

文章编号: 0253-2239(2007)03-0451-6

一种三维数字成像系统的多视点姿态估计方法*

丁雅斌^{1,2} 彭翔² 田劲东² 赵卫军² 李阿蒙² 赵晓波²

(¹ 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 深圳大学光电子学研究所, 教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 为校准多视场深度数据, 提出基于条纹投影的三维数字成像系统的多视点姿态估计方法。该方法至少在两个视点分别向被测物体投射出一组正交条纹图, 利用条纹投影和相位重建技术, 将相位图映射为物体的三维空间坐标。进而, 利用投影仪的投射过程是摄像机成像过程的逆过程, 建立投影仪的投射平面和摄像机的成像平面的对应关系, 将“极线几何约束”应用到基于条纹投影的主动三维视觉的姿态估计问题, 并在考虑测量数据受噪声影响的条件下, 建立了求解视点姿态参量的数学模型。通过优化求解非线性方程可以获得多视点的姿态估计参量。所设计的实验及结果证明了所提出方法的有效性。

关键词: 应用光学; 三维数字成像; 条纹投影; 姿态估计

中图分类号: TP27 文献标识码: A

Pose Estimation of Multiple Viewpoints for Three-Dimensional Digital Imaging System

Ding Yabin^{1,2} Peng Xiang² Tian Jindong² Zhao Weijun² Li Ameng² Zhao Xiaobo²

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072
² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Education Ministry, Shenzhen 518060

Abstract: To register multiple range images, we present a method for the pose estimation of multiple viewpoints for three-dimensional digital imaging system based on fringe projection. This method illuminates the test object with two orthogonal fringe sequences, respectively, from at least two different viewpoints, then reconstructs Cartesian coordinates of the object in three-dimensional space from phase map with help of fringe projection and phase reconstruction techniques. As the projector can conceptually be regarded as camera acting in reverse, the relation between projection plane of the projector and imaging plane of the camera is fixed. Taking epipolar geometry into account, this approach can further realize the pose estimation of three-dimensional active vision system based on fringe projection. We build up a non linear equation to calculate the parameters of orientation even if the input data are influenced by noise. Mathematical formulation of the proposed method is given and the effectiveness of this approach has been demonstrated by the designed experiments.

Key words: applied optics; three-dimensional digital imaging; fringe projection; pose estimation

1 引言

三维数字成像及造型^[1,2]是近年来国际上活跃研究的一个新兴交叉学科领域。它被广泛地应用到

反向工程、文物保护、医学诊断、工业检测以及虚拟现实等诸多方面。基于条纹投影、灰度编码、莫尔技术等方法^[3~6]的三维数字成像系统的目标是确定物

* 国家自然科学基金(60275012)、广东省自然科学基金(031804)、广东省普通高校自然科学研究重点项目(04Z010)和深圳市科技计划项目(200341)资助课题。

作者简介: 丁雅斌(1979—),男,天津人,博士研究生,主要从事三维数字成像及造型研究。E-mail: ankeeding@tom.com

导师简介: 彭翔(1955—),男,湖北仙桃人,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像及造型、光学信息安全、现代光学测试技术的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-12; 收到修改稿日期: 2006-06-23

体的空间三维坐标(笛卡儿坐标)并将其逆向重建。求解传感器的运动方向,估计传感器在不同视点的位置姿态是三维数字成像与造型系统的一项重要工作。由于深度传感器的视场有限,并且受到观察方向和物体本身形状的限制,不可能一次得到描述物体形状的全部信息。在实际应用中,需要把物体放在系统前的工作区间内,从一个视点得到描述物体形状的深度图像,然后移动传感器,在新的视点得到物体其他部分的深度信息。重复此过程,直到获得物体的全部深度信息为止。因此,准确提供各个视点的位置姿态信息是保证在统一坐标系中校准和融合多视点采集的深度图像数据的关键。目前,视点估计主要是利用多视点图像间的重叠区域的对应特征点来进行,而由于物体表面的特性、噪声、以及物体的自遮挡等原因,寻找特征点及它们之间的对应关系是一件困难的工作^[7,8]。另外,基于条纹投影的三维系统并非直接测量物体坐标,它直接得到的是投影条纹的相位值,图像的像素坐标等。因此,必须结合传感器的几何结构参量才能转变为物体的绝对三维坐标^[9]。

本文提出一种“相位-坐标”的变换方法,结合极线几何约束条件对基于条纹投影的三维数字成像与造型系统进行姿态估计。它的优点在于:1)通过相位-坐标的变换,将相位图映射为物体的三维空间坐标,并且使在不同图像里的寻找对应特征点的过程方便快捷。2)为校准和融合多视点采集的深度图像提供初始变换矩阵。

2 相位-坐标的转换算法

三维数字成像与造型系统由摄像机和投影仪组成(如图1),两个设备之间位置相对固定,通过系统结构参量构成几何约束。投影仪投射条纹图案到被

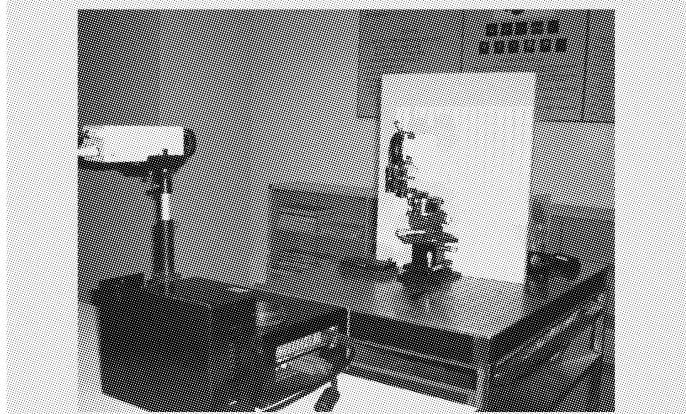


图1 系统装置

Fig. 1 System configuration

传感的三维景物上,由于三维景物的深度变化导致编码条纹图像的产生。摄像机采集编码条纹图,然后通过条纹自动分析技术解码获得三维景物的深度图像。

由投影仪的数字微型反射镜阵列(DMD)将计算机生成正弦条纹图投射到被传感的三维物体上,摄像机的成像传感器(CCD)采集得到物体编码条纹图。根据条纹分析算法,例如三步相移法和快速傅里叶变换(FFT)法,从变形条纹图中解调出主值范围内相位函数 $\varphi_w(x, y)$,再通过相位展开算法得到连续分布的展开相位图 $\varphi_u(x, y)$ 。而目前使用的相位展开算法中相位的起始点是任意选取的,所以由此得到的 $\varphi_u(x, y)$ 仅是一个相对相位分布,为了要将相位分布映射为物体的空间坐标,需要将相对相位变换为绝对相位 $\varphi_a(x, y)$ 。为了确定绝对相位,Hu^[10]曾设计一种特殊的结构光,它仅有一条竖直的条纹,并位于投影区域的中心。这条位于中心的竖条纹的作用是为了在相位图上确定对应于投影区域中心竖条纹上的像素,而这些像素应该有相等的绝对相位值。以这些位于中心线位置的像素的相位为起始点,将相位图上的其他像素的相对相位值转换成绝对相位值。那么绝对相位 $\varphi_a(x, y)$ 可以表示为

$$\varphi_a = \varphi_u - \varphi_u^k, \quad (1)$$

φ_u^k 表示中心线上像素的相对相位值。于是在数字微型反射镜阵列上对应于空间 M 点的条纹位置可以根据以下方程求出:

$$u = \frac{\varphi_a^M}{2\pi} p, \quad (2)$$

p 是条纹的空间周期。本文采用同样的方法确定绝对相位。

因为上述方法不能提供另一维的坐标 v (纵坐标),因此在同一位置再投射一幅横条纹图案,也就是将第一次投射的竖条纹图案旋转 90° ,另外还需投射一条横的中心线,用来确定绝对相位。同理可得纵坐标 v 。

这样,对于空间任意点 $M(x, y, z)$,只要知道它在CCD成像平面上的投影点 $m_1(u_1, v_1)$,那么利用相位-坐标的变换可以很快找到它在数字微型反射镜阵列上的对应点 $m_2(u_2, v_2)$ 。因为,投影仪的投射过程是摄像机成像过程的逆过程,所以可以将投影仪当作双目立体视觉中的第二个摄像机使用。只要知道了摄像机和投影仪的内参矩阵 $[K_c, K_p]$,以及摄像机和投影仪之间的位置关系 $[R, t]$ 。就可以重构出空间点的三维坐标。

$$\begin{cases} s_1 [u_1 \ v_1 \ 1]^T = \mathbf{K}_c [\mathbf{I} \ 0] [x \ y \ z \ 1]^T, \\ s_2 [u_2 \ v_2 \ 1]^T = \mathbf{K}_p [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] [x \ y \ z \ 1]^T, \end{cases} \quad (3)$$

其中 \mathbf{R} 为 3×3 的旋转矩阵, \mathbf{t} 为 3×1 的平移矩阵, \mathbf{K}_c 和 \mathbf{K}_p 为 3×3 的矩阵, \mathbf{I} 为 3×3 的单位矩阵。 s_1 和 s_2 是任意的非零常数。

3 极线约束

极线约束是立体视觉的重要原理之一。当两个摄像机同时对物体拍摄时, 获得图像 I_1 和 I_2 。如图 2 所示, 如果 m_1 和 m_2 是空间一点 M 在两图像上的投影点, 称 m_1 和 m_2 为对应点。 C_1 和 C_2 分别是两个摄像机的入瞳, 空间点 M 与两个入瞳 C_1 和 C_2 组成的三角形在平面 π 上。直线 l_1 在图像 I_1 内, m_1 在 l_1 上, 称 l_1 为图像 I_1 上对应于点 m_2 的极线。直线 l_2 在图像 I_2 内, m_2 在 l_2 上, 称 l_2 为图像 I_2 上对应于点 m_1 的极线。

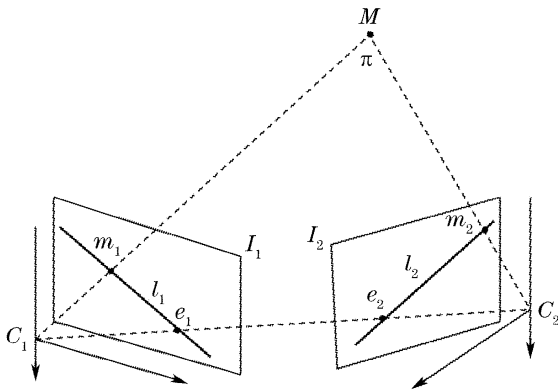


图 2 极线与极点

Fig. 2 Epipolar line and epipole

不失一般性, 将第一个摄像机坐标系作为世界坐标系, 令 $[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ 为第二个摄像机相对于第一摄像机的位置变换, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 分别为两摄像机的内参矩阵, 由针孔模型, 推出两个方程

$$\begin{aligned} s_1 \tilde{m}_1 &= \mathbf{K}_1 [\mathbf{I} \ 0] \begin{bmatrix} M \\ 1 \end{bmatrix}, \\ s_2 \tilde{m}_2 &= \mathbf{K}_2 [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} M \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

\tilde{m}_1 和 \tilde{m}_2 是对应点 m_1 和 m_2 的齐次表示, M 表示空间点 M 的非齐次坐标。 \mathbf{I} 为 3×3 的单位矩阵。 s_1 和 s_2 是任意的非零常数。对上面两式进行变换, 可以得到

$$\tilde{m}_2^T \mathbf{K}_2^{-T} [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \mathbf{K}_1^{-1} \tilde{m}_1 = 0, \quad (5)$$

这里 $[\mathbf{t}]_{\times}$ 表示由三维向量 \mathbf{t} 定义的反对称矩阵, 如果 $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$, 那么

$$[\mathbf{t}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix},$$

令 $\mathbf{F} = \mathbf{K}_2^{-T} [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \mathbf{K}_1^{-1}$, (5) 式变为

$$\tilde{m}_2^T \mathbf{F} \tilde{m}_1 = 0, \quad (6)$$

(6) 式称为极线方程。它给出了对应点 m_1 与 m_2 所必须满足的约束关系。可以看出, 在给定 m_1 的情况下, (6) 式是一个关于 m_2 的线性方程, 即 I_2 图像上的对应于点 m_1 的极线方程 l_2 。反过来, 在给定 m_2 的情况下, (6) 式是一个关于 m_1 的线性方程, 即 I_1 图像上的对应于点 m_2 的极线方程 l_1 。存在基本矩阵 \mathbf{F} , 使得 m_1 的极线 l_2 表示为 $l_2 = \mathbf{F} \tilde{m}_1$, m_2 的极线 l_1 表示为 $l_1 = \mathbf{F}^T \tilde{m}_2$ 。

4 三维系统的运动姿态估计

由于深度传感器单次测量的视场范围有限, 并且受到观察方向和物体本身形状的限制, 因此不可能一次得到描述物体形状的全部信息。在实际应用中, 需要把物体放在系统前的工作区间内, 从一个视点得到描述物体形状的深度图像, 然后移动传感器, 在新的视点得到物体其他部分的深度信息。重复此过程, 直到获得物体的全部深度信息为止。这一过程需要的参量包括:

1) $\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i$: 深度传感器在对物体进行多视点拍摄时的, 各个位置的相对运动姿态, 为校准和融合多视点采集的深度图像提供初始变换矩阵;

2) $\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*$: 光学系统的几何结构参量(摄像机和投影仪的相对位置关系), 这是一个约束关系, 在对物体进行多视点拍摄时不会改变, 它决定了相位图与三维物体表面上相应各点高度的联系;

3) $\mathbf{K}_c, \mathbf{K}_p$: 摄像机和投影仪的内部参量, 决定了三维物体表面上各点在图像上的位置。

如图 3 所示, 以基于条纹投影的深度传感器在两个视点采集图像为例。在第一个视点 V_1 , CCD

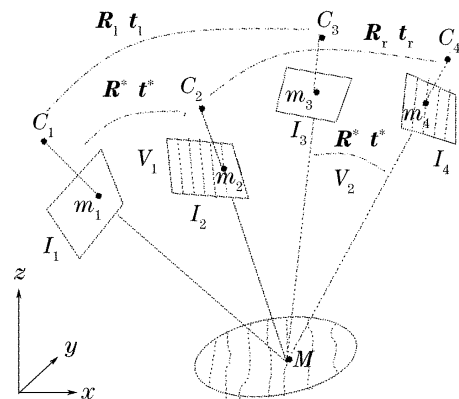


图 3 条纹投影系统在两个不同视点的示意图

Fig. 3 Schematic arrangement of a fringe projection system at two viewpoints

和数字微型反射镜阵列的成像平面和投影平面分别为 I_1, I_2 , 在第二个视点 V_2 , 相应的成像平面和投影平面为 I_3, I_4 。令 m_{ij} 表示位于第 i 个图像上对应于空间中第 j 个点 M_j 。

不失一般性, 将第一个视点的摄像机坐标系作为世界坐标系, $[\mathbf{R}^* \ t^*]$ 描述摄像机与投影仪的位置关系(固定不变), $[\mathbf{R}_l \ t_l]$ 表示深度传感器由视点 V_1 变换到视点 V_2 时, 摄像机的位置变换, $[\mathbf{R}_r \ t_r]$ 表示深度传感器由视点 V_1 变换到视点 V_2 时, 投影仪的位置变换。其中

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_r &= \mathbf{R}^* \mathbf{R}_l \mathbf{R}^{*-1}, \\ t_r &= t^* + \mathbf{R}^* t_l - \mathbf{R}^* \mathbf{R}_l \mathbf{R}^{*-1} t^*. \end{aligned}$$

由极线约束[(5)式]知, 两个视点应对 6 个基本矩阵, $\mathbf{F}_{12}, \mathbf{F}_{13}, \mathbf{F}_{14}, \mathbf{F}_{23}, \mathbf{F}_{24}, \mathbf{F}_{34}$, 其中

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{12} &= \mathbf{F}_{34} = \mathbf{K}_p^{-T} [t^*]_{\times} \mathbf{R}^* \mathbf{K}_c^{-1}, \\ \mathbf{F}_{13} &= \mathbf{K}_c^{-T} [t_l]_{\times} \mathbf{R}_l \mathbf{K}_c^{-1}, \\ \mathbf{F}_{24} &= \mathbf{K}_p^{-T} [t_r]_{\times} \mathbf{R}_r \mathbf{K}_p^{-1}, \\ \mathbf{F}_{14} &= \mathbf{K}_p^{-T} [t_{14}]_{\times} \mathbf{R}_{14} \mathbf{K}_c^{-1}, \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{R}_{14} = \mathbf{R}^* \mathbf{R}_l, t_{14} = \mathbf{R}^* t_l + t^*$,

$$\mathbf{F}_{23} = \mathbf{K}_c^{-T} [t_{23}]_{\times} \mathbf{R}_{23} \mathbf{K}_p^{-1},$$

其中 $\mathbf{R}_{23} = \mathbf{R}_l \mathbf{R}^{*-1}, t_{23} = t_l - \mathbf{R}_l \mathbf{R}^{*-1} t^*$ 。这些运动关系组成 6 个极线方程。Zhang 在文献[11]所研究的立体被动视觉问题中, 4 幅图像使用了 $\mathbf{F}_{12}, \mathbf{F}_{13}, \mathbf{F}_{24}, \mathbf{F}_{34}$ 4 个基本矩阵。本文研究条纹投影主动视觉问题中构造了 6 个基本矩阵, 以增加约束条件。

最小化这些极线约束的平方和, 转换成最小二乘问题, 求解参量矩阵 $\mathbf{K}_c, \mathbf{K}_p, \mathbf{R}^*, t^*, \mathbf{R}_l, t_l$ 。这个方法源于 Longuet-Higgins 准则^[11]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n [& (\widetilde{m}_{2i}^T \mathbf{F}_{12} \widetilde{m}_{1i})^2 + (\widetilde{m}_{3i}^T \mathbf{F}_{13} \widetilde{m}_{1i})^2 + \\ & (\widetilde{m}_{4i}^T \mathbf{F}_{14} \widetilde{m}_{1i})^2 + (\widetilde{m}_{3i}^T \mathbf{F}_{23} \widetilde{m}_{2i})^2 + \\ & (\widetilde{m}_{4i}^T \mathbf{F}_{24} \widetilde{m}_{2i})^2 + (\widetilde{m}_{4i}^T \mathbf{F}_{34} \widetilde{m}_{3i})^2], \quad (7) \end{aligned}$$

$i = 1, \dots, n$ 是特征点的个数, \widetilde{m}_{ki} 表示特征点的齐次坐标, 它的第一个下标 $k = 1, \dots, 4$ 表示它来自的图像。第二个下标 i 表示它是第几个特征点。

以图像 I_1 和 I_2 上的对应点为例, 当数据有噪声时, 点 m_1 不一定落在极线 l_1 上。因此, 一个更有物理含义的准则应是使得点 m_1 到极线 l_1 的距离尽可能的小。令 $l_1 = \mathbf{F}_{12}^T \widetilde{m}_2 \equiv (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$, 则点 m_1 到 l_1 的距离为

$$d_{12}(\widetilde{m}_1, l_1) = \frac{|\widetilde{m}_1^T \mathbf{F}_{12}^T \widetilde{m}_2|}{\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2}}, \quad (8)$$

由于对称, 同理, 令 $l_2 = \mathbf{F}_{12} \widetilde{m}_1 \equiv (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$, 则点 m_2 到 l_2 的距离为

$$d'_{12}(\widetilde{m}_2, l_2) = \frac{|\widetilde{m}_2^T \mathbf{F}_{12} \widetilde{m}_1|}{\sqrt{\alpha_2^2 + \beta_2^2}}, \quad (9)$$

则两幅图像的运动参量可以通过最小化

$$d_{12}^2(\widetilde{m}_1, l_1) + d'_{12}^2(\widetilde{m}_2, l_2), \quad (10)$$

来得到。同理全部两个视点的运动参量可以通过最小化

$$\begin{aligned} & (d_{12}^2 + d'_{12}^2) + (d_{13}^2 + d'_{13}^2) + (d_{14}^2 + d'_{14}^2) + \\ & (d_{23}^2 + d'_{23}^2) + (d_{24}^2 + d'_{24}^2) + (d_{34}^2 + d'_{34}^2) \quad (11) \end{aligned}$$

来得到。

用 Levenberg-Marquart(LM)方法迭代求解这个非线性方程时, 需要给出未知数的初值, 它们可以通过现有方法^[12]来获得。由于摄像机和投影仪的内部参量 $\mathbf{K}_c, \mathbf{K}_p$, 以及它们之间的位置关系 \mathbf{R}^*, t^* , 是固定不变的, 因此, 只需对这 4 组参量进行一次标定求解, 而后再求系统在不同视点的姿态估计时, 可以将它们当作常数, 而只优化求解各个视点的姿态 \mathbf{R}_i, t_i 。

5 实验分析

为验证本文提出的三维系统的运动姿态估计方法, 首先设立一个三维标定靶, 用来评价计算结果。标定靶是打印出来的平面方格阵列图案, 如图 4 所示。将标定靶垂直放置在带有刻度的平移台上, 由此形成三维标定靶。

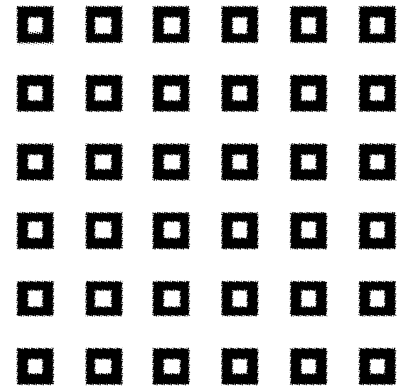


图 4 标定靶

Fig. 4 Calibration target

第 1 组实验检验透视投影矩阵的精确度。在 6 个不同的位置, 共有 864 个标定特征点。检验计算出的透视投影矩阵。由(4)式得到二维图像点。u 方向均方根误差(rms)为 0.2618 pixel, 标准差(std)为 0.2620 pixel, v 方向的均方根误差 0.2491 pixel, 标准差为 0.2493 pixel。图 5 为二维点绝对误差的散点图。

第 2 组实验检验重建误差, 评判两个设备之间

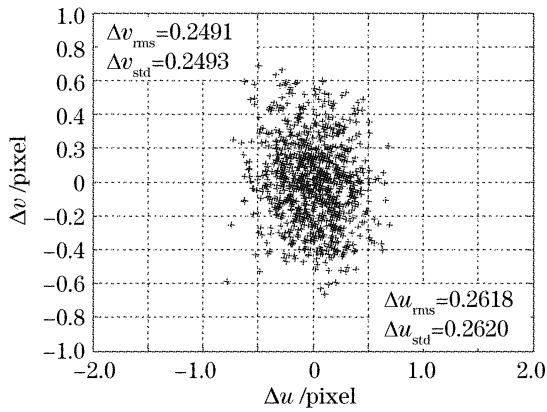


图5 二维数据点的测量误差

Fig. 5 Measurement error for two-dimensional points 的系统结构参量 \mathbf{R}^* , \mathbf{t}^* 的精确程度。由 CCD 探测到的特征点的二维坐标 (u, v) , 重建出对应点三维坐标 (x, y, z) [(3)式]。计算此三维点与标定靶上对应特征点的误差的标准差。结果如图 6 所示, 在 6 个不同的位置, 重建出来的三维点集在空间三个方向上的标准差, 均小于 0.4 mm。

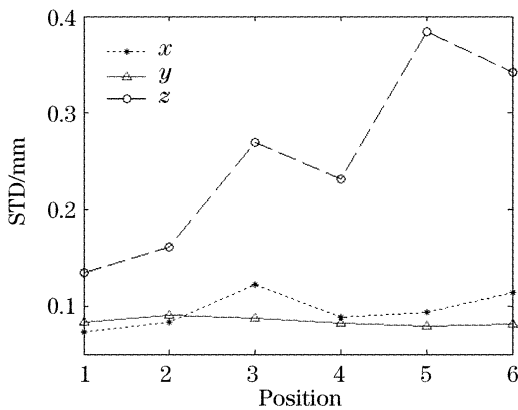


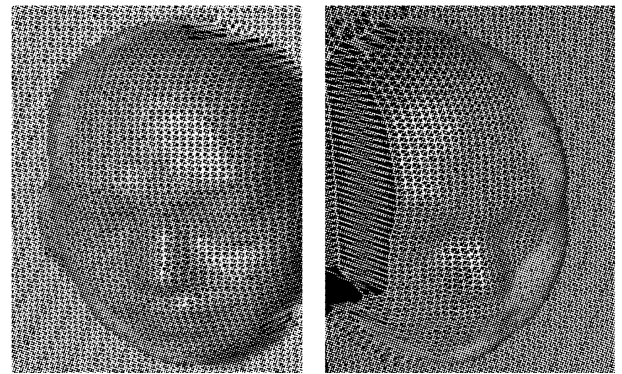
图6 重建的三维数据点的标准差

Fig. 6 Standard deviation for reconstructed three-dimensional points in three directions

第 3 组检验姿态估计的精确性。对标定靶, 用三维系统在某个视点对其采集, 记为视点 1, 然后任意移动系统到另一个能够采集到所有特征点的视点对其采集, 记为视点 2。利用本文提出的方法分别重建两个视点采集到的特征点, 得到点集 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$, 同时得到两个视点间的姿态变换矩阵 $[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ 。以视点 1 为基准, 将视点 2 的点集 \mathbf{X}_2 变换到视点 1 的坐标系下, 得到 $\mathbf{X}'_2 = \mathbf{R}\mathbf{X}_2 + \mathbf{t}$ 。计算 $\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}'_2$ 的误差, 得到三个方向的标准差分别为 0.0927 mm, 0.0750 mm 和 0.2562 mm。

对一个真实物体在两个视点测量, 利用求得的视点姿态, 将两个视点的图像, 变换到同一坐标系内。图 7 分别为两个视点的采集得到的点云图像 (深度图像)。图 8 为变换到同一个坐标系下, 校准

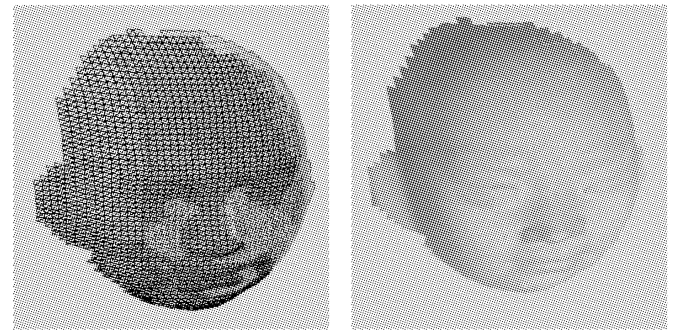
后的网格图像和加以渲染的图像。可以看到, 视点姿态估计正确。



(a) (b)

图7 从两个不同视点获取的点云图。(a) 视点 1, (b) 视点 2

Fig. 7 Acquired point clouds from two different views. (a) view1, (b) view2



(a) (b)

图8 视点姿态估计的实验验证。(a) 网格图, (b) 渲染图
Fig. 8 Experimental demonstration of pose estimation of viewpoints. (a) mesh, (b) rendering

6 结 论

由于视场范围有限, 三维数字成像系统在完整重建物体时, 需要匹配多视点采集的深度图像, 因此必须对多视点的位置姿态进行估计。本文针对基于条纹投影的三维主动视觉系统, 提出了一种视点姿态估计方法。通过本文方法得到的多视点姿态估计的参量可以为多视点深度图像在统一坐标系中校准和融合提供必要的条件。该方法可以推广到其他三维主动视觉系统, 例如, 三维激光扫描系统的多视点姿态估计问题。另外, 本文提出的方法对诸如复杂物体的自动化检验、机器人定位等领域的应用都有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Peng Xiang, Zhang Zonghua, Zhu Shaoming *et al.*. 3D digital imaging system based on white-light digital moiré [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(10): 1401~1405 (in Chinese)

- 彭 翔, 张宗华, 朱绍明 等. 基于白光数字莫尔的三维光学数字成像系统[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1401~1405
- 2 Jindong Tian, Xiang Peng. 3-D digital imaging based on shifted point-array encoding[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(26): 5491~5496
- 3 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 4 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)
苏显渝, 谭松新, 向立群 等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 5 Peng Xiang, Qiu Wenjie, Wei Linbin *et al.*. Phase decoding based on temporal-spatial phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 43~48 (in Chinese)
彭 翔, 邱文杰, 韦林彬 等. 相位解码的时-空重建算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 43~48
- 6 Ning Chen, Jingang Zhong. Application of wavelet transform to 3D shape measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 648~650
- 7 C. S. Chua, R. Jarvis. Point signatures; a new representation for 3D object recognition[J]. *International of Computer Vision*, 1997, **25**(1): 63~85
- 8 Zhang Zonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. The research on acquiring the initial value of registering range images by ICP[J]. *J. Engineering Graphics*, 2002, **23**(1): 78~84 (in Chinese)
张宗华, 彭 翔, 胡小唐. 获取 ICP 匹配深度图像初值的研究[J]. *工程图学学报*, 2002, **23**(1): 78~84
- 9 Shao Shuangyun, Sun Xianyu, Wang Hua *et al.*. Calibration of the measurement system based on modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 203~206 (in Chinese)
邵双运, 苏显渝, 王 华 等. 调制度测量轮廓术的系统标定[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 203~206
- 10 Qingying Hu, Peisen S. Huang, Qionglin Fu *et al.*. Calibration of a three-dimensional shape measurement system [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(2): 487~493
- 11 Zhengyou Zhang, Quangtuan Luong, Olivier Faugeras. Motion of an uncalibrated stereo rig: self-calibration and metric reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, **12**(1): 103~113
- 12 Wu Chaofu, Li Hua, Hu Zhanyi. New active vision based camera self-calibration technique [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(6): 752~762 (in Chinese)
吴福朝, 李 华, 胡占义. 基于主动视觉系统的摄像机自标定方法研究[J]. *自动化学报*, 2001, **27**(6): 752~762