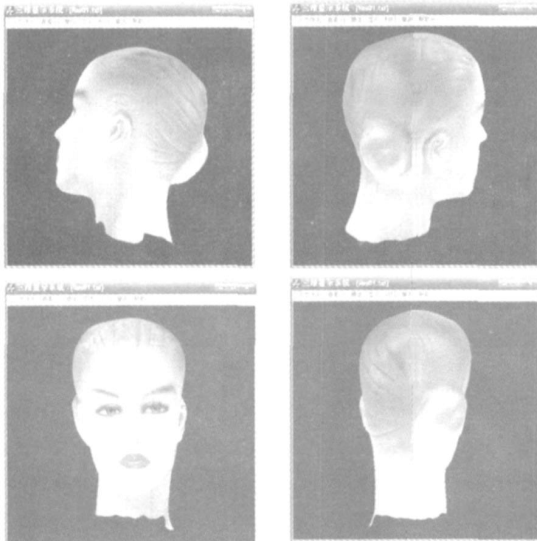


图 7 纹理映射后模特儿的三维效果图

4.2 真实人脸的重建

基于本文中提出的方法重建真实的人脸模型,利用



图 8 人脸的纹理影像



图 9 纹理映射后的真实人脸三维效果图

该硬件平台,使用摄影机的分辨率为 2592 像素 \times 1944 像素.在获取人脸表面空间点云后,进行噪声点的剔除和三角剖分,然后使用如图 8 所示的人脸真实影像进行纹理的重建,图 9 是真实人脸重建后的三维效果图.

5 结束语

本文提出通过投影两类纹理实现人脸几何重建的方法,有效解决影像匹配难题.提出了基于外接球面进行真实纹理重建的思路,实现了基于参考球面的过渡区域颜色处理方法,达到了匀光处理的效果并尽量保持了原始影像的颜色信息.尽管该方法增加了硬件的要求,但其技术成熟且成本不会很高.相信该方法对其它物体的三维重建具有重要的参考意义.

参考文献:

- [1] 梅丽,鲍虎军,郑文庭,等.基于实拍图像的人脸真实感重建[J].计算机学报,2000,23(9):996-1002.
MEI Li,BAO Hujun,ZHENG Wen-ting,et al. Realistic reconstruction of human face based on images[J]. Chinese J Computers,2000,23(9):996-1002. (in Chinese)
- [2] 胡永利,尹宝才,谷春亮,等.基于形变模型的三维人脸重建方法及其改进[J].计算机学报,2005,28(10):1671-1679.
HU Yong-li,YIN Bao-cai,GU CHUN-liang etc. 3D face reconstruction based on the improved morphable model[J]. Chinese J Computers,2005,28(10):1671-1679. (in Chinese)
- [3] 张祖勋.数字摄影测量与计算机视觉[J].武汉大学学报(信息科学版).2004,29(2):1035-1039.
ZHANG Zu-xun. Digital photogrammetry and computer vision[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2004,29(2):1035-1039. (in Chinese)
- [4] 侯文广.基于普通数码相机实现三维重建的应用研究[D].武汉:武汉大学,2006.
HOU Wen-guang. Research on 3D reconstruction based on ordinary camera [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese)
- [5] Noh J,Neumann U. A survey of facial modeling and animation techniques[R]. Los Angeles, California:University of Southern California,1998,Technical Report:99-705.
- [6] Fua P. Regularized bundle-adjustment to model heads from image sequences without calibration data[J]. International Journal of Computer Vision,2000,38(2):153-171.
- [7] Lhuillier M,Quan L. Match propagation for image-based modeling and rendering[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(8):1140-1146.
- [8] Koikkalainen J,Lotjonen J. Reconstruction of 3-D head geometry from digitized point sets:an evaluation study[J]. IEEE Trans on Information Technology in Biomedicine,2004,(8):377-

386.

- [9] Brown M, Szeliski R, Winder S. Multi-image matching using multi-scale oriented patches [J]. IEEE Trans on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, (1): 510 - 517.

作者简介:



侯文广 男, 1974 年 7 月生于山西平遥, 2006 年获武汉大学博士学位, 现在华中科技大学图像识别与人工智能研究所从事博士后研究工作, 研究方向为三维重建、数字摄影测量和计算机视觉. E-mail: houwenguang99@163.com

- [10] X Li, H Zha. Realistic human head modeling with multi-view hairstyle reconstruction [A]. Proceeding of 3DIM '05 [C]. Ottawa: IEEE Computer Society Press, 2005: 432 - 438.

陈大为 男, 1950 年 4 月生于香港, 1998 年获香港理工大学博士学位, 主要从事工业测量和三维重建的研究工作.

E-mail: ictwchan@inet.polyu.edu.hk

丁明跃 男, 1961 年 5 月生于湖北麻城, 1988 年 12 月获华中科技大学博士学位, 现为华中科技大学特聘教授, 博士生导师, 长期从事图像处理、模式识别和计算机视觉等领域的科研工作.

E-mail: myding@mail.hust.edu.cn

www.cnki.net