

文章编号 1004-924X(2009)07-1745-07

采用多级动态规划实现立体匹配

郭永彩, 魏朋玉, 高 潮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 动态规划算法是立体匹配中比较流行的一种全局优化方法, 然而传统的动态规划立体匹配算法因忽略了核线间像素对视差的影响, 产生了比较明显的横向“条纹”效应。为了消除此效应, 本文提出了一种采用多级动态规划的立体匹配算法。该算法通过建立初始视差空间, 对核线间进行双向的动态规划运算, 然后将合并得到的结果用于优化初始视差空间。基于新的视差空间在核线上进行双向的动态规划运算, 最后求取使核线上和核线间动态规划合并结果最小的值作为所求视差。利用标准数据库 Middlebury 平台对提出的算法进行了测试。实验结果表明, 该算法与传统的动态规划算法和基于扫描线优化算法相比, 横向“条纹”效应有所改善, 且总体误匹配率分别降低了 28.60% 和 40.42%, 提高了匹配结果的准确性。

关键词: 计算机视觉; 立体匹配; 动态规划; 视差空间; 视差图

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Stereo correspondence using multi-stage dynamic programming

GUO Yong-cai, WEI Peng-yu, GAO Chao

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Dynamic programming is one of the oldest but still popular methods for stereo correspondence. Because the traditional stereo matching based on the dynamic programming has the well-known horizontal “streaking” effect for skipping the vertical edges, a stereo correspondence using the multi-stage dynamic programming is proposed to eliminate this effect in this paper. Firstly, the initial disparity space is constructed, and the down and up dynamic programming processes are operated across the epipolar lines. Then, the initial disparity space is optimized by the combined results above. Finally, based on the new disparity space, the forward and backward dynamic programming processes are implemented along the epipolar lines, and the disparities are obtained by minimizing the combined results of the dynamic programming along and across the epipolar lines. This algorithm is evaluated on the benchmark Middlebury database. The experimental results show that the “streaking” effect is suppressed and the general error matching rates have decreased by 28.60% and 40.42% respectively compared with that of the traditional dynamic programming algorithm and the scan-line optimization algorithm, which can offer a good trade off in terms of the accuracy. It is demonstrated that the proposed algorithm is more efficient.

Key words: computer vision; stereo correspondence; dynamic programming; disparity space; disparity map

收稿日期: 2008-08-11; 修订日期: 2008-09-01.

基金项目: 教育部重点科研项目 (No. 108174)

1 引言

立体视觉的广泛应用使立体匹配成为目前计算机视觉研究的重点之一。立体视觉需要解决的关键问题是立体匹配,因此针对这个问题的大量研究相继出现。Scharstein 和 Szeliski^[1]做了一项关于匹配算法的分类和比较的调查。根据匹配策略的不同,立体匹配算法大致可以分为局部优化^[2]和全局优化^[3-8],以及在此基础上提出的局部优化和全局优化结合的方法^[9]。其中,局部优化方法中图像各像素点的视差仅取决于该像素点周围某区域内的像素,计算比较简单,但是匹配的精度不够;全局优化则是图像中各像素点的视差与其他所有像素有关,匹配精度较好。目前广泛采用的全局优化方法包括动态规划(Dynamic Programming)、遗传算法(Genetic Algorithm)、图割法(Graph Cuts)、模拟退火(Simulated Annealing)和信任传播(Belief Propagation)等。

目前,大多数立体匹配算法都是在双目平行立体视觉的假设前提下进行的,即假设立体相机的位置为标准配置,也就是相机的光轴互相平行,且基线(光心的连线)与图像水平方向一致,此时图像的水平扫描线即为核线。不失一般性,文中所提出的改进算法也是在基于此假设的前提下进行的,而且所用各立体图像均经过核线矫正。

传统的基于核线优化的动态规划立体匹配方法由于忽略了核线间的影响,致使核线与核线之间的约束不够,即单从每条核线上看都是最优解,但从全局来看未必是最优解。这样导致视差图中出现了比较明显的横向“条纹”效应,容易造成立体视觉后期工作的错误,如三维重建的表面失真及机器人避障导航的失败等。源于文献[3]提出的利用两阶段动态规划进行立体匹配的启示,本文提出了一种采用多级动态规划的立体匹配算法。该算法的基本思想是,在进行动态规划过程中,考虑相应的核线的影响因素,经过核线间及核线方向的多次动态规划算法,得到准确度较高的稠密视差图。

2 能量评价函数

全局优化方法将立体匹配转化为求取最优解问题,一般会先给出一个能量评价函数,然后通过优化算法来求取使能量函数取得最小值的视差值函数。通常,能量评价函数由灰度相似性和视差平滑性两项约束组成,如式(1)所示,其中 $\mathbf{E}_{\text{data}}(d)$ (d 的取值范围是 $[0, D]$, D 为最大视差值)代表灰度相似性约束, $\mathbf{E}_{\text{smooth}}(d)$ 代表视差平滑性约束。

$$\mathbf{E}(d) = \mathbf{E}_{\text{data}}(d) + \lambda \times \mathbf{E}_{\text{smooth}}(d). \quad (1)$$

$\mathbf{E}_{\text{data}}(d)$ 的计算将在建立视差空间时详述。由于视差的不连续、遮挡等大部分发生在灰度的跳变处,因此可以把 $\mathbf{E}_{\text{smooth}}(d)$ 看作是视差的不连续和遮挡代价。本文中,为了防止边界模糊采用了文献[4]的方法定义视差平滑性约束,如式(2)所示:

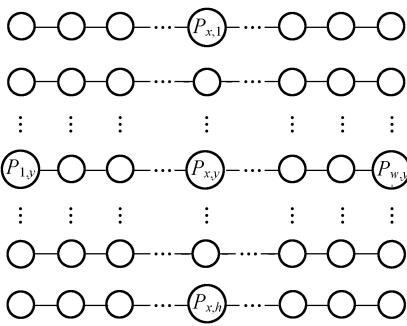
$$\mathbf{E}_{\text{smooth}}(d) = \mathbf{S}(d_p, d_q) = \begin{cases} 0, & d_p = d_q \\ \gamma_{pq}, & |d_p - d_q| = 1 \\ \omega_{pq}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, p, q 是参考图像中的两个相邻像素, d_p, d_q 是赋予这两个像素的视差值, γ_{pq} 是预先设置的常数, ω_{pq} 是采用文献[6]的方法计算得到。

3 算法原理及实现

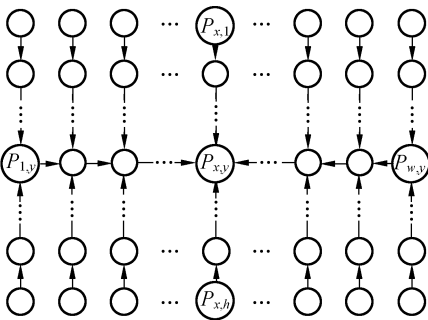
3.1 算法原理

本文提出的算法,与传统的基于核线的动态规划立体匹配方法^[1]不同。从图 1(a)(w, h 分别表示图像的长和宽)中可以看出,传统动态规划算法的扫描路径仅限于单独的核线内,忽略了核线间的邻域像素对像素点视差求取的影响,因此在得到的视差图中容易出现明显的横向“条纹”效应。本文提出的方法则同时考虑了核线间像素的影响,得到图 1(b)所示的扫描结构,对于参考图像(本文以左图像为参考图像)中任意像素的视差求取均涉及到其他全部像素,从而可以得到更加可靠的视差。实验结果表明,这种算法的匹配效果明显得到提高。



(a) 传统动态规划的扫描结构

(a) Scanning structure of traditional method



(b) 本文方法动态规划的扫描结构

(b) Scanning structure of proposed method

图 1 扫描结构对比

Fig. 1 Comparison of scanning structures

3.2 算法实现过程

3.2.1 建立视差空间^[8]

视差空间是一个三维离散的方体,如图 2 所示。三维视差空间中坐标 (x, y, d) 的值表示参考图像中像素点 (x, y) 被赋予视差 d 时的匹配代价值,即能量评价函数中 $E_{data}(d)$ 的项。视差空间中的任意 d 对应的 $x-y$ 的切面称为视差空间图像

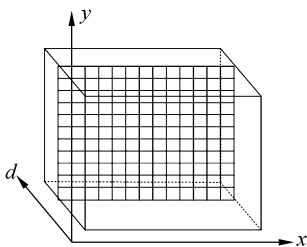


图 2 视差空间方体及视差空间图像

Fig. 2 Disparity space cube and disparity space image

(Disparity Space Image, DSI)。采用像素灰度差的绝对值作为相似性测度,这种方法计算简单,但在边界处左右图像的像素灰度差值比较大,直接计算像素灰度差值,易造成目标函数中相似性约束项不能准确反映匹配约束。因此,在实际处理中采用灰度约束条件 T_g ,匹配代价计算公式如下:

$$m(x, y, d) = \min\{|I_L(x, y) - I_R(x - d, y)|, T_g\} \quad (3)$$

为了进一步提高匹配代价计算的精度,在计算匹配代价时,采用 Birchfield 和 Tomasi^[10]提出的像素不相似测度方法计算能量公式中的相似性约束代价,这种方法可以有效降低因图像采样的离散化引起的匹配代价计算误差。

3.2.2 动态规划优化方法

本文提出的算法运用了多次动态规划运算,这里仅给出核线方向的优化过程示意图。如图 3 所示,(a)表示前向动态规划过程;(b)表示后向动态规划过程;(c)表示核线方向代价累积过程。其中, q_1, q_2 分别表示两次扫描过程中像素 $p_{x,y}$ 的前驱相邻像素。

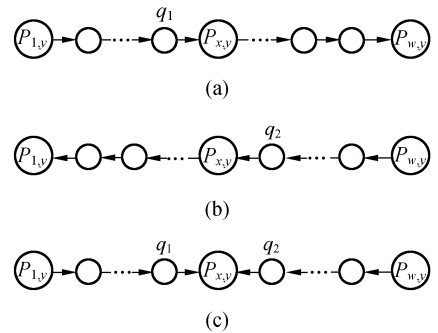


图 3 双向动态规划优化计算示意图

Fig. 3 Schemes of bidirectional dynamic programming

由于动态规划算法用到了递归运算,因此为了便于计算,将能量函数式(2)优化为式(4)^[6]的形式:

$$k(p, d_p) = \min_{d_p, d_q \in D} \{m(p, d_p) + \sum_{q \in n(p)} (\lambda \times S(d_p, d_q) + k(q, d_q))\} \quad (4)$$

其中: p 是参考图像中任意像素, $n(p)$ 是像素 p 的前驱相邻像素。

动态规划优化方法步骤如下:

(1) 核线间的动态规划

在核线间, 对参考图像的每一列分别进行向下和向上两次动态规划运算, 目的是为了得到优化矩阵 $\mathbf{V}_{\text{cost}}[p, d_p]$, 并利用它来更新原始视差空间的匹配代价值。

首先, 对每一列做向下的动态规划运算, 得到核线间从最上边开始的每一个像素的最优匹配代价, 代价的求取利用了式(4)的简化形式——式(5), 然后将所得的优化代价存放在矩阵 $\mathbf{D}_{\text{cost}}[p, d_p]$ 中。

$$\mathbf{k}'(p, d_p) = \min_{d_p, d_q \in D} \{ \mathbf{m}(p, d_p) + \lambda \times \mathbf{S}(d_p, d_q) + \mathbf{k}'(q, d_q) \}. \quad (5)$$

接着, 对每一列做向上的动态规划运算, 得到核线间从最下边开始的每一个像素的最优匹配代价, 代价求取仍采用式(5), 只是这时 q 指向 p 下面的像素。然后把得到的结果存放在矩阵 $\mathbf{U}_{\text{cost}}[p, d_p]$ 中。

为了得到每个像素视差的优化代价, 可以将向上和向下运算代价进行累积^[3]。把参考图中位于坐标 (x, y) 的像素记为 $p_{x,y}$, 则赋予它视差 d 时的最小能量函数可以用式(6)表示。

$$\mathbf{V}_{\text{cost}}(p_{x,y}, d_p) = \min_{d_p, d_q \in D} \{ \mathbf{m}(p_{x,y}, d_p) + \lambda \times \mathbf{S}(d, d_q) + \mathbf{k}'(q, d_q) + \lambda \times \mathbf{S}(d, d_q') + \mathbf{k}'(q, d_q') \}, \quad (6)$$

结合式(5), 上式可以等同于式(7)。

$$\mathbf{V}_{\text{cost}}(p_{x,y}, d_p) = \mathbf{D}_{\text{cost}}[p_{x,y}, d_p] + \mathbf{U}_{\text{cost}}[p_{x,y}, d_p] - \mathbf{m}(p_{x,y}, d_p). \quad (7)$$

(2) 初始视差空间优化

得到优化矩阵 $\mathbf{V}_{\text{cost}}[p, d_p]$ 之后, 采取以下策略将核线间的动态规划与核线上的动态规划结合, 用已取得的运算结果更新视差空间代价值, 更新过程由式(8)实现。

$$\mathbf{m}'(p, d_p) = \mathbf{m}(p, d_p) + \alpha \times (\mathbf{V}_{\text{cost}}(p, d_p) - \max_{d_p \in D} (\mathbf{V}(p, d_p))), \quad (8)$$

其中, α 是一个用来调整核线间动态规划对视差结果影响的参数。

(3) 核线上的动态规划及视差求取

核线上的双向动态规划过程与核线间的动态规划基本相同, 这里不再赘述。需要注意的是, 此时的动态规划运算是基于新的视差空间进行的, 最后把得到的累积结果存放于矩阵 $\mathbf{H}_{\text{cost}}[p, d_p]$ 中。

最后, 为了进一步强化核线间动态规划运算对视差结果的影响, 本文提出的算法采用式(9)来获取视差。

$$d = \operatorname{argmin}_{d_p \in D} \{ \beta \times \mathbf{H}_{\text{cost}}[p, d_p] + (1 - \beta) \times \mathbf{V}_{\text{cost}}[p, d_p] \}, \quad (9)$$

其中, β 是取值在 $[0, 1]$ 的常数。

4 实验结果

采用 Middlebury 网站提供的数据库平台来评价本文提出算法的效果, 得到的结果如图 4 所示(使用的原始立体像对及对应的真实视差图均可以在网站 [http:// vision. middlebury. edu/ stereo/](http://vision.middlebury.edu/stereo/) 下载)。从图 4 可以看出, 本文方法得到的结果与 SO^[1] (Scan-line Optimization, 即扫描线优化)、DP^[1] 方法相比, 已明显地消除横向“条纹”。而且, 在缺乏纹理区域时得到的匹配效果也是比较满意的, 如 Tsukuba 图像的右上角背景处、Venus 图像的左边和 Teddy 图像玩具房子的房顶等处都比较平滑, 误匹配率有所下降。另外, 对于视差不连续处也保持了边界的清晰。

表 1 列出了几种不同算法的测试结果(测试结果均来自 Middlebury 网站)。其中, nonocc 表示非遮挡区域的误匹配率, all 表示包括半遮挡区域在内的整体误匹配率, disc 表示视差不连续区

域的误匹配率。利用表中数据,采用式(10)计算总体的误匹配率,本文提出算法相对于 DP^[1] 和

SO^[1]分别降低了 28.60%和 40.42%,效果显著提高。

表 1 不同算法测试结果比较

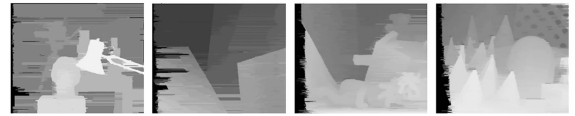
Tab.1 Results of different algorithms

Images	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones		
	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc	nonocc	all	disc
Proposed method	2.58	4.29	12.3	1.45	2.49	8.02	11.7	18.4	23.1	8.27	15.7	18.9
DP ^[1]	4.12	5.04	12.0	10.1	11.0	21.0	14.0	21.6	20.6	10.5	19.1	21.1
SO ^[1]	5.08	7.22	12.2	9.44	10.9	21.9	19.9	28.2	26.3	13.0	22.8	22.3

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i' - p_i}{p_i'} \times 100\% \right), \quad (10)$$

其中, p_i 是本文算法的误匹配率, p_i' 是原有算法的误匹配率, $N=12$ 。

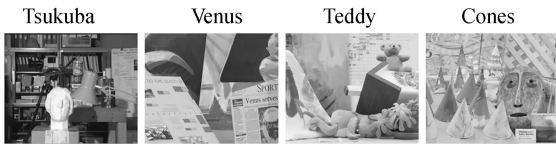
此外,为了验证本文算法的实用价值,又对网站 <http://www.cs.brown.edu/~black/images.html> 提供的实拍 Pepsi 和 Garden 图像序列(由单一照相机沿水平直线导轨移动所拍摄的图像序



(e) DP^[1] 方法的结果
(e) Results of DP^[1]

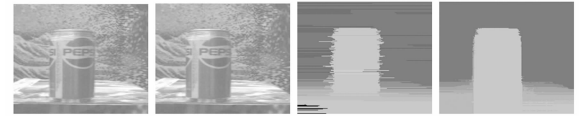
图 4 实验结果

Fig. 4 Experimental results



(a) 左图像

(a) Left images



Pepsi

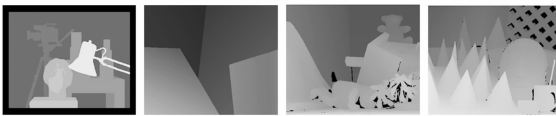


Garden

(a) 左图像 (b) 右图像 (c) DP^[1] 法 (d) 本文方法
(a) Left (b) Right (c) Results of (d) Results of
images images DP^[1] proposed
method

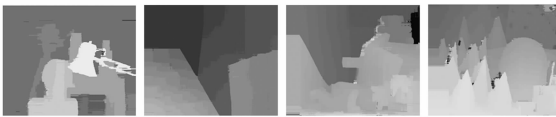
图 5 Pepsi 和 Garden 序列的测试结果

Fig. 5 Results on Pepsi and Garden Sequence



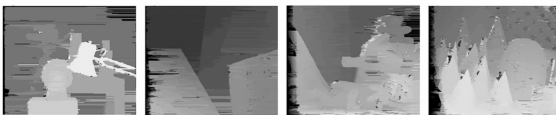
(b) 真实视差图

(b) Ground truth images



(c) 本文方法的结果

(c) Results of proposed method



(d) SO^[1] 方法的结果

(d) Results of SO^[1]

列)做了测试,结果如图 5 所示。由于不能获取真实视差图,这里只给出了传统动态规划方法和本文算法所得的效果图。从图中可以看出,相对于传统动态规划方法,本文算法对横向“条纹”效应具有一定的抑制能力。同时,在实时性方面,使用主频 1.81 GHz,内存 512 M 的计算机运行一对 360×240 的 Garden 图像对,在视差搜索范围为 5 且没有软件加速算法的情况下,耗时 0.81 s,说明本文算法满足实时的要求。

5 结 论

本文提出了一种采用多级动态规划的立体匹配算法。利用核线间和核线上的动态规划运算,最大限度地利用了像素间的相关信息,很大程度上消除了横向“条纹”效应。实验结果表明,该算法的总体误匹配率相对于传统的基于动态规划的

算法和基于扫描线优化的算法分别降低了28.60%和40.42%,匹配准确度得到了一定的提高。

虽然本文算法的结果良好,但仍存在不足,今后的改进将集中在如何更好地处理遮挡问题、视差不连续问题、使用新的约束假设和算法的优化等方面,以便进一步提高匹配准确度和算法执行速度,满足实际应用的要求。

参考文献:

- [1] SCHARSTEIN D, SZWILSKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002,47(1-3):7-42.
- [2] 张春森. 三维运动分析中的运动-立体双匹配约束[J]. *光学精密工程*, 2007,15(6):945-950.
ZHANG CH S. Motion-stereo double matching restriction in 3D movement analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):945-950. (in Chinese)
- [3] KIM J C, LEE K M, CHOI B T, *et al.*. A dense stereo matching using two-pass dynamic programming with generalized ground control points[C]. *Proceedings of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society*, 2005, 2: 1075-1082.
- [4] 邓毅, 林学闯. 一种新的快速立体视觉导航算法[J]. *电子学报*, 2006,34(11):2090-2093.
DENG Y, LIN X Y. A novel fast stereo algorithm for vision navigation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006,34(11):2090-2093. (in Chinese)
- [5] 谢子荣, 王东红, 罗均, 等. 基于生物信息学中双DNA序列比对算法的图像立体匹配及其实现[J]. *光学精密工程*, 2007,15(1):106-111.
XIE SH R, WANG D H, LUO J, *et al.*. Novel stereo matching algorithm based on pair-wise DNA alignment algorithm in bioinformatics and its implementation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1): 106-111. (in Chinese)
- [6] VEKSLER O. Stereo correspondence by dynamic programming on a tree[C]. *Proceedings of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society*, 2005:384-390.
- [7] 姜凯, 陈海霞, 刘立峰, 等. 基于模板抽样的快速图像匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2004,12(3):311-315.
JIANG K, CHEN H X, LIU L F, *et al.*. Fast image matching algorithm based on template sampling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(3):311-315. (in Chinese)
- [8] INTILLE S S, BOLICK A F. Disparity-space images and large occlusion stereo[C]. *Proceedings of the Third European Conference on Computer Vision, Stockholm, Sweden: Springer Berlin/Heidelberg*, 1994,2:179-186.
- [9] 尹传历, 向长波, 宋建中, 等. 一种基于自适应窗口和图切割的快速立体匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(6):1117-1121.
YIN CH L, XIANG CH B, SONG J ZH, *et al.*. Fast stereo matching algorithm based on adaptive window and graph cuts[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):1117-1121. (in Chinese)
- [10] BIRCHFIELD S, TOMASI C. A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence*, 1998,20(4):401-406.

作者简介:



郭永彩(1963—),女,重庆人,教授,博士生导师,1982年于西安电子科技大学获得学士学位,1988年、1999年于重庆大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电技术及系统、数字信号处理方面的教学与科研工作。E-mail: ycguo@cqu.edu.cn



高潮(1959—),男,山西柳林人,教授,博士生导师,1982年于东南大学获得学士学位,1988年、2004年于重庆大学分别获得硕士和博士学位,主要从事电子技术、计算机信息处理及精密测控领域的教学与科研工作。E-mail: gaoc@cqu.edu.cn



魏朋玉(1982—),女,河南南阳人,硕士研究生,2006年于中原工学院获得学士学位,主要从事计算机视觉,数字图像处理方面的研究。E-mail: wpy19822006@163.com

● 下期预告

微流体数字化喷点技术基础实验

耿鑫,侯丽雅,章维一

(南京理工大学微系统研究室,江苏南京210094)

为了解决现有的微喷点技术中存在的外接驱动设备过于庞大, MEMS 技术制作的微喷头结构复杂、造价昂贵、可操作性和与生物样品的兼容性差等问题,研制了新型的脉冲惯性力驱动方式和简洁的无热源、无外部加压装置的微喷点系统。介绍了微流体数字化喷点技术的驱动原理,搭建了微喷点系统的实验平台;然后,对微喷点的均一性和驱动参数的影响进行了实验研究,并对实验数据进行分析 and 总结;最后,用粘度为 $4.13 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的点样液制,作了密度为 $4000 \text{ 点}/\text{cm}^2$ 的中等密度微阵列。实验结果表明:样品点直径 $< 100 \mu\text{m}$, 变异系数 $\text{CV} < 8\%$, 完全可以满足微阵列制备技术的密度、样品点尺度和均一性的要求,可供小型实验室使用。