

基于一维相位相关的改进图像三维重建算法

李 达¹, 潘志斌¹, 李敬源¹, 高 峰¹, 贺菲菲²

(1 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2 中兴通讯股份有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 在 T Shibahara 等提出的基于一维相位相关的三维重建算法的基础上进行改进, 对图像序列进行加窗前处理; 在均值法中对图像序列进行有效的加权处理; 利用各匹配等级之间的相关性优化由粗到精的立体匹配结构; 对三维模型进行限制深度的后处理. 实验结果表明, 本文提出的改进算法在保证输出三维模型精度的基础上比原始算法的三维重建效率有明显提升.

关键词: 双目视觉; 三维重建; 一维相位相关; 立体匹配

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)01-0073-04

Improved 3D Reconstruction Algorithm Based on 1D Phase-Only Correlation

LI Da¹, PAN Zhi-bin¹, LI Jing-yuan¹, GAO Feng¹, HE Fei-fei²

(1 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, China; 2 ZTE Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: T Shibahara et al proposed a high-accuracy stereo correspondence technique based on 1D Phase-Only Correlation. In this paper, we propose four improvements as follows: windowing to reduce boundary effects; weighting in averaging 1D POC functions; optimizing the coarse-to-fine matching; limiting the range of depth. Experimental results show that the 3D reconstruction efficiency is improved significantly compared to the original algorithm.

Key words: stereo vision; 3D reconstruction; 1D phase-only correlation; stereo matching

1 引言

三维图像相对于二维图像有着不可替代的作用, 三维模型已经被应用到各个领域. 除了常见的利用三维绘图工具绘制三维模型外, 从实物获取三维信息也是一种重要手段^[1]. 在医学领域已可以利用医学影像设备(如 CT、MRI、PET 等)获取断层的层片数据序列, 在电影、工业等领域也采用激光来扫描获取深度图. 这两种主动式获取实物三维信息的技术虽然精度高, 但是由于过于昂贵而无法应用到大众领域. 基于双目立体视觉的三维重建是被动式获取三维信息技术之一, 由于双目立体视觉技术的设备只需要两个摄像机, 因此可以被利用到更多的领

域中, 但是较低的三维重建精度和速度是限制其应用的主要问题^[2-3].

相位信息是图像中的重要特征, 利用相位信息进行图像配准有极高的精度. 在文献[4]中作者利用二维相位相关技术的抗噪性、健壮性和高精度进行立体匹配, 并采用了多分辨率的结构和加窗技术, 得到了较好的三维重建效果, 文献[5]中提出四项相应的改进, 进一步提高了三维重建的精度. 但是图像的相位相关技术需要进行大量的计算, 因而限制了其实际应用. 在文献[6]中作者利用图像校正后极线限制的特征, 采用一维相位相关技术减少了大量的计算, 并采用平均法提高了匹配精度, 使三维重建结果的精度没有降低, 而运算时间极大地减少. 这种方法

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-06-14

基金项目: 高校博士点专项基金项目(20100201110030); 中兴通讯技术开发项目(20110174); 浙江大学开放基金(A1115)

具有一定的理论意义和合理性,在作者设定的实验条件下也得到了较好的结果,但是,文献[6]进行一维相位相关运算时没有考虑边缘效应,采用平均法时也没有考虑图像序列集的权值,因此,三维重建的效果就会下降.此外,文献[6]在多分辨匹配过程中,没有考虑到各匹配等级之间的冗余,最后也没有对三维模型进行后处理,从而影响了三维重建的速度和精度,因此本文尝试从这些方面对文献[6]进行进一步改进.

2 基于一维相位相关的三维重建算法

2.1 基于一维相位相关的匹配算法(1D Phase-Only Correlation, 1D POC)

相位相关算法避免了图像中低频噪声的影响,在图像配准中性能良好^[7],而对图像序列采用的一维相位相关算法也有相同特征,其原理如下所述:

设两个长度为 N 的图像序列 $f(n), g(n)$, 其 1D DFT(一维离散傅里叶变换)分别为

$$F(k) = \sum_{n=-M}^M f(n) W_N^{kn} = A_F(k) e^{j\theta_F(k)} \quad (1)$$

$$G(k) = \sum_{n=-M}^M g(n) W_N^{kn} = A_G(k) e^{j\theta_G(k)} \quad (2)$$

式中 $n = -M, \dots, M$, 且 $N = 2M + 1$; $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$; $A_F(k)$ 和 $A_G(k)$ 为幅度部分, $e^{j\theta_F(k)}$ 和 $e^{j\theta_G(k)}$ 为相位部分, 则归一化后的相位差为

$$\hat{R}(k) = \frac{F(k)G(k)^*}{|F(k)G(k)|} = e^{j\theta(k)} \quad (3)$$

式中 $G(k)^*$ 代表 $G(k)$ 的复数共扼, $\theta(k) = \theta_F(k) - \theta_G(k)$, 而 $\hat{R}$ 的 1D IDFT(一维离散傅立叶反变换)为

$$\hat{r}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-M}^M \hat{R}(k) W_N^{-kn} \quad (4)$$

当两个图像序列相似时, $\hat{r}$ 将出现一个明显的峰值 α , 峰值的位置 δ 即为两个图像序列 $f(n), g(n)$ 的相对偏移, 利用相位相关的这一峰值特性可以进行获取双目立体图片之间偏移的计算, 高精度地完成三维重建中的立体匹配.

2.2 基于均值法的一维相位相关匹配算法

利用标定的结果对获取的双目图像进行校正后, 则左右图像的极线保持平行, 如图 1 所示. 图像间的偏移只发生在极线上, 因此可以直接对图像序列进行基于一维相位相关的运算, 从而求出偏移.

当图像质量较差时, 基于原始一维相位相关的匹配算法的精度较低, 采用均值法可以提高匹配的精度, 其主要步骤如下所述:

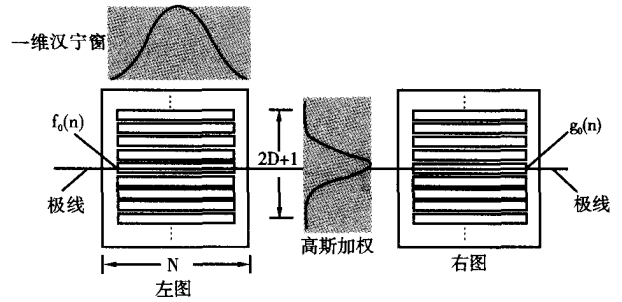


图 1 基于一维相位相关的立体匹配示意图

如图 1 所示, 以横向配置的双目视觉系统为例, 在参考图像序列 $f(n)$ 的纵轴方向偏移 L 得到图像序列 $f_L(n)$, 与之对应的图像序列为 $g_L(n)$, $f_L(n)$ 与 $g_L(n)$ 进行一维相位相关运算(1D POC)可以得到 $\hat{r}_L(n)$, 其均值序列为

$$\hat{r}_{ave}(n) = \frac{1}{2D+1} \sum_{L=-D}^D \hat{r}_L(n) \quad (5)$$

其中 $L = -D, \dots, D$, D 为均值法中最大的序列偏移, $2D+1$ 为均值法采用图像序列的总数. 在均值序列上搜索峰值位置就能得到准确的偏移.

2.3 由粗到精(Coarse-to-Fine)的立体匹配结构

为了提高立体匹配的鲁棒性, 文献[6]同样采用文献[4]中由粗到精的立体匹配结构, 将双目摄像机获取的左右两幅图片缩小到多个分辨率, 匹配时以左图中的点为参考点从右图中搜索匹配点, 由最低的分辨率开始逐步到原始的分辨率进行由粗到精的匹配, 其主要步骤如下所述:

对双目摄像机获得的左右图像分别构造多个等级的分辨率结构, 分为 l_{max} 级进行逐级匹配, 左右图像在第 l 级分辨率的图像 f_l 由下式通过对前一级 f_{l-1} 的 4 邻域像素进行平均得到

$$f_l(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 f_{l-1}(2x+i, 2y+j) \quad (6)$$

由于左右图像校正后极线平行, 因此只需考虑极线方向上的偏移, 以横向配置的双目系统为例, 从最高级 $l = l_{max}$ 级开始, 左图中的参考点 $m = (m_1, m_2)$ 在该级的坐标为 $(\lfloor 2^{-l_{max}} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l_{max}} m_2 \rfloor)$, 可以假设右图中匹配点在该级的坐标和左图相同, 即 $q_{l_{max}} = (\lfloor 2^{-l_{max}} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l_{max}} m_2 \rfloor)$. 在 $l = l_{max} - 1$ 级, 点 m 在 $l = l_{max} - 1$ 级的坐标为 $m_l = (\lfloor 2^{-l} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l} m_2 \rfloor)$, 在 l 级左图以点 $(\lfloor 2^{-l} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l} m_2 \rfloor)$ 为中心的序列和 l 级右图以点 $2q_{l+1}$ 为中心的序列进行一维相位相关运算(均值法), 得到横向相对位移 δ_l , 则 l 级右图匹配点坐标为 $q_l = (\lfloor 2^{-l} m_1 \rfloor, 2\lfloor 2^{-(l+1)} m_2 \rfloor + \delta_l)$. 循环上述步骤对 $l = l-1$ 级逐步进行匹配修正, 直到 $l=0$ 得到最终的 $q(m)$, 完成像素级的匹配. 由

上述算法对左图的像素点进行立体匹配即可在右图中得到每个像素点的匹配点。

文献[6]提出的算法在基本不降低三维重建效果的基础上减少了运算时间,但是作者没有考虑到边缘效应对一维相位相关算法的影响,均值法中没有考虑图像序列集的权值,由粗到精的立体匹配结构中也并没有考虑到各分辨率之间的运算冗余,增加了运算的负担。本文将从均值法一维相位相关的优化和由粗到精的立体匹配结构的完善方面对文献[6]进行改进。

3 改进算法

3.1 均值法一维相位相关算法优化

由于图像中取图像块时人为产生边界,与真实世界不符,一般采用 2D Hanning(二维汉宁)窗来减少边界效应。而进行一维相位相关运算时需要在图像中取图像序列,同样会有边界而带来边界效应,这里可以类似地对图像序列加窗处理。如图 1 所示,对长度为 N 的 $f_L(n)$ 与 $g_L(n)$ 分别使用 1D Hanning(一维汉宁)窗来减少边界效应,公式如下:

$$w(n) = \frac{1 + \cos(\frac{\pi n}{M})}{2} \quad (7)$$

其中图像序列长度为 $N = 2M + 1, n = -M, \dots, M$ 。

进行均值法一维相位相关匹配算法时,公式 $\hat{r}_{ave}(n) = \frac{1}{2D+1} \sum_{L=-D}^D \hat{r}_L(n)$ 认为每个图像序列匹配结果 $\hat{r}_L(n)$ 的权值均相同为 1。实际上每个图像序列的匹配结果由于空间相关性的不同对最终的结果贡献不同:参考图像序列 $f_0(n), g_0(n)$ 的匹配结果有最大的贡献,而偏离较大(L 较大即离参考图像序列较远)的图像序列 $f_L(n), g_L(n)$ 贡献较小,甚至会造成最终的结果的误匹配。因此对每个图像序列的匹配结果加不同的权值才更符合图像序列之间的关系。根据实际的图像序列之间的关系,参考图像序列的权值应为最大,偏离增大的图像序列的权值应该减少,本文中采用如图 1 所示的高斯权重值,对每个图像序列匹配结果 $\hat{r}_L(n)$ 加权后序列均值公式如下:

$$\hat{r}_{ave}(n) = \frac{1}{2D+1} \sum_{L=-D}^D \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-L^2/(2\sigma^2)} \right] \hat{r}_L(n) \quad (8)$$

其中 σ 为正态分布的标准偏差, $L = -D, \dots, D, D$ 为均值法中最大的序列偏移, $2D+1$ 为均值法中采用图像序列的总数。

3.2 由粗到精的立体匹配结构完善

文献[6]在由粗到精的匹配过程时并没有考虑各个分辨率之间的关系,但是实际中有大量的点在经过几次匹配后已经匹配正确即偏移为零,以至于在下一个分辨率匹配中进行多余的运算。这样会造成大量的冗余运算,降低了算法的运算效率,因此本文对由粗到精的立体匹配结构进行完善,在当前分辨率下对每个点的匹配结果进行检测,对已经匹配正确的点则跳过下一个分辨率的匹配。

具体步骤为对点 m 在 l 级的相对位移 δ_l 进行判断,若相对位移 $\delta_l \neq 0$,则认为该点还没有正确匹配,那么继续进行下一个分辨率的匹配。若 $\delta_l = 0$,则认为该点已经正确匹配,并进行如下的运算:

$$q_{l-1}(m) = (\lfloor 2^{-(l-1)} m_1 \rfloor, 2 \lfloor 2^{-l} m_2 \rfloor) \quad (9)$$

$$\alpha_{l-1}(m) = \alpha_l(m) \quad (10)$$

利用运算结果直接跳过下一个分辨率的匹配,提高运算效率。

3.3 三维模型输出优化

文献[6]对匹配的结果并没有进行误匹配的推断和修正,但是实际中匹配结果仍有部分误匹配,需要进行后处理对其进行限制,以使误匹配不会输出到最终的三维模型中,影响三维重建的实际效果。本文考虑实际三维模型的最大深度和最小深度,同时设定深度的范围和峰值的阈值 α_{th} ,若对应点的深度不在设定的深度范围内则不输出,而对应点在匹配过程中所得的峰值 α 小于阈值 α_{th} 也不输出。

设参考点坐标为 (x_l, y_l) , 匹配点的坐标为 (x_r, y_r) , 对应所得峰值为 α , 则视差 $d = x_l - x_r$ 。

若 $\alpha \geq \alpha_{th}$ 且 $d_{min} < d < d_{max}$, 则输出到三维模型中,这里 d_{min} 为最小视差, d_{max} 为最大视差。

4 实验结果

本文实验硬件环境为:用两个 Basler 网络摄像机(型号 scA1400-17gc)搭建起横向平行的双目摄像机系统, Intel(R) Core(TM) Duo CPU E8400 3.00 GHz, 2.00GB 内存的计算机,运行的软件环境为:MATLAB R2010a。实验所用的图像为本文所搭建的双目摄像机系统获取的图片,利用工具 Camera Calibration Toolbox for Matlab 及双目摄像机的内外参数(图像中心点坐标,焦距,基线长度)对所拍摄的图片进行校正,并得到校正后内外参数。实验参数匹配等级 l_{max} 为 5, 匹配序列大小为 33, 均值法参数根据分辨率不同设定, 图片大小为 1388×1038 , 匹配的目标大小为 270×350 。

校正后的图片如图 2 所示.



图 2 校正后的效果

由文献[6]中的算法进行三维重建可以得到图 3 所示的三维模型(加入深度限制),输出三维模型的精度较高,可见文献[6]中的算法在保证高精度三维模型的基础上减少了运算量,其运算时间为 68.311 秒.图 4 为由本文提出的改进算法所得结果,在保证输出三维模型与文献[6]中的算法具有相同精度的前提下,运算时间得到显著地减少,运算时间为 46.763 秒,减少了 31.54%.

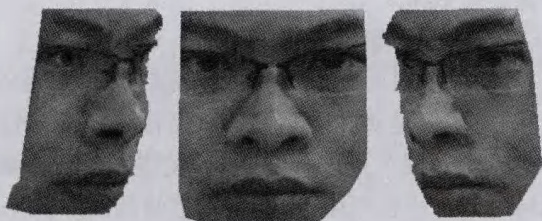


图 3 文献[6]中相位相关算法所得三维模型



图 4 本文改进的相位相关算法所得三维模型

5 结束语

本文提出的改进算法对图片图像序列进行了有效的加窗处理,并利用均值法中各图像序列之间的空间相关性进行合理的加权处理,充分利用了各匹配等级之间的关系减少冗余运算并引入输出三维模型的后处理.本文提出的改进算法在保证三维模型精度的基础上能使得运算效率明显提高.

参考文献:

- [1] 徐奕,周军,周源华. 立体视觉匹配技术[J]. 计算机工程与应用,2003,15(1):1-5.
- [2] 周佳立,张树有,杨国平. 基于双目被动立体视觉的三维人脸重构与识别[J]. 自动化学报,2009,35(2):123-131.
- [3] 周佳立,张树有. 基于双目被动立体视觉的脚型建模与比对方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(6):782-788.
- [4] Muquit M A, Shibahara T, Aoki T. A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching [J]. IEICE Trans. Fundamentals, 2006, 89(3):686-697.
- [5] 李达,潘志斌,乔瑞萍,等. 基于相位相关的图像三维重建算法[J]. 微电子学与计算机,2012,29(4):53-57.
- [6] Shibahara T, Aoki T, Nakajima H. A high-accuracy stereo correspondence technique using 1D band-limited phase-only correlation[J]. IEICE Electronics Express, 2008,5(4):125-130.
- [7] 邓红梅,吴四夫. 基于相位相关算法的研究与实现[J]. 信息技术,2005,29(4):19-20.

作者简介:

李 达 男,(1986—),硕士研究生.研究方向为图像处理.