

文章编号: 1004-9037(2004) 01-0072-06

多传感器融合综述

王 军, 苏剑波, 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所, 上海, 200030)

摘要: 对智能机器人领域的多传感器融合的研究现状进行了讨论。首先, 对该领域研究中的一些问题进行了概述, 包括信息描述空间、数据关联与时间同步、验前信息和融合结构等, 然后把已有的融合方法分类成概率统计方法和人工智能方法进行重点介绍。最后, 强调了融合结构在多传感器融合研究中的作用, 并且对多传感器融合的未来研究作了进一步的展望。

关键词: 多传感器; 多传感器融合; 融合方法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Summary of Multisensor Fusion

WANG Jun, SU Jian-bo, XI Yu-geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030, China)

Abstract With the more and more complex applications, multisensor integration and fusion have become a new research area. In this paper, the current researches of the multisensor fusion are discussed as one of the popular fields. The problems in the research are summarized, including information description space, data association and synchronization, prior information and fusion structure, etc. Then the fusion method is discussed and classified into two categories: probability based and artificial intelligence based methods. Finally the importance of fusion structure is emphasized in the field of multisensor fusion and its future research is outlined.

Key words multisensor; multisensor fusion; fusion method

引 言

传感器是智能机器与系统的重要组成部分, 其作用类似于人的感知器官, 可以感知周围环境的状况, 为系统提供必要的信息。例如, 一个机器人可以通过位置传感器获得自身当前的位置信息, 为下一步的运动任务提供服务。通过传感器可以将系统的输入和输出联系在一起, 构成一个闭环的控制回路, 这对实际应用有着极其重要的意义。

随着工作环境与任务的日益复杂, 人们对智能系统的性能提出了更高的要求。单靠一个位置传感器无法消除由于其自身的累积误差对系统造成的影响。另外单个传感器往往无法满足某些系统对鲁棒性的要求。显然, 解决这些问题的一种有效途径就是多传感器技术。多传感器技术的使用可以提高

系统的性能, 但在实际应用中还存在许多问题。目前, 针对这些问题的研究已经形成了一个新的研究领域, 即多传感器集成与融合^[1]。虽然这方面的研究只有短短十几年, 但已经取得了许多研究成果, 其中多传感器融合的研究更是受到人们的重视, 并且已经成为目前该领域的研究热点之一。和国外的研究相比, 国内在多传感器融合方面的研究尚处于初始阶段, 对这方面系统介绍的文献也相对较少^[2~4]。此外, 多传感器融合是一个复杂的信息处理过程, 所要研究的问题多, 而且解决问题的方法也很多, 因此有必要对目前的研究情况进行系统的介绍。

1 问题描述

单传感器系统结构如图 1所示。单个传感器在

某一采样时刻只能获取一组数据,由于数据量少,所以经过处理得到的信息只能用来描述环境的局部特征,在实际应用中单传感器系统往往被认为是一个单入单出的系统。与单传感器系统相比,多传感器系统的结构要复杂得多,如图 2。多传感器系统通过多个传感器(可以为同构,也可以为异构)获得更多种类和数量的传感数据,因此经过处理得到的多种信息能够对环境进行更加全面的描述,在实际应用中多传感器系统可以被理解为一个多入多出的系统(包括多入单出系统)。这种结构上的差异导致了多传感器系统的处理过程比单传感器系统更加复杂,其中多传感器融合是整个处理过程中一个重要的组成部分,如图 3。

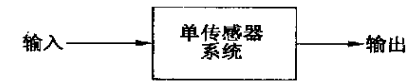


图 1 单传感器系统

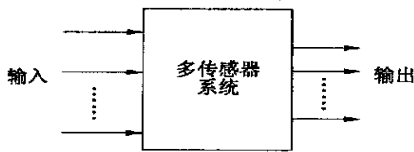


图 2 多传感器系统

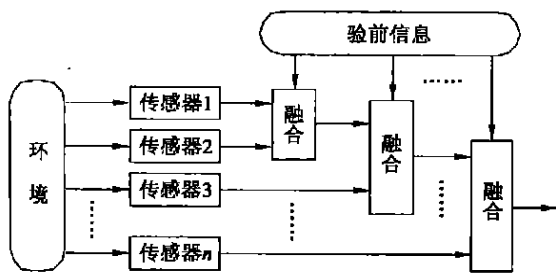


图 3 多传感器系统

在多传感器融合中,包含了大量的不确定信息。首先,无论哪种传感器,其测量数据都会存在一定的误差,造成误差的原因可能是环境中的不确定性,如噪声;也可能是传感器本身存在的问题,如传感器故障或者模型偏差。因此从这样的测量数据中提取的信息必然具有某种不确定性(如随机性)。其次,验前信息是根据系统以往行为得到的一种经验信息,可以是人工产生的,也可以由系统自身产生,它也具有一定不确定性(如模糊性)。以上这些具有不确定性的信息统称为不确定信息。除了上面介绍的两种情况外,在处理过程中由于信息的损失也会产生新的不确定信息。多传感器融合的研究对象就

是这些不确定信息,通过融合处理可以降低信息的不确定性,提高对环境特征描述的准确性。研究表明,经融合处理得到的结果比单个传感器得到的结果更准确,同时信息的冗余还可以提高整个系统自身的鲁棒性^[5]。

多传感器融合是一个复杂的不确定信息处理过程,有待解决的问题很多。

1.1 信息描述空间的不同

在多传感器系统中,每个传感器得到的信息都是某个环境特征在该传感器空间中的描述。由于各传感器物理特性以及空间位置上的差异,造成这些信息的描述空间各不相同,因此很难对这样的信息进行融合处理。为了保证融合处理的顺利进行,必须在融合前对这些信息进行适当的处理,将这些信息映射到一个共同的参考描述空间中,然后进行融合处理,最后得到环境特征在该空间上的一致描述。例如,在一个多传感器系统中,可以通过视觉传感器得到物体位置信息,也可以用超声波传感器得到物体的位置信息。由于坐标系不同,因此在融合前必须将它们转换到同一个参考坐标系中,然后进行融合处理。这里值得注意的是,信息的不确定性给这个问题的解决带来了许多困难。Durrant-Whyte在文[6]中曾提出了一种不确定几何学的理论框架,它能够有效地解决不确定几何体在不同坐标空间中的变换,这一方法还在文[7]中得到了应用。但这种方法仅限于几何信息的处理。

1.2 数据关联与时间同步问题

融合处理的前提条件是从每个传感器得到的信息必须是对同一目标的同一时刻的描述。这包括两个方面,首先要保证每个传感器得到的信息是对同一目标的描述,比如同一物体的位置信息。在多传感器融合中,这被称之为数据关联(Data association)^[8]。其次,要保证各传感器之间应该在时间上同步。在动态工作环境下,同步问题表现得尤为突出。文[9]利用序列的方法来解决时变观测(Time-variant observation)的同步问题。

1.3 验前信息

验前信息也是多传感器融合所要处理的内容之一。它与其他信息不同,它可以被用于多传感器融合的各个阶段,对多传感器融合起着重要的作用。因此,如何将验前信息与多传感器融合有机地结合以及在动态环境下如何获取、更新验前信息都

是值得研究的问题。在这方面,专家系统和数据挖掘技术为解决这些问题提供了很好的思路^[10,11]。

1.4 融合方法

多传感器融合的实质是不确定信息的处理,它需要能够处理不确定信息的数学工具。要解决融合问题,首先要用具体的数学形式来描述不确定信息,然后用相应的数学工具来处理。因此,不确定信息的不同表示方法对应着不同种类的融合方法。例如,与随机信息相对应的是基于概率统计的融合方法;与模糊信息相对应的是基于模糊逻辑的融合方法。除了不确定性给处理带来的困难外,多种不同形式的不确定性并存也给多传感器融合带来了很大的困难。此外,还要考虑应用环境对融合方法的进一步要求,即适用于动态与未知环境下的融合方法。

1.5 融合结构

多传感器融合具有明显的层次结构,如图 3 所示,在从左到右的处理过程中,信息会变得越来越抽象,高层的信息可以看成是从多个低层信息中抽象出来的,例如,可以从两幅图像中得到物体的深度信息。虽然层次结构为多传感器融合提供了灵活性,但同时也带来了一些问题,比如信息损失等。

在这些所要解决的问题中,有些是在特殊应用环境下提出的。然而作为多传感器融合的本质问题,无论是理论研究还是实际应用,融合方法都是多传感器融合所研究的重点。

2 多传感器融合方法

作为多传感器融合的研究热点之一,融合方法一直受到人们的重视,这方面国外已经作了大量的研究,并且提出了许多融合方法^[12~14]。目前,这些方法大致可分为两大类:概率统计方法和人工智能方法。其中人工智能方法又可以分为两种:逻辑推理方法和学习方法。

2.1 概率统计方法

概率论已有很长的历史,它成功地处理了许多与不确定性有关的问题,有丰富的理论和系统的方法。它所研究的现象是随机的,用随机变量来表示不确定信息(随机信息),将概率统计方法作为不确定信息处理的手段。在多传感器融合中,常采用的与概率统计有关的方法包括:估计理论^[15]、卡尔曼

滤波^[16]、假设检验^[17,18]、贝叶斯方法、统计决策理论^[19]以及其他变形的方法^[20,21]。其中,文[12]对卡尔曼滤波、贝叶斯估计、多贝叶斯方法和统计决策理论做了简单的介绍,其他方法可以在本文所列举的参考文献中找到。概率统计方法可以在融合的各个层次上使用,尽管概率统计方法已经成为多传感器融合研究中不可缺少的工具,但是在不确定性推理中仍然存在一些问题。这主要有两方面的原因,首先,概率论本身存在着缺陷。目前,对概率存在两种不同的解释,一种是客观概率,即事件发生的频率;另一种是主观概率,即人的信念。这两者既存在着联系,又存在着差异和矛盾。此外,概率论在传统框架下无法综合不同信息所表示信念。在文[22]中,张尧庭等人讨论了概率论存在的问题,并且介绍了两种改进的概率方法,即似然比推理和信任函数理论。这两种方法可以在一定程度上克服传统概率方法所存在的问题。其次,在许多融合方法中,往往对传感信息的性质做了一些明确的假设,最常见的假设就是每个传感器所采用的测量模型都包含一附加的白噪声项,同时假设各个传感器之间相互独立。可是在实际应用中这一假设很难满足,这对概率统计方法的实际应用会造成影响。此外,由于许多概率统计方法都是基于一个确定的概率分布,因此大多数概率统计方法只适合于静态的工作环境。

2.2 逻辑推理

逻辑推理包括概率推理、证据推理、模糊推理和产生式规则等。它们都属于不确定性推理,是人工智能研究中最活跃的研究领域之一。不确定性推理的方法,首先需要不确定信息进行表示(或度量),不同的表示方法即构成不同的不确定性推理的方法。文[23]对人工智能中的不确定性进行了深入的讨论。文[24]对不确定性推理原理进行了详细的讨论,并且提出了包含度理论。包含度理论不仅是研究不确定性推理的一般原理,而且是研究不确定现象的方法学。文[25,26]分别给出了模糊方法和 D-S 证据理论在多传感器数据融合中的应用。文[10]介绍了产生式规则在多传感器融合中的应用。此外, Luo 和 Kay 还对 D-S 证据理论、模糊逻辑和产生式规则进行了比较^[13],与概率统计方法相比,逻辑推理存在许多优点,它在一定程度上克服了概率论所面临的问题,它对信息的表示和处理更加接近人类的思维方式,它一般比较适合于在高层次上的应用(如决策),但是逻辑推理本身还不

够成熟和系统化。此外,由于逻辑推理对信息的描述存在很大的主观因素,所以信息的表示和处理缺乏客观性。和概率统计方法一样,逻辑推理在实际应用中也存在一些问题。例如,证据组合规则是 D-S 证据理论的核心,但在应用中要求满足组合证据之间相互独立,这在实际应用中往往难以满足。在文 [27] 中,针对这一问题对 D-S 证据理论做了一些改进。

2.3 学习方法

学习方法在多传感器融合的研究中还没有引起人们的足够重视。这主要是因为学习方法在理论方面还不够完善,需要更加深入的研究。目前多传感器融合的研究主要集中在工作环境为静态的情况下,很少考虑未知与动态的情况。在这方面,Luo 和 Kay 曾多次强调适用于动态与未知情况的融合方法将会成为多传感器融合未来研究方向之一,同时还强调人工智能领域,尤其是神经网络将会为多传感器融合的研究在理论和实践上提供更加有力的手段^[12,13]。通过对这些方法的研究,不难发现用学习方法来解决多传感器融合问题有以下几个特点:首先,能够有效地解决不确定、动态情况下多传感器融合存在的一些问题,如复杂操作的建模问题,学习问题,鲁棒性问题等;其次,多采用学习算法作为实现的主要手段,通过训练来得到复杂操作的模型;最后,由于学习算法自身具有处理不确定性的能力,因此不需要其他复杂的不确定信息处理方法。因为这些特点,使得系统具有良好的性能,如自适应性和鲁棒性。

目前,学习方法自身还存在一些问题,例如,稳定性问题,泛化能力,缺乏有效的学习机制等。目前已有的学习方法包括神经网络、映射学习方法、数据挖掘等^[11,28~30]。作者目前也从事这方面的研究工作,研究的内容主要是能够适应环境动态变化的具有学习能力的融合方法。

尽管对目前已有的融合方法进行了分类介绍,但它们之间没有严格的界限。例如,在人工智能中,利用概率主观的一面产生了基于概率的不确定性推理。此外,各种方法之间又存在一定的联系,而且它们之间的组合可以形成性能更好的融合方法。文 [31] 利用产生式规则和神经网络来实现可选传感器融合系统。文 [32] 用神经网络和贝叶斯法则得到一种自适应传感器模型。每种融合方法都存在各自的优缺点,显然这种组合可以更好地发挥它们各自的优点。

3 结论与展望

本文对多传感器融合目前的研究现状进行了讨论,对其存在的问题进行了详细的描述,并且对存在的融合方法进行了分类介绍,其中每种分类又包括许多具体的方法。随着多传感器融合研究的深入和相关学科的发展,还会出现新的方法,这些方法都存在其优点和局限性。无论哪种方法,它所研究的对象都是不确定信息,不同种类的不确定信息都有不同的数学处理方法^[33],目前还没有一种通用的方法可以用来处理所有不确定信息。人们在寻找新算法的同时^[34~36],开始考虑融合结构的问题。融合结构也是多传感器融合所要研究的问题之一,融合结构的一般表示如图 3。如果不确定信息种类少,而且处理过程简单,那么融合算法的结构就可以看成是融合结构,这时可以忽略融合结构问题。然而当不确定信息种类增加或者处理过程变得复杂(如层次增加),整个处理过程就会包括许多的算法,如传感数据的预处理,数据关联,融合算法等,这时就需要用一种合理的结构将这些算法有效地组织起来,如何建立这种结构就是融合结构所要研究的问题。国外这方面的研究开始的很早,也取得了一些成果^[8,13,37],其中包括许多文献中提到的一种通用融合结构^[8,37],该结构是由美国联合指挥官实验室(Joint Directors of Laboratories)的数据融合工作组提出的。它将融合过程分为 4 个模块:预处理、一级处理、二级处理和三级处理,其中的每个模块又可以进一步分割,并且这些模块可以采用不同的算法来实现。尽管该结构存在一定的局限性,但可以作为多传感器融合的一种通用模型。此外,文 [37] 提出了一种融合结构,该结构包括数据层、特征层和决策层。在数据层上,首先将原始数据创送到融合中心,然后进行融合处理。结果也比较准确,但要求传感器为同构的,而且占用很大的通讯带宽;在特征层上,首先原始数据提取特征信息,然后传送至融合中心进行处理。和数据层相比,尽管可以节省通讯带宽,但由于信息损失,处理结果准确性较差;在决策层上,每个传感器可以进行局部决策,然后将局部决策进行融合得出全局的决策结果。由于信息压缩,结果准确性最差,但处理时占用的带宽最小,并且没有传感器同构的要求。上面介绍的只是一般性的融合结构,但在实际应用中,人们更关心的是针对具体应用所采用的融合结构,目前这方面的研究颇为突出^[38~40]。

通过上面的讨论可以看出,融合结构在融合方法的研究中所具有的重要性。随着多传感器融合研究与应用的深入,未来的多传感器融合将会是一个更加复杂的信息处理过程,不仅包括许多具体的算法,而且结构也比较复杂。如何根据实际应用将算法与结构有机地结合在一起,为整个融合系统提供更加有效的融合策略,这是未来多传感器融合研究所要解决的主要问题。目前已有大量的融合算法,它们都存在各自的优缺点,只有通过合理的融合结构才能将这些算法组织在一起,使其扬长避短,构成更加有效的融合方法。另外,未来的多传感器融合还将面临一个难题,那就是动态与未知环境下的融合问题^[41~44],这无疑会对融合方法是一个挑战。因此,不仅需要性能更好的融合算法,而且需要更加灵活的融合结构,提高融合系统的自适应性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 王 军,苏剑波,席裕庚. 多传感器集成与融合概述 [A]. 中国自动化学会第 15 届青年学术年会 [C]. 2000. 132~ 136.
- [2] 邵 远,何发昌,罗志增. 多传感器信息融合浅析 [J]. 电子学报, 1994, 22(5): 73~ 79, 60.
- [3] 高德平,黄雪梅. 多传感器和数据融合 (一) [J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 1~ 4.
- [4] 高德平,黄雪梅. 多传感器和数据融合 (二) [J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2): 10~ 13, 57.
- [5] Richardson J M, Marsh K A. Fusion of multisensor data [J]. The International Journal of Robotics Research, 1988, 7(6): 78~ 96.
- [6] Durrant-Whyte H F. Uncertain geometry in robotics [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(1): 23~ 31.
- [7] Hager G, Mintz M. Computational methods for task-directed sensor data fusion and sensor planning [J]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(4): 285~ 313.
- [8] Hall D L. Mathematical techniques in multisensor data fusion [M]. Artech House, 1992.
- [9] Emura S, Tachi S. On design of sequential sensor fusion system [A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 3400~ 3406.
- [10] 郑云慧,张桂林,吴光焰. 一个基于知识的目标跟踪信息处理系统 [J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(2): 46~ 48.
- [11] Waltz E L. Information understanding: integrating data fusion and data mining processes [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1998, 6: 553~ 556.
- [12] Luo R C, Kay M G. Multisensor integration and fusion in intelligent systems [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(5): 901~ 931.
- [13] Luo R C, Kay M G, Lee W G. Future trends in multisensor integration and fusion [A]. Industrial Electronics, Symposium Proceedings, ISIE'94 [C]. 1994 IEEE International Symposium on Published, 1994. 7~ 12.
- [14] Luo R C, Su K L. A review of high-level multisensor fusion approaches and applications [A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems [C]. Taipei, Taiwan, 1999. 25~ 31.
- [15] Mutambara A G O. Decentralized estimation and control for multisensor system [M]. CRC Press, 1998.
- [16] 周 锐,申功勋,房建成,等. 基于信息融合的目标图像跟踪 [J]. 电子学报, 1998, 26(12): 89~ 91.
- [17] Wang Xiaogang, Shen H C, Qian Wenhan. A hypothesis testing method for multisensory data fusion [A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 3407~ 3412.
- [18] Wang Xiaogang, Shen H C. Multiple hypothesis testing fusion method for multisensor systems [A]. Proceedings of the 1999 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. 1999. 1008~ 1013.
- [19] Kamberova G, Mandelbaum R, Mintz M. Statistical decision theory for mobile robotics: theory and application [A]. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems [C]. 1996. 17~ 24.
- [20] Pasad L, Iyengar S, Kashyap R L, *et al.* Functional characterization of fault tolerant integration in distributed sensor networks [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21(5): 1082~ 1087.
- [21] Durrant-Whyte H F. Sensor models and multisensor integration [J]. The International Journal of Robotics Research, 1988, 7(6): 97~ 113.
- [22] 张尧庭,杜劲松. 人工智能中的概率统计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 李 凡. 人工智能中的不确定性 [M]. 北京: 气象出版社, 1994.

版社, 1992.

[24] 张文修,梁 怡. 不确定性推理原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.

[25] Rusoo F, Ramponi G. Fuzzy methods for multise-n-sor data fusion [J]. IEEE Transactions on Instru-mentation and Measurement, 1994, 43(2): 288~294.

[26] 黄 瑛,陶云刚,周洁敏,等. D-S证据理论在多传感器数据融合中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(2): 172~ 177.

[27] 罗志增,蒋静坪. 基于 D-S理论的多信息融合方法及应用 [J]. 电子学报, 1999, 27(5): 100~ 102.

[28] 杨卫平,沈振康. 神经网络的一般模型及在信息处理中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(5): 63~ 66.

[29] Mukai T, Mori T, Ishikawa M. A sensor fusion system using mapping learning method [A]. Pro-ceedings of the 1993 IEEE/RJS International Con-ference on Intelligent Robots and Systems [C]. 1993. 391~ 396.

[30] 梁继民,杨万海,蔡希尧. 一种具有参数学习能力的决策融合方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(2): 206~ 209.

[31] Kobayashi F, Arai F, Fukuda T, *et al.* Sensor se-lected fusion system [A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fu-sion and Integration for Intelligent Systems [C]. 1999. 123~ 128.

[32] van Dam J W M, Krose B J A, Groen F C A. Adaptive sensor models [A]. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems[C]. 1996. 705~ 712.

[33] 刘开第,吴和琴,庞彦军,等. 不确定性信息数学处理及应用 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.

[34] Hipel K W, Ben-Haim Y. Decision making in an un-certain world information-gap modeling in water resources management [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1999, 29(4): 506~ 517.

[35] Rao N S V. Projective method for generic sensor fusion problem [A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems[C]. 1999. 1~ 6.

[36] Yager R R, Filev D P. Induced ordered weighted averaging operators[J]. IEEE Transaction on Sys-tems, Man and Cybernetics, 1999, 29(2): 141~ 150.

[37] Varshney P K. Multisensor data fusion [A]. Ele-ctronics & Communication Engineering Journal[C]. 1997. 245~ 253.

[38] Hiransoog C, Malcolm C A. Multi-sensor/knowle-dge fusion [A]. Proceedings of the 1999 IEEE In-ternational Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems [C]. Taipei, Taiwan, 1999. 117~ 122.

[39] Sylvie Martin dit Neuville. Intelligence fusion [A]. Proceedings of the 1996 IEEE International Confer-ence on Multisensor Fusion and Integration for In-telligent Systems[C]. 1999. 78~ 787.

[40] Wang Jun, Su Jianbo, Xi Yugeng. COM-based so-ftware architecture for multi-sensor fusion system [J]. Information Fusion, 2001, 2(4): 26~ 270.

[41] Gao J B, Harris C J. Some remarks on Kalman fil-ters for the multisensor fusion [J]. Information Fu-sion, 2002, 3(3): 19~ 201.

[42] Leal J, Scheduling S, Dissanayake G. Stochastic sim-ulation in surface reconstruction and application to 3D mapping [A]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation[C]. 2002. 1765~ 1770.

[43] 王 军,苏剑波. 一种具有渐进学习能力的融合方法 [J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1496~ 1500.

[44] Nieto J, Guivant J, Nebot E. Real time data asso-ciation for fast SLAM [A]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation [C]. 2003. 412~ 418.

作者简介: 王 军 (1973-),男,博士研究生,研究方向: 多传感器信息融合, E-mail: xwangjun@ sina. com. cn; 苏剑波 (1969-),教授,博士生导师,研究方向: 智能机器人控制. 多传感器信息融合; 席裕庚 (1946-),男,教授,博士生导师,研究方向: 智能机器人. 预测控制.