基于面向对象 Petri 网的水下机器人体系结构建模与可达性问题研究

林昌龙¹, 刘开周²

(1. 华侨大学计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 针对之前构建的水下机器人体系结构仅停留在系统结构框图层面的不足, 本文对其进行建模并对它的正确性进行理论分析. 首先简要地介绍之前的研究成果, 即趋于通用化的水下机器人体系结构. 然后根据该体系结构的模块化封装和层次化组织的特点, 采用面向对象的 Petri 网对其进行建模. 在此基础上, 针对系统能否顺利完成使命的问题, 给出了一个充分性判据, 从而在理论上比较严密地论证了该体系结构的时序和逻辑的正确性. 最后通过半物理仿真实验对其进行仿真验证.

关键词: 自主水下机器人; 体系结构; 面向对象的 Petri 网; 可达性

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-03-0332-07

Research on Modeling and Reachability Problem of Autonomous Underwater Vehicle Architecture Based on Object-oriented Petri Net

LIN Changlong¹, LIU Kaizhou²

(1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The architecture we previously constructed for autonomous underwater vehicles (AUV) only remains in the system block level. To cope with this insufficiency, the architecture is modeled and its correctness is theoretically analyzed in this paper. Firstly, our previous work, that is, a generalized architecture for AUVs, is presented. Then, according to its characteristics of modular packaging and hierarchical organization, the object-oriented Petri net is adopted to model this architecture. Based upon this, the mission reachability problem is focused and a sufficient criteria is proposed. Thus, the correctness of the timing and logic of this architecture is thoroughly demonstrated. Finally, semi-physical experiments are carried out to validate the architecture.

Keywords: autonomous underwater vehicle; architecture; object-oriented Petri net; reachability

1 引言 (Introduction)

经过几十年的积累, 自主水下机器人 (AUV) 的技术逐渐发展成熟, 目前已经在海洋开发、科学考察等领域发挥了一定的作用. 随着人们对 AUV 能力的要求不断提高, AUV 的使命变得越来越复杂, 因此它的控制系统需要处理越来越多的问题: 既包括常规的问题, 如信息的采集与处理、运动求解、故障诊断、组合导航等; 也包括智能领域的问题, 如使命规划、情景评价、机器学习等. 这就需要有一套完善的机制, 将上述问题进行有效的包容, 使信息能及时顺畅地流通, 使许多功能模块能合理地在空间和时间域上发挥作用^[1]. 所以, 体系结构一直是水下机器人领域的一个研究热点.

根据推理方式、控制结构、构建方式和信息输入方式的不同^[2], 体系结构可以分成 3 大类^[3-4]: 慎思式体系结构^[5]、反应式体系结构^[6]和混合式体系结构^[7]. 这 3 种体系结构是在硬件水平受限的条件下为了提高机器人的性能而提出来的. 得益于计算机技术的飞速发展, 规划与反应时间的不匹配不再是一个迫使慎思式结构与反应式结构严格分开的强制性原因; 而随着机器人使命的复杂化和需求量的增长, 其控制系统开发、升级和维护的复杂性问题正逐渐显现出来. 因此, 在 2000 年左右, 对体系结构的研究重点悄然从强调机器人的性能转变为强调机器人的开发. 目前, 这方面的主要研究成果有文 [8-11], 虽然他们的目标各不相同, 但是与通用化体系结构这个方向都有密切的联系.

虽然国内外学者为了提高机器人的自主能力和智能水平提出许多体系结构, 但是这些工作大部分停留在系统的结构框图层面, 对体系结构进行建模并验证其机理的工作还比较少. 已有的研究成果大多是针对体系结构中的部分模块展开的: 张禹采用有限状态机构建了系统中使命和任务规划的分层递阶监控结构^[2]; 马志强^[12]和许真珍^[13]采用面向对象的 Petri 网 (OPN) 分别设计了多陆地机器人集群的追逃模型和多 AUV 异构集群的协作模型.

本文在前期工作^[11]的基础上, 采用 OPN 对趋于通用化的水下机器人体系结构进行建模, 然后从时序和逻辑的角度研究了该体系结构对使命的可达性问题, 并通过半物理仿真实验加以验证.

2 趋于通用化的 AUV 体系结构 (A generalized architecture for AUV)

这一部分对前期的工作, 即趋于通用化的 AUV 体系结构, 进行简要介绍.

2.1 自主基元的构建

系统中每一个独立模块的工作机制都可以归纳为感知和决策两个步骤, 也就是说, 每个模块都包含了一个“感知-决策”闭环. 因此, 我们将系统中的每个独立模块都抽象成为具有相同结构的单元, 称为自主基元, 如图 1 所示.

图 1 自主基元详细结构

Fig.1 Details of the autonomic element

在自主基元中, 感知单元获取它的资源信息并进行融合与分析, 从而得到它自身状态以及外部环境的最优估计, 对世界模型与知识库进行更新. 当

它的资源发生故障的时候, 它将把自身因为资源故障而丧失的能力汇报给它的上层. 决策单元则根据上层所给的控制指令, 结合当前的自身状态和外部环境信息, 采用知识库中的规则进行规划, 产生对它的资源的控制指令, 在经过同步之后, 发送给它的资源来执行. 除了感知和决策之外, 世界模型与知识库也是自主基元的重要构成部分, 它不仅保存感知所获得的资源的状态, 还提供关于资源的先验知识, 感知和决策利用这些先验知识实现对资源的管理. 自主基元还包含 6 个接口: 传感器和执行器用于与下层交互, 它们接收来自下层的信息并向下层发送指令; 汇报器和接收器用于与上层交互, 它们汇报自身的状态并接收来自上层的指令; 协调器和信息交换器用于与同一层次的自主基元交互, 协调器用于自主基元之间的协作, 而信息交互器用于数据的共享.

2.2 体系结构的构建

虽然所有的自主基元都被抽象成一个统一的模型, 具有相同的结构和运行流程, 但是不同的自主基元内部的感知单元、决策单元和世界模型与知识库单元具有各不相同的内容, 这就决定了它们具有不同的功能. 在完成各个自主基元的开发之后, 根据自主基元的功能把它们进行层次化的组织就得到了完整的 AUV 控制系统体系结构, 如图 2 所示.

系统中, 每个自主基元内部都有一个“感知-决策”闭环, 因而整个系统就包含了许多不同层次的闭环. 下层的闭环管辖的时空范围较小, 数据较具体, 更新频率较高, 反应速度较快, 具有反应式体系结构的特征; 上层的闭环管辖的时空范围较大, 数据较抽象, 更新频率较低, 处理时间较长, 但能够从全局出发进行统筹规划, 具有慎思式体系结构的特征. 所以, 整个系统既能对一些突发事件做出快速的响应, 又能对全局的目标进行最优的规划.

在该体系结构中, 顶层是进行高层规划的自主基元, 然后规划来到下一级: 细化规划和收集信息, 再传到底层的工作部分: 反应式行为. 高层的自主基元可以读取它们的相邻低层自主基元的运行情况 (实质上也就是进行监控), 还能够进行引导. 因为使用了包容技术, 上层只能直接控制和管理它的相邻下层. 在管理类型中, 每层都试图进行直接的处理, 即在本层发现的问题直接在本层进行修正. 只有当某个自主基元无法解决自身的问题时, 才向上层求助. 前期的研究和实践表明, 该体系结构对不同的使命都具有较强的适应性, 从而可以降低机器人控制系统开发、维护和升级的复杂性.

图2 趋于通用化的 AUV 体系结构

Fig.2 A generalized architecture for AUV

3 系结构建模和分析 (Modeling and analysis of architecture)

对于这个由多个自主基元所构成的系统是否能够顺利地完成使命的问题,本节采用 OPN 对其进行建模和分析。

3.1 面向对象的 Petri 网

OPN 是面向对象的建模技术与着色 Petri 网的结合,它既具有对象的模块化、可重复使用性的特点,又继承了 Petri 网结构化描述复杂逻辑关系的能力。在模型中,对象与系统的实体一一对应,便于阅读与理解。而且对象将其详细的活动及其复杂的逻辑关系包裹起来,当关注整个系统行为时,只要关注对象与外界的信息传递接口以及不同对象接口之间的信息传递就可以了;只有当需要观察对象的行为时,才打开“包裹”,暴露其内部详细活动及其之间复杂的逻辑关系,因此系统模型比一般 Petri 网模型要简洁得多。

定义 1 系统的 OPN 被定义为一个二元组:

$$S = (O, R)$$

其中, $O = \{O_i | i = 1, \dots, k\}$ 为系统的对象的集合, $R = \{R_{ij} | i, j = 1, \dots, k, i \neq j\}$ 为对象之间信息传递关

系的集合, k 为对象的个数。

(1) 对象 O_i 的 OPN 用下列 7 要元表示为

$$O_i = \{P_i, T_i, M_{li}, M_{oi}, F_{li}, F_{oi}, C_i\}$$

其中, O_i 为系统的第 i 个对象; P_i 为 O_i 的状态库所有有限集合; T_i 为 O_i 的活动变迁有限集合; M_{li} 为 O_i 的输入信息库所的有限集合; M_{oi} 为 O_i 的输出信息库所的有限集合; C_i 为与 O_i 的库所和变迁关联的色彩集合: $C(P_i)$ 、 $C(T_i)$ 、 $C(M_{li})$ 、 $C(M_{oi})$ 分别为 O_i 的状态库所、活动变迁、输入库所、输出库所的色彩集合; $I_i(P'_i, T_i)$ 为库所 P'_i 到变迁 T_i 的输入映射: $C(P'_i) \times C(T_i) \rightarrow N$, 对应着从 P'_i 到 T_i 的彩色有向弧, 这里 $P'_i = P_i \cup M_{li}$; $O_i(P'_i, T_i)$ 为变迁 T_i 到库所 P'_i 的输出映射: $C(T_i) \times C(P'_i) \rightarrow N$, 对应着从 T_i 到 P'_i 的彩色有向弧, 这里 $P'_i = P_i \cup M_{oi}$ 。

(2) 对象 O_i 至 O_j 的信息传递关系网用下列八元组表示为

$$R_{ij} = \{M_{oi}, G_{ij}, M_{lj}, C(M_{oi}), C(M_{lj}), C(G_{ij}), F'_{lij}, F'_{oj}\}$$

其中, M_{oi} 、 M_{lj} 、 $C(M_{oi})$ 、 $C(M_{lj})$ 的定义同 (1); G_{ij} 为 O_i 到 O_j 的信息传递的门的有限集合; $C(G_{ij})$ 为 G_{ij} 的色彩集合; $F'_{lij}(M_{oi}, G_{ij})$ 为输出信息库所 M_{oi}

到 G_{ij} 的输入映射: $C(M_{Oi}) \times C(G_{ij}) \rightarrow N$, 对应着从 M_{Oi} 到 G_{ij} 的彩色有向弧; $F'_{Oij}(M_{Ij}, G_{ij})$ 为 G_{ij} 到输入信息库所 M_{Ij} 的输出映射: $C(G_{ij}) \times C(M_{Ij}) \rightarrow N$, 对应着从 G_{ij} 到 M_{Ij} 的彩色有向弧。

门是位于 OPN 之间的一种特殊的变迁, 表示不同 OPN 之间信息传递的“事件”。图 3 给出了两个对象之间信息传递关系的示例。

图 3 OPN 示意图

Fig.3 Sketch map of an OPN

3.2 基于 OPN 的体系结构模型

本文所构建的体系结构由不同层次的多个自主基元构成。每个自主基元具有特定的功能, 自主基元之间通过信息交互组合到一起构成了一个完整的系统。正如 OPN 的定义, 基于 OPN 的模型描述了系统的两个方面: 一是系统的对象, 即各个自主基元, 每个自主基元采用一个着色 Petri 网来描述其内部的时序和逻辑关系; 二是对象之间的信息传递关系, 即自主基元之间的信息交互, 采用门变迁对其进行描述。图 4 给出了基于 OPN 的趋于通用化的 AUV 体系结构的模型。

图 4 趋于通用化的 AUV 体系结构模型

Fig.4 Model of the generalized architecture for AUV

限于篇幅, 这里只以罗盘基元为例子, 展示单个自主基元内部的时序逻辑模型, 如图 5 所示; 相应的状态库所和活动变迁的含义见表 1。

图 5 罗盘基元的 OPN 模型

Fig.5 OPN based model of the autonomic element of the compass component

表 1 图 5 中的库所和变迁的含义

Tab.1 Meanings of places and transitions in Fig.5

库所	变迁
MP1: 获取罗盘的信息;	T1: 控制周期到;
MP2: 罗盘数据信息;	T2: 罗盘运转正常;
罗盘故障信息;	T3: 罗盘设备故障;
P1: 等待下一个控制周期;	T4: 数据包正确;
P2: 设备检查;	T5: 数据包错误;
P3: 分析数据;	T6: 返回数据.
P4: 保持数据.	

3.3 使命可达性问题研究

可达性是 Petri 网的一个重要特性。给定一个 Petri 网, 我们期望知道是否可以通过激发一系列变迁从初始标识到达目标标识。

定义 2 若从初始标识 m_0 开始激发一个变迁序列 s_r 产生标识 m_r , 则称 m_r 是从 m_0 可达的。一般地, 从 m_0 到 m_r 所激发的变迁序列表示为 $s_r = t_{j_1}, \dots, t_{j_r}$, 这里 $j_1, \dots, j_r$ 为整数。从 m_0 激发 s_r 产生 m_r 表示为: $m_0[s_r > m_r]$ 。

有的时候我们只关心少数重要的库所的内容是否可以匹配, 而不管其它库所的内容。因此, 可以只考察部分库所的可达性, 即子标识的可达性问题。

定义 3 对于库所集合 P' 的一个子集 P'' 和与 P'' 对应的标识 m'_0, m'_r , 如果存在标识 m_0, m_r 和激发序列 s_r , 满足: (1) 对任何 $p_i \in P''$, 有 $m'_0(p_i) = m_0(p_i)$ 和 $m'_r(p_i) = m_r(p_i)$; (2) $m_0[s_r > m_r]$, 则称子标识 m'_r 是从 m'_0 可达的, 记为 $m'_0[s_r > m'_r]$ 。

对于 AUV 系统, 可达性可以用来描述如下问题: 从系统的初始状态或者当前状态出发, 要求达到期望的状态 (例如, 使命完成), 是否存在确定的运行步骤, 即是否可以完成使命。用 m_0 表示系统的初始状态或者当前状态, m_r 表示系统的期望状态, s_r 表示系统的运行步骤, 则问题可以描述为: 给定 m_0 和 m_r , 寻找 s_r 使得 $m_0[s_r > m_r]$ 。

根据 OPN 的特点, 系统在建模过程中已经被分

解成许多个对象. 但由于体系结构的特殊性, 对象之间存在着明显的上下层的关系. 为了更清楚地描述这一特点, 下面给出层次化 OPN 的定义.

定义 4 对于 OPN 中的对象 O_i 和 O_j , 如果存在从 O_i 到 O_j 的门变迁 g_{ij} (即存在 $m_{Oim} \in M_{O_i}$, $m_{1jn} \in M_{1j}$, $g_{ij} \in G_{ij}$, 满足 $(m_{Oim}, g_{ij}, m_{1jn}) \in R_{ij}$), 也存在从 O_j 到 O_i 的门变迁 g_{ji} ; 并且 g_{ij} 传递的是控制指令信息, g_{ji} 传递的是相应指令的完成状态信息, 则称 O_i 是 O_j 的直接上层, 或简称为 O_i 是 O_j 的上层, 记为 $O_i > O_j$. 相应的, O_j 是 O_i 的直接下层或下层.

定义 5 对于一个 OPN, 如果满足: (1) 存在某个对象, 它是所有其它对象的上层; (2) 对任何两个对象 O_i 和 O_j , $O_i > O_j$ 和 $O_j > O_i$ 不同时成立, 则称该 OPN 为层次化的 OPN. 同时, 称满足 (1) 的那个对象为顶层对象, 没有任何下层的对象为底层对象.

在上一小节构建的体系结构 OPN 模型的基础上, 结合上述的定义, 下面针对本文的体系结构给出一个判断系统状态可达性的充分条件.

定理 1 对于包含有限个对象的层次化的 OPN, 对每个对象进行如下操作: (1) 删除用于与下层交互的所有输出和输入信息库所; (2) 对发送给下层的每个控制指令, 新建一个状态库所, 该库所复制与下层交互的输入信息库所的色彩集合; (3) 将与被删除的输出和输入信息库所对应的有向弧改为与相应的新建状态库所对应. 如果完成上述操作之后, 满足以下条件: (1) 顶层对象的子标识状态 m'_{1r} (期望状态) 是从子状态标识 m'_{10} (初始状态或当前状态) 可达的, 其中子标识所对应的库所集合为原 OPN 中顶层对象的状态库所集合; (2) 非顶层对象对来自上层的每个控制指令, 其子标识状态 m'_{ir} (完成某指令) 是从子标识状态 m'_{i0} (执行某指令) 可达的, 其中子标识所对应的库所集合为原 OPN 中该对象用于与它的上层交互的输入输出信息库所集合, 则原层次化的 OPN 的子标识状态 m'_r (期望状态) 是从子状态标识 m'_0 (初始状态或当前状态) 可达的. 其中子标识 m'_0 和 m'_r 所对应的库所集合为原 OPN 中顶层对象的状态库所集合, 即 $m'_0 = m'_{10}$, $m'_r = m'_{1r}$.

证明: 采用数学归纳法.

(1) 如果原来的层次化 OPN 仅包含一个对象, 那么它的输入输出信息库所集合、对象之间的信息传递关系集合均为空集, 即原层次化 OPN 退化成一个普通的 PN. 因为该对象的子标识状态 m'_{1r} (期望状态) 是从 m'_{10} (初始状态或当前状态) 可达的, 即存在激发序列 s_r 使得 $m'_{10}[s_r > m'_{1r}]$, 因此有 $m'_0[s_r > m'_r]$,

结论成立.

(2) 假设对包含 m 个对象的层次化 OPN 结论成立, 即存在激发序列 s_r 使得 $m'_0[s_r > m'_r]$. 那么当对象个数为 $m+1$ 时, 新加入的对象 (记为 O_j) 必定为原来某个对象 (记为 O_i) 的直接下层, O_j 负责完成 O_i 的控制指令.

考察引入对象 O_j 之前 O_i 中新建状态库所的集合 $P'_i = \{p_{ik1}, \dots, p_{ikt}\}$ (根据定理 1 中的操作步骤 2). 对于集合中的某个库所 p_{iks} , 它代表着某个控制指令的执行, 找出激发序列 s_r 中所有与它相关的活动变迁: $s_r = \dots t_{ila} \dots t_{ilb} \dots t_{ila} \dots t_{ilb} \dots$, 其中, 活动变迁 t_{ila} 向 p_{iks} 放入托肯, 而活动变迁 t_{ilb} 从 p_{iks} 取走托肯.

在引入对象 O_j 之后, O_i 控制指令的执行由原来的通过新建状态库所集合 P'_i 来象征变为由 O_j 通过一系列的细化步骤来实现. 为此, 首先对 O_i 增添用于与下层交互的输出和输入信息库所. 对集合 P'_i 中的元素 p_{iks} , 将其删除, 并且将活动变迁 t_{ila} 指向它的有向弧改为指向与下层交互的输出信息库所, 将它指向活动变迁 t_{ilb} 的有向弧改为由输入信息库所指向 t_{ilb} . 经过以上变换之后, 原来向 p_{iks} 放入托肯的活动变迁 t_{ila} 现在改向输出信息库所放入托肯, 并且通过门变迁 g_{ij} 传递到 O_j 的输入信息库所, 构成对象 O_j 的子标识状态 m'_{j0} . 根据条件 (2), 对象 O_j 的子标识状态 m'_{jr} 是从 m'_{j0} 可达的, 即通过激发序列 s_{jr} 之后, O_j 的输出信息库所将被放入托肯并将触发门变迁 g_{ji} 传递到 O_i 的输入信息库所, 从而使得激发序列中的 t_{ilb} 可以正常发射. 因此, 在完成了对集合 P'_i 中的元素 p_{iks} 的处理之后 (即在实现了对 p_{iks} 所象征的控制指令的细化之后), 系统仍然是从子标识状态 m'_0 到 m'_r 可达的, 即 $m'_0[s'_r > m'_r]$, 其中 $s'_r = \dots t_{ila} g_{ij} s_{jr} g_{ji} \dots t_{ilb} \dots t_{ila} g_{ij} s_{jr} g_{ji} \dots t_{ilb} \dots$.

类似地, 对集合 P'_i 中的其它元素逐个进行相应的处理. 同理可得, 在完成了对集合 P'_i 中的所有元素进行处理之后, 系统仍然是从子标识状态 m'_0 到 m'_r 可达的, 即 $m'_0[s'_r > m'_r]$.

由于原层次化 OPN 包含有限个对象, 因此, 根据证明步骤 (1) 和 (2), 在经过有限次的对象引入之后, 即可构成原 OPN, 并且系统的子标识可达性也得到了保证. 证毕.

根据该定理, 在经过一些简单的操作之后, 我们就可以通过各个对象的可达性来推导出整个系统的可达性. 由于每个对象的规模都比较小, 验证其可达性的计算量不会太大, 从而避免了直接验证整个系统的可达性可能出现的组合爆炸问题.

4 半物理仿真实验 (Semi-physical simulation)

为了充分验证该体系结构的正确性, 在 AUV 半物理仿真平台上对开发的控制系统进行了仿真验证. AUV 半物理仿真平台由 4 个部分组成, 分别是: 载体控制系统、虚拟 AUV 系统 (也称为虚拟环境系统)、视景显示系统和以太网交换系统, 其总体结构如图 6 所示.

图 6 半物理仿真平台总览

Fig.6 Overview of the semi-physical simulation platform

图 7 情报收集和监察使命仿真

Fig.7 Simulation of the intelligence/reconnaissance mission

图 8 海洋学使命仿真

Fig.8 Simulation of the oceanography mission

载体控制系统根据一定的策略和算法计算得到控制量并通过标准的硬件接口将相应的控制命令发送给虚拟 AUV 系统. 虚拟 AUV 系统负责模拟水下

机器人的真实工作情况从而得到 AUV 的状态信息, 它不仅通过硬件接口将状态信息反馈给载体控制系统, 还通过网络交换系统发送给视景显示系统. 视景显示系统接收来自虚拟 AUV 系统的载体位置姿态信息, 对其进行实时的显示, 提供一种直观的视觉效果. 它的界面分为 3 个窗口, 主窗口显示 AUV 的实时 3 维姿态信息, 左边的窗口显示 AUV 在 X-Y 平面上的路径, 下面的窗口显示的是 AUV 的深度变化曲线.

视景显示系统在仿真过程中的完整屏幕截图如图 7 所示, 在这次仿真过程中, AUV 正在执行情报收集和监察使命. 图 8 是 AUV 执行海洋学调查时的 X-Y 平面路径截图. 我们在仿真平台上进行了多次实验, AUV 控制系统总体运行情况良好, 从而验证了依照该体系结构开发的控制系统的正确性.

5 结论和展望 (Conclusion and future work)

本文采用 OPN 对趋于通用化的 AUV 体系结构进行建模, 并给出了一个判断系统状态可达性的充分条件, 从而在理论上比较严密地论证了该体系结构的正确性, 最后通过半物理仿真进行进一步的验证.

该体系结构中虽然预留了同层自主基元之间进行协作的接口, 但是在实现的过程中并没有使用, 而是把同层基元的协作交给相邻的上级基元来协调. 在未来的工作中, 将考虑同层基元之间存在协作的系统的实现问题以及系统状态的可达性问题.

参考文献 (References)

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
Jiang X S, Feng X S, Wang L T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000.
- [2] 张禹. 远程自主潜水器体系结构的应用研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2004.
Zhang Y. Application research on control architecture of long range autonomous underwater vehicle[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [3] Ridao P, Batlle J, Amat J, et al. Recent trends in control architectures for autonomous underwater vehicles[J]. International Journal of Systems Science, 1999, 30(9): 1033-1056.
- [4] Valavanis K P, Gracanin D, Matijasevic M, et al. Control architectures for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1997, 17(6): 48-64.
- [5] McGann C, Py F, Rajan K, et al. A deliberative architecture for AUV control[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1049-1054.

- [6] Rosenblatt J K. DAMN: A distributed architecture for mobile navigation[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 1997, 9(2/3): 339-360.
- [7] Smith S M. An approach to intelligent distributed control for autonomous underwater vehicles[C]//*IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 105-111.
- [8] Albus J S. 4-D/RCS reference model architecture for unmanned ground vehicles[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 3260-3265.
- [9] Ricard M, Kolitz S. The ADEPT framework for intelligent autonomy[R]. Belgium: Von Karman Institute, 2002.
- [10] Rowe S, Wagner C. An introduction to the joint architecture for unmanned systems (JAUS)[EB/OL]. (2008) [2012-12-30]. http://www.iema.org/Class_1_Gen-2_UHF_RFID_-_EPC_Global.pdf.
- [11] Lin C L, Feng X S, Li Y P, et al. Toward a generalized architecture for unmanned underwater vehicles[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2368-2373.
- [12] Ma Z Q, Hu F D, Yu Z H. Multi-agent systems formal model for unmanned ground vehicles[C]//*International Conference on Computational Intelligence and Security*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 492-497.
- [13] Xu Z Z, Feng X S, Li Y P. Cooperation model design based on object-oriented Petri net for multiple heterogeneous UUVs system[C]//*7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 5710-5715.

作者简介:

林昌龙 (1981-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 机器人体系结构, 机器人控制.

刘开周 (1976-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 水下机器人控制.

(上接第 331 页)

- [5] De Agapito L, Hayman E, Reid I. Self-calibration of rotating and zooming cameras[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 45(2): 107-127.
- [6] Basu A, Ravi K. Active camera calibration using pan, tilt and roll[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 1997, 27(3): 559-566.
- [7] Sinha S N, Pollefeys M. Pan-tilt-zoom camera calibration and high-resolution mosaic generation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 103(3): 170-183.
- [8] Davis J, Chen X. Calibrating pan-tilt cameras in wide-area surveillance networks[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 144-149.
- [9] Shih S W, Hung Y P, Lin W S. Calibration of an active binocular head[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 1998, 28(4): 426-442.
- [10] Kwon H, Park J, Kak A C. A new approach for active stereo camera calibration[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 3180-3185.
- [11] Semple J G, Kneebone G T. *Algebraic projective geometry*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1979.
- [12] Colombo C, Del Bimbo A, Pernici F. Metric 3D reconstruction and texture acquisition of surfaces of revolution from a single uncalibrated view[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(1): 99-114.
- [13] Hartley R, Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*[M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

作者简介:

郑红 (1961-), 女, 博士, 教授. 研究领域: 模式识别, 智能检测技术, 计算机视觉.

刘振强 (1985-), 男, 博士生. 研究领域: 模式识别, 嵌入式系统设计, 计算机视觉.