

几种图像相似性度量的匹配性能比较

陈卫兵

(南通职业大学 电子工程系, 江苏 南通 226007)

(ntcwb@mail.ntvc.edu.cn)

摘要:针对景象匹配中匹配性能和匹配实时性会受相似性度量选择影响的问题,从常用的相似性度量(归一化积相关、相位相关、均平方差和去均值均平方差)入手,对图像施加噪声和进行畸变(如图像旋转变换、图像比例变化、光照强度变化和云层遮挡等),通过相似性度量匹配性能的仿真试验,从匹配性、适应度和实时性等方面对各相似性度量进行比较,并对结果进行了归纳总结与证明。

关键词:图像匹配;相似性度量;匹配性能

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Comparison of matching capabilities in similarity measurements

CHEN Wei-bing

(Department of Electronic Engineering, Nantong Vocational College, Nantong Jiangsu 226007, China)

Abstract: Image matching performance and real-time capability mostly depend on how to choose similarity measurement method of image matching algorithm. In order to analyze this topic in-depth, the paper carried out a series of simulation experiments for the matching performance evaluation of four similarity measurements (NProd, PC, MSD and equalization MSD) through noise addition and image distortions. The image distortions include picture orientation, image scale change, illumination intensity change, clouds cover, and so on. The experimental results were compared with those from the matching performance, adaptive capacity and real-time capability. Analysis and theoretical demonstration of the results were also given.

Key words: image matching; similarity measurement; matching performance

0 引言

景象匹配技术在飞行器制导定位等领域一直是人们研究的热门课题,具有广泛的应用前景。研究可靠性高、鲁棒性好的图像匹配算法是提高匹配制导性能的有效途径。按照Brown的理论^[1],用于景象匹配各种匹配算法都是4个元素的不同选择的组合:特征空间、相似性度量、搜索空间、搜索算法。其中相似性度量是指衡量匹配图像特性之间相似性的尺度,在景象匹配中占有重要的位置。基于各种相似性度量的算法研究不在少数,但对相应的适用场合没做详细的分析介绍,如何根据参与匹配的实际情况,选择合适的相似性度量,对有效地抑制噪声、畸变干扰,提高匹配概率与匹配精度有重要的意义。

本文通过对几种常用的相似性度量的匹配性能进行仿真并加以分析证明,给出了几种普遍存在的因素对相似性度量的影响以及相似性度量的适应性和实时性,为实际图像匹配应用中选择何种相似性度量提供了理论依据。

1 常用的相似性度量

图像的相似性度量有好多种,但应用广泛,相对成熟的相似性度量可以归结为两大类:距离度量和相关度量。设矩阵 X 为基准图矢量,大小为 $M \times N$, Y 代表实时图矢量,大小为 $m \times n$,则几种常见的相似性度量可表示如下。

1.1 距离度量

距离度量是相比较的两幅图像定义在某种距离意义下的

度量,两幅图像越相似,则距离越小。常用的距离度量有。

1) 平均绝对差度量MAD。

$$D(u, v) = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n |X(j+u, k+v) - Y(j, k)| \quad (1)$$

2) 平均平方差度量MSD。

$$D(u, v) = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - Y(j, k))^2 \quad (2)$$

3) 去均值平均绝对差度量。

$$D(u, v) = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - \bar{X}(u, v) - Y(j, k) + \bar{Y})^2 \quad (3)$$

其中: $\bar{X}(u, v)$ 为基准子图的平均值, \bar{Y} 为实时图的平均值。

4) Hausdorff 距离度量。

Hausdorff 距离度量是适合于二值图像(如边缘特征图像)相似性的度量。给定有限的两个点集 A 和 B , A 和 B 之间的Hausdorff 距离定义为:

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (4)$$

其中: $h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|$, $h(A, B)$ 称有向Hausdorff 距离^[2]。

1.2 相关度量

相关度量是定义在某种相关意义下的度量^[3]。

1) 积相关度量。

a) 归一化积相关度量(Normalized Product, NProd)。

收稿日期:2009-06-25;修回日期:2009-08-04。

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2008188);江苏省六大人才高峰项目(07-E-013)。

作者简介:陈卫兵(1966-),男,江苏南通人,副教授,硕士,主要研究方向:人工智能。

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X(j+u, k+v) Y(j, k)}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X^2(j+u, k+v) \right]^{1/2} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n Y^2(j, k) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

b) 去均值归一化积相关度量。

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - \bar{X}(u, v)) Y(j, k)}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - \bar{X}(u, v))^2 \right]^{1/2} \times \frac{1}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (Y(j, k) - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}}} \quad (6)$$

2) 相位相关度量(Phase Correlation, PC)。

设 $g_r(x, y)$ 为参考图, $g_s(x, y)$ 为实时图, $G_r(u, v)$ 、 $G_s(u, v)$ 分别为它们的 Fourier 变换, 令它们的互功率谱为 $G_r * G_s^*$, 则相位相关函数 R 为:

$$R = F^{-1} \left[\frac{G_r * G_s^*}{|G_r * G_s^*|} \right] = F^{-1} [e^{j(\varphi_r - \varphi_s)}] \quad (7)$$

其中: F^{-1} 表示 Fourier 反变换, φ_r 、 φ_s 分别为两图的相位角^[4]。

2 相似性度量匹配性能的仿真比较

由于相似性度量较多, 进行一一仿真工作量过大, 因此选用最具代表性的四种相似性度量(归一化积相关、相位相关、均平方差, 去均值均平方差)进行仿真研究。

2.1 选用的基准图及截取图

为了便于计算匹配性能(匹配概率、匹配误差), 仿真时选用从基准图截取一小块图像, 添加噪声及施加畸变的方法产生仿真用实时图^[5]。选用的基准图为分辨率 1 m 的某地区可见光卫星照片, 大小为 412 像素 × 419 像素, 如图 1(a) 所示, 从中截取的图像, 大小为 152 像素 × 157 像素, 如图 1(b) 所示。

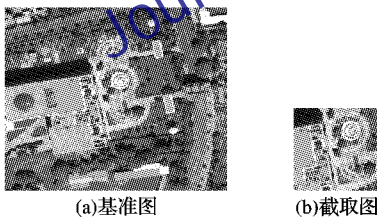


图1 仿真所用的基准图像及截取图像

2.2 选用的噪声及畸变模型

为了能够尽可能地反映基准图与实时图的差异, 仿真选用式(8)所示的噪声及畸变模型。

$$Y(j, k) = \alpha X(u_0 + j + \delta_j, v_0 + k + \delta_k) + n(j, k) \quad (8)$$

其中: X 为基准图矢量, Y 为实时图矢量, 基准图与实时图差异除了具有位置平移(u_0, v_0) 外, 还存在随机噪声 $n(j, k)$, 灰度畸变 α , 以及比例缩放、旋转等畸变引起位置的微小变化 δ_j 、 δ_k 等。

2.3 噪声及各种畸变的仿真

2.3.1 图像噪声的仿真

图像的噪声是以式(8)中 $n(j, k)$ 的值来体现的, 仿真时, 取 $n(j, k)$ 为均值是 0, 方差为 σ 的随机噪声。其实, 若 $n(j, k)$ 不服从均值为 0, 实时图经过过去均值预处理后, 噪声就会变为

均值为 0, 因此仿真时对均值不为 0 的噪声不作考虑。

对截取图添加均值为 0, 方差 σ 为 0.032、0.072、0.149、0.200 产生的模拟实时图如图 2 所示。

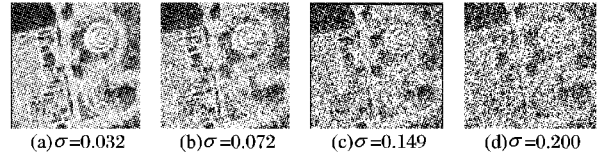


图2 添加噪声的仿真用实时图

2.3.2 图像旋转变化的仿真

景象匹配导航中, 由于惯性仪表的测量误差, 拍摄的实时图与基准图总存在一定的角度偏差, 这种偏差可用对截取图施加旋转变化来仿真, 但是不能直接从截取图中旋转得到, 因为截取图直接旋转会使截取图变大, 且存在空白信息。采取的措施是: 记下截取图的大小及其中心位置; 以此位置为中心, 重新在基准图上截取一块较大的图像, 以保证旋转后实时图大小的区域内没有空白区域; 对该截取图旋转; 对旋转后的图像中心截取实时图大小的一块图像即得具有旋转畸变的实时图。

采用上述方法所得具有旋转畸变的实时图如图 3 所示。

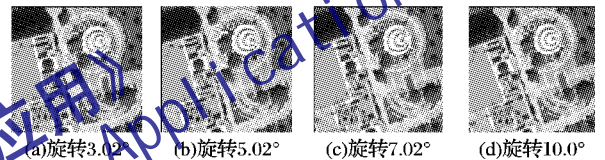


图3 图像旋转的仿真用实时图

2.3.3 图像比例变化的仿真

景象匹配导航中, 由于测高系统存在测量误差, 拍摄的实时图经过比例校正后, 仍然存在一定大小的比例误差, 这种误差可采用对截取图施加缩放来仿真, 具体措施为: 记下截取图的大小及其中心位置; 以此位置为中心, 重新在基准图上截取一块较大的图像, 以保证缩小后实时图大小的区域内没有空白区域; 对该截取图缩放; 对缩放后的图像中心截取实时图大小的一块图像即为畸变的实时图。采用上述方法所得具有缩放畸变的实时图如图 4 所示。

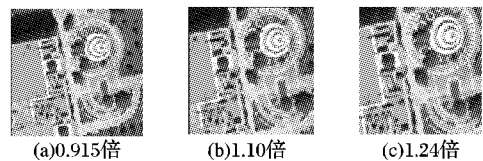


图4 具有缩放畸变的仿真实时图

2.3.4 光照强度变化的仿真

拍摄基准图与实时图的时间的不同, 天气不同, 都会造成光照强度的变化, 表现为在基准图与实时图灰度值的变化, 即式(8)中 α 的变化, α 取不同值所得的仿真用实时图如图 5 所示。

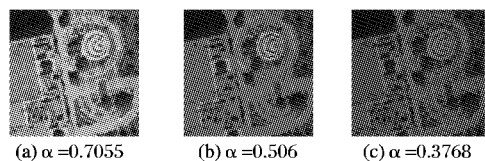


图5 光照强度变化的仿真用实时图

2.3.5 云层遮挡的仿真

景象匹配导航中, 拍摄实时图时, 出现云层遮挡的情况也

不可避免,可采取从截取图中去掉一部分图像来仿真云层遮挡的情况。所得的仿真用实时图如图 6 所示。

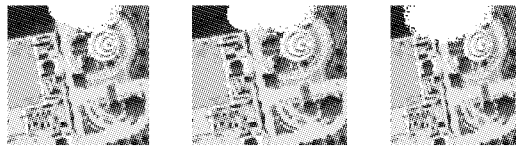


图 6 云层遮挡的仿真用实时图

2.4 仿真结果

对截取图分别施加噪声及畸变用不同相似性度量进行匹配的结果如表 1 所示。其中:匹配误差,即匹配到的位置(u_1, v_1)与截取位置(u_0, v_0)之间的距离

$$\varepsilon = \sqrt{(u_0 - u_1)^2 + (v_0 - v_1)^2}$$

度量值为匹配点的度量值,对于相关度量为相关曲面的峰值,对于距离度量为距离曲面的峪值。有下划线的结果表示明显的误匹配。

表 1 实验结果

畸变类型	畸变值	实时图	匹配误差				度量值			
			NProd	相位 相关	MSD	去均值 MSD	NProd	相位 相关	MSD ($\times 10^7$)	去均值 MSD ($\times 10^7$)
添加 噪声	0.032	图 2(a)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.967 52	0.123 32	1.555 40	1.555 30
	0.072	图 2(b)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.936 62	0.094 47	3.053 90	3.046 70
	0.149	图 2(c)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.897 43	0.068 62	5.040 40	5.019 70
	0.200	图 2(d)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.875 65	0.060 92	6.127 80	6.088 60
旋转	3.02°	图 3(a)	1.000 00	3.162 30	1.000 00	1.000 00	0.960 10	0.039 14	1.846 00	1.846 60
	5.02°	图 3(b)	3.605 60	4.472 10	3.605 60	3.605 60	0.947 67	0.041 39	2.421 30	2.421 10
	7.02°	图 3(c)	5.385 20	5.831 00	5.385 20	5.385 20	0.941 44	0.044 22	2.701 80	2.701 70
	10.00°	图 3(d)	8.062 30	8.062 30	8.062 30	8.062 30	0.927 60	0.024 63	3.336 60	3.336 50
缩放	0.915	图 4(a)	3.162 30	4.472 10	3.162 30	3.162 30	0.917 47	0.013 90	2.513 90	2.506 40
	1.100	图 4(b)	2.236 10	10.770 30	2.236 10	2.236 10	0.944 66	0.013 68	3.618 60	2.611 00
	1.240	图 4(c)	<u>118.330 00</u>	8.602 30	<u>118.330 00</u>	<u>118.330 00</u>	0.924 56	0.015 60	3.809 80	3.784 10
光照 变化	0.705 5	图 5(a)	0.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	0.993 84	0.151 13	0.222 51	0.488 77
	0.506 0	图 5(b)	0.000 00	1.000 00	151.604 70	1.000 00	0.993 84	0.151 13	0.293 94	0.935 74
	0.376 8	图 5(c)	0.000 00	1.000 00	<u>157.784 00</u>	<u>155.605 00</u>	0.993 84	0.151 13	0.370 11	1.858 90
云层 遮挡	9%	图 6(a)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.937 85	0.092 99	0.175 22	1.565 20
	13%	图 6(b)	0.000 00	0.000 00	0.000 00	818.472 90	0.938 87	0.080 74	0.208 73	0.181 57
	20%	图 6(c)	<u>237.785 00</u>	0.000 00	<u>235.136 10</u>	<u>239.420 10</u>	0.938 87	0.080 74	0.208 73	0.181 52

3 分析与证明

通过分析仿真结果得到如下结论:

1) 添加噪声不会影响匹配性能。

从仿真结果可以看出,添加噪声后利用各种相似性度量匹配结果的误差都为 0,即使噪声添加到使图像人眼都分辨不出来,匹配误差仍然为 0。

$$\begin{aligned}
 D(u, v) &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - Y(j, k))^2 = \\
 &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - (X(u_0+j, v_0+k) + n(j, k)))^2 = \\
 &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - X(u_0+j, v_0+k))^2 + \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n n(j, k)^2 - \\
 &= \frac{2}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - X(u_0+j, v_0+k))n(j, k) = \\
 &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (X(j+u, k+v) - X(u_0+j, v_0+k))^2 + \delta^2 - 0(\cdot)
 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $0(\cdot)$ 表示近似为 0,因此 $D(u, v)$ 与噪声无关。而对于归一化积相关有:

$$\begin{aligned}
 R(u, v) &= \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X(j+u, k+v) [X(u_0+j, v_0+k) + n(j, k)]}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X^2(j+u, k+v) \right]^{1/2} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n [X(u_0+j, v_0+k) + n(j, k)]^2 \right]^{1/2}} = \\
 &= \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X(j+u, k+v) X(u_0+j, v_0+k) + 0(\cdot)}{\left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X^2(j+u, k+v) \right]^{1/2} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n [X(u_0+j, v_0+k) + n(j, k)]^2 \right]^{1/2}}
 \end{aligned} \quad (11)$$

(下转第 110 页)

精确匹配,匹配的成功率得到了提高,由此,将更多的资源纳入为任务选择的范围内,使得系统在吞吐量、任务满足率和资源调度率上均有所提高。就失败率来看,供求基本平衡和供不应求两种情况下分别增长了0.35%和0.80%,这和其他参数的增长相比较,增长幅度甚微,是可承受的。它反映出用户在QoS参数的理解上的模糊性和不确定性,导致一般在定义中提出略高的要求,因此,软化几乎对QoS没有影响。

最大匹配算法从两个方面取得了进展:1)在满足QoS需求的基础上,适度扩大了资源选择范围,减少了因为QoS参数而导致的匹配问题,使得资源调度率和任务满足率提高;2)确定了依照QoS选择资源的优先顺序,为任务选择了适当的资源,而非当前网格中最好的资源,使系统工作在最优状态,由此进一步提高系统的可用性。与传统经典算法比较,最大匹配算法在任务一级取得了次优解,但在系统一级得到更优解。算法有利于克服网格中因自私性带来的缺点,在用户和系统效率之间取得折中,更有利于系统的稳定和健壮,尤其适用于资源供不应求状态下。

4 结语

本文立足于网格用户对QoS参数的模糊性和不确定性,按照参数性质,将其分为刚性参数和弹性参数。针对弹性参数,进行了软化处理,使其在不失定性含义的前提下,扩展了资源选择的范围,提高了任务和资源在QoS参数上的匹配率,由此提高系统的吞吐量,实现网格系统的调度优化。实验

证明,对QoS的软化处理提高了系统吞吐量和资源匹配成功率,最终实现了整个系统资源调度率的提高。

参考文献:

- [1] ALOISIO G, CAFARO M, EPICOCO I, *et al.* Resource and service discovery in the iGrid information service[EB/OL]. [2009-06-15]. <http://www.gridlab.org/WorkPackages/wp-10/Documents/igrid-iccsa.pdf>.
- [2] BRADLEY A, CURRAN K, PARRZ G. Resource discovery and management in computational GRID environments[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2007, 19(6): 639-657.
- [3] CHEN P, XU Z, ZHANG B. A solution to QoS control and availability promotion in complex grid computing[C]// *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Networks*. New York: IEEE, 2004: 403-407.
- [4] LI CHUNLIN, LI LAYUAN. Utility based multiple QoS guaranteed resource scheduling optimization in grid computing[C]// *Proceedings of the International Conference on Computing: Theory and Applications*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 165-169.
- [5] BUYYA R, ABRAMSON D, GIDDY J. Nimrod/G: An architecture or a resource management and scheduling system in a global computational grid[C]// *Proceedings of the 4th International Conference/Exhibition on High Performance Computing in the Asia-Pacific Region*. New York: IEEE, 2000: 283-289.
- [6] PLESINS R, VILUTIS S, SANDONAVICIUS D. The measurement of grid QoS parameters[C]// *Proceedings of 29th International Conference on Information Technology Interfaces*. New York: IEEE, 2007: 703-707.

(上接第100页)

可见式(11)的 $R(u, v)$ 与式(6)具有相同位置的峰值点,即添加噪声也不影响NProd度量的匹配概率。

2)相关度量对于光照强弱的变化不敏感,而距离度量却比较敏感。

实时图和基准子图的相似程度可以直观地从两图的图像矢量在欧氏空间的几何关系得出来。

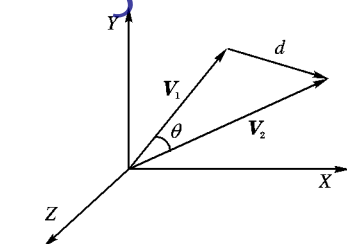


图7 向量 V_1 和 V_2 在欧氏空间的关系图

如图7所示,若实时图 $Y(j, k)$ 相当于向量 V_1 ,基准子图 $X(u + j, v + k)$ 相当于向量 V_2 ,则平方差度量 $D(u, v)$ 相当于 d ,归一化积相关度量 $R(u, v)$ 相当于 θ 。由此关系可以看出,光照强弱只影响 V_1 的模,从而影响 d 的变化,而不引起 θ 的变化,因此光照变化会引起距离度量的误匹配,而对相关度量没有影响。这与仿真结果相符。

3)相位相关度量对于云层具有较高的适应能力。

以上仿真都基于灰度的匹配算法,其中相位相关舍去了图像的能量信息,与图像的边缘密切相关,云层遮挡影响了实时图的灰度分布情况,对NProd、MSD和去均值MSD算法影响较大,但云层遮挡只是使实时图减小,其遮挡部分包含了很少的边缘信息,减小后的实时图包含的信息也足以使相位相

关算法正确找到匹配位置。

4)对于旋转、缩放等畸变,几种相似性度量都比较敏感。

对实时图施加旋转、缩放畸变,各种相似性度量都不同程度地出现了匹配误差,甚至误匹配,可见旋转、缩放畸变是影响匹配概率的主要因素,因此要尽量消除旋转、缩放畸变后再进行匹配,才能取得较好的匹配性能。

4 结语

不同的相似性度量对于不同的畸变类型适应度不同,在进行景象匹配时,应根据主要的畸变类型选择适应度比较强的相似性度量。若对于各种畸变的影响综合衡量,相关度量优于距离度量,但相关度量的计算量大于距离度量,因此选择相似性度量时还要考虑是否能达到实时性要求。

参考文献:

- [1] BROWN L G. A survey of image registration techniques[J]. *ACM Computer Surveys*, 1992, 24(4): 325-376.
- [2] 赵锋伟, 沈振康, 李吉成. 景象匹配技术研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(12): 111-114.
- [3] YANG X G, MIAO D, CAO F. Study on the matching similarity measure method for image target recognition[C]// *The 2nd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Berlin: Springer, 2005: 289-292.
- [4] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: A survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 21(11): 977-1000.
- [5] 钟声伟, 王玉珍, 屈志毅. 图像拼接中特征块的选取[J]. *计算机工程*, 2002, 28(9): 165-167, 232.