

Research on Autonomous Capability Evaluation of Unmanned Ground Vehicles

Li Jing¹, Tang Zhenmin², Tan Yefa¹, Cai Yunfei², Liu Jiayin²

¹College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu, China

²Department of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu, China

Email address:

lijingwry@126.com (Li Jing), tang.zm@163.com (Tang Zhenmin), tanyefa7651@162.com (Tan Yefa), cyf@njust.edu.cn (Cai Yunfei), smiton@foxmail.com (Liu Jiayin)

To cite this article:

Li Jing, Tang Zhenmin, Tan Yefa, Cai Yunfei, Liu Jiayin. Research on Autonomous Capability Evaluation of Unmanned Ground Vehicles. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 12-20. doi: 10.11648/j.sd.20160401.13

Received: January 30, 2016; Accepted: February 26, 2016; Published: April 8, 2016

Abstract: In this paper, according to the requirements of the theory of analytic hierarchy process (AHP), in order to demonstrate its autonomy should possess the ability of elements, the ability can be divided into the perception ability, planning ability, motion control ability, behavioral ability and learning ability evaluation of five aspects. Then all aspects are decomposed step by step down for 12 evaluation key elements and 38 evaluation factors. On this basis, the technical maturity is calculated with fuzzy membership degree matrix on the evaluation of the assignment of reference. The improved G1 sequence relations and fuzzy comprehensive evaluation method are used on the system of the unilateral and total autonomy ability to combine qualitative and quantitative evaluation, by setting the different task environment. What is more, trying to prove that in order to determine the level of autonomy, there should be autonomy ability of different vehicle verification, as well as autonomy value interval distribution.

Keywords: Unmanned Ground Vehicle, Autonomous Capability Evaluation, G1 Order Relation, Fuzzy Evaluation

无人地面车辆自主能力评价研究

李静¹, 唐振民², 谭业发¹, 蔡云飞², 刘家银²

¹野战工程学院, 解放军理工大学, 江苏南京, 中国

²计算机科学与工程学院, 南京理工大学, 江苏南京, 中国

邮箱

lijingwry@126.com (李静), tang.zm@163.com (唐振民), tanyefa7651@162.com (谭业发), cyf@njust.edu.cn (蔡云飞), smiton@foxmail.com (刘家银)

摘要: 本文按层次分析法的理论要求, 从体现其自主性应具备的能力要素出发, 以无人地面车辆自主能力为总体目标, 分为感知能力、规划能力、运动控制能力、行为能力和学习能力五个评价方面, 向下逐层分解为12个评价要素和38个评价因素。在此基础上, 以技术成熟度作为模糊评价中隶属度矩阵赋值的参考, 用改进的G1序关系法和模糊综合评价法对系统单项和总体自主能力进行定性和定量相结合的评价, 通过设置不同任务环境, 对不同无人车的自主能力进行验证, 得到评价值的区间分布, 以此确定自主性等级的划分。

关键词: 无人地面车辆, 自主能力评价, G1序关系, 模糊评价

1. 引言

无人地面车辆利用各种安装在车辆平台不同部位的传感器感知周围环境和自身状态,获得道路状况、障碍物和位姿等信息,经数据融合、态势估计等产生系统决策,最终转化为车辆控制,实现安全、可靠地在地面上自主行驶[1]。自主性是无人系统在预定任务目标实现过程中感知、理解、分析、交流、规划及决策制定与执行的能力,是其最重要的性能指标之一[2]。

美国对无人系统自主性的研究体现在其国防部颁布的无人系统路线图中,2001年、2002年和2005年3个版本都是针对无人机制定的,以自主控制等级(Autonomous Control Level, ACL)来描述自主性等级[3-5];2007年版将自主和控制概念扩展至空中、水下、地面无人系统中,并提出了多机协同理论[6];2011年版从人与系统的关系给出了自主性的四个等级,即人操作、人委派、人监督、完全自主,这种等级分法更加适合所有领域的无人系统,在对系统评价时具备了更多的灵活性和实用性[7]。

在自主性理论研究的过程中,Reed等将自主性定义为一个量值,用来区别不同的自主性等级[8];Sean等利用联合意图理论在智能控制框架中创建了可调节自主性模块,并从系统计算能力、传感器保真度、人机接口的知识

传递等角度对自主性进行了分析[9];在自主性评价模型建立方面,李一波等人提出四指标模型[10]、王越超等人建立蛛网模型[11]、杨哲等采用模糊评价方法[12],都是以ALFUS工作组的三因素评价模型为基础;而在无人系统能力比赛中,一般以是否完成规定的任务、完成的数量和完成时间作为打分和评价依据,以总分的排序来判断自主性高低,如“中国智能车未来挑战”大赛,这种方法直观、易操作,但很难全面地评价无人地面车辆的自主性能力。

本文按层次分析法理论[13],从体现无人地面车辆自主性应具备的能力要素出发,以其自主性能力为评价目标,分为感知、规划、运动控制、行为和学习能力5个评价方面,向下逐层分解为4个评价层次,共12个评价要素和38个评价因素(具体如图1所示),设置的指标涵盖了无人地面车辆自主性能力的各个方面[14-16]。由于自主性能力指标属于软指标,有的能力尚在开发中,因此,本文建立的无人地面车辆自主性能力评价指标体系符合其技术发展的规律和要求,且所有的指标都可以根据需要进行增减,具备一定的灵活性,符合实际应用。之后,采用定性定量相结合的方法进行单项和总体自主性能力的评价,得到的结果符合预期,确定的无人地面车辆自主性能力等级划分可为其他领域无人系统自主性研究提供参考。

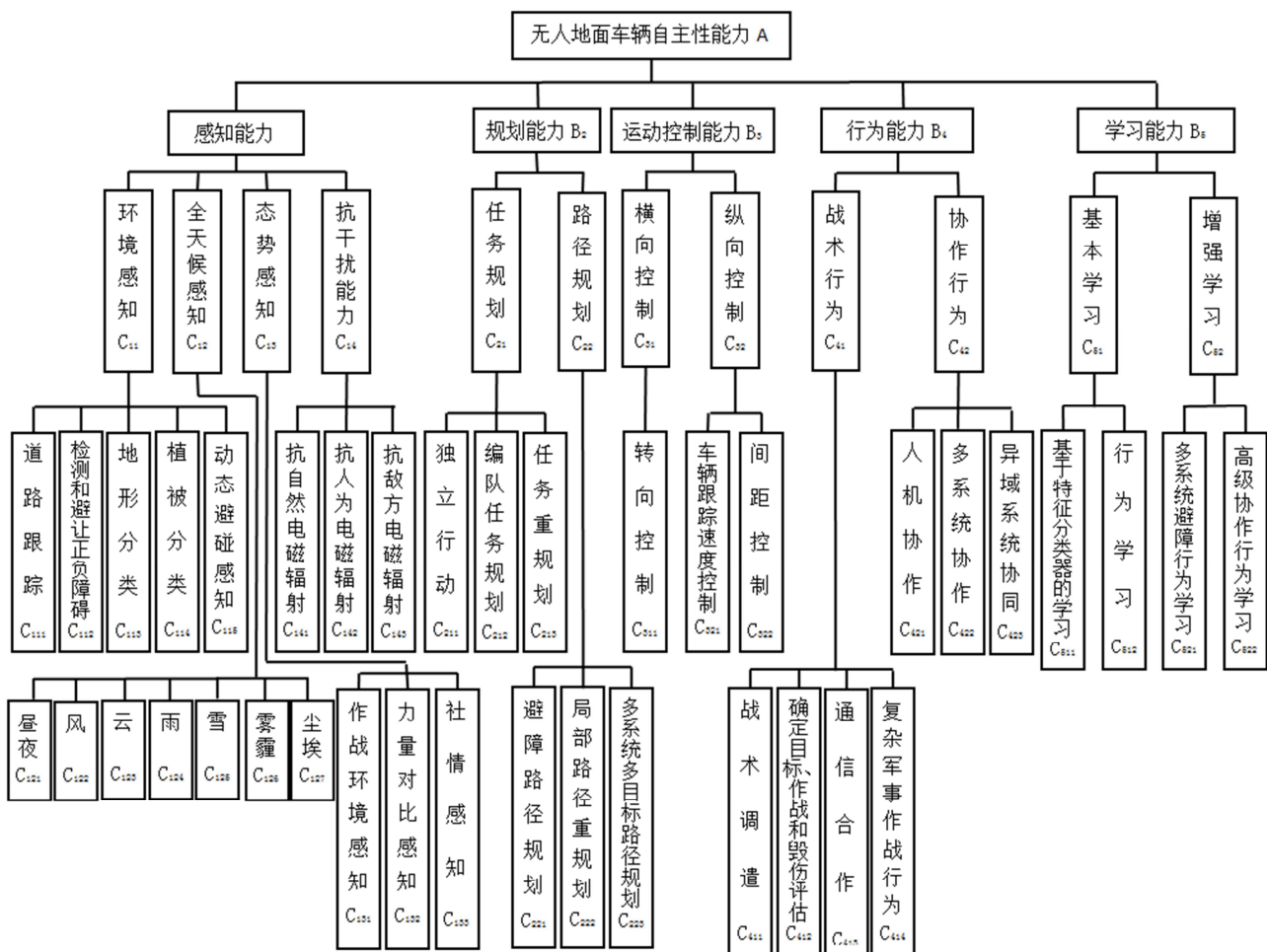


图1 无人地面车辆自主性评价指标体系。

2. 无人地面车辆自主性能力评价模型

本文在对已有的评价方法进行研究的基础上, 对G1序关系法进行改进, 最大程度的去除主观因素的影响, 结合模糊综合评价法建立无人地面车辆自主性评价模型, 其中模糊评价方法中的隶属度矩阵以技术成熟度作为参考标准。通过对设置的不同环境和不同自主性等级的无人车进行赋值, 以验证模型计算的可行性, 实现了评价过程的程序化。

2.1. 改进的G1序关系法

不同评价方面的评价要素、评价因素对无人地面车辆自主性能力的影响程度是不同的, 有些较重要, 有些次之, 有些受目前技术能力限制甚至还不具备, 为了表示各方面能力因素的相对关系, 通过算法对不同能力因素赋予不同的权重, 作为对无人地面车辆在某种任务环境中执行任务时应具备的自主性能力的要求。

2.1.1. 基本理论

G1序关系分析法可以唯一的体现指标之间按某种规定或原则排定的序关系[17]。在本文中这种规定或原则是无人地面车辆在任务环境中应该具备的能力, 即任务与主体能力应对等。由于序关系的排序对指标权重值影响较大, 为了减少某个专家的主导意见, 本文在过程中采用Spearman等级相关系数一致性检验和均值法二次排序进行修正。

2.1.2. 方法和步骤

①确定序关系

定理：若评价指标 x_i 相对于某评价准则（或目标）的重要性程度大于（或不小于） x_j 时, 则记为 $x_i > x_j$ 。

定理：若评价指标 x_1, x_1, \dots, x_m 相对于某评价准则（或目标）具有关系式 $x_1^* > x_2^* > \dots > x_m^*$ 时, 则称评价指标 x_1, x_1, \dots, x_m 之间按“>”确立了序关系。这里 x_i^* 表示 $\{x_i\}$ 按序关系“>”排定顺序后的第 i 个评价指标 ($i = 1, 2, \dots, m$)。

评价指标集 $\{x_1, x_1, \dots, x_m\}$ 按下述步骤建立序关系。

第一步, 专家(或决策者)在指标集 $\{x_1, x_1, \dots, x_m\}$ 中, 选出认为是最重要(关于某评价准则)的一个(只选一个)指标记为 x_1^* 。

第二步, 专家(或决策者)在余下的 $(m-1)$ 个指标中, 选出认为是最重要(关于某评价准则)的一个(只选一个)指标记为 x_2^* 。

.....

第 k 步, 专家(或决策者)在余下的 $(m-(k-1))$ 个指标中, 选出认为是最重要(关于某评价准则)的一个(只选一个)指标记为 x_k^* 。

.....

第 m 步, 经过 $(m-1)$ 次挑选剩下的评价指标记为 x_m^* 。

这样就唯一确定了一个序关系式 $x_1^* > x_2^* > \dots > x_m^*$, 为标记方便, 仍记为 $x_1 > x_2 > \dots > x_m$ 。

②排序修正

本文拟邀请10位相关领域专家和技术人员, 对无人地面车辆在实验设定的任务环境条件下应具备的自主性能力因素进行排序。G1序关系法不需要进行一致性检验, 为了更好的体现科学性, 采用斯皮尔曼等级相关系数法对专家排序进行检验[18, 20]。

设: 第 j 种方法得到的排序为 $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, 则第 j 和第 k 个排序的等级相关系数也即斯皮尔曼系数 ρ_{jk} ,

$$\rho_{jk} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m (a_{ij} - a_{ik})^2}{m(m^2 - 1)} \quad (1)$$

Spearman等级相关系数的作用是淘汰不通过一致性检验的专家排序, 计算一位专家和其他所有专家的Spearman等级相关系数的均值, 当均值 ≥ 0.5 , 则该专家通过一致性检验, 否则, 淘汰该专家排序。

③二次排序

本文采用平均值法对经过一致性检验的排序指标进行二次排序。

第一步, 排名的分数转换

用排序打分法[18]将专家排名转换成分数 R_{ij} , 即

$$R_{ij} = n - r_{ij} + 1$$

其中, i 为第 i 个指标 ($i = 1, 2, \dots, m$), j 为第 j 位专家 ($j = 1, 2, \dots, l$), r_{ij} 为第 i 个指标在 j 位专家排序中的排名。

第二步, 均值法指标得分计算

均值法指标[18]得分表达式为 $\bar{R}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_{ij}$, 其中, \bar{R}_i 为第 i 个指标均值法得分, R_{ij} 为排名的分数。

第三步, 均值法二次排序

按均值方法的得分 \bar{R}_i 的大小重新进行排名, 数值大的排名高, 反之, 排名低。

若有两个指标的得分 $R_i = R_j$, 则通过计算不同得分的标准差确定指标排序。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (R_{ij} - \bar{R}_i)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

若 $\sigma_i \neq \sigma_j$, 则按照得分的标准差 δ_i 的大小进行排名, δ_i 越小排名越高。

若 $\sigma_i = \sigma_j$, 则 i 和 j 两个指标的排名相同。

以上步骤不断重复, 直至满足一致性检验要求。

④给出 x_{k-1} 与 x_k 间相对重要程度的比较判断

在修正排序的基础上, 对相邻的排序指标进行重要性程度比较。

第一步, 设专家关于评价指标 x_{k-1} 与 x_k 的重要性程度之比 w_{k-1}/w_k 的理性判断分别为 $r_k = \frac{w_{k-1}}{w_k}$ ($k = m, m-1, m-2, \dots, 3, 2$), r_k 由各个专家单独给出, 然后求平均值。当 m 较大时, 可取最次要指标 $r_m = 1$ 。 R_k 的赋值可参考表1[17]。

表1 指标比较赋值说明。

r_k	说明
1.0	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 具有同样重要性
1.1	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 之比介于同样重要与稍微重要之间
1.2	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 稍微重要
1.3	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 之比介于稍微重要与明显重要之间
1.4	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 明显重要
1.5	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 之比介于明显重要与强烈重要之间
1.6	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 强烈重要
1.7	指标 x_{k-1} 与指标 x_k 之比介于强烈重要与极端重要之间
1.8	指标 x_{k-1} 比指标 x_k 极端重要

定理：若 x_1, x_1, \dots, x_m 具有序关系式 $x_1 > x_2 > \dots > x_m$ ，则 r_{k-1} 与 r_k 必须满足 $r_{k-1} > \frac{1}{r_k}$ ， $k = m, m-1, m-2, \dots, 3, 2$

第二步，权重系数 w_k 的计算

定理：若专家（或决策者）给出 r_k 的理性赋值满足 $r_{k-1} > 1/r_k$ ，则

$$w_m = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i)^{-1} \quad (3)$$

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad k = m, m-1, \dots, 3, 2$$

由于本文是针对无人地面车辆在执行某次任务过程中的自主性能力评价，当任务确定时，无人地面车辆所面对的工作环境和任务目标就基本确定。因此，在层次分析法的基础上采用G1序关系法来确定指标权重值，简化了计算量，序关系的给出表达了专家的意愿，结果可信赖，更好的将专业知识和经验判断给予充分量化；过程中为了减少某一位专家意见的主导性，采用一致性检验和二次排序，使评价结果更具科学性。

2.2. 模糊综合评价法

本文在按上述方法得到权重值的基础上，对评价因素集采用单因素模糊评价方法得到单个评价方面的值，之后逐层向上通过模糊综合评价，得到系统自主性能力综合评价值。

模糊评价法理论的关键就是求出隶属度矩阵（模糊评判矩阵）。本文以代表各项自主性能力的技术成熟度（TRL）[22-25]作为赋值依据，采用问卷调查的形式，由专家和相关技术人员给出无人地面车辆自主性能力技术所处的等级和完成情况（完成的百分数），再通过对调查数据的整理、统计，得到单因素模糊评判矩阵，即能力因素相对于评价集的隶属度矩阵，同之前得到的评价因素指标权重值，通过模型计算得到评价值。

2.2.1. 单项自主性能力评价

对第四层的指标因素按单因素评价法[17]，得到单项自主性能力评价值，具体步骤如下：

第一步，确定因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$

第二步，确定评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$

第三步，给出单因素的评判矩阵， r_{ij} 表示从因素 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 出发，该评判对象能被评为 v_j 的隶属度。即 r_{ij} 表示第 i 个因素 u_i 在 j 个评语 v_j 上的频率分布，一般将其归一化使之满足 $\sum r_{ij} = 1$ 。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

第四步，确定权重和单因素模糊综合评价模型 $B = WR = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ ，其中 $b_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$

本文建立的无人地面车辆自主性能力评价指标体系中，绝大部分为能力指标，没有明确的测量值。因此，给每个因素集 U 建立合适的评价集 V ，应用（很强，强，一般，弱，很弱）5个等级进行评价。评价集的等级划分来自于决定某个因素能力的技术成熟度，对应评分集为 $(1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$ 。

2.2.2. 综合自主性能力评价

本文采用模糊综合评价方法[17]，由单因素评价中得到的评价因素指标的隶属度矩阵 R_j 和对应层的权重值 W ，按 $B_{ij} = WR_{ij}$ 得到评价向量，如二级评价要素的第一个评价因素的隶属度矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{14} \end{bmatrix}$$

同理可得 R_2, R_3, R_4, R_5 ，于是，由二级综合评价矩阵得

$$B_i = W_i R_i \quad (4)$$

将 B_i 处理成直观的百分制，用 $B_i \times$ 评分集，可得无人地面车辆自主性评价方面“环境感知”的单项能力得分；由一级指标的模糊矩阵 $R = [B_i]$ 和其权重值 W ，经 $A = WR$ 得到无人地面车辆综合自主性能力评价值，即为无人地面车辆在某次任务条件下的自主性评价值。

3. 实验验证

在以上理论分析的基础上，将整个无人地面车辆自主性评价过程程序化。假设三个综合任务环境和多个具备不同能力的无人地面车辆，通过权重赋值和隶属度判断对评价模型和方法进行验证，其中对多人或是多次的赋值均取平均值，最后得到单项自主性能力和综合自主性能力的评价值。经整理数据，得到自主性评价分布区间，以此作为划分无人地面车辆自主性等级的依据。

3. 1. 任务环境

选取有代表性的三个场景，根据任务要求和所处环境的特征确定在该环境下对无人地面车辆自主性能力方面的要求，权重越大说明该方面能力要求越高。

3. 1. 1. 城市环境（任务1）

任务1是以“2014中国智能车未来挑战”大赛场地为背景，选择城郊、市区、高速公路和校园等环境道路。任务包括车辆速度不超过40km/h；能够在一定交通流下完成任务启动、任务终点停车、执行U-TURN、交叉路口通行、特殊路段行驶（避让行人、交通标志识别、有人驾驶车辆干扰、按锥桶排成的导向通道行驶等）、定点泊车（侧方位和固定线框停车）等驾驶任务；具备避让或汇入车流的能力；没有夜间行车任务，比赛期间天气预报第一天天气晴朗有云，夜间有雨，第二天白天小雨转阴伴有三级以上的风（根据天气条件出现的可能性给出序关系），经排序计算得到表2结果。

表2 任务1中无人地面车辆自主性能力评价值。

权重	计算值
W ₁₁	(0.37, 0.17, 0.11, 0.09, 0.27)
W ₁₂	(0.09, 0.20, 0.24, 0.24, 0.10, 0.09, 0.13)
W ₁₃	(0.44, 0.28, 0.29)
W ₁₄	(0.46, 0.32, 0.21)
W ₂₁	(0.39, 0.39, 0.24)
W ₂₂	(0.31, 0.48, 0.22)
W ₃₁	0.42
W ₃₂	(0.39, 0.62)
W ₄₁	(0.23, 0.22, 0.39, 0.17)
W ₄₂	(0.53, 0.29, 0.18)
W ₅₁	(0.64, 0.35)
W ₅₂	(0.63, 0.38)
W ₁	(0.44, 0.28, 0.10, 0.17)
W ₂	(0.62, 0.37)
W ₃	(0.41, 0.59)
W ₄	(0.42, 0.58)
W ₅	(0.55, 0.45)
W	(0.37, 0.18, 0.26, 0.10, 0.09)

3. 1. 2. 越野环境（任务2）

任务2以“跨越险阻-2014”地面无人平台挑战赛的场地为基础。要求对路障、街垒、倒塌墙体、损毁装备、弹坑、壕沟、水坑以及动态障碍物等能够自主避让、绕行，并通过隧道；天气预报比赛第一天晚间有暴雨，对后续比赛场地影响较大，越野环境地面泥泞、积水，负障碍积水较深；对任务2权重序关系的排序是以越野环境为背景，具有一定的作战需求和协作要求，即该任务考验的是无人地面车辆在野外未知环境的带有一定军事要求的任务执行能力，经排序计算得到表3结果。

表3 任务1中无人地面车辆自主性能力评价值。

权重	计算值
W ₁₁	(0.11, 0.24, 0.39, 0.15, 0.10)
W ₁₂	(0.09, 0.14, 0.10, 0.3, 0.09, 0.11, 0.19)
W ₁₃	(0.48, 0.31, 0.22)
W ₁₄	(0.24, 0.41, 0.34)
W ₂₁	(0.32, 0.24, 0.45)
W ₂₂	(0.45, 0.36, 0.20)
W ₃₁	0.46
W ₃₂	(0.45, 0.55)
W ₄₁	(0.30, 0.20, 0.37, 0.12)
W ₄₂	(0.44, 0.36, 0.19)
W ₅₁	(0.62, 0.39)
W ₅₂	(0.62, 0.38)
W ₁	(0.32, 0.24, 0.23, 0.20)
W ₂	(0.58, 0.42)
W ₃	(0.58, 0.42)
W ₄	(0.58, 0.41)
W ₅	(0.55, 0.45)
W	(0.29, 0.24, 0.14, 0.17, 0.15)

3. 1. 3. 乡村环境（任务3）

任务3是面对乡村典型环境，没有作战要求，不需要多系统协作，因此去掉指标C₁₃、C₁₄₃、C₂₁₂和C₂₂₃，行为能力B₄下只保留C₄₂₁，学习能力B₅下只保留C₅₁₁，为便于输入程序验算，对去掉的指标以0输入，经排序计算得到表4结果。

表4 任务1中无人地面车辆自主性能力评价值。

权重	计算值
W ₁₁	(0.18, 0.21, 0.38, 0.09, 0.15)
W ₁₂	(0.09, 0.14, 0.10, 0.15, 0.07, 0.15, 0.24)
W ₁₄	(0.45, 0.55)
W ₂₁	(0.62, 0.38)
W ₂₂	(0.55, 0.45)
W ₃₁	0.61
W ₃₂	(0.45, 0.55)
W ₄₂	0.12
W ₅₁	0.10
W ₁	(0.47, 0.29, 0.24)
W ₂	(0.58, 0.43)
W ₃	(0.61, 0.38)
W ₄	0.12
W ₅	0.10
W	(0.36, 0.23, 0.19, 0.12, 0.10)

以上假设的三个任务环境各层指标体系权重的计算，都是建立在任务要求和环境特征的基础上，给出的序关系和比较判断、以及计算出的各指标权重值体现了专家的经验判断和该任务要求系统具备的自主性能力。经多次验算、一致性检验、二次排序和取平均值，很好的避免了个别权威专家主观因素的影响。在给出比较判断值的过程中虽然带有一定的主观性，但由于序关系已经确定了重要性排序，

每位专家给出重要判断比较值之间的一点差别不足以影响最后权重值，之后又对所有专家的判断结果取平均，得出的权重数值基本符合心理预期和任务要求。

3.2. 实验车自主性能

对不同型号、具有不同能力特点的无人地面车辆采用专家咨询法，在对各单项能力技术成熟度分析的基础上，得到单因素模糊评价矩阵，结合之前得到的权重值计算出单因素自主能力评价值，最终得到总体自主性评价值。

3.2.1. A车

无人车A具有道路环境下的道路跟踪、复杂线形道路行驶，U-turn，交通信号识别、密集障碍躲避、动态障碍躲避、重规划、融入交通流、隧道检测，远程遥控下的紧急停车、速度自适应等能力；越野环境下具备长距离自主驾驶、正负障碍检测，动态障碍检测和危险区域识别能力；并解决了上下坡时由于传感器视角造成的误检测问题；具备稀疏路点的自动加载和显示，GPS受干扰情况下的可靠定位；该车设计的目标是面对公路环境，在越野环境中一些能力相对较弱，学习能力目前只能在非常有限的等级公路环境下进行，经隶属度赋值得到：

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$R_{31} = [0 \quad 0.7 \quad 0.3 \quad 0 \quad 0]$$

$$R_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{41} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{42} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{51} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{52} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

3.2.2. B车

B车为履带式车改装而成，成功实现了AMT控制、制动转向控制、分离转向控制和速度伺服控制，采用360° 高清摄像机与高敏感度探测器，任何地雷、炸弹、伏兵等障碍均可识别，具有一定的作战能力；由于自身车辆具有高技术性能，能够克服特殊地形障碍，在检测地面凹凸障碍方面具有一定优势，可以行驶在泥泞的道路、高起伏的坡路，以高时速穿越复杂地形；具有红外夜视装置，实现了夜间行驶；在此环境下具有一定学习能力，经隶属度赋值得到：

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$R_{31} = [0 \quad 0.2 \quad 0.8 \quad 0 \quad 0]$$

$$R_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{41} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$R_{42} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$
$$R_{51} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$
$$R_{52} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

3.2.3.C、D、E车

为了进行全面的自主性等级评价区间的划定，拟用C车（全遥控，所有能力都属于低赋值1.0）、D车（多车协同完全自主，所有能力都在高赋值为1.0）、E车（单车完全自主，除协同能力属于低赋值为1.0，其余能力完全属于高赋值为1.0）进行极端隶属度赋值。

3.3. 自主性评价过程实现

对整个评价过程经算法实现，得到无人地面车辆单项和总体自主性能力评价。文中展现的只是大量算例的一部分，仅以有限的例子来说明无人地面车辆自主性评价模型和方法，算法实现结果如图2所示，图中A1表示A车在环境1中的5个能力方面的评价，以此类推。

A1score =					
	59.2000	50.6000	56.0000	42.4000	20.0000
A1Score =					
	51.5300				
B1score =					
	48.2000	46.2000	40.8000	58.0000	29.8000
B1Score =					
	45.3580				
A2score =					
	42.2000	48.0000	50.8000	38.0000	20.0000
A2Score =					
	40.8380				
B2score =					
	53.8000	45.4000	38.2000	58.8000	29.6000
B2Score =					
	46.6640				

C1score =					
	20.0000	20.0000	15.2000	20.0000	20.0000
C1Score =					
	18.7520				
D1score =					
	100.0000	100.0000	76.0000	53.6000	100.0000
D1Score =					
	88.6560				
C2score =					
	20.0000	20.0000	13.8000	20.0000	20.0000
C2Score =					
	19.0700				
D2score =					
	100.0000	100.0000	69.0000	66.4000	100.0000
D2Score =					
	89.6380				
E2score =					
	100.0000	100.0000	69.0000	66.4000	100.0000
E2Score =					
	85.0060				

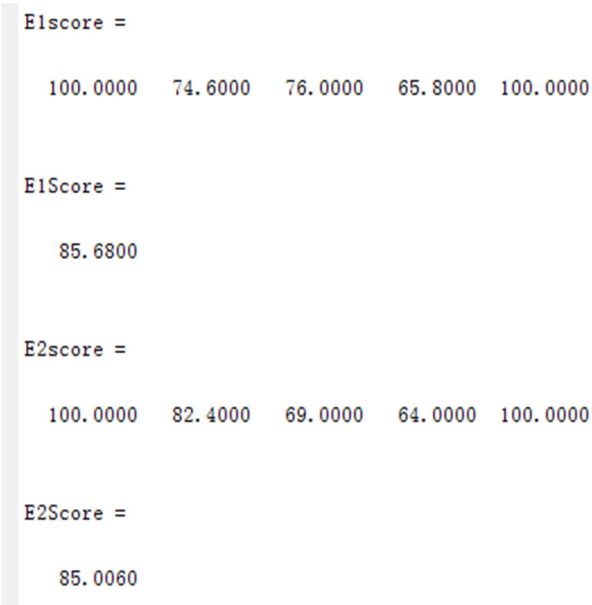


图2 无人地面车辆自主性评价算法实现图例。

将图2中的自主性评价值整理成表5至表7，以便对无人地面车辆自主性评价值进行比较。

表5 任务1中无人地面车辆自主性能力评价值。

得分	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	A
A车	59.2	50.6	56.0	56.4	20.0	53.1
B车	48.2	46.2	40.8	58.0	29.8	45.4
C车	20.0	20.0	15.2	20.0	20.0	18.8
D车	100.0	100.0	76.0	53.6	100.0	88.7
E车	100.0	74.6	76.0	65.8	100.0	85.7

表6 任务2中无人地面车辆自主性能力评价值。

得分	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	A
A车	42.1	48.0	50.7	41.6	20.0	40.9
B车	53.8	45.4	38.2	58.8	29.6	46.7
C车	20.0	20.0	13.8	20.0	20.0	19.1
D车	100.0	100.0	69.0	66.4	100.0	89.6
E车	100.0	82.4	69.0	64.0	100.0	85.0

表7 任务3中无人地面车辆自主性能力评价值。

得分	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	A
A车	55.0	53.2	55.2	11.3	2.0	44.1
B车	53.6	46.6	43.0	9.6	4.0	39.7
C车	19.8	20.0	15.0	2.4	2	15.1
D车	99.0	100.0	75.0	12.0	10.0	74.2
E车	99.0	100.0	75.0	12.0	10.0	75.3

C车、D车、E车是假设具有某方面极端能力的无人地面车辆，目的是为了能够在任务环境下对能力得分的最高值和最低值作区间规定，更好的分析无人地面车辆能力的高低。例如，在任务3中，由于 B₄ 和 B₅ 两个评价方面都只保留了一个指标，该指标的最大评价值仅为12分和10分，因此，也可以看出单项自主性能力得分排序意义大于得分意义。

在每一种任务环境中都需要对大量具有不同自主性能力的无人地面车辆进行隶属度矩阵的赋值和评价值的计算，这样得出的评价值分布才有意义，评价值的排序可以说明在该环境下无人地面车辆自主性能力的高低。

4. 无人地面车辆自主性评价等级确定

美国国防部2011年发布的路线图中，给出了无人系统自主性的四个等级[13]，即人操作、人委派、人监督和完全自主，并对每个等级相对应的各种技术进行了解释，这四个等级是针对所有无人系统而定的。因此，本文在此划分的基础上，结合无人地面车辆工作环境和其自主性能力的特点，通过大量实验验证和数据归类，对无人地面车辆自主性等级得分区间进行划分，将无人地面车辆自主性能力划分为四个等级，即人遥控、自动工作、近自主、全自主，可以比较全面的涵盖各种自主性能力的无人地面车辆，具体描述如表8所示。

表8 无人地面车辆自主性能力等级。

等级	名称	主要特征描述	评价值区间
1	人遥控	由操作人员对无人地面车辆的行驶路线、动作行为等进行在线控制能够在一般结构化环境或已知地形、日光及有利天气下按照人预先规划好的路径行走，遇到环境变化或突发状况时，系统本身无判断决策能力，需要人或更高级的智能体进行控制和决策	20分以下
2	自动工作	人只布置全局任务，对系统尽量少的干预，处于监控管理状态；过程中系统能够根据环境感知进行任务和路径重规划，不受一般气候条件变化影响；具备在一定环境下的学习能力和多系统协同能力；具有对地形特征的识别与分类，以及多类数据的融合；具备一定的态势感知能力，能做出常规决策	20~40分
3	近自主	具有全面的感知能力，能够进行自我保护和隐蔽，具有高机动性和全方位的态势感知能力；能够进行故障检测、诊断与修复；具有多方面决策能力和控制权限；可以进行多智能体（包括人与其他智能体）协同；机动性等同于全地形车辆，可以在极端的天气条件下工作；系统领受任务后，无需更多的人为干预，自主完成任务	40~70分
4	全自主		70分以上

5. 结束语

本文以无人地面车辆自主性能力为研究目标，从5个能力方面出发建立了自主性能力评价模型，采用定性定量相结合的方法对单项自主能力和系统综合自主性能力进行了评价，在假设的环境条件下，对不同自主性等级的无人地面车辆进行赋值验算，以得到的评价值进行自主性等级划分，结果符合美国国防部提出的无人系统自主性四等级模式，证明文中的方法具有一定的科学性和可行性。

致谢

本文为青年科学基金项目《不完全量测与通信局限下的多机器人协作实时SLAM一致性分析研究》(61305134)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [2] Hui-Min Huang, Elena Messina, James Albus. Toward a Generic Model for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) [C]. Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, Maryland, 2003.
- [3] Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000-2025 [C]. Technical Report. Department of Defense. Washington DC, 2001.
- [4] Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002-2027 [C]. Technical Report. Department of Defense. Washington DC, 2002.
- [5] Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aircraft system Roadmap 2005-2030 [C]. Technical Report. Department of Defense. Washington DC, 2005.
- [6] Office of the Secretary of Defense, FY2009-2034 Unmanned Systems Integrated Roadmap [C]. Department of Defense, Washington DC, 2009.
- [7] 高劲松, 李慧, 陈哨东. 美国国防部无人系统路线图自主性的技术演进[J]. 国际航空, 2012, 5: 36-38.
- [8] Reed N E. A User Controlled Approach to Adjustable Autonomy [C]. Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE, 2005: 185-193.
- [9] Sean A L, Jonathan T B, Marcus H H, et al. A Deontic Implementation of Adjustable Autonomy for Command and Control of Robotic Assets. Unmanned Systems Technology VIII, Proceedings of SPIE, 2006: 1-11.
- [10] 李一波, 王新星, 姚宗信等. 无人平台自主能力分级的四指标模型[J]. 电光与控制, 2012, 10(10): 34-37.
- [11] 王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法[J]. 中国科学: 科学通报, 2012, 15(15): 1290-1299.
- [12] 杨哲, 张汝波. 无人系统自主等级模糊评价方法[C]. 先进制造技术与工业信息学博士生学术论坛论文集, 2009: 2043-2047.
- [13] 付瑶. 评价系统的理论与实践研究[M]. 福建厦门: 厦门大学出版社, 2015.
- [14] 付梦印, 王美玲译. 军用无人地面车辆技术的发展[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [15] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [16] 朱淼良, 杨建刚, 吴春明. 自主式智能系统[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [17] 徐吉辉, 谢文俊. 综合评价理论、方法与军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [18] 李刚, 曹宏举, 贾秀娇. 基于一致性排序的群组G1赋权方法[J]. 统计与决策, 2010(21): 21-23.
- [19] 王菲菲, 罗日成, 刘从法等. 基于隶属函数-G1法的变压器状态综合评判. 电气技术, 2011, 10: 10-14.
- [20] 刘艳春. 一种循环修正的组合评价方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(4): 88-94.
- [21] 宁宝权, 陕振沛. 基于均值修正G1组合赋权的第三方农产品物流供应商综合评价[J]. 物流技术, 2015(11): 163-165.
- [22] 于坤炎, 周悦, 赵祥君, 等. 车辆装备项目技术成熟度评估方法及应用[J]. 军事交通学院学报, 2015, 17(3): 48-52.
- [23] MACKEY R, SOME R, ALJABRI A. Readiness levels for spacecraft information technologies [C]. Aerospace Conference, IEEE Press, 2003: 1-398.
- [24] 王志梅, 解月江, 何枫. 软件产品成熟度国外相关技术综述[J]. 质量与可靠性, 2015(5): 51-55.
- [25] 梁新, 刘宝平, 李凛然. 大型武器装备系统成熟度评估及优化[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2015(3): 344-348.