

文章编号 1004-924X(2011)10-2520-06

基于极线校正的快速相位立体匹配

姜宏志*, 赵慧洁, 梁宵月, 李 冬

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要:基于双目结构的投影栅相位法利用相位值建立左右图像对应点匹配关系,但传统相位立体匹配方法匹配速度较慢,因此本文提出了一种基于极线校正的相位立体匹配方法来提高相位立体匹配速度。首先,通过极线校正算法将双目立体视觉几何结构转换成极线标准几何结构,即左图中任意一点在右图的极线是与该点纵坐标相同的水平直线。然后,在对左右相位图进行极线校正的基础上,给出了改进的相位立体匹配方法步骤。最后,通过对实物进行三维重建,分析比较了传统相位立体匹配方法与改进方法的性能。实验结果表明,与传统方法相比,改进的方法将匹配时间缩短了63%,能够满足工业应用对测量速度的要求。

关键词:投影栅相位法;极线校正;相位立体匹配

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2520

Phase-based stereo matching using epipolar line rectification

JIANG Hong-zhi, ZHAO Hui-jie, LIANG Xiao-Yue, LI Dong

(Precision Opto-mechatronics Technology Key-laboratory of Education Ministry,
School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191)

* Corresponding author, E-mail: jhz1862@126.com

Abstract: Projected grating phase method with two-camera setups uses phase values to set up the corresponding points between the left and right images. For solving the problem of a lower speed in the traditional phase-based stereo matching method, a new phase-based stereo matching method using epipolar line rectification is presented to improve the speed of phase-based stereo matching. Firstly, the epipolar line rectification algorithm is used to transform the bi-stereo geometry into the epipolar standard geometry. That is, the epipolar line for a certain point on the left image is simply the horizon line with the same row coordinate on the right image. Then, based on the epipolar line rectifications of left and right phase maps, procedures of improved phase-based stereo matching method are presented. Finally, through three-dimensional reconstruction of certain objects, this paper analyses and compares the performances of original and improved phase-based stereo matching methods. The experimental results show that the improved method has shortened the matching time by 63 percent as compared

收稿日期: 2010-11-15; 修订日期: 2011-02-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042403); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0705)

with that of traditional method. The method can meet the requirements of high speed for industrial measurements.

Key words: projected grating phase method; epipolar line rectification; phase-based stereo matching

1 引言

投影栅相位法^[1]是光学非接触三维形貌测量的一种重要方法。投影栅相位法具有快速、高精度的特点,在工业测量领域的应用日趋广泛。投影光栅相位法使用投射器^[2]投射光栅到物体表面,光栅在物体表面发生变形,相位受到调制从而携带物体表面信息,利用这些相位信息可恢复物体表面三维形貌。基于投影光栅法的双目三维测量系统首先通过解相算法(相移法^[3]和傅里叶轮廓术^[4])解调相位,计算得到被包裹在区间的相位,再通过相位展开算法^[5-6]还原连续真实的相位图。然后,利用相位约束进行立体匹配,得到左右摄像机的对应匹配点。最后,根据双目立体视觉三维重建原理^[7]计算物体三维形貌。其中,相位立体匹配方法的性能是影响三维测量系统性能的主要因素之一。相位立体匹配使用相位作为匹配约束条件,具有环境光影响较小、匹配点密集等优点。相位立体匹配研究的难点是等相位点的寻找。通过投射两组相互垂直的光栅得到两条等相位线,再利用两条等相位线相交可以实现匹配点的寻找^[8]。由于需要投射两组光栅,该方法难以满足工业测量快速性要求。传统的利用极线约束的匹配方法^[9]通过在极线上寻找等相位点将匹配过程由二维转化成一维,提高了匹配速度和精度。但是,受镜头畸变影响,计算量仍然较大,无法满足工业测量对相位匹配的快速性要求。

本文针对传统的相位立体匹配方法的不足,提出了一种改进的相位立体匹配方法。该方法通过极线校正^[10],在校正镜头畸变同时提高相位匹配速度,能够满足工业测量的快速性要求。

2 原理

在基于投影光栅法的双目三维测量系统中,如果已知世界坐标系中一点 P 在左右图像中的投影点分别为 p_l 、 p_r ,如图 1 所示。

那么 p_l 在右图像中对应的匹配点 p_r 必定位

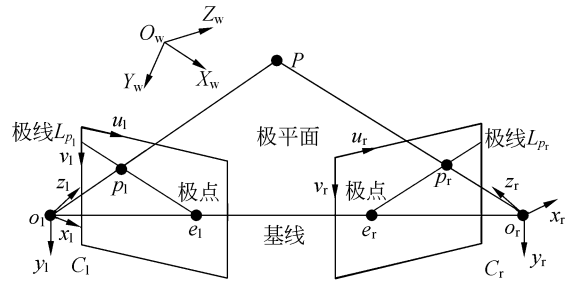


图 1 双目立体几何结构

Fig. 1 Bi-stereo geometry

于 p_l 在右图像中的极线 L_{p_r} 上,极线可由下式计算得到:

$$\begin{cases} L_{p_r} = \mathbf{F}p_l \\ L_{p_l} = \mathbf{F}^T p_r \end{cases}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{F} 是基本矩阵,可以由左右摄像机内外参数计算得到。

极线校正的目的是使左图像中一点在右图像中的极线为与该点纵坐标相同的水平直线,实现极线标准结构,如图 2 所示。极线标准几何结构具有如下特点:(1)基线同时包含在左右摄像机焦平面内;(2)所有的极线与基线平行;(3)左右相位图匹配点具有相同的纵坐标。

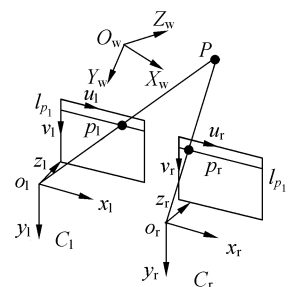


图 2 极线标准几何结构

Fig. 2 Epipolar standard geometry

2.1 摄像机模型

在线性摄像机模型下,空间点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像机像平面上的投影可用齐次坐标表示为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[R|T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, s 为比例系数, $[u, v]^T$ 表示 P 点的图像像素坐标, A 是摄像机内参数矩阵, R 和 T 分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量. α_x 和 α_y 分别 u 轴和 v 轴上归一化焦距, u_0 和 v_0 为光学中心.

摄像机镜头的径向和切向畸变模型为: 设空间点 P 在图像坐标下的坐标为 $[u_n \ v_n]^T$, 令 $[x_n \ y_n]^T$ 为规一化的图像坐标^[11], 则:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_n - u_0/\alpha_x \\ v_n - v_0/\alpha_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

带镜头畸变的归一化图像坐标 $[x_d \ y_d]^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x(x_n, y_n) \\ \delta_y(x_n, y_n) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中,

$$\delta_x(x_n, y_n) = x_n(k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2k_3 x_n y_n + k_4(r^2 + 2x_n^2), \quad (6)$$

$$\delta_y(x_n, y_n) = y_n(k_1 r^2 + k_2 r^4) + k_3(r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n, \quad (7)$$

$$r^2 = x_n^2 + y_n^2, \quad (8)$$

其中, $[k_1 \ k_2]$ 为径向畸变系数, $[k_3 \ k_4]$ 为切向畸变系数, 则带镜头畸变的图像坐标 $[u_d \ v_d]^T$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 + x_d \alpha_x \\ v_0 + y_d \alpha_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.2 极线校正原理

设左右摄像机的内参数矩阵分别为 A_l 和 A_r , 左右摄像机的相对于世界坐标系的外参数分别为 R_l, T_l 和 R_r, T_r , 在世界坐标系下两个摄像机光心的坐标分别为 c_l 和 c_r . 在不考虑镜头畸变的情况下, 令左右摄像机的投影矩阵分别为 M_{ol} 和 M_{or} :

$$\begin{cases} M_{ol} = A_l[R_l|T_l] = A_l[R_l| -R_l c_l] = [Q_{ol}|q_{ol}] \\ M_{or} = A_r[R_r|T_r] = A_r[R_r| -R_r c_r] = [Q_{or}|q_{or}] \end{cases}, \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} Q_{ol} = A_l R_l \\ Q_{or} = A_r R_r \\ q_{ol} = A_l T_l \\ q_{or} = A_r T_r \end{cases}. \quad (11)$$

极线校正原理是在保证两个摄像机光心 c_l, c_r 相对位置不动的前提下, 将两个摄像机坐标系绕着各自的光心旋转, 当旋转到两个摄像机的焦平面共面时, 令新的投影矩阵分别为 M_{nl} 和 m_{nr} , 则

$$\begin{cases} M_{nl} = A[R_n| -R_n c_l] = [Q_{nl}|q_{nl}] \\ M_{nr} = A[R_n| -R_n c_r] = [Q_{nr}|q_{nr}] \end{cases}, \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} Q_{nl} = AR_n \\ Q_{nr} = AR_n \\ q_{nl} = -AR_n c_l \\ q_{nr} = -AR_n c_r \end{cases}. \quad (13)$$

旋转后, 左右摄像机内参数矩阵必须相同, 且外参数旋转矩阵相同. A 可设为 A_l 或 A_r , 左右摄像机相对于世界坐标系的旋转矩阵 R_n 可写为:

$$R_n = [r_1^T \ r_2^T \ r_3^T]^T, \quad (14)$$

其中 r_1, r_2 和 r_3 可由 c_l, c_r 计算得到:

$$\begin{cases} r_1 = (c_l - c_r) / \| (c_l - c_r) \| \\ r_2 = k \wedge r_1 \\ r_3 = r_1 \wedge r_2 \end{cases}, \quad (15)$$

其中 k 是任意单位矢量, r_1 表示旋转后摄像机坐标系 x 轴方向与基线方向 $(c_l - c_r)$ 平行, 而 y 轴方向 r_2 和 z 轴方向 r_3 根据设定的 k 进行计算. 从而计算出旋转矩阵 R_n .

令左图像校正前后图像齐次坐标分别为 m_{ol} 和 m_{nl} , 右图像校正前后图像坐标分别为 m_{or} 和 m_{nr} . 校正前, 世界坐标系下点 P 坐标用直线 $o_l P$ (参见图 1) 的参数方程描述为:

$$P = c_l + s_{ol} Q_{ol}^{-1} m_{ol}, \quad s \in \mathbf{R}, \quad (16)$$

其中, $Q_{ol}^{-1} m_{ol}$ 为直线 $o_l P$ 的方向向量. 同理, 校正后点 P 坐标用直线 $o_r P$ (参见图 2) 的参数方程描述为

$$P = c_r + s_{nr} Q_{nr}^{-1} m_{nr}, \quad s \in \mathbf{R}, \quad (17)$$

根据公式(16)和(17), 可得校正前后左摄像机图像坐标关系为:

$$m_{ol} = \lambda_{ol} Q_{ol} Q_{nl}^{-1} m_{nl}, \quad (18)$$

同理, 可得校正前后右摄像机图像坐标关系为:

$$m_{or} = \lambda_{or} Q_{or} Q_{nr}^{-1} m_{nr}. \quad (19)$$

其中, λ_{ol} 和 λ_{or} 为常数因子.

在考虑镜头畸变的情况下,需再将公式(18)和(19)中得到的 m_{or} 和 m_{or} 分别代入公式(4)中的 $[u_n \ v_n]^T$,由公式(4)~(9),得到带有畸变的图像坐标,从而找到极线校正后坐标与原始图像坐标(带镜头畸变)之间的对应关系。

2.3 相位插值原理

给定校正后的图像坐标,其在原始图像上的对应坐标点一般为亚像素坐标,所以在计算极线校正后的相位图时,需要对原始相位图进行双线性插值。若极线校正后相位图上任一点 P_n 的待求相位为 φ_P ,其对应的极线校正前原始相位图上一点为 $P_0(x, y)$,取 P_0 临近的 4 个像素点 $P_{00}(x_{00}, y_{00}), P_{01}(x_{01}, y_{01}), P_{10}(x_{10}, y_{10}), P_{11}(x_{11}, y_{11})$,对应的相位值为 $\varphi(x_{00}, y_{00}), \varphi(x_{01}, y_{01}), \varphi(x_{10}, y_{10})$ 和 $\varphi(x_{11}, y_{11})$, P_0 与 4 点的关系如图 3 所示:

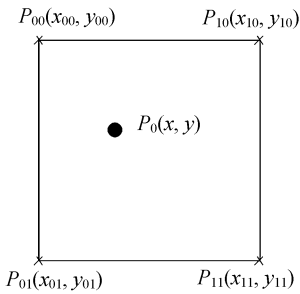


图 3 相位插值示意图

Fig. 3 Phase interpolation chart

通过双线性插值,可得到 P_n 点的相位值 φ_P ,参见式(20)。

$$\begin{aligned} \varphi_P(x, y) = & \varphi(x_{00}, y_{00}) + [\varphi(x_{10}, y_{10}) - \varphi(x_{00}, y_{00})] \cdot \\ & (x - x_{00}) + [\varphi(x_{01}, y_{01}) - \varphi(x_{00}, y_{00})] \cdot \\ & (y - y_{00}) + [\varphi(x_{11}, y_{11}) + \varphi(x_{00}, y_{00}) - \\ & \varphi(x_{01}, y_{01}) - \varphi(x_{10}, y_{10})] \cdot (x - x_{00}) \cdot \\ & (y - y_{00}). \end{aligned} \quad (20)$$

对极线校正后相位图上的每一点均进行双线性插值,即得到了极线校正后的相位图。

2.4 相位立体匹配方法

在基于投影光栅法的双目三维测量系统中,先由校正后新相位图上点的坐标,通过以上极线校正计算出对应于原始相位图上的亚像素坐标,再根据相位插值方法,计算出对应的相位值,从而由左右摄像机原始相位图得到具有极线标准几何结构的新相位图。

依据极线校正后的新相位图,相位立体匹配方法采用以下 4 种约束条件:(1)极线约束。左右相位图匹配点具有相同的纵坐标。(2)相位单调约束。左右摄像机的相位图是单调变化的。(3)顺序一致性约束。极线校正后的左摄像机相位图中的一系列点,在校正后的右摄像机相位图的极线上具有相同的顺序,因此,在搜索过程中,可利用已经找到的匹配点,作为后续匹配时的初始搜索点,提高搜索效率。

在新相位图中,匹配点的搜索过程简化为在直线上寻找相位差值最小的点。先根据左摄像机相位图中待匹配点的相位,在右摄像机相位图纵坐标相同直线搜索与左图该点相位值最接近的点作为初始匹配点,再根据邻近点相位进行线性插值,得到与待匹配点相位相同的右摄像机匹配点坐标,完成相位立体匹配。

3 实验与分析

在以下实验中,采用四步相移法和外差多频相展开算法计算左右摄像机原始相位图。

3.1 极线校正实验

本实验通过对五大圆标定板相位图进行极线校正验证极线校正算法。极线校正前首先利用五大圆标定板对左右摄像机定标,得到左右摄像机的内外参数。图 4 是校正前左右摄像机相位图,图 5 是校正后左右摄像机相位图。实验结果表明,极线校正后左右相位图所有极线相互平行且图像坐标系 X 轴方向一致,对应匹配点具有相同的纵坐标。

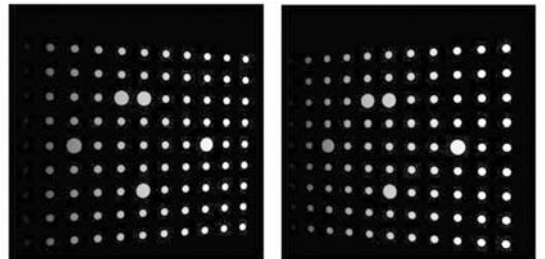


图 4 左右摄像机原始相位图

Fig. 4 Original phase maps of left and right cameras

3.2 三维重建实例

本实验分别采用两种匹配方法对石膏头像进行三维重建。实验前,可根据已标定摄像机内外

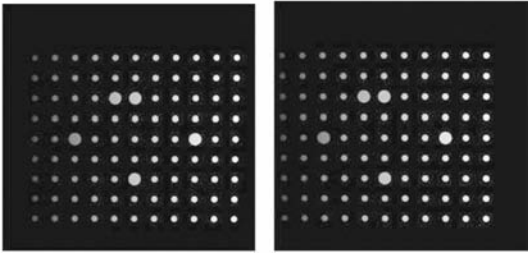


图 5 具有极线标准几何结构的新相位图

Fig. 5 Epipolar line rectification of left and right phase maps

参数下,预先建立了极线校正后坐标与原始图像坐标(带镜头畸变)之间的对应坐标变换表,便于相位插值,缩短了改进的匹配方法的运行时间。实验中,电脑配置为 CPU Pentium 4 3.2 GHz、内存 1 G,摄像机拍摄的原始图像分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 。实验结果显示,传统匹配方法(9)耗时 10.672 s,改进的基于极线校正的快速匹配方法耗时 3.943 s,改进的匹配方法将匹配时间缩短了 63%。传统的相位立体匹配方法需要计算受畸变影响的极线,随着图像分辨率的增加,计算极线非常耗时。改进的相位立体匹配方法通过引入极线

校正,避免了计算复杂极线,缩短了匹配时间。图 6 为采用改进的匹配方法对石膏头像进行三维重建的结果。

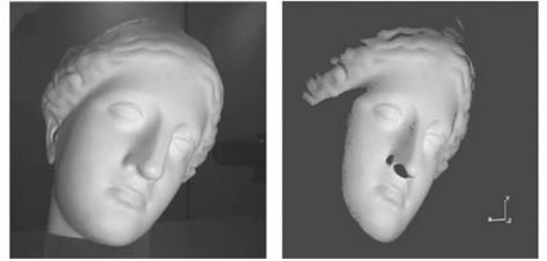


图 6 石膏头像三维重建结果

Fig. 6 Three dimensional reconstruction results

4 结 论

针对高精度快速测量要求,提出了一种基于极线校正的快速相位立体匹配方法。与传统的匹配方法相比,该方法通过极线校正在校正镜头畸变的同时提高了相位立体匹配的速度,避免了计算复杂极线,简化了相位立体匹配点的搜索过程,提高了相位立体匹配的速度。实验结果表明,该方法将匹配时间缩短了 63%。

参考文献:

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39:10-22.
- [2] 赵慧洁,曾俊钰,雷彦章. 基于声光栅的变频条纹投射系统[J]. *光学学报*, 2008, 28(2):355-360.
ZHAO H J, ZENG J Y, LEI Y Z. Frequency-varying fringe projector based on acoustic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2):355-360. (in Chinese)
- [3] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18):3105-3110.
- [4] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, 22(24):3977-3982.
- [5] REICH C, RITTER R, THESING J. White light heterodyne principle for 3D-measurement [J]. *SPIE*, 1997, 3100:236-244.
- [6] 雷彦章,赵慧洁,姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(7):1338-1342.
LEI Y ZH, ZHAO H J, JIANG H ZH. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7):1338-1342. (in Chinese)
- [7] 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):86-22.
HU Y, LIU Q, WANG C J, et al.. Research on binocular stereo vision sensor [J]. *J. Transducer Technology*, 2005, 24(2):86-88. (in Chinese)
- [8] ZHAO H J, LI J J. Stereo image matching based on phase unwrapped[J]. *SPIE*, 2003, 5253:394-397.
- [9] 赵慧洁,雷彦章,姜宏志. 基于投影栅相位的立体匹配方法[C]. 第十三届图形图像会议论文集, 2006:496-500.
ZHAO H J, LEI Y Z, JIANG H Z. The Stereo

Matching Method Based on the Projected Grating Phase method [C]. *The 13th Image and Graphics Conference Proceedings*, 2006: 496-500. (in Chinese)

- [10] FUSIELLO A, TRUCCO E, VERRI A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J].

Machines Vision and Application, 2000, 12: 16-22.

- [11] ZHANG ZH Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.

作者简介:



姜宏志(1978—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,2001年、2004年分别于大连交通大学获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉及三维形貌测量等方面的研究。E-mail: jhz1862@126.com



梁青月(1987—),女,河北人,硕士研究生,2005年于四川大学获学士学位,主要从事三维形貌测量方面的研究。E-mail: i19870816@tom.com



赵慧洁(1966—),女,辽宁人,教授,博士生导师,1988年、1991年、1994年于哈尔滨工业大学精密仪器系分别获学士、硕士和博士学位,现为北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院书记,主要从事光电检测、机器视觉及信息处理等方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn



李冬(1985—),男,陕西西安人,硕士研究生,2007年于北京航空航天大学获学士学位,主要从事三维形貌测量方面的研究。E-mail: dongli@sa.buaa.edu.cn

● 下期预告

螺旋型波荡器辐射特性及光束线前置镜热载分布

程显超,李中亮,赵飞云,徐朝银

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029)

合肥国家同步辐射实验室新引进了一台螺旋型电磁波荡器,插入电子储存环的直线段,产生高通量圆偏振相干光,提供一条真空紫外光束线,用于燃烧科学研究。本文基于 NSRL 改造后的光源参数,分析螺旋型波荡器的同步辐射偏振特性,计算了由该波荡器辐射出的总功率和功率密度分布,以及受其直接辐照的光束线前置环面镜的热载、温度场和由此导致光学镜面的面形误差,为光束线工程设计提供理论依据。