

基于相位恢复的三维可视化应用研究

刘 星 明 蔡 铁 王 辉 静 彭 刚 桂 荣 枝

(深圳信息职业技术学院计算机学院 深圳 518172)

摘 要 空间曲面的三维数字化测量在工业检测、虚拟现实、影视艺术以及文物保护等领域具有重要的应用价值。提出一种实现自由曲面三维数字化的方法,该方法不仅能重建物体的几何模型,而且能实现物体表面色彩等纹理属性的恢复。利用结构光照明重建空间三维点云数据,并利用匹配算法建立物体的几何模型;然后通过交互式选取点优化策略进行纹理映射的方法实现目标物体的真实感三维重建。与传统的方法相比,该方法能够精确地实现目标物体的纹理重建,避免了特征检测困难或粘贴标准点等方法的数据处理困难以及后期数据的人工等操作,实验结果也验证了该方法的有效性。

关键词 三维测量,可视化,相位辅助

中图法分类号 TP391.7 文献标识码 A

Applied Research of Three-dimensional Visualization Based on Phase Retrieval

LIU Xing-ming CAI Tie WANG Hui-jing PENG Gang GUI Rong-zhi

(School of Computer Science, Shenzhen Institute of Information and Technology, Shenzhen 518172, China)

Abstract Three dimensional measurement of space surface has important applications in areas of industrial inspection, virtual reality, film art and cultural relics of preservation. In this paper, a method was presented to build the 3D digitization of free-form, which can not only reconstruct the geometric surface, but also recover its texture attributes. The structured light is used to project onto the target surface for acquiring the space points, and the matching algorithm is used to build the geometric of the target model. Three-dimensional reconstruction of sense of reality for target object is realized through interactive selection optimization strategy's texture mapping. The proposed method is straight and can avoid difficult of feature extraction and the data post-processing of the human operation. At last, the experimental results prove the effectiveness of the proposed method.

Keywords Three-dimensional measurement, Visualization, Phase aided

基于光学的真实感三维建模技术是非接触式法^[1-3],不需要接触物体就能实现复杂自由曲面的三维数字化,避免了对目标物体造成损害或破坏,具有传统检测方法(如三坐标仪,通过探针接触测量或检测物体)无法比拟的优点。此外,真实感三维建模技术具有扫描速度快、精度高、主动性强等优点,能快速实现自由曲面进行精确的三维数字化建模,且随着计算机硬件技术水平的发展,三维数字化设备的成本也大幅降低,在工业生产和检测中将发挥更加重要的作用。

几何建模在工业产品检测和测量中具有重要的应用价值,发挥着重要的作用。但目前绝大部分的研究都集中在对物体几何形状的建模研究上,缺少对物体的表面属性(表面材质、色彩等)的恢复,从而在很大程度上抑制了其在文物保护、虚拟现实以及产品展示等领域的应用^[3-6]。为此,本文提出一种实现物体表面纹理属性恢复的方法,重建物体几何模型和

恢复其表面纹理属性,实现真实感三维模型的重建。

恢复表面纹理属性,需要将采集的纹理照片映射到几何模型表面,即确定纹理照片与几何模型的变换关系。确定纹理照片与几何模型变换有几种有不同的方法,如文献[7,8]通过把纹理相机固定在三维数字化采集设备上,实现物体深度数据和纹理数据的同时采集,并通过采集设备的系统标定精确确定纹理相机和深度数据之间的坐标变换关系;如张^[9]通过几次标靶姿态调整来实现空间体内采集系统的精确标定,确定纹理相机和几何相机之间的变换,该方法操作较简便,并且标定精度高,但约束了系统的采集视场,不利于数据的采集及后期处理操作;文献[10,11]则通过提取特征点、特征线的方法来确定采集纹理相机的位姿,该方法适合特征较明显的物体,如城市或房屋类特征明显的物体;文献[12]则通过在纹理照片和几何模型中交互选点来确定坐标系之间的变换关系,把采集的纹理照片映射到几何模型上,该方法操作简便,

本文受广东省自然科学基金:真彩色智能成型关键技术研究(2015A030310511),深圳市科技项目:基于光学辅助的高保真三维成像机理研究(JCYJ20150417094158019),深圳市“智能彩色成型工程实验室”资助。

刘 星 明(1982—),男,博士,讲师,主要研究方向为三维测量、计算机视觉、计算机图形学,E-mail: xlium@126.com;蔡 铁(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为信号处理与模式识别;王 辉 静(1976—),女,博士,副教授,主要研究方向为智能信息处理与应用;彭 刚(1975—),男,博士,主要研究方向为计算机网络建模与分析;桂 荣 枝 女,硕士,主要研究方向为信息处理与应用。

但如何优化纹理照片与模型的关联映射误差是关键。

本文提出一种利用结构光投影物体实现真实感三维重建的方法,该方法利用相位解调算法重建目标物体的几何形貌;然后在纹理照片和重建几何模型上采取交互取点的策略,把纹理映射到三维几何模型上,并进行纹理融合处理,得到具有逼真感的真实三维模型。本文提出的方法实现了几何模型和纹理属性的真实感三维重建,拓展了三维建模在文物保护、虚拟现实等领域的应用范围。最后,通过对实物的真实感三维建模,验证了该系统的可靠性和有效性。

1 空间采集数据

本文基于结构光照明的三维数字化系统对目标物体表面形貌进行测量。三维数字化系统由投影仪和相机组成,利用投影仪向目标物体投射结构条纹光(周期性彩色条纹),条纹受到目标物体表面形貌高低变化而发生调制;然后利用相机采集调制变形的结构光图形系列进行算法分析,并利用相位解调和相位恢复算法实现目标物体表面形貌的三维测量。

相位恢复算法包括三步相移恢复算法、四步相移恢复算法、最小二次方等。为了减小噪声对采集数据的影响,提高数据的稳定性,本文采用六步相移恢复算法对目标物体表面形貌进行重建。假设相机采集到受目标物体高度调制的变形条纹图在 (x, y) 处的光强度分布图 $I(x, y)$,方程可表示为:

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y) + 2\pi n/6), n = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (1)$$

其中, $a(x, y)$ 为背景光强可视采集到信号的光场强度, $b(x, y)$ 为条纹的对比度可视信号的调制度, $\varphi(x, y)$ 为受物体调制的绝对相位,通过相位解调和恢复进行求解。

式(1)根据最小二乘法可以获得相位:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^6 I_n(x, y) \sin(2\pi n/6)}{\sum_{n=1}^6 I_n(x, y) \cos(2\pi n/6)} \quad (2)$$

式(2)求解得到的相位 $\varphi(x, y) \in [0, 2\pi)$,三角函数具有周期性,在整个视场内采集的相位值不唯一,即存在折叠相位。为了确定测量物体的相位绝对值,需对相位进行展开,确定相位的折叠级次^[13]。本文利用双目立体视觉,在已知相机参数的条件下(通过相机标定得到相机的焦距、主点、相机畸变系数等),求解得到空间的三维点云数据。

采集的空间三维点云数据含有噪声、散乱点数据等,需要进行后期数据的预处理,如采集数据的去噪和散乱点的剔除操作,以及根据目标物体的周围的数据拓扑结构对遗漏或局部未采集到的数据进行补漏和恢复,并保持相邻点的连接关系。

为了建立物体的完整几何模型,采集的数据通过ICP匹配算法^[14,15]统一一点云数据到同一世界坐标系下,并进行数据融合操作,去除重叠区域的冗余数据,建立物体的几何模型,该过程的数学表达式可以表示为:

$$\{X_{w1}, X_{w2}, X_{w3}, \dots, X_{wm}\} \rightarrow M\{\Delta_i \{V_{1j}, V_{2j}, V_{3j}\}\}, i = 1, 2, 3, \dots, N; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

其中, X_{wj} 表示在局部坐标的第 j 次采集的深度数据集, M 表示无冗余数据的几何模型, $\Delta_i \{V_{1j}, V_{2j}, V_{3j}\}$ 表示几何模型 M 的三角面片集。

2 表面纹理属性的重建

模型表面的纹理属性在文物保护、虚拟现实等方面显得尤为重要,然而影响物体表面的表面纹理属性的因素比较复杂,与目标物体的材质、表面的光照环境、物体的表面结构以及观测的视角等众多因素有关,导致求解物体的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)十分困难。可以说实现模型表面的纹理重建是一项十分具有挑战性的任务。

为了重建真实感三维纹理模型,通常采用相机实拍目标物体的纹理照片,并通过确定纹理照片与目标物体的位姿关系把采集的纹理照片(2D)映射到重建目标模型(3D)的对应区域,恢复物体的表面纹理属性。实现纹理照片到目标物体的几何模型对应区域的精确映射是一件比较困难的任务,有很多科研工作者和研究人员做了深入的研究工作,并发表了系列的文章,如通过纹理照片和几何模型的特征检测,或在目标模型表面粘贴人工标志点来实现纹理照片到几何模型的映射,该方法面临特征提取或标志点区域遮挡纹理处理等系列问题时具有局限性。

本文采取一种优化策略建立纹理照片和几何模型的映射关系,即交互式地在纹理照片和几何模型选点的策略,并结合数学优化方程,实现目标物体表面纹理属性的重建。本文将纹理映射算法与全局优化调整相结合,利用估计的映射初值进行迭代优化,提高和增强了算法的匹配精度,改善了重建真实感模型的重建效果。

纹理照片到目标几何模型的映射模型涉及到相机的焦点、焦距以及拍摄相机相对物体的姿态(相机的外部参数)等关键参数,其数学表达式可以表示为:

$$\tilde{x}_i = KR [I] - \tilde{C} X_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

设 $P = KR [I] - \tilde{C}$ 为 3×4 的投影矩阵,则上式可以表示为: $\tilde{x}_i = P X_i$ 。式(4)中, X_i 为空间和纹理图像坐标的齐次坐标表示方法, K 为采集相机的内部参数, R 和 \tilde{C} 统称为相机的外部参数,用 3×3 的旋转矩阵和 3×1 的坐标向量分别表示相机在采集坐标系统的方向和相机中心坐标。

假设在纹理照片和几何模型中选取的点为 $\tilde{x}_i \leftrightarrow X_i$, $\tilde{x}_i = \tilde{x}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{w}_i)^T$, $X_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T$,并设 P^{jT} 为投影矩阵 P 的第 j 行的向量,则投影矩阵 P 可以表示为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{1T} \\ P^{2T} \\ P^{3T} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),并推理得:

$$\tilde{x}_i \times P X_i = \begin{bmatrix} \tilde{y}_i P^{3T} X_i - \tilde{w}_i P^{2T} X_i \\ \tilde{w}_i P^{1T} X_i - \tilde{x}_i P^{3T} X_i \\ \tilde{x}_i P^{2T} X_i - \tilde{y}_i P^{1T} X_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

因 $\tilde{x}_i \times P X_i = 0$,又因 $P^{jT} X_i = X_i^T P^j$,由式(6)得:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -\tilde{w}_i X_i^T & \tilde{y}_i X_i^T \\ \tilde{w}_i X_i^T & 0^T & -\tilde{x}_i X_i^T \\ -\tilde{y}_i X_i^T & \tilde{x}_i X_i^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^1 \\ P^2 \\ P^3 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

根据式(7)建立等式(这里只需取方程的前2行建立等式,第三行由被前2行线性表示,故舍去)。式(7)可以简写为: $\hat{A}_i \hat{P} = 0$,这里, \hat{p} 和投影矩阵 A_i 分别表示为:

$$\hat{p} = \begin{pmatrix} P^1 \\ P^2 \\ P^3 \end{pmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} 0^T & -w_i X_i^T & \tilde{y}_i X_i^T \\ w_i X_i^T & 0^T & -\tilde{x}_i X_i^T \end{bmatrix}$$

把 $\tilde{x}_i \leftrightarrow X_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 带入式(7),得到 $2n \times 12$ 的行列式 A ,求解投影矩阵 P 的值即求解 $AP=0$,实验算法如下:

1)数据预处理:对纹理坐标和空间三维坐标 $\tilde{x}_i = \tilde{x}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, w_i)^T$ 和 $X_i(X_i, Y_i, Z_i, 1)$ 进行归一化处理,减少尺寸因子的误差影响;

2)行列式 A 进行SVD分解 $A = SVD^T$,取投影矩阵 P 的估计值;

3)定义误差距离函数 $D_{\min} = d(\tilde{x}, PX)^2$,把求解的投影矩阵作为初值,利用最大似然估计迭代求解精确投影矩阵 P ;

4)误差优化,利用捆绑调整(Bundle Adjustment, BA)进行全局优化调整,设定迭代的次数或误差精度(本文实验设定为 $n=30$),求解精确投影矩阵 P ;

5)对求解的投影矩阵逆归一化操作,得到最终的投影矩阵 P 。

3 实验结果

实验利用实验室多年来研发的数字化采集设备进行数据采集,数字化采集设备结构如图1所示,系统由投影仪和CCD相机组成。投影仪和CCD相机连接电脑,并通过控制板驱动进行控制。系统工作时,通过电脑控制投影条纹光到目标测量物体上,CCD采集受到物体高度调制的变条纹图,并利用相位技术(见文章第2节)进行相位复原,得到空间三维点云。采集到的点云数据经过数据预处理,剔除受噪声和散乱点对目标测量的影响,并根据相邻点云的拓扑连接关系,建立物体的网格三角面片模型。实验结果如图2所示。

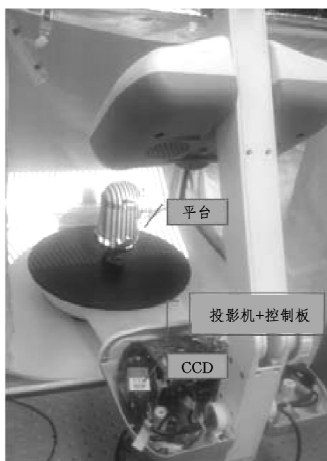
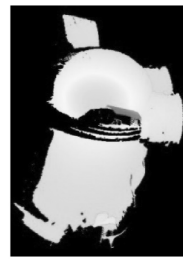
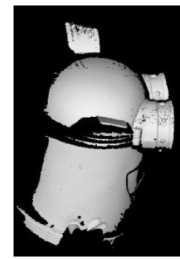


图1 系统采集示意图

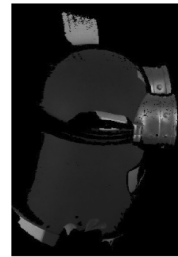
为了对物体表面纹理属性进行恢复,需要建立照片与目标模型之间的关联映射,确定纹理信息与几何模型的对应。实验根据成像模型建立方程组,利用提出的优化方法确定关联变换矩阵(即2D-3D的变换),把采集的纹理照片映射到目标模型上,重建物体的表面色彩等属性(实验结果见图2)。



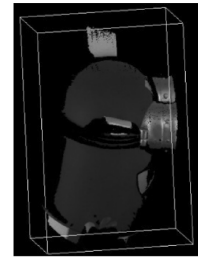
(a)采集的点云数据



(b)点云数据三角化建立网格模型



(c)把采集的黑白图映射到模型表面

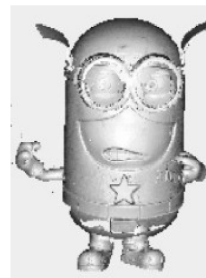


(d)纹理映射得到的结果

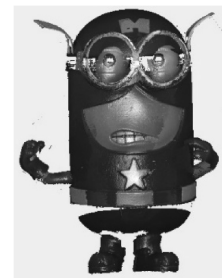
图2 实验结果

上述结果仅仅是部分数据,不能完整地表示物体。为了得到物体的完整模型,需要统一采集的数据到同一坐标系下,并进行后期数据处理(如处理冗余数据等),建立物体的几何模型。本文利用文献[13]的方法建立物体的几何模型,并通过后期数据处理,去除重叠区域的冗余数据(见图3(a))。

系统采集黑色材质物体数据的效果不理想,导致建立的目标模型有数据缺陷,这是结构光三维重建方法存在的问题,也是下一步实验研究需要解决的问题。实验利用文献[7]的方法,对三维模型表面的纹理进行融合,得到真实感三维纹理模型,图3(b)为纹理映射和融合后重建的三维模型,实现了目标物体几何形貌(形状、尺寸)和表面属性的重建。



(a)采集的数据统一到世界坐标系下



(b)纹理映射和融合后得到的真实感建立的几何模型

三维模型

图3 实验结果

对一个玩具进行数据采集(见图4(a)),投影条纹光到物体表面,采集目标物体的深度点云数据,并对数据进行后期处理(深度像匹配、融合、简化等数据处理),建立物体的网格模型,原始模型的数据为8M,包括282336个三角面片。为了方便数据的存储和数据的传递,进行简化后数据为2.1M,包括20000个三角面片,简化后的模型见图4(c)。实验利用CCD采集物体的纹理照片(照片分辨率为 2592×1544),利用交互式选点测量(见文章第2节),实现将纹理照片映射到目标物体模型上(见图4(b));把围绕物体采集的纹理照片映射到任何网格模型上,并利用文献[7]的方法进行纹理融合,得到的真实感模型如图4(d)所示。

(下转第274页)

参考文献

- [1] 郑嘉利,覃团发,倪光南. Tree-based Back off Protocol for Fast RFID Tag Identification [J]. 中国邮电高校学报(英文版), 2013,20(2):37-41
- [2] 丁治国,朱学永,等. 自适应多叉树防碰撞算法研究[J]. 自动化学报, 2010,36(2):237-241
- [3] Yussof Y M, Hashim H, Baba M D. Identity-based Trusted Authentication in Wireless Sensor Network[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012,9(3)
- [4] Grawrock D. TCG specification architecture overview [EB/OL]. Technology Report. Trusted Computing Group Revision 1, 4 (2007). http://www.trustedcomputinggroup.org/resources/tcg_architecture_overview_version_1_4, 2012
- [5] Tae-Wook H, Byong-Gyo L, Kim Y S, et al. Improved anti-collision scheme for high speed identification in RFID system[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Innovative

- Computing, Information and Control. Beijing, China: IEEE, 2006:449-452
- [6] 韦冬雪,郑嘉利,李亮亮,等. 一种新颖的多叉树防碰撞算法研究[J]. 计算机科学, 2013,40(10):52-55
- [7] 黄庆欢,郑嘉利,韦冬雪,等. 基于二维码的 RFID 混合防碰撞算法[J]. 计算机科学, 2014,41(11):10-14
- [8] 张学军,蔡文琦,王锁萍. 改进型自适应多叉树防碰撞算法的研究[J]. 电子学报, 2012,40(1):193-198
- [9] 林伟,李景霞,叶林峰. 基于多叉树搜索算法改进的 RFID 防碰撞算法[J]. 电子技术应用, 2012,20(10):130-133
- [10] 陈希孺,倪国熙. 数理统计学教程[M]. 合肥:中国科学技术出版社, 2009:189-211
- [11] 数理统计编程组. 数理统计[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1997:42-49
- [12] 任少杰,郝永生,许博浩,等. 一种新的自调整多叉树防碰撞算法[J]. 计算机测量与控制, 2015,23(12):4180-4184

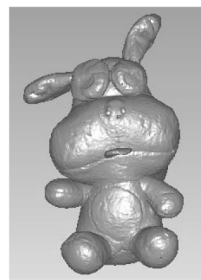
(上接第 258 页)



(a)采集的纹理图像



(b)单幅图像映射的结果



(c)重建的几何模型



(d)实验得到的真实感三维模型

图 4 实验结果

结束语 本文提出一种基于投影条纹光的三维重建方法,该方法实现了几何形貌和纹理属性的重建,拓展了其在虚拟现实、影视艺术以及文物保护等领域的应用。此外,本文通过建立方程组的参数优化方案,实现了纹理照片到几何模型的映射,该方法避免了传统纹理相机对采集视场的干扰,有利于后期的数据采集和后期处理。

如何实现对特殊材质物体(如表面具有光滑或易高光属性材质)的数据采集以及物体的表面双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)等问题,是下一步需要研究和解决的问题。

参考文献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000,39(1):10-22
- [2] Bernardini F, Rushmeier H. The 3D Model Acquisition Pipeline

- [J]. Computergraphics forum, 2002,21(2):149-172
- [3] Blais F. Review of 20 Years of range sensor development[J]. Journal of Electron Imaging, 2004,13(1):231-240
- [4] Bernardini F, Rushmeier H, Martin I M, et al. Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta[J]. IEEE Computergraphics, 2002,22(1):59-67
- [5] Guidi G, Beraldin J A, Atzeni C. High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's Maddalena[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(3):370-380
- [6] Karaszewski M, Sitnik R, Bunsch E. On-line, collision-free positioning of a scanner during fully automated three-dimensional measurement of cultural heritage objects[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012,60(9):1205-1219
- [7] Liu X, Peng X, Yin Y, et al. Generation of photorealistic 3D image using optical digitizer[J]. Applied Optics, 2012,51(9):1304-1311
- [8] 刘星明,刘晓利,殷永凯,等. 真实感三维模型的纹理融合[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012,24(11):1440-1446
- [9] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]// IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 1999:666-673
- [10] Kyuseo H, Kihyun H. Geometric and texture cue based depth-map estimation for 2D to 3D image conversion[C]// 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). 2011:651-652
- [11] Lingyun L, Stamos I. A systematic approach for 2D-image to 3D-range registration in urban environments[C]// IEEE 11th International Conference on Computer Vision. 2007:1-8
- [12] Tzur Y, Tal A. FlexiStickers- photogrammetric texture mapping using casual images[J]. ACM Transaction on Graphic, 2009,28(3):1-10
- [13] Zhang Z, Towers C E, Towers D P. Uneven fringe projection for efficient calibration in high-resolution 3D shape metrology[J]. Applied Optics, 2007,24(46):6113-6119
- [14] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1991:2724-2729
- [15] Besl P J, McKay H D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(2):239-256