基于立体视觉的图像测量技术研究

王彬凤

目 录

CONTENTS

01 选题背景与意义

02 单目立体视觉高度测量

03 单目立体视觉路面病害面积测量

04 双目立体视觉测量

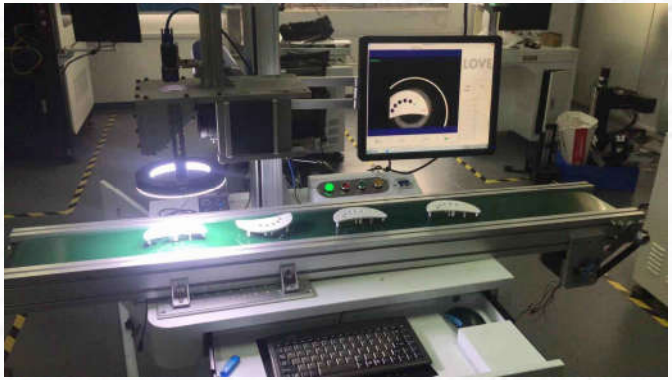
05 总结与展望

01

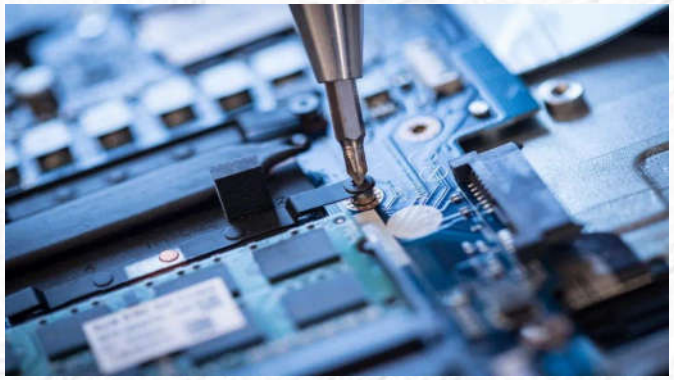
选题背景与意义

1.1研究意义

提高效率：



不方便进行接触式测量：



1.2研究现状

人为设置辐射源的测量方法。对目标物体进行主动的激光照射、结构光照射等，根据其反馈信息进行计算分析从而得到目标物体的距离、长度等参数信息。

依据一定的几何和物理定律对直接来自被测对象的可用信息进行处理进而得到目标物体的参数信息。被动式测量中基于立体视觉的图像测距技术占据现如今研究的主流地位。

1.2研究现状

- 逆透视投影变换法：现实世界中三维空间点与图像上二维成像点之间的转换关系。
- 相机内参几何标定法：标定得到相机内参后，根据相机成像的针孔成像模型以及相机与待测目标物之间的三维空间几何关系建立单目立体视觉模型。
- 数据回归建模法：使用先测距再建模的逆向思路，建立已知距离样本点与所拍摄图像上样本投影点之间的一一对应关系，从而搭建单目立体视觉模型。

1.2研究现状

交汇式双目立体视觉

使用双目相机采集图像时不限制两相机的拍摄角度；
需重复标定，且计算量大。

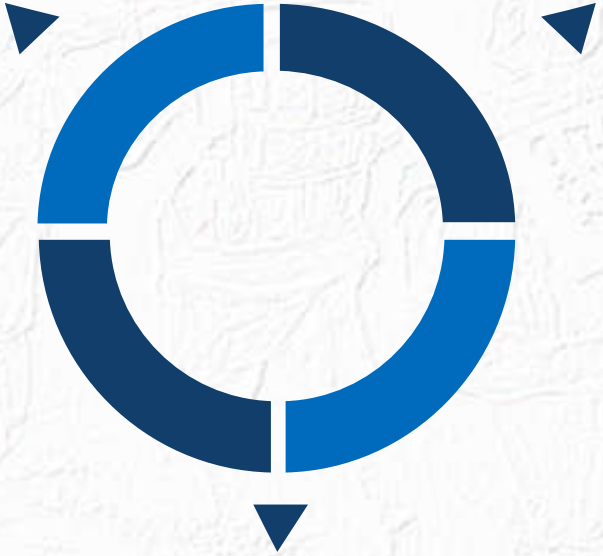
平行式双目立体视觉

采集图像时两相机光轴严格平行，且两成像平面共面；
只需标定一次，计算简便。

1.3现存问题

一、不存在普适方法

立体视觉作为一个由多个模块组成的系统，针对不同的待测目标物和不同的测量环境，可能会需要设计不同的测量方案。



二、缺乏有效的远距离测量方法

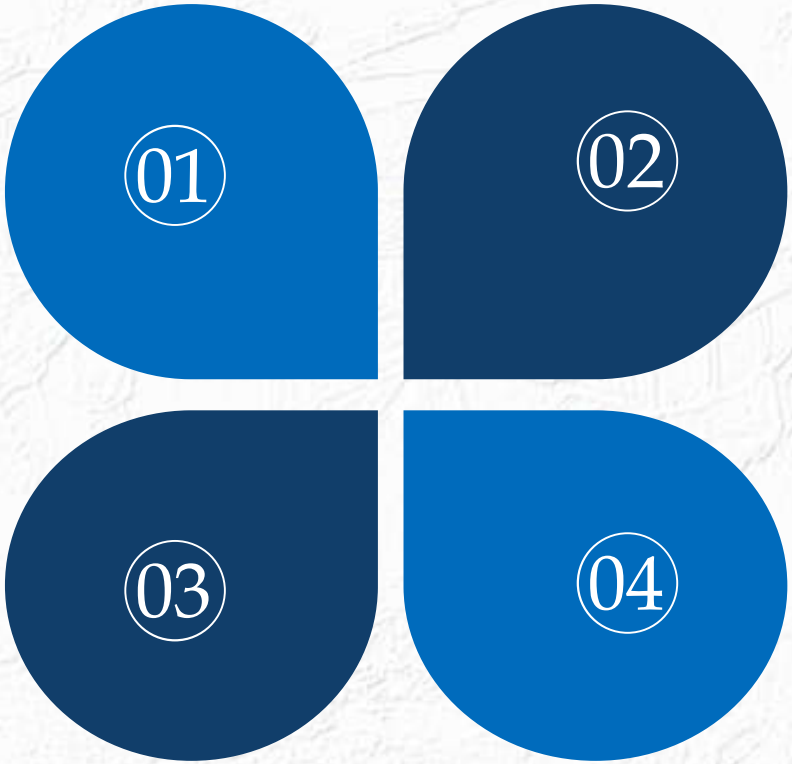
远距离测量时，由于背景复杂、目标特征点不易获取等原因，缺乏有效的立体视觉测量算法。

三、算法稳定性、实时性不高

基于立体视觉的图像测量过程一般都需要先标定再进行测量，并不能达到调整相机并实时测量的要求；影响测量效果的因素较多，算法稳定性不高。

1.4主要工作

一 设计出一种基于两条水平平行线的相机俯仰角标定法，并用于单目立体视觉图像测量技术中。



二 分别针对目标物高度和路面病害面积设计了单目立体视觉测量方法。

三 分析了平行式双目立体视觉图像测量精度的影响因素，进行改进，完成了双目立体视觉测量模型的搭建与验证。

四 针对单目立体视觉图像测量和双目立体视觉图像测量的各项指标进行分析，并进行了对比。

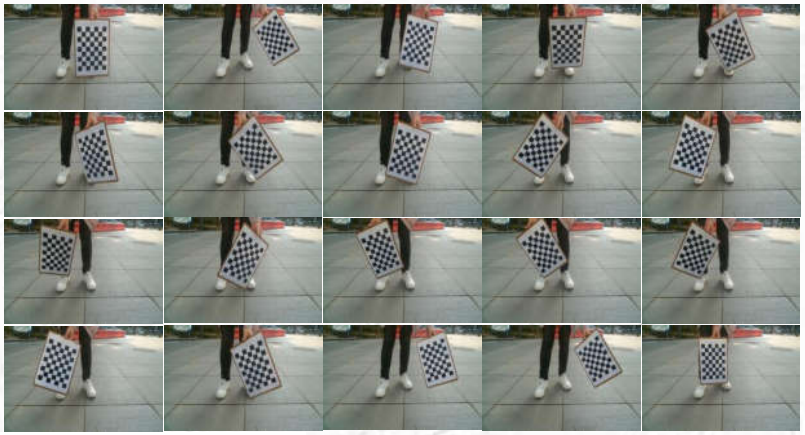
02

单目立体视觉高度测量

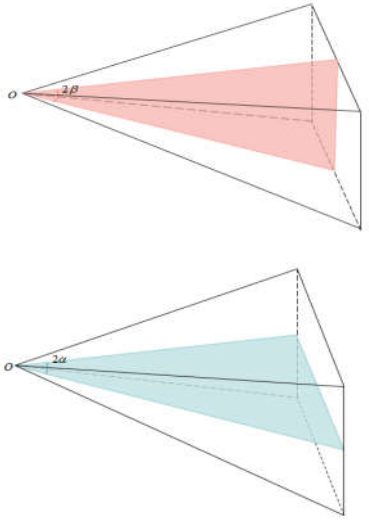
2.1单目立体视觉模型

棋盘格标定

拍摄黑白棋盘格照片，
标定获得摄像机焦距



根据焦距获得
摄像机视场角

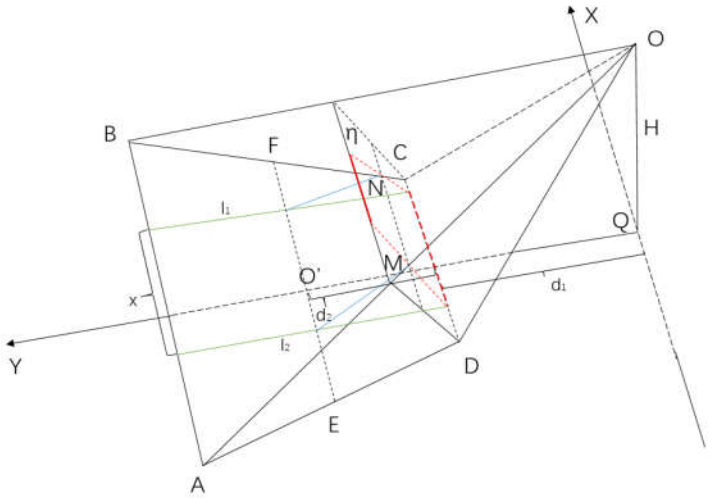


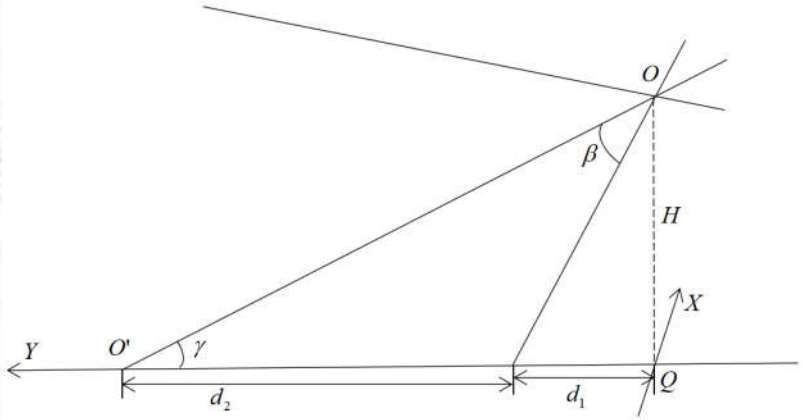
$$\tan\beta = \frac{h}{2 * f_y}$$

$$\tan\alpha = \frac{w}{2 * f_x}$$

2.1单目立体视觉模型

外参计算

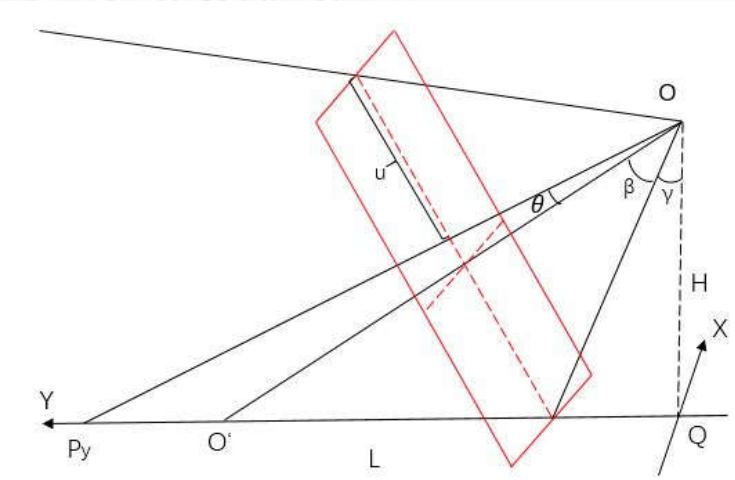




$$\cot\gamma = \sqrt{\left(\frac{w * x}{2 * MN * \tan\alpha * H}\right)^2 - 1}$$

2.1单目立体视觉模型

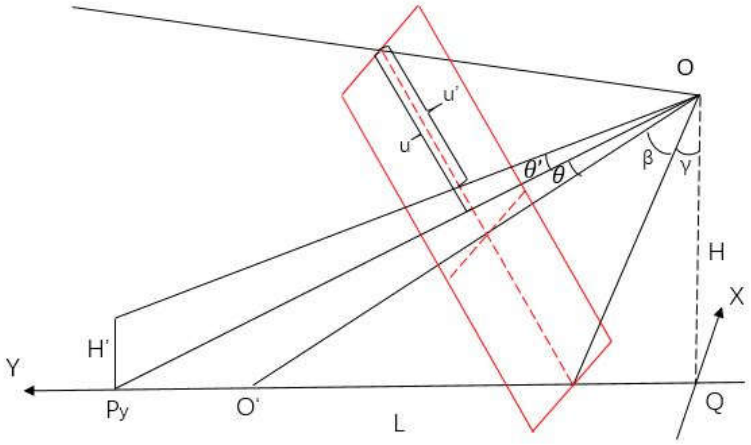
获得目标物与相机水平距离



$L = H * \tan(\beta + \alpha + \theta)$ 点P投影在图片上半平面

$L = H * \tan(\beta + \alpha - \theta)$ 点P投影在图片下半平面

获得目标物高度



$H' = H - D / \tan(\beta + \gamma + \theta')$ 目标物投影点在上半平面

$= H - D / \tan(\beta + \gamma - \theta')$ 目标物投影点在下半平面

2.2单目测距

结果分析：

图像中所拍摄地砖格真实大小为60cm*60cm，使用相邻两组测量距离之间差值与地砖格长度进行误差计算：绝对误差值最大为1.86%，平均误差为1.30%。

实验组别	1	2	3	4	5	6
距离测量结果（单位：cm）	134.247	193.997	254.825	314.214	375.328	436.438
差值（单位：cm）	/	59.750	60.828	59.389	61.114	61.11

2.2单目测距

相机高度是人为测量获得的，会在过程中引入一定的人为误差，虽然在实际操作中会因为人为测量而引入相机高度误差，但是该误差为毫米级别，假设认为测量引入的误差为±5mm，则该实验中相机高度为52.9±0.5cm，此时相机高度的绝对误差为0.95%。在保证相机高度为唯一变量的条件下，取相机高度误差最大，即相机高度为53.4cm和52.4cm重新进行以上深度信息还原实验，实验对比结果见下表：

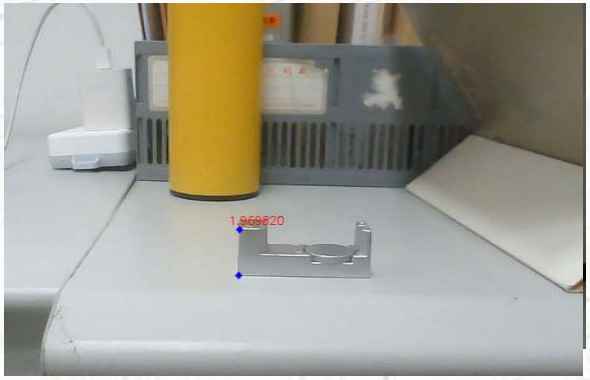
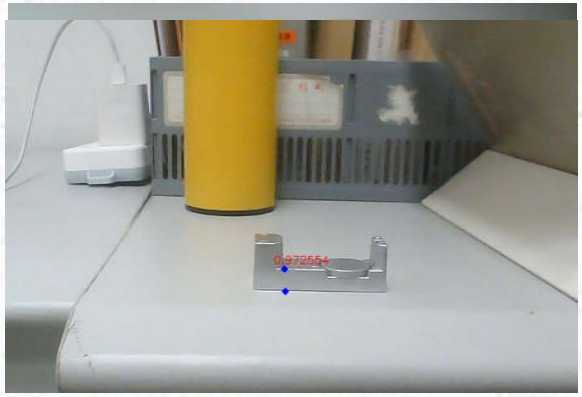
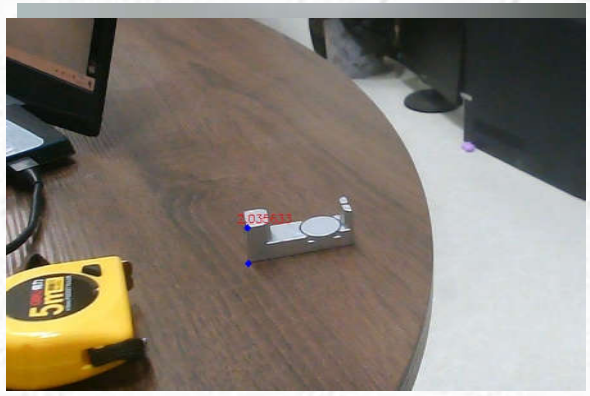
相机高度（单位：cm）		52.4	52.9	53.4
相机俯仰角（单位：°）		7.05298	7.12063	7.18829
实验组别	1	133.440	134.247	135.048
	2	193.061	193.997	194.923
	3	253.906	254.825	255.733
	4	313.461	314.214	314.955
	5	374.912	375.328	375.735
	6	437.443	437.438	437.431

结果分析：

人为测量相机高度所导致的误差会造成深度信息还原过程中的一定程度的误差，但因此而造成的误差并不大。

2.3单目测高

针对人体身高以及零件进行了垂直方向的参数测量，误差保证在2%以内。

零件放置平台高度		真实距离	测量距离	误差
		实际身高（cm）	测量值（cm）	误差值（cm）
42cm		2.00cm	2.035633cm	+0.035633cm
	1	180	178.881	-1.119
		0.93cm	0.908600cm	-0.021400cm
	2	187	186.825	-0.175
		0.63cm	0.650536cm	+0.020536cm
	3	167	165.751	-1.249
		5.80cm	5.684699cm	-0.115301cm
	4	180	178.868	-1.132
		5.80cm	5.781784cm	-0.018216cm
	5	179	179.761	+0.761
86cm		2.00cm	1.969820cm	-0.030180cm
	6	180	182.595	+2.595
		0.93cm	0.972554cm	+0.042554cm
	7	167	166.977	-0.023
		0.63cm	0.613514cm	-0.016486cm
	8	166	164.985	-0.015
		2.00cm	1.991448cm	-0.008552cm
	9	188	185.101	-2.899
		0.93cm	0.922557cm	-0.007443cm

2.3单目测高

为了验证待测人物距相机的远近是否会影响到本文搭建的单目立体视觉测量模型的测量精度，使待测人物侧对相机站立在距相机不同距离的地方，控制待测人物距相机的距离为唯一变量，对待测人物的身高进行测量。

实际高度（单位：cm）	待测人物测量深度信息（单位：m）	测量高度（单位：cm）	相对误差（单位：cm）	绝对误差	平均误差
188	11.3379	189.9680	1.9680	1.05%	0.854%
	9.09304	185.5747	2.4253	1.29%	
	7.11766	186.2265	1.7735	0.94%	
	5.95864	186.2798	1.7202	0.92%	
	3.59222	187.8770	0.1230	0.07%	

结果分析：

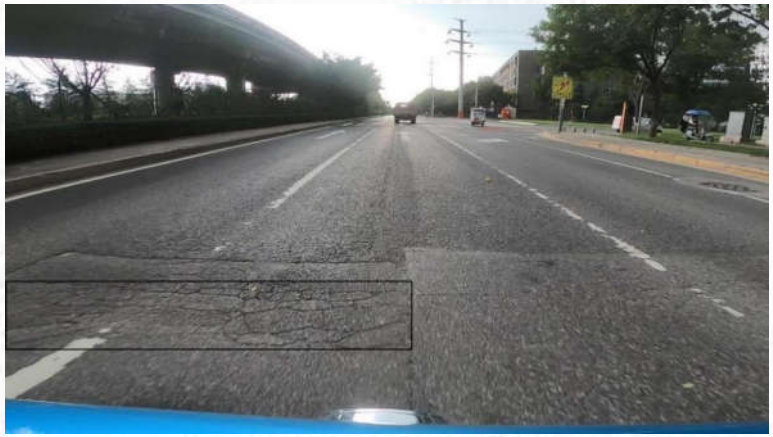
测量结果均较为可观，待测人物距相机的远近并不会在很大程度上影响到本文搭建的单目立体视觉测高模型的测量精度

03

单目立体视觉
路面病害面积测量

3.1路面病害面积测量方法

以PCI评价指标（损坏程度、损坏面积、损坏密度）来对病害进行定级，病害面积是一项重要的评价指标，本研究为了提高道路病害面积测量的精确度，假设现实当中的道路病害为矩形。

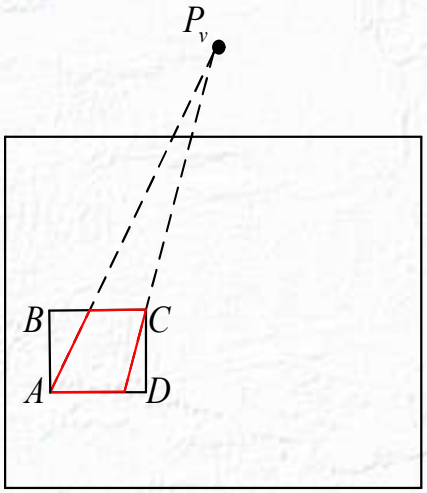


道路病害检测结果：
二维图像上道路病害的外接矩形框

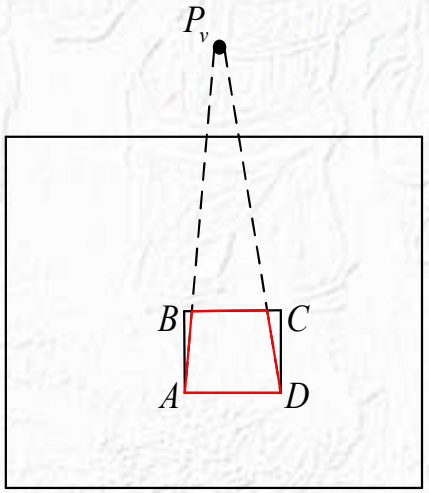
道路病害面积测量：
将二维图像上的道路病害外接框转换为实际矩形

3.1路面病害面积测量方法

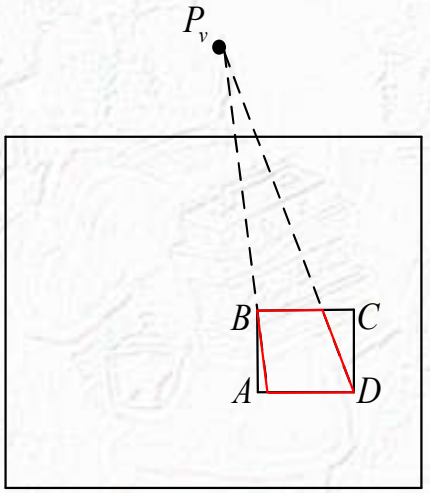
根据路面所在平面的水平消失点与检测所得到的矩形框还原现实病害矩形所对应的二维平面投影。



检测矩形框处于图像左侧

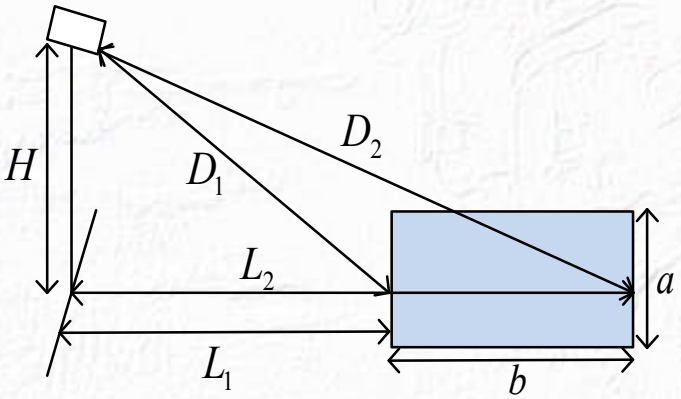


检测矩形框处于图像中间



检测矩形框处于图像右侧

3.1路面病害面积测量方法

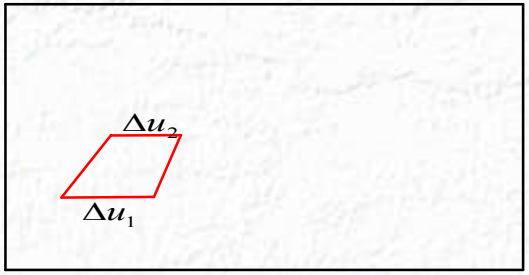


根据上节中还原待测目标深度信息的方法，可以求出L_1和L_2。

$$D_1=\sqrt{L_1^2+H^2}$$

$$D_2=\sqrt{L_2^2+H^2}$$

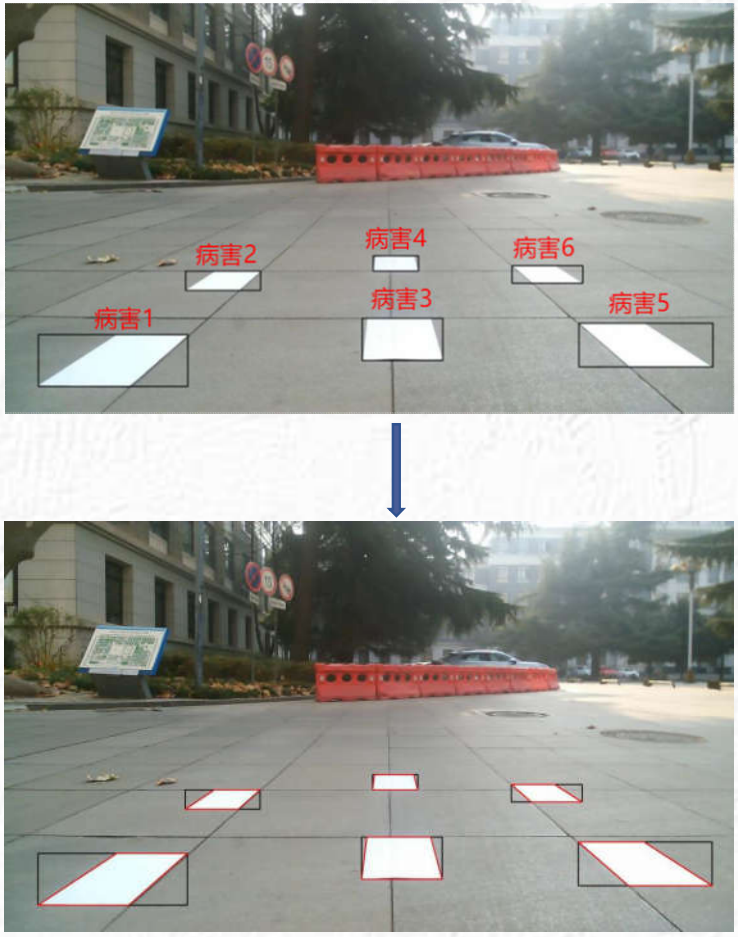
$$b=L_2-L_1$$



$$\begin{cases}\dfrac{\Delta u_1}{a}=\dfrac{f}{D_1}\\[2ex]\dfrac{\Delta u_2}{a}=\dfrac{f}{D_2}\end{cases}\rightarrow a=\frac{\Delta u_1*D_1}{f}=\frac{\Delta u_2*D_2}{f}$$

$$S=a*b$$

3.2使用A4纸进行模拟实验



模拟病害	测量长度（单位：cm）	测量宽度（单位：cm）	测量面积（单位：cm^2）	实际面积（单位：cm^2）	绝对误差（单位：cm^2）	相对误差
病害1	31.1493	20.502	638.622	623.7	14.922	2.40%
病害2	30.6799	19.6492	602.836		20.864	3.35%
病害3	30.3362	21.1757	642.390		18.69	3.00%
病害4	29.1885	20.6269	602.069		21.631	3.47%
病害5	29.1813	20.4342	596.296		27.404	4.39%
病害6	29.1519	21.2089	618.280		5.420	0.87%

3.3使用地砖格进行模拟实验

病害1

病害4

病害7

病害2

病害5

病害8

病害3

病害6

病害9

模拟病害	测量面积（单位：cm^2）	实际面积（单位：cm^2）	绝对误差（单位：cm^2）	相对误差（单位：cm^2）
病害1	3570.02	3600	29.98	0.83%
病害2	6950.92	7200	249.08	3.46%
病害3	10964.45	10800	164.45	1.52%
病害4	7299.38	7200	99.38	1.38%
病害5	14475.39	14400	75.39	0.52%
病害6	21847.35	21600	247.35	1.15%
病害7	3480.36	3600	119.64	3.32%
病害8	7157.51	7200	42.49	0.59%
病害9	10568.68	10800	231.32	2.14%

3.4路面病害面积测量实验

病害1

病害5

病害2

病害6

病害3

病害7

病害4

病害8

病害	测量面积（单位：cm^2）	实际面积（单位：cm^2）	绝对误差（单位：cm^2）	相对误差（单位：cm^2）
病害1	5843.13	70*85=5950	106.87	1.80%
病害2	326.675	11*31=341	14.325	4.20%
病害3	1886.76	33*60=1980	93.24	4.71%
病害4	1915.56	50*38=1900	15.56	0.82%
病害5	3980.89	70*59=4130	149.11	3.61%
病害6	10036.37	120*80=9600	436.37	4.55%
病害7	7925.46	127*60=7620	305.46	4.01%
病害8	12925.7	250*50=12500	425.7	3.40%

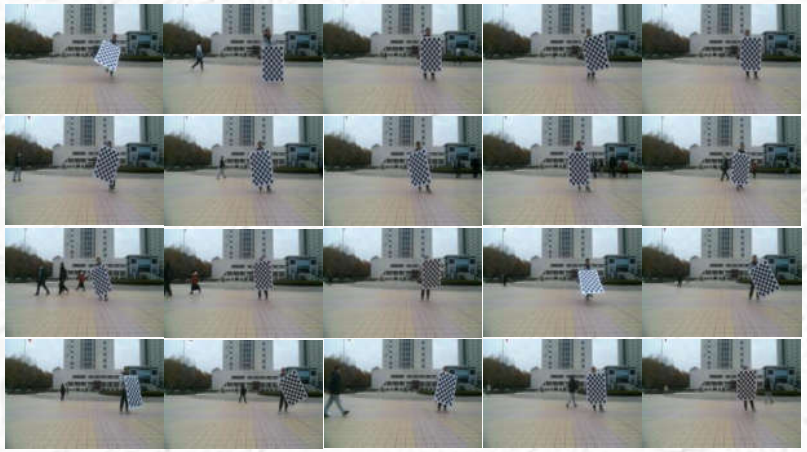
04

双目立体视觉测量

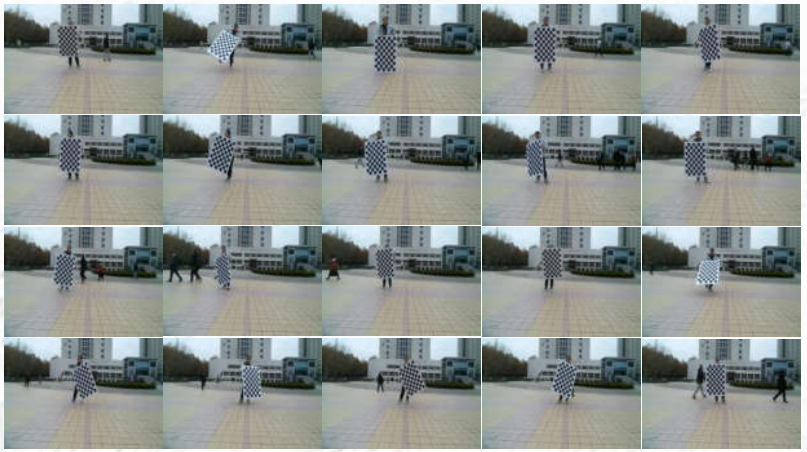
4.1双目立体视觉模型

棋盘格标定

进行双目标定，获得两相机焦距以及右侧相机相对于左侧相机的旋转矩阵和平移矩阵；



左相机采集的不同位姿标定模板图像



右相机采集的不同位姿标定模板图像

$$\begin{cases} P_l = \begin{bmatrix} R_l & T_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 1 \end{bmatrix} \\ P_r = \begin{bmatrix} R_r & T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_l = R_l P + T_l \\ P_r = R_r P + T_r \end{cases}$$

$$P_r = P_r P_l^{-1} P_l - P_r P_l^{-1} T_l + T_r$$

$$\begin{aligned} R &= R_r R_l^{-1} \\ T &= T_r - R_r R_l^{-1} T_l \end{aligned}$$

4.1双目立体视觉模型

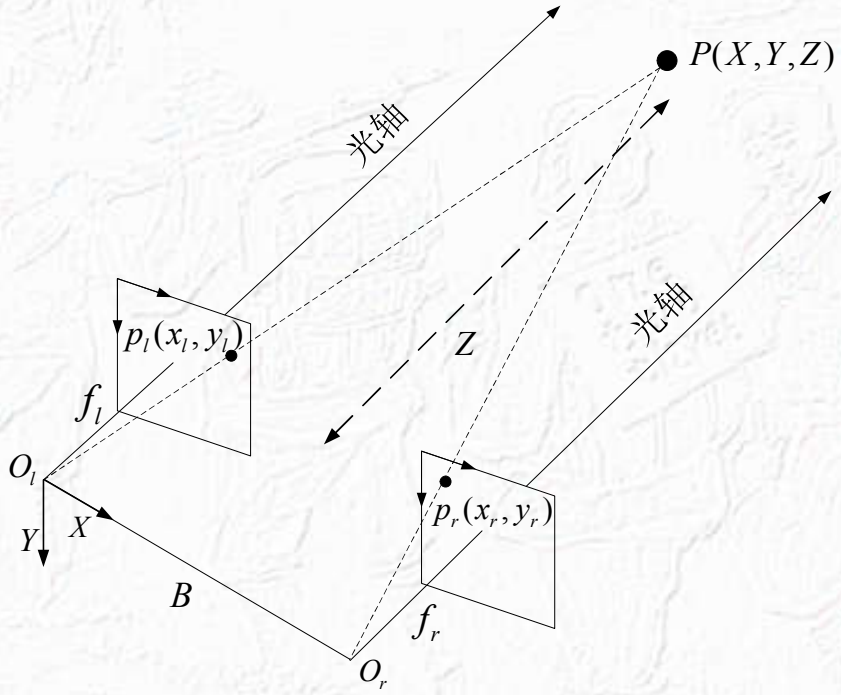
极线校正

通过极线校正算法将不满足对极约束的非理想情况转换为对极约束的理想情况；

满足对极约束的理想情况

4.1双目立体视觉模型

三维坐标恢复



$$\begin{cases} \dfrac{x_l - \frac{w}{2}}{X} = \dfrac{f}{Z} \\ \dfrac{\frac{w}{2} - x_r}{X} = \dfrac{f}{Z} \\ \dfrac{y - \frac{h}{2}}{Y} = \dfrac{f}{Z} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Z = \dfrac{B \cdot f}{x_l - x_r} \\ X = \dfrac{Z \cdot (x_l - \frac{w}{2})}{f} \\ Y = \dfrac{Z \cdot (y - \frac{h}{2})}{f} \end{cases}$$

尺寸信息获取

获取被测两点的三维坐标后计算两点三维坐标欧氏距离，即为两点间实际距离；

4.2双目测量精度的影响因素及解决方案

测量结果影响因素

- 相机基距及相机分辨率决定了最远测量距离

$$Z = \frac{B \cdot f}{D}$$

Z与D成反比关系，D最小值为1，此时Z=B*f，基距与相机分辨率直接决定了最远测量距离。

- 左右相机焦距不一致会导致一定的测量误差

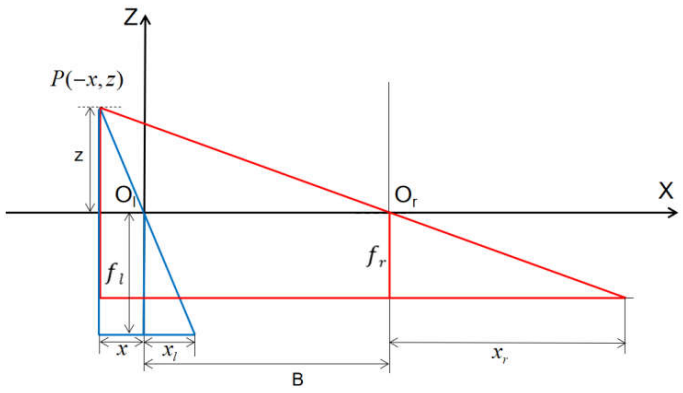
在通用的平行双目立体视觉模型中，一般选用两个参数一致的摄像机，并假设两相机焦距一致，但在实际拍摄过程中无法保证两摄像机参数的完全一致。

- 相机光轴不平行导致的测量误差

在平行双目立体视觉模型中，两摄像机光轴平行，且处于同一水平面，而在实际拍摄过程中，随着两摄像机基距的增加，保证该测量条件便变得更加困难。

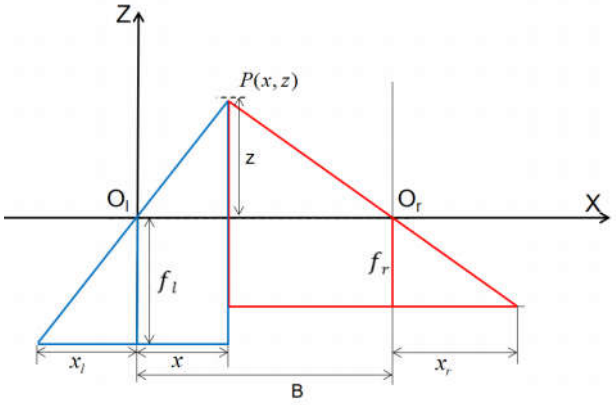
4.2双目测量精度的影响因素及解决方案——两相机焦距不一致

在测量公式中使用和两个变量代替，可以避免该种误差的产生，引入不同焦距变量后，需要考虑被测物处在不同位置的平行双目立体视觉模型区别。



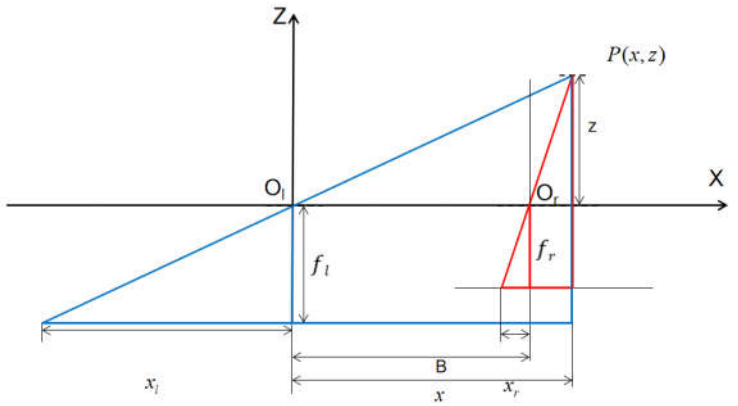
目标点在左侧：

$$\begin{cases} \dfrac{x_l}{f_l}=\dfrac{x_l+x}{f_l+z} \\ \dfrac{x_r}{f_r}=\dfrac{x_r+B+x}{f_r+z} \end{cases} \Rightarrow z=\frac{B\cdot f_r\cdot f_l}{x_r\cdot f_l-x_l\cdot f_r}$$



目标点在中间：

$$\begin{cases} \dfrac{x_l}{f_l}=\dfrac{x_l+x}{f_l+z} \\ \dfrac{x_r}{f_r}=\dfrac{x_r+B-x}{f_r+z} \end{cases} \Rightarrow z=\frac{B\cdot f_r\cdot f_l}{x_l\cdot f_r+x_r\cdot f_l}$$



目标点在右侧：

$$\begin{cases} \dfrac{x_l}{f_l}=\dfrac{x_l+x}{f_l+z} \\ \dfrac{x_r}{f_r}=\dfrac{x_r+x-B}{f_r+z} \end{cases} \Rightarrow z=\frac{B\cdot f_r\cdot f_l}{x_l\cdot f_r-x_r\cdot f_l}$$

4.2双目测量精度的影响因素及解决方案——两相机光轴不平行

1. 在不满足对极约束条件下待测点距相机的距离越远，两相机光轴在水平平面上的投影直线不平行造成的测量误差越大。
2. 在不满足对极约束条件下，两相机光轴在竖直平面上的投影直线不平行会增加竖直方向距离的测量误差。

待测两点	实际距离（单位：cm）	未校正图像测量距离（单位：cm）	校正后图像测量距离（单位：cm）	未校正图像测量结果绝对误差	校正后图像测量结果绝对误差
1，2	260.7	252.45347	317.76087	17.88%	21.88%
2，3	302.7	288.63073	369.85530	46.36%	30.62%
5，6	332.4	267.70628	334.76609	76.58%	31.02%
6，7	991.7	518.97698	1404.10270	476.96%	309.37%

4.3双目测量实验及结果——待测目标物距相机约2.5m

实验组别		左图坐标（pixels）	右图坐标（pixels）	三维坐标（cm）	测量长度（cm）	实际长度（cm）
1	点1坐标（pixels）	(536, 778)	(266, 779)	(-17.9877,75.0197,243.248)	27.4587	26.8
	点2坐标（pixels）	(900, 788)	(672, 790)	(64.5714,76.1612,244.362)		
	点3坐标（pixels）	(657, 756)	(397, 757)	(8.69231,71.9288,256.836)		
2	点2坐标（pixels）	(900, 788)	(627, 789)	(64.5714,75.7473,244.362)	19.8681	20.4
2	点3坐标（pixels）	(900, 692)	(627, 692)	(64.5714,55.8791,244.362)	39.6973	39.7
3	点4坐标（pixels）	(582, 325)	(321, 324)	(-1.29885,20.9981,255.598)	40.171	39.7
	点4坐标（pixels）	(466, 408)	(208, 409)	(-33.0678,3.72287,258.827)		
	点5坐标（pixels）	(765, 329)	(507, 327)	(38.7616,20.8043,258.57)		
3	点1坐标（pixels）	(537, 772)	(265, 770)	(-16.6176,71.8713,245.505)	34.6669	33.4
4	点1坐标（pixels）	(768, 788)	(494, 789)	(37.1168,75.4708,243.471)	33.74	33.4
	点2坐标（pixels）	(900, 693)	(627, 692)	(64.5714,55.8791,244.362)		
	点3坐标（pixels）	(657, 660)	(397, 661)	(8.69231,51.0673,256.836)		
4	点6坐标（pixels）	(481, 708)	(226, 708)	(-30.1333,-62.4824,261.872)	92.4071	91.7

4.3双目测量实验及结果——待测目标物距相机约10m

实验组别	待测点	待测点世界坐标	测量距离（单位：cm）	实际距离（单位：cm）	相对误差（单位：cm）	绝对误差
1	点1	（21.871,-203.484,1072.36）	313.709	307	6.709	2.19%
	点2	（339.703,306.336,1038.85）	297.003	307	9.997	3.25%
2	点2	（20.9259,83.5037,1808.76）	337.533	327	10.533	3.22%
	点3	（-194.476,-47.756,851.346）	322.582	327	4.418	1.35%
3	点4	（100.444,-58.8542,881.57）	318.583	324	5.417	1.67%
	点5	（-209.317,86.0952,1181.79）	334.380	324	10.380	3.20%
4	点6	（28.7882,84.0217,1388.45）	97.3561	110	2.6439	2.40%
	点7	（90.6597,151.445,981.57）				
	点3	（71.6212,-157.515,1074.8）				
4	点3	（-16.6603,-155.013,852.389）	114.327	110	4.327	3.93%

4.3双目测量实验及结果——待测目标物距相机约65m

实验组别	待测点	待测点世界坐标	实际距离（单位：m）	测量距离（单位：m）	相对误差（单位：m）	绝对误差
1	点1	（-1285.822, 1696.496, 6362.798）	23.44	23.7670	0.327	1.40%
	点2	（2220, 1670.4, 7260.12）				
1	点3	（-897.12, 1526, 6519）	19.23	19.7157	0.4857	2.53%
2	点2	（-927.12, 1526, 6519）	13.13	13.4473	0.3173	2.42%
	点4	（1714.18, 835.294, 7117.76）				
3	点5	（-996.397, 1625.526, 6528.72）	13.13	13.4290	0.2990	2.28%
2	点6	（1721.28, -556.981, 6609.17）	23.44	24.1394	0.6994	2.98%
	点4	（1444.1, 2230.38, 6460.31）				
3	点5	（-360.774, 1669.94, 6309.55）	13.13	13.5342	0.4042	3.08%
	点6	（940.356, 1760.87, 6670.85）				

4.4单双目测量方法对比

	单目测量	双目测量
硬件设备	单个相机	单个相机/两个相机
是否需要人为测量环境参数	是	否
是否对拍摄环境有所要求	是	否
进行测距时模型计算量	较小	较小
进行测高时模型计算量	较小	较小
进行空间任意尺度测量时模型计算量	较大	较小
可测量范围	取决于相机分辨率和待测目标物类型	取决于相机基距和相机分辨率
测量误差	较低	低

05

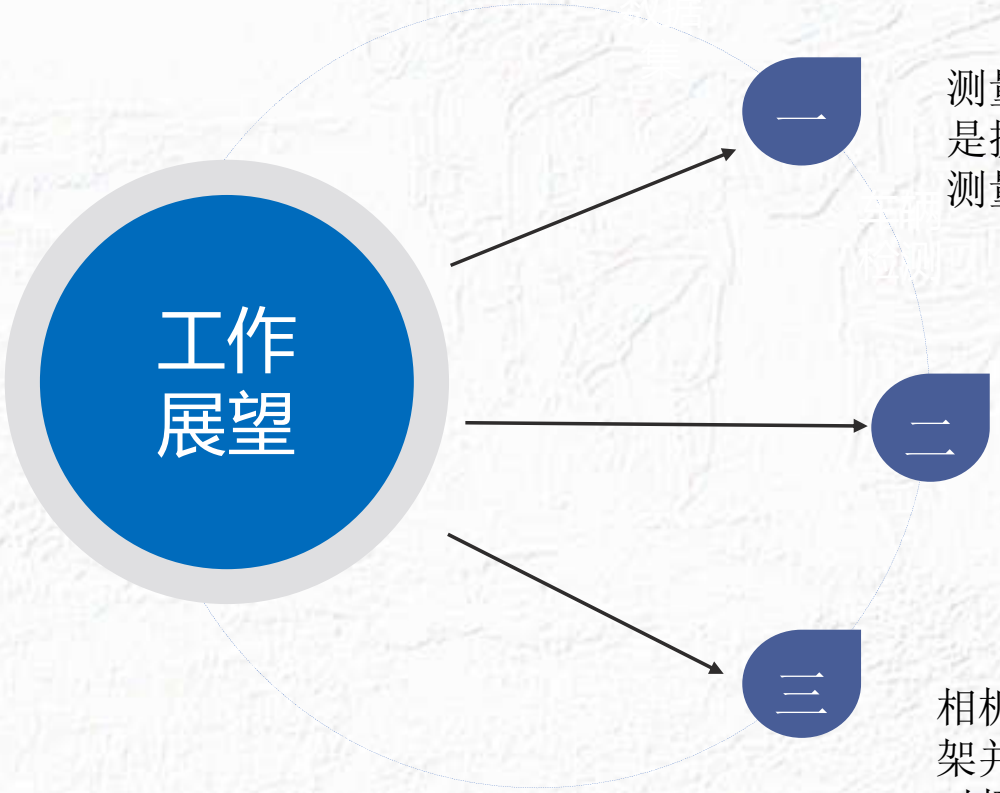
总结与展望

5.1论文总结

研究总结

- 设计出一种基于两条水平平行线的相机俯仰角标定法，并用于单目立体视觉图像测量技术中。
- 分别搭建了单目立体视觉模型实现了对目标物高度和道路病害面积的测量。
- 分析了平行式双目立体视觉图像测量精度的影响因素，进行改进，完成了双目立体视觉测量模型的搭建与验证。
- 针对单目立体视觉图像测量和双目立体视觉图像测量的各项指标进行分析，并进行了对比。

5.2工作展望



在搭建的单目立体视觉测量系统中，只能完成物高的测量，对基于单目立体视觉的水平距离测量以及空间测量只是提出了设想方案并没有具体实现，可以进一步在水平距离测量以及空间任意两点距离测量方面继续进行研究。

在实现平行式双目立体测量时，没有使用立体匹配技术。使用人为选取特征点的方式不仅降低了测量系统的自动化程度，也在测量过程中引入了人为误差。为了使系统更为实用并避免不必要的误差，需要进一步增加平行式双目测量系统的自动化程度。

虽然本文在搭建双目相机图像采集系统时采用了自制的相机架在一定程度上避免了相机光轴不平行的问题，但该相机架并不便于携带，希望在后续的研究中可以对如何使相机满足对极约束的方法进行进一步研究，并提出较为简便的方案。

5.3研究成果

专利

[1] 杜建超, 王彬凤, 于成龙, 莫可怡. 基于一组水平平行线标定相机俯仰角的方法: 中国, 202110990972.X[P].2021.08.

[2] 杜建超, 于成龙, 王彬凤, 李梦, 曹博豪. 基于矩形标定物的路面病害指标测量方法: 中国,202111285560.2[P].2021.10.

[3] 杜建超, 韩 硕, 宁阳, 王彬凤. 基于改进的Transformer网络的跌倒检测方法: 中国, 202210256088.8[P]. 2022.03.