

## 双目结构光高精度三维复原算法的快速实现

敖黎铭, 徐 晓, 李 熙

(华南理工大学 物理与光电学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 针对基于双目单视面的双目结构光高精度三维复原算法数据量大、处理速度慢的缺点, 在成本限定条件下, 提出了一种基于嵌入式 DM8168 系统的计算优化方法, 优化方法包括减少数据处理量、常规优化、角度转换计算优化等。针对  $1628 \times 1236$  大小的 2 幅图像, 可以实现快速三维复原处理, 且精度较高, 具有较大的工程应用价值。

**关键词:** DM8168 系统; 程序优化; 双目结构光; 光学测量

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2018)06-0129-03

## Fast implementation of high precision 3D restoration algorithm based on binocular structured light

AO Li-ming, XU Xiao, LI Xi

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at shortcomings of large amount of data and slow processing speed of binocular structured light high precision 3D restoration algorithm based on horopter, a computational optimization method based on embedded DM8168 system under the condition of cost limit is proposed. The optimization methods include reducing amount of data processing, conventional optimization, optimization of angle conversion calculation, etc. For two images of  $1628 \times 1236$  size, fast 3D restoration processing can be achieved, and it has higher precision and has great value in engineering application.

**Keywords:** DM8168 system; program optimization; binocular structured light; optical measurement

### 0 引 言

双目视觉技术类似于模拟人眼技术, 能够较好地恢复出物体和场景的三维信息<sup>[1]</sup>, 但其运算量大, 限制了其在高精度快速图像处理系统中的应用<sup>[2]</sup>。在本项目组进行的实际工程中, 通过基于双目的结构光进行高精度三维复原, 因此, 需要研究不同的软、硬件方法<sup>[3]</sup>加速解算。

现在广泛应用的图像处理系统根据图像处理器不同可以分为四种<sup>[4]</sup>: 基于个人电脑 (personal computer, PC) + 采集卡的结构、基于现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 的图像处理系统、基于数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 的图像处理系统和基于 FPGA + DSP 的图像处理系统。其中基于 PC + 采集卡架构拥有超高的处理速度, 但便携性不足, 在某些场合并不适合应用; 基于 FPGA 的图像处理系统由于过分要求针对特殊算法配置硬件结构, 因此并不适合普遍的图像处理情景; DSP 是专门的数字信号处理器, 算法开发难度也比较低, 但是单纯的 DSP 既做功能控制, 又做算法处理, 会降低系统的算

法处理效率<sup>[5]</sup>。

本文采用 DM8168 平台将功能核集成在单片系统中<sup>[6,7]</sup>, 避免了单纯的 DSP 同时进行算法运算和功能控制所导致的算法处理效率低的问题, 并采用了一系列优化手段, 尤其通过采用查表和级数展开相结合的算法, 大幅提高了高精度三维复原算法的运算速度。

### 1 针对 DM8168 的三维复原算法

#### 1.1 算法介绍

在实际应用中, 线激光垂直照射在物体表面, 通过左右交叉放置相机拍摄得到 2 幅灰度图像, 通过两幅图像复原光条处的三维信息。首先分别对左右灰度图进行畸变校正, 接着根据双目单视面原理, 将图像像素坐标转换为角度坐标, 转换关系如图 1 所示。本文以左相机为例对角度  $\alpha_L$  计算进行优化。

基于左右图像灰度信息的特征匹配和匹配点的三维复原, 具体匹配和三维复原的研究参考文献 [8]。

收稿日期: 2018-02-05

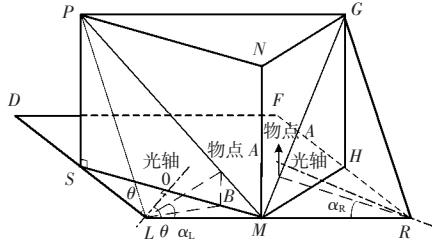


图1 双目相机等效模型

## 1.2 平台结构与算法流程

DM8168 是一种多核异构片上系统,其集成的 Cortex-A8 处理器用于控制各个协处理器存储、传输图像等;集成的浮点 C674xDSP 处理器,用于实现用户自定义算法<sup>[9]</sup>。在该平台上所运行的算法流程如图 2 所示。

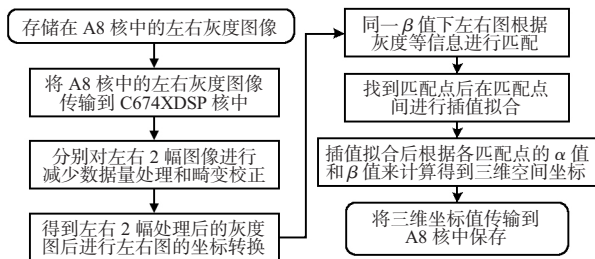


图2 算法流程

## 2 算法优化

### 2.1 减少数据处理量

在 DM8168 上采用了粗裁剪和细裁剪相结合的方法,将  $1628 \times 1236$  转换成  $1628 \times 40$  大小的图像。以左图为例,具体步骤为:

1) 对  $1628 \times 1236$  的图像  $G(i, j)$  进行二值化处理,得到黑白二值图像  $B(i, j)$

$$B(i, j) = \begin{cases} 255 & G(i, j) \geq T \\ 0 & G(i, j) < T \end{cases} \quad (1)$$

式中  $T$  为分割阈值,可预设或使用自适应的方法确定。

2) 寻找  $B(i, j)$  中白值(255)出现的次数在一定范围内(如  $1628 \times 10$ ) 的最大值,即找到光条主体位置,但考虑到

$$\alpha_L = \arccos \frac{f^2 + (ccy - x)^2 + (y - ccx)^2 + f^2 / \cos^2 \theta - (ccy - x)^2 - (f \tan \theta - (y - ccx))^2}{2f / \cos \theta \sqrt{f^2 + (ccy - x)^2 + (y - ccx)^2}} \quad (3)$$

式中  $f$  为图 1 中焦距  $LO$  的长度,  $\theta$  为左相机光轴与基线  $LR$  的夹角,  $ccx$  为主点的列坐标,  $ccy$  为主点的行坐标,以上参数均由相机标定可得;  $x, y$  分别为某个像素点在图片中行、列坐标。考虑到该公式中除了  $x, y$  坐标外的其他参数值在相机固定的情况下保持不变,因此,采用以部分空间换取时间的方法,通过级数展开和查表法相结合代替直接计算,提高运算效率。

具体评估公式如下

$$s = k_1 \times \frac{t}{T_0} + k_2 \times \frac{v}{V_0} \quad (4)$$

式中  $k_1, k_2$  为权重参数,  $k_1$  取 0.8,  $k_2$  取 0.2;  $T_0, V_0$  分别

光条照射物体时产生弯曲,以该最大值所处位置为中心,将灰度图像  $G(i, j)$  裁剪为  $1628 \times 100$  大小的图像  $Cut1\_G(i, j)$ ,同时记下载剪的起始列位置  $Left\_Initial$ 。

3) 由于畸变校正与像素点在原图  $G(i, j)$  中的位置相关,因此,在得到裁剪的起始列位置  $Left\_Initial$  后,便可直接对裁剪后的图像  $Cut1\_G(i, j)$  进行畸变校正<sup>[10]</sup>,得到畸变校正后的图像  $Cut1\_Co\_G(i, j)$ 。

4) 提取光条。根据本文算法的特点,在第一次裁剪并校正后的图像  $Cut1\_Co\_G(i, j)$  的基础上再一次进行裁剪,得到图像  $Cut2\_G(i, k)$

$$Cut2\_G(i, k) = \begin{cases} Cut1\_G(i, j) & k++ \\ \text{不赋值 } k \text{ 不变} & Cut1\_G(i, j) < T_c \end{cases} \quad (2)$$

式中  $T_c$  为判断是否为光条的阈值,可事先给定。同时在二维数组  $LeftReImageU[i][k]$  中存储对应行光条在原图  $G(i, j)$  中的列坐标。经过 2 次裁剪后运行时间较未裁剪减少了 5.84 s,整个裁剪过程如图 3 所示。

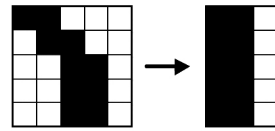


图3 第二次裁剪示意

### 2.2 常规优化

常规优化包括 2 方面: 1) 指令级优化。包括循环体展开以便于软件流水作业,使用内联函数以减少函数调用,打开编译器优化选项,使用 `Const` 关键字以减少存储器间的相关性等<sup>[11]</sup>; 2) 算法级优化。针对三角函数和根号运算的优化,由于 DM8168 没有相应的内联函数,使用库函数运算较为缓慢,因此,针对三角函数和根号运算的计算范围使用简单的查表法。经常规优化后算法的运行时间降为 0.15 s。

### 2.3 角度转换计算优化

图 1 中坐标转换  $\alpha$  计算较为复杂,进一步优化,以左图为例,具体为

为最适宜接受系统的计算所花费的 CPU 时钟周期数和表所占内存大小;  $t, v$  分别为级数展开后对运算量和内存大小的评估。 $V_0$  取值为 L2cache 大小,即 256 kB,  $T_0$  取值为 1000CPU 时钟周期。

对于时间  $t$  和表的大小  $v$  的评估采用如下办法: 1) 将  $\alpha_L$  的计算公式通过二元函数的泰勒级数展开分别展开成本阶、一阶、二阶 3 种情况,更高阶的展开由于项数的增多导致计算量增大,不予考虑,即可评估 3 种展开情况下计算机计算所用的加载、加乘和跳转次数,结合 DM8168 开发板的硬件结构进一步评估出具体所花费的 CPU 时钟周期数; 2) 在 3 种展开情况下分别寻求插值所引起最大误差不超过

某一精度要求时  $x, y$  的间隔, 由此间隔便可算出此时表所占内存大小。通过对 3 种情况的评估, 找到使评估公式中的  $s$  值最小的点作为本文的运算时间与内存大小之间平衡结果。

式(3)展开成本阶、一阶、二阶后, 其插值结果与真实结果的最大误差值如图 4~图 6 所示。

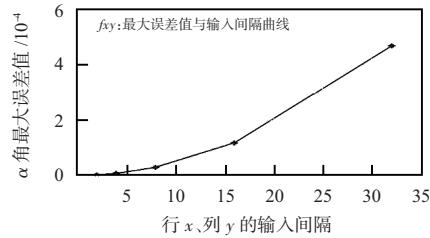


图 4 级数本阶展开后插值结果与真实值的最大  $\alpha$  角误差

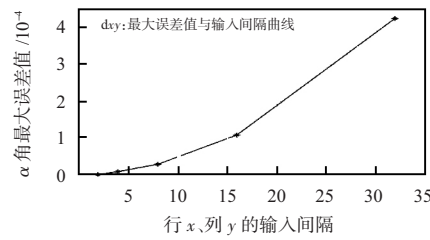


图 5 级数一阶展开后, 插值结果与真实值的最大  $\alpha$  角误差

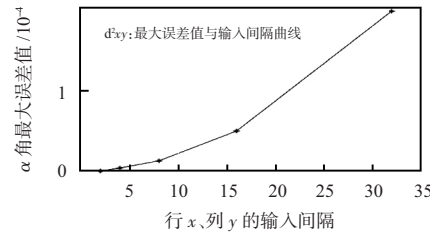


图 6 级数二阶展开后插值结果与真实值的最大  $\alpha$  角误差

本文在计算机中用差分求出  $\alpha$  角沿  $x$  方向和沿  $y$  方向上的变化基本一致, 因此, 对于行  $x$  和列  $y$  取间隔采用同步的方式。由上述图中可以得出最大误差值小于  $10^{-4}$  的三个间隔分别为 14, 15, 21。通过 CCS 查看汇编代码发现展开成本阶后计算需要 10 次加载、15 次加法运算、9 次乘法运算, 展开成一阶后计算需要 7 次加载、4 次加法运算、2 次乘法运算, 展开成二阶后计算需要 11 次加载运算、16 次加法运算、10 次乘法运算, 而在 DM8168 中, 对于 float 单精度型数据, 一次加载指令、加法指令、乘法指令的执行分别需要 5, 7, 7 个 CPU 时钟周期。将以上结果代入评估公式中计算得本阶结果  $s_0$  为 0.21, 一阶结果  $s_1$  为 0.14, 二阶结果  $s_2$  为 0.28, 由此可得展开成一阶  $x, y$  的间隔取 15 制表其值最小。本文利用此优化方法使得程序运行时间减少到 0.11 s, 在常规优化的基础上降低了 26.67% 的时间。

3 实验结果与讨论

为了验证本算法优化后的运算速度, 分别在 DM8168 嵌入式系统平台(主芯片是 TI 公司的 TMS320DM8168)和 PC 平台(Intel(R) 酷睿双核 CPU)上选择不同形状的光条

进行多次实验对比, 统计算法运行时间以及分析最后的重建效果。结果如图 7、表 1 和图 8 所示。

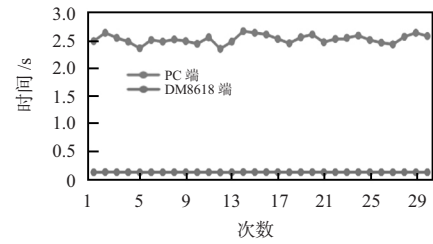


图 7 不同光条在不同平台的运行结果

表 1 算法在 PC 端和 DM8168 系统上运行时间对比

平台	平均运行时间/s	图像大小	重建效果
PC 端 MATLAB R2010b(优化后)	2.5	1 628 × 1 236	良好
DM8168 系统(未优化)	6.759	1 628 × 1 236	良好
DM8168 系统(优化后)	0.114	1 628 × 1 236	良好

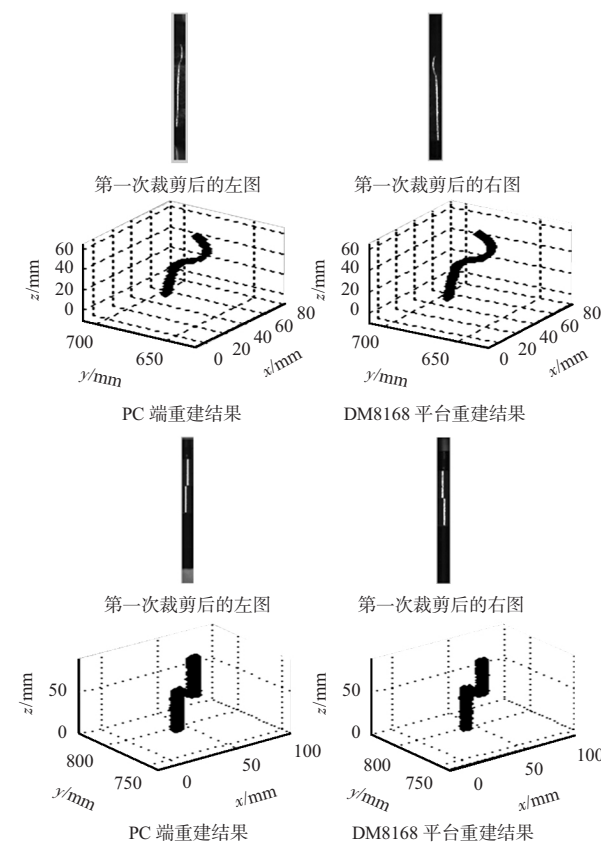


图 8 三维重建结果

由表 1 可以看出, 优化后在运行速度上, DM8168 表现明显优于 PC 端 MATLAB, 二者的运算速度相差近 20 倍, 可见本文优化方法有效。在输入变量可预测的情况下, 使用查表和级数展开相结合的方法, 可以使得包含三角函数和根号等的复杂算术运算变得更为简单, 减少了运行开销。

在精度上, DM8168 平台与 PC 端基本相同, 差别与本文在 DM8168 平台中对图像数据取值为 float 型有关, 使得图像数据的有效位数在 6 位后与 PC 端不同, 但并不影响本文的高精度三维重建效果。

(下转第 135 页)

表 2 3 次轨迹最终落点的测量结果 mm

轨迹		计算值	实测值	误差
轨迹 1	X	226.994	215.5	11.494
	Y	930.817	970.0	39.183
	Z	2387.400	2412.5	25.100
轨迹 2	X	-186.634	-175.2	11.430
	Y	921.489	970.0	48.511
	Z	2955.830	3004.7	48.870
轨迹 3	X	270.081	277.0	6.920
	Y	919.891	970.0	50.109
	Z	2728.460	2754.5	26.100

可以看出,检测误差均在 5.2 cm 以内,平均误差为 2.973 cm,测量精度较为良好。

6 结 论

基于三帧差算法对羽毛球运动进行检测,并对轨迹检测进行了改进优化,可有效地提取羽毛球的单次轨迹。使用双目工业相机进行硬件触发,同步获取羽毛球的左右像素坐标,基于双目标定结果最终获取羽毛球的运动空间轨迹。通过对测量结果进行定性和定量的分析,说明了视觉测量运动目标空间轨迹的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 应文杰,徐开,徐少平.羽毛球机器人机械臂运动轨迹多目

(上接第 131 页)

4 结 论

本文以 DM8168 双目三维高精度重建系统为平台,针对嵌入式 DM8168 系统对基于双目的结构光高精度三维复原算法进行优化,使得该算法能达到快速高精度三维重建效果。本文优化方法不仅局限于本平台算法中,可以应用到其他需要移植优化的图像算法场合。从实用意义出发,经过本文中优化方法,高精度三维复原算法虽然处理速度达到了 0.11 s,但仍有改进的空间,尤其是查表和级数展开相结合的方法,对于复杂的算术运算具有良好的优化效果,但对于循环以及条件语句仍需要进一步优化,这将是下一步的研究内容。

参考文献:

[1] 梁琨.基于双目视觉的三维重建研究[D].西安:陕西科技大学,2007.  
[2] Shotton J,Fitzgibbon A,Cook M,et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images[J]. Communications of the ACM,2013,56(1):116-124.  
[3] Huang X,Gong L. Shortest path based planar graph cuts for bi-layer segmentation of binocular stereo video[C]//2010 Asian Conference on Computer Vision, ACCV 2010 Workshops, Springer, Berlin Heidelberg,2010:82-91.

标规划[J].计算机工程与应用,2017,53(3):258-265.

[2] 陈兵旗.机器视觉技术及应用实例详解[M].北京:化学工业出版社,2014.  
[3] 王婷婷,李戈,赵杰,等.基于双目视觉的运动目标检测跟踪与定位[J].机械与电子,2015(6):73-76.  
[4] 黄成都,黄文广,闫斌.基于 Codebook 背景建模的视频行人检测[J].传感器与微系统,2017,36(3):144-146.  
[5] 吕嘉卿,刘立程,郝禄国,等.基于视觉背景提取的自适应运动目标提取算法[J].计算机应用,2015,35(7):2029-2032.  
[6] 张远辉.基于实时视觉的乒乓球机器人标定和轨迹跟踪技术研究[D].杭州:浙江大学,2009.  
[7] 王琳,赵健康,夏轩,等.基于双目立体视觉技术的桥梁裂缝测量系统[J].计算机应用,2015,35(3):901-194.  
[8] 张娟,潘建寿,吴亚鹏,等.基于双目视觉的运动目标跟踪与测量[J].计算机工程与应用,2009,45(25):191-194.  
[9] 张梁,徐锦法.基于双目视觉的无人飞行器目标跟踪与定位[J].计算机工程与应用,2014,50(24):27-31.  
[10] 蔡琨.视觉测量中的摄像机标定与三维重建方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
[11] 王耀东,余祖俊,石井抱.高速立体视觉与机械运动异常动作三维检测[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2161-2169.

作者简介:

曹晓明(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

[4] 杨振永.基于 TMS320DM8168 的嵌入式高清图像处理系统的关键技术研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2013.  
[5] 黄晓婷.基于 DM8168 双核 DSP 的车辆识别系统[D].南京:南京航空航天大学,2015.  
[6] 杨振永,王延杰,孙海江,等.基于 TMS320DM8168 的 SOC 高清视频处理系统的设计与实现[J].液晶与显示,2013(5):764-769.  
[7] 刘冰,谷源涛.基于 DM8168 的视频会议系统 MCU 设计与实现[J].计算机工程与设计,2014(10):3399-3403.  
[8] 王珊,徐晓.基于双目单视面的三维重建[J].光学学报,2017,37(5):207-215.  
[9] 朱海.基于 DM8168 的视频监控系统的实现[D].成都:电子科技大学,2013.  
[10] 吴火森.鱼眼相机图像处理及校正算法研究与实现[D].西安:西安电子科技大学,2015.  
[11] 魏带娣,李元,郭浩,等.基于 DSP 的运动目标检测算法优化[J].指挥控制与仿真,2014,36(1):66-70.

作者简介:

敖黎铭(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为 DSP 下的图像处理算法优化和应用,E-mail:1134616663@qq.com。

徐晓(1968-),男,通讯作者,副教授,主要从事机器视觉与人机工程方面的研究工作,E-mail:physicsxuxiao@163.com。