

光学定位系统立体匹配中伪点的自动去除方法**

刘素娟, 杨荣骞, 吴效明

Automatic removal for pseudo markers in optical positioning system

Liu Su-juan, Yang Rong-qian, Wu Xiao-ming

Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China

Liu Su-juan★, Studying for master's degree, Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China
 scut_bme2011@163.com

Corresponding author: Yang Rong-qian, Doctor, Lecturer, Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China
 bmeyrq@gmail.com

Corresponding author: Wu Xiao-ming, Professor, Doctoral supervisor, Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China
 bmxmwus@scut.edu.cn

Supported by: Central University Special Funds for Basic Research Operating Expenses of South China University of Technology, No. 2009ZM0235*

Received: 2011-10-20
 Accepted: 2011-11-30

Abstract

BACKGROUND: The spatial markers can be captured by optical positioning system to form images, in which the feature points are similar and the texture information is difficult to be obtained. There is an ambiguity in stereo matching, which produce pseudo markers.

OBJECTIVE: To analyze the process of stereo matching and propose an effective and automatic method for removing the pseudo markers.

METHODS: Because all rays emitted from the same marker lie in the same epipolar plane, the searching for matching feature points could be determined in specific region to reduce the searching area. Pseudo markers existing in stereo matching were removed according to the abrupt change of spatial coordinates of pseudo markers. So the correct markers were obtained.

RESULTS AND CONCLUSION: A simulation operation tool with three markers was tracked in the experiments. 40 groups of images were obtained and $\delta=0.0025$ was as the initial matching threshold for testing the algorithm. The reconstruction of the movement showed that this method could effectively isolate the pseudo markers. Compared with the real distances, the error of the computed distances of real markers at the same time was 0.2844 mm, the relative error was 0.48%, which demonstrated the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm.

Liu SJ, Yang RQ, Wu XM. Automatic removal for pseudo markers in optical positioning system. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(17): 3156-3159. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 光学定位系统捕捉到的空间标记点的图像存在特征点相似、场景纹理信息少等情况,使得立体匹配存在多义性,即产生匹配伪点。

目的: 分析匹配过程,提出一种有效的自动去除立体匹配中伪点的方法。

方法: 根据同一空间点发射的光线位于同一极平面的原理,将匹配特征点的搜索范围限制在一定区域内,从而减小了搜索区域。然后通过伪点空间坐标的突变性剔除匹配中产生的伪点,从而得到正确的匹配标记点。

结果与结论: 实验中对装有3个标记点的模拟手术器械工具进行跟踪。对其连续拍摄40组图像,并选取 $\delta=0.0025$ 作为初始匹配阈值进行测试。重建的运动轨迹表明该方法可有效的孤立伪点,同时将所得同一时刻的真实点间的距离与真实距离比较,平均误差为0.2844 mm,相对误差为0.48%。实验结果验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 立体匹配; 极平面; 标记点; 双目视觉; 光学定位; 伪点

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.17.027

刘素娟, 杨荣骞, 吴效明. 光学定位系统立体匹配中伪点的自动去除方法[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(17):3156-3159. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

在手术导航系统中,需通过光学定位装置对装有发光标记点的手术器械(目标物)进行跟踪^[1]。光学定位装置本质上是一个双目视觉立体系统,它是通过左右摄像机同时采集带多个标记点的观测目标图像,通过匹配和跟踪各个图像帧中的相应标记点可获取手术器械的三维运动信息。标记点匹配的正确与否直接影响整个系统的跟踪精度^[2-3]。

立体匹配即是在两幅待匹配图像中寻找匹配点。目前立体匹配算法常用的有基于区域的匹配算法和基于特征的匹配算法。基于区域的匹配算法一般在某个窗口进行搜索,利用一个相似度模型,寻找窗口中像素灰度相似度最大

的两个区域作为匹配区域。它的计算量比较大,而且依赖场景中丰富的纹理信息,易受环境照明变化、强光及噪声的影响。基于特征的匹配算法是提取图像中的一些几何特征点,如角点、边缘等组成一个离散的特征集合,利用特征间的距离作为度量手段,具有最大最小距离的特征对作为匹配元素,并通过一定的约束条件减少每一个特征可能对应的特征数量。常用的约束有极线约束、惟一性约束和连续性约束等。基于特征的匹配算法匹配率高,鲁棒性好,是目前应用较多的一种方法。但是在匹配过程中仍需要解决匹配对的多义性^[4-6]。即当左右两视图上的特征点相似,且多个特征点位于同一极线上,则会出现一对多的匹配情况,无法确定相应特征点的位置。如图1所示, C_l 、 C_r 分别代表双目视觉中左右两摄像机的光心,空间点 P_1 、

P_2 都平行于两光心的连线。它们在左右像平面上对应的特征点分别为 p_{1l} 、 p_{1r} 和 p_{2l} 、 p_{2r} 。根据同一光源与两光心的连线必相交的原理, 正确的匹配对可惟一确定一空间点。如光线 $p_{1l}C_l$ 与 $p_{1r}C_r$ 相交于 P_1 , $p_{2l}C_l$ 与 $p_{2r}C_r$ 交于 P_2 。然而由于各特征点相似且 P_1 、 P_2 平行于 C_lC_r , 它们相应的特征点必位于同一极线上, 则可能出现 $p_{1l} \leftrightarrow p_{2r}$, $p_{1r} \leftrightarrow p_{2l}$ 伪匹配对, 那么根据光线相交原理, 则会出现图中所示的伪点 Q_1 、 Q_2 , 则无法确定实际的空间点。

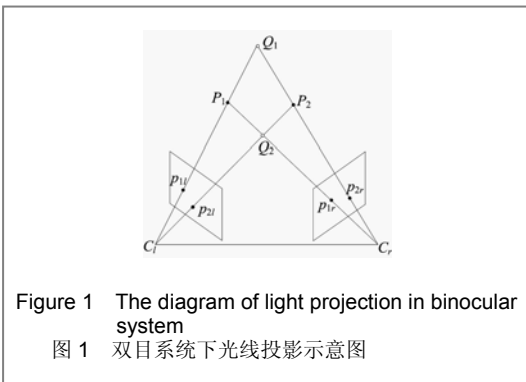


Figure 1 The diagram of light projection in binocular system
图1 双目系统下光线投影示意图

针对伪匹配的问题, 目前使用的方法有松弛迭代法、最小中值法、滤波法及RANSAC法等。它们主要是通过阈值选择、估算基础矩阵等手段剔除伪匹配对, 其计算量大, 过程也比较复杂。此外, 赵梅芳等^[7]采用多目立体视觉系统, 以直线段为特征, 通过旋转单个摄像机去伪匹配对。但匹配过程需重复计算旋转摄像机的内外部参数以保证直线方程的正确性。陈江^[4]采用人工方式去除伪匹配对, 其过程费时、烦琐。而且目前具有国际领先的光学定位系统供应商加拿大NDI公司也只是采用控制发射信号的方式避免匹配过程, 没有根本解决匹配多义性的问题, 不仅控制过程复杂, 而且手术器械上标记点发光时序必须与摄像机拍摄同步^[8]。为了解决所跟踪的标记点在图像中形成的光点特征相似, 而且图像中场景纹理信息较少, 利用传统的方法无法解决匹配中多义性的问题, 本文提出了利用极平面与光线向量之间的关系进行初始匹配, 并结合伪点的突变特性实现自动去除伪匹配, 从而实现了光学定位系统中的立体匹配, 提高光学定位系统的精度。

1 双目视觉系统下的光线向量

将左右摄像机和世界坐标系分别用 S_l , S_r , S_g 表示, 它们之间存在着旋转、平移的关系^[9]。

对于空间一点 P , 经双目视觉系统可获得其在左右两幅图像上的特征点 $p_i=[u_i, v_i]^T$ 、 $p_r=[u_r, v_r]^T$ 。根据摄像机的成像几何模型, 将 p_i 转换到 S_i 坐标系下并记其对应点为 $p_i=[x_i, y_i, 1]^T$ 。此转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = A_i^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 A_i 是左摄像机的内部参数矩阵, 可通过标定获得。引入一任意量 t_i , 光线 p_iC_i 在 S_i 坐标系下满足线性方程:

$$P = p_i t_i \quad (2)$$

同理, 光线 p_rC_r 在 S_r 坐标系下可表示为:

$$P = p_r t_r \quad (3)$$

其中 t_i 是一任意量, p_i 可由式(1)求得。将光线 p_iC_i 与 p_rC_r 转换到同一世界坐标系 S_g 下可得:

$$\hat{P} = R_{lg} p_i t_i + T_{lg} \quad (4)$$

$$\hat{P} = R_{rg} p_r t_r + T_{rg} \quad (5)$$

式中 R_{lg} 、 R_{rg} 、 T_{lg} 、 T_{rg} 分别是 S_l 、 S_r 到 S_g 的旋转矩阵和平移矢量。由于光线 p_iC_i 、 p_rC_r 是同一空间点发出的, 所以两光线相较于 P 点, 即 $\hat{P} = \hat{P}$ 。那么 P 点的三维坐标也可通过联立式(4)、(5)求解得到。同时也可得两光线在 S_g 坐标系下的方向向量分别为 $h_l = R_{lg} p_i$ 和 $h_r = R_{rg} p_r$ 。

2 基于极平面的初始匹配

在图1中, 记由 P_1 、 C_l 、 C_r 确定的平面为 Π , 即极平面^[10]。其平面法向量 \vec{n} 可由空间向量 $\overline{p_{1l}C_l} \times \overline{p_{1r}C_r}$ 得到。 $\overline{p_{1l}C_l}$ 可由式(4)求得, 记 $h_{li} = \overline{p_{1l}C_l}$ 。而且 P_1 在左右像平面上的特征匹配对 $p_{1l} \leftrightarrow p_{1r}$ 必在平面 Π 上, 那么由式(5)求得的空间向量 $\overline{p_{1r}C_r}$ 并记为 h_{1r} , 则有:

$$\vec{n} \cdot h_{1r} = 0 \quad (6)$$

但由于计算误差点积结果可能不为0, 此时引入一阈值 δ 则式(6)可表示为:

$$\vec{n} \cdot h_{1r} < \delta \quad (7)$$

即对于左图像上的一特征点 p_l , 它在右图像上对应的特征点 p_r 必满足式(7), 不满足此关系的特征点必不与 p_l 相匹配。但由于式(7)都只

华南理工大学生物医学工程系, 广东省广州市 510006

刘素娟★, 女, 1987年生, 河南省许昌市人, 汉族, 华南理工大学在读硕士, 主要从事生物医学测量与仪器方面的研究。
scut_bme2011@163.com

通讯作者: 杨荣霖, 博士, 讲师, 华南理工大学生物医学工程系, 广东省广州市 510006
bmeyrq@gmail.com

并列通讯作者: 吴效明, 教授, 博士生导师, 华南理工大学生物医学工程系, 广东省广州市 510006
bmwxmwus@scut.edu.cn

中图分类号: R318
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225 (2012)17-03156-04

收稿日期: 2011-10-20
修回日期: 2011-11-30
(20110820006/M·G)

表示点与面的关系, 并非是点对点的关系。因此, 满足式(7)是 p_i 与 p_r 相匹配的必要不充分条件。当空间两点 P_1 、 P_2 与 C_1 、 C_r 共面时(比如 $P_1P_2//C_1C_r$ 的情况), 那么 p_{1r} 、 p_{2r} 分别确定的直线 $p_{1r}C_r$ 、 $p_{2r}C_r$ 都在极平面 Π 上。也就是说, 当 n 唯一确定一个极平面时, 与 p_{1r} 匹配的特征点必在满足式(7)的点集 $p = \{p_{ir}|i \in N\}$ 中。同时也会产生伪匹配对, 在空间中形成伪点。

3 基于伪点突变性的去伪匹配

从初始匹配的过程中可知, 伪点是在空间中至少有两点与左右摄像机的光心处在同一极平面上时产生的。在双目视觉系统的实际应用中, 这种情况是在目标物放置在某一特定位置时才有出现的。当目标物的位置发生时, 处在同一极平面的点将随着位置的变化而变化。在某一时刻产生的伪点在相邻的下一时刻由于位置变化而消失, 即伪点的突变性。而对于真实的空间点, 即使位置发生变化其仍然存在, 并与上一相邻时刻相差一位置偏移。

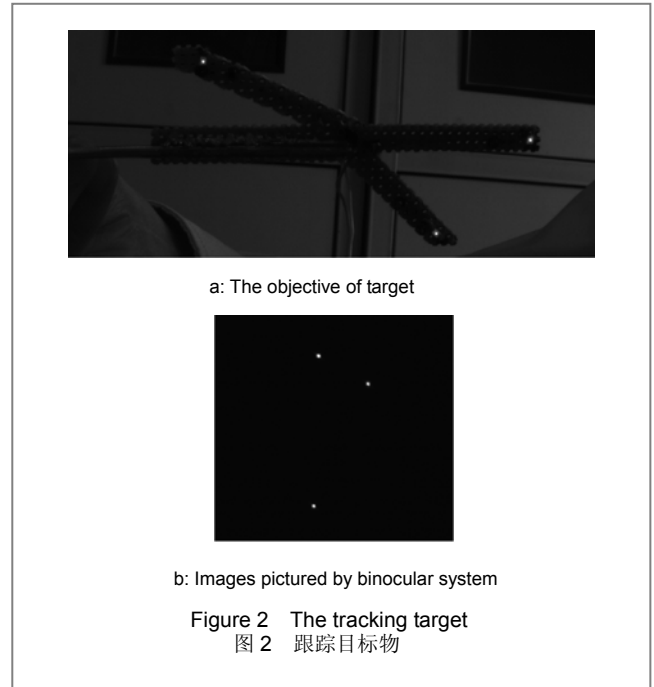
伪点的突变性可用距离约束关系表征。假设 t_0 时刻 P_1 、 P_2 的坐标位置分别为 W_1 、 W_2 , 在相邻的下一时刻 t_1 两点位置关系发生变化, 此时它们的坐标位置分别为 W_3 、 W_4 。同时出现图1中 $P_1P_2//C_1C_r$ 的情况, 则在初始匹配过程中形成伪匹配对。伪匹配对对应的光线也将空间相交产生 t_1 时刻的伪点 Q_1 、 Q_2 , 其空间位置坐标也可通过式(1)~(5)计算求得并记为 M_1 、 M_2 。而在 t_0 时刻 P_2 不在 P_1 确定的极平面 Π 上, 则 P_2 对应的特征点 p_{2l} 、 p_{2r} 均不属于点集 p 。即在 t_1 时刻初始匹配过程中产生伪点的伪匹配对不存在于 t_0 时刻, 则存在的距离约束关系如下:

$$\begin{cases} |M_1 - W_i| < |W_3 - W_i| \\ |M_2 - W_i| < |W_4 - W_i| \end{cases} \quad (8)$$

其中 $i=1, 2$ 。通过式(8)将 t_1 时刻的伪点剔除, 同时可将其对应的伪匹配对剔除, 从而保留正确的匹配对。

4 实验结果

实验中采用两台型号为MV-130UM的摄像机构成双目视觉立体系统, 并在摄像机CCD前放置一近红外滤光片, 使其只能感应到近红外波段, 进而滤除环境光的影响。整个系统在前期工作中已标定, 即摄像机的参数信息及各个坐标系之间的变换关系已知。实验中跟踪的目标物是模拟手术导航中需跟踪的手术器械, 其上装有3个近红外发光管作为发光标记点, 可发射960 nm近红外波。如图2所示, 图2a是目标物的真实图像, 图2b是经双目视觉立体系统捕获的图像。由于滤除了环境光, 图像背景为黑色。



图像上的光点是目标物上发光标记点对应的特征点, 可通过文献[11]中方法提取亚像素坐标。任意两发光管的距离已在前期工作中通过普通光学双目视觉立体系统精确测出, 其真实距离值可分别记为 $D_1=91.5381$ cm、 $D_2=81.7491$ cm、 $D_3=36.6886$ cm。

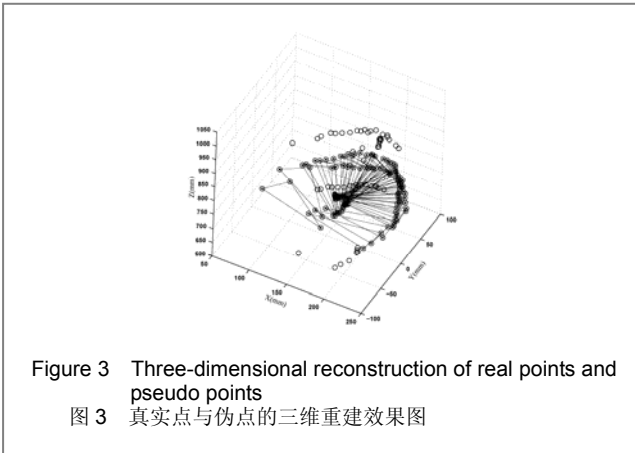
实验中将目标物在双目视觉立体系统的有效视场内移动, 并连续拍摄40组图像进行测试。在提取图像中特征点时采用自动搜索的方式, 并选取 $\delta=0.0025$, 初始匹配可得符合式(7)的候选匹配对。以其中一幅图像为例, 匹配结果见表1所示。

表1 初始匹配结果(+匹配; -不匹配)
Table 1 The initial match result (+ represents matching; - represents not)

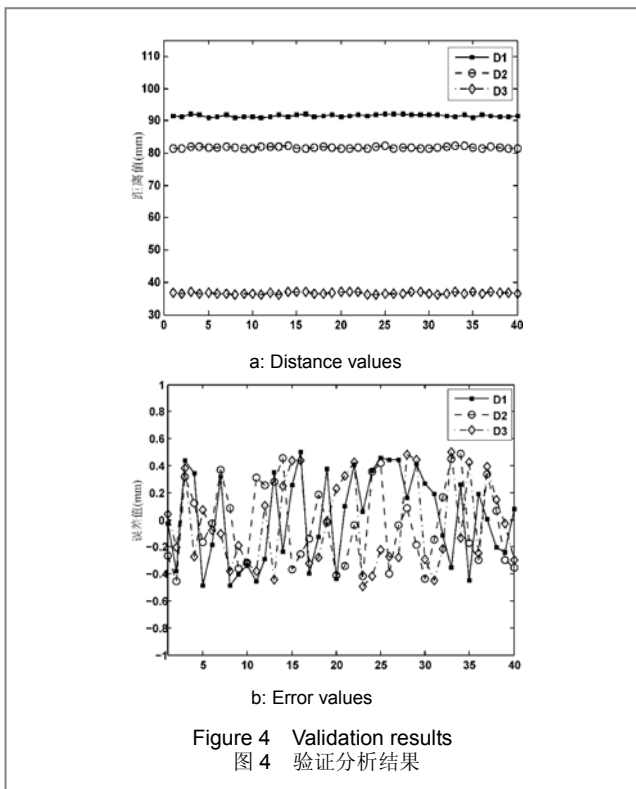
Right	Left		
	1	2	3
1	+	+	-
2	+	+	-
3	-	-	+

表中1, 2, 3表示自动搜索到特征点的顺序, 但左右图像中对应特征点的顺序并不一致。其中 $3 \leftrightarrow 3$ 是一一对应且惟一, 则左图像搜索到的第3点与右图像第3点对应同一个发光标记点。

对于剩余的候选匹配对求取空间三维坐标, 并比较与前一时刻的三个真实点的距离关系。实验表明 $1 \leftrightarrow 2$ 和 $2 \leftrightarrow 1$ 对应伪点并予以剔除。最后将正确的匹配关系及真实点三维坐标保存, 并作为下一幅图像的比较基准。40组图像的测试结果如图3所示。图中孤立的 \circ 为匹配过程中的伪点, 通过直线连接组成三角形的实点为真实点。同时图中也显示了目标物的运动轨迹。



为了进一步验证所使用匹配方法的正确性, 实验中将最终的匹配结果对应的每一组3个发光点两两求距离并分析其与真实距离值的误差。图4a显示了40组求得的距离值, 其中■对应 D_1 , ○对应 D_2 , ◇对应 D_3 。距离误差分布见图4b, 平均误差是0.284 4 mm, 平均相对误差为0.48%。实验数据表明本文提出的立体匹配方法能够正确去除伪匹配对。



5 结论

本文利用匹配特征点对应的光线共面的性质筛选出可能的匹配对, 再结合伪点的突变特性剔除伪匹配对实现立体匹配。该方法不仅解决了光学定位系统的跟踪目标物的图像特征相似, 缺少场景纹理信息的问题, 也减小了立体匹配的搜索区域, 对提高光学定位系统的定

位精度具有重要意义。同时在匹配过程中计算了三维坐标, 进一步提高了光学定位系统的跟踪效率。实验结果表明, 方法简单可行, 准确地实现了光学定位系统中的立体匹配。

6 参考文献

- [1] Sun JA, Liu JB, Zhao J, et al. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2001; 18(3): 475-479.
孙九爱, 刘聚卑, 赵俊, 等. 计算机辅助外科手术中立体定位技术的研究进展[J]. 生物医学工程杂志, 2001, 18 (3): 475-479.
- [2] Huo YM, Yan YL, Sun JA, et al. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2002; 21(3): 230-234.
霍彦明, 严勇兰, 孙九爱, 等. 手术导航中精度问题的研究[J]. 北京生物医学工程, 2002, 21(3): 230-234.
- [3] Zhang WQ, Dai R, Wang ZX. Yiyong Shengwu Lixue. 2004; 19(1): 51-56.
张文强, 戴戎, 王志焘. 外科手术导航系统的研究现状及进展[J]. 医用生物力学, 2004, 19(1): 51-56.
- [4] Chen J. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
陈江. 二目立体测量系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [5] Gao HW, Li B, Liang Y, et al. Jishuanji Gongcheng. 2008; 34(20): 210-213.
高宏伟, 李斌, 梁英, 等. 立体视觉中误匹配滤波方法的研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(20): 210-213.
- [6] Wang L, Zhang L, Ai HB. Shandong Keji Daxue Xuebao. 2011; 30(1): 16-21.
王琳, 张力, 艾海滨. 一种基于基本矩阵估计的立体视觉中滤除误匹配的方法[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(1): 16-21.
- [7] Zhao MF, Shen BX, Wu XM, et al. Zhongguo Jiliang Xueyuan Xuebao. 2003; 14(2): 89-94.
赵梅芳, 沈邦兴, 吴晓明, 等. 多目立体视觉测量系统中的快速去伪匹配法[J]. 中国计量学院学报, 2003, 14(2): 89-94.
- [8] Knappe P, Gross I, Pieck S, et al. Position control of a surgical robot by a navigation system. Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003.
- [9] Yang RQ, Chen YZ. Design of a 3-D Infrared Imaging System Using Structured Light. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011; 60(2): 608-618.
- [10] Zhao LL. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2007.
赵亮亮. 双目立体视觉中的图像匹配技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [11] Yang RQ, Cheng S, Chen YZ. Flexible and accurate implementation of a binocular structured light system. Optics and Lasers in Engineering. 2008; 46: 373-379.

来自本文课题的更多信息--

基金声明: 华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金(2009ZM0235)。

作者贡献: 实验设计为刘素娟, 实验实施为刘素娟, 实验评估为杨荣骞, 资料收集为刘素娟。刘素娟成文, 吴效明, 杨荣骞审核, 杨荣骞对文章负责。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理要求: 没有与相关伦理道德冲突的内容。

本文创新性: 以往相关研究主要基于特征点的匹配, 存在计算量大, 过程费时、繁琐等问题。而且当特征点相似, 图像物理场景纹理较少时, 无法解决匹配过程中存在的多义性问题。针对存在的问题, 本文设计了有创新性的两步匹配方法。第一步, 利用极平面与光线向量的关系进行初始匹配, 获得一系列的候选匹配对, 其中正确的匹配对反映真实的点, 错误的匹配对(伪匹配)反映伪点。第二步, 结合伪点的突变性去除伪匹配。与现有的方法相比, 本文提出的方法计算量小, 过程简单, 更适合特征点相似, 场景纹理少的情况。