

一种用于火星地形匹配的撞击坑特征选择方法

陶 江¹, 曹云峰¹, 丁 萌², 庄丽葵¹, 张洲宇¹, 钟佩仪¹

(1 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016,

2 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 火星探测器在着陆过程中面临严峻的火星地理环境, 对特征提取及特征匹配的性能造成严重影响. 为此, 提出了一种多特征融合的撞击坑特征选择方法. 该方法先对撞击坑用多种特征检测子进行可重复性评价得出综合性能最好的 AKAZE 特征检测子, 然后以 AKAZE 特征检测子为基础, 通过查全率-查错率 (recall vs. 1-precision) 曲线来对多种特征描述子评价, 最后将其中性能较好的一种或几种特征结合, 对撞击坑地貌进行特征提取及匹配, 选择匹配性能最好的一组作为撞击坑匹配定位的特征. 实验结果表明, 用该特征选择方法进行撞击坑匹配与传统的 SIFT 特征匹配相比, 匹配正确率提高了 8% 左右.

关键词: 火星地形匹配; 特征提取; 撞击坑地貌; 特征评价; 多特征融合

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)09-0082-05

A Feature Selection Method for Craters in Martian Terrain Matching

TAO Jiang¹, CAO Yun-feng¹, DING Meng², ZHUANG Li-kui¹,
ZHANG Zhou-yu¹, ZHONG Pei-yi¹

(1 College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China,

2 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Mars spacecraft facing severe Mars geographical environment in the landing process. Performance of feature extraction and feature matching have been seriously affected. To solve this problem, a feature selection method based on multi-feature fusion is proposed. Firstly, the AKAZE feature detector with the best comprehensive performance is obtained by using the repeatability evaluation of the feature pits. Then, based on the AKAZE feature detector, the recall rate 1-precision curve is used to evaluate the feature descriptors. Finally, one or several features with better performance are combined to extract and match the features of the craters, and the best matching performance is selected as the feature of positioning for crater. Experimental results show that compared with the traditional SIFT feature matching, the matching accuracy is improved by about 8%.

Key words: martian terrain matching; feature extraction; crater terrain; feature evaluation; features fusion

1 引言

基于视觉的火星着陆导航由于具有设备简单、能够获取丰富的地貌信息等优点, 已被成功应用于火星着陆任务. 而大多用于导航的火星地标为撞击坑这一地貌特征, 因为撞击坑地形地貌复杂, 而地理

环境越丰富的地方越有可能存在和适宜居住相关的证据^[1]. 例如“好奇号”着陆器的着陆点选在了盖尔撞击坑(Gale Crater)^[1], 因此, 本文通过对火星探测器携带的光学相机实时获得的火星撞击坑地貌图像与已通过轨道探测器获得的火星地貌光学图像分别进行特征提取, 再进行特征匹配.

对撞击坑地貌图像进行特征提取是地形匹配的一个重要环节. 目前主要是提取撞击坑的边缘特征, 角点特征和斑点特征. 美国航天局喷气推进实验室(JPL)的 Yang Cheng^[2] 等人针对撞击坑这一行星地貌采用 Canny 算子来提取撞击坑的边缘特征, Ricardo Martins^[3] 等人提取撞击坑的 Haar-like 特征, Andrew E. Johnson^[4] 等人提取撞击坑的 SIFT 特征. 由上可知, 目前用于火星地貌图像特征提取方法抗几何变化都较差^[5].

因此, 本文对火星撞击坑地貌分别用多种特征提取方法提取特征.

2 撞击坑特征提取

撞击坑特征提取分为三个部分: 撞击坑地貌图像获取, 撞击坑特征检测, 撞击坑特征描述.

2.1 撞击坑地貌特征检测

2.1.1 撞击坑地貌特征检测子

用于特征检测和匹配的特征分为全局特征和局部特征, 其中局部特征具有良好的几何不变性和光照不变性^[6], 适于火星着陆过程中所拍摄的实时图可能遇到的噪声干扰, 如实时图发生仿射变化, 探测器高速运动造成相机拍摄图像模糊等. 因此本文用于对撞击坑进行特征检测的特征检测子有 HARRIS、SIFT、SURF、MSER、BRISK、KAZE、AKAZE 这 7 种. 其中, HARRIS 特征检测子具有良好的旋转不变性和灰度不变性^[6]; SIFT 特征检测子具有稳定的尺度不变性、光照不变性、旋转不变性和部分仿射不变性^[7]; 而 SURF 特征是对 SIFT 特征的改进, 同样具有良好的旋转不变性和尺度不变性^[6-7]; MS-

ER 特征检测子具有很好的仿射不变性^[7]; BRISK 特征检测子具有较好的旋转不变性、尺度不变性以及模糊不变性^[6]; KAZE 特征具有良好的旋转不变性、尺度不变性、模糊不变性以及仿射不变性^[6]; AKAZE 是对 KAZE 特征的改进, 同样具有较好的旋转不变性和尺度不变性^[6]. 由于图像像素大小会对特征检测算法造成一定的影响, 例如像素越大则特征检测子的精度越高, 相应的特征检测子的性能也会一定程度上降低^[6], 据此, 下面用于特征提取的火星地表图像像素大小均设置为 $1\,024 \times 1\,024$, 图像数据均来源于文献[8-9]. 共选取了 108 幅火星地貌图片对撞击坑分别从缩放(zoom)、旋转(rotation)、视角(viewpoint)、模糊(blur)四个方面来对特征检测子进行性能评估. 缩放表征的是不同尺度的火星地貌特征对特征检测的影响; 旋转主要从相机平台可能发生旋转来考虑; 考虑到相机的拍摄角度由下视变成斜视, 此时图像相对于下视时拍摄的图像也就发生了仿射变化, 为此考虑视角变化对地貌特征检测的影响; 当相机平台以一定速度运动时, 那么相机与被拍摄物体之间发生了相对运动, 造成相机所拍摄的图像模糊, 即运动模糊, 也会对拍摄的图像造成影响, 本文也将考虑这一因素对地貌特征检测的影响. 对撞击坑图像放大 1.5 倍, 旋转 40° , 视角变化 40° , 模糊运动长度参数为 20 的情况分别如图 1 所示.

2.1.2 特征检测子性能评估

特征检测子的性能从可重复性(repeatability)和检测时间两个方面来评价. 可重复性是评价区域检测子的重要评价指标之一^[10].

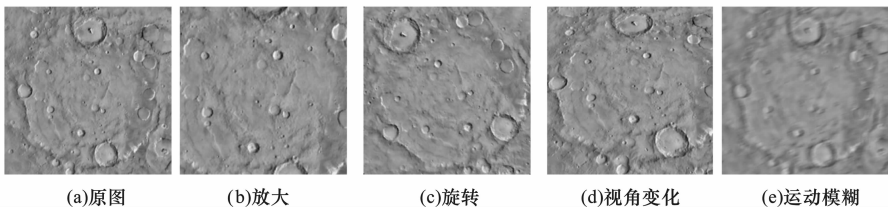


图 1 撞击坑几何形变与模糊变化

对于给定的实时图和参考图, 特征检测子的可重复计算方法为, 两幅图像相匹配的区域数量与两幅图像中检测到的区域数量较小的一方的比值. 特征检测子所检测到特征数量会随着图像的内容、分辨率等因素的不同而不同^[6], 同时也会对检测时间有一定的影响. 上述 7 种特征检测子的检测时间如表 1 所示.

表 1 特征检测子

特征检测子	检测时间/s
SIFT	0.265 6
SURF	0.105 7
HARRIS	0.185 7
KAZE	1.187 5
MSER	0.188 7
BRISK	0.393 8
AKAZE	0.579 9

2.2 撞击坑地貌特征描述

2.2.1 特征描述子

撞击坑特征描述同样在缩放、旋转、模糊、视角这四种变换下对各种特征描述子进行性能评估. 本文用于特征描述的候选特征描述子有 SIFT、SURF、KAZE、AKAZE、FREAK、BRISK 这 6 种.

2.2.2 特征描述子性能评估

特征描述子的性能用查全率-查错率(recall vs 1-precision)曲线^[7]和时间这两种指标来进行评估. 用于特征描述的特征描述子及其运算时间如表 2 所示.

表 2 特征描述子

特征描述子	时间/s
SIFT	0.258 5
SURF	0.058 3
KAZE	0.671 0
FREAK	0.007 2
BRISK	0.006 6
AKAZE	0.030 7

查全率是指同一个场景的两幅图像正确匹配的区域数量与实际相匹配的区域数量的比值. 这里的匹配是指, 通过对同一场景的两幅图像进行特征检测得到的两个区域 A 和 B 进行特征描述, 分别得到和两个检测区域相对应的特征描述子 D_A 和 D_B , 如果 D_A 和 D_B 之间的距离小于某个阈值 t , 那么就认为这两个检测区域 A 和 B 是相匹配的. 查错率就是错误匹配区域的数量和总的匹配区域数量之比.

3 多特征融合匹配

基于上述的特征检测子和特征描述子评估结果, 下面对撞击坑选择不同的特征进行匹配. 为了增强描述子的鲁棒性, 提高参考图与实时图的匹配精度, 本文采用多特征描述子对特征点进行描述^[11], 即在 AKAZE 特征检测子检测出的同一个特征点的基础上用上述评估性能靠前的几个特征描述子进行级联, 以提高特征描述子信息的全面性. 首先对撞击坑的参考图和对应的实时图分别进行特征检测得到相应的特征点, 再对每个特征点用 m 个特征描述子 $(D_1^1, D_2^2, \dots, D_m^m)$ 级联生成一个 $(a_1 + a_2 + \dots + a_n)$ 维的联合特征描述子, 再通过特征描述子之间的欧式距离作为相似性度量, 找出与撞击坑的实时图某个特征点相对应的参考图中最近和次近的两个特征点, 欧式距离的计算公式如下:

$$D = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + \dots + (x_n - x'_n)^2}$$

(1)

式中, $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为参考图中待匹配特征点; $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 为实时图中待匹配特征点; n 为特征描述子的维度. 采用最邻近距离比值匹配策略, 如果最近距离 D_{FirMin} 与次近距离 D_{SecMin} 的比值不大于一定的阈值 T , 即 $\frac{D_{\text{FirMin}}}{D_{\text{SecMin}}} < T$, 本文取经验值 0.6. 那么参考图中的特征点与实时图中的最近距离的特征点相匹配. 搜寻最近特征点和次近特征点的策略为近似最邻近快速搜索 (Approximate nearest neighbor, ANN), 最后采用 MSAC (M-estimator SAmple Consensus) 算法剔除误匹配点对.

4 仿真实验

本文实验环境为 WIN10 64 bit/Intel Core i3 2.1 GHz/4 GB内存/MATLAB2016a.

4.1 撞击坑地貌图像数据获取

实验所采用的图像数据为分辨率较高的 HiRISE^[8] 和 HRSC^[9]. 该图像数据还可由谷歌地球软件中的火星模式中获取. 图像匹配定位所需的参考图的分辨率应该尽可能高, 也就是要让参考图所保留的火星地表的细节尽可能多, 更有利于匹配, 因此将 HiRISE 卫星图作为参考图来源. 本文采用的实时图为截取谷歌地球中不同视角不同高度下的火星地表图像.

4.2 特征检测子评估实验

4.2.1 特征检测参数设置

本文设置的模糊长度为从 10 个像素变化到 20 个像素, 方向为 0. 旋转角度以相机轴线为中心在与下视方向垂直的水平面内进行旋转角度从 10° 到 90° 变化. 通过调整谷歌火星中视角的高度使得火星地貌图像从原始图像的 1.4 倍放大到 3 倍, 来研究缩放对撞击坑特征的影响, 通过将相机视角由下视方向调节到前视方向, 角度从 20° 调节到 60° .

4.2.2 特征检测子性能评估实验

通过对上述撞击坑在旋转、缩放、运动模糊和视角变换条件下对 HARRIS、SIFT、SURF、MSER、BRISK、KAZE、AKAZE 这 7 种特征检测子进行性能评估, 得到如图 2 所示的撞击坑地貌特征检测结果. 在四种变换条件下的 7 个特征检测子中性能排序如表 3 所示. 由表 3 可知, 对于撞击坑地貌, AKAZE 和 KAZE 性能评价结果一致, 为此结合表 2 中检测子的实时性, 将 AKAZE 特征作为火星地貌特征提取的特征检测子, 用于后续的特征描述.

表 3 特征检测子评估结果

	特征检测子性能排序						
	1	2	3	4	5	6	7
模糊	AKAZE	SURF	SIFT/KAZE		MSER	HARRIS	BRISK
旋转	SIFT	AKAZE	KAZE	SURF/HARRIS		BRISK	MSER
缩放	KAZE/SIFT		SURF/MSER/AKAZE			HARRIS	BRISK
视角	KAZE/HARRIS/AKAZE			SIFT	SURF	MSER	BRISK

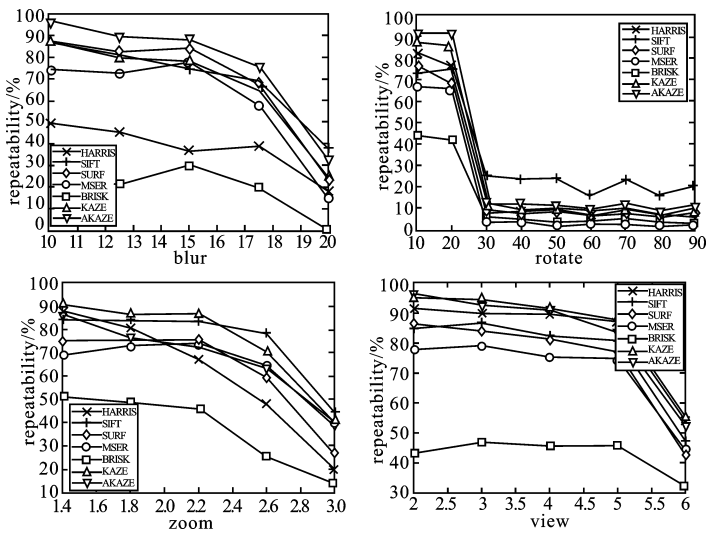


图 2 撞击坑地貌特征检测子评估结果

4.3 特征描述子评估实验

4.3.1 特征描述参数设置

特征描述参数设置和 4.2.1 节的特征检测参数设置相同。

4.3.2 特征描述子性能评估实验

通过撞击坑在旋转、缩放、运动模糊和视角变换条件下用 SIFT、SURF、FREAK、BRISK、KAZE、AKAZE

这 6 种特征描述子进行性能评估,得到如图 3 的撞击坑地貌进行特征描述结果. 四种变换条件下的 6 个特征描述子性能排序如表 4 所示. 由表 4 可知,整体上 KAZE 描述子表现出最好的评测结果,其次是 SURF 描述子,然后是 AKAZE 描述子. 在模糊条件下 SURF 描述子要略好于 KAZE 描述子,其他变换条件下都是 KAZE 描述子好于 SURF 描述子.

表 4 特征描述子评估结果

	特征描述子性能排序					
	1	2	3	4	5	6
模糊	SURF/KAZE		AKAZE	SIFT	BRISK	FREAK
旋转	KAZE	SURF/BRISK		AKAZE	SIFT	FREAK
缩放	KAZE	BRISK/SURF/AKAZE			SIFT	FREAK
视角	KAZE/SURF		BRISK/AKAZE/SIFT			FREAK

4.4 特征匹配实验与分析

根据 4.3.2 节对特征描述子的评估结果,对撞击坑地貌分别用性能靠前的描述子进行级联对实时图和参考图提取的 AKAZE 特征点进行描述,并按照第 3 节的特征匹配方法进行匹配. 匹配试验采用 KAZE 和 SURF 特征融合匹配,KAZE 和 BRISK 特征融合匹配,KAZE 特征匹配,SURF 特征匹配,

BRISK 特征匹配和 SIFT 特征匹配六种方案进行对比实验. 撞击坑地貌参考图为火星科学实验室着陆点^[1]盖尔撞击坑(Gale Crater)的下视图像,图像大小为 2 200×1 700,实时图大小为 1 024×1 024. 旋转角度为 30°,模糊参数为 5,缩放系数为 1.2. 图 4 为 KAZE 和 SURF 特征融合匹配结果,从表 5 可以看出 KAZE+SURF 和传统的 SIFT 特征匹配正确

率提高了 8%左右.

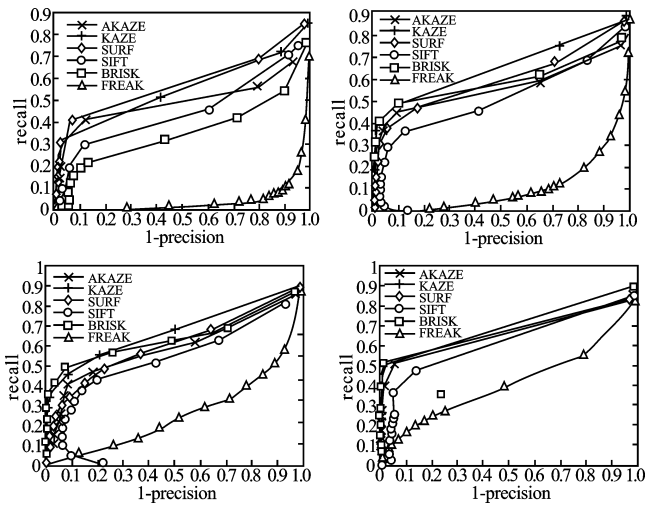


图 3 撞击坑地貌特征描述子评估结果

表 5 撞击坑地貌特征匹配对比实验

序号	特征	匹配对数	正确匹配对数	正确匹配率/%
1	KAZE+SURF	1 808	1 287	71.18
2	KAZE+BRISK	1 326	1 062	80.09
3	KAZE	1 290	972	75.34
4	BRISK	82	71	86.56
5	SIFT	1 821	1 152	63.26

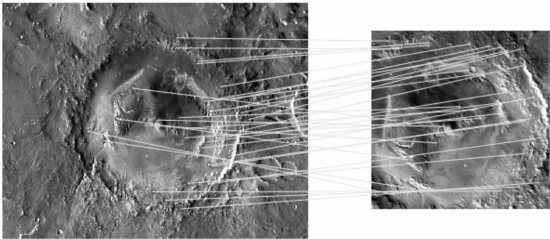


图 4 撞击坑地貌 KAZE 和 BRISK 特征融合匹配结果

5 结束语

提出了用于火星地形匹配定位的撞击坑特征选择与提取方法. 先用可重复率对特征检测子进行筛选得到 AKAZE 特征检测子, 然后用多种特征描述子基于 AKAZE 特征邻域进行描述, 再通过查全率-查错率评价指标对特征描述子进行筛选. 为了提高匹配的鲁棒性, 选取匹配性能较好的一种或几种描述子分别对每种火星地貌进行描述匹配. 实验结果表明, 本文提出的特征选择方法能有效的提高匹配的准确率. 将多特征融合框架引入特征描述, 增强了用于图像匹配的特征信息的完整性及匹配的鲁棒

性. 下一步拟扩展火星地貌图像数据库, 对更复杂的火星地貌进行匹配研究.

参考文献:

[1] Golombek M, Grant J, Kipp D. Selection of the mars scie-nce laboratory landing site [J]. Space Science Reviews;2012,170;1.

[2] Cheng Y, Ansar A. Landmark based position estimation for pinpoint landing on mars [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005;4470.

[3] Carr J R, Sobek J S. Digital scene matching area correlator (DSMAC) [J]. Image Processing for Missile Guidance,1980,238;36-41.

[4] Trawny N, Mourikis A I, Roumeliotis S I. Vision-aided inertial navigation for pin-point landing using observations of mapped landmarks [J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24;357-78.

[5] Cheng Y, Andrew E J, Larry H M. Optical landmark detection for spacecraft navigation[J]. Advances in the Astronautical Sciences;2003,114(3);1785-1803.

[6] Cordes K, Grundmann L, Ostermann J. Feature evaluation with high-resolution images[C]// Computer Analysis of Images and Patterns. Springer International Publishing, 2015, 9256;374-386.

[7] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition . IEEE,2003.

很少。总体来看,基于软硬件协同的 ROS 节点实现要比在 ARM 上实现更有时间上的优势。

6 结束语

从以上实验可以看出,基于 Zynq 软硬件协同的 ROS 节点实现在用户编程模式上和纯软件完全相同,但经过 FPGA 硬件加速之后,大大缩减了 ROS 中复杂图像算法的运行时间,更有利于智能机器人在嵌入式领域的发展。

目前在 Zynq 上 PS 端到 PL 端的通讯耗时较长,如何减少这一块的通讯开销并将软硬件协同实现移植到其他异构芯片上是进一步需要研究的方向。

参考文献:

- [1] Barros, Taiser Tadeu Teixeira. A mobile manipulator controller implemented in the robot operating system [R]. Proceedings for the Joint Conference of ISR, 2014: 121-128.
- [2] WIKI. Open Source Robotics Foundation [EB/OL]. [2016-10-09]. <http://wiki.ros.org/>.
- [3] Yamashina, Kazushi, Ootsu K, et al. Proposal of ROS-compliant FPGA component for low-power robotic systems [C]//International Conference on Intelligent Earth Observing & Applications, IEEE, 2015.
- [4] 丁帅帅,柴志雷. 基于 HLS 的 SURF 特征提取硬件加速单元设计与实现 [J]. 微电子学与计算机, 2015, 32 (9): 133-137.

- [5] Martin G, Smith G. High-level synthesis: past, present, and future [J]. IEEE Design and Test of Computers, 2009, 26(4): 18-25.
- [6] 何宾. Xilinx FPGA 设计权威指南 [M]. 北京:清华大学出版社, 2014.
- [7] Fire W S, Archibald J K. Improved census transforms for resource-optimized stereo vision [J]. IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology, 2013, 23(1): 60-73.
- [8] Heinly J, Dunn E, Frahm J M. Comparative evaluation of binary features [C]//12th European Conference on Computer Vision, Part II. IEEE, 2012.
- [9] Nakazato, Kaichiro. FPGA-based stereo vision system using census transform for autonomous mobile robot [C]// International Conference on Informatics, Electronics and Vision, IEEE, 2015.
- [10] 周龙,徐贵力,李开宇,等. 基于 Census 变换和改进自适应窗口的立体匹配算法 [J]. 航空学报, 2012, 33 (5): 886-892.

作者简介:

赵可可 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统、FPGA 设计. E-mail: yake827@foxmail. com.

柴志雷 男, (1975-), 博士, 副教授. 研究方向为嵌入式系统设计技术、高性能视觉系统、基于 FPGA 的可重构计算和 FPGA 操作系统等.

吴东 男, (1971-), 博士, 高级工程师. 研究方向为 FPGA 高效能计算机.

(上接第 86 页)

- [8] CENTER HIRISE OPERATIONS. HiRISE images of MS-L(Curiosity) [EB/OL]. [2016-10-12]. <https://www.uahirise.org/releases/msl-images.php>.
- [9] ESA/NASA/SOHO/LASCO. Space in images [EB/OL]. [2016-10-12]. <https://www.esa.int/spacelinimages/Images>.
- [10] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmid C, Zisserman A. A Comparison of affine region detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65 (1/2): 43-72.
- [11] 朱英红. 基于特征的红外与可见光图像匹配技术研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2012.

作者简介:

陶江 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为计算机视觉. E-mail: tjdwangyi@163. com.

曹云峰 男, (1964-), 教授, 博士生导师. 研究方向为无人机飞行控制与导航.

丁萌 男, (1981-), 博士, 副教授. 研究方向为计算机视觉、无人机导航、制与控制、红外目标检测.

庄丽葵 女, (1963-), 讲师. 研究方向为视觉导航技术.

张洲宇 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为计算机视觉.

钟佩仪 女, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为计算机视觉.