大口径器件精密装配系统视觉标定与误差补偿

孙佳[1]，王鹏[1]，覃政科[1]，熊召[2]，袁晓东[2]，刘长春[2]

1. 中国科学院自动化研究所，北京 100190
E-mail: jia.sun@ia.ac.cn, peng_wang@ia.ac.cn

2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，四川 绵阳 621900
E-mail: xiong_022111@163.com

摘　要:本文介绍了一种大口径器件机器人精密装配系统及其视觉标定和误差补偿方法。大口径器件装配过程的位姿检测与定位采用视觉传感器和激光测距传感器相结合的方式，检测与定位的结果反馈给机器人系统，通过控制机器人，实现精密装配过程的自动对准和插入等操作。为提高检测与定位精度，视觉系统由两个不同焦距的CCD相机构成，分别用于远距离时的粗定位和近距离时的精定位，同时解决了远距离的大范围定位需求以及近距离的高定位精度要求。相机标定是保证检测与定位精度的前提条件，本文结合粗定位和精定位视觉系统的不同特点，研究了相机内外参数以及机器人手眼关系的标定方法。同时对标定结果进行了误差分析及补偿优化。实验表明本文的方法能够满足大口径器件自动化精密装配过程视觉检测定位的要求。

关键词:机器人装配, 检测与定位, 相机标定, 手眼标定, 畸变校正

Vision Calibration and Error Compensation of Precision Assembly System for Large Scale Component

SUN Jia[1], WANG Peng[1], QIN Zhengke[1], XIONG Zhao[2], YUAN Xiaodong[2], LIU Changchun[2]

1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
E-mail: jia.sun@ia.ac.cn, peng_wang@ia.ac.cn

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China
E-mail: xiong_022111@163.com

Abstract: In this paper, a precision assembly system and the error compensation of vision calibration for big scale object is presented. Vision sensors and laser distance meters are used for detection and pose estimation in the assembling process. The results of these sensors are fed back to the robot. Through controlling the robot, this method can realize automatic alignment and insertion. In order to improve the precision of detection, two different focal length CCD cameras are used. One is used for the rough positioning when it is far from the objective. The other is used for the precise positioning when it is near from the objective. It solved the problem of obtaining large information and the high positioning accuracy. Camera calibration is a prerequisite to ensure the accuracy of detection and pose estimation. The methods of camera calibration for this two vision systems are researched. And the results of experiment are analyzed and the error is compensated. From the results, the accuracy of this method can meet the requirement of the system.

Key Words: Robotic Assembly, Detection and Pose Estimation, Camera Calibration, Hand-eye Calibration, Distortion Correction

1　引言

机器人装配系统以其自动化程度高、装配精度高、稳定性好、能适应极端环境等特点而广泛应用于汽车制造、航空、电子产品制造等各个领域[1]。机器人装配系统已经有了较成熟的发展，小到微米级的电子元件制造，大到大型工业设备的生产，无不体现着机器人装配系统在现代工业生产中的重要地位。在航天航空、汽车制造、大型激光驱动器等领域中，都涉及同一类型器件的装配任务——大口径器件的装配。如航天飞船中的大口径部件的装配、汽车挡风玻璃的装配，以及大型激光驱动器中各种大口径光机组件的装配[2]。不同于普通的装配目标，大口径器件具有体积大、重量大、易损坏、装配精度要求高等特点。

针对大口径器件的装配系统仍然存在很多挑战[3]。其难点主要有以下几点：第一，大口径器件的装配操作空间一般较大，因此要求装配系统能在较大范围内检测到目标器件及其待安装位置；同时，要保证安装过程较高的装配精度。这就要求系统搭载的传感器能够同时获取远距离时的大量信息及近距离时的高精度信息。第二，由于大口径器件体积大、重量大，因此装配系统中机器人末端的夹持器易产生变形，为保证装配的高精度，需要对装配系统及时进行标定调整。

为解决这些困难，本文的机器人精密装配系统提出了“大范围定位引导”和“近距离精确对准定位”相结合的检测与定位策略，通过采用两个不同焦距的

*此项工作得到国家自然科学基金资助，项目批准号：61379097，61100098.

CCD相机构成装配机器人的视觉系统，同时解决了远距离的大范围定位要求及近距离的高定位精度要求。

视觉系统的标定是机器人视觉中的一个重要研究方向[4]，是机器人装配工作顺利完成的前提。视觉系统的标定包括相机标定及手眼标定。相机标定是指在一定的相机成像模型下求取相机的内部参数及外部参数的过程；手眼标定是指求取相机相对于机器人末端执行器的位置关系的过程[5]。机器人视觉系统的标定是一个从二维图像到三维空间的建模过程，在这个复杂的过程中必然会引入很多误差。例如镜头畸变、图像噪声、CCD相机量化效应以及机器人运动等引起的误差。每个系统均有其各自的特性，各项误差的相对大小也不相同。因此，针对视觉系统的标定过程进行适合该系统的误差补偿是非常有必要的。

2 大口径器件精密装配系统

大口径器件具有体积大、重量大、易损伤、易污染等特点，且装配系统要求在较大的操作空间和定位范围内完成装配对象从夹取、转运、对准到装配整个过程。因此，系统需同时满足精度、效率、洁净等要求，系统的组成主要包括：六自由度洁净机器人、夹持装置及其气动控制部件、检测定位系统、机器人控制器、上位机等，如图1所示。

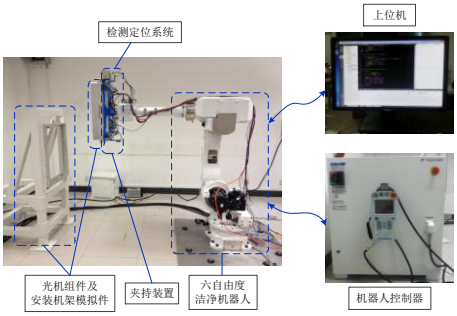


图 1:大口径器件精密装配系统

其中检测定位系统包括视觉传感器、激光测距传感器，分别安装在机器人末端的夹持装置上，其布置方式如图2所示。

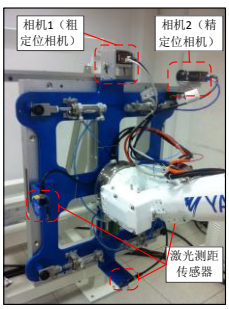


图 2:检测定位系统结构图

为减少装配过程中产生的遮挡，同时使传感器与大口径器件处于同一基准，视觉传感器安装在夹持机构的上部，并保证在装配过程中视觉传感器与装配位置不会发生干涉。为了解决大范围转运和引导对检测定位的需求，以及装配最后阶段对检测定位精度的需求，系统将装配过程的检测定位分为粗定位和精定位两个阶段。视觉传感器1用于粗定位，其具有较大的焦距（8mm），在距离目标较远时，可获得较大范围的场景信息；视觉传感器2用于精定位，其具有相对较小的焦距（5mm），在粗定位过程结束后，利用精定位相机可获得较高精度的目标局部位姿信息。通过两个相机对目标位姿的“传递”过程，实现整个装配过程的大范围和高精度检测与定位。为弥补视觉传感器在近距离观测范围有限，以及深度信息估计精度差的缺陷，在夹持装置左、右及下侧分别搭载三个激光测距传感器。实现装配的最后阶段，对装配对象和装配位置的精确位姿关系的测量。系统粗定位和精定位的流程如图3所示：

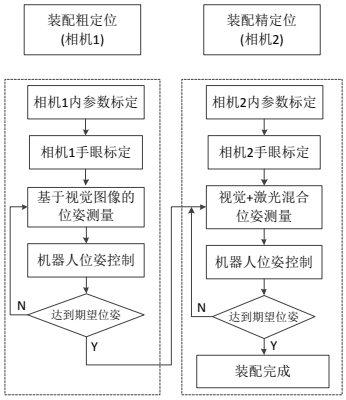


图 3:装配系统检测与定位流程图

3 大口径器件精密装配系统视觉标定

在大口径器件精密装配过程中，视觉检测与定位的精度对装配的成功与否起着关键的作用。而视觉系统的精确标定则是保证检测与定位精度的前提。视觉系统标定包括相机内外参数的标定以及机器人手眼标定。在本系统中，要对粗定位相机及精定位相机两个视觉系统分别进行内外参数及手眼关系的标定。

3.1 相机成像模型

系统所搭载的两个相机的模型采用经典的小孔成像模型[6]，即空间中的点均通过相机光轴中心点投射到成像平面上，其原理如图4所示。

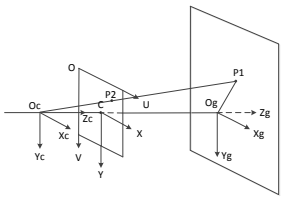


图 4:小孔成像模型

在图4中，以O_g为原点建立目标坐标系；以O_c为原点建立相机坐标系，Z_c轴方向平行于相机光轴，并以从相机到目标的方向为正方向，与像平面垂直；XCY为图像物理坐标系，以光轴和像平面的交点C为原点，即图像主点$[u_0, v_0]$，X,Y轴分别平行于相机坐标系的X_c，Y_c轴；UOV为图像像素坐标系，以图像左上角为坐标原点，U,V轴分别平行于图像物理坐标的X,Y轴。

假设目标坐标系与世界坐标系重合，空间中一点P_1的坐标为$\left[x_w, y_w, z_w\right]^{\mathrm{T}}$，其在相机坐标系下的坐标为$\left[x_c, y_c, z_c\right]^{\mathrm{T}}$则：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T \tag{1}$$

其中，旋转矩阵R和平移向量T称为相机的外部参数。

根据小孔成像模型，及各坐标系间的变换关系，可以得到图像坐标系到相机坐标系的关系：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中：A即为相机内参数矩阵，$\left[u_0, v_0\right]$为主点坐标，f_x，f_y为x轴和y轴的放大系数。

3.2 相机标定原理

为满足本装配系统对相机标定精度高、鲁棒性好等要求，并结合系统的应用场景，本文将借鉴张正友标定法对两视觉系统进行标定[7]。其原理如下。

假设世界坐标系平面与标定模板所在平面重合，则小孔成像模型可表示为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，r_i表示旋转矩阵R的第i列向量。令$\tilde{M} = \begin{bmatrix} x_W & y_W & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\tilde{m} = \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，则上式可简写为：

$$s\tilde{m} = H\tilde{M} \tag{4}$$

通过多个图像点与空间点的对应关系，即可求出单应性矩阵H。

此时所得的H可能和真实的H相差一个比例因子，因此有：

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix} = \lambda A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \tag{5}$$

由于r_1与r_2为单位正交向量，有$r_1^{\mathrm{T}} r_1 = r_2^{\mathrm{T}} r_2 = 1$，且$r_1^{\mathrm{T}} r_2 = 0$，所以得到相机内部参数求解的两个约束条件：

$$\begin{cases} h_1^{\mathrm{T}} A^{-\mathrm{T}} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^{\mathrm{T}} A^{-\mathrm{T}} A^{-1} h_1 = h_2^{\mathrm{T}} A^{-\mathrm{T}} A^{-1} h_2 \end{cases} \tag{6}$$

通过求解中间变量$B = A^{-\mathrm{T}} A^{-1}$便可求得相机内外参数：

$$\begin{cases} v_0 = \left(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}\right) / \left(B_{11}B_{22} - B_{12}^2\right) \\ \lambda = B_{33} - \left[B_{13}^2 + \mathrm{v}_0\left(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}\right)\right] / B_{11} \\ f_u = \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ f_v = \sqrt{\lambda B_{11} / \left(B_{11}B_{22} - B_{12}^2\right)} \\ s = -B_{12} f_u^2 f_v / \lambda \\ u_0 = s v_0 / f_v - B_{13} f_u^2 / \lambda \end{cases} \tag{7}$$

及：

$$\begin{cases} r_1 = \lambda A^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda A^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = \lambda A^{-1} h_3 \\ \lambda = \dfrac{1}{\left\| A^{-1} h_1 \right\|} = \dfrac{1}{\left\| A^{-1} h_2 \right\|} \end{cases} \tag{8}$$

3.3 相机手眼标定

对相机内外参数标定完成后，为实现通过图像对机器人进行控制，必须知道机器人末端执行器与相机的相对位姿关系，即相机坐标系与机器人坐标系之间的关系[7][8]。这种关系的标定称为机器人的手眼标定。对于eye-in-hand系统，手眼标定求取的是相机坐标系相对于机器人末端坐标系的关系。

在本文的机器人精密装配系统中，粗定位相机与精定位相机只是安装位置不同，它们手眼标定的方法相似。以粗定位相机的手眼标定为例，机器人坐标系、相机坐标系和目标坐标系之间的关系如图5所示：

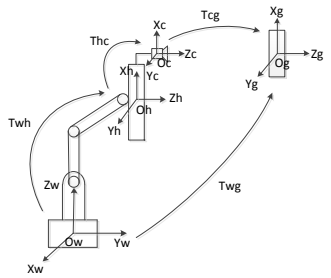


图 5:大口径器件精密装配系统坐标系示意图

在图5中，世界坐标系机器人基坐标系重合，表示为$O_wX_wY_wZ_w$，$O_hX_hY_hZ_h$为机器人末端执行器坐标系，$O_cX_cY_cZ_c$为相机坐标系，$O_gX_gY_gZ_g$为目标坐标系。矩阵T_{wh}表示基座标系到执行器末端坐标系的变换，T_{hc}表示执行器末端到相机坐标的变换，即所求手眼关系矩阵。T_{cg}表示相机到目标坐标系的变换，T_{wg}表示基座标系到目标坐标系的变换。

由坐标系之间的变换关系可知：

$$T_{\mathrm{wg}} = T_{\mathrm{wh}} T_{\mathrm{hc}} T_{\mathrm{cg}} \tag{9}$$

其中，T_{cg}可由相机外参数标定求得，T_{wh}可由机器人控制器读取获得。

在目标固定的情况下，T_{wg}和T_{hc}是固定不变的。改变机器人末端执行器的位姿，标定每一个位姿状态下相机相对于目标的外参数T_{cg}。T_{whi}表示第i次运动时基座标系到执行器坐标系间的变换，T_{cgi}表示第i次运动相机相对于目标的外参数。由（9）式可得

$$T_{whi} T_{hc} T_{cgi} = T_{wh(i-1)} T_{hc} T_{cg(i-1)} \tag{10}$$

根据上式进行变量代换、通用旋转变换等，即可通过两次及以上的机器人运动求出手眼关系矩阵T_{hc}[9]。

4 误差分析与补偿

4.1 实验环境

大口径器件精密装配系统的机器人为MOTOMAN MCL0050-A00洁净型六自由度机器人，最大工作半径为2046mm，重复运动精度（Repetitive Positioning Accuracy）为±0.07mm。精定位相机型号为AVT（Allied Vision Technologies）的GC1600H，图像分辨率为1620×1220，像素尺寸为4.4um×4.4um，配合焦距为5mm的广角镜头。粗定位相机参数与精定位相机相同，配合焦距为8mm的常规镜头。粗定位相机标定板内角点数为9×14，角点间距为50mm；精定位相机标定板内角点数为6×9，角点间距为25mm。

4.2 标定误差分析与补偿

相机标定是一个从三维空间到二维空间的投影，再从二维空间到三维空间重建的一个复杂过程。在这个过程中必然会引入大量误差，包括：成像模型产生的畸变误差、噪声引起的误差、光线变化引起的误差、标定板制作精度及角点提取误差因素、由CCD相机的数字图像空间量化效应所引起的像素定位误差以及机器人运动误差等。对于一些误差因素，我们可以通过特定手段进行改善，如制作高精度标定板可以减少标定板制作引入的误差；提供适宜的光照环境可以减少光线变化引起的误差；对标定图片进行一定的降噪处理可以减少噪声产生的误差。而图像的畸变给标定带来的误差则需要改变成像模型来进行补偿。

4.2.1 畸变误差模型

由于工艺水平等因素限制，实际的相机成像系统不可能达到理想化的小孔成像模型，物点在像平面上的实际成像点和理想成像点存在着误差[8]。这种误差被称作畸变误差。相机非线性畸变模型可以描述为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中（x_c，y_c）为理想的图像坐标，（x，y）为实际图像坐标，（ε_x，ε_y）为非线性畸变值，可以描述为：

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon^x{}_k + \varepsilon^x{}_p + \varepsilon^x{}_s \\ \varepsilon_y &= \varepsilon^y{}_k + \varepsilon^y{}_p + \varepsilon^y{}_s \end{aligned} \tag{12}$$

其中第一项为径向畸变，来自于透镜形状；第二项为切向畸变，来自于整个相机的组装过程；第三项为薄棱镜畸变，同样来自于整个相机的组装过程。但相比于前两项，第三项的畸变对视觉精度的影响要小得多，因此，本文只考虑径向畸变和切向畸变。

径向畸变：实际相机的透镜总是在成像仪的边缘产生显著的畸变，随着向边缘移动，畸变越来越严重。径向畸变可以描述为：

$$\begin{aligned} \varepsilon^x{}_k &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \varepsilon^y{}_k &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \tag{13}$$

其中，k_1、k_2和k_3分别为二阶、四阶和六阶径向畸变系数，$r_2=x_2+y_2$为实际畸变像点到畸变中心的距离。

切向畸变：这种畸变是由于透镜制造上的缺陷使得透镜本身与图像平面不平行而产生的。切向畸变可以描述为：

$$\begin{aligned} \varepsilon^x{}_p &= 2p_1 y + p_2(\mathrm{r}^2 + 2x^2) \\ \varepsilon^y{}_p &= 2p_2 x + p_1(\mathrm{r}^2 + 2y^2) \end{aligned} \tag{14}$$

其中，p_1、p_2为切向畸变系数。

4.2.2 畸变系数求解

当考虑径向畸变与切向畸变时，理想成像点的坐标（x_c，y_c）可表示为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)x \\ (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{bmatrix} \tag{15}$$

将上式转换到像素坐标系，则有：

$$\begin{bmatrix} u_c - u_0 \\ v_c - v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(u - u_0) \\ (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(v - v_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{bmatrix} \tag{16}$$

其中（u_c，v_c）为理想的像素坐标，（u，v）为实际像素坐标。

将式（16）转换为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} u_c - u \\ v_c - v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u-u_0)r^2 & (u-u_0)r^4 & (u-u_0)r^6 & 2xy & r^2+2x^2 \\ (v-v_0)r^2 & (v-v_0)r^4 & (v-v_0)r^6 & r^2+2y^2 & 2xy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \tag{17}$$

根据多幅图像的多个角点联立方程，利用最小二乘法即可计算出畸变系数矩阵$\begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & p_1 & p_2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$。

4.2.3 相机参数优化

采用非线性相机成像模型后，可用本节方法计算出相机畸变系数。但其内外参数仍然是在线性模型下求解的，因此与真实值之间还存在一定误差。为求得最优解，本文采用Levenberg-Marquardt（LM）算法对相机所有参数进行全局优化，优化目标函数为：

$$f = \min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left\| m_{ij} - \hat{m}(\mathrm{A}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, R_i, t_i, M) \right\|^2 \tag{18}$$

其中，$\hat{m}(\mathrm{A}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, R_i, t_i, M)$为世界坐标点$M$的投影图像坐标；$m_{ij}$为通过角点提取得到的实际图像坐标。

4.3 误差评价

由于标定板上角点的实际三维坐标未知，无法用图像坐标求得的世界坐标与真值比较的方法来评价标定精度。但标定板上两角点的间距已知，因此可以用恢复出的角点间距和实际的角点间距进行对比以判断整个标定过程的误差大小。其具体流程如图6所示。

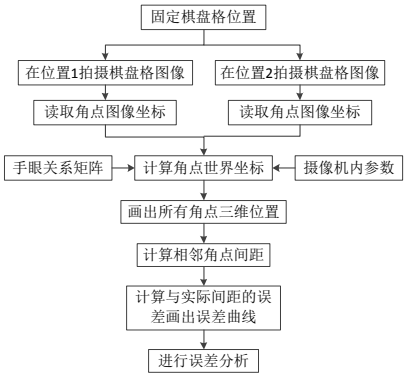


图 6:误差分析流程图

首先，固定棋盘格位置不变，控制机器人及其固定的相机分别达到位置1及位置2采集棋盘格图像；再通过模拟双目视觉的方法恢复每一个角点的三维坐标，计算每行相邻角点的间距；最后，对计算出的角点间距与实际角点间距进行比较并分析其误差。其中，各误差计算公式如下：

误差均值：$\mu_x=\sum_{i=1}^{n}X_i$；均方差：$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}{n}}$

最大绝对误差：$\delta=\max(|x_1|,|x_2|,\cdots,|x_n|)$；

最大相对误差：$\xi=\frac{\delta}{D}\times100\%$

4.4 实验结果

首先，按第3节所述理想小孔成像模型下相机内外参数及手眼标定原理为粗定位相机和精定位相机进行标定；再用4.2节所述引入畸变系数并进行全局优化的方法对两个相机再次标定。

粗定位相机的两次标定结果见表1。从表1中可见，粗定位相机在优化前后内参数有较明显变化，其中比较直观的参数主点坐标，其u_0变化了30pixels，v_0变化了17pixels；从畸变系数中可以看到，其切向畸变系数相对径向畸变系数小得多。

精定位相机两次标定结果见表2。从表2中可见，精定位相机在优化前后内参数也有较明显变化，主点坐标中u0变化了33pixels，v0变化了28pixels；从畸变系数中可以看到，其切向畸变相对径向畸变也小得多。

表 1. 粗定位相机（相机 1）标定结果

	优化前		优化后
内参数			
f_x	1894.16		1903.12
f_y	1892.26		1904.71
u_0	809.50		779.24
v_0	609.50		626.20
畸变系数			
k_1	0		-0.0964
k_2	0		0.2429
k_3	0		-0.1373
p_1	0		0.0009
p_2	0		-0.0009
手眼矩阵			
R	-0.8578	-0.4855	-0.0167
	0.4858	-0.8567	-0.0396
	0.0029	-0.0405	0.9994
T	190.6738	346.3058	48.4347

表 2 .精定位相机（相机 2）标定结果

	优化前		优化后
内参数			
f_x	1101.2563		1157.5802
f_y	1101.2563		1155.3755
u_0	809.5000		842.3411
v_0	609.5000		637.3494
畸变系数			
k_1	0		-0.1245
k_2	0		0.1489
k_3	0		0.1008
p_1	0		-0.0000
p_2	0		0.0009
手眼矩阵			
R	-0.8459	-0.4837	0.0372
	0.4839	-0.8467	-0.0082
	0.0344	0.0143	0.9992
T	-60.7108	441.7457	7.1151

用4.3节所述误差分析方法，对粗定位相机在理想小孔成像模型下标定的结果进行误差分析。由标定结果计算出的各角点三维位置图及角点间距误差曲线如图7（a）、（b）所示；同样，用4.3节所述误差分析方法，对精定位相机在理想小孔成像模型下标定的结果进行误差分析。由标定结果计算出的各角点三维位置图及角点间距误差曲线如图8（c）、（d）所示：

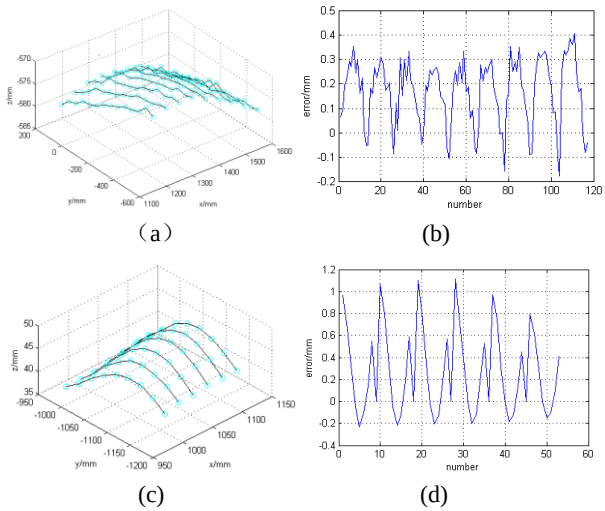
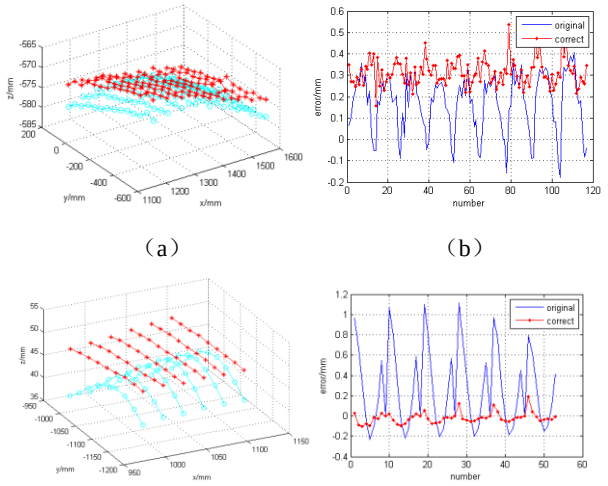


图 7:相机标定优化前计算结果

图7中（a）为用粗定位相机理想小孔成像模型下标定的结果求出的角点三维坐标。图中可以看出：重建的角点并不在同一平面，这是由于模拟的双目视觉在求取目标深度信息时图像坐标的精度对其影响非常大。因此，我们将标定板放置在与世界坐标系XOY面平行的平面，在计算两点间距时，可尽量减少Z轴方向的误差对整体结果的影响。图7（b）为所有计算出的角点间距相对于真值50mm的误差曲线。从曲线中可以看出，其最大误差为0.407mm，其最大相对误差为0.814%，已经能够满足系统在粗定位阶段对相机

标定精度的要求。图7（c）为用精定位相机在理想小孔成像模型下标定的结果求出的角点三维坐标。图中可以看出：重建的角点其深度信息误差比粗定位相机重建出的误差更大，角点组成的面出现明显的弧度。这其中不仅是三维重建方法的原因，还可能是其本身的标定误差引起的。图7（d）为所有计算出的角点间距相对于真值25mm的误差曲线。从曲线中可以看出，其最大误差达到了1.115mm，其最大相对误差到达4.46%，其精度不能满足系统在精定位阶段对相机标定精度的要求。

用4.3节所述误差分析方法，对粗定位相机经过畸变校正后的标定结果进行误差分析。由校正后标定结果计算出的各角点三维位置对比图及角点间距误差对比曲线如图8（a）、（b）所示；同样，用4.3节所述误差分析方法，对精定位相机经过畸变校正后的标定结果进行误差分析。由校正后标定结果计算出的各角点三维位置对比图及角点间距误差对比曲线如图8（c）、（d）所示：



（a）　　（b）

（c）　　（d）

图 8:相机校正前后标定结果对比

由图8中（a）、（b）可见，对于粗定位相机，经过畸变校正后，其误差并未减小，反而整体增大；由图8中（c）、（d）可见，对于精定位相机，无论是角点三维坐标的深度估计，还是角点间距的误差值，校正后的精度都有显著的提高。这一点可以从粗、精定位相机校正前后误差分析对比结果中更为明显的看出，误差分析对比结果见表3、表4。

表3中可见，粗定位相机经过畸变校正后，虽然均方差变小了，但其误差均值、最大绝对误差、最大相对误差整体都变大了；表4中可见，精定位相机经过畸变校正后，其误差均值、均方差都显著变小，说明其标定误差不仅更小而且更稳定。

经过以上分析，我们可以得到这样的结论：本系统中粗定位相机的镜头畸变非常小，经过畸变校正后，其标定精度并未改善。同时，由于引入畸变系数也可能引入更多误差因素。因此，粗定位相机我们使用理想的小孔成像模型进行标定。精定位相机由于采用的是广角镜头，本身畸变就相对较大，经过畸变校正后，其精度有较明显的提高。经过校正后的结果能够满足系统在标定精度上的要求，因此，精定位相机我们采用引入畸变的成像模型进行标定。

表 3. 粗定位相机（相机 1）校正前后标定误差分析结果对比

	校正前	校正后
误差均值/mm	0.1681	0.3144
均方差	0.1363	0.0651
最大绝对误差/mm	0.4070	0.5581
最大相对误差	0.814%	1.116%

表 4.精定位相机（相机 2）校正前后标定误差分析结果对比

	校正前	校正后
误差均值/mm	0.2717	-0.0180
均方差	0.3970	0.0540
最大绝对误差/mm	1.1150	0.1883
最大相对误差	4.46%	0.7532%

5　结论

本文介绍了一种面向大口径器件的机器人精密装配系统。本系统采用视觉传感器及激光测距传感器相融合的方式解决了大口径器件大距离高精度装配的需求。同时给出了视觉系统中粗定位相机及精定位相机的标定方法。对于多种可能的误差因素进行了分析，给出相应的改善方法，并针对成像畸变这一主要误差因素给出了详细的补偿方法。经实验验证，本文提出的方法能够满足系统对相机标定精度的要求。

参考文献

[1] B. Zhang, et al. Vision-guided Robot Alignment for Scalable, Flexible, Assembly Automation[C]. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.* Phuket, Thailand, 2011, (12): 7-11.

[2] E. I. Moses, et al., National Ignition Facility: *The World's Largest Optics and Laser System*[C], presented at LASE 2004,Photonics West, San Jose, CA, January, 2004

[3] Z. Qin, P. Wang, J. Sun, J. Lu and H. Qiao, Precise Robotic Assembly for Large-Scale Objects Based on Automatic Guidance and Alignment, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 10.1109/TIM.2016. 2526738 , Feb 2016

[4] I. Miyagawa, H. Arai, and H. Koike , "Simple camera calibration from a single image using five points on two orthogonal 1-D objects", IEEE Transactions on Image Processing, 19(6), 1528-1538(2010).

[5] J. Sun, P. Wang, et al. Overview of Camera Calibration for Computer Vision[C]. *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on* IEEE, 2014:86-92.

[6] 徐德,谭民,李原.机器人视觉测量与控制[M].北京:国防工业出版社.2011.

[7] Z. Y. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334(2000).

[8] R. Taufiqur, K. Nicholas. An Efficient Camera Calibration Technique Offering Robustness and Accuracy Over a Wide Range of Lens Distortion. *IEEE transactions on image processing*,2012,21(2):627-637.