

基于小波多分辨率网格划分的双目立体视觉方法^{*}

徐 刚 张文明 李海滨 刘 彬

(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 河北 066004)

摘要 基于双目立体视觉的三维重建是机器视觉技术中重要的研究内容,在机器人视觉导航、航空测绘、医学成像和工业检测等很多领域都有广泛的应用。研究空间网格候选点三维坐标与图像中二维坐标的映射关系,对基于网格候选点投影灰度相似性的立体视觉方法进行改进,建立多分辨率网格节点与小波分解图像实现一一对应关系,通过逐级分析网格节点的映射像点灰度相似性,确定由粗到精的候选点筛选策略,最终恢复被测物体的深度信息。Matlab 平台下的仿真实验可以验证,小波多分辨率网格节点的构建不但改善了计算效率,也避免了过多候选点带来的随机误差,使三维重建精度得到了提高。

关键词 机器视觉; 三维重建; 双目立体视觉; 网格划分; 小波变换

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.1021

Binocular Stereo Vision Method Based on Wavelet Multi-Resolution Mesh Generation

Xu Gang Zhang Wenming Li Haibin Liu Bin

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The 3D reconstruction based on binocular stereo vision is a main part of the machine vision technology and has a variety of applications in robot navigation, aerial surveying and mapping, medical imaging, industrial inspection, etc.. With analysis of the relation between 3D coordinates of the mesh candidates and 2D coordinates in images, the mesh candidates similarity of gray value based stereo vision method was improved. Multi-resolution mesh grid was established corresponding to the wavelet decomposed images. The depth information of the object was reconstructed according to the similarity of the gray values between both images with the choosing strategy from the rough to the fine. The algorithm has obvious superiorities in computation and accuracy shown by experiments using Matlab.

Key words machine vision, 3D reconstruction; binocular stereo vision; mesh generation; wavelet transform

1 引 言

双目立体视觉技术是机器视觉中重要的分支,它是基于视差原理,由双摄像机从不同角度同时获取同一物体的两幅数字图像,恢复出物体三维几何信息的方法。随着双目立体视觉技术在近 20 多年来的迅速发展,已经逐渐完善并应用到机器人视觉导航、航空测绘、医学成像和工业检测等很多领域^[1]。但由于图像立体匹配过程的复杂性,立体视

觉测量技术一直难以在测量精度和计算速度之间达到完美平衡^[2],仍需要做大量的工作对其进行不断完善。

针对基于网格候选点投影灰度相似性的三维重建方法存在的一些问题^[3]进行研究,引入了小波多分辨率分析,建立多分辨率网格节点与小波分解图像对应,通过网格节点在图像上的映射灰度相似性确定被测物体的深度信息。多分辨率网格节点的逐级求精

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-09-25

基金项目: 河北省科技攻关项目(07212120D)和河北省教育厅基金(2000327)资助课题。

作者简介: 徐 刚(1979—),男,博士研究生,主要从事光电检测技术和计算机视觉方面的研究。E-mail: xg@ysu.edu.cn

导师简介: 刘 彬(1953—),男,教授,博士生导师,硕士,主要从事光电检测技术和信号处理方面的研究工作。

算法实现了候选点的快速筛选,同时也避免了局部最优引起的随机误差。系统仿真实验证明,使用小波多分辨率网格节点对于三维重建效果和计算效率都有明显的提高。

2 基于网格候选点双目立体视觉模型

在以往基于图像匹配的三维重建过程中,通过匹配后特征点的二维坐标恢复出空间三维坐标^[4,5]。而本文方法中,首先建立三维空间网格作为被测物体深度的候选点,然后对比有效深度范围内所有候选点映射到两幅 CCD 图像上像点的灰度相似性,进而得到物点的深度信息。因此如何有效构建世界坐标系下的网格节点是本方法中的关键问题。

2.1 摄像机成像模型

通过摄像装置的标定,可以确定世界坐标系到图像坐标系的映射关系^[6],并依此建立成像模型。设 (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标系的坐标, (x_c, y_c, z_c) 为摄像机坐标系的坐标, (u, v) 为图像坐标系的坐标,式(1)给出了齐次坐标描述的摄像机投影基本公式;

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \gamma & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A' \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 为 3×4 矩阵,称为投影矩阵, \mathbf{M}_1 由 $s_x, s_y, u_0, v_0, f, k_1$ 和 k_2 等确定。这些参数只与摄像机本身性质有关,称为摄像机内部参数 (Intrinsic parameters); \mathbf{M}_2 由 R, t 给出,完全由摄像机相对于世界坐标系的方位决定,称为摄像机的外部参数 (Extrinsic parameters)。

2.2 三维网格候选点的构建

应用边缘检测等图像处理技术的预处理过程,可以提取被测物轮廓特征的二维图像坐标,结合世界坐标系与图像坐标系的映射关系,确定被测物体曲面所在的世界坐标系大致范围。通过限定有效的被测区域范围有助于减少计算量,提高计算效率。网格节点之间距离间隔的选取取决于摄像机的内部参数,如果该距离过大,则不能保证某一深度的网格节点与物面重合,导致计算错误;如果该距离太小,则会大大增加系统的计算量,同时过多的候选点也

无助于重建精度的提高。因此,参照摄像机标定的结果^[7],网格节点间距设定为 $2/(s_x + s_y)$,并根据此标准将世界坐标系沿坐标轴方向划分为拥有 $m \times n \times l$ 个节点的三维空间网格。其中, s_x 和 s_y 为摄像机内部参数,代表图像平面上沿 x 轴、 y 轴方向单位距离上的像素点数, $s = s_x/s_y$ 称为尺度因子。

既然三维重建的目的是要恢复被测物体在三维空间中的深度信息,那么可以将世界坐标系中 Z 轴坐标看作三维空间的深度信息。把 X 轴、 Y 轴坐标确定而 Z 轴坐标值顺序变化的网格节点作为一组候选点,通过投影在左右图像的灰度相似性测度判断哪一个点代表了物体在空间中的深度信息。整个三维重建的过程可以看作是对 $X_w O_w Y_w$ 平面上的 $m \times n$ 个节点分别计算深度,确定在 Z 方向上 l 个网格候选点中哪一点与真正的物面重合。图 1 给出了空间中矩形网格的其中一部分,根据公式(1),将每一组网格节点分别映射到两台摄像机的图像坐标系,并对相应像点做灰度相似性分析。

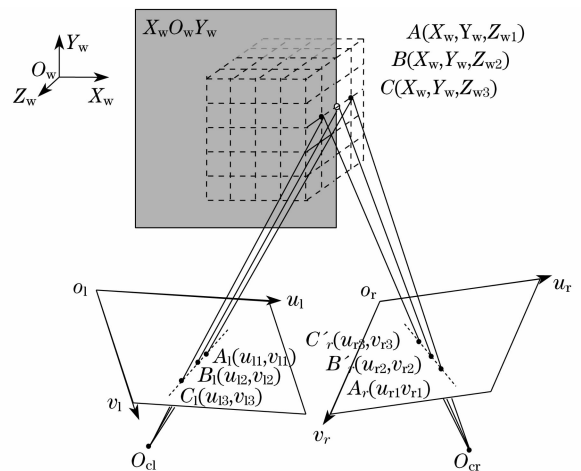


图 1 不同深度的网格节点在像面上的映射关系
Fig. 1 Projection of the points with variable depth candidates in world coordinate system

由图 1 所示,假设被测物体表面与世界坐标系 $X_w O_w Y_w$ 平面重合,而空心点 $B(X_w, Y_w, Z_w2)$ 落在物面 $X_w O_w Y_w$ 上,那么两台摄像机的图像坐标系上相应映射点 $B'_1(u_{12}, v_{12})$ 和 $B'_r(u_{r2}, v_{r2})$ 的灰度信息一定相同,即为物面上该点的灰度值。而在 B 点前后的其它网格节点,如点 $A(X_w, Y_w, Z_w1)$,映射到左摄像机图像坐标系上的点 $A'_1(u_{11}, v_{11})$ 显示的灰度信息则是物面 $X_w O_w Y_w$ 与空间直线 $O_{cl}A$ 相交物点的灰度值。同理可知该点 $A(X_w, Y_w, Z_w1)$ 投影到右摄像机像面上的坐标点 $A'_r(u_{r1}, v_{r1})$ 的灰度是物面 $X_w O_w Y_w$ 与空间直线 $O_{cr}A$ 相交的物点的灰度值。

很明显这两个 CCD 像面上的映射点反映出的灰度信息并不是来自同一物点,因此 A 点投影到摄像机像面上的两点 $A'_1(u_{11}, v_{11})$ 和 $A'_r(u_{r1}, v_{r1})$ 灰度值并不相同。通过对比每一组数据的投影灰度信息,可以判定出灰度相似度最高的一对点所对应的空间点就是所求的深度信息。

3 小波多分辨率分析

小波变换是一种时间窗和频率窗都可改变的时间局域化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。正是因为这种多分辨率特性,使得小波变换能有效地从图像中提取出信息,实现对图像的自适应分析^[8]。

由于图像是二维信号,需要将小波变换从一维推广到二维,二维多分辨率分析可分两步进行。首先沿 x_1 方向分别用 $\varphi(x_1)$ 和 $\psi(x_1)$ 作分析,把 $f(x_1, x_2)$ 分解成平滑逼近和细节这两部分,然后对这两部分再沿 x_2 方向分别用 $\varphi(x_2)$ 和 $\psi(x_2)$ 作类似分析。这样得到的四路输出中,经 $\varphi(x_1)$ 和 $\varphi(x_2)$ 处理所得的一路是 $f(x_1, x_2)$ 的第一级平滑逼近 $A_1 f(x_1, x_2)$,反映两个方向的低频成分。其余三路输出为细节函数, $D_1^{(1)} f(x_1, x_2)$ 反映水平方向的低频成分和垂直方向的高频成分, $D_1^{(2)} f(x_1, x_2)$ 反映水平方向的高频成分和垂直方向的低频成分, $D_1^{(3)} f(x_1, x_2)$ 反映水平方向的高频成分和垂直方向的高频成分。

多分辨率分析对图像信号具有连续逼近的能力,因此通过小波函数来构造多分辨率网格节点,可以由粗到精地实现候选点的逐级筛选。二维小波分解在每一个尺度上都将在上一尺度的低频平滑图像分解为新的低频平滑图像和高频细节图像,而低频平滑图像集中了原始图像的大部分能量,反映了图像的绝大部分信息,因此可以利用这些不同尺度上的低频图像进行三维候选点的逐级筛选^[9]。

如图 2,小波函数把原始图像分解成分辨率由低到高的子图集,而随着图像的每一级小波分解,图像尺寸变为原图的四分之一,空间网格节点数量随之调整为原来的四分之一,同时节点间距也相应的调整为原来的 2 倍,这样就保证了网格节点与小波分解图像的逐级对应关系。这种由粗到精的算法既提高了计算速度,同时也避免了过多候选点对测量准确性带来的干扰。根据相似性测度对候选点逐层筛

选直至回到原始分辨率,最终实现深度信息的测量。

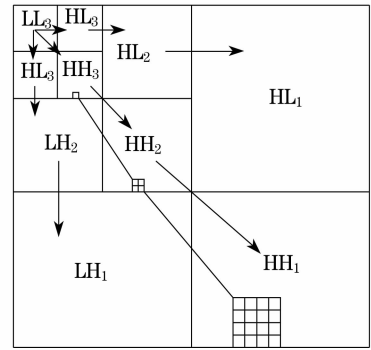


图 2 3 级小波分解结构图

Fig. 2 The diagram of 3-scale wavelet decomposition structure

在选择小波基的时候,应该满足两个要求:第一,在低频图像中应尽可能地多保留原始图像的信息;第二,函数应尽量避免过于复杂,保证算法的高效性^[10]。Daubichies 小波在运动估计中应用广泛,可以很好地保留低频信息,本文采用 Daubichies 小波进行图像分解。

4 实验结果

通过仿真实验,验证了小波多分辨率对网格候选点算法的优化效果。构建与小波分解图像对应的多分辨率三维网格节点,并依次计算各级网格节点投影到左右图像上像点的灰度相似性。每一级相似度较高的前 10% 网格节点作为下一级计算的候选点,经过逐级运算直至回到原始分辨率,确定被测物体的深度信息。

实验在 Matlab 2008 环境下构建世界坐标系中被测物体的模型,并将未使用小波多分辨率的网格候选点方法与本文引入小波变换后的算法进行了比较。图 3 中(a)为摄像机获得的原始图像,分辨率为 800×800 , (b)为该图像的小波分解图。经多次实验,采用三级小波分解效果最佳,三维重建结果如图 4 所示。相对于未使用小波变换的网格候选点方法,本方法在仿真实验中程序运行时间从原来的 63.51 s 提高到 39.82 s,重建精度也从 90.97% 提高到 93.04%。重建精度是将仿真建模和三维重建后得到的世界坐标系中三维坐标的比较,在误差范围允许的条件下验证深度信息测量的正确性。由结果可知,前者对所有深度范围中的网格节点逐一计算,不但计算量较大,而且会有随机误差对判决产生影响。多分辨率网格划分方法在速度上有明显优

势,且三维重建精度也有所提高。

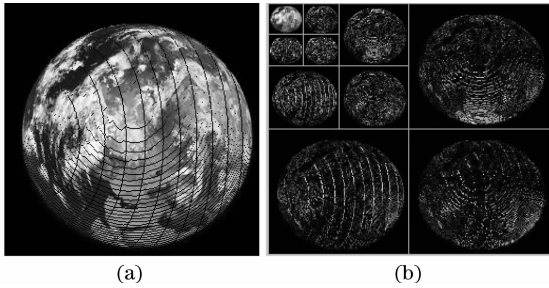


图 3 摄像机获取图像及其三级小波分解效果

Fig. 3 Picture from camera and wavelet decomposition at level 3

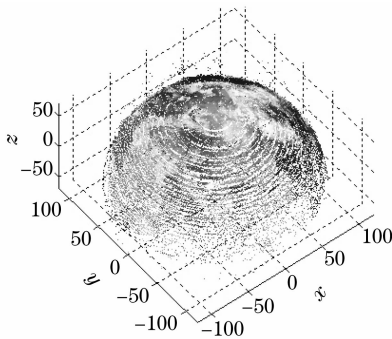


图 4 三维重建结果

Fig. 4 Result of the 3D reconstruction

5 结 论

基于网格点投影灰度对比的三维重建方法,应用小波变换的多分辨率特性来自适应构建网格节点。通过对各级网格候选点在左右 CCD 图像上映射点的相似性度量,逐级筛选表征被测物体深度的网格候选点,最终恢复物体的深度信息。小波多分辨率分析的引入,实现了由粗到精的候选点筛选策略,提高了系统的计算效率,使其能够满足实时计算的需要,同时也实现了三维重建精度的优化,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Zheng Nanning. *Computer Vision and Pattern Recognition* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998, 197~183
郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 197~183
- Zhu Xiaoming, Gao Zhiyun. Theoretic research on double-CCD stereoscopic system[J]. *Opt. Tech.*, 2003, **29**(3): 298~300
朱效明, 高雅允. 双 CCD 立体视觉系统的理论研究[J]. 光学技术, 2003, **29**(3): 298~300
- Xu Gang, Zhang Wenming, Lou Fengwei *et al.*. A new 3D reconstruction method based on gray similarity of the projecting grid points[J]. *Acta Optica*, 2008, **28**(11): 2175~2180
徐刚, 张文明, 娄凤伟等. 基于网格点投影灰度相似性的三维重建新方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2175~2180
- Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng *et al.*. A robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 454~461
刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 454~461
- Li Haibin, Zhang Qiang. A new stereo matching algorithm based on sub-line segment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 907~912
李海滨, 张强. 一种新的基于子线段的立体匹配算法[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 907~912
- Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1440~1442
余俊, 林家明, 杨建宇等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1440~1442
- Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- Sarkar I, Bansal M. A wavelet-based multiresolution approach to solve the stereo correspondence problem using mutual information [J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern*, 2007, **37**(4): 1009~14
- Zhang Wenming, Liu Bin, Li Haibin. Characteristic point extracts and the match algorithm based on the binocular vision in three dimensional reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **34**(2): 181~185
张文明, 刘彬, 李海滨. 基于双目视觉的三维重建中特征点提取及匹配算法的研究[J]. 光学学报, 2008, **34**(2): 181~185
- Zhang Jingmin, Zhang Zhijia, Wang Dongshu. A fast pyramid image matching algorithm based on wavelet decomposition[J]. *Microelectronics & Computer*, 2007, **24**(1): 207~213
张敬敏, 张志佳, 王东署. 基于小波分解的塔式快速图像匹配算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, **24**(1): 207~213