

文章编号: 1001-0645(2005)10-0872-04

三目立体视觉外极线校正及其 FPGA 实现方法

安路平, 贾云得, 李鸣翔

(北京理工大学 信息科学技术学院计算机科学与工程系, 北京 100081)

摘要: 提出一种三目立体视觉外极线校正的快速算法。3 个摄像机呈直角三角形配置, 且已知摄像机透视投影矩阵。根据校正基本约束确定校正后的图像平面, 利用图像不变形约束计算校正所需的三阶矩阵, 用于在平面仿射坐标系下对图像进行重取样, 使图像的行列对齐。给出了基于 FPGA 的实时计算三目立体视觉外极线校正的硬件实现方法。在时钟频率为 60 MHz, 图像可分辨的像素数为 640×480 时, 三目立体视觉外极线校正速度达到 48 帧/s。

关键词: 立体视觉; 三目视觉; 外极线校正; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP 391 **文献标识码:** A

Trinocular Epipolar Rectification and Its Implementation with an FPGA

AN Lu-ping, JIA Yun-de, LI Ming-xiang

(Department of Computer Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An efficient algorithm of trinocular epipolar rectification is proposed. The trinocular stereo system involves three cameras in triangular configuration with known perspective matrices. The common image plane of three images after rectification is calculated under rectification constraints, and three-ranked matrices are then computed under undistorted image constraints. With this the image is resampled in planar affine coordinate to align images either in row or in column. The implementation of trinocular epipolar rectification in real time with a single chip of FPGA is discussed. A performance of 48 frames per second is achieved with an image size of 640×480 pixels and a clock frequency of 60 MHz.

Key words: stereo vision; trinocular vision; epipolar rectification; FPGA

三目立体视觉具有匹配正确率高、结构简洁等特点, 广泛应用于环境三维感知和机器人视觉导航等场合。立体图像对应满足外极线(epipolar line)约束: 一幅图像上的一个给定点, 其对应点必定位于另一幅图像上相应的外极线上。通常情况下, 图像的所有外极线会聚于一点, 称之为外极点(epipolar

point)。外极线校正即根据已知的外极线几何信息生成虚拟图像对, 使外极线平行于坐标轴, 同时新的图像平面共面, 以便进行深度恢复。在当前已有的双目立体视觉校正方法中, 使用透视投影矩阵(PPM)或基本矩阵表示外极线几何信息^[1~4]。

Fusiello 等人提出了一种双目立体视觉系统的

紧凑的外极线校正方法^[1]。Loop 等人提出的双目立体视觉外极线校正方法分解单应性矩阵^[2]。Ayache 等人提出了三目立体视觉外极线校正方法^[3]。

作者提出的三目立体视觉校正算法假设已知各摄像机的透视投影矩阵,并考虑到立体视觉的实时应用要求,利用 FPGA 固有的大规模并行处理能力和多级流水线机制的特性,在单片 FPGA 芯片上实现了该算法。

1 外极线校正方法

三目立体视觉系统中的 3 个摄像机呈三角形配置,其中一个摄像机为参考摄像机,获取的图像称为参考图像,用 REF 表示,其它两个摄像机获取的图像分别用 IMG1 和 IMG2 表示,如图 1 所示。

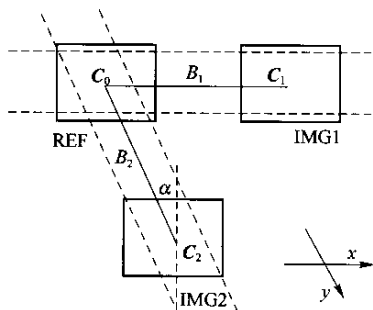


图 1 外极线校正后图像示意图

Fig. 1 Sketch of images after epipolar rectification

经过外极线校正的图像具有两个特性:①REF 和 IMG1 的外极线与图像扫描行平行;②REF 中点的列坐标与其在 IMG2 中对应点的列坐标相同。

图 1 为沿光轴方向(z 轴正方向)的正视图。 C_0 、 C_1 和 C_2 分别表示 3 个摄像机的光学中心; B_1 和 B_2 分别表示参考摄像机与两个目标摄像机的基线; α 为 B_1 和 B_2 所成的夹角的余角, $\alpha \in (-\pi/2, \pi/2)$ (图中 x, y 坐标轴构成平面仿射坐标系)。

1.1 校正自由度分析

根据针孔成像模型的特点和外极线校正后图像的特性,三目立体视觉校正的基本约束为:①3 个摄像机的光学中心 C_0 、 C_1 和 C_2 在空间中位置保持不变;②校正后 3 个图像平面共面,且平行于 3 个光心 C_0 、 C_1 和 C_2 所决定的平面;③校正后摄像机坐标系 x 轴沿 C_0 和 C_1 连线方向, y 轴沿 C_0 和 C_2 连线方向。第 1 个基本约束保证校正前后的图像点具有唯一的对应关系;第 2 个基本约束保证校正后的图像对分别具有与各自基线平行的外极线,以便进行立体匹配;第 3 个基本约束保证 REF 与 IMG1 的外极

线与图像扫描行平行, REF 中点的列坐标与其在 IMG2 中对应点的列坐标相同。

设空间中一点 P 在绝对坐标系下的坐标为 $P_w = [x_w \ y_w \ z_w]^T$,在校正前摄像机坐标系下的坐标为 $P_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$,经摄像机成像为图像点 $[u \ v]^T$ 。由针孔成像模型可得

$$z_c [u \ v \ 1]^T = A [R \ t] \begin{bmatrix} P_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} f/a_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 是摄像机的内部参数矩阵(这里使用 4 参数摄像机模型); $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ 为摄像机姿态矩阵; $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 是平移向量。摄像机光心 C 满足关系式 $RC + t = 0$, 则式(1)可写为

$$z_c [u \ v \ 1]^T = AR [P_w - C]. \quad (2)$$

设 A_{old} 和 R_{old} 分别为校正前摄像机内部参数矩阵和摄像机姿态矩阵, m_{old} 为空间点 P_w 在校正前图像中的齐次像素坐标, $P_{c-old} = [x_{c-old} \ y_{c-old} \ z_{c-old}]^T$ 为空间点 P_w 在校正前摄像机坐标系下的坐标; A_{new} 和 R_{new} 分别为校正后摄像机内参数矩阵和摄像机姿态矩阵, m_{new} 为空间点 P_w 在校正后图像中的齐次像素坐标, $P_{c-new} = [x_{c-new} \ y_{c-new} \ z_{c-new}]^T$ 为空间点 P_w 在校正后摄像机坐标系下的坐标。校正前后,摄像机光心 C 和空间点 P_w 不改变,则由

$$\begin{cases} z_{c-old} m_{old} = A_{old} R_{old} [P_w - C], \\ z_{c-new} m_{new} = A_{new} R_{new} [P_w - C]. \end{cases} \quad (3)$$

可得

$$\lambda m_{new} = A_{new} R_{new} (A_{old} R_{old})^{-1} m_{old}. \quad (4)$$

式中: A_{old} 和 R_{old} 可通过标定得到; $\lambda = z_{c-new}/z_{c-old}$ 。故需确定校正后摄像机内部参数矩阵 A_{new} 和摄像机坐标系姿态矩阵 R_{new} 。

1.2 确定校正后摄像机坐标系

根据三角形配置下三目立体视觉系统外极线校正的基本约束③,校正后摄像机坐标系 x 坐标轴沿 C_0 和 C_1 连线方向, y 坐标轴沿 C_0 和 C_2 连线方向, z 坐标轴垂直于 xy 平面,构成右手坐标系。

设单位向量 $r'_1 = \frac{C_1 - C_0}{\|C_1 - C_0\|}$, $r'_2 = \frac{C_2 - C_0}{\|C_2 - C_0\|}$, $r'_3 = r'_1 \times r'_2$, 则校正后摄像机坐标系姿态矩阵确定为

$$R_{new} = [r'_1 \ r'_2 \ r'_3]^{-1}. \quad (5)$$

式(5)确定的摄像机坐标系是三维空间仿射坐标系,图像坐标系是平面仿射坐标系。外极线分别平行于图像坐标系二坐标轴,校正后的图像在仿射坐

标下行列对齐。

1.3 确定校正后摄像机内部参数矩阵

校正后的摄像机内部参数矩阵决定新的图像平面距摄像机坐标系原点的距离、图像行列单位像素长度的比值以及光轴与图像平面的交点(principal point)。由于三目立体图像对外极线校正的特殊要求,校正后的摄像机坐标系姿态由摄像机位置配置关系唯一确定,因此在外极线校正阶段,该矩阵具有唯一可用于减小图像校正变形的自由度。

校正是对图像重新取样的过程,过取样和欠取样都在很大程度上影响立体匹配的效率 and 准确率^[5],反映在图像上即新增或丢失过多的点;同时校正前后图像的基本几何特征不应有较大的改变。基于如上的考虑,附加两个约束条件:①校正前后图像面积(正交坐标系下的像素单位)不变;②图像各对边中点连线校正前后保持长度比例不变或近似不变。

计算可得校正后图像对角线向量形式分别为 $[c_1f_1 \ d_1f_2]^T$ 和 $[c_2f_1 \ d_2f_2]^T$,原图像坐标系中 UV 轴各对边中点连线校正后向量形式分别为 $[a_1f_1 \ b_1f_2]^T$ 和 $[a_2f_1 \ b_2f_2]^T$,其中 $a_1, b_1, a_2, b_2, c_1, d_1, c_2, d_2$ 为常量, $f_1 = f/a_x, f_2 = f/a_y$ 。设原图像大小为 $w \times h$ (像素),则约束①②分别表述为

$$\begin{cases} |c_1d_2 - c_2d_1|f_1f_2 = 2wh, \\ (a_1^2w^2 - a_2^2h^2)f_1^2 + (b_1^2w^2 - b_2^2h^2)f_2^2 \rightarrow 0. \end{cases} \quad (6)$$

记 $p = a_1^2w^2 - a_2^2h^2, q = b_1^2w^2 - b_2^2h^2, s = 2wh/|c_1d_2 - c_2d_1|$,可解得

$$f_1 = s^{1/2}(|q/p|)^{1/4}, f_2 = s^{1/2}(|p/q|)^{1/4}. \quad (7)$$

对 3 个摄像机分别计算 f_1, f_2 ,取其平均值。

2 实验

实验图像像素数为 640×480 ,各摄像机的内外参数分别为

参考摄像机(REF):

$$\begin{cases} A_{\text{REF}} = \begin{bmatrix} 1.064 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 1.069 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_{\text{REF}} = \begin{bmatrix} 9.998 \times 10^{-1} & 1.228 \times 10^{-2} & -1.713 \times 10^{-2} \\ 1.078 \times 10^{-2} & 9.963 \times 10^{-1} & -8.519 \times 10^{-2} \\ 1.811 \times 10^{-2} & 8.499 \times 10^{-2} & 9.962 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, \\ t_{\text{REF}} = \begin{bmatrix} 5.123 \times 10 \\ -8.657 \times 10 \\ 9.484 \times 10^2 \end{bmatrix}; \end{cases}$$

摄像机 1(IMG1):

$$\begin{cases} A_{\text{IMG1}} = \begin{bmatrix} 1.027 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 1.033 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_{\text{IMG1}} = \begin{bmatrix} 9.998 \times 10^{-1} & -1.953 \times 10^{-2} & 2.000 \times 10^{-3} \\ 1.963 \times 10^{-2} & 9.967 \times 10^{-4} & -7.933 \times 10^{-2} \\ -4.440 \times 10^{-4} & 7.935 \times 10^{-2} & 9.968 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, \\ t_{\text{IMG1}} = \begin{bmatrix} -2.040 \times 10 \\ -8.053 \times 10 \\ 9.430 \times 10^2 \end{bmatrix}; \end{cases}$$

摄像机 2(IMG2):

$$\begin{cases} A_{\text{IMG2}} = \begin{bmatrix} 1.047 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 1.057 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_{\text{IMG2}} = \begin{bmatrix} 9.993 \times 10^{-1} & -1.857 \times 10^{-2} & -3.296 \times 10^{-2} \\ 1.606 \times 10^{-2} & 9.971 \times 10^{-1} & 7.490 \times 10^{-2} \\ 3.426 \times 10^{-2} & 7.432 \times 10^{-2} & 9.966 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, \\ t_{\text{IMG2}} = \begin{bmatrix} 3.556 \times 10 \\ -1.954 \times 10 \\ 9.372 \times 10^2 \end{bmatrix}. \end{cases}$$

计算可知,两基线夹角为 103.8° 。图 2 和图 3 所示分别为外极线校正前后的三目立体图像对,图 3 中白线为校正后的外极线。可见校正后的图像的外极线达到了行列对齐的效果。

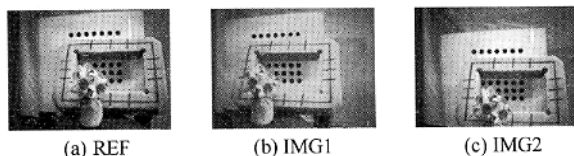


图 2 校正前图像对

Fig. 2 Stereo pairs before rectification

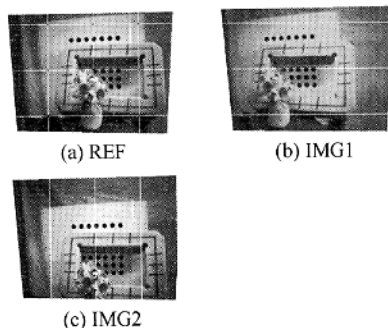


图 3 校正后图像对

Fig. 3 Stereo pairs after rectification

3 硬件实现

系统核心部分由两块 PCB 组成:图像采集板和

处理板。3 个最大分辨率为 640×480 (单位像素)的 CMOS 像机位于图像采集板上,大致呈直角三角形位置关系放置;处理板通过与图像采集板的接口采集图像,利用两套存储器实现 ping-pong 操作,使得采集图像与校正处理并行执行。校正结果分成两路,一路用于液晶显示屏显示,另一路存储于存储器中,供后续立体匹配过程使用或实时传输至 PC。外围设备包括 IEEE1394 数据传输板和液晶显示屏。IEEE1394 数据传输板用于系统与 PC 高速通信,例如系统控制命令、校正图像或原图像等的传输。

校正过程根据式(4)对采集到的原始图像进行采样。对于校正后图像的每一个像素点的坐标,计算出相应校正前的位置,读取上下左右邻近的 4 个像素,进行双线性插值,得到校正后的像素值。数据处理流程图如图 4 所示。

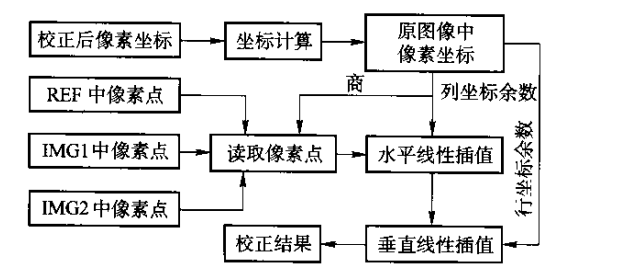


图 4 外极线校正数据流程图

Fig. 4 The data flow of epipolar rectification

系统选用 Xilinx 公司的 FPGA,型号为 XC2V2000-4FG676,使用硬件描述语言 Verilog 实现校正算法。经 XilinxISE 版本 6.1 内嵌综合工具 XST 综合后,资源占用情况如表 1 所示。综合后 FPGA 的设计最大工作频率为 127.170 MHz。

表 1 FPGA 内部资源耗费表

Tab. 1 Resource cost in FPGA

资源名称	资源总数	使用数	使用率/%
Slices	10 752	4 303	40
Slice Flip Flops	21 504	6 905	32
4 input LUTs	21 504	3 982	18
Bonded IOBs	456	308	67
Mult18x18s	56	9	16

外极线校正过程中,每校正 1 个像素点,需耗费 4 个时钟周期从外部存储器中读入图像数据(包括所需的用于双线性插值的图像数据),由于 3 幅图像

分别存储在 3 块外部存储器中,即 3 个像素数据可以同时读取,因此对于同一个校正后坐标,可以顺序计算出在 3 幅原始图像中相应的坐标。校正 1 幅 640×480 图像需要 1 228 800 个时钟周期,在 60 MHz 的系统时钟下,三目 640×480 的图像校正速度为 48.8 帧/秒,数据处理速度达到 42.9 MB/s。

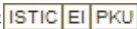
4 结 论

提出了一种三目立体视觉外极线校正算法,并且给出了算法在 FPGA 上的实现方法。校正过程中对自由度的约束具有明显的几何意义,实验证明校正约束的使用是合理的,硬件实现的性能指标达到实时应用的要求。算法及硬件实现已成功用于所设计的第三代微型立体视觉机(MSVMⅢ)上^[6]。

参考文献:

- [1] Fusiello A,Trucco E,Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. Machine Vision and Applications,2000,12:16—22.
- [2] Loop C, Zhang Zhengyou. Computing rectifying homographies for stereo vision[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Colorado, America: IEEE Computer Society,1999. 125—131.
- [3] Ayache N, Hansen C. Rectification of images for binocular and trinocular stereovision[A]. Proceedings of the 9th Intenational Conference on Pattern Recognition [C]. Rome, Italy: IEEE Computer Society,1988. 11—16.
- [4] Pollefeys M,Korch R,Gool L. A simple and efficient rectification method for general motion [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision[C]. Corfu,Greece:IEEE CS Press, 1999. 496—501.
- [5] Gluckman J,Nayar S. Rectifying transformations that minimize resampling effects[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Hawaii, America: IEEE Computer Society,2001. 111—117.
- [6] Jia Yunde, Zhang Xiaoxun, Li Mingxiang, et al. A miniature stereo vision machine (MSVM-Ⅲ) for dense disparity mapping[A]. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition[C]. Cambridge, England: IEEE Computer Society, 2004. 728—731.

三目立体视觉外极线校正及其FPGA实现方法

作者: 安路平, 贾云得, 李鸣翔, [AN Lu-ping](#), [JIA Yun-de](#), [LI Ming-xiang](#)
作者单位: [北京理工大学, 信息科学技术学院计算机科学与工程系, 北京, 100081](#)
刊名: [北京理工大学学报](#) 
英文刊名: [TRANSACTIONS OF BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY](#)
年, 卷(期): 2005, 25(10)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. [Fusiello A. Trucco E. Verri A A compact algorithm for rectification of stereo pairs](#) 2000
2. [Loop C. Zhang Zhengyou Computing rectifying homographies for stereo vision](#) 1999
3. [Ayache N. Hansen C Rectification of images for binocular and trinocular stereovision](#) 1988
4. [Pollefeys M. Korch R. Gool L A simple and efficient rectification method for general motion](#) 1999
5. [Gluckman J. Nayar S Rectifying transformations that minimize resampling effects](#) 2001
6. [Jia Yunde. Zhang Xiaoxun. Li Mingxiang A miniature stereo vision machine \(MSVM-III\) for dense disparity mapping](#) 2004

相似文献(2条)

1. 期刊论文 李秀智. 张广军. [LI Xiu-zhi. ZHANG Guang-jun](#) 三目视觉图像的极线校正方法 -[光电工程](#)2007, 34(10)
提出了解决垂直双基线三目(左、右、顶)极线校正的两步法. 第一步摄像机旋转变换, 按照特定的规则将各摄像机的对应坐标轴绕其光心旋转至互相平行, 使得各像平面共面且与焦平面平行. 第二步顶摄像机的平移变换, 使三个摄像机光心构成空间等腰直角三角形. 为此, 提出一种等效处理方法. 采用一面平面靶标, 采集旋转变换前的三目图像, 然后施以旋转变换, 分析变换后三目图像所提供的特征对应点对的坐标, 确定出顶图像变换至理想视图需要偏移的主点坐标, 该过程等效于顶摄像机位置的平移. 实验表明, 该方法简便有效.
2. 期刊论文 顾征. 苏显渝. [Gu Zheng. Su Xianyu](#) 三目自适应权值立体匹配和视差校准算法 -[光学学报](#)2008, 28(4)
立体匹配是计算机视觉研究中的关键问题. 相比于双目视觉, 三目视觉能够获得更多的信息和额外的极线约束消除立体匹配的歧义性. 为了提高三目立体匹配的精度, 提出一种基于自适应权值和视差校准的三目立体匹配方法. 将双目视觉中有效的自适应权值窗选择算法应用到三目视觉中, 进行匹配窗的选择; 提出一种新的目标图像选择算法, 能够合理利用平行基线三目立体视觉系统中不同目标图像提供的信息, 有效地消除遮挡, 提高匹配的精度; 提出一种适用于三目视觉的视差校准算法, 利用三目图像像素间的色彩相似性和距离约束将初始匹配的视差结果进行校准, 得到最终的视差图. 实验结果表明, 本文算法结构简单, 能够生成浓密、高精度的视差图.

引证文献(1条)

1. [李秀智. 张广军](#) 三目视觉图像的极线校正方法[期刊论文]-[光电工程](#) 2007(10)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_bjlgdxxb200510007.aspx

授权使用: 陕西理工学院(sxlgxy), 授权号: 4e253d67-9f40-424f-bfcd-9df201150af0

下载时间: 2010年9月15日