

文章编号: 0253-2239(2008)07-1338-05

一种单双目视觉系统结合的三维测量方法

雷彦章 赵慧洁 姜宏志

(北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要 在投影栅相位法的单目和双目三维测量结构的基础上,提出了一种单双目结合的三维测量方法。采用双目测量系统的架构,对两相机的公共区域使用双目的方法进行复现,同时分别将两个相机与投影仪组成两个单目测量系统,通过标定的统一可以将两者的世界坐标系统一到共同的基准上,利用单目的测量结果对双目测量的缺失区域进行填补。在对石膏头像的测量中,利用该方法避免了双目测量中在鼻梁附近出现的数据丢失。在保证双目复现区域精度的基础上,该方法有效地改进了测量结果的完整性。

关键词 光学测量; 双目视觉; 单目视觉; 相位

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1338

A Three-Dimensional Measurement Method by Combining Binocular and Monocular Vision Systems

Lei Yanzhang Zhao Huijie Jiang Hongzhi

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Based on the combination of binocular vision measurement and monocular vision measurement, a new three-dimensional (3D) measurement method is proposed with the two systems, the common field of view is reconstructed by a binocular vision system, and the unmatched area is filled up by two monocular vision systems, which is composed of the projector and cameras separately. Their world coordinate systems can be unified to a common reference with uniform calibration. In the measurement of gesso head portrait, the data missing near the nose can be avoided by this method. While the reconstruction precision of the binocular vision system is maintained, this method improves the measurement results efficiently.

Key words optical measurement; binocular vision; monocular vision; phase

1 引 言

基于结构光的三维测量技术具有大量程、非接触、速度快、系统柔性好、精度适中等优点,目前已经广泛应用于三维模型重建、物体表面轮廓的三维测量以及工业环境中尺寸和形位参量的检测等领域^[1]。投影栅相位法是其中最具有前途的研究方向之一^[2]。对物体投射正弦条纹,其相位会受到物体高度的调制,电荷耦合器件(CCD)拍摄到的条纹图像也必将包含物体的高度信息。

基于投影栅相位法的系统主要可以分为单目结

构^[3]和双目结构^[4]。在投射器的基础上,单目测量系统只需一个 CCD,通过相位值直接解算得到物体的高度,而双目系统则将相位作为匹配的一个特征量,利用机器视觉中双目立体视觉的方法求取物体的三维特征。这两种结构都有各自的优缺点,但单目系统只能得到被测物与参考面的高度差,在测量精度以及抗噪性上与双目视觉系统有一定的差距。而双目视觉系统由于其三维坐标的获取是基于两相机对应点的匹配,在视场方面有一定的局限性,对于遮挡、阴影等情况,在复现得到的物体三维表面中容

收稿日期: 2007-10-15; **收到修改稿日期**: 2008-01-02

基金项目: 教育部创世纪优秀人才培养计划(NCET-04-0174)、国家自然科学基金(60678030)、教育部博士点基金(20040006033)、航空基础科学基金(05I51068)和航天创新基金资助课题。

作者简介: 雷彦章(1984—),男,硕士研究生,主要从事视觉测量方面的研究。E-mail: yzhlei@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 赵慧洁(1955—),女,教授,博士生导师,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

易出现数据缺失。

针对这种情况,本文提出了一种将单双目各自优点结合起来的三维形貌测量方法。使得系统既能够具有双目的高精度、高稳健性的特点,同时对于某些双目无法测量的区域也能够通过单目加以补偿。

2 三维测量系统

2.1 系统结构

系统结构图如图 1 所示,采用的仍是双目视觉^[4]的布局方式。当需要时分别利用左右相机与投影仪组成两个单目测量系统。在双目测量出现数据缺失时可以利用单目的测量结果加以补偿。

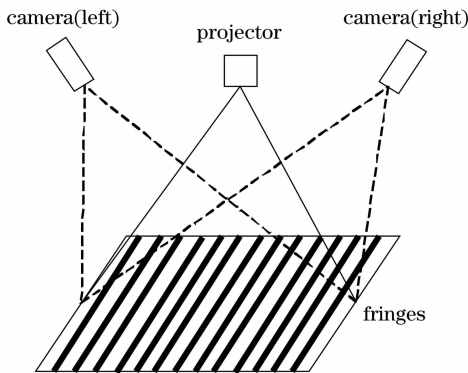


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure of the system

双目立体视觉三维测量基于视差原理^[5],左相机像面上的一点只要能在右摄像机像面上找到对应的匹配点(二者为空间同一点在左、右相机像面的投

影),通过两条光线相交就可确定该点的三维坐标。同时利用空间同一点在左右相机中具有相等的相位值这一条件,可有效地提高匹配点的寻找速度和准确度^[6]。对图 4 所示的石膏头像,得到如图 2 的双目复现结果。

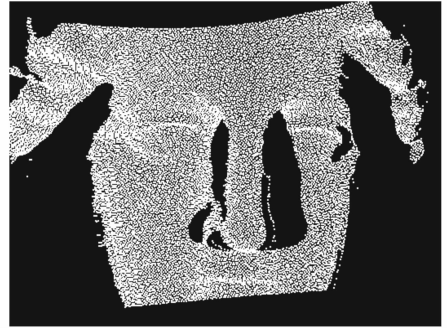


图 2 双目复现结果

Fig. 2 Reconstruction result of binocular vision system

从图 2 可见,在头像鼻梁附近会出现的一些的空洞,其原因是由于鼻梁的遮挡,该区域无法同时出现在左右两个相机的视场中。

单目系统采用 Qingying Hu 等^[7]提出的单目测量方法。在将投影仪等效为一个点光源和数字微反射器(DMD)组合的基础上,对 CCD 上每一个点都可以得到一个对应的等相位面。利用等相位面与相机入射光线的交点即可确定得到物体的三维坐标。左右相机与投影仪组合得到的三维复现结果如图 3 所示。

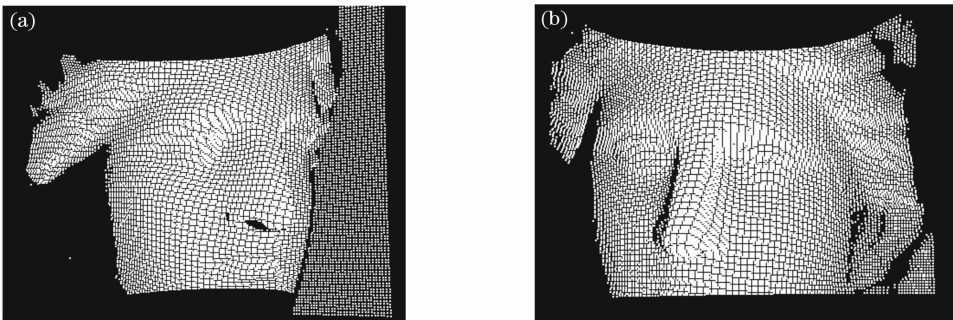


图 3 左相机(a),右相机(b)与投影仪单目系统复现结果

Fig. 3 Reconstruction results of monocular vision system (a) left camera and projector, (b) right camera and projector

为了检验单双目系统的测量精度,设计了一个实验,对一个标准平面进行测量,以拟合得到的平面作为标准值,各测量值距离平面的距离作为该点的误差量。通过统计,双目测量系统其测量误差的标准差为 0.038 mm,而单目系统测量误差的标准差则为 0.2 mm,由此可见两者在精度上还是存在一定的差距。

2.2 相位求取

单目系统可以通过相位值直接求得物体的三维坐标,而双目系统中则将相位值作为匹配的一个重要约束条件。所以对正弦条纹的相位求取是单双目测量能够统一到一个双目系统中的重要原因。当光栅被投影到被测物体表面上时,在物体表面产生畸变,形成变形光栅,如图 4 所示。



图 4 投影光栅图像

Fig. 4 Image with projected fringes

采用四步相移法^[8],可以得到每一点的相主值为

$$\phi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^3 g_i(x, y) \sin \frac{2\pi i}{N}}{\sum_{i=0}^3 g_i(x, y) \cos \frac{2\pi i}{N}} \right], \quad (1)$$

式中 g_i 为该点灰度值, N 为相移步数, 这里 $N = 4$ 。由于反正切的引入, 得到的相主值 $\phi(x, y)$ 将被限制在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 这需要利用相位展开得到绝对相位值 $\Phi(x, y)$ 。而对于双目系统, 不仅要求得到两相机对应的相位值, 还要求能够把两者统一到一个共同的基准中, 即使空间同一点在左右相机中的相位值相等。

结合不同的条纹投射方法, 相位展开方法也分为很多种, 如时域相位展开法^[9]和外差多频解相法, 其中外差多频解相法^[10, 11]在投射条纹次数和相位精度上都有较好的表现。而且对于双目系统, 该方法还能自动把两相机的相位基准统一起来, 以利于匹配。

外差多频解相法需要投射多级不同周期的条纹才能解算出正确的相位值。以两级条纹周期为例, 假设通过四步相移法对周期为 λ_1 、 λ_2 (频率为 f_1 、 f_2) 的两级条纹 (存在某一点两者相主值均为 0) 求得的相主值分别为 $\phi_1(x, y)$ 、 $\phi_2(x, y)$ 。根据外差原理, 可以得到对于周期为 $\lambda_b = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ (对应频率为 $f_1 - f_2$) 的条纹, 在点 (x, y) 处的相位值为 $\phi_b(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$, 如图 5 所示。

如果计算得到的周期 λ_b 能够覆盖整个视场, 即保证视场内只有一个条纹周期, 那么可利用多频解相法^[12]对 $\phi_1(x, y)$ 或 $\phi_2(x, y)$ 进行相位展开, 否则需要追加投射条纹次数^[11]。

在零相位 (点 A) 相同的情况下, 相位值与正弦条纹周期是成反比的:

$$\frac{\Phi_b(x, y)}{\Phi_1(x, y)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_b} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2}, \quad (2)$$

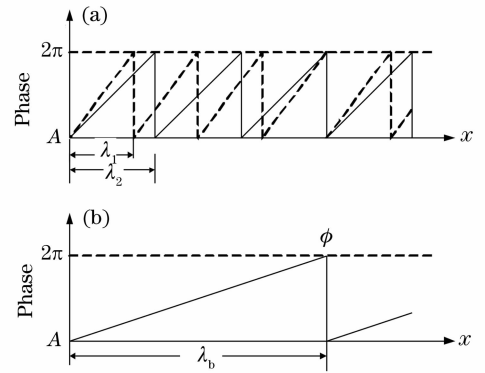


图 5 两级条纹的相位主值(a)及外差相位展开过程(b)

Fig. 5 Phase principal value of two-stage fringes (a) and the procedure of heterodyne phase unwrapping (b)

式中 $\Phi_1(x, y)$ 、 $\Phi_b(x, y)$ 分别为周期为 λ_1 、 λ_b 时的相位展开结果, 同时由于 λ_b 能够覆盖整个视场, 其相位展开结果与相主值是相等的, 即 $\Phi_b(x, y) = \phi_b(x, y)$, 因此

$$\Phi_1(x, y) = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2}, \quad (3)$$

利用(3)式即可得到周期为 λ_1 时的条纹相位展开结果, 而且在相位展开的同时, 左右两个相机的相位值都能够统一在一个基准点 A 上。

采用该方法对图 1 中的石膏头像的相位展开结果如图 6 所示, 以灰度代表相位值。

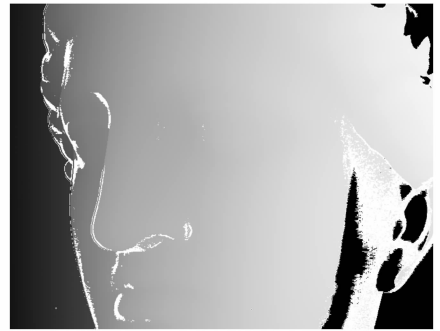


图 6 相位展开图像

Fig. 6 Phase unwrapped image

2.3 系统标定及数据统一

为了在一套双目系统中, 同时实现双目和单目两套系统。在标定的过程中必须同时进行单双目两套系统的标定。目前系统中双目的标定采用平面靶标的标定方法^[13], 单目标定则使用文献^[7]的方法。系统的难点是将三个系统 (一套双目测量系统, 两套单目系统) 统一到一个坐标系下。标定过程中, 可以将双目系统的坐标系建立在左相机上, 同时单目标定将坐标系建立在对应的相机上, 这样对左相机组成的单目系统则不涉及到坐标系的转换问题。而右

相机与投影仪组成的单目系统则需要对测量结果进行坐标系转换。

假设 R, t 分别为右相机相对左相机的旋转和平移矩阵(双目标定过程中得到),则对右相机坐标系下的三维坐标 X_r ,有如下变换关系:

$$X_l = RX_r + t. \quad (4)$$

对右相机坐标系下的三维坐标利用(4)式进行坐标系转换,即可把三个系统得到的数据都统一到左相机坐标系下。三套系统的数据都统一到同一个坐标系后,单目系统的数据可直接对双目测量的缺失部位进行补偿。

另一方面,对于单目测量,复现双目缺失部位以外的区域,既增加了测量时间,同时也会在这些区域产生数据重叠,影响进一步的处理。为了在单目测量中只复现双目缺失区域,在双目测量的匹配过程中必须分别对左右相机的未匹配点进行标记。对相位图中每一点设置一个标记值,如果能够找到对应匹配点则设其标记值为 1,否则为 0。在随后的单目复现中仅需针对标记值为 0 的点进行处理。

3 三维测量实验

实验中利用单双目结合的方法对石膏头像进行了复现,具体步骤如下:

1) 标定:标定可以分为单目标定和双目标定两个部分。其中单目标定要分别得到两个相机和投影仪之间的位置参量,双目标定则要得到两个相机的内外参量。

2) 解相:对左右相机拍摄得到的光栅图像进行相位展开,同时将两者相位值统一到一个共同的基准上。为了避免背景区域和噪声较大区域对测量结果的影响,可以采用基于调制度的背景区分方法将其从相位图中过滤掉^[14]。

3) 匹配:利用相位值相等和极线约束条件寻找左右相机中的对应匹配点。同时在相位图中对未匹配点予以标记。

4) 双目复现:得到左右相机的匹配点后,利用相机的内外参量,复现得到物体的三维形貌。

5) 单目修补:相位图中残留的未匹配点,除被区分为背景者外,都是由于只出现在一个相机视场中而无法进行匹配。此时分别利用左右相机与投影仪组成两个单目测量系统。利用本文所述的单目测量方法,分别对左右相机中的未匹配点求取对应的三维坐标,并统一到双目测量坐标系中。

图 7 为对石膏头像修补后得到的复现结果。

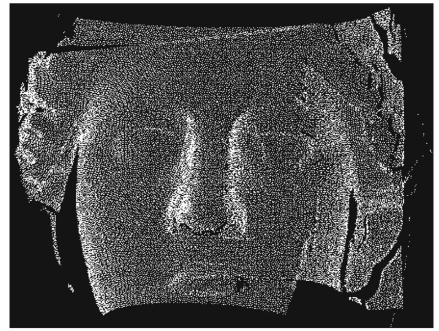


图 7 单双目结合得到的测量结果

Fig. 7 Reconstruction result by combining monocular vision system and binocular vision system

从图 7 可见,在双目测量中出现的的数据缺失区域已通过单目测量补偿,可得到完整的石膏头像的三维数据,与单纯的双目系统相比,改进了测量结果的完整度。同时与仅利用两个单目测量的数据相比,在两相机的公共视场区域能有较好的精度。当这些区域的测量精度要求不是很高时,此时的结果已经能够满足要求。如果对细节的精度要求很高,则必须利用双目系统单独对这些区域再次进行测量,此时这些区域的单目测量结果可作为进一步测量时路径规划的依据。

4 结 论

提出了一种单双目结合的三维测量方法,能够结合单目和双目这两种三维测量方法的优势,对双目高精度测量结果中出现的空洞区域,可以使用该处单目测量的结果加以补偿。同时应用双目测量系统本身的投影仪与两个相机即可组成两套单目测量系统,不需要额外的硬件配置。如果对整体的测量精度要求很高,则可以将单目结果作为进一步测量时路径规划的依据,实现测量的自动化。与单纯的双目测量系统相比,使用此方法能够有效地改进系统的测量范围和测量结果的完整性。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229
- 毛先富, 陈文静, 苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 225~229
- 3 Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1641~1646
- 蔡元元, 苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. *光学*

- 学报, 2006, **26**(11): 1641~1646
- 4 Carsten Reich, Reinhold Ritter, Jan Thesing. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 224~231
 - 5 Hu Yong, Liu Qiang, Wang Congjun *et al.*. Research on binocular stereo vision sensor[J]. *J. Transducer Technology*, 2005, **24**(2): 86~88
 - 胡 勇, 刘 强, 王从军 等. 双目视觉测量传感器研究[J]. *传感器技术*, 2005, **24**(2): 86~88
 - 6 Zhao Huijie, Li Jianjie. Stereo image matching based on phase unwrapped[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5253**: 394~397
 - 7 Qingying Hu, Peisen S. Huang. Calibration of a three-dimensional shape measurement system[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(2): 487~493
 - 8 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. Application of phase shifting method in projection grating measurement[J]. *J. Appl. Opt.*, 2003, **24**(4): 46~49
 - 潘 伟, 赵 毅, 阮雪榆. 相移法在光栅投影测量中的应用[J]. *应用光学*, 2003, **24**(4): 46~49
 - 9 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
 - 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
 - 10 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411
 - 张南洋生, 杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1407~1411
 - 11 Carsten Reich, Reinhold Ritter, Jan Thesing. White light heterodyne principle for 3D-measurement [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3100**: 236~344
 - 12 H. O. Saldner, J. M. Huntley. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2770~2775
 - 13 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
 - 14 Shao Shuangyun. Applied Study on Modulation Measurement Profilometry [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004
 - 邵双运. 调制度测量轮廓术应用研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004

“2008 年度中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊,中文核心期刊,创刊于 1964 年,是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨,促进国内外学术交流,沟通科研与产业的联系。

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的部分具有重要学术、应用价值的论文。本栏目得到了包括众多著名科学家在内国内一流研究人员的肯定和支持,“2007 中国光学重要成果”发布会上,国家科技部副部长、《光学学报》主编曹健林,中国光学学会理事长、《中国激光》主编周炳琨院士,《激光与光电子学进展》主编范滇元院士,中科院上海光机所所长朱健强等为获奖代表颁奖。

为了让读者了解 2008 年度我国光学领域科研人员的最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,本刊 2009 年第 2 期继续推出 2008 年度中国光学重要成果栏目,现向全国在光学领域在国际知名刊物发表论文的专家、学者征稿。征稿说明如下:

1. 来稿条件:研究成果已发表在 2008.01.01~2008.12.31 日以来出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*,

Opt. Lett. 等;

2. 稿件格式:最多不超过 1 500 字,不超过 2 张图片。必须用中文,语言简洁易懂,不必提供过多技术细节,尽量避免使用公式,最好选用彩色图片,参考文献不超过 5 篇,文章结尾处注明作者发表论文的出处,论文格式可参考中国光学期刊网。并注明来稿的创新之处;

3. 请作者标出所投论文的所属研究领域,如自适应光学、生物光子学、探测器、衍射光学、光纤光学、纳米光学、非线性光学、光学工程、光子结构、光传播、量子光学、半导体光学、超快光学等;投稿应该包括作者的姓名、单位和联系方式;

4. 录用稿件不收取任何审稿费、版面费,投稿截止日期 2008.12.31;

5. 投稿方式

在线投稿: www.opticsjournal.net/lop.htm

E-mail: lop@siom.ac.cn;

6. 说明:为了能全面反映国内光学领域的研究成果,本栏目只接受每个研究小组的一篇报道,但该报道可以介绍一个或几个相关的研究成果;本次活动入选论文将在 2009 年 3 月向社会公布并向入选作者颁奖。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23