

中图法分类号: TB863 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)11-1584-07

论文引用格式: Guo L P, Chen X N, Liu B. Calibration of Kinect sensor with depth and color camera [J]. Journal of Image and Graphics 2014, 19(11): 1584-1590. [郭连朋, 陈向宁, 刘彬. Kinect 传感器的彩色和深度相机标定 [J]. 中国图象图形学报 2014, 19(11): 1584-1590.] [DOI: 10.11834/jig.20141105]

Kinect 传感器的彩色和深度相机标定

郭连朋, 陈向宁, 刘彬

装备学院, 北京 101400

摘要: 目的 针对现有的 Kinect 传感器中彩色相机和深度相机标定尤其是深度相机标定精度差、效率低的现状, 本文在现有的基于彩色图像和视差图像标定算法的基础上, 提出一种快速、精确的改进算法。方法 用张正友标定法标定彩色相机, 用泰勒公式化简深度相机中用于修正视差值的空间偏移量以简化由视差与深度的几何关系构建的视差畸变模型, 并以该模型完成 Kinect 传感器的标定。结果 通过拍摄固定于标定平板上的标定棋盘在不同姿态下的彩色图像和视差图像, 完成 Kinect 传感器的标定, 获得彩色相机和深度相机的畸变参数及两相机之间的旋转和平移矩阵, 标定时间为 116 s, 得到彩色相机的重投影误差为 0.33, 深度相机的重投影误差为 0.798。结论 实验结果表明, 该改进方法在保证标定精度的前提下, 优化了解题过程, 有效提高了标定效率。

关键词: 视差图像; Kinect 传感器; 畸变校正; 相机标定

Calibration of Kinect sensor with depth and color camera

Guo Lianpeng, Chen Xiangning, Liu Bin

Equipment Academy, Beijing 101400, China

Abstract: **Objective** Given the low efficiency and poor accuracy of the recent calibration method for the Kinect sensor with depth and color camera, we propose an improved algorithm that can quickly and accurately calibrate the color and depth camera of the Kinect sensor based on color and disparity images. **Method** The algorithm considers the features of color and depth simultaneously to improve the calibration of the Kinect sensor. The color camera was calibrated using Zhang's method, and the depth camera was calibrated using a Kinect disparity distortion correction model. This model represents the geometric relationship between disparity and depth and uses a spatially varying offset simplified by Taylor's formula that decays as Kinect disparity increases. **Result** The Kinect sensor was calibrated using multiple views of the calibration plane to obtain the color and disparity images that would be used to obtain the distortion parameters and the rotation and translation matrix between the two cameras. The spatial distortion parameter by Taylor's formula was streamlined to simplify the distortion correction model of the depth camera and to optimize the solution process. The reprojection error of the color camera was 0.33, whereas that of the depth camera was 0.798; the running time of our calibration process was 116 s. **Conclusion** Experiments show that the proposed algorithm can ensure the accuracy and improve the efficiency of the calibration process.

Key words: disparity image; Kinect sensor; distortion correction; camera calibration

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-07-06

第一作者简介: 郭连朋(1990—), 男, 装备学院光学工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理。E-mail: guolianpeng1990@126.com

0 引言

目标及场景的3维重建及显示在虚拟现实、设计仿真和人机交互等诸多领域都有十分广泛的应用。Kinect 等设备的出现为方便的获取3维信息提供了可能^[1-3],在3维视觉领域具有重要意义。Kinect 是由微软公司开发的体感外设,可同时获得彩色信息和深度信息,彩色信息由常规的彩色相机获得,深度信息由一个红外发射器和一个红外相机组成的深度传感器获得。由于 Kinect 传感器的彩色相机和深度相机不在同一位置,深度信息和彩色信息不能精确地对齐,而在物体3维重建、识别与跟踪等应用中,这种对应关系要求是非常严格的^[4-6]。因此,实际应用中需要通过相机标定得到两个相机之间的对应关系。

目前, Kinect 的标定方法主要有两类。一类是文献[7]提出的方法:遮挡激光发射器,在自然光条件下对粘贴于平坦木板上的棋盘标定图进行拍摄,获得标定棋盘的彩色图像和红外图像并提取角点,然后计算彩色相机和红外相机的内外参数。该方法简单有效,但由于得到的红外图像非常暗,标定结果不稳定。另一类标定方法是文献[8]提出的方法,忽略红外相机透镜畸变的影响,提出一种基于彩色图像和 Kinect 原始视差的标定两个相机畸变参数和深度参数的标定模型。但是该方法需要进行朗伯方程求解等一系列复杂的运算,求解过程复杂,运算速度慢。鉴于此,根据文献[8]提出的方法,通过简化标定模型,优化求解过程,在保证标定精度的前提下,有效提高了标定效率。

1 Kinect 深度测量原理

Kinect 传感器由一个红外激光发射器、一个红外接收相机和一个彩色相机组成,其深度测量的原理是三角测距原理^[9]。激光源投射出的一束红外激光,经过衍射光栅的衍射作用,被分成多束,在空间中形成了一个随深度改变而变化的散斑图案。红外接收相机接收该散斑图案,并与参考图案进行相关运算生成包含深度信息的视差图。其中,参考图案是存储在 Kinect 传感器里面的已知距离上的散斑图案。

如图1所示,假定目标 o 在距传感器距离为 z_0 的参考平面上,红外相机捕捉到目标 o 处的激光散

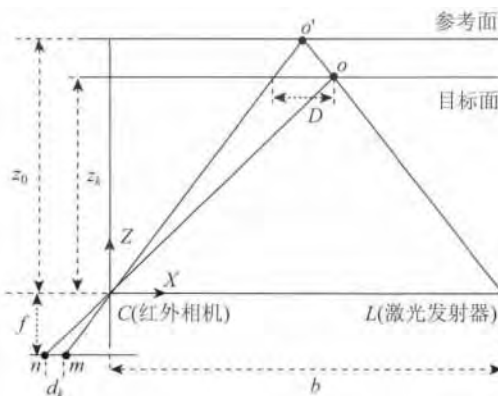


图1 测量视差与深度的关系图

Fig.1 Relation between the depth and measured disparity

斑在红外图像上成像的位置为 n 。当目标的深度发生变化时,图像上激光散斑的位置 n 就会沿 X 轴移动到 m 。测量出散斑 k 在图像上的视差 d_k ,那么

$$\frac{D}{b} = \frac{z_0 - z_k}{z_0} \quad (1)$$

并且

$$\frac{d_k}{f} = \frac{D}{z_k} \quad (2)$$

式中 z_k 表示目标距传感器的深度, b 指基线长度, f 指的是线外相机的焦距。 D 是点 k 在物空间的位移, d_k 是在红外图像上的视差。把式(2)中的 D 代入式(1),可得

$$z_k = \frac{z_0}{1 + \frac{z_0}{fb}d_k} \quad (3)$$

若固定参量 z_0 , f 和 b 已通过标定获得,则可根据式(3)由观测的视差推导出深度信息。

2 标定模型

2.1 彩色相机的内参数

彩色相机的内参数采用类似于文献[10]中包含径向校正和切向校正的针孔模型。彩色相机坐标系一点 $x_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ 到图像坐标系 $p_c = [u_c \ v_c]^T$ 的投影关系如方程式(4)~(6)。首先,要对该点进行归一化 $x_c = [x_n \ y_n]^T = \left[\frac{x_c}{z_c}, \frac{y_c}{z_c} \right]^T$ 。

$$x_g = [2k_3x_ny_n + k_4(r^2 + 2x_n^2) \times k_3(r^2 + 2y_n^2) + 2k_4x_ny_n] \quad (4)$$

$$x_k = (1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_5r^6)x_n + x_g \quad (5)$$

式中 \mathbf{x}_g 是经过切向畸变校正的新位置, \mathbf{x}_k 是经过径向畸变校正和切向畸变校正之后的新位置, $\mathbf{r}^2 = x_n^2 + y_n^2$, $\mathbf{k}_c = [k_1, \dots, k_5]$ 是包含畸变参数的向量。

最后,可以得到该点在图像坐标系中的坐标

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{cx} & 0 \\ 0 & f_{cy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{oc} \\ v_{oc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{f}_c = [f_{cx} \ f_{cy}]$ 是焦距, $\mathbf{p}_{oc} = [u_{oc} \ v_{oc}]$ 是主点坐标,该相机模型可以用 $\mathbf{L}_c = \{\mathbf{f}_c \ \mathbf{p}_{oc} \ \mathbf{k}_c\}$ 描述。

2.2 深度相机内参数

深度相机坐标与深度图像坐标的变换关系同彩色相机坐标与彩色图像坐标的变换关系是相似的。彩色相机的畸变模型是正向模型(即世界坐标到图像坐标),而为了计算方便,深度相机的畸变是利用反向模型^[8](即图像坐标到世界坐标)。深度相机的几何畸变模型可由方程式(5)(6)通过变换系数 \mathbf{x}_n 和 \mathbf{x}_k 获得。

根据式(3),视差 d_k 和深度 z_k 的关系可描述为

$$z_k = \frac{1}{c_1 d_k + c_0} \quad (7)$$

式中 c_1 和 c_0 是要标定的深度相机的内参数,如果直接用视差的测量值 d 代入式(7)进行标定(即不进行视差畸变校正),观测过程中的深度信息会产生一个固定的误差,可通过添加一个漂移量 Z_δ 进行修正,有效减少重投影误差^[7],即

$$z_{kk} = z_k + Z_\delta(u \ v) \quad (8)$$

本文尝试直接修正原始视差 d 来提高标定精度。根据文献[11],归一化误差非常接近指数衰减,因此,本文构建一个失真模型,利用一个衰减的空间偏移量来抵消随视差值的增加带来的误差

$$d_k = d + D_\delta(u \ v) \exp(\alpha_0 - \alpha_1 d) \quad (9)$$

式中 d 是从 Kinect 中获取的未经校正的视差值, D_δ 用来消除畸变的影响,表示与每个像素都有关系的空间畸变, d_k 为校正后的视差值。

方程式(7)(9)用来计算视差到深度的变换过程,而这些方程的逆可用来计算重投影误差,根据方程式(7)可得

$$d_k = \frac{1}{c_1 z_k} - \frac{c_0}{c_1} \quad (10)$$

式(9)存在指数关系,所以它的逆比方程式(7)的逆复杂地多。因此,本文根据泰勒公式将式(9)简化为

$$d_k = d + D_\delta(u \ v) \exp(\alpha_0 - \alpha_1 d) \approx d + D_\delta(u \ v) (1 + \alpha_0 - \alpha_1 d) \quad (11)$$

因此

$$d = \frac{d_k - D_\delta - D_\delta \alpha_0}{1 - \alpha_1} \quad (12)$$

因此深度相机的模型可描述为 $\mathbf{L}_d = \{f_d \ \mathbf{p}_{od} \ k_d \ c_0 \ c_1 \ D_\delta \ \alpha\}$, 其中前3个参量表示镜头的焦距、径向畸变和切向畸变,后4个参量用来描述视差到深度值的变换关系。

2.3 外参数和相对位姿

不同的参考系关系如图2所示。 $\{D\}$ 为深度相机坐标系, $\{C\}$ 为彩色相机坐标系, $\{V_i\}$ 为标定平板所在的坐标系, $\{W_i\}$ 为标定棋盘所在的坐标系。某一坐标系上的点可以通过 $\mathbf{I} = \{\mathbf{R} \ \mathbf{t}\}$ 转换到另外一个坐标系,其中 \mathbf{R} 是旋转变量, \mathbf{t} 是平移变量。例如,坐标系 $\{W_i\}$ 中一点 x_w 可以通过方程 $x_c = {}^{W_i}\mathbf{R}_c x_w + {}^{W_i}\mathbf{t}_c$ 转换到坐标系 $\{C\}$ 。

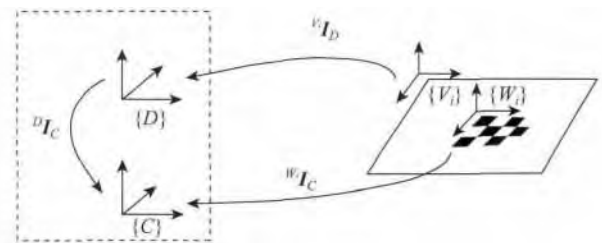


图2 坐标系变换关系图

Fig. 2 Reference frames and transformations

3 标定过程

3.1 初始标定

彩色相机的标定方法已经很成熟,利用 Zhang^[10] 的方法来对相机参数进行初始化。简单的说,分以下几步:

- 1) 在彩色相机拍摄的标定棋盘的彩色图像上提取角点;
- 2) 利用世界坐标系 $\{W_i\}$ 中已知角点位置计算单应矩阵;
- 3) 利用单应矩阵约束相机参数并利用线性方程求解。这里,畸变系数初值设为0。

同样的方法可以对深度相机的畸变参量进行初始化。然而,由于在深度图像中标定棋盘的角点是不可见的,所以要在标定板上人工选取4个点,同样利用 Zhang 方法^[10] 计算 $\{V_i\}$ 和 $\{D\}$ 之间的单应矩阵。这4个点的误差非常大,只适于用来获得初始的估计值(包括焦距、主点坐标和平移

向量 ${}^V I_D$), 用来估计出每个点的深度值。根据估计出的深度值和测得的视差值, 并利用方程式(7)建立一个线性的超定系统, 为深度参量(c_0 和 c_1)提供一个初始值。

3.2 求解相对位姿

对于深度相机, 仅仅知道相机相对于坐标系 $\{V_i\}$ 的位姿, 但坐标系 $\{V_i\}$ 和坐标系 $\{W_i\}$ 是没有对齐的。为了得到相机相对于坐标系 $\{W_i\}$ 的位姿, 我们可以利用坐标系 $\{V_i\}$ 和 $\{W_i\}$ 的共面关系, 在每个参考系内提取平面方程(用 $n^T x - \delta = 0$ 来定义平面, 其中 n 是单位法线, δ 是与原点的距离), 并把它当作一个常量。把旋转矩阵按列划分 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$, 并令 $n = [0 \ 0 \ 1]^T$ 和 $\delta = 0$, 那么在相机坐标系下的平面参数为

$$n = r_3 \text{ 且 } \delta = r_3^T t \quad (13)$$

彩色相机中平面的描述向量可以通过矩阵 $M_c = [n_{c1} \ n_{c2} \ \dots \ n_{cn}]$ 和 $b_c = [\delta_{c1} \ \delta_{c2} \ \dots \ \delta_{cn}]$ 联系起来^[12], 同样, 深度相机中的平面描述向量可通过 M_d 和 b_d 联系起来。那么彩色相机到深度相机的变换关系为

$${}^c P'_D = M_d M_c^T \quad (14)$$

$${}^c t_D = (M_c M_c^T)^{-1} M_c (b_c - b_d)^T \quad (15)$$

最终通过 SVD 分解得到旋转矩阵 ${}^c R_D = UV^T$ (USV^T 是 ${}^c R'_D$ 的 SVD 分解)。

3.3 非线性优化

非线性优化的目的是使所有参数的重投影误差平方的加权和最小。对于彩色相机, 误差为角点的测量位置 p_c 和重投影位置 \hat{p}_c 的欧氏距离。而对于深度相机, 误差为原始视差测量值 d 和视差的重投影值 \hat{d} (原始视差的估计值)的差。通过计算得到相机沿光线到标定平面的距离, 利用式(10)(12)得到原始视差的估计值 \hat{d} , 并利用它们对应的方差的倒数进行加权, 最终可得到代价函数为

$$c = \frac{\sum_{\text{像素数}} \|\hat{p}_c - p_c\|^2}{\delta_c^2} + \frac{\sum_{\text{像素数}} (\hat{d} - d)^2}{\delta_d^2} \quad (16)$$

式中 δ_c^2 为彩色相机测量误差的方差, δ_d^2 为深度相机测量误差的方差, 在这里, 方程式(16)是一个参数变量非常多的非线性方程。因此, 本文对方程式(16)进行修改, 利用由方程式(11)的校正的视差值 d_k 代替原始测量视差值 d , 并利用由方程

式(10)得到的校正后的视差估计值 \hat{d}_k 代替原始视差的估计值 \hat{d} , 最终把视差畸变参数和其他的参数分开, 即

$$c = \frac{\sum_{\text{像素数}} \|\hat{p}_c - p_c\|^2}{\delta_c^2} + \frac{\sum_{\text{像素数}} (\hat{d}_k - d_k)^2}{\delta_d^2} \quad (17)$$

最优化过程包括:

1) 初始化过程可以为彩色相机参量提供一个非常好的初值, 但是只能为深度相机的参数和位姿进行粗略的估计。因此, 第1步只对 L_d 和 ${}^D I_c$ 及其他固定参数进行修改。然后, 通过步骤2) 3) 两步交替迭代完成优化过程。

2) 固定 D_δ , 通过最小二乘算法调整方程式(17)的参数使其值 c 最小。

3) 对每一个像素, 对空间视差畸变参数 D_δ 进行优化。深度畸变模型的初始值(α 和 D_δ)并不重要, 将两个初始量设为0可得到非常精确的结果。

不断用该方法迭代, 直到残差收敛至最小。

3.4 视差畸变系数 D_δ 优化

D_δ 中的参量同其他参量是独立的, 并且 $D_\delta(u, v)$ 仅仅取决于像素(u, v)的观测值, 可以单独地对 D_δ 进行最优化。本文对每一个视差的测量值 d , 通过方程式(9)进行失真校正, 并根据方程式(10)得到视差的估计值 d_k 代入方程式(17)。最小化方程式(17)求解 D_δ 等价于最小化它们的中间项, 因此, 代价函数可描述为

$$c_d = \sum_{\text{图像数}} \sum_{u, v} (d + D_\delta(u, v) \exp(\alpha_0 - \alpha_1 d) - d_k)^2 \quad (18)$$

方程式(18)是一个二次方程, 因此 $D_\delta(u, v)$ 的最优解可通过求解线性方程获得。

4 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 将标定棋盘固定在一个平板上, 用 Kinect 传感器从多个角度对平板上的标定棋盘进行拍摄, 采集 80 幅彩色图像(如图3所示)和对应的 80 幅视差图像(如图4所示), 分成 A、B 两组。A 组的 60 幅彩色图像和视差图像, 用来对 Kinect 标定, B 组的 20 幅彩色图像和视差图像用来对标定结果进行验证, 计算重投影误差。

通过本文算法得到的相机内参数如表1、表2所示。

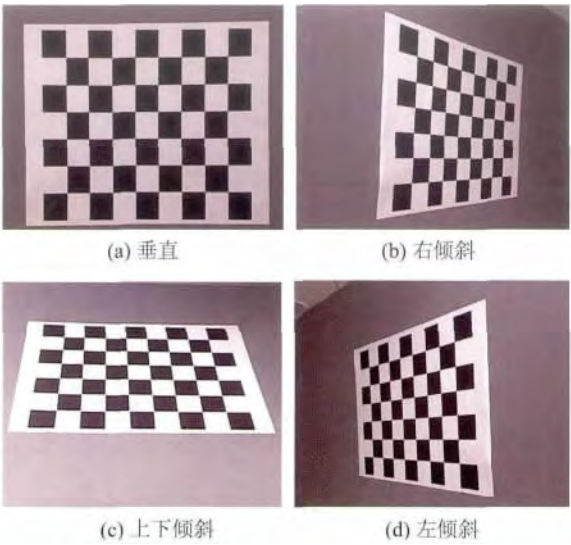


图3 彩色图像
Fig.3 Color images for calibration

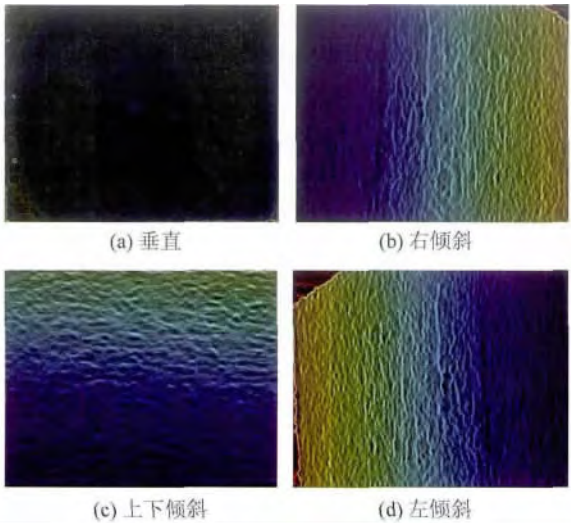


图4 视差图像
Fig.4 Disparity images for calibration

表1 彩色相机内参数

Table 1 Color camera intrinsics							
f_{cx}	f_{cy}	c_{cx}	c_{cy}	k_{c1}	k_{c2}	p_{c1}	p_{c2}
529.06 ± 0.40	530.34 ± 0.39	319.05 ± 0.34	263.98 ± 0.33	0.188 4 ± 0.001 0	-0.486 5 ± 0.003 6	-0.003 0 ± 0.000 1	0.000 7 ± 0.000 1

表2 深度相机内参数

Table 2 Depth camera intrinsics									
f_{dx}	f_{dy}	c_{dx}	c_{dy}	k_d	p_d	c_0	c_1	α_0	α_1
582.98 ± 0.37	589.88 ± 0.45	321.47 ± 0.24	232.50 ± 0.28	0.000 0 ± 0.000 0	3.12 ± 0.002	-0.002 858 ± 0.00	1.891 6 ± 0.037 4	0.003 1 ± 0.000 1	

从彩色相机到深度相机的旋转和平移关系为

$${}^cR_D = \begin{bmatrix} 0.999\ 9 & -0.001\ 28 & 0.005\ 02 \\ 0.001\ 36 & 0.999\ 87 & -0.015\ 86 \\ -0.005\ 00 & 0.015\ 87 & 0.999\ 86 \end{bmatrix}$$
$${}^c t_D = [-0.024\ 52\ 0.001\ 74\ -0.002\ 20]$$

在主频为 2.4 GHz 的笔记本电脑上本算法完成标定所用的标定时间为 116 s ,而 Herrera C 的方法在同样的电脑上标定的时间为 10 min。为了验证本文算法的精度 与 Herrera C 所提出的算法进行对比 ,两种算法分别利用 A 组数据进行标定 ,并利用 B 组数据计算重投影误差 ,得到重投影误差的标准差(表 3)。图 5 和图 6 分别是本文算法和 Herrera C 算法算出的空间畸变系数 ,并用 Matlab 中函数 imtool 1.5 图像形式显示出来。通过与 Herrera C 算法算出的畸变系数对比 ,可以发现二者是非常相似的。综上所述可以看出 ,两种方法都能很精确地完成 Kinect 传感器的标定。所以 本文算法不但能保证标定的精度 ,而且在原算法的基础上 ,有效提高了运算效率。

表3 重投影误差的标准差

Table 3 Std. deviation of reprojection error		
算法	彩色相机	深度相机
Herrera C	0.35	0.787
本文	0.33	0.798

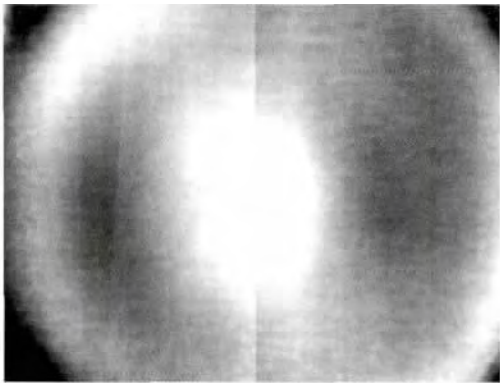


图5 本文算法空间畸变系数
Fig.5 Spatial distortion parameter of our method

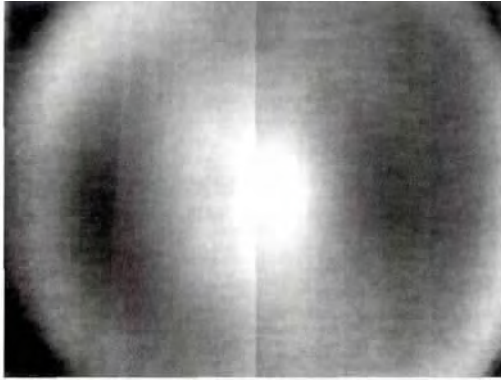


图6 Herrera C 算法空间畸变系数

Fig. 6 Spatial distortion parameter D_s of Herrera C

不对原始视差值 d 进行修正, 直接利用视差与深度的关系得到场景的深度信息, 并与彩色信息对齐, 得到场景的彩色 3 维点云如图 7 所示。由于无法精确获得场景中物体的深度信息, 导致场景中出现大面积的信息的缺失。根据本文标定结果, 得到场景的彩色 3 维彩色点云如图 8 所示。利用 Herrera C 算法, 对相同数据进行处理, 得到的场景的彩色 3 维点云如图 9 所示。通过对比, 可以看出, 如果不对原始视差 d 进行修正, 得到的场景彩色 3 维点云误差较大且容易导致信息缺失, 而本文标定方法和 Herrera C 算法提供的标定方法都能得到较精确的深度信息, 重建出场景的彩色 3 维点云能较好的保留场景中物体的细节信息。

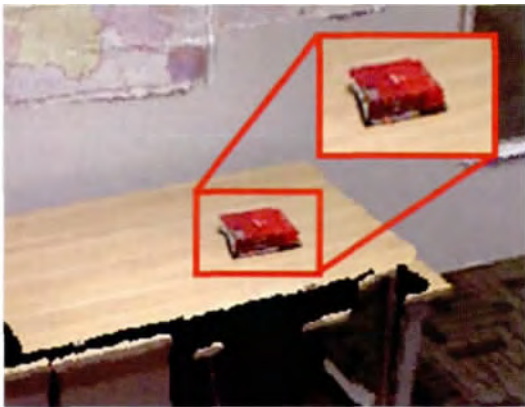


图7 未修正原始视差时得到的 3 维彩色点云

Fig. 7 Three dimensional colored point clouds with distorted disparity (i. e. without distortion correction)

5 结 论

针对现有的基于彩色图像和视差图像的标定算

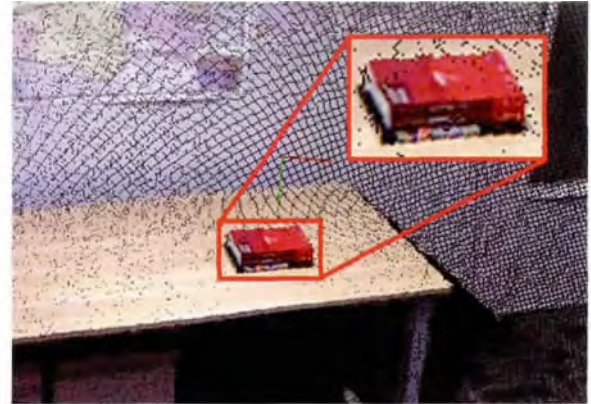


图8 本文算法得到的 3 维彩色点云

Fig. 8 3D colored point clouds by our method

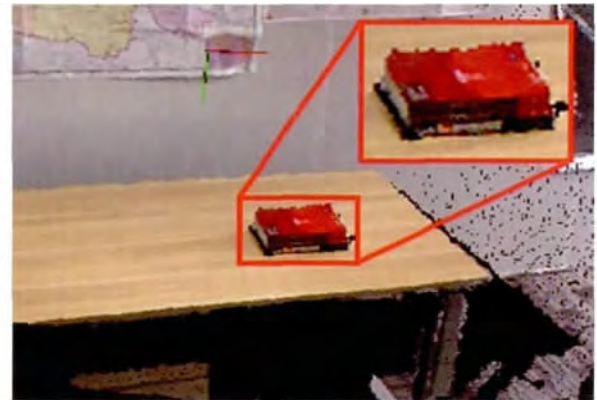


图9 Herrera C 算法得到的 3 维彩色点云

Fig. 9 3D colored point clouds by Herrera C

法求解过程复杂、运算速度慢的缺点, 本文从提高运算效率的角度出发, 提出了一种改进的 Kinect 传感器标定算法。用泰勒公式化简深度相机中用于修正视差值的空间偏移量 D_s , 以简化由视差与深度的几何关系构建的视差畸变模型, 最后对 D_s 进行非线性优化, 并通过对比实验结果验证本文算法的有效性。实验表明, 本文算法有效地提高了标定效率, 实现了精确、快速地完成 Kinect 传感器标定的目的, 相比于原来的算法, 更具有实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] Engelhard N, Endres F, Hess J, et al. Real-time 3D visual SLAM with a hand-held RGB-D camera [C]//The RGB-D Workshop on 3D Perception in Robotics at the European Robotics Forum, Robotdalen, Sweden: Association for Computing Machinery, 2011: 239-248.
- [2] Izadi S, Kim D, Hilliges O, et al. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera [C]//

- The 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Santa Barbara ,CA: ACM ,2011: 559-568.
- [3] Tong J , Zhou J , Liu L , et al. Scanning 3d full human bodies using kinects[J]. Visualization and Computer Graphics ,2012 , 18(4) : 643-650.
- [4] Lee S , Ho Y. Real-time Stereo view generation using kinect depth camera[C]//Proceedings of 2011 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Conference. Cambridge: Cambridge University Press ,2011: 123-133.
- [5] Lee W , Park N , Woo W. Depth-assisted real-time 3D object detection for augmented reality [C]// Proceedings of ICAT' 11. Osaka , Japan: WorldPress ,2011: 126-132.
- [6] Peter H , Michael K , Evan H , et al. RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments[J]. International Journal of Robotics Research ,2012 , 31(5) : 647-663.
- [7] Smisek J , Jancosek M , Pajdla T. 3D With Kinect[M]. London: Consumer Depth Cameras for Computer Vision ,2013: 3-25.
- [8] Herrera C , Kannala J , Heikkilä J. Joint depth and color camera calibration with distortion correction [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence ,2012 , 34(10) : 2058-2064.
- [9] Arieli Y , Freedman B , Machline M , et al. Depth mapping using projected patterns: U. S. 8150142 B2 [P]. 2012-4-3.
- [10] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence , 2000 , 22 (11) : 1330-1334.
- [11] Raposo C , Barreto J P , Nunes U. Fast and accurate calibration of a kinect sensor[C]//Proceedings of International Conference on 3DTV. Seattle , WA: IEEE ,2013: 342-349.
- [12] Unnikrishnan R , Hebert M. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera[J]. International Journal of Control , Automation and Systems ,2012 , 10 (6) : 1240-1244.