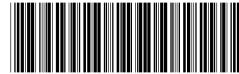


(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103413300 A

(43) 申请公布日 2013. 11. 27

(21) 申请号 201310320916. 0

(22) 申请日 2013. 07. 26

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁路 28 号

(72) 发明人 苏远歧 刘跃虎 黄骁 麦伯男

(74) 专利代理机构 西安智大知识产权代理事务所 61215

代理人 何会侠

(51) Int. Cl.

G06T 7/00 (2006. 01)

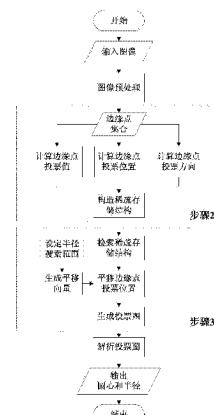
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法

(57) 摘要

一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法，步骤为：1、图像预处理；2、离散圆周生成一组投票方向，构造稀疏存储结构，记录边缘点不依赖于半径的投票方向、投票位置和投票值；3、检索稀疏存储结构，获取各离散投票方向的投票位置，离散给定的半径搜索范围，根据离散的半径和方向生成平移向量，对投票位置进行平移，叠加投票值生成投票图；4、根据投票图解析圆心和半径；本发明采用稀疏存储结构，能有效减少投票计算过程的时间和空间复杂度，检测过程具有实时性，针对不同场景图像的检测效果和鲁棒性均优于当前其他方法，能够满足实际应用需求。



1. 一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其主要包括如下步骤:

步骤 1 :图像预处理 :对原始输入图像进行边缘点检测,并计算各个边缘点梯度方向;

步骤 2 :离散圆周生成一组投票方向,构造稀疏存储结构,记录边缘点不依赖于半径的投票方向、投票位置和投票值;首先对圆周进行离散点采样,以采样点到圆心的方向,作为边缘点可能的投票方向;利用匹配度表示边缘点投票值,在匹配度上界的约束下,确定边缘点的投票方向,进而计算出边缘点所在图像位置周围不依赖于半径的投票区域和相应投票值;构造稀疏存储结构,包括一个稀疏矩阵和一个稀疏链表,存储边缘点的投票方向、投票位置和投票值,其中,稀疏矩阵记录边缘点的投票位置所在图像列号和边缘点投票方向,稀疏链表中每个链表节点包含三个元素,首元素存储边缘点投票位置所在的图像行号,第二个元素存储投票值,第三个元素存储同一图像列中下一个投票位置所在的图像行号;

步骤 3 :检索稀疏存储结构,获取各离散投票方向的投票位置,离散给定的半径搜索范围,根据离散的半径和方向生成平移向量,对投票位置进行平移,叠加投票值生成投票图:对每个投票方向检索稀疏存储结构,得到边缘点不依赖于半径的投票值和投票位置;设定半径搜索范围,采样生成离散半径值,针对每个半径值,结合所有投票方向生成平移向量,检索出的边缘点投票位置按照平移向量进行平移,叠加平移后的边缘点投票值,生成投票图;

步骤 4 :根据投票图解析圆心和半径:对步骤 3 中得到的每个离散半径值对应的投票图,采用局部最大值搜索方法,确定可能的圆心位置和置信度,投票 图对应的离散半径值作为圆形半径;组合从所有离散半径值对应的投票图中解析得到的圆形,采用非极大抑制策略,去除冗余圆形。

2. 根据权利要求 1 所述的一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其特征在于:步骤 2 所述利用匹配度表示边缘点投票值的具体方法为,边缘点匹配度定义为,设定的差异上界,减去边缘点梯度方向与投票方向形成的方向差异,再减去边缘点位置与其他图像位置形成的位置差异。

3. 根据权利要求 1 所述的一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其特征在于:步骤 2 所述确定边缘点的投票方向,进而计算出边缘点所在图像位置周围不依赖于半径的投票区域和相应投票值的具体方法为,所有使得边缘点匹配度为非负值的图像位置构成投票区域,在方向差异不大于差异上界的条件下,根据边缘点梯度方向,确定出每个边缘点对应的两个投票方向 $\{d_i, i=1, 2\}$, d_i 表示第 i 个投票方向,相应的方向差异记作 $\{ori_dif_i, i=1, 2\}$;对每一个方向差异 ori_dif_i , 差异上界减去 ori_dif_i 得到最大允许位置差异 $\{loc_dif_i, i=1, 2\}$;对每一个 loc_dif_i , 根据边缘点所处图像位置,在位置差异不大于最大允许位置差异的条件下,计算出每个边缘点满足匹配度约束条件的两个投票区域 $\{roi_i, i=1, 2\}$;当方向差异和最大允许位置差异分别为 ori_dif_i 和 loc_dif_i 时,在边缘点投票区域各个投票位置,得到的投票值为 { 差异上界 - ori_dif_i - 位置差异, 位置差异 $\leq loc_dif_i, i=1, 2\}$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其特征在于:步骤 2 所述构造稀疏存储结构的具体方法为,对每个边缘点,需要存储三种信息,分别是边缘点投票方向、投票位置和投票值;构造一个二维矩阵 MM, 大小为 NxK, N 代表原始输入图像的列数,K 代表投票方向数目,假定某个边缘点对应的投票方向为 k, 在计算出的投票区域 roi

中,按照列方向遍历投票值,当投票位置位于图像第 n 列时,二维矩阵 MM 中位于第 n 行、第 k 列的元素置 为指向一个链表的指针,该链表存储投票区域 roi 中位于图像第 n 列的投票值,每个链表节点包含三个元素,第一个元素存储投票位置所在图像行号,第二个元素存储投票值,第三个元素存储同一图像列中下一投票位置所在图像行号;当两个边缘点对应于同一投票方向时,处于同一图像列投票位置的投票值压入同一链表,更进一步,如果两个投票值还处于同一图像行投票位置,则只存储较大投票值;在边缘点匹配度约束条件下,两个边缘点对应同一投票方向和同一图像列投票位置的概率很小,使得矩阵 MM 及其指向的链表均只含有少量元素,具有稀疏性。

5. 根据权利要求 1 所述的一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其特征在于:步骤 3 所述对每个投票方向检索稀疏存储结构的具体方法为,假定考虑第 k 个投票方向,在步骤 2 得到的稀疏存储矩阵 MM 的第 k 列中,搜索含有值的矩阵元素,确定元素所处矩阵行号和元素值,其中,行号表示边缘点投票位置所在图像列号 col,元素值表示指向边缘点投票值存储链表的指针;在该指针指向的链表中,链表节点首元素给出边缘点投票位置所在图像行号 row,第二个元素给出边缘点投票值 val,第三个元素给出下一投票位置所在图像行号;对第 k 个投票方向,图像中不依赖于半径的边缘点投票位置为 {(row, col)},相应的边缘点投票值为 {val}。

6. 根据权利要求 1 所述的一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,其特征在于:步骤 3 所述叠加平移后的边缘点投票值的具体方法为,根据设定的半径搜索范围,采样生成离散半径值;对每个离散半径值,考虑所有 K 个投票方向,生成 K 个平移向量,其中,投票方向确定平移向量方向,半径值确定平移向量长度;此前,步骤 3 针对每个投票方向,已经从稀疏存储结构中检索出对应的不依赖于半径的边缘点投票值和投票位置;按照每个半径值对应的 K 个平移向量,依次平移投票位置,叠加各个平移向量得到的平移后的投票值,生成每个半径值对应的投票图。

一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于计算机视觉物体检测领域,具体涉及一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法。

背景技术

[0002] 作为视觉世界中的一类常见物体,圆频繁出现在我们的日常生活中,例如使用的硬币、汽车的轮胎、圆形交通标志牌等。利用计算机视觉技术,识别出图像中圆形物体具有重要意义,例如,银行在统计硬币数目时,目前通常采用人工计数的方式,费时费力,相比之下,如果对硬币进行拍照,并检测出该图像中圆形对象,即可达到硬币计数的目的,省时省力。因此,提供一种准确而快速的圆检测方法显得十分必要。

[0003] 经过几十年的发展历程,针对圆检测,国内外已提出了各种各样的方法,然而从实际应用的角度,这些方案远未完善,仍然存在改善的可能。在这些方法中,大部分是基于霍夫变换 (Hough Transform)。它们依据落在轮廓上的边缘点数目来判断圆实例的匹配效果,这个值正比于圆的半径,因此要比较不同半径的匹配效果则需要相对圆半径进行归一化。虽然都是基于霍夫变换,但是因为使用策略不同,这些方法呈现出各自的特点。常用的策略包括:(1) 同时对一组半径进行投票的改进,一般基于二维的投票矩阵,而非图像平面加上半径的三维矩阵,主要包括 OpenCV (Open Source Computer Vision) 实现的 Yuen 的方法 [1] 和 Tao 的霍夫变换方法 [2];(2) 应用半径调制的复投票矩阵对一组半径进行复值投票 [3];(3) 将随机霍夫变换 (RHT : Randomized Hough Transform) 和不同采样策略结合 [4];(4) 应用圆的对称性;(5) 采用层次投票;(6) 将圆检测视作滤波操作。以上方法针对检测过程中存储空间、检测精度、方法计算复杂度等不同因素进行改进,往往组合使用。

[0004] 在实际应用场景中,圆检测面临各种不利因素:图像光照不均匀使得边缘点梯度方向估计不准、圆形目标存在遮挡、变形、混杂噪声边缘点。但是,在目前的实际应用中,仍然采用传统的基于霍夫变换的检测方法,如中国知识产权局公开号为 CN102147857A 的专利(“利用改进霍夫变换进行类圆形检测的图像处理方法”)。这类方法虽然有不同的工程实现方式,但存在一些共性:(1) 圆形轮廓上边缘点对圆心的投票采用叠加方式,投票位置沿着该点梯度方向,在不同半径值下计算得出;(2) 投票的目的是统计位于圆轮廓上的边缘点数目,需要去除不同半径值对边缘点数目统计结果的影响,即对最终投票图做半径归一化。这种投票方式带来两种不利影响:一方面,叠加投票方式会使圆形轮廓周围噪声点的投票结果也被计算在内,不利于真实圆形目标的确定;另一方面,由于投票方向依赖于边缘点梯度方向,但梯度方向的估计往往并不精确,所以,得出的投票位置并不能精确反映真实圆心位置。综上所述,现有的圆形检测方法无法在检测准确性和鲁棒性方面,满足实际应用需求。

[0005] [1] H. Yuen, J. Princen, J. Illingworth, and J. Kittler, "Comparative study of Hough Transform methods for circle finding," *Image and Vision Computing*, vol. 8, pp. 71-77, 1990.

[0006] [2] T. Peng. Detect circles with various radii in grayscale image via Hough Transform. Available:

[0007] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9168-detect-circles-with-variousradii-%20in-grayscale-image-via-hough-transform>

[0008] [3] E. E. Zelniker and I. V. L. Clarkson, "Maximum-likelihood estimation of circle parameters via convolution," Trans. Img. Proc., vol. 15, pp. 865–876, 2006.

[0009] [4] T. -C. Chen and K. -L. Chung, "An Efficient Randomized Algorithm for Detecting Circles," Computer Vision and Image Understanding, vol. 83, pp. 172–191, 2001.

发明内容

[0010] 为了解决现有圆形检测方法在实际应用中存在的问题,本发明的目的在于提供一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,能够快速、准确、鲁棒的检测出各种复杂场景图像中的圆形目标物体。

[0011] 为达到以上目的,本发明采用如下技术方案:

[0012] 一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法,包括如下步骤:

[0013] 步骤1:图像预处理:对原始输入图像进行边缘点检测,并计算各个边缘点梯度方向;

[0014] 步骤2:离散圆周生成一组投票方向,构造稀疏存储结构,记录边缘点不依赖于半径的投票方向、投票位置和投票值;首先对圆周进行离散点采样,以采样点到圆心的方向,作为边缘点可能的投票方向;利用匹配度表示边缘点投票值,在匹配度上界的约束下,确定边缘点的投票方向,进而计算出边缘点所在图像位置周围不依赖于半径的投票区域和相应投票值;构造稀疏存储结构,包括一个稀疏矩阵和一个稀疏链表,存储边缘点的投票方向、投票位置和投票值,其中,稀疏矩阵记录边缘点的投票位置所在图像列号和边缘点投票方向,稀疏链表中每个链表节点包含三个元素,首元素存储边缘点投票位置所在的图像行号,第二个元素存储投票值,第三个元素存储同一图像列中下一个投票位置所在的图像行号;

[0015] 步骤3:检索稀疏存储结构,获取各离散投票方向的投票位置,离散给定的半径搜索范围,根据离散的半径和方向生成平移向量,对投票位置进行平移,叠加投票值生成投票图;对每个投票方向检索稀疏存储结构,得到边缘点不依赖于半径的投票值和投票位置;设定半径搜索范围,采样生成离散半径值,针对每个半径值,结合所有投票方向生成平移向量,检索出的边缘点投票位置按照平移向量进行平移,叠加平移后的边缘点投票值,生成投票图;

[0016] 步骤4:根据投票图解析圆心和半径:对步骤3中得到的每个离散半径值对应的投票图,采用局部最大值搜索方法,确定可能的圆心位置和置信度,投票图对应的离散半径值作为圆形半径;组合从所有离散半径值对应的投票图中解析得到的圆形,采用非极大抑制策略,去除冗余圆形。

[0017] 步骤2所述利用匹配度表示边缘点投票值的具体方法为,边缘点匹配度定义为,设定的差异上界,减去边缘点梯度方向与投票方向形成的方向差异,再减去边缘点位置与其他图像位置形成的位置差异。

[0018] 步骤 2 所述确定边缘点的投票方向,进而计算出边缘点所在图像位置周围不依赖于半径的投票区域和相应投票值的具体方法为,所有使得边缘点匹配度为非负值的图像位置构成投票区域,在方向差异不大于差异上界的条件下,根据边缘点梯度方向,确定出每个边缘点对应的两个投票方向 $\{d_i, i=1, 2\}$, d_i 表示第 i 个投票方向,相应的方向差异记作 $\{\text{ori_dif}_i, i=1, 2\}$;对每一个方向差异 ori_dif_i ,差异上界减去 ori_dif_i 得到最大允许位置差异 $\{\text{loc_dif}_i, i=1, 2\}$;对每一个 loc_dif_i ,根据边缘点所处图像位置,在位置差异不大于最大允许位置差异的条件下,计算出每个边缘点满足匹配度约束条件的两个投票区域 $\{\text{roi}_i, i=1, 2\}$;当方向差异和最大允许位置差异分别为 ori_dif_i 和 loc_dif_i 时,在边缘点投票区域各个投票位置,得到的投票值为 { 差异上界 $-\text{ori_dif}_i$ - 位置差异, 位置差异 $\leq \text{loc_dif}_i, i=1, 2\}$;

[0019] 步骤 2 所述构造稀疏存储结构的具体方法为,对每个边缘点,需要存储三种信息,分别是边缘点投票方向、投票位置和投票值;构造一个二维矩阵 MM ,大小为 $N \times K$, N 代表原始输入图像的列数, K 代表投票方向数目,假定某个边缘点对应的投票方向为 k ,在计算出的投票区域 roi 中,按照列方向遍历投票值,当投票位置位于图像第 n 列时,二维矩阵 MM 中位于第 n 行、第 k 列的元素置为指向一个链表的指针,该链表存储投票区域 roi 中位于图像第 n 列的投票值,每个链表节点包含三个元素,第一个元素存储投票位置所在图像行号,第二个元素存储投票值,第三个元素存储同一图像列中下一投票位置所在图像行号;当两个边缘点对应于同一投票方向时,处于同一图像列投票位置的投票值压入同一链表,更进一步,如果两个投票值还处于同一图像行投票位置,则只存储较大投票值;在边缘点匹配度约束条件下,两个边缘点对应同一投票方向和同一图像列投票位置的概率很小,使得矩阵 MM 及其指向的链表均只含有少量元素,具有稀疏性。

[0020] 步骤 3 所述对每个投票方向检索稀疏存储结构的具体方法为,假定考虑第 k 个投票方向,在步骤 2 得到的稀疏存储矩阵 MM 的第 k 列中,搜索含有值的矩阵元素,确定元素所处矩阵行号和元素值,其中,行号表示边缘点投票位置所在图像列号 col ,元素值表示指向边缘点投票值存储链表的指针;在该指针指向的链表中,链表节点首元素给出边缘点投票位置所在图像行号 row ,第二个元素给出边缘点投票值 val ,第三个元素给出下一投票位置所在图像行号;对第 k 个投票方向,图像中不依赖于半径的边缘点投票位置为 $\{(row, col)\}$,相应的边缘点投票值为 $\{val\}$ 。

[0021] 步骤 3 所述叠加平移后的边缘点投票值的具体方法为,根据设定的半径搜索范围,采样生成离散半径值;对每个离散半径值,考虑所有 K 个投票方向,生成 K 个平移向量,其中,投票方向确定平移向量方向,半径值确定平移向量长度;此前,步骤 3 针对每个投票方向,已经从稀疏存储结构中检索出对应的不依赖于半径的边缘点投票值和投票位置;按照每个半径值对应的 K 个平移向量,依次平移投票位置,叠加各个平移向量得到的平移后的投票值,生成每个半径值对应的投票图。

[0022] 本发明提出的采用稀疏存储结构的圆形检测方法,与现有技术相比,产生的有益效果为:

[0023] 1)增加检测准确性和鲁棒性:在利用稀疏结构存储不依赖半径值的边缘点投票值时,对具有相同投票位置的投票值,仅提取较大投票值,作为链表节点的第二个元素压入链表。这种处理方式不同于叠加投票值方式,能够减小噪声点的不利影响,增加圆形检测的

准确性和鲁棒性。在三类图像中(见表1),本发明提出的方法与其他几种常见圆形检测方法进行了检测性能的对比,实验结果表明,相比于其他圆形检测方法,本发明针对不同场景图像,圆形物体检测结果的查全率和准确率显著提高(见表2),能够满足实际应用需求。在表2中,三项指标分别表示,查全率 / 准确率 / 调和均值,调和均值越大,圆形检测效果越好。

[0024] 表 1. 三类包含圆形物体的实验图像

[0025]

名称	硬币 (Coins)	圆形印章 (Seals)	圆形交通标识 (Traffic Signs)
图像数目	17	14	170
光照条件	人造光	文档图像	自然图像
图像类型	彩色图像	二值图	彩色图像
目标物体个数	100	94	265

[0026] 表 2. 圆形检测效果比较

[0027]

图像 方法	硬币 (Coins)	圆形印章 (Seals)	圆形交通标识 (Traffic Signs)
本发明	0.98/ 0.98 / 0.98	0.95/ 1.00 / 0.97	0.90/ 0.92 / 0.91
Yuen方法 文献[1]	0.77/ 0.88 / 0.82	0.57/ 0.96 / 0.72	0.69/ 0.75 / 0.71
Tao 方法 文献[2]	0.92/ 0.98 / 0.95	0.78/ 0.87 / 0.82	0.62/ 0.81 / 0.70
Zelniker 方法 文献[3]	0.94/ 0.87 / 0.90	0.74/ 0.79 / 0.77	0.57/ 0.63 / 0.60
Chen 方法 文献[4]	0.84/ 0.81 / 0.82	0.77/ 0.68 / 0.72	0.48/ 0.65 / 0.55

[0028] 2) 检测实时性 :本发明采用稀疏结构存储和检索边缘点投票值,能有效简化投票图计算过程,提高检测效率;针对一张长和宽最大值为 512 个像素点的图像,能在 250ms 时间内完成圆检测,满足实时性应用需求。

[0029] 3) 本发明采用一个稀疏矩阵存储边缘点对应的圆周采样点和边缘点投票位置所在图像列号,同时利用一个链表存储边缘点投票位置所在图像行号、边缘点投票值和下一投票位置图像行号。这种稀疏存储方式下,较少的内存空间即可满足要求,具有较低的空间复杂度。例如,一张图像含有 n 个边缘点,假定采用双精度浮点数存储各个数值,此时稀疏结构所需的存储空间 $S(n)=cn \text{ byte}$, $c \approx 100$;当 $n=8000$ 时,投票图计算过程所需存储空间约为 0.76MB。

附图说明

- [0030] 图 1 是本发明采用稀疏存储结构进行圆形检测的方法流程图；
 [0031] 图 2 是稀疏结构存储不依赖于半径的边缘点投票方向、投票位置以及投票值的示意图；
 [0032] 图 3 是稀疏结构存储较大匹配度边缘点投票值的示意图；
 [0033] 图 4 是检索稀疏存储结构中边缘点投票值的示意图；
 [0034] 图 5 是平移和叠加不依赖半径值的边缘点投票位置和投票值，得到投票图的示意图。

具体实施方式

- [0035] 以下结合附图及具体实施例，对本发明作进一步的详细描述。
 [0036] 本发明一种采用稀疏存储结构的圆形检测方法，图 1 为方法流程图，包括如下步骤：

- [0037] 步骤 1：图像预处理：
 [0038] 该步骤获取进行匹配度投票的边缘点对象及其梯度方向。边缘点检测采用 Canny 方法，梯度方向计算采用 3x3Sobel 卷积模板。按照这种方式，从原始输入图像中获得边缘点集合 $V=\{v_e=(x_{v_e}, y_{v_e}) | e=1, \dots, E\}$ 和相应梯度方向 $\{f_e | e=1, \dots, E\}$ ，E 为边缘点数目。
 [0039] 步骤 2：离散圆周生成一组投票方向，构造稀疏存储结构，记录边缘点不依赖于半径的投票方向、投票位置和投票值：
 [0040] 该步骤依据边缘点的匹配度进行投票，在剔除半径值对投票的影响时，计算各个边缘点的投票方向、投票位置和投票值，并存储在稀疏结构中，具体包含两个处理阶段：

- [0041] 1) 遍历边缘点，在边缘点匹配度约束条件下，根据每个边缘点梯度方向，确定边缘点的投票方向、投票位置和投票值；

- [0042] 首先对圆周进行离散点采样，从圆心到采样点的方向，作为边缘点可能的投票方向，记作 $\{od_k, k=1, 2, \dots, K\}$ ，K 为圆周采样点数目；对于一个梯度方向为 f_e 的边缘点 (x_{v_e}, y_{v_e}) ，不考虑半径影响时，边缘点匹配度采用下式计算：

$$d_k(x, y) = \max[\tau - ori_dif(f_e, od_k) - loc_dif((x_{v_e}, y_{v_e}), (x, y)), 0]$$

- [0044] 其中， τ 表示差异上界，一般令 $\tau=1$ ， $ori_dif(f_e, od_k)$ 表示边缘点梯度方向 f_e 与第 k 个投票方向 od_k 形成的方向差异； $loc_dif = \frac{\|x_{v_e} - x\|_2^2 + \|y_{v_e} - y\|_2^2}{\sigma^2}$ 表示边缘点所处

图像位置 (x_{v_e}, y_{v_e}) 与边缘点在图像中可能的投票位置 (x, y) 形成的位置差异，

- [0045] σ 是归一化因子，一般令 $\sigma=1.5$ 。方向差异 $ori_dif(f_e, od_k)$ 定义为：

$$ori_dif(f_e, od_k) = \beta d_a(f_e, od_k)$$

- [0047] 其中 $d_a(f_e, od_k)$ 计算两个角度的差异， β 的选择使得满足 $ori_dif(f_e, od_k) \leq 1$ 的 k 只能取两个整数值。

- [0048] 利用边缘点匹配度进行投票时，边缘点投票区域 $\{(x, y)\}$ 需满足约束条件：

$$ori_dif(f_e, od_k) + \frac{\|x_{v_e} - x\|_2^2}{\sigma^2} + \frac{\|y_{v_e} - y\|_2^2}{\sigma^2} \leq \tau = 1$$

- [0050] 在确定方向差异 $ori_dif(f_e, od_k)$ 后，位置差异约束为，

$$[0051] \quad \frac{\|xv_e - x\|_2^2}{\sigma^2} + \frac{\|yv_e - y\|_2^2}{\sigma^2} \leq 1 - ori_dif(f_e, od_k)$$

[0052] 满足这个不等式的边缘点投票区域 $\{(x, y)\}$ 是一个圆形区域, 其半径为 $(1 - ori_dif(f_e, od_k))^{0.5} \sigma$ 。这个投票区域通常只包含十几个像素点, 具有稀疏性。在满足边缘点匹配度约束条件的投票区域中, 边缘点 (xv_e, yv_e) 对各个投票位置 (x, y) 的投票值由边缘点匹配度 $d_k(x, y)$ 给定。

[0053] 2) 构造稀疏存储结构, 存储边缘点不依赖半径值的投票位置、投票值和对应的投票方向;

[0054] 在步骤 2 处理阶段 1) 中, 根据边缘点的匹配度进行投票, 已经确定出各个边缘点不依赖于半径的投票方向、投票位置和投票值。每个边缘点对应两个投票方向, 每个投票方向生成一个边缘点投票区域, 对每个投票区域, 按照列方向遍历, 每一列对应一个投票位置图像列号; 构造一个二维矩阵 MM, 存储列号和投票方向, 矩阵大小为 NxK, N 为图像列数, K 为投票方向数目; 构造一个链表, 存储投票位置图像行号和投票区域每一列包含的边缘点投票值。参照图 2, 考虑一个投票区域, 位于大小为 MxN 的图像中, 对应于第 k 个投票方向, 当在图像第 n 列按列遍历投票区域时, 将矩阵 MM 中位于第 n 行、第 k 列的元素置为指向链表的指针, 在该指针指向的链表中, 每个节点包含三个元素, 第一个元素存储投票位置所在图像行号, 第二个元素存储边缘点投票值, 第三个元素存储同一图像列中下一投票位置所在图像行号; 特殊的, 参见图 3, 如果两个边缘点投票区域存在重合部分, 并且对应同一投票方向 k, 在图像列 n 按列遍历投票区域重合部分时, 两个投票区域中处于图像第 n 列的投票值压入同一链表, 指向该链表的指针由矩阵 MM 中位于第 n 行、第 k 列的元素给定, 链表节点第一和第三个元素仍然存储投票位置图像行号和下一投票位置行号, 但第二个元素考虑两个投票区域中处于图像第 n 列的投票值, 对其中处于同一图像行号的两个投票值, 仅仅存储较大投票值。

[0055] 步骤 3: 检索稀疏存储结构, 获取各离散投票方向的投票位置, 离散给定的半径搜索范围, 根据离散的半径和方向生成平移向量, 对投票位置进行平移, 叠加投票值生成投票图:

[0056] 该步骤依据步骤 2 得到的稀疏存储结构, 对每个投票方向检索稀疏存储结构, 得到边缘点不依赖于半径的投票位置和投票值; 设定图像中圆形物体可能半径范围, 采样生成离散半径值, 针对每个半径值结合所有投票方向生成平移向量, 检索出的边缘点投票位置按照平移向量进行平移, 叠加平移后的边缘点投票值, 生成投票图。具体包含两个处理阶段:

[0057] 1) 对每个投票方向检索稀疏存储结构, 得到边缘点不依赖于半径的投票位置和投票值;

[0058] 参见图 4, 对第 k 个投票方向, 考虑步骤 2 得到的稀疏存储结构, 在矩阵 MM 第 k 列中, 搜索含有值的矩阵元素, 确定元素所处矩阵行号 $(n1, n2, n3)$ 和元素值, 其中, 行号表示边缘点投票位置所在图像列号 $n1, n2, n3$, 元素值表示指向边缘点投票值存储链表的指针, 三个元素值给出三个链表指针, 指向三个链表。在这三个链表中, 链表节点首元素给出边缘点投票位置所在图像行号, 第二个元素给出边缘点投票值, 第三个元素给出同一图像列中下一投票位置所在图像行号。

[0059] 2) 设定图像中圆形物体可能半径范围,采样生成离散半径值,针对每个半径值结合所有投票方向生成平移向量,检索出的边缘点投票位置按照平移向量进行平移,叠加平移后的边缘点投票值,生成投票图;

[0060] 对一个梯度方向为 f_e 的边缘点 (xv_e, yv_e) ,考虑半径影响时,边缘点匹配度采用下式计算,

$$[0061] O_k(x, y) = \max[\tau - \left(ori_dif(f_e, od_k) + \frac{\|xv_e - xd_k - x\|_2^2}{\sigma^2} + \frac{\|yv_e - yd_k - y\|_2^2}{\sigma^2} \right), 0]$$

[0062] 其中, (xd_k, yd_k) 表示第 k 个圆周采样点相对于圆心的位置向量,相比于不考虑半径影响的边缘点匹配度计算方式,

$$[0063] d_k(x, y) = \max[\tau - \left(ori_dif(f_e, od_k) + \frac{\|xv_e - x\|_2^2}{\sigma^2} + \frac{\|yv_e - y\|_2^2}{\sigma^2} \right), 0]$$

[0064] 两者存在平移关系, $O_k(x, y) \approx d_k(x+xd_k, y+yd_k)$, 这等效于将 $d_k(x, y)$ 计算方式下生成的边缘点投票区域按照向量 (xd_k, yd_k) 进行平移, 向量长度为此时假定的半径值, 向量方向为第 k 个投票方向 od_k 。

[0065] 在预先假定的圆形物体半径范围内,以离散采样方式得到半径值,对每个半径值,结合所有 K 个投票方向,生成平移向量,投票方向确定平移向量方向,半径值确定平移向量长度,每个半径值对应 K 个平移向量。对于一个半径值 R,在步骤 3 处理阶段 1) 中,已经检索出各个投票方向对应的不依赖于半径的边缘点投票位置和投票值,参见图 5,考虑第 k、k+1、k+2 个投票方向,这三个方向下的边缘点投票位置,分别按照半径值 R 对应的第 k、k+1、k+2 个平移向量,进行平移操作,并叠加各个平移向量下得到的平移结果,作为与半径值 R 对应的投票图。

[0066] 步骤 4:根据投票图解析圆心和半径;

[0067] 经过步骤 1, 2, 3 后,每个离散半径值对应一张投票图,对投票图采用局部最大值搜索策略,确定可能的圆心位置和置信度,半径大小由投票图对应的离散半径值给定;组合从所有离散半径值对应的投票图中解析得到的圆形,按照置信度从大到小排序,采用非极大抑制策略,去除冗余圆形。

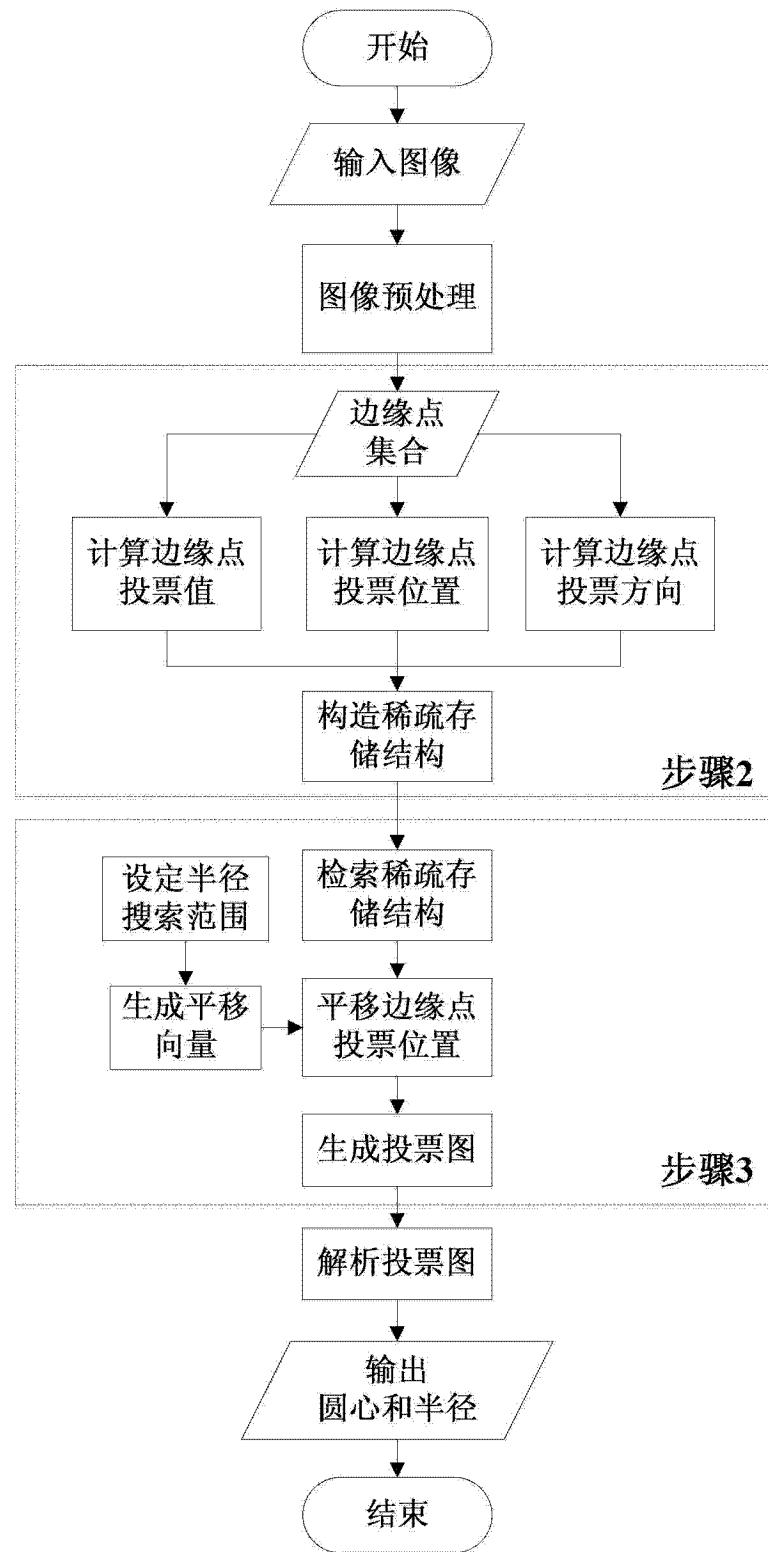


图 1

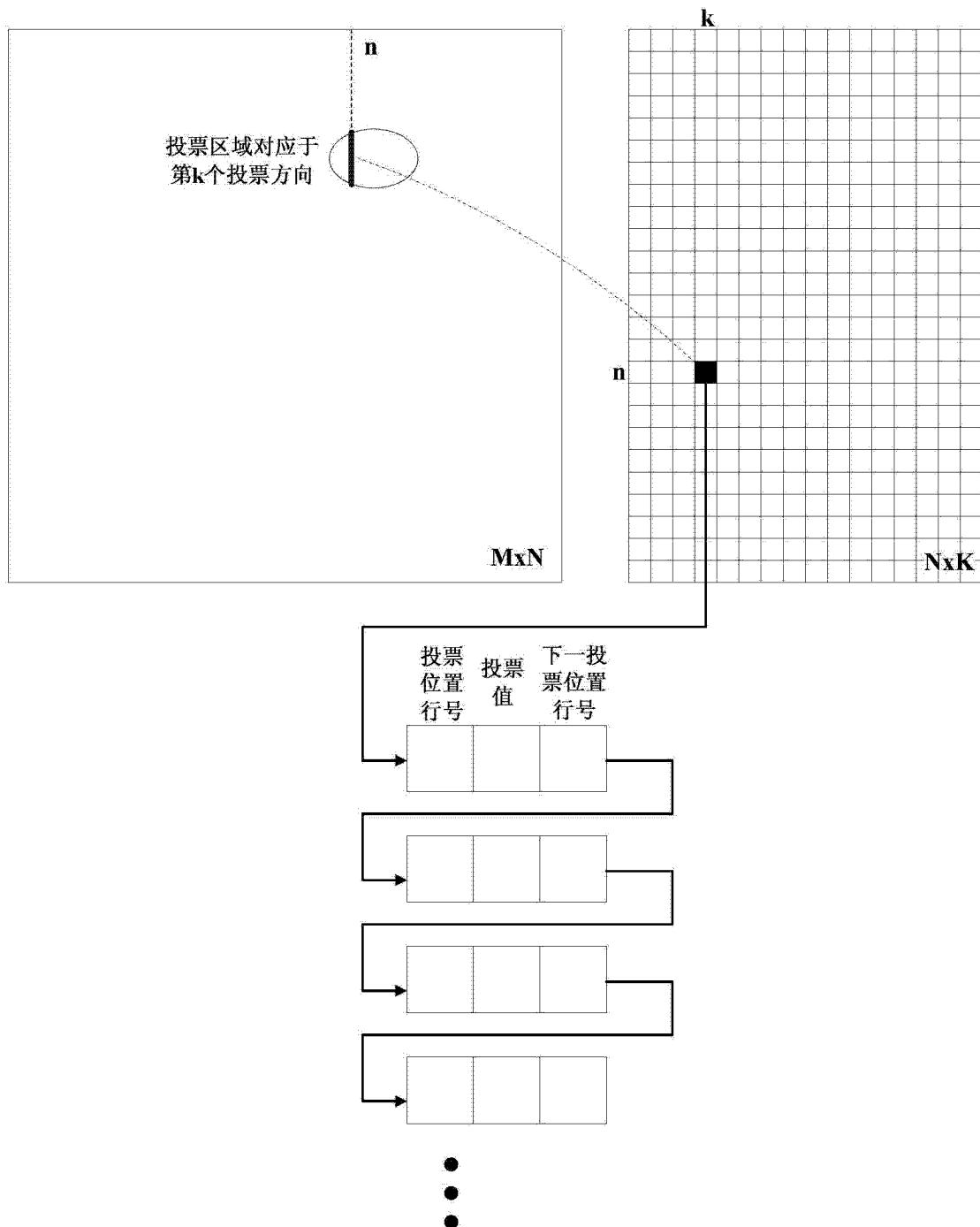


图 2

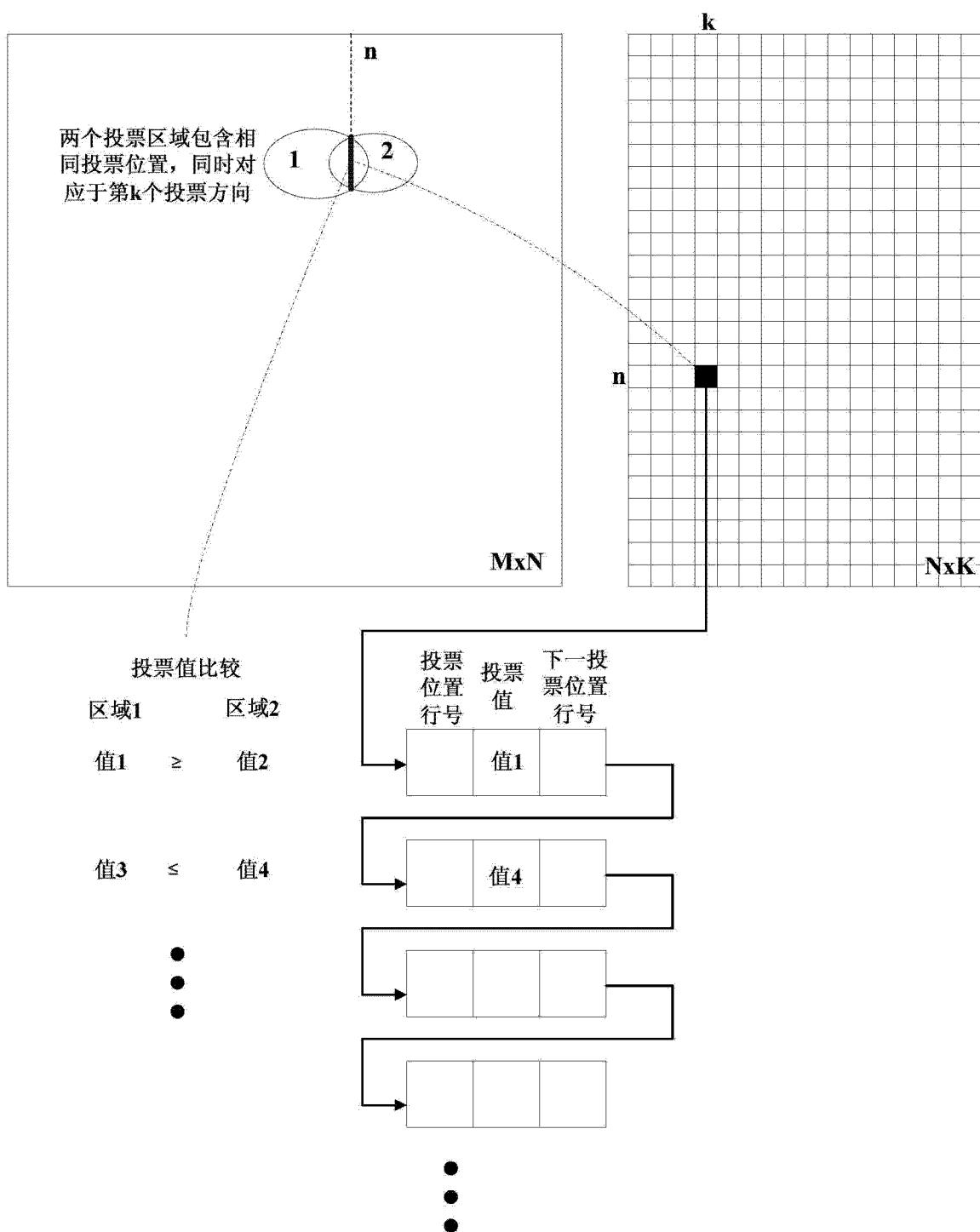


图 3

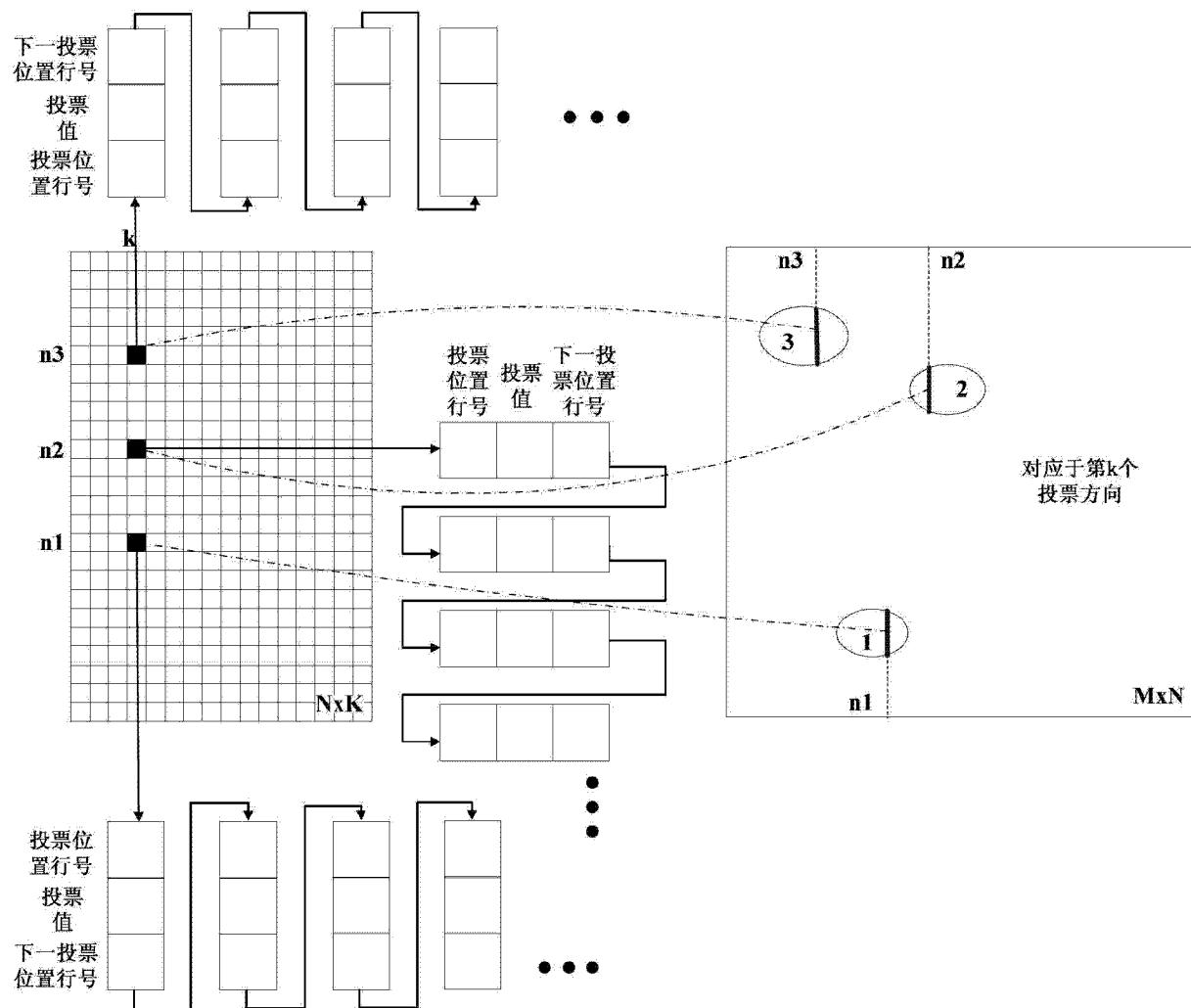


图 4

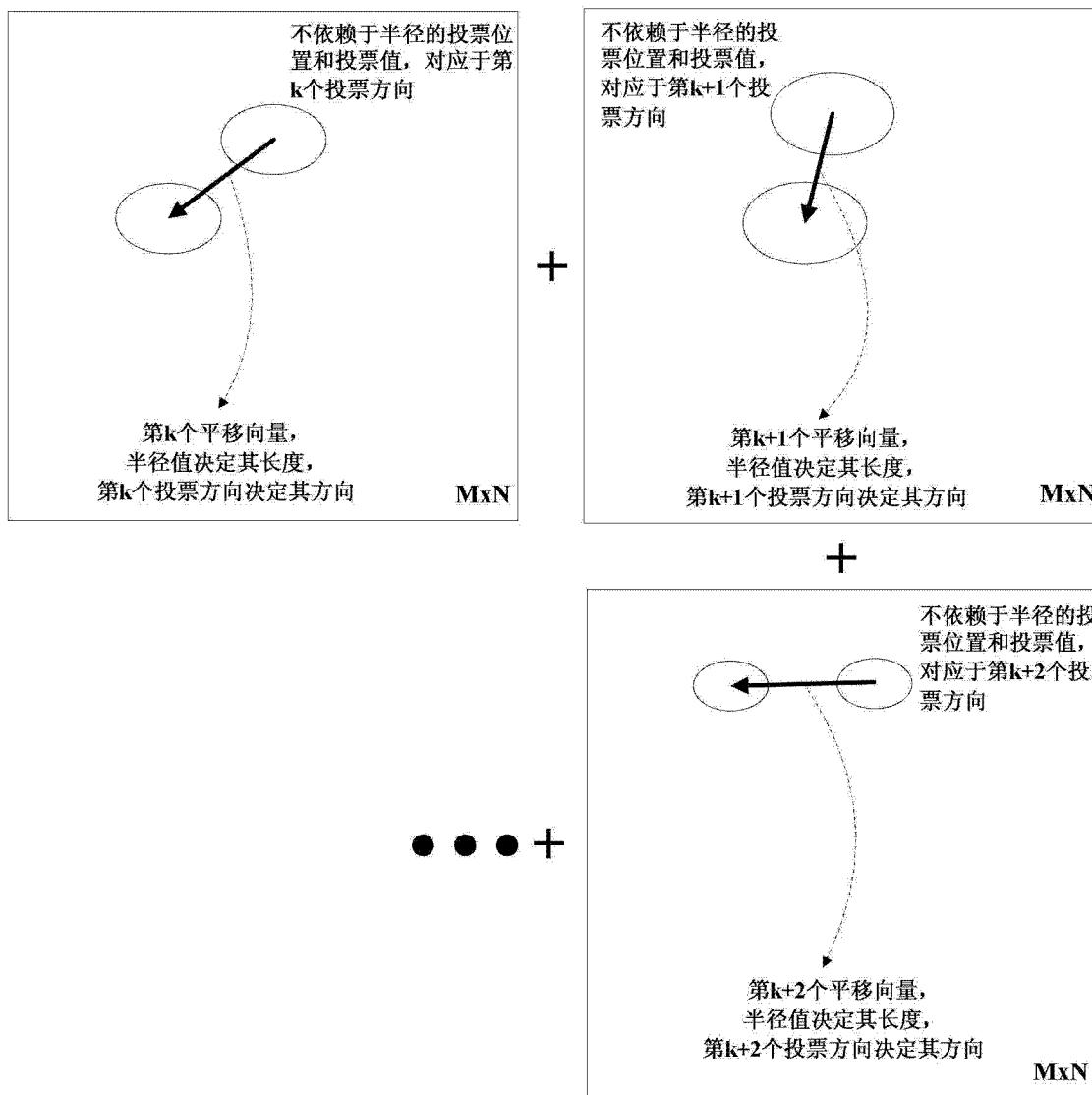


图 5