

简化 UKF 算法在摄像机标定中的应用

陈 益, 赵高鹏, 刘 娣

(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘要: 提出一种基于简化无迹卡尔曼滤波(UKF)算法的摄像机标定方法。将平面靶标图像上的不同特征点坐标视为同一个特征点在不同时刻的运动坐标。为避免欧拉角描述法带来的奇异问题,用单位四元数描述世界坐标系和摄像机坐标系之间的变换关系,选取摄像机内外参数作为系统状态变量。结合实际应用背景,简化标准 UKF 算法,将其用于摄像机参数估计,在保证标定精度的前提下降低运算复杂度。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 摄像机标定; 平面靶标; 简化 UKF 算法

Application of Simplified UKF Algorithm in Camera Calibration

CHEN Yi, ZHAO Gao-peng, LIU Di

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

【Abstract】 This paper proposes a camera calibration method based on simplified Unscented Kalman Filtering(UKF) algorithm. The feature points in the planar target images are considered as motion coordinates of one feature point at different time. To avoid the singular problem from Euler angle description, the quaternion is used to represent the transform relation between world coordinate system and camera coordinate system. The intrinsic and extrinsic camera parameters are taken as system state variables. According to the application background, it simplifies the original UKF algorithm and uses it to estimate camera parameters, and reduces the calculation complexity while the calibration precision is kept. Simulation results show that this method is effective.

【Key words】 camera calibration; planar target; simplified Unscented Kalman Filtering(UKF) algorithm

1 概述

根据摄像机获取的图像信息计算三维空间中物体的几何信息,即实现三维场景在二维平面上的投影,并由此重建和识别物体是计算机视觉研究的主要对象之一^[1]。在计算机视觉中,必须解决摄像机标定问题。摄像机标定是获取摄像机内部空间几何特性和光学特性(摄像机内部参数)、摄像机坐标系相对某个世界坐标系的三维位置和方向关系(外部参数)近似值的过程^[2]。

利用一幅或多幅高质量靶标图像,采用非线性优化算法进行摄像机参数估计是目前常用的标定方法。近年来,随着非线性滤波理论的发展,很多学者研究了如何将滤波算法应用于摄像机标定。文献[2-3]利用扩展卡尔曼滤波(Expanded Kalman Filtering, EKF)分别对摄像机的内外参数和外参数进行估计,但在扩展卡尔曼滤波方法中,状态分布用高斯随机变量来近似,由于对非线性系统模型的一阶线性化,使得解析的传递状态分布在此过程中不可避免地引入了线性化误差,降低了滤波精度甚至导致滤波器不稳定。因此,文献[4]提出采用无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filtering, UKF)方法,通过一组确定的、具有不同权值的 sigma 点逼近待估计状态,较好地解决了上述问题,取得了良好的滤波性能。

在标准 UKF 算法中,需要对系统状态变量进行扩展处理,即将系统原状态变量、输入噪声和观测噪声合并为新的系统状态。此处理在维数较高的情况下将极大增加算法复杂度。标准 UKF 算法将无迹变换同时应用于状态方程和测量方程,而不考虑它们是否是非线性方程。在实际应用中,噪声通常是加性的,且状态方程和测量方程并非都是非线性的。

对于此类混合系统,可以在保证滤波器性能的前提下,对标准 UKF 算法进行简化以降低其运算复杂度。

2 摄像机模型

为定量描述摄像机成像过程,需用到如图 1 所示的 3 种坐标系,即图像平面坐标系、世界坐标系和摄像机坐标系。

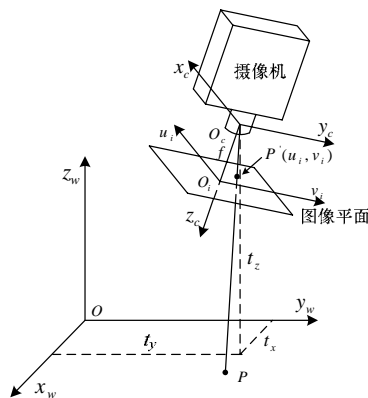


图 1 3 种坐标系

3 种坐标系具体定义如下:

(1) 图像平面坐标系 $O_i - u_i v_i$ 。原点 O_i 取为摄像机光轴与图像平面(靶面)的交点, u_i 轴和 v_i 轴分别平行于图像像素的行与列。

(2) 摄像机坐标系 $O_c - x_c y_c z_c$ 。原点 O_c 取为摄像机的心, z_c 轴为摄像机的光轴。

作者简介: 陈 益(1983 -),男,博士研究生,主研方向:光电测量技术;赵高鹏、刘 娣,博士研究生

收稿日期: 2009-04-30 E-mail: cy19830408@163.com

与 O_i 点的距离为摄像机焦距 f ， z_c 轴沿光轴指向摄影方向， x_c 轴、 y_c 轴分别与图像坐标系的 u_i 轴、 v_i 轴平行。

(3)世界坐标系 $O-x_w y_w z_w$ 。在环境中选择的一个基准坐标系，用来描述摄像机位置，可以根据具体环境选取。

设 $X_p^w (x_p^w, y_p^w, z_p^w)$ 表示世界坐标系中某物点 P 的三维坐标， $X_p^c (x_p^c, y_p^c, z_p^c)$ 是同一点 P 在摄像机坐标系中的坐标，则

$$\begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \\ z_p^c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^w \\ y_p^w \\ z_p^w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^w \\ y_p^w \\ z_p^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， \mathbf{T} 是 3×1 平移矩阵， $\mathbf{T} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ ； \mathbf{R} 是 3×3 正交旋转矩阵，为避免欧拉角描述姿态问题的奇异现象，由单位四元数描述如下：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

单位四元数的参数 q_0, q_1, q_2, q_3 满足如下约束：

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (3)$$

设物点 P 在图像平面上的投影点坐标为 $X_p^i (u_i, v_i)$ ，由针孔成像相机模型的透视原理可知式(4)成立。

$$z_p^c \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f_v}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \\ z_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & 0 & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \\ z_p^c \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $a_u = f_u/dx$ ， $a_v = f_v/dy$ 是摄像机在 x 方向和 y 方向上的有效焦距； (u_0, v_0) 为主点坐标。

式(1)~式(4)表征了二维图像坐标与三维世界坐标间的基本关系，若已知物点的世界坐标，则利用该变换关系可以求出相应的理想图像坐标。若知道像点的图像坐标和上述变换关系，则可以确定过摄像机光心的一条空间射线。摄像机标定是指获取模型参数 a_u ， a_v ， u_0 ， v_0 ， q_0 ， q_1 ， q_2 ， q_3 ， t_x ， t_y ， t_z 的值。

3 基于 SUKF 的摄像机参数估计

3.1 状态方程

获取标定靶上的特征点图像坐标，将图像平面上不同特征点的图像坐标视为同一个特征点在不同时刻的运动坐标，取摄像机的内外参数为状态变量，则 $\mathbf{x}_k = [a_u, a_v, u_0, v_0, q_0, q_1, q_2, q_3, t_x, t_y]^T$ ，可以建立如下系统状态方程^[5]：

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} \quad (5)$$

其中， \mathbf{x}_k ， \mathbf{x}_{k-1} 分别为 k 时刻和 $k-1$ 时刻的状态变量； $\Phi_{k|k-1}$ 为 $k-1$ 时刻到 k 时刻的状态转移矩阵，对同一幅图像而言，不同时刻的状态变量是不变的，因此， $\Phi_{k|k-1}$ 是 11×11 单位矩阵。

3.2 测量方程

选取标定靶上特征点的图像坐标 $X_p^i (u_i, v_i)$ 为观测量 y_k ，由于其对应的世界坐标 $X_p^w (x_p^w, y_p^w, z_p^w)$ 已知，因此综合式(1)~式(4)可得：

$$y_k = [h_1(\mathbf{x}_k), h_2(\mathbf{x}_k)]^T + v_k \quad (6)$$

其中， v_k 为系统观测噪声，一般主要来源于成像过程中的几何失真、图像的量化误差以及特征点提取误差等，本文认为

其为零均值高斯白噪声，且方差为 R_k 。

$$\begin{cases} h_1(\mathbf{x}_k) = u_i = a_u \frac{r_1 x_p^w + r_2 y_p^w + t_x}{r_7 x_p^w + r_8 y_p^w + t_z} + u_0 \\ h_2(\mathbf{x}_k) = v_i = a_v \frac{r_4 x_p^w + r_5 y_p^w + t_y}{r_7 x_p^w + r_8 y_p^w + t_z} + v_0 \end{cases} \quad (7)$$

应注意，四元数不是刚体姿态的最小参数描述，它给出了一个额外自由度，因此，每次运算后必须将四元数规范为单位量。

3.3 摄像机标定中的 SUKF 算法推导

在式(5)~式(7)组成的系统中，状态方程是线性的，测量方程是非线性的，且观测噪声 v_k 为加性高斯噪声。对于此类混合系统，文献[6]证明在进行 UKF 滤波运算时，无需对系统状态进行扩展，且可以使用和卡尔曼滤波方法相同的一步预测方程，而其他非线性部分则仍然保持 UKF 算法的特征。将上述 UKF 和 KF 的混合滤波称为简化的 UKF(Simplified UKF, SUKF)算法，则对于本文中的摄像机标定系统，推导 SUKF 算法流程如下：

(1) Sigma 采样点权值设定

采用比例修正对称采样产生增广状态的 Sigma 点集 χ^n ，定义其权值 $W_0^m, W_0^c, W_i^m, W_i^c$ 形式如下：

$$\begin{cases} W_0^m = \lambda / (L + \lambda) \\ W_0^c = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^m = W_i^c = 1 / [2(L + \lambda)] \quad i = 1, 2, \dots, 2L \end{cases} \quad (8)$$

其中， L 为系统状态维数，本文中 $L=11$ ； $\lambda = \alpha^2(L+k) - L$ 是一个标量； α 用于设置 Sigma 点集到均值点的距离； k 为比例参数，通常设置为 0 或 $3-L$ ； β 用于融入验前信息，对于高斯分布， $\beta=2$ 是最优的。

(2) 初始化

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = E(\mathbf{x}_0) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T] \quad (10)$$

计算状态预测值和方差

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \Phi_{k|k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T = \mathbf{P}_{k-1} \quad (12)$$

计算 Sigma 采样点

$$\chi_k = [\hat{\mathbf{x}}_k \quad \hat{\mathbf{x}}_k \pm \sqrt{(L+\lambda)\mathbf{P}_k}] \quad (13)$$

时间更新

$$\mathbf{Y}_{k|k-1} = [h_1(\chi_k), h_2(\chi_k)]^T \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathbf{Y}_{i,k|k-1} \quad (15)$$

测量更新

$$\mathbf{P}_{yy,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c (\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)(\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)^T + \mathbf{R}_k \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{xy,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c (\mathbf{Y}_{i,k} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)(\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)^T \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xy,k} \mathbf{P}_{yy,k}^{-1} \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k^-) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{yy,k} \mathbf{K}_k^T \quad (20)$$

在本文中，由于系统状态方程为线性方程，因此式(11)、式(12)直接采用 KF 中一步预测的计算公式进行运算，而不必用多个采样点来近似逼近。滤波算法是基于离散状态模型的，而上述状态方程是连续的，因此，必须对其进行离散化处理，本文采用 4 阶 Runge-Kutta 法实现。

4 仿真实验

为验证本文提出的摄像机标定算法的有效性,利用 Matlab 进行数值仿真,仿真条件如下:选取 15×10 、间距为 20 mm 的共面特征点阵模拟标定靶标,所有特征点空间坐标的 Z 坐标均为 0。设摄像机内外参数的真实值分别为 $a_u=1\ 375$, $a_v=1\ 500$,主点坐标 $(u_0, v_0)=(176, 144)$,旋转矩阵的单位四元数表示为 $q=[0.948\ 2, 0.055\ 3, 0.168\ 4, 0.263\ 6]^T$,平移矩阵 $T=[95.857, 110.342, 287.149]^T$ 。考虑图像采样量化误差和特征点提取误差,并假设这部分误差通过在图像坐标上叠加标准偏差为 0.5 个像素的随机噪声实现。

为比较不同滤波方法用于摄像机标定中的效果,下文根据上述摄像机内外参数等仿真条件分别采用标准 UKF, SUKF 和 EKF 方法进行标定实验,结果如表 1 所示。

表 1 仿真系统标定结果

参数	标准 UKF	SUKF	EKF
a_u/pix	1 372.355 3	1 372.355 3	1 368.666 2
a_v/pix	1 495.607 0	1 495.607 0	1 490.174 5
u_0/pix	177.498 6	177.498 6	178.373 5
v_0/pix	145.626 0	145.626 0	148.581 3
q_0	0.948 3	0.948 3	0.948 7
q_1	0.055 4	0.055 4	0.055 3
q_2	0.168 3	0.168 3	0.166 4
q_3	0.263 3	0.263 3	0.263 1
t_x/mm	97.549 8	97.549 8	101.497 4
t_y/mm	112.154 7	112.154 7	117.899 2
t_z/mm	288.247 2	288.247 2	289.843 6
相对单次 运行时间	1.000 0	0.350 0	0.280 0

从表 1 可以看出,标准 UKF 方法用于摄像机标定时,与 EKF 方法相比,其标定精度很高,但以计算时间为代价。而 SUKF 方法具有与标准 UKF 方法相当的标定精度,且计算效率高于标准 UKF 方法。

5 结束语

本文方法为非线性滤波算法在摄像机标定中的应用提供了参考。在下一步工作中,笔者将研究并解决以下问题:(1)本文将摄像机成像模型假设为线性模型,未考虑镜头的非线性畸变;(2)非线性滤波方法对初值的依赖性较大,如何选取合适的初值。

参考文献

- [1] 马颂德,张正友.计算机视觉[M].北京:科学出版社,1998.
- [2] 翟晋,周富强,张广军.基于卡尔曼滤波的摄像机标定方法[J].光电工程,2007,34(9):60-65.
- [3] Stringa E, Regazzoni C S. A Novel Camera Calibration Algorithm Based on Kalman Filter[C]//Proc. of IEEE ICPR'00. [S. l.]: IEEE Press, 2000: 1872-1875.
- [4] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation[J]. Proc. of the IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2004, 92(3): 401-422.
- [5] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 李涛.非线性滤波方法在导航系统中的应用研究[D].长沙:国防科学技术大学,2003.

编辑 陈晖

(上接第 273 页)

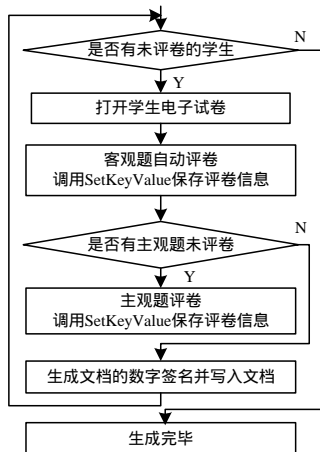


图 3 SaveDescriptAfterJudge 函数算法流程

SaveDescriptAfterJudge 函数的格式说明如下:

```
bool SaveDescriptAfterJudge(string xmlFile) {...}
```

其中,参数 xmlFile 为被评卷的学生电子试卷的文件名。在评卷结束后,将教师的评卷信息保存到 xmlFile 文件中。CreateDocumentAfterTest 函数在学生考试结束后由系统自动调用或管理员手动调用 SaveDescriptAfterJudge 函数在教师评卷结束后被调用。

4 结束语

XML 在数据交换与文档描述方面有很大优势,它可以很

方便地与数据库中的表进行转换,并且能够容易地读取和存储资料,确保数据结构精确。XML 文档还可以很容易地转换为 HTML, DOC 或 PDF 等格式的文档,便于需要时再现学生试卷。

上述是本文采用 XML 技术存储试卷的主要优势,但与二进制格式的文档相比,XML 文档的纯文本结构导致其数据量增大,尤其当数据量很大时,效率就会下降。

在算法的实现过程中,选择使用 XML 来描述电子试卷的结构时要考虑到该问题,因此,本文在设计时将大量的 XML 文档的读写操作放到系统运行空闲时集中处理,较好地解决了该问题。

参考文献

- [1] 徐建军,游海,罗育智.基于 XML 文本的元数据交换存储算法分析[J].计算机应用,2007,27(12):267-269.
- [2] 穆运峰,申利民.基于元数据的柔性信息系统建模与实现[J].计算机工程,2008,34(16):37-40.
- [3] 丁跃潮,张涛.XML 实用教程[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [4] 郑建标.一种基于 XML 和元数据的工具框架研究[J].微计算机信息,2007,23(3):197-199.

编辑 陆燕菲