

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0627-05

图像融合技术研究的最新进展

刘松涛¹, 周晓东²

(1. 大连舰艇学院信息与通信工程系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 图像融合是把同一场景从不同特性、不同时间、不同分辨率传感器获得的多幅图像综合成一幅图像的先进图像处理技术。该技术可以广泛应用在医学、遥感、计算机视觉、气象预报及军事目标识别等多个领域。介绍了当前图像融合技术的一些最新进展, 指出了图像融合技术可能的发展方向。

关键词: 图像融合; 性能评价; 目标识别和跟踪

中图分类号: TP251

文献标识码: A

Recent Development of Image Fusion Techniques

LU Song-tao¹, ZHOU Xiao-dong²

(1. Dept of Information & Comunication Engineering, Dalian Naval Academy, Dalian 116018;

2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Control Engineering Dept, Yantai 264001, China)

Abstract: Image fusion is an advanced image processing technology. It can integrate several images of the same scene which captured by several different (i.e., features, time, resolution) sensors into one image. It is widely used in the regions of medicine, remote sensing, computer vision, weather forecast, and military target recognition, etc. In the paper, some recent development of image techniques are reviewed and furthermore, the possible directions of further research are pointed.

Key words: image fusion; performance evaluation; target recognition and tracking

1 引言

图像融合作为一个新兴的学科体系正在不断发展中, 在许多方面已经取得了比较满意的成绩, 研究者们从各个不同的应用领域, 提出了多种不同的图像融合方法。但是, 相对于图像处理其他领域的研究而言, 图像融合技术的研究还刚刚开始, 还没有统一的定义、成熟的理论和方法, 有许多问题急需解决, 一个系统成熟的学科体系还没有形成。

近二十多年来, 国内外学者对图像融合技术进行了大量研究。国外, 以美国为代表的技术发达国家, 图像融合技术遥遥领先, 具有代表性的机构是美国 MIT 林肯实验室和荷兰的人力因素所, 专著是《多传感器图像融合及其应用》^[1], 系统是 2002 年获得了专利的可以融合可见光、近红外和远红外的像素级图像融合系统^[2]。国内, 图像融合技术主要处于算法理论研究阶段, 有关实用图像融合系统的研制正在开发中。北京理工大学是国内最早开展系

统性图像融合技术研究的单位。概括地说, 当前国外图像融合系统的研究已从理论逐渐转向工程, 而国内还处在理论探讨阶段。

按信息抽象的程度, 图像融合可以分为三个结构层次: 像素级图像融合、特征级图像融合和决策级图像融合。本文重点介绍像素级图像融合的最新进展, 这是最有别与传统信息融合的地方。

2 图像融合技术新进展

2.1 图像融合理论框架

不同级的融合试验表明每一级都有典型的属性, 并拥有某种典型的融合方法。但是所有这些方法肯定有一个共同的原理, 这促使研究一个通用的

基金项目: 国防预研基金资助项目 (No. 51403030604JB1401)。

作者简介: 刘松涛 (1978 -), 男, 博士研究生, 主要从事图像融合, 目标识别, 成像跟踪, DSP 开发等研究工作。E-mail: navylst@sohu.com

收稿日期: 2006-02-26

数学模型来抽象这些过程。最后,将这个融合模型纳入到一个复杂的图像理解系统中,这也是图像融合的最终目的^[3]。文献[4]给出了一个统一的图像融合框架,在这个框架下可以分类、比较和评估现存的图像融合算法,统一模型中 LRPI(低分辨率全景图像)如何计算以及调制系数值为多少决定了不同的图像融合算法。

2.2 系统集成

图像融合算法是一个图像融合系统的核心,然而,在一个图像融合系统中,其它许多过程也起着非常重要的作用,值得详细考虑,比如:系统集成问题,它是研制一个实时图像融合系统所关联的实际问题,可以说优于开发更复杂或难以理解的像素级融合算法,但迄今为止,在图像融合领域中很少有人考虑这些方面。

实时融合系统需要考虑的一个基本的、重要的问题是系统反应时间,也就是说,从一个场景被相机成像到可得到融合结果输出的持续时间。一些情况下,可以允许大的反应时间(即多帧),但是大多数实时系统中允许的系统反应时间是很短的(单帧最理想,现实中也可几帧),这也往往是一个系统设计的主要动力。所以说,算法设计师是有风险的,虽说设计了一个性能良好的融合算法,但常常由于反应时间不能接受而不能被实际采用。

2.3 统计学方法

统计学方法首先把融合图像间或一些特征间的关系用模型表示,模型可以含有噪声以及一些未知参数。这种方法可以有监督的,也可能是无监督的。有监督时,通过训练步骤,或预处理步骤可以估计图像模型的参数;无监督时,这些参数可以通过数据本身估计。该方法也可视为一个优化问题,比如:在贝叶斯优化中,目的是找到使后验概率最大的融合图像;在马尔科夫随机方法中,输入图像被建模为马尔科夫随机场,并定义一个代价函数来描述融合的目标,用全局优化策略(模拟退火)来最小化这个代价函数。

文献[5]提出了一种基于期望值最大的图像融合方法。该方法首先假设图像对场景的成像模型。以期望值作为目标函数,通过使目标函数最大的方法确定该模型的参数,估计出真实场景,进而得到理想的融合图像。进一步,文献[6]将模糊数学理论引入到图像融合模型。该模型假定理想的融合后的图像包含场景所有的信息;将它乘上一个模糊因子,再加上随机噪声,可用来描述某一个成像传感器中获得的场景图像;不同的传感器对应不同的模糊因子和噪声。在此基础上,提出了建立在非多尺度分解框架下的图像融合算法。它以各传感器获取的图

像作为输入条件,应用统计信号处理中的 EM 算法,求出针对不同传感器的噪声参数和模糊因子,通过迭代估计出融合的图像。这两种方法避免了诸如像素平均法、加权平均法等算法融合效果差,又克服了多尺度融合法运算量大的缺点,均获得了满意的融合效果和较少的算法处理时间。

文献[7]通过对观测图像进行基本的、合理的数学建模来研究图像融合。模型试图表征问题的统计学方面,包括随机扭曲(比如噪声)的影响。图像融合问题被看作一个估计问题,其中最好的融合算法使融合图像和真实场景之间的均方误差最小。首先在模型所有参数都已知的前提下描述了最优的图像融合方法。接着又针对实际情况下,模型的各种参数是未知的,提出了一个鲁棒的图像融合方法。结果显示,鲁棒融合方法产生的均方误差总小于给定的临界值,因此,在未知确切模型参数的情况下降低了损失。它们的结果进一步显示,忽略不同传感器噪声之间的相关性是一种鲁棒的方法,这在其它文献中还没有被验证过。

伪 Wigner 分布函数的重要特征是直接逐像素操作,平移不变,并能够时频图像表示,特别适合于图像处理。文献[8]提出一种基于一维伪 Wigner 分布函数的多聚焦图像融合算法,并声称优于现有的所有方法。而 Renyi 熵可以定量评估不同分布的性能,从而可以在时域或频域自适应地选择参数,以达到最优的多聚焦和多传感器图像融合^[9]。

2.4 新的分解方法

(1) 矩阵分解法

文献[10]认为从不同传感器获取的图像,可以看作是融合图像乘以不同的权重,故可以使用非负矩阵分解技术来进行图像融合。

(2) 易操纵金字塔分解

易操纵金字塔是一种多尺度、多方向、并具有自转换能力的图像分解方法,它把图像分解成不同尺度、多方向。与小波变换不同,它不止三个方向的子带系列,不仅保持了紧支集正交小波的特点,而且具有平移不变性及方向可操纵等优点。使用基于拉普拉斯变换、小波变换的融合方法,即使待融合的图像间存在较小的配准误差,也会引起融合图像的严重退化,出现双边缘以及虚假成分,而基于易操纵金字塔的融合方法能够克服这些缺点。

(3) Hermite 变换^[11]

由于 Hermite 变换基于高斯梯度算子,所以对图像融合来说,具有更好的图像表示模型。

(4) 局部余弦基

局部基将时间轴划分成不同大小的时间片断。

特别引人注意的是余弦基,它可以通过设计覆盖每个时间片断的平滑窗口和用不同频率的余弦函数相乘得到。通过迭代基于局部余弦基的分割空间可以构造局部余弦树,这提供了为特定信号选择最优基的方法。最好的局部余弦基使时间分割的片断随自适应信号时频结构的变化而变化。

注意到小波包和局部余弦是对偶基。小波包分割频率轴,一致地变换到时间域,而余弦基分割时间轴,一致地变换到频率域。通过这两个概念结合,人们可以得到时频平面的任意分割。

(5)脊波 (ridgelets)和曲线波 (curvelets)

和小波相比,脊波和曲线波有更好的方向性,并且各向异性。所以,curvelets在边缘表示方面优于小波。文献[12]将curvelet应用于多光谱图像和全景图像的融合,结果具有更丰富的空间和光谱信息。

2.5 神经视觉生理学方法

美国麻省理工学院林肯实验室的 A. M. Waxman利用对抗受域(仿响尾蛇双模式细胞工作机制),提出了微光夜视图像和红外图像的对抗融合。

荷兰人力因素所的 A. Toet提出的另一种伪彩色的可见光图像和红外图像融合方法,也是一种仿生的颜色对抗(Color Opponent)方法。

国内北京理工大学利用神经视觉生理学进行像素级图像融合及其彩色显示工作正处于世界前沿领域^[13]。

2.6 图像融合与图像处理算法的互相结合

融合图像可以提供比单传感器图像更可靠和完整的场景表示。但是,几乎所有的融合算法都是基于基本的处理技术,没有考虑高层的抽象信息。正如近来研究表明,这些算法已不能满足人员观察者的复杂要求,需要开发更具有主观意义的方法。为此,文献[14]提出了一个新的框架,其基本思路是如果用高层的信息,比如图像边缘和图像分割的边界用来指导基本的像素级融合过程,就能够实现更具有主观意义的算法。和传统的两个像素级融合方法比较表明,多层融合结构消除了不利的影响,比如融合干扰物、丢失重要的可视信息,且融合过程更可靠,图像变得更清晰,图像质量也更好。这些结论通过主观评估和已建立的融合性能客观评估方法已得到证实。

2.7 基于成像物理模型的融合方法

近来,随着各种不同物理成像机理图像传感器的出现,以及对这些传感器之间物理特性的联系深入研究,图像融合的研究开始考虑直接使用基于成像物理模型的融合方法。文献[15]提出了一种新的融合方法,克服了现存方法的一些缺点。首先对

传感器成像过程建模,包含了噪声、局部对比度反向和特征不匹配,然后,依据概率融合规则,并结合图像的先验信息进行融合。

2.8 自适应优化图像融合研究

图像融合的过程是从多个源图像中提取和综合信息的过程。如何实现信息的最大限度地提取,如何才能使提取的信息最重要、最有效,都是很值得研究的问题。另外,自适应图像融合也是一个研究方向,要求有一个策略来决定算法在何时,以及如何满足特定的融合目的。将图像融合效果评价的信息加入到融合规则的选取和参数的选择过程中,可以更充分地利用信息源提供的信息,会得到比开环图像融合过程更好的效果。文献[16]提出了一种先进的离散小波变换图像融合算法,有两个参数可调,分别为分解的层数和选择小波的长度,这两个参数决定了图像融合的质量,然后通过质量评价因子迭代优化融合过程,达到最优融合。进一步,文献[17]通过集成客观融合指标到传统的图像融合算法构建了新框架,该框架可以自适应调整融合参数达到最优的融合显示。

2.9 多级图像融合

对于像素级融合而言,作为一个广义上的图像预处理,对目标探测识别的贡献很有限,而且应用也很受限。如欲从图像融合中获得目标的更多信息,如目标分类、属性、威胁估计等,就需要特征级融合乃至决策级融合。另外,在许多应用中,要实时地进行像素级融合是困难的,此时也要选择决策级和特征级图像融合。文献[18]还认为在低信噪比条件下点目标几乎没有形状、大小及纹理特征,灰度特征也不够明显,像素级融合方法容易在融合阶段把有用的互补信息丢失,因此,推荐基于图像融合的点目标识别最好在特征级上进行。我们认为,为了使图像融合在目标识别和跟踪时具有更广泛的适应性,有必要研究像素级、特征级和决策级图像融合的组合问题。文献[19]针对远距离低信噪比条件下目标检测难的实际问题,已提出了一种基于多传感器多级信息融合的目标检测方法,其算法包括两个部分:特征级融合和决策级融合。

2.10 融合效果评价

对确定融合算法的优点和比较不同融合算法的结果来说,效果评价都是重要的。另外,对具体融合算法,为了得到最优参数设置,效果评价也是必须的。

(1)融合效果的视觉特性评价

某些客观测度,虽然具有很好的理论基础,但是有时它与人眼的感知会有偏差。文献[20]基于人类视觉系统,提出了一种基于空域局部信息和频域

对比度灵敏度函数的评估算法。

(2) 主观和客观评价结合的方法

客观的评价方法离不开主观评价,主观评价与客观定量评价标准需要相结合进行综合评价,即对融合图像质量在主观定性的目视评价基础上,进行客观定量评价。文献 [21] 详细描述了如何进行图像融合效果评估的主观实验,并定义了清楚的主观和客观互相验证算法,给出了一系列客观评估因子的主观验证方法。

(3) 含噪声图像融合效果评价

常见的融合质量评估方法都假定源图像中没有噪声。在实际系统中,通常不是这样的,所以这些评估方法是无效的。Perovic 为解决这个问题,把一系列新颖的噪声度量引入他们自己的融合效果客观评估方法中,改进的度量方法被用来评估各种各样图像融合方案以及存在大量和不同类型噪声情况下特征选择和信息融合的性能与鲁棒性^[22]。结论是:先进的多分辨率融合方案容易在融合图像中保留或增加噪声的水平,而简单的平均方法对抑制噪声是有效的。相似地,简单的全局算术融合规则(加权平均)比先进的局部选择规则在有噪声时融合效果要好。这项研究表明,研究标准的对输入噪声鲁棒的多分辨率融合方案还需做进一步的努力。

(4) 分析评价

人们比较关注发展合适的融合图像的实验评价方法。给定一组源图像和几个融合算法,目的是如何决定哪个融合算法最适合给定的应用。如此的实验程序是非常重要的,但是,实验方法有一些固有的限制。比如:实验方法仅仅对选定的图像集有效。也就是说,实验结果不可能教条地应用在比考虑的图像集更大的场合,实验评价只能适合给定条件下的有限的具体例子。因此,想通过实验评价来证明一个融合方法总是好的思路是不可行的。而使用分析的方法很容易同时研究所有情况,能够以任何想要的方式改变任何或所有的参数。使用数学分析,人们甚至能从理论上分析最好融合方法的性能,这是通过实验的方法所不能够实现的。因此,使用实验评价时,分析评价可以很好地弥补实验评价从未解决的问题。

当前,图像融合研究者开始运用理论分析的方法来进一步增强实验评价的结果,但还没有引起应有的重视。文献 [23] 可能是第一次尝试。应当指出,他们对图像融合分析评价的方法只是做了初步探讨,有待用更综合的模型来分析研究。

2.11 硬件实现

随着技术进步、系统小型化和需求的增多,图像

融合产品越来越多,但当前商业上可得到的图像融合产品很少。多数是通用的硬件卡,比如 Samoff 提供的,而且大多产品仅是为了图像融合(可能还需人工图像配准)。比较突出的是 Octec 的 ADEPT60-IFP,它包含了两个传感器的视频跟踪和图像融合,其功能不仅包括简单的加权平均融合和高性能的多分辨率融合,还有图像预处理和图像配准模块。

图像融合的实现是困难的,有必要加大力度研究图像融合技术的实际工程实现方法,开发能够实现各种复杂融合算法的处理硬件,以便在数据获取的同时就实时地完成融合。

2.12 基于图像融合的目标识别和跟踪算法研究

传统的目标识别和跟踪算法都是基于单传感器图像的,此类算法存在着一个很大的问题,即目标的误判和漏判。误判和漏判的主要原因是,单传感器图像对于目标的描述不够充分,提供的信息达不到识别的目的。针对这个原因,多传感器图像融合识别是一个很好的解决途径。

当前,利用多传感器图像融合来解决目标识别和跟踪的难题是一个研究热点。文献 [24] 针对双色红外成像系统提供的目标图像信息,分别在红外弱小目标的检测和识别阶段,采用多传感器信息融合理论对来自两个不同波段的红外图像进行特征级和决策级数据融合,并提出了“OR/AND”表决融合检测法和基于 D-S 证据理论和模糊综合的目标识别融合算法。A. Toet^[25]等在通过双波段图像检测海面上的浮雷和小艇时,使用了和文献 [24] 相似的方法。

3 发展趋势

以前多分辨率分解图像融合方法,重点在图像融合规则的制定上,从基于像素选取,到基于窗口,再到基于区域都作了深入细致的研究,但对图像的多分辨率分解方式没有给予足够的关注。实际上,一个有效的、适于图像融合的多分辨率表示形式,对融合结果的优劣有着至关重要的影响。另外,对某种多分辨率表示形式,不同的分解层数有着不同的融合结果,而且并不是分解层数越多融合结果就越好,所以需要研究分解层数对融合图像的影响及如何选取合适的分解层数。最后,不同的多分辨率分解和融合规则的结合会产生不同的性能,现在还缺乏对此的详细研究。

目前,大多数图像融合算法只是针对静止图像,对于序列图像,其图像间存在着强相关性,对序列图像的融合要充分利用这一点,此外还要考虑序列图像融合所需要的实时性。序列图像融合要求^[26]:

(a) 时间序列上稳定。融合的序列图像在时间上是

稳定的,也就是说,融合序列图像的灰度变化仅仅是由输入序列图像的灰度变化引起的,决不能是融合算法引起的;(b)时间序列上一致。输入序列图像的灰度变化必须没有延迟或对比度变化的出现在融合序列图像中。经验表明,对单帧图像效果好的图像融合算法未必在连续条件下也合适。所以,一个图像融合算法应该在不同环境条件下具有灵活性和适应性,用户为了最优化融合效果,应该可以改变融合参数,保证待融合图像可以有更广泛的结合方式。

像素级图像融合方法通常概括为两大类:单分辨率方法和多分辨率分解方法。但无论重点在单分辨率图像融合方法,还是在基于多分辨率分解的图像融合方法,并不是说就提倡这种类型的方法,而排斥其它类型的方法。不同类型方法的结合应该是最有希望的。比如:在遥感图像融合中,HIS技术是最常用的,小波融合法是讨论最多的,但这两种方法都有颜色扭曲的问题,文献[27]把这两种方法结合起来,明显降低了融合结果中的颜色扭曲现象。

参考文献:

- [1] R S Blum, Z Xue, Z Zhang Multisensor image fusion and its applications[M]. CRC Press, 2005.
- [2] Zhang E, J S Zhang, V W Song Pixel-by-pixel VIS-NIR and LIR sensor fusion system[A]. Proceedings of SPIE, 2003, 4820: 535 - 549.
- [3] Pinz Axel, Renate Bartl Information fusion in image understanding[J]. Proc of IEEE, 1992: 366 - 370.
- [4] Wang Zhijun, Djemel Ziou, Costas Amenakis, et al A comparative analysis of image fusion methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(6): 1391 - 1402.
- [5] 刘刚,敬忠良,孙韶媛.基于期望值最大算法的图像融合[J].激光与红外,2005,35(2):130 - 133.
- [6] 曹治国,王文武.应用统计信号处理和模糊数学的图像融合算法[J].光电工程,2005,32(5):73 - 75.
- [7] Blum Rick S Robust image fusion using a statistical signal processing approach[J]. Information Fusion, 2005, (6): 119 - 128.
- [8] Gabarda Salvador, Gabriel Gristó bal Multifocus image fusion through pseudo-Wigner distribution[J]. Optical Engineering, 2005, 44(4): 047001(1 - 9).
- [9] Gabarda Salvador, Gabriel Cristóbal The Renyi entropy as a decision measure for a pseudo-Wigner distribution image fusion framework[A]. Proceedings of SPIE, 2005, 5910: 1 - 11.
- [10] 苗启广,王宝树.基于非负矩阵分解的多聚焦图像融合研究[J].光学学报,2005,25(6):755 - 759.
- [11] López-Caboa Alejandra A, Franz Mora, Boris Escalante-Ramírez Mapping and characterization of urban forest in Mexico City[A]. Proceedings of SPIE, 2004, 5239: 522 - 531.
- [12] Choi Myungjin, Rae Young Kim, Myeong-Ryong Nam, et al Fusion of multispectral and panchromatic Satellite images using the curvelet transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 136 - 140.
- [13] 倪国强,戴文,李勇量,等.基于响尾蛇双模式细胞机理的可见光红外图像彩色融合技术的优势和前景展望[J].北京理工大学学报,2004,24(2):95 - 100.
- [14] Petrovic Vladimir Multi-level image fusion[A]. Proceedings of SPIE, 2003, 4820: 679 - 688.
- [15] Shama Ravi Krishna Probabilistic Model-based Multi-sensor Image Fusion[D]. USA: Oregon Graduate Institute of Science and Technology Doctor's Thesis, 1999.
- [16] Zheng Yufeng, Edward A Essock, Bruce C Hansen Advanced discrete wavelet transform fusion algorithm and its optimization by using the metric of image quality index[J]. Optical Engineering, 2005, 44(3): 037003(1 - 12).
- [17] Petrovic Vladimir, Tim Cootes Objectively adaptive image fusion[J]. Information Fusion, 2005, In Press.
- [18] 马治国,王江安,雷选华,等.基于红外双波段图像融合的点目标识别[J].激光与红外,2003,33(3):228 - 230.
- [19] 李秋华,李吉成,沈振康.一种基于多传感器多级信息融合的红外目标检测方法[J].电子与信息学报,2004,26(11):1700 - 1705.
- [20] Chen Hao, Pramod K Varshney A perceptual quality metric for image fusion based on regional information[A]. Proceedings of SPIE, 2005, 5813: 34 - 45.
- [21] Petrovic Vladimir Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation[J]. Information Fusion, 2005, In Press.
- [22] Petrovic V S, C S Xydeas Sensor noise effects on signal-level image fusion performance[J]. Information Fusion, 2003, (4): 167 - 183.
- [23] Blum Rick S On multisensor image fusion performance limits from an estimation theory perspective[J]. Information Fusion, 2005, In Press.
- [24] 李秋华.基于红外图像信息融合的目标检测和识别技术研究[D].长沙:国防科学技术大学硕士论文,2002.
- [25] Toet A. Detection of dim point targets in cluttered maritime backgrounds through multisensor image fusion[A]. Proceedings of SPIE, 2002, 4718: 118 - 129.
- [26] Rockinger Oliver, Thomas Fechner Pixel-level image fusion: the case of image sequences[A]. Proceedings of SPIE, 1998, 3374: 378 - 388.
- [27] Zhang Yun, Gang Hong An HIS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images[J]. Information Fusion, 2005, (6): 225 - 234.