

单目立体视觉中的系统误差与棱镜位姿对视场的影响评估

原天宇¹, 代祥俊², 杨福俊^{1*}

¹东南大学土木工程学院江苏省工程力学重点实验室, 江苏 南京 211189;

²山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255090

摘要 对棱镜分光式单目立体视觉系统进行了深度方程的推导,修正了棱镜位姿偏移引入的成像误差,分析了位姿引起的成像视场变化。该系统由一个相机与两个具有相同参数的双棱镜组成,相机单次拍摄可获取两幅具有视差的子图像,这可视作两个具有一定夹角的虚拟相机同时成像。采用虚拟点模型与光线追踪法推导深度方程,建立视差与深度方程参数之间的关系,进一步研究了系统中物距与夹角对图像深度信息与视差的影响。棱镜组的人为放置,不可避免地引入位姿误差,进而影响每个成像通道中的成像视场。基于棱镜的旋转与偏移,建立了修正的虚拟点模型,并深入研究了棱镜组位姿对系统成像与视场产生的影响;最后通过实验验证了理论与推导的有效性与准确性。

关键词 测量; 单目立体视觉; 棱镜位姿; 深度方程; 系统误差; 视场评估

中图分类号 TP491.4; TH822 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231629

1 引言

立体视觉三维成像技术通常采用两台相机构建具有视差的双目系统,从不同视角同步拍摄目标场景图像,通过图像校正与立体匹配算法获取目标视场(FoV)中的全场三维信息^[1-2]。通常情况下,双目立体视觉系统需要足够的相机基线以满足合理的视差角度,因此对系统的布置空间与实测环境提出了较高要求。而在机器人视觉定位、医学内窥镜成像等领域,紧凑的测量环境无疑使传统的双目视觉系统面临更大的挑战^[3-4]。为了解决空间受限条件下的三维感知难题,单目立体视觉系统应运而生。从成像方式与光源的性质来看,现有的单目立体成像技术主要分为两类:主动成像与被动成像。主动成像通常使用投影仪对待测物体表面投射正弦条纹或散斑图案,相机采集受表面高度调制后的图像,结合相移方法或模式识别来重建目标的表面形貌^[5-6]。而被动成像则无需额外引入特定的照明光源,相机拍摄普通光照条件下的物体后,采用图像处理方式来获取图像的深度信息。依据成像原理,被动成像方式中的单目立体视觉可分为三类:基于相机多位置分步采样^[7]、基于附加光学元件^[8]和基于机器学习算法的三维重建技术^[9]。其中采用附加光学元件进行相机分光的方法被认为是一种高效、直观且便

捷的成像模式。现有研究中,通过在相机前加入反光镜、衍射光栅、折射棱镜等设备,将相机传感器分割为多个独立且同步成像的通道,并且采用对比验证的方法来证明系统的可靠性与有效性。单目立体视觉与双目立体视觉系统对同一物体进行拍摄,结合数字图像相关(DIC)方法分别获取三维形貌与相同激励下的全场变形,二者的结果与误差验证了所提单目立体视觉系统具有较高的测量精度^[10-12]。相比之下,棱镜分光式单目立体视觉系统仅需要在镜头前的合适位置摆放分光装置,该方法不仅光路紧凑而且易于调节成像区域与视场,因此多用于低速冲击与水下变形测量等工程应用^[13-14]。进一步地,依据使用棱镜的差异,棱镜分光式单目立体视觉系统可分为单棱镜分光系统、棱镜组分光系统与微棱镜阵列分光系统^[1]。结合前期工作,为了使双棱镜组构成的单目立体视觉系统更加适用于高精度形貌重建与变形测量等领域,本文将对该系统中存在的误差进行深入研究。

形貌重建与变形测量是单目视觉系统应用的主要目的,三维形貌的重建则是测量的关键。相机从不同角度对同一物体进行成像,引入的视差可用于计算物体的深度信息,进而恢复真实的三维场景^[15]。为了获取高精度的测量结果,需要考虑成像系统中存在的误差因素并对其进行评估。对于单棱镜分光立体视觉系

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2024-01-24; 录用日期: 2024-01-30; 网络首发日期: 2024-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(12072073, 12172200)

通信作者: *yang-fj@seu.edu.cn

统而言,可以通过建立参数模型来分析测量范围对系统误差产生的影响。结果表明近距离测量误差较小,随着测量距离与测试范围变大,误差随之增大^[16]。Wu 等^[17]考虑了该系统中由镜头畸变引入的测量误差,并提出了一种改进的数学模型加以修正。该研究不仅提高了测量精度,还讨论了棱镜制造缺陷与棱镜位姿引入的系统误差。此外,Yu 等^[18-19]通过对光学系统的优化设计和测量不确定性的预测,从理论上建立和评估了基于反光镜单目立体视觉系统的误差模型,进而采用优化后的系统进行工程测量。然而,现有文献对棱镜分光式单目立体视觉系统的误差研究较少,因此开展相应的研究与评估尤为重要。

本文对棱镜分光式单目立体视觉系统中的系统误差进行评估,考虑了分光元件因人为放置引入的不可忽视的测量误差。首先,通过虚拟点模型推导出世界坐标系(WCS)中空间点与成像虚拟点的对应关系,得到了理想状态下系统的成像模型。其次,采用深度方程表征了系统的视差,分析了物距与夹角对视差的影响。同时,根据不同的棱镜位姿,提出了修正的虚拟点模型,并研究了不同位姿下的成像视场变化。最后,通过实验验证了理论推导与修正模型的正确性与有效性。

2 系统深度方程与视差的关系

2.1 深度方程的推导

图 1 为棱镜分光式单目立体视觉系统。该系统由一个工业相机与两个参数完全相同的双棱镜组成。理想状态下,棱镜以一侧直角边重合的方式放置于单相机的镜头前,并且相机光轴平分棱镜间的夹角。其中, (X, Y, Z) 为 WCS 中的某一点, (x, y) 为真实相机中的

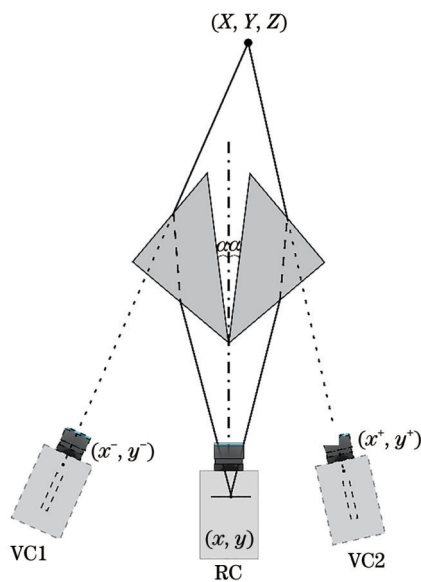


图 1 棱镜分光式单目立体视觉系统的示意图

Fig. 1 Schematic of prism-splitting monocular stereo vision system

成像坐标, (x^-, y^-) 和 (x^+, y^+) 分别为系统中左、右两个虚拟相机的成像坐标, α 为单侧棱镜与相机光轴的夹角。图 1 中 RC 为系统中的真实相机,VC1 和 VC2 分别为左、右虚拟相机。采用虚拟点模型对单目立体视觉系统进行推导,建立虚拟点与世界坐标中空间点的对应关系:

$$\begin{cases} x^+ = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{a}{b} X - Z + \frac{1}{b} L_B K_2^+ \sin \gamma \right) \\ x^- = \frac{1}{\zeta} \left(-\frac{a}{b} X + Z - \frac{1}{b} L_B K_2^- \sin \gamma \right), \\ y^+ = y^- = -\frac{Y}{\zeta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ζ 为系统整体的放大倍率; a 和 b 均为角度参数; L_B 为棱镜斜边长度; γ 为棱镜重叠底角的角度; K_2^- 和 K_2^+ 分别为左、右虚拟相机中的角度参数,上述参数可进一步表示为

$$\begin{cases} \kappa = n^2 - \cos^2(\gamma + \alpha) \\ K_1 = \frac{\kappa}{\sqrt{1 - \kappa}} - \sqrt{\kappa} \tan(\gamma + \alpha) \\ a = 1 + K_1 \cos(\gamma + \alpha) \\ b = K_1 \sin(\gamma + \alpha) \\ K_2 = \left[1 - \frac{\kappa}{\sqrt{1 - \kappa} \cos(\gamma + \alpha)} \right] \sin(\gamma + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为折射率; κ 、 K_1 和 K_2 均为虚拟相机系统中关于角度的参数。根据式(2)可以获取 WCS 中空间点与两个虚拟点的一一对应关系。

图 2 为采用光线追踪法表示的物面上一点在系统中成像的光学路径。将坐标系建立于相机透镜的焦点处。可以看出,三维空间中任意点通过光学中心均可映射至真实相机的成像平面内。例如经过物点 P 的 ray 3 经过两次折射,可以形成光线 ray 2 与 ray 1,入射光线与像平面相交得到其中一个虚拟点。假设光线在棱镜中的入射角与折射角分别为 θ_{ij} 和 θ_{ij} , $j=1,2$,其中“+”与“-”分别代表上述角度在 x 轴的正半轴与负半轴。 x^+ 与 x^- 代表虚拟点在 x 轴上的投影; ω^+ 和 ω^- 分别为 x 正、负半轴上光线入射相机的夹角; T 为真实相机的光学中心到双棱镜组重合点的距离; f 为真实相机的焦距。过物点 P、入射点 B 和 B'、棱镜的直角顶点分别作 z 轴的垂线,交于 Q 点、E 点、F 点和 N 点。O 点代表棱镜的重合底角,A 点和 A'点为出射光线与棱镜直角边的交点,B 点和 B'点为入射光线与棱镜直角边的交点。因此,在 x 轴正半轴上的深度方程可以表示为

$$Z = T + \overline{ON} + \overline{NE} + \overline{EQ}. \quad (3)$$

选定镜头与已知棱镜组位置时, T 与 \overline{ON} 即为已知量,而 \overline{NE} 与 \overline{EQ} 为待计算量,其与 WCS 中实际点的

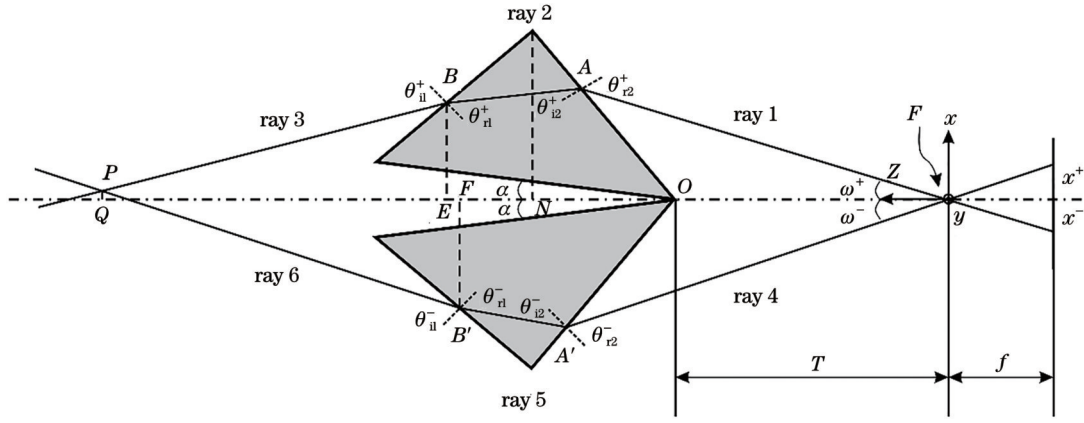


图 2 立体视觉系统的光线追踪图

Fig. 2 Schematic of ray tracing for stereo vision system

入射光线的路径有关。例如采用 x 轴负半轴表示深度方程, 则可用 \overline{NF} 与 \overline{FQ} 替换 \overline{NE} 与 \overline{EQ} 进行计算。根据光线可逆理论, P 点可视为从 B 出发的 ray 3 与从 B' 出发的 ray 6 的交点, 因此确定 P 点的坐标后可完全确定深度方程。

由折射定律可知:

$$n = \frac{\sin \theta_{i1}^+}{\sin \theta_{r1}^+} = \frac{\sin \theta_{i2}^+}{\sin \theta_{r2}^+} = \frac{\sin \theta_{i1}^-}{\sin \theta_{r1}^-} = \frac{\sin \theta_{i2}^-}{\sin \theta_{r2}^-} \quad (4)$$

在 x 轴的正半轴一侧, 进行光线折射的几何分析与函数推导, 得到上述角度的数值表达式分别为

$$\theta_{i1}^+ = \arcsin \left[n \cdot \sqrt{1 - \frac{\cos^2(\alpha + \gamma - \omega^+)}{n^2}} \right], \quad (5)$$

$$\theta_{i2}^+ = \arcsin \left[\frac{\cos(\alpha + \gamma - \omega^+)}{n} \right], \quad (6)$$

$$\theta_{r1}^+ = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{\cos(\alpha + \gamma - \omega^+)}{n} \right], \quad (7)$$

$$\theta_{r2}^+ = \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma + \omega^+. \quad (8)$$

特别地, 将等式中的“+”改为“-”时, 即为 x 轴负半轴一侧的成立条件。因此, B 和 B' 可以描述为

$$B = \begin{bmatrix} L_B \cos \gamma \cos(\alpha + \gamma) - x_1 \cos(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ T + L_B \cos \gamma \cos(\alpha + \gamma) + x_1 \sin(\alpha + \gamma) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: x_1 为 x 正半轴侧从棱镜直角顶点到 B 的距离, 且

$$x_1 = \tan \theta_{r1}^+ \left[L_B \cos \gamma \sin(\alpha + \gamma) - \frac{T(\tan \omega^+ + \sin \omega^+)}{\sin(\alpha + \gamma)} \right], \quad (10)$$

$$x_1 \in [0, L_B \sin \gamma].$$

$$B' = \begin{bmatrix} -L_B \cos \gamma \cos(\alpha + \gamma) + x'_1 \cos(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ T + L_B \cos \gamma \cos(\alpha + \gamma) + x'_1 \sin(\alpha + \gamma) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: x'_1 为 x 负半轴侧从棱镜直角顶点到 B' 的距离, 且

$$x'_1 = \tan \theta_{r1}^- \left[L_B \cos \gamma \sin(\alpha + \gamma) - \frac{T(\tan \omega^- + \sin \omega^-)}{\sin(\alpha + \gamma)} \right], \quad x'_1 \in [0, L_B \sin \gamma]. \quad (12)$$

此时, 由 x 正半轴一侧计算的深度方程可以表示为

$$Z = T + L_B \cos(\alpha + \gamma) \left[\tan(\alpha + \gamma + \theta_{i1}^+) + 1 \right] - x_1 \left[\tan(\alpha + \gamma + \theta_{i1}^+) \cos(\alpha + \gamma) - \sin(\alpha + \gamma) \right]. \quad (13)$$

根据图 2 几何关系, 式(13)中的入射光线夹角 ω 可由系统的视差 $D = x^+ + x^-$ 表示。在深度方程计算中, 可进行以下合理假设:

- 1) 由于单侧棱镜与光轴间的夹角通常小于 3° , 因此计算时进行小角度近似, 即存在 $\alpha \approx \tan \alpha \approx \sin \alpha$;
- 2) 由于棱镜重叠底角与镜头的距离通常远小于物距, 因此有 $\alpha \approx \omega \approx \frac{x^\pm}{f}$;

3) 因为棱镜的尺寸远小于物距, 所以物体表面反射的光到达棱镜的迎光表面时, 其入射角可以近似为

$$\theta_{i1} \approx \frac{\pi}{4} + \alpha.$$

因此单目立体视觉系统中的深度方程可简化为

$$Z = \frac{(2n-1)(2T+f\cos\alpha)}{n\sqrt{n^2-\cos\alpha}} - \frac{2T(2n-1)}{n\cos\alpha} \left(\frac{D+2f\cos\alpha}{D+2fn\cos\alpha} \right). \quad (14)$$

2.2 参数对视差的影响

假设实验条件仅改变其中的单一变量, 本节分别讨论了物距增量与棱镜间的夹角对视差的影响。当棱镜间夹角等其余参数保持不变时, 根据式(14), 增大物距将导致虚拟相机间视差的减小, 且物距与视差呈现非线性关系。通过求解式(14)的一阶导数, 即可获取

视差与物距增量的关系:

$$\frac{dD}{dZ} = 2f \cos \alpha - \frac{fn^3 \cos^3 \alpha}{T(2n-1)} \times \left[Z - \frac{(2n-1)(2T+f \cos \alpha)}{\sqrt{n(n^2 - \cos \alpha)}} \right]. \quad (15)$$

式(15)表明,物距的增大会导致虚拟相机中两点视差的减小,并且视差的减小速率会随物距的增大而降低。换句话说,物体距离测量系统较远时具有较小的视差,反之则具有较大视差。同理,当物距等其余参数保持不变时,从式(8)即可获取视差随夹角变化的表达式,通过求解关于夹角的导数,即可获取视差与夹角的关系:

$$\frac{dD}{d\alpha} = \frac{2f^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha}{T(2n-1)} + \frac{fn^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha}{T(2n-1)} \times \left[Z - \frac{(2n-1)(2T+f \cos \alpha)}{n \sqrt{n^2 - \cos \alpha}} \right]. \quad (16)$$

由式(16)可知,在满足小角度假设条件下,棱镜间

夹角增大将使两个虚拟相机间的基线变长,该过程亦为非线性变化过程。基线的变长意味着虚拟相机将会以更大的夹角从不同方向观测同一物体。因此,在此假设下,棱镜间的夹角变大,系统的视差也增大。

3 棱镜位姿对视场的影响

3.1 棱镜位姿的分类

如图 3 所示,棱镜位姿大致可分为三类,其中包括棱镜的旋转与偏移。假设成像系统选用棱镜顶角为 γ 的直角棱镜,且两个棱镜的其中一个底角重合放置于相机前;此时引入棱镜坐标系,并将坐标原点定于棱镜组的基点上。其中,棱镜坐标系的位置随棱镜的转动与偏移始终产生相等增量。不考虑 y 方向的不平整度与整体平移,认为棱镜组始终位于 xoz 平面内。图 3(a)为一侧棱镜绕基点的旋转;图 3(b)和(c)分别表示棱镜沿 x 方向与 z 方向发生偏移。特别地,两侧棱镜与光轴的夹角不相等时,其等同于棱镜组整体绕重合点旋转。理想状态下,系统的视场范围可以表示为

$$\varphi_{1,2} = \arcsin \left[\frac{\sqrt{\Gamma^2(n^2-1) - \Gamma n^2 \sin \alpha + \sqrt{2} \Gamma \cos(\alpha+\gamma) + n^2 - \cos^2(\alpha+\gamma)}}{\Gamma^2 + \Gamma \sin \alpha + 1} \right] + \gamma - \alpha - \frac{\pi}{2}, \quad (17)$$

式中: φ_1 和 φ_2 分别表示左、右两个虚拟相机的视场角度。 $\Gamma = \frac{L_B}{L_L}$ 为系统的尺寸参数, L_L 为棱镜重合边

与镜头的距离,此时系统的整体视场角度为 $\phi = \varphi_1 + \varphi_2$ 。

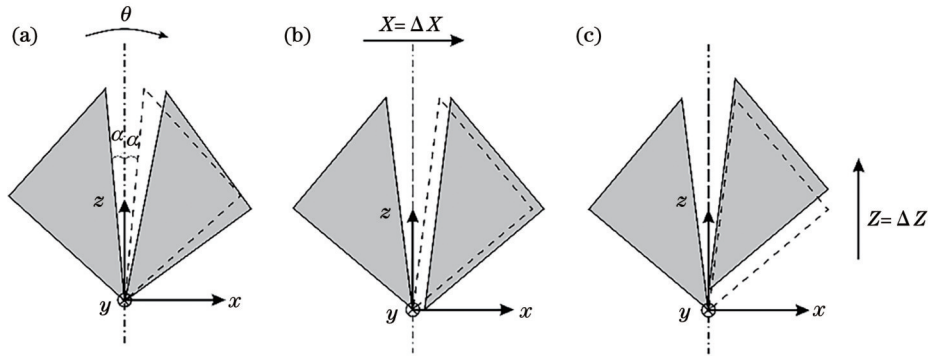


图 3 三种典型的棱镜位姿。(a)绕重合点旋转;(b)沿 x 方向偏移;(c)沿 z 方向偏移

Fig. 3 Three typical biprism postures. (a) Rotation around coincidence point; (b) offset along x -direction; (c) offset along z -direction

3.2 修正模型与位姿对视场的影响

当左、右两侧棱镜与光轴的夹角不相等时,式(17)显示 φ_1 和 φ_2 随角度独立变化,意味着两个虚拟相机的位置变化相互独立,此时系统的视场随棱镜两侧夹角的变化而发生独立改变。相比于理想的放置状态,两

侧夹角的不同会导致区域重叠部分的增大或减小,进而引起深度的改变。图 3(a)中一侧棱镜绕 y 轴向 x 轴正半轴旋转 θ ,旋转后,棱镜与原始光轴间的夹角变为 $\alpha + \theta$ 。此时将点在偏移棱镜坐标系中的坐标代入式(1),可得修正后虚拟点的横坐标为

$$x^- = \frac{1}{\zeta} \left[\frac{a}{b} (X \cos \theta^- + Z \sin \theta^-) - (Z \cos \theta^- - X \sin \theta^-) + \frac{1}{b} L_B K_2^- \sin \gamma \right], \quad (18)$$

$$x^+ = \frac{1}{\zeta} \left[-\frac{a}{b} (X \cos \theta^+ + Z \sin \theta^+) + (Z \cos \theta^+ - X \sin \theta^+) - \frac{1}{b} L_B K_2^+ \sin \gamma \right], \quad (19)$$

式中: x^- 和 x^+ 分别为左、右半侧棱镜旋转时对应虚拟相机中映射点的坐标, θ^+ 和 θ^- 分别表示左、右半侧棱镜的旋转角度。特别地, 当仅有 x 正半轴棱镜变化时, 仅存在式(19)。根据式(17), 代入夹角数值, 可以再次获取两个虚拟相机的视场与系统整体的 FoV。棱镜的旋转会导致该侧 FoV 绕 y 轴产生 θ 角度的偏转, 而另一侧棱镜位置保持不变, 导致视场重叠区域变小。

如图 3(b) 所示, 一侧棱镜沿着 x 正半轴产生偏移时, 棱镜间将存在空隙。值得注意的是, 偏移距离过大则导致系统的分光失效。此时无法从式(17)中直接判断左右两侧独立视场的变化情况。将坐标点在偏移棱镜坐标系中的表达式代入式(1), 可得世界坐标在两个虚拟相机中的 x 方向坐标为

$$x^- = \frac{1}{\zeta} \left[\frac{a}{b} (X + \Delta X) - Z + \frac{1}{b} L_B K_2^- \sin \gamma \right], \quad (20)$$

$$x^+ = \frac{1}{\zeta} \left[-\frac{a}{b} (X + \Delta X) + Z - \frac{1}{b} L_B K_2^+ \sin \gamma \right]. \quad (21)$$

根据式(20)、(21), 偏移一侧的成像点在 x 方向的绝对距离发生改变, 相比于未发生偏移的棱镜, 则有 $|x^-| < |x^+ + \Delta x|$, 其中 Δx 为偏移引入的映射点的移动距离。此时, 左右相机的虚拟视场角度满足 $\varphi_1 < \varphi_2 + \theta(\Delta x)$, 从而导致左右两个独立视场的范围不相等。此时, 偏移棱镜一侧的视场向偏移方向移动, 将会减小系统的重叠视场。

当棱镜组沿光轴呈左右对称, 一侧棱镜沿着 z 正半轴产生偏移时, 即图 3(c) 所示的情况, L_L 增大导致视场发生改变。根据成像的虚拟点模型, 有

$$x^- = \frac{1}{\zeta} \left[\frac{a}{b} X - (Z + \Delta Z) + \frac{1}{b} L_B K_2^- \sin \gamma \right], \quad (22)$$

$$x^+ = \frac{1}{\zeta} \left[-\frac{a}{b} X + (Z + \Delta Z) - \frac{1}{b} L_B K_2^+ \sin \gamma \right]. \quad (23)$$

由式(22)和(23)可知, 平移导致偏移侧子图像中的对应点位置改变。同时, 式(17)表明, L_L 将导致 φ 的改变, 即偏移侧视场发生变化。此外, 在系统确定的缩放倍率下, 沿 z 方向远离或靠近镜头时, 系统的重叠 FoV 表现为缩小或放大。

不失一般性, 人为放置的棱镜位置可能会包含上述所有情况, 棱镜位姿对视场的影响需综合考虑。由此可得, 当棱镜组中一侧棱镜发生旋转或偏移时, 改变侧的视场产生变化, 从而可能会影响系统的重叠视场。

4 实验验证

4.1 物距与夹角对视差的影响

图 4(a) 为棱镜分光式单目立体视觉系统的布置图。采用一个分辨率为 2048 pixel \times 2048 pixel 的工业相机作为图像采集设备, 其配备了焦距为 25 mm 的镜头。待测试样为圆柱体, 放置在距离棱镜前端 1.4 m 处, 通过水转印方法在表面粘贴散斑, 在两个光源的

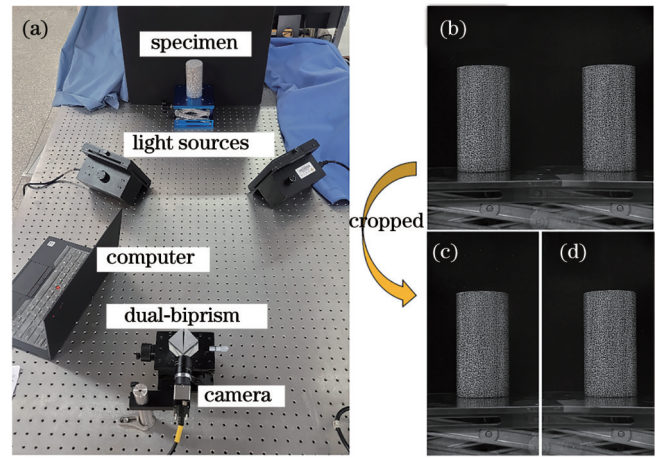


图 4 基于双棱镜组的单目立体视觉装置及其采集的图像。(a) 实验布置图; (b) 相机快照获取的真实图像; (c) 左侧虚拟相机获取的图像; (d) 右侧虚拟相机获取的图像

Fig. 4 Monocular stereo vision system based on dual-biprism and its captured images. (a) Experimental setup; (b) real image obtained by camera snapshot; (c) image obtained by left virtual camera; (d) image obtained by right virtual camera

照射下无明显反光。将两个具有相同参数且尺寸均为 40 mm \times 40 mm \times 40 mm 的双棱镜通过底角重叠的方式放在镜头前, 棱镜组整体放置于表面光滑且平整的高精度平移台上。实验前, 单束激光从相机后照明, 提供可视化的相机光轴, 依据激光光束可以调节相机的位姿, 使相机正对待测物体的表面。激光将穿过棱镜的重合边, 调整棱镜位姿使棱镜间的夹角尽可能地被可视化光轴平分。采用棋盘格标定板进行相机的标定, 以为后续 DIC 的匹配计算提供相机内外参数。图 4(b) 为采用所提方法获取的图像, 其中包含的两个子图像分别由左、右虚拟相机获取。沿图像的中轴线进行分割, 即可获取两幅独立且含有相同分辨率的图像, 如图 4(c)、(d) 所示。首先, 通过比对式(14)计算的轮廓与 DIC 计算结果, 验证公式推导的有效性。值得注意的是, 视差图与深度方程计算获取的结果为物体表面各点距离相机的深度信息, 需要进行坐标转换方可得到物体的轮廓信息与相对高度。因此, 两种方法均获得物体深度信息后, 在空间中确定原点与坐标轴方向, 建立转换坐标系, 进行坐标变换, 即可分别得到物体的轮廓。

根据前文描述, 将物体发生平移前相机快照获取的图像进行分割, 如图 5(a) 所示。图 5(b) 为立体匹配示意图。其中, 矩形框部分为视差与 DIC 的计算区域 (RoI), 通过图像匹配与坐标转换, DIC 方法计算得到的物体表面轮廓如图 5(c) 所示。采用相机的立体校正与图像处理对所选区域进行视差计算, 为了得到数量相同的数据, 视差计算过程中选取了与 DIC 计算中大小一致的模板与网格, 物体表面全场的视差信

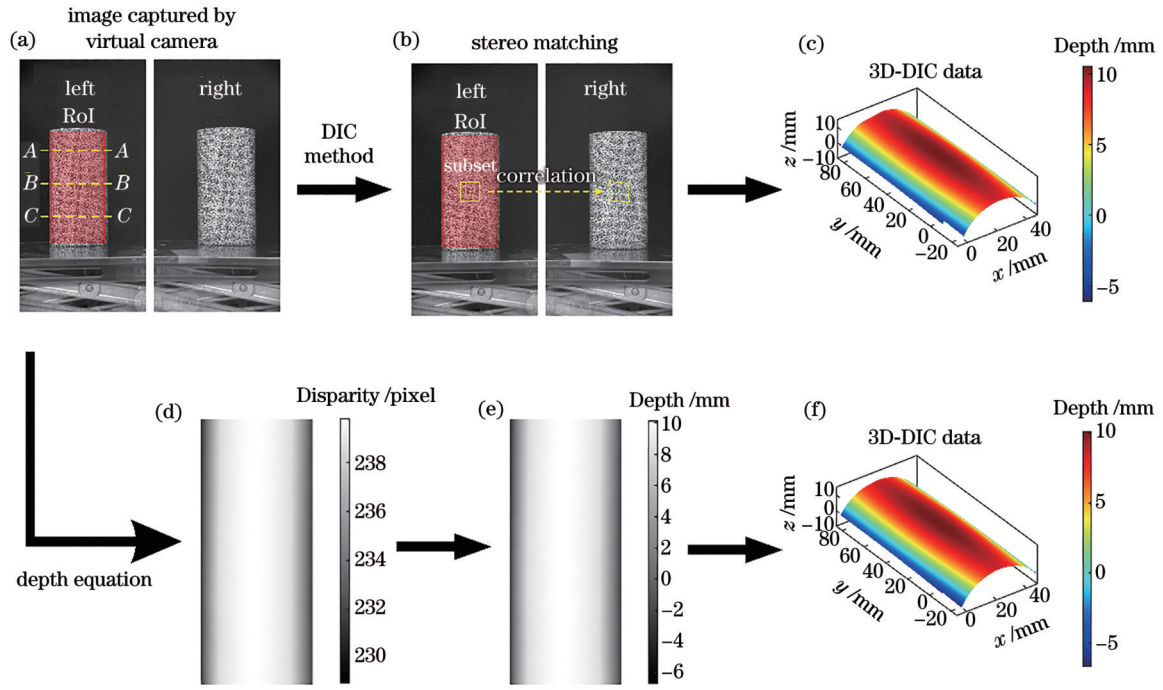


图 5 待测物体深度信息与轮廓重建结果。(a)相机快照获取的两张子图像及其计算区域;(b)立体匹配示意图;(c) DIC 计算结果;(d)视差图;(e)深度图;(f)三维深度图

Fig. 5 Depth information of measured object and results of profile reconstruction. (a) Two sub-images captured by camera snapshot and its RoI; (b) schematic diagram of stereo matching; (c) result of DIC; (d) disparity map; (e) depth map; (f) 3D depth map

息如图 5(d)所示。将各点的视差与实验条件中的尺寸信息代入式(14)中,即可获得待测物体上的各点深度值,如图 5(e)所示。分别以物体的物理尺寸为 x 、 y 轴坐标值,以计算得到的深度值为 z 轴数值,绘制物体的三维深度图像,如图 5(f)所示。同样地,通过坐标转换即可重建物体的轮廓。从两种方法计算的三维轮廓图可知,文中推导公式可用于获取物体的深度信息并用于重建三维形貌。

在验证公式的有效性后,物体朝相机侧进行平移,此时保持棱镜间的夹角与相机光圈、焦距等参数不变。每次的平移距离为 1 cm,共平移 10 次,平移过程中,相机采集若干幅图像用于后续视差图与深度图的计算;同时,以平移前图像作为参考图,利用 DIC 进行平移距离的测定与物体形貌的重建。值得注意的是,进行多次平移后相机会产生虚焦现象,为了获取更大的景深,实验前调小相机光圈并采用主动补光的方式进行图像采集,提前调整好相机,使其聚焦于物体表面。平移实验结束后保持物距不动,通过改变棱镜夹角评估夹角对视差的影响。同时,采用量角器计量可以获得每次实验中棱镜间夹角和单侧棱镜与光轴的夹角,通过多次计量减小误差。初始的棱镜间夹角设定为 3° ,每次夹角改变 0.3° ,共改变 10 次,角度改变过程中,相机同样拍摄若干幅图像用于后续计算。

此外,选用棋盘格尺寸为 10 mm 的标定板作为被测对象,依据前述平移与夹角变化操作定量描述视差的变化,相机快照时的图像如图 6 所示。为了突出成

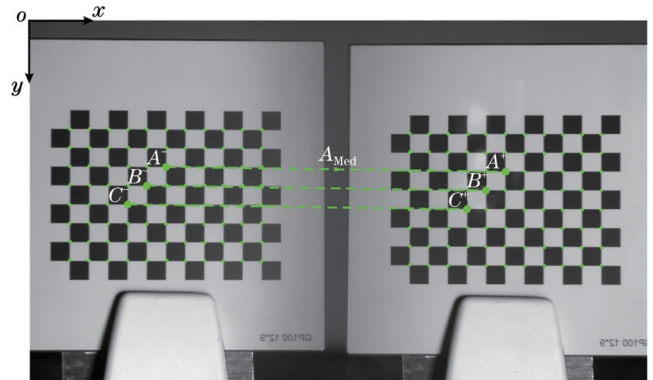


图 6 单个相机快照时采集的图像
Fig. 6 Snapshot image taken by a single camera

像视场中标定板的具体细节,并减少背景等无关信息的干扰,对原始采集的图像进行了 y 方向裁剪。

角点 A^- 、 B^- 、 C^- 与 A^+ 、 B^+ 、 C^+ 分别为空间中的点在两个虚拟相机中的位置,采用角点识别方法,即可确定标定板中任意角点的像素坐标,其中 A_{Med} 为角点 A^- 与 A^+ 连线的中点。选取图 6 中 A^- 与 A^+ 对应的 WCS 中的棋盘格角点作为研究对象,定量分析物距与棱镜间夹角对系统视差的影响。根据实验安排,保持棱镜组关于系统的光轴对称,分别改变物距与棱镜间的夹角,引入的视差改变如图 7 所示,其中 x^- 和 x^+ 分别为 A 点在左、右子图像中的横坐标。将每次物距改变与棱镜偏移后 A_{Med} 的 x 坐标作为图像的原点,即 0 位置处。过原点处的虚线即可表示左右子图像中的分割

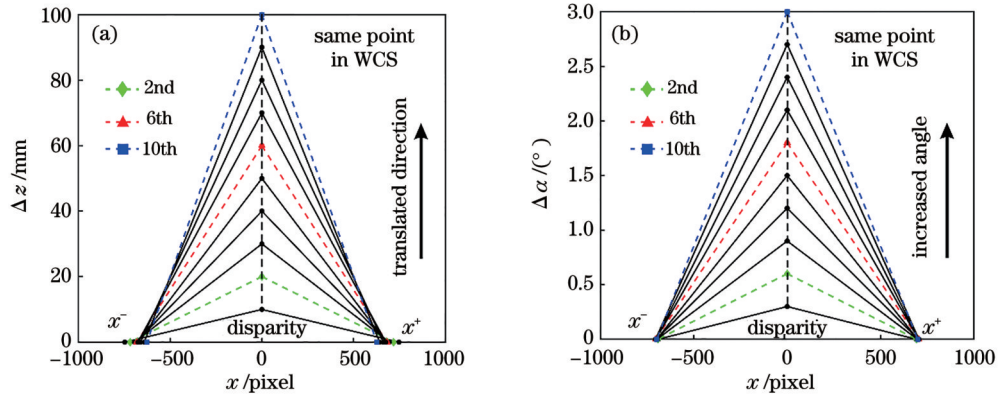


图 7 改变物距与棱镜间夹角对视差的影响结果。(a)改变物距;(b)改变棱镜间夹角

Fig. 7 Results of disparity variation with object distance and angle. (a) Changing object distance; (b) changing angle between prisms

线。由于实验前已将相机正对标定板,且物距远大于 L_L ,因此可视角点 A 位于图像的分割线上。每次进行位移,视差 $|x^+ + x^-|$ 均发生改变。此时,虚拟相机的相对位置不变,较远的物体会以更小的视差呈现在虚拟相机中。另一方面,在保持物距不变时,棱镜间夹角的增大会导致视差的增加。夹角的增大意味着两个虚拟相机将以更长的基线长度观测物体,在获取更多深度信息的同时增大视差。这一结果与双目立体视觉中的视差随物距的变化结果一致。

4.2 棱镜位姿对视场的影响

使用相同的相机与棱镜组对固定位置处的标定板进行拍摄,本实验采取棱镜组整体旋转或偏移的方式进行实验以尽可能地减小误差。按照棱镜位姿的分类,依次进行棱镜组的旋转、 x 方向与 z 方向的偏移,并且在位姿变化前后分别拍摄图像用于记录角点坐标与成像视场的变化。为了研究位姿造成的视场变化,在初始图像中连接左、右子图像的对应点,找出各点连线的中点作为棱镜的初始基点,仍选择图6中的 $A^-、B^-、C^-$ 与 $A^+、B^+、C^+$ 位置处的角点作为研究对象。位姿变化后提取子图像中的像素坐标,分别连接初始基点与左、右子图像中的对应点,即可通过对应点连线的偏移

获取系统视场的变化。特别地,若需研究一侧棱镜偏移引入的角点与视场变化,仅需要计算该侧通道中对应点的像素坐标。

改变棱镜组位姿产生的 FoV 变化结果如图8所示。其中,坐标原点为原始图像中(1024, 2048)位置处,其也可被视为棱镜组的基点,图8中所示每次位姿改变时角点 $A^-、B^-、C^-$ 与 $A^+、B^+、C^+$ 的像素坐标为真实坐标值。原点与各个虚拟点的连线可代表位姿变化导致的坐标变化,可直接表示因位姿改变而产生的 FoV 偏移量。值得注意的是,系统视场的变化方向与连线的偏移方向相反。如图8(a)所示,当棱镜组整体绕基点顺时针向右旋转 1° 时,子图像中标定板的位置向左偏移,此时每个通道中的视场均会沿顺时针方向偏移,这也将导致整体重叠区域的视场向该方向移动。若仅有右侧棱镜顺时针旋转 1° ,其会引起右侧通道中虚拟点的像素坐标向左偏移 57 pixel,且该侧通道的视场偏移将导致系统重叠视场的减小。棱镜组整体沿 x 正半轴偏移 1 mm,也会引入相同的变化趋势。若仅有右侧棱镜的偏移,则虚拟点向左偏移 49 pixel。此外,当棱镜组整体沿 z 正半轴移动 1.4 mm 时,图8(c)中并未发生明显的 FoV 变化,这是因为当棱镜组整体朝向

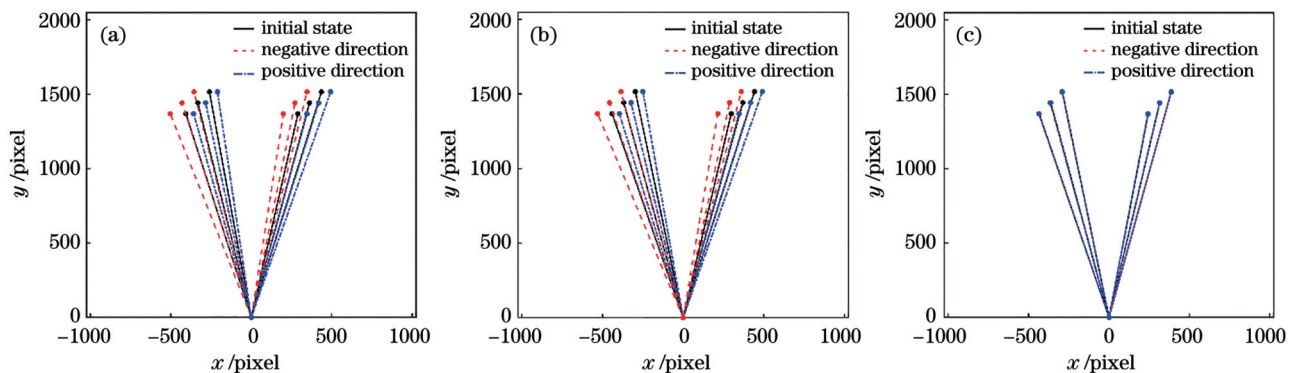


图 8 棱镜组位姿变化时 FoV 的变化结果。(a)绕基点旋转;(b)沿 x 方向平移;(c)沿 z 方向平移

Fig. 8 Results of FoV varying with biprism posture. (a) Rotation around coincidence point; (b) offset along x -direction; (c) offset along z -direction

物体偏移时,视场的缩小会从边缘向中间进行,实验所用的标定板被放置于视场中心而不受影响。另一方面,若仅有单侧棱镜存在 z 方向的偏移时,该侧通道视场的缩小使得系统FoV重叠区域减小。实验结果与理论分析吻合,证明了推导的正确性。

进一步地,将实验开始时采集的图像作为初始图像,提取该图像中角点的像素坐标作为初始坐标值。当棱镜组位姿发生改变时,左右半侧图像中标定板的位置均发生变化,将此时提取的角点坐标标记为偏移坐标值。对于修正模型的验证而言,位姿改变前,通过将子图像中的初始坐标值代入式(1),即可获得虚拟点映射在WCS中的坐标,因被测物为平面,此时认为 $z=0$ 。将棱镜偏移的距离分别代入式(18)~(23)中,基于前述获取的WCS中的坐标,计算得到理论上的偏移坐标值。通过对比相同偏移量下图像中的偏移坐标值,即可验证修正模型的正确性。

5 误差结果与讨论

为了定量比较两种方法计算结果的一致性,在RoI中选取三个横截面进行物体表面相对高度的绘

制,如图9所示。可以看出,两种方法能够较好地描述物体的轮廓,在截面B-B处两种方法的结果吻合得较好,截面A-A与截面C-C仍存在微小差异。为了进一步说明两种方法在所选截面处的差异性,图10分别展示了三个截面的误差曲线。结果表明,两种方法计算的最大轮廓误差均小于0.5 mm。此外,截面处的均方根误差(RMSE)分别为0.19、0.13、0.23 mm,证明通过公式推导不仅能够获取正确的深度信息,而且经坐标变换后结果也能用于待测物体的轮廓重建。由视差图计算得到的轮廓与DIC结果在高度最大值与边缘处仍有差异,这是由相机立体校正与选取转换坐标系引入的。通常情况下,视差计算往往需要两个光轴近乎平行的相机对同一物体进行拍摄;而该实验中,由于棱镜间夹角的存在,两个虚拟相机间的光轴显然不平行,为了获取正确的视差图像,需要对其中一个虚拟相机进行投影,采用投影矩阵进行插值计算时将不可避免地引入误差。此外,利用投影图像获取深度图后,需要在物体上选择合适的拉格朗日坐标系进行坐标转换,使其能够正确重建物体轮廓,该步骤也会引入误差。

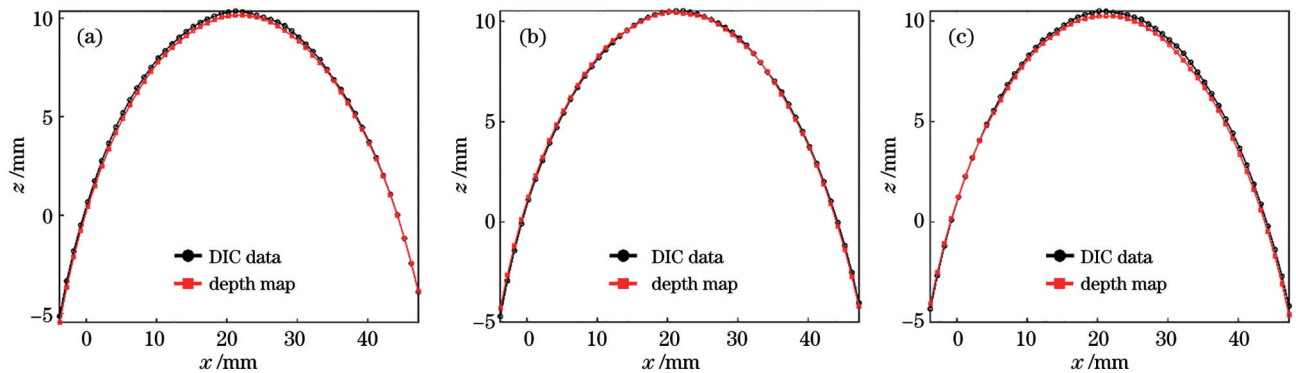


图9 三个截面处深度计算方法与DIC计算方法的对比结果。(a)截面A-A;(b)截面B-B;(c)截面C-C

Fig. 9 Comparison results of depth calculation method and DIC method at three cross-sections. (a) Cross-section A-A; (b) cross-section B-B; (c) cross-section C-C

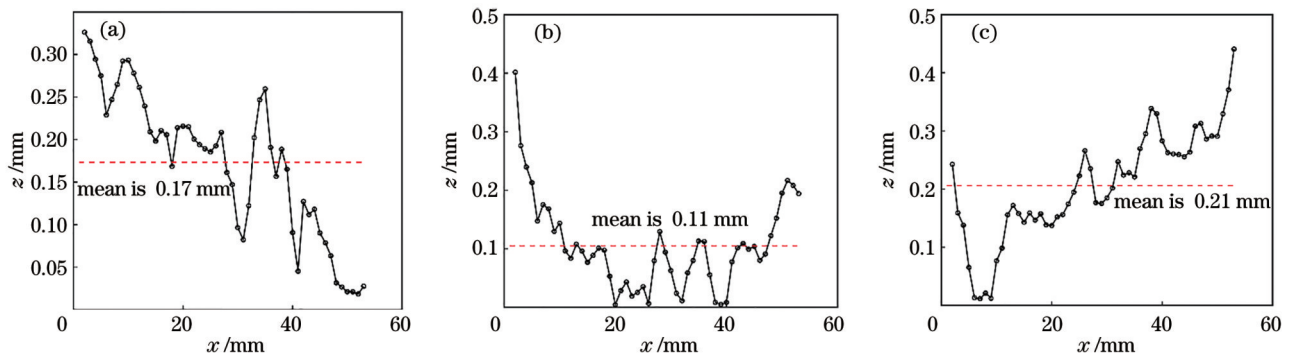


图10 截面数据的误差曲线。(a)截面A-A;(b)截面B-B;(c)截面C-C

Fig. 10 Error curves of cross-section data. (a) Cross-section A-A; (b) cross-section B-B; (c) cross-section C-C

为了验证在改变物距与夹角时,所提方法能准确地获取物体深度信息并重建其形貌,本实验选取上述

B-B截面进行轮廓结果的比对。图11(a)~(c)为棱镜间夹角不变,物距减小时B-B截面高度信息的对比结

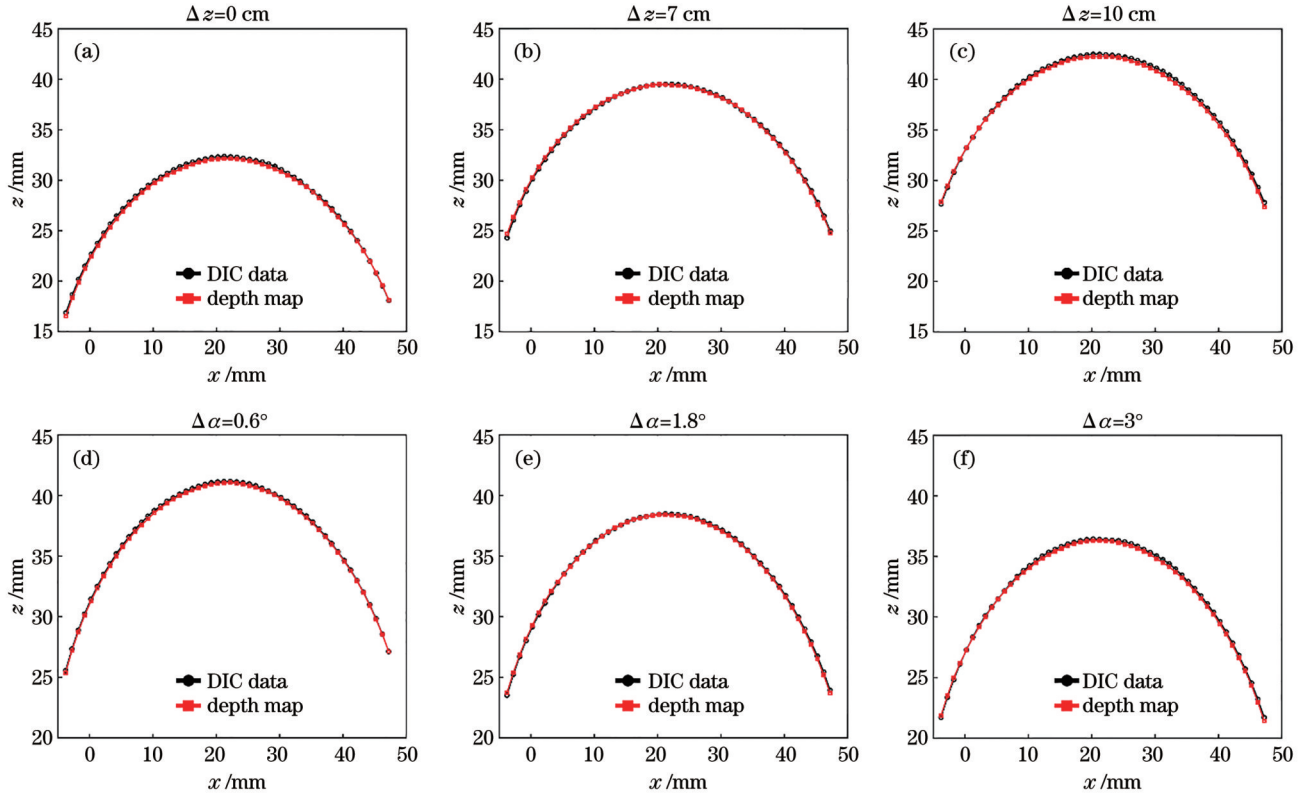


图 11 物距与夹角改变时, B-B 截面处轮廓对比结果。(a) 初始位置; (b) 物距减小 7 cm; (c) 物距减小 10 cm; (d) 棱镜间夹角增大 0.6°; (e) 棱镜间夹角增大 1.8°; (f) 棱镜间夹角增大 3°

Fig. 11 Comparison of profiles at cross-section B-B when object distance and angle between prisms are changed. (a) Initial position; (b) object distance decreases by 7 cm; (c) object distance decreases by 10 cm; (d) angle between prisms increases by 0.6°; (e) angle between prisms increases by 1.8°; (f) angle between prisms increases by 3°

果。从图 11 中可知, 在物距改变时两种方法重构的高度结果较为吻合, 表明物距改变时所提方法与公式推导仍然有效。图 11(d)~(f) 表示在物距减小 10 cm 的情况下, 增大棱镜间夹角时 B-B 截面高度的对比结果。结果显示, 在满足前述小角度假设的前提下, 棱镜间夹角变化时, 利用深度方程与坐标变换的方法依然可以重建待测物体的轮廓。综上所述, 本文推导的深度方

程在计算图像深度方面具有较高精度, 并且通过坐标转换的方法可以进一步计算物体的轮廓信息与相对高度。

进一步地, 保持物距与棱镜的夹角不变, 按照姿态分类, 实验中棱镜组先后分别旋转 4°、沿 x 轴偏移 6 mm、沿 z 轴偏移 6 mm, 利用角点识别方法获取的棋盘格角点的像素坐标如图 12 所示。如 3.2 节所述, 将

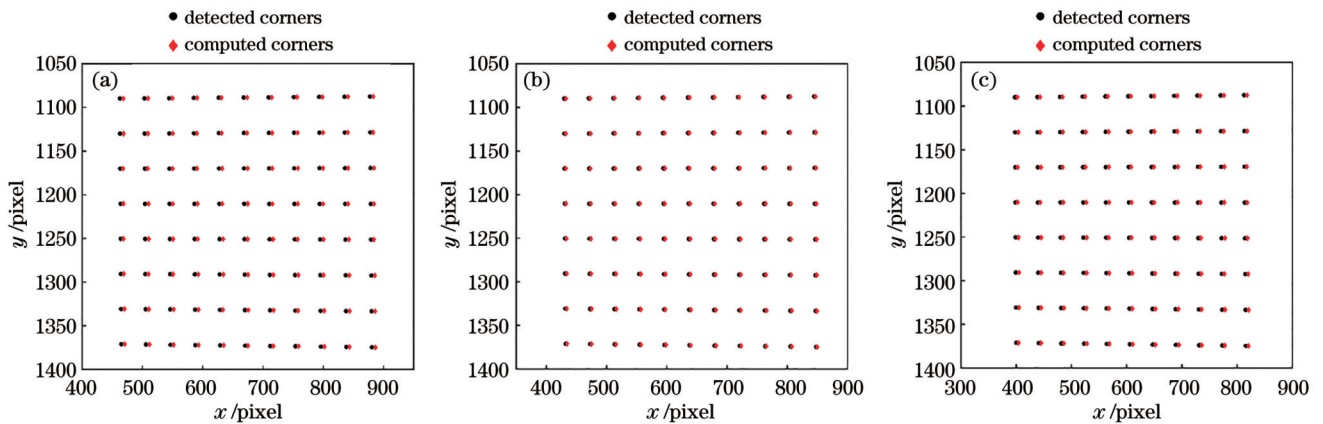


图 12 角点检测获取的偏移坐标与修正模型计算的结果对比。(a) 棱镜旋转; (b) 棱镜沿 x 方向偏移; (c) 棱镜沿 z 方向偏移

Fig. 12 Comparison between offset coordinates obtained by corner detection and results computed by modified model. (a) Prism rotation; (b) offset of prism along x-direction; (c) offset of prism along z-direction

棱镜组偏移前角点的初始坐标与偏移参数代入修正模型中,即可得到同一空间点在修正模型下的虚拟点坐标。通过对比两种方法下角点的像素坐标,可以验证所提修正模型的正确性。通过计算全场角点的均方根误差可知,在棱镜组旋转、沿 x 轴偏移、沿 z 轴偏移时,全场的误差分别为 8.9、9.6、4.2 pixel。其中误差的可能来源包括棱镜偏移距离的误差、角点提取算法误差、镜头畸变等。

6 结 论

本文研究了棱镜分光式单目立体视觉系统中深度方程与视差的关系,并考虑了由棱镜组位姿引入的系统误差。结合虚拟点模型与光线追踪法推导了系统的深度方程,通过求解深度方程的导数,研究了物距与棱镜间夹角对图像视差的影响。结果表明物距的减小与夹角的增加会增大图像的视差。针对位姿引入的系统误差,本文对虚拟点成像模型进行了修正。实验结果表明,在已知棱镜偏移距离与空间点世界坐标的情况下,采用修正模型可以准确地计算虚拟点的像素坐标,从而可以确定不同棱镜位姿下空间点的映射关系。最后,棱镜组绕基点旋转或沿垂直于相机光轴方向的偏移会引起系统视场的改变,而沿相机光轴方向的位姿改变仅减小成像的范围。该方法可为由光学元件组成的单目立体视觉系统的高精度形貌重建与变形测量提供参考。

参 考 文 献

- [1] 刘兴盛, 李安虎, 邓兆军, 等. 单相机三维视觉成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415007.
Liu X S, Li A H, Deng Z J, et al. Advances in three-dimensional imaging technologies based on single-camera stereo vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415007.
- [2] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Yu Q F, Shang Y. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 040001.
Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 040001.
- [4] 张建勋, 韩明慧, 代煜. 面向低分辨率单目内窥镜图像的三维多孔结构重建[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2085-2095.
Zhang J X, Han M H, Dai Y. Three-dimensional porous structure reconstruction for low-resolution monocular endoscopic images[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 2085-2095.
- [5] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [6] 庄苏锋, 屠大维, 刘建业. 基于主动散斑投射的水下双目视觉三维成像[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1411003.
Zhuang S F, Tu D W, Liu J Y. Underwater binocular vision 3D imaging with active speckle projection[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1411003.
- [7] Zhang M, Zhong Z L, Piao Y R, et al. Three-dimensional integral imaging with circular non-uniform distribution[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105912.
- [8] 杨琤, 周富强. 镜像式单摄像机双目视觉传感器的结构设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 7-12.
Yang C, Zhou F Q. Structure design of binocular vision sensor using mono-camera with mirrors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 7-12.
- [9] 王家骏, 刘越, 吴宇晖, 等. 基于平面系数表示的自适应深度分布单目深度估计方法[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1415001.
Wang J J, Liu Y, Wu Y H, et al. Monocular depth estimation method based on plane coefficient representation with adaptive depth distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1415001.
- [10] Xia S M, Pan Z P, Zhang J W. Optical microscope for three-dimensional surface displacement and shape measurements at the microscale[J]. Optics Letters, 2014, 39(14): 4267-4270.
- [11] Dai X J, Yuan T Y, Zu Z, et al. Experimental study of wrinkling behavior of membrane structures via visual method[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106537.
- [12] Zhao Y, Cui X Y, Wang Z G, et al. Prism-based single-camera system for stereo display[J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 063106.
- [13] Zhang W L, Xu M Q, Yuan T Y, et al. Dual-biprism-based single-camera high-speed 3D-digital image correlation for deformation measurement on sandwich structures under low velocity impact[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2023, 62(1): 20230136.
- [14] Luo H J, Yu L P, Pan B. Bi-prism-based single-bilateral-telecentric-camera stereo-DIC for accurate underwater 3D deformation measurement: implementation of a parametric model[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 162: 107440.
- [15] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.
Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.
- [16] 胡梦瑶, 陈文建, 李武森. 基于等腰棱镜单摄像机立体视觉系统误差分析[J]. 光学技术, 2022, 48(4): 416-420.
Hu M Y, Chen W J, Li W S. Error analysis of binocular stereo vision system[J]. Optical Technique, 2022, 48(4): 416-420.
- [17] Wu L F, Zhu J G, Xie H M, et al. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: systematic error analysis and correction[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 129-138.
- [18] Yu L P, Pan B. Structure parameter analysis and uncertainty evaluation for single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror adapter[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6936-6946.
- [19] Luo H J, Yu L P, Pan B. Design and validation of a demand-oriented single-camera stereo-DIC system with a four-mirror adapter[J]. Measurement, 2021, 186: 110083.

Influence Evaluation of Systematic Errors and Prismatic Postures on Field of View in Monocular Stereo Vision

Yuan Tianyu¹, Dai Xiangjun², Yang Fujun^{1*}

¹*Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;*

²*School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255090, Shandong, China*

Abstract

Objective Monocular stereo vision features low cost and compactness compared to binocular stereo vision and has a broader application prospect in space-constrained environments. Stereo vision systems based on dual-biprism are widely employed in engineering measurement due to their adjustable field of view (FoV). Compared to other types of monocular vision systems, this method is compact and easy to adjust. Topography reconstruction and deformation measurement are the main application purposes of monocular vision systems. The error factors existing in the imaging system should be considered and evaluated to obtain high-precision measurement results. The acquisition and reconstruction of depth information are crucial for accuracy. The depth equation derived from the optical geometry can be adopted to analyze factors affecting the reconstruction accuracy. Analyzing the influence of object distances and angles on image depth information and disparity in depth equations can provide references for system layout and optimization. Additionally, the artificially placed dual-biprism has offset and rotation, and the errors caused by postures will change the imaging model which is derived in the ideal state. Therefore, model correction considering posture errors is important for high-precision imaging. Meanwhile, the dual-biprism posture will lead to the FoV difference. The quantitative study of the FoV caused by the posture can be helpful for the reasonable arrangement of system layout and object positions. Based on the previous studies, to make the monocular stereo system composed of dual-biprism more applicable to high-precision topographic reconstruction and deformation measurement, we will conduct an in-depth study on the influences of systematic errors and prismatic postures on the FoV.

Methods The depth equation of the monocular vision system is expressed by geometrical optics and the ray tracing method. By making a small angle assumption and ignoring the distance between the dual-biprism and the camera, a depth equation with parameters such as disparity, included angle, and object distance can be obtained, as demonstrated in Eq. (8). By solving the partial derivative of the depth equation, the relationship among object distance, included angle, and disparity is obtained, as illustrated in Eqs. (9)–(10). The classification of prism postures is discussed, including rotation around the base point and offset along the x - or z -direction, as shown in Fig. 3. According to the systematic error introduced by the prism postures, the imaging model is further modified. Furthermore, the modified model is utilized to analyze the influence of prism postures on the FoV, as described in Eqs. (12)–(14). The experiments include verifying the validity of the derivation of the depth equation by leveraging the DIC results as true values, proving the model correctness by calculating the coordinates of the corner points, and investigating the FoV changes caused by the prismatic postures by matching the coordinates of the corresponding points. First, the experiment of object distance change is carried out. After keeping the object distance unchanged, the included angle of the prism is changed to evaluate the influence of the object distance and included angle on the disparity respectively. The DIC results are compared with the results of Eq. (8) to verify the derivation correctness. The dual-biprism is offset according to the classifications, the image is collected before and after posture changes, and the pixel coordinates of the corners of the whole field are extracted by the corner recognition method. The angular coordinates and offset distance before posture change are substituted into Eqs. (12)–(14). The calculated pixel coordinates are compared with the pixel coordinates identified above to verify the equation derivation correctness. Finally, the influence of postures on the FoV is determined by tracking the pixel coordinates of specific corners in the calibration plate before and after the prism posture changes.

Results and Discussions The depth equation for the monocular stereo vision system can be described as Eq. (8). The influence of the parameters on the disparity can be obtained by solving the derivatives regarding the object distance and included angle for the depth equation respectively. The derived equations can be expressed as Eqs. (9) and (10). The depth equation description shows that the disparity decreases with increasing distance and shows a nonlinear change. As shown in Fig. 3, all three posture classifications cause a change in the standard virtual point model. The camera is calibrated after the

device is placed to verify the derivation validity. As shown in Fig. 8, the FoV changes introduced by the postures can be obtained by tracking the corner points extracted in the calibration board before and after the posture variations. When the prism group rotates 1° clockwise around the base point, the FoV in each channel will shift anticlockwise, which will also cause the FoV in the overall overlapping area to move in this direction. If only the right prism rotates 1° clockwise, it will make the pixel coordinates of the virtual point in the right channel shift 57 pixels to the right, and the FoV offset of the side channel will reduce the overlapping FoV of the system. When the prism group is offset to the right by 1 mm along the x -direction, the same trend will be introduced. If only the right prism is offset, the virtual point will be offset by 49 pixels to the right. Meanwhile, when the prism group moves 1.4 mm along the positive half-axis of the z -direction, there is no significant FoV change in Fig. 8(c). The speckle images before and after the object distance and angle changes are captured, with the disparity map obtained. Then, the depth map can be computed using Eq. (8), in which the depth information of each point in the overlapping FoV can be obtained. The profile of the measured object can be obtained using the coordinate transformation method. The derivation correctness of the equation can be verified by selecting three cross-sections on the object and comparing the profiles of the object obtained by the two methods, as shown in Figs. 9–11. The corrected models considering the prismatic postures are illustrated in Eqs. (12)–(14). The pixel coordinates of the corner points obtained before the posture change are calculated by substituting them into Eqs. (12)–(14) to obtain the offset coordinates, which can be compared with the pixel coordinates of the corner points extracted after the offset to verify the correctness of the corrected model, as shown in Fig. 12.

Conclusions The relationship between depth equation and disparity in prism-splitting type monocular stereo vision systems is studied, with the system error introduced by the dual-biprism postures considered. The depth equation of the system is derived by combining the virtual point model and ray tracing method. By solving the derivative of the depth equation, the influence of object distance and included angle on disparity is studied. The results show that the disparity of the image increases with the reducing object distance and rising included angle. The imaging model is modified to address the system errors introduced by postures. The experimental results show that the pixel coordinates of virtual points can be accurately calculated using the modified model with known offset distances of the dual-biprism and world coordinates of spatial points, which can determine the mapping relationship of spatial points for different prism postures. Finally, the rotation of the dual-biprism or the offset along the direction perpendicular to the optical axis of the camera will cause the FoV of the system to change, while the posture change along the optical axis of the camera will only reduce the imaging range. Finally, we can provide references for high-precision reconstruction and deformation measurement of monocular stereo vision systems composed of optical elements.

Key words measurement; monocular stereo vision; prismatic posture; depth equation; systematic error; field of view evaluation