

声散射预报中目标断面图像的快速旋转

张培珍^{1,2}, 王朔中¹

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 广东海洋大学信息学院, 广东湛江 524088)

摘要: Fourier 衍射投影定理可用于水下目标重建和水声目标散射特性分析。将目标和周围介质的声学参数分布以二值图像描述, 计算目标特性时需旋转目标图像而维持入射方向不变得得到不同角度的投影。若直接用几何变换旋转二值图像, 由于像素间的映射并非一一对应, 会加重图像边缘的锯齿并在局部区域产生空值点。以极坐标系矩形网格下的平移实现目标旋转, 再用形态学的开闭运算对重新变换到笛卡尔坐标系的图像边缘进行平滑, 可有效提高旋转精度和速度, 改善图像重建系统的性能。实验结果表明该方法有助于快速获取投影数据, 提高目标重建系统的性能。

关键词: Fourier 衍射定理; 水声目标; 断面图像; 极坐标平移; 快速旋转

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-04-0340-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.04.009

Fast rotation of cross-section image in calculating projections for sound scattering prediction

ZHANG Pei-zhen^{1,2}, WANG Shuo-zhong¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Information, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract: In reconstructing acoustic object and predicting sound scattering based on the Fourier diffraction theorem, projections in all directions are calculated by rotating the object while maintaining the incident wave unchanged. Object rotation is time consuming, and suffers from errors due to ruggedness of the edges and holes inside the object caused by discretization. To improve computation efficiency and quality of the rotated image, the discretized binary object in the Cartesian system is converted into polar coordinates and presented on rectangular grids. In this way, rotation of the object is achieved by translation in the rectangular grid-represented polar system, and the result is converted back to the Cartesian system. The obtained image is then smoothed with morphological opening and closing operations. The proposed method can significantly reduce the computational burden, avoid holes and reduce edge ruggedness, thus improve accuracy of the computed projections.

Key words: Fourier diffraction theory; acoustic object; cross-section image; translation in polar coordinates; fast rotation

0 引言

根据 Fourier 衍射投影定理, 透射型衍射 CT 是在前向散射场中采集数据, 所得前向投影的一维 Fourier 变换对应于目标断面图像二维 Fourier 变换域中与通过原点的直线相切的内侧半圆弧上的值。反射型衍射 CT 是在后向散射场中采集数据, 它的一维 Fourier 变换对应于断面图像二维 Fourier 变换的外侧半圆弧上的值^[1]。圆弧半径等于入射波空间角频率。使入射波围绕目标旋转 360°可得到变换域的大量投影样本数据, 通过 Fourier 反变换即获得目

标断面图像的重建^[2]。为了便于处理, 通常固定入射波方向不变而旋转目标来获取各方向的投影。目标的旋转角度分辨率直接影响重建目标图像的质量, 旋转一周所涉及的计算量则决定了重建的效率。假定水下目标为具有椭圆断面的质地均匀柱体, 以垂直于轴线的平面声波为入射波, 则目标断面可用二值图像描述, 即均匀背景上的椭圆。直接用三角公式计算二值图像的旋转, 对大尺寸目标和角度分辨率要求高时计算量较大, 并且由于新旧坐标点并非一一对应, 旋转后会在目标局部区域产生空值, 在黑色像素区域出现白色空洞。Daniel 等^[3]将旋转矩阵分成三步以提高旋转质量, 但是旋转速度降低。Chien 和 Baek^[4]提出过一种二值图像黑色线流的快速旋转算法, 有效地消除了空洞, 与直接旋转法相比速度提高两倍以上。后来他们又建立了基于块匹配的二值图像快速旋转方法^[5], 利用重叠块解决空洞问题, 并通过预先组织好的映射模型提

收稿日期: 2010-09-16; 修回日期: 2010-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071187)

作者简介: 张培珍(1972-), 吉林白山人, 博士研究生, 研究方向为水声学、数字图像处理

通讯作者: 王朔中, Email: shuowang@shu.edu.cn

高旋转速度。这种方法要以大量的预设模型为基础。Avila^[6]利用量化方法对单色图像进行处理,着重解决空洞、不平滑边缘以提高旋转图像的质量。Nguyen^[7]预先设置各个旋转角度映射表,利用数字微分器加快逆向映射速度。这些方法都是为了缩短单次旋转的时间和解决旋转中存在的空洞问题,通常需要大量的预设值。

本文利用极坐标与笛卡尔坐标系的转换关系,将图像旋转过程中的三角函数与乘法运算转换成极坐标系在矩形网格表示下的循环平移,运用基于形态学的开闭运算提高旋转质量。用此方法可有效提高大尺寸目标精细间隔角度变化的旋转速度并保证计算精度。

1 水下均匀目标断面的二值图像描述

对于均匀理想介质中的平面声波,声阻抗率 Z_s 等于介质密度 ρ 与声速 c 的乘积。考虑二维声场,目标为无限长柱体,轴线与 z 轴重合,入射波为垂直于 z 轴的平面声波^[8]。目标断面图像可表示为

$$I(x, y) = W(x, y)\rho_w c_w + O(x, y)\rho_o c_o + B(x, y)\rho_b c_b \quad (1)$$

其中 x, y 为空间坐标, ρ_w 和 ρ_o 分别为水和目标的密度, c_w 和 c_o 分别为声波在水中和目标介质中的传播速度。当数值计算中边界占据一个网格宽度时可定义分界区,其密度和声速为 ρ_b 和 c_b , 近似取为目标和水介质参数的平均值。若忽略分界区厚度,则式(1)中第三项不存在。 $O(x, y)$ 和 $W(x, y)$ 分别代表目标和水介质区,椭圆柱目标断面的二值图像近似为图 1(a), 可用式(2)表示:

$$O(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} < 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$W(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} > 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

以上是未考虑目标内部切变和切应力的二维声场简单模型。

2 二值图像的快速旋转

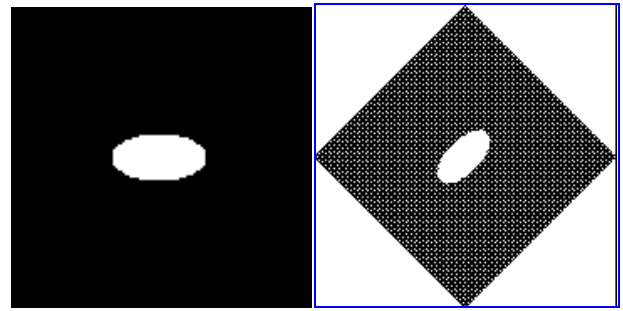
2.1 直接旋转与空洞现象

用 $I(x, y)$ 表示尺寸为 $M \times N$ 二值目标图像, $I(x', y')$ 为旋转图像, 则有

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

坐标旋转中得到的 x' 和 y' 是浮点数, 常规取整

运算使像素间的映射产生多对一, 像素间的重复映射会使旋转后部分位置像素出现空值。旋转后图像相邻像素间的欧氏距离的可能取值为 $0, 1, \sqrt{2}, 2, \sqrt{5}$, 而笛卡尔坐标系中相邻像素点之间的距离只能为 $0, 1, \sqrt{2}$, 当相邻黑色像素之间距离等于 2 或 $\sqrt{5}$ 时将产生空点, 图像出现空洞效应如图 1(b) 所示。



(a) 目标断面图像 (b) 旋转 45° 图像

图 1 目标断面与旋转 45° 图像

Fig.1 Cross section of an image and a rotated version

反向映射^[9]是一种排除空洞效应的简单方法, 首先令

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (5)$$

旋转后的像素值根据式(6)得到:

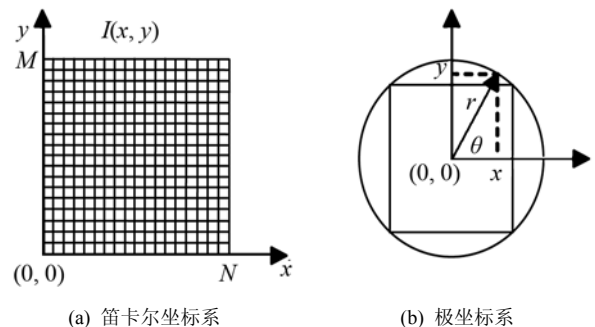
$$I(x', y') = \begin{cases} 1, & \text{if } I(x, y) = 1 \\ 0, & \text{if } I(x, y) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了保证旋转后图像信息完整, 将图像旋转覆盖范围设定为 $L \times L$, L 等于原图像外接圆直径。若原图像尺寸为 $M \times N$, 则 $L = \sqrt{M^2 + N^2}$ 。由于目标旋转是围绕目标中心进行的, 需将图像平移后旋转, 则反向映射公式重新定义为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' + (L - N)/2 \\ y' + (L - M)/2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N/2 \\ M/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 极坐标系平移法

利用 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$ 可完成从笛卡尔坐标到极坐标的变换, 如图 2(a)、2(b) 所示。极坐标系下



(a) 笛卡尔坐标系 (b) 极坐标系

图 2 笛卡尔坐标到极坐标系变换

Fig.2 Conversion from Cartesian to polar coordinate systems

图像可表示为

$$f(r, \theta) = I \left(\left[\frac{N}{2} + r \cos \theta \right], \left[\frac{M}{2} + r \sin \theta \right] \right) \quad (8)$$

这里 $[\cdot]$ 表示取整运算。

以 θ 为横轴, r 为纵轴, 将极坐标系中的图像转换为矩形网格中的表示, 见图 3, 其中 $r=0, 1, \dots, L, \theta=0, \dots, 360^\circ$ 。于是 θ 和 r 的增减对应于矩形网格表示中横坐标和纵坐标的变化。

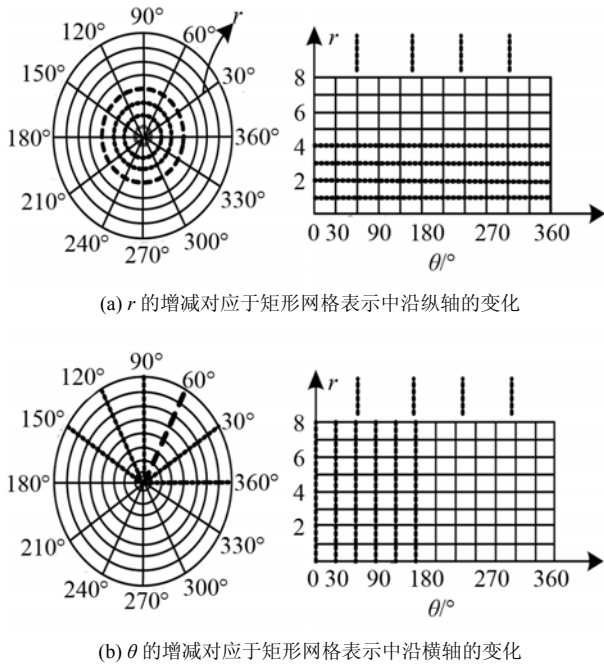


图 3 极坐标系的矩形网格表示
Fig.3 Rectangular representation of polar coordinates

将图像逆时针旋转一个角度 φ , 在极坐标的矩形网格表示中沿横轴向右循环平移相同的角度, 如图 4 所示。 360° 范围内旋转, 平移角度 φ 可表示为 $f_\varphi(r, \theta) = [f(r, \theta - \varphi)]_{360}$ (9) 式中 $[\cdot]_{360}$ 表示对 360° 求模运算。

在矩形网格表示中, 平移操作不会引入误差, 而且可避免耗时的乘法运算, 克服空洞效应。图 5(a)为椭圆目标在矩形网格中的表示, 将其向右循

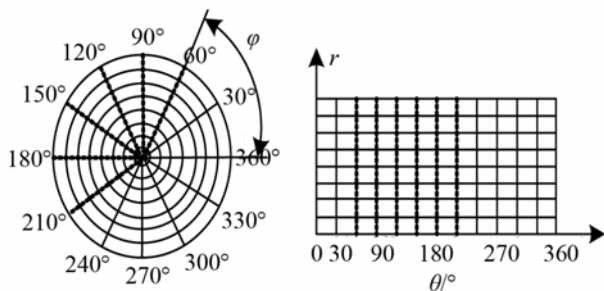


图 4 极坐标中的旋转变为平移
Fig.4 Rotation in polar coordinates corresponding to translation in the rectangular representation

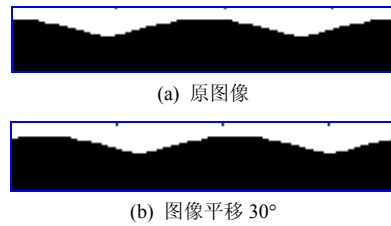


图 5 图像旋转在矩形网格中表现为平移
Fig.5 Image rotation and translation

环平移 30° , 得到图 5(b)。

为了获取投影数据, 要在极坐标系矩形网格表示下将图像循环平移后重新回到笛卡尔坐标系。这一过程包括像素坐标变换和亮度赋值两个步骤。由于变换后的图像仍需是二值的, 所以直接用最近邻插值法完成亮度赋值。具体步骤如下:

(1) 相关参数确定: 令原图像中心为 $O_{M,N} = \{(M+1)/2, (N+1)/2\}$; 则图像在四个象限的归一化比例因子 $S_{M,N} = \{(M-1)/2, (N-1)/2\}$, 笛卡尔坐标系下 x, y 轴单位网格为 $1/S_M$ 和 $1/S_N$; 极坐标系中 r 和 θ 单位网格为 $\delta_r = 1/(L-1)$ 和 $\delta_\theta = 2\pi/360^\circ$ 。

(2) 极坐标至笛卡尔坐标的变换:

$$r_{m,n} = \sqrt{x_m^2 + y_n^2}, \theta_{m,n} = \arctan \left(\frac{y_n}{x_m} \right) \quad (10)$$

若 $\theta_{m,n} < 0$, 则取 $\theta_{m,n} + 2\pi; m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N; x_m = (m - O_M)/S_M, y_n = (n - O_N)/S_N$ 。

(3) 坐标修正: $r_{m,n} \rightarrow 1 + r_{m,n} \delta_r, \theta_{m,n} \rightarrow 1 + \theta_{m,n} \delta_\theta$

(4) 坐标的最近邻插值:

$$r_{m,n} \rightarrow r_{m,n} \pm \min \{ |r_{m,n} - \lfloor r_{m,n} \rfloor|, |r_{m,n} - \lceil r_{m,n} \rceil| \} \quad (11)$$

$$\theta_{m,n} \rightarrow \theta_{m,n} \pm \min \{ |\theta_{m,n} - \lfloor \theta_{m,n} \rfloor|, |\theta_{m,n} - \lceil \theta_{m,n} \rceil| \} \quad (12)$$

(5) 亮度赋值: $\hat{I}(x, y) = f(r_{m,n}, \theta_{m,n})$

用极坐标平移法旋转图像, 消除了局部区域的空洞效应, 而且在空间尺寸不变的条件下保持了图像的全部信息。但由于最近邻插值的局限性, 图像边缘呈锯齿状, 如图 6(a)所示。用形态学开闭运算可以完成边缘平滑, 同时保持目标轮廓形状不变。

2.3 基于形态学的边缘平滑

给定二值图像 $I(x, y)$ 和结构元素二值模板 $T(i, j)$, 则典型的腐蚀与膨胀运算可分别表示成:

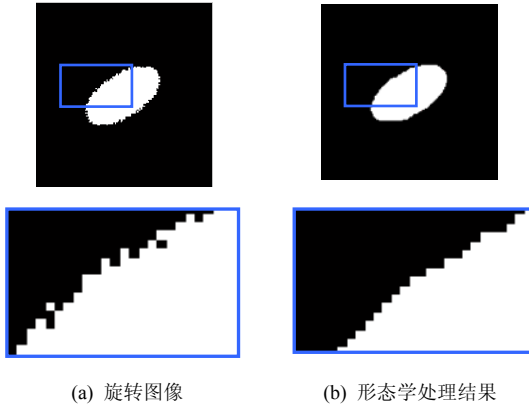
$$E(x, y) = \bigcap_{i,j=0}^m [I(x+i, y+j) \& T(i, j)] = I \cap T \quad (13)$$

$$D(x, y) = \bigcup_{i,j=0}^m [I(x+i, y+j) \& T(i, j)] = I \cup T \quad (14)$$

开运算是先腐蚀后膨胀的过程, 用来消除比结构元素小的物体或分离纤细点处的连接, 并可平滑较大物体的边缘。闭运算先膨胀后腐蚀, 用来填充小于结构元素的物体内部细小空洞, 平滑边缘。使用以下四个具有不同方向特性的结构元素:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

以结构元素中心为膨胀腐蚀的目标点，连续进行四次闭开运算，完成四个方向的边缘平滑并保持图像的二值性，图 6(b)为形态学处理效果及局部放大。



(a) 旋转图像 (b) 形态学处理结果
图 6 二值图像的形态学平滑处理
Fig.6 Morphological smoothing of binary image

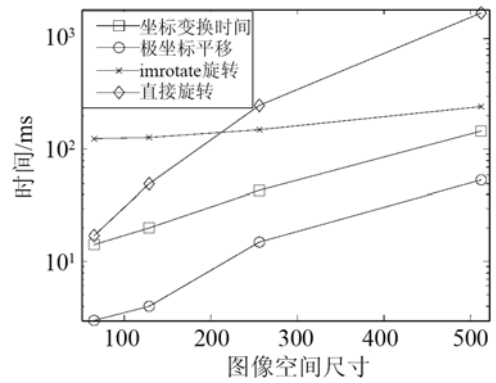
3 实验效果与评价

实验中所采用的椭圆断面长轴和短轴分别为 30 和 15 个像素，在不同面积的水域中用不同尺寸的图像表示，图像尺寸分别为 64×64、128×128、256×256、512×512。在相同实验条件下，对直接旋转法、利用 MATLAB 函数 imrotate 和本文提出的极坐标平移法进行对比。图 7(a)为图像空间尺寸变化时，采用不同旋转方法单次旋转的时间比较，图中蓝色方块符号线包括了两次坐标变换时间。

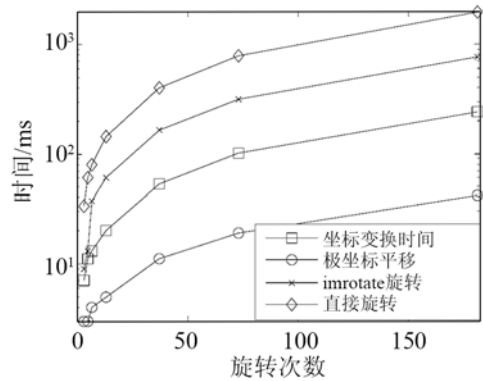
图 7(b)、7(c)、7(d)是图像尺寸分别为 64×64、128×128、256×256 时，将图像旋转 360°，旋转角度间隔分别为 180°(2 次)、90°(5 次)、60°(7 次)、30°(13 次)、10°(37 次)、5°(76 次)、2°(181 次)，采用不同旋转方式所需时间的统计结果。其中方块符号线包含了多次双向坐标变换和极坐标平移法旋转图像所需时间。由于坐标变换需要进行空间插值，所以在旋转次数较少时，算法的优越性不明显。增加图像尺寸并连续旋转 10 次以上时，极坐标平移法有效地减少了计算量因而在速度上具有优势。

4 结论

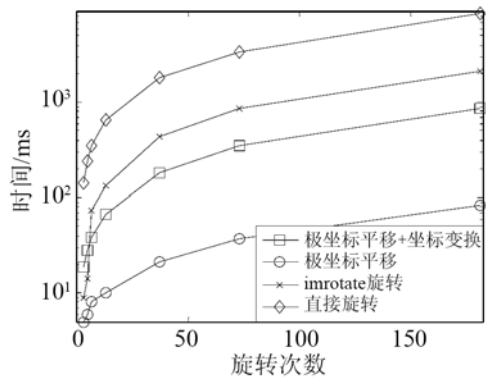
本文通过坐标转换，在极坐标系矩形网格下由平移实现目标旋转。当考虑的目标和周围介质范围相同时，旋转角度间隔越精细，旋转的次数越多，



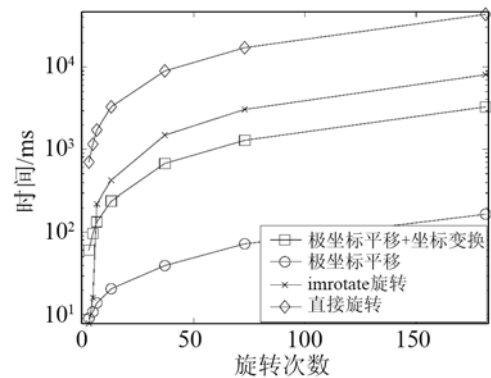
(a) 单次旋转时间对比



(b) 64×64 图像多角度旋转时间



(c) 128×128 图像多角度旋转时间



(d) 256×256 图像多角度旋转时间

图 7 不同二值图像旋转方法时间对比

Fig.7 Comparison of computation time for binary image rotation with different methods

所需的时间也就越长。当旋转精度相同时, 图像的像素点越多, 断面图像的尺寸越大, 旋转所需计算量就越大。该方法将大量的三角函数和乘法运算转换成平移, 不仅实现简单, 而且在目标尺寸增加、旋转角度分辨率提高时, 具有稳定、高效的特点。基于形态学的开闭运算与结构元素的设计, 平滑了图像的边缘, 提高了旋转的质量。为 Fourier 衍射投影定理根据前后向投影数据进行高效率和高精度重建提供了保证。

参 考 文 献

- [1] WANG Shuozhong. Prediction of scattered sound field based on the reversal of acoustic diffraction tomography[C]// 17th International Congress on Sound and Vibration, Cairo, Egypt, 2010, 18-22.
- [2] 王朔中, 方针. 声衍射层析成像研究进展[J]. 声学技术, 2010, **29**(4): 117-122.
WANG Shuozhong, FANG Zhen. Progress in acoustic diffraction tomography research[J]. Technical Acoustics, 2010, **29**(4): 117-122.
- [3] Danielsson P, Hammerin M. High accuracy rotation of images [C]// CVGIP: Graph. Models Image Processing, 1992, **54**(4): 340-344.
- [4] Chien S I, Baek Y M. A fast black run rotation algorithm for binary images[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, **19**(5-6): 455-459.
- [5] Chien S I, Baek Y M. Hierarchical block matching method for fast rotation of binary images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(3): 483-489.
- [6] Avila B T, Lins R D, Oliveira L. 2005. A new rotation algorithm for monochromatic images[C]// Proceedings of ACM DocEng'05, 2005: 130-132.
- [7] Nguyen D T. A rotation method for binary document images using DDA algorithm[C]// Proceeding of the eighth ACM symposium on document engineering. 2008, 267-270.
- [8] Wang S, Wang R, and Fang Z. Calculation of sound scattering from elastic targets using unified FDTD formulae[C]// 136th Meeting of the Acoustical Society of America, J. Acoust. Soc. Am., 1998, **104**(3, pt.2): 1755-1755.
- [9] Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation[J]. Pattern Recognition, 1996, **29**(11): 1775-1778.