

毕业设计说明书中文摘要

本文总共提出了两种基于计算机视觉的位移检测方案，并分别对两种方案的优势和劣势进行了探讨和对比。首先，本文复现了 Lee 等人设计的基于单应变换的单目视觉位移检测方案^[1]，并基于该方案提出了一个改进版本，可使计算机能够基于色块自动检测视频帧中的感兴趣区域并提取像素坐标，从而无需手动选定，并用十六点法替代了原方案中的八点法^[1]以获得更精确的单应映射关系，从而获得更精确的位移测量结果。接着，本文提出了基于双目视觉的位移检测方案，可直接得到靶标在起始处和终点的三维公制坐标，以此计算空间位移。经探究与测试，两种方案各有利弊，将在本文中详细探讨。

关键词 计算机视觉 单目视觉 感兴趣区域 单应性 双目视觉

毕业设计说明书外文摘要

Title Research on Computer Vision-based Displacement

Measurement Systems

Abstract

This paper proposed two schemes for displacement measurement based on computer vision. Firstly, we reproduced the monocular vision-based displacement measurement system utilizing homography^[1] by Lee et al., and we raised an improvement scheme, enabling computer to detect ROIs and retrieve image coordinates in each frame automatically by color filter, eliminating the need for manual selection, and we replaced the original eight-point algorithm^[1] with sixteen-point to achieve better pixel-to-metric mapping accuracy. Secondly, we proposed a binocular vision scheme which directly retrieves the three-dimensional metric coordinates of the initial and terminal displacement points of the marker, so as to calculate the spatial displacement. The two proposed schemes have both advantages and disadvantages, of which the details are presented in the paper.

Keywords Computer vision monocular vision ROI homography binocular vision

目 次

1 引言	1
2 基于单目视觉的位移检测系统	4
2.1 流程框架	4
2.2 实现细节	5
2.3 实验及结论	10
3 基于双目视觉的位移检测系统	17
3.1 流程框架	17
3.2 实现细节	18
3.3 实验及结论	20
4 方案对比、总结与展望	25
致谢	28
参考文献	29
图 2.1	4
图 2.2	4
图 2.3	5
图 2.5	6
图 2.6	6
图 2.7	7
图 2.8	10
图 2.10	11
图 2.11	12
图 2.12	12
图 2.14	13
图 2.15	14
图 3.1	17
图 3.2	18
图 3.3	19
图 3.5	21
图 3.7	22
图 3.8	23
表 2.4	5
表 2.9	11

表 2.13	13
表 2.16	14
表 3.4	21
表 3.6	22
表 3.9	23
表 3.10	26

1 引言

结构健康检测 (SHM) 对于评估一个工程结构的性能、制定有针对性的维护策略而言是至关重要的, 其中形变是对工程结构的状态以及性能变化最重要的衡量标准之一^[2]。形变最重要的表现形式之一是结构发生位移, 因此迄今为止, 大量与结构健康检测有关的论文以探讨位移检测的方法为重。

我们对现存的位移检测方案加以整理, 大致可将其分为两大类: 第一类为接触式的位移检测系统, 第二类为非接触式的位移监测系统。接触式的位移检测系统以接触式传感器为主, 例如 Yu 等人设计的一种平面电容传感器以实现长距离位移检测^[3]、许等人设计的一种双轴电容位移检测技术^[32], 以及林等人设计的一种电感式位移测量装置^[33], 但这两种方法仅限于平面二维位移检测; 很多接触式的动态位移检测 (一般用于振动检测场景) 机制使用附着在待测结构表面的加速度传感器来实时获取空间位移信息^[4], 即实时获取三轴 (三个正交方向) 的瞬时加速度, 并通过时域积分获取振幅信息; 还有一类接触式方案使用光纤传感器^{[5][6][7][31]}以精确测量微小位移。这些接触式方案最显著的弊端在于, 传感器需要被安装在待测物表面, 当传感器数量增加时会产生负载效应^[8], 从而破坏待测物固有的结构动力学^[4], 易对测量结果造成不可避免的干扰。虽然有部分研究人员设计出了高度集成化的传感器模组^[9]或微机电系统^[10]来缓解单体载荷, 但此类装置对制造工艺和人员操作要求较高, 因此不利于推广。

非接触式的位移检测系统也可以分为两大类: 一类是采用专业非接触式仪器进行位移检测的检测系统, 另一类是基于摄像头和计算机视觉技术的位移监测系统, 亦即本文的重点。其中, 专业的非接触式检测仪器包括电子散斑干涉仪^[11]、云纹 (摩尔纹) 干涉仪^[12]、连续波多普勒雷达^[13]等, 能够实现精度极高的微小形变检测, 但此类设备主要用于精密小位移测定, 应用场景有限, 且往往成本过高, 因此不利于推广; 普通的激光传感器虽然能够得到理想的位移精度, 但仅限于记录位于光束轴线上的位移变化, 自由度较低。

得益于单位性能成本逐渐下降的计算设备, 计算机视觉技术在近十年的发展中已经被普及到了各个领域, 成为一项在学术界和工业界都极具研究价值和应用价值的工程技术之一^[14]。无论在静态还是动态位移检测方面, 基于计算机视觉的检测技术都具有传统方案无法比拟的优势: 1) 无接触、无损伤的测量过程; 2) 相对快速的平台搭建过程^[14]; 3) 极高的空间分辨率^[4]; 4) 相对低廉的成本。其中, “极高的空间分辨率”是使得计算机视觉方案获得青睐的主要原因之一, 这一优势源于相机拍摄得到的画面中, 每一个像素点都可以被等效为一个独立的传感器^[14], 这使得像素级和亚像素级分辨率的位移检测成为可能。如果使用高速摄像头,

还可以获得较高的瞬态分辨率^[4]，以此获得较高的动态位移测量精度。由于这些独一无二的优势，越来越多与位移检测有关的研究倾向于使用计算机视觉技术。其中，贾将计算机视觉技术应用于铁轨位移检测^[15]，并应用了超分辨率技术来提升拍摄画面的分辨率、用圆拟合来确定靶标的质心和半径^[15]，获得了毫米级的检测精度；王将计算机视觉技术应用于桥梁结构位移监测，将 YOLOv4 神经网络技术应用于待测物检测与框定，通过像素坐标到世界坐标的映射关系获得了良好的测量精度^[16]；冯等人将数字频域图像分析技术带到显微摄像机应用场景中，以检测微小位移^[36]。

我们设计了两种基于计算机视觉的位移检测方案，第一种基于单目视觉以测量平面位移，第二种基于双目视觉以测量空间位移。本文将对两个方案分别进行详细介绍，并探讨其各自的优劣。

第一个种方案基于 Lee J.等人设计的位移检测系统 (以下简称“L 方法”)^[1]。该系统使用靶标坐标提取和实时单应映射来实现靶标的像素坐标到公制坐标的转换，并以此得到位移数据^[1]。原方案的优势在于，相较于 Mortas 等人和 Niitsu 等人所设计的方案要求摄像头机位固定、且须介入辅助测量设备^{[17][18]}，L 方法无需任何辅助测量设备，并能够在任何摄像头可以拍摄到靶标的机位获得理想的测量结果。我们复现了这一方案的基本流程，并首先基于其中的感兴趣区域选取以及像素坐标提取环节加以改进，使程序能够自动精确地框定出画面中特定颜色的区块，并提取出每个区块的中心像素坐标用于计算单应映射关系。接着，我们将原方案中的八点求解法^[1]替换为“十六点”求解法以得到更精确的单应映射关系。依据固定机位的静态位移测试结果，单应变换基于“十六点”求解法的程序能够获得更小误差的位移测量结果。

L 方法对于更复杂的空间位移而言是无能为力的，这种方案仅限靶标在一个定平面位移的情况。而 Lee H.等人提出过一种双目视觉的三维模态检测技术^[19]，通过结合互相关匹配法和最小均方匹配法，能够以亚像素级精度绘制结构体的空间动态位移数据^[19]。可见，双目视觉系统的主要优势在于能够获得一个点的空间坐标，从而可以获得该点的空间位移距离。因此，我们在第一个单目视觉方案的基础上衍生出了一个基于双目视觉的位移检测系统。在双目视觉方案中，我们保留了程序自动框定和提取靶标中心像素的算法，获取起始位移点和位移终点的公制空间坐标则采用了双目测距原理。经静态位移测试，该双目视觉方案能够实现毫米级检测精度。

本文除引言外，将主要分为三个部分。第一部分 (第 1 章) 主要介绍基于单目视觉的位移检测方案，包括流程框架、实现细节以及实验结论；第二部分 (第 2 章) 主要介绍基于双目

视觉的位移检测方案，同样包括流程框架、实现细节以及实验结论；第三部分（第 4 章）将对第一部分和第二部分的方案进行总结、对两种方案进行对比，并简述我们对基于计算机视觉的位移检测技术的发展期望。

本文的所有相关程序使用 C++ 编程语言及 OpenCV 4.5.5 开源函数库开发完成，部分数据分析和图表绘制使用 Python 的 NumPy 扩展程序库以及 Matplotlib 绘图库开发完成。调试和运行相关程序用到的集成式开发环境包括 Qt Creator 5.12、Visual Studio 2019、Visual Studio Code 以及 Xcode 13。

值得注意的是，如无特殊说明，本文中的所有“单目位移检测系统”、“双目位移检测系统”、“单目系统”、“双目系统”均指文中详细介绍的两个位移检测系统。

由于疫情原因，本文所有的开发、测试以及调试环节均在非实验室环境中使用非专业仪器进行，因此对实验数据会有影响，且由于动态位移测试对实验设备要求较高，文中所有的位移测试均为静态位移测试。敬请谅解！

2 基于单目视觉的位移检测系统

2.1 流程框架

单目视觉位移检测系统的硬件部分主要包括如下设备：1) 一台智能手机 (iPhone 13 Pro)、2) 一个手机支架、3) 一台笔记本电脑 (MacBook Air 2018) 和 4) 以一个平板电脑显示屏为载体的靶标。其中，智能手机背部的广角摄像头作为该系统的摄像头，固定在手机支架上，负责在固定机位分别拍摄位移起点的靶标图像和位移终点的靶标图像；靶标紧靠一个平整的墙体放置，通过直尺规划靶标的位移；笔记本电脑无线接收从智能手机传来的图像，运行程序部分，计算并输出最终的位移检测结果。拍摄装置的实景和靶标的样式如图 2.1 和图 2.2 所示：

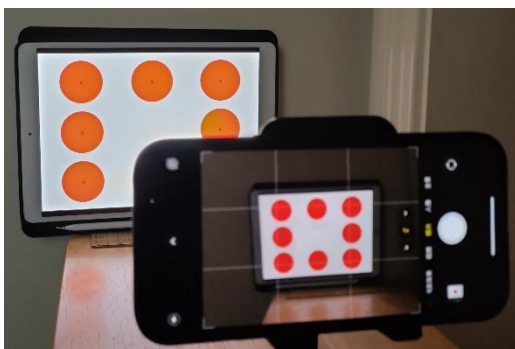


图 2.1 拍摄装置实景

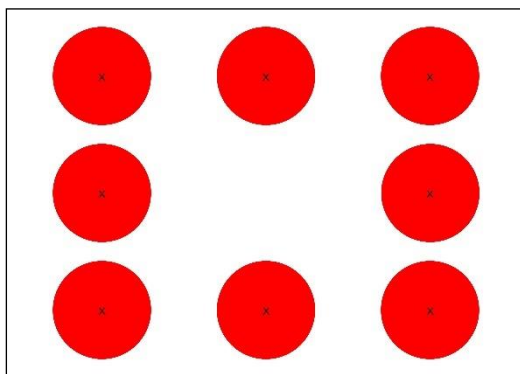


图 2.2 单目视觉方案的靶标样式

单目视觉位移检测系统的程序流程图如图 2.3 所示，具体执行顺序为：1) 读取靶标在位移起点的图像；2) 识别各个感兴趣区域 (红色实圆) 并编号；3) 依据编号提取各个感兴趣区域形心的像素坐标；4) 用户依据编号输入各个点的实际公制坐标；5) 根据 8 组坐标对计算单应变换关系；8) 读取靶标在位移终点的图像并提取靶标上任意一个标记点在终点的像素坐标；9) 使用先前的单应映射关系计算得到该点在终点的公制坐标；10) 对该点在终点和起点的公制坐标运用距离公式，得到公制位移距离。

其中，像素坐标指的是从图像上提取的、以像素为单位的坐标， x 轴的零点对应图像的

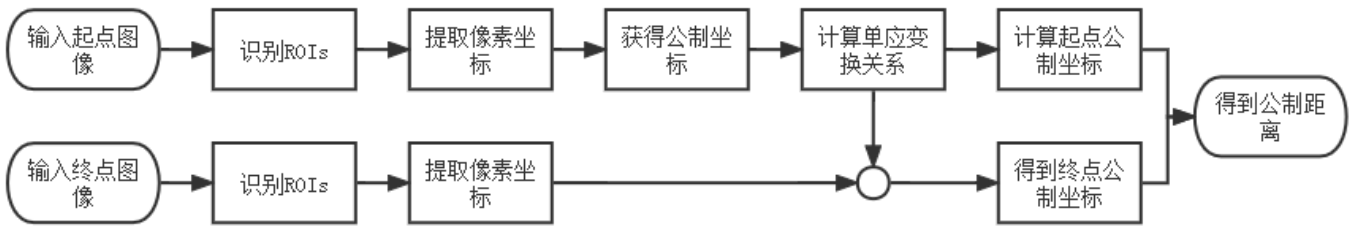


图 2.3 单目视觉位移检测系统程序流程图

最左侧、 y 轴的零点对应图像的最顶部。公制坐标指的是现实世界中对应图像上某一点的、以公制长度单位为单位的坐标， x 和 y 轴的零点可以在靶标平面任意选取。对于动态位移检测场景，仅需将位移起点图像设置为第 $n-1$ 帧图像，将位移终点图像设置为第 n 帧图像，依此类推、循环执行即可。

2.2 实现细节

实现细节部分将按照流程顺序，对 2.1 节流程中几个重点环节的实现方法进行详细描述，包括感兴趣区域的自动框定、像素坐标提取、平面单应映射和求公制距离。

2.2.1 识别和框定感兴趣区域

如图 2.2 所示，靶标由白色底板和八个完全相同的实心圆（以下简称“标记”）构成。程序成功识别出靶标的标志就是成功识别并框选出图像中靶标上的八个标记，且框选精确与否将决定后续提取出的八个标记形心的像素坐标是否精确。

首先对图像进行预处理，其主要目的是为了减少识别过程中不相关结构带来干扰。由于标记具有颜色特征，因此可以考虑基于其颜色特征对图像做二值化。OpenCV 中的 `inRange` 函数基于 HSV 色彩模型，可以将图像中给定颜色范围的像素置 1（白色），将其它像素置 0（黑色），从而获得一张基于颜色特征的二值图像，一般称之为“掩膜”。如果颜色范围有多个区间，则分别基于每个区间二值化原图像得到对应的掩膜，最后将所有的掩膜图像按位相或即可。本方案中选择如表 2.4 中所示的两个 HSV 色彩区间来滤出图像中的红色区域：

表 2.4 色彩区间上下限取值 (HSV 色彩模型)

	H_{min}	S_{min}	V_{min}	H_{max}	S_{max}	V_{max}
区间 1	0	127	0	10	255	255
区间 2	156	43	46	180	255	255

为了正确使用该滤波器实现图像二值化，需要先将原图像 (RGB 色彩空间) 的色彩空间转换至 HSV 色彩空间，可以使用 OpenCV 中的 `cvtColor` 函数来简单完成这一转换。

二值化后的图像于原图像的对比如图 2.5a、2.5b、2.6a 和 2.6b 所示：

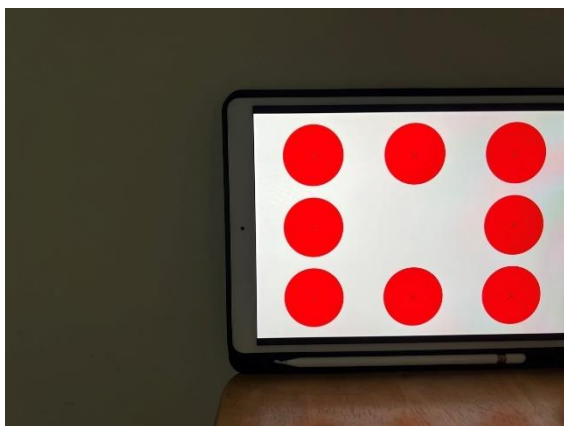


图 2.5a 原图像 1 (RGB 色彩空间)

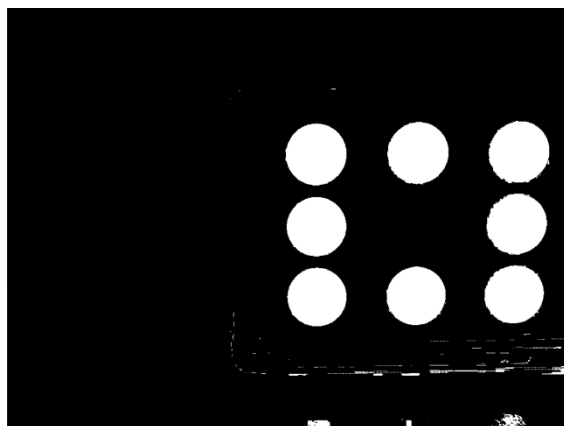


图 2.5b 原图像 1 掩膜 (二值图像)

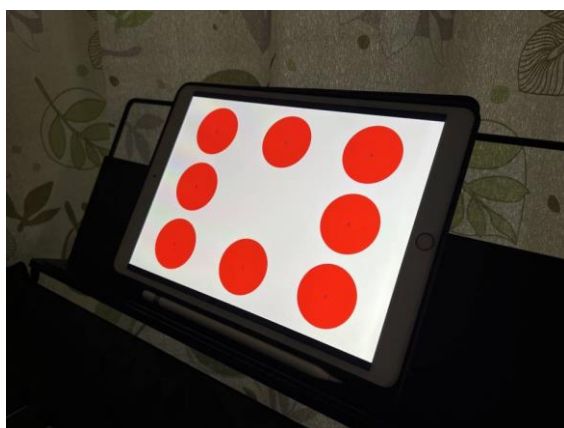


图 2.6a 原图像 2 (RGB 色彩空间)

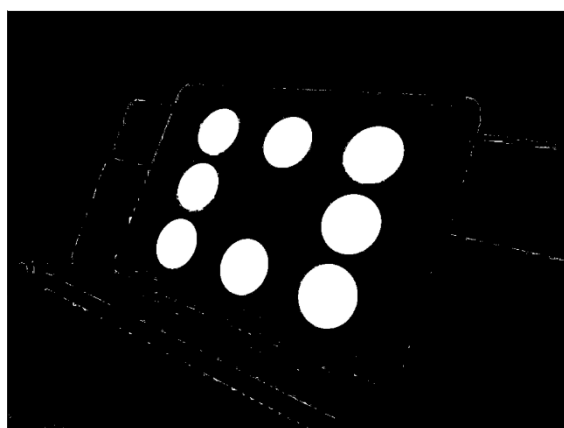


图 2.6b 原图像 2 掩膜 (二值图像)

从以上两组图像可以看出，八个标记在基于 HSV 色彩区间的图像二值化得到的掩膜图像中可以被完整保留，而除标记外，其他非相关区域基本已被滤除，极少数未被滤除的像素点也不足以构成较大面积的区块，因此不会影响对标记的识别。若对原图像做降噪处理再行二值化，并对二值化图像进行先开运算、后闭运算的形态学操作，可以更大程度地去除噪声并获得更好的标记轮廓。

识别标记点是基于掩模图像进行操作的。Suzuki 等人提出了基于二值图像边界跟踪的拓扑学结构分析技术^[20]，被广泛应用于二值图像的轮廓提取。OpenCV 中封装的 findContours 轮廓提取函数就是基于 Suzuki 等人的理论，该函数能够返回二值图像中所有的闭合轮廓（以轮廓像素坐标序列的形式）以及轮廓之间的继承关系。从图 2.5b 和 2.6b 可以看出，八个标记拥有掩模图像中面积最大的八个轮廓，因此在提取出掩模图像中所有的轮廓之后，将其按面积从大到小排序，八个最大轮廓的像素坐标序列即为八个标记的轮廓像素坐标序列。为此，可以使用 OpenCV 提供的 contourArea 函数获得每个轮廓包围区域的面积。在得到八个标记的轮廓像素坐标序列后，我们使用最大外接矩形法来框定八个标记，外接矩形的中心与标记形

心重合。最大外接矩形法可以直接调用 OpenCV 提供的 `boundingRect` 函数，其返回值为一个外接矩形对象，该对象的关键属性参数包括外接矩形左上角点位的像素坐标、外接矩形的宽（以像素为单位）以及外接矩形的高（以像素为单位）。通过这些参数能够获得外接矩形的中心像素坐标，即标记的形心像素坐标。图 2.7a 和图 2.7b 展示了本程序自动识别和框选八个标记的运行结果。

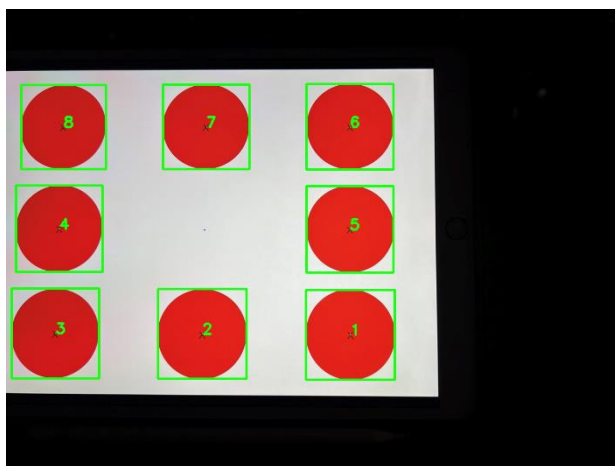


图 2.7a 程序自动识别和框选运行结果



图 2.7b 在“6 号”标记处裁切并放大得到的图像

从图 2.7a 可以看出，程序能够成功地识别并框选出靶标上的全部八个标记点。同时，根据图 2.7b，程序计算得到的形心像素坐标以绿色圆点的形式被标出，与该标记实际的形心坐标高度重合。相较于 L 方法需要使用者手动框选出图中的感兴趣区域^[1]，再对每一个感兴趣区域单独进行图像处理，我们的自动识别与框选机制更加高效，且能够得到同样理想的框选精度。

2.2.2 像素坐标提取

在 2.2.1 中已经讲到，通过外接矩形的参数可以得到外接矩形的像素中心。无论摄像机位如何变化，图像中靶标上的标记都是一个椭圆（圆是椭圆的一种特殊情况），而椭圆的外界矩形，其形心与椭圆的形心重合，因此得到外接矩形的形心像素坐标即得到了标记的形心像素坐标。标记的形心像素坐标是关键参数，因为它将被用于求解单目视觉方案中的核心——单应映射关系，亦即单应矩阵。外接矩形的已知参数包括左上角点的像素坐标 (x, y) 、像素宽 w 以及像素长 l 。由此，可以得到外接矩形的中心，亦即标记形心的像素坐标，如 2.1 式：

$$\begin{cases} x_{mark} = x + \frac{w}{2} \\ y_{mark} = y + \frac{h}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

其中, x_{mark} 和 y_{mark} 分别表示标记形心像素坐标的 x 分量和 y 分量。只要标记轮廓的提取足够精确, 就能够得到精确的外接矩形框, 从而准确定位标记的形心位置。

2.2.3 平面单应映射

平面单应映射是指从一个平面上的点投影至另一个平面的映射关系, 在计算机视觉领域应用广泛, 如图像拼接^[21]、视觉标定等。考虑靶标位移仅限于靶标所在平面、摄像头位置固定且靶标上的八个标记始终在相机取景器中全部可见的情况, 只要知道了图像平面与靶标平面之间的单应映射关系, 就可以将图像平面任意一点的像素坐标投影到靶标平面的对应位置处。若这样的单应映射关系是通过图像平面的若干像素坐标和对应于靶标平面的若干公制坐标建立的, 则通过单应性就可以将图像平面的任意像素坐标映射为靶标平面上对应的公制坐标。由于测量公制位移不关心靶标位移起点或终点的绝对公制坐标, 而因此靶标平面的零点可以任意选取, 而图像平面的零点一般取图像的最左上角。假设平面 A 到平面 B 之间的单应映射关系为 H , 则有:

$$P_B = H \cdot P_A \quad (2.2a)$$

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \quad (2.2b)$$

式 2.2a 中, H 是一个如图 2.2b 的三阶矩阵, P_A 和 P_B 分别表示平面 A 上的任意一点以及该点在平面 B 上的投影点。由于单应映射矩阵 H 是一个三阶矩阵, 而 P_A 和 P_B 原则上是两个平面上的二维点, 因此在实际计算时, P_A 和 P_B 是两个三维齐次向量, 分别写作:

$$P_A = (x_A \ y_A \ 1)^T \quad (2.3a)$$

$$P_B = (x_B \ y_B \ 1)^T \quad (2.3b)$$

将 2.2b、2.3a 和 2.3b 式代入 2.2a 式, 得到:

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

将 2.4 式写为如 2.5a 的线性方程组形式:

$$\begin{cases} x_B = h_{11}x_A + h_{12}y_A + h_{13} \\ y_B = h_{21}x_A + h_{22}y_A + h_{23} \\ 1 = h_{31}x_A + h_{32}y_A + h_{33} \end{cases} \quad (2.5a)$$

将 2.5a 中的第三个等式代入前两个等式可得 2.5b:

$$\begin{cases} x_B = \frac{h_{11}x_A + h_{12}y_A + h_{13}}{h_{31}x_A + h_{32}y_A + h_{33}} \\ y_B = \frac{h_{21}x_A + h_{22}y_A + h_{23}}{h_{31}x_A + h_{32}y_A + h_{33}} \end{cases} \quad (2.5b)$$

令 $h_{33} = 1$ ，则求解单应性一共需要解出 8 个未知数。由 2.5b 可知，一对投影点由两个方程约束，因此在理想情况下，四对投影点可以确定一个单应性。Lee J. 等人求解单应性所使用的“八点法”^[1]就是指，利用靶标上四个标记中心的公制坐标及其对应于图像平面的四个像素坐标来得到图像平面到靶标平面的投影映射关系。然而在实际应用中，由于很难得到四对理想的投影点，因此往往使用大于四对投影点进行求解。Förstner 也在其书中指出，用大于四对投影点求解可以得到更理想的单应映射关系^[22]。

求解单应性的方法有很多，基本思想是代入已知点对来优化映射误差。考虑使用最小均方误差法 (MMSE) 来优化误差，即求：

$$\arg \min_H \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\widehat{x_B^k} - \frac{h_{11}x_A^k + h_{12}y_A^k + h_{13}}{h_{31}x_A^k + h_{32}y_A^k + 1} \right)^2 \quad (2.6a)$$

$$\arg \min_H \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\widehat{y_B^k} - \frac{h_{21}x_A^k + h_{22}y_A^k + h_{23}}{h_{31}x_A^k + h_{32}y_A^k + 1} \right)^2 \quad (2.6b)$$

式 2.6a 和 2.6b 中， N 表示点对的数量， $\widehat{x_B^k}$ 和 $\widehat{y_B^k}$ 表示第 k 个投影点的实际坐标值， x_A^k 和 y_A^k 表示第 k 个被投影点的实际坐标。本方案中，靶标上八个标记的公制坐标已实现经过测量得到，因此我们将 2.2.1 和 2.2.2 中程序得到的八个像素坐标和八个公制坐标一一对应，这样就得到了八对投影点。OpenCV 提供了 findHomography 函数来根据给定点得到最优单应映射矩阵。该函数使用最小二乘法可直接获得全局最优解，因此相较于迭代法（如梯度下降）的求解效率更高，适用于实时视频检测。

2.2.4 求公制距离

得到最优单应映射关系后，对位移终点的靶标图像重复 2.2.1 及 2.2.2 中的步骤，任意选择终点图像和起点图像上位置相对应的一对标记中心，并对终点图像上被选中的标记中心进行单应性映射以得到该点在终点位置的公制坐标，最后使用两点直线距离公式就可以得到靶

标的位移距离（这里假设靶标是刚性的）。

如果通过计算八个标记像素坐标的算数平均值从而得到靶标的中心，然后对靶标中心做单应变换，以此通过靶标中心的公制位移来计算靶标的位移，这样就不需要人为选择起终点的对应标记点，看似能够进一步简化操作流程。然而，这仅在图像平面与靶标平面完全平行的情况下是可行的，而在一般情况下会造成较大的测量误差。

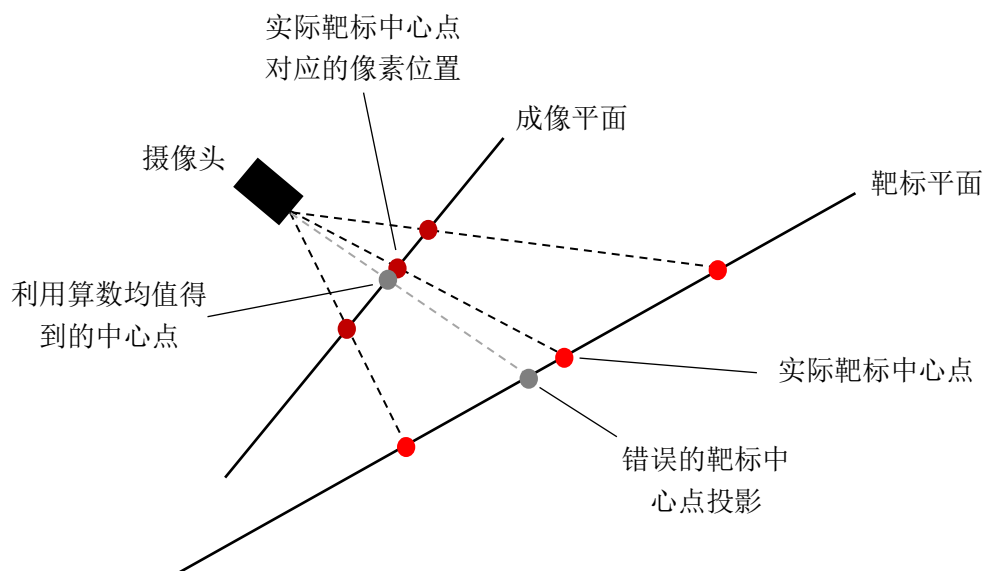


图 2.8 利用错误的算法得到的伪靶标中心点投影示意图

从图 2.8 可以看到，利用算数均值计算得到的中心点像素坐标并不能被正确投影到靶标的正中心，而是会出现偏差，这是因为单应性的理论是基于针孔摄像头模型，这意味着投影线是从单点射出的，因此投影线之间不平行，所以利用算数均值得到的中心点和实际的中心点存在偏差。综上，人为选取一组对应的标记，并利用标记中心的公制位移距离得到靶标的位移仍然是针对一般场景较为高效的方案。

2.3 实验及结论

我们一共设计了两个实验项目。第一个实验项目主要考察求解单应性的点对数量将如何影响测量误差，而第二个实验项目则通过靶标不同的位移距离来测试该系统的位移检测精度。本节的最后，将对两项实验的结果以及该系统进行总结。

实验中涉及到的设备参数如表 2.9 所示：

表 2.9 实验设备参数一览

实验设备名称	参数名称	参数详情
智能手机	摄像头分辨率及光圈	1200 万像素 f/1.5 光圈
笔记本电脑	性能参数	Intel 双核酷睿 i5-8210Y，8GB 内存
靶标 (平板电脑)	靶标 (平板电脑) 分辨率	2224×1668，264 ppi

2.3.1 求解单应性的点对数量对误差的影响

我们设计了静态位移实验以得到单应性的点对数量对位移测量误差的影响。理论上，使用的投影点对越多，位移测量结果的误差应当越小。因此，本实验的目的主要是为了验证该理论。我们分别设计了三个靶标，上面分别绘制了四个、六个和八个规格完全相同的红色实心圆标记。三个靶标的底色、大小和分辨率均完全一致。三个靶标的样式如图 2.10a、2.10b 和 2.10c 所示。

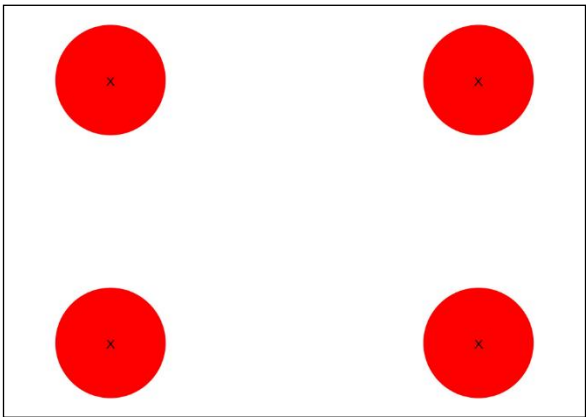


图 2.10a “四标记式” 靶标

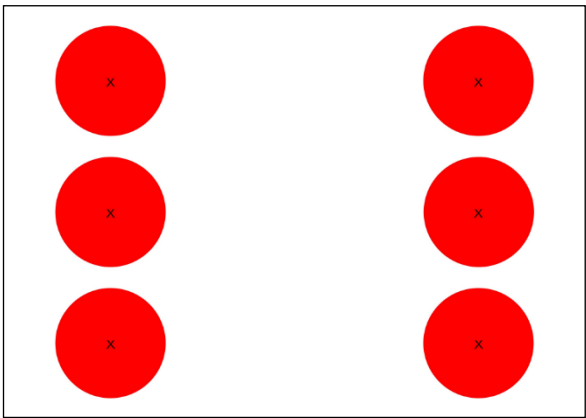


图 2.10b “六标记式” 靶标

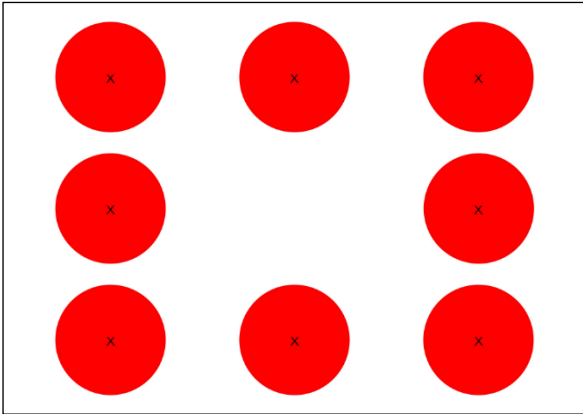


图 2.10c “八标记式” 靶标，本方案使用的靶标

本项实验的具体方法为，对三个靶标分别进行静态位移测试，每次位移的起点和终点位置相同 (位移相同)，位移平面相同，且摄像机位自始至终固定不变。使用程序分别对三组位移图像进行处理，计算得到三组位移数据，并与参考位移距离对比以计算误差。本实验使用的参考位移距离为 10cm。由于靶标的载体是一台平板电脑，设备的四角为圆角，因此为了能够在三组位移测试中较精确地将靶标移动到同一个起点或终点参考线，平板电脑下方触控笔上的金属环其中一侧被用于对齐参考线，具体如图 2.11 所示。



图 2.11 红色圆环将用于对其位移参考线的金属环一侧标记了出来

三组位移测试的标记识别部分程序运行截图如图 2.12a、2.12b 和 2.12c 所示。

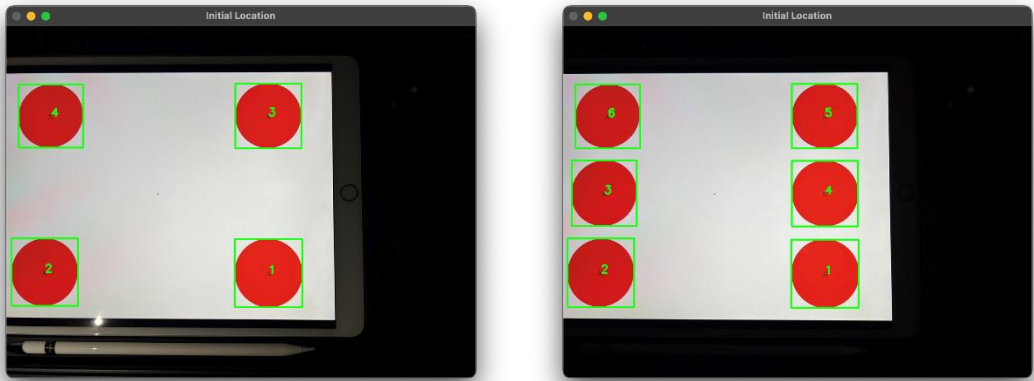


图 2.12a “四标记” 靶标的位移测试过程程序截图 图 2.12b “六标记” 靶标的位移测试过程程序截图

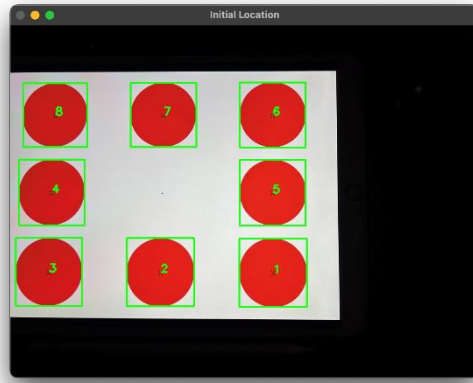


图 2.12c “八标记”靶标的位移测试过程程序截图

本项实验的结果如表 2.13 所示：

表 2.13 求解单应性的点对数量对位移测量结果误差的影响实验结果

标记个数 (个)	参考位移 (cm)	测量结果 (cm)	误差 (%)
4	10.00	10.50	5.0
6	10.00	10.39	3.9
8	10.00	10.25	2.5

位移测量结果误差 (%) 关于求解单应性的点对数量的数据折线图如图 2.14 所示：

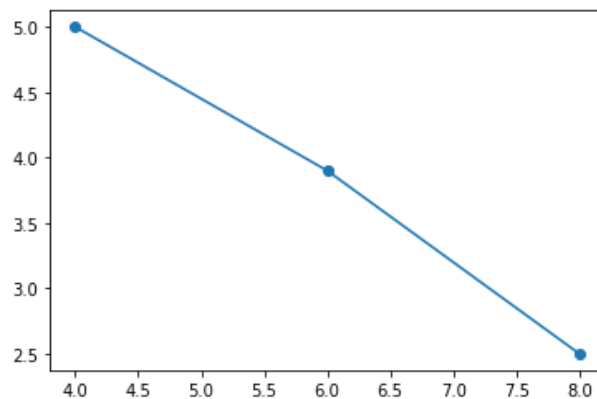


图 2.14 横轴表示点对数量 (对)、纵轴表示位移测量误差 (%)

从表 2.13 和图 2.14 中可以得到，随着标记个数的增加，位移测量结果与参考位移之间的误差呈逐渐缩小的趋势。在该方案中，标记个数即代表求解单应矩阵所能够使用的投影点对，因此可以验证结论，即在已知投影点对大于等于 4 组的情况下，用于求解单应性的点对数量越多，位移测量结果与参考值之间的误差越小。

2.3.2 定机位静态位移检测精度测试

定机位静态位移检测精度测试将检验该单目视觉检测系统的静态位移测量精度。测试将被分为四组，四组测试的参考位移距离分别为 1cm、2cm、5cm 和 12cm。整个测试过程，靶标将一致采用“八标记式”靶标 (如图 2.10c 或图 2.2 所示)，且位移起点和机位自始至终保持固定，位移起点和定距参考线的对齐方式仍参考 2.3.1 中的对齐方式。

图 2.15 展示了该测试中靶标在位移起点的图像：

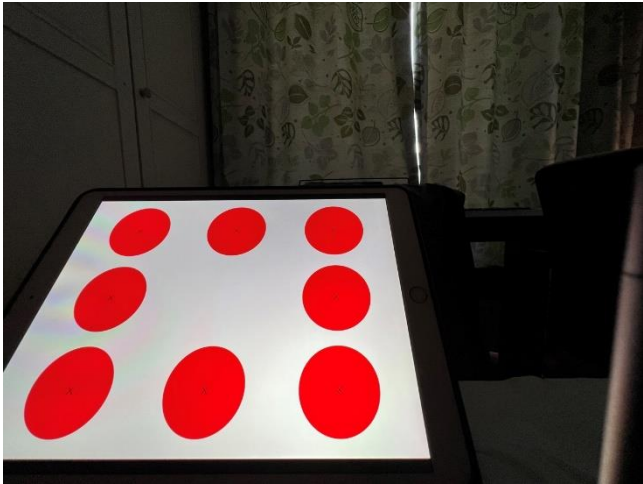


图 2.15 定机位静态位移测试：靶标位移起点图像

本项实验的结果如表 2.16 所示：

表 2.16 定机位静态位移测量结果与误差

参考位移 (cm)	测量结果 (cm)	误差 (%)
1.00	1.12	12.0%
2.00	2.34	17.0%
5.00	5.89	17.8%
12.0	12.9	7.50%

以上测量结果的平均误差为 13.6%。从实验数据可见，该方案可以获得厘米级精度，但由于该实验数据使用非实验设备采集自非实验环境，对参考位移的测定可能不准确、靶标在位移起终点可能不处于同一平面，因此实际的精度可能较本实验测得的精度更高。因此，为了获得更可靠的结果，需要后续采取实验室规格的精度测试。

此外，我们认为，在实际应用场景中，图像平面与靶标平面之间的夹角大小也会对测量精度造成影响。在 Lee J.等人对其方案的动态振动测试中，虽然他们宣称其所提出的检测系统对任意机位拍摄具有鲁棒性^[1]，但从他们的实验数据中还是可以了解到，图像平面与靶标平面见的夹角越大，测量结果的误差越大。从图 2.15 可以看出，相较于实验 2.3.1 中的正对机位，本实验的图像平面与靶标平面存在较大的夹角，对于厘米级静态位移测量实验（相较于

Lee J.等人设计的实验中,毫米级的靶标位移距离)而言,误差会被进一步放大。我们认为,此误差的主要来源在于现有的像素坐标提取机制对于斜视机位拍摄得到的图像仍存在误差,导致无法获得精确的单应映射关系。

2.3.3 总结

通过上述实验结果可以看出,本方案使用的十六点法(八个已知投影点对)较L方法中使用的八点法^[1](四个已知投影点对)能够解得更精确的单应映射关系,从而获得更理想的静态位移测量结果。当图像平面与靶标平面之间的夹角较大(摄像头斜向对准靶标)时,用该系统测量静态位移将获得厘米级精度的测量结果。

L方法虽然可以达到毫米级的实验室环境动态位移检测精度,但即使如此,L方法在位移检测精度上是否较本章所述的单目视觉方案更优这一点仍然存疑,原因如下:

- 1) Lee J.等人仅测试了L方法的动态位移检测精度,因此静态场景下的检测精度未知;
- 2) 在Lee J.等人设计的实验中,靶标的最大位移距离未超过1cm(他们使用的靶标载体为简谐振动台,振幅为5mm)^[1],因此对较大位移距离的检测精度未知;
- 3) Lee J.等人设计的实验室规格测试对于实际应用场景而言仍过于理想,因此现实场景下的检测精度未知。

此外,受限于L方法追踪标记和提取像素坐标的算法流程,L方法不适用于较大位移量的检测。该方案需要操作者对输入的第一帧图像手动框选每个标记所在的一个感兴趣区域,程序则负责分别对每一个感兴趣区域做二值化处理^[1]。在动态检测过程中,由于不可能让操作者对每一帧图像框选标记,因此要求靶标上所有的标记在程序运行过程中处于其所在的感兴趣区域范围内,这不仅限制了靶标的移动范围,而且对操作者框选标记的方法也有较高要求。不仅如此,由于L方法使用大津法对感兴趣区域二值化^[1],相较于我们所使用的HSV颜色滤波器,是一种单阈值分割法,这使得L方法对靶标上的局部明暗不一致(例如由于环境照明设备和视角差异造成的局部表面反光、局部亮斑污渍等)较为敏感。从图2.12a可以看到,在该测试环境中,拍摄设备的闪光灯未被关闭导致靶标所在区域的局部光照发生了变化,但未对程序正确识别和框选出四个标记造成影响。实际上,我们的方案为用户提供极高的自由度。图2.12a至2.12c中我们使用了本方案对不同的靶标进行了位移检测,这意味着使用者可以自定义靶标的标记个数,而HSV颜色滤波器使得使用者还可以自定义靶标的标记颜色,以适应不同的操作环境。

针对本方案,我们提供了一个进一步改进思路以优化误差。我们认为,静态位移测量实验结果的误差源于一般斜视摄像机位的单应映射精度仍不足,而单应性求解不够精确的原因

在于，八个标记中心的像素坐标并非通过直接识别后提取、而是间接计算得到的。与 2.2.4 中所提到的问题类似，通过间接计算得到的标记中心与实际标记中心可能存在偏差，这使得程序得到的投影点对并不满足实际场景中两个平面间的单应性。显然，缩小每个标记的直径理论上可以缩短伪中心与实际中心的绝对距离，从而减小误差，但更理想的方案是直接识别和提取像素平面的投影点，并与靶标平面对应的投影点做组合。可以考虑设计一个多边形标记（边数大于等于 4），并在图像平面对多边形标记的角点进行检测和坐标提取（使用角点检测算法，如 Shi-Tomasi 等），从而该坐标可直接用于计算平面单应性。

基于单应性的单目视觉方案仅适用于靶标在其所处平面位移的情况，且靶标需要附着在平直的物体表面。此外，求解单应性至少需要四个投影点对，这对靶标的大小也有一定限制。综上所述，此类方案难以适应复杂场景的检测需求。为此，我们提出了基于双目视觉的位移检测系统。双目视觉系统可以通过视差原理计算单点的三维公制坐标，因而得以计算该点的空间公制位移，从而无需依赖多个已知点求解映射关系，也无需将位移约束在平面上。双目视觉系统的优势能够解决上述本方案中存在的限制，将基于计算机视觉的位移检测技术带入更复杂的场景。第 3 章将重点介绍和评估基于双目视觉的位移检测系统。

3 基于双目视觉的位移检测系统

3.1 流程框架

基于双目视觉的位移检测系统（以下简称“双目位移检测系统”）基于视差测距原理^[30]。双目测距系统一般包含两个主要部分：双目标定和双目测距。行业普遍使用的双目标定原理基于张氏棋盘标定法^{[28][29]}。由于在本系统的后续实验中，我们将只使用一枚单摄像头分别在左右两个位置进行拍摄来得到双目图像，因此可近似认为双摄像头之间不存在内部参数差异；此外，我们使用的智能手机摄像头具备防畸变功能，因此无需修正图像畸变，从而无需得到摄像头的畸变参数；最后，我们在平整的表面上绘制了参考线，以确保左右两次拍摄过程中，两次成像平面基本处于同一平面。综上，相较于标准的双目标定流程，我们的流程将被简化为仅获取摄像头的焦距即可。焦距是重要的相机内部参数，将被用于计算空间中的目标点到摄像头平面之间的公制距离（以下简称“深度”）。

双目位移检测系统使用单标记靶标，如图 3.1 所示。

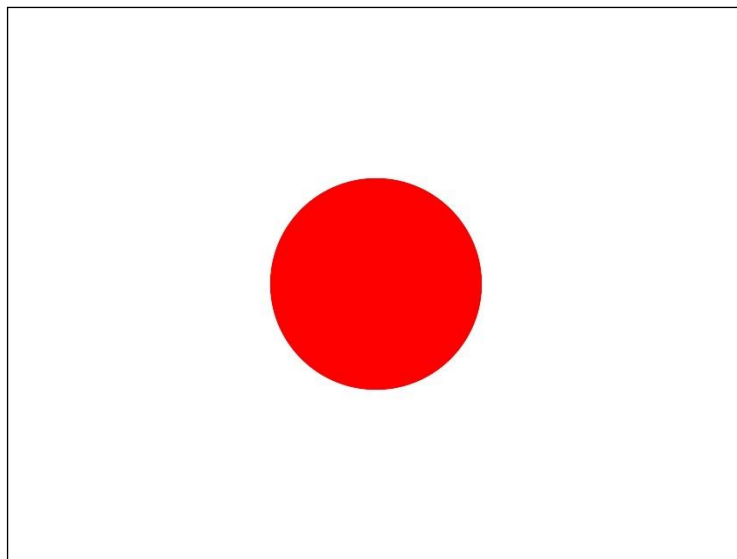


图 3.1 双目位移检测系统的单标记靶标

双目位移检测系统的程序流程图如图 3.2a 和 3.2b 所示，具体执行顺序为：1) 获得相机焦距（以像素为单位）；2) 获得位移起点位置左、右图像中标记中心的像素坐标；3) 计算标记中心在起点位置的深度（ z 轴坐标）；4) 计算标记中心在起点位置的公制 x 轴坐标和 y 轴坐标，从而得到标记中心在起点处的三维公制坐标；5) 对标记中心在位移终点的图像执行相同的流程，获得标记中心在终点处的三维公制坐标；6) 计算标记中心的空间公制位移。

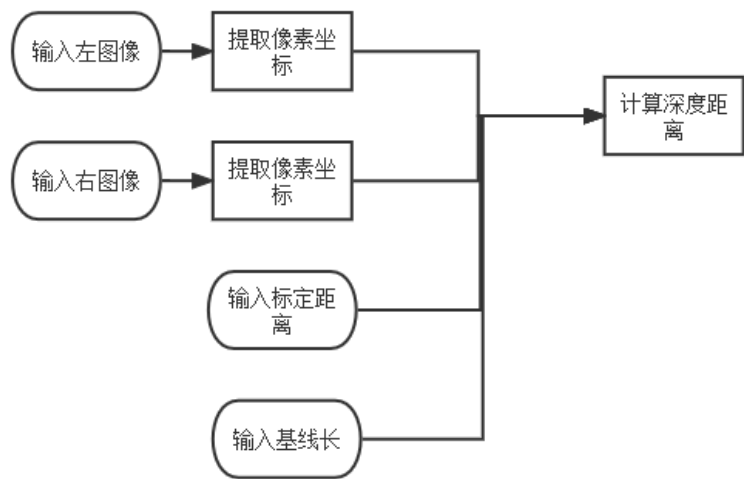


图 3.2a 标定相机焦距程序流程图

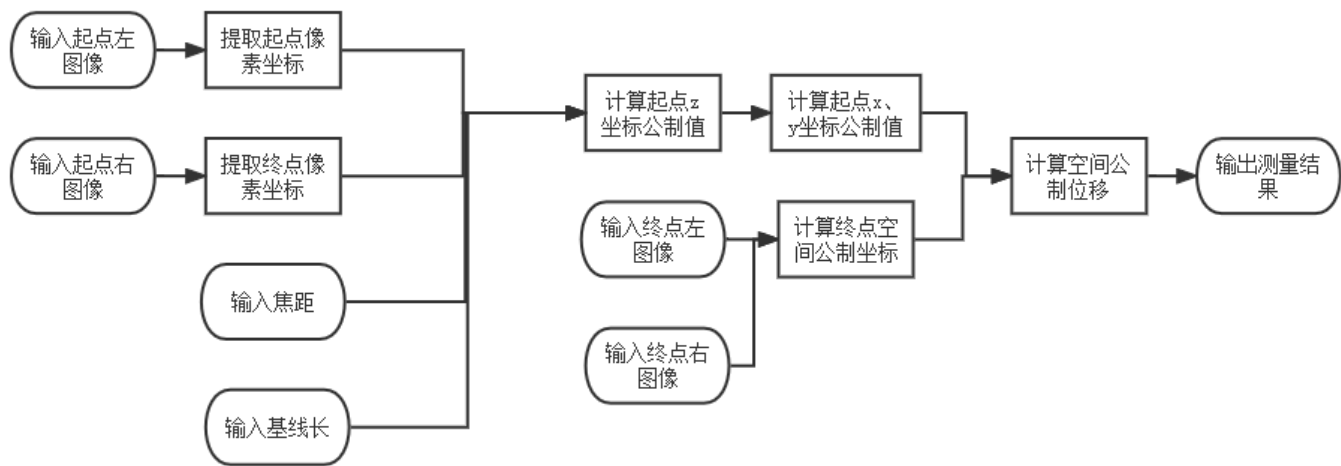


图 3.2b 双目位移检测系统测量空间公制位移程序流程图

如图 3.2a 和 3.2b，相机焦距标定和空间公制位移计算将分为两个程序。3.2a 中的“标定距离”指的是为了得到相机焦距而先使用一组标定图像，在拍摄标定图像时，靶标标记中心的深度是设定好的，即为已知量，以毫米为单位；“基线长”是指摄像头在左右两个位置的间距，以毫米为单位。3.2b 中，由于位移终点处双目图像的处理流程与起点处的一致，因此从输入图像到解得终点处标记中心的空间公制坐标之间的步骤已被省略。

3.2 实现细节

实现细节部分将按照流程顺序，对 3.1 节流程中几个重点环节的实现方法进行详细描述，包括相机焦距标定和求空间公制坐标。

3.2.1 相机焦距标定

相机焦距标定和双目测距均基于视差测距原理。视差测距的原理图如图 3.3 所示：

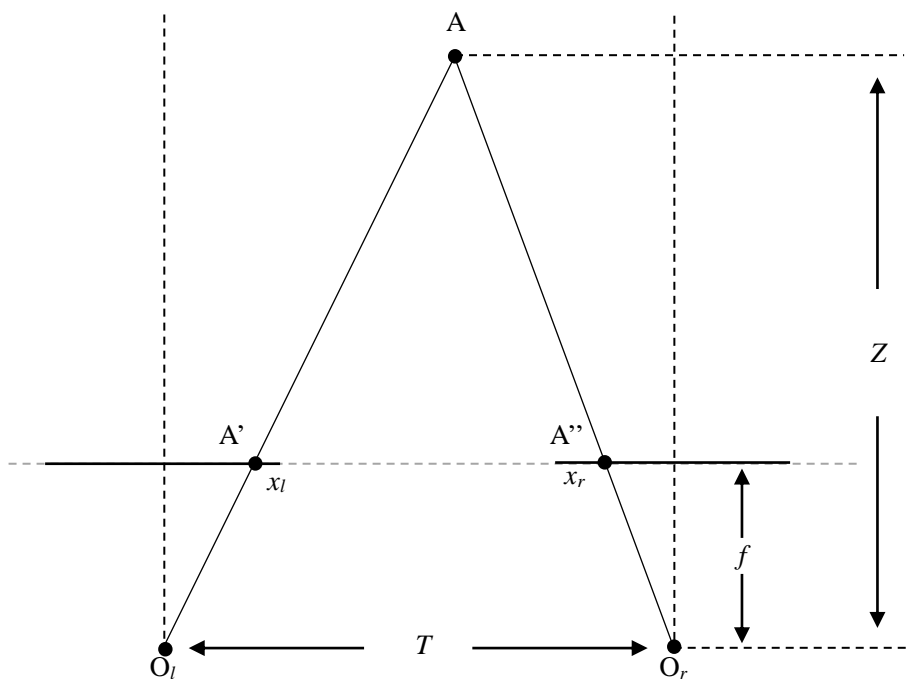


图 3.3 视差测距原理示意图

图 3.3 中，A 点表示空间中的任意一点、 O_l 和 O_r 分别表示左摄像头和右摄像头（针孔相机模型）、 A' 和 A'' 分别表示 A 点在左视图和右视图中的像。变量方面， Z 表示 A 的深度、 f 表示焦距、 T 表示基线长、 x_l 和 x_r 分别表示 A' 和 A'' 在左视图和右视图中的像素坐标 x 分量。在对相机焦距进行标定的环节，标记中心的深度 Z 已知，基线长 T 已知且保持不变，因此主要任务是从左右视图中分别提取出 x_l 和 x_r ，并利用所得到的已知量计算出相机焦距 f 。

x_l 和 x_r 的差值被称之为视差，用 d 表示，表达式如式 3.1：

$$d = x_l - x_r \quad (3.1)$$

由于 x_l 和 x_r 是以像素为单位的坐标值，因此视差 d 的单位是像素。根据相似三角形原理可知：

$$Z = \frac{f \cdot T}{(x_l - x_r)} = \frac{f \cdot T}{d} \quad (3.2)$$

对式 3.2 变形可得：

$$f = \frac{Z \cdot d}{T} \quad (3.3)$$

由式 3.3 可以看出，由于基线 T 和深度 Z 均为公制距离，因此计算得到的焦距 f 是以像素

为单位的。

我们在双目位移检测系统中继承了单目视觉方案的标记识别与像素坐标提取算法，以此获得左右视图中标记中心的 x_l 和 x_r 。

将计算得到的 x_l 和 x_r 代入式 3.3 中，可以得到：

$$f = \frac{Z(x_l - x_r)}{T} \quad (3.4)$$

通过将所有已知的变量代入式 3.4，即可得到摄像头的焦距，该值是一个常量。

3.2.2 求解空间公制坐标与公制位移

标记中心的空间公制 x 和 y 坐标值可同样基于相似三角形原理求解，可由式 3.5 和 3.6 得到：

$$x = \frac{Z \cdot x_l}{f} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{Z \cdot y_l}{f} \quad (3.6)$$

深度 Z 可以由式 3.2 计算得到。自此便得到了标记中心的空间公制坐标.将 x 和 y 表达式中的 Z 替换为式 3.2，标记中心的空间公制坐标可以写作：

$$(x, y, z) = \left(\frac{T \cdot x_l}{x_l - x_r}, \frac{T \cdot y_l}{x_l - x_r}, \frac{f \cdot T}{x_l - x_r} \right) \quad (3.7)$$

对位移起终点的空间公制坐标使用距离公式就可以得到标记中心的静态空间位移。

3.3 实验及结论

我们一共设计了两个实验项目。第一个实验项目主要考察本双目系统测量标记中心深度方向位移分量的精确度，而第二个实验项目将测试本系统的静态空间位移测量精度。本节的最后，将对两项实验的结果以及该系统进行总结。

为了进一步提高程序执行效率，所有相机焦距标定以及静态空间位移测量环节都预先将左视图及右视图以相同方法压缩至 **1280 × 960** 分辨率。此分辨率下，通过焦距标定程序计算得到的摄像头焦距为 928.3 个像素。

我们使用如下参数进行相机焦距标定：

表 3.4 相机焦距标定时相关实验参数

基线长度 (mm)	标定距离/标定深度 (mm)
50mm	250mm

图 3.5a 和 3.5b 展示了焦距标定时拍摄到的左右视图。

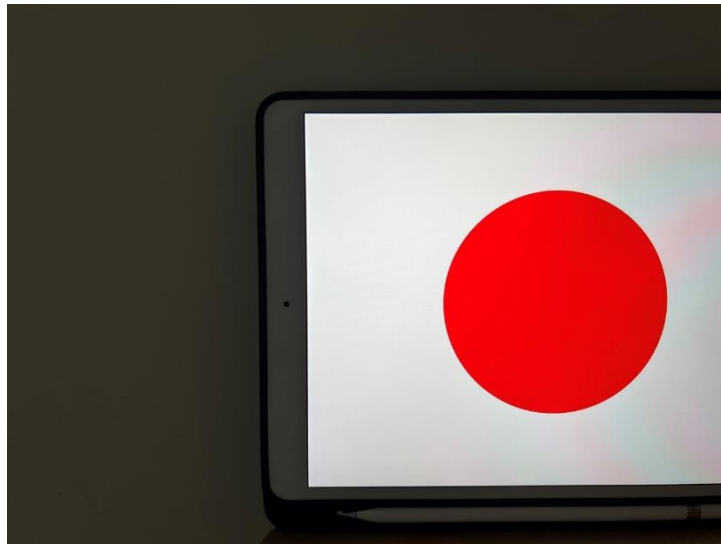


图 3.5a 相机焦距标定时拍摄到的左视图

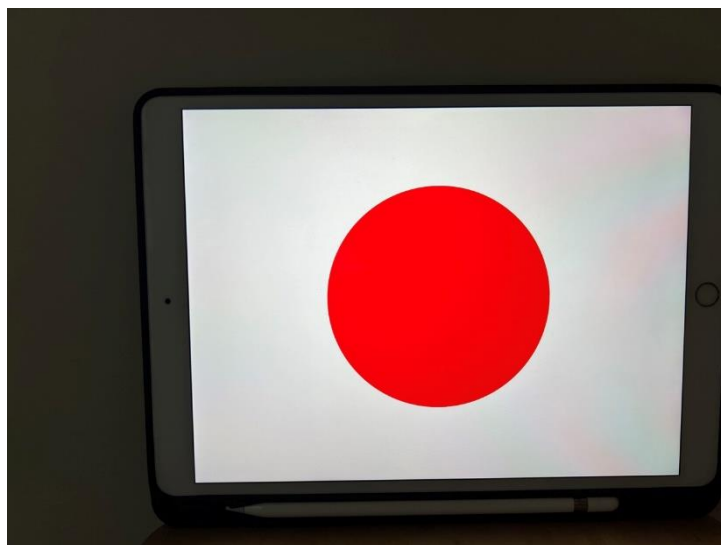


图 3.5b 相机焦距标定时拍摄到的右视图

3.3.1 标记中心深度方向位移分量的测量精度

我们设计了静态空间位移实验以得到本系统测量待测点深度方向位移分量的精度。测试将被分为三组，三组测试的深度方向参考位移分量分别为 3cm、5cm 和 7cm。每组测试中，靶标的位移起点一致，且为了方便起见，靶标仅沿深度方向移动，因此可以近似认为，靶标的总位移量等于深度方向的位移分量，亦即 x 方向的位移分量和 y 方向的位移分量近似为零。事实上，由于手机支架的构造使得其更易于对齐位移参考线，因此实际在实验过程中，靶标

将保持静止，而搭载手机的手机支架基于位移参考线在深度方向移动，这样同样可以得到我们想要的数据。

本实验的实验结果如表 3.6 所示：

表 3.6 标记中心深度方向位移分量的测量结果

参考位移 (mm)	测量结果 (mm)	误差 (%)
30	29.3	-2.3%
50	46.0	-8.0%
70	62.3	-11.0%

测量结果误差（绝对值%）关于参考位移（mm）的数据折线图如图 3.7 所示：

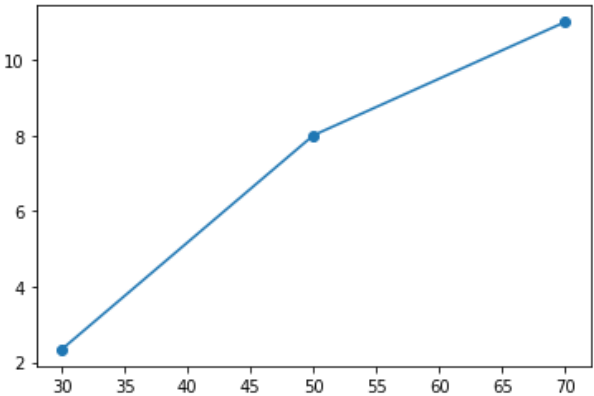


图 3.7 横轴表示参考位移（mm），纵轴表示测量误差的绝对值（%）

从实验结果可以看到，随着位移距离逐渐增大，测量结果与参考值之间的误差也逐渐变大。根据[23]，当深度一定时，较大的基线长度 T 和相机焦距 f 能得到更小的深度测量误差^[23]。本实验受到实验环境限制，基线长度 T 被固定为 50mm，并且在对图像进行了尺寸压缩后，由于 $x_l - x_r$ 变小，因此根据式 3.4，求得的焦距 f 变小。综合以上两个限制因素，可能导致本系统在 50mm 及 70mm 处的误差较大。

3.3.2 静态空间位移测量精度

本实验原则上是实验 3.3.1 的补充，标记中心在空间中存在 x 分量和 y 分量的位移距离，总的参考位移量为 57mm，仍然是在靶标保持静止的状态下移动手机支架来实现相对位移。

实验中，靶标在位移起终点的左右视图如图 3.8a 至 3.8d 所示：

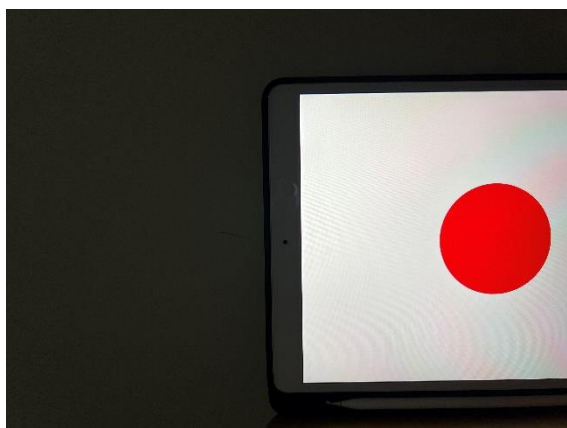


图 3.8a 起点左视图

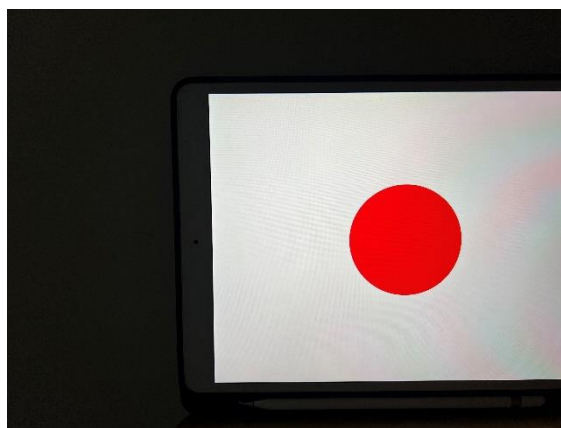


图 3.8b 起点右视图

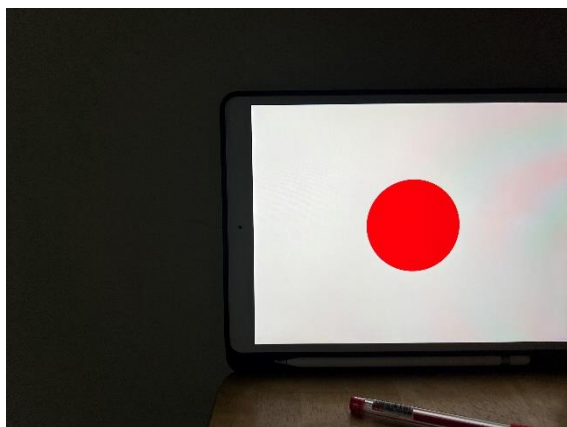


图 3.8c 终点左视图

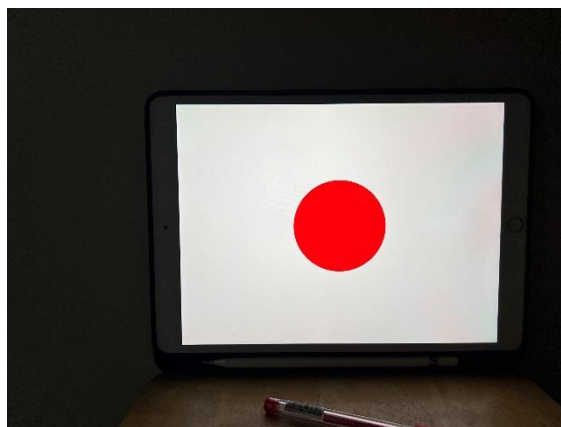


图 3.8d 终点右视图

标记中心在位移起终点处的公制坐标由程序计算得出，如表 3.9 所示：

表 3.9 标记中心在位移起终点处的公制坐标

点位名称	x 分量 (mm)	y 分量 (mm)	z 分量 (mm)
起点处	268.6	126.3	224.2
终点处	273.7	146.1	274.7

经程序测量得到的空间公制位移距离为 54mm，百分比误差为-5.6%。

3.3.3 总结

通过上述实验结果可以看出：

- 1) 在本实验条件下，双目位移测量系统对深度位移分量的测量在 50mm 以下具有良好的精度，但对于超过 50mm 的深度方向位移，本系统的精确度不高。在实验 3.3.1 中，我们总结了可能导致误差的因素，包括基线长度和像素焦距。如果后续有机会进行实验室规模的测试，我们会扩大基线长度，并使用原始分辨率的图像进行焦距标定。可以通过在不同基线长度和视图分辨率情况下进行多次实验，从而验证基线长度和像素

焦距对深度位移分量的测量结果误差的影响。

- 2) 在本实验条件下，双目位移检测系统对于一般空间公制位移距离的测量结果较好，但由于我们没有时间和条件进行更多位移测试，因此无法确定较好的测量结果与参考值匹配度是否能够出现在更大的位移范围和更复杂的位移场景中。后续，我们将设计更完善的实验，以测试该系统分别在 x 分量、 y 分量和 z 分量上的位移检测精度。我们将设计多组实验分别得到三个位移分量的检测精度，并结合 1) 中的误差分析方法综合探讨。

针对本方案，我们也提供了一个改进思路。与 2.3.3 中对单目位移检测系统的改进方案类似，可以将原有的标记识别与中心坐标提取方案替换为直接对矩形靶标的四个角点进行识别和提取，从而可直接提取出待测点位的坐标进行公制转换，以此减少间接计算待测点位期间易产生的提取偏差。此外，对四个角点均进行空间位移检测可以获得靶标所处物件更详尽的动作信息，如靶标的翻转角度等，在动态应用场景下，如振动检测，还可以对四个点分别提取振动参数，获得靶标附着区域的模态等。

由于在本方案进展到后期时，本人因疫情原因被转移至集中隔离点隔离，因此无法对本方案进行更详尽的研究，且实验计划被迫中断，敬请谅解！

4 方案总结、对比与展望

第 2 章和第 3 章分别对两种方案的实现细节和实验结果进行了论述。我们分别提出了两种基于计算机视觉的位移检测系统，第一种是基于单目视觉的位移检测系统，第二种是基于双目视觉的位移检测系统。单目位移检测系统基于 L 方法，通过计算面到面的单应映射关系来实现像素坐标到公制坐标的转换^[1]。第 2 章的方案一基于 L 方法进行了改进，包括实现了自动识别靶标上的标记点并提取中心坐标、使用十六点法而非八点法^[1]以求解得到更精确的单应映射关系。通过实验，我们验证了已知映射点对越多、单应性求解结果越精确的结论，同时对位移测量误差进行了分析，提出成像平面与靶标位移平面间的夹角会对误差造成影响的观点，进一步提出在夹角较大的情况下，间接的像素坐标提取方式是造成单应性求解不准确以致测量结果产生误差的主要原因。基于此，我们针对方案一提供了一种改进思路（详见 2.3.3），将间接的像素坐标提取方式替换为直接识别到像素坐标并进行提取，从而降低间接计算而产生的误差。第 3 章的双目位移检测系统继承了单目系统自动识别和提取标记中心像素坐标的算法，使用视差测距原理直接计算标记中心的空间公制坐标，以此来计算静态位移。通过实验，我们的双目位移检测系统对于深度方向位移量小于 50mm 的检测场景具有高精确度，并基于相关参考资料^[23]，在 3.3.3 中提出了改进的实验方案。我们针对方案二也提供了一种改进思路（详解 3.3.3），能够改善间接计算像素坐标带来的误差，并能通过同时检测四个角点以提取得到更复杂的运动信息。

在静态场景下，我们认为双目位移检测系统具备绝对优势。参考第 2 章方案一，对于单目视觉系统来说每次静态位移检测只能求解得到一个单应映射关系，这就意味着在位移起点和位移终点，靶标应当处于同一平面，即靶标平面。这使得在静态检测场景下，靶标的位移空间限制较大，几乎无法应用于普通的行业应用场景。2.3.3 中已对方案一在静态检测场景下存在的主要限制和问题进行了讨论，因此不再赘述。双目位移检测系统对于靶标的位移空间几乎没有限制，并且不需要依赖任何平面到平面的映射关系，因此可以直接对空间中的单点测量位移，这使得双目位移检测系统的能够适应绝大多数的静态检测需求。此外，基于 3.3.3 中提及的双目位移检测改进方案，双目位移检测系统在同时检测靶标上的多个标记点的位移后，可以获得更详尽的靶标运动数据，且不再限于检测空间平移，而是可以应对如靶标翻转、弯曲等复杂的姿态和形态变化。因此，一个完善的双目位移检测系统在静态检测场景下具有单目系统无法比拟的优势。

在动态场景下，双目位移检测系统的检测机制不变，单目位移检测系统则能够对靶标有限的空间位移进行检测。对于动态场景下的单目位移检测系统，所谓“有限的”的空间位移

是指，若以垂直于靶标平面的轴为 z 轴，则在动态检测期间，靶标应不存在 z 轴方向的位移。这仍将靶标的运动约束在其所处平面内，但与静态场景不同的是，该平面是可以实时变化的。参考 2.1 中所述，动态的单目位移检测系统对每一帧计算平面单应性，因此对于上述定义的有限空间位移而言，轨迹由若干段直线段构成。动态位移轨迹的精度一般与采样率相关。无论是单目还是双目位移检测系统，理想状态下，画面采样率越高，轨迹分段越精细，位移轨迹的拟合度就越高。在实际应用中，由于很多摄像头记录高帧率视频所使用的码率相较于低帧率视频的码率低，因此高帧率视频每一帧画面的清晰度一般不及同分辨率下的低帧率视频。为了获得高精度的动态位移信息，如果条件允许，应以尽可能高的码率、帧率以及清晰度来记录动态位移，即使这样可能需要消耗更多的计算资源或时间。对比单目和双目位移检测系统，我们认为双目系统在动态场景下，尤其是行业应用场景中，仍然较单目系统更具优势，主要还是源于双目系统在动态场景下依然能够发挥出更高自由度的空间位移检测优势，使其能够适应于更广泛的应用领域。单目位移检测系统的优势在于更低的成本和更小的规模需求。实验 3.3.1 中提到，对于双目位移检测系统，较大的基线长度能够获得较理想的测量精度，这使得双目系统可能需要占用较大的平台搭建空间。然而，随着双目摄像头集成度越来越高、双目测距算法愈趋成熟，单目系统的成本和规模优势将被逐渐削弱。目前，单目位移检测技术被应用于平面微位移检测^[36]，这是因为在此类场景下一般不便于也没有必要使用双目视觉技术。

综上，我们对两种方案分别在静态和动态检测场景中的优势和劣势进行了对比，并着重对广泛需求较高的动态检测场景进行了论述。本文的观点认为，双目位移检测系统在两种场景下都具有明显的优势，尤其对静态位移检测场景而言。对单目和双目位移检测系统的对比表如表 3.10 所示：

表 3.10 两种方案的各项应用指标对比

方案	成本 (越低越好)	静态场景自由 度 (越高越好)	动态场景自由 度 (越高越好)	占用空间资源 (越低越好)	综合对比结果
单目位移检测 系统	较低	极低	低	较低	较差
双目位移检测 系统	较高，有逐渐下 降趋势	高	高	较高，有逐渐下 降趋势	较好

基于计算机视觉的位移检测技术已受到广泛应用，包括土木结构监测^{[24][34]}、皮革工业^[35]、

地震研究^[25]、辅助医学诊断^[26]等领域，且精度已经可以媲美专业的位移检测仪器，并可适用于各种尺度下的位移检测场景。我们预测，不同领域的位移检测系统都将大规模应用计算机视觉技术。此外，人工智能技术也将助推计算机视觉技术的发展。目前也已现存一些基于人工智能的计算机视觉位移检测方案^{[27][16]}，能够极大限度地降低对程序设计者在数字图像处理与分析方面的知识储备需求。OpenCV 中也提供了一些模型加载器，可允许程序设计者载入一些现有的基于人工智能技术的目标识别与检测模型。为此，我们也曾尝试了基于回归神经网络 (Regression Networks) 的 GOTURN 目标算法，是 OpenCV 中可使用的性能最好的目标追踪算法之一，但由于实际追踪精度仍旧远无法达到位移检测所要求，因此在文章中我们未作描述。计算机视觉技术在精密测量领域还有很大的发展空间，包括测量精度、执行效率、多场景适应性等，相关市场也正处于蓬勃发展期。我们相信，在短短的几年内，更新的技术手段势必将替代旧的方法，也能够为计算机视觉技术打开越来越多的应用场景。我们希望，不仅限于位移检测，计算机视觉技术能够发挥其优势，成为科技发展道路上的重要工具、行业应用领域的重要生产力，并将最终造福于人类社会的方方面面。

致 谢

本文及相关内容（程序、实验等）在南京理工大学电子工程与光电技术学院房红兵老师的指导下完成。房红兵老师严谨的学术作风、渊博的专业知识以及诲人不倦的高尚师德对我产生了极为深远的影响。从毕业设计开题起至完成论文，房红兵老师有问必答，对研究方向以及疑难点予以悉心的指导，不仅将我引导至一个我所热爱的学术方向，还让我树立了远大的学术目标。不仅如此，房红兵老师在疫情严重期间时常予以关怀，并及时告知我特殊时期的研究计划。在此，谨向房红兵老师致以最诚挚的谢意和最衷心的感谢！

此外，感谢南京理工大学为我提供了如此宝贵的科研机会，并慷慨提供了本项目的研究经费。

最后，感谢父母对我的培养，并能够在疫情期间支持我完成本项目。

参 考 文 献

- [1] Lee J, Cho S, Sim S. Monocular vision-based displacement measurement system robust to angle and distance using homography[C]//6th international conference on advances experimental structural engineering. 2015.
- [2] Xu Y, Brownjohn J M W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(1): 91-110.
- [3] Yu J, Wang W, Lu K, et al. A planar capacitive sensor for 2D long-range displacement measurement[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE C, 2013, 14(4): 252-257.
- [4] Liu Z, He Q, Chen S, et al. Time-Varying Motion Filtering for Vision-Based Nonstationary Vibration Measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(6): 3907-3916.
- [5] Hong L Y, Lee J W, Jun J H, et al. Angular Displacement Measurement using Optical Fiber[C]//World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007: 799-801.
- [6] Perrone G, Vallan A. A Displacement Measurement System Based on Polymer Optical Fibers[C]//2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE, 2008: 647-651.
- [7] Ghaffar A, Ali S, Zhang H X, et al. Optical Fiber Based Dynamic Displacement Measurement Sensor Using Polymer optical Fiber[C]//2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). IEEE, 2019: 1-4.
- [8] Cakar O, Sanliturk K Y. Elimination of transducer mass loading effects from frequency response functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(1): 87-104.
- [9] Li M, Liu M. Micro-system for shock and vibration measurement[C]//2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2009: 3-920-3-923.
- [10] Moore S I, Moheimani S O R. Displacement measurement with a self-sensing MEMS electrostatic drive[J]. Journal of microelectromechanical systems, 2014, 23(3): 511-513.

- [11] Huang S J, Yeh H J. The Three-Dimensional Displacement Measurement of Sandwich Circular Plates With a Single Fully-Potted Insert Using Electronic Speckle Pattern Interferometry[M]//Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures. Springer, Dordrecht, 2007: 615-616.
- [12] Asundi A. Moiré interferometry for out-of-plane displacement measurement around cracks[J]. International journal of fracture, 1989, 40(3): R43-R48.
- [13] Li S, Xiong Y, Ren Z, et al. Ultra-micro vibration measurement method using CW Doppler radar[C]//2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). IEEE, 2020: 235-237.
- [14] Lavatelli A, Zappa E. Modeling uncertainty for a vision system applied to vibration measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(8): 1818-1826.
- [15] 贾政权. 机器视觉技术在铁轨位移检测上的研究与应用[D].华北理工大学,2020.DOI:10.27108/d.cnki.ghelu.2020.000786.
- [16] 王爽.基于数字图像技术的桥梁结构位移检测[J].信息技术与信息化,2021(09):84-86.
- [17] Mortaş C, Demirci M F, Gürbüz S Z, et al. Measuring of displacement with image processing methods by using digital camera and laser pointer[C]//2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU). IEEE, 2016: 841-844.
- [18] Niitsu Y, Iizuka T, Furuya O. Real Time Displacement Measurement of Lattice Pattern Using High Speed Camera[C]//2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems. IEEE, 2013: 751-756.
- [19] Lee H, Rhee H, Oh J H, et al. Measurement of 3-D vibration by dynamic photogrammetry using least-square image matching for sub-pixel targeting[C]//2015 IEEE SENSORS. IEEE, 2015: 1-2.
- [20] Suzuki S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [21] 杨晨晓. 基于单应性矩阵的图像拼接方法研究[D].青海师范大学,2018.
- [22] Förstner W, Wrobel B P. Photogrammetric computer vision[M]. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [23] Walker, Stewart. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, 2nd Edition[J].

Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015.

[24] Fukuda Y, Feng M Q, Narita Y, et al. Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4725-4732.

[25] Nazemi A, Hosseini A, Binaee B, et al. A low-cost vision-based system for displacement analysis in earthquake research[C]//2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM).

[26] Zhang C, Yu J, Ishimatsu T, et al. Vision-based interface for people with serious spinal cord injury[C]//2015 IEEE SENSORS. IEEE, 2015: 1-4.

[27] Liu X, Tan Q. Subpixel in-plane displacement measurement using digital image correlation and artificial neural networks[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics. IEEE, 2010: 1-4.

[28] 李春明,耿永鹏,远松灵,李鹏.基于双目视觉的目标测距研究[J].内蒙古科技与经济,2021(21):88-90.

[29] 方发清,唐平,吕中广,兰春立.一种基于双目相机的校正方法及装置[P]. 广东省: CN112465913A,2021-03-09.

[30] 林永兵,马莎.一种测距方法以及测距装置[P]. 广东省: CN113091694A,2021-07-09.

[31] 张华勇,王向刚,杨永成,贾坚,周鑫鑫,郭建伟. 光纤位移检测装置[P]. 山东省: CN216206040U,2022-04-05.

[32] 许强伟,涂良成,严世涛,伍文杰.一种基于双调制法的双轴电容位移检测装置和方法[P]. 湖北省: CN111811385B,2022-03-25.

[33] 林海杰,吴敏涛,徐培钰. 基于差分信号的电感式位移检测装置[P]. 广东省: CN216115843U,2022-03-22.

[34] 巩一帆,董志学,蒋力顺,刘志强.基于图像处理的钢轨纵向位移检测系统的研究[J].计算技术与自动化,2021,40(03):111-115.DOI:10.16339/j.cnki.jsjsyzdh.202103020.

[35] 孟多,高丽,宁铎.基于计算机视觉的皮革收缩温度中位移检测的研究[J].西部皮革,2019,41(01):118-121.

[36] 冯博,徐超,邵德洋,罗时现.基于白光数字频域图像的旋转轴微位移检测方法[J].仪器仪表学报,2016,37(S1):46-52.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2016.s1.008.