

射线图像的立体匹配技术研究

付丽琴 韩 焱

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘 要 在数字射线成像检测技术中,当物体形状不适宜于旋转扫描时,传统的 X 射线计算机断层成像技术(CT)难以得到其 3 维信息,对于这种情况,立体视觉是一种较好的解决方案。立体视觉的关键技术是立体匹配,尽管目前立体匹配技术的研究已取得了很大的进展,然而这类研究主要局限于可见光等反射成像领域,对 X 射线图像等透射成像领域的研究很少。由于成像原理的不同,透射图像的立体匹配技术与可见光图像存在很大差异。为了对 X 射线图像进行正确匹配,根据射线图像的特点,首先制定了合理的立体匹配策略,并指出边缘是一种“好”的匹配基元;然后建立了射线图像立体匹配的约束条件,同时分析了射线图像匹配不确定性的原因;最后确定了由粗到精的两步匹配方法,并提出利用多目视觉约束来实现精匹配。利用工业射线像增强器系统对标准样件进行成像的实验结果表明,该技术是可行的,匹配的绝对平均误差在 2pixels 范围内。

关键词 立体匹配 匹配基元 约束条件 不确定性

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1006-8961(2008)12-2363-05

Study on Stereo Matching Technique for Digital Radiography Images

FU Li-qin, HAN Yan

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051)

Abstract The 3D information of an object can not be obtained using the conventional computed tomography when the object is not fit for rotating scan in digital radiography (DR) inspection. So, stereo vision is a better solution. Stereo matching is an important research area in stereovision. Although stereo matching research has progressed remarkably, the studies are mostly aiming at reflection imaging field, such as visible light, and transmission imaging field, such as X-ray. For the dissimilarity of imaging principle, the stereo matching technique of transmission images is different from that of reflection images. In the paper, the stereo matching technique for X-ray images are studied in detail. Edge is advised to be used as matching primitive. According to the characters of X-ray images, the constraints of stereo matching are set up. The reasons of matching uncertainty are analyzed. Finally, the “coarse-to-fine” strategy is suggested and the constraint from multi-view images is used to implement fine matching. Finally, to validate the technique, digital radiography system with intensifier is used to imaging for a standard sample. The experimental results show that the technique is feasible.

Keywords stereo matching, matching primitive, constraint, uncertainty

1 引 言

X 射线计算机断层成像术(简称 CT)是一种重要的射线图像 3 维信息重建的技术,其具有很高的

精度。然而,由于受 3 维重建算法的限制,对于体积庞大,不适宜于旋转扫描的物体,传统的 CT 将无法获取其 3 维信息,而且各种不完全投影数据的重构技术对数据缺失量都有一定的限制^[1],如 Defrise,潘晓川等人提出的感兴趣区域重建的 PI 线扫描方

基金项目:国家自然科学基金项目(60532080);山西省自然科学基金项目(2006011034)

收稿日期:2006-08-31; **改回日期:**2007-08-31

第一作者简介:付丽琴(1971 ~),女,副教授,2006 年于中北大学信息与通信工程学院获博士学位。主要研究方向为图像处理与识别、信息重构、语音信号处理。E-mail:liq.f@nuc.edu.cn

法^[2,3],也只能针对长目标等局部区域上完全扫描的物体,且扫描方式比较复杂,在使用上具有局限性。此外,CT技术还具有技术复杂、成本昂贵、成像时间长等弱点,这就增加了它在工业在线检测等领域应用的难度。

而立体视觉对扫描模式的要求则很低,只要得到同一个物体(或物体上同一部分)在两个以上视图的具有重叠区域的图像,就可以通过一系列技术重建出这个物体(或物体上这一部分)的3维信息。目前对立体视觉的研究主要局限于可见光视差法等基于反射成像原理的3维坐标重建,而对于透射图像的研究则很少。国内只有清华大学进行了相关研究,即利用立体视觉原理实现射线图像中物体多层重叠信息的分层显示,已成功地应用于大型集装箱的快速分层检测^[4],并大大提高了识别率,然而由于这种技术分层的层数很少,因此不适用于结构连续、纹理相差很小的工业产品。

立体匹配是立体视觉技术中最为关键的步骤。虽然目前对立体匹配策略的研究已取得了很大进展,然而这类研究主要针对反射图像,由于成像原理的不同,透射图像的立体匹配技术与反射图像存在很大差别。本文根据X射线的成像机理,对透射图像的立体匹配技术进行了深入探讨。

2 X射线图像立体匹配的特点和匹配特征选取

由X射线成像的原理知道,X光图像属于光透射投影成像,与一般光反射成像原理的不同在于,它是一个积分成像的过程^[5](如图1所示)。对于一般物体,设 $\mu(x,y)$ 为被测物体某断面的线性衰减系数的分布函数, I_0 为射线的入射强度, I 为射线沿 L 方向穿透物质后的透射强度。则

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\int_L \mu(x,y) dl\right) \quad (1)$$

由式(1)可以看到,在投影图像上,由于每个像素的灰度是相应视线上所有体素密度的投影叠加,因此射线图像中的每个像素都不存在3维表面,这就使得其立体匹配实现起来更为困难。具体分析如下:

(1)由于投影图像上每个点是射线方向上各层面对应点的密度叠加,因此其像素灰度不能代表物体空间某一点的密度或光强信息;

(2)由于透射投影带来投影图像上的特征交叉

问题,从而提高了误匹配率;

(3)射线图像包含了物体的内部结构,由于这些结构的先验知识很难得到,因此一些匹配约束难以起到作用。

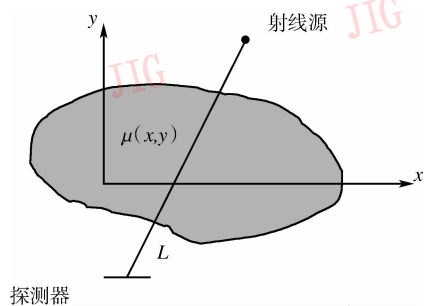


图1 射线投影示意图

Fig. 1 The principle of radiography projection

综上所述,射线图像的立体匹配是一个很困难的问题。要正确实现射线图像的立体匹配,必须解决好以下两个问题:①提取适当的图像特征作为匹配基元;②建立相应的匹配准则及确定适当的匹配策略。立体匹配技术中,匹配特征的选取非常重要,一般好的匹配特征应具有可区分性、不变性、稳定性、唯一性和有效解决歧义匹配的能力^[6]。对于立体透射图像,由于不同深度的物体层面的灰度重叠,而不像可见光图像那样只是遮挡关系,其在提取特征时更易出现特征的缺失,而在3维重建时,又有灰度分配等问题,因此选取的匹配特征应同时满足立体匹配与图像灰度重建的需要。基于以上考虑,本文选取图像最低层次的特征——边缘作为匹配基元。

3 射线图像立体匹配的约束条件

当射线源与物体之间具有相对水平位移时,由于射线对物体投影方向的改变而得到的具有差异的多幅投影图像,称为立体图像。为讨论方便,本文将由不同视角得到的任两幅图像分别称为左投影图像和右投影图像,分别对应于成像时物体相对于射线源的位置偏左和偏右的两种情况。

众所周知,立体匹配本身是一个病态问题,其在实现过程中需要若干条件的约束才有可能取得实用的效果。为此,研究者们做了不懈的努力,他们提出了各种约束条件,用于消除匹配的不确定性^[7,8],以达到局部的或全局的匹配唯一性。然而这些约束条件都是针对光反射成像原理提出来的。由于射线图

像是基于透射成像原理,因此其立体匹配的约束规则与反射光图像不尽相同。作者在对射线成像机理进行深入研究的基础上,指出了以下射线图像立体匹配应当满足的约束条件:

3.1 唯一性约束

由式(1)知道,由于射线投影图像上各像点的灰度都是某一射线方向上物点的密度积分,因此投影图像上的一点对应于射线方向上的多个物点,而且射线方向不同,点的累积数目也不同。从这个角度上说,唯一性原则是不成立的。

然而,如果只考虑投影图像边缘点与物体表面点的对应关系,则唯一性约束是成立的。也就是说,左投影图像上的边缘点在右投影图像上具有唯一的匹配点,但是,右投影图像上的这个匹配点不一定在边缘上,它可能在边缘内部某个范围的邻域内;反过来,右投影图像上的边缘点在左图像中的位置情况亦是如此。

3.2 极线约束

左投影图上的一点 A ,它所对应的空间物点在右投影图上的位置一定在某一条曲线上,且这条曲线的方程与射线源或物体的运动方式有关。当射线源或物体沿水平方向(如 X 方向)平移时,第 1 幅投影图像中的一点,它在第 2 幅投影图像中的对应点一定在与它的 Y 坐标相同的直线上;反过来,第 2 幅投影图像中的一点,它在第 1 幅投影图像中的对应点也一定具有与它本身相同的 Y 坐标值。

3.3 视差范围约束

当视点变化时,则物体空间中不同深度的点在投影图上将产生不同幅度的视差,且视差的大小一定在某个范围之内,这个范围与立体视觉系统的系统参数,如射线源与成像屏的距离,以及基线的长度、物体的厚度等有关。

3.4 有序性约束

由于处于同一深度层次上的点,在不同投影图上的位置关系保持不变,即顺序不变,因此,利用 X 射线投影的几何关系,即可求取物体空间点在投影平面上的位置。如图 2 所示,物体空间中同一深度的 A 、 B 两个点在不同视点图像上的投影点 a 、 b 及 \hat{a} 、 \hat{b} 左右顺序一致,且满足

$$b - a = \hat{b} - \hat{a} \quad (2)$$

即与射线源平台平行的直线段在不同投影图上的投影长度保持不变。

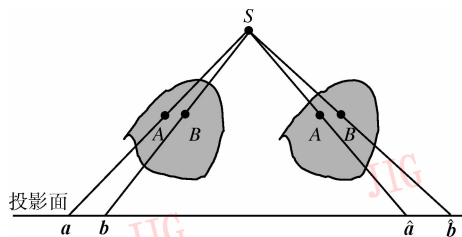


图 2 同一深度的点投影后顺序不变

Fig. 2 The invariance of projection order for points in same depth

4 匹配点的不确定性分析

4.1 投影点偏移现象

当通过射线源与目标的相对平移来获取立体像对时,射线源与成像屏始终保持平行,而射线源的投影方向与被检测目标之间的夹角则发生变化,由此造成了目标投影图像的形变。图 3 描述了该种情形下目标表面点与其投影图像边缘点的对应情况, T 表示被检测目标的一个垂直截面,其投影为具有两个边缘点的直线, S_1 、 S_2 表示不同的射线源位置。由图 3 可以看出,在视点 S_1 下,投影图像上的右边缘点 E_1 对应于空间点 P ;而在视点 S_2 下,投影图像的右边缘点 E_2 则对应于空间另一点 Q , P 在第 2 幅图像上的投影点是一个内部点 O 。若将点 E_1 和点 E_2 作为匹配对应点,则对视差的计算是错误的。

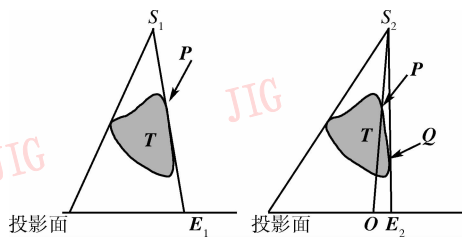


图 3 与射线源垂直的一个平面在不同视点下的投影情况

Fig. 3 The projection of points in the plane vertical to ray source

4.2 投影交叉现象

当通过射线源与目标的相对平移来获取立体像对时,由于处于不同深度的线段在成像平面上的放大倍数不同,因此,物体空间处于不同深度的两点与其投影可能发生水平方向上的交叉(如图 4 所示)。例如, A 、 B 两点处于不同深度,从水平方向看,点 B 在点 A 的右面,其在第 1 幅图像上的投影点的顺序是 b 、 a ,而在第 2 幅图像上的投影点顺序则是点 \hat{a} 、 \hat{b} 。因此,在一幅投影图像中水平方向上相邻的点,其在另一幅投影图中的对应点的左右顺序可能发生变化。

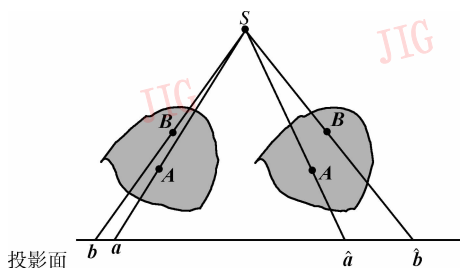


图 4 不同深度层次上的点投影后发生水平交叉

Fig. 4 The projection of points in difference depth

4.3 灰度值不能作为匹配属性

由于投影图上像素的灰度不能代表物体空间某一点的密度或光强信息,因此,灰度值不能作为匹配基元的属性。这样在进行边缘匹配时,只能以位置特征作为其匹配属性,这就给唯一对应点的选取带来了困难。

射线图像的这些特点都使得高准确率立体匹配变得非常困难,只能通过设计较为严谨的匹配策略进行弥补。

5 匹配策略

5.1 由粗到精的两步匹配法

立体匹配策略的内容包括像对间相似性测度的定义、最优匹配的确定以及控制匹配算法等,而且在立体匹配的具体实现中三者可融为一体。本文针对射线图像的立体匹配在寻找对应点时存在的不确定性,设计了由粗到精的两步匹配法。

粗匹配的目的在于搜索左图像边缘点在右图像上的准匹配点集。当通过射线源与目标的相对水平移动来获取立体像对时,根据极线约束,可先将匹配点的搜索区域简化为水平方向的 1 维区域;然后,利用先验知识,如被测工件的厚度、实验系统参数等来确定物体上任一点的视差范围,以进一步缩小对应点的搜索区域。

经过初始匹配之后,由于立体像对中的每一个边缘点,都有一个候选的匹配点集与之对应,因此存在着匹配的多义性和模糊性。精匹配的目的就是从粗匹配所得到的候选匹配点集中找出唯一的对应点。

5.2 精匹配的准则

5.2.1 邻域视差梯度最小准则

当射线源沿水平方向(X 向)匀速移动,通过多次曝光采集投影图像时,各投影图上的像素点与空间物点的位置对应关系应满足 Y 方向的顺序不变

性,即投影图上, Y 方向相邻的点对应于物体空间 Y 方向相邻的面,它们的深度应满足连续性。其体现在立体图像上,就是当不考虑噪声等的影响时, Y 方向相邻的点,其视差梯度应当足够小,且连续变化。

5.2.2 同名点视差拟合曲线光滑准则

该准则是利用多目视觉的约束关系来消除对应点的不确定性。多目视觉情况下,由于在不同的投影图像上,同一个相对位置的边缘点,它们对应于物体外表面上连续分布的点,因此,使相邻图像两两匹配,则所得到的同名点的视差变化也应当是连续的。如图 5 所示, S_1, S_2, S_3 分别表示 3 次曝光时射线源相对于物体的位置, e_1, e_2, e_3 分别表示 3 次曝光得到的投影图像中的同名点(具有相同 Y 坐标的物体的左边缘点), E_1, E_2, E_3 分别表示与 e_1, e_2, e_3 对应的物体表面上的点,由此可以看到, E_1, E_2, E_3 的深度是连续变化的。

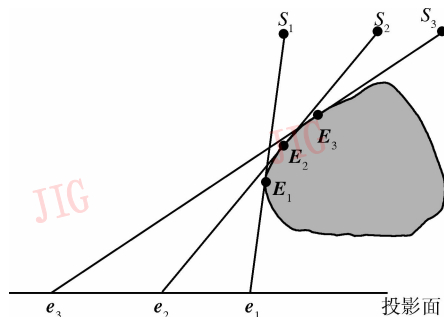


图 5 多目视觉情况下同名点视差的连续性

Fig. 5 The disparity continuity of homonymy points in multi-view stereo vision

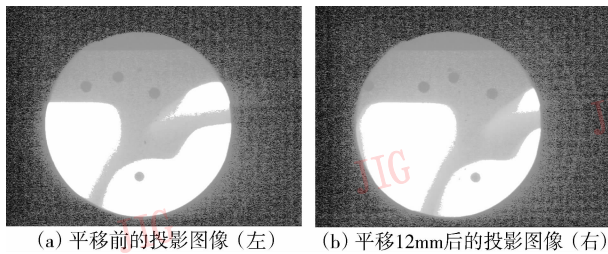
当采用水平基线多目投影来获取立体图像时,每一组相邻立体像对的基线长度是相等的。由于物体表面的形状是连续的,因此两两匹配后得到的对应投影图上同名点的视差(即深度)应该是连续变化的,而不应当有极大或极小值点。因此,若将多次匹配后得到的同名点视差值进行曲线拟合,则最优匹配时该曲线应当是光滑的;否则,不连续点处必然对应有误匹配,应将其剔除,并以正确的对应点替换,然后继续匹配。

6 实验结果

采用工业 X 射线像增强器系统得到的标准样件图像,对本文算法的可行性进行了实验验证。系统中,射线源到探测器的距离为 630mm,物体到探测器距离为 79mm。由于像增强器系统的成像区域远小于

样件的尺寸,因此不能一次对样件的整体进行成像。对于该系统,若用传统的 CT 来重建样件的剖面图像,则技术非常复杂,例如常采用物体与射线源相对平移的方式来先对样件多次成像,然后通过拼接得到样件整体的投影图像。而利用立体视觉原理,则由于可以分区域地重建层面图像,其不但对样件的扫描次数大大减少,而且省去了拼接等技术,所以,本文技术的复杂性不随物体大小的改变而改变。

实验时,将物体放在四轴机械平台上匀速地在水平方向移动,并通过等时间间隔曝光来获取图像,两次曝光期间平台水平移动的距离为 12mm。图像大小为 768×576 pixels,图 6 所示为其中的两幅。



(a) 平移前的投影图像(左) (b) 平移12mm后的投影图像(右)

图 6 立体像对

Fig. 6 Stereo images

用本文的算法对图 6 所示的立体像对进行从左投影图像到右投影图像的匹配,其得到的部分匹配点坐标如表 1 所示。

表 1 部分匹配点的对应坐标

Tab. 1 Coordinate of corresponding points

左投影图像匹配点		右投影图像匹配点		左投影图像匹配点		右投影图像匹配点	
X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标
177	303	177	368	228	470	228	540
188	276	188	341	232	462	232	532
199	285	199	350	234	373	234	443
210	496	210	561	250	110	250	180
215	196	215	266	256	260	256	327
215	394	215	464	302	297	302	365
220	198	220	268	358	293	358	358
220	476	220	546	456	343	456	412

利用相关软件,通过观察表 1 中所列部分匹配点的对应坐标分别在两幅图像上的位置可以发现,匹配结果基本正确,绝对平均误差在 2 个像素范围内。

7 结 论

基于立体视觉原理,进行大型工件的断层成像

不仅可以提高检测的精度和速度,并可进行在线实时检测和自动控制。虽然立体视觉重建是一个病态问题,其在现实条件下需要若干条件的约束才有可能获得实用的效果,然而由于它具有成像设备简单、成像时间短、适用性广等种种优点,因此将立体视觉原理应用到射线精密检测领域,具有重要意义。论文根据射线图像的特点,首先建立了透射图像立体匹配的约束条件,并设计了射线图像的立体匹配方案;为了解决射线图像匹配的多义性问题,还提出了一种多目视觉的同名点视差拟合曲线光滑准则。虽然本文算法对标准样件取得了较好的匹配效果,但依然有一些问题存在,例如:

(1) 对于灰度变化比较平缓的图像,由于边缘特征不显著,致使匹配效果较差;

(2) 尽管射线成像能获取物体的内部结构,但当遇到目标内部有多个相距较近的重复结构时,本文算法还有待改进;

下一步工作的重点是针对射线图像的特点,建立更有效的双目体视模型和研究立体匹配不确定性的本质,同时为匹配提供更多的约束,以降低立体匹配的难度。

参考文献 (References)

- 1 Candes Emmanuel J, Rombeig Justin K. Signal recovery from random projections [J]. Proceedings of SPIE Computational Imaging III, 2005, 5674:76 ~ 86.
- 2 Defrise M, Noo F, Kudo H. A solution to the long-object problem in helical cone-beam tomography [J]. Physical Medical Biology, 2000, 45(3):623 ~ 643.
- 3 Zou Y, Pan Xiao-chuan. Exact image reconstruction on PI-lines from minimum data in helical cone-beam CT [J]. Physical Medical Biology, 2004, 49(6):941 ~ 959.
- 4 Zeng Yu, Wang Jing-jin. Stratified radiation imaging with multi-scale gaussian operator zero-crossing method [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(5): 424 ~ 427. [曾宇,王经瑾.多尺度高斯算子卷积零交叉法辐射分层成像[J].核电子学与探测技术, 2003, 23(5): 424 ~ 427.]
- 5 Kak A C, Slaney M. Principles of Computerized Tomography imaging [M]. New York, USA: IEEE Press, 1988.
- 6 Zitnick C L, Kanade T. A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(7):675 ~ 684.
- 7 Cox I J, Hingorani S, Maggs B M, et al. A maximum likelihood stereo algorithm [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 63(3): 542 ~ 567.
- 8 Zhang Zheng-you. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 27(2):161 ~ 195.