

文章编号: 1001-3806(2004)05-0550-04

投影数字散斑的立体匹配

李美菊, 苏显渝

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 立体视觉作为被动光学三维传感中最重要的距离感知技术, 具有广阔的应用前景。立体匹配是整个立体视觉的难点和重点所在。传统的立体匹配中, 平坦、缺乏纹理细节的三维面形的误匹配率较高。采用一种辅助投影数字散斑的方法, 利用归一化协方差区域相关算法, 解决了这个问题, 并得到了满意的浓密视差图。

关键词: 立体视觉; 立体匹配; 数字散斑; 浓密视差图

中图分类号: O438; TP301.6 **文献标识码:** A

Stereo matching by means of digital speckle

LI Mei-ju, SU Xian-yu

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Stereovision is one of the most widely used techniques as a powerful passive optical sensing method. The stereo matching is a key point of such technique. However, the conventional matching method is rather inefficient to measure continuous and characterless surface, which may lead to severe matching mistakes. So an aided digital speckle projection is proposed in such environment. The dense disparity map is achieved using the mean normalized cross correlation in our experiment.

Key words: stereovision; stereo matching; digital speckle; dense disparity map

引 言

光学三维传感在机器视觉、实物仿形、工业检测、生物医学等领域, 都具有重要意义和广阔的应用前景。获取三维面形信息的基本方法, 传统上分为两大类: 被动三维传感和主动三维传感。立体视觉是计算机被动测距方法中最重要的距离感知技术, 它直接模拟了人类视觉处理景物的方式, 可以在多种条件下灵活地测量景物的立体信息, 其作用是其它计算机视觉方法所不能取代的。对它的研究, 无论是从视觉生理的角度还是工程应用中都具有十分重要的意义。

立体视觉的基本原理是从两个(或多个)视点观察同一景物, 以获取在不同视角下的感知图像, 通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息。这一过程与人类的立体感知过程是类似的。一个完整的立体视觉系统通常可

分为图像获取、摄像机定标、特征提取、立体匹配、深度确定及内插等 6 个大部分^[1]。其中立体匹配是最重要也是最困难的部分。立体匹配是寻求同一空间景物在不同视点下投影图像的像素间的一一对应关系, 是在两幅存在视点差异、几何、灰度畸变和有噪声干扰的图像间进行的, 这无疑是十分困难的。更何况立体匹配还要求得到像素间的一一对应匹配。其存在的主要问题是: 对于特殊结构的景物, 如平坦、缺乏纹理细节、周期性的重复特征等易产生假匹配; 对方向平行于极线的特征匹配出现歧义; 在摄像机基线距离增大时, 遮挡严重, 能重建的空间点减少。

针对立体匹配的第一个难题, 即缺乏纹理细节的曲面, 可以考虑利用辅助投影的方法, 人为地增加曲面的特征点。散斑具有随机性, 使得物体表面上任意一点的高度信息可由该处散斑图像的微小邻域唯一标定。CHEN 等首先在这个方面做了研究^[2], 但是他们的算法只针对二值化的图像, 在图像二值化的过程中, 需要人为地确定阈值参数, 虽然对参数的选取给出了指导性的建议, 但仍不利于自动化处理。作者提出采用数字微镜装置(digital micro mirror device, DMD)投影随机位置散斑的方法实现立

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60177001)

作者简介: 李美菊(1979), 女, 硕士研究生, 从事立体视觉方面的研究。

E-mail: xyaran@163.com

收稿日期: 2003-09-19; 收到修改稿日期: 2003-11-10

体匹配,在匹配过程中,采用了一系列比较成熟的算法:快速区域相关算法,弥补相关运算的速度缺陷;多窗口算法,充分考虑匹配区域间的关联性;亚像素定位,提高匹配精度。并对 3 种模型进行匹配实验,获取了令人满意的浓密视差图。

1 原理与匹配算法

1.1 立体视觉系统

图 1 中给出了立体视觉系统结构示意图。该系统主要由两个 CCD 摄像机、数字光投影仪(digital light projector, DLP)、图像板、双屏显卡和计算机组成。DLP 投影的是 3×3 的位置随机散斑,如图 2 所示。需要指明的是,在该系统中,两个 CCD 的相对位置已被精确校正,符合正直摆放模型,这样,匹配过程只需在一条直线上进行即可。

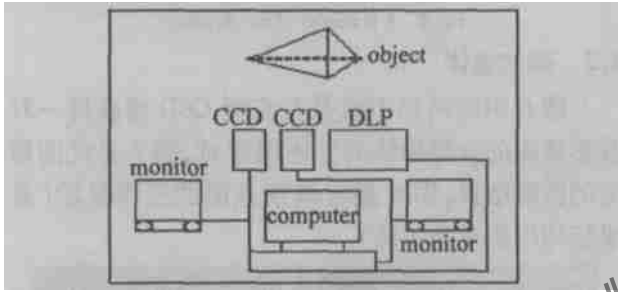


Fig. 1 The measurement system



Fig. 2 The used random speckle pattern

1.2 数字随机散斑

投影图形选用数字局域位置随机散斑图形^[3],该散斑场的特点是一个大区域分成了许多 $m \times m$ ($m \geq 3$) 的小区域,每个小区域中有一随机位置的灰度值为 255,其余均为 0。这种散斑由于是二值化的,抗干扰能力较强。利用计算机生成这样一幅散斑图,然后投影到物体表面。实验中,取 $m = 3$ 。生成的随机散斑如图 2 所示。

1.3 立体匹配

目前,立体匹配算法可分为 3 类:基于特征的算法,基于区域的算法和基于相位的算法。要获取浓密的视差图,对测量曲面投影了散斑,故选用基于区

域的相关算法。在匹配过程中,以归一化协方差作为相似性判据。

1.3.1 归一化协方差相关 归一化协方差相关定义如下:

$$C(i, j, d) = \frac{\text{cov}(W_l(i, j), W_r(i + d, j))}{\sqrt{\text{var}(W_l(i, j)) \cdot \text{var}(W_r(i + d, j))}} \quad (1)$$

式中, W_l , W_r 分别为左右图像中以 (i, j) 和 $(i + d, j)$ 为中心、窗口尺寸为 w 的灰度矩阵, d 为视差, cov 代表协方差, var 代表方差。一般情况下,对于某一特定的待测曲面, d 的取值位于某一区间 (d_-, d_+) 内,匹配时只需在此区间范围内搜索即可。根据系统结构、参考平面的位置和被测物体的初始估计高度,可以确定一个视差搜索范围 d ,这样大大减少了相关计算量,提高了匹配效率。 C 的取值范围为 $[0, 1]$,取值越趋近于 1,表示 W_l 和 W_r 相关程度越高,两个中心点的正确匹配性也越高,反之亦然。在视差的搜索区间内进行相关运算时,需要设置一个阈值 g ,当 $C(i, j, d) > g$ 时,认为对应中心点为一对可能的匹配点对,之后选择其中相关值最大的,认为是正确的匹配。作者对视差范围做了限定,在此范围内,最大相关峰值处可以认为对应正确匹配。后面的实验证明,这种算法对于实验具有足够高的准确度。在实验中,取 $g = 0.7$ 。实验中发现,当 g 取值过高时,待测物体边缘区域会出现匹配空洞,这是由于边缘阴影遮挡,使相应相关值降低,为了弥补这些匹配空洞,降低了灰度域值。为了提高匹配精度,采用多窗口算法抑制误配。

1.3.2 相关的快速算法 相关是匹配中最为核心的部分,其算法的选择直接决定匹配速度。曾吉勇等^[4]讨论了一种基于 box filter 方法^[5]的快速相关算法。在此借鉴这种快速相关算法进行相关处理。现给出部分结论。

由 (1) 式及参考文献[4],有如下结果:

$$\text{cov}(W_l(i, j), W_r(i + d, j)) = \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l I_1(m + i, n + j) I_2(m + i + d, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{I_1(i, j) I_2(i + d, j)} \quad (2)$$

$$\text{var}(W_l(i, j)) = \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l I_1^2(m + i, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{I_1(i, j)}^2 \quad (3)$$

$$\text{var}(W_r(i + d, j)) = \sum_{m=-k}^k \sum_{n=-l}^l I_2^2(m + i + d, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{I_2(i + d, j)}^2 \quad (4)$$

式中, $I_m(i, j)$ 可用 box filter 方法^[5]计算 ($m = 1,$

2):

$$\overline{I_m(i+1, j)} = \overline{I_m(i, j)} + \frac{1}{A} [I_m(i+k+1) - I_m(i-k)] \quad (5)$$

式中, $A = (2k+1)(2l+1)$, 是 box filter 的面积。

1.3.3 多窗口算法 该算法是计算每个像素的相关值的一个附加算法, 其基本思想就是计算相关值时进一步考虑匹配子图像之间的相关性。HIRSCHMÜLLER 等^[6] 对该算法有较为详细的说明, 由于篇幅限制, 在此不再赘述。

1.4 亚像素定位

由于 CCD 离散化采样, 像素坐标取值均为整数, 则可能采样点在另一幅图像上没有准确的匹配。因此, 若想得到较为精确的匹配结果, 需要进行数据拟合和处理, 即亚像素定位。实验采用二次曲线拟和。二次曲线选用抛物线, 设抛物线方程为:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (6)$$

以匹配确定的对应点为中心, 采用 3 个或 5 个像素的窗口拟合抛物线, 计算抛物线系数, 再计算极大值点作为亚像素定位的匹配点。由 $df(x)/dx = d(a_0 + a_1x + a_2x^2)/dx = 0$, 得到亚像素定位的对应点位置:

$$x = -a_1/2a_2 \quad (7)$$

2 实验结果

由于 DLP 的时空特性^[7], 为了更为准确地获取图像, 用 CCD 采样时, 左右各连续拍摄 8 次, 然后取其平均作为初始立体图像对, 这种操作同时也可降低随机噪声的干扰。

2.1 阶梯物体

图 3 中的两幅图像是左右两 CCD 捕获得一对

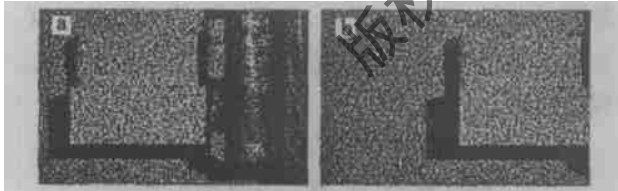


Fig. 3 The pair of captured images for the object 2
a—left image b—right image

投影散斑的阶梯物体的立体图像对, 图 4 是此图像对的匹配结果, 图 5 是对该视差图的三维显示(各坐标均以像素为单位)。作者关心的是台阶物体本身的高度信息, 但是双目视觉系统的匹配结果是以过两 CCD 光学中心连线的垂面为零参考平面, 这样阶梯物体的高度信息是加在一个高度偏置上的, 为了突出被测物体的信息, 减去了这一距离信息。实例中该距离对应约 120 像素。后面几个实例中的处理原因类似。

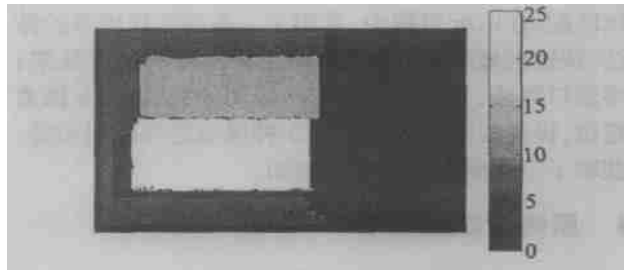


Fig. 4 The disparity map(120 pixels have been removed)

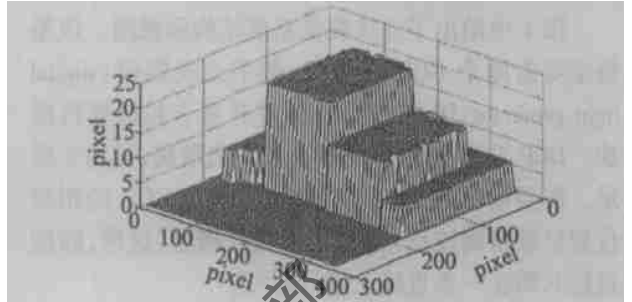


Fig. 5 3D display of the disparity

2.2 碗状物体

图 6 中的两幅图像是左右两 CCD 捕获得一对投影散斑的阶梯物体的立体图像对, 图 7 是此图像对的匹配结果, 图 8 是对该视差图的三维显示(各坐标均以像素为单位)。

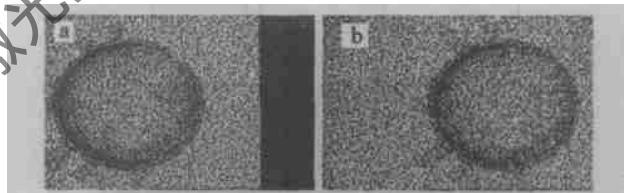


Fig. 6 The pair of captured images for the object 3
a—left image b—right image

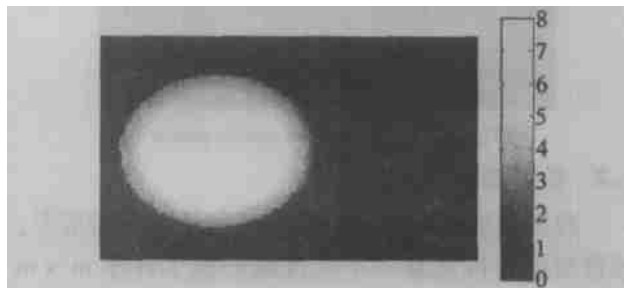


Fig. 7 The disparity map(125 pixels have been removed)

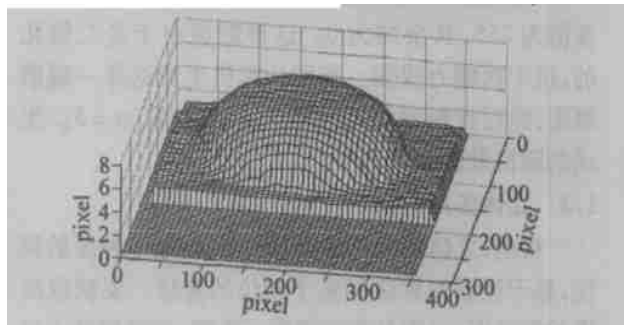


Fig. 8 3D display of the disparity

2.3 人脸面具

图 9 中的两幅图像是左右两 CCD 捕获一对投影散斑的阶梯物体的立体图像对, 图 10 是此图像对的匹配结果, 图 11 是对该视差图的三维显示(各坐标均以像素为单位)。

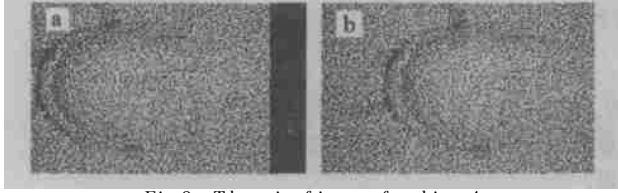


Fig. 9 The pair of images for object 4
a—left image b—right image

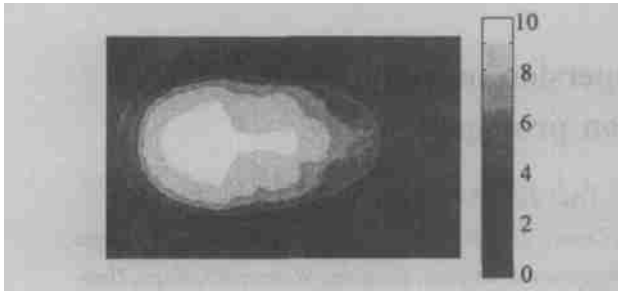


Fig. 10 The disparity map (145 pixels have been removed)

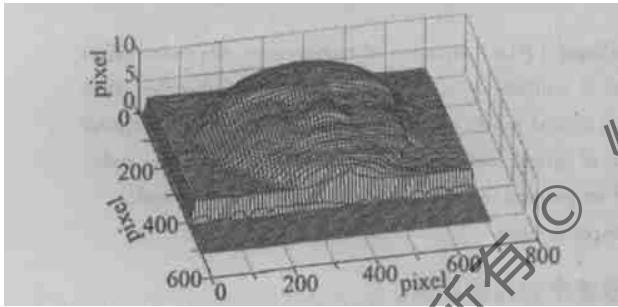


Fig. 11 3-D display of the disparity

3 结 论

针对双目视觉中特征缺乏的表面的三维重建问题, 提出采用数字显微镜装置投影随机位置散斑的方法实现立体匹配。在匹配过程中, 采用了快速区域相关算法, 以弥补相关运算的速度缺陷; 多窗口算法, 考虑匹配区域的关联性; 亚像素定位, 以提高匹配精度。最后对 5 种模型进行匹配实验, 获取了令人满意的浓密的视差图。辅助散斑照明的引入, 降低了立体视觉系统的灵活性。但是, 对于弱纹理和无纹理的表面的三维重建, 辅助照明引入的特征是立体匹配所必须的。

参 考 文 献

- [1] BARNARD S J, FISCHER M A. Computational stereo [J]. ACM Computing Surveys, 1982, 14: 553~ 572.
- [2] CHEN Y Sh, CHEN B K. Measuring of a three dimensional surface by use of a special distance computation [J]. Appl Opt, 2003, 42(11): 1958~ 1972.
- [3] 代红军, 苏显渝. 数字散斑时间序列相关三维面形测量方法 [J]. 光学学报, 2001, 21(10): 1208~ 1213.
- [4] 曾吉勇, 苏显渝. 浓密视差图的快速提取 [J]. 光学技术, 2004(1): 40~ 43.
- [5] SUN Ch M. Fast stereo matching using rectangular subregioning and 3 D maximum surface technique [J]. IJCV, 2002, 47(1/2/3): 99~ 117.
- [6] HIRSCHMÜLLERH, INNOCENT P, GARIBALDIJ. Real-time correlation based stereo vision with reduced border errors [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1~ 3): 229~ 246.
- [7] 曹益平, 苏显渝, 向立群. 数字显微镜期间的时空特性 [J]. 激光杂志, 2002(5): 16~ 18.

(上接第 487 页)

实验中还发现, 当增加高压脉冲宽度到 $4.5\mu\text{s}$ 时, 在腔倒空之后还有一个调 Q 激光脉冲输出。当高压脉冲宽度小于 $3\mu\text{s}$ 时, 可以消除该调 Q 脉冲而只有腔倒空输出。原因可参见文献[7]。

3 结 论

通过理论分析和实验结果可知, 随着激光器腔长的增加, 腔倒空峰值功率和脉宽都增加。且随着高压脉冲上升沿时间的增加, 腔倒空的峰值功率下降, 脉宽增加; 增加布氏窗输出反射率, 功率和脉宽略有增加。为了满足脉冲外差成像雷达对激光脉宽及峰值功率的特殊要求, 可采用增加增益长度和改变腔倒空电压上升速率的办法予以解决。

参 考 文 献

- [1] AHLBERGH, LUNDQVIST S, LET ALICK D *et al.* Imaging Q -switched CO_2 laser radar with heterodyne detection: design and evaluation [J]. Appl Opt, 1986, 25(17): 2891~ 2892.
- [2] PEARSON G N, RYE B J. Frequency fidelity of a compact CO_2 Doppler lidar transmitter [J]. Appl Opt, 1992, 31(30): 6475~ 6484.
- [3] CHOI J W, JUAN Y B, STRZELES *et al.* Frequency stabilization of excited CO_2 lasers [J]. SPIE, 2002, 3729: 786~ 787.
- [4] 刘敬海, 徐敬普. 激光器件与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 164~ 167.
- [5] 叶青, 胡渝, 曾昭信 *et al.* 碲化镉光电调制器性能研究 [J]. 红光技术, 1996, 18(6): 7~ 10.
- [6] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 422~ 424.
- [7] 田兆硕, 王 骐, 王雨三. 电光腔倒空与调 Q 射频波导 CO_2 激光器 [J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1613~ 1616.