

文章编号:1004-4213(2011)11-1702-4

伪随机序列投影三维测量中的快速子序列匹配

陈良锋, 李勇

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要:提出了一种适用于伪随机序列投影三维测量技术的子序列匹配快速算法. 首先根据源序列的内容及子串长度构造由多层子表组成的表格; 然后根据子序列的内容, 从首字符开始从左到右, 依次从首层表格开始向下查找; 最后得到子序列在源序列中的位置. 即根据首字符在首层表格中查到对应的第二层表格地址, 再在第二层表格中根据第二个字符, 查找第三层表格地址. 以此类推, 查出最后一层表格的地址. 在最后一层表格中, 根据末字符查找到该子序列在源序列中的位置. 给出了理论分析并进行了实验验证, 结果表明, 在目前主流的计算机上, 对于典型场景采用查表法的子序列匹配速度较常用算法快 60 倍以上.

关键词:机器视觉; 结构光三维测量; 时空二值编码; 查表法; 快速算法

中图分类号: TN206

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20114011.1702

0 引言

光学三维测量技术以其非接触、测量速度快、准确度高等优点^[1-2], 已经被广泛应用于三维重建、轮廓测量、虚拟现实、影视特技、医学、数字文物等众多领域^[3-4]. 编码结构光三维测量技术是目前应用较多的光学三维测量技术, 按编码方式可分为时间编码、空间编码和直接编码三类^[5]. 采用伪随机序列投影^[6]的编码结构光三维测量技术是其中的重要方法. 该方法利用伪随机序列中一定长度的子序列所具有的唯一性, 从拍摄图像中恢复代码, 然后构造子序列. 通过子序列匹配的方法得到其在投影序列中的位置, 从而得到摄像机与投影仪坐标系的对应点. 最后根据三角测量原理获得物体三维形貌. 在该方法中, 子序列匹配是必不可少的步骤, 其运算速度直接影响三维重构的快慢. 常见的子序列匹配方法有 Brute Force (BF) 算法^[7]、Knuth-Morris-Pratt (KMP) 算法^[8]及 C/C++ 函数库中提供的子串查找算法等. 其基本思想是在源序列中从头到尾扫描比较, 确定是否存在目标子序列. 这类算法是针对源序列是任意的情况设计的. 对于长度为 M 的子串, 其算法平均复杂度都远大于 $O(M)$. 而伪随机序列投影三维测量中源序列是确定的. 因此可以根据这一特性设计效率更高的算法. 本文提出了一种采用查表法的快速子序列匹配方法, 大大地提高了子序

列匹配速度. 给出了算法原理, 并以时空二值编码结构光三维测量技术^[6]为例进行了实验验证.

1 原理

1.1 时空二值编码原理

伪随机序列投影三维测量系统如图 1. 它主要由摄像机、投影仪及计算机等构成. 由投影仪投出若干编码模式, 摄像机从另一角度拍摄被物体三维面形调制的变形模式. 再经计算机对拍摄的图像进行分析、解码, 并构造子序列; 然后通过子序列匹配得到摄像机和投影仪坐标系之间的对应点对. 而摄像机和投影仪之间的位置关系一旦确定, 就可以由三角测量原理获得了物体三维面形数据. 在只用一维坐标编码时, 可以采用式(1)得到物体三维形貌^[9].

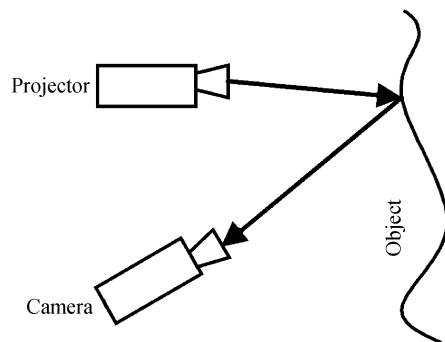


图 1 编码结构光系统示意
Fig. 1 Scheme for 3D measurement system based on pseudo random sequence projection

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60702078)资助

第一作者: 陈良锋(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学三维传感. Email: chen_liangfeng@163.com

导师(通讯作者): 李勇(1972-), 男, 教授, 主要研究方向为数字全息、光学三维传感及三维显示等方面. Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2011-07-08; 修回日期: 2011-08-15

$$\begin{cases} Z_w(u, v) = \sum_{n=0}^N k_n(u, v) \Delta u_p^n(u, v) \\ X_w(u, v) = a_1(u, v) + b_1(u, v) Z_w(u, v) \\ Y_w(u, v) = a_2(u, v) + b_2(u, v) Z_w(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

式中 u, v 是摄像机像素坐标, Δu_p 是与同一像素点对应的被测表面与参考平面的投影仪像素坐标差, a_1, a_2, b_1, b_2, k_n 为与摄像机像素坐标有关的常量。

时空二值编码综合时间编码和空间编码两种方法,平衡了测量可靠性、准确度及速度等指标,可以得到可靠、高准确度测量结果和物体表面纹理。图 2

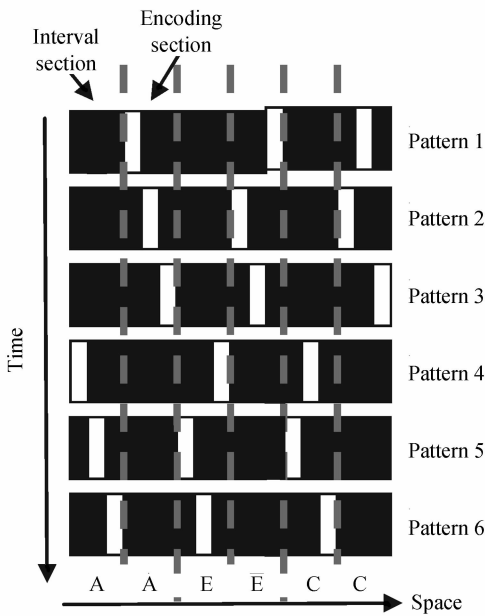


图 2 时空二值编码示意
Fig.2 Sketch of spatial-temporal encoding

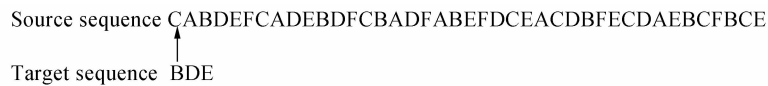


图 3 子串匹配算法示意
Fig.3 Sketch diagram for subsequence matching

KMP 算法是在 BF 算法的基础上改进而来。其改进在于在子串和源串每一次匹配过程中,若是有字符不相同的情况,不需要像 BF 算法一样子串从源串的下一个位置重新开始匹配。而是利用子串建立的失败链接数组,得到子串在源串中下次开始匹配的位置。从那里子串和源串再开始匹配。KMP 算法的理论平均时间复杂度接近 $O(N+M)$ 。但在部分匹配子串较少时,时间复杂度远大于 $O(N+M)$ 。其它的字符串匹配快速算法与 KMP 算法相似,其基本思想都是在字符不相等时尽可能往右多移以减少比较次数。但是目前常见算法的平均时间复杂度远大于 $O(M)$,对于具体子串还与其在源串中的位置有关。在进行大量子串匹配时,运算量较大。

1.3 查表法原理

对于伪随机序列投影三维测量,源串(序列)是

是采用冗余编码方案^[10]的原理。图中每个符号占六个投影仪像素,在空间上左三个像素为编码单元,右三个像素为冗余编码单元。两者对同一个符号编码,规则相同只在时间坐标上相差 3。码值由编码单元的时空坐标构成。代码构成的原则是:1)空间方向,一个模式中,每个单元内有且只有一个像素是白色的,其它为黑;2)时间方向,在同一个单元内,每个像素在且只在一个模式中为白色,其它为黑。这样,以亮条纹在编码单元中的空间相对位置为空间坐标,其所在模式的序号,为时间坐标。把时间和空间坐标组合就可以对区域编码。如符号“E”可表示为时空坐标“1 3 2 1 3 2”,加框部分表示相对空间坐标,未加框的表示时间坐标。在得到符号的编码后,就可以用这些符号构造伪随机序列。投影模式由伪随机序列决定。

1.2 常见子序列匹配算法原理

伪随机序列投影三维测量中的子序列匹配与字符串运算中的字符串匹配相同。最基本的算法是 BF 算法,如图 3。算法核心思想是:按从左到右顺序,首先将目标子串的第一个符号 $T[0]$ 与源串的一个符号 $S[0]$ 比较。若相等,则再比较 $T[1]$ 和 $S[1]$,一直到 $T[M]$ (M 为子串长度)为止。若比较中有符号不等,则 T 向右移动一个字符的位置,再依次进行比较。如果存在 $k, 1 \leq k \leq N$ (N 为源串长度),且 $S[k \dots k+M-1] = T[0 \dots M-1]$,则匹配成功;否则失败。该算法最坏情况下要进行 $M \times (N-M+1)$ 次比较,时间复杂度为 $O(M \times N)$ 。

确定的,而且子串的长度也是确定的,序列中用到的字符较少。因此考虑根据源串的内容构造一张表格,采用查表的方法实现子串匹配。这样,子串匹配的时间复杂度恒为 $O(M)$,与子串所在位置无关。下面以子串长度为 4,字符数为 6(从“A”到“F”)的情形为例说明这一算法。表格结构如图 4(以字符“A”开头的子串为例),它由四层子表构成。第 0 层有 1 个子表,包含 6 个表项,分别与子串的第 0 个字符“A”到“F”对应。表项内容为下层子表的首地址。第 1 层由 6 个子表构成,每个子表同样有 6 个表项,分别与子串的第 1 个字符“A”到“F”对应。表项内容为下层子表的首地址。在子表中,不存在的子串,由于无对应下层子表,相应表项置为空(NULL)。如按子串构成规则,“AA”不可能存在,则第 0 层第 0 表项所指的子表中的第 0 项置为 NULL,其它层、其它子表情

况类似,第2层由30个子表构成,每个子表同样有6个表项,分别与子串的第2个字符“A”到“F”对应.表项内容为下层子表的首地址.第3层由120个子表构成,每个子表同样有6个表项,分别与子串的第3个字符“A”到“F”对应.表项内容为子串在源串中的位置.不存在的子串,其对应的表项置-1.

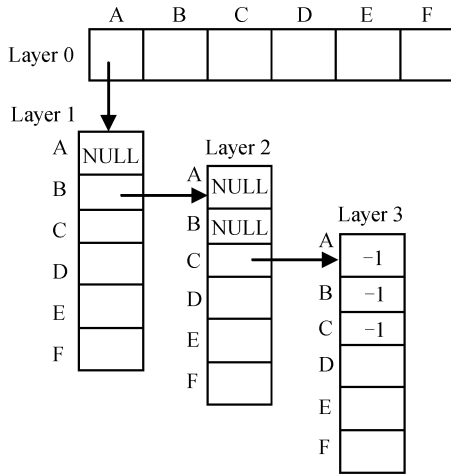


图4 查找表结构示意图

Fig. 4 Structure of look-up table

子串匹配算法为:1)根据子串首字符,在第0层表格对应表项中得到第1个字符所在的表格地址;2)根据子串第1个字符在1)查到的表格对应表项中内容得到第2个字符所在的表格地址.如果地址为空,则返回-1(表示子串不存在),否则继续;3)根据子串第2个字符在2)查到的表格对应表项中内容得到第3个字符所在的表格地址.如果地址为空,则返回-1(表示子串不存在),否则继续;4)根据子串第3个字符在3)查到的表格对应表项中内容得到子串在源串中的位置并返回该值,查表结束.由于一次查表操作运算量与一次比较操作相同,由上述算法可以得出,查表法的时间复杂度为 $O(M)$.

2 实验及结果

由理论分析可知,不同于查表法,其它算法的复杂度是统计意义上的量.对具体情况,其匹配时间相差较大.主要与源串长度及场景中恢复的子串在源串中的位置分布有关.源串越长,匹配时间越长,意味着查表法提高的倍数越多.子串主要分布在源串首部,匹配时间较短,即查表法提高的倍数较少;反之,查表法提高的倍数较多.在实际应用中,子串通常均匀分布,查表法提高的倍数主要与源串长度有关.为此,本文选择了比较典型的场景进行实验.采用时空二值编码结构光投影(源串长度为181个字符),拍摄了像素为 640×480 的棋盘格和雕像的图像.对图像进行处理,恢复了各区域的编码.然后构

造子序列,分别用查表法、VC的strstr函数、BF算法、KMP算法等进行子串匹配,比较了每种算法匹配所用时间.程序使用VC编程实现,在Windows XP系统下分别在:1)Intel Pentium 4 CPU主频3.00 GHz,内存512 MB;2)Intel Core i3 CPU主频2.53 GHz,内存2 GB;3)Intel Core i5 CPU主频2.80 GHz,内存4 GB,三种目前主流微机上运行测试.在这三种机型微机上,每种算法测试了100 000次,取得了每种算法的平均匹配时间.表1为棋盘格子串匹配的时间比较.表2为雕像子串匹配的时间比较.从两张表的数据结果可以看出查表法的子串匹配时间明显比其他算法少,最少提高倍数超过60倍.

表1 棋盘格图像子串匹配时间比较

Table 1 Comparison of substring matching time for chessboard

Algorithm	Look-up Cpu table/ μ s	Strstr/ μ s	BF/ μ s	KMP/ μ s
Pentium 4	388s	24 311	40 826	44 861
Core i3	217	17 939	26 891	40 856
Core i5	184	13 432	21 006	32 499

表2 雕像图像子串匹配时间比较

Table 2 Comparison of substring matching time for statue

Algorithm	Look-up Cpu table/ μ s	Strstr/ μ s	BF/ μ s	KMP/ μ s
Pentium 4	356	23 014	36 931	44 493
Core i3	196	17 275	25 067	38 663
Core i5	154	11 591	17 884	28 023

图5为利用查表法对棋盘格和雕像进行子串匹配后得到的摄像机像素对应的子序列位置图.匹配结果与匹配前的编码恢复算法及是否采用纠错算法



(a) Result of chessboard



(b) Result of statue

图5 摄像机像素对应子序列位置图

Fig. 5 Subsequence position maps corresponding to camera pixel

等有关.如果采用纠错算法,图5的匹配结果可进一步提高.最后,本文根据匹配结果进行了三维恢复.图6是雕像的三维恢复结果.

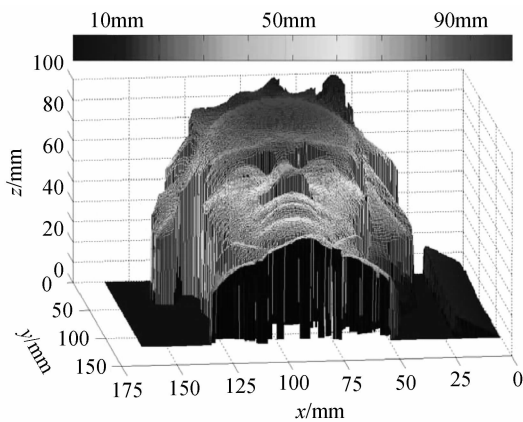


图6 三维恢复结果
Fig.6 Reconstructed 3D shape

3 结论

采用伪随机序列投影的三维测量技术中,子序列匹配是必不可少的步骤.常见的子序列匹配需要进行多次试匹配,存在匹配时间开销大的缺点.通过分析这类三维测量技术特点,提出查表法实现快速子串匹配.查表操作只相当于常见算法的1次试匹配操作,因此大大提高了匹配速度.以时空二值编码三维测量技术为例,进行了实验验证.结果表明:在目前主流计算机上对典型场景采用查表法,匹配速度比常见算法提高约60倍.

参考文献

- [1] BLAIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 231-240.
- [2] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(1): 10-22.
- [3] ZHANG Qi-can, SU Xian-yu. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(8): 3110-3116.
- [4] WANG Yuan-yuan, WANG Hui, REN Zhi-jun, et al. Research of the computer-generated dynamic rainbow hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1018-1021.
王媛媛,王辉,任志军,等.动态数字彩虹全息显示的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1018-1021.
- [5] SALVI J, PAGES J, BATLLE J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4): 827-849.
- [6] LI Yong, CHEN Yun-fu, JIN Hong-zhen, et al. Binary spatio-temporal encoded illumination for 3D imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 670-675.
李勇,陈云富,金洪震,等.三维成像中的二值时空编码照明方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 670-675.
- [7] 严蔚敏,吴伟民.数据结构(C语言版)[M].北京:清华大学出版社,1997:70-84.
- [8] KNUTH D, MORRIS J H, PRATT Jr V. Fast pattern matching in strings[J]. *SIAM Journal on Computing*, 1977, **6**(2): 323-350.
- [9] LI Yong, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, **53**(14): 1955-1964.
- [10] XUE Kang, LI Yong. Redundancy encoding method for three-dimensional shape measurement based on binary spatio-temporal encoded illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2163-2165.
薛康,李勇.二值时空编码照明三维测量中的冗余编码方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2163-2165.

Rapid Subsequence Match in Pseudo Random Sequence Projection Based Three-dimensional Measurement System

CHEN Liang-feng, LI Yong

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: A rapid algorithm for three-dimensional measurement was proposed based on pseudo random sequence projection. Firstly, a multi-layer table was constructed according to source sequence and length of sub-sequence. Then, the operation of looking up table was performed from table on top layer to which on bottom layer corresponding to the character in subsequence from left to right. Finally, the position of subsequence was obtained by looking up the table on bottom layer. That is to say, the address of table on second layer was obtained by looking up table on top layer according to first (left) character in subsequence. Then, the address of table on third layer was obtained by looking up table on second layer according to second character in subsequence. The rest can be done in the same manner. Finally, the address of table on bottom layer was obtained and the position of subsequence was obtained by looking up this table. The theory analysis and experimental results were presented. The results show that the speed of algorithm based on look-up table for representative scene is about 60 times faster than the general ones on mainstream computer.

Key words: Machine vision; Three-dimensional measurement based on coded structured light; Binary spatial-temporal encoding; Look-up table; Rapid algorithm