

文章编号 1004-924X(2016)增-0718-09

## 合作靶标标志点检测及位姿测量

葛双龙<sup>1</sup>, 温卓漫<sup>2,3\*</sup>, 齐丽君<sup>4</sup>, 邸 男<sup>2</sup>, 罗 君<sup>2,3</sup>

- (1. 吉林警察学院 刑事科学技术系, 吉林 长春 130117;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**在机械臂抓捕目标时,需要实时求取目标与机械臂上手眼相机之间的相对位姿。本文利用被抓取目标上合作靶标标志点的图像坐标,采用 P3P 算法对相对位姿进行了高精度解算。首先,利用合作靶标上的圆环和直线对靶标进行快速识别,确定靶标在图像中的区域。然后,把靶标区域分为多个相互有重叠的正方形小窗,将每个小窗内的最亮点作为候选点,并利用标志点的圆形特征,使用多种条件剔除非法点,保留三个合法标志点,最终确定标志点的中心坐标。最后,结合摄像机内参和靶标尺寸信息,用 P3P 算法求解相对位姿。仿真结果表明,标志点识别的准确率高于 99%;位姿解算的旋转误差小于 0.1 度,平移误差小于 0.5 mm。在实验中,上述参数分别为 97%、0.2 度和 1 mm。该算法操作简单、速度快、准确率高、精度高,适用于工业、农业、航空航天等领域的高精度实时单目位姿测量。

**关键词:**计算机视觉;单目视觉;手眼相机;P3P;圆检测

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0718

## Maker detection and pose measurement using a cooperative target

GE Shuang-long<sup>1</sup>, WEN Zhuo-man<sup>2,3\*</sup>, QI Li-jun<sup>4</sup>, DI Nan<sup>2</sup>, LUO Jun<sup>2,3</sup>

- (1. Department of Criminal Science and Technology,  
Jilin Police College, Changchun 130117, China;
  2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
  4. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)
- \* Corresponding author, E-mail: wenzhuoman@sina.com

**Abstract:** When mechanical arm arrests target, relative pose between target and hand-eye camera of arm is required to be obtained with real-time. By using image coordinate of mark points of cooperative target, P3P algorithm was adopted to realize high precision calculation of relative pose. Firstly, circles and straight lines of cooperative target were rapidly identified and the area of target circles was determined. Secondly, target area was divided into many square windows with mutually overlapping; with the highlight of each window as candidate point, circular feature of mark point was applied to e-

收稿日期:2016-05-19;修订日期:2016-06-05.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA7031010B)

eliminate illegal points by combining with various conditions, while three legal mark points were kept so as to determine center coordinates of the mark point finally. Lastly, combine with dimension information of participated target in camera and obtain relative pose with P3P algorithm. Simulation results show that the accuracy rate of the mark point identification is higher than 99%; rotation error of pose calculation is less than  $0.1^\circ$ ; translation error is less than 0.5mm. In actual experiment, the above parameters respectively are 97%,  $0.2^\circ$  and 1mm. Operation of the algorithm is simple with high speed, high accuracy and high precision, applicable to high accuracy real-time monocular pose measurement of industry, agriculture, aerospace and other fields.

**Key words:** computer vision; monocular vision; hand-eye camera; P3P; circle detection

## 1 引言

合作靶标<sup>[1-2]</sup>,即形状、大小已知的人工靶标。当机械臂<sup>[3]</sup>抓取目标时,通常将合作靶标和被抓捕机构安装在目标上,将手眼相机和抓捕机构安装在机械臂上。由手眼相机实时拍摄合作靶标的图像,并识别靶标上的标志点;继而利用标志点的图像坐标,结合相机内参以及合作靶标物理尺寸,求取靶标和相机之间的相对位置和姿态;然后将其转换为抓捕结构和被抓捕结构之间的相对位姿;从而进行最优抓取路径规划。由此可见,合作靶标的标志点识别以及位姿测量对于机械臂能否顺利抓取目标十分关键。

单目位姿测量<sup>[4-5]</sup>是指利用单个相机拍摄目标图像,对目标位姿进行求解。传统的方法是把棋盘格<sup>[6]</sup>作为靶标。该算法需要识别棋盘格的所有角点<sup>[7]</sup>,从不同位置和角度拍摄棋盘格图像,然后利用多幅图像信息进行求解。该方法能算出摄像机内参和每幅图像对应的摄像机外参,缺点在于角点识别难度高,算法整体计算量大。文献[8]和[9]将加了滤光片的几个标志点按一定形状排列作为合作靶标。然后用两种不同波长的激光照射靶标,分别产生前景图和背景图,二者相减得到标志点图像。该方法靶标设计简单,但是由于需要两种光源,硬件设计较为复杂。文献[10]中的位姿测量算法是针对某项特殊任务设计的,可移植性不强,操作复杂。

本文使用了一种圆环、直线、圆点,3种图形相结合的合作靶标。在靶标识别的基础上,提出了如何在靶标区域内快速准确地识别标志点。利用3个标志点在图像中的坐标,运用P3P(Point 3

Perspective)算法对合作靶标和相机之间的相对位姿进行精确求解。

本文的第2节介绍了合作靶标以及如何利用图像结合的方法对其进行识别;第3节详细给出了在靶标区域内标志点识别的具体步骤;第4节阐述了结合标志点图像坐标、相机参数和靶标尺寸,对相对位姿的高精度解算;第5节展示了本算法对模拟图像和真实图像的测试结果;第6节对算法做出了总结。

## 2 合作靶标识别

本文所使用的合作靶标如图1所示。它以黑色无光漆为背景,其上喷有轴对称的白色图案。以靶标中心 $O_w$ 为圆心,有一个圆环;圆环的左右两侧分别有一条长直线;圆环上方有一条短直线。靶标中心有一个垂直于靶标平面的立柱 $O_wA_w$ ,圆形标志点 $A_w$ 位于立柱顶端中部。靶标的最左端和最右端,两条长直线旁,分别有圆形标志点 $B_w$ 和 $C_w$ 。

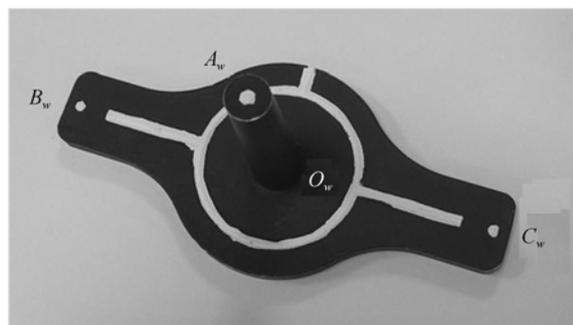


图1 合作靶标

Fig. 1 Cooperative target

在拍摄合作靶标图像后,需要进行合作靶标的识别<sup>[11-12]</sup>。本文采用图形结合的方式进行识别,大致流程如下。首先,对图像进行高斯平滑以去除噪声影响。其次,根据图像梯度幅度的整体分布情况,使用自适应阈值初步提取图像边缘,继而用改进的非极大值抑制算法获取理想的单像素边缘。在边缘跟踪完成后,用拟合方法在图像中进行快速圆识别<sup>[13]</sup>,求出圆心和半径。接着结合靶标上圆和直线的物理尺寸关系,以圆心为中心限定与圆半径呈一定比例的矩形框,在框内寻找与圆的相对位置关系符合靶标形状的直线。如若有一定数量的此类直线则认定该图形为合作靶标。如此一来,便得到了图像上圆形的中心  $O$  和半径  $r$ 。由于靶标左右对称,靶标的中心即为圆形的圆心。根据靶标中心和圆形半径,便可确定靶标在图像中的区域。继而在区域内进行标志点检测及相对位姿测量。

### 3 标志点检测

合作靶标的物理尺寸是确定的。那么,合作靶标上圆形、直线、标志点之间的相对大小关系是已知的。在靶标图像上,他们之间的比例关系虽然会因为靶标姿态存在些许变化,但变化不明显。根据第 2 小节求得的圆形半径  $r$  和圆心  $O$ ,图像上靶标所在的区域范围便可以大致估算出来。

如图 2 所示,在合作靶标图像上,以靶标中心  $O$ (即圆心)为中心,根据圆形的半径  $r$ ,开一个长为  $k_1 r$  宽为  $k_2 r$  的矩形窗口,该区域则为靶标区域。其中,  $k_1$  和  $k_2$  是固定的实系数,可根据合作靶标的物理尺寸得到。3 个标志点一定出现在该矩形靶标区域内。

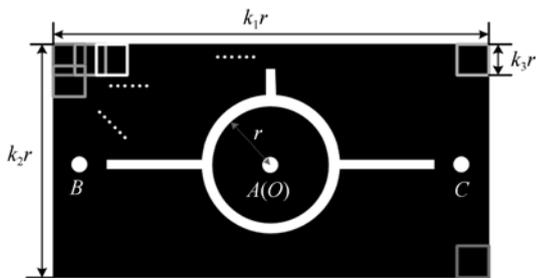


图 2 靶标区域内的标志点扫描

Fig. 2 Scanning of markers in the target area

在该靶标区域内,从左上角开始,用相互部分重叠的矩形小格子对图形扫描。格子的大小为  $k_3 r$ 。  $k_3$  也是固定的实系数,由合作靶标上圆环半径和标志点半径的物理尺寸之比决定。

在每个矩形小格子内,寻找像素灰度值最大的点,存入数组 candidates 中,作为候选点。假设每行有  $m$  个小格子,每列有  $n$  个小格子,那么在整个靶标区域内,总共有  $m \times n$  个小格子,即数组 candidates 的长度为  $m \times n$ 。在这  $m \times n$  个候选点中,如若两个候选点之间的距离太近,则保留灰度值较大的候选点,剔除灰度值较小者。

接着,在每个候选点的周围开一个尺寸合适的正方形小窗,确保整个标志点落在窗内。如图 3(a)(彩图见期刊电子版)所示,蓝色虚线所示窗口太小,未包含整个标志点,不符合要求;黄色实线窗口大小合适,包含了整个标志点,符合要求。图 3(a)显示的是极限情况,候选点恰好位于标志点的最左边,这样需要的窗口大小是最大的。可见,正方形窗口的边长需要大于标志点的直径。标志点的直径可以通过靶标上圆环的直径  $2r$  估算出来。

如图 3(b)(彩图见期刊电子版)所示,从候选点出发(红色),向上、下、左、右 4 个方向寻找是否有分隔前景与背景的点(蓝色),即相邻两个像素灰度值差异大于某一阈值的点。若在 4 个方向上都有这样的点,则保留该候选点,否则剔除该点。

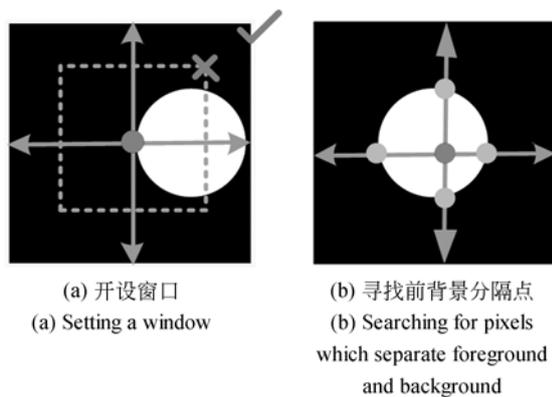


图 3 剔除非法候选点

Fig. 3 Ruling out invalid marker candidates

对于剩下的候选点,以每个候选点为起始点,进行区域生长,生长停止的条件是与候选点的像素差异大于某一阈值。在生长完成后,判断生长

区域的面积是否在某一个范围内。如若面积符合要求,则认定该点为标志点,该区域的质心则为标志点中心。质心算法的优点在于它能在光照不均匀、运动模糊等特殊条件下准确计算标志点中心。

至此,计算出了图像上 3 个靶标标志点 A、B、C 的中心坐标。

#### 4 相对位姿测量

利用图像上 3 个标志点的中心坐标,结合 P3P 算法,合作靶标和相机之间的相对位姿便可以精确求出。

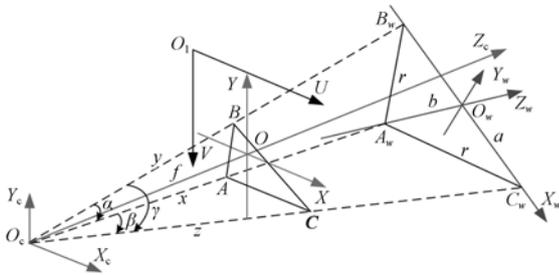


图 4 P3P 投影示意图  
Fig. 4 Projection diagram of P3P algorithm

如图 4 所示,以靶标底面中心  $O_w$  为原点的  $O_w X_w Y_w Z_w$  是靶标坐标系;以摄像机光学系统主点  $O_c$  为原点的  $O_c X_c Y_c Z_c$  是摄像机坐标系;以图像中心  $O$  为原点的  $OXY$  是图像物理坐标系 ( $Z_c$  穿过图像中心  $O$ );以图像左上角  $O_i$  为原点的  $O_i UV$  是图像像素坐标系,图像中心  $O$  在该坐标系下的坐标为  $(u_0, v_0)$ 。 $X_c Y_c$  平面、 $XY$  平面、 $UV$  平面相互平行。在靶标坐标系下,合作靶标上的 3 个标志点为  $A_w, B_w, C_w$ 。由靶标的物理尺寸可知,底边  $B_w C_w$  的长度为  $a$ ,立柱  $O_w A_w$  高度为  $b$ ,三角形腰  $A_w B_w$  和  $A_w C_w$  的长度  $r$  可以由  $a$  和  $b$  求出 ( $r = ((a/2)^2 + b^2)^{0.5}$ )。靶标底边  $B_w C_w$  在靶标坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$  的  $X_w$  轴上,靶标平面平行于  $X_w Y_w$  平面,立柱  $O_w A_w$  重合于  $Z_w$  轴。根据针孔模型,靶标坐标系下的  $A_w, B_w, C_w$  投影到图像坐标系下的  $A, B, C$ 。假设  $O_c A_w, O_c B_w, O_c C_w$  长分别为  $x, y, z$ ,它们之间的夹角分别为  $\alpha, \beta, \gamma$ 。

$A_w, B_w, C_w$  在靶标坐标系下的坐标可由靶标尺寸求出,  $A, B, C$  在图像像素坐标系下的坐标可以通过本文第 3 节的算法得出。那么,  $A, B, C$  3

点的图像物理坐标即可结合摄像机内部参数求出。以  $A$  点为例,其图像像素坐标为:

$$\begin{cases} x_A = s_x(u_A - u_0) \\ y_A = -s_y(v_A - v_0) \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $(x_A, y_A)$  和  $(u_A, v_A)$  分别为  $A$  点图像物理坐标和图像像素坐标,  $s_x$  和  $s_y$  分别为  $X$  方向和  $Y$  方向的像元尺寸。

根据几何关系,  $\alpha, \beta, \gamma$  可以由  $A, B, C$  3 点的图像物理坐标求解。以  $\alpha$  为例,在  $\triangle O_c AB$  中,根据余弦定理有:

$$\cos \alpha = \frac{|O_c A|^2 + |O_c B|^2 - |AB|^2}{2|O_c A||O_c B|}, \quad (2)$$

其中,  $|O_c A|^2, |O_c B|^2$  和  $|O_c C|^2$  可以分别表示为:

$$\begin{cases} |O_c A|^2 = f^2 + |OA|^2 = f^2 + x_A^2 + y_A^2 \\ |O_c B|^2 = f^2 + |OB|^2 = f^2 + x_B^2 + y_B^2, \\ |AB|^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $f$  为相机焦距。同理,在  $\triangle O_c AC$  和  $\triangle O_c BC$  中,可分求出  $\beta$  和  $\gamma$  的数值,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} \beta = \arccos^{-1} \frac{f^2 + x_A x_C + y_A y_C}{\sqrt{f^2 + x_A^2 + y_A^2} \sqrt{f^2 + x_C^2 + y_C^2}} \\ \gamma = \arccos^{-1} \frac{f^2 + x_B x_C + y_B y_C}{\sqrt{f^2 + x_B^2 + y_B^2} \sqrt{f^2 + x_C^2 + y_C^2}} \end{cases} \quad (4)$$

根据  $\alpha, \beta, \gamma$  和  $b, c$  求解  $x, y, z$  的过程就是 P3P 问题,可以由以下数学形式表示:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2xy\cos\alpha = |A_w B_w|^2 \\ x^2 + z^2 - 2xz\cos\beta = |A_w C_w|^2 \\ y^2 + z^2 - 2yz\cos\gamma = |B_w C_w|^2 \end{cases} \quad (5)$$

如图 5 所示,  $\triangle A_w B_w C_w$  是靶标上 3 个特征

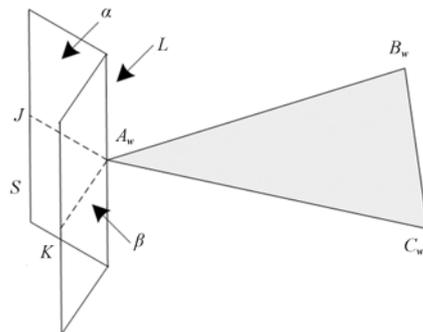


图 5 空间示意图  
Fig. 5 Sketch map of space layout of points

点组成的三角形,  $A_w J$  垂直于  $A_w B_w$ ,  $A_w K$  垂直于  $B_w C_w$ , 并且  $A_w J$  和  $A_w K$  都在  $A_w B_w C_w$  平面上, 直线  $L$  过  $A_w$  且垂直于该平面, 直线  $L$  和射线  $A_w J$  组成平面  $\alpha$ , 直线  $L$  和射线  $A_w K$  组成平面  $\beta$ 。

文献[14]指出当特征点组成等腰三角形, 并且光学系统主点出现在平面  $\alpha$  和平面  $\beta$  所夹的空间  $S$  时, P3P 问题有唯一解:

$$\begin{cases} A_c = \left( \frac{xx_A}{\sqrt{f^2 + x_A^2 + y_A^2}}, \frac{xy_A}{\sqrt{f^2 + x_A^2 + y_A^2}}, \frac{xf}{\sqrt{f^2 + x_A^2 + y_A^2}} \right) \\ B_c = \left( \frac{yx_B}{\sqrt{f^2 + x_B^2 + y_B^2}}, \frac{yy_B}{\sqrt{f^2 + x_B^2 + y_B^2}}, \frac{yf}{\sqrt{f^2 + x_B^2 + y_B^2}} \right), \\ C_c = \left( \frac{zx_C}{\sqrt{f^2 + x_C^2 + y_C^2}}, \frac{zy_C}{\sqrt{f^2 + x_C^2 + y_C^2}}, \frac{zf}{\sqrt{f^2 + x_C^2 + y_C^2}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

由于  $A_w, B_w, C_w$  3 点在靶标坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$  下是固定的, 其坐标分别为:

$$\begin{cases} A_w = (0, 0, -\sqrt{b^2 - (\frac{a}{2})^2}) \\ B_w = (-\frac{a}{2}, 0, 0) \\ C_w = (\frac{a}{2}, 0, 0) \end{cases} \quad (8)$$

结合式(8)以及  $A_c, B_c, C_c$  3 点的坐标, 根据向量关系可以求出由靶标坐标系到摄像机坐标系的转换矩阵  $C$ 。求解过程如下:

①在靶标坐标系下, 计算 3 个线性无关的单位向量  $n_{w1}, n_{w2}, n_{w3}$ :

$$\begin{cases} n_{w1} = \frac{\vec{A_w B_w}}{|\vec{A_w B_w}|} = (-\frac{a}{2b}, 0, \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4}}/b) \\ n_{w2} = \frac{\vec{B_w C_w}}{|\vec{B_w C_w}|} = (1, 0, 0) \\ n_{w3} = \frac{n_{w1} \times n_{w2}}{|n_{w1} \times n_{w2}|} = (1, 0, 0) \end{cases} \quad (9)$$

三者组成矩阵  $N_w = (n_{w1}, n_{w2}, n_{w3})$ 。

②同理, 在摄像机坐标系下, 计算与  $n_{w1}, n_{w2}, n_{w3}$  对应的三个向量  $n_{c1}, n_{c2}, n_{c3}$ , 组成矩阵  $N_c = (n_{c1}, n_{c2}, n_{c3})$ 。

③  $C$  的旋转矩阵  $R_c = N_c N_w^{-1}$ ,  $C$  的平移向量  $t_c = A_c - R_c A_w$ , 转换矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} R_c & t_c \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} y = x \cos \alpha + \sqrt{b^2 - x^2 \sin^2 \alpha} \\ z = x \cos \beta + \sqrt{b^2 - x^2 \sin^2 \beta} \\ y^2 + z^2 - 2yz \cos \gamma = a^2 \end{cases} \quad (6)$$

用牛顿迭代法可以求解上述方程组。

$A_w, B_w, C_w$  3 点在摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$  下对应的坐标  $A_c, B_c, C_c$ , 可以依据三角形相似原理求出, 其解为:

至此, 已经由合作靶标上的 3 个特征点求得了靶标坐标系到摄像机坐标系的转换矩阵  $C$ 。

这一转换矩阵表示了靶标和摄像机之间的相对位姿关系。它有 6 个自由度, 沿  $X, Y, Z$  3 个轴的旋转(俯仰  $\theta_x$ 、偏航  $\theta_y$ 、滚动  $\theta_z$ )和沿 3 个轴的平移( $t_x, t_y, t_z$ )。

## 5 实验与结果

为了验证靶标标志点的识别准确率和位姿测量精度, 本文进行了两组实验, 模拟实验和真实实验。每组实验采用 10 000 幅图片。

### 5.1 模拟实验

利用 3ds Max 软件, 制作合作靶标一比一大小的模型。继而将该模型导入用 OpenGL 编写的图形处理软件中, 自定义靶标的初始位置和运动轨迹。靶标沿  $X, Y$  轴的旋转(俯仰  $\theta_x$ 、偏航  $\theta_y$ )范围为  $[-15^\circ, 15^\circ]$ ; 沿  $Z$  轴的旋转(滚动  $\theta_z$ )范围为  $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。靶标沿  $X, Y$  轴的平移范围为  $[-100 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$ , 沿  $Z$  轴的平移范围为  $[300 \text{ mm}, 1500 \text{ mm}]$ 。依据相机参数产生出合作靶标在不同位置和姿态下的 100 000 幅图像。图 6(a)、(b)和(c)给出了 3 种不同位姿下本文算法的处理结果; 图 6(d)、(e)和(f)给出了对应的靶标局部图像。

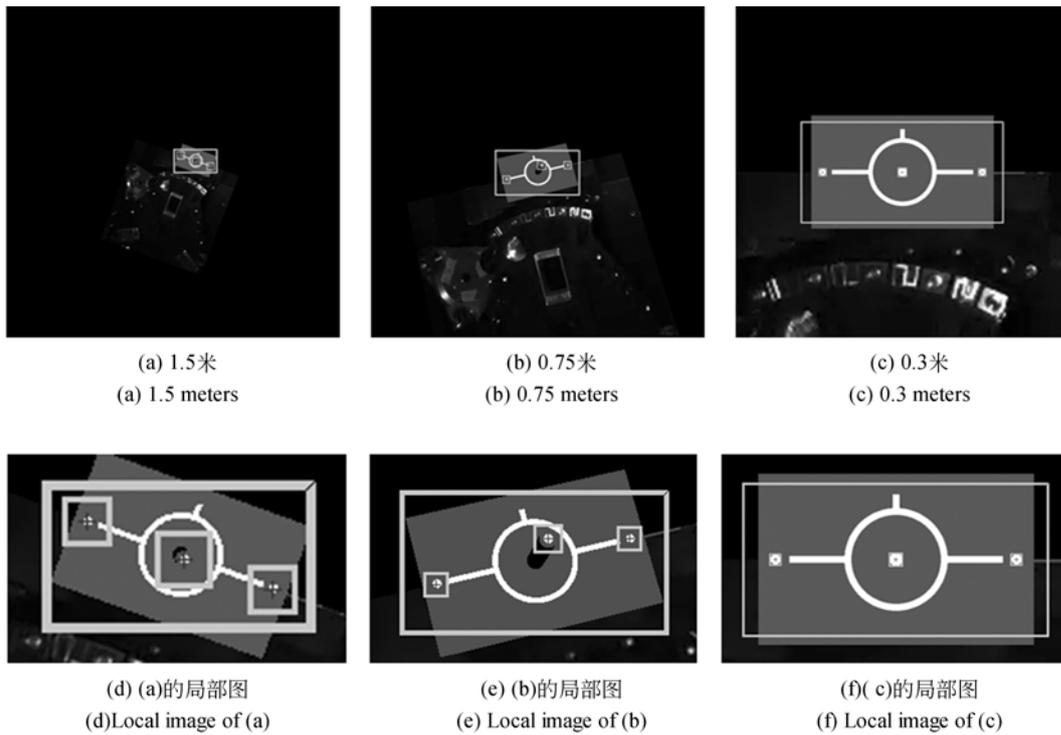


图 6 仿真图像的实验结果

Fig. 6 Experiment results with simulated images

表 1 展示了图 6 (a)、(b)和(c)所对应的标志点的中心位置以及靶标和相机之间的相对位姿信息。可见靶标离相机越远时,标志点所占的像元

面积越小,测量精度越低。当手眼相机控制机械臂逐渐靠近靶标时,测量精度逐步提升,进而控制机械臂完成抓取动作。

表 1 模拟图像的测量结果

Tab. 1 Measurement results with simulated images

图 6(a)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	71.59	23.58	115.90	测量值	-4.92	-0.07	-20.05	测量值	99.35	49.31	1501.83
	Y	32.24	51.46	17.77	真实值	-5.00	0.00	-20.00	真实值	100.00	50.00	1500.00

图 6(b)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	11.95	-96.51	92.11	测量	10.09	-10.03	15.07	测量	-0.49	-0.39	750.54
	Y	21.23	-23.20	21.39	真实	10.00	-10.00	15.00	真实	0.00	0.00	750.00

图 6(c)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	-1.02	-246.721	244.92	测量	0.05	-0.02	0.00	测量	-0.25	-0.29	300.21
	Y	-1.05	-1.02	-1.02	真实	0.00	0.00	0.00	真实	0.00	0.00	300.00

100 000 幅图像的标志点识别准确率为 99.543%, 即有 99 543 幅图像成功进行了位姿解算。对于位姿测量成功的图像,测得了整体的平

均旋转和平移误差。俯仰  $\theta_x$  误差为  $0.07^\circ$ ; 偏航  $\theta_y$  误差为  $0.03^\circ$ ; 滚动  $\theta_z$  误差为  $0.04^\circ$ ;  $t_x$  平移误差为 0.39 mm;  $t_y$  平移误差为 0.27 mm;  $t_z$  平

移误差为 0.33 mm。由此可见,本文提出的标志点检测以及相对位姿测量方法误差极小,旋转误差小于  $0.1^\circ$ ,平移误差小于 0.5 mm。

## 5.2 实际实验

如图 7 所示,将手眼相机和合作靶标安装在六自由度转台上,控制转台在一定范围内旋转和平移。相机与靶标之间的真实位姿关系可由六自由度转台得知。每转换一次位姿,手眼相机拍摄一幅合作靶标图像,同时手眼相机实时计算靶标标志点的中心位置以及合作靶标和手眼相机之间的相对位姿。总共转换 100 000 次位姿,图 8(a)、(b)和(c)展示了其中的三幅处理结果图;图 8(d)、(e)和(f)给出了其对应的靶标局部图像。

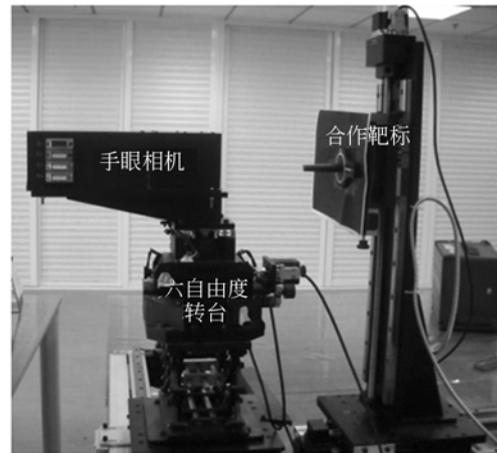


图 7 试验装置图

Fig. 7 Experiment device

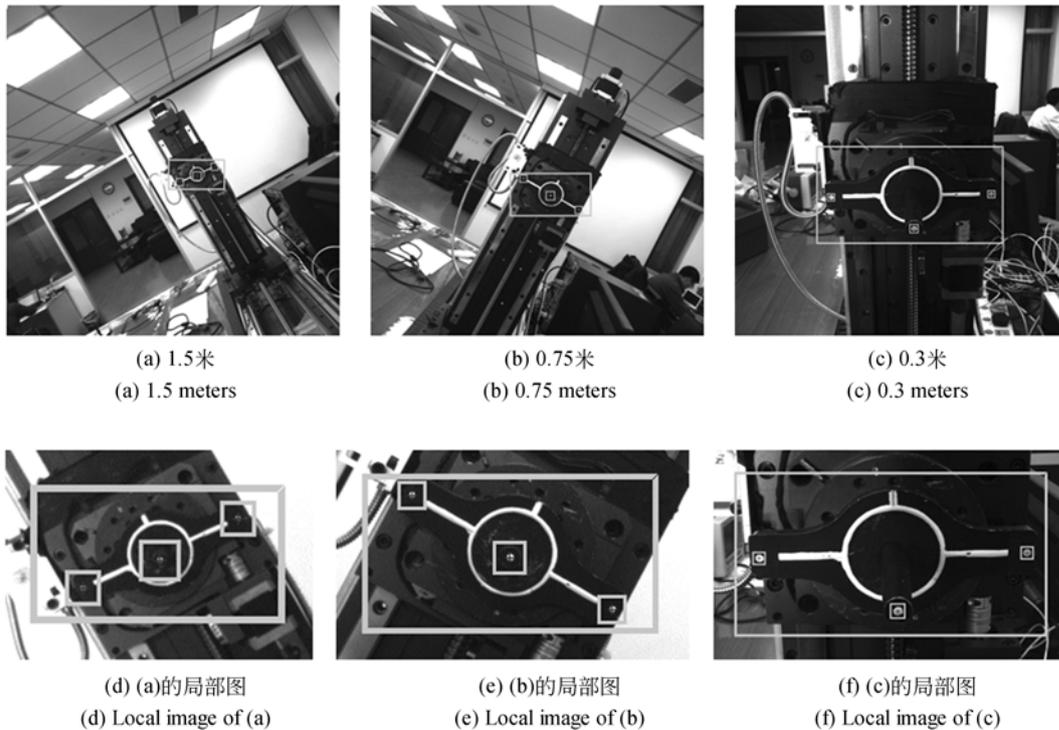


图 8 实际图像的实验结果

Fig. 8 Experiment results with real images

表 2 展示了图 8(a)、(b)和(c)所对应的标志点的中心位置以及靶标和相机间的相对位姿信息。

对于该实验中的 100 000 真实幅图像,本算法成功测得 97 254 幅图像的对应位姿,成功率为

97.254%。未能识别的原因有两种,一是靶标识别不成功,二是标志点检测不成功。前者由于背景复杂、对比度过低、运动模糊等因素引起。后者由于光照不均匀、运动模糊、背景有干扰点、标志点在图像中面积过小等因素引起。

表 2 真实图像的测量结果

Tab. 2 Measurement results with experimental images

图 8(a)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	73.00	20.00	127.00	测量值	-1.68	5.38	25.76	测量值	87.35	-15.36	1 257.72
	Y	-17.50	-37.00	11.50	真实值	-1.75	5.42	26.01	真实值	86.94	-15.78	1 258.42
图 8(b)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	40.77	-42.76	127.63	测量	-0.25	3.26	-29.59	测量	30.02	-52.77	753.86
	Y	-78.50	-25.38	-122.74	真实	0.06	3.35	-29.77	真实	30.56	-52.29	753.45
图 8(c)	标志点坐标/pixel			旋转角度/(°)			沿各坐标轴的平移距离/mm					
	坐标	点 A	点 B	点 C	数值	俯仰 $\theta_x$	偏航 $\theta_y$	滚动 $\theta_z$	数值	X 轴 $t_x$	Y 轴 $t_y$	Z 轴 $t_z$
	X	38.82	-216.02	276.00	测量值	-15.55	0.18	1.26	测量值	8.48	-21.42	299.933
	Y	-180.85	-83.96	-73.64	真实值	-15.53	-0.32	1.19	真实值	8.72	-21.50	300.04

对于成功测得位姿的图像,测得了平均旋转和平移误差。俯仰  $\theta_x$  误差为  $0.35^\circ$ ; 偏航  $\theta_y$  误差为  $0.29^\circ$ ; 滚动  $\theta_z$  误差为  $0.42^\circ$ ;  $t_x$  平移误差为  $0.74$  mm;  $t_y$  平移误差为  $0.67$  mm;  $t_z$  平移误差为  $0.92$  mm。位姿测量的精度取决于标志点的中心定位精度。在真实场景下,靶标背景复杂、光照条件变化多,靶标标志点中心定位精度就会降低,因而真实实验的平均误差相较于模拟实验都有所增加。然而,平均旋转误差依旧小于  $0.2^\circ$ , 平均平移误差小于  $1$  mm。由此,进一步证明了本文提出的算法具有很高的精度,可行性高。

## 6 结 论

本文提出了一种合作靶标标志点的快速检测方法,并利用 P3P 算法对合作靶标和相机之间的

相对位置和姿态进行了精确解算。给定靶标图像,算法首先采用圆形和直线结合的方式对合作靶标进行快速识别;然后利用合作靶标上图形之间的比例关系,用相互有部分重叠的小窗对靶标区域进行扫描,继而在每个小窗内寻找最亮点作为候选点,再利用标志点的圆形特征从候选点中迅速识别标志点并且进行中心定位;最后结合相机的内参数得到高精度的相对位置和姿态。使用大量模拟和真实图像对算法进行了验证和分析。仿真表明,识别准确率均高于  $99\%$ ,位姿解算的旋转误差小于  $0.1^\circ$ ,平移误差小于  $0.5$  mm。实验表明,识别准确率均高于  $97\%$ ,位姿解算的旋转误差小于  $0.2^\circ$ ,平移误差小于  $1$  mm。该方法速度快、精度高、操作简单,可应用于工业、农业、航空等领域的实时高精度位姿测量。下一步的主要工作集中在提高标志点中心定位精度。

### 参考文献:

- [1] 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.  
LI Y, YE P J, PENG J, et al.. Artificial target recognition and location based on Mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 566-572. (in Chinese)
- [2] 温卓漫,王延杰,邸男,等. 基于合作靶标的在轨手

- 眼标定[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1005-1012.  
WEN Z M, WANG Y J, DI N, et al.. On-orbit hand-eye calibration using a cooperative target [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1005-1012. (in Chinese)
- [3] FLORES-ABAD A, MA O, PHAM K, et al.. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68: 1-26.
- [4] 晁志超,伏思华,姜广文,等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统 [J]. 光学学报, 2011, 31(3):

- 2001-2007.  
ZHAO ZH CH, FU S H, JIANG G W, *et al.*. Mono camera and laser range finding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 2001-2007. (in Chinese)
- [5] 陈小林. 单目视觉系统的姿态解算算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 45-48.  
CHEN X L Research of attitude calculation of single camera visual system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(6): 45-48. (in Chinese)
- [6] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] 戴士杰, 邵猛, 吴佳宁, 等. 使用 12 像素对称模板的棋盘格内角点检测 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1306-1311.  
DAI SH J, SHAO M, WI J N, *et al.*. Internal corner detection of chessboard image for camera calibration based on 12 pixels symmetrical template [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1306-1311. (in Chinese)
- [8] GRANADEA S R, LECROY J. Analysis and design of solid corner cube reflectors for a space navigation application [C]. *Proceedings of the SPIE*, Orlando, USA: SPIE, 2005: 120-129.
- [9] 赵连军, 刘恩海, 张文明, 等. 单目三点位置测量精度分析 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1190-1197.  
ZHAO L J, LIU E H, ZHANG W M, *et al.*. Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1190-1197. (in Chinese)
- [10] 刘巍, 尚志亮, 马鑫, 等. 基于彩色编码的副油箱风洞模型位姿测量方法 [J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1556-1563.  
LIU W, SHAN ZH L, MA X, *et al.*. Position and attitude measuring method of auxiliary fuel tank based on color-coding in wind tunnel [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2015, 36(5): 1556-1563. (in Chinese)
- [11] 温卓漫, 王延杰, 邱男, 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): 1300-1338.  
WEN ZH M, WANG Y J, DI N, *et al.*. Fast recognition of cooperative target used for position and orientation measurement of space station's robot arm [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1300-1338. (in Chinese)
- [12] WEN Z M, WANG Y J, KUIJPER A, *et al.*. On-orbit real-time robust cooperative target identification in complex background [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(5): 1451-1463.
- [13] 叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗, 等. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(4): 1105-1111.  
YE F, CHEN C J, LAI Y Z, *et al.*. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1105-1111. (in Chinese)
- [14] 周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论 [J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1698-1701.  
ZHOU X, ZHU F. A note on unique solution conditions of the P3P problem [J]. *Chinese Journal of Computers* 2003, 26(12): 1698-1701. (in Chinese)

#### 作者简介:



葛双龙 (1974—), 男, 吉林长春人, 博士, 副教授, 1998 年于东北师范大学获得学士学位, 2004 年于中国人民公安大学获得硕士学位, 主要从事视频监控、图像处理等方面的研究。E-mail: 65957146@qq.com



温卓漫 (1991—), 女, 湖南岳阳人, 博士研究生, 2012 年于东北师范大学获得学士学位, 现为中国科学院大学博士研究生, 主要从事数字图像处理、计算机视觉研究。E-mail: wenzhuoman@sina.com