

采用小世界免疫克隆算子的频率域图像配准

徐海黎^{1,2}, 花国然², 庄健¹, 王孙安¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 南通大学机械工程学院, 226019, 江苏南通)

摘要: 为满足智能寻位加工中对零件图像配准速度和配准精度的高要求,提出了一种采用伪极快速傅里叶变换(PPFFT)和小世界-克隆选择算法(SWCSA)的图像配准方法(PPFFT-SWCSA). 首先对图像进行伪极快速傅里叶变换,然后利用变换后获取的频谱特征信息设计优化算法的代价函数,最后采用 SWCSA 算法得到 2 幅图像间的配准参数. 采用 PPFFT 降低了运算复杂性,提高了运算速度;采用 SWCSA 算法,克服了图像配准中常用的相位相关法无法检测到图像间较小偏移量的缺点. 实验结果表明,PPFFT-SWCSA 方法的配准角度精度可以达到空间 0.2° ,在对图幅为 256×256 像素的图像配准实验中,PPFFT-SWCSA 方法的配准速度比基于离散极坐标傅里叶变换和相位相关法的配准速度快 2 倍.

关键词: 图像配准;伪极快速傅里叶变换;克隆选择;小世界

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0038-05

A Frequency Domain Approach to Image Registration Using Small World Clonal Selection Algorithm

XU Haili^{1,2}, HUA Guoran², ZGUANG Jian¹, WANG Sun'an¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract: Owing to the demanding accuracy and speed for image registration in intelligent searching machining system, a registration method based on pseudo-polar fast Fourier transform (PPFFT) and small world clonal selection algorithm (SWCSA) is proposed. Firstly, PPFFT is done for the image. Secondly, a suitable fitness function is selected by using the magnitude of PPFFT. Lastly, registration parameters are obtained by SWCSA. With PPFFT, the complexity of computation is significantly lowered and the speed is accelerated. With SWCSA, the disadvantage that small translation can not be detected by phase correlation is eliminated. Experimental results demonstrate that the registration accuracy of rotation is up to 0.2° . In the 256×256 pixels image registration experiment, the speed of the proposed method is two times faster than that of discrete polar Fourier transform and phase correlation algorithm.

Keywords: image registration; pseudo-polar fast Fourier transform; clone selection; small world

如何确定被加工零件的空间位姿(六自由度)是智能寻位加工技术的关键问题^[1],基于计算机视觉的工件空间位姿的确定则是该研究的热点,其关键技术为图像配准. 目前,图像配准的主要方法有控制点法、最大互信息配准法、光流场法和离散傅里叶法

等^[2]. 由于图像的平移、旋转、镜像和缩放等变换都能在频谱空间有相应的体现,所以在图像配准技术中傅里叶法具有一定的优势,但由于该方法一般采用相位相关进行图像平移检测,因而当目标平移幅度较小时,其互功率谱可能就无法检测出变化. 另

外,由于零件本身有倒角、毛刺、锈迹、油污等,加上照明条件的影响,所获取的图像数据通常含有阴影等噪声,所以纯粹利用图像的灰度信息或外形信息,其配准效果往往不甚理想。本文采用伪极快速傅里叶变换(PPFFT)来提高极坐标傅里叶变换速度,并利用频谱中的幅值信息设计合适的代价函数,采用小世界-免疫克隆选择算法(SWCSA)检测目标图像与标准图像之间的配准参数,从而克服了普通频谱方法计算时间长、容易受外界干扰以及微小变化不易检测等缺点。

1 伪极快速傅里叶变换

1.1 极坐标傅里叶变换基本原理

在笛卡尔直角坐标系中,二维信号的旋转对应于极坐标系中极角的偏移,信号的尺度变换对应于极坐标系中极径的伸缩。利用二维离散极坐标傅里叶变换(DPFT)在旋转和尺度变换上的良好性质,提取图像的频域特征时,将傅里叶频谱用极径和极角表示更便于处理。

在直角坐标系中,图像 I_1 和 I_2 具有平移、旋转和尺度关系^[3]

$$I_2(x, y) = I_1[s(x\cos\theta_0 + y\sin\theta_0) + \Delta x, s(-x\sin\theta_0 + y\cos\theta_0) + \Delta y] \quad (1)$$

式中: θ_0 为旋转角; s 为尺度因子; $(\Delta x, \Delta y)$ 为平移参数。

在极坐标下式(1)的傅里叶变换为

$$I_2^{\text{DP}}(r, \theta) = s^{-2} I_1^{\text{DP}}[s^{-1}r, \theta + \theta_0] \exp(j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)) \quad (2)$$

式中: r 为极径; θ 为极角; $\omega_x = r\cos\theta$; $\omega_y = r\sin\theta$; I_1^{DP} 和 I_2^{DP} 的幅值 M_1 和 M_2 满足

$$M_2(r, \theta) = s^{-2} M_1[s^{-1}r, \theta + \theta_0] \quad (3)$$

$$M_2(\log r, \theta) = s^{-2} M_1[\log r - \log s, \theta + \theta_0] \quad (4)$$

$$M_2(\xi, \theta) = s^{-2} M_1[\xi - d, \theta + \theta_0] \quad (5)$$

式中: $\xi = \log r$; $d = \log s$ 。

由于 DPFT 行、列不可分离,因而不能直接应用 FFT,对二维 $N \times N$ 图像信号,其运算复杂度为 $O(N^4)$ 。伪极快速傅里叶变换(PPFFT)算法^[4-5]在保证精度的情况下大大降低了计算复杂度(其计算复杂度为 $O(N^2 \lg N)$),从而提高了计算速度。

1.2 伪极快速傅里叶变换基本原理

图1为极栅格图,图中圆为同心圆,射线为角度均匀分布的射线,栅格点为同心圆与射线的交叉点。

图2为伪极栅格图,图中射线的角度不服从均

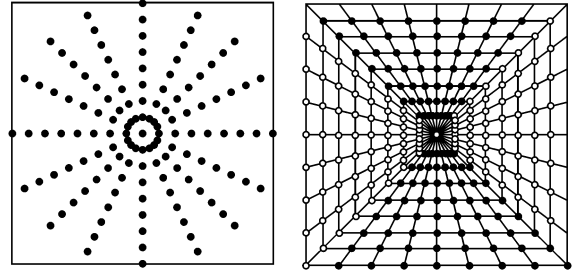


图1 极栅格

实心点为基本垂直点;
空心点为基本水平点

图2 伪极栅格

匀分布,但其斜率却是均匀分布的,栅格点为同心方形与射线的交叉点,将点分为基本垂直点和基本水平点。

伪极快速傅里叶变换的步骤为:①对基本垂直点集的傅里叶变换;②将第①步变换后的图像旋转 90° ,进行基本平行点集的傅里叶变换;③根据取样的位置将两部分加起来,就可得整幅图像的 PPFFT。其中,基本垂直点集的傅里叶变换与基本平行点集的傅里叶变换步骤相同:①对0填充后的图像的每一列做长度为 $2N$ 的一维 FFT;②对第①步输出的每一横排做长度为 N 的分数傅里叶变换。

1.3 插值得到极坐标傅里叶变换

由 PPFFT 得到的伪极方格上的频率点值只是极坐标傅里叶变换的近似,为得到极坐标栅格上的频率点,还需要进行两步插值。仍以基本垂直点为例,先对横轴的点序列做等角度插值,使得相邻射线的夹角相同,然后对各射线的点序列做等距离插值,使得各射线上相邻点以新的等间距分布。对基本平行点进行同样的处理,得到 DPFT。

1.4 算法描述

(1)设标准图像 $I_1(i, j)$ 和待配准图像 $I_2(i, j)$ 的尺寸分别为 $m_1 \times l_1$ 和 $m_2 \times l_2$,将图像 I_1, I_2 按下式分别进行0扩充

$$f_z[i_1, i_2] = \begin{cases} f[i_1, i_2] & 0 \leq i_2 < N \\ 0 & N \leq i_2 < 2N \end{cases} \quad (6)$$

得到的图像尺寸均为 $2N \times 2N = 2^k \times 2^k, k \in \mathbf{Z}$,且有 $2N \geq s \max(m_1, l_1, m_2, l_2), s \in \mathbf{Z}$,这里 s 定为1。

(2)对 $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 分别做 PPFFT,得到 $I_1^{\text{PP}}(r, \theta)$ 和 $I_2^{\text{PP}}(r, \theta)$ 。

(3)对 $I_1^{\text{PP}}(r, \theta)$ 和 $I_2^{\text{PP}}(r, \theta)$ 分别做两步插值运算,得到 $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 的 DPFT $I_1^{\text{DP}}(r, \theta)$ 和 $I_2^{\text{DP}}(r, \theta)$ 。

(4) 设 $I_2^{\text{DP}}(r, \theta)$ 的长度为 l , 由 $b' = l$ 得到对数极坐标中 r 轴的对数底 b , $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 的离散对数极坐标傅里叶变换 (DLPFT) 由 $I_1^{\text{DP}}(r, \theta)$ 和 $I_2^{\text{DP}}(r, \theta)$ 插值后得到, 插值运算满足

$$I_1^{\text{DLP}}(\xi, \theta) = I_1^{\text{DP}}(\text{ent} b^r, \theta)$$

$$I_2^{\text{DLP}}(\xi, \theta) = I_2^{\text{DP}}(\text{ent} b^r, \theta)$$

式中: $\text{ent } b^r$ 表示取小于或等于 b^r 的最大整数。

(5) 计算对数极坐标幅值谱 $M_1^{\text{DLP}}(\xi, \theta)$ 和 $M_2^{\text{DLP}}(\xi, \theta)$ 。

2 SWCSA 算法机理及算子描述

对 PPFFT 后的图像采用小世界-免疫克隆选择算法计算配准参数。将生物学中的免疫克隆学说与社会学中的小世界现象结合起来, 并将免疫克隆优良的局部搜索性能和小世界中引入的长距离搜索机制相结合, 以增强免疫克隆的全局寻优能力。

2.1 克隆选择算法简述

设抗体群 $\mathbf{A}(k) = \{A_1(k), A_2(k), \dots, A_n(k)\}$ 为抗体 $\mathbf{A}(k)$ 的 n 元组, 抗体 $\mathbf{A}(k)$ 演化过程中的主要操作为克隆增殖 T_c^c 、高频变异 T_m^c 以及克隆选择 T_s^c 。在克隆选择算子的作用下, 获得相应的新抗体群为 $\mathbf{A}(k+1) = \{A_1(k+1), A_2(k+1), \dots, A_n(k+1)\}$, 从而更新抗体群, 实现抗体群中的信息交换。关于免疫克隆选择算法的详细论述及理论分析可参考文献[6]。

2.2 小世界优化算法简述

社会网络中的小世界现象源于美国社会心理学家 Milgram 在 20 世纪 60 年代有关追踪美国社交网络中的最短路径的社会学实验^[7-8]。实验结果表明, 一个高度聚集的包含了局部连接节点的子网, 连同一些随机的有助于产生短路径的长距离随机连接就可以提高信息传递效率。Watts 和 Strogatz 由此构造了具有小世界效应的优化搜索算法——小世界优化算法^[9]。该算法中依概率 p_m 选择进行长连接搜索的节点, 采用倒位操作实现长连接搜索算子 Γ 。例如, 倒位前某个节点为 $s_i(k) = [s_{i1}(k), \dots, s_{ip}(k), \dots, s_{iq}(k), \dots, s_{iv_n}(k)]$, 若被选中的 2 个倒位点为 p 和 q , 且 $1 \leq p \leq q \leq v_n$, 则倒位后新节点为

$$s'_i(k) = [s'_{i1}(k), \dots, s'_{i(p-1)}(k), s'_{iq}(k),$$

$$s'_{i(q-1)}(k), \dots, s'_{i(p+1)}(k), s'_{ip}(k),$$

$$s'_{i(q+1)}(k), \dots, s'_{iv_n}(k)] =$$

$$[s_{i1}(k), \dots, s_{ip}(k), \dots, s_{iv_n}(k)]$$

依概率采用该随机长连接搜索, 在一定程度上

可避免算法过早陷入局部最优值。

3 基于 SWCSA 的图像配准算法

3.1 配准代价函数的设计

通过 1.4 节, 得到对数极坐标幅值谱 $M_1^{\text{DLP}}(\xi, \theta)$ 和 $M_2^{\text{DLP}}(\xi, \theta)$ 。对数极坐标中的尺度轴和角度轴的平移量 (p, q) 用 2 个 8 位二进制码串表示, 即抗体编码长度为 16 位。取 2 幅图像对数极坐标幅值谱之间的距离作为配准代价函数, 距离越小, 则相似性越大。表示为

$$R(M_1, M_2, p, q) = \sum_{i=1}^{2N} \sum_{j=1}^{2N} |M_1^{\text{DLP}}(i, j) - M_2^{\text{DLP}}(i + p, j + q)| \quad (7)$$

考虑到配准算法对快速性的高要求, 定义 SWCSA 中的抗体-抗原亲和力函数如下:

(1) 设 $\epsilon(p, q, i, j) = |M_1^{\text{DLP}}(i, j) - M_2^{\text{DLP}}(i + p, j + q)|$;

(2) 取一个不变的阈值 T_K ;

(3) 对于某个 (p, q) , 顺次取 i, j , 计算 ϵ , 并进行累加, 当累加 r 次误差超过 T_K , 则停止累加, 并记下次数 r , 作为该 (p, q) 所对应个体的抗体-抗原亲和力大小。

r 值越大, 表明在该点上为使总误差超过阈值 T_K 所需的累计次数越多, 该点也就越接近于频域图像偏移点, 故可以将差值累加次数 r 作为个体的抗体-抗原亲和力评价指标。阈值 T_K 的选取依据实验, 对不同的图像可保持不变。

3.2 SWCSA 算法描述

SWCSA 算法的主要步骤可描述如下

$k=0$

初始化: $A(0) = \{a_1(0), a_2(0), \dots, a_n(0)\} \in I^n$

计算抗体-抗原亲和力: $A(0): \{f(A(0))\} = \{f(a_1(0)), f(a_2(0)), \dots, f(a_n(0))\}$

While $A(k)$ 中没有最优个体出现, do

克隆增殖: $B(k) = T_c^c(A(k))$

高频变异: $C(k) = T_m^c(B(k))$

倒位操作: $D(k) = \Gamma(C(k))$

计算抗体-抗原亲和力: $D(k): \{f(D(k))\}$

克隆选择: $A(k+1) = T_s^c(D(k))$

计算抗体-抗原亲和力

$A(k+1): \{f(A(k+1))\} = \{f(a_1(k+1)), f(a_2(k+1)), \dots, f(a_n(k+1))\}$

$k=k+1$

end

3.3 配准参数的计算

由 3.1、3.2 中可得 2 幅图像间的频域偏移量 (p, q) , 由此可得旋转角度的可能值和尺度因子

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2N}q; \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2N}q + \pi$$

$$s = b^{\frac{q}{N}}$$

对图像 I_2 作尺度 s 和旋转角 θ_1 及 θ_2 的校正, 得到图像 I_{2,θ_1} 和 I_{2,θ_2} , 再次利用 SWCSA 算法在空间域求出 I_1 和 I_{2,θ_1} 及 I_{2,θ_2} 之间的相似度最大值 r , 取较大的一个 r 值对应的角度作为旋转角 θ_0 , 并得到平移关系 $(\Delta x, \Delta y)$.

3.4 算法优越性

(1) 克隆规模是依据抗体-抗原亲和度、抗体-抗体亲和力和自适应调整的, 即通过促进或抑制抗体的产生, 体现了免疫反应的自我调节;

(2) 抗体的高频变异保证了抗体多样性的产生和亲和度的成熟;

(3) 克隆选择算子实现了在候选解附近的局部搜索, 体现了较强的局部搜索能力;

(4) 引入小世界现象中的长距离搜索机制, 在一定程度上可避免算法陷入局部最优, 加上克隆算子本身的选择机制具有记忆功能, 能够保证算法以概率 1 收敛到最优解.

4 实验结果与分析

为了评价本文 PPFFT-SWCSA 方法的配准性能, 分别采用 4 种不同的基于傅里叶变换的配准方法对 4 种不同的零件进行实验, 零件配准图如图 3 所示. 要求零件是凸多边形, 每组零件的 2 幅图像间具有旋转和缩放关系. 配准前先利用基于玻耳兹曼原理的图像分割算法^[10]提取目标图像.

4 种不同的基于傅里叶变换的配准方法原理如下.

(1) 基于离散极坐标傅里叶变换和相位相关的配准方法(PDFT-PCA): 直接进行极傅里叶变换, 再采用相位相关法得到配准参数.

(2) 基于非均匀空间傅里叶变换和相位配准方法(USFFT-PCA): 在直角坐标系下对图像进行过采样, 然后对过采样点进行二维傅里叶变换, 通过插补算法近似得到极坐标傅里叶变换, 再采用相位相关法检测配准参数.

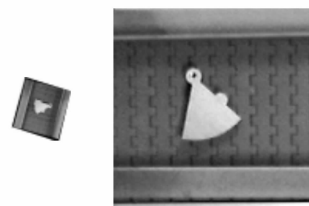
(3) 文献[5]采用的配准方法(PPFFT-PCA): 由伪极栅格中的点经二维傅里叶变换后插补近似得

到极坐标系下的点, 再采用相位相关法检测配准参数.

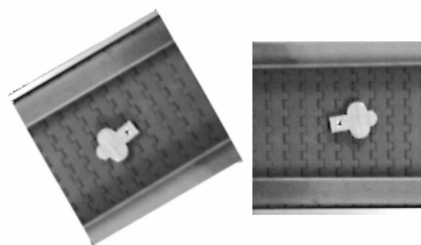
(4) 本文配准方法(PPFFT-SWCSA): 由伪极栅格中的点经二维傅里叶变换后插补近似得到极坐标系下的点, 再采用小世界-免疫克隆优化算法检测 2 幅图像间的配准参数.

实验中选用的参数如下: 种群规模为 20, 克隆规模为 15, 变异系数为 0.2, 倒位系数为 0.3, 代价函数中的阈值为 100. 采用 4 种方法的配准结果如表 1 所示.

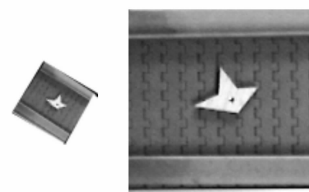
表 2 是 4 种方法的配准速度对比数据. 图 4 为图 3d 所示的 2 组图像之间角度变化较小时, 经过多次实验得出的误差分析曲线.



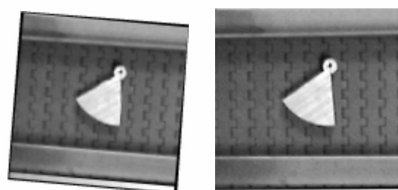
(a) $s=4, \theta_0=105^\circ$



(b) $s=1, \theta_0=150^\circ$



(c) $s=3, \theta_0=33^\circ$



(d) $s=1.13, \theta_0=5^\circ$

图 3 4 种零件的配准图

表 1 4 种配准方法实验结果对比

(s,θ ₀)的实际值		(s,θ ₀)的计算值			
		PDFT-PCA	USFFT-PCA	PPFFT-PCA	PPFFT-SWCSA
图 4a	(4, 105°)	(4.0, 105.02°)	(4.2, 102.34°)	(4.03, 104.06°)	(4.0, 104.95°)
图 4b	(1, 150°)	(1, 150.32°)	(1.2, 148.25°)	(1, 150.15°)	(1.0, 150.08°)
图 4c	(3, 33°)	(3.03, 32.4°)	(2.82, 31.63°)	(3.03, 32.74°)	(3.01, 32.94°)
图 4d	(1.13, 5°)	*	*	*	(1.10, 3.04°)

注: * 表示检测错误。

表 2 对图 3a 所示图像采用 4 种配准方法的配准用时对比

配准用时/s			
PDFT-PCA	USFFT-PCA	PPFFT-PCA	PPFFT-SWCSA
12.35	2.80	3.34	4.01

从实验结果可以看出:由于 PDFT 是直接进行极傅里叶变换,没有经过插补运算,所以准确率最高,但运算量大;USFFT 的插补误差明显大于 PPFFT,故准确率较差;在 PPFFT-PCA 方法中,对目标物体辨识采用的是相位相关法,在旋转角度很小时,无法得到结果;PPFFT-SWCSA 方法通过优化寻找到了最佳偏移量,但其运算时间略大于 PPFFT-PCA. 综合而言,本文方法具有较高的精度和较快的配准速度。

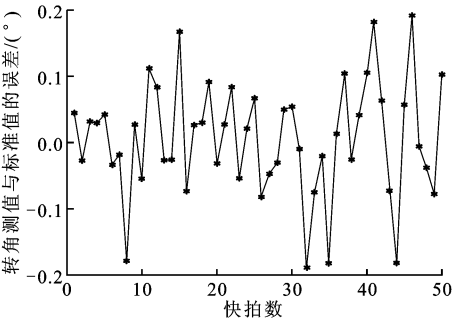


图 4 θ₀ = 5°时的配准误差图

5 结 论

本文提出了基于伪极快速傅里叶变换和小世界免疫克隆选择算法的图像配准方法. 采用伪极坐标傅里叶变换,计算复杂度由直接极坐标傅里叶变换的 $O(N^4)$ 降低为 $O(N^2 \lg N)$,显著提高了运算速度,而精度基本不变. 经过傅里叶变换后,利用频谱中的幅值信息,通过设计合适的代价函数,采用小世界-免疫克隆优化算法,得到 2 幅图像间的配准参数,克服了相位相关法无法检测到图像间较小偏移量的缺点,并且配准精度也得到了提高. 实验结果表明,本文算法具有较高的精度、较快的配准速度和较强的鲁棒性.

参考文献:

[1] 毛德柱,周凯,张伯鹏. 智能寻位加工技术应用研究[J]. 制造技术与机床,2000(4):42-44.
MAO Dezhu, ZHOU Kai, ZHANG Bopeng. Research for intelligent searching machining[J]. Manufacture Technology and Machine Tool, 2000(4):42-44.

[2] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11):977-1000.

[3] KELLER Y, AVERBUCH A, ISRAELI M. Pseudopolar-based estimation of large translations, rotations and scalings in images [J]. IEEE Trans Image Processing, 2005, 14(1):12-22.

[4] AVERBUCH A, COIFMAN R R, DONOHO D L, et al. The pseudopolar FFT and its application, YALEU/DCS/RR - 1178 [R]. New Haven, CT, USA: Yale University, 1999.

[5] AVERBUCH A, COIFMAN R R, DONOHO D L, et al. Fast and accurate polar Fourier transform [J]. Applied Computational Harmonic Analysis, 2006, 21(2): 145-167.

[6] 焦李成,杜海峰,刘芳,等. 免疫优化计算、学习与识别[M]. 北京:科学出版社,2006.

[7] JEFFREY T, MILGRAM S. An experimental study of the small world problem [J]. Sociometry, 1969, 32(4): 425-443.

[8] WATTS D. Six degrees: the science of a connected age [M]. New York, USA: WW Norton & Company, 2004: 19-100.

[9] 杜海峰,庄健,张进华. 用于函数优化的小世界优化算法[J]. 西安交通大学学报,2005,39(9):1011-1015.
DU Haifeng, ZHUANG Jian, ZHANG Jinhua. Small world algorithm for function optimization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9):1011-1015.

[10] 庄健,余清,王孙安. 基于玻耳兹曼原理的图像分割算法 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(5): 804-807.
ZHUANG Jian, YU Qing, WANG Sun'an. Image segmentation algorithm based on Boltzmann theory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(5): 804-807.