

doi: 10.7690/bgzdh.2018.09.020

基于视觉的特种机械臂目标识别与定位

黎宏久, 张志安, 朱 朔

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对特种机械臂在复杂环境下对危险品抓取的准确性与实时性需求, 提出一种利用视觉信息识别定位的方法。给出基于单双目视觉系统结合的识别定位策略, 采用颜色分割、开闭运算、边缘轮廓检测和特征匹配完成单目视觉算法, 通过立体标定、立体校正和深度计算完成双目视觉算法; 根据齐次变换得出的目标物体位置信息对机械臂进行关节转动角度求解, 利用角度阈值范围得出最优解; 并通过目标物体位姿测量实验和抓取操作进行验证。验证结果表明: 该方法是可行和合理的, 能实现目标物体的实际抓取。

关键词: 特种机械臂; 单目视觉; 双目视觉; 运动学逆解

中图分类号: TP241.3 **文献标志码:** A

Target Recognition and Orientation of Special Mechanical Arm Based on Vision

Li Hongjiu, Zhang Zhian, Zhu Shuo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to satisfy accuracy and real-time needs of special mechanical arm fetching dangerous goods in the complex environment, research method of using visual information to identify and orientate is proposed. A visual recognition and positioning strategy based on a single and binocular combination is presented. The color segmentation, opening and closing operations, edge contour detection and feature matching are used to complete the monocular vision algorithm. The stereo calibration, stereo correction and depth calculation are used to complete the binocular vision algorithm. According to the position information of the target object obtained by the homogeneous transformation, special mechanical arm is used to solve the joint rotation angle, and the optimal solution is obtained by using the angle threshold range, and through the target object pose measurement experiment and grasping operation to verify. The verification results show that the method is feasible and reasonable, and can achieve the actual fetching of the target.

Keywords: special mechanical arm; monocular vision; binocular vision; inverse kinematics

0 引言

在现代战场中, 为了减少人员伤亡, 特种机器人应运而生。特种机器人能在各种复杂环境下执行特种任务, 如侦察、排爆、作战等^[1]。针对排爆任务, 需要特种机器人的机械臂能实现半自动抓取且具有精准的抓取能力。基于视觉的目标识别与定位技术能够实时获取目标的特征图像信息并对目标进行精确定位, 能较好地实现复杂环境下的可靠抓取。排爆特种机械臂依靠视觉系统反馈的方位信息辅助获得目标的位置坐标, 通过机械臂的逆运动学算法优化获得各关节动作角度, 并以关节电机配合伺服动作, 从而实现整个抓取流程^[2]。

目前, 视觉目标识别与定位的热门方案是采用双目视觉技术, 利用三角法对目标定位, 根据视场差与深度信息进行 3 维重建, 得出目标物质心 3 维坐标, 但双目视觉技术在机械臂前端需要视觉伺服且为多目标种类的情况下实时处理, 运算量过大。

多自由度机械臂的逆运动学算法最常用的有解析法和几何法等, 利用 D-H 参数表建立机械臂数学模型, 进行运动学计算, 实现机械臂的关节运动优化^[3]。为了在有干扰的复杂环境下实现目标的识别与精确抓取, 笔者采用单双目结合的识别与定位方案, 并配合搭载多自由度机械臂的轮履复合全向移动平台, 在实验环境下对危险品进行抓取, 对视觉算法、机械臂逆运动学算法及操作进行验证, 最后给出实验结果。

1 视觉识别与定位策略

如图 1 所示, 特种机械臂采用单双目摄像机结合的方式进行目标识别与定位, 其机械臂抓取控制框图如图 2 所示。单目摄像机可以获取目标 2 维平面信息并能实时反馈, 虽能随机械臂随动, 但无法获得深度信息; 双目摄像机可以通过立体标定和视差关系获取目标深度信息, 但实时处理速度仅为单目的一半。所以笔者利用 2 个视觉系统的优势互补

收稿日期: 2018-06-17; 修回日期: 2018-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(11472008)

作者简介: 黎宏久(1992—), 男, 湖北人, 硕士, 从事机器人技术与应用工程研究。

来提升整体抓取精度和实时处理速度。

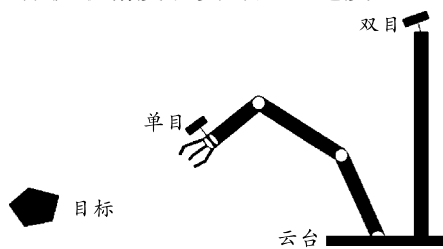


图 1 视觉抓取模型

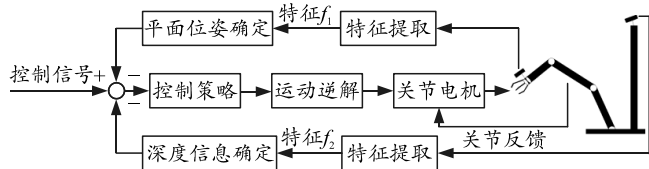


图 2 机械臂抓取系统框架

单目摄像机固定在机械臂末端上方，跟随末端执行器运动，时刻观察与抓取目标之间的相对位置，由单目视觉算法可以判别目标相对机械臂末端执行器的平面位置和方位 (x,y,θ) 。

双目摄像机固定在机械臂与移动平台连接云台上，通过双目摄像机提供的视差信息对目标深度信息进行估计。由摄像机与机械臂末端执行器的固定坐标变换关系并结合此刻双目与目标间深度信息，可得出目标与机械臂末端执行器的相对距离 (z) 。

2 单目视觉处理

2.1 目标图像预处理

机械臂末端执行器上的单目摄像机在捕获图像时，由于光照、传输干扰、噪声和环境因素等原因，图像本身会存在很多缺陷，故应先进行图像滤波。滤波前原图如图 3 所示。



图 3 单目摄像机捕获原图

笔者采用归一化块滤波器，对于图像上每一个像素点，利用卷积核和要处理的 2 维图像计算它的邻域像素和滤波器矩阵对应元素的乘积，然后相加作为该像素的值。其卷积核为

$$K = \frac{1}{K_{\text{length}} \times K_{\text{width}}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

滤波之后图像趋于平滑，此时，应对图像进行颜色空间变换与颜色分割，由于 HSV 颜色空间受光照影响小，而 RGB 空间最常用；因此，笔者结合两者优势，采用 HSV 与 RGB 结合的方式进行颜色分割^[3]。以不同的颜色像素值来获取图像掩膜，处理得到的效果如图 4 所示。



图 4 颜色分割图

由图 4 可知：由于目标物体与土壤颜色相近，如采取单一的颜色分割，无法获取纯粹图像信息，中间仍然包含一些孔洞类，存在对识别不利的因素，需要对图像进行去噪与滤波处理；因此，笔者引入图像的开闭运算。

开闭运算均能处理有缺陷的图像，但两者的处理方式并不相同。开运算能对图像中的凸点与突出线条作消除处理，闭运算能对图像中凹点与缺口作填补处理。开闭运算后效果如图 5 所示。

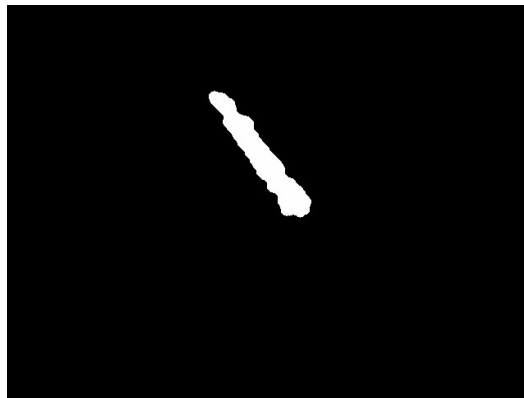


图 5 开闭运算后颜色分割图

2.2 目标寻找与识别

为了进一步减少图像中剩余信息量，实现视场

中多目标寻找，对图像进行二值化分割，将像素分为 2 类，赋予不同的值，提高实时图像处理速度。二值化公式如下：

$$g(i, j) = \begin{cases} 0, & f(i, j) < T \\ 255, & f(i, j) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

寻找目标需要找到目标颜色合适的阈值。笔者综合考量拾色器和光照环境对颜色变换的影响，选定几种目标颜色集合的阈值范围。

二值化图像生成后，需要对图像中的物体轮廓进行检测提取，运用 FindContours 算法确定二值图像边界的围绕关系，包括图像中外边界、孔边界以及边界层次关系。假定外边界与孔边界 2 种边界分别对应图像连通区域中像素值为 1 和 0 的部分，并用 $f(i, j)$ 表示图像的像素值，输入的二值图像用 0 和 1 表示，则每次进行扫描时，遇到下述 2 种情况则终止扫描：

1) 当 $f(i, j)$ 是外边界的起始点时，此时有：

$$\left. \begin{aligned} f(i, j-1) &= 0 \\ f(i, j) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2) 当 $f(i, j)$ 是孔边界的起始点时，此时有：

$$\left. \begin{aligned} f(i, j) &\geq 1 \\ f(i, j+1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

扫描结束后，从上述起始点开始，标记边界上的像素，若为新发现的边界，分配唯一标识符，记为 cnt，初始时 cnt=1，每次新发现边界则 cnt+1，直至发现所有边界形成最终轮廓。得到轮廓图像如图 6 所示。

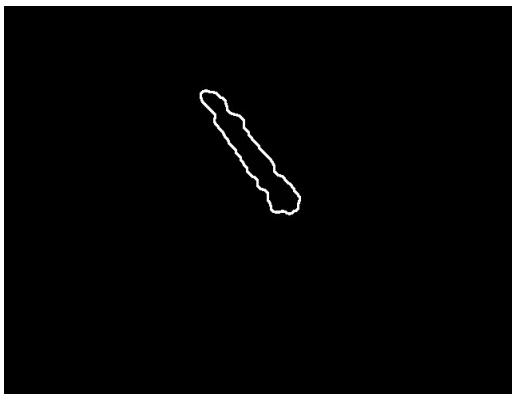


图 6 轮廓检测

2.3 目标匹配与定位

目标匹配在轮廓特征处理后，根据目标轮廓进行相应算法处理，得出目标方位。由于文中抓取的目标所处环境恶劣，位置和姿态具有不确定性，因

此对目标物体特征匹配时应保证特征匹配算法在特征匹配时的平移、旋转和尺度不变性。此处笔者引入 Hu 不变矩作为目标的特征匹配算法。

对于轮廓检测得出的目标图像，若图像的灰度分布函数为 $f(x, y)$ ，则函数相关的 $(i+j)$ 阶矩为：

$$Z_{i,j} = \iint x^i y^j f(x, y) dx dy \quad i, j = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

$(i+j)$ 阶中心矩定义为：

$$\mu_{i,j} = \iint (x - x_0)^i (y - y_0)^j f(x, y) dx dy \quad (6)$$

将式(5)和式(6)作离散化处理可得：

$$Z_{i,j} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^i y^j f(x, y); \quad (7)$$

$$\mu_{i,j} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \left(x - \frac{z_{1,0}}{z_{0,0}}\right)^i \left(y - \frac{z_{0,1}}{z_{0,0}}\right)^j f(x, y) \quad (8)$$

式(7)和式(8)中， $i, j = 0, 1, 2, \dots$ 。

当目标图像处于变化状态时， $(i+j)$ 阶矩 $Z_{i,j}$ 也相应变化，但中心矩 $\mu_{i,j}$ 由于其平移不变性和对旋转的适应性仍然保持不变。对特征匹配而言，单有以上 2 种优势依然无法满足要求，还需要保持目标图像比例不变性，此时引入归一化中心矩。表达式如下：

$$y_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_{\infty}^r} \quad (9)$$

式中 $r = (i+j+2)/2, i+j=2, 3, \dots$ 。

归一化中心矩的 2 阶和 3 阶中心矩转化而得的 7 个边界不变矩即为 Hu 不变矩^[7]。可表示为

$$H = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7\} \quad (10)$$

实时图像处理时，Hu 不变矩在连续图像条件下能保持平移、缩放和旋转的图像特征不变性^[7]。利用 Hu 不变矩定位匹配到的目标在图像中的位置，由图像矩质心法求得目标物体的具体位置坐标；设质心坐标为 (x_0, y_0) ，可根据下式求得：

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{z_{1,0}}{z_{0,0}} \\ y_0 &= \frac{z_{0,1}}{z_{0,0}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

笔者使用单目摄像机分辨率为 640×480 ，在摄像机的像素坐标系内，根据上述算法可得出的原目标中目标物体质心的 2 维坐标。

3 双目视觉处理

3.1 视觉系统坐标变换

在笔者所述视觉系统中，由于单目摄像机的存

在，实时视觉处理已经实现目标物体的 2 维坐标定位，故双目摄像机仅需根据单目给出的目标物体位置进行深度定位，无需进行图像识别处理，大大缩短处理流程。此时，应先得出单目与双目摄像机之间的固定齐次坐标变换矩阵，然后通过视觉标定算法确定单目摄像机坐标系 Σ_{C1} 、双目摄像机坐标系 Σ_{C2} 与世界坐标系 Σ_W 之间的坐标变换关系，各坐标系及其关系如图 7 所示。

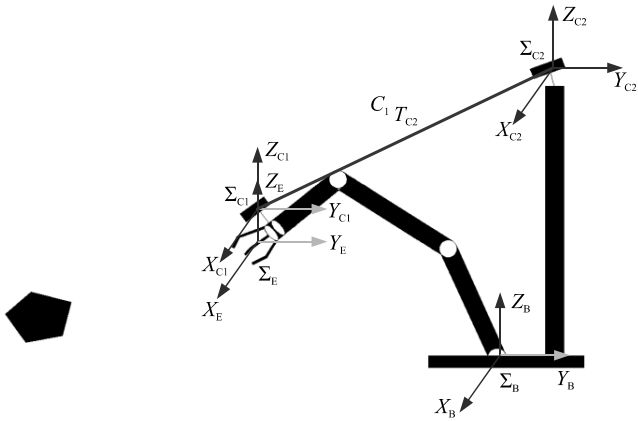


图 7 单双目坐标变换

图 7 中定义了初始状态下机械臂中各坐标系和位置关系：机械臂云台坐标系 Σ_B 、单目摄像机坐标系 Σ_{C1} 、双目摄像机坐标系 Σ_{C2} 、末端执行器坐标系 Σ_E 和单双目间的坐标转换关系 ${}^{C_1}T_{C_2}$ 。若机械臂在每次动作之前均处在初始位置，则 2 个摄像机的相对位置关系是固定的，此时可得出各坐标系间的齐次坐标变换关系。

以机械臂云台坐标系 Σ_B 为基础坐标系进行分析，双目摄像机坐标系 Σ_{C2} 相对于基础坐标系 Σ_B 之间的齐次关系可以用齐次变换矩阵 ${}^{C_2}T_B$ 来表示：

$${}^{C_2}T_B = \begin{bmatrix} {}^{C_2}R_B & {}^{C_2}P_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中： ${}^{C_2}T_B \in R^{3 \times 3}$ 为双目摄像机坐标系 Σ_{C2} 相对基础坐标系 Σ_B 的旋转矩阵； ${}^{C_2}P_B$ 为双目摄像机坐标系 Σ_{C2} 相对基础坐标系 Σ_B 的平移矢量。

同理可得出，单目摄像机坐标系 Σ_{C1} 与末端执行器坐标系 Σ_E 的齐次变换关系 ${}^{C_1}T_E$ 和末端执行器坐标系 Σ_E 与基础坐标系 Σ_B 的转换关系 ${}^E T_B$ 。根据以上各坐标系之间关系，将各复合变换矩阵依次左乘可得出单双目摄像机之间齐次关系：

$${}^{C_1}T_{C_2} = {}^{C_2}T_B^{-1} \times {}^{C_1}T_E \times {}^E T_B \quad (13)$$

3.2 立体校正与深度计算

根据单目摄像机给出的位置信息，双目可快速

识别并定位目标。在得出深度信息之前，需要对双目图像进行立体校正，修正由于双目视觉系统 2 个摄像机的视场差导致的图像畸变。通过立体校正，将实际中非共面行对准的 2 幅图像校正成共面行对准，使 2 幅图像的像素坐标系保持平行。立体校正示意图如图 8 所示。

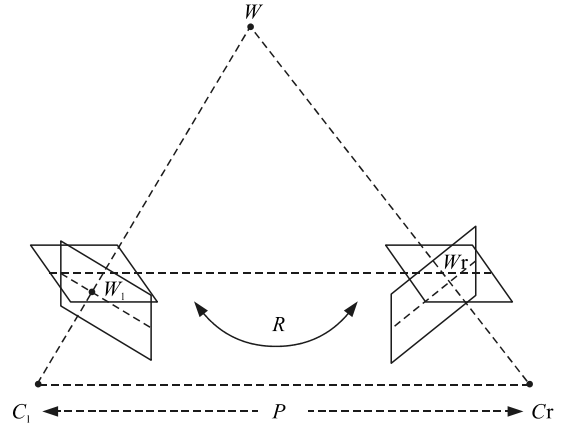
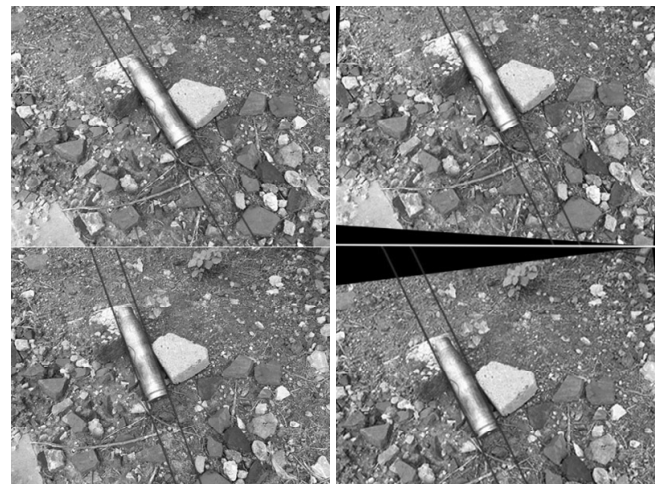


图 8 双目摄像机立体校正

图 8 中 R 为左右摄像机之间的旋转矩阵， P 为左右摄像机之间的平移矩阵，两者即是立体校正的平移参数和旋转参数， R 和 P 可由立体标定算法得到。若 R_r 和 P_r 为右摄像机参数标定得到的旋转矩阵和平移矩阵， R_l 和 P_l 为左摄像机参数标定的旋转矩阵和平移矩阵，则有：

$$\left. \begin{aligned} R &= R_r (R_l) P \\ P &= P_r - R P_l \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

立体校正前后图像对比如图 9 所示。



(a) 立体校正前

(b) 立体校正后

图 9 立体校正前后图像对比

当左右摄像机立体校正完成后，两摄像机的光轴处于平行，此时可进行目标物体深度距离计算。如图 10 所示。

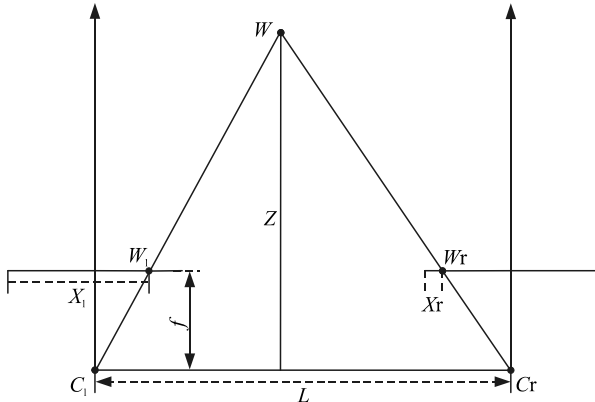


图 10 深度关系

图 10 中, W 为目标物体质心, W_1 和 W_2 是质心 W 在左右摄像机像平面上的成像点, f 为摄像机焦距, C_1 和 C_r 为左右摄像机光心, X_1 和 X_2 为左右成像点分别在左右像平面与图像左边缘的距离。则视差与深度的关系为:

$$\frac{L}{Z} = \frac{(L + X_2) - X_1}{Z - f}, \quad (15)$$

故在双目摄像机的正常视距范围内, 目标物体深度为:

$$Z = \frac{Lf}{X_1 - X_2}. \quad (16)$$

最终双目得出的深度数据如图 11 所示。



(a) 深度数据 (b) 深度信息

图 11 上位机双目深度数据图

4 机械臂运动学模型

4.1 运动学模型建立

当视觉系统得出目标 3D 信息后, 通过单双目摄像机分别与末端执行器的齐次变换关系可得出目标质心与末端执行器中心的位姿关系, 此时可对目标物体进行抓取。

采用六自由度机械臂进行抓取, 建立运动学模型之前应分析系统时序动作。由于云台与单目摄像机方位随动、末端执行器动作在机械臂动作完成之

后, 故本运动学模型中不包含云台部分与末端执行器部分自由度, 此时依照四自由度(4 个旋转关节)建立运动学模型如图 12 所示。

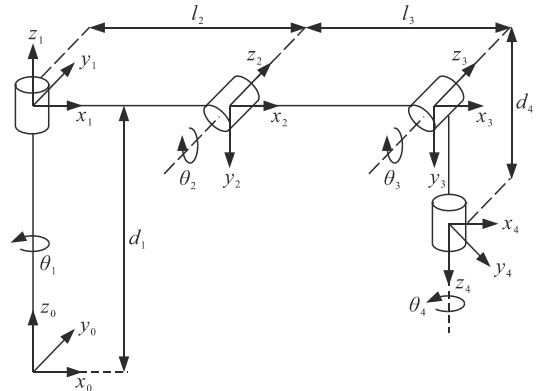


图 12 特种机械臂运动学模型

4.2 运动学正解与运动学逆解

机械臂在各关节运动角度已知的情况下, 求解末端关节在机械臂基础坐标系的位姿方法称作机械臂运动学正解。该解具有唯一性。与之相反, 已知末端中心位姿, 求解各关节运动角度的方法称作机械臂运动学逆解。逆解存在多解情况, 故应根据机械臂实际运动角度范围筛选出最优解。

根据图 12 中各参数表示以及初始状态位姿可以得出特种机械臂 D-H 参数, 如表 1 所示。

表 1 特种机械臂 D-H 参数

i	$\alpha_i / (^\circ)$	l_i	θ_i	d_i
1	-90	0	θ_1	d_1
2	0	l_2	θ_2	0
3	90	l_3	θ_3	0
4	0	0	θ_4	d_4

表中: i 为各臂杆序号; α 为初始关节角度; l 和 d 为杆长; θ 为关节转动角度。将机械臂 D-H 参数表中参数代入各关节齐次变换矩阵 T_i , 有:

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

运动学正解方程(末端执行器与基础坐标系的齐次变换矩阵 T)可表示为:

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (18)$$

逆运动学求解中,末端执行器位姿齐次变换矩阵 T 已知,如下式:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

逆运动学求解关节姿态矩阵的常用方法有解析法、几何法和迭代法。笔者结合几种方法的优劣,采用解析法与几何法相结合的方法进行计算,并根据实际角度运动阈值区间,得出各关节运动角度的唯一解:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) & \left(-\frac{\pi}{2} < \theta_1 < \frac{\pi}{2}\right) \\ \theta_2 &= \arcsin(\sin\theta_2) & \left(0 < \theta_2 < \frac{\pi}{2}\right) \\ \theta_3 &= \arccos\left(\frac{\left(\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - d_1\right)^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \times l_2 \times l_3}\right) & \left(0 < \theta_3 < \frac{3}{4}\pi\right) \\ \theta_4 &= -\arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) & \left(-\frac{\pi}{2} < \theta_4 < \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

5 实验验证

为了验证本文中视觉定位方法的准确性,笔者进行了位姿测量实验。实验选用 640×480 分辨率的蛇形管摄像机进行视觉测量,帧率 20FPS 左右;选用 MPU9250 九轴姿态传感器安装在机械臂各关节以及末端执行器和目标排爆物体上,通过 IIC 通信在上位机端读取 6 个 MPU9250 姿态角数据,并选用 GP2Y0E03 红外测距模块安装在末端执行器上,通过上位机串口读取传感器与目标物质心直线距离,及两者数据融合姿态测量验证。利用 MFC 平台编写上位机软件输出实验结果。视觉测量与姿态测量均以机械臂末端执行器初始状态下的姿态作为

基础坐标系,姿态测量的各处姿态数据需要经过与红外测距模块测量距离数据进行融合处理转换成基础坐标系下位置坐标数据。

本次实验数据单位为 mm,由于实验数据较多,仅截取实验过程中某一时间段数据。测量和验证的数据对比如图 13 所示。

时间	视觉坐标			姿态坐标			误差 (X,Y,Z)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
10:28:31	310	186	857	318	190	850	(8,4,-7)
10:28:31	307	184	851	311	188	857	(4,4,6)
10:28:31	314	188	854	320	184	843	(6,-4,-9)
10:28:31	315	189	851	316	182	846	(1,-7,-5)
10:28:31	313	184	850	317	185	856	(4,1,6)
10:28:31	311	188	845	320	184	850	(9,4,5)
10:28:31	305	179	846	315	187	854	(10,8,8)
10:28:31	301	190	846	314	188	847	(13,-2,1)
10:28:31	317	185	845	310	183	849	(-7,-2,4)
10:28:31	308	185	844	308	181	840	(0,-4,4)
10:28:32	309	187	843	309	190	852	(0,3,9)
10:28:32	308	181	842	315	194	851	(7,13,9)
10:28:32	304	181	840	309	191	847	(5,10,7)
10:28:32	310	189	838	317	188	848	(7,-1,10)
10:28:32	311	192	839	320	189	846	(9,-3,7)
10:28:32	311	178	840	311	181	853	(0,3,13)
10:28:32	315	179	837	310	184	851	(-5,5,14)
10:28:32	309	180	847	307	188	850	(-2,8,3)
10:28:32	307	188	845	314	186	847	(7,-2,2)
10:28:32	310	187	843	315	185	849	(5,-2,6)
10:28:32	311	186	840	317	185	848	(6,-1,8)
10:28:33	313	184	840	320	185	846	(7,1,6)
10:28:33	314	182	841	313	183	857	(4,4,16)
10:28:33	313	182	840	310	184	856	(-3,2,15)

图 13 实验数据

将图 13 的误差数据进行均值处理,得出视觉系统测量得到的平均误差(X,Y,Z)为(3.83,1.42,5.75),位置误差:

$$\Delta S = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} = 7.05 \text{ mm} \quad (21)$$

在视场 1 m 范围内,640×480 分辨率下,位置检测误差在 10 mm 以内即可满足定位要求,且图 13 中测得数据约为 10 组/s,故在满足精确性和实时性的条件下,抓取动作能顺利完成;因此,在实验误差允许范围内,机械臂能完成自动抓取任务,实现排爆功能,从而验证了本文中实验方法的正确性与可靠性。

6 结论

笔者针对特种机械臂在复杂环境下的排爆定位技术进行研究,提出基于视觉的目标识别定位方法。首先给出了视觉识别定位策略,采用单双目结合的视觉测量方法,通过对单目视觉算法和双目视觉算法进行研究,实现了目标排爆物体的识别与定位,然后根据目标物体相对末端执行器的位置和姿态关系,进行机械臂关节运动角度的逆运动学求解并完成机械臂自主抓取动作,最后通过视觉测量与姿态测量的对比验证了该方法的有效性。

[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(6): 707-710.

[2] 柳长安, 王和平, 李为吉. 无人机的侦察航路规划[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4): 490-494.

[3] 马良, 项培军. 蚂蚁算法在组合优化中的应用[J]. 管理科学学报, 2001, 4(2): 32-37.

[4] 彭斯俊, 黄樟灿, 刘道海, 等. 基于蚂蚁系统的 TSP 问题的新算法[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1998(5): 88-92.

[5] TIMOTHY W M, RANDAL W B. Trajectory Planning for Coordinated Rendezvous of Unmanned Air Vehicles[R]. AIAA-2000-4339-CP, 2000.

[6] MA T, BEN A. Optimal Route Re-planning for Mobile Robots: A Massively Parallel Incremental Algorithm.

Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation[C]. Albuquerque New Mexico, 1997. 2727-2733.

[7] 彭斯俊, 黄樟灿, 刘道海, 等. 基于蚂蚁系统的 TSP 问题的新算法[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1998(5): 88-92

[8] PARUNAK H V D, MICHAEL P, ROBERT C. Digital Pheromones for Autonomous Coordination of Swarming UAV's[R]. AIAA-2002-3446-CP, 2002.

[9] DORIGO M, CAMBARDELLA L M. A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1997, 1 (1) 53-66.

(上接第 85 页)

参考文献:

[1] 杨武, 姚锡凡, 范路桥. 基于双目视觉定位的排爆机器人控制系统[J]. 微计算机信息, 2008, 24(2): 255-256, 262.

[2] 邱联奎. 基于机械手的视觉伺服控制及其应用研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2006: 4-10.

[3] 晁衍凯, 徐昱琳, 周勇飞, 等. 基于双目视觉的机器人目标定位与机械臂控制[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(7): 6-9.

[4] CAI L, CHANG F, LI S, et al. Control System of the Explosive Ordnance Disposal Robot Based on Active Eye-to-Hand Binocular Vision[C]//Artificial Intelligence

and Computational Intelligence, AICI 2011: 24-31.

[5] HUANG Y, CHEN X, ZHANG X. Kinematic Calibration and Vision-Based Object Grasping for Baxter Robot[C]// Intelligent Robotics and Applications, ICIRA 2016: 269-278.

[6] 李宇飞, 高朝辉, 申麟. 基于视觉的机械臂空间目标抓取策略研究[J]. 中国科学(技术科学、信息科学), 2015, 45(1): 31-35.

[7] 徐婷婷, 段锁林, 庄玮. 基于小波包的机器人多目标识别与定位研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(4): 374-378.

[8] 邱雪娜, 刘斐, 刘士荣, 等. 基于双目视觉的移动机器人动态目标识别与定位[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2010(1): 103-112.