

# 基于运动路径靶标的空间机器人视觉标定方法

张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 胡天健, 梁书立

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对空间缺少标定靶标物的难题, 基于空间机器人机械手的精确末端定位能力, 提出了一种通过规划机械手运动路径生成靶标从而在轨视觉标定的方法. 首先介绍了视觉标定方法的总体框架. 然后对该标定方法进行了误差分析, 根据棋盘靶标标定误差与控制点图像坐标误差满足线性关系的先验知识, 推导了从机械手末端定位到控制点图像坐标的误差传递关系, 并对两类误差进行合成得到了等效的控制点图像坐标误差. 最后利用仿真实验验证了标定误差与等效误差满足线性关系, 分析了靶标尺寸、相对距离、控制点密度和靶标结构因素对标定精度的影响.

**关键词:** 视觉标定; 靶标; 运动路径; 误差分析; 机械手

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-02-0193-07

## Space Robot Vision Calibration with Reference Objects from Motion Trajectories

ZHANG Lijun, HUANG Xuexiang, FENG Weichun, HU Tianjian, LIANG Shuli

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** For lack of reference objects in space, an on-orbit vision calibration method is proposed based on the precise localization of manipulator end of space robot, which generates reference objects through programming motion trajectories of the manipulator. Firstly, a general framework of the method is introduced. Secondly, error analysis is applied to the calibration method. According to the prior knowledge that the calibration error of the chessboard target is linear to the image coordinate error of the control point, the error transfer from localization of manipulator end to the image coordinate of the control point is derived, and an equivalent error of the image coordinate of the control point is further derived by the combination of the two kinds of errors. Finally, the linear relationship between the calibration error and the equivalent error is validated by simulation experiments, and the effects of reference object size, relative distance, control point density and structure factors on the accuracy of the proposed vision calibration method are analyzed.

**Keywords:** vision calibration; reference object; motion trajectory; error analysis; manipulator

## 1 引言 (Introduction)

机器视觉在空间任务中具有重要的应用, 如非合作视觉测量<sup>[1]</sup>、在轨抓捕<sup>[2]</sup>等. 由于空间的温度、重力条件与地面不同会导致相机内参数发生变化, 因此高精度的视觉应用需要对相机进行在轨标定. 目前, 视觉标定的方法大致可以分为 3 类: 传统标定方法<sup>[3-5]</sup>、自标定方法<sup>[6-7]</sup>和基于主动视觉<sup>[8]</sup>的标定方法. 对于高精度的视觉应用, 通常采用传统标定方法对相机进行标定. 传统视觉标定方法都需要控制点位置精确已知的靶标, 但在空间环境中通常缺少这样的标定靶标.

自 Tsai<sup>[3]</sup> 和 Zhang<sup>[4]</sup> 提出两步法的框架后, 传统视觉标定方法可以认为已经比较成熟, 因此视觉

标定算法的研究更多为面向特殊场景的视觉标定方法<sup>[7,9]</sup>. 在太空环境中, 不同类型相机采用的标定策略也不相同. 文 [10-11] 针对通用性靶标只能解决有限工作距离标定的问题, 提出利用天文观测的方式, 采用恒星作为标定控制点实现基于天文观测的视觉标定方法, 这类方法适用于天文观测类型的相机, 但无法用于近视场相机的标定. 机器视觉在空间机械臂上也具有应用, 1990 年, 人类历史上第一个空间机械臂“加拿大臂”利用事先固定的圆形标记点阵列图案靶标进行了在轨标定<sup>[12]</sup>; 文 [13] 将 2D 平面靶和两步法标定框架引入到机械臂视觉标定中, 在实物仿真实验中获得了高精度的标定结果, 但这些应用中都需要事先配置标定靶标.

本文针对太空环境中缺少通用靶标的特殊场景,考虑一类装载机械手的空间机器人的视觉标定问题.空间机械手的末端位置具有很高的定位精度,本文提出通过控制机械手运动生成平面运动路径靶标从而实现相机的在轨标定,并对该标定方法进行误差分析,得到了一种等效误差关系,最后利用实验研究验证了该等效误差关系的正确性.基于运动路径靶标的标定方法不需要事先配置专用标定靶标,能够为某些特殊场景提供一种可行的标定方法.

## 2 基于运动路径靶标的视觉标定方法基本原理 (Principle of the vision calibration method based on reference objects from motion trajectories)

本文提出的基于运动路径靶标的视觉标定系统的总体框架如图1所示,整个系统主要包括靶标设计与路径规划、两步法标定算法两个模块.

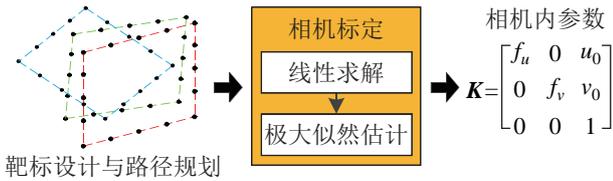


图1 基于运动路径的视觉标定系统的总体框架

Fig.1 General framework of the manipulator motion trajectories based vision calibration system

### 2.1 靶标设计与路径规划

标定靶标的本质是一系列空间参数精确已知的控制点或控制线.由于空间机械手具有很高的末端定位精度,因此可以通过控制机械手运动模拟各类由控制点或控制线构成的靶标,再利用成熟的标定方法进行标定.本文通过构造平面靶标实现相机的高精度标定:控制机械手沿正方形路径运动,在正方形边沿路径上以一定的空间间隔对机械手末端位置进行控制点采样得到平面靶标;控制机械手多次运动构造多个平面靶标.靶标的设计参数与视觉标定精度相关,具体的靶标参数设计在第4节中进行讨论.

### 2.2 视觉标定

#### 2.2.1 平面靶标成像的单应矩阵

一个3D点  $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$  从世界系投影成像得到2D像点  $\mathbf{m} = [u, v]^T$ , 采用针孔成像模型,则  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{m}$  间的投影关系用齐次坐标  $\tilde{\mathbf{M}}, \tilde{\mathbf{m}}$  表示为

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}} \quad (1)$$

其中  $s$  为尺度因子,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  为相机外参数,分别为旋转矩阵与平移向量,  $\mathbf{K}$  为相机内参数矩阵,表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $(u_0, v_0)$  为图像主点,即光轴与图像交点的图像坐标,  $(f_u, f_v)$  为焦比,  $f_u = f/d_u$ ,  $f_v = f/d_v$ , 其中  $f$  为相机焦距,单位为 mm,  $d_u$  和  $d_v$  为单个像元横向和纵向的尺寸,单位为 mm.文中约定使用  $\mathbf{K}^{-T}$  表示  $(\mathbf{K}^{-1})^T$  或  $(\mathbf{K}^T)^{-1}$ .

不失一般性,设平面靶标在  $Z=0$  的世界系平面上,旋转矩阵第  $i$  列用  $\mathbf{r}_i$  表示,由式(1)有

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于平面靶标上点  $\mathbf{M}$  的  $Z$  坐标恒等于0,后文中取  $\mathbf{M} = [X, Y]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{M}}$  为  $\mathbf{M}$  的齐次坐标,则点  $\mathbf{M}$  与像点  $\mathbf{m}$  的关系由单应矩阵  $\mathbf{H}$  描述:

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{M}} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]$$

#### 2.2.2 视觉标定算法

给定平面靶标参数及控制点的像素坐标可以估计相机的单应矩阵  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$ .由式(4)中  $\mathbf{r}_1$  与  $\mathbf{r}_2$  的正交性可以得到关于相机外参数的两个约束关系:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (6)$$

记:

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{B}$  为对称矩阵,主要包含元素记为

$$\mathbf{b} = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T \quad (8)$$

将  $\mathbf{H}$  的第  $i$  个列向量  $\mathbf{h}_i$  表示为  $\mathbf{h}_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ , 则有

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{v}_{ij}^T = [h_{i1}h_{j1}, h_{i2}h_{j1} + h_{i1}h_{j2}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T \quad (10)$$

利用上述表述, 式 (5) 和 (6) 的约束关系可以重新表述为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (11)$$

如果有  $n$  次观测得到  $n$  个靶标, 可以得到线性方程组:

$$\mathbf{V}\mathbf{b} = 0 \quad (12)$$

其中  $\mathbf{V}$  为  $2n \times 6$  阶矩阵, 当  $n \geq 2$  时式 (12) 至少有 4 个方程, 此时可以求解  $\mathbf{K}$  的 4 个参数. 再利用式 (4) 和相机内参数可以求解每次成像的相机外参数, 即旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{t}$ .

将得到的相机内外参数作为初值, 设定目标函数, 采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法进一步对相机的内参数进行优化, 优化目标函数为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_{ij})\|^2 \quad (13)$$

其中,  $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_{ij})$  是第  $i$  个靶标的点  $M_{ij}$  的投影方程. 上述标定过程没有考虑镜头畸变的影响, 畸变系数的标定可以参考文 [4] 等.

### 3 误差分析 (Error analysis)

由于专用的棋盘靶标具有很高的加工精度, 因此图像中控制点像点提取过程的误差是基于棋盘靶标视觉标定的主要误差源. 相比之下, 运动路径靶标是机械手沿着规划的空间路径运动得到的靶标, 而机械手受控运动形成控制点时机械手末端的 3 个位置自由度均存在误差, 该误差会破坏平面靶标的平面模型, 因此除了控制点像点坐标的误差, 机械手末端定位误差也可能是运动路径靶标的主要误差源之一.

根据文 [4] 中棋盘靶标标定的实验结果, 在其他条件保持不变的情况下, 视觉标定的误差与控制点像点的噪声强度满足线性关系. 本节在该先验知识的基础上对运动路径靶标的误差进行分析.

设相机系中控制点  $\mathbf{M}_C = [X_C, Y_C, Z_C]^T$  投影成像得到 2D 像点  $\mathbf{m} = [u, v]^T$ , 采用针孔成像模型, 则  $\mathbf{M}_C$  与  $\mathbf{m}$  间的投影关系用齐次坐标表示为

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

整理一下可以得到  $u$  和  $v$  的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_u X_C}{Z_C} + u_0 \\ \frac{f_v Y_C}{Z_C} + v_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

假设机械手在运动中  $X_C$ 、 $Y_C$ 、 $Z_C$  三个方向上受独立的噪声影响, 不失一般性, 噪声均取为均值为 0、方差为  $\sigma_1^2$  的高斯白噪声.

对式 (15) 求全微分得到

$$\begin{bmatrix} d_u \\ d_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{Z_C} dx_C - \frac{f_u X_C}{Z_C^2} dz_C \\ \frac{f_v}{Z_C} dy_C - \frac{f_v Y_C}{Z_C^2} dz_C \end{bmatrix} \quad (16)$$

则由机械手末端位置传递得到的  $u$  和  $v$  标准差分别为

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_u = \sqrt{\left(\frac{f_u}{Z_C}\right)^2 \sigma_{x_C}^2 + \left(\frac{f_u X_C}{Z_C^2}\right)^2 \sigma_{z_C}^2} \\ \hat{\sigma}_v = \sqrt{\left(\frac{f_v}{Z_C}\right)^2 \sigma_{y_C}^2 + \left(\frac{f_v Y_C}{Z_C^2}\right)^2 \sigma_{z_C}^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中, 对于靶标的一次成像, 相机系中不同控制点坐标的  $X_C$ 、 $Y_C$  差别比较大; 但通常情形下, 不同控制点的  $Z_C$  值相近, 且比  $X_C$ 、 $Y_C$  的最大值要大一两个数量级, 因此式 (17) 中  $\hat{\sigma}_u$ 、 $\hat{\sigma}_v$  的第 2 项远小于第 1 项, 带来的影响可以忽略. 则式 (17) 可以简化为

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_u = \frac{f_u}{Z_C} \sigma_{x_C} = \frac{f_u}{Z_C} \sigma_1 \\ \hat{\sigma}_v = \frac{f_v}{Z_C} \sigma_{y_C} = \frac{f_v}{Z_C} \sigma_1 \end{cases} \quad (18)$$

另一方面, 由先验知识知相机标定的误差与控制点像点的噪声强度呈线性关系. 设控制点像点坐标在  $u$ 、 $v$  两个方向上受独立的噪声影响, 不失一般性, 噪声均取为均值为 0、方差为  $\sigma_2^2$  的高斯噪声. 则可将机械手位置与控制点像点的误差进行合并得到等效的控制点像点的标准差:

$$\begin{cases} \sigma_u = \sqrt{\sigma_2^2 + \hat{\sigma}_u^2} = \sqrt{\sigma_2^2 + \left(\frac{f_u}{Z_C}\right)^2 \sigma_1^2} \\ \sigma_v = \sqrt{\sigma_2^2 + \hat{\sigma}_v^2} = \sqrt{\sigma_2^2 + \left(\frac{f_v}{Z_C}\right)^2 \sigma_1^2} \end{cases} \quad (19)$$

在式 (17) 中, 靶标控制点在相机系中横、纵坐标  $X_C$ 、 $Y_C$  的值越大则  $u$  和  $v$  的标准差越大; 但由经验知, 靶标的尺寸越大则抗噪声能力越强, 精度会越高. 由于式 (19) 中无法决定尺寸对精度的影响, 因此在第 4 节中利用仿真实验进行定量分析.

## 4 实验研究 (Experimental study)

由于两步法标定算法中有迭代优化的步骤, 因此第3节等效误差的推导过程中利用了一个实物棋盘靶标标定实验的结论作为误差分析的假设, 本节进一步利用蒙特卡洛模拟方法进行实验研究. 在第3节得到的等效误差关系中, 正如结尾处的分析, 靶标尺寸对标定性能的影响未知, 因此首先利用仿真实验研究尺寸对精度的影响; 其次, 误差分析中利用了一个实物靶标的一个结论, 即误差与控制点像点噪声强度近似为线性关系, 并在此基础上得到了从机械手末端位置到控制点像点的等效误差关系, 其中距离为首要影响因素, 而在运动路径靶标中上述等效误差关系是否成立需要进行试验研究; 最后, 在进行靶标设计时还有两个因素需要考虑: 靶标控制点的密度和靶标的结构.

仿真实验中相机内参数取为:  $f_u = f_v = 1000$ ,  $u_0 = v_0 = 512$ ; 图像大小取为  $1024 \text{ 像素} \times 1024 \text{ 像素}$ . 用欧拉角列向量  $\mathbf{r}$  表示平面靶标的旋转的欧拉角, 用列向量  $\mathbf{t}$  (单位为 mm) 表示平面靶标的平移向量. 实验中均采用 5 个互相不平行的靶标平面 (由文 [4] 中实验结果知 5 个靶标平面基本能保证靶标数目对精度的提升接近饱和):  $\mathbf{r}_1 = [0, 20^\circ, 0]^\text{T}$ ,  $\mathbf{r}_2 = [20^\circ, 0, 0]^\text{T}$ ,  $\mathbf{r}_3 = [10^\circ, -10^\circ, 0]^\text{T}$ ,  $\mathbf{r}_4 = [-5^\circ, 15^\circ, 0]^\text{T}$ ,  $\mathbf{r}_5 = [15^\circ, 10^\circ, 0]^\text{T}$ . 仿真实验中对每组参数都独立运行 500 次, 由于真实内参数已知, 取内参数偏差绝对值的平均值作为误差.

### 4.1 靶标尺寸

在研究靶标尺寸的实验中, 采用正方形运动路径, 每条边上采样 6 个控制点 (包含 2 个端点). 本文中靶标尺寸为靶标成像相对于像平面的尺寸, 假设靶标正对像平面, 则由相似三角形关系可知

$$\frac{l_T}{l_1} = \frac{t_z}{f} \quad (20)$$

其中  $l_T$  为正方形靶标边长, 单位为 mm;  $l_1$  为靶标图像的空间尺寸, 单位为 mm, 满足  $l_1 = n d_u$ ,  $n$  为靶标成像横轴方向像素数目,  $d_u$  为单个像元的宽度, 单位为 mm;  $t_z$  为平移向量的  $z$  轴分量, 在这里为相机与靶标的相对距离. 将  $l_1$  代入式 (21), 整理得到

$$n = \frac{f_u}{t_z} l_T \quad (21)$$

将靶标成像横轴方向像素数目  $n$  与像平面横轴方向的像素数目  $n_u$  的比值定义为靶标尺寸  $S_T$ :

$$S_T = \frac{n}{n_u} = \frac{l_T f_u}{n_u t_z} \quad (22)$$

则靶标尺寸  $S_T$  的值域为  $[0, 1]$ . 靶标成像尺寸还受到旋转角的影响, 由于靶标的物理尺寸通常小于靶标与相机的相对距离, 因此不同旋转情形下依然采用式 (22) 来近似估计.

在靶标尺寸的实验中,  $t_z$  分别取为 500 mm、1000 mm 和 1500 mm, 分别单独地给机械手末端位置和控制点像点位置加上均值为 0、标准差为 1 的高斯白噪声, 标准差的单位分别为 mm 和像素.

图 2 所示为不同条件下焦比  $f_u$  的相对误差曲线, 约定后文中 J-noise 表示机械手末端位置噪声, K-noise 表示控制点像点噪声. 由图 2(a) 和 (b) 的曲线可以看出: 1) 随着靶标尺寸的增加,  $f_u$  的误差降低, 即增加靶标尺寸能提升标定精度, 但各条曲线在靶标尺寸超过 0.8 后变化非常缓慢, 精度提升基本达到饱和. 2) 图 2(b) 中, 不同相对距离下的  $f_u$  误差曲线重合, 即相对距离不同但靶标尺寸和控制点像点噪声强度相同时视觉标定的精度相近. 3) 在图 2(a) 中, 相同靶标尺寸下相对距离越大,  $f_u$  的精度越高, 这与等效误差关系相符: 由 2) 知, 相同靶标尺寸下若控制点像点取相同噪声强度, 误差大小相同, 则由式 (18) 的等效关系知, 控制点位置噪声带来的误差与距离成反比, 因此相对距离越大,  $f_u$  精度越高.

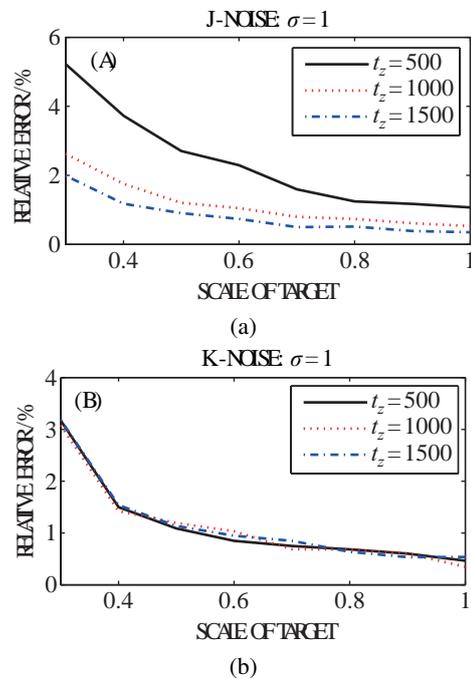


图 2 不同靶标尺寸下  $f_u$  的相对误差  
Fig.2 Errors of  $f_u$  w.r.t. the target size

### 4.2 等效误差关系

实验中靶标采用正方形运动路径, 每条边上采样 6 个控制点 (包含 2 个端点), 靶标尺寸取为 0.5,

$t_z$  分别取为 500 mm、1000 mm 和 1500 mm, 分别单独地给机械手末端位置和控制点像点位置加上均值为 0、标准差为  $\sigma$  的高斯白噪声,  $\sigma$  的取值范围为 0.2~2,  $\sigma$  的单位分别为 mm 和像素。

图 3 所示为不同距离和噪声条件下焦比  $f_u$  的相对误差曲线和相机主点坐标  $u_0$  的绝对误差曲线。图 3 的 6 张子图里, 相机内参数的误差与控制点像点噪声强度和机械手末端位置噪声强度均近似为线性关系, 因此第 3 节中采用的线性关系假设成立。

将上述设定的相机内参数代入到式 (19) 中可以得到相应的等效控制点像点坐标噪声强度为

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_2^2 + \left(\frac{1000}{t_z}\right)^2 \sigma_1^2}$$
 其中  $\sigma_1$  为机械手末端位置噪声强度,  $\sigma_2$  为控制点像点位置噪声强度。表 1 给出了不同距离下分别由机械手末端位置和控制点像点坐标噪声对应的  $f_u$  误差的理论比值与实际比值, 其中理论比值为两类噪声强度对应等效噪声强度的比值; 由于  $f_u$  误差与两类噪声强度均近似呈线性关系, 因此实际比值为两类噪声对应误差曲线斜率的比值, 曲线斜率通过直线拟合得到。为了表达的直观性, 表 1 中将控制点像点位置对应的误差归一化为 1。

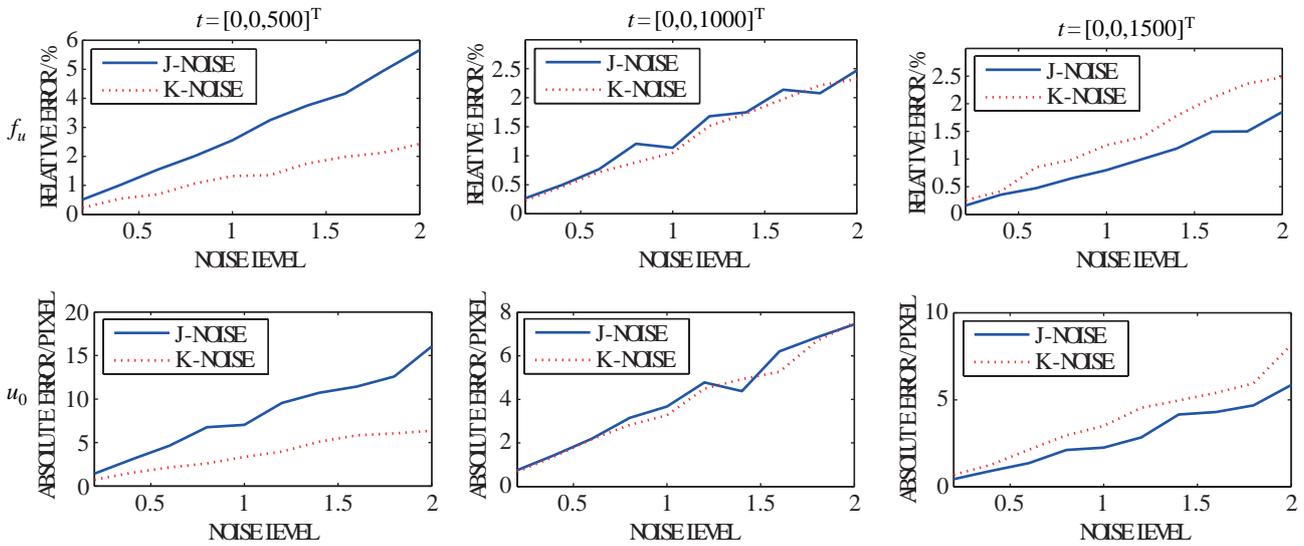


图 3 不同噪声强度下  $f_u$  与  $u_0$  的误差  
Fig.3 Errors of  $f_u$  and  $u_0$  w.r.t. the noise level

表 1 误差比值  
Tab.1 Ratio of errors

$t_z$ /mm	500	1000	1500
理论比值	2:1	1:1	0.67:1
实际比值	2.21:1	1.05:1	0.69:1

表 1 中 3 个距离下机械手末端位置和控制点像点位置噪声对应的  $f_u$  误差的理论比值与实际比值接近, 即视觉标定误差与控制点像点坐标等效误差近似呈线性关系, 等效误差由式 (19) 计算。

### 4.3 其他因素

分析控制点密度因素的实验中, 采用正方形运动路径, 每条边上采样 3~22 个控制点 (包含 2 个端点), 靶标的尺寸取为 0.5,  $t_z$  取为 1000 mm, 给机械手末端位置加上均值为 0、标准差为  $\sigma$  的高斯白噪声,  $\sigma$  的取值为 0.5 mm、1 mm 和 1.5 mm。

图 4 所示为不同控制点密度和噪声条件下焦比  $f_u$  的相对误差曲线和相机主点坐标  $u_0$  的绝对误差

曲线。从图 4 的 6 条曲线上来看, 控制点密度对标定精度的提升很快就接近饱和, 实际应用中密度取为 10 左右即可。

分析靶标结构的实验中, 分别采用经典的实物棋盘型的控制点分布与正方形运动路径的靶标结构布局, 如图 6 所示。实验中其他参数保持一致: 每条边上采样 6 个控制点 (包含 2 个端点), 靶标的尺寸取为 0.5,  $t_z$  取为 1000 mm, 给机械手末端位置加上均值为 0、标准差为  $\sigma$  的高斯白噪声,  $\sigma$  的取值为 0.2 mm~2 mm。

图 5 所示为两种靶标结构在噪声条件下焦比  $f_u$  的相对误差曲线和相机主点坐标  $u_0$  的绝对误差曲线。可以看到: 虽然棋盘结构的控制点数量是正方形结构的 1.8 倍, 但两类靶标结构对应的焦比和相机主点的精度基本相同; 而实验中两种靶标的尺寸一致, 这说明了靶标尺寸对标定精度的影响远大于靶标结构的影响。

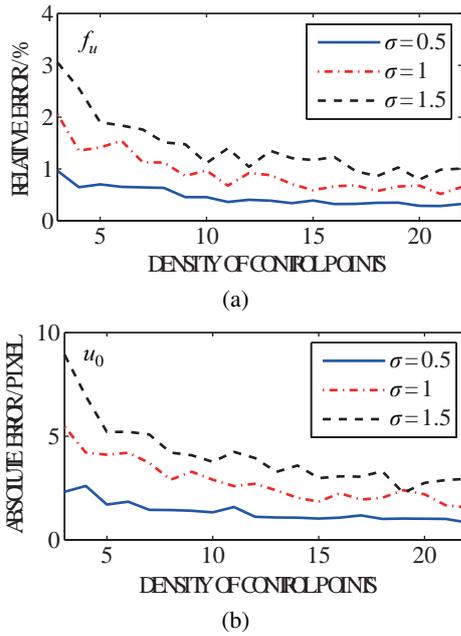


图4 不同密度下  $f_u$  的相对误差

Fig.4 Errors of  $f_u$  w.r.t. the density of control points

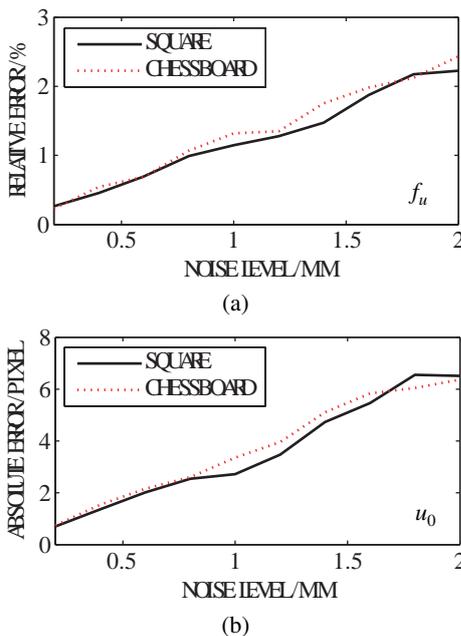


图5 不同靶标结构下  $f_u$  与  $u_0$  的误差

Fig.5 Errors of  $f_u$  and  $u_0$  w.r.t. the target structure

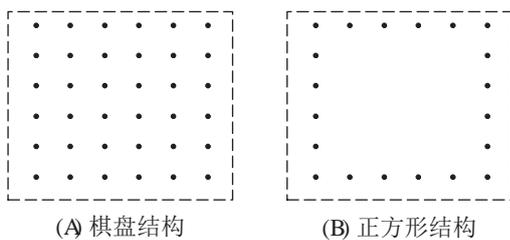


图6 靶标控制点示意图

Fig.6 Illustration of control points of reference objects

#### 4.4 实验总结

4.1 节和 4.3 节已经分析了靶标尺寸、控制点密度和靶标结构对标定误差的影响；4.2 节的实验结果证明了式 (19) 的等效误差关系，即相机标定的误差与等效控制点像点坐标误差满足线性关系。则根据式 (19)，进一步降低标定误差可以采取以下方法：

- 1) 提高控制点的提取精度，空间采集图像后在地面通过人机交互实现控制点亚像素级坐标提取；
- 2) 增大运动路径靶标的  $Z_C$  值，即增加靶标与相机的相对距离；
- 3) 提高机械手位置的定位精度，这里可以采用重复同一路径多次运动取平均值的重复定位方式来降低噪声，理论上对同一路径重复  $n$  次测量取平均值，则机械手末端位置的噪声模型变为均值为 0、方差为  $\sigma_1^2/n$  的白噪声，相应地  $\sigma_u, \sigma_v$  降低为

$$\begin{cases} \sigma_u = \sqrt{\sigma_2^2 + \frac{1}{n} \left(\frac{f_u}{Z_C}\right)^2 \sigma_1^2} \\ \sigma_v = \sqrt{\sigma_2^2 + \frac{1}{n} \left(\frac{f_v}{Z_C}\right)^2 \sigma_1^2} \end{cases} \quad (23)$$

#### 5 结论 (Conclusion)

针对空间视觉高精度标定缺少标定靶标的难题，本文基于空间机器人机械手的精确末端定位能力，提出了通过规划机械手的运动路径构造运动路径靶标，进而实现视觉标定的方法。基于运动路径靶标进行标定除了受控制点像点坐标误差影响之外，还受机械手末端定位误差的影响，本文基于棋盘靶标标定精度与控制点像点坐标精度为线性关系的先验知识，推导出了从机械手末端定位误差到控制点像点坐标误差的传递关系，并合成两类误差得到了等效的控制点像点坐标误差。最后通过计算机仿真实验研究验证了上述等效误差关系，研究了靶标尺寸对标定精度的影响：增大靶标尺寸有助于提高标定精度，但同一靶标尺寸下控制点像点精度对标定精度的影响相同，不受距离影响。总体来看，由于机械手末端定位误差的存在，运动路径靶标的标定精度低于实物棋盘靶标，但通过重复定位、增大靶标与相机相对距离等运动路径设计方法能够控制该误差的影响，因此本文为缺少标定靶标的特殊场景提供了一种可行的视觉标定方法。

#### 参考文献 (References)

[1] 梁斌, 杜晓东, 李成, 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人, 2012, 34(2): 242-256.

- Liang B, Du X D, Li C, et al. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft[J]. Robot, 2012, 34(2): 242-256.
- [2] 徐文福, 孟得山, 徐超, 等. 自由漂浮空间机器人捕获目标的协调控制[J]. 机器人, 2013, 35(5): 559-567.  
Xu W F, Meng D S, Xu C, et al. Coordinated control of a free-floating space robot for capturing a target[J]. Robot, 2013, 35(5): 559-567.
- [3] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [4] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] 付生鹏, 赵吉宾, 夏仁波, 等. 基于环形镜面的相机外部参数自动标定方法[J]. 机器人, 2015, 37(3): 277-285.  
Fu S P, Zhao J B, Xia R B, et al. Annular mirror based extrinsic camera automatic calibration[J]. Robot, 2015, 37(3): 277-285.
- [6] 张雪波, 路晗, 方勇纯, 等. 室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定技术及其应用[J]. 机器人, 2013, 35(4): 385-393.  
Zhang Y B, Lu H, Fang Y C, et al. An automatic calibration method for outdoor PTZ cameras and its applications[J]. Robot, 2013, 35(4): 385-393.
- [7] 郑红, 刘振强. 基于精确模型的云台摄像机自标定[J]. 机器人, 2013, 35(3): 326-331,338.  
Zheng H, Liu Z Q. Self-calibration of pan-tilt camera based on accurate model[J]. Robot, 2013, 35(3): 326-331,338.
- [8] 王宪, 谭建平, 陈国强, 等. 基于主动视觉的测量装置精度校准方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(4): 1071-1076.  
Wang X, Tan J P, Chen G Q, et al. Active vision-based accuracy calibration technology for measurement devices[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(4): 1071-1076.
- [9] Heikkila J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1066-1077.
- [10] 李春艳, 李怀峰, 孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 558-563.  
Li C Y, Li H F, Sun C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 558-563.
- [11] 戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 100-104.  
Dai D K, Wang S S, Hu C S, et al. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 100-104.
- [12] MacLean S G, Pinkney H F L. Calibration procedures for the space vision system experiment[C]//Proceedings of the SPIE, Conference on Industrial Vision Metrology, vol.1526. Bellingham, USA: SPIE, 1991: 113-121.
- [13] 谭启蒙, 胡成威, 高升. 空间机械臂视觉相机内参标定技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 74-80.  
Tan Q M, Hu C W, Gao S. Research on calibration of intrinsic parameters for space manipulator camera based on 2D planar pattern[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(6): 74-80.

#### 作者简介:

- 张李俊 (1991 -), 男, 硕士生. 研究领域: 机器视觉和视觉测量.
- 黄学祥 (1970 -), 男, 研究员, 硕士生导师, 研究领域: 空间操作.