

# 基于粒子群算法的摄像机标定过程优化<sup>\*</sup>

殷春平, 陈艺峰, 吴了泥, 林 麒<sup>\*</sup>

(厦门大学 物理与机电工程学院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 摄像机标定为机器视觉在物体位姿与姿态的测量过程中最重要一环, 其映射物体三维空间与二维图像之间关系是一个复杂非线性最优化问题。为了更好地解决这一复杂优化问题, 阐述了利用粒子群优化(PSO)算法计算摄像机标定过程的一种优化方法, 重点描述了 PSO 算法的原理、单目视觉测量系统, 以及基于 CMOS 摄像机的成像模型及其原理和算法。通过图像软件提取靶体模型上特征控制点, 及摄像机标定算法建立了相应的计算公式。结合 PSO 算法优化像机外参, 实验结果表明, PSO 算法计算准确、速度快, 具有很强的工程应用价值。

**关键词:** 粒子群优化算法; 摄像机标定; 机器视觉

中图分类号: TP391; TH744

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0100-04

## Optimization of camera calibration process based on PSO algorithm

YIN Chun-ping, CHEN Yi-feng, WU Liao-ni, LIN Qi

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The camera calibration for machine vision plays an important role in measuring position and pose of objects; it maps the relationship from 3D space objects and 2D image. However, it is a difficult non-linear optimization problem. In order to solve the complex optimization problems, particle swarm optimization(PSO) algorithm was put forward to solve the problem as a kind of optimization method. The method and the related theory of PSO were described, such as the principle of PSO algorithm, the monocular vision measurement system, the imaging model based on CMOS camera and its principle and algorithm. Combined with the PSO algorithm, the experiment results show that this algorithm is accurate, and it has a strong engineering application value.

**Key words:** particle swarm optimization(PSO) algorithm; camera calibration; machine vision

## 0 引 言

机器视觉研究的主要内容之一是像机标定, 即根据摄像机获取的图像信息解算物体在三维空间中的几何信息, 而这些几何对应关系是由摄像机成像模型决定的, 这些几何模型参数即摄像机参数, 求解这些参数的过程即摄像机标定过程。因此在物体空间位置、姿态的测量过程中, 像机标定是重要且必不可少的一环, 是一个非常复杂的非线性最优化问题。

现有的摄像机标定技术大体可以归结为两类: 传统的摄像机标定方法和摄像机自标定方法。传统摄像机标定存在经常性调整摄像机和设置已知的标定参照

物的要求, 自标定具有灵活方便的优点, 但一般精度不太高, 鲁棒性不足<sup>[1-3]</sup>。

本研究探索粒子群算法优化摄像机标定的过程, 辅助实现物体模型姿态测量。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO)<sup>[4]</sup> 源于对鸟群捕食行为的研究, 是近年来发展起来的一种新的进化算法, 是一种基于迭代的优化工具, 算法实现过程中没有交叉变异操作, 以粒子对解空间中最优粒子的追随进行搜索。PSO 的优点在于流程简单、容易实现, 算法参数简洁, 无需复杂的调整。由于该算法结构开放、便于运算, 并且易与具体问题结合、鲁棒性强, 成为解决工程实际问题的一种有效方法<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072207)

作者简介: 殷春平(1987-), 男, 四川巴中人, 主要从事机电一体化方面的研究。E-mail: yep5918@163.com

通信联系人: 林 麒, 女, 教授, 博士生导师。E-mail: qilin@xmu.edu.cn

## 1 粒子群算法原理

粒子群优化算法与其他进化类算法相类似, 也采用“群体”与“进化”的概念, 同样也是依据粒子的适应值大小进行操作。将每个个体看作是  $n$  维搜索空间中的一个没有重量和体积的微粒, 并在搜索空间中以一定的速度飞行。该飞行速度由个体的飞行经验和群体的飞行经验进行动态调整<sup>[6-7]</sup>。

假设:

$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})$  为粒子  $i$  的当前位置;

$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in})$  为粒子  $i$  的当前速度;

$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{in})$  为微粒  $i$  所经历最好适应值的位置。对于最小化问题, 目标函数值越小, 对应的适应值越好。

本研究设  $f(X)$  为最小化的目标函数, 则粒子  $i$  的当前最好位置由下式确定:

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t) & \text{若 } f(X_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \\ X_i(t+1) & \text{若 } f(X_i(t+1)) < f(P_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

设群体中的微粒数为  $s$ , 群体中所有粒子所经历过的最好位置为  $P_g(t)$  称为全局最好位置。则:

$$P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots, P_s(t)\} \\ f(P_g(t)) = \min\{f(P_0(t)), f(P_1(t)), f(P_2(t)), \dots, f(P_s(t))\} \quad (2)$$

基本粒子群算法的进化方程可描述为:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (P_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (3)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

式中: 下标“ $j$ ”——粒子的第  $j$  维; “ $i$ ”——第  $i$  个粒子;  $t$ ——粒子的第  $t$  代;  $c_1$ ——粒子跟踪自己历史最优值的权重系数, 又叫认知系数;  $c_2$ ——粒子跟踪群体最优值的权重系数。通常  $c_1$  和  $c_2$  通常在  $0 \sim 2$  间取值;  $\omega$ ——惯性权重系数, 以实现对微粒飞行速度的有效控制与调整。

$\omega$  越大, 则微粒的飞行速度越大, 并以较大的步长进行全局探测;  $\omega$  越小, 则微粒的速度步长越小, 趋向于进行精细的局部搜索。Shi and Eberhart 等人经过实验发现  $\omega \in [0.9, 1.2]$  时, 算法具有较理想的搜索性能。另外, 在搜索过程中可以对  $\omega$  进行动态调整, 调整合适的  $\omega$  从而使算法有较大的几率以一定精度收敛于全局最优解<sup>[8]</sup>。

基本粒子群算法的流程如下:

(1) 依照初始化过程, 对微粒群的随机位置和速度进行初始设定;

(2) 计算每个微粒的适应值;

(3) 对于每个微粒, 将其适应值与所经历过的最好位置  $P_i$  的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当

前的最好位置;

(4) 对每个微粒, 将其适应值与全局所经历的最好位置  $P_g$  的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前的全局最好位置;

(5) 根据方程式 (3) 和式 (4) 对粒子速度和位置进行进化;

(6) 如未达到结束条件 (通常为足够好的适应值或达到一个预设最大代数), 则返回 (2)。

## 2 面阵摄像机模型及标定解算原理

由于 CMOS 摄像机在机器视觉领域已得到普遍应用, 下面以 CMOS 面阵摄像机模型为例介绍其成像模型及算法。三维世界坐标系投影到成像平面模型, 如图 1 所示, 即经 4 种变化将三维世界坐标系点  $P_w$  转化为二维图像坐标系点  $(r, c)$ :

(1) 世界坐标系 (WCS) 点  $P_w = (x_w, y_w, z_w)$  刚性变换到摄像机坐标系 (CCS) 中, 对应点  $P_c = (x_c, y_c, z_c)$ , 关系为:

$$P_c = RP_w + T \quad (5)$$

式中:  $T$ ——平移矩阵,  $T = (t_x, t_y, t_z)$ ;  $R$ ——旋转矩阵。

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

(2) 摄像机坐标系 (CCS) 点  $P_c$  投影到成像平面坐标系中 (IPCS) 为点  $(u, v)$  投影关系:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{f}{z_c} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (7)$$

(3) 由于镜头存在畸变, 修正后投影点坐标为:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4k(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (8)$$

(4) 转化到图像坐标系 (ICS) 中为点  $(r, c)$ :

$$\begin{pmatrix} r \\ c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{s_y} & 0 & c_y \\ 0 & \frac{1}{s_x} & c_x \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

(5) 标记中心点坐标  $m_i$  与上述投影计算的坐标  $\pi(M_i, \rho)$  之间距离最小化:

$$d(c) = \sum_{i=1}^n \|m_i - \pi(M_i, \rho)\|^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

式中:  $(f, k, c_x, c_y, s_x, s_y)$ ——摄像机内参;  $(t_x, t_y,$

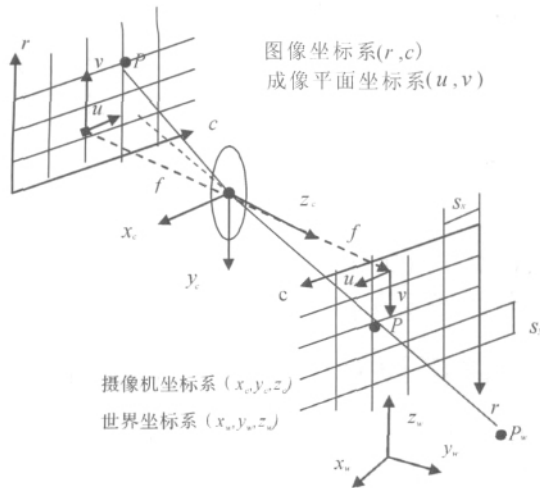


图 1 CMOS 摄像机模型的透视投影关系及成像平面与虚拟成像面的综合模型

$t_z, \alpha, \beta, \gamma$ )—摄像机外参,  $n$ —标志点数目,  $m_i$ —提取出的标志点中心坐标,  $\pi(M_i, c)$ —通过投影计算的坐标。

本研究使式 (10) 最小化求标定相机的参数, 这是一个复杂的非线性最优化问题<sup>[9-10]</sup>, 因此需要为这些参数提供更好的初始值, 其中摄像机内参初始值一般可以在图像传感器以及镜头说明书中得到。但摄像机外参一般很难得到, 可以通过几何学以及标定标记投影得到椭圆尺寸来得到一个较好初始值。

### 3 非线性优化粒子群程序设计

本研究采用通过单目视觉系统测量得到的像素坐标作为参考信息, 粒子群算法利用 C 语言编程计算得到像素坐标进行校准, 首先定义以下函数:

世界坐标系 (WCS) 中某点  $P_{wi} = (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$  式(1~5) → 图像坐标系 (ICS) 中点  $(r_i, c_i)$ :

$$Y = \sum_{i=0}^n ((r_{i0} - r_i)^2 + (c_{i0} - c_i)^2) \quad (11)$$

式中:  $r_{i0}, c_{i0}$ —第  $i$  个标志点通过单目视觉系统测量得到的像素坐标;  $r_i, c_i$ —利用 C 语言编程计算得到像素坐标; 下标  $k$ —粒子群算法对靶体模型的位姿  $(t_{xk}, t_{yk}, t_{zk}, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$  进行第  $k$  次搜索。

粒子群算法程序流程<sup>[11]</sup>如图 2 所示。

在进行搜索的过程中, 需要设定一个结束条件, 这里设定一个大于而趋于 0 的数  $\varepsilon$ 。当  $Y = \sum_{i=0}^n ((r_{i0} - r_i)^2 + (c_{i0} - c_i)^2) > \varepsilon$  时, 依据速度位置更新公式继续搜索, 直到  $Y = \sum_{i=0}^n ((r_{i0} - r_i)^2 + (c_{i0} - c_i)^2) \leq \varepsilon$  时, 认为搜索到外

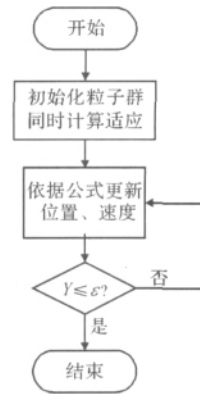


图 2 粒子群算法程序流程图

部参数为此时  $(t_{xk}, t_{yk}, t_{zk}, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$ 。

### 4 实验与分析

基于上述原理和流程, 本研究利用 C 语言设计相应 PSO 算法, 其中摄像机内参如表 1 所示, 靶体上的点坐标及对应点的像素坐标如表 2 所示,  $\rho_1 = 1.7, \rho_2 = 2.5$ , 动态权重系数  $w_1$  设置在  $[0.4, 0.9]$  范围内, 微粒个数为 50,  $\rho$  个外参搜索范围可根据像机视野大小和标定板与摄像机的相对位置进行估计, 本例中,  $(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)$  搜索范围为  $([-0.2, 0.2], [-0.2, 0.2], [0.5, 1.5], [300, 360], [300, 360], [180, 270])$ , 长度单位为米, 角度单位为度。搜索速度分别为  $(0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.025)$ ,  $\varepsilon = 0.001$ , 本研究运用 PSO 程序求解, 优化算出结果摄像机外参如表 3 所示。

表 1 摄像机内参

$f/\text{mm}$	$k$	$c_x / \text{Pixel}$	$c_y / \text{Pixel}$	$s_x / \mu\text{m}$	$s_y / \mu\text{m}$
0.008 321	-340.651	799.54	609.56	2.752 81	2.8

表 2 靶体上的点坐标及对应点的像素坐标

	世界坐标 $P_w(x_w, y_w, z_w)$			像素坐标 $(r, c)$	
	$x_w$	$y_w$	$z_w$	$r$	$c$
1	0.005	0	0	565.858	710.482
2	-0.008	-0.049	0	606.649	568.562
3	-0.008	0.049	0	585.275	858.783

表 3 摄像机外参

$t_x$	$t_y$	$t_z$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$Y$
-0.029 573 1	-0.011 056 9	1.020 57 323.346	358.196	263.296	0	0

该结果在表 1、表 2 作为已知, 通过商业软件 Halcon 设计编写相应标定程序进行验证, 验算结果与表 3 对比误差为 0.035 1, 证明了该算法的有效性和正确性。

## 5 结束语

通过 PSO 算法, 本研究能快速优化出摄像机标定过程外参, 并通过矩阵转换计算出靶体模型的位姿。在应用时, 可以设计循环程序直接计算出每次的姿态并能达到一定精度, 本研究提出的 PSO 优化算法可以直接确定摄像机外参, 即靶板相对摄像机的初始位姿的确定。同时对汽车车轮定位、航天航空等领域位置及姿态的测量提供了理论依据, 具有重要的参考价值。

### 参考文献 (References):

- [1] 王春雷, 朱 劲. 一种非线性摄像机标定方法[J]. 电脑知识与技术, 2008, 4(7): 1728-1729, 1732.
- [2] 沈慧杰. 基于单目视觉的摄像机定位方法的研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2009.
- [3] 曾建兰. 摄像机标定若干问题的研究[D]. 上海: 华东师范大学电子科学技术系, 2008.
- [4] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization:

developments, applications and resources [C] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway NJ: IEEE Press, 2001: 81-86.

- [5] 周驰, 高海兵, 高亮, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2003(12): 7-11.
- [6] LOVBJERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimization with breeding and subpopulations [C]. San Francisco, USA: Proc of the Third Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2001.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia [s. n.], 1995: 1942-1948.
- [8] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Applications [M]. Wiley-VCH, 2008.
- [10] 张铨伟, 王彪, 徐贵力. 摄像机标定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2010(11): 174-179.
- [11] 聂文淑. 基于 MEMS-IMU 的飞行器模型姿态测量系统的研究[D]. 厦门: 厦门大学物理与机电工程学院, 2011.

[编辑: 李 辉]

(上接第 96 页)

## 4 结束语

本研究通过仿真计算分析发电机励磁系统调节参数对系统动态电压稳定的影响, 可以得出以下有益的结论:

(1) 发电机及其控制系统作为电力系统的重要组成部分, 对维持电力系统的稳定运行有着重要作用。发电机无功出力的减少不利于系统的动态电压稳定;

(2) 励磁系统是同步发电机的重要组成部分, 励磁系统的快速励磁能力和强励性能对发电机的动态无功支撑能力有重要影响;

(3) 励磁系统调节参数是影响发电机的电压调节特性和强励性能的关键因素, 励磁调节器的参数设置对维持电力系统的动态电压稳定性有重要作用。

本研究对预防电力系统电压失稳有一定的指导价值。针对电力系统的同一故障, 发电机励磁系统间存在着协同的最优的励磁参数设置以最大程度地提高电力系统的动态电压稳定性, 需要更进一步深入研究。

### 参考文献 (References):

- [1] TAYLOR W. Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

- [2] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [5] 傅 旭, 王锡凡, 杜立春. 电力系统电压稳定及其展望 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 1-9.
- [6] 高 鹏, 石立宝, 姚良忠, 等. 辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标 [J]. 电网技术, 2009, 33(19): 26-31.
- [7] 段俊东, 郭志忠, 魏成江. 电压稳定临界域的描述及在线近似确定 [J]. 继电器, 2007, 35(17): 47-51.
- [8] 江 伟, 王成山, 余贻鑫. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 13-18.
- [9] 黄宇保, 王健全. 基于 ANN 和等值发电机模型的快速暂态稳定计算 [J]. 机电工程, 2010, 27(6): 78-81.
- [10] 周晓渊, 邱家驹, 周 宏. 高压侧电压控制对电压稳定性的影响 [J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 83-87.
- [11] 吴 浩. 电力系统电压稳定性研究 [D]. 杭州: 浙江大学电气学院, 2002.
- [12] 苏为民, 方思立. 励磁系统典型数学模型及其参数选择 [J]. 电力设备, 2004, 5(11): 27-31.

[编辑: 李 辉]