doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.008

基于机器视觉的嫁接苗移栽实时定位研究

谭明豪　曹其新　邱　强　冷春涛
(上海交通大学机器人研究所, 上海 200240)

摘要: 针对自动化育苗流程中的嫁接苗移栽环节,提出了一种基于机器视觉的嫁接苗移栽实时定位系统。该系统能根据点云信息定位每次移栽嫁接苗时穴孔的位置,并且在穴盘受迫移动后重新定位穴孔的位置。具体的方法是通过 RGB 传感器与红外传感器获取工作区域内的点云信息,利用点云信息,首先离线标定传送带平面方程,进而根据实时的位置信息完成穴盘与背景的在线分离;接着从分离出的穴盘点云得到对应的二维掩膜,从掩膜中的单连通区域推算出每个穴孔的位置;针对穴盘移动之后的重定位,使用了基于随机采样一致算法的单应矩阵计算方法,由历史单应矩阵从初次定位的穴孔坐标计算出当前的穴孔位置。实验表明,该定位系统能有效定位穴孔的位置,满足嫁接苗移栽要求。

关键词: RGBD 机器视觉; 图像匹配; 穴盘; 移栽; 定位
中图分类号: TP391.41; S223.94　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)02-0059-05

Real-time Localization Research of Transplanting Based on Machine Vision

Tan Minghao　Cao Qixin　Qiu Qiang　Leng Chuntao
(*Research Institute of Robot*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: A machine vision based real-time localization system for transplanting machine was proposed. The system can realize real-time detection of the plug tray's position and get the right coordinate for each planting accurately. By off-line calibration using point cloud, equation of the conveyor belt's plane was determined. With the equation, the plug tray was separated from the background in the point cloud. The 2D mask was got by using the point cloud of the plug tray. Then the contour of the plug tray was detected in the 2D mask, the plug tray's position was determined and each hole's coordinate was calculated in its corresponding simple connected area before planting the first graft seedling. After that, considering the movement during each time's planting caused by vibration, re-localization needed to be done. To do the re-localization, SURF feature points detection was done in the color image before and after last planting. Then the SURF feature points were matched, and the homography matrix was computed based on random sample consensus algorithm, which was used to calculate the coordinate of the hole. The experiment results showed that the system could achieve high precision for localization of the hole in the transplanting plug tray and it was little influenced by the lighting conditions and background color.

Key words: RGBD machine vision; image matching; plug tray; transplanting; localization

引言

嫁接技术是植株实现稳定高产、抵抗病害的重要技术手段。为了降低嫁接苗培育整个环节的工作强度,提高嫁接苗存活率以及生长质量,嫁接苗的全自动培育是未来发展的趋势。嫁接苗的全自动培育包括精密定向自动播种、自动育苗、自动供苗、自动嫁接、嫁接苗自动移栽以及温室自动管理几个步骤,

收稿日期: 2015-09-15　修回日期: 2015-11-17
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA10A506)
作者简介: 谭明豪(1993—),男,博士生,主要从事机器视觉研究,E-mail: mhtran@163.com
通信作者: 曹其新(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事机器视觉和机器人研究,E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn

每个环节都有大量研究人员进行深入研究[1-5]。其中,嫁接苗的自动移栽主要完成从嫁接机上取苗再到穴盘上进行种苗的过程。移栽效果一般取决于穴孔定位的精度、稳定性以及末端执行器的设计[6-7]。

目前,针对移栽过程中穴孔位置的定位研究主要是利用机器视觉来完成[8-10]。传统的研究大多利用穴盘的 RGB 图像,将 RGB 图像转换为灰度图后再将灰度图通过设定的阈值二值化来进行穴盘与传送带背景或者幼苗图像的分割,这种方法的效果在实际定位中往往受到很多因素的影响,如光照、穴盘和传送带的颜色等。同时,种植过程中,由于机械臂与穴盘之间的相互作用,穴盘会沿着与传送带平行的方向产生一定的位移和旋转,因此,穴盘的定位需要实时地进行,即每完成一次种植之后,需要对穴盘进行一次重新定位。重新定位与初次定位不同之处在于重新定位时多出了刚种的嫁接苗作为定位的干扰因素,而嫁接苗会遮挡住穴盘关键的边缘部位。

本文提出一套基于 RGBD 机器视觉的嫁接苗移栽实时定位系统,该系统利用点云信息来检测穴盘位置,消除传统利用彩色图像进行阈值分割的局限性;同时利用图像匹配来实时跟踪穴盘的当前位置,在已种的嫁接苗遮挡住穴盘边框的情况下仍然能准确定位当前穴盘位置。

1 穴盘的初次定位

嫁接苗自动移栽过程对穴盘穴孔的定位精度有较高的要求。根据嫁接苗自动移栽的要求,在进行自动栽植前,需要对穴盘进行基质填充和打孔处理,而嫁接苗将被种植到这些被打好的孔中,如图 1 所示。

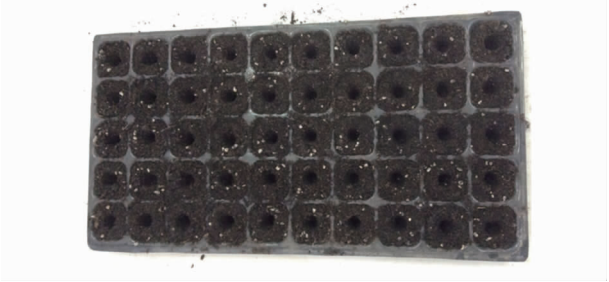


图 1 移栽穴盘示意图

Fig. 1 Image of plug tray

每个穴孔的直径为 15 mm 左右,而嫁接苗的茎的直径为 5 mm 左右,且无法保证嫁接苗的茎是完全的垂直,因此需要留有一定的余量才能保证嫁接苗能准确地插入穴孔中,从这个角度看,相当于提高了对穴孔中心的定位精度要求。

1.1 穴盘-背景分离

相比于传统的 RGB 视觉,RGBD 机器视觉多了一维深度信息,选取合适的 RGBD 传感器,可以获得所关注物体的三维点云。选取图像传感器其彩色图像分辨率为 640 像素 ×480 像素,深度图像分辨率为 640 像素 ×480 像素;使用的穴盘尺寸为长 540 mm,宽 280 mm,高 50 mm。

如图 2 所示为传感器获取的穴盘及其附近的点云。用 2 个平面分别拟合穴盘上表面以及传送带表面能够很方便地从传送带背景中分离出穴盘轮廓。传送带所在平面在整个过程中相对于传感器位置不变,因此可以离线标定传送带平面,然后在线检测穴盘上表面。

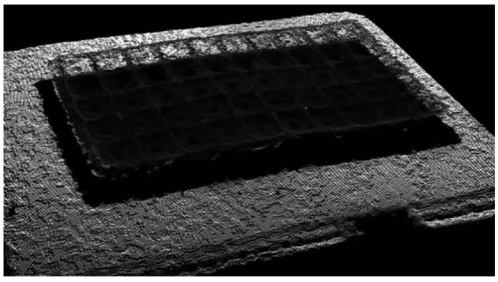


图 2 穴盘点云示意图

Fig. 2 Point cloud of plug tray

传送带平面方程求取办法:截取传送带部分区域点云,利用该区域点云信息拟合传送带平面方程[11-12]。常用的平面拟合方法有最小二乘法、特征值最小二乘法以及 RANSAC 算法等,由图 2 可以看出所获得的点云比较整齐,几乎没有异常点,且该步骤用于粗定位,使用最小二乘法就能满足精度的要求。

设传送带平面方程为

$$z = a_0 x + a_1 y + a_2 \tag{1}$$

对于点云中的 n 个点($n > 2$),由最小二乘法,设

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z)^2 \tag{2}$$

使得 δ 最小的 a_0、a_1、a_2 即为要求的平面参数,线性最小二乘法已被证明有解,因此这里只需保证 δ 的一阶偏导数为零即可,即

$$\frac{\partial \delta}{\partial a_i} = 0 \quad (i = 0,1,2) \tag{3}$$

可推出

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n} x_i (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) = 0 \\ \sum_{i=0}^{n} y_i (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) = 0 \\ \sum_{i=0}^{n} (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

整理得

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i y_i & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i & \sum_{i=1}^{n} y_i^2 & \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i z_i \\ \sum_{i=1}^{n} y_i z_i \\ \sum_{i=1}^{n} z_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

解式(5)即可求得 a_0、a_1、a_2；代入传送带区域点云信息，得到传送带平面方程

$$-0.011x + 0.101y + 0.995z - 0.821 = 0 \tag{6}$$

进而可推出穴盘上表面方程

$$0.011x - 0.101y - 0.995z + 0.821 - d = 0 \tag{7}$$

式中　d——穴盘高度

通过不等式定义穴盘上表面的点，点云坐标满足

$$\text{Dist} = |-0.011x + 0.101y + 0.995z - 0.821 + d| < 0.01 \text{ m} \tag{8}$$

的点即为穴盘上表面的点，保存满足式(8)的点云，即得穴盘上表面点云。

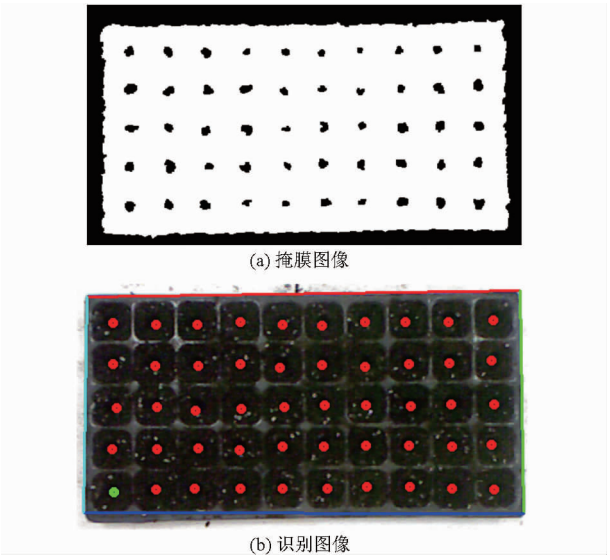
1.2　穴孔定位

至此，已从原始点云分离出穴盘上表面点云，现在需要定位穴盘上每一个穴孔的具体位置。具体方法如下：将穴盘上表面的点云重投影到二维图像上获得穴盘的掩膜图像，如图 3a 所示，该掩膜图像由多个连通区域构成，显然白色区域表示的是穴盘以及覆盖的基质，对该区域用多边形近似很容易得到近似的矩形，该矩形根据穴盘的规格可以分成 5 × 10 的栅格，每个栅格中又有一个小的单连通区域，显然这是空缺的穴孔造成的，因此该单连通区域表示穴孔位置，计算其几何中心作为穴孔位置的坐标，至此得到每一个穴孔中心的位置，如图 3b 所示。而每个穴孔深度是否符合要求则需要在单栅格中利用点云再次判断，杨扬等[4]已经提出了一种检测穴孔深度的方法，这里不再赘述。

2　穴盘的移动重定位

上述步骤得到了在种植开始前初次识别获得穴孔位置深度信息的方法。但是在种植过程中由于种植动作的冲击、振动等影响，会使得穴盘沿着与传送带所在平面平行的方向产生平移和旋转，虽然每次移动的距离不大，但是误差会不断累积，种植的成功率随着已种嫁接苗数量的增加会不断降低。因此，需要合适的算法实现穴孔的实时定位检测。

由于已种在穴盘上的幼苗对穴盘边框和未种植穴孔的遮挡，使得上述初定位算法并不适用于后续的穴孔定位。为此采用了图像匹配[13-17]的方法来



(a) 掩膜图像

(b) 识别图像

图 3　穴盘定位流程

Fig. 3　Images in plug tray localization process

定位移动后穴孔的位置：对每次移动前后（即种植前后）的穴盘图像进行特征匹配，根据匹配点对计算移动前后图像的单应矩阵，从而得到移动前后图像的位置变换关系，从已知的穴孔位置坐标计算移动后各个穴孔的坐标。

单应矩阵是用来描述两幅图像之间的对应关系的，如果两幅图像只通过平移、旋转以及缩放就可以互相对应起来，则它们之间的关系可以使用单应矩阵来描述。$\boldsymbol{H}$ 表示单应矩阵，若图 A 中的点 Q 经过移动后对应到图 B 中的点 P，用齐次坐标表示点 Q、P 分别为 $Q(x_1, y_1, 1)$、$P(x_2, y_2, 1)$，$\boldsymbol{H}$ 用 3 × 3 的矩阵表示，则有

$$P = \boldsymbol{H}Q$$

反过来，如果知道足够多对应的点集，也可以求出两幅图之间的单应矩阵。利用特征点来计算单应矩阵是常用的手段。特征点算法的选取往往取决于精度以及检测效率的要求。SURF 算法[18]是由著名的 SIFT 算法[19]改进而来的，是一个兼顾效率与精度的优质算法，本文选择对种植前后穴盘图像的 SURF 特征点进行匹配，匹配的方式是比较特征点的描述子，即特征向量之间的欧氏距离，通过距离阈值判定特征点是否匹配，同时基于互匹配排除一些容易出错的特征点。图 4 中的点表示 SURF 检测到的特征点，线连接的两点表示匹配的特征点。

上述过程得到的特征点匹配集中仍然有少数错误的匹配。利用这些包含错误匹配的集合来计算移动前后穴盘图像的单应矩阵 $\boldsymbol{H}$。记匹配点的集合为 C，移动前后图像分别为 I_{before} 和 I_{after}，该计算利用随机采样一致算法[20]，具体的过程如下：

（1）设定初值 $N_{\max} = 0$；从集合 C 中随机选取

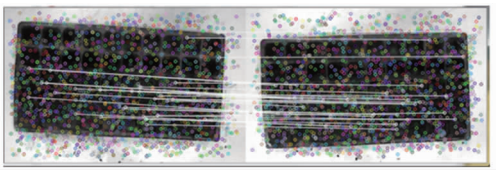


图 4 特征点匹配示意图

Fig. 4 Image of feature-point matching

4 个匹配点对;I_{before}、I_{after}中的点分别记为 P_i、P_i',则有 $P_i = \boldsymbol{H}P_i'(i = 1,2,3,4)$,单应矩阵 $\boldsymbol{H}$ 大小为 3×3,但是只有 8 个自由元素,因此 4 个匹配的点对就能解出 $\boldsymbol{H}$。

(2) 对 $\forall \{P_k;P_k'\} \in C$,对于步骤(1)中所求单应矩阵 $\boldsymbol{H}$,记 $a = P_k - \boldsymbol{H}P_k'$,若有 $|a| < \varepsilon$(ε 接近零且为正),表示该点对对模型 $\boldsymbol{H}$ 的测试通过,称 $\{P_k;P_k'\}$ 为局内点对;对剩下的所有点对进行测试,统计所有的局内点对的数量 N(包括用于计算 $\boldsymbol{H}$ 的 4 个点对),如果 $N > N_{\max}$,则替换 $N_{\max} = N$。

(3) 重复上述两个步骤,使得 $N_{\max}$大于设定阈值时,循环停止,此时算得的 $\boldsymbol{H}$ 则是适合最多点对单应关系的模型。因为每次种植的过程,穴盘都会移动,因此上述计算步骤每次种植都需要计算一次。

得到单应矩阵之后,便可以通过前后两幅图的单应关系计算,一直倒推到第 1 次检测出的穴孔坐标,计算出本次种植的穴孔坐标。第 i 次种植的坐标关系

$$P_i = \boldsymbol{H}_i P_{i-1} \quad (i = 1,2,\cdots,50)$$

根据历史单应矩阵的数据便可以得出

$$P_i = \boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{H}_{i-1}\cdots(\boldsymbol{H}_3(\boldsymbol{H}_2(\boldsymbol{H}_1 P_1))))$$

式中 P_i——第 i 次种植时对应穴孔的坐标

$\boldsymbol{H}_i$——第 $i+1$ 次种植对应的单应矩阵

P_1——P_i 倒推到第一次初定位时检测出来的该穴孔对应的坐标

根据事先进行的机器人与传感器之间的手眼标定获得的转换矩阵 $\boldsymbol{T}_{pic\text{-}rob}$,可以解出第 i 次种植的机器坐标 $P_{i\text{-}robot}$

$$P_{i\text{-}robot} = \boldsymbol{T}_{pic\text{-}rob} P_i$$

将 $P_{i\text{-}robot}$通过 TCP 通信发送给机械臂,机械臂便可在每次取苗之后,移动到 $P_{i\text{-}robot}$点处完成种植动作。

3 实验与分析

应用上述定位方法,对如图 1 所示的装有基质的穴盘进行了定位检测实验,定位流程如图 5 所示。图像传感器装在穴盘正上方约 60 cm 处。实验分别对初定位与重定位环节进行了测试。

初定位实验中,点云位置信息的获取本来就具备可见光无关性,并且整个定位过程只用到了点云

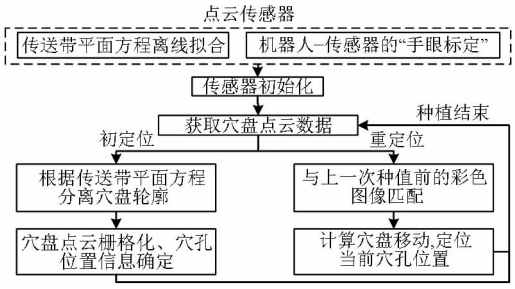


图 5 穴孔定位流程图

Fig. 5 Flow chart of hole localization

的位置信息,因此该过程还具有颜色无关性。故实验中不需要考虑光照与颜色的影响。穴孔位置先由人工标记,再通过程序计算,比较两者的差值作为穴孔位置识别的误差,每组进行了 100 次实验。其结果见表 1,该定位误差能满足移栽要求。

表 1 初定位实验结果

Tab. 1 Results of the first localization experiment

组别	分离成功率/%	定位平均误差/mm
1	100	2.59
2	100	2.78
3	100	2.55

穴盘移动重定位实验中(表 2),采取人为随机拖动穴盘移动一小段距离的方式(约 2 ~ 5 cm),并在 2 次获取图像信息之间在对应穴孔种上 1 株嫁接苗作为重定位干扰因素。实验表明,基于随机采样一致算法的图像匹配并不受所占图像比例很小的干扰因素影响。同时,由于图像匹配一般只对种植前后图像的整体变化敏感,因此理论上光照、背景颜色等因素对该环节的影响不大,但是由于特征点的检测是在 RGB 图像上进行的,考虑到光照、颜色信息可能影响特征点检测环节,因此考虑不同光照、不同背景颜色下的重定位精度。同样使用人工标记与程序计算对比的方法,每组实验为 1 个穴盘从定位第 1 个穴孔到定位到最后 1 个穴孔为止,因此每组实验有 49 次重定位。其中光照强度较弱时仍至少满足能获得清晰的 RGB 图像。

表 2 穴盘重定位实验结果

Tab. 2 Results of re-localization experiment

组别	背景颜色	光照条件	平均定位误差/mm
1	白	强	3.33
2	白	中等	3.48
3	白	较弱	3.69
4	黑	强	3.54
5	黑	中等	3.57
6	黑	较弱	3.70

从实验结果看,重定位环节中穴盘背景颜色与光照条件对定位精度的影响不大,但是重定位环节

误差整体大于初定位，这与选取的 SURF 特征点只精确到亚像素点有关，但该误差仍满足嫁接苗移栽要求。

4　结束语

提出了一套针对嫁接苗自动栽植过程的穴孔实时定位系统，该系统利用传感器获取穴盘的实时点云信息，从中分析计算出穴孔的空间位置，为嫁接苗的移栽提供足够的空间信息；针对种植过程中穴盘移动的情况，利用 SURF 特征点进行图像匹配计算移动前后穴孔位置对应关系，完成穴孔的重定位。实验表明，该定位系统受环境光照、传送带颜色等因素影响非常微小，且定位精度高，能满足嫁接苗移栽的要求。

参　考　文　献

1　沈卫平，张路. 蔬菜嫁接机自动上苗装置研究[J]. 轻工机械，2010，28(2)：22－26.

2　项伟灿. 直插式蔬菜自动嫁接机的研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2010.
Xiang Weican. The research of direct insert type automatic grafting machine for vegetables[D]. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University，2010.（in Chinese）

3　Kumar G V P，Raheman H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review[J]. International Journal of Vegetable Science，2008，14(3)：232－255.

4　杨扬，曹其新，盛国栋，等. 基于机器视觉的育苗穴盘定位与检测系统[J]. 农业机械学报，2013，44(6)：232－235.
Yang Yang，Cao Qixin，Sheng Guodong，et al. Plug tray localization and detection system based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(6)：232－235.（in Chinese）

5　Prasanna Kumara G V，Rahemanb H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review[J]. International Journal of Vegetable Science，2008，14(3)：232－255.

6　孙国祥，汪小旦，何国敏，等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报，2010，41(10)：48－53.
Sun Guoxiang，Wang Xiaochan，He Guomin，et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(10)：48－53.（in Chinese）

7　童俊华. 蔬菜钵苗穴盘间移栽执行器设计，移栽信息检测与路径规划[D]. 杭州：浙江大学，2014.
Tong Junhua. End-effector design，seedling information inspection and path planning for transplanting between vegetable seedling trays[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2014.（in Chinese）

8　孙国祥. 基于机器视觉技术的穴盘苗自动移栽机器人研究[D]. 南京：南京农业大学，2009.
Sun Guoxiang. Automatic plug seedlings transplanting robot based on machine vision[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2009.（in Chinese）

9　Ling P P，Ruzhitsky V N. Machine vision techniques for measuring the canopy of tomato seedling[J]. Journal of Agricultural Engineering Research，1996，65(2)：85－95.

10　Tong J，Jiang H，Zhou W. Development of automatic system for the seedling transplanter based on machine vision technology[C]// 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering，2012，2：742－746.

11　官云兰，刘绍堂，周世健，等. 基于整体最小二乘的稳健点云数据平面拟合[J]. 大地测量与地球动力学，2011，31(5)：80－83.
Guan Yunlan，Liu Shaotang，Zhou Shijian，et al. Robust plane fitting of point clouds based on TLS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics，2011，31(5)：80－83.（in Chinese）

12　周春霖，朱合华，李晓军. 随机抽样一致性平面拟合及其应用研究[J]. 计算机工程与应用，2011，47(7)：177－179.
Zhou Chunlin，Zhu Hehua，Li Xiaojun. Research and application of robust plane fitting algorithm with RANSAC[J]. Computer Engineering and Applications，2011，47(7)：177－179.（in Chinese）

13　Pang Y，Li W，Yuan Y，et al. Fully affine invariant SURF for image matching[J]. Neurocomputing，2012，85：6－10.

14　殷伶. 图像匹配技术的研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2010.
Yin Ling. Research on image matching technique[D]. Xi'an：Xidian University，2010.（in Chinese）

15　Huijuan Z，Qiong H. Fast image matching based-on improved SURF algorithm[C]// 2011 International Conference on Electronics，Communications and Control（ICECC），IEEE，2011：1460－1463.

16　Remondino F，Spera M G，Nocerino E，et al. State of the art in high density image matching[J]. The Photogrammetric Record，2014，29(146)：144－166.

17　赵璐璐，耿国华，李康，等. 基于 SURF 和快速近似最近邻搜索的图像匹配算法[J]. 计算机应用研究，2013，30(3)：921－923.
Zhao Lulu，Geng Guohua，Li Kang，et al. Images maching algorithm based on SURF and fast approximate nearest neighbor search[J]. Application Research of Computers，2013，30(3)：921－923.（in Chinese）

18　Bay H，Tuytelaars T，Van Gool L. Surf：speeded up robust features[C]// Computer Vision-ECCV 2006，Lecture Notes in Computer Science，Berlin Heidelberg：Springer，2006，3951：404－417.

19　Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision，2004，60(2)：91－110.

20　Fischler M A，Bolles R C. Random sample consensus：a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM，1981，24(6)：381－395.