

文章编号 1004-924X(2017)02-0485-07

GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建

孔筱芳, 陈 钱*, 顾国华, 钱惟贤, 任 侃

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为减轻双目摄像机标定过程中对高精度靶标的依赖,实现摄像机参数的精确标定,并对空间坐标进行高精度重建,提出一种 GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建方法,采用 GPS 代替 2D 或 3D 靶标进行双目摄像机标定。将 GPS 的位置在视场中任意移动,由被标摄像机拍摄多组含有 GPS 的图像,利用空间三维坐标与图像二维坐标间的映射关系,结合摄像机成像模型和双目摄像机标定原理,标定出双目摄像机参数,并对空间坐标进行精确重建。通过空间重建坐标与 GPS 实际测量值之间的相对距离误差,对重建精度进行检验。实验证明,该方法能够克服双目摄像机标定过程中对高精度靶标的依赖,空间重建坐标具有较高的精度,相对距离误差从 1.56% 减小到 0.52%。

关键词:计算机视觉;双目摄像机标定;摄像机成像模型;GPS 坐标转换;空间坐标重建

中图分类号:TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0485

GPS-based binocular camera calibration and space coordinate reconstruction

KONG Xiao-fang, CHEN Qian*, GU Guo-hua, QIAN Wei-xian, REN Kan

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn

Abstract: To alleviate the dependence of binocular camera on high-accuracy target during calibration, achieve precise calibration of camera parameters and implement high-accuracy reconstruction of space coordinates, a GPS-based method for binocular camera calibration and space coordinate reconstruction is introduced, in which GPS instead of 2D or 3D targets is used to carry out the camera calibration. Through arbitrarily moving the GPS at the shooting site, multiple images with GPS are shot by calibrated camera; based on the mapping relation between spatial 3D coordinates and 2D image coordinates, the binocular camera parameters are calibrated and precise reconstruction of space coordinates is carried out by combining camera imaging model with calibration theory of binocular camera; finally, the reconstruction accuracy is tested in accordance with relative distance error between the space reconstruction coordinates and actual measurement values. The reconstruction results of proposed method are compared with the true data obtained by the GPS, and the results indicate that the method can help binocular camera to overcome the dependence on high-accuracy targets and equip the space recon-

收稿日期:2016-07-02;修订日期:2016-08-24.

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(No. BK20130769)

struction coordinates with relatively high accuracy, with a relative distance error decreased from 1.56% to 0.52%.

Key words: computer vision; binocular camera calibration; camera model; GPS coordinate transformation; space coordinate reconstruction

1 引 言

传统双目摄像机的标定精度通常依赖于 2D 或 3D 靶标^[1], 因此, 在标定过程中, 需要对靶标进行精密加工, 并要求其尽可能地覆盖整个拍摄视场。然而, 在实际应用中, 由于大型高精度 2D 或 3D 靶标加工和维护难度很大, 通常采用小型靶标进行标定, 而小型靶标的视场精度分布不均匀, 会产生较大的标定误差。为了提高标定精度, 实现空间坐标的准确重建^[2-5], 在实际测量应用中需要对传统的双目摄像机标定方法进行改进。

针对实际测量应用场景, O. Faugeras^[6]等提出了不需要靶标的摄像机自标定方法, 该方法利用摄像机内部参数间的约束进行标定, 但该方法的标定精度不能满足高精度的测量要求; 张建新^[7]等根据平行线“消隐点”理论, 提出用于双目视觉传感器自标定的“两步法”, 以解决双目视觉传感器之间位置关系的求取问题, 但在实际应用中, 高精度的平行直线方向矢量不易获得, 故影响测量精度; 马永壮^[8]等提出一种基于双目主动视觉的线性自标定算法, 从理论上推导出绝对二次曲面包含了摄像机全部内部参数和无穷远平面信息, 并根据双目视觉平移关系, 扩展了无穷远平面信息对绝对二次曲面的线性约束, 最终实现线性自标定和三维重建, 但该方法要求两个摄像机之间存在纯平移关系, 不具备一般性。以上摄像机标定方法虽然可以使标定过程不依赖于靶标, 但是仍然不能满足实际应用中对标定精度的要求。

GPS(Global Position System)全球定位系统利用卫星测距测时实现导航和定位。随着高精度实时动态定位技术 RTK(Real-time Kinematic)的发展, GPS 已能够实时提供观测站点在任意坐标系中的三维数据, 在保证 10km 系统精度下达到厘米量级的高精度^[9-10], 且具有全方位、全天候等特点, 作为快速采集数据与定位的高效工具, 已

得到广泛应用。

与传统的 2D 或 3D 标定靶标相比, GPS 能提供精度更高的空间坐标, 并能在视场中任意移动。综上所述, GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建方法可以较好地解决双目摄像机标定中对高精度靶标的依赖问题, 并实现了空间坐标高精度重建, 具有可行性。

2 GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建

GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建, 不需要使用 2D 或 3D 靶标, 而是根据 GPS 提供的高精度空间坐标信息, 利用空间三维坐标与图像二维坐标间的映射关系, 进行摄像机参数的标定及空间坐标重建。采用处于 RTK 工作模式^[11]的北斗星通 GPS, 获得的空间坐标信息作为 GPS 质心处坐标。图 1 为所用 GPS 的主视图与俯视图, 点 O 为其质心。



图 1 GPS 主视图与俯视图

Fig. 1 Front view and top view of GPS

2.1 GPS 坐标系及坐标转换

GPS 采用图 2 所示的 WGS-84 坐标系作为其导航坐标系。WGS-84 坐标系以地球的质心为坐标原点, X 轴指向 CTP 赤道和 BIH10984.0 零度子午线的交点, Z 轴指向 BIH10984.0 定义的协议地球极 CTP(Conventional Terrestrial Pole)方向, Y 轴与 X 轴、Z 轴构成右手坐标系^[11]。

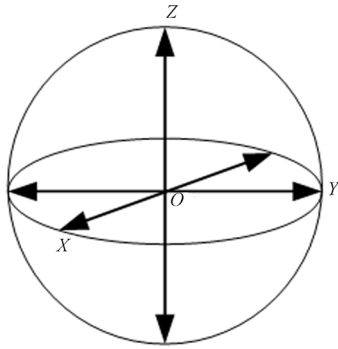


图 2 WGS-84 坐标系

Fig. 2 Coordinate system of WGS-84

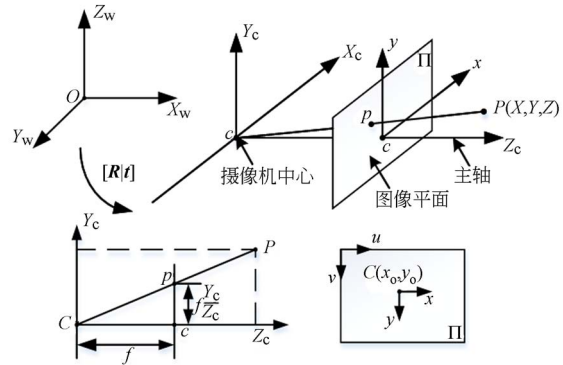


图 3 摄像机成像模型

Fig. 3 Imaging model for camera

对 GPS 导航坐标系进行电文解析,得到 GPS 质心位置的纬度 B 、经度 L 及高度 H 信息。为了更直观地表示 GPS 质心的位置信息,需要将 GPS 导航坐标系 (B, L, H) 转换到地球直角坐标系 (X_E, Y_E, Z_E) 中,其转换关系为:

$$\begin{cases} X_E = (N + H) \cos B \cos L, \\ Y_E = (N + H) \cos B \sin L, \\ Z_E = [N(1 - E^2) + H] \sin B, \\ E = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - E^2 \sin^2 B}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中, N 为椭球曲率半径, E 为椭球第一偏心率, a 为地球的长半径,且 $a = 6\,378\,137\text{m}$, b 为地球的短半径,且 $b = 6\,356\,752\text{m}$ 。

得到地球直角坐标系 (X_E, Y_E, Z_E) 后,还要将其转换到以 GPS 主站为坐标原点的世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 。设 GPS 主站 O 在地球直角坐标系中为 $P_{E0}(X_{E0}, Y_{E0}, Z_{E0})$, GPS 从站 A 在地球直角坐标系中为 $P_E(X_E, Y_E, Z_E)$, 则 GPS 从站 A 相对于 GPS 主站 O 的坐标为:

$$\begin{cases} X_w = X_{E0} - X_E, \\ Y_w = Y_{E0} - Y_E, \\ Z_w = Z_{E0} - Z_E. \end{cases} \quad (2)$$

2.2 GPS 双目摄像机标定

双目摄像机标定过程中包含的 4 个坐标系^[12] 如图 3 所示,分别为世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$, 摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$, 图像坐标系 $o_c - xy$ 和计算机图像坐标系 $o - uv$ 。

根据摄像机成像模型知^[13], 图像坐标系 $o - uv$ 与世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 之间的变换关系

如式(3)所示:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= s\mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \\ s\mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} &= s\mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \\ s\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} &= s\mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix}$ 为摄像机投影矩阵, \mathbf{A} 为摄像机内参矩阵, $\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix}$ 为摄像机外参矩阵。双目摄像机标定过程即为求解摄像机投影矩阵 \mathbf{M} 的过程。

由式(3)可得:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, s_i 为比例因子, $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, 1)^T$ 为 GPS 质心在世界坐标系中某一点 i 的齐次坐标表示, $(u_i, v_i, 1)^T$ 为点 i 对应的齐次图像坐标表示, m_{ij} 为 \mathbf{M} 矩阵的第 i 行第 j 列元素。

将式(4)的矩阵形式转化为方程组形式,得到包含比例因子 s_i 的 3 个方程:

$$\begin{cases} s_i u_i = m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14}, \\ s_i v_i = m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24}, \\ s_i = m_{31} X_{wi} + m_{32} Y_{wi} + m_{33} Z_{wi} + m_{34}. \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)中的第一式、第二式分别除以第三式,消去 s_i 后,有:

$$\begin{cases} m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14} - \\ u_i m_{31} X_{wi} - u_i m_{32} Y_{wi} - u_i m_{33} Z_{wi} = u_i m_{34}, \\ m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24} - \\ v_i m_{31} X_{wi} - v_i m_{32} Y_{wi} - v_i m_{33} Z_{wi} = v_i m_{34}, \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)写成矩阵形式,有:

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ & & & & & & & \dots & & & \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n Z_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 m_{34} \\ v_1 m_{34} \\ \dots \\ u_n m_{34} \\ v_n m_{34} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

实际上,投影矩阵 M 乘以任意不为零的常数并不影响 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 与 (u_i, v_i) 的关系。因此,

可以令式(7)中 $m_{34} = 1$,从而得到关于 M 矩阵 $m_{11} \sim m_{33}$ 元素的 $2n$ 个线性方程。令:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ & & & & & & & \dots & & & \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n Z_{wn} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{b} = [m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}]^T, \\ \mathbf{X} = [u_1, v_1, \dots, u_n, v_n]^T. \end{cases} \quad (8)$$

则式(8)可以表示成:

$$\mathbf{Ab} = \mathbf{X}. \quad (9)$$

采用最小二乘法可以求出式(9)中的 \mathbf{b} 矩阵,即:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{X}, \quad (10)$$

又因为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} = m_{34} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T & m_{14} \\ \mathbf{m}_2^T & m_{24} \\ \mathbf{m}_3^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中, $\mathbf{m}_i^T (i=1,2,3)$ 为投影矩阵 M 第 i 行前 3 个元素组成的行向量; $m_{i4} (i=1,2,3)$ 为投影矩阵 M 第 i 行第四列元素。则有 $m_{34} \mathbf{m}_3 = \mathbf{r}_3$, \mathbf{r}_3 是正交单位矩阵的第三行, $|\mathbf{r}_3| = 1$, 则有:

$$m_{34} = \frac{1}{|\mathbf{m}_3|}. \quad (12)$$

至此, M 矩阵中所有元素已知,即完成了双目摄像机的标定。

2.3 空间坐标重建

图 4 为两台摄像机组成的双目测量系统。假

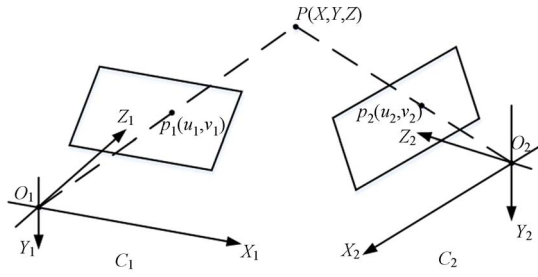


图 4 双目测量系统

Fig. 4 Binocular vision system

设空间中任意一点 $P(X, Y, Z)$ 在两个摄像机

C_1 与 C_2 所拍摄的图像上分别为点 $p_1(u_1, v_1)$, $p_2(u_2, v_2)$, 且摄像机 C_1 与 C_2 的投影矩阵分别为 \mathbf{M}_1 与 \mathbf{M}_2 , 则有:

$$\begin{cases} Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \\ Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (13)$$

消去式(13)中的 Z_{c1}, Z_{c2} , 得到关于 (X, Y, Z) 的 4 个线性方程:

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases}, \quad (14)$$

将式(14)写成矩阵形式,有:

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

采用最小二乘法即可求出空间重建点 P 的坐标 (X, Y, Z) 。

将获得的空間重建点 $P(X, Y, Z)$ 与点 P 处 GPS 质心的实际测量值 (X_p, Y_p, Z_p) 进行比较, 得到空间重建坐标在 X, Y, Z 方向上的误差 dX, dY, dZ , 有:

$$\begin{cases} dX = |X - X_p| \\ dY = |Y - Y_p| \\ dZ = |Z - Z_p| \end{cases}. \quad (16)$$

由式(17)可得空间重建坐标相对距离误差 err :

$$err = \frac{\sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2}}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2}} = \frac{\sqrt{(X_p - X)^2 + (Y_p - Y)^2 + (Z_p - Z)^2}}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2}}. \quad (17)$$

3 实验与分析

实验采用的双目摄像机 C_1 与 C_2 均为 Basler

acA640-90gc, CCD 尺寸为 $4.88 \text{ mm} \times 3.66 \text{ mm}$, 分辨率为 658×492 , 镜头标注焦距为 $F=12 \text{ mm}$, 图 5 为实验示意图。

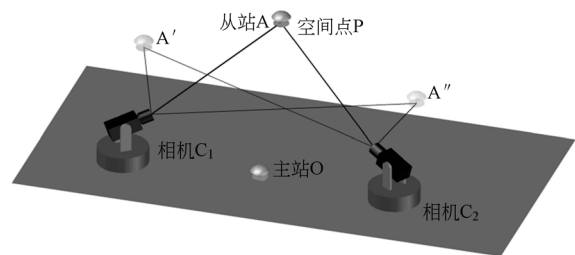


图 5 实验示意图

Fig. 5 Experiment schematic diagram

3.1 实验结果

实验中, 将摄像机 C_1 与 C_2 按图 5 所示放置, 固定 GPS 主站 O 的位置, 并记录其质心的纬度、经度和高度信息。在双目摄像机的公共视场范围内移动 GPS 从站 A , 同时拍摄其在 C_1 与 C_2 中的图像, 并记录相应的 GPS 质心坐标信息。表 1 为部分 GPS 质心的纬度、经度和高度信息 P_{GA_i}

$(B_{A_i}, L_{A_i}, H_{A_i}) (i=1, 2, \dots, n)$, 世界坐标系坐标信息 $P_i(X_i, Y_i, Z_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 以及 GPS 质心在图像 $\{I_i^l, I_i^r\} (i=1, 2, \dots, n)$ 中的坐标信息。

分别采用本文标定方法(记为 GPS 标定)与文献[14]的标定方法(记为 3D 靶标标定)进行双目摄像机标定, 得到投影矩阵 M_1 与 M_2 , 计算出空间重建点 P 坐标, 并根据式(17)得到空间坐标重建相对距离误差 err , 如表 2 所示。从表 2 可以看出, GPS 标定的空间坐标重建相对距离误差比 3D 靶标的小, 具有较高的空间重建精度, 相对于 3D 靶标标定而言, GPS 标定将空间重建坐标相对距离误差从 1.56% 减小到 0.52%。

分别采用 GPS 标定和 3D 靶标标定进行 20 次实验, 对 20 个不同的空间坐标进行重建, 并分

别计算空间重建坐标在 X, Y, Z 方向上的误差 dX, dY, dZ 。结果如图 6 所示(彩图见期刊电子版), 其中红色折线为结果在 X, Y, Z 方向上空间坐标的真实值(由 GPS 获得), 绿色折线为 GPS 标定得到的 X, Y, Z 方向上该点的实际值, 蓝色折线为 GPS 标定在 X, Y, Z 方向上的误差 dX, dY, dZ , 黑色折线为 3D 靶标标定得到的 X, Y, Z 方向上该点的实际值, 紫色折线为 3D 靶标标定对应的误差。表 3 为两种方法在 X, Y, Z 方向上的平均误差。从图 6 能看出, 采用 GPS 标定得到的空间重建坐标与实际坐标位置基本重合, 且在 X, Y, Z 方向上的误差较稳定, 其空间坐标重建精度较 3D 靶标标定方法具有较大的提高。

表 1 实验部分坐标

Tab. 1 Partial experimental coordinates

	$(B, L, H)(^\circ, ^\circ, m)$	$(X, Y, Z)(m)$	$(u, v)(pixel)$
1	(32.02779439207, 118.85694708176, 27.2832)	(1.3106, 0.0629, 2.2517)	(160, 222), (172, 177)
2	(32.02779469088, 118.85695229788, 27.2928)	(0.8836, -0.1857, 2.2849)	(190, 220), (204, 176)
3	(32.027789673923, 118.85695581545, 27.3841)	(0.6134, -0.3839, 2.5259)	(221, 218), (234, 175)

表 2 双目摄像机标定及空间坐标重建结果

Tab. 2 Binocular camera calibration and space coordinates reconstruction results

	GPS 标定	3D 靶标标定
M_1	$\begin{bmatrix} -85.7891 & 14.9046 & 57.8652 & 161.9852 \\ -24.1683 & 40.7384 & -6.8950 & 294.0728 \\ 0.0377 & -0.0781 & 0.0300 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -49.7912 & 39.4394 & 7.2032 & 206.6860 \\ -8.2426 & 5.8428 & -29.6091 & 289.4933 \\ 0.0802 & -0.1805 & -0.0770 & 1 \end{bmatrix}$
M_2	$\begin{bmatrix} -70.1278 & -9.1389 & 47.4065 & 177.0620 \\ -24.9924 & 43.1808 & -8.7621 & 245.8182 \\ 0.0497 & -0.0928 & 0.0132 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -36.1536 & -55.1801 & 4.9606 & 202.5730 \\ -10.6591 & 13.9421 & -23.6828 & 232.5408 \\ 0.1138 & -0.2316 & -0.0991 & 1 \end{bmatrix}$
P	(-2.3413, -1.6226, 2.2023)	(-2.3856, -1.6550, 2.1577)
err	0.52%	1.56%

表 3 两种方法在 X, Y, Z 方向上的平均误差Tab. 3 Average errors of two methods in X, Y, Z

	X 方向	Y 方向	Z 方向	err
GPS 标定	0.0061	0.0015	0.0086	0.0106
3D 靶标标定	0.0135	0.0086	0.0100	0.0189
精度提高数值	54.81%	82.56%	14%	43.92%

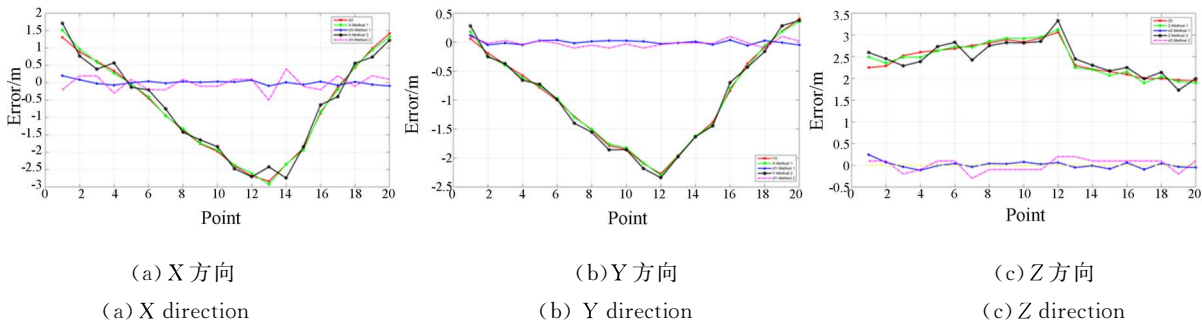


图 6 空间重建坐标 X,Y,Z 方向误差

Fig. 6 Errors of space reconstruction coordinates in X,Y,Z directions

3.2 误差分析

双目摄像机标定过程中,使用的标定点数 n 、图像中 GPS 质心坐标提取时的偏移量 d 等因素都会对摄像机参数标定和空间坐标的重建结果产生影响。因此,本文分别对标定点数 n 、GPS 质心提取偏移量 d 两方面进行仿真,分析各误差对空间坐标重建精度的影响。

针对标定点数 n 的实验中, n 分别取为 20, 50,100,1 000 进行双目摄像机标定及空间坐标重建,并进行 100 次实验,得到标定点数 n 与空间坐标重建相对距离误差 err 间的曲线关系,如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着标定点数 n 的增大,空间重建坐标相对距离误差 err 逐渐减小。由此可知,采用较多的标定点能够提高系统精度。

针对图像中 GPS 质心提取的偏移量 d 的实验中,对图像坐标 $(u_i, v_i), (i = 1, 2, \dots, n)$ 添加随机偏移量 $d = 1, 3, 5$ pixels, 并进行 100 次实验,得到 GPS 质心提取偏移量 d 与空间重建坐标相对距离误差 err 之间的曲线关系,如图 8 所示。由图 8 可以看出,随着 GPS 质心提取偏移量 d 逐

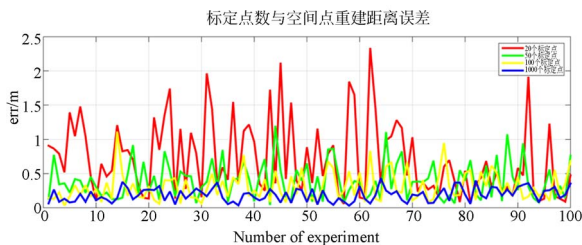


图 7 标定点数 n 与空间重建坐标相对距离误差 err 关系
Fig. 7 Relationship between calibration point number n and space reconstruction coordinates distance error err

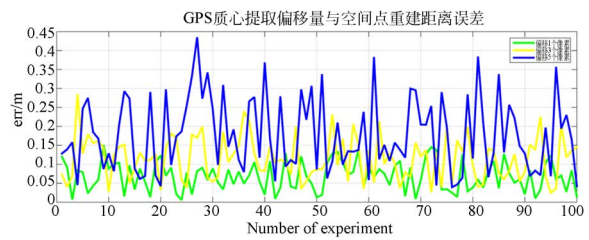


图 8 GPS 质心提取偏移量 d 与空间重建坐标相对距离误差 err 关系

Fig. 8 Relationship between GPS centroid extraction offset d and space reconstruction coordinates distance error err

渐增大,空间坐标重建相对距离误差 err 也逐渐增大。由此可知,采用较精确的 GPS 质心提取方法能够提高系统的精度。

4 结 论

本文提出一种 GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建方法,用高精度 GPS 代替 2D 或 3D 靶标,利用空间三维坐标与图像二维坐标间的映射关系,将 GPS 在视场中任意摆放,并由双目摄像机拍摄多组含有 GPS 质心的图像,根据摄像机成像模型和双目标定原理,标定摄像机参数,并对空间坐标进行重建。分别采用本文 GPS 标定与 3D 靶标标定方法对双目摄像机进行标定,实验证明,该方法能够克服双目标定过程对高精度靶标的依赖,得到的空间重建坐标具有较高的精度,其重建坐标相对距离误差从 1.56% 减小到 0.52%。

参考文献:

- [1] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [J]. *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition*, 1986:364-374.
- [2] 王琼华, 邓欢. 集成成像 3D 拍摄与显示方法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(2):153-158.
WANG Q H, DENG H. 3D pickup and display method of integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2):153-158. (in Chinese)
- [3] 李蓉, 邓春健, 邹昆. 一种基于 MRF 的单幅图像数据的三维重构方法研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(3):301-309.
LI R, DENG CH J, ZOU K. 3D reconstruction method based on single image data by MRF [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3):301-309. (in Chinese)
- [4] 杨宇, 阚凌雁, 于佳, 等. 基于激光扫描的人脸三维重建方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12):3946-3950.
YANG Y, KAN L Y, YU J, *et al.*. Face 3D reconstruction based on laser scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12):3946-3950. (in Chinese)
- [5] 谢易辰, 陈健, 闫斌, 等. 三维特征点距离特征集合求交匹配算法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8):2728-2732.
XIE Y CH, CHEN J, YAN B, *et al.*. Distance feature set intersection for 3D feature matching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8):2728-2732. (in Chinese)
- [6] FAUGERAS O D, LUONG Q T, MAYBANK S J. Camera self-calibration: Theory and experiments [C]. *ECCV*, 2012:321-334.
- [7] 张健新, 段发阶, 叶声华. “两步法”求取双目视觉传感器中摄像机位置关系[J]. *光电工程*, 1998(5):37-41.
ZHANG J X, DUAN F J, YE SH H. “Two Step” method for binocular sensor self-calibration [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998(5):37-41. (in Chinese)
- [8] 马永壮, 刘伟军. 一种基于双目主动视觉的线性自标定算法[J]. *机器人*, 2004, 26(6):486-490.
MA Y ZH, LIU W J. A linear self-calibration algorithm based on binocular active vision [J]. *ROBOT*, 2004, 26(6):486-490. (in Chinese)
- [9] 余小龙, 胡学奎. GPS RTK 技术的优缺点及发展前景[J]. *测绘通报*, 2007(10):39-41.
YU X L, HU X K. GPS RTK technique: merits, demerits and perspective [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007(10):39-41. (in Chinese)
- [10] 黑志坚, 周秋生, 曲建光, 等. GPS RTK 测量成果的精度估计及应用探讨[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(8):1295-1298.
HEI ZH J, ZHOU Q SH, QU J G, *et al.*. Precision estimation of GPS RTK survey production and its application discussion [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(8):1295-1298. (in Chinese)
- [11] 李志远. GPS 在目标跟踪坐标转换的应用研究[J]. *电脑编程技巧与维护*, 2012(19):7-8.
LI ZH Y. The application of GPS in coordinate transformation in target tracking [J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*, 2012(19):7-8. (in Chinese)
- [12] 吴丹. 计算机视觉中相机标定算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
WU D. *Research on camera calibration in computer vision* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge university press, 2003.
- [14] 潘静, 李为民. 基于 3D 立体靶标的摄像机标定算法[J]. *机械与电子*, 2007(5):3-5.
PAN J, LI W M. Algorithm of implementing 3D calibration board-based camera calibration [J]. *Machinery & Electronics*, 2007(5):3-5. (in Chinese)

作者简介:



孔筱芳(1990—),女,江苏南京人,博士研究生,2013年于南京理工大学获得电子信息工程学士学位,主要研究方向为图像处理。E-mail: xiaofangkong@163.com.

导师简介:



陈钱(1964—),男,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,1991年于华东工学院光电技术系获得硕士学位,1996年于南京理工大学获得博士学位,现为南京理工大学副校长,主要研究方向为光电信息探测与图像处理、光电信号处理与数字视频技术。E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn.