

基于大景深三维扫描系统对 RAC 标定法的修正

李剑峰^{1,2}, 郭永康¹, 王鹏^{1,2}, 朱建华¹, 汤青^{1,2}

(1 四川大学 物理学院纳光子技术研究所, 成都 610064)

(2 廊坊智通机器人有限公司, 河北 廊坊 030001)

摘 要:基于大景深三维扫描系统的倾斜摄像机模型, 推导了新的物像关系并修正了 Tsai 的 RAC 标定法. 利用修正后的 RAC 标定法对大景深扫描系统的摄像机进行了标定, 实验结果表明修正后的 RAC 标定法适用于倾斜的摄像机系统, 标定准确度可以达到 0.03 mm.

关键词:计算机视觉; 摄像机标定; RAC 标定法; 景深; 三维扫描系统

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)02-0405-5

0 引言

激光三维扫描作为一种非接触式测量方法, 已经在三维面形测量、快速成型、逆向工程上得到了广泛的应用^[1-2]. 但是当激光视觉扫描系统应用于一些尺寸较大、面形较复杂的物体的三维检测时, 需要对数据进行拼接, 提高扫描系统的景深^[3]. 根据 Scheimpflug 条件偏转像平面可以扩大成像系统的景深^[4]. 摄像机标定是激光测量中获取三维空间信息的前提和基础, 也是确定摄像机内外参量的一个过程. 精确标定摄像机内外参量不仅可以直接提高测量准确度, 而且为后继的三维重建奠定了良好的基础. 目前标定方法很多, 按其求解算法大致可分为线性法、非线性优化法和两步法. 传统的线性法不考虑镜头畸变, 准确度欠佳^[5-6]; 非线性优化法^[7]可以得到比较高的标定准确度, 但其算法比较繁琐, 而且非线性优化对噪音和初值选择较敏感, 如果初值选择不当, 很可能得不到真正解. 两步法是介于两者间的一种比较灵活的方法, 其中以 Tsai 的 RAC 法^[8]为典型, 它先线性求解部分参量, 然后考虑畸变引入非线性优化, 有着稳定性好, 快速的优点. 但是上述传统标定方法都是针对像平面平行于镜头平面模型的定标, 并不适用于像平面和镜头平面有夹角的大景深成像系统. 本文基于大景深成像系统推导了像平面和镜头平面有夹角时的物像关系方程, 并将 θ 因子引入 Tsai 的 RAC 标定法, 并利用修正后的 RAC 标定法对大景深扫描系统的摄像机进行了标定, 实验结果表明修正后的 RAC 标定法适用于倾斜的摄像机系统的定标, 有较高的标定准确度.

1 基于大景深三维扫描系统对 RAC 法的修正

1.1 基于 Scheimpflug 条件建立大景深扫描系统

通常的扫描系统其探测器平面平行于透镜, 能在探测器上清晰成像的纵向范围很小、景深短. 为了解决该问题, 可使探测器平面与成像透镜平面成一倾角 θ , 当系统满足 Scheimpflug 条件^[9]

$$\theta = 90 - \arctan\left(\frac{\beta}{k}\right) \quad (1)$$

时, 在一定范围内的被测点都能正焦的成像在探测器阵列上, 从而扩大了系统的景深. 式中 β 为激光束投影轴和透镜光轴的夹角, k 为系统的放大率.

1.2 像平面偏转角度 θ 后的倾斜摄像机模型

图 1 为像平面偏转角度 θ 后的摄像机模型的几何结构, 它反映了任意空间点与图像点的投影变换关系. 设 $({}^wX_w, {}^wY_w, {}^wZ_w)$ 为点 P 在空间坐标系 $\{W\}$ 中三维坐标, $({}^cX_c, {}^cY_c, {}^cZ_c)$ 是该点在摄像机坐标系 $\{C\}$ 中的三维坐标, $({}^cX_u, {}^cY_u)$ 是 P 点在中心为 O_R 的图像物理坐标系中的理想坐标, $({}^cX_d, {}^cY_d)$ 是考虑透镜径向畸变的 P 点实际图像物理坐标, $({}^lX_d, {}^lY_d)$ 为该点在中心为 O_l 的图像像素坐标系中的实际坐标. θ 为像平面与镜头平面的夹角. 为

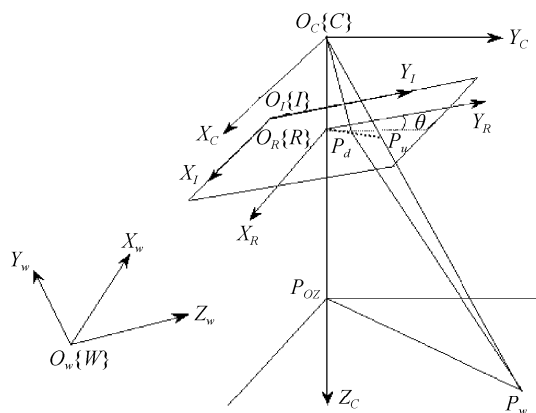


图 1 倾斜摄像机模型
Fig. 1 The model of tiled camera system

了扩大扫描系统的景深,利用 Scheimpflug 条件将像平面偏转了一个角度 θ ,因此对传统的 RAC 方法进行了修正,将 θ 因子引入模型.

1.3 倾斜摄像机模型中空间坐标到图像坐标的变换过程

1.3.1 摄像机坐标系 $\{C\}$ 到物空间坐标系 $\{W\}$ 的变换

摄像机坐标系 $\{C\}$ 中的坐标 $({}^C X_w, {}^C Y_w, {}^C Z_w)$ 转换为物空间坐标系 $\{W\}$ 的坐标 $({}^W X_w, {}^W Y_w, {}^W Z_w)$ 可用矩阵形式表示

$$\begin{bmatrix} {}^C X_w \\ {}^C Y_w \\ {}^C Z_w \end{bmatrix} = {}^C R_w \begin{bmatrix} {}^W X_w \\ {}^W Y_w \\ {}^W Z_w \end{bmatrix} + {}^C T_w \quad (2)$$

式中 ${}^C R_w = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵,由正交性

有 ${}^C R_w^{-1} = {}^C R_w^T$, ${}^C T_w = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移矢量.

1.3.2 小孔模型下的摄像机坐标系 $\{C\}$ 到图像物理坐标系 $\{R\}$ 的变换

由图 1,图像物理理想坐标 $({}^C X_u, {}^C Y_u)$ 到摄像机坐标 $({}^C X_w, {}^C Y_w, {}^C Z_w)$ 的投影变换关系为

$${}^C X_u = \frac{f \cdot {}^C X_w \cos \theta}{{}^C Z_w \cos \theta + {}^C Y_w \sin \theta},$$

$$\begin{aligned} {}^C X_d + {}^C X_d k_1 r^2 &= f \frac{(r_{11} {}^W X_w + r_{12} {}^W Y_w + r_{13} {}^W Z_w + t_x) \cos \theta}{(r_{31} {}^W X_w + r_{32} {}^W Y_w + r_{33} {}^W Z_w + t_z) \cos \theta + (r_{21} {}^W X_w + r_{22} {}^W Y_w + r_{23} {}^W Z_w + t_y) \sin \theta} \\ {}^C Y_d + {}^C Y_d k_1 r^2 &= f \frac{r_{21} {}^W X_w + r_{22} {}^W Y_w + r_{23} {}^W Z_w + t_y}{(r_{31} {}^W X_w + r_{32} {}^W Y_w + r_{33} {}^W Z_w + t_z) \cos \theta + (r_{21} {}^W X_w + r_{22} {}^W Y_w + r_{23} {}^W Z_w + t_y) \sin \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

1.4 需要标定的参量

以上可知,要得到图像物理坐标系 $\{I\}$ 到世界坐标系 $\{W\}$ 的关系需要确定一些参量,而摄像机标定就是确定摄像机内部几何和光学特性(内部参量)和相对一个世界坐标系统的摄像机坐标的三维位置和方向(外部参量)的方法.1)外部参量:摄像机的外部参量为摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 ${}^C R_w$ 和平移向量 ${}^C T_w$.2)内部参量:摄像机内部几何和光学特性,主要包括有效焦距 f ,透镜畸变系数 k_1 及不确定尺度因子 s_x .

1.5 引入 θ 因子对 Tsai 的 RAC 标定法进行修正

在传统的 Tsai 模型中, $\overline{O_R P_d}$ 和 $\overline{P_{oz} P_w}$ 平行,因此有以下关系

$$\overline{O_R P_d} // \overline{P_{oz} P_w} \Rightarrow \overline{O_R P_d} \times \overline{P_{oz} P_w} = 0 \quad (8)$$

而在像平面偏转后的模型中,由于将像平面偏转了 θ , $\overline{O_R P_d}$ 和 $\overline{P_{oz} P_w}$ 不再平行,它们的夹角为 θ ,因此得出以下关系

$${}^C Y_u = \frac{f \cdot {}^C Y_w}{{}^C Z_w \cos \theta + {}^C Y_w \sin \theta} \quad (3)$$

考虑镜头的畸变,理想图像坐标 $({}^C X_u, {}^C Y_u)$ 到实际图像坐标 $({}^C X_d, {}^C Y_d)$ 的变换为

$${}^C X_u = {}^C X_d + \delta_x, {}^C Y_u = {}^C Y_d + \delta_y \quad (4)$$

δ_x 和 δ_y 是透镜径向畸变值,它与图像点在图像中的位置有关,可以表示为

$$\begin{aligned} \delta_x &= k_1 {}^C X_d ({}^C X_d^2 + {}^C Y_d^2) \\ \delta_y &= k_1 {}^C Y_d ({}^C X_d^2 + {}^C Y_d^2) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 k_1 为透镜畸变系数.

1.3.3 图像物理坐标系 $\{R\}$ 到图像像素坐标系 $\{I\}$ 的变换

在 Tsai 的 RAC 标定法中,有

$$\begin{aligned} {}^I X_d &= -s_x d_x' - {}^C X_d + u_0 \\ {}^I Y_d &= -d_y' - {}^C Y_d + v_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 (u_0, v_0) 为计算机图像中心坐标, d_x' 和 d_y' 分别为图像平面上 x, y 方向单位像素的距离, s_x 为两者之比即尺度因子, (u_0, v_0) 为主点 O_R 的像素坐标.

1.3.4 图像物理坐标系 $\{R\}$ 到世界坐标系 $\{W\}$ 的变换

将方程(2)代入方程(4)和(5),可以推出图像物理实际坐标 $({}^C X_d, {}^C Y_d)$ 和世界坐标 $({}^W X_w, {}^W Y_w, {}^W Z_w)$ 的关系如下

$$\frac{{}^C X_d}{{}^C X_w} = \frac{{}^C Y_d \cos \theta}{{}^C Y_w} \Rightarrow {}^C X_d {}^C Y_w - {}^C Y_d \cos \theta {}^C X_w = 0 \quad (9)$$

由式(6),可以得到

$${}^C X_{di}' = -({}^I X_{di} - u_0) d_x', {}^C Y_{di}' = -({}^I Y_{di} - v_0) d_y' \quad (10)$$

这里 ${}^C X_{di}' = {}^C X_{di} s_x$, ${}^C Y_{di}' = {}^C Y_{di}$

将式(2)和(10)代入式(9),使用非共面点进行标定,空间点及其图像投影点可以得到以下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} {}^C Y_{di}' {}^W X_{wi} \\ {}^C Y_{di}' {}^W Y_{wi} \\ {}^C Y_{di}' {}^W Z_{wi} \\ {}^C Y_{di}' \\ -{}^C X_{di}' {}^W X_{wi} \\ -{}^C X_{di}' {}^W Y_{wi} \\ -{}^C Y_{di}' \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} t_y^{-1} s_x r_{11} \cos \theta \\ t_y^{-1} s_x r_{12} \cos \theta \\ t_y^{-1} s_x r_{13} \cos \theta \\ t_y^{-1} s_x t_x \cos \theta \\ t_y^{-1} s_x r_{21} \\ t_y^{-1} s_x r_{22} \\ t_y^{-1} s_x r_{23} \end{bmatrix} = {}^C X_{di}' \quad (11)$$

如果有一系列数目大于 7 的空间坐标 $({}^W X_w, {}^W Y_w, {}^W Z_w)$ 以及与之相对应的图像坐标

$({}^lX_d, {}^lY_d)$, 用最小二乘法可以解出上述线型方程组的 7 个变量

$$a_1 = t_y^{-1} s_x r_{11} \cos \theta, a_2 = t_y^{-1} s_x r_{12} \cos \theta, a_3 = t_y^{-1} s_x r_{13} \cos \theta, a_4 = t_y^{-1} s_x t_x \cos \theta$$

$$a_5 = t_y^{-1} r_{21}, a_6 = t_y^{-1} r_{22}, a_7 = t_y^{-1} r_{23} \quad (12)$$

根据式(12)求出的 7 个变量, 便可以计算出摄像机外参量 ${}^cR_w, t_x, t_y$.

1.5.1 确定 $|t_y|$

$$|t_y| = \frac{1}{\sqrt{a_5^2 + a_6^2 + a_7^2}} \quad (13)$$

1.5.2 确定 s_x

$$s_x = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} |t_y| / \cos \theta \quad (14)$$

1.5.3 确定旋转矩阵 R 与 t_x 及判断 t_y 的符号

$$r_{11} = a_1 t_y / (s_x \cos \theta), r_{12} = a_2 t_y / (s_x \cos \theta), \\ r_{13} = a_3 t_y / (s_x \cos \theta), r_{21} = a_5 t_y, r_{22} = a_6 t_y, \\ r_{23} = a_7 t_y, t_x = a_4 t_y / \cos \theta \quad (15)$$

先假定 t_y 为正, 取世界坐标系中任一标志点, 则可以计算出其在摄像机坐标系下的坐标

$${}^cX_u = r_{11} {}^wX_w + r_{12} {}^wY_w + r_{13} {}^wZ_w + t_x, \\ {}^cY_u = r_{21} {}^wX_w + r_{22} {}^wY_w + r_{23} {}^wZ_w + t_y \quad (16)$$

同时取这个坐标点在图像上的投影点 $({}^lX_d, {}^lY_d)$, 在实际摄像机系统中, cX_u 与 lX_d 应该同号, 如果计算出两者异号, 则 t_y 取负. 最后由旋转矩阵的正交性可以计算出 r_{31}, r_{32}, r_{33}

$$r_{31} = r_{12} r_{23} - r_{13} r_{22}, r_{32} = r_{13} r_{21} - r_{11} r_{23}, \\ r_{33} = r_{11} r_{22} - r_{12} r_{21} \quad (17)$$

1.5.4 计算有效焦距 f, t_z 及径向畸变系数 k_1

当不考虑透镜径向畸变时(即 $k_1 = 0$), 式(7)对一系列的标定块形成了一个超定方程组, 可以用最小二乘法求解 f, t_z . 当存在径向畸变时($k_1 \neq 0$), 仍先不考虑径向畸变计算出 f, t_z 的值, 然后将求出的 f, t_z, θ 及 $k_1 = 0$ 作为初始条件, 通过 Levenberg-Marquardt 方法^[10]对式(7)进行非线性优化, 求出 f, t_z, θ 及 k_1 的真实值. 最后再将前面几步求出的所有参量值作为初值代入(7)再进行非线性优化得到所有参量的真实值.

2 倾斜摄像机系统的标定实验结果与分析

2.1 实验系统装置图

如图 2, 标定块被固定在电动位移台上, 通过电脑驱动电动位移台移动标定块. 半导体激光二极管产生的激光平面垂直照射在标定块上, 激光平面与标定块移动的方向平行. 图像采集器件为 16 mm 的镜头和 1 280 × 1 024 像素的像平面, 镜头光轴与

激光平面的夹角 β 为 45° . 相邻标定孔的距离为 4 mm, 孔的直径为 1 mm, 标定孔大小的选择基于 16 mm 的焦距下工作距离在 15 ~ 30 cm. 标定孔过大会导致工作距离较近的时候超出视场范围. 而标定孔过小会降低图像处理的准确度. 世界坐标系的原点位于标定块处于电动位移台零刻度时左上角第一个标定孔的中心, x 轴沿标定孔的横方向, y 轴沿标定孔的列方向, z 轴沿标定块移动的方向. 由此可以得到所有标定孔在世界坐标系中的坐标 $({}^wX_{wi}, {}^wY_{wi}, {}^wZ_{wi})$.

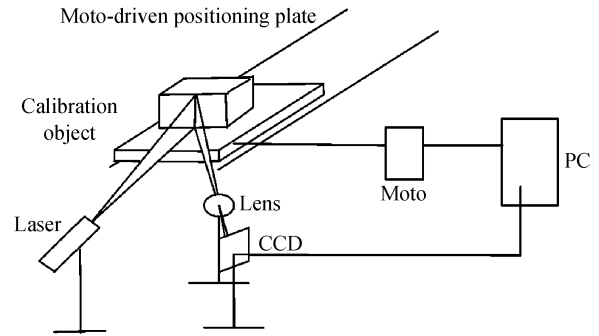


图 2 标定系统的结构

Fig. 2 The structure of calibration system

2.2 像平面偏转提高摄像机系统的景深

首先让像平面平行于镜头平面, 如图 3. 当标定块从前基准平面 ${}^wZ_w = 79$ mm 移动到 ${}^wZ_w = 39$ mm 的位置时, 标定块照片就出现了明显的离焦, 这说明系统的景深小于 40 mm. 接着根据 Scheimplug 条件偏转像平面, 使其和镜头平面有一个 30° 的夹角. 如图 4, 当标定块从 ${}^wZ_w = 9$ mm 移动到 ${}^wZ_w = 159$ mm

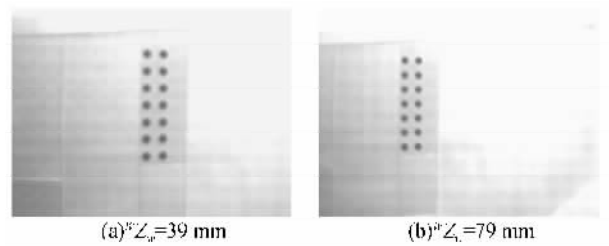


图 3 像平面平行于镜头平面时标定块在不同 wZ_w 处的照片
Fig. 3 Image of the calibration object in different wZ_w when the image plane parallel to the lens plane

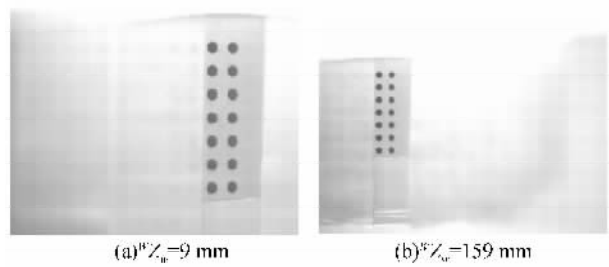


图 4 像平面偏转 30° 后标定块在不同 wZ_w 处的照片
Fig. 4 Image of the calibration object in different wZ_w after tilting image plane 30°

的位置时,成像仍然清晰,即系统景深可以达到 150 mm. 实验证明采用 Scheimpflug 条件后的系统景深是像平面平行于镜头平面时的 3 倍左右. 图 5 和图 6 分别为 θ 等于 45° 和 15° 时标定块在 ${}^wZ_w = 9$ mm 和 ${}^wZ_w = 159$ mm 的照片. 因为符合 Scheimpflug 条件的 θ 只有一个,所以这个角度大或小都不可能让标定块在整个 150 mm 的景深范围内清晰成像.

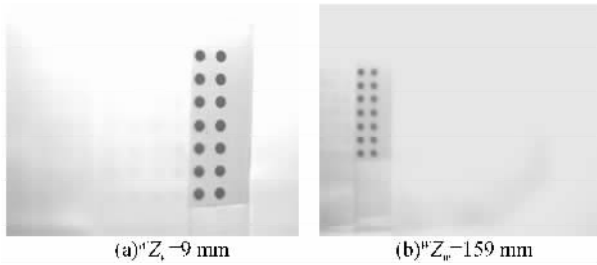


图 5 像平面偏转 45° 后标定块在不同 wZ_w 处的照片
Fig. 5 Image of the calibration object in different wZ_w after tilting image plane 45°

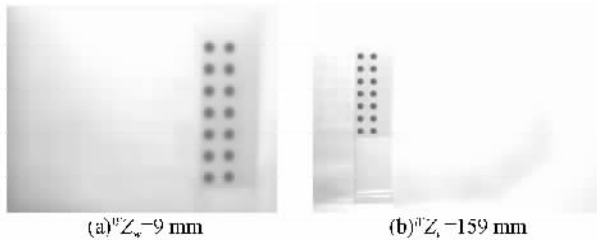


图 6 像平面偏转 15° 后标定块在不同 wZ_w 处的照片
Fig. 6 Image of the calibration object in different wZ_w after tilting image plane 15°

2.3 用修正后的 RAC 法对倾斜摄像机系统进行标定

将平台从 ${}^wZ_w = 9$ mm 移动到 ${}^wZ_w = 159$ mm, 同时采集了 10 幅标定块图片. 对采集的图片进行二值化和探测标定孔重心的亚像素图像处理, 找出了所有标定孔重心在图像中的坐标. 实验共得到 140 个标定点的世界坐标 $({}^wX_{wi}, {}^wY_{wi}, {}^wZ_{wi})$ 和与之相对应的图像坐标 $({}^iX_{di}, {}^iY_{di})$. 首先设定初值 (u_0, v_0) 为 $(640, 512)$ pixel, $\theta = 30^\circ$, 通过修正后的 RAC 法定标, 得到的标定结果为

$${}^cR_w = \begin{bmatrix} -0.9485 & -0.0178 & 0.3162 \\ 0.0075 & -0.999 & 0.0025 \\ 0.3162 & 0.0011 & -0.9487 \end{bmatrix}$$

$${}^cT_w = [-53.7429 \quad 5.3220 \quad 105.5385]^T$$

$$f = 16.229 \text{ mm}, k_1 = -0.0052, s_x = 1.0014$$

$$(u_0, v_0) = (532.8, 584.5) \text{ pixel}, \theta = 27.32^\circ$$

利用标定出来的参量将探测出的图像坐标 $({}^iX_{di}, {}^iY_{di})$ 联合已经知道的世界坐标 ${}^wZ_{wi}$ 可以求出 $({}^wX_{wi}, {}^wY_{wi}, {}^wZ_{wi})$, 与标准的 $({}^wX_{wi}, {}^wY_{wi}, {}^wZ_{wi})$ 对比, 便得到在世界坐标系下的标定标准偏差 δ_w . 反之用标定出来的参量将标准的 $({}^wX_{wi}, {}^wY_{wi}, {}^wZ_{wi})$

变换到图像空间再和探测出来的图像坐标对比, 便得到在图像坐标系下的标定标准偏差 δ_i . 实验中测得

$$\delta_w = 0.024 \text{ mm}, \delta_i = 0.603 \text{ pixel}$$

从实验结果可以看出标定的准确度较高, 修正后的 RAC 法可以用于倾斜的摄像机系统的定标.

3 结论

偏转像平面建立了大景深摄像机系统, 并基于像平面偏转后的新模型对传统的摄像机模型进行了修正, 在理论上完整地推导了三维扫描系统摄像机的物象关系方程, 基于此模型修正了 Tsai 的 RAC 标定法并利用修正后的 Tsai 标定法成功的进行了标定. 实验结果表明该方法标定准确度较高, 可应用于倾斜的摄像机模型.

参考文献

- [1] LI Bing, LUO Yi-ping, WANG Zhao, *et al.* Study on the rapid measuring method of multi light-knife for 3D profile[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):738-741.
李兵, 罗意平, 王昭, 等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究[J]. 光子学报, 2002, **32**(6):738-741.
- [2] XU Jian-qiang, WANG Yun-shan, SI Shu-chun, *et al.* Study on scan-phase-shifting profilometry for measurement of 3-D object shapes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1210-1213.
徐建强, 王蕴珊, 司书春, 等. 三维形貌测量的扫描相移法研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(10):1210-1213.
- [3] ZHANG Shun-de, LU Bing-heng, DING Yu-chen. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(6):533-536.
张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光, 2001, **28**(6):533-536.
- [4] BICKEL G, HAUSEL G, MAUL M. Triangulation with expanded range of depth[J]. *Opt Eng*, 1985, **24**(6):955-977.
- [5] SALVI J, MOUADDIB E, BATLLE J. An overview of the advantage and constraints of coded pattern projection techniques for autonomous navigation[C]. *IEEE Proc IROS* 97, 1997:1264-1271.
- [6] ZHANG Da-pu, LI Yu-shan, LIU Yang. Camera calibration based on image series[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1415-1419.
张大朴, 李玉山, 刘洋. 一种利用图像序列进行摄像机标定的方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(9):1415-1419.
- [7] SALVI J, ARMANGUÉ X, BATLLE J. A comparative review of camera calibration methods with accuracy evaluation[J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**:1617-1635.
- [8] 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 Int J Robot Automat*, 1987, **RA-3**:323-344.
- [9] SU Xuan-yu, LI Ji-tao. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 1999:200-220.

苏显渝,李继陶.信息光学[M].北京:科学出版社,1999:200-220.

recipes in C[M]. New York: Cambridge University Press, 1994.

[10] PRESS W, TEUKOLSKY S, VETTERLING W. Numerical

Modification of RAC Camera Calibration Method Based on Large Depth-of-view 3D Laser Scanner

LI Jian-feng^{1,2}, GUO Yong-kang¹, Wang Peng^{1,2}, ZHU Jian-hua¹, TANG Qin^{1,2}

(1 *Nano Photonics Research Technology Institute of Sichuan University, Chendu 610064, China*)

(2 *XinAoMDT Technology Co., Ltd, Langfang, Shandong 065001, China*)

Received date: 2006-09-19

Abstract: Base on the tilted camera model, new object-image equations are derived theoretically and the RAC method of Tsai is modified. Using the modified RAC method, the camera of large depth-of-view 3D laser scanning system is calibrated successfully. The experimental results show that the modified RAC method can solve the titled camera model. The standard deviation of calibration is lower than 0.03 mm.

Key words: Computer vision; Camera calibration; RAC method; Depth-of-view; 3-D scanning system



LI Jian-feng received his B. S. degree and M. S. degree from Sichuan University in 2003 and 2005 respectively. He is currently a Ph. D. degree candidate at Institute of Nano Photonics Research Technology, Department of Physics, Sichuan University, China. His research interests focus on machine vision and photo-electricity signal processing.