

## 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统

王天宇<sup>1</sup>, 董文博<sup>2,3</sup>, 王震宇<sup>1</sup>

- (1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206;
2. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;
3. 中国科学院太空应用重点实验室, 北京 100094)

**摘要:**利用计算机视觉进行位姿测量的方法广泛应用于机器人系统、运动体控制系统和精密检测系统。研究和设计了一种基于固定靶标的单目视觉定位系统和方法,用最少硬件资源实现精密定位。首先,利用图像匹配的方法检测出平面靶标在图像中的坐标,图像匹配采用 SIFT 算法和映射匹配方法,之后利用固定靶标的特性求取中心点。实验利用多幅图像样本验证了图像匹配的准确性和鲁棒性。然后,针对呈矩形分布的 PnP 问题,提出了一种新的求解方法,以靶标控制点的图像坐标和空间坐标作为输入,得到了移动物体与摄像机的三维相对位姿。实验利用五维精密位移台移动目标物体并拍摄多副图像,结果表明位姿测量系统在 800 mm 范围内达到 mm 级精度,可以满足应用需求。

**关键词:** 计算机视觉; 单目视觉定位; 图像匹配; PnP 问题

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0427003

## Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target

Wang Tianyu<sup>1</sup>, Dong Wenbo<sup>2,3</sup>, Wang Zhenyu<sup>1</sup>

- (1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. Key Laboratory for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The position and orientation measurement system based on computer vision is extensively applied on robotics, motion control and precision detection systems. Using the minimum hardware resource, a localization system based on mono-vision and manual planar target was designed and the method of image matching and position resolving was also studied. Firstly, the object detection based on image matching was used to get the coordinate of the planar target in image. The matching was based on SIFT features and projection estimation to detect the target in image, and then the accurate coordinate of the target's center was calculated by some inherent shape information. A number of image samples were used to validate the accuracy and robustness of the image matching algorithm.

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61573139); 国家科技重大专项-载人航天与探月工程

作者简介: 王天宇(1991-), 男, 博士生, 主要从事计算机视觉和模式识别方面的研究。Email: tywang@ncepu.edu.cn

通讯作者: 董文博(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事精密测量与控制、空间实验载荷支持、空间电子学等方面的研究。

Email: wbodong@csu.ac.cn

王震宇(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事计算机视觉和模式识别等方面的研究。Email: zywang@ncepu.edu.cn

Secondly, a new method to solve the PnP problem based on the rectangular distribution was proposed. The method uses the locations of target control points in the image coordinate system and the object coordinate system was used to get the relative position and orientation between the moving object and the camera. The experiment was conducted on the 5D precision displacement stage and results show that the system can achieve the accuracy level of mm in the range of 800mm, which meets the project requirement.

**Key words:** computer vision; mono-vision localization; image matching; PnP problem

## 0 引言

位姿测量是实现机器人或运动体控制系统行为决策和自主运动的前提。其中,基于摄像机的视觉系统具有结构简单、测量范围大等特点,已得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。

视觉系统包括单目、双目、多目等方式,拍摄对象也包括人工设定靶标和自然特征靶标。人工设定靶标的目标检测更简单,可靠性更高,因此适用于固定场景下的位姿测量。利用单目视觉系统,配合靶标的先验信息,就可以解算物体在空间的相对位置和姿态,这是一种典型的方法。

单目视觉定位的核心问题是目标检测和位姿解算。在目标检测方面,以前的研究关注于从图像中提取线、轮廓或者 3D 表面,然后将它们和已知的 3D 物体模型匹配。但这些特征不能够应用于目标被部分遮挡或发生形变的情况<sup>[2]</sup>。近年来,基于局部特征的方法取得了显著的进展,有效的克服上述不足。K.Mikolajczyk 等人在不同的应用场景下进行了测试实验,比较了多种典型的局部特征(如 SIFT、互相关、矩不变量等 10 种)的性能,结果表明 David Lowe 提出的 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)的性能最佳<sup>[3]</sup>。该局部特征具有尺度、旋转、光照不变性,而且能够在一定的程度上抑制噪声、视角变化等影响<sup>[4]</sup>。王睿等对 SIFT 特征进行了改进,在其基础上融合了全局形状信息和颜色信息,提高了特征匹配的准确性和鲁棒性<sup>[5]</sup>。崔雄文等人提出了一种基于子空间模型的跟踪算法,利用距离不变量筛选 SIFT 特征点匹配对,并对 SIFT 特征点和 PCA 子空间进行实时更新,最终实现精确的目标检测和跟踪<sup>[6]</sup>。

位姿解算是基于摄像机数学模型,建立空间目

标特征与图像特征之间的对应投影关系,从而确定目标位姿信息的过程。常用的特征有点特征、直线特征等。其中,应用点特征进行位姿解算的问题统称为 PnP (Perspective-n-Point)问题。目前的研究已有如下结论:当  $n \leq 2$  时,已知条件不足,不能确定目标的位姿参数;而当  $n > 5$  时,该问题可应用线性求解的方法;当  $3 \leq n \leq 5$  时,PnP 问题通常都是非线性问题,可能具有多个解。刘昶等<sup>[7]</sup>提出了基于共面二点一线特征的方法,将位姿解算问题转换为求解一个二次方程问题,实现目标定位。但该方法会得到 2 个可能解,在实际应用中存在局限性。刘吟啸等人<sup>[8]</sup>提出了一种类似于 PnP 的目标点定位方法,利用任意 4 个空间点在两幅观测图像中的位置,求得目标点在空间中的三维坐标。参考文献[9]利用未知长宽比的矩形顶点对应的 4 个像点,通过一种非线性优化方法,对矩形目标进行位姿测量。参考文献[8]、[9]提出的方法均为非线性迭代求解。在迭代计算过程中,容易受到图像噪声的影响,当特征点提取精度不高的情况下,可能发生迭代不收敛的情况。

在位姿测量中,通常关注于如何利用最少的已知信息来求得问题的唯一解,因此, $3 \leq n \leq 5$  的 PnP 问题成为常见的研究对象。文中提出了一种呈矩形分布的 PnP 位姿测量方法,仅需 4 个特征点,即可求解目标物体与摄像机之间的相对位置和姿态。该方法易于实现,基于极少信息,即可实现位姿的线性求解,相对于传统算法,避免了非线性迭代的过程。

文中设计了一种基于靶标的单目定位系统。首先对该视觉系统的结构进行了概述,然后讨论了视觉定位的实现方法,主要包括靶标的设计与检测、摄像机参数的标定等,最后利用呈矩形分布的 4 个靶标特征点实现位姿测量。实验结果表明,在实际场景下,该系统能够完成对移动物体的定位工作,精度较高,具有一定的应用价值。

### 1 单目视觉定位系统概述

为了利用最少的硬件资源进行精密定位, 采用单目视觉系统, 结合人工靶标的先验信息进行物体位姿测量。硬件系统主要由实验台 1、移动物体 2、人工靶标 3、镜头 4、摄像机 5、光源 6、主控计算机 7、显示器 8 等组成, 如图 1 所示。在该系统中, 已知摄像机的位置, 建立坐标系。只要能获取物体在摄像机坐标系下的坐标, 即可实现两者相对位姿的信息。

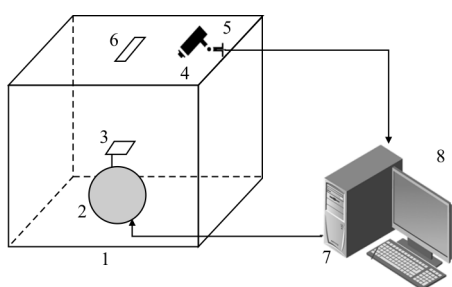


图 1 视觉系统概图

Fig.1 General picture of the vision system

视觉系统的软件和算法部分可分为图像采集、图像处理分析、位姿解算 3 个部分。图像采集模块控制摄像机拍摄原始图像。图像处理分析模块对获取的场景图像进行图像预处理、摄像机标定、目标检测, 得出已知靶标在图像中的坐标。位姿解算模块通过靶标的图像坐标和先验信息, 计算出目标与摄像机的相对位姿信息, 实现目标的视觉定位。

下面分别详细描述视觉定位系统中靶标的设计与检测、位姿解算等环节。

### 2 靶标的设计与检测

实际应用中, 目标物体通常形状不规则、体积较大、建模复杂, 因而不便于直接进行特征提取和视觉测量<sup>[10]</sup>。该系统利用人工平面靶标来辅助定位, 它可以被看作是目标物体位置、姿态的标识器。靶标的使用不但能够简化特征提取的难度, 还可以提高视觉测量的精度, 目前广泛应用于视觉测量系统中。

#### 2.1 靶标的设计

为了便于精密检测, 靶标应能够提取出数目可

观的 SIFT 特征, 用于图像匹配。根据课题需求, 设计的靶标如图 2 所示, 该靶标尺寸大小为 80mm×60mm, 具有较为复杂的纹理, 并且包含特征圆、特征线等信息, 易于获取靶标控制点的图像坐标。

在平面靶标上选定控制点  $P_0, P_1, P_2, P_3$  用于后续的位姿测量。为了便于理解, 将上述靶标图像简化, 其中  $P_0, P_1$  为线段端点,  $P_2, P_3$  为圆形标志的圆心, 靶标控制点之间空间位置关系已知,  $P_0P_1P_2P_3$  为矩形, 其中,  $P_0P_1 \parallel P_2P_3, P_0P_1 \perp P_2P_3$ 。

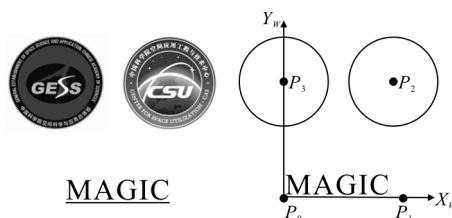


图 2 平面靶标及其特征图

Fig.2 Planar target and its feature diagram

靶标坐标系  $OX_wY_wZ_w$  的定义如下: 以靶标所在平面为  $X_wY_w$  平面, 原点为  $P_0, X_w$  轴为  $\overrightarrow{P_0P_1}, Y_w$  轴为  $\overrightarrow{P_0P_3}, Z_w$  轴方向垂直纸面向上, 由  $X_w$  轴和  $Y_w$  轴叉乘获得。

#### 2.2 靶标的检测

在待测图像中检测特定的靶标, 采用基于图像匹配的方法。首先拍摄靶标的模式图像, 该图像仅包含靶标, 以保证提取的特征点均为靶标特征。为方便表述, 将平面靶标的模式图像记为  $I_M$ , 将待测图像记为  $I_D$ 。一般来说,  $I_M$  与  $I_D$  之间为仿射变换, 其数学模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $(x, y)$  为模式图像  $I_M$  中点的坐标;  $(x', y')$  为待测图像  $I_D$  中对应点的坐标;  $\mathbf{H}$  为图像间的映射矩阵。

分别从模式图像和待测图像中提取特征, 并通过特征匹配策略求解映射矩阵  $\mathbf{H}$ , 建立特征点在两幅图像中的对应关系。

由公式(1)可知, 若得到模式图像中靶标控制点的像素坐标  $(x_i, y_i)$ , 便可求解出靶标控制点在待测图像中的坐标  $(x'_i, y'_i)$ , 实现目标检测。如图 3(a)所示, 具体实现步骤如下所述。

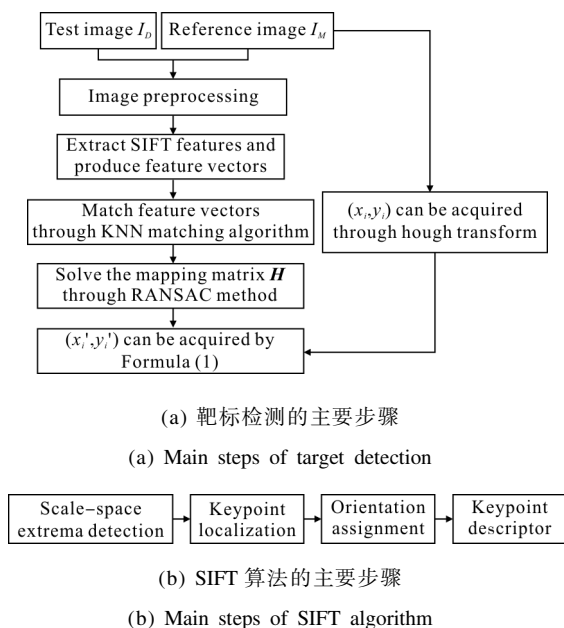


图 3 靶标检测流程图

Fig.3 Flow chart of target detection

2.2.1 图像预处理

为了消除原始图像的几何变形、图像失真等退化,便于后续的处理分析,文中对图像进行灰度化处理、平滑滤波、直方图均衡化及二值化等操作,改善图像的质量。

2.2.2 特征提取

采用 SIFT 算法分别对  $I_M$  和  $I_D$  进行特征提取,对于每个 SIFT 特征点,生成高维的特征向量,用于图像匹配。SIFT 算法的主要步骤如图 3(b)所示,具体实现可见参考文献[4]。

2.2.3 特征匹配

采用特征向量之间的欧氏距离判断两幅图像中特征点的相似性,将具有最小距离的两个特征点匹配起来。采用 KNN(K-Nearest-Neighbor)<sup>[11]</sup>匹配算法对特征向量进行匹配。之后,利用 RANSAC(Random Sample Consensus)<sup>[12]</sup>算法对匹配正确的特征点进行数据拟合,求解映射矩阵  $H$  的未知参数,从而建立特征点在两幅图像中的对应关系。

2.2.4 靶标控制点的坐标解算

利用 Hough 变换方法<sup>[13]</sup>提取模式图像中  $I_M$  的圆特征和线段特征,获取靶标控制点  $P_0、P_1、P_2、P_3$  的图像坐标  $(x_i, y_i)$ 。由公式(1)可知,将其与映射矩阵  $H$  相乘,可得到靶标控制点在待测图像  $I_D$  中的坐标  $(x_i', y_i')$ ,实现目标检测。

3 三维位姿解算

移动物体视觉定位的关键在于求解摄像机的外部参数矩阵。文中以 4 个靶标控制点  $P_0、P_1、P_2、P_3$  的空间坐标及其投影点  $q_0、q_1、q_2、q_3$  的图像坐标作为输入,通过求解呈矩形分布的 PnP 问题来进行位姿测量。

由摄像机成像模型可知,对于靶标上的某个空间点,假定其在靶标坐标系下的坐标为  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,在摄像机坐标系下的坐标为  $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,则坐标之间满足下述的变换关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$  为旋转矩阵;  $\mathbf{T} = (T_x, T_y, T_z)^T$  为平

移向量。

定义靶标坐标系的原点  $P_0$  代表移动物体的位置,求出其在摄像机坐标系的空间坐标(即平移向量  $\mathbf{T}$ )可得移动物体与摄像机的相对位置参数,而旋转矩阵  $\mathbf{R}$  表示相对姿态。

3.1 位姿解算问题的几何描述

结合前面的介绍,三维位姿测量问题可以进行如下表述,如图 4 所示。

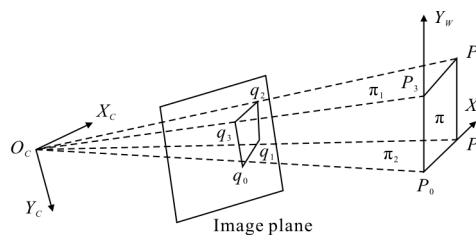


图 4 三维位姿测量问题示意图

Fig.4 Issue of 3D position and orientation measurement

(1) 已知控制点  $P_0、P_1、P_2、P_3$  均位于平面靶标  $\pi$  上,在像平面上的对应点分别为  $q_0、q_1、q_2、q_3$ ,  $P_0P_1P_2P_3$  为矩形,其中  $P_0P_1 \perp P_0P_3$ ,  $P_0P_1 // P_2P_3$ ,  $|P_0P_1| = d_1$ ,  $|P_2P_3| = d_2$ ;

(2)  $P_0、P_1、P_2、P_3$  在靶标坐标系下的空间坐标已知,  $q_0、q_1、q_2、q_3$  在图像坐标系下的像素坐标已知;

(3) 摄像机成像模型的内参数矩阵  $\mathbf{A}$  已知。

求:靶标坐标系与摄像机坐标系之间的几何变换,即公式(2)中的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ 。

### 3.2 呈矩形分布的 PnP 问题求解方法

像平面上靶标控制点在摄像机坐标系下的坐标分别为  $q_0(x_0, y_0, f)$ 、 $q_1(x_1, y_1, f)$ 、 $q_2(x_2, y_2, f)$ 、 $q_3(x_3, y_3, f)$ , 其中  $f$  为摄像机焦距。设光心  $O_C$  与  $q_2, q_3$  形成的平面为  $\pi_1$ , 由  $q_2, q_3$  的直线方程和摄像机内参数可以计算出  $\pi_1$  的标准法向量  $N_1$ , 记  $N_1 = (n_x, n_y, n_z)^T$ 。由于  $P_0, P_1 // \pi_1$ , 可知  $N_1^T \cdot \overrightarrow{P_0 P_1} = 0$ 。令  $k_0 = \frac{|O_C P_0|}{|O_C q_0|}$ ,  $k_1 = \frac{|O_C P_1|}{|O_C q_1|}$ , 分别表征光心到靶标控制点  $P_0, P_1$  的距离与光心到像点  $q_0, q_1$  距离的比值, 则

$$\overrightarrow{P_0 P_1} = \overrightarrow{O P_1} - \overrightarrow{O P_0} = k_1 \overrightarrow{O q_1} - k_0 \overrightarrow{O q_0}$$

可得:

$$(k_1 x_1 - k_0 x_0) \cdot n_x + (k_1 y_1 - k_0 y_0) \cdot n_y + (k_1 f - k_0 f) \cdot n_z = 0 \quad (3)$$

整理, 记

$$h = \frac{k_1}{k_0} = \frac{n_x x_0 + n_y y_0 + n_z f}{n_x x_1 + n_y y_1 + n_z f}$$

由  $|P_0 P_1| = d_1$ , 可知:

$$\sqrt{(k_1 x_1 - k_0 x_0)^2 + (k_1 y_1 - k_0 y_0)^2 + (k_1 f - k_0 f)^2} = d_1 \quad (4)$$

由公式(3)~(4)可计算出  $k_0, k_1$ 。因而, 可得到  $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$ ,  $P_1(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1})$  在摄像机坐标系下的坐标, 即  $(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0}) = (k_0 x_0, k_0 y_0, k_0 f)$ ,  $(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1}) = (k_1 x_1, k_1 y_1, k_1 f)$ 。

同理, 可求得靶标控制点  $P_2, P_3$  在摄像机坐标系下的坐标。记光心  $O_C$  与  $q_0, q_1$  形成的平面为  $\pi_2$ , 求出其  $\pi_2$  的标准法向量  $N_2$ , 由  $P_2, P_3 // \pi_2$ , 可得到  $N_2^T \cdot \overrightarrow{P_2 P_3} = 0$ 。令  $k_2 = \frac{|O_C P_2|}{|O_C q_2|}$ ,  $k_3 = \frac{|O_C P_3|}{|O_C q_3|}$ , 分别表征光心到靶标控制点  $P_2, P_3$  的距离与光心到像点  $q_2, q_3$  距离的比值。结合  $|P_2 P_3| = d_2$  的信息, 求出  $k_2, k_3$ , 可得到  $(x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2}) = (k_2 x_2, k_2 y_2, k_2 f)$ ,  $(x_{P_3}, y_{P_3}, z_{P_3}) = (k_3 x_3, k_3 y_3, k_3 f)$ 。

至此, 求出了 4 个靶标控制点在摄像机坐标系下的空间坐标。

其中,  $P_0$  为靶标坐标系的原点, 它在摄像机坐标系下的空间坐标即为平移向量, 即  $T = (x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})^T$ , 从而得到移动物体与摄像机的相对位置参数。

靶标坐标系的  $X_w$  轴在摄像机坐标系下的方向为:

$$\overrightarrow{P_0 P_1} = \overrightarrow{O P_1} - \overrightarrow{O P_0} = (x_{P_1} - x_{P_0}, y_{P_1} - y_{P_0}, z_{P_1} - z_{P_0}) \quad (5)$$

将该向量标准化, 记为  $(r_{11}, r_{21}, r_{31})$ , 它是旋转矩阵  $R$  的第一个列向量。

靶标坐标系的  $Y_w$  轴在摄像机坐标系下的方向可表示为:

$$\overrightarrow{P_0 P_3} = \overrightarrow{O P_3} - \overrightarrow{O P_0} = (x_{P_3} - x_{P_0}, y_{P_3} - y_{P_0}, z_{P_3} - z_{P_0}) \quad (6)$$

将该向量标准化, 记为  $(r_{12}, r_{22}, r_{32})$ , 它是旋转矩阵  $R$  的第二个列向量。

靶标坐标系的  $Z_w$  轴在摄像机坐标系下的方向向量  $(r_{13}, r_{23}, r_{33})$  可由  $X_w, Y_w$  轴在摄像机坐标系下的方向向量进行叉乘运算来得到, 即:

$$(r_{13}, r_{23}, r_{33}) = (r_{11}, r_{21}, r_{31}) \times (r_{12}, r_{22}, r_{32}) \quad (7)$$

至此, 得到  $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$ , 获得了靶标坐标系与

摄像机坐标系的旋转矩阵, 求解出移动物体在摄像机坐标系下的姿态参数。

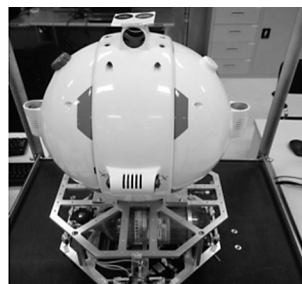
最终, 该视觉系统实现了对移动物体的定位, 得到位姿参数的唯一解。

## 4 实验结果

文中所设计的基于靶标的单目视觉定位系统应用于中国科学院空间应用工程与技术中心所研制的空间舱内机器人, 见下文。视觉系统采用 Basler 工业摄像机 ACA1300-30gc, 镜头选择 computar H0514-MP2, 焦距 5 mm。

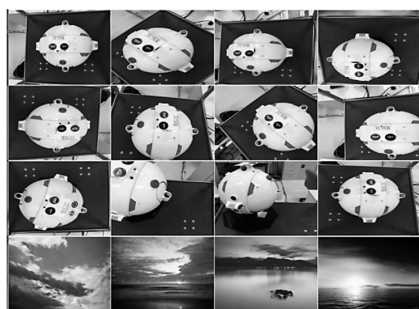
### 4.1 靶标检测实验

文中对 800 张待测图像进行了目标检测实验, 其中真图像 200 幅, 都通过实际采集获得; 假图像 600 幅, 采用各类无关照片。待测图像样本库示例如图 5(a)所示。为了提高靶标检测的计算效率, 减少每帧图像的处理时间, 实际处理时, 将图像尺寸大小调整为  $160 \times 120$ , 部分样本图像如图 5(b)所示, 实验结果如表 1 所示。



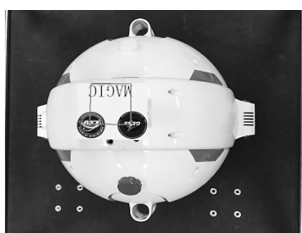
(a) 空间舱内机器人原型图

(a) Picture of space cabin robot prototype



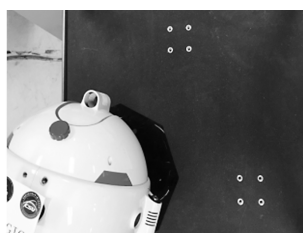
(b) 图像样本库示例

(b) Image sample for target detection



(c) 正确检测的图像

(c) Correct detected image



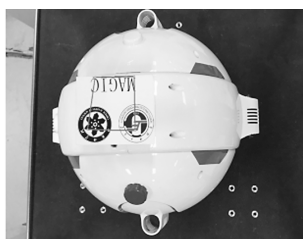
(d) 漏检图像 1

(d) Missing detected image 1



(e) 漏检图像 2

(e) Missing detected image 2



(f) 误检图像

(f) False detected image

图 5 靶标检测示意图

Fig.5 Diagram of target detection

表 1 图像检测结果(样本总数 800)

Tab.1 Result of image detecting (sample number 800)

Detection result	Number of images	Detection rate
Correct detection	795	98.75%
False detection	2	0.25%
Missed detection	8	1%

观察出现漏检的图像，主要是靶标遮挡严重，图像尺度或偏角变化太大等原因导致的，如图 5(d)、(e) 所示。出现误检的图像主要是因为图像纹理复杂，存在与靶标极为相似的图形，如图 5(f)所示。鉴于实际的应用场景较为简单，因而算法的误检率较低。

该实验环境参数如下：主控计算机 CPU 为 Intel 酷睿 i53210M 2.5 GHz，内存 2 GB，显存 32 M，操作系统为 Windows 7，软件开发环境为 Visual Studio 2010。应用文中算法处理以上 800 张图像分辨率为 160×120 的待测图像，总耗时为 158.514 s，每张图像平均耗时大约为 0.198 s，能够满足工程项目对实时性的要求。

靶标检测算法的时间效率与检测精度之间存在着一定的矛盾。该算法主要运算量在于特征提取和特征匹配。提取到的特征点越多，检测的精度越高；相应地，算法耗时越大。在保证检测精度的前提下，提高算法的时间效率，达到靶标检测准确性和实时性的统一，是下一步要考虑的问题。可以考虑对特征向量进行简化，优化特征匹配过程。

#### 4.2 摄像机内参数标定实验

文中以 Matlab2010a 作为软件开发环境，采用 Zhang Z.Y<sup>[14]</sup>提出的基于 2D 平面靶标的标定方法进行摄像机内参数标定。2D 平面靶标选择宏诚光学有限公司制作的黑白棋盘格标定板，方格边长为 5 cm。

从不同角度拍摄 20 张棋盘格图像用于摄像机内参数的标定，标定结果如表 2 所示。其中  $\alpha_x = f/dX$ ，为  $u$  轴上归一化焦距， $\alpha_y = f/dY$  为  $v$  轴上归一化焦距， $\gamma$  是不垂直因子； $u_0$ 、 $v_0$  为光心在像平面的像素坐标； $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 、 $\gamma$  只与摄像机内部结构有关。

表 2 摄像机内参数标定结果

Tab.2 Inner parameter calibration of the camera calibration

$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\gamma$	$u_0$	$v_0$	$k_1$	$k_2$
1 338.8	1 345.02	0	618.15	475.73	-0.11	0.12

#### 4.3 定位实验

选择步进电机控制器 SC100 和精密电控五维旋转台 MRS103 作为测试设备，验证提出的三维解算方法的有效性。实验中，将靶标布置在电控旋转台上，标定出靶标相对于摄像机的位置、姿态参数，然后拍摄图像进行测试。

(1) 对单幅图像进行位姿测量，测试图像如图 6 所示。 $P_0$  的空间坐标  $(x_C, y_C, z_C)$  表征靶标的位置，以欧拉角表示旋转矩阵，旋转按  $z_C$  轴、 $y_C$  轴、 $x_C$  轴的次序，对应的旋转角度分别表示为  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\psi$ 。分别利用文

中方法(记为方法 1)与参考文献[7]提出的基于二点一线特征的位姿定位方法(记为方法 2)计算靶标的位置和姿态,与旋转台的位姿控制结果相对比。由于基于二点一线特征的位姿定位方法会得到 2 个可能的解,这里笔者只选择该方法得到的正确解。实验结果如表 3 所示。



图 6 用于位姿测量的测试图像

Fig.6 Test image for pose measurement

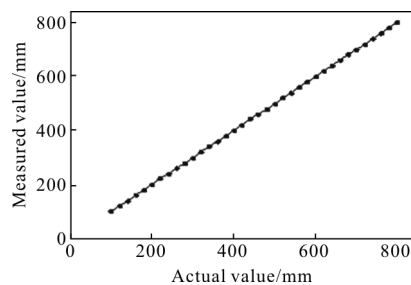
表 3 物体位姿测量结果

Tab.3 Position and orientation measurement results of object

Pose parameter	$x_c/mm$	$y_c/mm$	$z_c/mm$	$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$\psi/(\circ)$
Actual value	-70	-20	600	30	30	10
Measured value (method 1)	-71.16	-20.54	601.58	30.25	29.54	10.44
Measured error (method 1)	-1.16	-0.54	1.58	0.25	-0.46	0.44
Measured value (method 2)	-71.42	-20.82	597.33	30.25	28.79	8.93
Measured error (method 2)	-1.42	-0.82	-2.67	0.25	-1.21	-1.07

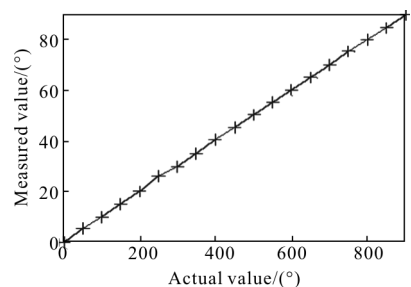
由表 3 可知,相比于参考文献[7]提出的位姿定位方法,文中方法的位姿测量精度较高,且可以得到位姿的唯一解,能够更好地应用于实际的工程项目。

(2) 对多幅标定好位置和姿态的待测图像进行测试。首先改变目标与摄像机之间的距离  $z_c$ ,实验结果如图 7(a)所示,平移参数  $x_c, y_c$  的测量结果与之类似;然后,测量靶标绕  $z_c$  轴旋转的欧拉角  $\theta$  和靶标绕  $y_c$  轴旋转的欧拉角  $\varphi$ ,实验结果如图 7(b)、(c)所示。



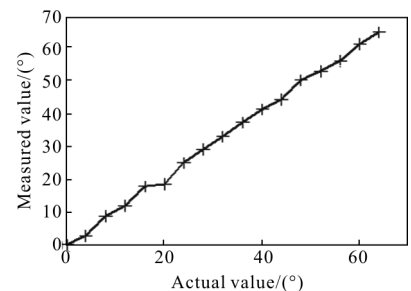
(a) 距离  $z_c$  的测量结果

(a) Measurement results of distance  $z_c$



(b) 旋转角度  $\theta$  的测量

(b) Measurement results of rotation angle  $\theta$



(c) 旋转角度  $\varphi$  的测量

(c) Measurement results of rotation angle  $\varphi$

图 7 位姿测量结果

Fig.7 Position and orientation measurement results

实验得到了较为理想的结果,测量数据与实际数据相差不大,平移参数的误差在 mm 级(在 100~800 mm 范围内),旋转角度的误差不超过  $2^\circ$ ( $\varphi$  在  $0\sim 64^\circ$  范围内),实验结果可以满足系统的指标。

从结果也可以看出,绕  $z_c$  轴旋转的欧拉角  $\theta$  非常准确。而靶标绕  $y_c$  轴旋转的欧拉角  $\varphi$  在角度较小和较大的地方都要稍差一点。究其原因,是因为角度过大时图像畸变严重,像素点的检测精度下降,而角度过小时图像的变化很小。因此,在欧拉角  $\varphi$  的测量上只有中间的角度测量最准确。为提高位姿测量的精度,在靶标绕  $y_c$  轴旋转的角度过大或过小的情况下,如何进行更精确的目标检测是下一步要研究的重点。

## 5 结论

文中研究和设计了一种基于靶标的单目视觉定位系统。根据测量需求,制作了一种特定的平面靶标,有效的降低了特征提取难度,提高了测量精度。利用基于 SIFT 的图像匹配方法获取靶标控制点在待测图像中的坐标,实现了目标检测。提出了一种三维位姿解算方法,能够求解呈矩形分布的 PnP 问题,得到移动物体的位置和姿态。实验结果验证了视觉系统的有效性,具有较高的定位精度和鲁棒性,可应用于对精密测量有需求的场合。

## 参考文献:

- [1] Wang Zhiqiang, Cheng Hong, Yang Guang, et al. Fast target location method of global image registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 225-229. (in Chinese)  
王志强,程红,杨桃,等.全局图像配准的目标快速定位方法[J].*红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 225-229.
- [2] Gao Wen, Zhu Ming, He Baigen, et al. Overview of target tracking technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 365-375. (in Chinese)  
高文,朱明,贺柏根,等.目标跟踪技术综述[J].*中国光学*, 2014, 7(3): 365-375.
- [3] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [4] Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [5] Wang Rui, Zhu Zhengdan. SIFT matching with color invariant characteristics and global context [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 295-301. (in Chinese)  
王睿,朱正丹.融合全局-颜色信息的尺度不变特征变换[J].*光学精密工程*, 2015, 23(1): 295-301.
- [6] Cui Xiongwen, Wu Qinzhong, Jiang Ping, et al. Affine-invariant target tracking based on subspace representation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (2): 769-774. (in Chinese)  
崔雄文,吴钦章,蒋平,等.子空间模型下的仿射不变目标跟踪[J].*红外与激光工程*, 2015, 44(2): 769-774.
- [7] Liu Chang, Zhu Feng, Xia Renbo. Monocular pose determination from coplanar two points and one line features [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29 (8): 3145-3147. (in Chinese)  
刘昶,朱枫,夏仁波.基于共面二点一线特征的单目视觉定位[J].*计算机应用研究*, 2012, 29(8): 3145-3147.
- [8] Liu Yinxiao, Wei Wei. Target points positioning algorithm based on rare information in uncalibrated camera's photos[J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(1): 272-275. (in Chinese)  
刘吟啸,韦巍.基于极少信息的任意照片目标点定位算法[J].*计算机应用研究*, 2015, 32(1): 272-275.
- [9] Xiao Xizhen, Li Wentao, Tang Yandong, et al. Position-pose measurement of rectangle with unknown aspect ratio based on nonlinear optimization [J]. *Information and Control*, 2016, 45(1): 108-113. (in Chinese)  
肖锡臻,李文涛,唐延东,等.基于非线性优化的长宽比未知矩形的位姿测量[J].*信息与控制*, 2016, 45(01): 108-113.
- [10] Li Ying, Ye Peijian, Peng Jing, et al. Artificial target recognition and location based on Mars exploration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 566-572. (in Chinese)  
李莹,叶培建,彭兢,等.基于火星探测的人工标志识别定位[J].*光学精密工程*, 2015, 23(2): 566-572.
- [11] Hastie T, Tibshirani R. Discriminant adaptive nearest neighbor classification[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(6): 607-616.
- [12] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Comm of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [13] Hough P V C. Methods and means for recognizing complex patterns: US, 3069654[P]. 1962-12-18.
- [14] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.