

文章编号: 0253-2239(2010)s100417

多样本并行估计在体全息景象匹配系统中的应用

汪顺利 曹良才 顾华荣 何庆声 金国藩

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 提出了一种应用于体全息景象匹配系统中的多样本并行估计方法,该方法充分利用了遥感图像的平稳随机性和体全息的高速多通道并行性,可有效提高景象匹配的精度。分析了多样本并行估计方法的理论基础,研究了该方法所包括的图像预处理,模板图像制备以及估计方程建立等步骤,同时也研究了多样本并行估计过程对各步骤的要求。实验结果表明多样本并行估计方法可以有效提高景象匹配的精度,同时识别精度也会随着样本数的增加而提高。

关键词 全息;体全息相关器;精度提高;多样本估计;景象匹配

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201030.s100417

Application of Multi-sample Parallel Estimation in Volume-Holographic Scene Matching System

Wang Shunli Cao Liangcai Gu Huarong He Qingsheng Jin Guofan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A multi-sample parallel estimation method using in the volume-holographic scene matching system is proposed. The method makes good use of the characteristics of stationary random of the remote sensing image and the characteristics of the high speed, multi-channel and high parallelism of the volume holographic correlator, and implements scene matching with high accuracy. Theoretical basement of multi-sample parallel estimation method is analyzed. The essential steps of the method including image preprocessing, template images preparation and estimation equation establishing are discussed in detail and the requirements for these steps are introduced. The experimental results show the validity of the multi-sample parallel estimation method, and the recognition accuracy is improved by increasing the sample numbers.

Key words holography; volume holographic correlator (VHC); accuracy improvement; multi-sample estimation; scene matching

OCIS codes 070.4550; 090.7330

1 引 言

体全息相关技术是一种基于体全息存储技术的多通道高速并行识别技术^[1,2],广泛应用在多目标识别、图像匹配、光学神经网络和数据库检索等领域^[3,4]。近年来,一系列的研究成果被应用到体全

息相关器(VHC)上,譬如交错技术的提出消除了“图像依赖行为”^[5],散斑调制技术的应用实现了光学内积的并行提取^[6],进而在一个晶体上实现了4000个相关点阵的相关识别^[7],同时有效提高了体全息相关器的识别精度。

收稿日期: 2010-08-05; 收到修改稿日期: 2010-10-11

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400701)、国家 863 计划(2009AA01Z112)和国家自然科学基金(60807005)资助课题。

作者简介: 汪顺利(1983—),男,博士研究生,主要从事体全息相关识别方面的研究。

E-mail: sl-wang06@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 金国藩(1929—),男,中国工程院院士,主要从事光学信息处理等方面的研究。

E-mail: jgf-dpi@tsinghua. edu. cn

遥感图像的识别技术广泛应用于地理勘测、卫星导航和目标追踪等领域,遥感图像的识别已成为当今比较热门的研究问题。本文通过对体全息相关器和遥感图像相关性质的研究,提出了一种多样本并行估计(MPE)方法来实现体全息景象匹配。

2 体全息景象匹配技术

体全息相关技术源于高密度体全息存储技术和光学相关技术^[8]。与传统光学相关器相比,体全息相关器输出的互相关函数的相关峰更窄,使得在一定的通道间隔下,输出面上可以并行无串扰地输出各通道的相关结果。通过增加材料厚度、离焦存储和随机相位调制等方法,可以进一步地抑制旁瓣,锐化相关函数的相关峰,从而显著地提高并行通道密度和输出精度。当旁瓣被压制得足够多时,可以认为体全息相关器的输出就很好地近似为

$$g(x_c, y_c) \propto \sum_{m=-M}^M \int dx_0 dy_0 f'(x_0, y_0) f_m^*(x_0, y_0), \quad (1)$$

此时,相关器的输出退化为一个点阵,每个光点的亮度正比于输入图像与库图像的内积值。由于相关点之间没有了旁瓣串扰,通道间隔可以显著减小,并行通道数可以显著增加,这使得体全息相关器成为了一种光学多通道并行内积运算器。

遥感图像的识别技术广泛应用于地理勘测、卫星导航和目标追踪等领域。遥感图像有着非常复杂的图像纹理特征,其相关函数可以表示为^[9]

$$f(x, y) = a \times \exp(-\alpha |x| - \beta |y|) + b, \quad (2)$$

式中 a 和 b 是一般常数, x 和 y 分别代表的是横向和纵向平移距离, α 和 β 是相关长度的倒数。遥感图像景象匹配可以通过模板匹配的方法来实现,一般来说,遥感图像将以一定的间隔,在水平和垂直方向上分成一定大小的若干子图。若输入一幅实时图,则要计算实时图和若干子图的内积,内积最大的子图的位置即为实时图的位置。微处理器采用的是串行的计算方式,完成上述过程需要大量的时间,无法满足快速景象匹配的需要。而体全息相关器可以实现光学内积的并行提取,恰好可以并行地完成上述过程,节省了大量的时间,为快速景象匹配的应用提供了广阔的前景。用体全息相关器实现景象匹配,通常需要将若干子图像存入体全息相关器,而后输入实时图,这样最亮的相关点所对应的子图像的位置即为实时图的位置。可以说用体全息相关器实现景象匹配的过程即为找最亮相关点的过程,这是

一种“击中、击不中”的光学相关识别方法^[7]。

传统的“击中、击不中”的方法只用到了一个最亮相关点的信息,当实时图与模板图像重合时,由于噪声等因素的影响,会常常发生误判。而对于通常的实时图位于模板图像之间的情况,则很难识别,精度较低。在“击中、击不中”的方法中,最亮相关点周围点的信息并没有用到,但这些信息对于判定实时图的位置依然是有帮助的,如果可以合理的利用这些点的信息,将可以提高体全息相关器的识别精度。在体全息相关器中,探测器的热噪声和散弹噪声是服从高斯分布的,而光学信号的统计特性则服从泊松分布。大量的实验表明,使用高斯分布来近似单点亮度的噪声分布是合理的^[10]。如图1所示,根据遥感图像的平稳随机性,通过预处理改变遥感图像的相关长度,可以使不同数目的相关点显示在探测器上。根据信号估计理论^[11],如果单点的噪声分布服从高斯分布,那么用更多的点来判定最后的结果将有利于消除因为噪声等因素引起的随机误差,进而提高体全息景象匹配系统的精度。同时体全息相关器又具有多通道和高并行的性质,可以使最亮点周围的相关点阵并行地得到,节省了计算时间。因此,利用体全息相关器的多通道并行性以及遥感图像的平稳随机性,可以采用多样本并行估计的方法来实现体全息景象匹配,从而有效提高匹配系统的精度。

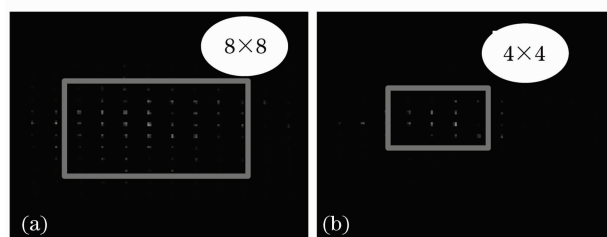


图1 采用预处理的方法使探测器上相关点阵的数量发生变化

Fig. 1 Different sample number of correlation spots for different image preprocessing

3 多样本并行估计方法

信号估计理论是研究在噪声干扰背景下,通过对信号的观测如何构造待估计参数的最佳估计量问题。信号的估计理论^[12,13]在雷达系统、通信系统、语音信号处理、图像处理、生物医学、自动控制和地震学等领域有广泛应用。例如,在图像处理中常常利用多样本估计去除噪声。所谓多样本估计,即通

过对同一探测源进行多探测器多通道估计,可以有效提高对探测源探测的精度。根据多次检测定理^[14]:

若接收信号的 m 次独立观测为 r_1, r_2, \dots, r_m , 每个噪声样本 $n_i (i=1, 2, \dots, m)$ 都是独立同分布的 $N(A, \sigma_n)$ 高斯变量, 噪声样本与有用信号样本二者统计独立。

那么有

$$p(r_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left[-\frac{(r_i - A)^2}{2\sigma_n^2}\right], \quad (3)$$

多次似然函数

$$p(\hat{r}) = \left(\frac{m}{2\pi\sigma_n^2}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{m(r_i - A)^2}{2\sigma_n^2}\right], \quad (4)$$

似然函数随测试的次数而变得尖锐, 其变化速率为 $1/\sqrt{m}$ 。这样也就可以通过信号估计来提高探测的精度。

将多样本估计技术应用于体全息相关器, 可以充分利用体全息相关器高速并行的特点, 形成多样本并行估计方法。一方面, 在库图像数量一定的情况下, 可以提高识别精度; 另一方面, 如果保持识别精度不变, 则可以大大减少所需存储的库图像数量, 使体全息相关器有更大空间存储更多库图像, 从而扩大识别范围。同时, 体全息相关识别高速并行的特点, 可以并行地给出相关运算的结果, 极大地提高了效率。

对多样本并行估计方法的步骤做详细研究。首先使用误差半径来评价景象匹配的识别精度。假设实时图的实际位置是 (x_1, y_1) , 计算得到的位置是 (x_2, y_2) , 那么误差半径为

$$\rho = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (5)$$

误差半径越大, 识别精度越低。

多样本并行估计方法包括图像预处理、模板图像制备以及估计方程建立等必备的步骤。图像预处理是利用多样本并行估计方法进行景象匹配的前提, 通过图像预处理可以调整图像的相关长度并降低实时图和模板图像的冗余相关性。不经过预处理的图像, 其冗余相关性比较大, 这样相关点的亮度就会基本相同, 无法区分。细化算法是图像预处理的一种, 其可以使图像中的线宽变窄, 但是保持图像的基本骨架。相关长度会随着线宽的变化而变化, 而图像的平稳随机性只决定于遥感图像的骨架, 这样细化算法在改变图像相关长度的时候不会破坏图像的平稳随机性, 可以很好地满足多样本并行估计的要求。

在体全息景象匹配的过程中, 模板图像的制备也是关键一环。在这个过程中, 参考图像需要被分割成一套模板图像, 而分割间隔 Δ_1 和 Δ_2 的选取是关键。根据遥感图像的平稳随机性, 当两像素点间的距离超过相关长度时, 该像素点将基本不具有相关性。因此, 模板图像的分割间隔必须小于相关长度。分割间隔的选择不仅仅由用户要求的精度决定, 同时要受到相关器存储容量、待识别图像的范围以及系统噪声的影响。模板图像的尺寸越大, 图像的平稳随机性越好, 就越有利于多样本并行估计方法的使用, 但是模板图像的尺寸还要受到空间光调制器尺寸的限制。一般情况下, 可以令 $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ 。

下面介绍估计方程建立的过程。在模板图像存入体全息相关器后, 当实时图输入到体全息相关器时, 相关点就可以被并行的探测到。不同相关点的亮度值可以用来建立估计方程。假设估计点的数目是 g (p 行, q 列, $g = p \times q$)。实时图的位置由变量 x, y 决定。那么估计方程就是

$$F(x, y) = \begin{cases} m_{11} = f_{11}(x, y) \\ m_{12} = f_{12}(x, y) \\ \dots \\ m_{uv} = f_{uv}(x, y) \\ \dots \\ m_{pq} = f_{pq}(x, y) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $f_{11}(x, y), f_{12}(x, y), \dots, f_{pq}(x, y)$ 是估计函数, 其形式如(1)式所示, $F(x, y)$ 是由上述估计函数组成的估计方程, $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{pq}$ 是相关点的亮度值。如果选取图像序号为 u 和 v 的图像为基准图, 根据分隔间隔和模板图像之间的关系, 就可以列出最终估计方程如下:

$$F(x, y) = \begin{cases} m_{11} = f_{uv}[x + (u-1)\Delta, y + (v-1)\Delta] \\ m_{12} = f_{uv}[x + (u-2)\Delta, y + (v-1)\Delta] \\ \dots \\ m_{uv} = f_{uv}(x, y) \\ \dots \\ m_{pq} = f_{uv}[x + (u-p)\Delta, y + (v-q)\Delta] \end{cases}. \quad (7)$$

方程组中有 2 个未知数和 g 个方程, 是一个超定方程, 用最小二乘法求解上述方程, 随着方程数(样本点数)的增加, 解得的 x 和 y 的精度也会增加。

4 实验及结果

实验装置如图 2 所示, 其中 PBS 为偏振分束

镜;SLM 为空间光调制器;S 为快门; L_1, L_2, L_3 及 L_4 为透镜;M 为反射镜; $\lambda/2$ 为半波片。光源是二极管抽运的固体激光器(波长是 532 nm),空间光调制器后放置了散射角为 0.2° 的漫射板,使用步进电机在掺铁的铌酸锂晶体中通过二维角度复用的方式存储全息光栅。使用 CCD 探测器探测相关点阵。记录介质的厚度是 15 mm,在介质中体光栅的厚度是 6 mm。

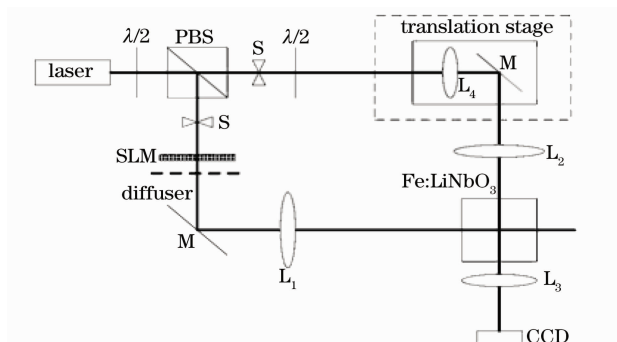


图 2 体全息遥感图像识别装置示意图

Fig. 2 Experiment setup for test the MPE method used in the VHC

在实验过程中,图 3 所示是待识别的参考图像,将框 1 所框的区域记为第一幅图,从第一幅图开始,以 5 pixel 为分割间隔分别向右和向下移动 39 次和 29 次进行模板图像制备,这样就得到了一个 40×30 的二维图像库,其中每幅图像的大小都是 640×480 。

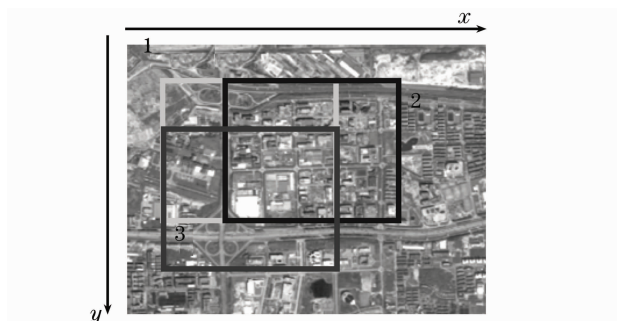


图 3 遥感图像体全息识别实验

Fig. 3 Experiment for remote sensing image

对于这 1200 张库图像,使用多样本并行估计方法进行体全息景象匹配,首先确定本次实验所选取的相关点数目为 16 (4×4 个样本点)。以左上角第一幅图的位置为坐标原点,已知实时图的大小是 640×480 ,坐标为 $(89, 33)$ 。如图 4 所示,将该实时图输入到体全息相关器中,探测器屏幕上显示出一系列相关点阵。在最亮的相关点附近选取 4×4 个相关点作为样本点,经归一化后,这 4×4 库图像样本点亮度值可以用以下 4×4 矩阵表示,

$$\begin{bmatrix} 0.392 & 0.506 & 0.581 & 0.452 \\ 0.551 & 0.769 & 0.833 & 0.639 \\ 0.517 & 0.664 & 0.769 & 0.601 \\ 0.364 & 0.461 & 0.544 & 0.423 \end{bmatrix}$$

选定亮度值为 0.392 的相关点所对应的模板图像为基准图像,该基准图像的坐标为 $(85, 28)$ 。这样通过“击中、击不中”方法就得到的实时图坐标为 $(92, 34)$,误差半径为 $\rho_1 = 3.16$ 。下面使用多样本并行估计方法来判断实时图的位置,估计函数中的参数可以通过拟合库图像的自相关曲线得到,那么根据各估计函数之间的关系,将归一化的相关点的亮度值代入(7)式中列解估计方程,就可以得到最终结果: $x = 4.3$ 和 $y = 4.4$,这样实时图的坐标就是 $(89.3, 32.4)$,误差半径为 $\rho_2 = 0.67$ 。



图 4 多样本并行估计识别实验

Fig. 4 Recognition experiment of multi-sample parallel estimation

由于误差半径 $\rho_1/\rho_2 = 4.7$,这样与“击中、击不中”的方法相比,利用多样本并行估计方法,识别精度比原来提高了 4 倍,达到亚像素级识别的水平。通过理论计算和实验结果可知,通过多样本并行估计的方法可以有效提高识别精度,样本数越多,识别精度越高,但是由于受到光学探测器系统精度的影响,识别精度也不可能无限提高。假设相关器精度为 L ,样本数为 $N(n \times n)$,探测器灰阶为 s ,那么有

$$L \times N^{-1/2} \geq s. \quad (8)$$

如图 5 所示,随着样本数增加,识别精度不断提升,但当样本数大于 64 时,随着样本数增加,识别精度的提升就不明显了。

5 结 论

利用遥感图像的平稳随机性和体全息的高速多通道并行性,提出适用于体全息景象匹配系统的多样本并行估计方法。该方法包括图像预处理、模板图像的制备以及估计方程的建立等重要步骤,大部分步骤都可以在系统工作之前完成。实时图的预处理和简单的相关计算需要在实时相关的过程完成,

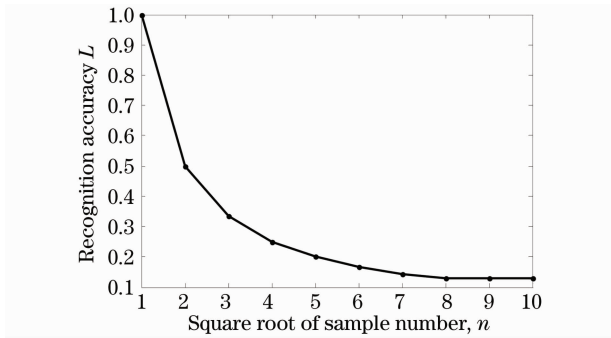


图5 识别精度提升随样本数增加示意图

Fig. 5 The schematic diagram of recognition accuracy improvement with sample number increasing

但是这些过程运算量很少,可以满足高速应用的需要。实验结果表明多样本并行估计方法可以有效提高体全息景象匹配系统的精度,样本数越多,精度也越高。同时,在精度不变的条件下,可以降低对体全息相关器的存储容量的要求。

参 考 文 献

- 1 Wang S, Tan Q, Cao L *et al.*. Multi-sample parallel estimation in volume holographic correlator for remote sensing image recognition[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21739~21748
- 2 Burr G, Mok F, Psaltis D. Large-scale volume holographic storage in the long interaction length architecture[C]. *SPIE*, 1994, **2297**: 402~414
- 3 Burr G, Kobras S, Hanssen H *et al.*. Content-addressable data storage by use of volume holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6779~6784
- 4 Goertzen B, Mitkas P. Volume holographic storage for large relational databases[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**: 1847~1853
- 5 Ni K, Qu Z, Cao L *et al.*. Improving accuracy of multichannel volume holographic correlators by using a two-dimensional interleaving method[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2973~2975
- 6 Ouyang C, L. Cao L, He Q *et al.*. Sidelobe suppression in volume holographic optical correlators by use of speckle modulation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1972~1974
- 7 Ni K, Qu Z, Cao L *et al.*. High accurate volume holographic correlator with 4000 parallel correlation channels[C]. *SPIE*, 2007, **6827**: 319~328
- 8 Tao Shiquan. *Optics Holographic Memory*[M]. Beijing: Beijing Industry University Press, 1998: 130~139
陶世荃. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998. 130~139
- 9 Capon J. A probabilistic mode for run length coding of picture [J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1959, **5**(4): 157~163
- 10 Bernal M, Coufal H, Grygiel R *et al.*. A precision tester for studies for holographic optical storage materials and recording physics[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(14): 2360~2374
- 11 Lundquist. M, Poga. C, DeVoe. R. G *et al.*. Holographic digital data storage in a photorefractive polymer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 890~892
- 12 Huang T. PCM Picture Transmission [J]. *IEEE Spectr.*, 1965, **2**: 57~63
- 13 Andrew, Jazwinski H. *Stochastic Process and Filtering Theory* [M]. New York and London: Academic Press, 1970. 112~119
- 14 Haralick R, Shanmugan K, Dinstein. Textural features for image classification[J]. *IEEE Trans. Syst.*, 1973, **3**(6): 610~621