

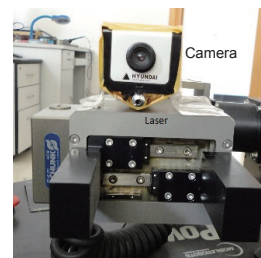


DOI: 10.12086/oe.2018.170696

一种采用单目手眼视觉的目标位置测量方法

张波涛*, 仲朝亮, 吴秋轩

杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018



摘要: 机械臂末端安装双目视觉, 会降低其在障碍环境下的可通过性。针对此问题, 本文构建了一种单目手眼与激光结合的位置测量方法, 先通过手眼获取光斑, 利用投射位置、投射点与手眼光轴的相对位置关系构建测量方法, 然后采用 D-H 模型构建坐标转换系统, 计算目标点的位置。目标测量精度与距离负相关, 适用于中短距离的位置测量。与目前常用的双目测量方法相比, 本方法减少了摄像机使用个数, 降低了机械臂末端测量系统的宽度, 更适用于狭窄空间作业, 同时也提高了机械臂的有效载荷能力。

关键词: 机器视觉; 机械臂; 三维定位; 机器人应用

中图分类号: TP242

文献标志码: A

引用格式: 张波涛, 仲朝亮, 吴秋轩. 一种采用单目手眼视觉的目标位置测量方法[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170696

A target localization method with monocular hand-eye vision

Zhang Botao*, Zhong Chaoliang, Wu Qiuxuan

School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract: The installation of binocular vision at the end of a manipulator reduces its availability in environments with obstacles. To deal with the problem, this study puts forward a target localization method using a laser and the monocular hand-eye vision. In the proposed method, the centre of the laser spot is obtained by the hand-eye vision, and the geometric relations among the laser emission point, light-spot and the optical axis of the camera are used to calculate the distance. Then, the D-H method is employed to construct the coordinate conversion system, so that the location of the target can be calculated. The measuring precision is negatively correlated with the distance, and it is suitable for the measurement in medium or short distance. Compared with the commonly used binocular measurement methods, the proposed method uses fewer cameras, which reduces the width of the measurement system on manipulators, and makes it more applicable to narrow workspace. Moreover, it also improves the effective load capacity of manipulators.

Keywords: machine vision; manipulator; 3D-localization; robot applications

Citation: Zhang B T, Zhong C L, Wu Q X. A target localization method with monocular hand-eye vision[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170696

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61503108); 浙江省自然科学基金资助项目(LY17F030022)

作者简介: 张波涛(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器人视觉, 智能机器人运动规划与控制的研究。E-mail: billow@hdu.edu.cn

1 引言

在机器人领域，笛卡尔坐标下的三维坐标测量具有重要的意义，测量所获得的三维坐标是机器人运动规划与导航的重要依据^[1]，也是移动机器人进行自定位，采集目标信息，对目标进行捕捉等任务的前提与基础^[2-3]。

目前，三维坐标测量通常采用多摄像机系统，至少由两个摄像机组成，此类系统可采用如下两种安装方式^[4-6]：1) 固定安装于工作环境；2) 装在可移动的车体上。前者可将所获得的数据通过有线或无线的方式传递给执行机构的规划层，具有实时性好、精度高等优点，但是需要对环境进行改造。后者直接安装在机器人上，其工作空间较广，且不需要对环境改造，但是精度有一定的损失。机器人车载三维测量系统通常为双目立体视觉(binocular stereo vision ranging system)^[7]。双目立体视觉是计算机视觉的重要研究内容之一，被广泛应用于工业自动化测量、规划与导航、遥感等领域^[8-9]，具有高精度、非接触和实时性等优点。激光(Laser)则是常用的单向测距工具之一，可以根据返回的时差与传播速度获得距离，机器人领域中常用的激光系统体积较大，并具自动测量功能，适宜装在承载能力较强的车体上，例如文献^[10]中的方法就是采用了此类典型的安装方式，并用来对障碍进行测距和地图构建。

将摄像机安装在机械臂末端执行器附近可以构成手眼(hand-eye)系统，手眼系统适用于基于反馈的视觉伺服，也便于在狭窄的空间中抓取物体，或者穿过空隙探测搜索目标^[11-12]。双目视觉是手眼最常用的三维测量系统，这种测量系统具有极高的测量精度，但缺点是成本昂贵，且因为摄像机自重会降低机械臂的负载能力^[8]。另一种方法是利用单目在空间的多个位置采样^[4]，利用不同采样位置的空间位置关系获得三维坐标，这类方法实时性差，且手眼需要在宽阔的工作环境中才能完成多位置采样。

因为凭借一个摄像头单次获得的一帧图像无法计算目标的深度信息，故基于单摄像机的测量系统需要增加距离传感器，或借助不同位置的多帧图像获得深度信息，其中，文献^[13]就是利用激光测距仪，配合单目摄像机实现了三维测量，文献^[14]以不具测距功能的激光束代替激光测距仪，提出了一种基于“共线三点透视问题(P3CP)”的目标定位方法，基于该方法的系统具有很好的便携性与灵活性。文献^[15]提出了

一种激光笔与单目结合的测距方法，该方法以极为廉价的硬件设备实现了距离测量，但是该方法无法获取目标的三维坐标信息^[15]。

本文设计了一种激光束与单目结合的三维定位测量方法，减小了测距传感器的宽度，减轻了机械手末端执行器的负重，从而使得机械手可以进入狭窄空间，具有更强的操作能力。此目标测量方法所需的硬件成本极其低廉，可以为精度需求不高的定位系统构建节省大量成本。与文献^[4]中的测量方法相比，本方法无需在多个位置测量，使得手眼可以在狭窄的空间中工作。与文献^[14]中的方法相比，本方法的应用对象不同，更适用于装备于机械臂或机器人。但是，与双目摄像机测量方法相比，本文所提方法精度低，并不适合对精度要求极高的工作环境。

2 激光笔与单目视觉结合的手眼测距

本文所提方法的基本原理为：通过视觉获取光斑的中心，利用激光发射点、光斑与摄像机光轴的相对几何关系实现测距。然后利用 Denavit-Hartenberg(D-H)参数表所构建的机械臂正运动学方法可以获得目标点在笛卡尔坐标系中的坐标，具体步骤如下。

2.1 手眼系统中的机械臂运动学

正运动学模型通常采用 D-H 法建立^[16]。根据 D-H 规则，设 d_i 为连杆的偏移， a_i 为相邻两连杆的垂直距离，连杆坐标系 Σ_{i-1} 与 Σ_i 之间的转换式为

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & L_{(1,2)} & L_{(1,3)} & L_{(1,4)} \\ \sin \theta_i & L_{(2,2)} & L_{(2,3)} & L_{(2,4)} \\ 0 & \sin \psi_i & \cos \psi_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中：

$$\begin{aligned} L_{(1,1)} &= \cos \theta_i, & L_{(1,2)} &= -\sin \theta_i \cos \psi_i, \\ L_{(1,3)} &= \sin \theta_i \sin \psi_i, & L_{(1,4)} &= a_i \cos \theta_i, \\ L_{(2,1)} &= \sin \theta_i, & L_{(2,2)} &= \cos \theta_i \cos \psi_i, \\ L_{(2,3)} &= -\cos \theta_i \sin \psi_i, & L_{(2,4)} &= a_i \sin \theta_i, \end{aligned}$$

θ_i 表示绕 z 轴的旋转角， ψ_i 表示从原 z 轴旋转到新 z 轴的角度。

本文以一款 Schunk GmbH & Co. KG 的 6-DOF 机械臂 Powercube 为例进行说明，如图 1 所示。根据 D-H 规则^[17]，Powercube 的连杆参数如表 1 所示。

Σ_0 表示安装机械臂的平台基座的坐标系， $\Sigma_1 \sim \Sigma_6$ 分别为连杆 1 至连杆 6 的坐标系，末端执行器的坐标

系定义为 Σ_7 。以上各坐标系均为右手坐标系，各坐标系间的关系如图 1 所示。

根据表 1 中的 D-H 参数，可得 Powercube 6-DOF 机械手的各关节间的位置姿态转换矩阵。

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & a_4 \sin \theta_4 \\ -\cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & a_4 \cos \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & \sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

从 Powercube 机械手的基座到末端执行器的位置姿态转换矩阵为

$${}^0I_7 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

根据转换矩阵 0I_7 ，可得末端执行器在笛卡尔坐标

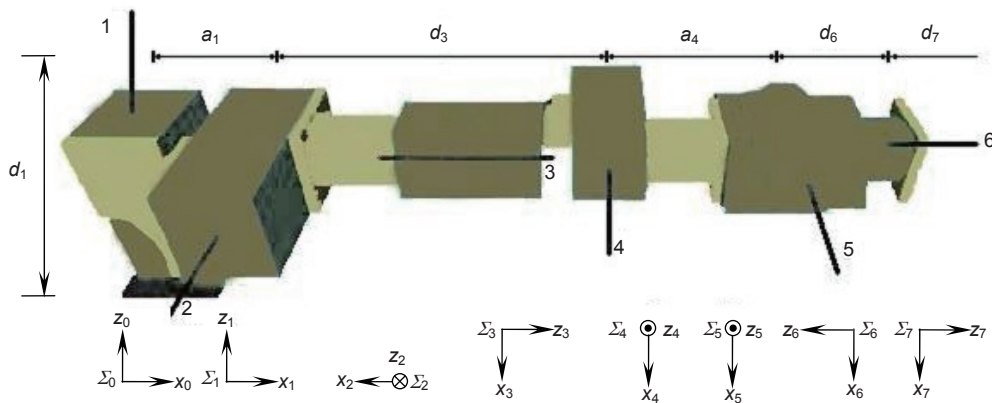


图 1 Powercube 机械手的坐标系定义

Fig. 1 Frame definitions of the Powercube manipulator

表 1 Powercube 机械手的运动学参数

Table 1 Kinematic parameters of the Powercube manipulator

Frame	$\theta_i/^\circ$	a_i/m	d_i/m	$\psi_i/^\circ$
Σ_0/Σ_1	θ_1	$a_1=0.125$	$d_1=0.135$	-90
Σ_1/Σ_2	θ_2+90	0	0	-90
Σ_2/Σ_3	θ_3+180	0	$d_3=0.339$	-90
Σ_3/Σ_4	θ_4-90	$a_4=0.175$	0	0
Σ_4/Σ_5	θ_5+90	0	0	-90
Σ_5/Σ_6	θ_6	0	$d_6=0.195$	180
Σ_6/Σ_7	θ_7	0	$d_7=0.05$	0

系的坐标如下：

$$L_e = [x_L \ y_L \ z_L] = [p_x \ p_y \ p_z] \quad (10)$$

2.2 基于手眼的目标定位方法

基于文献[15]的测距方法必须满足两个基本条件：1) 激光束与单目光轴平行。2) 工作环境：激光束在目标物体上的落点在环境中是可以通过亮度或颜色辨识的。第一个条件可通过人为设置满足；但第二个条件限制了该系统的工作环境，导致该测距方法不适于超长距离测距，也不适合在光线极强的环境下进行测量。

该测距方法的基本工作原理：当激光束被投射于目标物上时，设投射点为 A ，由条件 2) 可知，光点可被摄像头所捕获，采用了基于亮度的捕获方法，故投射点的位置在图帧中的坐标是可计算的^[15]。由条件 1) 可知光束平行于光轴，只需要计算这个点沿纵轴方向的距离，即可算出要计算光笔发射点到投射点 A 的距离，测距系统的示意图 2 所示。

由图 2 可知：

$$d = \frac{h}{\tan \theta} \quad (11)$$

θ 可通过下式评估：

$$\theta = n \cdot \omega + \varepsilon \quad (12)$$

其中： n 为图帧中心到投射点在图帧中位置的像素个数， ω 为每个像素对应的弧度， ε 为弧度误差， h 为测量传感器初始距离参数，由式(11)与式(12)可得：

$$d = \frac{h}{\tan(n \cdot \omega + \varepsilon)} \quad (13)$$

当设备配置完毕，则 h 为已知常数。在不同的距离多次测量 d 与 n ，可得 ω 与 ε 的方程组，进而求得参数 ω 与 ε ，用式(13)实现测距。

将该测距方法的基本原理与机械臂运动学相结

合，得到三维位置测量方法，该测量方法的原理如下：将激光束发射装置安装在末端执行器附近，使得光束与末端执行器轴线平行。则从固定点到末端执行器间的坐标转换矩阵为：

$${}^0I_e = {}^0I_7 A_T A_e \quad (14)$$

其中：末端执行器与激光笔发射点之间的转换矩阵为 A_T ，发射点到投射点之间的转换矩阵为 A_e ，由式(9)可得坐标转换矩阵如下：

$${}^0I_e = {}^0I_7 A_T A_e = A_0 A_1 A_2 \dots A_T A_e \quad (15)$$

因为对于机械臂正运动学而言，其关节角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_7$ 是确定的，由式(15)计算可得投射点位姿矩阵为：

$${}^0I_1 = \begin{bmatrix} n_x^1 & o_x^1 & a_x^1 & p_x^1 \\ n_y^1 & o_y^1 & a_y^1 & p_y^1 \\ n_z^1 & o_z^1 & a_z^1 & p_z^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据式(16)，可得目标点在笛卡尔坐标系下的坐标测量值如下：

$$L_T = [x_T \ y_T \ z_T] = [p_x^T \ p_y^T \ p_z^T] \quad (17)$$

参照文献[18]的研究方式，本文将目标点的测量值与目标实际位置之间的误差定义如下：

$$f_e = \sqrt{(x_T - t_x)^2 + (y_T - t_y)^2 + (z_T - t_z)^2} \quad (18)$$

其中 $t = (t_x, t_y, t_z)$ 为目标的实际位置。

2.3 基于手眼的目标定位算法流程

Step 1: 初始参数配置。在不同的距离多次测量 d 与 n ，可得 ω 与 ε 的方程组，进而求得参数 ω 与 ε 。根据机械臂机构计算 D-H 参数 a_i, d_i, ψ_i 。

Step 2: 基于视觉反馈的光束目标对准。设目标中心在图像中的位置为 $G_{\text{goal}}(x_{\text{goal}}, y_{\text{goal}})$ ，光斑中心在图像中的位置为 $G_L(x_L, y_L)$ 。利用机械臂逆运动学，逐

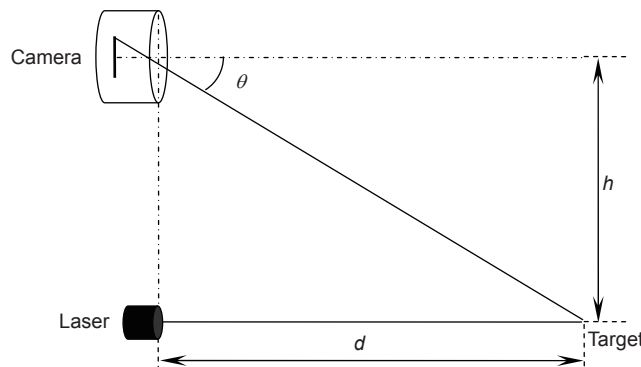


图 2 测距原理

Fig. 2 The theory of distance measurement

渐缩小 $D_{\text{goal-L}}$, 其中 $D_{\text{goal-L}}$ 按下式计算。

$$D_{\text{goal-L}} = |x_{\text{goal}} - x_L| + |y_{\text{goal}} - y_L| \quad (19)$$

Step 3 : 根据采集的图像数据由式(13)计算投射距离 d , 其中 n 由实时采集到的图帧获得 , ω 与 ε 为 Step 1 中计算得到的参数。

Step 4 : 转移矩阵计算 , 读取机械臂关节角度 , 根据式(9)得到转移矩阵 0I_7 , 根据 Step 2 中的投射距离 d 计算得到转移矩阵 A_e 。

Step 5 : 三维坐标计算 , 根据式(15)得到投射点姿态矩阵 0I_e , 然后由式(17)得到目标点在笛卡尔坐标系中的坐标 $[x_T \ y_T \ z_T]$ 。

3 试验结果与分析

将所提方法在 Powercube 机械臂上进行测试 , 该款机械臂属 6-DOF 模块化机械臂 , 为德国 Schunk 公司所制造 , 其末端执行器的最大负荷为 2 kg , 该机械臂作为附件安装在美国 MobileRobots 所研发的 AGV 大型负重平台 Powerbot 上 , 用于对目标操作 , Powerbot 是一个差分驱动的大型室内负重机器人 , 如图 4 所示。

以网络摄像头与激光(650 nm~660 nm, 635 nm)构建了一个简易的测距系统 , 并装载于 Powerbot 机器人 6-DOF 的机械臂的末端 , 如图 5 所示。坐标测量系统中的测距参数如下 : $\omega = 0.00252$, $\varepsilon = 0.04047$, $h = 3.05$ 。

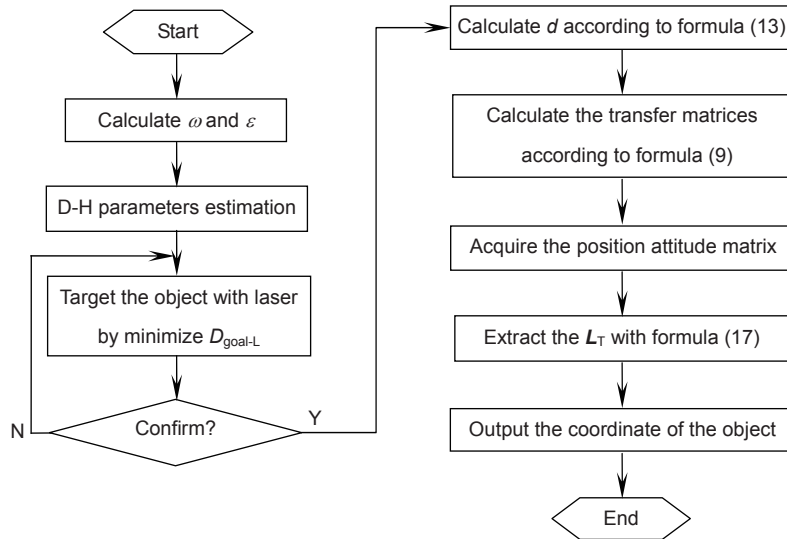


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm



图 4 Powercube 机械臂与 Powerbot。(a) Powerbot; (b) Powercube

Fig. 4 The Powercube and the Powerbot. (a) Powerbot; (b) Powercube

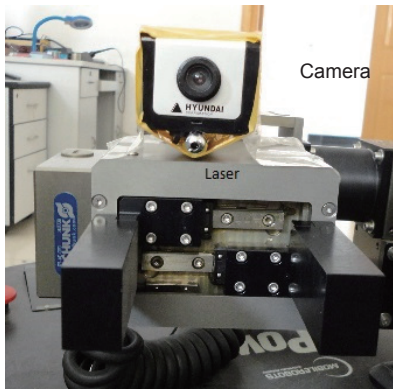


图5 Powercube 上的坐标测量系统
Fig. 5 3D localization system on Powercube

在不同的光照下进行测试，试验结果表明，试验环境中的光照、目标与环境的颜色对比会影响试验精度。摄像头的分辨率、激光笔的光线强度也会影响试

验精度，如图 6 所示。针对系统的有效工作距离，进行了一系列的测试，测试结果如表 2 所示，表 2 中距离单位为 mm。其中， ϵ_{margin} 为误差幅度， λ_{ϵ} 为相对误差， D_{ϵ} 为误差均方差。

由表 2 可见该测量系统的误差绝对值随距离缩小而缩小，相对误差变化无固定规律。由于摄像头的精度与光笔的光照强度所限，本设备的有效距离为 2 m，超出 2 m 后系统将逐渐变得不稳定。受摄像机硬件性能局限，超出 10 m 时，该系统无法获得有效的测量结果。由此测量结果可知：该系统能获取目标物体的大致位置信息，但无法获取目标的高精度位置；该系统可以用于目标操作，随着手与目标物体的接近，误差将会迅速缩小。

本算法中每个像素对应的弧度存在微小的误差 $\Delta\omega$ ，根据式(13)可知，当距离变远时， n 值增大；根

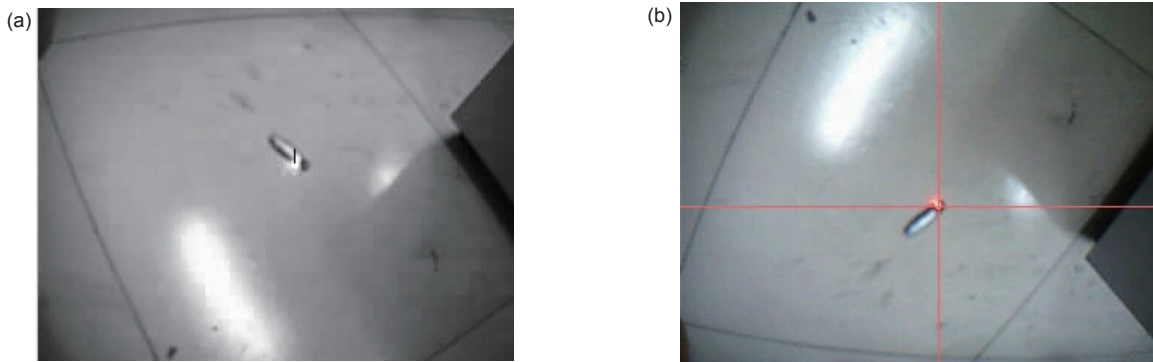


图6 三维坐标测量。(a) 目标物；(b) 测量场景
Fig. 6 3D coordinate measurement. (a) Target; (b) Measurement scene

表2 测量系统的误差

Table 2 Errors in this measurement system

Distance/mm	ϵ_{margin}/mm	$\lambda_{\epsilon}/\%$	D_{ϵ}/mm	Distance/mm	ϵ_{margin}/mm	$\lambda_{\epsilon}/\%$	D_{ϵ}/mm
50	1.2	2.40	0.08	300	11.7	3.90	2.04
60	1.6	2.67	0.11	350	13.8	3.94	3.47
70	2.1	3.00	0.15	400	17.3	4.33	5.89
80	2.6	3.25	0.19	450	20.6	4.58	8.56
90	3.4	3.78	0.28	500	23.1	4.62	10.08
100	4.5	4.50	0.52	600	28.2	4.70	24.81
110	4.8	4.36	0.37	800	35.9	4.49	70.46
120	5.1	4.25	0.38	1000	41.1	4.11	131.73
130	5.4	4.15	0.47	1300	67.4	5.18	146.28
140	5.6	4.00	0.51	1600	85.7	5.36	159.16
150	5.9	3.93	0.33	2000	112	5.60	164.75
200	8.3	4.15	1.85	10000	\	\	\
250	10.6	4.24	1.94				

据式(12)可知, θ 的误差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = n \cdot (\omega + \Delta\omega) - n \cdot \omega = n \cdot \Delta\omega \quad (20)$$

$\Delta\theta$ 会随 n 值增大而变大。此时, 计算所得距离 d 的误差必然会变大, 进而导致最终测量坐标误差变大, 误差及其统计指标 λ_ε 、 D_ε 的变化趋势如图 7、图 8、图 9 所示。

与双目定位算法相比, 本所提方法存在局限性, 也有其优势。由表 3 中数据可见, 与双目定位相比, 其精度低, 有效量程稍短; 其优点为: 本文算法所支持的测量设备所占空间较小、成本低, 因此, 非常适合机械臂的手眼在狭窄工作空间中作业。双目定位算

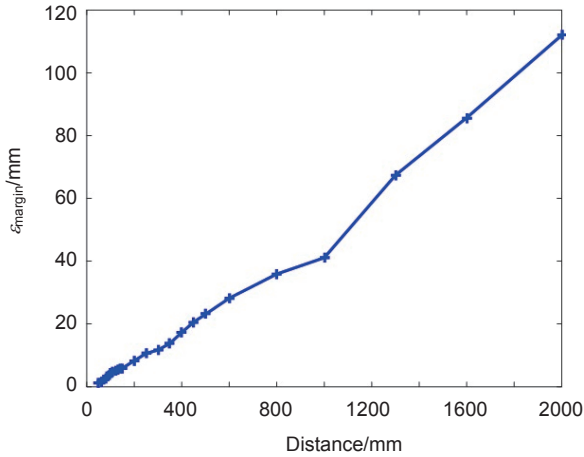


图 7 误差随目标距离的变化

Fig. 7 The error varies with the distance of target

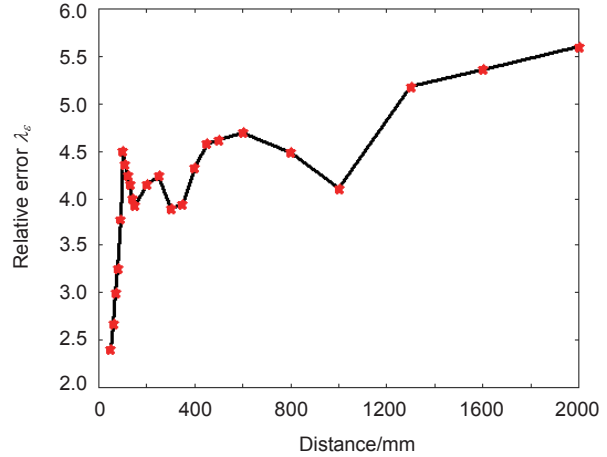


图 8 相对误差随目标距离的变化

Fig. 8 Relative error varies with the distance of target

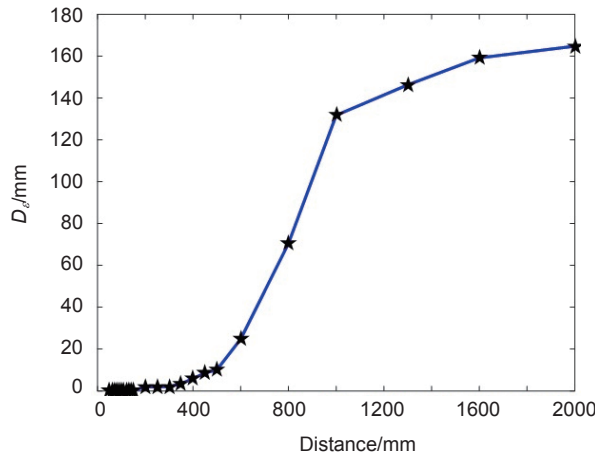


图 9 D_ε 随目标距离的变化

Fig. 9 D_ε varies with the distance of target

表 3 本文所提方法与双目定位的对比

Table 3 Comparison between the method and binocular location

	Binocular method	This method
Device width/mm	>150	70
Price/RMB	3000	200
Weight/g	>400	160
Applicability	Broad space	Narrow space
Error for 300 mm	0.49	11.7
Error for 500 mm	0.80	23.1
Error for 700 mm	0.98	28.6
Error for 1000 mm	1.20	41.1

法需要两台间隔一定距离的摄像机^[19]，其设备宽度较大，因此，难以进入狭窄空间。

4 结 论

本文所提方法利用激光发射点、光斑与摄像机光轴的相对几何关系实现测距，并根据机械臂正运动学可得目标点在笛卡尔坐标系中的坐标。该方法受光照影响，测量精度与距离负相关，适于中短距离测量。与目前常用的双目定位相比，精度较低、量程稍短，但本方法的硬件成本低，适用狭窄空间作业，通过减少摄像机数量提高了机械臂的有效载荷能力。

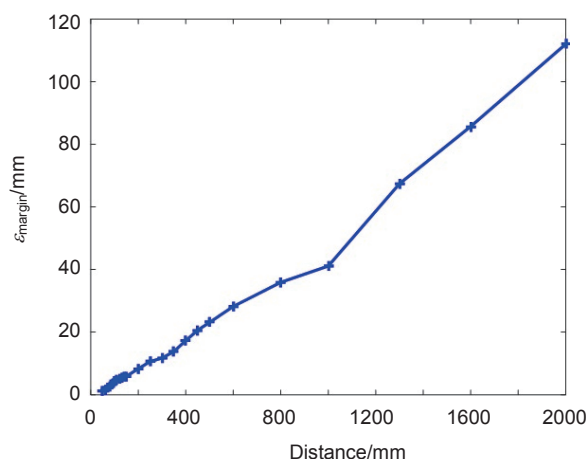
参考文献

- [1] Siegwart R, Nourbakhsh I R. *Introduction to autonomous mobile robots*[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2004: 3–45.
- [2] Chaudhury A, Ward C, Talasaz A, et al. Computer vision based autonomous robotic system for 3D plant growth measurement[C]//*Proceedings of the IEEE 12th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, Halifax, Canada, 2015: 290–296.
- [3] Iguchi Y, Yamaguchi J. Omni-directional 3D measurement using double fish-eye stereo vision[C]//*Proceedings of the IEEE 21st Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, Mokpo, Korea, 2015: 1–6.
- [4] Huang W Y, Xu X M, Wu F Q, et al. Research of underwater binocular vision stereo positioning technology in nuclear condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 28–33.
黄文有, 徐向民, 吴凤岐, 等. 核环境水下双目视觉立体定位技术研究[J]. *光电工程*, 2016, **43**(12): 28–33.
- [5] He T, Chen J Y, Hu X, et al. A study of 3D coordinate measuring based on binocular stereo vision[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **740**: 531–534.
- [6] Wei S P, Yan H M, Zhang X D. Disparity estimation based on the combination of depth camera and stereo vision[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(7): 72–77.
魏少鹏, 严惠民, 张秀达. 一种深度相机与双目视觉结合的视差估计技术[J]. *光电工程*, 2015, **42**(7): 72–77.
- [7] An X C, Hong W, Xia H. Research on binocular vision absolute localization method for indoor robots based on natural landmarks[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Chinese Automation Congress (CAC)*, Wuhan, 2015: 604–609.
- [8] Nefti-Meziani S, Manzoor U, Davis S, et al. 3D Perception from binocular vision for a low cost humanoid robot NAO[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **68**: 129–139.
- [9] Li H, Li B, Xu W F. Development of a remote-controlled mobile robot with binocular vision for environment monitoring[C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, 2015: 737–742.
- [10] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: boss and the urban challenge[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(8): 425–466.
- [11] Fanello S R, Pattacini U, Gori I, et al. 3D stereo estimation and fully automated learning of eye-hand coordination in humanoid robots[C]//*Proceedings of the 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Madrid, Spain, 2014: 1028–1035.
- [12] Chao F, Lee M H, Jiang M, et al. An infant development-inspired approach to robot hand-eye coordination[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, **11**(2): 15.
- [13] Henry P, Krainin M, Herbst E, et al. RGB-D mapping: using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, **31**(5): 647–663.
- [14] Huang F S. Study on the key technique of single camera 3D coordinate vision measurement system using a light pen[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
黄凤山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [15] Aroca R V, Burlamaqui A F, Gonçalves L M G. Method for reading sensors and controlling actuators using audio interfaces of mobile devices[J]. *Sensors*, 2012, **12**(2): 1572–1593.
- [16] Xu D, Calderon C A A, Gan J Q, et al. An analysis of the Inverse Kinematics for a 5-DOF manipulator[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2005, **2**(2): 114–124.
- [17] Craig J J. *Introduction to robotics: mechanics and control*[M]. 3rd ed. London: Pearson Education, 2005: 62–120.
- [18] da Graça Marcos M, Machado J A T, Azevedo-Perdicoulis T P. An evolutionary approach for the motion planning of redundant and hyper-redundant manipulators[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2010, **60**(1–2): 115–129.

A target localization method with monocular hand-eye vision

Zhang Botao*, Zhong Chaoliang, Wu Qiuxuan

School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China



The error varies with the distance of target

Overview: Over the past decade, vision-based positioning technology has attracted more and more attentions, and has been widely used in robotics. Binocular vision is often installed at the end of a manipulator, which is used to get the position and the orientation information of targets. However, the installation of binocular vision reduces the flexibility and the load capacity of a manipulator. This problem becomes more obvious, when the load capacity of a manipulator is low or the working space is narrow. Moreover, the price of binocular vision is still relatively high. To deal with the problem above, this study puts forward a target localization method using a laser and a monocular hand-eye vision. The lower priced laser equipment used in this study can only send out a light beam, and cannot measure the distance independently. The hand-eye vision system is used to obtain the centre of the laser spot. The geometric relations among the laser emission point, light-spot and the optical axis of the camera are applied to calculate the distance from the target point to the laser emitter. The Denavit–Hartenberg convention (D–H) is often used to calculate the position and the orientation of links and joints in robotics. The distance from the target point to the laser emitter can be considered as an extended link of the manipulator. Under this assumption, the D-H method can be employed to construct the coordinate conversion system, which contains the beam of the laser and the mechanical manipulator. With this coordinate conversion system, the location of the target can be calculated. The coordinate measuring precision is negatively correlated with the distance, and it is suitable for the position measurement of medium and short distance. When a target is far away, the error is too large that it cannot work effectively. The light illuminations in the working environment have an impact on the laser spot taken by the camera. Compared with the commonly used binocular measurement methods, the proposed method uses only one camera, which reduces the width of the measurement system on manipulators, and makes it more suitable for working in narrow workspace. When searching for an object with a mobile robot, the arm is often required to enter a hole or a narrow gap. The method proposed in this paper is especially suitable for the above case. Moreover, this design also reduces the weight of the sensor on the manipulator that improves the effective load capacity of manipulators.

Citation: Zhang B T, Zhong C L, Wu Q X. A target localization method with monocular hand-eye vision[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170696

Supported by National Natural Science Foundation of China (61503108) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY17F030022)

* E-mail: billow@hdu.edu.cn