

文章编号: 0253-2239(2010)10-2884-07

条纹边界编码的动态 3D 重建及流水建模

郭继平 彭翔 刘晓利 李阿蒙 殷永凯

(深圳大学光电工程学院教育部光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 提出一种基于彩色条纹边界编码的动态三维重建及流水式三维建模的方法,通过定位隐边界,消除隐边界对边界跟踪的影响,减少错误数据,提高扫描效率,实现了对运动物体深度数据的动态获取。进而,提出一种基于标志点匹配的流水式三维建模方案并给出建模过程中的视点规划方法,由此提高了匹配精度和匹配效率,以最少的单面数据完成了建模过程。实验证实了此方法不仅可以更快更精确地重建出单面深度数据,而且可以自动、快速完成深度数据间的匹配,得到更高的匹配精度和效率,实现了流水式三维建模。

关键词 图像处理; 三维测量; 流水式三维建模; 条纹边界编码; 视点规划

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2884

Dynamic 3D Reconstruction and Pipelined 3D Modeling Based on Stripe Boundary Encoding

Guo Jiping Peng Xiang Liu Xiaoli Li Ameng Yin Yongkai

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Education Ministry of China,

College of Optoelectronics Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract An approach for dynamic 3D shape acquisition of moving object and pipelined 3D modeling is proposed. Based on a brief review of previously reported methods a modified sensor prototype to realize the proposed approach is designed, which relies on color stripe boundary encoding. By locating the ghost boundary and removing its influence on boundary tracking, it is possible to reduce the erroneous range data and improve the scanning efficiency. Moreover, an efficient method for pipelined 3D modeling based on the registration using markers is proposed. An interactive view planning method in the modeling is also presented, leading to an improved accuracy and efficiency for registration and resulting in a modeling process with minimum range images. Experiment results show that the proposed approach can not only reconstruct the range image of single viewpoint accurately, but also automatically register the range images from different viewpoints, achieving 3D modeling in a pipeline mode.

Key words image processing; 3D measurement; pipelined 3D modeling; stripe boundary encoding; view-planning

1 引言

三维数字成像技术越来越受到各方面的重视和应用^[1~5],其中动态获取运动物体三维几何信息并实现流水式三维建模具有重要意义,例如动态物体三维数字成像和三维视频序列的生成等。动态获取

物体深度图像和流水实现三维建模包含两个关键技术:1)需要有效的编解码方案,实现对运动物体深度图像的动态重建;2)需要有效地对深度图像数据动态匹配的方法,快速实现不同时刻深度数据间的自动匹配,从而得到运动物体的整体三维模型。目前

收稿日期: 2009-11-06; 收到修改稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60775021, 60907005)、深圳市科技计划项目(200734)、深圳大学科研项目(000018)和中国博士后科学基金(200902334)资助课题。

作者简介: 郭继平(1985—),男,硕士研究生,主要从事三维数字成像与造型等方面的研究。E-mail: puyegjp@gmail.com

导师简介: 彭翔(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像与造型、光学测试技术和光学信息处理等方面的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

对动态三维重建方法的研究已有报道。文献[6]对近年来的提出的动态三维重建的编码方法做了较为全面的综述。对运动物体三维重建而言,设计编码方案时应尽量减少所需编码图案数量以满足动态重建的要求。为此,基于单幅编码图的动态三维重建方法被提出,例如,Zhang 等^[7]提出的彩色结构光编码方案,Quiroga 等^[8,9]提出的自适应结构光方法,Pan 等^[10,11]提出的彩色相移方案等。另外一个途径是设法提高系统投影采集速度,使得在投影多幅编码图的时间间隔内物体近似不动,如 Zhang 等在彩色相移技术基础上,通过改进硬件和高速采集的方法实现了对运动或变形物体三维数据实时获取,但这种技术途径对硬件设备的要求较高^[12,13]。上述方法都有可能实现对运动物体三维几何信息的动态获取,但这些方法都尚未涉及运动物体深度图像的匹配问题。Hall-Holt 和 Rusinkiewicz 提出基于时空相关性的黑白条纹边界编码方案^[14,15]。该方法生成四幅黑白条纹图,利用各幅条纹图的边界和它们在时间维上的组合共同实现编码。在解码时先进行边缘提取得到四幅编码图的子边界,然后在相邻编码图之间连续跟踪边界三次,得到由四个子边界组成的最终边界,进而由四个子边界编码共同组合得到最终的边界编码,通过三角测量原理实现对运动物体深度数据的动态获取,最后通过迭代最近点(ICP)方法^[16]对各时刻深度数据进行匹配得到最终三维模型。该方法所需要的四幅编码图在时间和空间上必须是相关的,通过边界跟踪实现解码和动态三维重建。

值得注意的是,条纹边界编码方法在获取运动物体深度数据的同时还具有匹配不同时刻深度图像数据的潜力,即具有流水实现三维建模的潜力。但该方法存在以下问题:1)由于条纹中存在隐边界,使得在边界跟踪时容易出错;2)该方法需要连续三次边界跟踪才能解码重建出物体三维信息,这在很大程度上限制了物体运动的速度;3)只能获得显边界处的深度数据,数据比较稀疏,扫描效率低;4)由于使用 ICP 的方法进行深度数据匹配,在单面深度数据稀疏的情况下,存在的错误数据导致匹配精度和效率下降。其中 1)~3)是动态编码方面存在的问题,4)是三维建模存在的问题。

为解决上述问题,本文提出一种改进方法。该方法将四幅黑白条纹图用两幅彩色条纹图替代,从而减少边界跟踪的次数,提高扫描速度和效率;利用彩色条纹编码图准确定位隐边界,从而提高深度图

像的数据密度和可靠性。为提高深度图像动态匹配的稳健性,提出利用非编码标志点进行动态深度数据的匹配方法,并给出流水三维建模过程中的视点规划方法。

2 基于黑白条纹边界的编码方法

文献[14]提出的条纹边界编码方法由四幅黑白条纹图组成,循环投射和采集这四幅图案,在各帧图像间跟踪边界,实现时空编码,并由此重建出深度数据。以下简要分析其编码原理,并针对其存在的问题给出改进方法和相应的测量系统设计。

2.1 黑白条纹边界编码

该方法向被测运动物体表面投射四幅黑白条纹图,每幅图中的条纹边界因物体深度信息调制而发生几何变形(编码),通过探测变形的条纹边界,并根据三角测量原理可以从变形的条纹边界中恢复出物体深度信息(解码)。该方法利用了运动物体表面信息的时空相关性,即物体表面上移动的条纹边界在时间和空间上是相关的,因此有可能在时间维上跟踪边界并进而实现对运动物体深度信息的动态获取。如果编码图案在时间上不相关,则顺序投射四幅条纹图时,由于运动物体表面同一位置的边界发生变化,又无法跟踪前一时刻同一位置对应的边界,必然导致错误的结果。黑白条纹边界编码正是利用了时空相关性进行动态编码,使得在时间维上的边界跟踪成为可能并从而实现解码。

该方法在设计编码时,选择黑白两种条纹,用 0 表示黑,1 表示白。同时,使用四幅条纹图,每一条边界的编码就可用一个 8 bit 二进制数表示,这样总共可唯一表示 256 条边界。然而上述边界如有相邻两个比特相同,即 00 或 11,实际上边界变得不可见,称之为隐边界。隐边界会导致边界信息的丢失,从而导致边界跟踪失败。为尽可能消除隐边界影响同时又保证足够的空间分辨率,规定隐边界在空间上和空间上都不能连续出现,两个隐边界之间必须存在至少一个显边界。最终得到图 1 所示的黑白条纹边界编码图案。

解码时,首先分别提取四幅条纹图案的边界,得

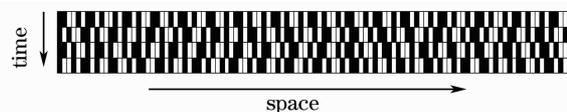


图 1 黑白条纹边界编码图案

Fig. 1 Binary stripe boundary encoded pattern

到各幅条纹图边界的编码,然后在时间维上连续三次跟踪相邻条纹图边界,得到各边界编码的组合,进而得到此边界的最终编码。边界跟踪时,认为距离前一条边界距离最近的边界为同一边界。然后,通过三角测量原理,重建出运动物体在边界处的深度数据。更详细的描述可参见文献[14]。

2.2 黑白条纹边界编码存在的问题

黑白条纹边界编码图案中存在隐边界而又无法对其定位,使得边界跟踪时容易出错,直接导致了解码错误而得到错误的深度数据点,并影响后续的数据匹配。因隐边界造成边界跟踪出错的情况主要受物体运动速度和表面梯度的影响。正确解码对物体运动速度要求,在投射两幅条纹图的时间间隔内,边界移动的距离不能超过半个条纹宽度。另外,即使物体运动较慢,如果物体表面梯度较大,某一帧条纹图中的条纹由于受到高度调制而导致宽度变化,使得原来单个条纹宽度展宽为两个条纹宽度(或者原来两个条纹宽度缩窄为单个条纹宽度),跟踪边界时导致将显边界误判为隐边界(或将隐边界误判为显边界)图 2 说明了此种情况。

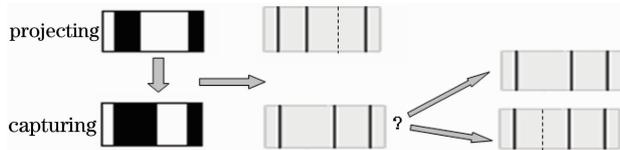


图 2 被测物体表面梯度造成误判的情况 (图中黑色虚细线表示隐边界)

Fig. 2 Error caused by gradient of object, the black dashed lines stand for ghost boundaries

黑白条纹边界编码方案需要向被测物体投射四幅黑白条纹图,跟踪三次边界才能实现重建,这在很大程度上限制了物体的运动速度和扫描速度。此外该方案只能重建出显边界处的深度数据,隐边界因无法定位导致物体表面信息的丢失,使得重建出的单面数据点稀疏,扫描效率较低。

3 基于彩色条纹边界的编码方法

3.1 彩色条纹边界编码原理

针对上述存在的问题,本文提出一种新的彩色边界编码原理来定位隐边界,用两幅彩色条纹图代替原来所需的四幅黑白条纹图,将原来的四幅黑白条纹图分别压缩到两幅彩色图像的红(R)和蓝(B)通道内,可用 B 通道的显边界定位出 R 通道条纹的隐边界,从而得到所有的边界,由此消除隐边界的影响。进而,在绿(G)通道中存放均匀照明光,用于拍

摄标志点图像实现动态深度图像的匹配。图 3 给出了该方法所用到的两幅彩色编码条纹图。为减小 G 通道的颜色对比度与其他两通道的串扰影响,调节 R,G,B 三个通道分量的强度比(1:0.5:1)以确保能可靠提取出标志点。

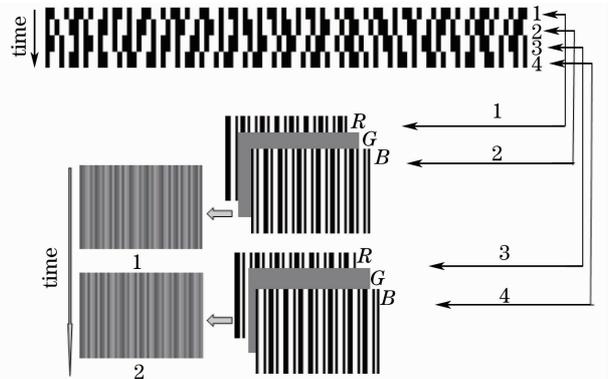


图 3 用于改进方案的编码图案

Fig. 3 Encoded patterns used for proposed approach

生成的彩色条纹图由四种颜色组成,其各自对应的 RGB 通道分量为{0,0.5,0},{1,0.5,0},{1,0.5,1},{0,0.5,1}。利用彩色条纹图的 R 和 B 颜色分量对条纹边界进行编码,则上述四种颜色用于编码的 R 和 B 颜色分量为{0,0},{1,0},{1,1},{0,1}。如图 4 所示,第一帧条纹图中的第二条子边界(条纹 2 与条纹 3 之间的边界)编码可由该边界左右条纹 R,B 分量({1,0},{0,1})表示为 1001。同理,第二帧条纹图中对应的子边界可表示为 1101。最终,此条纹边界的编码可由第一帧和第二帧的子边界的组合唯一表示为 10011101。这样,只要在两帧彩色条纹图之间跟踪边界一次,便可得到边界的编码。图 4 给出了边界跟踪过程的示意,其中 d1 为第二帧中条纹 2 与条纹 3 间边界(橙色虚线表示)到第一帧中条纹 2 与条纹 3 间边界(橙色实线表示)的距离,d2 为此边界到第一帧中条纹 3 与条纹 4 间边界(蓝色实线表示)的距离。因 $d1 < d2$,故该边界与

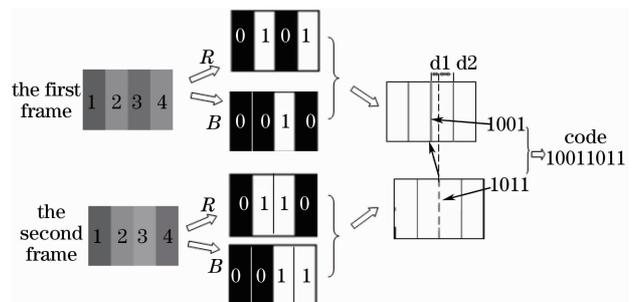


图 4 边界跟踪与解码示意图

Fig. 4 Schematic diagram of boundary tracking and decoding

橙色边界是同一边界。得到最终边界的编码后,就可以根据相机和投影仪的三角关系求出此边界处的物体表面深度信息。

3.2 3D 传感器系统设计

根据 3.1 节提出的彩色条纹边界编码原理设计的 3D 传感器结构如图 5 所示。由于需要用到标志点进行深度数据匹配,因此选择使用双目系统结构以实现标志点的三维重建。为保证深度数据重建的精度,系统设计时使得投影仪与相机之间有足够大的夹角。另外,为便于双相机查找标志点实现深度数据的匹配,设计时使得双相机 CCD1 和 CCD2 之间有较大的共有视场。在数据采集阶段,投影仪向被测运动物体循环投射上述两幅彩色条纹图,两个彩色相机 CCD1 和 CCD2 同步采集。由 CCD1 采集到的图像,分离出每帧的 R, G, B 分量,利用 B 通道条纹的显边界定位出 R 通道条纹的隐边界,然后跟踪辨识相邻两帧之间的边界。通过建立投影仪与 CCD1 之间的对应关系实现深度数据的重建,再由各相同时刻 CCD1 和 CCD2 采集得到图像的 B 颜色通道提取标志点,并由此对各个时刻的深度数据进行实时匹配。正确重建深度数据,实现单面深度数据间匹配的关键是 CCD1, CCD2, 投影仪之间的

同步。为此,使用并行端口连接 CCD1 和 CCD2,通过外部触发使双相机同步采集,并通过软件控制,实现投影与采集的同步。

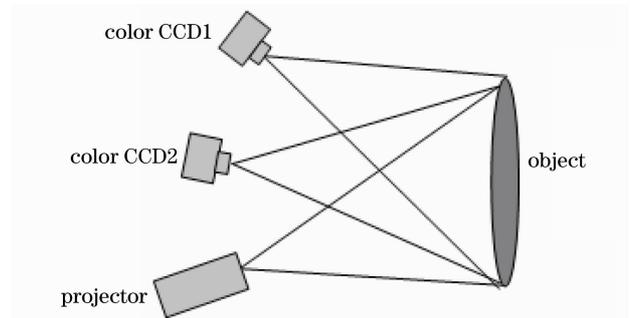


图 5 投影采集装置

Fig. 5 Layout for projection and acquisition

3.3 单面深度数据重建结果

实际测量时,向被测物体循环投射两幅彩色编码条纹图,由采集到的图像分离出 R, G, B 三通道分量,提取边缘并定位出隐边界,利用各颜色分量分别解出边界的编码并在两幅彩色条纹图之间跟踪边界的变化,从而得到边界的编码,进而根据三角测量原理计算出边界处物体深度信息。图 6 分别给出了本文方法及黑白条纹边界编码方法重建深度数据结果的比较。

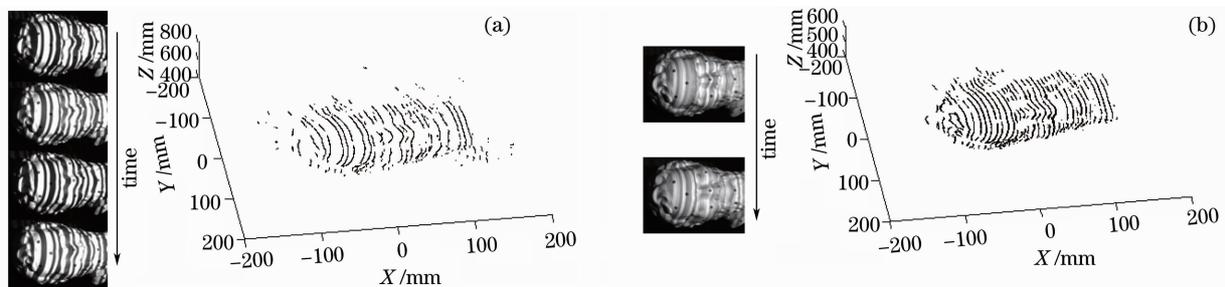


图 6 三维重建结果。(a)原方案三维重建结果;(b)本文方法三维重建结果

Fig. 6 Result of 3D reconstruction. (a) result of original method; (b) result of proposed method

从结果可以看出,原方案由于无法定位出隐边界,解码时存在图 2 所示的混淆情况而出现较多错误三维数据点,同时,单面数据稀疏。本文方法可以定位出隐边界,消除了图 2 所示的混淆情况,大大减少了解码过程中因边界跟踪而出现的错误从而提高了解码正确率。并且可以得到隐边界处的三维数据以及得到更密集的单面数据,提高了扫描效率。另外,本文方法只需要在彩色图像之间跟踪一次边界便可解出边界编码(而文献[15]中需跟踪三次),提高了扫描速度。只要物体速度在允许范围之内,都可成功跟踪每一条边界(包含隐边界)进行解码,计算出边界处深度信息。

4 动态深度数据的动态匹配及视点规划

完成运动物体单视点深度数据重建之后,还需要将不同时刻深度数据匹配到一起才能够获得运动物体的整体模型。动态匹配过程涉及两个重要内容:1)选择合适的匹配方法将各时刻单面深度数据匹配到一起;2)选择合适的拍摄路径,以最少的拍摄次数获得整体模型,即视点规划。

4.1 动态深度数据匹配

深度数据的匹配问题实质上就是寻找到相应的变换关系将不同时刻或不同视点得到的单面深度数据统一到同一个坐标系下。文献[15]使用 ICP 方法进行匹配,因边界编码得到的单幅深度数据比较少致

使匹配效率不高,并且匹配结果的精度在很大程度上受到重建深度数据精度的影响。综合考虑以上因素,借助圆形标志点并使用点模式匹配方法进行匹配。

匹配方法主要分为三个步骤:

1)由3.2节所述的 CCD1 和 CCD2 同步采集各时刻受运动物体高度信息调制的彩色条纹编码图案,提取存有标志点图像 G 通道分量,利用殷等提出的圆形标志点亚像素中心定位方法^[17]对标志点图像进行亚像素边缘提取并计算出标志点圆心坐标;

2)由标志点圆心坐标根据双目立体视觉原理重建出各标志点圆心的三维坐标,进而利用各相邻时刻标志点圆心坐标,根据点模式匹配方法^[18]求得相邻时刻标志点匹配点对;

3)由标志点匹配点对(至少三对)计算出各时刻运动物体深度数据之间的坐标转换关系,然后采用基于非编码标志点的深度数据全局匹配方法^[19]利用此转换关系将各视点深度数据顺序两两匹配,最终将所有视点的深度数据匹配到统一的坐标系下得到整体模型。

图 7 给出了相邻时刻两个视点标志点匹配结果,表 1 给出了其中 8 组匹配标志点的距离误差 $[e_i = d(X_i - X'_i)]$ 、平均误差 $(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i)$ 和 RMS 误差

$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$ 。图 8 给出了由这些标志点将两个视场的深度数据匹配到一起的结果。

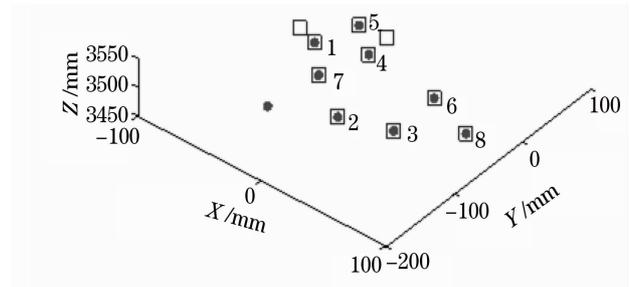


图 7 标志点匹配结果

Fig. 7 Result of markers registration

表 1 匹配点误差

Table 1 Distance error of markers registration

Pairs	1	2	3	4	5	6	7	8
Error /mm	0.0783	0.0201	0.0329	0.0253	0.0198	0.0310	0.0176	0.0473
Mean error: 0.0340 mm;				RMS error: 0.0390 mm				

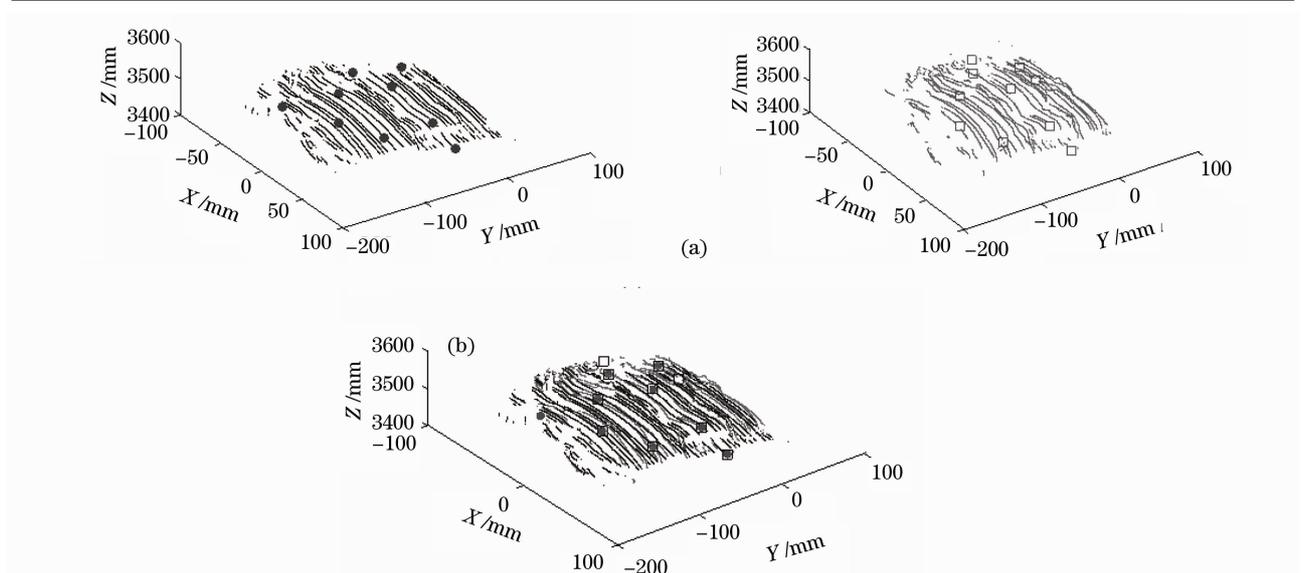


图 8 两个视点深度数据匹配结果。(a)两个视点的深度数据及标志点;(b)两个视点深度数据的匹配结果

Fig. 8 Registration of two views range data. (a) range data of two views; (b) registration result

由结果可以看出,本文提出的匹配方法不受物体深度数据精度的影响,保证了匹配精度,整体匹配误差控制在 0.1 mm 以下。另外,此方法以少数的标志点实现匹配,相对于 ICP 算法不需要对大量深度数据点进行迭代优化,提高了匹配效率。

4.2 动态三维建模中的视点规划问题

视点规划主要任务是设法理解和量化观察目标与传感器之间的关系,并决定出传感器在下一个最优视点(NBV)的空间位置和方向参数,以便自动、可靠地操作传感器系统获取物体深度图像信息,从

而以最少的视点获得物体表面三维信息^[20]。视点规划方法目的在于在三维建模中尽量减少或避免人工干预,从而自动查找下一最优视点。然而,自动确定下一最优视点的算法一般都比较复杂,保证传感器精确到达下一视点位置也是一个难题。本文的方法从数据采集、深度数据重建到动态三维建模是一个流水实现过程,在允许的速度范围之内,可以动态获取运动物体深度数据。在这种情况下,可以通过人机交互来控制传感器(相机)和被测物体的相对位置,以最少的视点建立动态物体的完整三维模型。另外,本文方法允许实时调整拍摄的视点,对重建深度数据不理想的物体表面重新拍摄。结合这些特点,在选择拍摄路径即最优视点的时候,需要考虑以下几个因素:1)满足三维重建的要求,每一个视点尽量避免直接对梯度变化较大的表面进行重建。在物体运动速度一定的情况下,在梯度较大的区域容易导致重建数据的错误;2)满足深度数据匹配的要求,保证相邻两个视点的三维深度数据能顺利进行匹配;3)满足以最少拍摄次数重建出整体三维模型的要求。综合以上几个因素,给出选取拍摄路径,即确定下一视点的原则:

1) 绕过物体表面梯度变化较大的区域,从侧面进行拍摄,确保每次三维重建区域梯度变化比较平坦。

2) 保证下一视点拍摄的物体表面与之前视点拍摄的物体表面有最大的不重合区域。

3) 在尽量满足第 2 点的同时,保证每相邻两个视点拍摄的物体表面公共区域至少存在 3 个共同的标志点。

实验证明,可以通过人机交互来规划物体相对与拍摄系统的运动路径,以最少的视点流水式完成整个建模过程。这种通过人机交互的视点规划避免了复杂的算法,无需额外编写程序来控制系统,可以实时调整拍摄路径。

5 实验结果

由本文提出的动态深度数据获取及三维建模方法,对米开朗基罗的白色石膏像如图 9(a)(高约 40 cm)进行了测量。实验中用到一个 SAMSUNG SP300 投影仪(DLP)(分辨率为 800 pixel × 600 pixel)、两个 DFK21F04 彩色 CCD 相机(分辨率为 640 pixel × 480 pixel)。在 Pentium4 2.8 GHz 的计算机上进行处理。实验系统如图 9(b)所示,投采速度约为 10 f/s,视场大小约为 60 cm × 40 cm,每个条纹宽度约 1.2 cm,要求物体在垂直条纹方向的运动速度不能超过 6 cm/s。

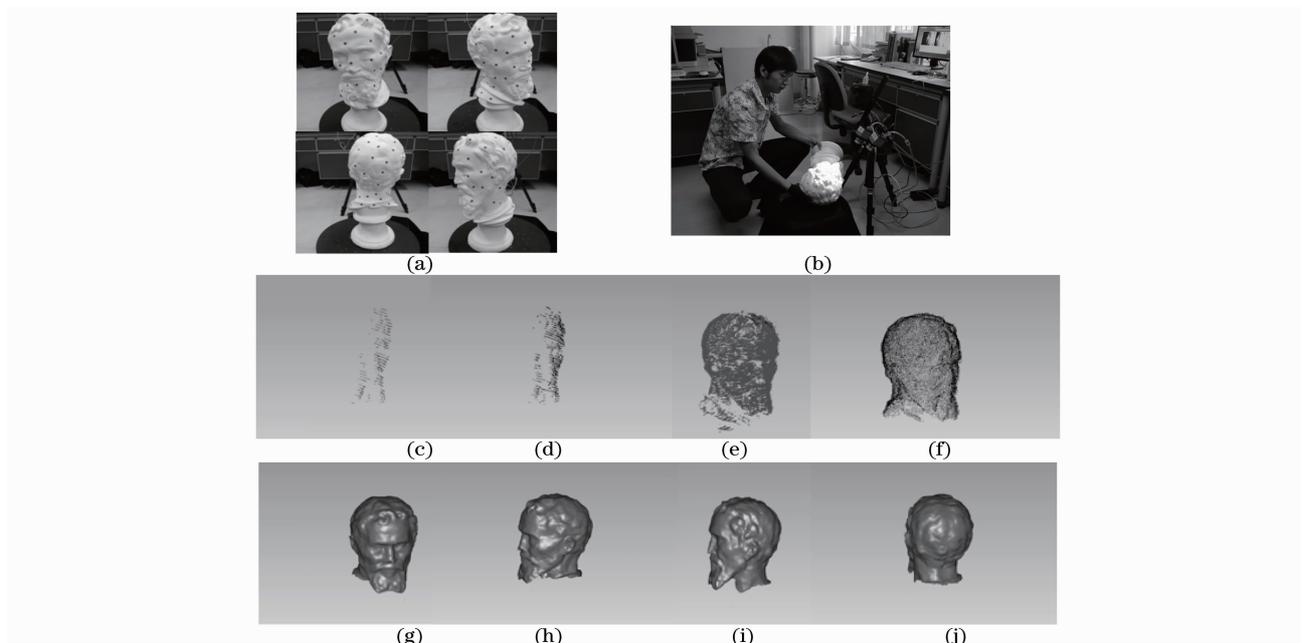


图 9 实验结果。(a)物体原图;(b)拍摄过程示意;(c)单面深度数据;(d)两个视场数据匹配的结果;

(e)多个视点深度数据匹配的结果;(f)对整体结果均匀采样(采样间隔 1.5)后的点云;(g)~(j)连成面的整体模型

Fig. 9 Experiment result. (a) original object; (b) process of image collection; (c) single view range data; (d) registration of two-views range data; (e) registration of multiple view range data; (f) point cloud after uniform sampling (sampling interval:1.5); (g)~(j) the complete model

测量时,向运动物体循环投射彩色条纹边界编码图案,通过人机交互实时调整拍摄视点,流水实现运动物体三维建模。分别用文献[14,15]方法与本文方法对米开朗基罗白色石膏像进行建模。文献[14,15]的方法完成建模实际拍摄时间约需 6 min,各视点深度数据间匹配的平均误差在 0.1 mm 左右;本文方法拍摄时间只需约 3 min,各视点深度数据间匹配的平均误差在 0.03mm 左右。图 9 给出了米开朗基罗白色石膏像的测量过程和实验结果。

由实验结果可见,本文的方法定位出隐边界,得到更密集的单面深度数据,在很大程度上减少了因边界跟踪出错而出现的错误数据,提高了深度数据重建精度。使用基于非编码标志点的深度数据全局匹配方法,保证了各视点深度数据匹配的精度和效率。

6 结 论

实验证明,基于彩色条纹边界编码的三维重建和流水建模方法不仅可以动态获得运动物体深度数据,并可利用非编码标志点实现动态匹配,以最少的视点重建出运动物体三维模型。该方法可以可靠定位出编码图中的隐边界,消除隐边界对边界跟踪的影响,从而大大减少因隐边界的存在而产生的错误数据,并且可以获得更密集的单面数据。此外,该方法只需 2 幅编码条纹图便可实现编码和解码,减少了投射条纹图数目和边界跟踪次数,提高了扫描效率,允许物体有更大的运动速度。最后,该方法使用标志点进行数据匹配并给出匹配过程中的视点规划,能够获得较高的匹配精度和匹配效率,能够以最少的单面数据完成整体模型的建立。

参 考 文 献

- 1 Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional digital imaging via position-shift point array projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1319~1323
田劲东,彭翔.位错点阵投影的三维数字成像[J].*光学学报*, 2005, **25**(10): 1319~1323
- 2 Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Three-dimensional surface profilometry using color-code projection grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 687~690
刘维一,王肇圻,母国光等.彩色数字编码投影光栅三维轮廓术的研究[J].*光学学报*, 2001, **21**(6): 687~690
- 3 Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Color permutation coded grating profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1218~1223
刘维一,王肇圻,母国光等.彩色组合编码条纹光栅轮廓术[J].*光学学报*, 2000, **20**(9): 1218~1223
- 4 Zhang Zonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. A new color 3-D optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 994~998
张宗华,彭翔,胡小康.一种新型彩色三维光学成像系统[J].*光学学报*, 2002, **22**(8): 994~998
- 5 Xiong Liudong, Jia Shuhai, Du Yanfen. A novel algorithm for phase retrieval from a single carrier-frequency fringe pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 123~126
熊六东,贾书海,杜艳芬.单幅载频条纹图的相位恢复新算法[J].*光学学报*, 2010, **30**(1): 123~126
- 6 J. Pages, J. Salvi, R. Garcia *et al.*. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling [C]. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003, **1**: 133~138
- 7 L. Zhang, B. Curless, S. M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]. Proceedings of the 1st International Symposium on 3-D Data Processing Visualization and Transmission, Padova, Italy, 2002. 24~36
- 8 J. A. Quiroga, D. Crespo, Javier Vargas. Adaptive spatiotemporal structured light method for fast three-dimensional measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(10): 107203
- 9 J. A. Gomez-Pedrero, J. A. Quiroga, M. Servin. Adaptive asynchronous algorithm for fringe pattern demodulation [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(21): 3954~3961
- 10 J. Pan, P. S. Huang, F. Chiang. Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1): 013602
- 11 P. S. Huang, C. Zhang, F. Chiang. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1): 163~168
- 12 S. Zhang, S. T. Yan. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2644~2649
- 13 S. Zhang, P. Huang. High-resolution, real-time 3D shape acquisition [C]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004, **3**: 28~37
- 14 O. Hall-Halt, S. Rusinkiewicz. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects [C]. Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Computer Vision, 2001, **11**: 359~366
- 15 S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, Levoy Marc. Real-time 3D model acquisition [C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2002, **21**(3): 438~446
- 16 Paul J. Besl, Neil D. McKay. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Tran. Pattern Analy.*, 1992, **14**(2): 239~256
- 17 Yin Yongkai, Liu Xiaoli, Li Ameng *et al.*. Sub-pixel location of circle target and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s1): 47~50
殷永凯,刘晓利,李阿蒙等.圆形标志点的亚像素定位及其应用[J].*红外激光与工程*, 2008, **37**(s1): 47~50
- 18 Xu Wenli, Zhang Lihua. A geometric reasoning based algorithm for point pattern matching [J]. *Science in China*, 2001, **44**(6): 445~452
徐文立,张立华.一种基于几何推理的点模式匹配算法[J].*中国科学 E 辑*, 2001, **44**(6): 445~452
- 19 Liu Xiaoli, Peng Xiang, Yin Yongkai *et al.*. A method for global registration of range data combined with markers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1010~1014
刘晓利,彭翔,殷永凯等.借助标志点的深度数据全局匹配方法[J].*光学学报*, 2009, **29**(4): 1010~1014
- 20 C. I. Connolly. The determination of next best views [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1985, **2**: 432~435