http://hkxb. buaa. edu. cn hkxb@buaa. edu. cn

DOI: 10. 7527/S1000-6893. 2014. 0118

空间站机械臂位姿测量中合作靶标的快速识别

温卓漫^{1,2},王延杰^{1,*},邸男¹,初广丽^{1,2,3},金明河⁴

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 白城师范学院,白城 137000

4. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室,哈尔滨 150080

摘 要:空间站机械臂在完成辅助对接或者目标抓捕时,需要实时求取机械臂上的视觉传感器与目标上的合作靶标之间的位置和姿态,而其前提条件是合作靶标的快速识别。本文提出了一种合作靶标的快速识别算法。算法分为3大步骤:首先用 Sobel 算子和改进的非极大值抑制算法提取靶标图像的单像素边缘;然后将每条边缘分为两段,分别采用最小二乘法进行圆拟合,若两段拟合结果相似则该边缘属于圆形;最后根据圆形的大小在每个圆形周围开出一大一小两个正方形窗口,统计在两窗的补集内距离圆心较近的直线数量,若直线数量满足规定条件则认为是合作靶标。利用手眼相机、六自由度转台和合作靶标对算法进行了验证,实验结果表明该算法能在1.5m的距离内准确识别合作靶标,且不受光照条件影响。合作靶标的识别算法快速、稳定、抗干扰能力强。

关键词:机器视觉;目标识别;非极大值抑制;圆检测;直线检测

中图分类号: V526; TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2015)04-1330-09

空间站机械臂^[1-4]是在空间站舱内或者舱外 完成辅助对接、目标搬运等操作的重要工具。通 常情况下,机械臂上安装有视觉传感器(摄像机) 和抓捕机构;对接的飞船或者搬运的目标上安装 有被抓捕机构和合作靶标^[5-8]。在对接或者抓取 的过程中,需要实时求取视觉传感器相对于合作 靶标的位置和姿态,进而转换为机械臂上的抓捕 机构与目标上的被抓捕机构之间的位姿关系,从 而控制机械臂规划抓取路径。所以,目标上合作 靶标的快速识别是实时位姿测量的先决条件。

目前,美国的航空航天项目在飞船对接时大都采用改进的视频制导敏感器(Advanced Video

Guidance Sensor, AVGS)作为合作靶标,靶标由 4 个加了滤光片的标识点构成。分别使用两种不 同波长的激光照射靶标,第1种激光不被反射,产 生背景图;第2 种被反射,产生前景图。二者相 减;用一个阈值提取结果图,图上就只剩下标识点 了;用多点透视算法(Perspective-n-Point, PnP) 根据标识点的图像坐标求解位姿,从而实现全自 动识别。这种方案需要使用两种激光照明,靶标 的制作很复杂,对舱内机械臂对合作目标的抓取 不适用。日本工程测试卫星7号(Engineering Test Satellite-7, ETS-VII)使用3点非共面光 标,使用视觉的方式进行识别。在中国,天宫与神

基金项目:国家"973"计划(2013CB733103)

收稿日期: 2014-05-06; 退修日期: 2014-05-26; 录用日期: 2014-06-10; 网络出版时间: 2014-06-18 10:55 网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/10.7527/S1000-6893.2014.0118.html

[★]通讯作者 . Tel. : 0431-86176560 E-mail: wangyj@ciomp. ac. cn

引用格式: Wen Z 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 Sinia, 2015, 36(4): 1330-1338. 温卓漫, 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.

舟 8、9、10 号手动对接时使用的是十字形靶标,靶 标的识别是依靠人眼观测完成的;自动对接时使 用的是激光雷达系统。

本文提出了一种具有圆形特征合作靶标的快 速识别方案。本合作靶标识别的重点是圆检测, 最著名的圆检测算法是 Hough 变换法,然而此算 法需要将图像坐标系变换为参数坐标系,运算量 和存储量都很大,基于它的改进算法^[9-11]很多,然 而速度都不够理想。现有的最快圆检测算法是 Wu 等^[12]提出的,本文在该算法的基础上提出了 一种速度更快的改进方案。为了进一步提高识别 准确率,在圆检测后根据靶标上的直线特征再次 进行了靶标判别。合作靶标识别算法计算量小、 速度快、准确率高。

1 合作靶标

合作靶标如图 1 所示,主要用于空间站机械 臂抓取合作目标时的位姿解算。靶标由 1 个圆环 和若干直线构成,圆环中心有一与靶标平面垂直 的立柱 OA。3 个圆形标识点 A、B、C 组成等腰三 角形,主要用于机械臂相对于该靶标的位姿求解。



图 1 合作靶标 Fig. 1 Cooperative target

本文利用该靶标的圆形和直线等形状特征, 提了一种快速、准确的识别算法。该算法能够在 0.3~1.5 m 范围内快速识别靶标。

靶标识别算法主要分为 3 大步骤:首先,根据 梯度信息提取单像素图像边缘;其次,判断每条边 缘是否构成圆形;最后,判断圆形边缘旁是否存在 直线进而识别出合作靶标。

2 边缘检测

为了消除光电噪声、数字化噪声、压缩噪声等 噪声的影响,在边缘检测之前需要先用高斯平滑 模板去除图像噪声。

然后,对图像进行边缘提取。最普遍使用的 Canny 算子对图像噪声过于敏感,且算法复杂度 高,计算量过大。因此,先用 Sobel 算子对图像进 行粗略的边缘提取,再使用改进的非极大值抑制 获取细化的图像边缘。

以理想圆与2维高斯模板卷积形成的图像作 为原图,用不同非极大值抑制方法得到的边缘提取 结果及其局部放大图如图2所示。其中,图2(a) 是用传统的非极大值抑制算法^[13]得到的细化结 果,从其局部放大图像图2(b)中不难看出提取的 边缘较粗,大部分边缘不是单像素的。图2(c)是 使用文献[14]得到的细化结果,对比图2(b)细化 效果有一定提高,但左上、左下、右上、右下4个方 向的局部区域依旧存在非单像素边缘,如图2(d) 所示。图2(e)是运用本文算法得到的结果,细化 效果有明显提升,除个别像素点外基本实现了单 像素边界提取,图2(f)是它的局部放大图像。





新算法的核心是利用梯度方向角选取邻域像 素,且在这4个方向上更偏重当前点与其4个邻 域的比较,其大致流程如下所述。

首先,对于用 Sobel 算子求出的所有边界点 (x, y),计算其在原图中的梯度方向角 α 和梯度 幅度 g 为

$$\begin{cases} \alpha(x,y) = \begin{cases} \arctan(g_y/g_x) & g_x \neq 0 \\ \pi/2 & g_x = 0, g_y > 0 \\ -\pi/2 & g_x = 0, g_y < 0 \end{cases}$$
(1)

式中: g_x 为 Sobel 算子计算出的 x 方向的梯度; g_y 为 y 方向的梯度。

然后,根据边缘上每个像素点的梯度方向角 正切值 a 的大小,按照图 3 所示区域 1 到区域 6分为 6 种情况。定义中间变量 $g_i(i \in [1, 4])$,表 示当前点相邻两点梯度幅度的加权平均值,加权 系数为 w。然后,

1) 标记1区,当 $a \in [-0.5, 0.5]$ 时,令 $g_1 = g(x-1, y), g_3 = g(x+1, y), g_2, g_4$ 为0,权重w为1。

2) 标记 2 区, 当 $a \in (0, 5, 1]$ 时, 令 $g_1 = g(x-1, y-1), g_2 = g(x-1, y), g_3 = g(x+1, y), g_4 = g(x+1, y), 权重 w = k_1 |g_y(x, y)| / |g_x(x, y)|_o$

3) 标记 3 区,当 $a \in (1, 2)$ 时,令 $g_1 = g(x - 1, y - 1), g_2 = g(x, y - 1), g_3 = g(x + 1, y + 1), g_4 = g(x, y + 1), 权重 w = k_2 | g_x(x, y) | / | g_y(x, y) |_{\circ}$

4) 标记 4 区,当 $a \in (-\infty, -2]$ 或者 $a \in [2, +\infty)$ 时,令 $g_1 = g(x, y-1), g_3 = g(x, y+1), g_2, g_4$ 为零,权重 w为 1。

5) 标记 5 区,当 $a \in (-2, -1)$ 时,令 $g_1 = g(x+1, y-1), g_2 = g(x, y-1), g_3 = g(x-1, y+1), g_4 = g(x, y+1), 权重 w = k_3 |g_x(x, y)|/|g_y(x, y)|_o$

6) 标记 6 区,当 $a \in [-1, -0, 5]$ 时,令 $g_1 = g(x+1, y-1), g_2 = g(x+1, y), g_3 = g(x-1, y+1), g_4 = g(x-1, y),$ 权重 $w = k_4 |g_y(x, y)|/|g_x(x, y)|_o$

需要注意的是,系数 $k_1 \sim k_4$ 的取值在(0,1]之间,取值越接近 0 则细化效果越明显,如果过小 则容易造成边界断裂。



图 3 梯度方向角划分图

Fig. 3 Dividing diagram according to gradient direction angles

令 G_1 、 G_2 分别为

$$\begin{cases} G_1 = wg_1 + (1-w)g_2 \\ G_2 = wg_3 + (1-w)g_4 \end{cases}$$
(2)

最后,进行边界点判断。若当前点梯度幅度 g(x,y)大于等于 G₁ 和 G₂,则认为当前点是边界 点,否则不是边界点。

获取了细化的图像边缘以后,需要进行边缘 跟踪^[15-16]。由于新算法剔除了许多虚假的边缘 点,边缘跟踪所需的时间大大减少了。跟踪时剔 除长度小于10个像素的边缘,因为这样的边缘分 成两段后每段仅有5个像素长,用最小二乘法对 它进行圆拟合已知量太少,意义不大;另外,靶标 上圆环在1.5m处时形成的边缘有几十个像素 长,远远大于10个像素。于是把图像上每一条长 于10个像素的边缘记录并且保存下来,以便进行 下一步判断。

3 圆形特征识别

如图 4 所示,将保存下来的每一条边缘 l 从 中点分为两部分,前一部分为 l_1 ,后一部分为 l_2 。 分别对 l_1 和 l_2 用最小二乘法进行圆拟合, l_1 对应 的圆心坐标为(x_{c1} , y_{c1}),半径为 R_{c1} 。 l_2 对应的 圆心坐标为(x_{c2} , y_{c2}),半径为 R_{c2} 。整条边缘 l对应的圆心坐标为(x_c , y_c),半径为 R_c 。

对 l₁ 和 l₂ 的拟合算法流程如下所述。

假设边缘长度为 *n*,对于其中每一个边缘点 (*x*, *y*)有

$$(x-x_{\rm c})^2 + (y-y_{\rm c})^2 = R_{\rm c}^2$$
 (3)





Fig. 4 Schematic diagram of circle fitting

即

$$x^{2} + y^{2} + ax + by + c = 0$$
(4)

$$\vec{x} \mathbf{\dot{p}} : a = -2x_{c}; b = -2y_{c}; c = x_{c}^{2} + y_{c}^{2} - R_{c}^{2}.$$

建立方程

$$F(a,b,c) = \sum_{i=1}^{n} (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2$$
(5)

式中: *x_i* 和 *y_i* 分别为边缘上点的横坐标和纵坐标。

为了使 F(a,b,c)的值尽量小,将它对参数 a、 b、c 分别求偏导,令偏导数均为零,就可以得到 F(x)的极小值,即

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = \sum_{i=1}^{n} 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)x_i = 0\\ \frac{\partial F}{\partial b} = \sum_{i=1}^{n} 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)y_i = 0\\ \frac{\partial F}{\partial c} = \sum_{i=1}^{n} 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0 \end{cases}$$

(6)

)

式(6)可以用克莱姆法则或者消元法求解,计 算出 a,b,c。那么,圆心坐标和半径分别为

$$\begin{cases} (x_{c}, y_{c}) = \left(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}\right) \\ R_{c} = \frac{\sqrt{a^{2} + b^{2} - 4c^{2}}}{2} \end{cases}$$
(7)

标准差为

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} |(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - R_c^2|}}{R_c}$$
(8)

记前一半边缘的标准差为 σ_{c1}, 后一半边缘的

标准差为 σ_{c2} 。判断两个标准差 σ_{c1} 、 σ_{c2} 是否满足 $\sigma < k_5 R_c$ (9)

式中: k_5 为常数,取值在(0,1)之间。如果满足,则计算相似系数:

$$S = \left(1 - \frac{2 \left|R_{c1} - R_{c2}\right|}{R_{c1} + R_{c2}}\right) \cdot \left(1 - \frac{2 \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2}}{R_{c1} + R_{c2}}\right) (10)$$

S表示边缘 l 的前后两部分 l_1 和 l_2 圆拟合 结果的相似程度,其数值越接近 1 则相似程度越 高。倘若系数 S在一定区域范围内,则认为边缘 l是圆。将整条边缘的坐标用最小二乘法重新进 行圆拟合,求出圆心坐标(x_c , y_c)和半径为 R_c 。 这样就得到了全部属于圆的边缘。

但是上述边缘中有一些是属于同一个圆的, 所以需要进行圆重组。同理,按照式(10)求取每 两段边缘所属圆的相似系数 S。如果 S 在一定范 围内则认为这两条边缘属于同一个圆,将它们组 合成一条边缘再进行圆拟合,求取圆心和半径。

另外,由于只需要在 1.5 m 的范围内识别靶标,靶标的半径长度一定属于某一固定范围,所以 应该剔除半径不在该范围内的圆。

4 靶标判别

为了提高识别的准确率,本算法在检测圆形 的基础上,根据直线信息执行了进一步的靶标判 别。在圆形的周围添加大小两个矩形窗口如图 5 所示。如若在窗口内存在规定数量的直线,则说 明该图形是合作靶标。





根据实际物理尺寸可知,靶标上圆环的内半

径为 R;圆环宽度为 W;圆环中心到圆环左右两 边直线末端的距离为 D;设 Δ 为根据靶标尺寸确 定的一个固定数; (x_1, y_1) 为大窗口的左下角坐 标; (x_2, y_2) 为小窗口的左下角坐标; (x_3, y_3) 为小 窗口的右上角坐标; (x_4, y_4) 为大窗口的右上角 坐标。由圆形拟合算法可以得知圆环在图像中内 半径 R_c 的像素大小。

那么由几何关系,可以得出确定两个矩形窗 位置的4个坐标为

$$\begin{cases} (x_1, y_1) = \left(x_c - \frac{R_c}{R}(D - \Delta)\cos 45^\circ, \\ y_c + \frac{R_c}{R}(D - \Delta)\sin 45^\circ\right) \\ (x_2, y_2) = \left(x_c - \frac{R_c}{R}(R + W), y_c + \frac{R_c}{R}(R + W)\right) \\ (x_3, y_3) = \left(x_c + \frac{R_c}{R}(R + W), y_c - \frac{R_c}{R}(R + W)\right) \\ (x_4, y_4) = \left(x_c + \frac{R_c}{R}(D - \Delta)\cos 45^\circ, \\ y_c - \frac{R_c}{R}(D - \Delta)\sin 45^\circ\right) \end{cases}$$

$$(11)$$

再根据上述坐标确定的两个矩形窗的补集 内,找出所有长度大于 k₆R₆的边缘,k₆为一固定 数,并且求出每条边缘在原图中梯度方向角绝对 值的标准差为

$$\sigma_{|\alpha|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(|\alpha| - \frac{\sum_{i=1}^{n} |\alpha|}{n} \right)^{2}}{n-1}} \qquad (12)$$

式中: α 的值可以由式(1)求出;n为边缘的长度, 即总像素个数。

如果是理想直线,标准差 σ_{lal} 应该为 0°。然 而,实际情况并非如此。因而规定如果 σ_{lal} 小于 2°,则认为该边缘是直线。然而这样求出的直线 并不一定是靶标圆环两侧的直线。因此,进一步 运用最小二乘法求出每条直线对应的 y=ax+b。 若圆心与直线的距离小于 $k_7R_c(k_7$ 为小于 1 的正 常量),则认为该直线是靶标上圆环旁的直线。

在理想情况下,靶标两个矩形窗的补集内应 该存在4条满足上述条件的边缘。然而在实际 中,由于光照不均匀等因素,边缘有可能发生断 裂、误检等情况。因此,规定如果有2到6条这样 的直线,则认为该图形是合作靶标,否则不是。 至此,已根据靶标形状特点完成了对合作靶 标的判别。

5 实验

运用如图 6 所示的实验装置对算法进行了验 证。手眼相机被安装在六自由度转台上,合作靶 标与相机相隔一定距离。



图 6 验证实验装置 Fig. 6 Demonstration experiment equipment

在距离为 0.3 m 时,拍摄合作靶标图像如 图 7(a)所示,并且按照本文算法对该图逐步进行 处理。

图 7(b)是对图 7(a)边缘提取的结果,基本上 实现了单像素理想边缘提取,由于靶标边缘的梯 度幅度较大,这里选取的阈值也相应较大,因此去 除了许多不需要的边缘信息。图 7(c)是圆检测结 果,一共检测出了 3 个圆,检测结果如表1 所示。

实验所用电脑配置如下:内存 2.0 G,CPU 主频 3.40 GHz。表 2 列出了传统 Hough 变换、 文献[9]和本文算法在该计算机上进行圆检测所 用的时间。可以看出,本文算法在速度上优于 Hough 算法和文献[9]算法。

在每个圆的周围开两个窗,并且在两窗的补 集内进行边界跟踪,在 3 个圆的周围分别找到了 2、8、2 条边缘,图 7(d)给出了局部跟踪结果。通 过第 4 小节的直线判断法则,得到 3 个圆形旁满 足条件的边缘条数分别为 0、3、0。图 7(e)显示了 局部的直线判断结果。只有第 2 个圆形周围存在 规定数量的直线,因而找到了合作靶标如图 7(f), 算法总共用时 84 ms。



(a) Original image



(b) Edges detected



(c) Circles detected



(d) Local image of edges around circle

表 1





(f) Cooperative target recognition result

图 7 各步骤实验结果图 Fig. 7 Experiment results of each step

Table 1	Results of circle detection	
Circle No .	Center/pixel	Radius/pixel
1	(419, 123)	15. 108 164
2	(622,650)	103.065 788
3	(426, 865)	15. 408 779

圆检测结果

表 2 圆检测用时比较

Table 2	Comparison of time spent on circle detection			
Method	Hough	Ref. [12]	Proposed method	
Time/ms	643	89	72	

在 1.5 m 的距离内,每隔 0.5 m 对合作靶标 拍照,识别结果如图 8 所示。结合图 7 和图 8 可 知,本算法满足空间站机械臂项目在 0.3 ~1.5 m 范围内准确识别靶标的要求。此外,在不同的光 照条件下对识别算法的稳定性进行了验证,如 图 9 所示。

从图 9 可以看出,本识别算法不受光照条件 影响,能够在不同照度情况下有效地识别靶标。

为了验证算法的鲁棒性,让识别算法连续工 作了4个小时。在此期间,光照条件随着太阳高 度角变化而变化;合作靶标与摄像机的相对距离 由六自由度转台控制在0.3~1.5 m之间变化。 中国相关空间项目一般每秒钟处理4帧或者8帧 图像。本算法每秒钟处理8帧图像,4小时总共 处理了115 200幅图像。实验过程中没有丢帧, 合作靶标的识别准确率达到了97.2%。可见,该 算法满足空间机械臂抓取系统对实时性和准确性 的要求。



(a) Distance is 0.5 m

(b) Distance is 1.0 m

(c) Distance is 1.5 m

图 8 靶标在不同距离时的识别结果 Fig. 8 Recognition results when target distance varies



(a) Light intensity is weak

(b) Light intensity is moderate

(c) Light intensity is strong

图 9 不同光照条件下的识别结果

Fig. 9 Recognition results under different lighting conditions

6 结 论

基于改进的非极大值抑制的边缘提取算法基本上能够提取出单像素理想边缘。

2)利用最小二乘法进行圆拟合的圆检测算法计算量小、速度快;圆环两旁的直线检测算法新颖且高效。

3)该合作靶标识别算法速度快,准确率高, 满足空间项目对鲁棒性和实时性的需求。下一步 的研究重点在于进一步降低算法的复杂度和空间 存储量。

参考文献

[1] Wei C, Zhao Y, Tian H. Grasping control of space robot for capturing floating target [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 633-637 (in Chinese). 魏承,赵阳,田浩.空间机器人捕获漂浮目标的抓取控制 [J].航空学报,2010,31(3):633-637.

[2] Cong P C, Sun Z W. Research of impact issues during dual-arm space manipulator capturing object[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(4): 235-241 (in Chinese).

丛佩超,孙兆伟.双臂式空间机械臂捕捉目标的碰撞问题研究[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(4); 235-241.

[3] Zhang F H, Fu Y L, Wang S G. Adaptive control of free-floating space robot with inertia parameter uncertainties
 [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 32 (12): 2347-2354 (in Chinese).

张福海,付宜利,王树国. 惯性参数不确定的自由漂浮空 间机器人自适应控制研究[J]. 航空学报,2012,32(12): 2347-2354.

[4] Liang J, Chen L. Improved nonlinear feedback control for free-floating space-based robot with time-delay based on predictive and approximation of Taylor series[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 163-169 (in Chinese).

梁捷,陈力.具有时延的漂浮基空间机器人基于泰勒级数 预测、逼近的改进非线性反馈控制[J].航空学报,2012, 33(1):163-169.

[5] Li J, Yuan F, Hu Y H. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1635-1641 (in Chinese).

李晶, 袁峰, 胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1635-1641.

[6] Wei X Q, Huang J M, Chen F, et al. Research on super close distance independent image navigation of cooperative target[J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(2): 28-39 (in Chinese).

魏祥泉,黄建明,陈凤,等.合作目标超近距离自主影像 导航技术研究[J].载人航天,2012,18(2):28-39.

[7] Liang B, Du X D, Li C, et al. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft[J]. Robot, 2012, 34(2): 243-256 (in Chinese).

梁斌,杜晓东,李成,等.空间机器人非合作航天器在轨 服务研究进展[J].机器人,2012,34(2):243-256.

[8] Wen Z M, Wang Y J, Di N, et al. On-orbit hand-eye calibration using cooperative target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1005-1012 (in Chinese).

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.

[9] Zhou F, Yang C, Wang C G, et al. Circle detection and its number identification in complex condition based on random Hough transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 623-627 (in Chinese).

周封,杨超,王晨光,等. 基于随机 Hough 变换的复杂条 件下圆检测与数目辨识 [J]. 仪器仪表学报,2013,34 (3):623-627.

[10] Duan L M, Wang W, Zhang X. Circle detection through improved Hough transform [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(9): 2148-2152 (in Chinese).

> 段黎明, 汪威, 张霞. 改进的 Hough 变换实现圆检测[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9): 2148-2152.

[11] Liu Y J, Lai R F, Rong W B, et al. A fast center detecting method based on improved randomized Hough transform[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(4): 298-304 (in Chinese).
刘延杰,赖日飞,荣伟彬,等. 基于改进随机 Hough 变换

的快速中心检测方法[J]. 纳米技术与精密工程,2011,9 (4):298-304.

- [12] Wu J P, Li J X, Xiao C S, et al. Real-time robust algorithm for circle object detection [C]// The 9th International Conference for Young Computer Scientists, 2008, 1722-1727.
- [13] Pratt W K. Digital image processing [M]. Deng L H, Zhang Y H, translated. Beijing: China Machine Press, 2005: 330-331 (in Chinese).
 Pratt W K. 数字图像处理[M]. 邓鲁华,张延恒,译. 北京:机械工业出版社, 2005: 330-331.
- [14] Wang J, Wang H L, Xiang M S, et al. Sub-pixel accuracy central location of circle target based on non-maximum suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1460-1468 (in Chinese).
 王静,王海亮,向茂生,等. 基于非极大值抑制的圆目标

亚像素中心定位 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1460-1468.

- [15] He F Y, Tian Z, Liu X Z, et al. A fast edge tracking algorithm for image segmentation using a simple Markov random field model[C]//International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2012: 633-636.
- [16] Tri C P, Yong S I, Ja C K, et al. An enhanced edge tracking method using a low resolution tactile sensor[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2010, 8(2):462-467.

作者简介:

温卓漫 女,博士研究生。主要研究方向:数字图像处理,机器 视觉。

E-mail: wenzhuoman@gmail.com

王延杰 男,研究员,博士生导师。主要研究方向:数字图像处 理,电视跟踪和自动目标识别技术。

Tel: 0431-86176560 E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn

Fast recognition of cooperative target used for position and orientation measurement of space station's robot arm

WEN Zhuoman^{1,2}, WANG Yanjie^{1,} *, DI Nan¹, CHU Guangli^{1, 2, 3}, JIN Minghe⁴

- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
- 2. The University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 3. Baicheng Normal University, Baicheng 137000, China
- 4. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China

Abstract: When space station's robot arm performs auxiliary docking or target arresting, position and orientation between the visual sensor fixed on robot arm and the cooperative target on object must be measured in real-time, and its prerequisite is fast recognition of cooperative target. A fast recognition algorithm of cooperative target is proposed. The algorithm consists of three steps. To begin with, Sobel operator and the improved non-maximum suppression algorithm are hired to extract single pixel edges in the picture of cooperative target. Moreover, every edge is split into two sections, and each section is fitted into a circle using least square circle fitting method. If two halves have similar fitting results, the edge belongs to a circle. Finally, we draw two square windows around each circle according to the circle's radius, one big and one small. The number of straight lines that are in the cooperative target are executed to test our algorithm. Experiments using handey camera, six-DOF turntable and the cooperative target are executed to test our algorithm. Results demonstrate that the proposed algorithm can accurately identify the cooperative target within a distance of 1.5 m regardless of lighting condition. In conclusion, the cooperative target recognition method is fast and stable and has strong anti-interference capability.

Key words: robot vision; target identification; non-maximum suppression; circle detection; line detection

Received: 2014-05-06; Revised: 2014-05-26; Accepted: 2014-06-10; Published online: 2014-06-18 10:55 URL: www. cnki. net/kcms/detail/10. 7527/S1000-6893. 2014. 0118. html Foundation item: National Basic Research Program of China(2013CB733103) * Corresponding author. Tel.: 0431-86176560 E-mail: wangyj@ciomp. ac. cn