

双目视觉小波域 SIFT 匹配与极线约束算法研究

汪 瑶, 徐 杜, 蒋永平, 卢传泽

(广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要:研究双目立体视觉技术,特征的提取和匹配是双目视觉的最基本的问题。目前,SIFT 已经被证明鲁棒性最好的局部不变特征描述符。但是 SIFT 算法产生的误匹配较多,精度偏低,为了解决这一问题,同时降低算法特征提取与匹配的复杂度,达到双目立体视觉实时性的要求,文中提出了一种结合小波变换和 SIFT 特征点的双目立体视觉匹配方法。首先,对双目视觉系统采集的左、右图像进行小波分解,把分解得到的低频图像作为输入,用 SIFT 算法进行特征点的初始匹配,再利用极线约束的理论求得精确匹配。实验结果表明,该方法具有较强的适应性,能够在减少误匹配的同时,大大加快运算速度。

关键词:小波变换;立体匹配;尺度不变特征变换;极线约束

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)11-0081-04

Study on Combined Wavelet-SIFT Matching and Epipolar Constraint Algorithm for Binocular Stereo Vision

WANG Yao, XU Du, JIANG Yong-ping, LU Chuan-ze

(Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The feature extraction and matching is the basic problem for binocular stereo. SIFT has proved to be the most robust local invariant feature descriptor in object recognition and matching. However, it generates the mismatch and low precision. In order to solve this problem and reduce complexity of the SIFT algorithm, meeting the higher accuracy and real-time requirements of binocular stereo vision, present an algorithm of binocular stereo vision matching approach based on wavelet transformation and scale invariance feature transformation (SIFT). First, process the left and right images respectively collected by binocular stereo vision system based on the method of wavelet decomposition. Then complete the initial match of feature point to low frequency image obtained by decomposition with SIFT algorithm. Finally, achieve exact match in accordance with epipolar constraint theory. The experimental results prove that this algorithm has a strong adaptability. It makes high matching accuracy and enhances the computing speed.

Key words: wavelet; stereo matching; SIFT; the epipolar constraint

0 引 言

双目立体视觉技术通过比较不同位置对同一场景拍摄的两幅图片找出其中匹配的场景点,从二维图像信息中恢复三维场景的信息。这其中最关键就是立体匹配的问题^[1]。基于 SIFT 特征的匹配算法,是目前国内外匹配研究领域比较成功的一种算法^[2]。SIFT 特征描述子使用梯度方向直方图来表示图像局部特征, SIFT 特征点具有尺度、旋转和光照的不变性,优于其

他特征描述子^[3]。但是,当图像间有明显灰度差异时,会产生错误的匹配,且 SIFT 算法计算量大,在对实时性要求较高的系统中并不适用^[4]。

针对 SIFT 的不足,将小波分析与 SIFT 算法相结合是近年新兴的改进 SIFT 算法的图像匹配算法^[5]。由于小波理论可以对指定时段和频段内的信号进行分析,根据噪声能量一般集中于高频、而图像频谱分布于一个有限区间的特点,可以利用小波分析局部化特征分离图像信号与噪声,增强立体匹配抗歧义性的能力。最后,根据双目视觉中的极线约束的匹配原则^[6],可以将特征点匹配的搜索范围从二维平面缩小到一维直线上,从而大大提高了特征点匹配的效率。

文中结合小波变换、SIFT 特征匹配算法和极线约束的匹配原则,采用一种可以满足实时性要求比较高

收稿日期:2012-03-06;修回日期:2012-06-11

基金项目:广东省教育部产学研结合项目(2010B090400186)

作者简介:汪 瑶(1987-),女,湖南桃江人,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理;徐 杜,教授,研究方向为光电技术与系统、计算机测控技术、智能控制和短距离无线通信。

的综合应用方法,与传统算法相比能剔除大量图像误匹配、改善匹配效果,减少匹配计算量,大大缩短匹配时间。

1 小波域 SIFT 匹配算法的实现

1.1 算法框架

当 SIFT 特征提取和匹配算法应用于对实时性要求较高的双目立体视觉系统中时,主要存在以下 3 个问题^[7]:

(1) SIFT 特征提取算法多次计算卷积平滑和统计加权直方图,需要大量的浮点数运算。算法复杂度高,计算时间长。

(2) SIFT 算法将提取大量特征点,但只有很少一部分可以正确匹配,给未匹配成功的特征点建立描述子会占用大量时间,会影响匹配和搜索速度。

(3) SIFT 算法是一种局部描述子,当图像的局部发生变化时,会出现误匹配。

针对以上问题,文中提出了一种基于小波域和 SIFT 算法的图像匹配算法,其目的是为了在双目立体视觉中提高图像匹配的运算速度和精度。低分辨率图像经小波变换后,受图像局部细节的影响大大降低,提高了该尺度下 SIFT 提取特征的能力和 SIFT 算法的运行速度。剔除高分辨率下匹配对中明显错误的匹配,通过设置阈值可获得相对精确的匹配。

本算法的描述如下:

- (1) 输入双目摄像头拍摄的经过平行校正和畸变校正后的左、右两幅图像;
- (2) 分别对左、右两幅图像进行小波分解;
- (3) 对小波分解后的低频图像利用 SIFT 算法获取初始匹配点对;
- (4) 利用极线约束的原理,进一步得到高精度的匹配点对。

1.2 小波变换

小波分析方法对信号进行压缩的实质是用尽可能少的小波基函数加权求和项来逼近原信号。小波变换针对不同频率在时域上的采样步长是可调节的,即在低频时小波变换的时间分辨率低,而频率分辨率较高,在高频时正好相反^[8]。

离散小波变换(DWT)的多分辨率分析属性使得它可以分析信号上某一特定时刻的频率特性,有很好的空间和频率定位性。Mallat 提出的金字塔模型是计算 DWT 的快速算法。图像是二维信号,使用二维 Mallat 算法处理图像可以得到原始图像在不同尺度、不同方向上的模糊分量和细节分量。

由二维分解小波滤波器对一幅图像进行小波分解得到的结果如图 1 所示。

1.3 极线约束

在立体匹配中,经常利用一些约束条件来减少搜索范围和确定正确的对应点,文中算法采用基于极线约束的图像匹配,这是在已知图像对间相对关系的情况下,沿目标对应极线搜索同名匹配点的过程,极线约束可以将搜索空间从二维降到一维,提高匹配的可靠性和精度^[9]。

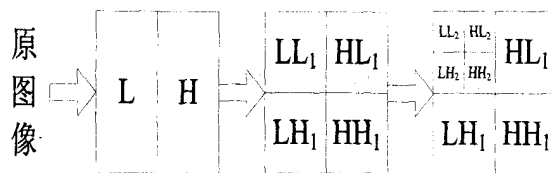


图1 二维金字塔分解示意图

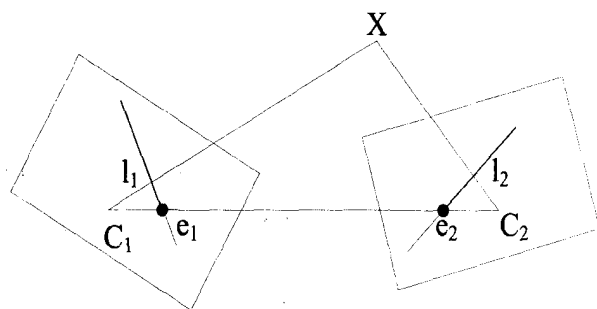


图2 对极几何原理图

由图2可知,空间点 X 在左、右摄像机 C_1 、 C_2 的像点分别为 X_1 、 X_2 ,由 X 、 C_1 、 C_2 三点确定的平面 π 称为极平面, e_1 和 e_2 分别为基线 C_1C_2 与两个像面的交点,称为极点,极平面和两个像面的交线 l_1 和 l_2 称为极线。由图示关系易知,空间点 X 在两个像面的像点将位于对应的极线上。根据此关系,如果在 C_1 像面上确定了 X 的图像点为 x_1 ,则由 X 、 C_1 、 C_2 三点也确定了极平面 π ,相应的极线 l_2 也被确定,此时,在 C_2 像面上确定空间点 X 点的像点位置时只需要在极线 l_2 上搜索即可。

1.4 基于 SIFT 特征的图像匹配

为了提高算法的鲁棒性,减少图像噪声、畸变和图像变换对匹配结果的影响,文中采用 SIFT 特征描述子。SIFT 算法主要通过采用金字塔分层的方法,减少计算量,提高运算速度,而 SIFT 算法是在完成特征点邻域高斯图像梯度计算后,采用统计直方图来构造特征向量,提高了特征描述子对视角变化的鲁棒性,从而整个匹配算法的稳健性得到提升^[10]。

算法首先对尺度空间进行搜索,完成特征检测,确定特征点位置 and 其所处的尺度,然后使用特征点邻域梯度的主方向作为该点的方向特征,从而实现了算子对尺度和方向的无关性。SIFT 特征匹配算法分为生成 SIFT 特征描述子和 SIFT 特征匹配两部分。SIFT 特征描述子的生成包括尺度空间极值的检测、特征点提取、特征点主方向定义和特征描述子生成 4 步^[11]。

高斯卷积核是实现尺度变换的唯一变换核,利用它可以计算二维图像 $I(x, y)$ 的高斯 - 拉普拉斯 (LoG) 尺度空间 $L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$, 其中, (x, y) 是像素坐标, σ 是尺度坐标, 尺度可变高斯函数为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

为了有效完成对某一尺度的稳定特征点的检测,可以对两个相邻高斯尺度空间的图像相减,得到一个高斯差分 (Difference of Gaussians, DoG) 的响应值图像 $D(x, y, \sigma)$ 。然后仿照 LoG 方法,通过对 $D(x, y, \sigma)$ 进行局部极大搜索,在位置空间和尺度空间中定位关键点。其中,

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ = L(x, y, \sigma) - L(x, y, k\sigma) \quad (2)$$

式中, k 为两相邻尺度空间倍数的常数。

关键点的搜索是通过同一组内各 DoG 相邻层之间的比较完成的,每个采样点都要跟它所有的相邻点 (26 - 邻域) 进行比较。

为了得到稳定的关键点,只删除 DoG 响应值低的点是不够的,DoG 对图像边缘有较强响应值,形成不稳定的边缘响应点。由下式确定特征点的稳定性。

$$\frac{\text{Tr}(H)}{\text{Det}(H)} = \frac{(D_{xx} + D_{yy})^2}{D_{xx}D_{yy} - D_{xy}^2} < \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma} \quad (3)$$

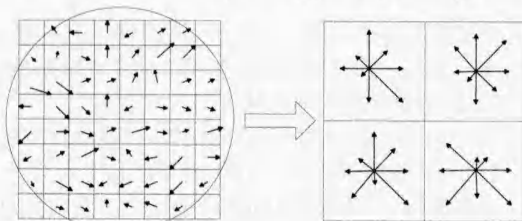
$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, H 是一个 2×2 的 Hessian 矩阵, 阈值 γ 是控制特征点稳定性的参数。Lowe 在论文中给出 $\gamma = 10$ 。

图 3 描述了 SIFT 特征描述子的生成过程,采用有限差分运算,计算以特征点为中心,以 $3 \times 1.5\sigma$ 为半径的区域内图像梯度的幅角和幅值,计算公式如下:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (6)$$



a 从高斯图像求梯度

b SIFT 特征描述子

图 3 SIFT 描述子生成过程

在完成特征点邻域的高斯图像的梯度计算后,生成一个直方图统计邻域内像素和梯度方向和幅值。梯

度方向直方图分 36 个柱表示 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围。每个加入直方图的采样点梯度幅值要采用圆形高斯加权函数进行权重处理,其 σ 值为特征点尺度的 1.5 倍。直方图的峰值代表该特征点邻域内图像梯度的主方向。当存在一个峰值能量相当于主峰值的 80% 时,认为这个方向是该点的辅方向。为保证特征矢量的旋转不变性,首先需要以特征点为中心,将坐标旋转为特征点的主方向,选取中心点附近 8×8 大小的图像邻域。在每个 4×4 的子区域内计算 8 个方向的梯度方向直方图,将每个梯度方向叠加,形成一个种子点。每个种子点有 8 个方向的方向特征信息。所以,共有 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 个数据,即形成了 128 维的 SIFT 特征矢量。将这 128 维的特征描述符归一化,使其具有亮度不变性。SIFT 特征向量的匹配就是对两幅待匹配图像的 SIFT 特征向量进行相似性度量。计算第一幅图像的每个局部特征点在第二幅图像的特征点集中的最邻近匹配。文中算法以 30 作为搜索宽度 (即最大视差),采用沿着极线的一维搜索。通过运算得到特征点所在模板图和 30 个搜索子图的 SIFT 特征向量,特征点和匹配点的相似性度量采用特征向量的欧氏距离。选取右图中某个特征点,分别计算此特征点的特征向量与左图中 30 个对应搜索子图的特征向量之间的欧氏距离。最终取欧氏距离最小的搜索子图的中心点作为匹配点^[12]。

2 实验结果与分析

为了检验文中算法的有效性,在 Pentium(R) 4, 2.66GHz CPU, 1.00GB RAM 的 PC 机上,用 C 语言编程实现了文中算法。在实验中,用文中采用的小波 + SIFT + 极线约束方法与原 SIFT 方法、小波 + SIFT 方法以及 SIFT + 极线约束方法的匹配性能进行了分析比较,实验结果如图 4、图 5 所示。

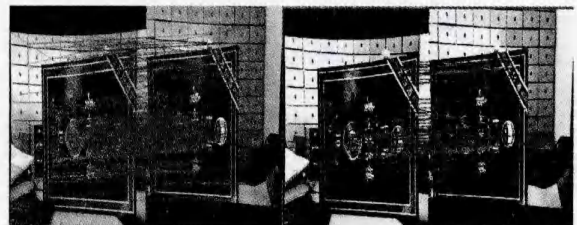


图 4 SIFT 方法、小波+SIFT 方法

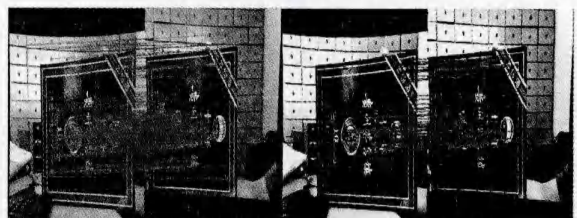


图 5 SIFT+极线约束、文中方法

图 4、图 5 为同一组图像在不同匹配算法下的效

果图,图中显示的均为经过畸变校正与平行校正后的输出图像。左半部分为左摄像机拍得的图像,右半部分为右摄像机拍摄的图像。

由以上4种匹配方法得出的性能结果统计见表1。由匹配结果可以得出,采用小波变换减少了匹配点数,降低了匹配复杂度,减少了算法运行时间;而采用极线约束的方法,在同一水平线上搜索匹配点,减少了误匹配点数,提高了正确匹配率。综合采用小波域SIFT变换和极线约束相结合的算法在降低了特征提取和特征匹配的复杂度的同时,提高了图像中特征点的正确匹配率,同时大大增强了SIFT算法的实时性。

表1 匹配结果统计

算法	SIFT	小波+SIFT	SIFT+极线约束	文中方法
总时间(s)	24.234	6.047	25.5	5.41
匹配点数	435	81	401	79
误匹配点数	36	5	23	3
匹配率	91.72%	93.82%	94.26%	96.20%

3 结束语

从上述理论分析和实验结果可以看出,基于小波域和SIFT算法的方法能够满足较高精度,同时使得特征提取和匹配的复杂度大大降低,SIFT算法的实时性和准确性得到提高。

由以上算法分析和实验结果可见:

(1)文中提出的算法采用基于SIFT的特征匹配,在保证匹配结果有效性和准确性的同时,极大提高了匹配结果对图像噪声和图像变换的鲁棒性和抗干扰性。

(2)SIFT算法检测特征点时采用高斯核和DOG算子对图像进行多次运算,耗费了大量时间。文中算法在生成SIFT特征描述之前先对图片进行小波分解,可减少特征描述生成的次数,使得特征描述生成阶段的计算量减少,大大提高了实时性。

(3)本算法采用了极线约束,可以降低SIFT算法的搜索范围,从而可以在算法运行时间减少的同时使得算法准确性得到提高。

(4)文中算法生成的特征点个数远远少于SIFT算法,从而待匹配特征点数和数据库容量得到减少,因而匹配时间也缩短了。

参考文献:

- [1] 游素亚,徐光祜. 立体视觉研究的现状与进展[J]. 中国图象图形学报,1997,32(2):17-23.
- [2] Yoon Kuk-Jin, Kweon In-So. Locally Adaptive Support-weight Approach for Visual Correspondence Search[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,28(4):650-656.
- [3] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//International Conference on Computer Vision. Corfu, Greece:[s. n.],1999.
- [4] 全 斌. 数字图像特征点提取及匹配的研究[D]. 西安:西安科技大学,2009.
- [5] Mallat S G. A theory of multi resolution signal decomposition: the wavelet representation signal decomposition[J]. IEEE-PAMI,1989,11(7):647-693.
- [6] 刘佳嘉,何小海,陈为龙. 一种结合小波变换的SIFT特征图像匹配算法[J]. 计算机仿真,2011,28(1):257-260.
- [7] 赵钦君,赵东标,韦 虎. Harris-SIFT算法及其在双目立体视觉中的应用[J]. 电子科技大学学报,2010,39(4):546-550.
- [8] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 谢 凡,秦世引. 基于SIFT的单目移动机器人宽基线立体匹配[J]. 仪器仪表学报,2008,29(11):2247-2252.
- [10] 宰小涛. 基于SIFT特征描述子的立体匹配算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [11] 王 艳. 基于点特征的立体匹配算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- [12] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

(上接第80页)

- cessing and Knowledge Engineering. [s. l.]:[s. n.],2010.
- [6] Wang Dan. Chinese to English automatic patent machine translation at SIPO[J]. World Patent Information,2009,31(2):137-139.
- [7] Goto I, Lu Bin, Chow K P. Overview of the Patent Machine Translation Task at the NTCIR-9 Workshop[C]//Proceedings of NTCIR-9 Workshop Meeting. Tokyo, Japan:[s. n.], 2011:559-578.
- [8] 宋 柔. 现代汉语跨标点句句法关系的性质研究[J]. 世界汉语教学,2008(2):26-44.
- [9] 侯 敏,孙建军. 汉语中的零形回指及其在汉英机器翻译中的处理对策[J]. 中文信息学报,2004,19(1):14-20.
- [10] 张 全,吴 晨,韦向峰. 汉语句间成分共享类型及分布研究[J]. 计算机科学,2007,34(1):166-169.
- [11] 贾 宁,张 全. 基于句间关系的汉语语义块省略恢复[J]. 中文信息学报,2008,22(6):33-37.
- [12] 池毓焕,李 颖. 面向汉英机器翻译的大句范式初探[C]//中国计算机语言学研究前沿进展(2007-2009). 烟台:出版者不详,2009:395-400.
- [13] 黄河燕,陈肇雄. 基于多策略分析的复杂长句翻译处理算法[J]. 中文信息学报,2002,16(3):1-6.