

基于相位相关的图像三维重建算法

李 达, 潘志斌, 乔瑞萍, 李敬源

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在 Muquit M A 等提出基于相位相关的三维重建算法的基础上提出改进, 对图像进行细节恢复的前处理; 利用各个匹配等级之间的结构相关性进行搜索限制; 在每个匹配等级下都进行畸点的识别和重定位; 对匹配结果进行限制深度的三维模型优化处理. 实验结果表明, 提出的改进算法比原始算法的三维重建性能有明显提升.

关键词: 双目视觉; 三维重建; 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(2012)04-0053-05

3D Reconstruction Algorithm Based on Phase-Only Correlation

LI Da, PAN Zhi-bin, QIAO Rui-ping, LI Jing-yuan

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Muquit M A et al proposed a high-accuracy 3D measurement system based on Phase-Only Correlation. In this paper, we propose four improvements as follows: enhance image texture; limit the search range by the structural correlation between search layers; detect and correct outliers at all search layers; limit the range of depth. Experimental results show that the 3D reconstruction performance is improved significantly compared to the original algorithm.

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

1 引言

三维模型逐步得到广泛应用, 在到医学、电影、工业、游戏及现代科技中扮演着极其重要的角色^[1]. 三维重建作为获取三维信息的有效手段已经成为计算机图形学和计算机视觉领域的一个研究热点. 获取三维信息的主要技术分为主动式和被动式两种: 主动式技术需要激光扫描获取深度图或者医学影像设备(如 CT、MRI、PET 等)获取断层的层片数据序列, 这些设备获取的数据精确, 但是由于过于昂贵而无法普遍应用; 而基于立体视觉的被动式技术只需要简单的设备(两个摄像头), 更能被大众接受. 虽然被动式技术可以适合很多应用场合, 但是较低的三维重建精度仍然是被动式三维重建技术的主要难题^[2-4].

相位相关技术具有良好的抗噪性、健壮性和高精度^[3], 且能推广到彩色图像中^[5], 逐渐成为被动式三维重建的重要技术之一. 文献[6]中将相位相关技术利用到高精度的图像配准中, 提出了较完整的基于相位相关的图像匹配技术框架. 在文献[7]中作者将相位相关技术应用到立体匹配中, 利用了多分辨率的结构和加窗技术. 虽然这种方法具有一定的理论意义和合理性, 但在实际应用中, 图片质量较低时以相位相关为基础的三维重建效果就会明显下降. 此外, 文献中的方法在多分辨匹配过程中, 并没有考虑到不同分辨率之间的联系, 同时, 也未能对三维模型的输出进行深度范围的限制, 从而严重影响了三维模型实际的重建效果, 因此本文尝试从这些方面对文献[7]进行进一步改进.

2 基于相位相关的三维重建算法

2.1 基于相位相关的匹配算法(Phase-Only Correlation, POC)

相位相关算法是一种非线性、基于傅氏功率谱的频域相关算法,由于采用该方法只取互功率谱中的相位信息^[8],避免了图像中低频噪声的影响,在图像配准中性能良好,其原理如下所述:

设两幅 $N_1 \times N_2$ 大小的图像 $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$, 其 2D DFT(二维离散傅里叶变换)分别为

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1 n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \quad (1)$$

$$G(k_1, k_2) = \sum_{n_1 n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \quad (2)$$

式中, $n_1 = -M_1, \dots, M_1, n_2 = -M_2, \dots, M_2$, 且 $N_1 = 2M_1 + 1, N_2 = 2M_2 + 1; W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}, W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}; A_F(k_1, k_2)$ 和 $A_G(k_1, k_2)$ 为幅度部分, $e^{j\theta_F(k_1, k_2)}$ 和 $e^{j\theta_G(k_1, k_2)}$ 为相位部分, 则归一化后的相位差为

$$\hat{R}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} = e^{j\theta(k_1, k_2)} \quad (3)$$

式中, $\overline{G(k_1, k_2)}$ 代表 $G(k_1, k_2)$ 的复数共扼, $\theta(k_1, k_2) = \theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$,

而 $\hat{R}$ 的 2D IDFT(二维离散傅里叶反变换)为

$$\hat{r}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1 k_2} \hat{R}(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \quad (4)$$

当两幅图像相似时, $\hat{r}$ 将出现一个明显的峰值 α , 峰值的位置 $\delta = (\delta_1, \delta_2)$ 即为两幅图像 $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$ 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, 实现三维重建中的立体匹配。

2.2 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[7]中采用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

$$f_l(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 f_{l-1}(2x+i, 2y+j) \quad (5)$$

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 $(\lfloor 2^{-l} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l} m_2 \rfloor)$ 为中心的块和 l 级右图以点 $2q_{l+1}$ 为中心的块进行相位相关运算(应用空域和频域的滤波技术), 得到相对位移 $\delta_l = (\delta_{l1}, \delta_{l2})$, 则 l 级右图匹配点坐标为 $q_l = 2q_{l+1} + \delta_l$. 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[7]中提出的算法得到了较好的三维重建效果, 但是原文作者没有考虑到相位相关算法对纹理较敏感, 由粗到精的立体匹配结构中也没有考虑到各分辨率之间的相关性及误匹配的累加, 容易造成误匹配无法被判定和修正, 降低立体匹配的精度, 导致三维模型出现较多的毛刺和缺失. 因此本文将从匹配的前后处理和由粗到精的立体匹配结构的完善方面进行对文献[7]的改进。

3 改进算法

3.1 图像细节恢复技术

由于利用相位相关技术进行匹配运算时, 目标表面的纹理对匹配的结果有较大影响, 若目标表面较光滑(即纹理较少)容易造成误匹配, 因此有必要对图像进行纹理增强的前处理. 本文对图像提取高频信息并将其叠加到原图像来使图像中的纹理更明显, 以提高匹配结果的可靠度。

利用下面的公式进行线性高通滤波:

$$c(x, y) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m f(i, j) g(x-i, y-j) \quad (6)$$

式中, f 为原始图像, c 为提取的高频部分, g 为 3×3 高通滤波模板:

$$g = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后得到纹理增强后的图像 f_1 :

$$f_1(x, y) = f(x, y) + c(x, y) \quad (8)$$

式中, f_1 为纹理增强后图像, f 为纹理增强前图像, c 为提取的高频部分, (x, y) 为图像的坐标点。

3.2 结构相关性搜索技术

在对式(4)中的 $\hat{r}(n_1, n_2)$ 寻找峰值时, 若进行全局的搜索可能有误匹配产生, 利用限制条件和匹配等级间的相关性可以限制搜索范围, 减少误匹配的产生。由横向的双目视觉系统的极线限制可知校正后纵向的偏移几乎为零, 因此纵向的搜索范围可以减小; 由粗到精的结构也决定了每个匹配等级之间有较大的相关性, 因此横向的搜索范围也可以减小。

对 $\hat{r}(n_1, n_2)$ 加低通滤波后再寻找峰值, 即限制峰值的搜索范围, 公式如下:

$$h(k_1, k_2) = \begin{cases} 1, & |k_1| \leq U_1, |k_2| \leq U_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

对 U_1 和 U_2 的设定即纵向和横向偏移的限制范围过小时, 算法不能搜索到准确的偏移(尤其是偏移较大时), 由粗到精的结构也不能发挥其自我修正的功能; 当限制范围过大时又不能起到限制误匹配的功能, 因此要通过实验确定其搜索范围。

3.3 畸点识别及重定位技术

文献[7]中在匹配结束后仅进行一次误匹配的判定和修正, 但是实际中在中间级的匹配过程也有误匹配产生且会将误差放大带入到下一个分辨率的匹配中; 另一方面, 文献[7]中误匹配的判定是利用固定的阈值 α_{th} 和峰值 α 进行比较, 但实验中我们发现各个分辨率下的峰值整体变化较大, 因此本文采用更有效的动态方法来确定阈值 α_{th} 。

具体步骤为统计每个匹配等级下的峰值 α 的分布, 设定 l 级一定范围内的边界为阈值 α_{lth} ; 对求得的 $q_l(m_l)$, 若相位相关匹配运算所得峰值 α 不小于阈值 α_{lth} , 即 $\alpha \geq \alpha_{lth}$, 则认为该点为合群点, 并进行如下运算:

$$q_k(m_l) = q_l(m_l) \quad (10)$$

$$d_{lc}(m_l) = m_l - q_l(m_l) \quad (11)$$

若 $\alpha < \alpha_{lth}$, 则认为该点为离群点, 取该点周围 5×5 范围内除该点外的 d 值的中值(即按从小到大排序后的中间值)为该点的 d 值, 即

$$d'_l(m_l) = (d_1^{med}, d_2^{med}) \quad (12)$$

$$q'_l(m_l) = m_l - d'_l(m_l) \quad (13)$$

然后, 再次进行相位相关匹配运算, 若新的峰值大于阈值 α_{lth} 则

$$q_k(m_l) = q'_l(m_l) \quad (14)$$

$$d_k(m_l) = m_l - q'_l(m_l) \quad (15)$$

$$\text{否则令 } d_k(m_l) = d'_l(m_l) \quad (16)$$

3.4 三维模型输出优化技术

由立体匹配所得的结果中有部分误匹配, 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。文献[7]中设定峰值的固定阈值 α_{th} 来限制误匹配的输, 但是这样仍会有部分误匹配没有被限制。本文进一步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

本文用于实验的硬件环境为: 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, 2.00 GB 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; 实验参数取值: 匹配等级 l_{max} 为 5, 匹配窗口大小 33×33 , 阈值 α_{th} 的范围为 10%, 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 1 所示, 为了进行更全面的比较, 图 2 中给出由基本的 SSD (Sum of Squared Differences) 算法所得的三维模型, 匹配时取图像之间的灰度差的平方和作为相似度的衡量标准, 公式如下:

$$R_{SSD} = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [f(n_1, n_2) - g(n_1, n_2)]^2 \quad (17)$$

式中, 匹配块大小为 $N_1 \times N_2$ 。

实验结果表明, SSD 算法思路简单, 运算速度快, 基本能得到大部分的正确匹配, 但是由输出的三维模型可以看出有明显的变形。图 3 所示为由文献[7]提出的算法所得的结果(加入深度限制), 输出的三维模型精度较高, 没有明显的变形, 但是模型上毛刺较多。图 4 所示为为由本文提出的改进算法所得的结果, 输出的三维模型精度进一步明显提高, 模型的变形也进一步减少, 模型表面的毛刺大量减少。

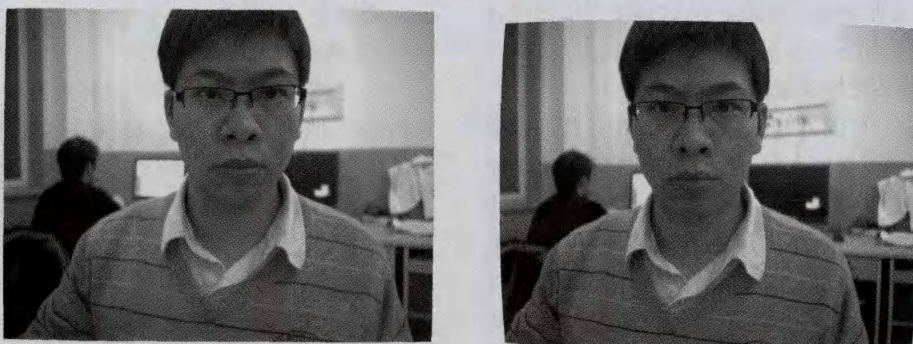


图 1 校正后的图片

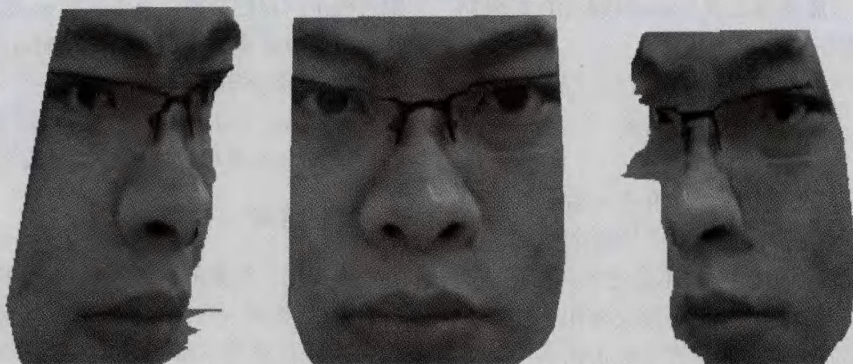


图 2 由 SSD 算法所得三维模型

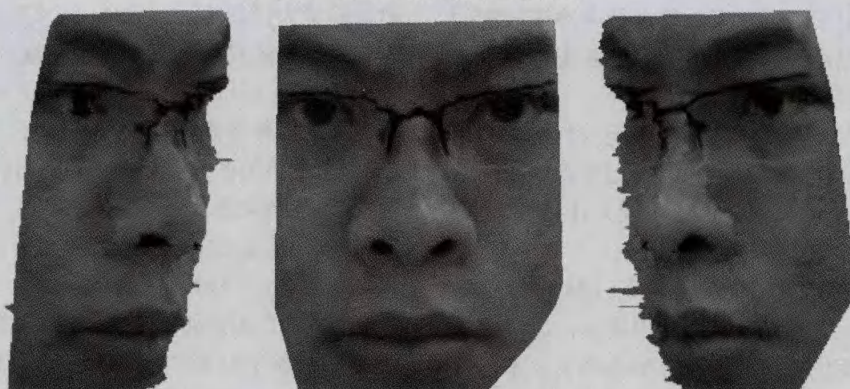


图 3 由文献[7]中相位相关算法所得三维模型

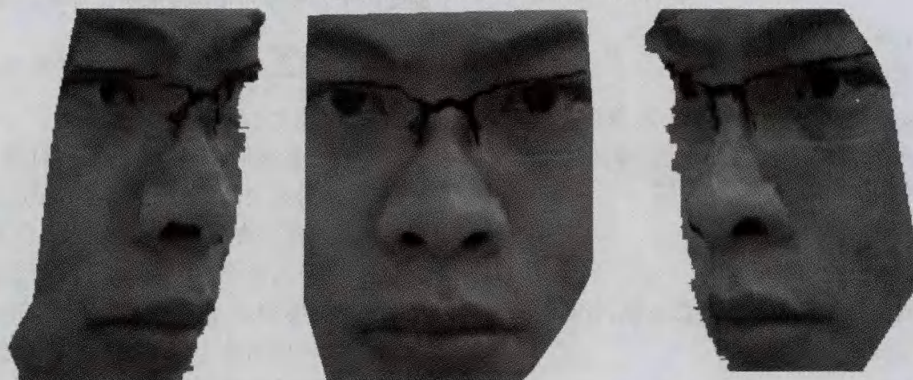


图 4 由本文改进的相位相关算法所得三维模型

5 结束语

在文献[7]的基础上,本文提出的改进算法对图片进行了有效的前处理,充分利用了各个匹配等级之间的联系进行峰值搜索,利用动态阈值使误匹配的判定和修正更合理、输出三维模型的后处理更有效。综合来看,本文提出的改进算法对基于双目视觉的三维重建具有更加良好的性能。

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] 杨东梅,印桂生,赖初荣. 虚拟装配中基于双目视觉的用户化身研究[J]. 微电子学与计算机,2010,27(6):35-38.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 冯巍,胡波. 基于超复数相位相关的彩色图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(1):183-187.
- [6] Takita K, Aoki T, Sasaki Y, et al, High accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation [J]. IEICE Trans. Fundamentals, 2003, 86 (8):1925-1934.
- [7] 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.
- [8] 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.
- 潘志斌 男,(1963—),教授. 研究方向为图像编码、图像识别.
- 乔瑞萍 女,(1966—),副教授. 研究方向为图像编码算法及其DSP实现.
- 李敬源 女,(1988—),硕士研究生. 研究方向为图像处理.

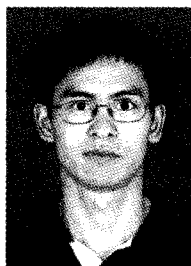
(上接第52页)

- [2] Abo A M, Gray P R. A 1.5-V 10-bit, 14.3-MS/s CMOS pipeline analog-to-digital converter [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(5):599-606.
- [3] 陈利杰,周玉梅. 一个用于12位40-MS/s低功耗流水线ADC的MDAC的设计[J]. 微电子学与计算机, 2011,28(1):108-112.
- [4] 李天望,叶波,江金光. 1.8V 10位50MS/s低功耗流水线ADC的设计[J]. 微电子学与计算机,2010,27(4):46-49.
- [5] Fan M J, Ren J Y, Shu G H, et al. A 12-bit 40-MS/s SHA-less pipelined ADC using a front-end RC matching technique[J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(1): 015002-1—015002-5.
- [6] Cline D W, Gray P R. A power optimized 13-b 5 Msamples/s pipelined analog-to-digital converter in 1.2 μ m CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1996, 31(3):294-303.
- [7] Chang D Y. Design techniques for a pipelined ADC without using a front-end sample-and-hold amplifier [J]. IEEE Transactions on Circuits and Sys-

tems—I: Regular Papers, 2004, 51(11): 2123-2132.

- [8] Chen H S, Song B S, Bacrania K. A 14-b 20-msample/s CMOS pipelined ADC[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36(7):997-1001.
- [9] 王晋雄,刘力源,李冬梅. 一种高线性度14位40 MS/s流水线A/D转换器[J]. 微电子学,2010,40(6):765-769.

作者简介:



周佳宁 男,(1987—),硕士研究生. 研究方向为模拟混合信号集成电路设计.