

面向机器人位姿测量的大视场变焦测量方法

姜涛^{1,2**}, 程筱胜^{1,2}, 崔海华^{1,2*}, 田威^{1,2}

¹南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

²江苏省数字化设计制造工程技术研究中心, 江苏 南京 210016

摘要 针对机器人大范围位姿精准测量问题, 提出一种大视场位姿测量的变焦测量方法。利用变焦图像匹配点的单应矩阵进行变焦内参动态计算, 根据变焦前后靶标位姿求解相机坐标系变换, 给出与变焦参数相关的 PnP 算法, 考虑畸变后进行参数优化, 并提出缩放和对焦两步变焦控制策略。提出一种基于图像模板的靶标板位姿测量算法, 在靶标可视姿态均能稳定检测并区分标志点。对变焦测量系统进行误差测量实验和大场景跟踪实验, 结果表明, 不同变焦参数下均具有较高的单点测量精度, 平均位置精度最高 21.8 μm , 在 400~1600 mm 范围误差 0.09 mm, 精度较高, 使用的变焦相机可实现 178.7461~9022.31 mm 测量。该方法实现了相机活动范围受限而测量范围可拓展的位姿测量。

关键词 机器视觉; 变焦测量; 变焦控制; 位姿检测; 大视场

中图分类号 TH741; TP242.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815012

Large Field of View Vision Method for Robot Pose Measurement Based on Zoom Lens

Jiang Tao^{1,2**}, Cheng Xiaosheng^{1,2}, Cui Haihua^{1,2*}, Tian Wei^{1,2}

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²Research Center of Digital Design and Manufacturing Engineering Technology of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to acquire high precision robot pose measurement when robot moves in large range, we propose a large field of view vision method based on zoom lens. Homography matrix between image matching points is used to dynamically calculate internal parameters while zooming. Camera coordinate system transformation is united according to target pose before and after zooming. In addition, by taking distortion into consideration, we introduce PnP algorithm which is related to zoom parameters and implement parameters optimization. We also propose a two-step zooming control strategy based on zoom and focus for dynamic pose measurement, as well as a target plate position measurement algorithm based on image template, which can detect and distinguish the mark points in any visible effective position of the target. Large number of measurement experiments including signal point error experiment and large scene tracking experiment are carried out to verify the effectiveness of the system. The experiment data show good performance in both pose measurement error and measurement range. Under different zoom parameters, the precision of single point measurement is high, as the average position precision is up to 21.8 μm . In the range of 400-1600 mm, position error is 0.09 mm which cannot be realized with ordinary fixed focus camera. Multiple experiments show that zoom camera can be used to measure during the range of 178.7461 to 9022.31 mm. The proposed method has an extensible measurement space and an advantage of position and orientation measurement in the case of variable measurement range with limited camera motion.

Key words machine vision; zoom measurement; zoom control; pose detection; large field of view

OCIS codes 150.0155; 150.1448; 150.1135

收稿日期: 2018-02-08; **修回日期:** 2018-03-22; **录用日期:** 2018-04-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (NS2017033)、南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金 (kfjj20170501)、南京市产学研合作后补助项目 (201722065)、扬州市创新能力建设计划项目——高等院校合作专项 (YZ2017273)

* **E-mail:** cuihh@nuaa.edu.cn; ** **E-mail:** jtmaster1@163.com

1 引 言

工业机器人位姿测量是指利用测量设备,对末端执行器或法兰盘中心实际位姿的测量^[1],位姿数据通常相对于测量坐标系。一方面,工业机器人的绝对定位精度低,末端位姿需要辅助定位与伺服控制,来提高机器人的绝对定位精度;另一方面,在机器人动力学标定中,位姿测量是获取实际位姿数据的重要环节,决定了动力学标定的精度。因此,工业机器人位姿测量具有重要意义。

现有的位姿测量设备包括激光跟踪仪^[2-3]、工业相机^[4-7]、三坐标测量机^[8]、可伸缩式靶标^[9]、结构光^[10]等。基于视觉的位姿测量具有快速、便捷、成本低、操作简单等优点^[11-12]。单目位姿测量常被称作 n 点透视(PnP)^[11],利用已知坐标的三维点及对应图像点,求解相机外参矩阵。现有算法大致分为解析算法和迭代算法;Kuang 等^[13]利用已知点、线及方向三个特征实现位姿测量,但该方法受限于目标特征形式;Bujnak 等^[14]研究了未知相机参数和畸变系数情况下的 PnP 问题,直接求解参数化投影矩阵,分解出位姿;Taketomi 等^[15]提出一种动态内参变化的 PnP 方法,该方法需要前期离线标定出部分内参数,然后进行多项式拟合,位姿测量精度低;最新的研究^[16]提出一种 IEP nP 算法,提高了对噪声的抗干扰能力。

为实现机器人大活动范围的位姿跟踪,主要思路是扩展相机视场和增强目标特征。张旭等^[1]针对测量目标难识别的问题,设计了快速响应的主动光立体靶标,可测范围延伸至 3 m,但靶标识别与区分标志点的过程复杂。变焦相机具有可扩展的测量视场,且变焦后固定焦距测量,可以避免定焦镜头测量精度随测量深度的增加而衰弱的问题^[17]。利用变焦相机进行测量的主要难点在于变焦后的参数标定,主要包括镜头焦距^[17-20]、主点^[21]畸变系数^[22]。目前,关于变焦相机标定的问题主要有两种解决方法:1)事先进行变焦的离线标定,然后将相机内参、畸变系数等进行插值或拟合,将标定参数表示成变焦相机缩放和对焦的多项式组合的形式,这种方法测量精度较高,但标定过程比较耗时;2)利用变焦前后图像对应点存在的单应关系,探究标定参数与成像点的内在联系,然后建立全局优化模型,求解出标定参数最优解,这种方法精度低,容易受图像噪声影响,参数求解复杂。

提出一种基于单目变焦相机的大视场位姿测量

系统。首先,对测量系统的整体结构进行概述,阐述工作流程;接着,分别研究基于变焦图像单应矩阵的标定参数计算方法、变焦相机 PnP 问题的坐标变换方法、变焦参数控制策略和视觉平面靶标位姿检测方法;最后,在搭建的系统上进行实验,验证变焦单点测量精度、变焦坐标系变换准确性,对机器人进行轨迹控制,通过机器人位姿测量和大场景位姿测量实验,验证变焦测量方案的有效性。

2 变焦位姿测量模型

2.1 变焦成像模型

变焦相机内部由变倍组、补偿组、前透镜、后透镜组成,透镜组可以等效为一个透镜,称为主面^[18],则成像模型可以等效为小孔成像模型^[17]。控制变焦镜头参数变化,主面和光心沿着光轴移动,为便于描述变焦过程中成像效果,假设光心位置不变,而成像平面位置移动,具体如图 1 所示。

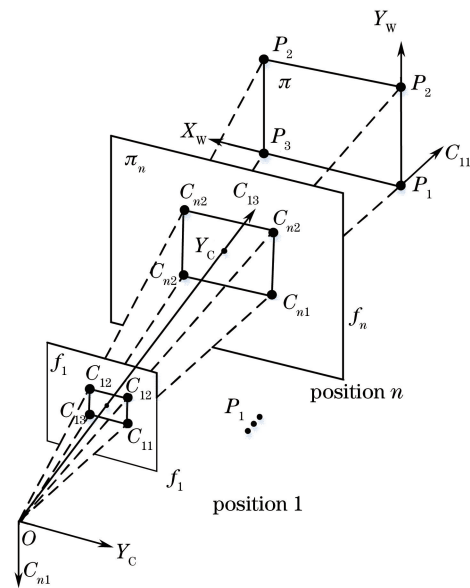


图 1 变焦成像模型

Fig. 1 Zoom lens model

在 position 1 处,焦距为 f_1 ,成像平面 π_1 图像主点 $C_0(u_0, v_0)$,改变缩放参数并调节对焦使图像清晰,可以获得任意变焦位置。设在 position i 处的焦距为 f_i ,成像平面为 π_i ,空间中位于同一平面的点 P_1, P_2, P_3, P_4 在 π_i 上成像点为 $(u_{ij}, v_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, 2, 3, 4$ 。在利用变焦相机进行三维测量或位姿计算的过程中,若已知相机内参,则可降低测量复杂度,提高测量速度。利用变焦图像匹配点可求解图像单应性矩阵,在已知基础位置内参情况下动态求解出变焦后相机内参^[17]。

设 position 1 为基础位置,该位置处相机内参已知。文献[21]表明,变焦前后主点不变,成像平面相互平行。则有

$$r_i = \frac{u_{ij} - u_0}{u_{1j} - u_0} = \frac{v_{ij} - v_0}{v_{1j} - v_0} = \frac{f_i}{f_1} (i \neq 1). \quad (1)$$

(1)式表明,变焦前后图像对应点存在单应性关系 \mathbf{H} ,且 \mathbf{H} 中包含了相机内参信息。假设 position 1 处相机内参矩阵为 \mathbf{K}_1 , position i 处的相机内参矩阵为 \mathbf{K}_i ,则有

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{K}_1, \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} f_1 & u_0 \\ & f_1 & v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} f_i & u_0 \\ & f_i & v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} r_i & (1-r_i)u_0 \\ & r_i & (1-r_i)v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix}.$$

找到不同变焦参数下图像的至少 4 组对应点,可以求解出单应矩阵 \mathbf{H} ,即:

$$\mathbf{H}^* = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^n \| \mathbf{m}_2^k - \mathbf{H} \mathbf{m}_1^k \|^2, \quad (3)$$

式中 m_1^k, m_2^k 分别为两图像 I_1, I_2 的对应匹配点, n 为匹配点总数。求解 \mathbf{H} 后通过(2)式便可求解出任意变焦参数下的相机内参矩阵。变焦后相机光心移动,即相机坐标系原点发生变化,理论上,相机沿光轴做平移变换,即:

$$\mathbf{O}_2 \mathbf{O}_1 = \mathbf{O} \mathbf{O}_1 - \mathbf{O} \mathbf{O}_2. \quad (4)$$

具体为 $\mathbf{O}_2 \mathbf{O}_1 = [0, 0, (1-r_2)f_1]^\top$ 。若在 position i 处世界坐标系到相机坐标系的齐次变换矩阵为 \mathbf{P}_i ,则统一到 \mathbf{O}_1 坐标系的变换为

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{W}_i \mathbf{P}_i, \quad (5)$$

式中 \mathbf{W}_i 表示相机光心的齐次变换矩阵,具体为

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O}_i \mathbf{O}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

利用(6)式进行坐标系对齐后,测量坐标系即统一到相机坐标系 \mathbf{O}_1 。事实上,在动态变焦过程中,便于计算的是变焦前后两次的变换矩阵,可直接利用变焦前后的靶标姿态求解前后相机坐标系变换。即:

$$\mathbf{W}_{i,i-1} = \mathbf{P}_i \mathbf{P}_{i-1}^{-1}, \quad (7)$$

式中 $i > 1$ 表示第 i 个变焦位置, $\mathbf{W}_{i,i-1}$ 表示变焦后相机坐标系到变焦前相机坐标系的变换。则有

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{W}_{2,1} \cdots \mathbf{W}_{i,i-1} = \prod \mathbf{P}_i \mathbf{P}_{i-1}^{-1}. \quad (8)$$

2.2 变焦位姿测量方法

如图 1 所示,相机坐标系为 $\mathbf{O}_c - X_c Y_c Z_c$,世界

坐标系为 $\mathbf{O}_w - X_w Y_w Z_w$,位姿测量即是在相机坐标系下世界坐标系的位姿。PnP 算法是求解位姿的常用算法,不同变焦参数下 PnP 模型与变焦值有关。若 P_1, P_2, P_3, P_4 为空间中位于同一平面的点,其在成像平面 π_i 上的图像点坐标为 $(u_{ij}, v_{ij}), i=1, \dots, n, j=1, 2, 3, 4$,在相机坐标系下对应点 $C_{ij}(u_{ij}, v_{ij}, f_i)$,则:

$$\mathbf{O}_i \mathbf{C}_{ij} = (u_{ij} - u_0, v_{ij} - v_0, f_i). \quad (9)$$

令

$$\mathbf{O}_i \mathbf{P}_1 = k \mathbf{O}_i \mathbf{C}_{i1} = k(u_{i1} - u_0, v_{i1} - v_0, f_i), \quad (10)$$

$$\mathbf{O}_i \mathbf{P}_2 = k \mathbf{O}_i \mathbf{C}_{i2} = k(u_{i2} - u_0, v_{i2} - v_0, f_i), \quad (11)$$

式中 $k = \frac{\|\mathbf{C}_{i1} \mathbf{C}_{i2}\|}{\|\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2\|}$ 表示线性比例,则:

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 = \mathbf{O}_i \mathbf{P}_2 - \mathbf{O}_i \mathbf{P}_1 = \frac{\|\mathbf{C}_{i1} \mathbf{C}_{i2}\|}{\|\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2\|} (u_{i2} - u_{i1}, v_{i2} - v_{i1}, 0). \quad (12)$$

令 $\mathbf{R}_i = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3)^\top$ 表示投影矩阵的旋转矩阵,则 $\mathbf{r}_1 = \frac{\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2}{\|\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2\|}$,按照(10)~(12)式可同理求

出 $\mathbf{r}_2 = \frac{\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_3}{\|\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_3\|}, \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2$ 。以 P_1 作为世界坐标系原点,则投影矩阵的平移向量即为 $\mathbf{O}_i \mathbf{P}_1$,得:

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{O}_i \mathbf{P}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

至此,求解出相机坐标系下移动靶标坐标系的位姿。

进一步研究发现,变焦过程是复杂的非线性过程,在求解单应性矩阵和位姿时都依赖于图像点坐标,而随着焦距减小、视场扩大,图像畸变也增加,成像点需要先去除畸变。文献[22]利用多项式拟合的方式,将不同焦距下的畸变系数表示成关于变焦参数的多项式。这种方法需要大量的离线标定工作,比较耗时。采用全局优化的方法获得精准位姿参数,引入如下畸变模型:

$$\delta x = x(\rho_1 r_d^2 + \rho_2 r_d^4), \quad (14)$$

$$\delta y = y(\rho_1 r_d^2 + \rho_2 r_d^4), \quad (15)$$

式中 $\delta x, \delta y$ 为畸变量, x, y 为理想图像坐标, $r_d = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。平面靶标板齐次坐标为 M_{ij} ,表示 i 焦距下 j 三维点, m_{ij} 为对应图像畸变点齐次坐标, $m_{ij} = (x_j + \delta x_j, y_j + \delta y_j, 1)^\top$ 。根据相机成像模型知,

$$\mathbf{M}_{ij} = \mathbf{K}_i \mathbf{P}_i m_{ij}. \quad (16)$$

在利用 PnP 算法求解平面靶标位姿时,靶标平面的理论三维点 \hat{M}_{ij} 已知,利用非线性优化的方法

使误差函数最小来得到最优参数：

$$\min \sum_{j=1}^n \|\hat{M}_{ij} - \mathbf{K}_i \mathbf{P}_i m_{ij}\|^2. \quad (17)$$

2.3 变焦控制策略

研究的变焦测量系统中,相机是固定放置的。相机放置时要求靶标在最大的视场范围内,应保证被测靶标能够检测到。

变焦控制策略如图 2 所示,针对缩放和对焦设计两步控制法。靶标板移动时,靶标平面的面积 A 随之变化,当面积小于低阈值 A_l 时放大,当面积大于高阈值 A_h 时缩小。考虑到缩放时间和动态跟踪的要求,缩放的步数需要实验确定。缩放主要影响视场大小,控制完成后对图像模糊程度进行评价。采用 Tenengrad 梯度函数评价清晰程度^[23],该方法求解的清晰度值越高,表示图像越清晰。计算当前模糊度值 t_1 ,增加对焦值,获得模糊度值 t_2 ,若 $t_2 > t_1$,则继续增加对焦并更新 $t_1 = t_2$,直到 $t_2 < t_1$ 。

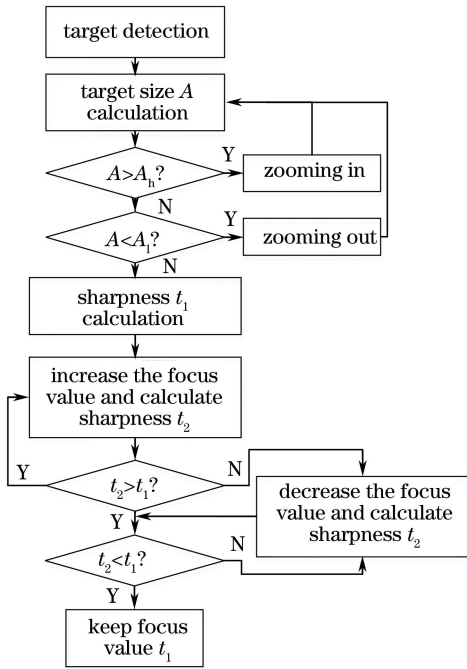


图 2 变焦控制策略流程图

Fig. 2 Flow chart of zoom control strategy

3 平面靶标设计与检测

3.1 靶标检测流程

考虑到所研究的单目变焦视觉测量模型主要针对平面的动态测量,并且平面的检测精度高于其他标志模块,检测更加便捷,所以利用圆形标志平板进行位姿测量。使用的圆形标志平板如图 3 所示^[21]。

靶标位姿测量主要是在靶标板平面建立世界坐

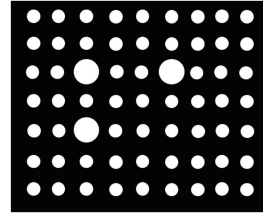


图 3 平面标志板

Fig. 3 Planar target board

标系,即确定靶标平面的坐标系原点及方向。文献[24]利用图像圆面积区分大圆与小圆,并根据大圆圆心的距离约束区分三个大圆,这种方法受标定板摆放位姿的影响,容易出现识别错误。本文提出利用图像模板的标志点识别方法,识别流程如下。

1) 控制相机采图。在控制缩放参数时,必须保证靶标板上三个大圆在视场范围内,并且必须调节对焦使图像清晰。

2) 图像处理与圆心提取。对靶标图像进行滤波去噪,提取图像边缘后利用图像轮廓进行椭圆拟合,筛选满足椭圆特征的轮廓,求解出椭圆心形的图像坐标。

3) 生成模板图像。将所有圆心坐标取整,绘制在新建的二值图像 I_C 上。删选出三个大圆,以一个大圆为中心,在其他两圆之间的 $1/3, 1/2, 2/3$ 处绘制圆形区域,分别获得 I_A, I_B 。

4) 模板叠加。计算 $I_{D1} = I_C - I_A, I_{D2} = I_C - I_B$ 。

5) 建立靶标坐标系。统计 I_{D1}, I_{D2} 中灰度为 255 的像素个数,根据大圆实际位姿关系标记三个大圆,建立靶标世界坐标系。

3.2 靶标位姿检测算法

记相机获得的图像为 I ,进行滤波去除噪声后检测轮廓,并对轮廓进行椭圆拟合,获得所有椭圆的圆心坐标,需要注意的是,圆心坐标为浮点型,而图像坐标为离散的点,所以将所有坐标点向上取整保存在容器 C 中。按照椭圆长轴的相对大小进行排序,获取前三个椭圆,记作集合 $E = \{E_0, E_1, E_2\}$ 。

新建二值图像, $I_C = \begin{cases} 255, (x, y) \in C \\ 0, \text{other} \end{cases}$ 。新建两个

图像模板 I_A, I_B ,在 E 中任取各不相同的三点,不失一般性,顺序标记为 p_1, p_2, p_3 ,令 $c_1 = (p_1 + p_2)/2, c_2 = (p_1 + p_2)/3, c_3 = 2(p_1 + p_2)/3, c_4 = (p_1 + p_3)/2, c_5 = (p_1 + p_3)/3, c_6 = 2(p_1 + p_3)/3$ 。

以 $c_i (i=1, \dots, 6)$ 为圆心、 r 为半径,取圆形邻域 $D_i = \{I(x, y) \mid \|I(x, y) - c_i\|_2 \leq r\}$ 。若 d 为两圆心之间的距离, r 为模板图像圆形区域半径。为保证算法求解唯一性, D_i 不应与其他圆点相交,

则 $1 < r < d/\sqrt{13}$ 。

得到的图像模板为

$$I_A(x, y) = \begin{cases} 0, (x, y) \in D_i, i=1, 2, 3 \\ 255, \text{other} \end{cases}, \quad (18)$$

$$I_B(x, y) = \begin{cases} 0, (x, y) \in D_i, i=4, 5, 6 \\ 255, \text{other} \end{cases}. \quad (19)$$

令 $I_{D1} = I_C - I_A, I_{D2} = I_C - I_B$, 具体过程如图 4 所示。

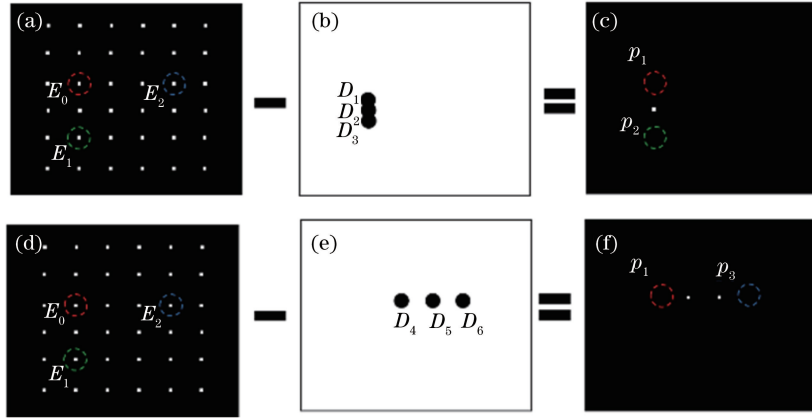


图 4 标志平板模板叠加示意图。(a) I_C ; (b) I_A ; (c) I_{D1} ; (d) I_C ; (e) I_B ; (f) I_{D2}

Fig. 4 Superposition of target and template images. (a) I_C ; (b) I_A ; (c) I_{D1} ; (d) I_C ; (e) I_B ; (f) I_{D2}

如果 $I_{D_i}(x, y) < 0$, 则 $I_{D_i}(x, y) = 0, i=1, 2$ 。计算 I_{D1} 和 I_{D2} 非零元素个数 n_1, n_2 , 根据 n_1, n_2 便可以判断大圆顺序, 从而得到标志平板坐标系。按照如下判别方法获得大圆的标签, 区分出三个大圆。图像模板完全依赖图像自身, 不依赖于绝对距离, 从而更加稳定。

1) 当 $n_1=0$ 时: 若 $n_2=1$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_1, E_2, E_0 ; 若 $n_2=2$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_2, E_1, E_0 。

2) 当 $n_1=1$ 时: 若 $n_2=0$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_1, E_0, E_2 ; 若 $n_2=2$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_0, E_1, E_2 。

3) 当 $n_1=2$ 时: 若 $n_2=0$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_0, E_2, E_1 ; 若 $n_2=1$, 则 p_1, p_2, p_3 对应的圆分别为 E_2, E_0, E_1 。

4 实验验证

4.1 变焦测量系统误差实验

采用 IMG DFK Z12G445 变焦相机进行实验, 焦距变化范围 5~50 mm, 变焦动态标定在文献 [17] 中给出了充分证明, 这里不做验证。在光学平台上进行单点和直线运动误差实验。为验证绝对定位精度, 分别进行单点和直线测量精度实验。靶标检测算法在不同位置检测靶标如图 5 所示。

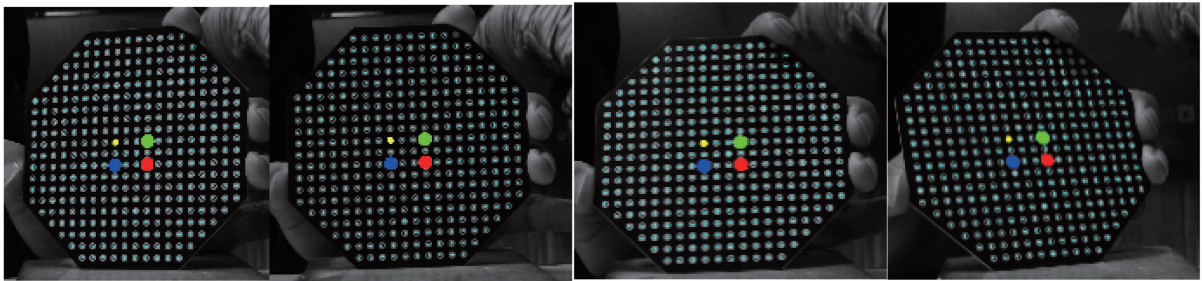


图 5 靶标检测示例

Fig. 5 Examples of target detection

选择不同缩放值进行单点位姿测量误差分析。选择两组缩放值, 将变焦相机固定放置在光学平台上, 检测靶标固定安装在移动小车上。缩放值取 10 和 60 的单点位置和姿态测量点分布如

图 6 所示。

记旋转向量和平移向量分别为 $r = (r_x, r_y, r_z)^T, t = (t_x, t_y, t_z)$, 则位姿平均误差包括位置偏差 e_{trans} 和姿态偏差 e_{rot} :

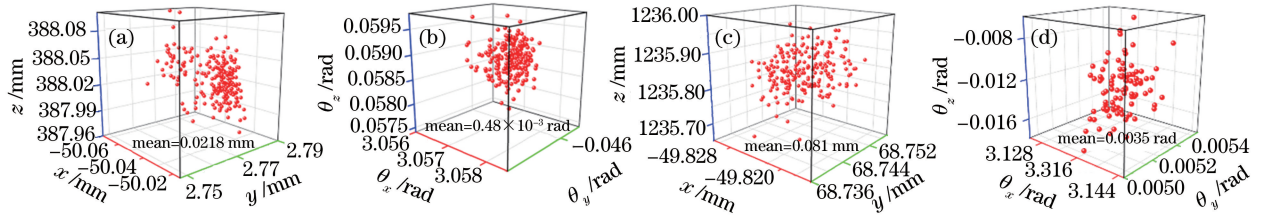


图 6 单点位姿平均误差。(a)缩放值 10 位置平均误差;(b)缩放值 10 姿态平均误差;
(c)缩放值 60 位置平均误差;(d)缩放值 60 姿态平均误差

Fig. 6 Mean error of single point pose. (a) Mean position error of zoom 10; (b) mean orientation error of zoom 10;
(c) mean position error of zoom 60; (d) mean orientation error of zoom 60

$$e_{\text{trans}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \| \mathbf{t}_i - \bar{\mathbf{t}} \|_2, \quad (20)$$

$$e_{\text{rot}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \| \mathbf{r}_i - \bar{\mathbf{r}} \|_2, \quad (21)$$

式中 m 表示连续测量次数, $\bar{\mathbf{t}}$ 、 $\bar{\mathbf{r}}$ 分别表示旋转向量和 平移向量的均值向量。图6(a)、(c)所示为位置偏

差 e_{trans} , 图 6(b)、(d)所示为姿态偏差 e_{rot} 。可以看出, 基础位置的位置误差可达 $21.8 \mu\text{m}$, 位姿误差为 $0.48 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。变焦测量系统在定焦单点测量方面具有较高精度, 可满足机器人测量要求。选择更多的缩放位置, 利用(20)、(21)式计算位置误差和姿态误差, 如表 1 所示。

表 1 单点测量位姿均方根误差

Table 1 Root mean square error of single point measurement

Zoom (i/i_{max})	$x / \mu\text{m}$	$y / \mu\text{m}$	$z / \mu\text{m}$	$\Theta_x / (10^{-3} \text{ rad})$	$\Theta_y / (10^{-3} \text{ rad})$	$\Theta_z / (10^{-3} \text{ rad})$
1/10	9.81	8.37	20.9	0.325	0.237	0.351
2/10	2.41	3.68	34.2	0.885	0.048	0.614
3/10	1.58	2.84	31.6	0.632	0.060	0.680
4/10	2.57	3.80	48.2	0.697	0.060	0.915
5/10	4.74	12.5	109	0.928	0.1	1.56
6/10	2.50	3.90	100	3.29	0.079	2.16
7/10	16.4	13.1	252	4.16	0.118	5.72
8/10	35.1	32.5	1077	5.04	0.134	5.59

表 1 中 i/i_{max} 分别表示当前变焦位置与最大变焦位置。从表 1 可以看出, 不同变焦参数下, 单点测量的位姿精度均较高, 最大位置偏差均方根误差为 1.077 mm , 此时测量对象位置远 (5 m), 测量空间扩

大, 可以满足机器人位姿测量要求。

利用直线导轨进行直线位姿测量。将靶标板固定在滑块上, 实验导轨长度为 1.2 m , 设置合理的变焦阈值, 进行跟踪。图 7 为直线运动跟踪。

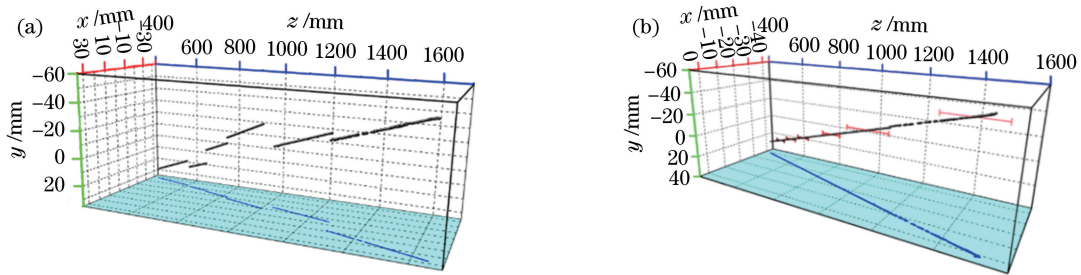


图 7 直线位姿测量。(a)变焦直线测量数据;(b)变焦坐标系统及深度误差分布

Fig. 7 Line position measurement. (a) Data of line measurement with zoom lens;
(b) depth error distribution and united camera coordinate system

图 7(a)为利用变焦相机进行直线跟踪的原始数据可以看出, 每个焦距下运动均为直线运动, 但直线数据分成了 6 段, 说明测量坐标系发生了 5 次变

换。根据变焦成像模型可知, 改变焦距后, 相机坐标系原点改变, 所以出现变焦数据不统一的问题。实验中, 在每一个变焦位置处, 保证标定板不动, 采集

变焦前后标定板图像,根据变焦前后图像单应矩阵求解变焦后相机内参,同时利用(7)、(8)式将坐标系统一,具体如图 7(b)所示。

坐标系统一后,不同焦距下的点云统一到基础坐标系下,测量结果为一条直线,利用 Matlab 进行直线拟合,用拟合优度定义运动直线度,在 $x-z$ 、 $y-z$ 方向拟合优度分别为 0.998、0.999,说明直线运动精度较高。由于实际运动存在偏差,直线均方根误差为 3.06 mm,表明测量点随深度存在偏差。进一步地,图 7(b)中在变焦位置进行单点位姿测量,随着距离增加,单点定位误差逐渐增加,第 6 个变焦位置处误差为 0.09 mm,表明单点测量精度较高。相对

定焦相机在 400~1600 mm 范围几乎无法实现稳定测量^[10],且精度在深度方向下降迅速,这说明了变焦测量系统在较大范围内测量的适用性。

4.2 机器人位姿测量实验

验证了变焦测量系统的精度及测量范围后,在机器人上进行跟踪实验。如图 8 所示,利用变焦相机进行工业机器人末端位姿测量,系统主要包括工业机器人 1、靶标板 2、变焦相机 3、集成控制单元 4。面向工业机器人的变焦位姿测量系统,要求测量范围覆盖整个机器人运动空间。图 8(b)为实验系统图,在实验中,选择 ESTUN 6 kg 机器人,运动范围覆盖半径 0.8 m 的空间。

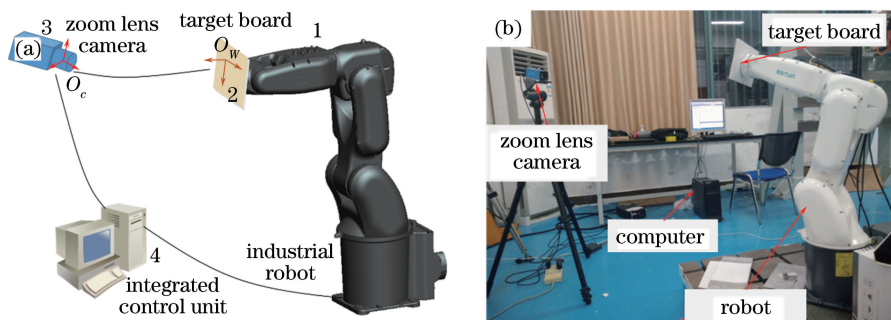


图 8 机器人位姿测量实验。(a)系统原理图;(b)实验设备

Fig. 8 Robot pose measurement experiment. (a) Schematic of system; (b) experiment setup

为验证变焦位姿测量在提高机器人自身位姿解算方面的有效性,开展机器人直线运动实验,利用精度更高的 C-Track 大视场双目测量设备^[4]进行对比,其单点定位精度高达 30 μm ,视场范围为 16.6 m^3 。实验过程:在标定板上粘贴 C-Track 跟踪靶标点,控制机器人末端沿 x 、 y 、 z 方向分别多次平

移一定距离,从控制器中读出平移量;同时用 C-Track 和本文单目相机进行跟踪,计算平移量,以 C-Track 跟踪距离作为真值。采用变焦单目相机与 C-Track 跟踪轨迹点,如图 9(a)、(b)所示,分别以示教器读数、变焦相机跟踪平移量、C-Track 跟踪平移量绘制平移量变化曲线,如图 9(c)所示。

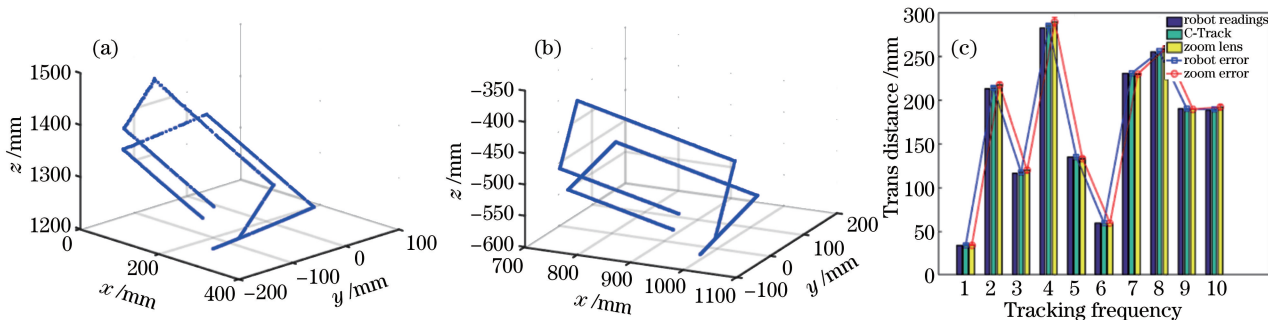


图 9 机器人位姿精度验证实验。(a)变焦相机跟踪轨迹;(b) C-Track 跟踪轨迹;(c)跟踪误差对比

Fig. 9 Experiment of robot's pose precision. (a) Tracking path with zoom lens; (b) tracking path with C-Track; (c) tracking error comparison

由图 9(a)、(b)可知,利用 C-Track 和变焦相机获得的轨迹相同,但由于没有标定 C-Track、变焦相机、机器人之间的转换,所以轨迹点的坐标原点不

统一。图 9(c)显示了 C-Track 和变焦相机的跟踪误差,以第 1 段平移量为例,机器人控制器读数变化 33.75 mm, C-Track 跟踪平移量为 34.189 mm,变焦

相机跟踪平移量为 34.2096 mm。以 C-Track 跟踪平移量为真值,则机器人自身平移偏差 0.439 mm,变焦相机跟踪平移量偏差为 0.026 mm,说明机器人控制器的数据并不能准确反映机器人实际运动,验证了本文方法的有效性。

采用的变焦相机具有较大的变焦范围,但实验中的机器人活动范围较小,为充分利用变焦测量范围灵活变动的优越性,采用更加宽松的变焦控制策

略,进行大范围变焦跟踪实验。

图 10(a)为在较长的实验室内进行大深度运动的测量结果,深度方向运动范围为 178.7461 ~ 9022.31 mm。图 10(b)为任意复杂运动的测量实验,受到运动速度影响,点云数据出现较多断点,但从投影点可看出整体运动趋势。实验验证了变焦相机测量视场灵活可变的特性,可以实现不同范围的跟踪,适用于不同型号和不同运动范围的机器人位姿测量。

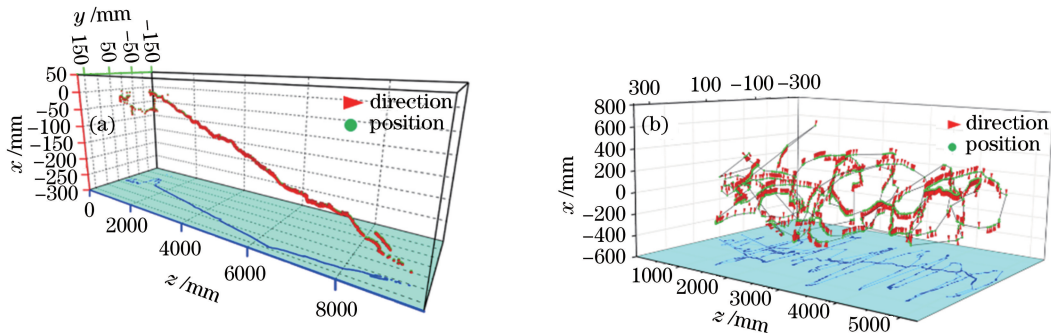


图 10 大范围变焦跟踪实验。(a)深度方向大范围直线运动;(b)复杂空间运动

Fig. 10 Large range zoom tracking experiments. (a) Linear motion in depth direction; (b) complex space motion

5 结 论

提出一种面向机器人活动空间的变焦测量系统,研究了变焦相机动态标定方法及位姿求解方法,给出了一种变焦控制策略。针对平面圆形靶标,提出一种基于图像模板的靶标位姿检测算法,能够稳定地求解出世界坐标系。实验结果显示,不同焦距下单点测量精度较高,位姿测量精度沿深度方向变化较小。实验测量范围覆盖了实验机器人活动空间,且在大深度、任意姿态测试时,变焦测量系统均具有稳定的测量效果,说明提出的变焦测量系统具有灵活的测量视场,较高的测量精度,以及动态测量便捷的特点,可以适用于不同规格型号的机器人跟踪与测量。系统在变焦相机控制策略、大深度精度控制方面仍须进一步优化研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Wei P. Monocular vision calibration method of the stereo target for robot pose measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 211-219.
张旭,魏鹏. 针对机器人位姿测量立体标靶的单目视觉标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 211-219.
- [2] Vincze M, Prenninger J P, Gander H. A Laser tracking system to measure position and orientation of

robot end effectors under motion[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1994, 13(4): 305-314.

- [3] Yang J, Wang D, Fan B, *et al.* Online absolute pose compensation and steering control of industrial robot based on six degrees of freedom laser measurement[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 034111.
- [4] Albert N, Mohamed S, Ahmed J, *et al.* Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker[J]. *Robotica*, 2014, 32(3): 447-466.
- [5] Meng Y, Zhuang H. Self-calibration of camera-equipped robot manipulators[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(11): 909-921.
- [6] Du G, Zhang P. Online robot calibration based on vision measurement[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(6): 484-492.
- [7] Zhang X, Song Y, Yang Y, *et al.* Stereo vision based autonomous robot calibration[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2017, 93: 43-51.
- [8] Driels M R, Swayze L W, Potter L S. Full-pose calibration of a robot manipulator using a coordinate-measuring machine[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1993, 8(1): 34-41.
- [9] Nubiola A, Bonev I A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 472-480.

- [10] Xie Z X, Chen W Z, Chi S K, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1015001.
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1015001.
- [11] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.
- [12] Wang T Y, Dong W B, Wang Z Y. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 146-153.
王天宇, 董文博, 王震宇. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 146-153.
- [13] Kuang Y, Astrom K. Pose estimation with unknown focal length using points, directions and lines [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013: 529-536.
- [14] Bujnak M, Kukulova Z, Pajdla T. New efficient solution to the absolute pose problem for camera with unknown focal length and radial distortion [C]. *Asian Conference on Computer Vision*, 2010: 11-24.
- [15] Taketomi T, Okada K, Yamamoto G, *et al.* Camera pose estimation under dynamic intrinsic parameter change for augmented reality [J]. *Computers & Graphics*, 2014, 44(1): 11-19.
- [16] Chen P, Wang C X. IEP n P: an iterative camera pose estimation algorithm based on EP n P [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0411001.
陈鹏, 王晨骁. IEP n P: 一种基于 EP n P 的像机位姿迭代估计算法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0411001.
- [17] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, *et al.* Calibration of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315005.
姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315005.
- [18] Liu W, Wang Y T, Chen J, *et al.* Tracking algorithm for zoom camera based on compensation matrix [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 159-163.
刘伟, 王涌天, 陈靖, 等. 利用补偿矩阵的可变焦摄像机跟踪算法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 159-163.
- [19] Arfaoui A, Thibault S, Desaulniers P. Calibration of zoom lens with virtual optical pattern [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 054107.
- [20] Wang Z, Mills J, Xiao W, *et al.* A flexible, generic photogrammetric approach to zoom lens calibration [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 244.
- [21] Wu B, Hu H, Zhu Q, *et al.* A flexible method for zoom lens calibration and modeling using a planar checkerboard [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2013, 79(6): 555-571.
- [22] Alvarez L, Gómez L, Henríquez P. Zoom dependent lens distortion mathematical models [J]. *Journal of Mathematical Imaging & Vision*, 2012, 44(3): 480-490.
- [23] Wang H N, Zhong W, Wang J, *et al.* Research of measurement for digital image definition [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(7): 828-831.
王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(7): 828-831.
- [24] Cui H H, Liao W H, Cheng X S, *et al.* Robust pattern locating algorithm for calibration of vision sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(9): 62-65.
崔海华, 廖文和, 程筱胜, 等. 用于视觉传感器标定的鲁棒性靶标定定位算法 [J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(9): 62-65.