

## 气浮实验台位姿视觉测量方法

刘宇航<sup>1,2</sup>, 顾营迎<sup>1</sup>, 李昂<sup>1,2</sup>, 李大为<sup>1</sup>, 徐振邦<sup>1</sup>, 刘宏伟<sup>1</sup>, 吴清文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间机器人工程中心 空间机器人系统创新研究室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了实现气浮实验台位姿的实时确定, 提出了一种基于单目视觉的位姿测量方法。首先, 设计了一种具有旋转、平移、缩放不变性且易于探测的圆形合作靶标; 其次, 结合靶标尺寸、形状以及安装位置, 基于 Blob 分析快速识别合作靶标, 保证了定位点提取的准确性; 然后, 提出一种在待识别区域内进行“行、列”扫描统计的靶标圆心测量算法, 实现靶标圆心的快速、鲁棒提取; 最后, 结合计算机坐标系下的圆心位置以及视觉测量系统中坐标变换关系, 解算气浮实验台的实际位姿。实验结果表明: 该方法测量位姿精度较高, 抗噪能力强, 在处理 1 600 pixel×1 600 pixel 图片的情况下, 平均测量周期为 53.086 ms(约 19 帧/s), 能够实现对气浮实验台位姿实时、精确、鲁棒的测量。

**关键词:** 气浮实验台; 计算机视觉; 位姿解算; 靶标识别; 圆心提取

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017005

## Pose visual measurement of the flotation experiment platform

Liu Yuhang<sup>1,2</sup>, Gu Yingying<sup>1</sup>, Li Ang<sup>1,2</sup>, Li Dawei<sup>1</sup>, Xu Zhenbang<sup>1</sup>, Liu Hongwei<sup>1</sup>, Wu Qingwen<sup>1</sup>

(1. Innovation Lab of Space Robot System, Space Robot Engineering Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to realize the real-time pose determination of the flotation experiment platform, a pose measurement method based on monocular vision was proposed. Firstly, an easily identifiable circular cooperative target was designed, which was invariant to the rotation, translation and scaling. Then, combining the size, shape and installation location, the cooperative target could be detected fast based on Blob analysis which could ensure the accuracy of the point extraction. Next, a method was proposed to extract the object circle centers fast and robustly by scanning the connected domains to be recognized. Finally, the actual pose of the flotation experiment platform could be calculated by the circle centers in the computer image coordinate system and the relations of coordinate transformation of the vision-based pose measurement system. The results showed that the proposed method had high accuracy and strong anti-noise capability, and the average period of processing the image of 1 600 pixel×1 600 pixel was 53.086 ms (about 19 frames per second). The method can realize the real-time, accurate and robust measurement of the pose of the flotation experiment platform.

**Key words:** flotation experiment platform; computer vision; pose calculation; target recognition; center extraction

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(11672290)

作者简介: 刘宇航(1992-), 女, 硕士生, 主要从事机器视觉以及机器人智能控制等方面的研究。Email: 18713509653@163.com

导师简介: 顾营迎(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事机器人视觉感知与运动控制等方面的研究。Email: gu007623@163.com

## 0 引言

气浮实验台是对卫星等航天器进行地面试验的特有装置<sup>[1]</sup>,可以近似模拟出外太空环境下航天器微重力、零摩擦的空间活动<sup>[2]</sup>,是一种全物理仿真验证方式,能够克服数学仿真中对实物部件精确建模困难的问题,对于验证航天器控制方式以及实际性能有着十分重要的意义<sup>[3]</sup>。文中主要研究气浮实验台的第三方位姿测量系统,该系统主要用于确定气浮航天器模拟器相对大理石平台的绝对位置和绝对姿态;确定航天器模拟器之间的相对位置和相对姿态;对相对运动控制仿真结果进行评估和标定。为了更真实的模拟卫星在轨不受外力、力矩干扰的自由漂浮状态,气浮实验台不能与地面设备有任何的物理连接,因此其位置及姿态信息通过非接触的方式获得将是一种较好的测量方案。加州工学院的 Jet Propulsion 实验室通过配置陀螺仪和星象跟踪仪,在室内屋顶建立 LED 星图进行气浮实验台姿态确定<sup>[4-5]</sup>,这种方法价格昂贵,对于小型低成本气浮实验台并不适用;麻省理工学院开发的应用于 SPHERES 微小卫星气浮台,通过配置超声波信标以及超声波接收器来确定位姿<sup>[6-7]</sup>,这种方式节省了成本,但需要设计复杂的位姿解算算法,实现较为困难。

文中设计了一种基于单目视觉的位姿测量方案,与已有气浮实验台位姿测量方案相比,其具有低成本、实现简单、需要辅助设备少等优点。首先在气浮实验台上安装合作靶标,然后进行靶标圆心提取,结合推导的各坐标系对应关系,实现对气浮实验台位姿的测量。文中提出的基于像素扫描的圆心提取算法,与现有的圆心提取算法相比具有计算量小、速度快、精度高等特点,保证了图像中合作靶标的定位精度。实验结果表明单目视觉位姿测量方案满足气浮实验台位姿测量高精度、实时、鲁棒的位姿测量要求。

## 1 视觉测量系统工作原理

### 1.1 视觉测量系统构成

视觉测量系统如图 1 所示,气浮实验台放置在大理石台面上,共有 3 个自由度,包括沿 X 向和 Y 向的两个平移自由度和一个绕 Z 轴的旋转自由度。在气浮实验台面固定位置处安装合作靶标,并在大理

石平台上方安装摄像机。上位机通过摄像机采集的含有合作靶标图像进而识别出靶标并提取圆心作为定位点,通过坐标变换就可以计算气浮实验台中心的位置坐标以及绕偏航轴旋转的角度。

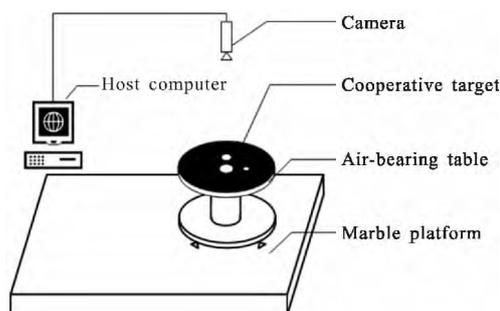


图 1 视觉测量系统

Fig.1 Vision-based pose measurement system

### 1.2 靶标设计

在气浮实验台上安装合作靶标,通过对靶标位姿的测量实现对气浮台位姿的测量。文中视觉测量系统中的合作靶标如图 2(a)所示,其设计原则如下:(1) 根据靶标旋转、平移和缩放不变性的原则,将其设计为圆形;(2) 为保证每次检测到的定位点个数固定且编号准确,设计 3 个半径不同的白色实心圆形,各圆心即为定位点;(3) 根据靶标易于探测和识别的原则,将整体设计为黑色背景区和白色圆形目标区两部分,黑色背景用来与黑色大理石平台相统一,并与白色圆形目标形成较大的对比度。

中心圆形 A 的圆心,是整个靶标的定位中心。3 个白色圆形目标的半径大小关系为  $R_A > R_B > R_C$ , 圆心连线构成腰长为 L 的等腰直角三角形,如图 2(b)所示。

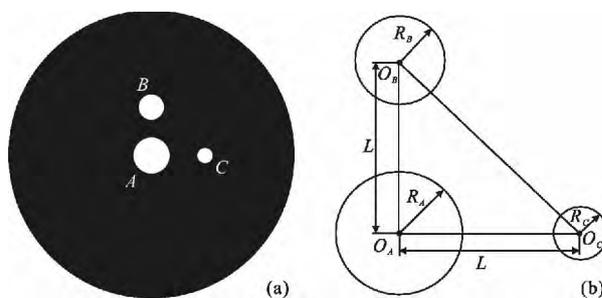


图 2 合作靶标设计图

Fig.2 Design diagram of cooperative target

### 1.3 坐标系关系

文中涉及到 5 个相关坐标系:世界坐标系(w 系)、

气浮实验台坐标系( $b$ 系)、摄像机坐标系( $c$ 系)、像平面坐标系( $p$ 系)、计算机图像坐标系( $m$ 系),如图 3 所示。

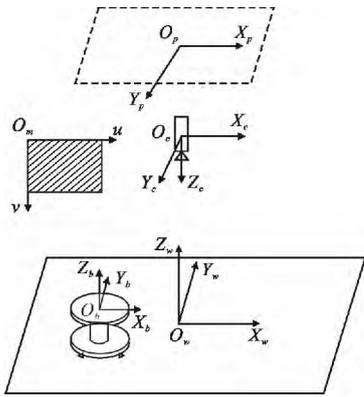


图 3 坐标系的定义

Fig.3 Definition of coordinate systems

图中, $w$ 系是位于大理石平台上的一个固定参考坐标系,原点 $O_w$ 位于平台中心, $X_w$ 轴、 $Y_w$ 轴分别平行于工作台面的长边和短边, $Z_w$ 轴垂直平台台面向上; $b$ 系原点 $O_b$ 位于气浮实验台台面中心, $X_b$ 轴为靶标圆心 $O_A$ 和 $O_C$ 连线, $Y_b$ 轴为圆心 $O_A$ 和 $O_B$ 连线, $Z_b$ 轴与 $Z_w$ 轴平行; $c$ 系原点 $O_c$ 位于摄像机光轴中心, $Z_c$ 轴沿摄像机的光轴方向, $X_c$ 轴和 $Y_c$ 轴分别与世界坐标系的 $X_w$ 轴和 $Y_w$ 轴平行; $p$ 系原点位于摄像机光轴与像平面的交点, $X_p$ 轴和 $Y_p$ 轴分别与 $X_c$ 、 $Y_c$ 轴平行; $m$ 系原点位于计算机图像平面左上角, $u$ 轴平行于图像的行扫描线, $v$ 轴平行于列扫描线。

气浮实验台中心点 $q$ 在世界坐标系中的坐标为 $q_w(x_w, y_w, z_w)$ ,其中 $z_w$ 始终为气浮实验台台面的高度 $H$ ,变换为计算机图像坐标系中的坐标 $q_m(u, v)$ 的过程如下。

(1) 从世界坐标系中 $q_w(x_w, y_w, z_w)$ 到摄像机坐标系中 $q_c(x_c, y_c, z_c)$ 的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T \quad (3)$$

式中: $R$ 和 $T$ 分别为 $3 \times 3$ 的旋转矩阵和 $1 \times 3$ 的平移

矩阵,这两个矩阵与摄像机内部参数及固定位置有关,可通 Matlab 标定工具箱离线标定得到。

(2) 从摄像机中三维坐标 $q_c(x_c, y_c, z_c)$ 到像平面坐标系中二维坐标 $(x, y)$ 的变换为:

$$\begin{cases} x = f \frac{x_c}{z_c} \\ y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 考虑图像的二阶径向畸变和切向畸变,校正后的像平面坐标系中坐标为 $q_p(x_p, y_p)$ ,且

$$\begin{cases} x_p = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_p = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \end{cases} \quad (5)$$

(4) 像平面坐标系中二维坐标 $q_p(x_p, y_p)$ 转换到计算机图像坐标系中坐标 $q_m(u, v)$ 转换关系为:

$$\begin{cases} u = \mu \frac{x_p}{d_x} + u_0 \\ v = \mu \frac{y_p}{d_y} + v_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_0$ 和 $v_0$ 为图像物理坐标系原点在图像坐标系中的坐标; $d_x$ 和 $d_y$ 为像平面上每一个像素点在 $x$ 、 $y$ 轴方向上的物理尺寸(mm/pixel); $\mu$ 为取决于摄像头和计算机图像平面的比例因子。

综上,得到计算机图像坐标系中坐标 $q_m(u, v)$ 与世界坐标系中坐标 $q_w(x_w, y_w, z_w)$ 的映射关系为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M(R/T) \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $M$ 为摄像机内参数矩阵; $s$ 为比例因子。

## 2 图像识别定位

在文中提出的基于视觉的位姿测量方案中,影响精度的关键因素为:摄像机的物理分辨率;摄像机的标定和误差修正精度;图像中像点的提取精度。在实验过程中,可以对传感器进行高精度的标定和误差修正。所以,在硬件一定的条件下,提高精度的最直接方法就是提高图像中靶标的定位精度。基于此,文中提出了一种合作靶标快速识别以及靶标圆心提取方法,程序实现流程图如图 4 所示,实验结果表明该方法能实现靶标圆心的快速、高精度提取,满足视觉测量系统的实时性要求。

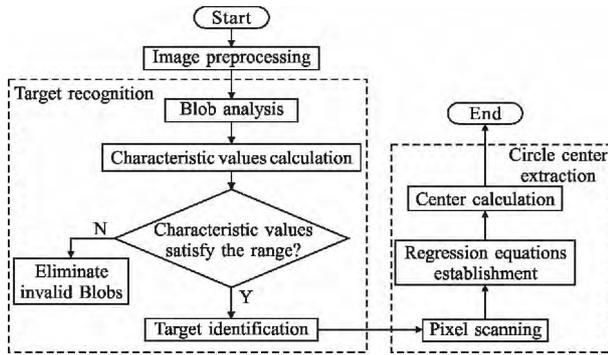


图 4 合作靶标圆心提取流程图

Fig.4 Flowchart for cooperative target center extraction

2.1 靶标识别

2.1.1 连通区域的 Blob 分析

首先,采用中值滤波器对图像去噪;然后,采用 Otsu 算法选取最佳阈值,实现图像二值化。

二值化处理后,可通过 Blob 分析对图像进行八连通区域提取<sup>[8]</sup>,得到各个区域的轮廓链码表,并由此计算出各连通区域的所需特征值。文中所采取的八向链码方向如图 5 所示:链码值加 1,其所指方向就按逆时针方向旋转 45°。Blob 边界轮廓的跟踪依链码的方向进行,由上一轮廓点确定下一跟踪点,而不是对所有像素点的扫描,增加了边界跟踪效率。通过对 Blob 区域边界进行编码和解码,得到对应轮廓点的坐标。

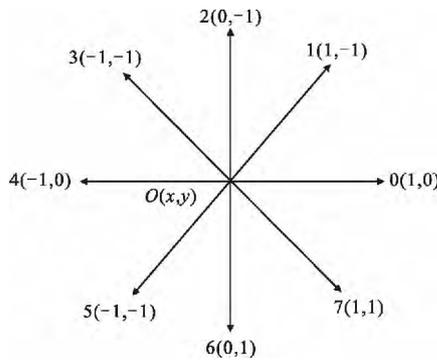


图 5 八向链码原理

Fig.5 Principle for eight-direction chain code

结合轮廓点坐标可计算出各连通区域宽高度、粗定位中心以及最小外接矩形等特征值。设边界点坐标  $R_i(x,y)$ , 边界点的个数  $n$ , 各特征值计算方法如下。

(1) 连通区域宽度 width 和高度 height 为:

$$\begin{cases} \text{width}=\max(x_i)-\min(x_i) \\ \text{height}=\max(y_i)-\min(y_i) \end{cases} \quad i \in \{0,1,2, \dots, n\} \quad (8)$$

(2) 连通区域中心坐标  $P(x,y)$ 为:

$$P(x,y)=\left(\frac{\max(x_i)+\min(x_i)}{2}, \frac{\max(y_i)+\min(y_i)}{2}\right) \quad i \in \{0,1,2, \dots, n\} \quad (9)$$

(3) 连通区域最小外接矩形顶点坐标为:

$$\begin{cases} (x_1,y_1)=(\min(x_i), \min(y_i)) \\ (x_2,y_2)=(\max(x_i), \min(y_i)) \\ (x_3,y_3)=(\max(x_i), \max(y_i)) \\ (x_4,y_4)=(\min(x_i), \max(y_i)) \end{cases} \quad (10)$$

2.1.2 靶标判别

合作靶标上只包含 3 个白色圆形目标, 并且实际物理尺寸和安装位置固定, 因此在计算机图像平面中目标连通区域大小及中心点距离均保持在一定范围内。该系统中,通过设置宽高度、宽高比、距离约束剔除干扰连通区域,进而确认靶标上的圆形区域,识别合作靶标。

(1) 宽高度约束

根据摄像机安装位置和靶标实际尺寸来设置宽度范围  $(w_{\min}, w_{\max})$ 、高度范围  $(h_{\min}, h_{\max})$ , 若连通区域的宽度 width 和高度 height 满足:

$$\begin{cases} h_{\min}<\text{height}<h_{\max} \\ w_{\min}<\text{width}<w_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

则保留该连通区域进入下一步筛选, 否则剔除该连通区域;

(2) 宽高比约束

理想情况下圆形连通区域宽高比应为 1:1, 实际情况中相机存在畸变, 因此将宽高比范围设置为 0.8~1.2, 若连通区域宽高比满足:

$$0.8 < \frac{\text{width}}{\text{height}} < 1.2 \quad (12)$$

则保留该连通区域进入下一步筛选, 否则剔除该连通区域;

(3) 距离约束

在设置距离约束时, 若直接对各连通区域间距离求解并比较则需要较大的计算量, 会降低运算速度, 因此可采用在连通区域周围设置矩形窗的方法选取符合条件的连通区域。

假设连通区域  $A$  为待判别区域, 由上述 Blob 分析可确定区域  $A$  中心坐标为  $P(x_A, y_A)$ , 因此以  $P(x_A, y_A)$  为中心设置矩形窗口。靶标设计中, 圆心距离最大为  $\sqrt{2} L$ , 实际情况中由于摄像机存在畸变, 并且由

轮廓链码表计算的区域中心与实际圆心存在一定的偏差,为使矩形窗口含靶标全部圆形目标,将其边长适当扩大,设置为  $3L$ 。综上,矩形窗口 4 个顶点坐标分别为  $(x_A-1.5L, y_A-1.5L), (x_A+1.5L, y_A-1.5L), (x_A+1.5L, y_A+1.5L), (x_A-1.5L, y_A+1.5L)$ 。

统计矩形窗口中连通区域数量,若为 3,继续求解当前 3 个区域中心点距离  $l_p(p=1, 2, 3)$ ,若  $l_p(p=1, 2, 3)$  均满足  $0.8L < l_p < 1.6L$ ,则确认该窗口中的 3 个连通区域是合作靶标上的目标圆形区域,否则剔除该连通区域,继续对其他连通区域进行距离筛选。

至此,已根据靶标形状特点以及实际安装位置完成了对合作靶标上圆形目标区域的提取,实现了图像中合作靶标的识别。

### 2.2 圆心提取

在实现了对合作靶标上圆形目标区域的识别后,需要提取靶标圆形的圆心。标准 Hough 圆变换将图像从二维空间变换到参数空间,通过设置累加器在三维空间中进行积累来完成检测任务,因此计算量较大且耗时较多。较为常用的快速 Hough 变换通过对灰度图像进行边缘提取并由边缘灰度梯度估计参数空间中的角度,达到降低计算量的目的,但在实际应用当中,由于算子提取梯度有限且离散,梯度算子方向常常偏离圆心,且偏差较大,由于受光源和反射的影响,灰度分布不均导致梯度变化,直接造成判断错误,无法满足文中的位姿测量系统圆心提取快速准确的要求。文中提出的基于像素统计的圆心求取算法,通过对待检测区域像素值进行扫描统计,并求取相应的回归方程来提取圆心。由于在整个区域内进行像素值的统计回归分析且无需进行边界提取,所以少量像素点的缺失以及圆形边界不影响计算精度,并且像素统计过程中进行简单的加法运算,计算速度大大提高,从而圆心的快速准确提取。具体实现方法如下:

将上述步骤中保留的连通区域最小外接矩形四条边沿上下左右各移动一个像素,确定为待扫描二值区域  $BW_p$ ,如图 6 所示。对  $BW_p$  进行逐行逐列描,统计第  $j$  行中像素值为 1 的像素数量  $m_j$  并保存于数组  $m$  中,统计第  $k$  列中像素值为 1 的像素数量  $n_k$  并保存于数组  $n$  中。

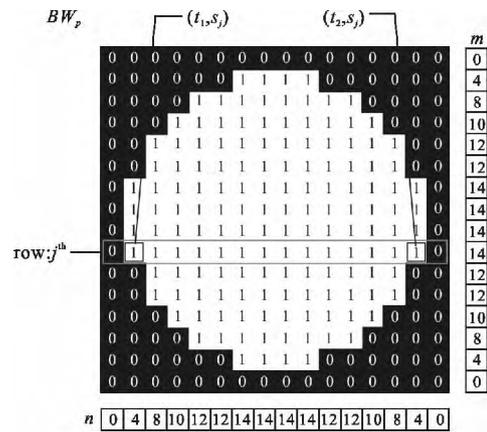


图 6 像素扫描示意图

Fig.6 Diagram of pixel scanning

在图像坐标系下,圆形基本公式为:

$$(l_x - o_x)^2 + (l_y - o_y)^2 = r^2 \quad (13)$$

式中:  $(l_x, l_y)$  为圆形边界点坐标;  $(o_x, o_y)$  为圆心点坐标,半径为  $r$ 。

在逐行扫描时,第  $j$  行中第一个像素值为 1 的像素点坐标为  $(t_1, s_j)$ ,最后一个像素值为 1 的像素点坐标为  $(t_2, s_j)$ ,代入公式(13)得:

$$\begin{cases} (t_1 - o_x)^2 + (s_j - o_y)^2 = r^2 \\ (t_2 - o_x)^2 + (s_j - o_y)^2 = r^2 \end{cases} \quad (14)$$

$t_1, t_2$  与  $m_j$  系满足:

$$m_j = t_2 - t_1 + 1 \quad (15)$$

与公式(14)联立得到像素数量  $m_j$  与圆心坐标  $(o_x, o_y)$  和半径  $r$  的关系为:

$$m_j = 2\sqrt{r^2 - (s_j - o_y)^2} + 1 \quad (16)$$

令  $M_j = (m_j - 1)^2$ , 设  $M_j$  关于  $s_j$  的回归方程为:

$$\tilde{M}_j = c_0 + c_1 s_j + c_2 s_j^2 \quad (17)$$

利用最小二乘法求解未知参数  $c_0, c_1, c_2$  的估计值,为此,作离差平方和

$$S = \sum_{j=1}^{\text{row}} (M_j - c_0 - c_1 s_j - c_2 s_j^2)^2 \quad (18)$$

为了使  $S$  的值尽量小,将它对参数  $c_0, c_1, c_2$  分别求偏导,令偏导数均为零,就可以得到  $S$  的极小值,即

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial c_0} = -2 \sum_{j=1}^{\text{row}} (M_j - c_0 - c_1 s_j - c_2 s_j^2) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c_1} = -2 \sum_{j=1}^{\text{row}} (M_j - c_0 - c_1 s_j - c_2 s_j^2) s_j = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c_2} = -2 \sum_{j=1}^{\text{row}} (M_j - c_0 - c_1 s_j - c_2 s_j^2) s_j^2 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

公式(19)可以用克莱姆法则或者消元法求解,计算出  $c_0, c_1, c_2$ 。

由分析可知,圆心点所在行数的  $m_j$  值最大,因此,当  $s_j$  为圆心点纵坐标时,  $M_j$  曲线取得极大值,圆心点纵坐标  $o_y$  为:

$$o_y = -\frac{c_1}{2c_0} \quad (20)$$

同理,进行逐列扫描时,求解出圆心点横坐标  $o_x$ 。

通过对每个  $BW_p$  区域进行像素扫描统计及回归方程求解,计算出各圆圆心。此方法在图像二值化基础上,直接对每个包含圆形目标的  $BW_p$  区域进行像素扫描,无需对整幅图像进行处理,有效减少了计算量,提高了圆心提取的速度。应用统计及回归分析的方法可以在靶标局部像素受到污染的情况下,最大限度的保证圆心提取的精度。

### 3 实验

#### 3.1 实验一

为了验证文中提出的基于像素扫描的圆心提取算法性能,利用已知各圆心实际坐标的合成图像进行运算时间和测量精度的对比实验,其中合成图像大小为 640 pixel×480 pixel,如图 7 所示。实验所用电脑配置如下:内存 2.0 G,CPU 主频 3.40 GHz。与文中

圆心提取算法进行对比实验的是传统 Hough 变换以及参考文献[9]中提出的结合 Sobel 边缘提取算子和最小二乘拟合的圆心计算方法。各算法在该计算机上对图 7 进行圆心提取所需时间的对比实验,结果如表 1 所示,各圆形的实际圆心及各算法的检测值如表 2 所示。可以看出,文中算法计算精度和速度均明显优于传统 Hough 变换、参考文献[9]算法。

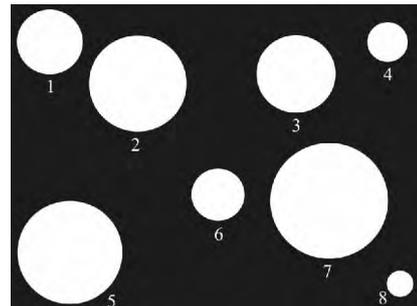


图 7 合成图像

Fig.7 Synthetic image

表 1 圆心提取用时比较

Tab.1 Comparison of time spent on center extraction

Method	Hough	Ref.[9]	Proposed method
Time/ms	63.335	47.065	12.401

表 2 圆心提取结果

Tab.2 Results of center extraction

No.	Actual/pixel	Hough/pixel	Ref.[9]/pixel	Proposed method/pixel
1	(60,60)	(59.250,58.750)	(60.287,60.303)	(59.997,60.002)
2	(195,125)	(193.750,123.250)	(195.189,125.314)	(194.996,124.998)
3	(440,110)	(439.750,109.750)	(440.262,110.332)	(440.014,110.000)
4	(580,60)	(579.250,58.750)	(580.152,60.320)	(580.018,59.986)
5	(90,390)	(88.750,388.750)	(90.177,390.282)	(90.003,389.996)
6	(320,300)	(320.250,299.250)	(320.183,300.300)	(319.984,300.015)
7	(490,310)	(489.250,309.250)	(490.189,310.283)	(489.992,309.997)
8	(600,440)	(599.250,438.750)	(600.257,400.342)	(599.973,439.983)

#### 3.2 实验二

运用如图 8 所示的实验系统对文中提出的位姿

测量方案进行了验证。其中,大理石工作平台尺寸为 8 m×16 m,摄像机被安装大理石平台上方 5 m 处,合

作靶标放置于气浮平台上方。

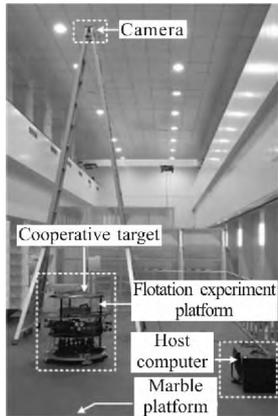


图 8 位姿测量实验装置

Fig.8 Experimental equipment of pose measurement

图 9 为应用文中第 2 节中所提出的算法提取

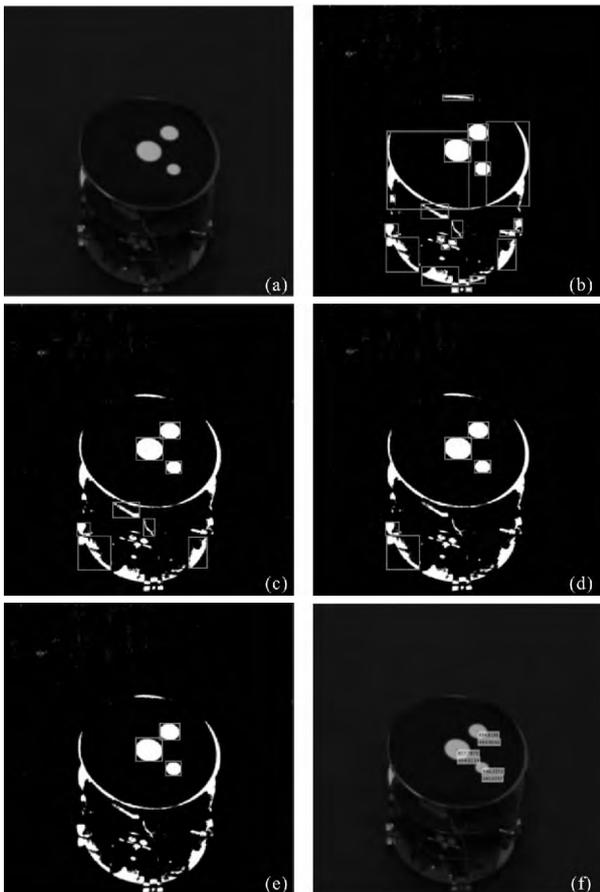


图 9 各步骤实验结果图

Fig.9 Experimental results of each step

靶标圆心过程截图，测试图像大小为 1 600 pixel×1 600 pixel。图 9(a)为上位机获取的实际图像,图 9(b)是图像二值化后提取到的所有连通区域,图 9(c)为

满足宽度和高度范围的连通区域,图 9(d)为满足宽高比范围的连通区域,图 9(e)为满足距离范围的连通区域,从而完成了合作靶标的识别,图 9(f)为圆心提取结果。

图 10 显示了上位机获取的 8 种不同位姿下的气

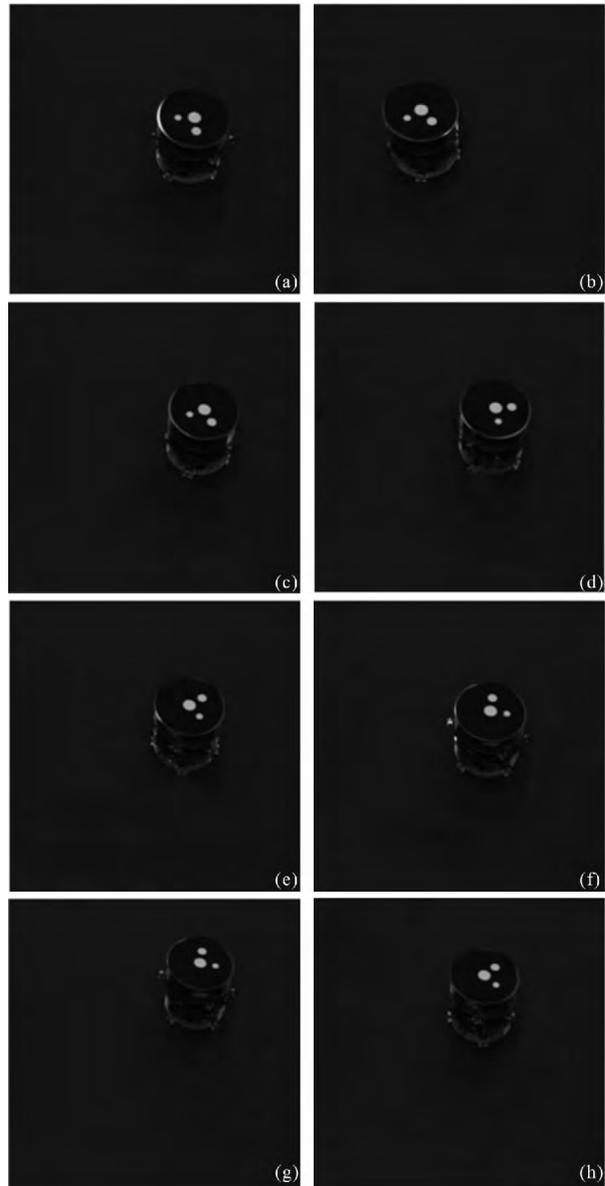


图 10 不同位姿下的气浮实验台

Fig.10 Flotation experiment platform of different poses

浮实验台图像。图像大小为1 600 pixel×1 600 pixel,其中图像左下角为世界坐标系原点位置,结合坐标系变换关系,计算气浮实验台的实际位姿,如表 3 所示。实验结果显示,该视觉测量系统平均能够在 53.086 ms 内实现位姿解算,每秒钟可处理 19 帧图像,且实验过程中不存在丢帧的现象,能够满足位姿测量系统

对实时性和准确性的要求。

表 3 气浮实验台实际位姿

Tab.3 Actual poses of flotation experiment platform

Image No.	X/mm	Y/mm	Yaw angle/(°)
Fig.(a)	2 339.7	2 226.6	172.79
Fig.(b)	1 349.3	2 316.1	137.12
Fig.(c)	2 444.4	2 300.2	149.59
Fig.(d)	2 280.9	2 308.6	86.61
Fig.(e)	2 251.3	2 335.8	60.97
Fig.(f)	2 221.6	2 428.8	8.13
Fig.(g)	2 383.9	2 841.8	9.23
Fig.(h)	2 130.7	2 680.2	52.91

### 4 结 论

文中为满足气浮实验台定位精度高、速度快的需求,设计了一套基于机器视觉的位姿测量方案。首先,设计了应用于气浮实验台定位的合作靶标,并提出了合作靶标识别算法以及靶标圆心提取算法;然后,建立了视觉测量系统,推导了坐标变换及计算公式;最后,根据识别出的气浮台上合作靶标在计算机图像坐标系下的圆心坐标解算出气浮台位置信息以及偏航角信息。实验结果证明:基于像素扫描的圆心提取算法新颖高效,圆心计算结果达到亚像素级的精度,并且该视觉测量系统能够在 56.086 ms 之内完成气浮实验台位姿测量,在保证测量精度的条件下实现了气浮实验台位姿的快速解算,满足气浮实验台位姿测量高精度、实时性以及鲁棒性的要求。

### 参考文献:

[1] Kim J J, Agrawal B N. Automatic mass balancing of air-bearing-based three-axis rotational spacecraft simulator [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2009, 32 (3): 1005-1017.

[2] Zhang Xinbang, Zeng Haibo, Zhang Jinjiang, et al. The physical simulation technology for spacecraft [J]. *Aerospace Control*, 2015, 33(5): 72-78. (in Chinese)  
张新邦, 曾海波, 张锦江, 等. 航天器全物理仿真技术[J]. *航天控制*, 2015, 33(5): 72-78.

[3] Deng Liwei, Song Shenmin, Chen Xinglin. Fractional order control for position and attitude of 5-DOF air-bearing simulator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(1): 1-7. (in Chinese)  
邓立为, 宋申民, 陈兴林. 五自由度气浮台位置和姿态的分数阶控制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(1): 1-7.

[4] Martin W R. The formation control testbed [C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004: 557-564.

[5] Shields J F. The formation control testbed celestial sensor: Overview, modelling, and calibrated performance [C]// 2005 IEEE Aerospace Conference, 2005: 1-9.

[6] Mohan S. Reconfiguration methods for on-orbit servicing, assembly, and operations with application to space telescopes [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

[7] Miller D, Saenz-Otero A, Wertz J, et al. SPHERES: a testbed for long duration satellite formation flying in micro-gravity conditions [C]//Proceedings of the AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2000: 100-110.

[8] Zhong Q S, Chen Z, Zhang X M, et al. Feature-based object location of IC pins by using fast run length encoding BLOB analysis [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4 (11): 1887-1898.

[9] Wen Zhuoman, Wang Yanjie, Di Nan, et al. Fast recognition of cooperative target used for position and orientation measurement of space stations robot arm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36 (4): 1330-1338. (in Chinese)  
温卓曼, 王延杰, 邸男, 等. 空间站机械臂位姿测量中合作靶标的快速识别[J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1330-1338.