基于双目立体视觉的图像测量技术研究

惠海芳

目录

CONTENTS

1 研究背景及意义

2 总体方案设计

3 双目测量关键技术研究

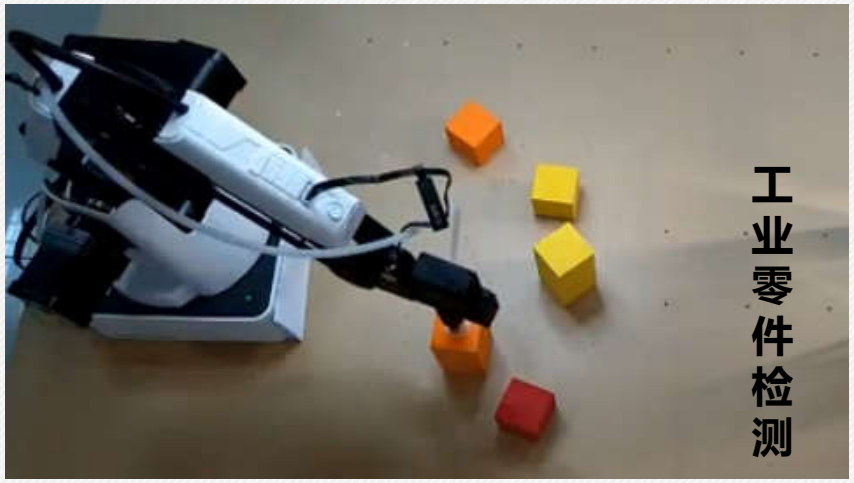
4 双目测量实验结果

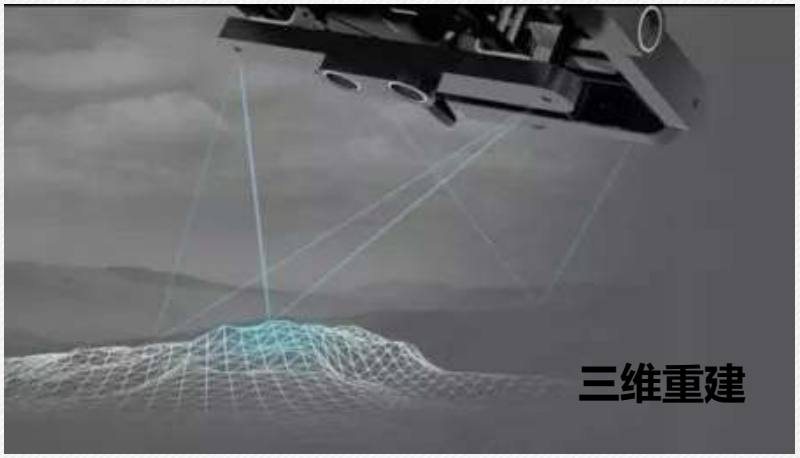
5 工作总结

第 1 部分

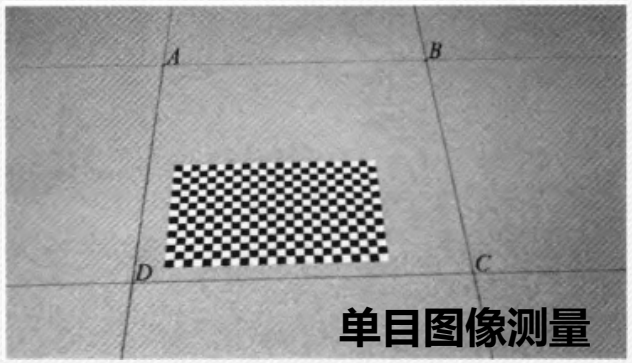
研究背景及意义

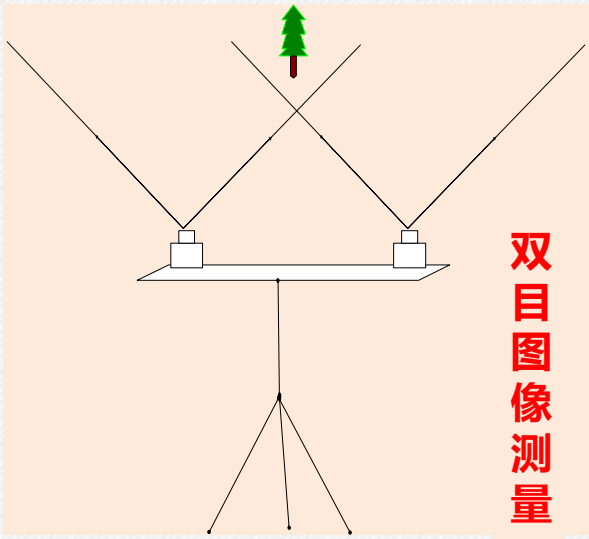
1.1 双目立体视觉技术的应用背景





1.2 物体尺寸测量的研究现状

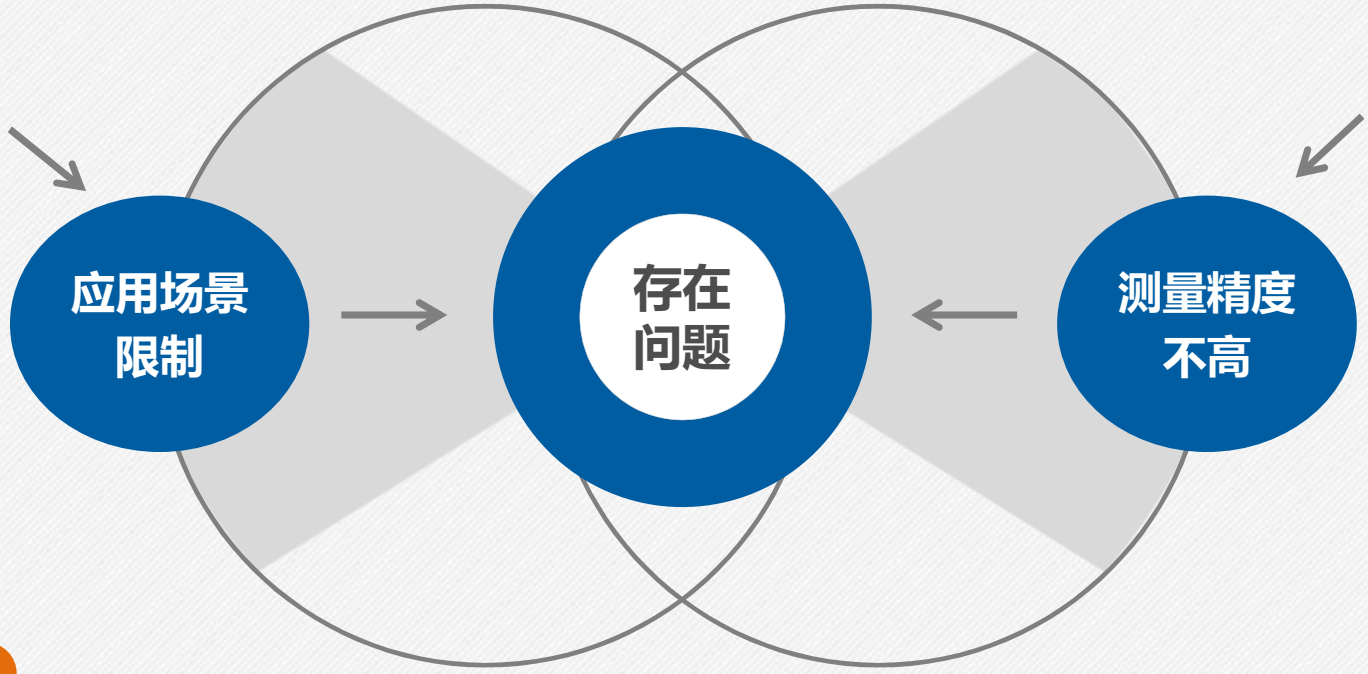




1.3 双目测量存在的问题及解决办法

市面上双目摄像机基线距较小，只适用于近距离、小尺寸的目标

摄像机标定、双目图像极线不平行、图像匹配等引入的误差



解决办法

搭建基线距可调的双目图像采集设备

解决办法

对双目测量涉及的关键技术进行研究

第 2 部分

总体方案设计

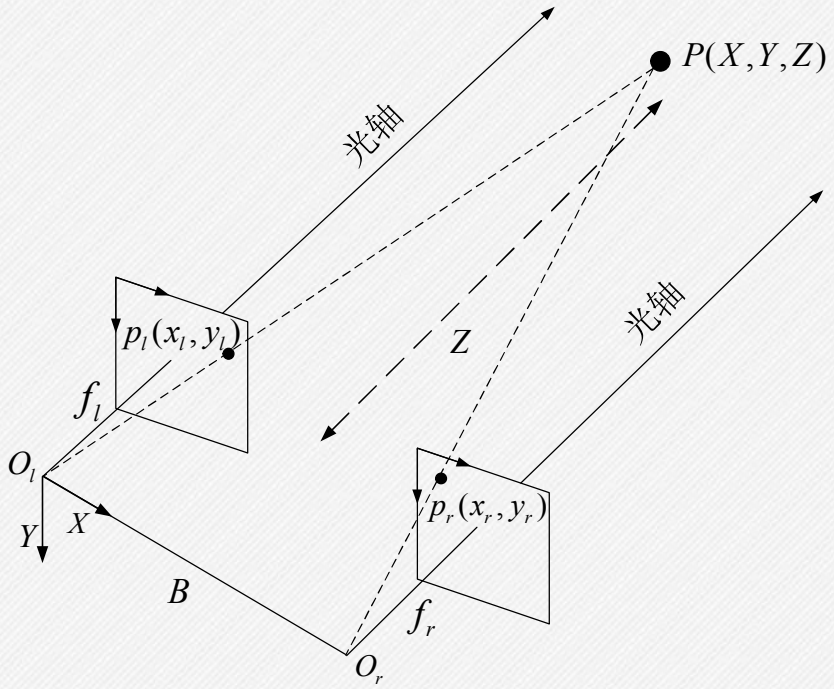
2.1 测量目标与需求分析

实现大型目标
建筑物的尺寸测量

2.2 双目图像测量算法

$$\begin{cases} x_i^l = f\dfrac{X_i}{Z_i} \\ x_i^r = f\dfrac{X_i - B}{Z_i} \\ y_i = f\dfrac{Y_i}{Z_i} \end{cases} \xrightarrow{D_i = x_i^l - x_i^r} \begin{cases} X_i = \dfrac{B \cdot x_i^l}{D_i} \\ Y_i = \dfrac{B \cdot y_i}{D_i} \\ Z_i = \dfrac{B \cdot f}{D_i} \end{cases}$$

$$L_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$$

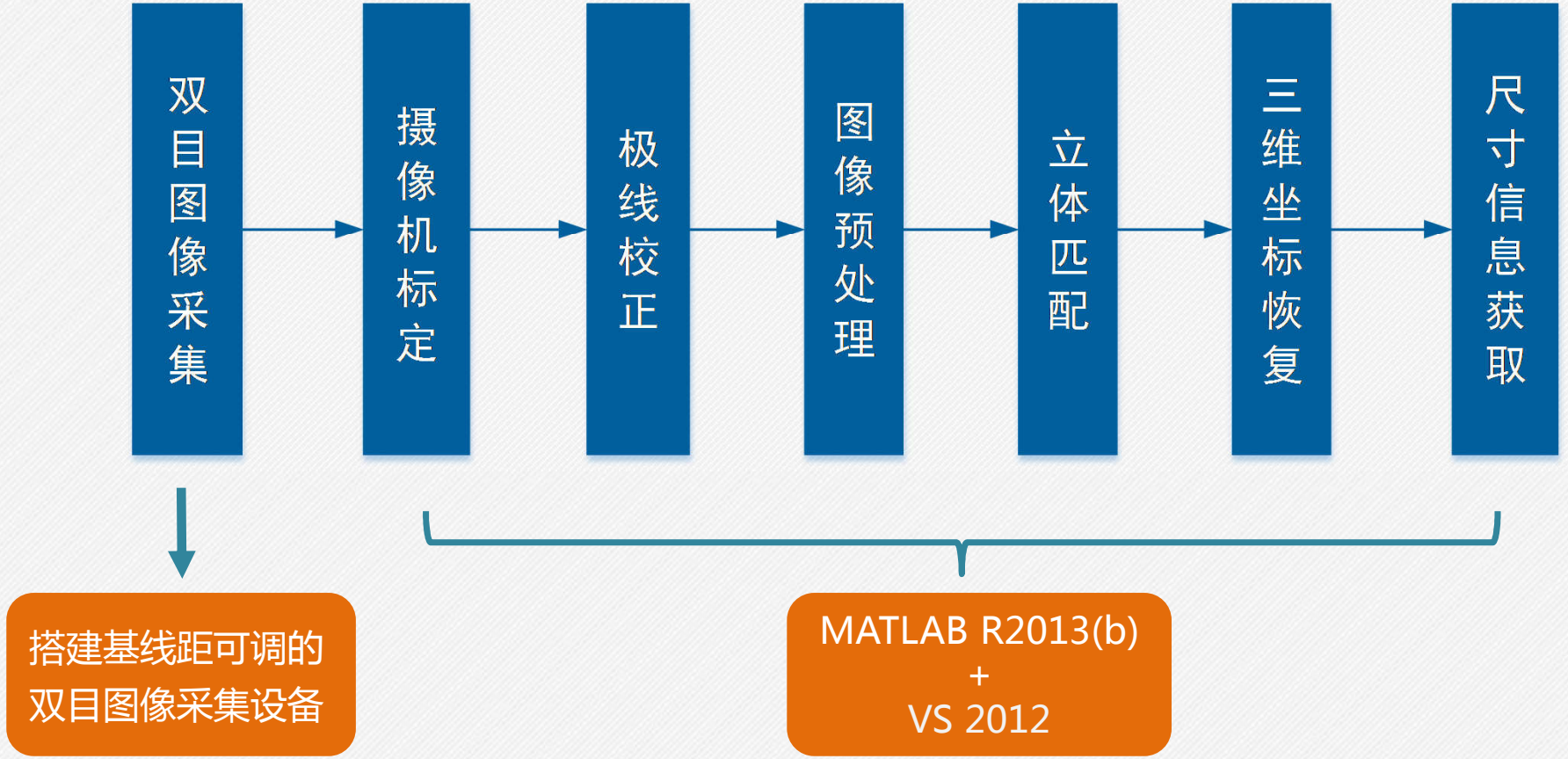


B为基线距，即两个摄像机光心连线的距离

f为归一化焦距，可由摄像机标定得到

(x_i^l, y_i^l)、(x_i^r, y_i^r), $i = 1, 2, 3, \cdots$, 由立体匹配得到两幅图像的像素坐标

2.3 双目测量实现方案


双目图像采集
摄像机标定
极线校正
图像预处理
立体匹配
三维坐标恢复
尺寸信息获取
搭建基线距可调的双目图像采集设备
MATLAB R2013(b)
+
VS 2012

第 3 部分

双目测量关键技术研究

3 双目测量关键技术研究

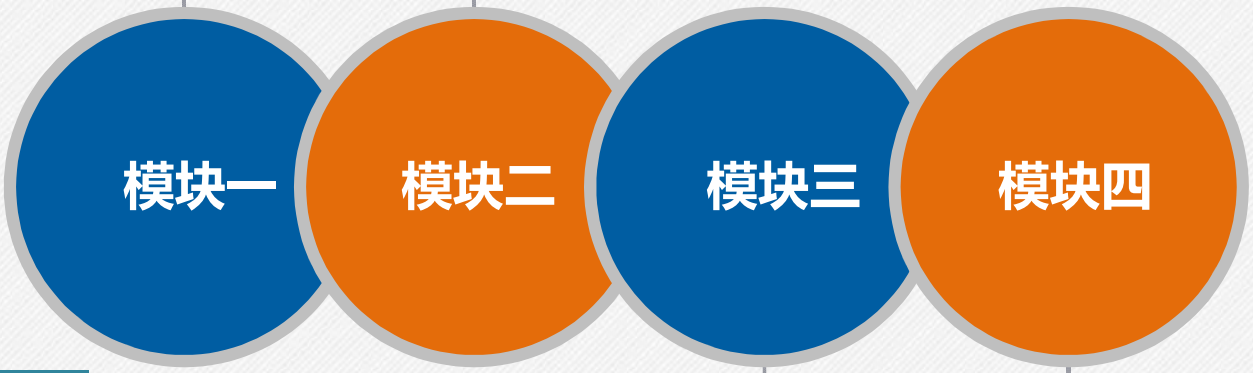
西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

摄像机标定

- 基于平面模板的摄像机标定算法
- 获取双目摄像机的系统参数

极线校正

- 基于OpenCV的Bouguet极线校正算法
- 获取理想的行对准的双目图像



图像预处理

- 图像灰度化
- 基于二维小波变换的图像阈值去噪算法
- 改进的直方图均衡化图像增强算法

立体匹配

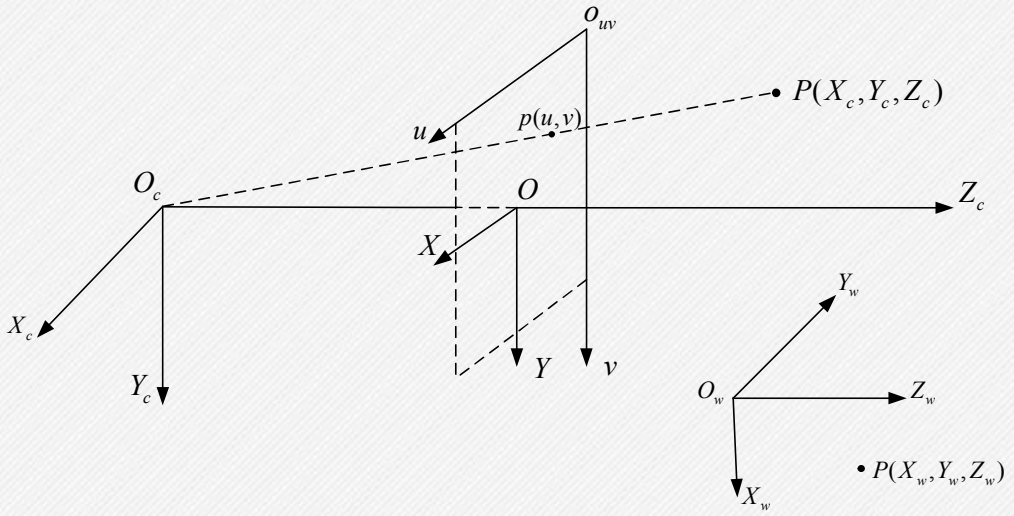
- 基于特征向量双向匹配和RANSAC的SIFT特征匹配算法
- 获取特征点的匹配点对

3.1 摄像机标定——摄像机成像模型

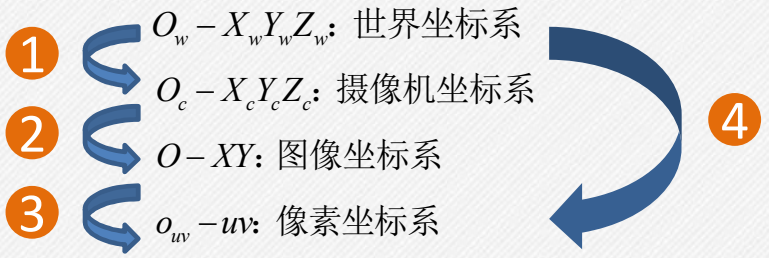
摄像机线性模型

$$Z_c\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{dX}&0&u_0\\0&\frac{1}{dY}&v_0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f&0&0&0\\0&f&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R&T\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}f_x&0&u_0&0\\0&f_y&v_0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R&T\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}=M_1M_2\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix}$$



待标定的摄像机线性参数	说明
摄像机内参矩阵M_1	f_x、f_y、u_0、v_0
摄像机外参矩阵M_2	R、T



3.1 摄像机标定——摄像机成像模型

摄像机畸变模型

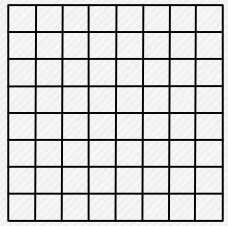
$$\begin{cases}\Delta x_{RLD} = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \Delta y_{RLD} = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\end{cases}$$

径向畸变

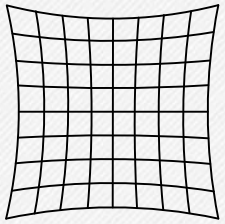
$$\begin{cases}\Delta x_{DLD} = p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ \Delta y_{DLD} = 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2)\end{cases}$$

切向畸变

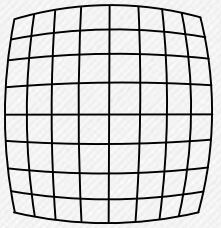
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2) \end{bmatrix}$$



(a) 原图像



(b) 枕形畸变



(c) 桶形畸变

径向畸变的两种类型

待标定的摄像机畸变参数	说明
摄像机径向畸变参数	k_1、k_2、k_3
摄像机切向畸变参数	p_1、p_2

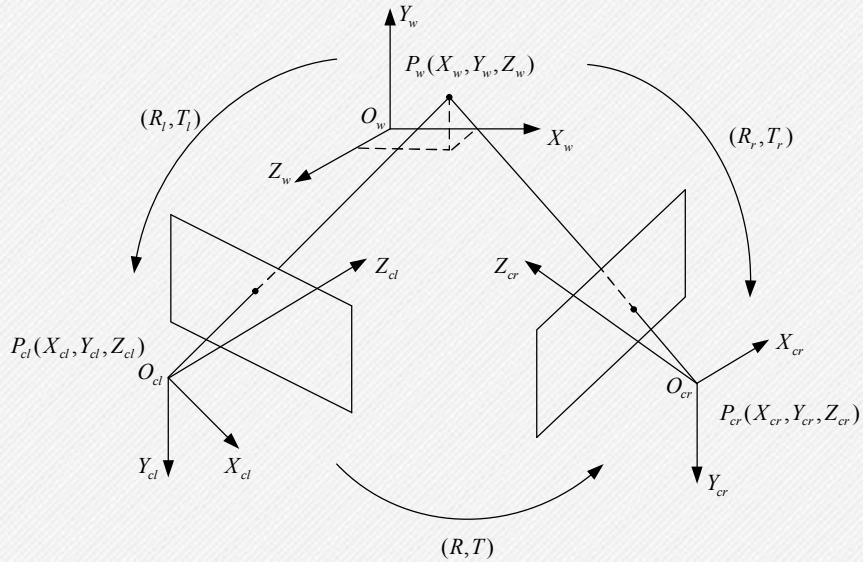
- 径向畸变：由于镜头径向曲率变化不规则而导致图像产生扭曲变形
- 切向畸变：由于透镜在制造过程中的缺陷引起的畸变

3.1 摄像机标定——摄像机成像模型

双目摄像机标定模型

$$\begin{cases} P_{cl} = R_l P_w + T_l \\ P_{cr} = R_r P_w + T_r \\ P_{cr} = R P_{cl} + T \end{cases}$$

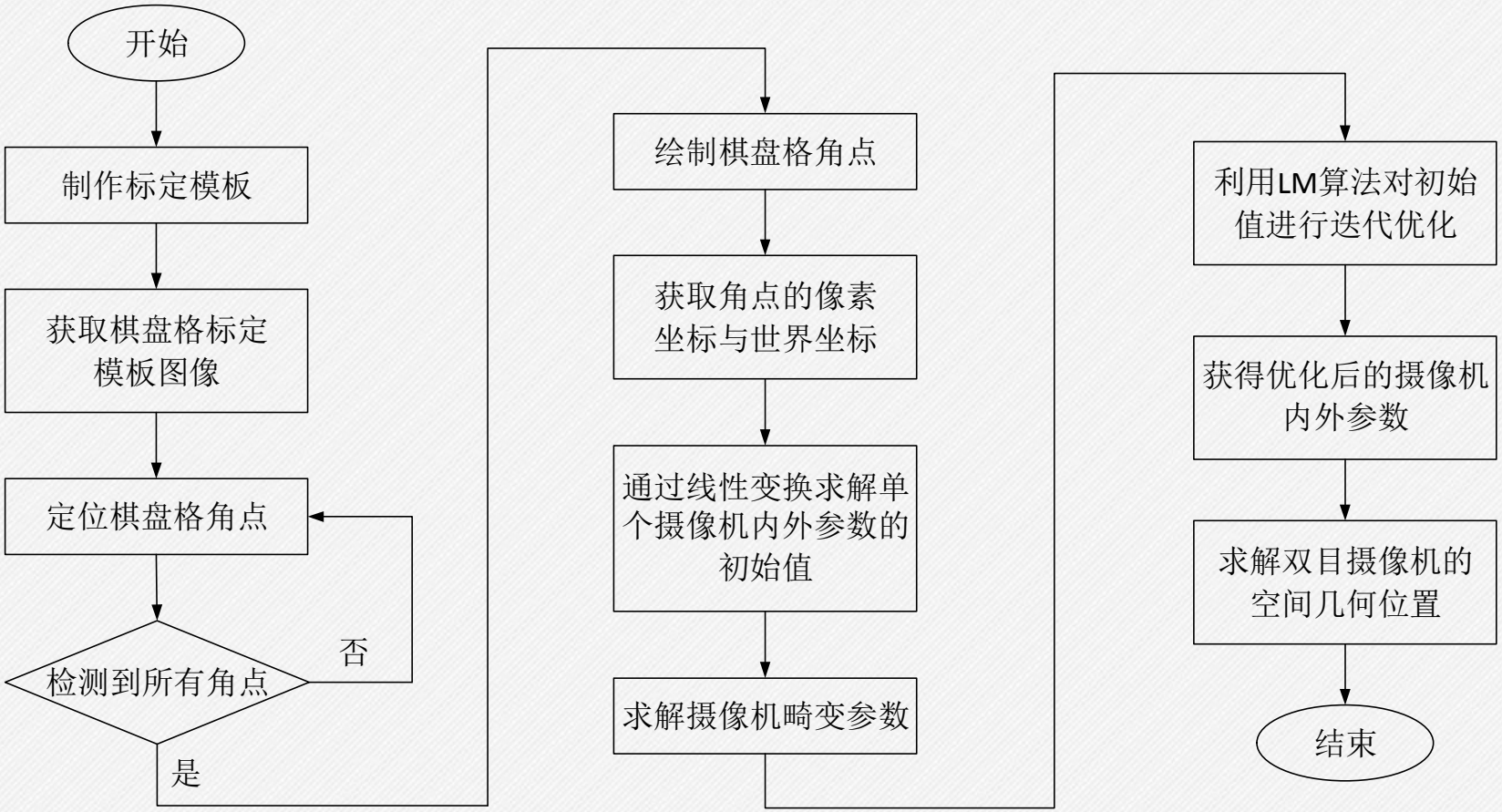
$$\begin{cases} R = R_r R_l^T \\ T = T_r - R T_l \end{cases}$$



待标定的双目摄像机参数	说明
双目摄像机的旋转矩阵	R
双目摄像机的平移向量	T

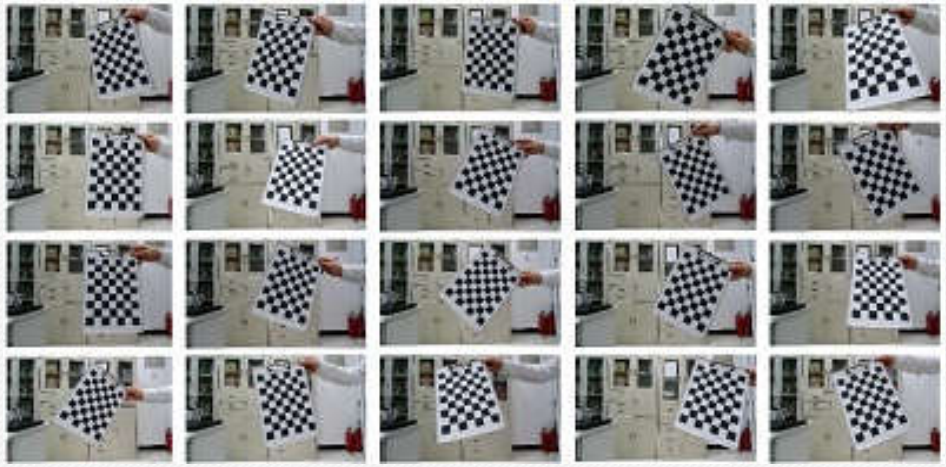
单目标定 → 双目标定

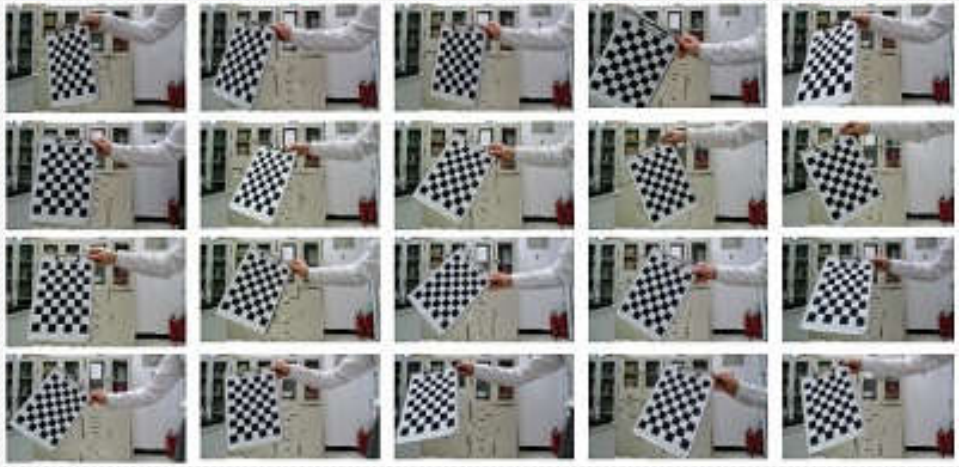
3.1 摄像机标定——基于平面模板的摄像机标定算法实现步骤



3.1 摄像机标定——标定实验与结果

棋盘格图像采集结果





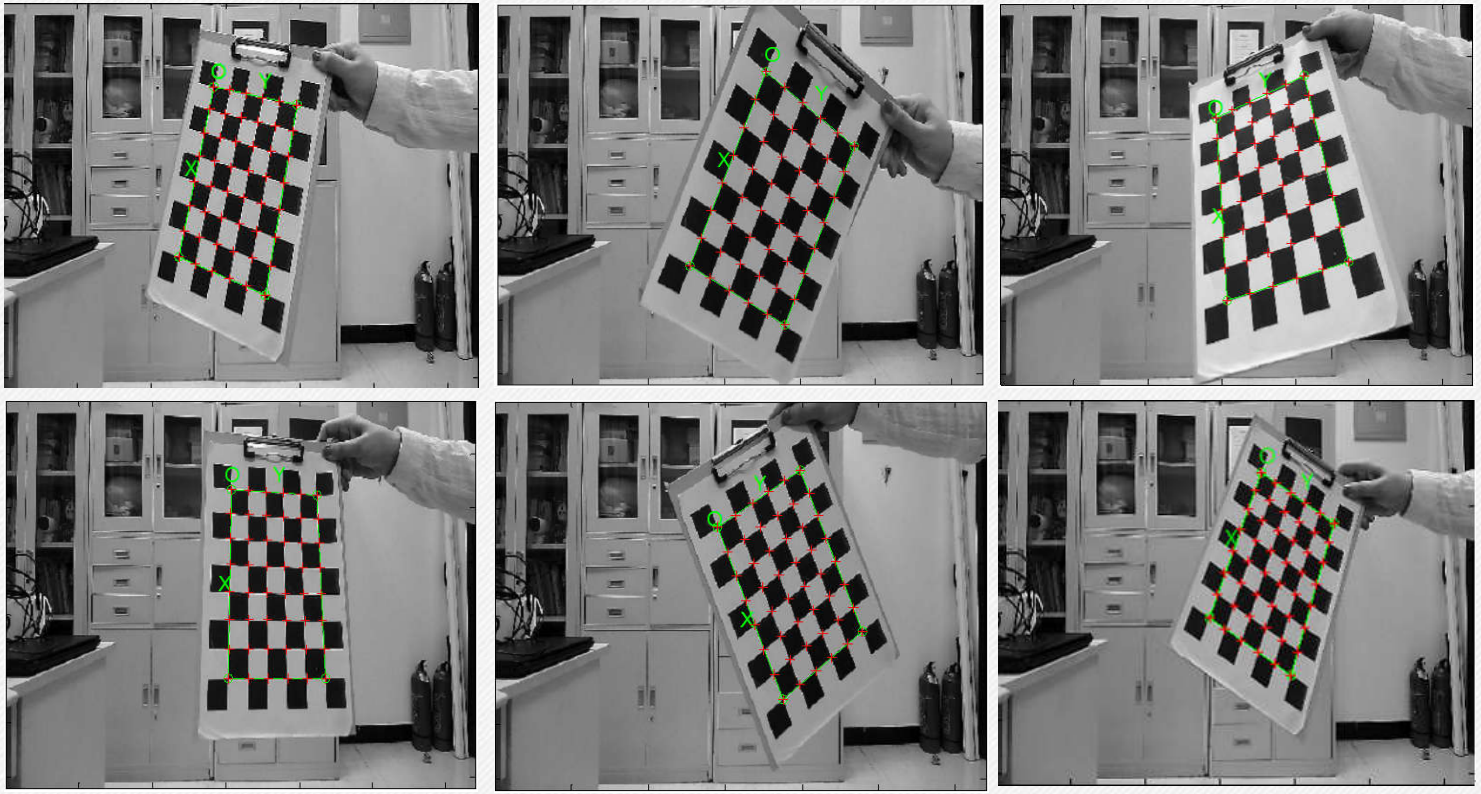
左摄像机

右摄像机

双目摄像机采集
的棋盘格图像

3.1 摄像机标定——标定实验与结果

棋盘格角点检测效果图

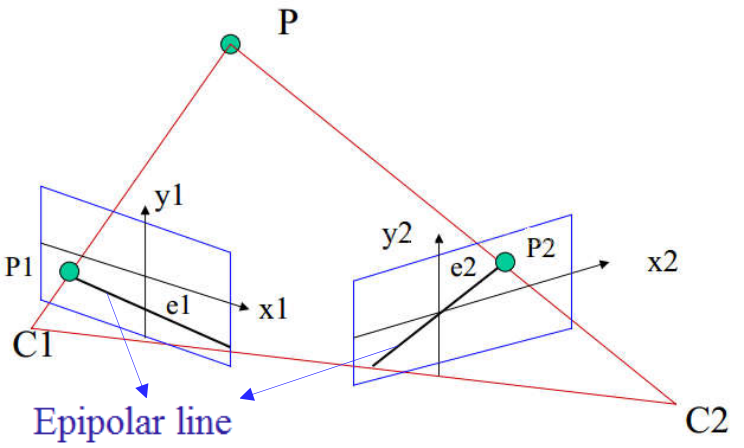


3.1 摄像机标定——标定实验与结果

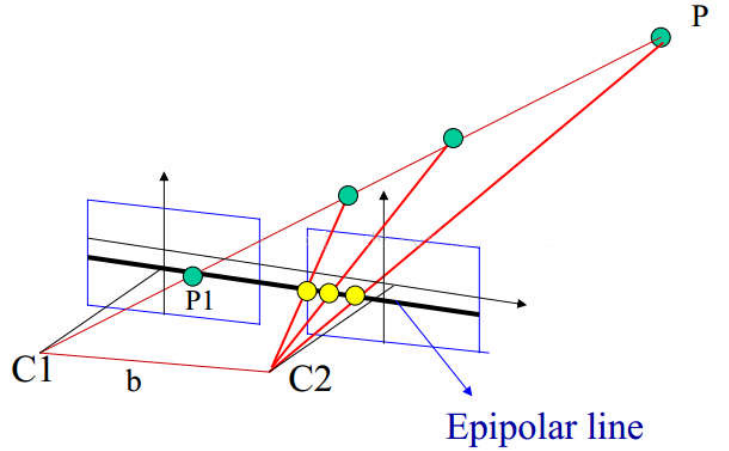
摄像机标定结果

标定参数	标定结果
摄像机线性模型内部参数	左摄像机：$M_{1l}=\begin{bmatrix}774.31821 & 0 & 665.16056\\ 0 & 772.36452 & 279.28965\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$　右摄像机：$M_{1r}=\begin{bmatrix}775.74048 & 0 & 641.38565\\ 0 & 774.55497 & 258.20658\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$
摄像机畸变模型参数	左摄像机：$[k_1\ \ k_2\ \ p_1\ \ p_2\ \ k_3]=[0.10871\ \ -0.14971\ \ -0.01185\ \ -0.00938\ \ 0.00000]$ 右摄像机：$[k_1\ \ k_2\ \ p_1\ \ p_2\ \ k_3]=[0.03247\ \ -0.01283\ \ -0.00815\ \ 0.00092\ \ 0.00000]$
双目摄像机的空间几何位置	旋转矩阵：$R=\begin{bmatrix}0.9953 & 0.0005 & 0.0971\\ -0.0034 & 0.9995 & 0.0303\\ -0.0971 & -0.0305 & 0.9948\end{bmatrix}$　平移向量：$T=[-218.40376\ \ 23.80302\ \ 9.60437]$

3.2 极线校正——双目立体视觉极线约束



极线校正



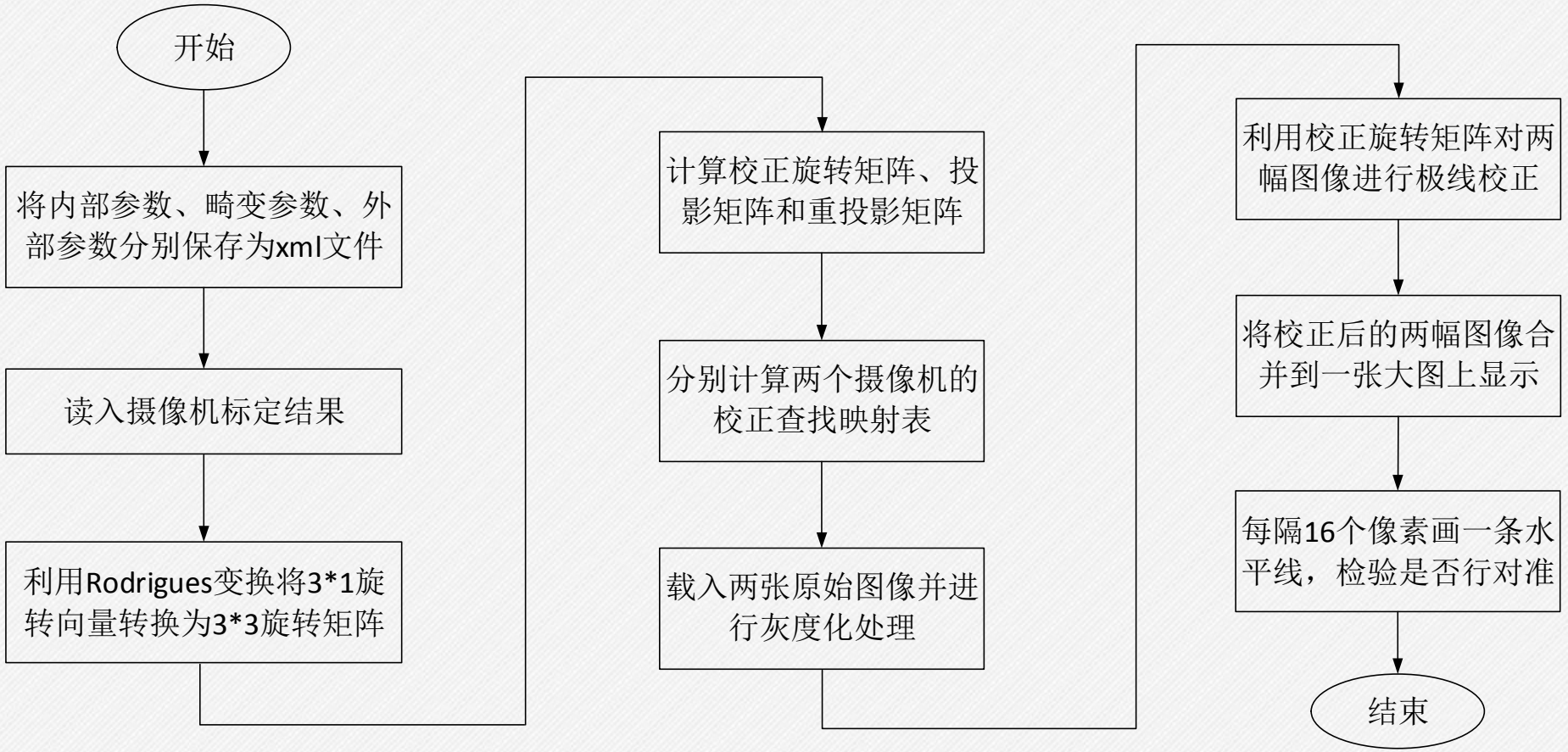
非理想情况下的极线约束

理想情况下的极线约束

目的

- 将一般双目立体视觉模型转换为平行双目立体视觉模型，简化三维世界坐标的计算过程
- 消除垂直方向视差，将立体匹配的搜索范围从二维降至一维，提高立体匹配的效率和精度

3.2 极线校正——基于OpenCV的Bouguet校正算法实现步骤



3.2 极线校正——极线校正算法结果演示图

(a) 原始左图像

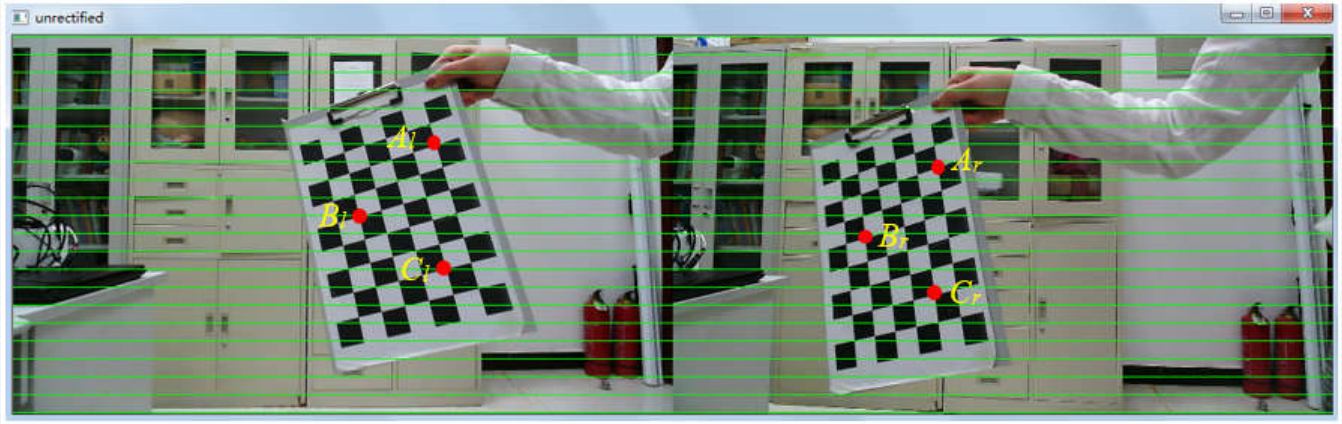
(b) 原始右图像

(c) 极线校正后的左图像

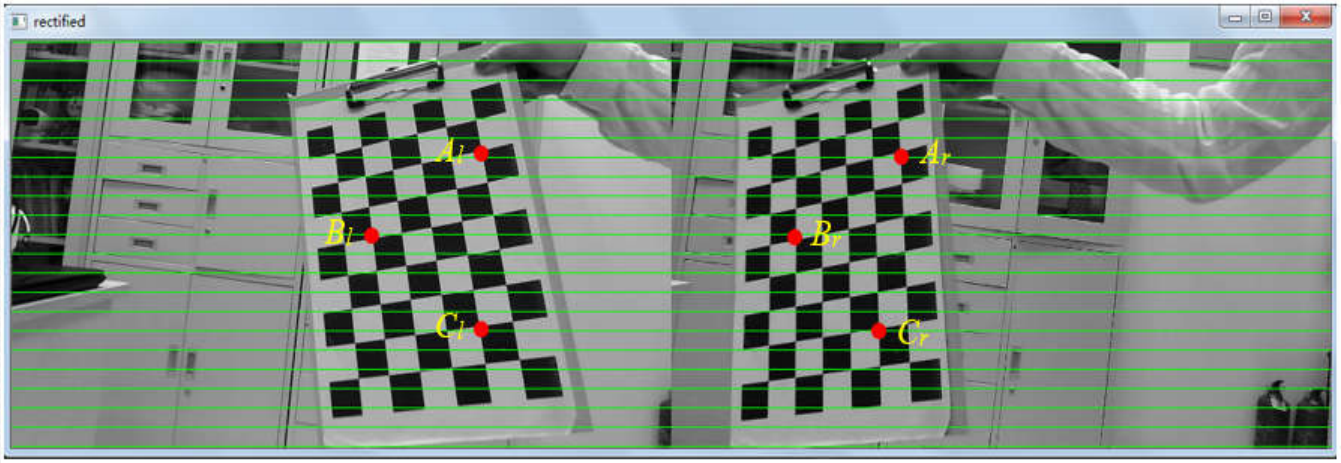
(d) 极线校正后的右图像

3.2 极线校正——极线校正算法结果演示图

校正前



校正后



为了方便比较极线校正前后的效果，对图像进行如下处理：

1. 将左右图像合并到一张大图上进行显示；
2. 每隔16个像素画一条水平线；
3. 人工标记出对应点，以检验两张图像是否实现了行对准；

3.3 图像预处理

图像预处理

图像灰度化

摄像机采集的图像均为彩色图像，为了方便后续图像处理函数的使用，通常第一步需要将获取的彩色图像进行灰度化处理

图像去噪

图像去噪主要针对的是图像噪声污染问题，利用图像去噪算法可以有效地降低目标图像携带的噪声

图像增强

图像增强可以提高图像的对比度，改善图像的清晰度，以获得高质量的目标图像，为特征点匹配奠定基础

3.3 图像预处理——图像灰度化

(a) 目标1建筑物原始彩色图像

(b) 目标2建筑物原始彩色图像

(c) 目标1建筑物灰度图像

(d) 目标2建筑物灰度图像

3.3 图像预处理——基于二维小波变换的图像阈值去噪算法

(a) 原始图像

(b) 椒盐噪声图像

(c) 高斯噪声图像

- 噪声密度为0.1的椒盐噪声
- 均值为0，方差为0.01的高斯噪声

3.3 图像预处理——基于二维小波变换的图像阈值去噪算法

(a) 均值滤波去噪

(b) 中值滤波去噪

(c) 二维小波阈值去噪

椒盐噪声去噪
方法对比

(a) 均值滤波去噪

(b) 中值滤波去噪

(c) 二维小波阈值去噪

高斯噪声去噪
方法对比

3.3 图像预处理——基于二维小波变换的图像阈值去噪算法

(a) 目标1建筑物灰度图像

(b) 目标2建筑物灰度图像

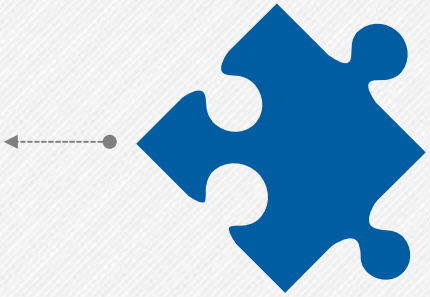
(c) 目标1建筑物图像去噪

(d) 目标2建筑物图像去噪

3.3 图像预处理——改进的直方图均衡化图像增强算法

传统的直方图均衡化

将原始图像中的各个像素分别映射到输出图像，是一种全局的图像增强技术，容易导致出现局部对比度过度增强问题



改进1

将原始图像分成若干个子块，针对每一个子块分别进行直方图均衡化处理

改进的直方图均衡化

改进2

限制灰度直方图的幅度，对每个子块的直方图进行裁剪，并将裁剪部分重新均匀分布在整个灰度区间

3.3 图像预处理——改进的直方图均衡化图像增强算法演示图

(a) 去噪后的目标1图像

(b) 传统的直方图均衡化图像

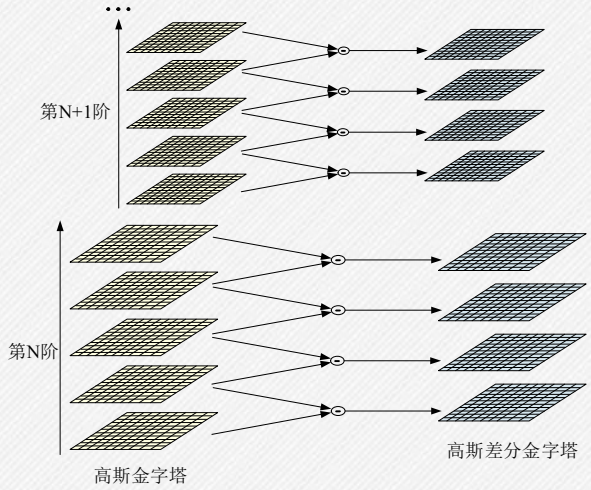
(c) 改进的直方图均衡化图像

(a) 去噪后的目标2图像

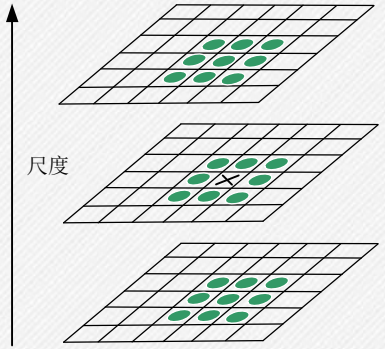
(b) 传统的直方图均衡化图像

(c) 改进的直方图均衡化图像

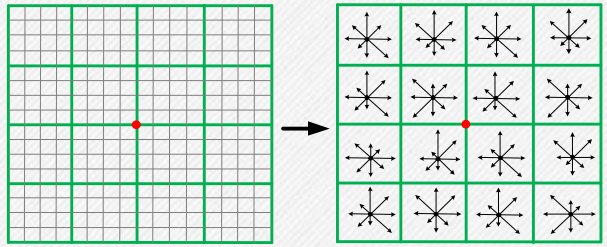
3.4 立体匹配——传统的SIFT特征匹配算法



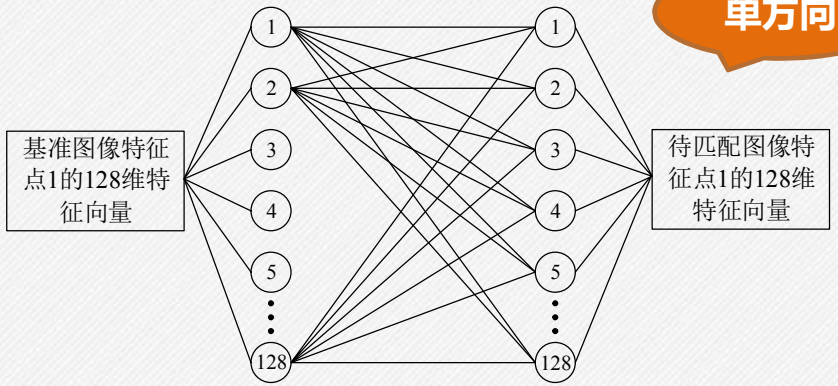
极值检测



生成SIFT特征向量



特征向量匹配



3.4 立体匹配——改进的SIFT特征匹配算法

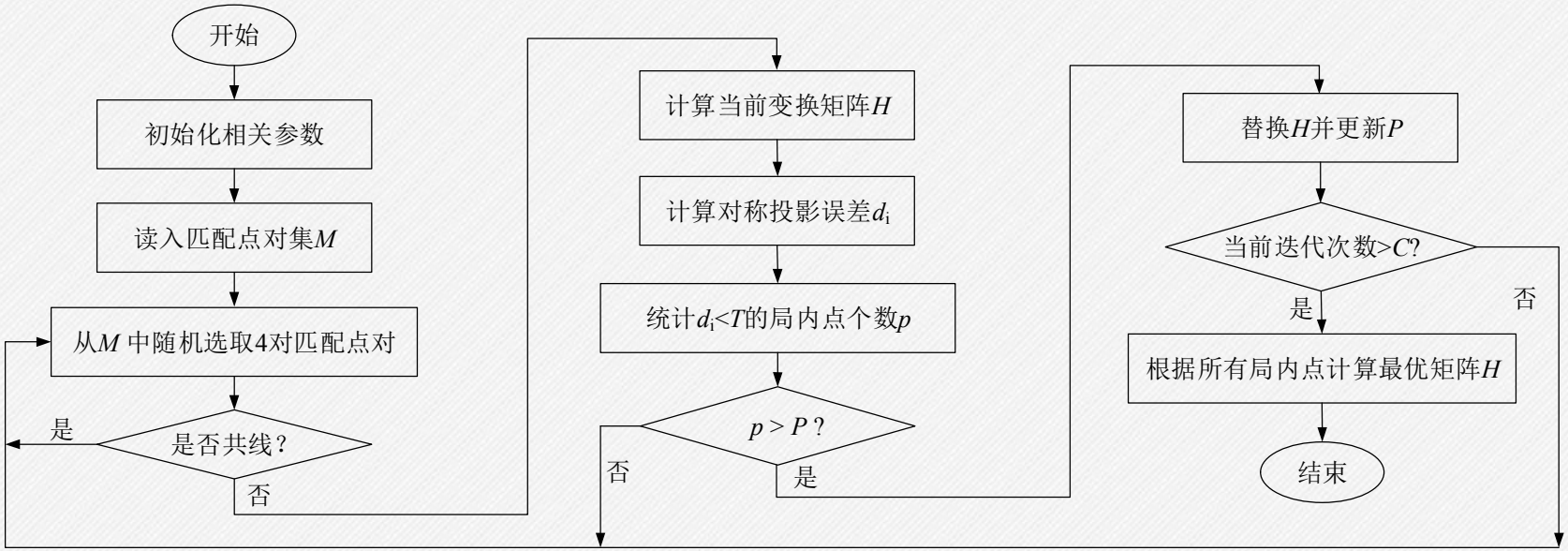
- SIFT特征向量双向匹配策略

单方向匹配 → 双向匹配

对两幅图像分别进行两次SIFT单向匹配，然后取交集部分作为最终的SIFT匹配点对集

解决特征点重复匹配问题

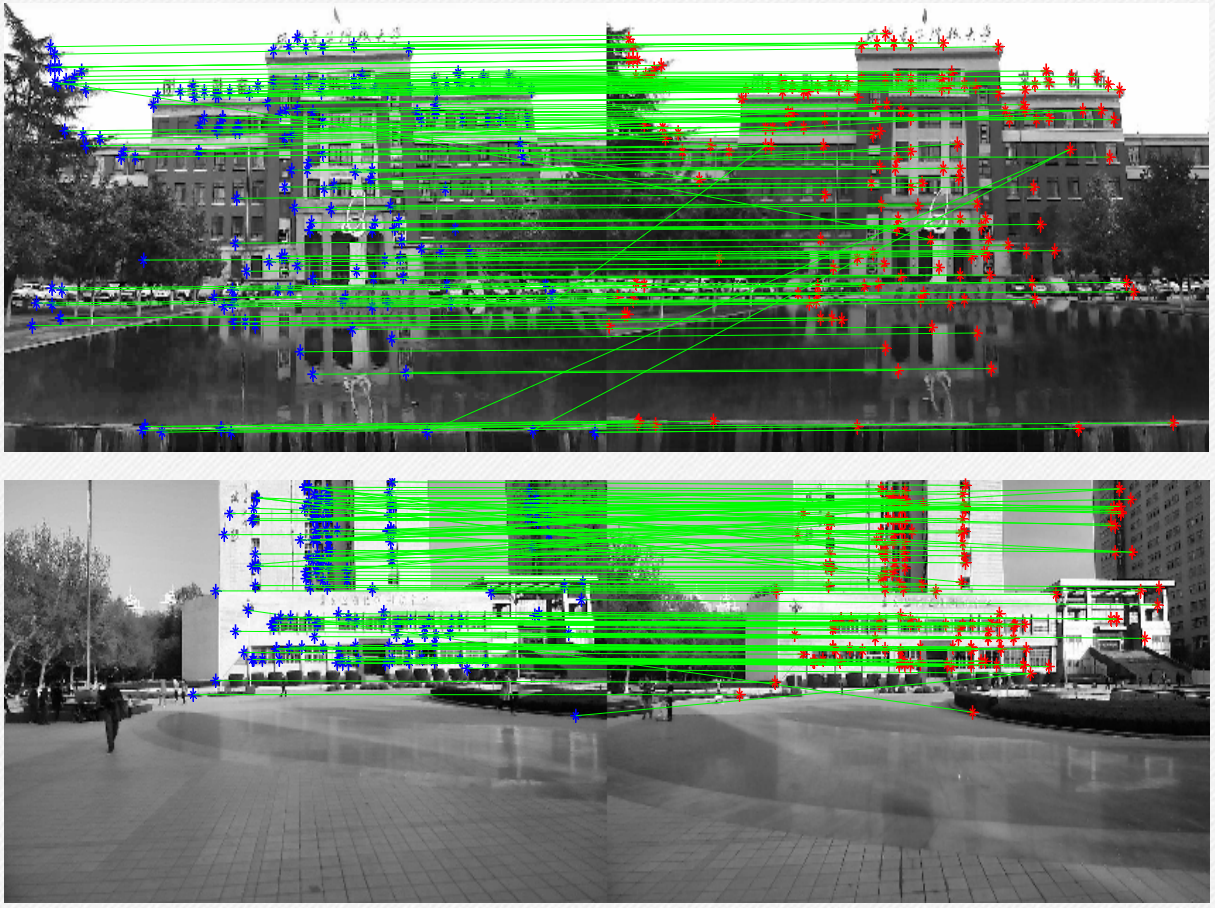
- RANSAC算法匹配筛选



+

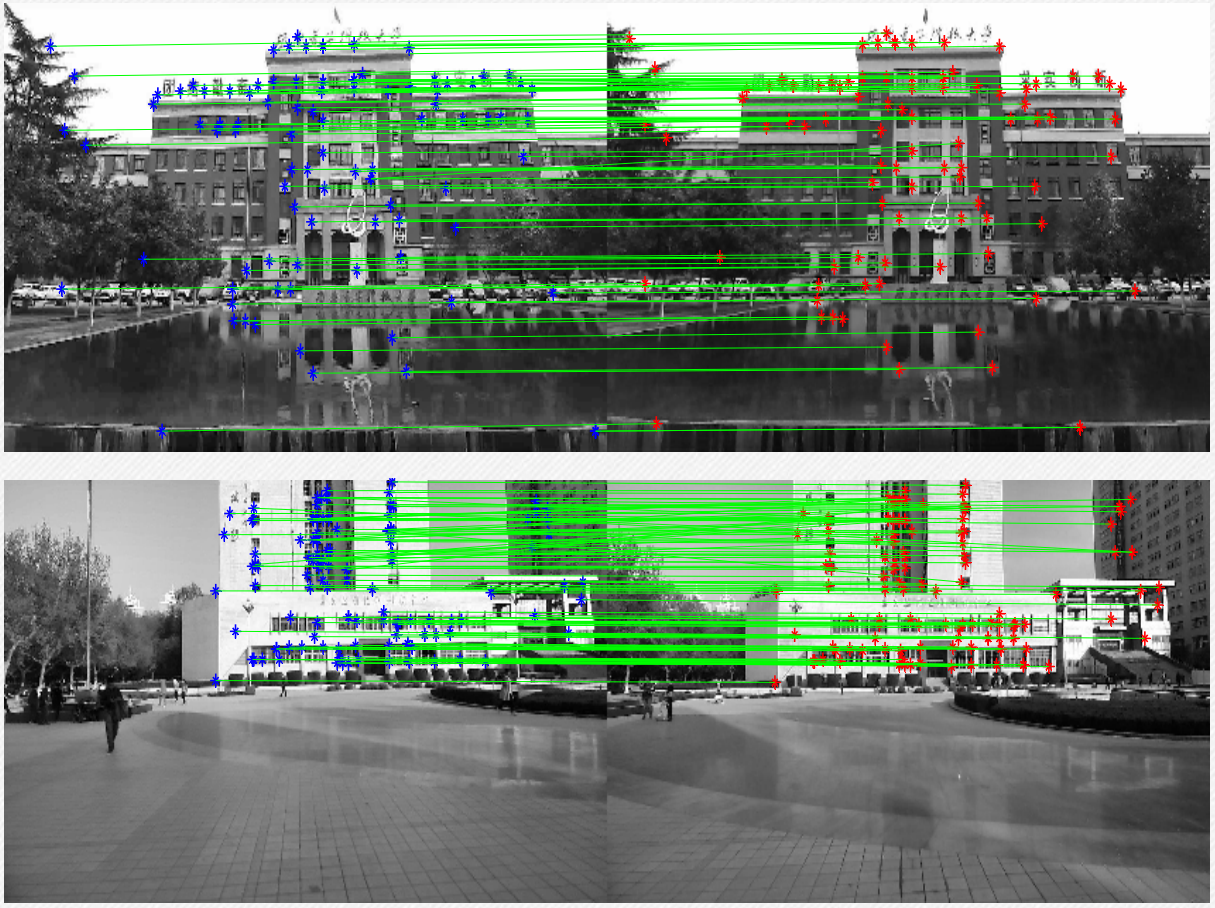
进一步剔除错误匹配点对

3.4 立体匹配——传统的SIFT特征匹配算法演示图



传统的SIFT算法匹配结果

3.4 立体匹配——改进的SIFT特征匹配算法演示图



改进的SIFT算法
匹配结果

第 4 部分

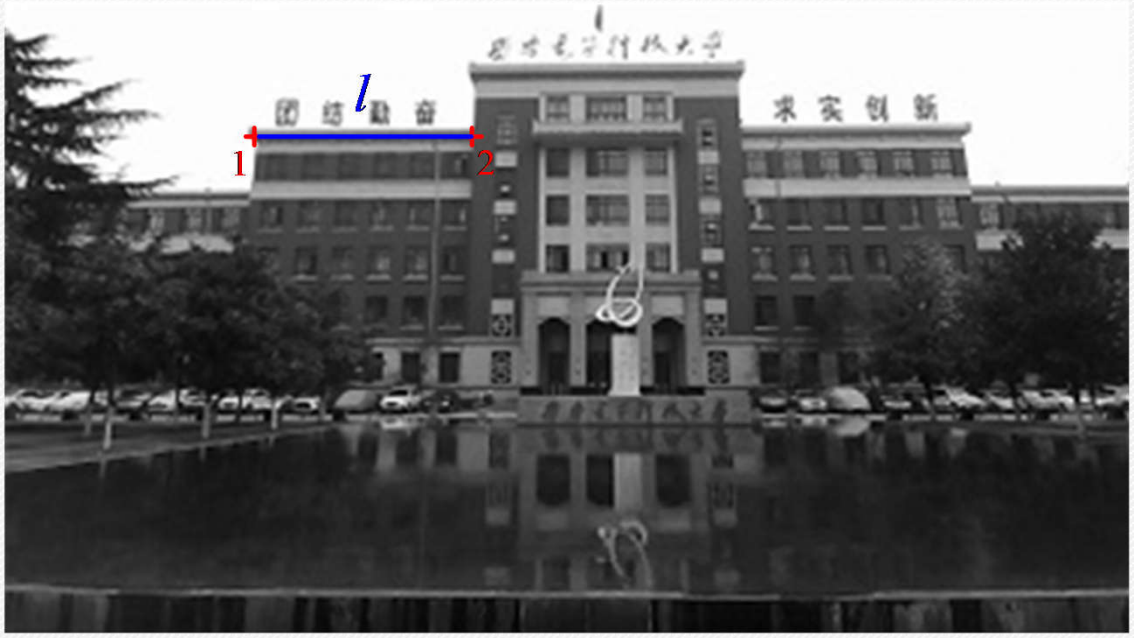
双目测量实验结果

4 双目测量实验结果

西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

目标1建筑物待测量尺寸标注



4 双目测量实验结果

西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

目标1建筑物三维世界坐标恢复

基线距 (单位：m)	待测点	左图像像素坐标 (单位：pix)	右图像像素坐标 (单位：pix)	三维世界坐标 (单位：x10^4 mm)
3.6	1	(283.4139,158.1159)	(234.6722,158.1159)	(2.0933,1.1678,5.7190)
	2	(533.4801,158.1159)	(486.8576,158.1159)	(4.1193,1.2209,5.9790)
6.0	1	(321.5596,170.8311)	(253.7450,170.8311)	(2.8450,1.5115,6.8509)
	2	(558.9106,164.4735)	(488.9768,168.7119)	(4.7952,1.4111,6.6433)
8.4	1	(315.2020,172.9503)	(228.3146,164.4735)	(3.0473,1.6720,7.4859)
	2	(561.0298,162.3543)	(459.3079,164.4735)	(4.6329,1.3407,6.3942)
10.8	1	(334.2748,168.7119)	(224.0762,162.3543)	(3.2761,1.6535,7.5887)
	2	(580.1026,162.3543)	(457.1887,162.3543)	(5.0972,1.4265,6.8037)

4 双目测量实验结果

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

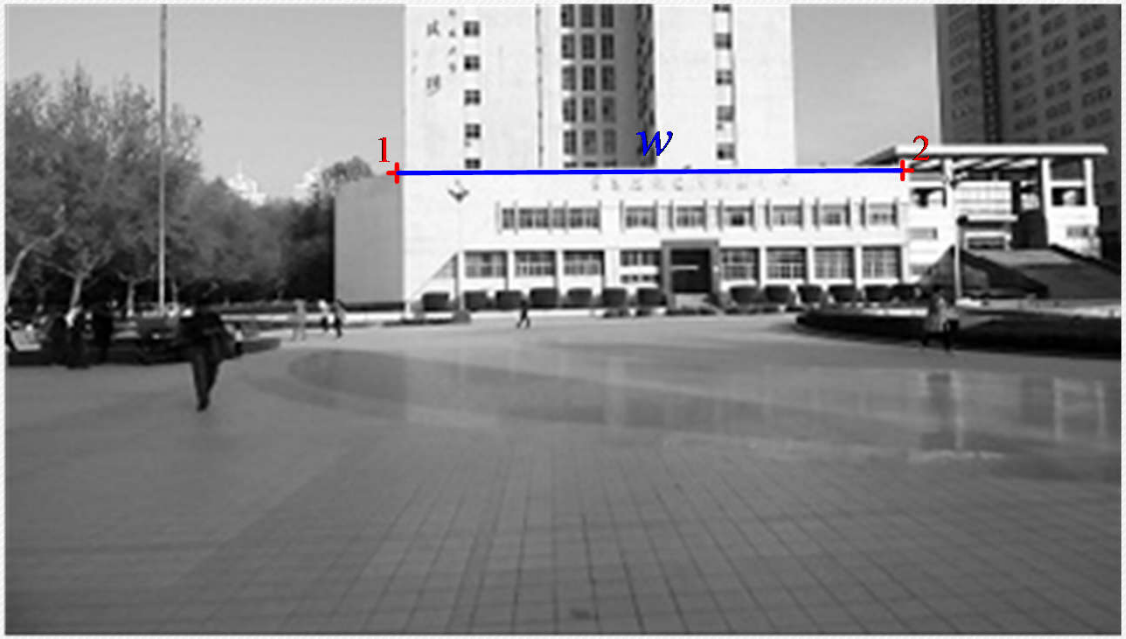
目标1建筑物尺寸测量结果

基线距 (单位：m)	测量标注	实际尺寸 (单位：m)	测量尺寸 (单位：m)	绝对误差 (单位：m)	相对误差
3.6	l	19.23	20.43	1.20	6.24%
6.0	l	19.23	19.64	0.41	2.13%
8.4	l	19.23	19.53	0.30	1.56%
10.8	l	19.23	19.96	0.73	3.80%

4 双目测量实验结果

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

目标2建筑物待测量尺寸标注



4 双目测量实验结果

西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

目标2建筑物三维世界坐标恢复

基线距 (单位：m)	待测点	左图像像素坐标 (单位：pix)	右图像像素坐标 (单位：pix)	三维世界坐标 (单位：x10^4 mm)
6.1	1	(463.5464,192.0232)	(378.7781,192.0232)	(3.3357,1.3818,5.5721)
	2	(1.0251e+03,185.6656)	(940.3675,192.0232)	(7.3770,1.3589,5.5721)
10.8	1	(457.1887, 189.9040)	(294.0099, 187.7848)	(3.0259,1.2499,5.1248)
	2	(1.0294e+03, 189.9040)	(876.7914, 194.4124)	(7.2860,1.3592,5.4807)
16.1	1	(457.1887,194.1424)	(234.6722,192.0232)	(3.3080,1.3970,5.6025)
	2	(1.0188e+03,187.7848)	(802.6192,192.0232)	(7.5881,1.4144,5.7673)
20.6	1	(461.4272,194.1424)	(171.0960,200.5000)	(3.2740,1.4001,5.4941)
	2	(1.0230e+03,187.7848)	(749.6391,202.6192)	(7.7088,1.4709,5.8348)

4 双目测量实验结果

4.1 双目立体视觉图像测量实例——不同基线距下的尺寸测量

目标2建筑物尺寸测量结果

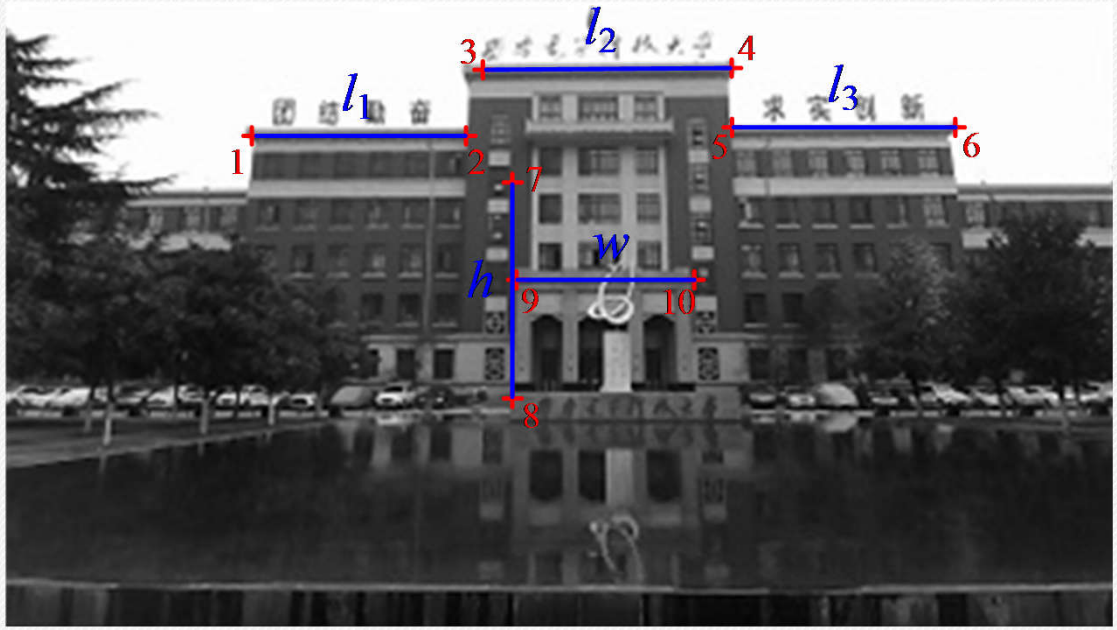
基线距 (单位：m)	测量标注	实际尺寸 (单位：m)	测量尺寸 (单位：m)	绝对误差 (单位：m)	相对误差
6.1	*w*	43.01	40.41	2.60	6.05%
10.8	*w*	43.01	42.76	0.25	0.58%
16.1	*w*	43.01	42.83	0.18	0.42%
20.6	*w*	43.01	44.48	1.47	3.42%

4 双目测量实验结果

西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

目标1建筑物待测量尺寸标注



基线距=6m

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

目标1建筑物三维世界坐标恢复

待测点	左图像像素坐标 (单位：pix)	右图像像素坐标 (单位：pix)	三维世界坐标 (单位：x10^4 mm)
1	(321.5596, 170.8311)	(253.7450, 170.8311)	(2.8450, 1.5115, 6.8509)
2	(558.9106, 164.4735)	(488.9768, 168.7119)	(4.7952, 1.4111, 6.6433)
3	(565.2682, 88.1821)	(501.6921, 88.1821)	(5.3347, 8.3222, 7.3076)
4	(864.0762, 79.7053)	(796.2616, 90.3013)	(7.6450, 7.0521, 6.8509)
5	(870.4338, 151.7583)	(802.6192, 160.2351)	(7.7013, 1.3427, 6.8509)
6	(1.1141e+03, 147.5199)	(1.0442e+03, 158.1159)	(9.5588, 1.2657, 6.6433)
7	(599.1755, 223.8113)	(529.2417, 225.9305)	(5.1407, 1.9202, 6.6433)
8	(599.1755, 454.8046)	(522.8841, 454.8046)	(4.7123, 3.5768, 6.0897)
9	(618.2483, 323.4139)	(535.5993, 325.5331)	(4.4882, 2.3479, 5.6213)
10	(828.0497, 321.2947)	(741.1623, 327.6523)	(5.7181, 2.2187, 5.3470)

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

目标1建筑物尺寸测量结果

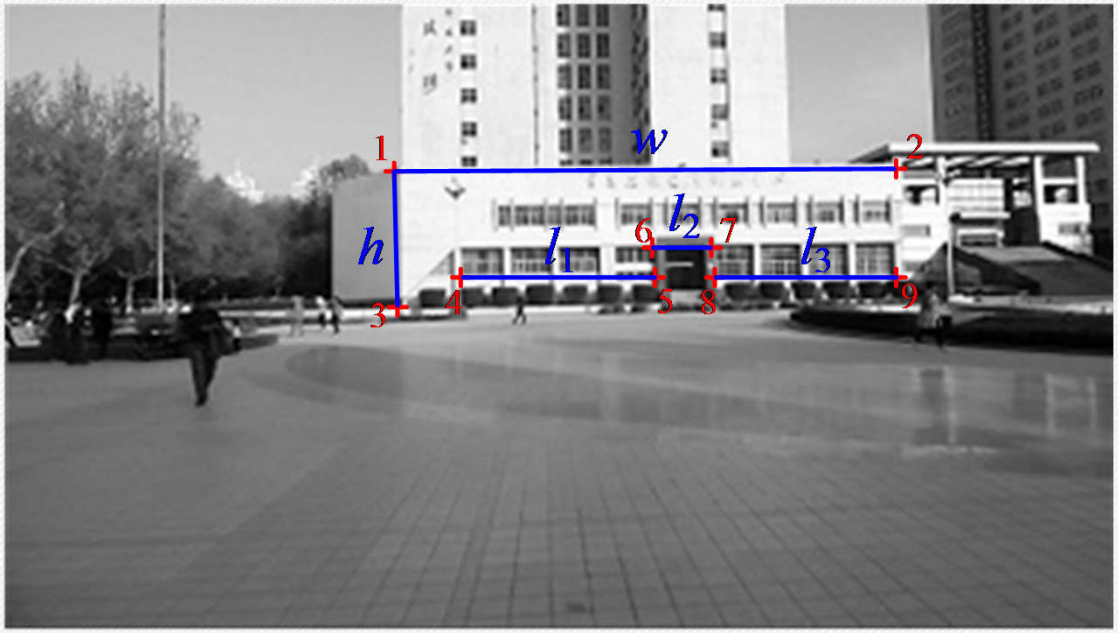
测量标注	实际距离 (单位：m)	测量距离 (单位：m)	绝对误差 (单位：m)	相对误差
l_1	19.23	19.64	0.41	2.13%
l_2	23.44	23.58	0.14	0.60%
l_3	19.23	18.71	0.52	2.70%
h	17.60	17.98	0.38	2.16%
w	13.13	12.67	0.46	3.50%

4 双目测量实验结果

西安电子科技大学 XIDIAN UNIVERSITY

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

目标2建筑物待测量尺寸标注



基线距=10.8m

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

目标2建筑物三维世界坐标恢复

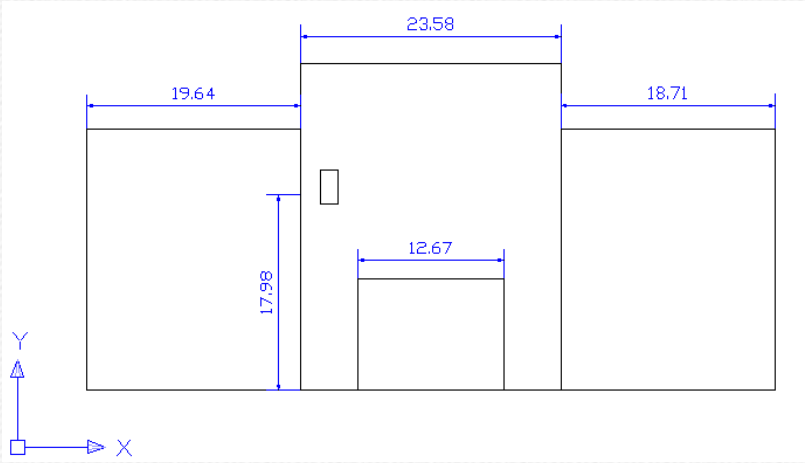
待测点	左图像像素坐标 (单位：pix)	右图像像素坐标 (单位：pix)	三维世界坐标 (单位：x10^4 mm)
1	(457.1887, 189.9040)	(294.0099, 187.7848)	(3.0259, 1.2499, 5.1248)
2	(1.0294e+03, 189.9040)	(876.7914, 194.4124)	(7.2860, 1.3592, 5.4807)
3	(457.1887, 350.9636)	(291.8907, 353.0828)	(2.9871, 2.3000, 5.0591)
4	(527.1225, 310.6987)	(366.0629, 314.9371)	(3.5347, 2.0976, 5.1923)
5	(745.4007, 312.8179)	(588.5795, 314.9371)	(5.1334, 2.1616, 5.3326)
6	(749.6391, 281.0298)	(597.0563, 285.2682)	(5.3060, 2.0042, 5.4807)
7	(821.6921, 281.0298)	(669.1093, 285.2682)	(5.8160, 0.0042, 5.4807)
8	(821.6921, 314.9371)	(669.1093, 319.1755)	(5.8160, 2.2442, 5.4807)
9	(1.0230e+03, 312.8179)	(874.6722, 319.1755)	(7.4479, 2.3006, 5.6373)

4.2 双目立体视觉图像测量实例——固定基线距下的尺寸测量

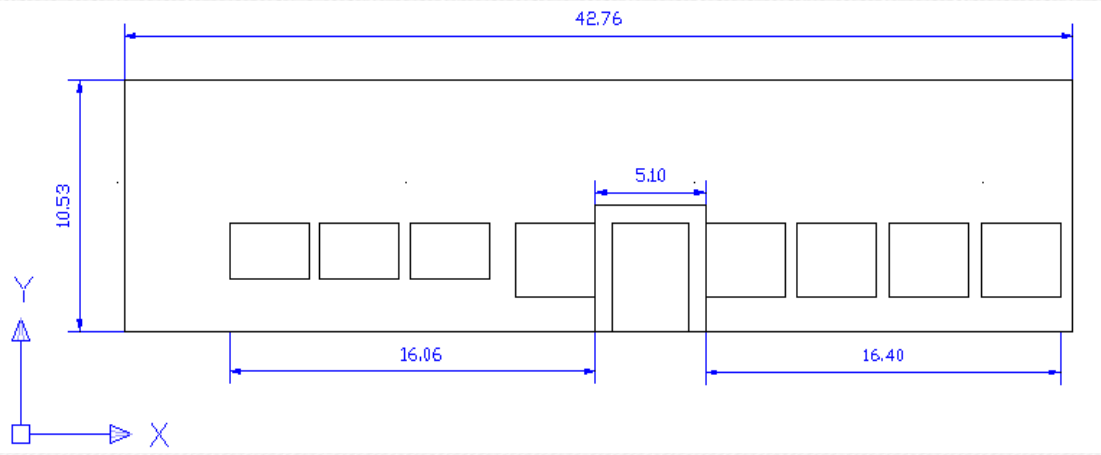
目标2建筑物尺寸测量结果

测量标注	实际距离 (单位：m)	测量距离 (单位：m)	绝对误差 (单位：m)	相对误差
w	43.01	42.76	0.25	0.58%
h	10.92	10.53	0.39	3.57%
l_1	16.60	16.06	0.54	3.25%
l_2	5.00	5.10	0.10	2.00%
l_3	16.08	16.40	0.32	1.99%

4.3 基于AutoCAD的目标建筑物平面图绘制及其尺寸标注



目标1建筑物尺寸标注



目标2建筑物尺寸标注

第 5 部分

工作总结

5 工作总结

主要工作
摄像机标定与极线校正
基于平面模板的摄像机标定算法
基于OpenCV的Bouguet极线校正算法
图像预处理与立体匹配
基于小波变换的图像阈值去噪算法
改进的直方图均衡化图像增强算法
改进的基于特征向量双向匹配和RANSAC的SIFT特征匹配算法
大型目标物双目图像测量
搭建基线距可调的图像采集设备
基于双目立体视觉的图像测量算法
针对不同场景进行测量实验并完成尺寸标注

谢谢您的观看与聆听