

# 一种极线约束修正数字图像相关匹配的 立体视觉测量方法

单宝华<sup>1,2,3</sup>, 霍晓洋<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

<sup>3</sup>哈尔滨工业大学土木工程智能防灾减灾工业与信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090

**摘要** 为了提高立体视觉方法的测量精度,提出一种极线约束修正数字图像相关(DIC)匹配的立体视觉测量方法。该方法通过 DIC 方法获得立体匹配的初值,应用极线约束对匹配计算结果进行修正,取位于右极线上距 DIC 匹配结果最近的点作为新的匹配点,并将该种匹配置正方法推广到右图像时序匹配。在材料实验机上完成 304 不锈钢试件单向拉伸实验,以引伸计的测量结果为真值,对比极线约束修正前后的双目立体视觉的测量误差。实验结果表明,极线约束修正以后,双目立体视觉测量误差的最大值、平均值及均方值均减小,说明极线约束修正后的匹配方法可以提高立体视觉方法的测量精度。

**关键词** 测量; 极线约束; 数字图像相关; 修正; 图像匹配

**中图分类号** TU317+.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0804003

## A Stereovision Measurement Method Using Epipolar Constraint to Correct Digital Image Correlation Matching

Shan Baohua<sup>1,2,3</sup>, Huo Xiaoyang<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China

**Abstract** To improve the measurement accuracy of stereovision method, a correction method based on epipolar constraint for digital image correlation (DIC) stereo matching is proposed. The initial stereo matching result is obtained by DIC method, and then the initial results are corrected by epipolar constraint. The point on the right pole line, which is the nearest to the initial result of DIC method, is selected as the new matching point on right image. In addition, this method is also used to match the sequential images. The tensile test of 304 stainless steel specimen is conducted on a material testing machine. Compared the measurement error of the proposed method with that of stereovision method without correction, the experimental results show that the maximum error, the average error and the root mean square value of the proposed method decrease through correction by epipolar constraint, which testifies that the proposed method can improve the measurement accuracy of stereovision method.

**Key words** measurement; epipolar constraint; digital image correlation; correction; image matching

**OCIS codes** 120.3930; 150.1135; 150.4065

**收稿日期:** 2017-03-13; **收到修改稿日期:** 2017-04-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51478148)、黑龙江省自然科学基金(E201434)、哈尔滨市创新人才研究专项基金(2015RAQXJ028)

**作者简介:** 单宝华(1975—),女,博士,副教授,主要从事结构健康监测、立体视觉及超声相控阵检测等方面的研究。

E-mail: shanbaohua@hit.edu.cn

# 1 引 言

在立体视觉测量领域,摄像机标定和左右图像立体匹配是两大核心问题,从某种意义上讲,相机标定技术和立体匹配算法的发展决定了立体视觉方法的发展<sup>[1]</sup>。立体匹配主要研究如何确定一副图像中某一点在另一幅图像中的对应点。立体匹配算法可以分为全局匹配算法<sup>[1-3]</sup>和局部匹配算法<sup>[4-6]</sup>。常用的全局匹配算法<sup>[7]</sup>包括动态规划算法和图割算法。虽然置信度传播算法<sup>[8]</sup>和图割算法<sup>[9]</sup>是比较好的全局匹配算法,但这两种算法计算时间长、效率低。在不影响匹配精度的前提下,学者们纷纷将注意力转移到局部匹配算法。常用的局部匹配算法<sup>[7]</sup>包括特征匹配算法、相位匹配算法和区域匹配算法。特征匹配算法的不足之处在于仅实现图像的离散匹配,得不到连续的视差图<sup>[10]</sup>。相位匹配算法存在相位奇点的问题<sup>[11]</sup>。在土木工程领域广泛使用的数字图像相关(DIC)方法是一种区域匹配算法。近年来,随着 DIC 方法的不断发展,DIC 方法在立体匹配中的优势越来越明显。

2009年,孙伟等<sup>[12]</sup>开展了 DIC 方法在土木工程测试领域的应用研究,采用橡胶带的拉伸实验验证 DIC 方法的测量精度。同年,Vasseur 等<sup>[13]</sup>应用 2 个高分辨率 CCD 相机测量碳纤维增强复合材料(FRP)加固的两跨钢筋混凝土梁产生裂缝的过程。2010年,叶南<sup>[14]</sup>在 DIC 方法的基础上提出分段位移传递法(FDT),并将 FDT 应用于大变形下的立体匹配与时序匹配。2013年,Kashfuddoja 等<sup>[15]</sup>应用三维 DIC(3D-DIC)方法对带孔洞的碳纤维 FRP 板进行实验,实验包括一侧加固和两侧加固两种情况。2014年,刘聪等<sup>[16]</sup>应用 3D-DIC 方法测量了 FRP 包裹混凝土柱抗压实验,立体匹配选择二阶函数。同年,朱飞鹏等<sup>[17]</sup>应用 3D-DIC 方法测量了玻璃 FRP 锚杆试件的拉伸性能,所用立体匹配算法为 DIC 方法。2015年,Shan 等<sup>[18]</sup>提出基于 Canny-Zernike 边缘检测的用于监测桥梁拉索模型自由振动的立体视觉方法。该立体视觉方法采用卡尔曼滤波进行时序图像的匹配,采用 DIC 方法进行左右图像的立体匹配。同年,董帅等<sup>[19]</sup>采用四相机两套 3D-DIC 系统实现口腔印模的 3D 重构,戴美玲等<sup>[20]</sup>采用 3D-DIC 方法测量了薄壁球壳受刚性球面压缩的连续变形。

通过比较分析可以发现,上述 DIC 方法进行立体匹配时没有考虑极线约束,给测量结果带来计算误差。极线约束是立体匹配中一个很重要的约束关系。极线约束给出的是点与直线的对应,但对对应点的匹配具有指导作用。为解决此问题,本文提出考虑极线约束的立体匹配修正计算方法。该方法将位于右极线上距 DIC 匹配结果最近的点作为新的匹配结果,替代直接由 DIC 方法匹配得到的结果,并将这种考虑极线约束的修正方法推广至时序匹配过程中,以提高立体视觉方法的测量精度。

# 2 基本原理

## 2.1 极线几何基本概念

如图 1 所示, $P$  是空间一点, $C$  为相机光心, $I$  为图像平面, $p$  为空间点  $P$  在图像平面  $I$  上的投影点, $l$  为极线,下标  $l$  表示左相机,下标  $r$  表示右相机。经过左右相机光心  $C_l$  和  $C_r$  的直线称为基线。由空间点  $P$  和左右相机光心  $C_l$  和  $C_r$  确定的平面称为极平面,用  $\pi$  表示。基线  $\overline{C_l C_r}$  与左右相机图像平面  $I_l$  和  $I_r$  的交点称为极点,用  $e_l$  和  $e_r$  表示。极平面  $\pi$  与左右相机图像平面  $I_l$  和  $I_r$  的交线  $\overline{p_l e_l}$  和  $\overline{p_r e_r}$  称为极线,用  $l_l$  和  $l_r$  表示。极线  $l_l$  为图像  $I_l$  上对应于  $p_r$  的极线,极线  $l_r$  为图像  $I_r$  上对应于  $p_l$  的极线。

如果已知投影点  $p_l$  在左相机图像平面  $I_l$  内的位置,那么在图像  $I_r$  内  $p_l$  所对应的点必然位于它在图像

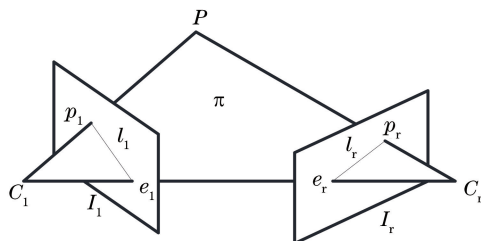


图 1 极线几何关系

Fig. 1 Epipolar geometry

$I_r$  内的极线上,即与  $p_l$  对应的  $p_r$  一定位于直线  $I_r$  上。反之,如果已知投影点  $p_r$  在右相机图像平面  $I_r$  内的位置,那么图像  $I_l$  内  $p_r$  所对应的点必然位于它在图像  $I_l$  内的极线上,即与  $p_r$  对应的  $p_l$  一定位于直线  $I_l$  上。在双目立体视觉测量领域中,称这种相互对应的约束关系为极线约束。极线约束给出点与直线的对应,对对应点的匹配具有指导作用。

### 2.2 极线几何满足的定量关系

在阐述极线几何满足的定量关系之前,需先介绍一下齐次坐标。在欧氏坐标系中,平面上的点可以用二维有序数组  $p'=(x,y)^T$  来表示。平面上直线  $l$  的方程可以表示为

$$ax + by + c = 0, \quad (1)$$

在(1)式两边同时乘以任一非零常数  $t$ ,得到

$$ax t + by t + ct = 0, \quad (2)$$

(1)式和(2)式表示的几何意义相同,都表示同一条直线。令  $p = (xt, yt, t)^T, l = (a, b, c)^T$ , 则(2)式可以写成

$$l^T p = 0, \quad (3)$$

式中  $p = (xt, yt, t)^T$  称为点  $p'=(x,y)^T$  的齐次坐标; $l = (a, b, c)^T$  称为直线  $l$  的齐次坐标。齐次坐标的一个重要的性质就是齐次坐标相差任意的非零常数仍然相同,即对于任意的常数  $s \neq 0$ ,齐次坐标  $p = (x, y, t)^T$  和  $q = sp = (sx, sy, st)^T$  表示同一个点,因为它们的非齐次坐标相同,表示为

$$p' = \left( \frac{x}{t}, \frac{y}{t} \right)^T = \left( \frac{sx}{st}, \frac{sy}{st} \right)^T = q'. \quad (4)$$

对于直线的齐次坐标也有类似的性质。需注意的是,对于点的齐次坐标  $p = (xt, yt, t)^T$ ,当  $t=1$  时,齐次坐标对应的前两位与欧氏坐标系下的点的坐标相同。引入齐次坐标的主要目的是在后面的矩阵运算中应用齐次坐标,使得方程表达简单明了。后述分析中如无特殊说明,点的坐标是指点的齐次坐标,直线方程为直线的齐次坐标。

如图 1 所示,空间点  $P$  在左右图像上投影点分别为  $p_l$  和  $p_r$ ,在不引起混淆的情况下,投影点的坐标也用  $p_l$  和  $p_r$  来表示。 $p_l$  和  $p_r$  满足的关系式为

$$p_r^T F p_l = 0, \quad (5)$$

式中  $F$  为一个 3 行 3 列的矩阵,称为基本矩阵,rank( $F$ )=2。基本矩阵可表示为

$$F = A_r^{-T} S R A_l^{-1}, \quad (6)$$

式中  $A_l$  和  $A_r$  分别表示左右相机的内参数矩阵,由标定计算结果给出。 $R$  为左相机到右相机的坐标系的旋转矩阵(3 行 3 列), $S$  为由左相机到右相机坐标系的平移向量  $T$  所确定的反对称矩阵。由左相机到右相机的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$  可以通过立体标定计算得到。

设  $T = (t_x, t_y, t_z)^T$ ,则  $S$  的计算式为

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由以上分析可以看出,经过相机标定计算和立体标定计算以后,可以完全确定基本矩阵  $F$ 。可见,基本矩阵只与双目立体视觉系统的参数有关,与外部场景无关,其提供的是双目立体视觉系统内在的一种约束关系。由此,右极线的方程和左极线的方程为

$$l_r = F p_l, \quad (8)$$

$$l_l = F^T p_r. \quad (9)$$

以上对极线几何的基本概念和定量关系做了基本的介绍,详细的理论介绍和推导过程可以参考文献[1]和文献[21]。

## 3 考虑极线约束的立体视觉测量方法

### 3.1 考虑极线约束的立体匹配修正

文献[22]介绍了采用 DIC 方法进行立体匹配的计算方法,其基本过程如图 2 所示。DIC 方法进行立体

匹配过程为:1)从左参考图像上截取匹配子区,将匹配子区与右参考图像做相关运算得到相关系数矩阵;2)从相关系数矩阵中寻找最大的相关系数,获得整像素位置;3)通过二次曲面拟合确定亚像素位置,计算得到右参考图像与左参考图像匹配子区中心相对应的点的坐标,则立体匹配完成。

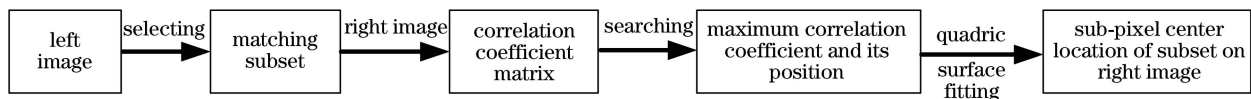


图 2 DIC 方法的立体匹配过程

Fig. 2 Process of stereo matching using DIC method

该立体匹配过程在许多相关文献[14-15]中也有类似阐述,虽然在相关系数、整像素及亚像素定位计算方法等方面略有不同,但总的思路是一致的。由图 2 可知,上述方法在采用 DIC 方法进行立体匹配时,均没有考虑用极线约束条件来限制对应匹配点的选取。

图 2 的立体匹配过程是一个已知左参考图像上投影点的图像坐标  $p_l$ ,通过相关运算求解对应的右参考图像上投影点的图像坐标  $p_r$  的过程。理论上, $p_l$  和  $p_r$  应满足(5)式所示极线约束方程。但实际计算发现,将  $p_l$  和  $p_r$  代入(5)式,等式左边并不是精确为 0。这说明经过相关运算和亚像素定位获得的右参考图像上对应投影点的坐标  $p_r$  计算存在误差,因此,需要对搜索到的结果进行修正,使其满足极线约束方程。

如图 3 所示, $p_r$  为采用 DIC 方法获得的右图像上的匹配点, $l_r$  为右极线, $p'_r$  为过  $p_r$  垂直于  $l_r$  的垂足。 $p'_r$  位于右极线上,满足极线约束条件,且为距离  $p_r$  最近的点。本文用  $p'_r$  代替  $p_r$ ,作为经过极线约束修正后的立体匹配结果。经过修正后的立体匹配点  $p'_r(x, y)$  的求解过程可以归结为:已知平面上一点与一直线方程,求解过该点与直线相垂直的交点。

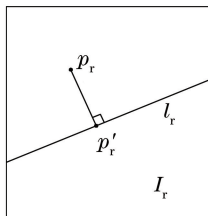


图 3 右图像立体匹配修正

Fig. 3 Correction of stereo matching on right image

如图 3 所示, $p_r(x_0, y_0)$  是由 DIC 方法立体匹配获得,在右图像上与  $p_l$  相对应的初始匹配点,右极线  $l_r$  为已知直线。因为左参考图像上点  $p_l$  和基本矩阵  $F$  已知,由(8)式得到右极线  $l_r$  的其次坐标  $l_r = Fp_l = (a, b, c)^T$ ,则直线  $l_r$  的方程可以表示为  $ax + by + c = 0$ 。

设  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  是右极线  $l_r$  上两个不同的点,将其代入直线方程,可以得到如下方程组:

$$\begin{cases} ax_1 + by_1 + c = 0 \\ ax_2 + by_2 + c = 0 \end{cases} \quad (10)$$

进一步整理,可以得到

$$a(x_1 - x_2) + b(y_1 - y_2) = 0。$$

所以,有向量垂直的关系,即

$$(a, b) \perp (x_1 - x_2, y_1 - y_2)。$$

又因为  $(x - x_0, y - y_0) \perp (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$ ,所以  $(x - x_0, y - y_0)$  与  $(a, b)$  平行。并且,  $p'_r(x, y)$  在直线  $l_r$  上,则可以得到如下方程组:

$$\begin{cases} ax + by + c = 0 \\ \frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} \end{cases} \quad (11)$$

将(11)式写成矩阵的形式为



$$\begin{bmatrix} a & b \\ b & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c \\ bx_0 - ay_0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由(12)式就可以计算出  $p'_r(x, y)$  的坐标, 此点即为经过极线约束修正后, 与左图像上  $p_l$  点相对应的右图像上的匹配点。

综上所述, 采用极线约束对 DIC 立体匹配结果进行修正的基本过程为

- 1) 根据相机标定结果计算基本矩阵  $F$ ;
- 2) 根据左图像上对应点  $p_l$  的坐标计算右极线方程  $l_r = Fp_l$ ;
- 3) 寻找右极线上距离 DIC 匹配结果  $p_r$  最近的点  $p'_r$ , 该点即为极线修正后匹配点;
- 4) 将极线约束修正后的匹配方法推广到时序匹配过程中。采用极线约束对立体视觉测量过程中的立体匹配与时序匹配同时进行修正, 修正后匹配流程如图 4 所示。

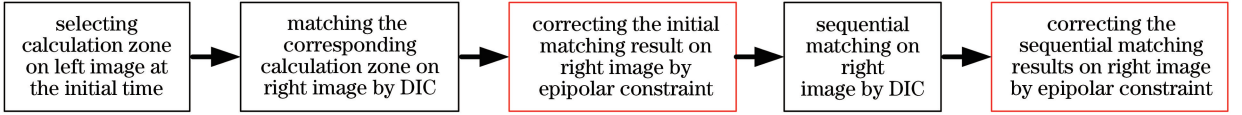


图 4 极线约束修正立体匹配过程

Fig. 4 Stereo matching process of epipolar constraint correction

### 3.2 考虑极线约束的立体视觉测量方法

在应用上述经过极线约束修正的 DIC 方法进行立体匹配时, 本文选择的 DIC 方法的相关函数为零均值归一化互相关函数(ZNCC), 该函数考虑了光照不均匀分布情况, 具有较好的抗噪性和稳健性, 其表达式为

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{u,v} [f(u,v) - \bar{f}] [g(x+u, y+v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{u,v} [f(u,v) - \bar{f}]^2 \sum_{u,v} [g(x+u, y+v) - \bar{g}]^2}}, \quad (13)$$

式中  $f$  为参考子区的灰度矩阵, 也称为模板, 来自于参考图像;  $\bar{f}$  为模板元素的平均值;  $g$  为变形图像矩阵;  $\bar{g}$  为  $f$  和  $g$  重合的那个区域灰度矩阵元素的平均值。最后求得的  $C_{ZNCC}$  为相关系数矩阵, 矩阵中元素的取值范围为  $[-1, 1]$ , 矩阵中元素绝对值越大意味着模板与图像之间匹配越好。

目前, 常用的亚像素搜索方法为牛顿-拉弗森(N-R)方法, 该方法需对图像灰度进行插值并且要对相关函数求导, 计算复杂。在保证搜索精度的前提下, 为了提高搜索效率, 选用二次曲面拟合的方式进行亚像素搜索。设相关系数矩阵  $C_{ZNCC}$  中绝对值最大元素的位置为  $Q(x_0, y_0)$ , 由  $Q$  以及周围的 8 个整像素点共 9 个点形成局部二次相关曲面, 该曲面方程为

$$\Phi(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f. \quad (14)$$

通过这 9 个点的位置以及对应位置处的相关系数值, 可以拟合出  $a \sim f$  的数值, 从而计算出曲面的极值点坐标  $\left(\frac{ce - 2bd}{4ab - c^2}, \frac{cd - 2ae}{4ab - c^2}\right)$ 。该极值点即为选取的子区域在变形图像上的中心。

双目立体视觉模型如图 5 所示, 其中  $P$  为空间中某一测点,  $o_r - x_r y_r z_r$  为右相机坐标系,  $o_l - x_l y_l z_l$  为左相机坐标系, 也是世界坐标系;  $O_l - X_l Y_l$  为左图像归一化坐标系,  $O_r - X_r Y_r$  为右图像归一化坐标系。测点  $P$  的三维坐标可以通过以下方程组进行求解, 即

$$\begin{cases} x_p = z_p X_l / f_l \\ y_p = z_p Y_l / f_l \\ z_p = \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $f_l, f_r$  分别为左右像机有效焦距,  $r_1, \dots, r_9$  和  $t_x, t_y, t_z$  为表征两像机相互位置关系的外参数,  $(X_l, Y_l)$  和  $(X_r, Y_r)$  为测点在左右图像上的坐标, 其中右图像坐标按照本文方法进行匹配修正。

每一时刻空间点的三维坐标可以由(14)式进行计算, 任一时刻三维坐标与初始时刻三维坐标的差值即为该时刻空间点的三维位移。

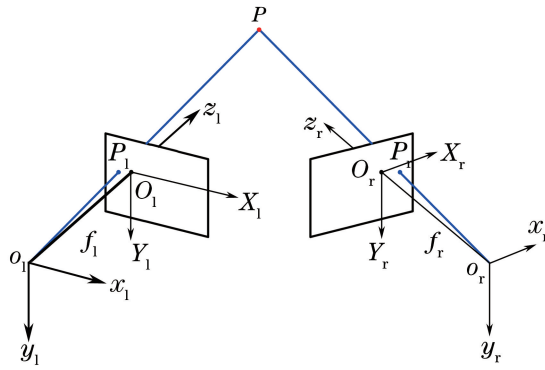


图 5 双目立体视觉模型

Fig. 5 Binocular stereovision model

## 4 试件拉伸实验

304 不锈钢具有韧性高、耐腐蚀、易于加工等优点,已广泛应用于工业、家具装饰等。实验所用的 304 不锈钢试件屈服强度为 205 MPa,抗拉强度为 520 MPa。文献[22]在立体匹配和时序匹配过程中采用 DIC 算法寻找最优解,结果表明,这种方法可以满足工程上的需求,但是在精度上还有待进一步提高。本文将极线约束条件应用到图像立体匹配中以提高立体匹配的精度,对 304 不锈钢试件进行位移测量,并将测量结果与引伸计的结果进行对比,并分析误差、验证极线约束对测量结果的影响。

### 4.1 实验设置

为了验证本文方法的有效性,在万能材料试验机上进行试件的单向拉伸实验。试件尺寸如图 6 所示,长度为 200 mm,厚度为 6 mm,材料为 304 不锈钢。在试件表面喷涂黑白相间的散斑,具体过程为先在试件表面喷涂一层黑色漆,待黑色漆晾干后,在黑色漆上面再均匀覆盖一层白色漆,保证肉眼能看到黑白相间的斑点,喷涂散斑的试件如图 7 所示。

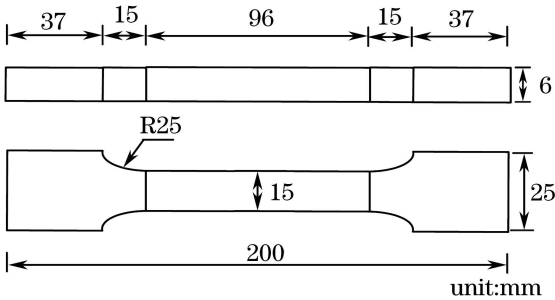


图 6 试件尺寸

Fig. 6 Specimen size

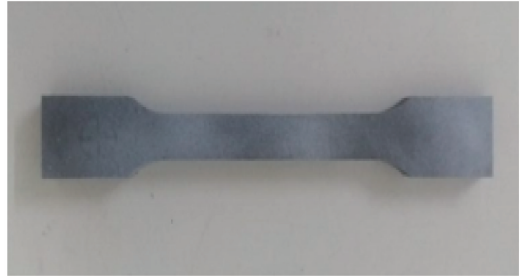


图 7 试件照片

Fig. 7 Specimen photo

实验所用的加载设备为微机控制电子万能试验机(HY-10080,上海衡翼精密仪器有限公司,上海),最大负荷为 100 kN,加载过程采取连续加载方式,力从 0 N 逐渐加载到 26 kN,之后试件进入塑性阶段,力逐渐减小到 25 kN,加载速度为  $0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;在试件上夹持一个引伸计,记录试件的伸长量,引伸计的标距为 50 mm,量程为 25 mm,精度为 0.005 mm,采样频率为 25 Hz。

双目立体视觉系统如图 8 所示,由两个 CCD 摄像机(Pike-F-100c, Allied Vision Technologies,德国)、摄像机支架、标定板和计算机构成。计算机配备 2 Tb 的存储空间,运行内存为 8 Gb,CPU 的主频为 3.7 GHz;标定板采用张正友棋盘格标定板,制作材料为亚克力板,表面粘贴  $9 \times 9$  个黑白相间的方格,每个方格的实际尺寸为 6 mm;摄像机像素为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ ,由外部触发信号控制两个 CCD 相机同时采集图片,采样频率为 10 Hz,镜头选用 36 mm 的定焦镜头;摄像机的高度可通过支架调节,并根据实验的现场环境调节摄像机的采光和清晰度;实验所用摄像机与 304 不锈钢试件表面的距离约为 1000 mm,相机距离地面的高度约为 800 mm;采用 6 W 的 LED 灯作为补充光源。实验现场照片如图 9 所示。

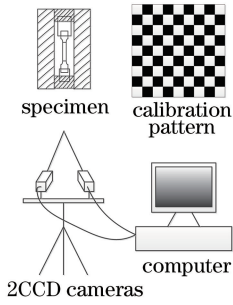


图 8 立体视觉系统

Fig. 8 Stereovision system

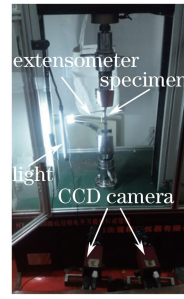


图 9 实验照片

Fig. 9 Experimental photo

### 4.2 实验结果分析

实验之前采用张正友标定方法对相机进行标定,在试件表面摆放不同姿态的标定板。共采集 9 张标定图片,然后采用张正友标定工具箱对立体视觉系统进行标定,得到相机的内外参数。采用材料试验机分别对 4 个试件进行拉伸实验:在试件表面夹持引伸计,计算机记录引伸计的伸长量,由另外一台计算机控制立体视觉系统的同步触发器,采集拉伸过程中的照片。后期数据处理时,在引伸计夹持的位置分别选取两个测点,采用立体视觉的方法计算这两个测点的位移,并通过作差得到两个测点间的距离,与引伸计的结果作对比。引伸计和测点的位置如图 10 所示。

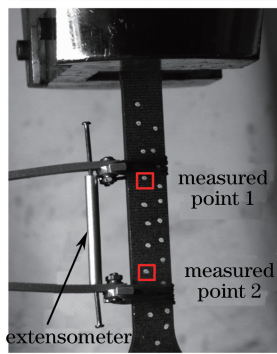


图 10 引伸计和测点位置

Fig. 10 Extensometer and position of measured point

对于 1~4 号试件,将极线约束前后立体视觉方法测量得到的位移数据和引伸计得到的数据进行对比,得到两个测点间的的面内位移和误差,如图 11 所示。由图 11 可知,两种方法得到的位移结果均与引伸计的结果基本一致,与传统的立体视觉测量方法相比,加入极线约束的立体视觉测量方法得到的位移结果更接近引伸计的位移结果。将两种方法得到的位移结果分别与引伸计进行比较,误差绘制于图 12 中。

由图 12 可知,4 个试件经极线约束处理后,立体视觉方法与引伸计的测量位移误差值都小于引入极线约束前的立体视觉方法的测量误差。将 4 个试件在极线约束前和极线约束后的立体视觉方法获得位移的平均误差、最大误差、均方误差对比结果列于表 2 中。由表 2 可知,经极线约束处理后,立体视觉方法测得的 4 个试件位移的平均误差、最大误差及均方误差均比无极线约束处理的立体视觉方法获得的对应值小,降幅分别为 42.1%,36.5%,8.6%。因此,采用极线约束方法修正图像的立体匹配及时序匹配结果,可以降低立体视觉测量方法的平均误差、最大误差及均方误差,提高立体视觉方法的测量精度。

表 2 极线约束前后误差对比

Table 2 Comparison of errors before and after epipolar constraint

Specimen	Average error /mm		Maximum error /mm		Mean square error /mm	
	Before correction	After correction	Before correction	After correction	Before correction	After correction
1 #	0.032485	0.018805	0.205699	0.130497	0.11540	0.10544
2 #	0.045313	0.01626	0.189188	0.096512	0.09674	0.06214
3 #	0.063193	0.014025	0.153284	0.067211	0.10247	0.07112
4 #	0.069603	0.020814	0.249851	0.131686	0.08445	0.06524

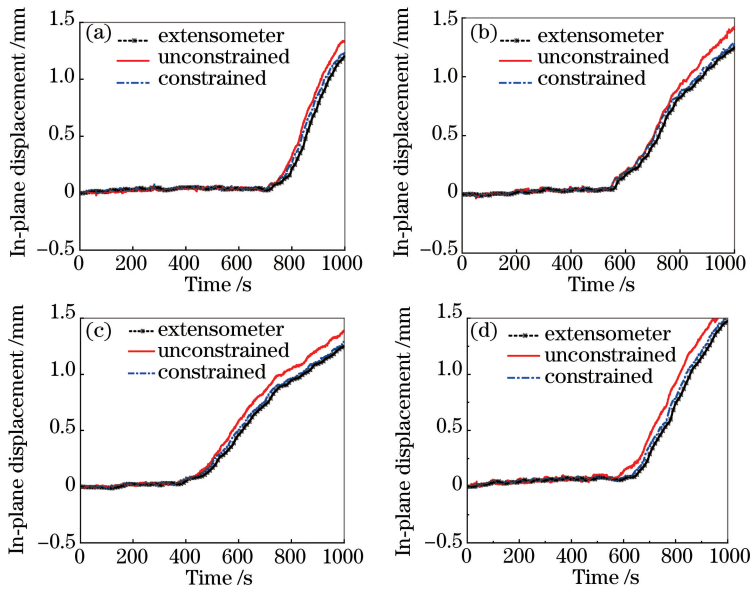


图 11 极线约束修正前后位移曲线对比。(a) 1# 试件;(b) 2# 试件;(c) 3# 试件;(d) 4# 试件  
 Fig. 11 Comparison of displacement curves before and after correction of epipolar constraint.  
 (a) 1# specimen; (b) 2# specimen; (c) 3# specimen; (d) 4# specimen

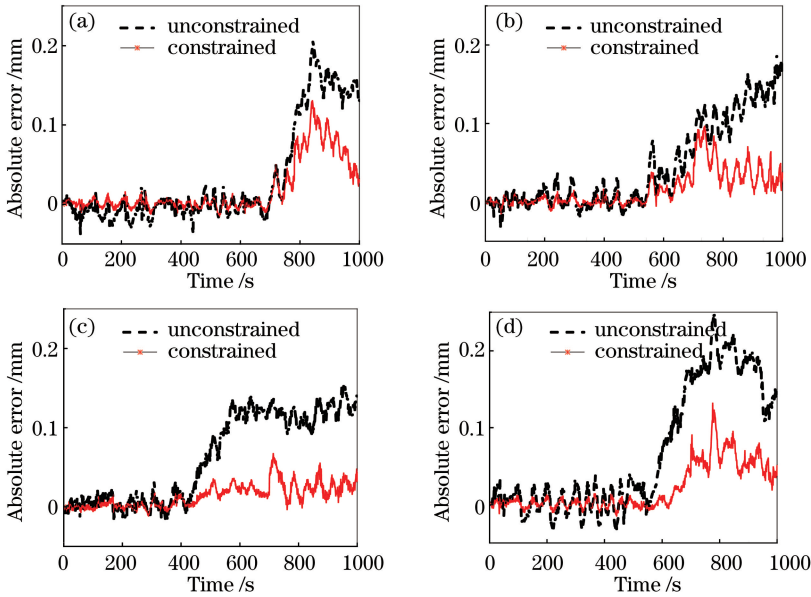


图 12 极线约束修正前后位移误差曲线对比。(a) 1# 试件;(b) 2# 试件;(c) 3# 试件;(d) 4# 试件  
 Fig. 12 Comparison of displacement error curves before and after correction of epipolar constraint.  
 (a) 1# specimen; (b) 2# specimen; (c) 3# specimen; (d) 4# specimen

## 5 结 论

为了提高立体视觉方法中的匹配精度、降低测量误差,采用极线约束对右图像的立体匹配结果进行修正。该方法以右极线上距 DIC 立体匹配结果最近的点作为新的匹配点,代替 DIC 方法直接匹配得到的结果;采用该修正方法对初始时刻的立体匹配结果和右相机时序匹配结果进行修正,通过 304 不锈钢试件的单向拉伸实验数据对该方法进行验算。实验结果表明,引伸计和极线约束修正前后的立体视觉方法测得的两条曲线吻合较好,表明立体视觉方法准确可靠;极线约束修正后的立体视觉测量方法的精度得到提高,平均误差、最大误差及均方误差均减小。将 DIC 方法与极线约束相结合,利用几何距离最小的约束条件对 DIC

匹配结果进行修正,概念清晰、计算简单,不仅提高了立体视觉方法的测量精度,而且具有非常重要的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Wen Gongjian. A global algorithm for straight line stereo matching based on feature grouping[J]. Journal of Software, 2006, 17(12): 2471-2484.  
文贡坚. 一种基于特征编组的直线立体匹配全局算法[J]. 软件学报, 2006, 17(12): 2471-2484.
- [2] Li G, Zucker S W. Surface geometric constraints for stereo in belief propagation[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, 2: 2355-2362.
- [3] Hong L, Chen G. Segment-based stereo matching using graph cuts[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 1: 74-81.
- [4] Yoon K J, Kweon I S. Locally adaptive support-weight approach for visual correspondence search[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, 2: 924-931.
- [5] Hosni A, Bleyer M, Gelautz M, *et al.* Local stereo matching using geodesic support weights[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2009, 1: 2093-2096.
- [6] Yang Q. Stereo matching using tree filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(4): 834-846.
- [7] Bai Ming, Zhuang Yan, Wang Wei. Progress in binocular stereo matching algorithms[J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 721-729.  
白明, 庄严, 王伟. 双目立体匹配算法的研究与进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 721-729.
- [8] Zhou Xiuzhi, Wang Runsheng. Pixel-set based stereo matching by using belief propagation[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3): 167-172.  
周秀芝, 王润生. 基于像元集的置信传递立体匹配[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3): 167-172.
- [9] Xu Qing, Wang Jingdong, Li Peng, *et al.* Fast stereo matching algorithm based on image segmentation[J]. Computer Engineering, 2006, 32(22): 209-211.  
徐青, 王敬东, 李鹏, 等. 基于图像分割的快速立体匹配算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(22): 209-211.
- [10] Prince S J D, Eagle R A. Weighted directional energy model of human stereo correspondence[J]. Vision Research, 2000, 40(9): 1143-1155.
- [11] Fleet D J, Jepson A D. Stability of phase information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(12): 1253-1268.
- [12] Sun Wei, He Xiaoyuan. Experimental studies on application of digital image correlation in measuring field of civil engineering[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(2): 271-275.  
孙伟, 何小元. 数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(2): 271-275.
- [13] Vasseur L, Matthys S, Taerwe L, *et al.* Measuring of crack bridging of CFRP strengthened concrete by digital image correlation[C]. 7<sup>th</sup> International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2009, 19(4): 1009-1014.
- [14] Ye Nan. Key techniques and systems of sheet metal formability analysis based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.  
叶南. 基于机器视觉的板料成形性能分析关键技术及系统实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [15] Kashfuddoja M, Ramji M. Whole-field strain analysis and damage assessment of adhesively bonded patch repair of CFRP laminates using 3D-DIC and FEA[J]. Composites Part B, 2013, 53(5): 46-61.
- [16] Liu Cong, Chen Zhenning, He Xiaoyuan. Application of 3D-DIC in experimental study on mechanical properties of civil structures[J]. Journal of Southeast University, 2014, 44(2): 339-344.  
刘聪, 陈振宁, 何小元. 3D-DIC在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. 东南大学学报, 2014, 44(2): 339-344.
- [17] Zhu Feipeng, Wang Jingrong, Lei Dong, *et al.* Application of 3D-DIC in tensile mechanical properties test for glass fiber reinforced plastic bolt[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3): 302-309.  
朱飞鹏, 王京荣, 雷冬, 等. 三维DIC在GFRP锚杆拉伸力学性能测试中的应用[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 302-309.



- [18] Shan B H, Zheng S J, Ou J P. Free vibration monitoring experiment of a stayed-cable model based on stereovision[J]. *Measurement*, 2015, 76(12): 228-239.
- [19] Dong Shuai, Dai Yuntong, Dong Eliang, *et al.* Three-dimensional reconstruction of dental impression based on multi-camera three-dimensional digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812006.  
董 帅, 戴云彤, 董萼良, 等. 应用多相机三维数字图像相关实现口腔印模三维重构[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812006.
- [20] Dai Meiling, Liu Cong, Dai Yuntong, *et al.* Study on visualization of continuous deformation measurement of thin-walled spheres compressed by rigid ball[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112001.  
戴美玲, 刘 聪, 戴云彤, 等. 薄壁球壳受刚性球面压缩的可视化连续变形测量研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1112001.
- [21] Wu Fuzhao. *Mathematical methods in computer vision*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 63-67.  
吴福朝. *计算机视觉中的数学方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 63-67.
- [22] Yuan Wenting. *The whole process of structural deformation measurement based on stereovision*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
袁文厅. *基于立体视觉的结构变形全过程测量方法*[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.