

基于旋转视觉的三维姿态重构方法及精度分析

邝泳聪, 董亦飞

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 考虑电子元件的多样化、精细化及 PCB 集合度越来越高, 这对元件组装设备的精度要求不断提升; 针对自动插件机视觉系统要求精度、实时性高, 系统结构空间狭小等特点, 基于旋转立体视觉建立了针脚末端三维坐标视觉系统的数学模型, 并在旋转视觉的代数重构法基础上提出等价双目视觉的三角重构法; 通过理论分析和仿真, 推导并验证了旋转视觉的关键部件与关键参数的精度对针脚位姿测量精度影响的定量分析方法; 借助于等价双目视觉的三角分析法, 找到了在某些位置下针脚位姿测量精度发生异常的原因和规律; 提出的重构方法及精度分析方法可为高精度旋转视觉的设计选型、优化和高效使用提供指导。

关键词: 机器视觉; 旋转立体视觉; 位姿重构; 精度分析; 仿真分析

Three-dimensional Posture Reconstruction Method and Accuracy Analysis Based on Rotation Vision

KUANG Yongcong, DONG Yifei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, GuangzhouGuangdong 510640, China)

Abstract: Considering the diversification and refinement of electronic components and the increasing degree of PCB assembly, the precision requirements of component assembly equipment are constantly increasing. Aiming at the characteristics of the automatic plug-in machine vision system requiring high accuracy, high real-time performance, and narrow system structure space, a mathematical model of the three-dimensional coordinate vision system at the end of the stitch is established based on the rotating stereo vision, and the equivalent is proposed on the basis of the algebraic reconstruction method of the rotating vision. Triangulation reconstruction method of binocular vision; through theoretical analysis and simulation, the quantitative analysis method of the influence of the accuracy of key components and key parameters of rotating vision on the accuracy of stitch pose measurement is derived and verified; with the aid of the triangle of equivalent binocular vision The analysis method found the reason and law of abnormality in the accuracy of stitch pose measurement at certain positions. The proposed reconstruction method and accuracy analysis method can provide guidance for the design selection, optimization and efficient use of high-precision rotating vision.

Keywords: Machine vision; Rotating stereo vision; posture reconstruction; accuracy analysis; simulation analysis

0 引言

插件机是将针脚类电子元件插装到印刷电路板的精密组装设备, 随着工业技术的发展, 越来越多的电子元器件组装需要自动化来完成^[1-2]。目前异型插件机所用的底部视觉系统, 当元件底部颜色浅或者反光较强时, 难以区分元件本体和针脚, 这影响了异型元件的插件成功率。本文的旋转视觉系统通过转动元件, 从不同角度获取针脚的侧面背光图像, 解决了针脚图像提取的可靠性问题^[3]。面对越来越精密化的工作环境, 为了进一步提高精度及效率, 针对三维姿态重构方法及精度的研究势在必行。

旋转视觉可看作是由单摄像机视觉加上精密旋转平台组成, 如果保持摄像机与针脚的相对位置不变的前提下转动摄像机, 旋转视觉可等价于一个双目视觉或多视图立体

视觉系统。旋转视觉常用于转轴的标定^[4]以及激光扫描表面轮廓重构^[5], 一般形式为单目/双目加转台, 文献[4]采用多个激光旋转扫描的方法进一步提高了标定的精度, 文献[5]采用双目加旋转台的重构方法自动生成目标三维模型, 基恩士^[6]基于单摄像机加双结构光加转台的方法已对高精度三维扫描测量仪实现量产。基于单目的旋转视觉相较于传统双目视觉有旋转无需重新标定、简单紧凑等优点, 但对旋转精度要求较高。对插件机而言, 针脚的定位精度是异型元件自动插件的关键, 针对旋转视觉的精度研究具有很强的现实意义。从重建模型入手, Leung等^[7]改进了双目视觉系统的三维重建方法以提高精度。从结构、测量参数入手, 文献[8]分析了摄像机基线距离等与测量精度关系以改善精度; 文献[9-10]通过建立误差传递模型分析系统重要参数对测量系统精度的影响; 文献[11]分析了结构

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-05-12。

基金项目: 广东省科技攻关项目(2015B020239001)。

作者简介: 邝泳聪(1970-), 男, 广东台山人, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉、精密制造方向的研究。

引用格式: 邝泳聪, 董亦飞. 基于旋转视觉的三维姿态重构方法及精度分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 235-242, 263.

参数对测量精度的影响。从提高系统内外参数标定精度的角度,文献[12-13]通过建立的视觉测量系统数学模型,得到各参数对测量系统定位误差的影响大小;文献[14]从标定算法模型入手,使姿态角求解仅与相机内参和特征点图像坐标相关,并在此基础上建立误差分析模型。上述针对精度的分析方法都是以某个特定的位姿或坐标点进行精度分析,然而当点的位姿不同时误差评价的结果可能也会随之改变,例如在某些姿态下获取的图像可能会引入很大的图像提取误差,这种误差对位姿估算精度的影响采用先进的最优化算法也难以弥补。同时由于像元的空间离散误差,双目视觉两个摄像机的匹配图像点对,经透射反投影到三维物空间后不再是同一个点而是一个区域,这个区域就是因为像元离散误差导致的测量不确定度^[15-17]。对于这一误差,文献[18]提出了一种评价方法,并建立误差评价模型;文献[19]通过建立了位姿估计目标函数提高了位姿估算精度。

旋转视觉可看作是由单摄像机视觉加上精密旋转平台组成,如果保持摄像机与针脚的相对位置不变的前提下转动摄像机,旋转视觉可等价于一个双目视觉^[20]或多视图立体视觉系统。实验室前期研究发现,在某些旋转角度测量针脚位姿时其误差会很大。旋转视觉的研究起步晚,系统设计优化和使用等方面缺乏理论指导,实验试凑效率低且难以保证较优的精度,针对上述问题,本文建立了元件针脚从世界坐标系到图像坐标系的投影参数模型,在此基础上提出了从图像信息重构针脚三维位姿的代数重构方法和三角重构方法;通过理论分析和仿真,推导并验证了图像离散误差、旋转轴精度、像素分辨率、镜头焦距、旋转半径和针脚高度等关键部件和参数对针脚位姿测量精度影响的分析方法;借助于等价双目视觉的三角分析法,找到了在某些角度位置下针脚位姿测量精度发生异常的原因和规律。本文的研究为高精度旋转视觉的设计选型、优化和高效使用提供了指导理论。

1 旋转视觉的参数模型

1.1 系统构成与坐标系说明

旋转视觉针脚测量系统的结构如图 1 所示,包括摄像机、镜头、背光源、旋转轴和升降轴。旋转轴末端的气爪或吸嘴固定住电子元件,测量时摄像机固定不动,光源从背面照亮元件针脚末端,通过旋转轴旋转获取针脚不同角度的侧面图像。

位姿测量可看作目标特征点在相关坐标系下的坐标与摄像机坐标系下的坐标变换问题^[14]。如图 2 所示,旋转视觉涉及 4 个坐标系:摄像机坐标系 $O_c - xyz$,其中 $O_c z$ 为摄像机光轴, O_c 为光心;图像坐标系 $O_i - uv$,图像中心 O_0 为光轴与图像平面的交点;将摄像机坐标系在 $xO_c y$ 平面上作平移运动形成世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$,原点 O_w 是旋转轴 Y_R 中心线与 $xO_c y$ 平面的交点, O_w 与摄像机光心的距离为 L_z ;旋转轴坐标系 $O_R - X_R Y_R Z_R$,其原点 O_R 与 O_w 重合,理想情况下,旋转轴坐标系与世界坐标系重合且 O_w 在 z 轴上,但由

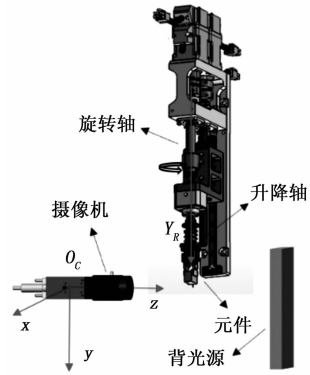


图 1 旋转视觉测量系统结构

于加工和装配都会存在误差,旋转轴 Y_R 与世界坐标轴 Y_w 之间有一定夹角,记 O_w 偏离 z 轴的垂直距离为 L_x 。简单起见,本文中默认已经将图像坐标系的尺寸单位转换为与其它坐标系一致,并将目标针脚末端(记为 P_i)看作理想空间点,暂不考虑其物理形状对图像投影的影响。 P_i 在摄像机坐标系、世界坐标系和旋转轴坐标系中的坐标用齐次坐标表示,分别记为 $P_i^c = [x_i^c, y_i^c, z_i^c, 1]T, P_i^w = [x_i^w, y_i^w, z_i^w, 1]T, P_i^R = [x_i^R, y_i^R, z_i^R, 1]T, P_i$ 在图像坐标系中投影点的坐标为 $p_i^l = [u_i, v_i, 1]T, O_0$ 坐标记为 $[u_0, v_0, 1]T$,光心 O_c 到图像中心 O_0 距离为焦距 f 。

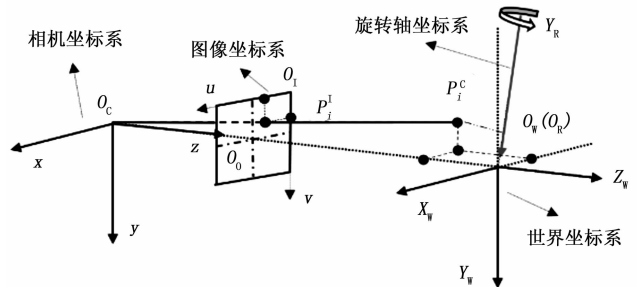


图 2 旋转立体视觉成像原理图

1.2 系统参数模型

1) 摄像机坐标系到图像坐标系的转换:

为了兼顾测量精度和轻量化,图 1 系统采用的是工业摄像机和普通工业镜头,其透射成像模型符合针孔摄像机模型。考虑到针脚位姿测量应用的视场小、工业镜头畸变较少且图像畸变可以通过标定独立校正等因素,本文假设已消除镜头畸变;由于工业摄像机图像芯片较大且加工工艺更严格,因此也假设 x 方向和 y 方向的像素物理尺寸一致,芯片阵列的扭曲为零。

根据针孔摄像机的透射原理,图像投影点 p_i^l 与对应的摄像机坐标 P_i^c 的转换关系可记为:

$$p_i^l = \frac{1}{z_i^c} * {}^lM_c * P_i^c \quad (1)$$

其中: ${}^lM_c = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 表示摄像机坐标系到图

像坐标系的转换矩阵, z_i^c 是目标点到摄像机光心的距离, 在二维图像测量/检测中, 目标所在平面通常与图像平面平行且距离基本固定, 但在本文系统 z_i^c 是变量。

2) 世界坐标系到摄像机坐标系的转换:

如前文所述, 世界坐标系是摄像机坐标系在 $xO_C y$ 平面上作纯平移运动形成的, 则世界坐标系到摄像机坐标系的转换关系为:

$$P_i^C = {}^C M_W * P_i^W \quad (2)$$

其中: ${}^C M_W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 是世界坐标系到摄像机

坐标系的转换矩阵。

3) 旋转轴坐标系到摄像机坐标系的转换:

旋转轴坐标系原点 O_R 与世界坐标系原点 O_W 重合, 则旋转轴坐标系与世界坐标系只存在旋转转换, 用 β 和 α 表达这种转换, 记轴 Y_R 与 Y_W 轴之间夹角为 β , 平面 $Y_R O_W Y_W$ 与 Z_W 轴的夹角记为 α 。则旋转轴坐标系到世界坐标系的转换关系为:

$$P_i^W = {}^W M_R * P_i^R \quad (3)$$

其中: ${}^W M_R = R_{Y^W}(\alpha) * R_{Z^W}(\beta)$, 为旋转轴坐标系到世界

坐标系的转换矩阵, 其中 $R_{Y^W}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$,

$$R_{Z^W}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

4) 旋转轴坐标系到图像坐标系的转换:

结合式 (1)、(2) 和 (3), 可得目标点 P_i 在旋转轴坐标系的坐标与图像坐标系的转换关系:

$$p_i^l = \frac{1}{z_i^c} * {}^l M_C * {}^C M_W * {}^W M_R * P_i^R = \frac{1}{z_i^c} * {}^l M_R * P_i^R \quad (4)$$

其中: ${}^l M_R$ 表示从旋转轴坐标系到图像坐标系的转换矩阵。 ${}^l M_C$ 是单摄像机视觉的内参数矩阵, ${}^C M_W$ 和 ${}^W M_R$ 属于外参数矩阵, 这些矩阵参数可以提前通过视觉标定得到。

2 位姿重构方法

前期研究主要基于标定参数模型实现针脚位姿重构(简称代数重构法), 代数方法模型简洁, 但用于图像信息重构目标位姿时, 不能提供易于理解的直观描述, 也不便于应用现有双目视觉的最新研究成果, 因此在基于式 (4) 参数模型的代数分析法基础上, 提出了基于等价双目视觉的三角重构法。

2.1 代数重构法

由式 (4) 可知是 P_i^R 四维齐次向量, 而投影点 P_i^l 是三维齐次向量, 可见根据单一位置获取的针脚图像无法实现目标点的空间坐标重构。图 2 中旋转轴 Y_R 转过 θ_K 角度后点 P_i^R 到达新位置(记为点 P_{i+1}^R), 有:

$$P_{i+1}^R = M_{\theta}^R * P_i^R \quad (5)$$

$$\text{其中: } M_{\theta}^R = \begin{bmatrix} \cos\theta_K & 0 & \sin\theta_K \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_K & 0 & \cos\theta_K \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由式 (4) 和 (5) 得到(用 P_i^R 表示的)点 P_{i+1}^R 的图像投影坐标:

$$p_{i+1}^l = \frac{1}{z_{i+1}^c} * {}^l M_R * P_{i+1}^R = \frac{1}{z_{i+1}^c} * {}^l M_R * M_{\theta}^R * P_i^R \quad (6)$$

联立式 (4) 和 (6) 得到的方程组包含 4 个线性方程, P_i^R 未知变量为 3 个, 因此解方程组可以实现点 P_i 三维坐标的重构。为了求解超定方程组, 有必要消去式 (4) 和 (6) 中的 z_i^c 和 z_{i+1}^c 。

将式 (6) 展开为方程组, 再通过初等变换运算消去 z_{i+1}^c , 可得:

$$\begin{cases} L_z X_2 - fL_x = h_{31} x_i^R + h_{32} y_i^R + h_{33} z_i^R \\ L_z Y_2 = h_{41} x_i^R + h_{42} y_i^R + h_{43} z_i^R \end{cases} \quad (7)$$

其中: $X_2 = u_{i+1} - u_0, Y_2 = v_{i+1} - v_0, h_{31} = (u_{i+1} - u_0) \sin\alpha \cos\beta \cos\theta_K + (u_{i+1} - u_0) \cos\alpha \sin\theta_K + f(\cos\alpha \cos\beta \cos\theta_K - \sin\alpha \sin\theta_K), h_{32} = -f \cos\alpha \sin\beta - (u_{i+1} - u_0) \sin\alpha \sin\beta, h_{33} = (u_{i+1} - u_0) \sin\alpha \cos\beta \sin\theta_K - (u_{i+1} - u_0) \cos\alpha \cos\theta_K + f(\cos\alpha \cos\beta \sin\theta_K + \sin\alpha \cos\theta_K), h_{41} = f \sin\beta \cos\theta_K + (v_{i+1} - v_0) \sin\alpha \cos\beta \cos\theta_K + (v_{i+1} - v_0) \cos\alpha \sin\theta_K, h_{42} = f \cos\beta - (v_{i+1} - v_0) \sin\alpha \sin\beta, h_{43} = f \sin\beta \sin\theta_K - (v_{i+1} - v_0) \cos\alpha \cos\theta_K + (v_{i+1} - v_0) \sin\alpha \cos\beta \sin\theta_K.$

式 (7) 中令 $\theta_K=0$, 得到对应式 (4) 消去 z_i^c 后的方程组:

$$\begin{cases} L_z X_1 - fL_x = h_{11} x_i^R + h_{12} y_i^R + h_{13} z_i^R \\ L_z Y_1 = h_{21} x_i^R + h_{22} y_i^R + h_{23} z_i^R \end{cases} \quad (8)$$

其中: $X_1 = u_i - u_0, Y_1 = v_i - v_0, h_{11} = f \cos\alpha \cos\beta + (u_i - u_0) \sin\alpha \cos\beta, h_{12} = -f \cos\alpha \sin\beta - (u_i - u_0) \sin\alpha \sin\beta, h_{13} = f \sin\alpha - (u_i - u_0) \cos\alpha, h_{21} = f \sin\beta + (v_i - v_0) \sin\alpha \cos\beta, h_{22} = f \cos\beta - (v_i - v_0) \sin\alpha \sin\beta, h_{23} = -(v_i - v_0) \cos\alpha.$

由于噪声、离散误差等原因, 图像投影不可避免存在误差, 实际应用中通常获取多个不同位置的图像投影坐标, 从而提高目标点 P_i 的空间坐标估算精度。通过旋转轴将元件针脚转到 k 个不同角度位置获取图像投影坐标, 根据式 (7) 可得到 $2 * k$ 个线性方程组成的超定方程组, 写成矩阵形式, 得到针脚末端三维重构模型:

$$L = H * P_i^R \quad (9)$$

$$\text{其中: } L = L_z \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \vdots \\ X_K \\ Y_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -fL_x \\ 0 \\ -fL_x \\ 0 \\ \vdots \\ -fL_x \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H =$$

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{2k-1,1} & h_{2k-1,2} & h_{2k-1,3} \\ h_{2k,1} & h_{2k,2} & h_{2k,3} \end{bmatrix}, \text{ 经过标定的旋转视觉系统进行针}$$

脚位姿测量时，矩阵 L 和 H 的值已知，因此用最小二乘法等优化方法求解超定方程组 (9)，即可得到目标点 P_i 的空间位姿估计。立体视觉中，在不同位置取像时目标点的图像投影坐标的不确定度通常不同，因此求解超定方程组时一般还要考虑测量值的加权。得到 P_i 在旋转轴坐标系的坐标后，根据公式 (3) 可以算得 P_i 的世界坐标。

2.2 三角重构法

旋转视觉的等价双目视觉如图 3 所示，简单起见，假设图上相关点的坐标都已经转换到旋转轴坐标系。 P_i^R 为第一次取像时针脚所在的角度位置， θ_k 是从第一次取像位置转到第 2 次取像位置时旋转轴转过的角度。 O_C 是摄像机光心， O_R 是旋转轴坐标系原点， X_1 和 X_2 分别是第一次和第二次 P_i 点在摄像机 O_C 的图像投影坐标。

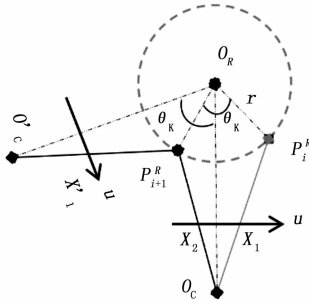


图 3 等价双目视觉示意图

保持针脚 P_i^R 与摄像机 O_C 的相对姿态不变，将点 P_i^R 和摄像机 O_C 一起绕 Y_R 轴（图上 O_R 点）旋转 θ_k 到达新位置 P_{i+1}^R ，在新的位置将原来的 X_1 和 O_C 记为点 X'_1 和（虚拟）摄像机 O'_C ，由图可见摄像机 O_C 和（虚拟）摄像机 O'_C 构成双目系统。根据双目视觉的三角测量法， P_{i+1}^R 点在摄像机 O'_C 和摄像机 O_C 的投影射线分别为 $O'_C X'_1$ 和 $O_C X_2$ ，求解这两直线的交点，即可得到 P_{i+1}^R 点坐标。将 P_{i+1}^R 绕 Y_R 轴旋转 $-\theta_k$ 角可回到点 P_i 的位置，即 P_{i+1}^R 点坐标乘上式 (3) 的旋转矩阵 $R_Y^R(-\theta_k)$ 即可得到 P_i^R 坐标。

由于镜头畸变和图像离散误差等原因导致的不确定性，实际应用中两投影射线一般不相交，应用双目/多目视觉的优化重构算法可获得最优解。按上述方法通过多次成像，也可以构成等价多目视觉，提高位姿估算精度。

实施三角法时，先要将 X_1 、 X_2 和摄像机光心 O_C 从图像坐标系和相机坐标系统一变换到旋转轴坐标系。由式 (6) 可得图像坐标系到旋转轴坐标系的转换关系：

$$P_i^R = z_i^C * {}^C M_R^{-1} * p_i^I \quad (10)$$

由式 (2) 和 (3) 得到摄像机坐标系到旋转轴坐标系的转

换关系：

$$P_i^R = {}^W M_R^{-1} * {}^C M_W^{-1} * P_i^C \quad (11)$$

3 旋转视觉的误差分析

误差分析的基本方法是通过搭建误差与目标参数的模型^[7-10]。本文的旋转视觉由单摄像机加上目标对象的精密旋转组成，旋转视觉的工作距离、视场大小、精度通常由具体的应用场景决定，但其它参数如取像角度位置、取像次数、旋转精度、摄像机分辨率、旋转半径、取像高度等，取决于其对总体精度的影响，由式 (9) 可知，三维重构主要与图像投影坐标信息、结构参数、旋转抽精度和测量参数有关。结构参数的误差主要源于系统标定，引起的误差属于系统误差；篇幅关系，本文主要从以下几个方面进行误差分析：①代数重构法和三角重构法的图像离散误差与针脚位姿估算误差关系；②旋转角度精度以及旋转轴径向跳动误差与图像提取误差关系；③旋转半径、焦距、摄像机分辨率、取像高度对精度的影响。

为了简化分析过程和突出主要参数与精度的关系，在没有特别说明时，下文研究中假定 $\alpha = \beta = 0$ ， $y_i^R = 0$ ，偏移量 $L_x = 0$ ，针对两次取像重构针脚空间位姿的情况进行分析。

3.1 图像坐标提取误差与针脚位姿估算误差关系

图像坐标提取误差主要来源于像元离散化带来的误差以及噪声等因素带来的误差^[11]，图像点坐标是计算机可读取的直接参数，图像点坐标的提取精度直接关系到位姿的估算精度。根据误差传递原理可定量分析图像点误差与针脚位姿估算误差的关系。

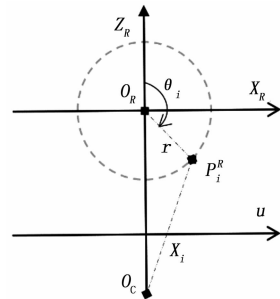


图 4 旋转角度 θ_i 与 P_i^R 图像投影的关系

1) 代数重构法

针脚的旋转角度 θ_i ($=\theta_0 + \theta_k$) 与 P_i^R 图像投影的关系如图 4 所示，其中 θ_0 是第一次取像时针脚所在的角度位置， θ_k 是从第一次取像位置转到第 K 次取像位置时旋转轴转过的角度。旋转轴坐标系下，针脚末端 P_i^R 在角度位置 θ_i 时其坐标为：

$$\begin{cases} x_i^R = r \sin \theta_i \\ z_i^R = r \cos \theta_i \end{cases} \quad (12)$$

式中， r 是旋转半径，即针脚末端到旋转轴中心线的距离。将式 (12) 代入式 (9)，整理得到两次取像时点 P_i^R 的图像投影坐标：

$$\begin{cases} X_1 = \frac{fr \sin\theta_0}{r \cos\theta_0 + L_z} \\ Y_1 = \frac{fy_i^R}{r \cos\theta_0 + L_z} \\ X_k = \frac{fr \sin(\theta_0 + \theta_k)}{r \cos(\theta_0 + \theta_k) + L_z} \\ Y_k = \frac{fy_i^R}{r \cos(\theta_0 + \theta_k) + L_z} \end{cases} \quad (13)$$

由式 (9) 可得点 P_i 在旋转轴坐标系下坐标为:

$$\begin{cases} x_i^R = \frac{(z_i^R + L_z)X_1}{f} \\ y_i^R = \frac{(z_i^R + L_z)Y_1}{f} \\ z_i^R = \frac{L_z(fX_2 - X_1 X_2 \sin\theta - fX_1 \cos\theta)}{X_1 X_2 \sin\theta + fX_1 \cos\theta - fX_2 \cos\theta + f^2 \sin\theta} \end{cases} \quad (14)$$

当 $\alpha = \beta = 0$ 时世界坐标系与旋转轴坐标系重合, 本文的内容主要涉及图像坐标系与旋转轴坐标系之间的关系, 因此这里统一用旋转轴坐标系表示。

根据误差传递原理^[21], 由式 (14) 可得到因图像离散误差引起的 P_i^R 位姿估算误差为:

$$\Delta_{dis}^1 = \sqrt{\sum_k \sum_j \left(\frac{\partial F_k}{\partial T_j} \delta T_j \right)^2} = \sqrt{\sum_k \left(\sqrt{\left(\frac{\partial F_k}{\partial X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_k}{\partial X_2} + \frac{\partial F_k}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial X_2} \right)^2} \delta X \right)^2} \quad (15)$$

式中, F_k 分别取 x_i^R, z_i^R, T_j 分别取 $X_1, X_2, \frac{\partial F_k}{\partial \theta_i}$ 与 $\frac{\partial F_k}{\partial r}$ 可用式

(12) 求偏导得到, $\frac{\partial \theta_i}{\partial T_j}, \frac{\partial \theta}{\partial X_2}$ 与 $\frac{\partial r}{\partial T_j}$ 可用式 (13) 偏导得到,

$\frac{\partial F_k}{\partial X_1}$ 与 $\frac{\partial F_k}{\partial X_2}$ 可用式 (14) 求偏导得到。

2) 三角重构法:

如图 3 所示, 图像投影坐标 X_1, X_2 和摄像机光心 O_c 在旋转轴坐标系的坐标分别为 $P_{O_c}^R = [0, 0, -L_z]^T, P_{X_1}^R = [X_1, 0, -L_z + f]^T, P_{X_2}^R = [X_2, 0, -L_z + f]^T$ 。点 $P_{O_c}^R$ 和 $P_{X_1}^R$ 绕 YR 轴旋转 θ_k 后坐标为 $P_{O_c}^R = [-L_z \sin \theta_k, 0, -L_z \cos \theta_k]^T, P_{X_1}^R = [X_1 \cos \theta_k + (f - L_z) \sin \theta_k, 0, -X_1 \sin \theta_k + (f - L_z) \cos \theta_k]^T$ 则两摄像机的投影射线 $O'_c X'_1$ 和 $O_c X_2$ 分别为:

$$\begin{cases} x^R = -L_z \sin \theta_k + k_2 (X_1 \cos \theta_k + f \sin \theta_k) \\ z^R = -L_z \cos \theta_k + k_2 (-X_1 \sin \theta_k + f \cos \theta_k) \\ x^R = k_1 X_2 \\ z^R = k_1 f - L_z \end{cases} \quad (16)$$

上述式中都有 $y_i^R = 0$, 这里没有列关于 y 的方程。由式 (17), 可得到直线 $O'_c X'_1$ 与直线 $O_c X_2$ 的交点坐标为:

$$\begin{cases} x_{i+1}^R = \frac{L_z X_2 (f \sin \theta_k + X_1 \cos \theta_k - X_1)}{(X_1 X_2 \sin \theta_k + f X_1 \cos \theta_k - f X_2 \cos \theta_k + f^2 \sin \theta_k)} \\ y_{i+1}^R = 0 \\ z_{i+1}^R = \frac{L_z (-f X_1 - X_1 X_2 \sin \theta_k + f X_2 \cos \theta_k)}{(X_1 X_2 \sin \theta_k + f X_1 \cos \theta_k - f X_2 \cos \theta_k + f^2 \sin \theta_k)} \end{cases} \quad (17)$$

根据误差传递原理^[19], 由式 (17) 可得到 P_{i+1}^R 点用三角法因图像离散误差引起的位姿估算总误差为:

$$\Delta_{dis}^2 = \sqrt{\sum_k \sum_j \left(\frac{\partial F_k}{\partial T_j} \delta T_j \right)^2} \quad (18)$$

式中, F_k 分别取 $x_{i+1}^R, z_{i+1}^R, T_j$ 分别取 X_1, X_2 , 其中 $\frac{\partial F_k}{\partial T_j}$ 的计算与式 (15) 相同。

3.2 旋转轴精度与图像提取误差关系

旋转视觉依靠旋转轴将目标点转动到不同角度位置实现取像投影, 位姿测量完成后, 还要将元件旋转到插件角度再进行插件, 因此旋转轴的精度对测量和插件精度至关重要。前文已分析过图像坐标误差与位姿估算误差的关系, 因此本节只分析角度定位精度和径向跳动误差对图像提取误差的影响。

1) 角度定位精度:

旋转角度定位误差的影响表现在, 位姿估算模型使用的旋转角度为理想值 θ_k , 旋转轴实际转过的角度存在偏差 $\delta\theta_k$ 时, 针脚实际到达的位置与估算位置有偏差。根据误差传递原理^[21], 式 (13) 得到因角度定位误差引起的图像提取误差:

$$\Delta_{angle-c} = \left| \frac{\partial X_j}{\partial \theta_k} \right| \delta \theta_k \quad (19)$$

2) 旋转轴径向跳动:

旋转轴径向跳动误差可分解为转角误差与半径误差, 转角误差上文已分析, 本节主要分析旋转半径与图像提取误差关系。位姿估算模型使用的旋转半径 r 为固定值, 但由于径向跳动, 实际取像时 r 存在偏差 δr , 导致针脚估算位置与实际位置存在偏差。根据误差传递原理^[21], 由式 (13) 得到因转轴径向跳动误差引起的 P_i^R 图像提取误差为:

$$\Delta_{r-c} = \left| \frac{\partial X_j}{\partial r} \right| \delta r \quad (20)$$

3.3 其他参数与针脚位姿估算精度关系

采用综合分析方法, 将初始角度、旋转角与像素分辨率或镜头焦距组合分析, 能更全面掌握这些关键系统参数对精度影响。分析旋转半径、焦距、像素分辨率对精度的影响可利用式 (15), 通过旋转半径、焦距、像素分辨率的不同取值得到其对针脚位姿估算精度影响。

分析取像高度对精度的影响时, 根据误差传递原理^[19], 由式 (13)、(14) 可得到 P_i^R 点因图像离散误差引起的对 y 方向位姿估算误差为:

$$\Delta_{dis}^3 = \sqrt{\sum_j \left(\frac{\partial y_i^R}{\partial T_j} \delta T_j \right)^2} \quad (21)$$

式中, T_j 分别取 X_1, X_2, Y_1 , 其中 $\frac{\partial y_i^R}{\partial T_j}$ 的计算方法与式 (15) 类同。

4 仿真实验与讨论

为验证所提出的针脚重构方法和误差分析方法的有效性, 在 Matlab2018a 上对上述的误差分析方法进行了仿真实

验。在没有特别说明的情况下，取 $r=12\text{ mm}$ ， $f=16\text{ mm}$ ，像元尺寸为 $4.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$ ，采用固定视差的方法，视场高度为 50 mm ，CCD 大小为 $1/2''$ ，则取测量距离 $L_z = \frac{50}{4.8}$ mm，图像坐标提取误差假定 1 个像素。

4.1 图像坐标提取误差与针脚位姿估算误差仿真与分析

1) 代数重构法:

为了分析在工作范围内图像坐标提取误差对针脚位姿估算误差的关系，了解旋转取像角度与位置测量误差的基本规律，仿真时以 θ_0 和 θ_k 为变量 ($\theta_0 = 0 \sim 360^\circ$ ， $\theta_k = -180^\circ \sim 180^\circ$)， r 、 L_z 和 f 按前述取值，根据式 (15) 计算出代数法的图像离散误差引起的 P_i^R 位姿估算误差，将结果绘制成三维图，如图 5 所示。

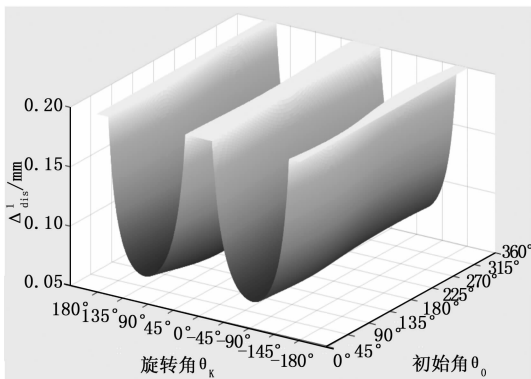


图 5 (代数法) 离散误差与位姿估算误差的三维图

在某些 θ_0 、 θ_k 范围，位姿估算误差出现运算极限值，为了更清楚看到误差与 θ_0 、 θ_k 的关系，图 5 中对超过 0.2 mm 的输出做了饱和处理，并对 z 轴显示限制在 $-0.2\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$ 范围内，如图右侧的颜色条所示，图中颜色越深的区域，对应的误差越小，越趋向浅色表示误差越大，白色区域对应误差超过 0.2 mm 的输出。

2) 三角重构法:

根据式 (18) 计算三角法的位姿测量误差，得到的三维图与图 (5) 基本一致，图 6 给出了三角法位姿估算误差三维图的顶部视图。图 6 中包含 3 个白色区域 (误差超出 0.2 mm): (1) $\theta_k = 0$ 或接近零的区域。从代数法的式 (13) 可知代数法的 X_2 的方程退化成 X_1 或接近 X_1 方程，因此会引起了大的估算误差; 从三角法角度分析，结合图 3 可知此时表示 P_i^R 和 P_{i+1}^R 在同一点或者靠近的位置取像，对应基线很短的双目结构，已有的研究表明这样测量误差会较大^[7]; (2) 图 6 顶部和底部 $\theta_k > 150^\circ$ 或 $\theta_k < -150^\circ$ 的两个亮黄区域，从代数法的方程 (13) 和 (15) 难以看出规律，用等价双目视觉结构来分析，可知这些区域对应的是类似图 7 所示的两条反投影射线夹角为零或接近零的情形，显然交点求解会出现很大的误差。通过数学分析，两条反投影射线夹角为零或接近零的位置的方程式为:

$$\arctan \frac{X_1}{f} + \theta_k - \arctan \frac{X_2}{f} \cong k * 180^\circ \quad (22)$$

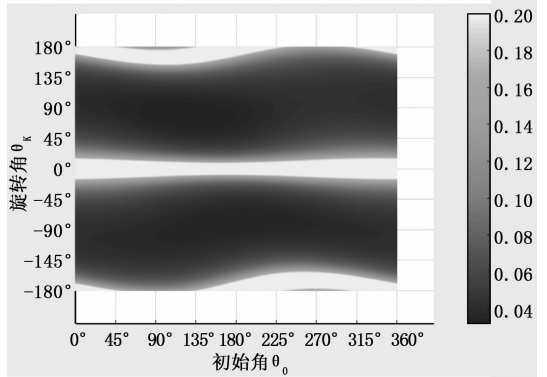


图 6 三角法估算误差三维图的顶视图

式中， $k = -1, 0$ 或 1 。 r 、 L_z 和 f 的取值变化时，这部分区域会相应改变。

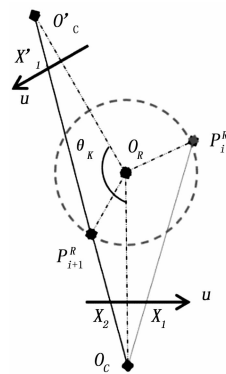


图 7 三角法两条反投影射线夹角接近零的情形

图 5 中的几个误差极值点，在三角法分析的结果中同样存在，对应的是两次取像位置分别在 0° (或 360°) 和 180° ，从式 (13) 可知，此时 X_1 和 X_2 方程都等于零，因此无法正常求解; 而这种情况下等价双目视觉结构也无法构成三角测量，因此在这两个位置测量，确实会存在极大误差。

从图 5 和图 6 可见，沿着初始角方向，精度最高的区域在旋转角为 90° 或 -90° 附近向两边扩散。也就是说两次取像的角度差异为 90° 左右，才可能获得最优精度。沿着旋转角方向，精度最高的取像位置是初始角为 135° 和 225° 位置附近，两次都在这两位置，可达到的精度最高，因为这两位置离摄像机的图像平面距离近，图像分辨率高，因此精度高。

根据得到的图像坐标提取误差与针脚位姿估算误差的三维图，不同测量角度，估算精度相差较大，根据最小二乘拟合的研究成果^[22]，采用多个角度旋转拍照，用最小二乘法求解针脚位姿的超定方程组可获得更高的位姿估算精度。

4.2 旋转轴精度与图像坐标提取误差仿真与分析

1) 角度定位精度:

旋转轴转角定位误差在 $\pm 0.05^\circ$ ，仿真采用最大转角误差为 0.1° ，根据式 (13)、(19)，其他参数与 4.1 相同，绘出角度定位精度与图像提取误差关系图，为便于观察图中 y 轴单位转换为像素。

如图 8 所示，图中有 2 个极值为零的位置，根据几何分

析可知此位置为 $P_i^R O_c$ 与旋转圆的相切位置, 在此位置及附近针脚的转角偏移到图像坐标系中映射的灵敏度极差。在 $\theta_i = K \times 180^\circ (K=1, 2, \dots)$ 左右位置, 转角误差造成的图像提取误差达到极大值。同时可看出最大 0.1° 的转角误差会造成 $0 \sim 0.5$ 个像素的图像提取误差。

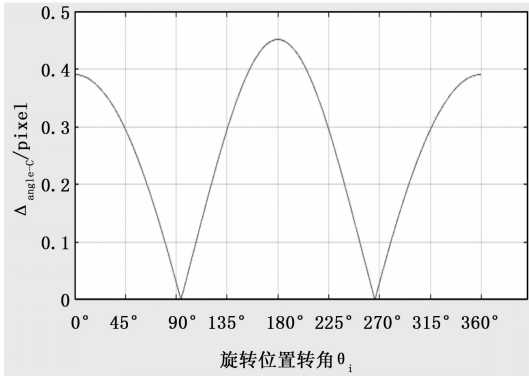


图 8 旋转角度误差与图像提取误差关系图

2) 旋转轴径向跳动:

结合本文旋转轴的系统结构, 正常径向跳动在 $10 \mu\text{m}$ 以内, 这里假定旋转半径误差为 $10 \mu\text{m}$ 。根据式 (13)、(21), 其他参数与 4.1 相同, 绘出旋转半径与图像提取误差关系三维图如图 9 所示。

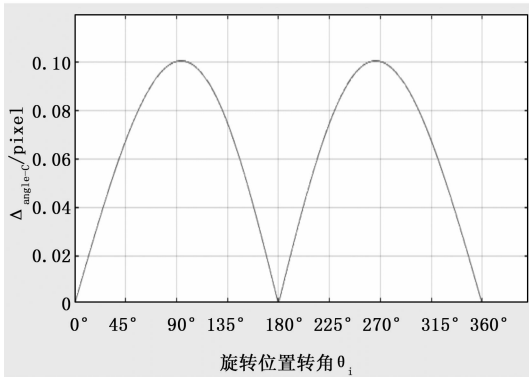


图 9 旋转半径误差与图像提取误差关系图

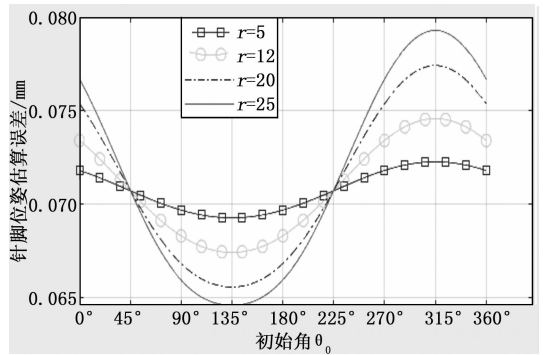
如图 9 所示, 在 $\theta_i = 90^\circ + K \times 180^\circ (K=1, 2, \dots)$ 位置, 半径误差造成的图像提取误差达到极大值; 在 $\theta_i = K \times 180^\circ (K=1, 2, \dots)$ 位置, 半径误差造成的图像提取误差达到极小值。同时可看出 $5 \mu\text{m}$ 的半径误差造成的图像提取误差最大在十分之一像素左右。

4.3 其他参数与针脚位姿估算精度仿真与分析

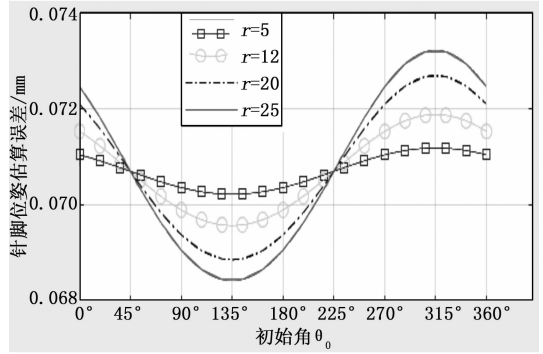
根据前文分析结果, 本小节的旋转角 θ_k 取值为 90° , 其他参数如无特别说明, 与 4.1 相同。

1) 旋转半径:

分析旋转半径对精度的影响是为了解决当元件的针脚很多时选取哪些针脚用来定位的问题。根据式 (15), 根据式 (12), 在焦距 $f=16 \text{ mm}$ 和 $f=50 \text{ mm}$ 两种情况下, 分别取旋转半径 $r=5 \text{ mm}$ 、 12 mm 、 20 mm 、 25 mm , 绘出旋转半径与针脚位姿估算精度的关系图如图 10 所示。



(a) $f=16 \text{ mm}$



(b) $f=50 \text{ mm}$

图 10 旋转半径对针脚位姿估算误差关系图

由图 10 (a)、(b) 可知, 相同焦距, 旋转半径越大, 初始角对精度影响越明显, 这是由于随着旋转半径的增大针脚与摄像机距离的变化幅度在增大。在初始角为 135° 左右时误差最小, 且随着半径的增大而减小。为对比分析不同焦距下半径变化对误差的影响, 做表 1。

表 1 焦距对针脚位姿定位误差影响表 ($\text{mm} \times 10^{-2}$)

半径 r	焦距 $f=50$			焦距 $f=16$		
	最大值	最小值	差值	最大值	最小值	差值
5	7.12	7.02	0.10	7.23	6.93	0.30
12	7.19	6.96	0.23	7.46	6.74	0.72
20	7.27	6.89	3.84	7.74	6.56	1.18
25	7.32	6.84	4.78	7.93	6.46	1.47

如表 1 所示, 以半径为 25 mm 为例, 发现焦距为 16 mm 时的最大误差与最小误差差值为 $14.7 \mu\text{m}$, 焦距为 50 mm 时最大误差与最小误差差值为 $4.8 \mu\text{m}$, 其他半径下规律也是如此, 由此可以得到结论为焦距增大时, 相同的旋转半径在不同初始角的误差差异变小。

2) 焦距:

针对焦距对测量精度的影响, 文献 [8]、[23] 通过固定测量距离的方式分析得到焦距越大误差越小的线性关系结论。然而焦距变化、测量距离不变可能会导致在此测量距离处无法清晰成像, 即跳出景深范围之外。本文通过固定视场范围使测量距离随焦距变化而变化的做法对焦距与误差的关系进行分析, 根据式 (15), 分别取 $f=8 \text{ mm}$ 、 16 mm 、 25 mm 、 50 mm , 测量距离随焦距而改变即 $L_z =$

$\frac{40f}{7.2}$ mm, 取最佳旋转角 90° , 绘出焦距与针脚位姿估算精度关系图, 如图 11 所示。

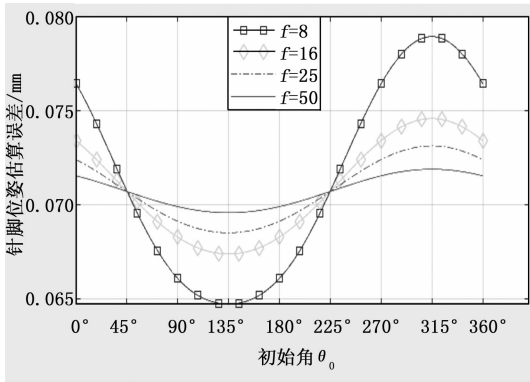


图 11 焦距对针脚位姿定位精度影响

如图 11 所示, 当测量距离 L_z 随焦距改变时, 其对精度影响在初始角不一样时表现出不同的趋势, 在初始角为 45° 到 225° 时焦距与精度成反比, 在其他角度时呈正比, 且焦距越短精度的波动范围越大, 这是由于焦距越短旋转半径对精度的影响越大。由于机械结构的限制, 在应用于插件机的旋转视觉系统时, 综合考虑选择焦距 $f=16$ mm。

3) 像素分辨率:

构成图像最小单位“像素”的大小就称为像素分辨率, 视觉测量方法的精度很大程度上取决于摄像机的像素分辨率^[24]。根据式 (15), 选取市面上常用 CCD 的像素当量 PixelSize, 绘出像素尺寸针脚位姿估算精度的关系图如图 12 所示。

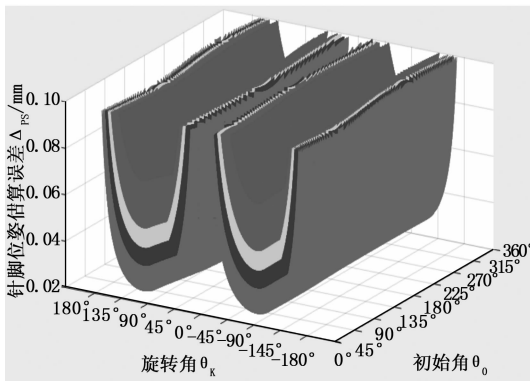


图 12 像素尺寸对针脚位姿估算误差关系图

如图 12 所示, 一共分析了 5 种不同的像素分辨率对针脚位姿估算误差的影响, 图 4~8 (a) 中用不同颜色的表面表示, 从内到外像素分辨率的值从大到小不断递减, Pixel-Size 分别为 $4.8 \mu\text{m}$ 、 $3.45 \mu\text{m}$ 、 $2.9 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 、 $1.67 \mu\text{m}$; 图中可看出, 随着像素分辨率的增加, 表面向下移动膨胀, 即针脚位姿的提取精度越来越高。

4) 针脚测量高度:

y^R 即针脚的测量高度, 取高度 $0\sim 30$ mm, 参考前章分析结果取旋转角 90° , 初始角 135° , 其他参数与 4.1 相同,

根据式 (21) 计算并绘图 (限于篇幅未展示), 发现定位高度的变化对针脚高度方向的提取精度影响程度很低, 即插件对于 y 方向的定位精度要求不高, 则参数选择主要参考 x 和 z 方向的精度分析结果。

5 结束语

本文以异形插件机针脚自动插装系统为研究背景, 采用三维视觉重构技术以解决异形元件难以实现自动插装的问题。

- 1) 建立了元件针脚世界坐标到图像坐标系的投影参数模型, 在此基础上提出了代数重构法和三角重构法;
- 2) 推导出视觉系统重要参数与位姿定位精度的误差传递公式, 并将初始角、旋转角、焦距、取样次数组合仿真分析, 找出不同角度组合对重构精度影响规律, 全面掌握关键结构、测量参数与位姿重构精度的关系;

3) 通过图像提取误差对针脚位姿估算误差的影响分析, 得到在旋转角 $|\theta_k| < 30^\circ$ 或 $|\theta_k| > 150^\circ$ 估算误差会较大的结论, 并推导出最大位置计算公式; 得到初始角、旋转角为 135° 、 90° 的角度组合能得到较优的定位精度;

根据视觉测量精度要求, 结合本文结论可初步确定旋转视觉系统以及双目/多目立体视觉系统的设计分析和测量应用。后续会对高精度针脚位姿估计的优化算法进行分析研究。

参考文献:

- [1] 王田苗, 陶 永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (9): 1-13.
- [2] KARIM B, KHEDDAR A. Humanoid robot locomotion and manipulation step planning [J]. Advanced Robotics, 2012, 26 (10): 1099-1126.
- [3] 邝泳聪, 李家裕, 梁经伦, 等. 基于旋转立体视觉的元件针脚精密定位方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (2): 45-53.
- [4] 徐永安, 杨 钦, 怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合 [J]. 中国激光, 2005, 32 (5): 659-662.
- [5] FITZGIBBON A W, Cross G, Zisserman. Automatic 3D model construction for turn-table sequences [C] //A. 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments. Freiburg, Germany, 1998: 155-170.
- [6] 高精度三维扫描测量仪 VL 系列 [EB/OL]. [2021-03-15] <https://www.keyence.com.cn/products/measure-sys/3d-scanner/>.
- [7] LEUNG, YUK-CHING, CAI L L. 3D reconstruction of specular surface by combined binocular vision and zonal wavefront reconstruction [J]. Applied Optics, 2020, 59 (28): 8526-8539.
- [8] LIU Q, Qin X S, Yin S S, et al. Structural Parameters Optimal Design and Accuracy Analysis for Binocular Vision Measure System [J]. Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, 2008: 2728-2732.

(下转第 263 页)