

# 基于 GEP 的双目视觉摄像机标定方法研究

陈云亮<sup>1</sup>, 杨娟<sup>1</sup>, 杨捷<sup>2</sup>, 李德华<sup>2</sup>

CHEN Yun-liang<sup>1</sup>, YANG Juan<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, LI De-hua<sup>2</sup>

1. 中国地质大学 计算机学院, 武汉 430074

2. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074

1. Department of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

E-mail: cyl\_king2004@163.com

**CHEN Yun-liang, YANG Juan, YANG Jie, et al. Study on camera calibration for binocular vision based on GEP. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(30): 50-52.**

**Abstract:** To achieve precise visual measurement, an accurate camera calibration method is required, and traditional binocular calibration methods have many limitations. A novel method in camera calibration for binocular vision is proposed and implemented. It introduces the Genetic Expression Programming (GEP) theory to discover valid coordinate models automatically. Compared with traditional algorithms, the experiments show that the proposed binocular calibration method based on GEP can effectively obtain high accuracy and speed up the algorithm remarkably. It also has a practical value.

**Key words:** camera calibration; binocular vision; Genetic Expression Programming (GEP)

**摘要:** 摄像机标定是精密视觉测量的基础, 传统的标定方法有很多的缺陷。提出了一种新的双目视觉摄像机标定方法, 通过引入基因表达式程序设计算法, 挖掘其中潜在的坐标函数关系。将 GEP 标定方法与同类方案进行了比较, 实验结果表明: 新算法有效地提高了标定精度, 加快了运算时间, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 摄像机标定; 双目视觉; 基因表达式程序设计

**文章编号:** 1002-8331(2007)30-0050-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391.4

## 1 引言

摄像机标定是计算机视觉研究的重要组成部分, 也是计算机立体视觉中不能回避的问题。摄像机标定的目的在于从摄像机获取的二维图像信息中重建物体的三维拓扑。常用的标定方法包括线性法<sup>[2]</sup>、非线性法<sup>[1]</sup>和双平面法<sup>[3]</sup>等。还有学者<sup>[4,5]</sup>认为摄像机内部几何和光学参数以及摄像机之间的位置关系并不需要解出, 只需利用神经网络的映射能力, 建立成像面上的二维投影点的坐标与其相应的被测点的三维坐标之间的一种映射关系。然而这种方法的缺陷在于忽略了应用过程中图像径向畸变的影响, 没经过有效区分即进行标定, 降低了抗噪声的能力和测量准确度。文献[6]提出了两级划分(即根据先验知识将图像划分为中心与非中心区域)的标定方案, 但受人工干预因素影响, 模型计算量较大。

基因表达式程序设计(Genetic Expression Programming, GEP)是一种模拟知识发现的性能强大的进化算法。GEP 算法在处理函数发现和时间序列<sup>[7]</sup>等问题上优势明显。因此, 本文借

助 GEP 学习非线性函数时高效的模拟能力及受样本规模影响小的优点来构造成像模型。

## 2 基于 GEP 摄像机标定模型

### 2.1 GEP 算法

GEP 是借鉴生物遗传的基因表达规律提出的知识发现新技术, 它不需对结果公式形状做主观假定, 而认为真理在训练数据中, 以基本变量和算符为遗传物质, 通过遗传、变异, 逐代进化出更接近事物本质的公式, 方法上更客观, 结果上更接近事物本质。GEP 算法常常用于复杂函数的自动建模, 尤其是在处理函数发现和时间序列等非线性问题上优势明显。

和其他进化算法一样, GEP 同样存在全局搜索范围和收敛速度之间的矛盾。在进化过程中对遗传操作概率(交叉率  $p_c$  和变异率  $p_m$ )进行自适应的修正能在一定程度上缓解上述问题<sup>[8]</sup>。具体说来, 进化过程中交叉率应逐渐变小并稳定于某一阈值以避免算法后期破坏优秀基因; 而变异率应根据个体适应度进行

**基金项目:** 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69775022); 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.863-306-ZT04-06-3); 中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划资助项目(No.CUGQNL44)。

**作者简介:** 陈云亮(1979-), 男, 讲师, 研究方向: 模式识别、智能计算; 杨娟(1946-), 女, 高级工程师, 研究方向: 智能计算、网络信息处理; 杨捷(1983-), 男, 硕士, 研究方向: 人工智能、图像处理和模式识别; 李德华(1946-), 男, 教授, 博导, 研究方向: 创造性思维和模式识别。

调整: 加大劣质个体的变异力度, 反之则赋予小概率变异以保留优秀模式。两者的计算公式如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c-\min} + \frac{(p_{c-\max} - p_{c-\min}) \times (f' - f_{avg})}{f_{\max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ p_{c-\max} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m-\min} + \frac{(p_{m-\max} - p_{m-\min}) \times (f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ p_{m-\max} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $p_{c-\min}$   $p_{c-\max}$   $p_{m-\min}$   $p_{m-\max}$  分别表示  $p_c$  和  $p_m$  的极小与极大值;  $f'$   $f_{avg}$   $f_{\max}$  代表当前操作个体、平均种群和最优个体的适应值。

### 2.2 摄像机畸变补偿模型

摄像机成像模型是光学系统成像几何关系的数学表示, 它反映了三维空间中的物体到像平面的投影关系。摄像机的畸变是摄像机标定过程中不可忽略的主要因素, 在实际应用中常考虑径向畸变给系统标定带来的误差, 不难描述相对径向畸变量  $\delta^{[6]}$  为:

$$\delta = k \times r^2 \quad (3)$$

本文中的参数参照文献[6], 其中  $r$  为标定点到图像中心的径向距离,  $k$  为畸变系数, 根据不同棱镜进行设置。由于受畸变的影响, 若将整块图像区域作为算法训练与识别的样本, 必然影响标定的精度<sup>[6]</sup>。因此在实验过程中有必要利用畸变性质将标定图像进行划分, 针对不同的子区域采用相应的畸变补偿, 再对补偿后的目标进行标定; 这样就可大大减少径向畸变造成的误差, 提高标定精度。根据径向畸变相对量与半径  $r$  平方成正比(式(3))的性质, 将整个图像划分为  $N$  个同心圆  $D_1, D_2, \dots, D_n$ , 对应半径为  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , 且规定相邻圆之间的畸变改变幅度在  $\varepsilon$  之内。则不难得到:

$$r_n^2 = \frac{n}{k} \times \varepsilon \quad (4)$$

$$r_n = r_1 \times \sqrt{n} \quad (5)$$

由上易知相邻同心圆半径与各自所包含之圆数开方成正比; 设置最小圆半径  $r_1$  可唯一确定整个标定圆的有效覆盖范围。

**定理 1** 如果图像长与宽分别为  $l_x$  与  $l_y$ , 标定时相邻的同心圆环最小间距为  $r_{\min}$ , 同心圆的最大个数为  $n_{\max}$ , 则最小圆半径  $r_1$  的最大范围为:

$$r_1 = \min \left\{ \frac{r_{\min}}{\sqrt{n_{\max}} - \sqrt{n_{\max} - 1}}, \frac{\frac{1}{2} \times \sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{\sqrt{n_{\max}}} \right\}$$

**证明** 由式(4)、式(5)可知:

$$r_n - r_{n-1} = r_1 \times (\sqrt{n} - \sqrt{n-1})$$

$$r_{n-1} - r_{n-2} = r_1 \times (\sqrt{n-1} - \sqrt{n-2}), \dots, r_2 - r_1 = r_1 \times (\sqrt{2} - \sqrt{1})$$

根据相邻同心圆环最小间距为  $r_{\min}$ , 同心圆的最大个数为  $n_{\max}$  的要求, 则有

$$r_1 \times (\sqrt{n_{\max}} - \sqrt{n_{\max} - 1}) \leq r_{\min} \quad (6)$$

由此不难得到

$$r_1 \leq \frac{r_{\min}}{(\sqrt{n_{\max}} - \sqrt{n_{\max} - 1})} \quad (7)$$

同时由于图像长与宽分别为  $l_x$  与  $l_y$ , 则最大的圆环半径为:

$$r_n = r_1 \sqrt{n_{\max}} \leq \frac{1}{2} \times \sqrt{l_x^2 + l_y^2} \quad (8)$$

求解上式得:

$$r_1 \leq \frac{\frac{1}{2} \times \sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{\sqrt{n_{\max}}} \quad (9)$$

综上所述可知:

$$r_1 = \min \left\{ \frac{r_{\min}}{\sqrt{n_{\max}} - \sqrt{n_{\max} - 1}}, \frac{\frac{1}{2} \times \sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{\sqrt{n_{\max}}} \right\}$$

至此通过设置最小圆半径等操作完成了对标定图像的划分, 划分后的相邻子区域(即同心圆)之间保持稳定的畸变改变幅度  $\varepsilon$ 。针对像素补偿时, 文献[6]曾提出过如下公式:

$$\begin{cases} x' = x \times (1 + k \times r^2) \\ y' = y \times (1 + k \times r^2) \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (10)$$

实际上划分后各子区域内的像素补偿差量均保持在  $[0, \varepsilon]$  内; 只要  $\varepsilon$  足够小则可视差量忽略不计, 则对于子区域内的像素可采用统一的补偿公式进行计算, 无疑大大减少了算法复杂度, 对式(10)的改进如下:

$$\begin{cases} x'_n = x_n \times (1 + n \times k \times r^2) = x_n \times (1 + \varepsilon \times n) \\ y'_n = y_n \times (1 + n \times k \times r^2) = y_n \times (1 + \varepsilon \times n) \\ r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $x_n, y_n$  表示像素落在第  $n$  个圆内。

### 2.3 基于 GEP 的摄像机标定模型的建立

(1) 对待标定的灰度图像进行二值化处理, 利用 Blob 算法<sup>[6]</sup>和 Sodel 算子平滑图像并得到标定区域内各像素的  $x, y, z$  坐标;

(2) 设置标定圆点, 利用  $r_{\min}$  和  $n_{\max}$  计算出各同心圆半径  $r_1, r_2, \dots, r_{n_{\max}}$  以确定对标定区域的划分;

(3) 利用式(10)对划分后的同心圆内坐标进行补偿;

(4) 取左右摄像机同名点的坐标与其实际坐标作为算法的输入样本, 计算图像的标定模型。文中借鉴方差分析中的 R-Square 检验 GEP 得到的模型, R-Square 值越趋近 1 表示坐标拟合程度越好<sup>[7]</sup>:

$$R\text{-Square} = \frac{\sum_{i=1}^n [(\hat{x}_i - \bar{x}) + (\hat{y}_i - \bar{y}) + (\hat{z}_i - \bar{z})]}{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) + (y_i - \bar{y}) + (z_i - \bar{z})]} \quad (12)$$

其中  $x_i, y_i, z_i$  为实际坐标值,  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  为所有  $x_i, y_i, z_i$  的平均值,  $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$  为 GEP 建模后得到的拟合值, 参数设置见表 1。

表 1 GEP 的参数设置

函数集	$F = \{+, -, *, /, ^, \sin, \cos, \exp, \ln\}$ ( $x/n$ 表示 $x^n, 0 < n < 5$ )		
特有参数	详细描述	一般参数	详细描述
终结符集	$\begin{cases} x_1, y_1, z_1 \\ x_2, y_2, z_2 \end{cases}$	种群规模	100
常数集	随机模拟	交叉率	[0.05, 0.42]
头部长度	8	变异率	[0.01, 0.044]
基因数量	5	选择算子	轮盘赌算子
连接函数	+	适应度函数	R-Square
IS 交换率	0.1	进化代数	1 000
RIS 交换率	0.1	个体重组概率	0.1
倒置概率	0.1		

表2 标定结果(有补偿条件下)

统计平均值	点云规模												
	140个		250个		370个		510个						
	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]					
总 R-Square	0.997 1	0.995 2	0.997 5	0.996 8	0.997 4	0.997 1	0.997 4	0.997 3					
分量 R-Square	0.997 0	0.997 2	0.997 2	- - - 0.997 4	0.997 5	0.997 5	- - - 0.997 6	0.997 5	0.997 2	- - - 0.997 3	0.997 3	0.997 4	- - -
运行时间/s	23.6(22.4+21.3+23.6)		57.6	45.3(45.3+45.1+44.0)		103.8	82.8(82.8+82.7+82.4)		165.2	122.0(121.9+122.0+121.3)		203.7	

表3 标定结果(无补偿条件下)

统计平均值	点云规模												
	140个		250个		370个		510个						
	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]	本文算法	文献[5]					
总 R-Square	0.675 8	0.672 3	0.653 1	0.653 6	0.582 2	0.582 7	0.501 4	0.501 3					
分量 R-Square	0.676 0	0.675 9	0.675 6	- - - 0.653 4	0.653 5	0.652 5	- - - 0.585 7	0.585 6	0.575 4	- - - 0.501 9	0.501 8	0.500 4	- - -
运行时间/s	21.8(21.8+21.7+21.2)		56.7	42.5(42.5+42.4+42.2)		100.9	80.3(80.1+80.3+78.6)		163.1	117.7(117.4+117.7+111.8)		198.5	

此外畸变改变幅度  $\varepsilon$ 、同心圆最小间距  $r_{\min}$  以及最大个数  $n_{\max}$  的设置也非常关键,三者之间存在紧密联系:幅度  $\varepsilon$  设置太小必然引起划分后的同心圆数目增大,与参数  $n_{\max}$  矛盾;设置太大则无法平滑相邻圆内像素的补偿量,影响标定精度;所以建议  $\varepsilon = \delta = k \times r_1^2$ ,其中  $k$  作为畸变系数由实际条件确定,而  $r_1$  取决于  $r_{\min}$  以及  $n_{\max}$  (定理1);后两者对图像的依赖性较大,总的说来应成正比关系。根据经验,  $n_{\max}$  取值应在[5, 17],则  $r_{\min}$  不宜小于图像中2个单位的像素级,这样即可满足视觉上的要求。

### 3 实验模拟

实验系统的硬件部分采用三维激光彩色扫描仪 200 型 (the Three-Dimensional Laser Color Scanner, 国家专利号: ZL95-2-278979)。首先设置世界坐标系原点并根据右手原则确定正方向;在待标定的物体表面上描绘4组(140、250、370、510个)标定点,其实际坐标  $x_i, y_i, z_i, i \in (1, 200)$  由 6JA 型万工显测出。将 CCD 摄像头沿建立的坐标系  $x$  正反方向移动恰当距离以获得一组(2幅)样本图像。实验依不同方位各进行100次,其工作原理图如图1所示。

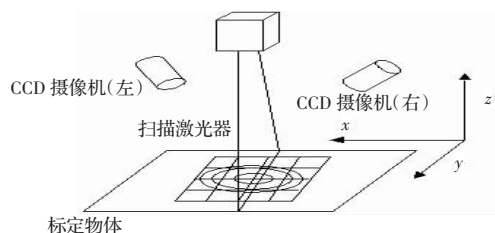


图1 三维激光彩色扫描仪的标定过程

标定结果与文献[5]进行比较,采用三层前馈网,隐层采用5个神经元,结果数据如表2,表3所示。

实验结果显示有补偿条件下的标定精度明显好于无补偿的;同时 GEP 算法的重建模型又优于文献[5],它的优点主要体现在:

(1)有效克服了样本数目对标定精度的影响,保持着相对稳定的识别率;

(2)运行耗时小,有很高时间的效率;

(3)新的模型能够对畸变进行补偿。

### 4 总结和展望

本文提出了一种基于改进型基因表达式程序设计算法的

摄像机标定法。通过对摄像机畸变及其基本性质的研究,将图像区分为不同的畸变区域(即一系列的同心圆)并采用相应的策略进行像素补偿;方法还可根据图像具体条件自动设定同心圆的半径参数,为标定过程提供便利。与同类算法相比很大程度上提高了识别精度,节省了计算时间,有效地克服了径向畸变带来的误差,具有很强的使用价值。

下一步的工作:

(1)畸变补偿模型中参数的设置对结果有很大的影响,因此需要对2.3节中的参数的设置作多次的训练,从新设置参数表,来达到实际的要求。

(2)对区域划分,可以采用具有约束条件的 GEP 来建模,这样更能体现实际的状况。

(3)利用 GEP 的自适应性,解决移动物体的标定问题。

(收稿日期:2007年6月)

### 参考文献:

- [1] Sobel I. On calibration computer controlled cameras for perceiving 3D scenes[J]. Artificial Intelligence, 1974, 5(2): 185-198.
- [2] Dainis A, Jubets M. Accurate remote measurement of robot trajectory motion[J]. Conference on Robotics and Automation, 1985: 92-99.
- [3] Martinsh A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based on data from two calibration planes[J]. Computer Graphics Image Processing, 1981, 17(2): 173-180.
- [4] Fu Qi-feng, Cui Yan-ping. Neural network technique in camera calibration for binocular vision[J]. Journal of Engineering Graphics, 2005(6): 93-97.
- [5] Zhao Qing-jie, Sun Zeng-qi, Lan Li. Neural network technique in camera calibration[J]. Control and Decision, 2002, 17(3): 336-338.
- [6] Wang Hong-jie, Lin Liang-ming, Yan Guo-zheng. Camera calibration algorithm based on multiple-layer-forward-neural network [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(9): 1358-1361.
- [7] Ferreira C. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming[J]. Advances in Complex Systems, 2002, 5(4): 389-408.
- [8] Zhang Chu-qian, Wan Y W, Liu Ji-yin. Dynamic crane deployment in container storage yards[J]. Transportation Research: Part B Methodological, 2002, 36(6): 537-555.
- [9] Liu Jun, Wang Dong-hong, Mao Guo-miao. High precision stereo positioning of IKONOS satellite images based on RPC model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004(9): 1-4.