

基于前期筛选和最小二乘优化的手眼标定

王庆滨¹, 邹伟¹, 徐德¹, 严伟², 王欣刚¹

1. 中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心, 北京 100190
E-mail: wangqingbin2012@ia.ac.cn

2. 扬州恒佳机械有限公司, 扬州 225129
E-mail: yanwei@henga.cn

摘要:本文基于仿生眼平台, 首先通过理论推导验证了, 摄像机与标定板的距离对手眼参数的影响, 得出了摄像机与标定板距离越远, 由平台角度误差引起的手眼参数误差越大的结论。基于此, 本文提出了一种基于前期筛选和最小二乘优化的手眼标定算法, 该方法首先通过计算的可信区间与通用旋转变换的转角选择一部分标定效果好的通用旋转转轴, 利用这些通用旋转变换转轴通过最小二乘求取旋转矩阵的逆, 再通过最小二乘方法求取平移向量。实验结果证明所提出的方法可以有效提高手眼参数的标定精度和单目运动视觉的测量精度。

关键词:仿生眼, 手眼标定, 最小二乘, 单目运动视觉

Eye-hand Calibration Based on the Early Screening and L-M Optimization

WANG Qingbin¹, ZOU Wei¹, XU De¹, YAN Wei², WANG Xingang¹

1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
E-mail: wangqingbin2012@ia.ac.cn

2. YANGZHOU HENGA MACHINERY CO.,LTD, Yangzhou 225129, China
E-mail: yanwei@henga.cn

Abstract: This paper based on bionic eye platform, the relation between hand-eye parameters and the distance between camera and calibration target is examined. A conclusion is drawn that the error is bigger when the distance between camera and calibration target bigger. So, a method of hand-eye calibration is proposed based on early choice and the method of least squares. Firstly, a confidence interval is obtained. Secondly, many groups of general rotating transformation axis is obtained and selected some of good groups based on confidence interval. Thirdly, the inverse of rotation matrix is obtained based on the method of least squares and the translation vector is obtained based on the method of least squares. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of hand-eye parameters and the accuracy of monocular motion vision.

Key Words: Bionic Eye, Eye-hand Calibration, L-M Optimization, Monocular Motion Vision

1 引言

在机器人视觉中, 通常采用Eye-in-hand系统, 即摄像机固定在机械手末端, 二者之间刚性连接并且其相对位置保持不变。在利用双目主动立体视觉和单目运动立体视觉获取环境深度信息时, 需要确定摄像机与机械手之间的空间关系, 即为手眼标定。在仿生眼平台中, 两个摄像机分别被安装在可以独立运动的两个运动模块上, 每个模块只有上下俯仰和左右旋转两个自由度。仿生眼平台依靠双目立体视觉和单目运动立体视觉感知环境信息, 因此, 摄像机与运动模块末端的变换关系需要用手眼标定获得。手眼标定的研究已经取得了非常多的成果, 如: 张正友的标定方法^[1]、转站法^[2]、基于直积的方法^[3]以及一些基于非线性的标定方法^[4-9]等。其中最经典的是Tsai提出的转站法, 但这种方法需要机器人末端移动较大角度才能标定, 否则结果误差较大。最常用的手眼标定方法是以棋盘格为靶标, 用张正友的平面标定法求取摄像机的外部

参数, 再结合机器人末端的运动参数, 根据方程 $AX=XB$ 取得手眼转换关系。这种方法比较成熟而且操作简单, 因而在实践中得到了广泛的应用。但由于图像容易受噪声影响, 提取的角点坐标对手眼参数的影响较大, 因此, 基于 $AX=XB$ 的求取的手眼参数具有随机性, 利用最小二乘优化手眼参数的方法只能应用于平移向量的求取。文献[10]中提出了一种基于立体标定的降低图像噪声对手眼参数影响的方法。以上方法都没有说明在实际操作中, 靶标与摄像机的距离对手眼参数的影响, 这是造成很多手眼标定失败的关键原因。

本文首先通过公式推导了靶标与摄像机的距离对手眼参数的影响, 进而提出一套基于前期筛选和最小二乘优化的手眼标定流程方法。该方法利用基于立体标定的方法求取相机外部参数, 结合机器人平台的运动参数, 获得多组通用旋转变换的转轴和转角, 根据转角偏差大小去除误差较大的通用旋转转轴, 进而用误差较小的转轴通过最小二乘优化获得更精确且

*此项工作得到江苏省科技成果转化专项资金资助, 项目批准号: BA2015144.

稳定的 R_m^{-1} ，通过 R_m^{-1} 求取 R_m 进而获得优化的平移向量。该方法对旋转矩阵的最小二乘优化有效提高了手眼参数的精度。

2 靶标与摄像机的距离对手眼参数的影响

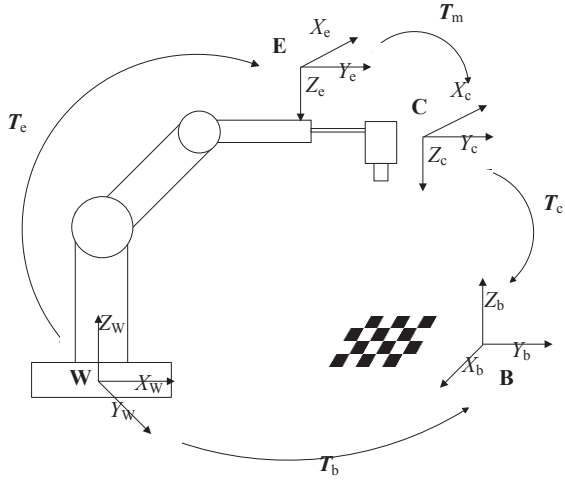


图1 手眼标定模型

Fig.1 The model of hand-eye calibration

常用的手眼标定模型如图1所示， W 为机器人的世界坐标系， E 为机器人末端坐标系， C 为摄像机坐标系， B 为靶标坐标系， T_e 为 W 到 E 之间的变换， T_c 为 C 到 B 之间的变换， T_b 为 W 到 B 之间的变换， T_m 为需要求取的手眼参数。在进行手眼标定时，控制机器人运动两次，获得运动前后3个位置的 T_e 和 T_c 。由于机器人世界坐标系与靶标坐标系之间的变换关系保持不变，因此可得公式(1)和(2)。

$$T_{ei} T_m T_{ci} = T_{e(i-1)} T_m T_{c(i-1)} \quad (1)$$

$$T_{Li} = T_m T_{Ri} T_m^{-1} \quad (2)$$

其中：

$$T_{Li} = T_{e(i-1)}^{-1} T_{ei} = \begin{pmatrix} R_{Li} & p_{Li} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_{Ri} = T_{c(i-1)} T_{ci}^{-1} = \begin{pmatrix} R_{Ri} & p_{Ri} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

通过以上两式得：

$$\begin{cases} R_{Li} = R_m R_{Ri} R_m^T \\ -R_{Li} p_m + R_m p_{Ri} + p_m = p_{Li} \end{cases} \quad (3)$$

通过公式3可以求得手眼参数。 T_{Ri} 可以通过文献[10]所用的立体标定方法获得，在仿生眼平台中，由于每个运动模块只有上下俯仰和左右旋转两个自由度。因此得：

$$T_{ei} = \begin{pmatrix} Rot(y, \beta) Rot(x, \alpha) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

设 T_{e0} 为初始位置的运动模块末端位姿， T_{e1} 为运动模块从位置 T_{e0} 沿 x 轴旋转 α 角度后所处的位置， T_{e2} 为运动模块从位置 T_{e1} 沿 y 轴旋转 β 角度后所处的位置。因此得：

$$T_{e0} = \begin{pmatrix} Rot(y, 0) Rot(x, 0) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T_{e1} = \begin{pmatrix} Rot(y, 0) Rot(x, \alpha) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$T_{e2} = \begin{pmatrix} Rot(y, \beta) Rot(x, \alpha) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

将公式(5)、(6)和(7)带入公式(2)可得公式(8)和(9)。

$$T_{L1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$T_{L2} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta & 0 \\ -\sin \alpha \sin \beta & \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos \beta & \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha - \cos \alpha \sin \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha - \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

T_{L1} 与 T_{L2} 的通用旋转变换的转轴 k_{L1} 和 k_{L2} 可通过文献[10]的方法获得。

$$k_{L1} = \begin{pmatrix} \frac{T_{L1}^{32} - T_{L1}^{23}}{2 \sin \alpha} \\ \frac{T_{L1}^{13} - T_{L1}^{31}}{2 \sin \alpha} \\ \frac{T_{L1}^{21} - T_{L1}^{12}}{2 \sin \alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sin \alpha + \sin \alpha}{2 \sin \alpha} \\ 0 - 0 \\ 0 - 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$k_{L2} = \begin{pmatrix} \frac{T_{L2}^{32} - T_{L2}^{23}}{2 \sin \alpha} \\ \frac{T_{L2}^{13} - T_{L2}^{31}}{2 \sin \alpha} \\ \frac{T_{L2}^{21} - T_{L2}^{12}}{2 \sin \alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{pmatrix} \quad (11)$$

进而可得：

$$k_{L3} = k_{L1} \times k_{L2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (12)$$

通过公式(13)和(14)可解得 R_m 。

$$[k_{L1} \ k_{L2} \ k_{L3}] = R_m [k_{R1} \ k_{R2} \ k_{R3}] \quad (13)$$

$$R_m = [k_{L1} \ k_{L2} \ k_{L3}] [k_{R1} \ k_{R2} \ k_{R3}]^{-1} \quad (14)$$

当摄像机为理想摄像机，不受任何噪声影响时，可得：

$$[k_{R1} \ k_{R2} \ k_{R3}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

因此可得：

$$\mathbf{R}_m = [\mathbf{k}_{L1} \ \mathbf{k}_{L2} \ \mathbf{k}_{L3}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

进而可根据式(17)解出 \mathbf{p}_m 。

$$\mathbf{p}_m = -(\mathbf{I} - \mathbf{R}_{Li})^{-1} \mathbf{R}_m \mathbf{p}_{Ri} \quad (17)$$

在理想状态下可得：

$$\mathbf{p}_{Ri} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{p}_{Li} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

因而可得：

$$\mathbf{p}_m = \begin{pmatrix} 0 \\ -y \cos \alpha - \frac{y}{2} \\ y \sin \alpha + \frac{y \sin \alpha}{2 \cos \alpha - 2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

设由于平台运动精度带来的角度误差为 $\Delta\alpha$ 。因而可得公式(19)和(20)。

$$\mathbf{R}_m^\Delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha + \Delta\alpha) & \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha + \Delta\alpha) & \cos(\alpha + \Delta\alpha) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{p}_m^\Delta = \begin{pmatrix} 0 \\ -y \cos(\alpha + \Delta\alpha) - \frac{y}{2} \\ y \sin(\alpha + \Delta\alpha) + \frac{y \sin(\alpha + \Delta\alpha)}{2 \cos(\alpha + \Delta\alpha) - 2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

实际标定的 \mathbf{R}_m 和 \mathbf{p}_m 与理想的 \mathbf{R}_m^Δ 和 \mathbf{p}_m^Δ 之间的误差可通过式(21)获得。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{p}_m = \mathbf{p}_m - \mathbf{p}_m^\Delta \\ \Delta \mathbf{R}_m = \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_m^\Delta \end{cases} \quad (21)$$

公式(16)、(18)、(19)、(20)和(21)联立得式(22)和(23)。

$$\Delta \mathbf{R}_m = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) & \sin \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) \\ 0 & -\sin \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) & \cos \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\Delta \mathbf{p}_m = \begin{pmatrix} 0 \\ -y \cos \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) \\ y \sin \alpha (1 - \cos \Delta\alpha) + \frac{y \sin \alpha (\cos \alpha \cos \Delta\alpha + \cos \alpha - \cos^2 \alpha - 1)}{(2 \cos \alpha \cos \Delta\alpha - 2)(\cos \alpha - 1)} \end{pmatrix} \quad (23)$$

从式(22)和(23)可得，当进行手眼标定时，标定靶与摄像机的距离越远， y 就越大，由机器人角度误差引起的手眼参数误差越大。运动模块末端转动角度越大，

误差越小。这为实际标定中如何选取标定靶与摄像机之间的距离提供了理论支持。

3 优化的手眼标定方法

基于以上对手眼标定时标定靶与摄像机之间的距离对手眼参数的影响，本文提出基于仿生眼平台的手眼参数标定方案。其具体流程如下：

1) . 标定摄像机内参数和畸变参数。

2) . 固定棋盘格靶标不变，靶标与摄像机的距离尽可能小，控制运动模块运动两次，每次运动角度尽可能大，分别记录运动模块的旋转角以及3个位置的靶标图像。

3) . 重复步骤2多次，直到获得足够多的位置信息和图像信息。

4) . 获得多组 $(\mathbf{T}_{L1}, \mathbf{T}_{L2}, \mathbf{T}_{R1}, \mathbf{T}_{R2})$ ，通过文献[10]的方法获得多组 $(\mathbf{k}_{L1}, \mathbf{k}_{L2}, \mathbf{k}_{R1}, \mathbf{k}_{R2})$ 和 $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$ 。

5) . 根据平台特性获取平台的运动精度，确定可信区间，根据 $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$ 和可信区间去除误差较大的 $(\mathbf{k}_{L1}, \mathbf{k}_{L2}, \mathbf{k}_{R1}, \mathbf{k}_{R2})$ 。

6) . 对剩下的 $(\mathbf{k}_{L1}, \mathbf{k}_{L2}, \mathbf{k}_{R1}, \mathbf{k}_{R2})$ 通过最小二乘求取旋转矩阵的逆，再求出旋转矩阵。

7) . 根据旋转矩阵和 $(\mathbf{T}_{L1}, \mathbf{T}_{L2}, \mathbf{T}_{R1}, \mathbf{T}_{R2})$ 利用最小二乘求取平移向量。

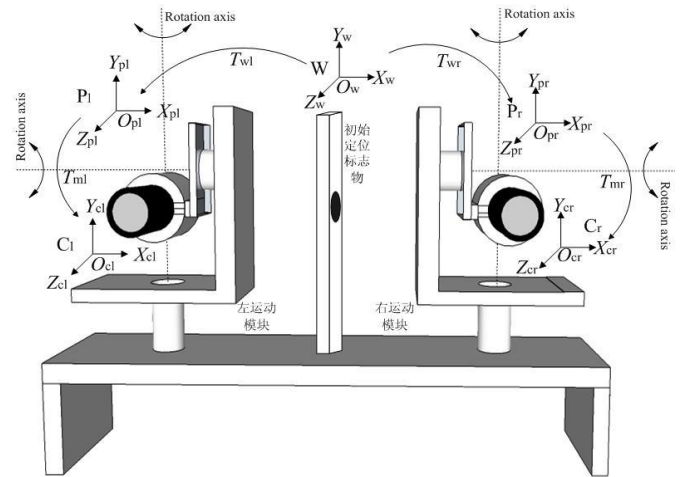


图2 仿生眼机械结构和坐标设置

Fig.2 The biomimetic eye system mechanical structure and coordinate system

3.1 可信区间的选取

仿生眼平台的机械结构如图2所示。每个运动平台通过两个编码器来实时获得运动平台沿x和y方向运动的角度信息，编码器的精度为 δ 。

当编码器在初始位置 L_1 时，设运动模块在x方向的角度为 γ_1 ，在y方向的角度为 λ_1 ，则可得 γ_1 和 λ_1 的范围：

$$\begin{cases} -\delta < \gamma_1 < \delta \\ -\delta < \lambda_1 < \delta \end{cases} \quad (24)$$

当摄像机在位置 L_2 时，运动模块在x方向的角度为 γ_2 ，在y方向的角度为 λ_2 。则可得 γ_2 和 λ_2 的范围：

$$\begin{cases} \alpha - \delta < \gamma_2 < \alpha + \delta \\ -\delta < \lambda_2 < \delta \end{cases} \quad (25)$$

当摄像机在位置 L_2 时,运动模块在x方向的角度为 γ_3 ,在y方向的角度为 λ_3 。则可得 γ_3 和 λ_3 的范围:

$$\begin{cases} \alpha - \delta < \gamma_2 < \alpha + \delta \\ \beta - \delta < \lambda_2 < \beta + \delta \end{cases} \quad (26)$$

设位置 L_1 到位置 L_2 的旋转角度为 θ_{L1} ,位置 L_2 到位置 L_3 的旋转角度为 θ_{L2} 。 θ_{L1} 和 θ_{L2} 可通过式(27)和(28)获得。

$$\theta_{L1} = \gamma_2 - \gamma_1 \quad (27)$$

$$\theta_{L2} = \lambda_3 - \lambda_2 \quad (28)$$

θ_{L1} 和 θ_{L2} 的范围如式(29)所示。

$$\begin{cases} \alpha - 2\delta < \theta_{L1} < \alpha + 2\delta \\ \beta - 2\delta < \theta_{L2} < \beta + 2\delta \end{cases} \quad (29)$$

因此得 θ_{R1} 可信区间为 $(\alpha - 2\delta, \alpha + 2\delta)$, θ_{R2} 的可信区间为 $(\beta - 2\delta, \beta + 2\delta)$ 。

基于最小二乘的手眼参数标定

通过 θ_{R1} 和 θ_{R2} 的可信区间去除误差较大的 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$,进而可以得到多组在可信区间里的 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$,由公式(13)得:

$$A_i = R_m B_i \quad (30)$$

其中:

$$A_i = \begin{bmatrix} k_{Li1} & k_{Li2} & k_{Li1} \times k_{Li2} \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} k_{Ri1} & k_{Ri2} & k_{Ri1} \times k_{Ri2} \end{bmatrix}$$

根据通用旋转变换的特性, A_i 和 B_i 都是可逆的,因此可得到:

$$B_i^{-1} R_m^{-1} = A_i^{-1} \quad (31)$$

每一组 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$ 都可以得到方程(27),将多组方程联立可得到式(32)。

$$\begin{bmatrix} B_1^{-1} \\ B_2^{-1} \\ \dots \\ B_n^{-1} \end{bmatrix} R_m^{-1} = - \begin{bmatrix} A_1^{-1} \\ A_2^{-1} \\ \dots \\ A_n^{-1} \end{bmatrix} \quad (32)$$

同时可得到公式(33)。

$$\begin{bmatrix} I - R_{L1} \\ I - R_{L2} \\ \dots \\ I - R_{Ln1} \\ I - R_{Ln2} \end{bmatrix} p_m = - \begin{bmatrix} R_m p_{R1} \\ R_m p_{R2} \\ \dots \\ R_m p_{Rn1} \\ R_m p_{Rn2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

根据式(32)通过最小二乘可以求解出优化的 R_m^{-1} ,取逆可解得 R_m ,将 R_m 带入式(33)可以通过最小二乘法获得优化的 p_m 。

4 实验

实验平台如图3所示,编码器的精度为2500线,经过倍频,其精度可扩展到10000线,其精度达到 0.036° 。摄像头采用3.8mm焦距的镜头,其分辨率为 720×576 。步进电机的步距角为 0.0140625° 。



图3 仿生眼平台

Fig.3 The biomimetic eye platform

控制运动模块多次运动,获得7组 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$ 和 $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$, $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$ 如表1所示。

表1 7组 $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$

Tab.1 The 7 groups of $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$

序号	$\theta_{L1}(^\circ)$	$\theta_{L2}(^\circ)$	$\theta_{R1}(^\circ)$	$\theta_{R2}(^\circ)$
1	10.008	10.008	9.9364	10.0355
2	10.008	10.008	9.9364	9.9364
3	10.008	10.008	9.7012	9.9861
4	10.008	10.008	9.8363	10.1010
5	10.008	10.008	10.0683	10.0026
6	10.008	10.008	10.0355	10.0026
7	10.008	10.008	9.8697	10.0026

从表1中可看出,每组的 θ_{L1} 和 θ_{L2} 的可信区间都是 $(9.936^\circ, 10.08^\circ)$,1,2,5,6组在可信区间内。利用1,2,5,6组的 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$ 通过公式(32)、(32)、(33)获得手眼参数如下所示:

$$T_1 = \begin{bmatrix} -0.9989 & 0.0243 & 0.0215 & 1.4672 \\ -0.0256 & -0.9422 & -0.3318 & -27.5838 \\ 0.0130 & -0.3322 & 0.9417 & 40.3345 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

利用7组的 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$ 通过最小二乘法获得的手眼参数如下所示:

$$T_2 = \begin{bmatrix} -0.9990 & 0.0202 & 0.0215 & 2.2419 \\ -0.0276 & -0.9474 & -0.3195 & -27.8615 \\ 0.0135 & -0.3200 & 0.9469 & 43.5783 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对第6组的 $(k_{L1}, k_{L2}, k_{R1}, k_{R2})$ 通过最小二乘法获得的手眼参数如下所示:

$$T_3 = \begin{pmatrix} -0.9974 & 0.0318 & 0.0207 & -0.6013 \\ -0.0308 & -0.9419 & -0.3318 & -27.9754 \\ 0.0100 & -0.3323 & 0.9403 & 40.2249 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

仿生眼平台可以通过单目运动视觉获得物体的深度信息,控制运动模块运动两次,拍摄同一位置棋盘格图像,用上述3种方法获得的手眼参数,可以求得摄像机的姿态信息,通过3视图融合的方式可以获得棋盘格角点的三维坐标。每个棋盘格角点大小为30mm,与摄像机的距离在70cm左右,角点数量为36,为了对比本文方法与其他方法的优缺点,计算所有角点与其相邻角点距离的最大值 $M_i(i=1, \dots, 36)$,求 M_i 的最大值 M_{max} 和平均值 M_{mean} 。用 M_{max} 和 M_{mean} 来表征靶标在x, y方向的误差。用所有角点的三维坐标拟合平

面D,求所有角点与平面D的距离的最大值 D_{max} 与均值 D_{mean} 。用 D_{max} 和 D_{mean} 来表征靶标在z方向的误差。表2列举了用3种方法获得的手眼参数分别求得的3组靶标的 M_{max} 、 M_{mean} 、 D_{max} 、 D_{mean} 。在表2中,CM为用 T_3 得到的 M_{max} 、 M_{mean} 、 D_{max} 、 D_{mean} 。LM为用 T_2 得到的 M_{max} 、 M_{mean} 、 D_{max} 、 D_{mean} 。BM为用 T_1 得到的 M_{max} 、 M_{mean} 、 D_{max} 、 D_{mean} 。

从表2中可以看出,本文方法标定的手眼参数有效降低了单目运动视觉获取的角点的误差。用本文方法获得的手眼参数求得的3组靶标的 M_{max} 、 M_{mean} 、 D_{max} 、 D_{mean} 比其他两种方法获得的都要小,在x, y, z方向上都提高了单目运动视觉的精度。

表 2 3种方法获得的手眼参数对单目运动视觉精度的影响

Tab.2 Effect of 3 methods of hand eye parameters on monocular visual motion accuracy

	1				2				3			
	M_{max} (mm)	M_{mean} (mm)	D_{max} (mm)	D_{mean} (mm)	M_{max} (mm)	M_{mean} (mm)	D_{max} (mm)	D_{mean} (mm)	M_{max} (mm)	M_{mean} (mm)	D_{max} (mm)	D_{mean} (mm)
CM	9.17	1.09	3.30	0.48	8.02	0.98	3.39	0.50	8.53	0.96	3.30	0.40
LM	4.95	1.00	2.44	0.46	3.88	0.67	2.57	0.49	4.51	0.68	2.79	0.38
BM	3.78	0.41	2.19	0.42	2.71	0.58	2.28	0.44	3.33	0.56	2.51	0.35

表 3 靶标不同距离对手眼参数的影响

Tab.3 The influence of target parameters of different distance from opponent's eyes

序号	棋盘格尺寸	距离(m)	θ_{L1} (°)	θ_{L2} (°)	θ_{R1} (°)	θ_{R2} (°)	$\Delta\theta_1$ (°)	$\Delta\theta_2$ (°)	Δp_m (mm)
1	25mm	0.5	10.008	10.008	10.0683	10.0026	0.0603	-0.0054	1.7157
2		0.65	10.008	10.008	10.0355	10.0026	0.0275	-0.0054	2.1081
3	30mm	0.6	10.008	10.008	9.9695	10.0683	0.0385	0.0603	2.8914
4		0.7	10.008	10.008	9.8363	10.0355	0.1717	0.0275	6.7729
5	55mm	1	10.008	10.008	9.9695	9.9861	0.0385	0.0219	14.5529
6		1.3	10.008	10.008	9.8864	9.9364	0.1216	0.0716	27.4724

为了验证标定板与摄像机的距离对手眼标定的影响,分别用不同距离下的靶标标定手眼参数,将获得的手眼参数与本文方法获得的手眼参数对比,求得手眼参数中平移向量的相对误差 Δp_m 。表3中列举了分别用格子大小为25mm、30mm和55mm的靶标在不同距离下得到的 $(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{R1}, \theta_{R2})$,并通过下式得到 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 。

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \theta_{L1} - \theta_{R1} \\ \Delta\theta_2 = \theta_{L2} - \theta_{R2} \end{cases} \quad (34)$$

从表3可以看出,标定靶距离摄像机越远, $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 越大, Δp_m 也越大。因此可以得出结论,标定靶与摄像机距离越远,标定的手眼参数误差越大。

5 结论

本文证明了仿生眼平台中,靶标与摄像机之间的距离对手眼参数的影响,得出结论:靶标与摄像机的距离越远,由平台旋转角度误差引起的手眼参数误差越大。基于以上结论,本文提出一种实用性强的手眼

标定流程方法,这套流程方法不仅对仿生眼平台的手眼标定有良好的效果,对其他平台的手眼标定也能起到非常好的效果。虽然本文的手眼标定方法主要针对只有旋转的手眼平台,对于含有平移的平台,可设计其他可信区间选取办法,也可去掉可信区间的选取,直接对 R_m^{-1} 进行最小二乘获取。

参考文献

- [1] Zhuang H Q, Wang K C, S.Roth Z. Simultaneous Calibration of a Robot and a Hand-Mounted Camera[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1995, 11(5): 649-660.
- [2] TSAI Y R, Lenz R K. A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.
- [3] Nicolas A, Radu H, Bernard E. Robot Hand-Eye Calibration Using Structure-from-Motion[J]. International Journal of Robotics and Research, 2001, 20(3): 228-248.
- [4] Malm H, Heyden A. A New Approach to Hand-Eye Calibration[C]. Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, 2000: 525-529.

- [5] 王君臣, 王田苗, 杨艳, 等。非线性最优机器人手眼标定[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 15-20.
- [6] 王君臣, 王田苗, 杨艳, 等。基于无迹卡尔曼滤波的机器人手眼标定[J]。机器人, 2011, 33(5): 621-627.
- [7] Strobl K H, Hirzinger G. Optimal Hand-Eye Calibration[C]// Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2006:4647 - 4653.
- [8] Heller J, Havlena M, Pajdla T. A branch-and-bound algorithm for globally optimal hand-eye calibration[J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2012, 157(10):1608-1615.
- [9] Wu H, Tizzano W, Andersen T, et al. Hand-Eye Calibration and Inverse Kinematics of Robot Arm Using Neural Network[J]. Advances in Intelligent Systems & Computing, 2014:581-591.
- [10] Wang Q B, Zou W, Xu D, et al. Binocular initial location and extrinsic parameters real-time calculation for bionic eye system[C]//Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on. IEEE, 2014: 74-80.