图文信息技术

基于梯度与归一化互信息的印刷图像配准

金闳奇[1]，简川霞[1]，赵荣丽[1,2]
（1.广东工业大学，广州 510006；2.广东省创新方法与决策管理系统重点实验室，广州 510006）

摘要：目的 为了提高印刷图像配准的精度。**方法** 提出一种基于梯度和归一化互信息的印刷图像配准方法。首先获取图像的归一化互信息，同时使用边缘检测算子获取图像边缘梯度的模值和方向角，然后根据边缘梯度信息和归一化互信息构造新的测度函数，以新的测度函数为目标函数，用 Powell 优化算法获取用于配准的最优参数。**结果** 通过将文中提出的方法和基于归一化互信息的图像配准方法分别用于印刷图像配准，得到的统计实验结果表明，对于 100 项随机配准参数，新方法得出的配准误差波动幅度更小，配准精度更高。**结论** 文中所提方法在准确性上优于基于归一化互信息的图像配准方法。

关键词：归一化互信息；边缘梯度；Powell 算法；图像配准
中图分类号：TB801.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2018)09-0182-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.032

Printing Image Registration Based on Gradient and Normalized Mutual Information

JIN Hong-qi[1], *JIAN Chuan-xia*[1], *ZHAO Rong-li*[1,2]
(1.Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Chia; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Innovation Method and Decision Management System, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the accuracy of printing image registration (IR). A printing image registration method based on gradient and normalized mutual information (NMI) was proposed. The NMI was firstly obtained, and the modulus and direction angle of the image edge gradient were obtained with the edge detection operator. Then, a new measure function was designed based on the edge gradient information and NMI. The Powell was used to optimize the algorithm to obtain the best parameters for registration with the new measure function as the objective function. The proposed method and the NMI-based image registration method were respectively used for printing IR. The results obtained from the statistical experiments showed that, the new method had smaller fluctuation range of registration errors and higher registration accuracy regarding 100 random registration parameters. The proposed method is superior to the NMI-based image registration method in terms of accuracy.

KEY WORDS: normalized mutual information; edge gradient; Powell algorithm; image registration

目前对印刷品缺陷检测主要以人工抽检为主，效率和自动化程度均较低。基于机器视觉的自动检测技术具有速度快、精度高、可靠性好等优点，因此在印刷工业中具有广阔的应用前景和市场[1]。在印刷过程中，经常需要对其加工品或半加工品进行表面缺陷检测[2]。基于机器视觉的印刷产品缺陷检测常采用模板比较的方法，即将待测的印刷产品与模板产品做差影运算，从残差图像中找出缺陷[3]。为减少待测产品和模板之间的不对齐带来的差影运算误差，有必要在差影运算之前将待测产品和模板进行图像配准，以实现两者对齐[4]。图像配准是以空间几何变换的方式（刚性、仿射、投影变换等），对一定数量的图像进行操作，使各图像之间达成匹配关系[5]。由此可见，研究印刷图像快速高精度的配准方法对提高印刷品缺陷

收稿日期：2017-06-28
基金项目：国家自然科学基金（51605101）；广东省数控一代机械产品创新应用示范工程专项资金（2013B011301023）；广东工业大学青年基金重点项目（17QNZD001）
作者简介：金闳奇（1995—），男，广东工业大学本科生，主攻机器视觉和人工智能。
通信作者：简川霞（1979—），男，博士，广东工业大学讲师，主要研究方向为图像处理和机器视觉。

检测准确率有重要的意义。

1　问题描述

图像配准的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代，按照配准特征空间大体可以分为 2 个大类[6]，一种基于灰度的配准方法；另一种基于特征的配准方法。随着这 2 种方法的不断发展，当前图像配准领域内的配准精度、时间及效率等方面都得到明显提高[7]。相较于基于灰度的配准方法，基于特征的配准方法未能完全利用全部灰度信息，在稳定配准环境中，其配准精度与基于灰度的配准方法不相上下[8]，而且基于特征的配准方法依赖与提取特征点的方法。若是提取不到参考图像与带配准图像间有效的对应特征点，则配准精度将大受影响[9]。基于灰度的配准方法利用图像系统的灰度值来实现图像之间的配准，在配准前可不进行图像预处理，且可以忽略图像中的假设性关系[10]，而且印刷图像的自动化处理环境是一个相对稳定的环境，即环境中的光照强度、光照亮度、光照色度、待检测图像的实际背景等都是固定不变的[11]，基于灰度的配准方法在小配准范围的配准精度上可以替代基于特征的配准方法[12]。Viola 和 Wells 等在 20 世纪 90 年代利用图像的灰度信息计算 2 幅图像之间的互信息，并将互信息作为 2 幅图像的配准测度函数来实现 2 幅图的配准，但图像配准精度受到图像灰度信息重叠区域面积影响[6,9]。归一化互信息，可以精确地表示灰度图像之间的相似性，有效地解决了互信息配准中的图像区域重叠对配准精度的影响[13—14]。但归一化互信息的配准算法没有考虑图像的边缘特征信息，配准精度也受到影响[15]。Yong 等提出将图像的特征信息测度（如点、线和面等）与归一化互信息测度相结合，构造新的配准测度以提高图像配准的精确度和鲁棒性[16—17]，但未充分考虑到图像的其他空间信息，例如区域的空间位置、长度、面积、距离、梯度信息等[18—19]，且没有具体实现在印刷产品缺陷检测等工艺中[20—21]。因此针对上述问题，文中拟深入研究图像配准的相似性测度，将图像梯度的模值和方向角引入归一化互信息中，构造出联合测度函数，以实现印刷图像的配准。

2　基于梯度和归一化互信息的联合测度

2.1　归一化互信息

归一化互信息测度是基于灰度信息的配准方法常用的相似性测度，其优点是既能保证配准有效性，又能降低图像重叠区域的影响。图像 $f(x, y)$ 和图像 $g(x, y)$ 的归一化互信息 $NMI(f, g)$ 定义为：

$$NMI(f,g)=\frac{\left[H(f)+H(g)\right]}{H(f,g)} \tag{1}$$

式中：$H(f)$ 和 $H(g)$ 分别为图像 $f(x,y)$ 和图像 $g(x,y)$ 的信息熵，$H(f,g)$ 为两者的联合信息熵。

2.2　梯度信息

归一化互信息忽略了图像的空间特征信息，以归一化互信息为测度函数的配准方法的配准精度难以达到小像素级别，搜索算法也容易过早收敛，因此需要在相似性测度函数中引入图像的空间特征信息。在图像空间特征信息中，梯度信息是反映了图像上灰度信息的过渡性，代表了像素与其邻域之间的空间灰度特征信息。

利用边缘检测算子依次得出 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 的梯度张量 $\boldsymbol{G}_f$ 和 $\boldsymbol{G}_g$，则 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 的梯度方向角差值，即张量 $\boldsymbol{\theta}$ 为：

$$\boldsymbol{\theta}=\arctan\left(\frac{G_f(x)}{G_f(y)}\right)-\arctan\left(\frac{G_g(x)}{G_g(y)}\right) \tag{2}$$

$f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 的梯度模值张量 $\boldsymbol{G}_f^m$ 和 $\boldsymbol{G}_g^m$：

$$\boldsymbol{G}_f^m=\sqrt{G_f(x)^2+G_f(y)^2} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{G}_g^m=\sqrt{G_g(x)^2+G_g(y)^2} \tag{4}$$

为了避免遍历所有梯度信息，对 $\boldsymbol{\theta}$ 作用一个加权函数 $W(\theta)$：

$$W(\theta)=\cos^2(\theta) \tag{5}$$

则图像 $f(x,y)$ 和图像 $g(x,y)$ 的梯度信息 $G(f,g)$ 定义为：

$$G(f,\mathrm{g})=\sum_{f\cap g}W(\theta)\min\left(\left|G_f^m\right|,\left|G_g^m\right|\right) \tag{6}$$

2.3　联合测度

将梯度信息 $G(x,y)$ 和归一化互信息 $NMI(f,g)$ 相结合，就可得到新的测度函数，即联合测度函数 $GI(f,g)$：

$$GI(f,g)=G(f,g)\times NMI(f,g) \tag{7}$$

基于联合测度的配准算法，既能有效提高图像的空间特征的分辨率，又可体现出图像间的统计相关性，合理降低 2 幅图像重叠面积的影响程度。联合测度既能合理计算出 2 幅或多幅图像之间的相似度，又具有精确度高和鲁棒性强的优点。下面对联合测度函数曲线进行分析。

假设 2 幅同质无差异的图像 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$，见图 1a 和图 1b，根据控制变量法的思想，单独改变刚性变换函数中的某一个参数，例如保持垂直方向和旋转方向的参数值不变，将图像 $g(x,y)$ 在水平方向 [−20, 20]范围内移动，同时保持其他参数在正确的配准位置不变，可以得到 2 种相似性测度的一系列因变量值，故以水平位移量作为横坐标，以相似性测度值为纵坐标，得到水平方向的配准函数曲线，见图 1c 和图 1d。按照相同的操作，得到垂直方向[−20, 20]

范围内的配准函数曲线，见图 1e 和图 1f，旋转角度[−20°, 20°]范围内的配准函数曲线，见图 1g 和图 1h。

对归一化互信息测度（NMI）、联合测度（GI）2 种测度函数曲线的形状进行对照分析，见图 1。其中图 1 中的图 1c, e, g 为 NMI 对应的水平方向、垂直方向、旋转角度的测度函数曲线，图 1d, f, h 为 GI 对应的水平方向、垂直方向、旋转角度的测度函数曲线。

GI 测度函数和 NMI 测度函数的相关信息见表 1。“坡度”函数 S 见式（8）。

$$S=\frac{F}{M} \tag{8}$$

式中：F 为峰值测度；M 为最小测度。从表 1 可以看出，GI 测度函数的坡度为 8.33，而 NMI 测度函数为 1.85，GI 测度函数的坡度远远大于 NMI 测度函数，这表明在变化参数接近于配准点时，GI 测度值变动范围远远大于 NMI 测度值的变动范围，这可以使得 Powell 在后期迭代步伐距离越来小的情况下，仍能保持相似性测度函数的局部差值大于人为设定的阈值，从而保证算法可以不停地寻找下一个最优解，从而利于降低 Powell 算法的局部最优问题给最

表 1　GI 测度函数和 NMI 测度函数的峰值测度、最小测度和坡度

Tab.1 The Max, Min and S values of GI and NMI measure functions

测度函数	峰值测度 F	最小测度 M	坡度 S
GI	12.5	1.5	8.33
NMI	2	1.08	1.85

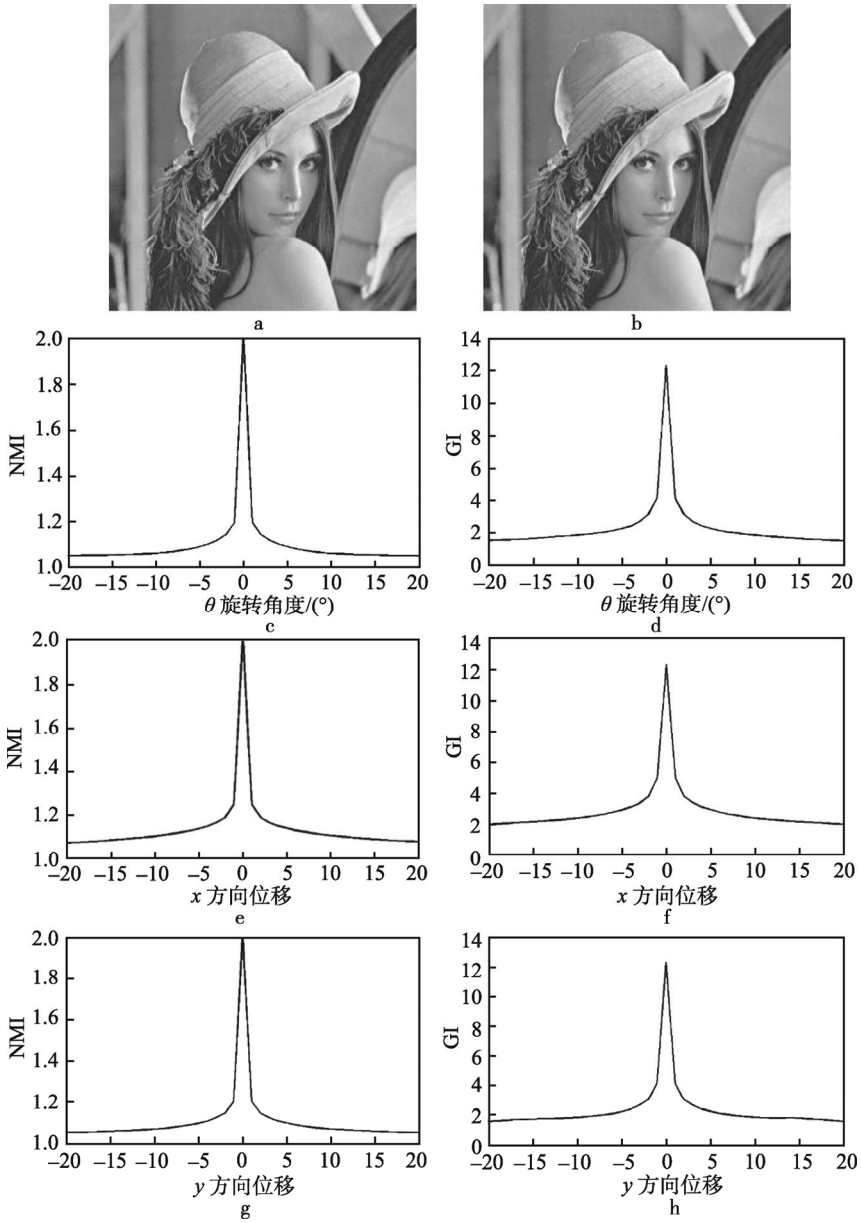

图 1　测度函数曲线

Fig.1 The curve of measure function

终结果带来的消极影响，因此 GI 算法能更轻易而精确地收敛到配准函数最优解。由此证明了联合测度 GI 测量精度更高，是一种更有效的图像配准相似性测度。

3　基于联合测度的图像配准步骤

文中提出的优化算法是基于联合测度的算法，参数个数少，变量变化范围小，而 Powell 算法通过一维搜索算子比较目标函数的数值大小来确定搜索方向和步长，在一系列共轭方向上搜索到最优解[22—23]，具有其他算法如遗传算法或粒子群算法所没有高速度的特点。Powell 运算过程拆成多次循环执行阶段，每个执行阶段又由 n+1 个（n 为相似性测度的变量个数）黄金算子构成。黄金算子即一维搜索算法中的黄金分割法，以黄金分割系数 0.618 不断逼近阶段性极值，在每轮执行过程中，依次沿着 n 个行列式满秩的特定的搜索方向（s_0, $s_1 \cdots s_{n-1}$），从初始点 X_0^k 进行 n 次黄金算子计算，得到一个临时最优点 X_n^k，然后利用规则构造新的搜索方向，接着从点 X_n^k 出发沿着 X_0^k 与 X_n^k 连线方向进行 1 次一维搜索得到本轮的临时最优点 X_0^{k+1}。新一轮迭代的初始点由上一轮的临时最优点 X_0^{k+1} 决定算法结果可收敛到最优解 X^*。

采用 Powell 算法对相似性测度函数进行参数寻优，循环优化变换参数，使得 GI 达到最大，并采用刚性变换作为搜索空间对待配准图像进行变换，最后的结果是实现参考图像和待配准图像的物理空间几何配准。图像配准的流程见图 2，其中 A 为基准图像，B 为待配准图像，k 为循环次数，ε 同 Powell 算法中的 ε（用于判断是否跳出循环），X^*为最优参数。具体步骤如下所述。

1）计算参考图像 A 和待配准图像 B 的联合测度 GI，并以此作为相似性测度，利用 Powell 算法进行参数寻优。

2）依据优化准则，不断循环搜索最优配准参数。

3）使用步骤 2）中得到的最优配准参数 X^*对待配准图像 B 进行刚性变换，得到配准图像。

4　实验与结果分析

设置 2 个实验。第 1 个实验：通过随机选择 3 个变换参数做为特例，对 2 种测度的变换参数与对应配准参数比较，来客观地评价 2 种相似性测度的性能。第 2 个实验：通过随机选择 100 个变换参数，以绘制误差统计图的方式，科学地对 2 种相似性测度的性能进行分析比较。

4.1　特例实验结果与分析

参考图像见图 3a，即图像处理领域广泛使用的

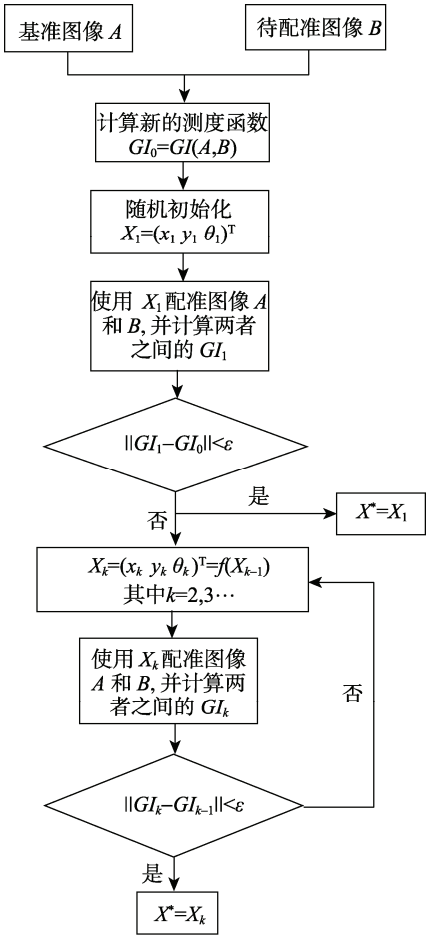

图 2　建议方法的配准流程

Fig.2 Registration flowchart of the proposed method

尺寸为 256×256 的 lena 头像图片。lena 图像具有平整的区块、清晰细致的纹路、渐变的光影、深浅层次的灰度等，使它在验证数字图像配准算法时常被使用[23]。

将图 3a 分别按照变换参数（−10, 5, −30°），（10, −10, 20°）和（−10, 20, 10°）进行刚性变换，依次得到图 3b、图 4b 和图 5b，并以这 3 个图像作为待配图像，分别标记为 TestImage1, TestImage2 和 TestImage3。分别采用归一化互信息（NMI）和联合互信息（GI）来进行待配图像与参考图像的配准实验。TestImage1, TestImage2 和 TestImage3 与参考图像的配准效果图分别见图 3d、图 4d 和图 5d，配准的参数见表 2—4。表 5 中的 t_x, t_y 和 t_θ 分别表示采用配准算法得到配准参数与变换参数分别在水平方向、垂直方向和旋转方向上的误差。

在参考图像中，以左上点为坐标原点，向右方向为 x 轴，向下方向为 y 轴，分别取 5 个检测点（x, y），它们分别为 A（131, 132），B(142, 134), C（164, 133），D（148, 161），E（134, 175）（在图 3 中检测点和配准点均进行标注），分别经过 NMI 方法配准和 GI 方法配准后得出 5 个 NMI 配准点 A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 和 5 个 GI 配准点 A_2, B_2, C_2, D_2, E_2，分别计算检

测点和配准点之间的距离 P_1 和 P_2，并计算不同配准算法下，配准点和检测点的距离均值 m_p，即将每一对检测点和配准点的距离相加后除以总对数，见表 2—4。从表 2—4 中可以看出 GI 算法得出的距离均值比NMI算法小0.4~1.2，这可以证明GI算法比NMI算法更加精确，例如在表 4 中，检测点为 D（148, 161），NMI 配准点为 D_1（146, 162），GI 配准点为 D_2（148, 161），可以得出检测点-配准点距离，P_1 为 2.232，P_2 为 0，最终 NMI 方法的距离均值 m_p 为 1.693 远远大于 GI 方法，这表明 GI 方法的精确度比 NMI 方法高。

其中：

$$P_1=\sqrt{(x_{\mathrm{NMI}}-x)^2+(y_{\mathrm{NMI}}-y)^2} \tag{9}$$

$$P_2=\sqrt{(x_{\mathrm{GI}}-x)^2+(y_{\mathrm{GI}}-y)^2} \tag{10}$$

$$m_{\mathrm{P}}=\frac{P_k}{5} \qquad k=1,2 \tag{11}$$

由以上对实验结果分析内容可以看出，GI 算法相比于传统的 NMI 算法，配准精度更高，更易选出最佳配准参数；并且前者得到的配准后图像和参考图像间的配准误差明显减小，由此可见 GI 是一种精确度更高，鲁棒性更强的相似性测度。

a 参考图像　b 待配准图像　c 利用 NMI 测度得到的配准结果　d 利用 GI 测度得到的配准结果

图 3　TestImage1 与参考图像的配准结果

Fig.3 Registration result of TestImage1 and reference image

表 2　参考图像图 3 中检测点与配准点的距离及距离均值

Tab.2 The distance between the detection point and the registration point and the distance mean in the reference image Fig.3

检测点	NMI 配准点	GI 配准点	P_1	P_2
A（131,132）	A_1（132,133）	A_2（132,131）	1.414	1.414
B（164,133）	B_1（163,134）	B_2（163,132）	1.414	1.414
C（142,134）	C_1（141,134）	C_2（141,134）	1.000	1.000
D（148,161）	D_1（147,162）	D_2（148,161）	1.414	0.000
E（134,175）	E_1（133,175）	E_2（134,174）	1.000	1.000
	距离均值 m_p		1.248	0.966

a 参考图像　b 待配准图像　c 利用 NMI 测度得到的配准结果　d 利用 GI 测度得到的配准结果

图 4　TestImage2 与参考图像的配准结果

Fig.4 Registration result of TestImage2 and reference image

表 3　参考图像图 4 中检测点与配准点的距离及距离均值

Tab.3 The distance between the detection point and the registration point and the distance mean in the reference image Fig.4

检测点	NMI 配准点	GI 配准点	P_1	P_2
A（131,132）	A_1（132,131）	A_2（131,132）	1.414	0.000
B（164,133）	B_1（164,132）	B_2（164,132）	1.000	1.000
C（142,134）	C_1（142,133）	C_2（142,133）	1.000	1.000
D（148,161）	D_1（148,161）	D_2（148,160）	0.000	1.000
E（134,175）	E_1（135,174）	E_2（134,174）	1.414	1.000
	距离均值 m_p		0.966	0.800

a 参考图像　b 待配准图像　c 利用 NMI 测度得到的配准结果　d 利用 GI 测度得到的配准结果

图 5　TestImage3 与参考图像的配准结果

Fig.5 Registration result of TestImage3 and reference image

表 4　参考图像图 5 中检测点与配准点的距离及距离均值

Tab.4 The distance between the detection point and the registration point and the distance mean in the reference image Fig.5

检测点	NMI 配准点	GI 配准点	P_1	P_2
A(131,132)	A_1(131,133)	A_2(131,132)	1.000	0.000
B(164,133)	B_1(162,133)	B_2(164,133)	2.000	0.000
C(142,134)	C_1(140,135)	C_2(141,134)	2.232	1.000
D(148,161)	D_1(146,162)	D_2(148,161)	2.232	0.000
E(134,175)	E_1(135,175)	E_2(136,175)	1.000	2.000
	距离均值 m_p		1.693	0.600

4.2　统计实验结果与分析

假设 $k\in[1,100]$，取随机变换参数 $[x_d^k, y_d^k, \theta_d^k]$，利用 Powell 算法进行参数寻优，得到配准参数 $[x_r^k, y_r^k, \theta_r^k]$，定义配准误差为 $[t_x^k, t_y^k, t_\theta^k]=[x_r^k - x_d^k, y_r^k - y_d^k, \theta_r^k - \theta_d^k]$，然后以 k 为横坐标，分别以 t_x^k，t_y^k，t_θ^k 为纵坐标绘制误差统计图，见图 6。

通过 Matlab 平台的一个循环程序得出图 6，总共进行了 100 次随机配准参数，对新测度函数进行统计检验，结果证明新测度得出误差函数只在小范围进行上下波动，而传统测度得出的误差函数则会出现极大的误差，远远大于新测度得出的误差，从图 6 中可以看到，GI 测度得到的配准参数误差在水平方向、竖直方向或旋转方向上的误差为 0.5 或 1 个像素点，上下波动控制在合理的范围。而 NMI 测度的配准误差在水平方向、竖直方向上的误差为 1 或 6 个像素点，且利用 NMI 测度得到的误差有较大波动，如图 6b 中 93 次实验 t_y 达到−10，这将严重影响整体的精度。所

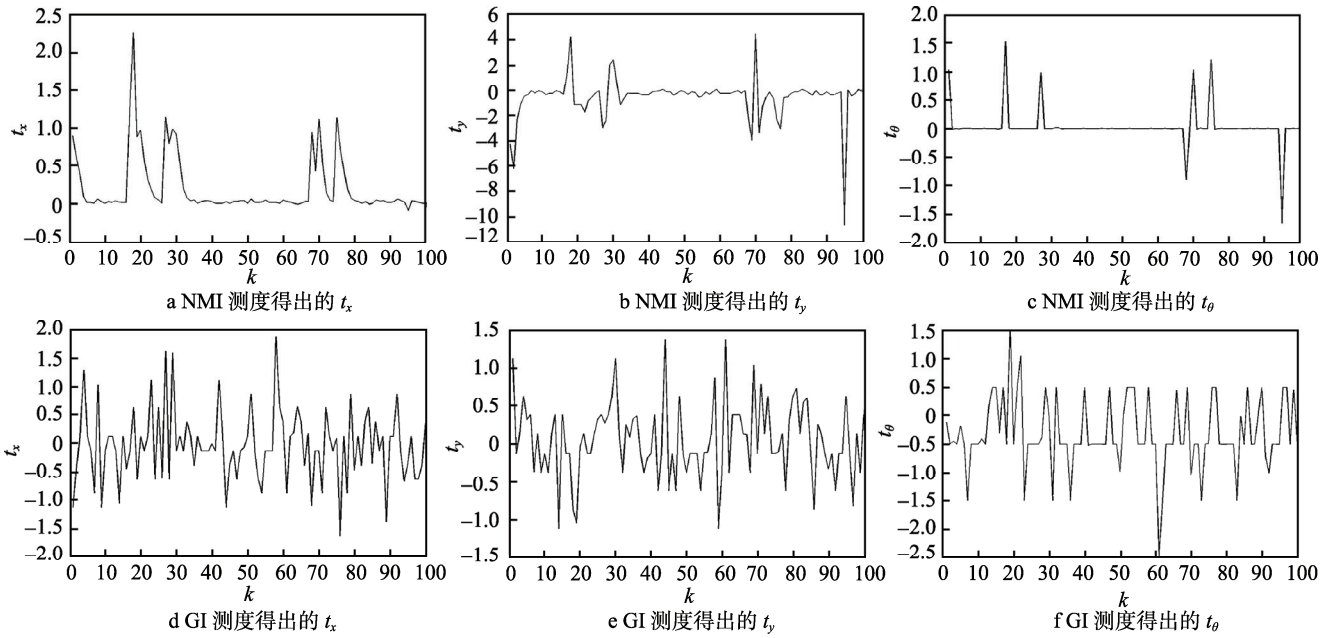

图 6　误差统计

Fig.6 Error statistics

以利用联合测度（GI）作为相似性测度进行配准，配准精度更高，图像配准效果更好。

5 结语

文中将图像梯度的模值和方向角引入 NMI 中，将此联合函数作为相似性测度函数，并采用 Powell 优化算法进行寻优。通过实验表明，文中改进测度相较于传统的归一化互信息测度，配准函数曲线平滑度更佳，在配准处的测度峰值更大，Powell 算法更易避开“局部最优解”问题而得出最佳配准参数，并且相对于传统方法，依据新测度方法得到配准误差明显减小，由此可见梯度和归一化互信息相结合的联合测度是一种精确度更高、鲁棒性更强的相似性测度。

参考文献：

[1] JIAN Chuan-xia, GAO Jian, AO Yin-hui. Automatic Surface Defect Detection for Mobile Phone Screen Glass Based on Machine Vision[J]. Applied Soft Computing, 2017, 52: 348—358.

[2] KWON B K, WON J S, KANG D J. Fast Defect Detection for Various Types of Surfaces Using Random Forest with VOV Features[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16(5): 965—970.

[3] 陈亚军. 基于机器视觉的印刷品缺陷检测系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
CHEN Ya-jun. Research on Defect Detection System for Printed Matter Based on Machine Vision Technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

[4] HUIZINGA W, POOT D H, GUYADER J M, et al. PCA-based Groupwise Image Registration for Quantitative MRI[J]. Medical Image Analysis, 2016, 29(4): 65—78.

[5] 陈显毅. 图像配准技术及其 MATLAB 编程实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
CHEN Xian-yi. Image Registration Technology and Its Implementation by MATLAB Programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

[6] VIOLA P, WELLS W M. Alignment by Maximization of Mutual Information[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(2): 137—154.

[7] 黄宝康. 基于灰度的图像配准技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
HUANG Bao-kang. Research of Image Registration Based on Gray Level[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.

[8] 文贡坚, 吕金建, 王继阳. 基于特征的高精度自动图像配准方法[J]. 软件学报, 2008, 19(9): 2293—2301.
WEN Gong-jian, LYU Jing-jian, WANG Ji-yang. An Automated Method for Feature-Based Image Registration with High-accuracy[J]. Journal of Software, 2008, 19(9): 2293—2301.

[9] VIOLA P, WELLS W M. Alignment by Maximization of Mutual Information[C]// International Conference on Computer Vision, Boston, Massachusetts, USA, 1995, Proceedings, IEEE, 2002, 24(2): 16—23.

[10] 杨祖彬, 代小红. 基于图像配准的食品包装印刷缺陷检测与实现[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 319—322.
YANG Zu-bin, DAI Xiao-hong. Printing Defects Detection and Realization in Food Packaging Based on Image Registration[J]. Computer Science, 2015, 42(8): 319—322.

[11] 何雄一. 基于互信息的医学图像配准与插值算法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
HE Xiong-yi. Medical Image Registration Based on Mutual Information and Interpolation Algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[12] THEVENAZ P, UNER M. Optimization of Mutual Information for Multi-resolution Image Registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 2083—2099.

[13] GAO Z, GU B, LIN J. Monomodal Image Registration Using Mutual Information Based Methods[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

[14] AMANKWAH A, LOFFFELD O. Image Registration Using a Combination of Mutual Information and Spatial Information[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver CO United states, 2006: 4012—4016.

[15] YONG S K, LEE J H, RA J B. Multi-Sensor Image Registration Based on Intensity and Edge Orientation Information[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(11): 3356—3365.

[16] PLUIM J P W, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Image Registration by Maximization of Combined Mutual Information and Gradient Information[C]// Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Berlin Germany, 2000: 809—814.

[17] 李智, 张雅声. 基于轮廓特征的图象配准研究[J].

指挥技术学院学报, 1998, 9(3): 101—106.
LI Zhi, ZHANG Ya-sheng. Research on Image Registration Based on Contour Feature[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 1998, 9(3): 101—106.

[18] 时永刚. 最大化算术-几何均值距离的多传感器遥感图像配准[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 582—586.
SHI Yong-gang. Multi-sensor Remote Sensing Image Registration by Maximization of Arithmetic-Geometric Divergence[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(4): 582—586.

[19] 王东峰, 邹谋炎. 基于最大化对齐度的多模态图像自动配准[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 755—762.
WANG Dong-feng, ZOU Mou-yan. Automatic Registration of Multimodal Images Based on Maximum Alignment[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(6): 755—762.

[20] QIU Qi-wen, DENVID L. A Novel Approach for Near-surface Defect Detection in FRP-bonded Concrete Systems Using Laser Reflection and Acoustic-laser Techniques[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 553—564.

[21] HUIZINGA W, POOT D H, GUYADER J M, et al. PCA-based Groupwise Image Registration for Quantitative MRI[J]. Medical Image Analysis, 2016, 29(4): 65—78.

[22] 佟杰新, 赵松年, 卢秀春. 现代设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
TONG Jie-xin, ZHAO Song-nian, LU Xiu-chun. Modern Design Method[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.

[23] 陈秀宁. 机械优化设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.
CHEN Xiu-ning. Mechanical Optimization Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2010.