·人工智能及识别技术·

【**Abstract**】This paper establishes the Bernoulli statistical model of match simulation experiments, estimates match probability calculation formula of image matching algorithm based on estimation method. With unbiasedness proved, it analyzes precision, describles probability distribution model of successful match in serial image match, and gives the definition of SIM algorithm match probability. The quantitative relationship among SIM probability, image serial number and single match probability is studied by an application example, which provides a theoretical decision-making basis for the choice of SIM algorithm and serial image number in aircraft scene match guidance using SIM technique.

图像匹配技术是在航天技术、卫星应用技术、计算机图像处理及模式识别等基础上发展起来的一门新技术，它在飞机辅助导航、远程武器、精确制导武器系统的末制导、光学或雷达图像的目标搜索与跟踪、车辆定位、医学图像处理、人脸识别、指纹验证、资源分析、气象预报等领域具有重大应用价值[1~2]。

匹配算法的性能是决定图像匹配系统匹配可信度、可靠性的关键因素。匹配概率是评价匹配算法性能的重要指标，是图像匹配应用系统选择算法的决策依据。因而，如何对图像匹配算法匹配概率进行有效的预测估计，也是算法研究的重要课题[2~4]。序列图像匹配算法是经典匹配算法发展的一种新思路[5]，它在多次单幅匹配的基础上，增加了匹配结果的融合处理，使匹配结果更加精确、可靠，提高了图像匹配系统整体匹配性能。

匹配概率的估计方法可分为以下 2 类：

(1)基于匹配仿真统计试验的方法[2](性能评估)。该方法依据试验的总次数及正确匹配的次数直接计算匹配概率。

(2)通过仿真试验，建立匹配概率与匹配过程中产生的图像特征值之间的统计关系模型[3~4]，利用图像的特征值，如信噪比、独立像元数、重复模式、相关峰特征等对匹配概率进行预测。序列图像匹配算法的匹配概率与经典匹配算法的匹配概率有着密切的联系。

1　统计数学模型建立

计算序列图像匹配算法匹配概率，必须估计出匹配系统单幅匹配的成功概率，即估计出经典匹配算法在完成一次匹配时的成功概率。也就是进行常规意义下算法的性能评估。

对匹配算法进行性能评估一般通过大量的匹配仿真试验完成，可近似地认为各次匹配试验的结果是随机的且互不影响。认为匹配算法的匹配概率为 p，则每次匹配仿真试验的结果事件 X 只可有 2 种可能结果，即正确匹配和误匹配，为了以后分析方便，不妨将其记为 0 与 1，即建立随机变量 X 的示性函数：

$$X=\begin{cases}1 & \text{正确匹配}\\ 0 & \text{误匹配}\end{cases} \tag{1}$$

则 X 的概率分布是

$$P\{X=k\}=p^k(1-p)^{1-k}\quad k=0,1\quad 0<p<1 \tag{2}$$

可以看出，对于单次匹配仿真试验，试验结果事件 X 服从 2 点分布或(0-1)分布。

2　算法匹配概率估计

依据大量的试验样本数据，如何科学地计算出事件(即总体分布)中的未知参数，就是概率统计中的参数估计问题[6]。这里要估计的就是匹配算法的匹配概率，即事件X的概率P。

2.1　匹配概率的矩估计

矩估计法是概率统计理论中求参数点估计的最基本方法

作者简介：杨小冈(1978－)，男，博士研究生，主研方向：精确制导，图像处理；曹　菲，博士研究生；缪　栋，教授、博士生导师；

之一，又称数字特征法。依据之前建立的总体事件数学模型，对于总体 X，可知

$$E(X)=p=\mu \tag{3}$$

若设进行了 n 次匹配仿真试验，有 m 次为正确匹配，记该样本为 $(X_1,X_2,\cdots,X_n)$，按矩估计法有

$$\hat{\mu}=A_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i=m/n \tag{4}$$

即算法匹配概率的估计值为 $\hat{p}=m/n$，这是经验概率公式，同时也说明了事件 X 在 n 次试验中发生的频率可作为事件 X 的概率估计值。

由贝努里大数定理知，在 n 次贝努里试验中某事件出现的频率 m/n 依概率收敛于该事件出现的概率 P，当试验次数 n 充分大时，事件出现的频率与概率有较大偏差的可能性很小。在实际工程中，这是基于大量的匹配仿真试验，计算正确匹配出现的频率，代替算法匹配概率的理论依据。

2.2 无偏性证明

无偏性表明估计量 $\hat{p}$ 的均值等于待估参数 P，即 P 是 $\hat{p}$ 的可能值的集中位置或散布中心，从而保证在平均意义下估计值 $\hat{p}$ 接近于真值 P。

因为 $E(\hat{p})=E(\hat{\mu})=E(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(EX_i)=\mu=p$，所以 $\hat{p}$ 是 P 的无偏估计量。对估计量的评价标准来说具有有效性和相合性，可以依照定义进行证明。

2.3 估计值精度分析

匹配概率 P 的点估计是用估计值 $\hat{p}$ 作为未知参数的近似值。对近似值应考虑其精度，未知参数 P 的近似值 $\hat{p}$ 的精度可用 $|p-\hat{p}|<\varepsilon$ 或 $p\in(\hat{p}-\varepsilon,\hat{p}+\varepsilon)$ 表示，其中，ε 为一正常数。由于估计量 $\hat{p}$ 是随机变量，它的取值具有随机性，因此，精度表示为 $p\in(\hat{p}-\varepsilon,\hat{p}+\varepsilon)$ 不是绝对成立，而是以一定的概率成立。利用区间估计理论可以定量表示点估计的精度和相应的概率。区间估计的一般思路就是：在给定的较大的置信度 $1-\alpha$ 下，确定未知参数的 P 的置信区间 $(\hat{p}-\varepsilon,\hat{p}+\varepsilon)$，并尽量使区间长度达到最小，即精度最高。

当置信度为 $1-\alpha$ 时，匹配概率P的置信区间为[6]

$$(\overline{X}\pm t_{\alpha/2}(n-1)\frac{S}{\sqrt{n}}) \tag{5}$$

式中，$\overline{X}$ 是样本 $(X_1,X_2,\cdots,X_n)$ 的均值；S 是样本方差；$t_{\alpha/2}(n-1)$ 是指自由度为 $n-1$ 的 t 分布的上侧 $\alpha/2$ 分位数，可通过查表获得。

给定某 2 种算法在相同环境下的匹配仿真试验样本：

$X_a=\{1,1,1,1,1,1,1,1,10,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,10,0,1,01,1,1,1,1\}$

$X_b=\{1,1,0,1,1,1,1,1,11,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,10,1,1,11,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1\}$

取置信度为 $1-\alpha$ ＝0.95，2 种算法的计算结果见表 1。

表 1　试验样本的区间估计结果

样本 X	总试验次数 n	正确匹配次数 m	均值 $\overline{X}$	样本方差 S	估计区间
X_a	30	25	0.833 3	0.023 94	0.833 3 ± 0.008 9
X_b	45	42	0.933 3	0.004 24	0.933 3 ± 0.001 3

可以看出，当试验样本容量达到较大值时，用样本均值作为匹配概率的估计值具有很高的精度，而且可以以很高的概率确信这一点。同时，依据区间估计理论，α 值越小，随机区间 $(\hat{p}-\varepsilon,\hat{p}+\varepsilon)$ 包含 $\hat{p}$ 的概率越大，但区间宽度增大，置信的精度下降。对未知参数进行区间估计就是要在 α 的取值与估计精度上进行优化的折中。

3 序列图像匹配概率估计

序列图像匹配算概率估计问题就是，在已知系统单次匹配概率的前提下，经过 n 次匹配后(即序列图像数目为 n)，求满足系统匹配融合要求的成功匹配次数的匹配概率。

定义序列图像匹配算法的匹配成功率即匹配概率 p_{ser} 为

$$p_{ser}=P\{X\geq k\} \tag{6}$$

式中，X 是一次序列匹配，即 n 次单幅匹配中成功匹配事件出现的次数；k 为满足匹配融合要求的最小匹配成功数。

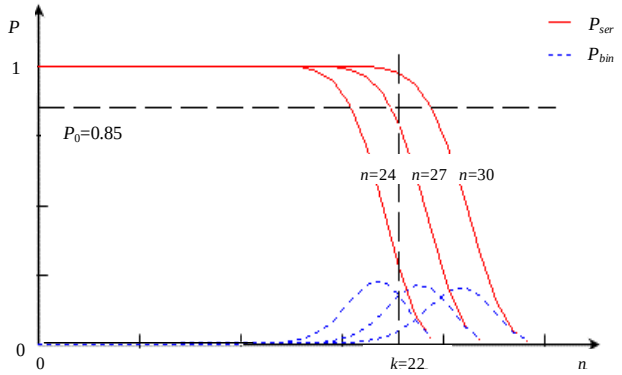
对于匹配概率为 P 的匹配算法，每完成一次独立的匹配过程，其成功匹配事件 X 出现的概率为 P，若进行 n 次重复独立匹配，出现 k 次成功匹配的事件服从二项分布，即 $X\sim B(n,p)$，依据二项概率公式可得其概率分布，即

$$p_{bin}=P\{X=k\}=C_n^k p^k(1-p)^{n-k}\quad k=0,1,2,\cdots,n \tag{7}$$

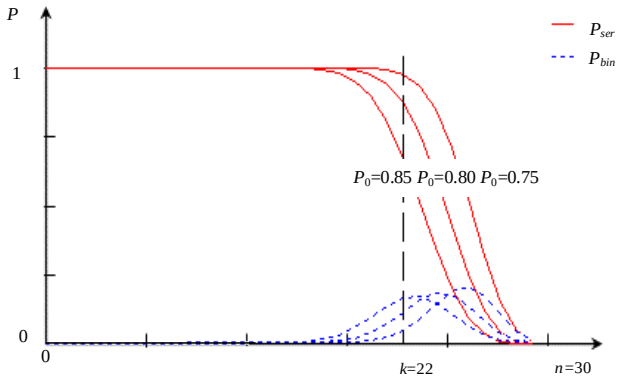
由式(6)、式(7)可得

$$p_{ser}=\sum_{i=k}^{i=n}C_n^i p^i(1-p)^{n-i} \tag{8}$$

这样，当已知单次匹配的成功概率 P 时，依据总的序列匹配数目 n，结合匹配系统对匹配次数的要求，便可计算出系统成功匹配的概率，即序列匹配概率 p_{ser}。显然，序列匹配算法匹配概率与单幅匹配概率 P，匹配序列图像数目 n 及满足匹配融合要求的最小匹配成功数 k 有直接联系。图 1(a)、图 1(b)分别为其关系示意图。



(a)n 变化时的情况



(b)P 变化时的情况

图 1　序列匹配概率分布及二项分布概率曲线

p_0表示单幅匹配概率P。可以看出，当P不变时，取相同的k值时，序列匹配概率 p_{ser} 随着n的增大而增加；当n不变时，p_{ser} 随着P的增大而增大。k值越大，即越接近n，p_{ser} 值越小；当k值较小时，p_{ser} 值很高，接近于“1”。依据这些关系，结合实际的系统工作背景，便可确定合适的n, k。虚线部分是二项分布概率曲线(式(7))，由式(7)、式(8)可知，序列匹配概率

相当于二项分布的累积结果。关于二项分析的性质，这里不再赘述。

4 实例与分析

序列图像匹配算法在精确制导武器如巡航导弹的图像匹配辅助末制导(DSMAC)中，具有广阔的应用前景[5,7]。若设弹上预存的基准图大小为$N\times N=512\times512$(像素)，分辨率r为5m，飞行中捕获的实时图大小为$M\times M=64\times64$(像素)，分辨率与基准图相同(经过预处理)，导弹在末制导阶段的飞行速度v为 300m/s，实时图的捕获频率f为 $0.8s^{-1}$。可以计算出导弹在飞经匹配区(基准图正上方)时，可捕获的实时图序列数目为

$$n\le\frac{M\times r}{v\times f}=\frac{512\times5}{300\times0.8}=10.667$$

取$n=10$，图 2 给出了P_0分别取 0.9, 0.8, 0.7, 0.6(从右至左)时的概率曲线图。表 2 给出了k分别取 4, 6, 8 时各种情况下系统的匹配概率估计值。

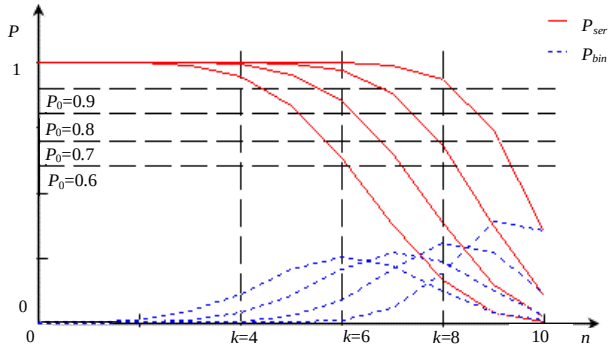


图 2　$n=10$ 时序列匹配概率分布曲线

表 2　$n=10$ 时序列匹配算法概率估计值

P_0	k	P_{ser}
0.9	4	0.999 9
0.8	4	0.999 1
0.7	4	0.989 4
0.6	4	0.945 2
0.9	6	0.998 3
0.8	6	0.967 2
0.7	6	0.849 7
0.6	6	0.633 1
0.9	8	0.929 8
0.8	8	0.677 8
0.7	8	0.382 7
0.6	8	0.167 3

由图 2、表 2 可知，采用序列匹配算法，选择合适的 k 值，系统的匹配概率明显提高。虽然 k 值越小，理论上系统的匹配概率越高，但这并不一定符合实际系统的工作需要。通常只有当 k 值即成功匹配次数达到一定的数量，才能确保系统正常工作。况且当 k 较小时，增加了算法对单次匹配结果的融合复杂度(比如说使如何剔除误匹配点的问题变得更为复杂)，从而使算法的实时性下降。k 的选择应是兼顾匹配概率及融合复杂度的有效折衷，应视具体情况而定。

5 结束语

传感器技术与计算机硬件技术的飞速发展，为序列图像匹配技术在众多领域的应用提供了广阔的空间，例如目标运动状态的估计、遥感图像的自动配准、全景图的生成、图像检索等领域[8]。序列图像匹配与传统的单一匹配模式相比，增加了系统成功匹配的可靠性，是提升系统整体匹配性能的重要途径。该序列匹配算法的概率估计分析方法是在一定的约束条件下成立的(文章在分析时已指出)，在实际中还应注意以下 2 点：

(1)一般意义下匹配算法的匹配概率估计一直是研究的难点问题。只有在匹配概率 P 的估计值相对可靠、准确的前提下，序列匹配算法的概率估计才具有实际意义。这对匹配仿真试验提出了很高的要求，如何使仿真试验的环境条件更逼近实际的序列匹配使用环境是研究的关键点。

(2)依据不同的应用背景，序列匹配结果的融合方法可能不尽相同，此时，序列匹配概率的定义也将有所差别。文中给出的是最基本的模式及其分析思路，对在其他情况下，匹配概率的计算具有指导意义。

参考文献

1 Matthias O. Franz B. Scene-based Homing by Image Matching[J]. Biological Cybernetics, 1998, (79): 191-202.

2 陈朝阳，张桂林，郑云慧. 景像匹配算法的性能评估方法研究[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(3): 38-41.

3 张国忠，沈林成，常文森，等. 互相关景象匹配系统的正确匹配概率研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 30-33.

4 刘　扬，姚娅媚，金善良. 景象匹配正确定位概率的实验研究[J]. 宇航学报, 2001, 22(6): 91-94.

5 殷　飞，桑　农，王　冼. 一种新的序列图像匹配定位算法[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(6): 422-425.

6 郑兴国. 应用概率统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.

7 王永明.连续景象匹配的后处理算法[J]. 宇航学报，2004，25(5): 535-540.

8 Huamei C. Mutual Information Based Image Registration with Applications[D]. Syracuse, NY: Syracuse University, 2002-04.

(上接第 195 页)

10 石纯一，张　伟. Agent 研究进展[Z]. (2006-04). http://ecolab.ruc.edu.cn/blog/index.php.

11 高　翔，林　杰，张　炜. 基于 Agent 的供应链仿真模型设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(32): 183-186, 192.

12 Jonatan G, Nilay S, Lazaros G P. A Combined Optimization and Agent-based Approach to Supply Chain Modeling and Performance Assessment[J]. Production Planning and Control, 2001, 12(1): 81-88.

13 Julka N, Srinivasan R, Karimi I. Agent-based Supply Chain Management-1: Framework. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(12): 1755-1769.

14 霍佳震，张艳霞，倪宏春. 基于供应链的零售商绩效评价体系研究[J]. 工业工程与管理, 2002, 7(6): 9-13.

15 方美琪，张树人. 复杂系统建模与仿真[M]. 北京：中国人民大学出版社, 2005.