

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.865.8

Метод оценки возможности автономного управления мобильным роботом

П.А. Безмен

Юго-Западный государственный университет

A method to evaluate the autonomic control capability of a mobile robot

P.A. Bezmen

South West State University

Оценка возможностей системы управления мобильным роботом, обеспечивающей его автономное функционирование, является актуальной задачей. Такой анализ позволяет не только определить текущие возможности системы управления, но и выявить области для ее дальнейшего совершенствования, что влечет за собой повышение общей эффективности и устойчивости работы автономных роботов в условиях реальных эксплуатационных сценариев. Работа посвящена разработке метода оценки возможности автономного управления мобильным роботом. Для достижения поставленной цели проведен анализ существующих подходов определения уровня автономности беспилотных систем, а также установлено соответствие значений оценки возможностей автономного управления мобильным роботом определенным уровням его автономности. Определена зависимость величины данной оценки от значений оценки возможностей автономного управления при выполнении конкретных задач. Выявлена взаимосвязь между значением оценки возможностей автономного управления при решении роботом некоторой задачи и вероятностями различных подвидов автономности системы управления роботом, зависящих от условий ее функционирования. Результаты работы показывают, что автономность, как способность робототехнической системы самостоятельно выполнять поставленные задачи, всегда определяется техническими характеристиками робота и условиями окружающей среды. Увеличение технических, информационно-алгоритмических ресурсов системы управления роботом и рост степени независимости от оператора при условии постоянных или снижающихся уровней сложности окружающей среды и задач повышают вероятность автономного управления мобильным роботом при выполнении им задания. В случае максимальной независимости от оператора и соответствия ресурсов системы управления уровням сложности среды и задач или при избыточности ресурсов оценка возможности автономного управления мобильным роботом формируется исходя из степени наличия технических и информационно-алгоритмических ресурсов системы управления роботом.

EDN: HNEOSW, <https://elibrary/hneosw>

Ключевые слова: робототехническая система, автономное управление, мобильный робот, метод оценки, система управления

■ An actual task is to evaluate the capabilities of the mobile robot control system that ensures the robot's autonomous operation. Such an analysis not only allows for the determination of the current capabilities of the robot control system but also helps identify areas for its further improvement, leading to increased overall efficiency and stability of autonomous robots in real-world operational scenarios. This paper is dedicated to developing a method for evaluating the capability of a mobile robot's autonomous control. To achieve this aim, an analysis of existing approaches for determining the level of autonomy in unmanned systems was conducted, and a correspondence was established between the evaluation values of the mobile robot's autonomous control capabilities and specific levels of the robot's autonomy. The dependence of this evaluation on the assessment of autonomous control capabilities during the robot's execution of particular tasks was also determined. A relationship was identified between the value of the autonomous control assessment when performing a given task and the probabilities of various autonomy subtypes of the control system, which, in turn, depend on operating conditions. The results show that autonomy, defined as the capacity of a robotic system to perform assigned tasks independently, is invariably governed by the robot's technical characteristics and the environmental conditions. Augmentation of the technical and informational-algorithmic resources of the control system, in conjunction with increasing its degree of independence from human operators — assuming that environmental complexity and task difficulty either remain constant or decrease — serves to significantly enhance the probability of achieving successful autonomous control during task execution. In cases of maximum independence from the operator, when the control system's resources match the environmental and task complexity levels, or when resources are abundant, the assessment of autonomous control capability is based on the availability of technical and informational-algorithmic resources within the robot's control system.

EDN: HNEOSW, <https://elibrary/hneosw>

Keywords: robotic system, autonomous control, mobile robot, evaluation method, control system

В настоящее время мобильные роботы (МР) не являются полностью автономными: их функционирование ограничено условиями реального окружающего пространства, способного динамически изменяться и частично или полностью недетерминированного. Продолжительность периода времени автономной (независимой) работы МР зависит от возможностей его бортовой энергоустановки по длительному обеспечению энергией всех его подсистем, что также накладывает ограничения на автономность.

В работе [1] автономность определена как способность МР существовать и выполнять функции в протяженных времени и пространстве, а также при изменяющихся условиях среды без необходимости взаимодействия с другими дружественными субъектами или субъектами высшего уровня иерархии.

Автономность МР может быть ограничена несовершенством его системы управления (далее СУМР) и бортовых сенсоров, поэтому определение возможностей СУМР, обеспечивающей его автономное функционирование, становится актуальной задачей.

Цель исследования — разработка метода оценки возможности автономного управления МР.

Для достижения поставленной цели выполнен обзор методов определения уровня автономности беспилотных систем (БПС), установлено соответствие значений оценки возможности автономного управления МР определенным уровням и выявлена ее зависимость от оценок возможности автономного управления МР при решении отдельных задач задания МР, найдена зависимость оценки возможности автономного управления МР при решении им некоторой задачи от вероятностей подвидов автономности СУМР, зависящих от условий ее работы.

Методика исследования. В публикациях [2, 3] рабочей группы ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems — уровни автономности БПС) предложено пространство автономности БПС и введены три его измерения: независимость от человека-оператора (далее оператор), сложности миссии и среды. Степени независимости от оператора, сложности миссии и среды для некоторой БПС, отнесенные к соответству-

ющим осям измерений, образуют ограниченную поверхностью возможную область пространства автономности, где может функционировать БПС. В работе [4] рассмотрено соответствие каждой БПС одному из десяти уровней автономности с точки зрения управления.

Определим уровень автономности управления МР как комплексную оценку возможности выполнения СУМР требуемых функций в течение продолжительного времени. На эту оценку влияют четыре подвида автономности СУМР: получения данных, их обработки, их распознавания и принятия решений. Для нахождения уровня автономности управления введем оценки A и A_i , первая из которых определяет возможность автономного управления МР при выполнении им задания, вторая — при решении МР i -й задачи задания.

Таблица 1

Уровни автономности управления

Уровень	Название уровня автономности управления	Диапазон оценок A и A_i
1	Дистанционное управление	[0; 0,1)
2	Расширенное дистанционное управление	[0,1; 0,2)
3	Управление согласно заранее спланированному заданию	[0,2; 0,3)
4	Расширенное управление согласно заранее спланированному заданию	[0,3; 0,4)
5	Полуавтономное управление	[0,4; 0,5)
6	Управление с делегированием оператору полномочий по изменению некоторых параметров задач задания	[0,5; 0,6)
7	Управление с расширенным делегированием оператору полномочий по изменению параметров задач задания	[0,6; 0,7)
8	Управление с возможностью кооперации (с оператором и/или другими системами)	[0,7; 0,8)
9	Управление с возможностью коллаборации (с оператором и/или другими системами)	[0,8; 0,9)
10	Полностью автономное управление	[0,9; 1,0]

Эти оценки могут принимать следующие значения:

$$A \in \mathbf{R}, 0 \leq A \leq 1 \text{ и } A_i \in \mathbf{R}, 0 \leq A_i \leq 1.$$

При $A = 0$ и $A_i = 0$ оператор дистанционно управляет МР. При $A \rightarrow 1$ и $A_i \rightarrow 1$ управление МР стремится к полностью автономному. При $A = 1$ и $A_i = 1$ МР работает так же эффективно, как если бы его функции выполнял оператор, или даже превосходит его.

Уровни автономности управления и соответствующие им диапазоны оценок A и A_i приведены в табл. 1.

При решении роботом i -й задачи оценка A_i является комплексной и формируется исходя из вероятностей достижения СУМР подвигов автономности (далее вероятности подвигов автономности) по следующим событиям: достижение автономности получения данных (S_A), достижение автономности обработки данных (H_A), достижение автономности распозна-

Таблица 2

Факторы, влияющие на вероятности достижения подвигов автономности

Обозначение	Название	Описание
f_a	Наличие технических ресурсов для автономной работы	Степень достаточности бортового аппаратного обеспечения вычислительной техники МР для выполнения задачи при полностью автономном управлении
f_p	Наличие информационно-алгоритмических ресурсов для автономной работы	Степень достаточности бортового программного обеспечения и баз данных МР для выполнения задачи при полностью автономном управлении
f_e	Сложность среды	Степень сложности среды, окружающей МР
f_t	Сложность задачи	Степень сложности задачи, выполняемой МР
f_o	Независимость от оператора	Степень предполагаемой/требуемой независимости управления МР от оператора в ходе выполнения задачи

вания данных (R_A), достижение автономности принятия решений (D_A). Условия работы СУМР (факторы), влияющие на вероятности достижения подвидов автономности приведены в табл. 2.

Вероятность автономности получения данных $P(S_A)$ зависит от факторов f_a , f_e и f_o , вероятность автономности обработки данных $P(H_A)$ — от f_a , f_p и f_o , вероятность автономности распознавания данных $P(R_A)$ — от f_a , f_p , f_e и f_o , вероятность автономности принятия решений $P(D_A)$ — от f_a , f_p , f_t и f_o .

Значение фактора f_a можно увеличить следующим образом: добавлением в СУМР низковольтных микропроцессоров и контроллеров [5]; оптимизацией схем питания и снижением потребления энергии процессорами, микроконтроллерами и периферийными устройствами СУМР [6, 7]; применением специализированных микросхем и ускорителей вычислений (графических процессоров) [8], микросхем ASIC [9, 10], FPGA [11] и процессоров глубокого обучения DLP [12]; использованием иерархической модульной архитектуры СУМР с возможностью автоматического подключения/отключения и замены модулей для адаптации СУМР к различным условиям эксплуатации; объединением функций в одной микросхеме СУМР, что снижает временные затраты на обработку сигналов [13, 14].

Значение фактора f_p можно увеличить следующим образом: применением и совершенствованием алгоритмов SLAM [15–17] для построения карт среды и ориентации МР в пространстве; использованием в СУМР алгоритмов оценки, фильтрации и комплексирования данных [18]; накоплением бортовой базы данных о типичных ситуациях и объектах с целью улуч-

шения распознавания и реагирования на изменение среды; применением специальных библиотек программ для решения специальных задач робототехники (распознавание образов, обработка естественного языка, принятие решений и др.) и моделей глубокого обучения искусственных нейронных сетей для нужд МР с учетом специфики задач и ограниченных аппаратных ресурсов [19, 20].

Возможные значения каждого фактора $f \in \mathbf{R}$ ограничены диапазоном $0 \leq f \leq 1$. При $f_a \rightarrow 0$ и $f_p \rightarrow 0$ растет потребность СУМР в привлечении дополнительных технических и информационно-алгоритмических ресурсов соответственно для реализации автономного управления, а при $f_o \rightarrow 0$ — в участии оператора, вследствие чего снижается уровень автономности управления.

При выполнении МР задачи с некоторым уровнем автономности управления должны быть соблюдены следующие условия:

- для вероятности $P(S_A)$

$$\min(f_a, f_o) \geq f_e;$$

- для вероятности $P(R_A)$

$$\min(f_a, f_p, f_o) \geq f_e;$$

- для вероятности $P(D_A)$

$$\min(f_a, f_p, f_o) \geq f_t,$$

где $\min(\bullet)$ — функция нахождения минимума своих аргументов.

Описание рассматриваемых факторов, разделенных на десять условных уровней, соответствующих уровням автономности управления приведено в табл. 3. Значения факторов распределены по уровням равномерно: первому соответствует диапазон $[0; 0,1)$, второму — $[0,1; 0,2)$, ..., девятому — $[0,8; 0,9)$, десятому — $[0,9; 1,0]$.

Таблица 3

Уровни факторов, влияющих на вероятности подвидов автономности

Уровень	f_a	f_p	f_e	f_t	f_o
1	Полный дефицит: реализовано только телеуправление МР	Полный дефицит: отсутствие всех необходимых программных средств и баз данных для самостоятельного выполнения МР каких-либо функций	Крайне простая среда: пустое статичное пространство, отсутствие препятствий, отличная освещенность и оптимальная видимость	Крайне низкая сложность: перемещение вдоль прямой линии или по ограниченной ровной поверхности (базовое управление движением)	Полное участие оператора в управлении

Продолжение таблицы 3

Уровень	f_a	f_p	f_e	f_t	f_o
2	Экстремальный дефицит: выполнение основных функций невозможно без вмешательства оператора, автономно работать может только мониторинг состояния МР и среды	Экстремальный дефицит: отсутствие ключевых программ и данных для автоматического режима работы, существенно ограничивающее функциональность МР	Простая среда: статичное пространство, наличие редких объектов и препятствий, отличная освещенность и оптимальная видимость	Низкая сложность: следование по маршруту	Полное участие оператора в управлении с делегированием оператором полномочий мониторинга состояний МР и окружающей среды
3	Критический дефицит: вычислительные возможности используются только для реализации базовых функций МР, требуется постоянное участие оператора в работе СУМР	Критический дефицит: недостаточно программных модулей и/или баз данных для выполнения многих основных функций МР в автоматическом режиме	Умеренно простая среда: слабопересеченный рельеф местности, наличие небольшого количества объектов и препятствий, редкое движение объектов, хорошая освещенность и оптимальная видимость	Умеренно низкая сложность: обнаружение и обход препятствий	Постоянное участие оператора в планировании задания
4	Крайне сильный дефицит: выполнение большинства задач требует вмешательства оператора, автономность существенно ограничена	Крайне сильный дефицит: ограниченное наличие ресурсов, позволяющее выполнять основные функции МР в автоматическом режиме	Усложненная среда: слабопересеченный рельеф местности, наличие небольшого количества препятствий и постоянно движущихся объектов, хорошая освещенность и оптимальная видимость	Средняя сложность: построение карты помещения/местности	Постоянное участие оператора в планировании задания с делегированием оператором полномочий мониторинга состояний МР и окружающей среды
5	Сильный дефицит: СУМР работает с заметными ограничениями по автономности, возможны сбои в реакции и планировании, полностью автономная работа возможна для некоторых важных подсистем СУМР	Сильный дефицит: доступны ресурсы для отдельного выполнения большинства функций МР в автоматическом режиме, отдельные функции МР, требующие сложных вычислений, программно не реализованы	Среднесложная среда: слабопересеченный рельеф местности, наличие множества препятствий и движущихся объектов, хорошая освещенность и оптимальная видимость	Повышенная сложность: навигация к заданной точке с учетом динамических препятствий	Частое вмешательство оператора в управление для изменения текущего задания (задачи)

Продолжение таблицы 3

Уровень	f_a	f_p	f_e	f_t	f_o
6	Значительный дефицит: ресурсы недостаточны для своевременного выполнения всех задач, возникают системные задержки, полностью автономная работа возможна для половины подсистем	Значительный дефицит: доступны ресурсы для отдельного выполнения всех функций МР в автоматическом режиме, автономное управление программно не реализовано	Сложная среда: среднeperесеченный рельеф местности, наличие множества препятствий и движущихся объектов, хорошая освещенность и ограниченная видимость	Высокая сложность: распознавание объектов и взаимодействие с ними	Ограниченное вмешательство оператора в управление с делегированием оператором полномочий изменения некоторых параметров задач задания
7	Умеренный дефицит: снижение производительности СУМР при решении сложных вычислительных задач, возможны кратковременные задержки и снижение точности выполнения задач, автономная работа возможна для большего числа подсистем	Умеренный дефицит: ресурсы достаточны для стабильной работы, требуются обновления или дополнения программ, реализующих неадаптивные алгоритмы, автономное управление полностью не реализовано	Крайне сложная среда: среднeperесеченный рельеф местности, наличие множества препятствий и движущихся объектов, удовлетворительная освещенность и недостаточная видимость	Крайне высокая сложность: самостоятельное обучение на основе полученного опыта	Ограниченное вмешательство оператора в управление с расширенным делегированием оператором полномочий изменения параметров задач задания
8	Легкий дефицит: некоторые сложные вычислительные задачи требуют дополнительных аппаратных ресурсов или оптимизации, но СУМР все еще функционирует автономно без существенных проблем	Легкий дефицит: программы, реализующие сложные вычисления, требуют оптимизации, автономная работа СУМР невозможна в реальном времени	Экстремальная среда: сильнопересеченный рельеф местности, наличие множества препятствий и движущихся объектов, неудовлетворительная освещенность и недостаточная видимость	Экстремальная сложность: операции в условиях неполной предсказуемости и ограниченной детерминированности среды	Наблюдение оператором

Окончание таблицы 3

Уровень	f_a	f_p	f_e	f_t	f_o
9	Минимальный дефицит: небольшие ограничения в вычислительных ресурсах для автономной работы СУМР в реальном времени, не влияющие на выполнение основных функций СУМР	Минимальный дефицит: все необходимые программные средства и базы данных присутствуют и актуальны, требуют оптимизации программы, реализующие функции СУМР в реальном времени	Аварийная среда: изменяющийся сильнопересеченный рельеф местности, наличие множества препятствий и движущихся объектов, неудовлетворительная освещенность и недостаточная видимость	Коллаборативная сложность: коллаборация с роботом/оператором для выполнения общей задачи	Редкое наблюдение оператором
10	Полностью достаточные ресурсы: аппаратные вычислительные ресурсы полностью соответствуют требованиям для автономной работы СУМР в реальном времени, СУМР работает без ограничений	Полностью достаточные ресурсы: обеспечение СУМР избыточными или достаточными ресурсами для автономной работы, высокой отказоустойчивости и возможности быстрого восстановления после сбоев	Катастрофическая среда: изменяющийся сильнопересеченный рельеф местности, наличие множества изменяющихся препятствий и непредсказуемо движущихся объектов, неудовлетворительная освещенность и недостаточная видимость	Критическая сложность: автономные планирование, выполнение и коррекция многоэтапных миссий	Зависимость от оператора отсутствует или крайне редкое наблюдение оператором

Результаты. Вероятности $P(S_{Ai})$, $P(H_{Ai})$, $P(R_{Ai})$, $P(D_{Ai})$ подвидов автономности при решении МР i -й задачи определяем следующим образом:

$$P(S_{Ai}) = f(f_{ai}, f_{ei}, f_{oi}) = \begin{cases} \min(f_{ai}, f_{oi}) & \text{при } \min(f_{ai}, f_{oi}) \geq f_{ei}; \\ 0 & \text{при } \min(f_{ai}, f_{oi}) < f_{ei}; \end{cases} \quad (1)$$

$$P(H_{Ai}) = f(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) = \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}); \quad (2)$$

$$P(R_{Ai}) = f(f_{ai}, f_{pi}, f_{ei}, f_{oi}) = \begin{cases} \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) & \text{при } \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) \geq f_{ei}; \\ 0 & \text{при } \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) < f_{ei}; \end{cases} \quad (3)$$

$$P(D_{Ai}) = f(f_{ai}, f_{pi}, f_{ti}, f_{oi}) = \begin{cases} \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) & \text{при } \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) \geq f_{ti}; \\ 0 & \text{при } \min(f_{ai}, f_{pi}, f_{oi}) < f_{ti}; \end{cases} \quad (4)$$

где f_{ai} , f_{ei} , f_{oi} , f_{pi} , f_{ti} — факторы при решении МР i -й задачи.

Оценку при решении МР i -й задачи вычисляем как вероятность того, что i -я задача будет выполнена МР в автономном режиме работы:

$$A_i = \min[P(S_{Ai}), P(H_{Ai}), P(R_{Ai}), P(D_{Ai})]. \quad (5)$$

В выражении (5) функция $\min(\bullet)$ использована для определения наименьшей (наихудшей) оценки A_i среди всех вероятностей подвидов автономности при решении МР i -й задачи.

Оценку A находим как минимальное значение среди оценок возможности автономного управления МР при решении им всех n задач задания $A_1, \dots, A_n$:

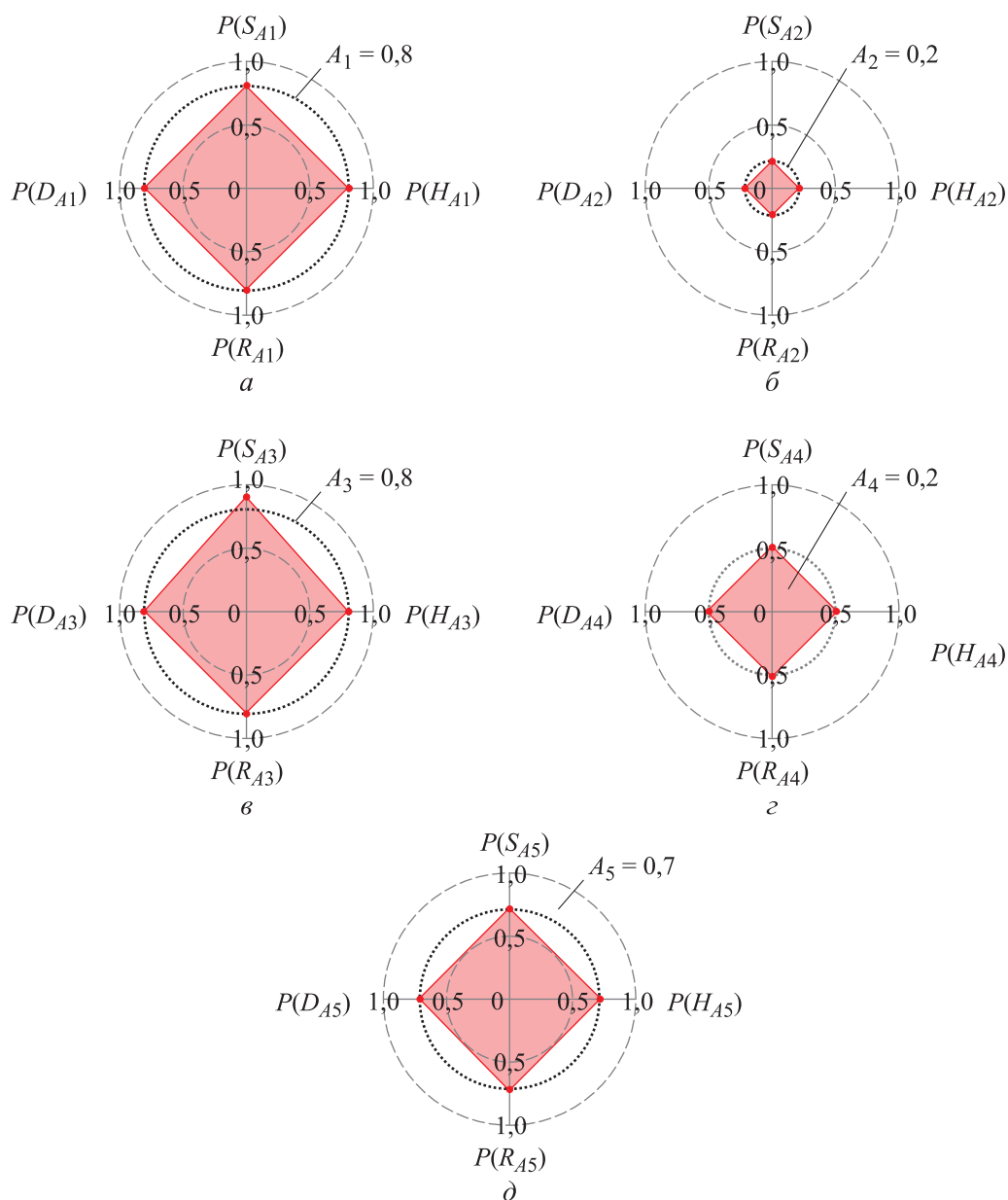
$$A = \min(A_1, \dots, A_n). \quad (6)$$

Значение оценки A показывает вероятность того, что все задание будет выполнено МР в автономном режиме при предполагаемых условиях его работы.

Таблица 4

Значения факторов, вероятностей подвидов автономности и оценок при решении роботом задач

Номер задачи	f_{ai}	f_{pi}	f_{ei}	f_{ti}	f_{oi}	$P(S_{Ai})$	$P(H_{Ai})$	$P(R_{Ai})$	$P(D_{Ai})$	A_i
1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
2	0,9	0,8	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
3	0,9	0,8	0,1	0,5	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
4	0,9	0,8	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,9	0,8	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7



Лепестковые диаграммы вероятностей подвидов автономности с указанием оценок возможности автономного управления МР A_1 – A_5 при решении первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) задач

Средневзвешенную оценку возможности автономного управления МР при выполнении всего задания вычисляем как

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i A_i)}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (7)$$

где k_i — некоторый i -й положительный весовой коэффициент значимости i -й задачи задания.

Оценку $A_{\text{ср}}$ можно использовать для анализа возможности автономного выполнения МР задания при условии неравнозначности его задач.

Пример оценки возможности автономного управления МР. Задание МР состоит из пяти задач. Значения факторов, влияющих на вероятности подвидов автономности при решении МР каждой задачи, приведены в табл. 4. Вероятности подвидов автономности для каждой i -й задачи $P(S_{Ai})$, $P(H_{Ai})$, $P(R_{Ai})$ и $P(D_{Ai})$ вычисляем по выражениям (1)–(4), а оценки A_i — по формуле (5).

Соответствующие каждой задаче значения вероятностей подвидов автономности и оценок возможности автономного управления МР приведены в табл. 4. Лепестковые диаграммы значений вероятностей подвидов автономности с указанием оценок A_1 – A_5 при решении роботом первой–пятой задач показаны на рисунке.

При условии равной значимости задач задания принимаем единый весовой коэффициент k , например $k = 1$, и по выражениям (6) и (7) находим оценки

$$A = \min(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = 0,2;$$

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^5 (k A_i)}{\sum_{i=1}^5 k} = 0,6.$$

Выводы

1. Оценка возможности автономного управления МР не равнозначна вероятности успешного выполнения МР задания, так как недостаток технических и информационно-алгоритмических ресурсов СУМР можно компенсировать увеличением участия оператора в управлении МР для успешного выполнения задания. При этом степень предполагаемой/требуемой независимости управления роботом от оператора будет снижена, а следовательно, и значение оценки A .

2. В большинстве случаев значение фактора наличия технических ресурсов для автономной работы f_a является постоянным при выполнении задания МР. В настоящее время предполагается, что МР не может самостоятельно наращивать бортовое аппаратное обеспечение СУМР и его вычислительные возможности. Снижение технических ресурсов СУМР при работе МР может быть обусловлено частичной или полной потерей работоспособности устройств, составляющих СУМР, например, из-за воздействия среды на МР.

3. Значение фактора наличия информационно-алгоритмических ресурсов f_p для автономной работы может меняться при решении МР разных задач задания. Увеличение значения фактора происходит вследствие того, что выполнение некоторой задачи в автономном режиме требует от СУМР временного применения специальных программ и/или баз данных, не входящих в состав основных информационно-алгоритмических ресурсов СУМР, но они доступны в автономном режиме работы. По завершению выполнения МР этой задачи возможно окончание применения специальных программ и/или баз данных, что подразумевает возвращение фактора к его предыдущему значению. Значение фактора f_p должно быть меньше или равно значения фактора f_a , так как требуемое функционирование программ и баз данных СУМР должно полностью обеспечиваться бортовым аппаратным обеспечением МР.

4. Автономность, как способность робототехнической системы самостоятельно выполнять поставленные задачи, всегда ограничена техническими характеристиками МР и условиями среды.

5. Увеличение технических и информационно-алгоритмических ресурсов СУМР совместно с повышением степени независимости от оператора при фиксированных или уменьшающихся степенях сложности среды и задач повышает вероятность автономного управления МР при выполнении им задания. При максимальной степени независимости управления МР от оператора и соответствии рассматриваемых ресурсов уровням сложности среды и решаемых задач или же при избыточности этих ресурсов оценка возможности автономного управления МР формируется исходя из степени достаточности бортового аппаратного обеспечения вычислительной техники МР, бортового программного обеспечения и баз данных МР.

Литература

- [1] Ермолов И.Л. *Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, МГТУ Станкин, 2012. 350 с.
- [2] Huang H.-M., Messina E., Wade R. et al. Autonomy measures for robots. *IMECE*, 2004, paper IMECE2004-61812, pp. 1241–1247; doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-61812>
- [3] Huang H.-M., Pavsek K., Albus J. et al. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework: an update. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5804, doi: <https://doi.org/10.1117/12.603725>
- [4] Huang H.-M., Messina E., Albus J. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework. Vol. II: Framework models version 1.0. NIST, 2007, 73 p.
- [5] Borkar S., Chien A.A. The future of microprocessors. *CACM*, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 67–77, doi: <https://doi.org/10.1145/1941487.1941507>
- [6] Mikołajczyk T., Mikołajewski D., Kłodowski A. et al. Energy sources of mobile robot power systems: a systematic review and comparison of efficiency. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 13, art. 7547, doi: <https://doi.org/10.3390/app13137547>
- [7] Zidar J., Matić T., Aleksi I. et al. Dynamic voltage and frequency scaling as a method for reducing energy consumption in ultra-low-power embedded systems. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 5, art. 826, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13050826>
- [8] Das R., Gupta V. A systematic literature review on graphics processing unit accelerated realm of high-performance computing. *IJCE*, 2024, vol. 5, no. 3, pp. 10–21, doi: <https://doi.org/10.47941/ijce.1813>
- [9] Lane D.M., Sahafi A. ADNA: automating application-specific integrated circuit development of neural network accelerators. *Electronics*, 2025, vol. 14, no. 7, art. 1432, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics14071432>
- [10] Dastres R., Soori M. A review in advanced digital signal processing systems. *IJECE*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 122–127, doi: <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.14330879>
- [11] Rostum H.M., Hammami N., Salih O.M. FPGA implementation in mobile robot applications: state of the art review. *Multidisciplinary Sciences*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 232–249, doi: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2023.2.21>
- [12] Gao M., Chen H., Liu D. An ASIP for neural network inference on embedded devices with 99% PE utilization and 100% memory hidden under low silicon cost. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 10, art. 3841, doi: <https://doi.org/10.3390/s22103841>
- [13] Cirstea M., Benkrid K., Dinu A. et al. Digital electronic system-on-chip design: methodologies, tools, evolution, and trends. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 2, art. 247, doi: <https://doi.org/10.3390/mi15020247>
- [14] Hameed Ul Hassan Mohammed. Chiplet-based architectures: redefining the future of System-on-Chip (SoC) design. *IJCNIS*, 2025, vol. 17, no. 7, pp. 15–29.
- [15] Alsadik B., Karam S. The simultaneous localization and mapping (SLAM)-an overview. *JASTT*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 147–158, doi: <https://doi.org/10.38094/jastt204117>
- [16] Placed J.A., Strader J., Carrillo H. et al. A survey on active simultaneous localization and mapping: state of the art and new frontiers. *IEEE Trans. Robot.*, 2023, vol. 39, no. 3, pp. 1686–1705, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3248510>
- [17] Qiao J., Guo J., Li Y. Simultaneous localization and mapping (SLAM)-based robot localization and navigation algorithm. *Appl. Water Sci.*, 2024, vol. 14, no. 7, art. 151, doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02183-6>
- [18] Безмен П.А. Исследование скорости сходимости алгоритма системы расширенный фильтр Калмана — адаптивный цифровой фильтр. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 11–20. EDN: QZXTMB
- [19] Soori M., Arezoo B., Dastres R. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *COGR*, 2023, vol. 3, pp. 54–70, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
- [20] Yeom K. Design of deep neural network based model predictive controller for a car-like mobile robot. *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, 2022, vol. 11, no. 8, pp. 606–613, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.606-613>

References

- [1] Ermolov I.L. *Rasshirenie funktsionalnykh vozmozhnostey mobilnykh tekhnologicheskikh robotov putem povysheniya urovnya ikh avtonomnosti s ispolzovaniem ierarkhicheskoy kompleksnoy obrabotki bortovykh dannykh*. Diss. dok. tekhn. nauk [Expanding the functionality of mobile technological robots by increasing their level of autonomy using hierarchical integrated processing of on-board data. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGTU Stankin Publ., 2012. 350 p. (In Russ.).
- [2] Huang H.-M., Messina E., Wade R. et al. Autonomy measures for robots. *IMECE*, 2004, paper IMECE2004-61812, pp. 1241–1247; doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-61812>
- [3] Huang H.-M., Pavsek K., Albus J. et al. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework: an update. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5804, doi: <https://doi.org/10.1117/12.603725>
- [4] Huang H.-M., Messina E., Albus J. *Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework*. Vol. II: Framework models version 1.0. NIST, 2007, 73 p.
- [5] Borkar S., Chien A.A. The future of microprocessors. *CACM*, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 67–77, doi: <https://doi.org/10.1145/1941487.1941507>
- [6] Mikołajczyk T., Mikołajewski D., Kłodowski A. et al. Energy sources of mobile robot power systems: a systematic review and comparison of efficiency. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 13, art. 7547, doi: <https://doi.org/10.3390/app13137547>
- [7] Zidar J., Matić T., Aleksi I. et al. Dynamic voltage and frequency scaling as a method for reducing energy consumption in ultra-low-power embedded systems. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 5, art. 826, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13050826>
- [8] Das R., Gupta V. A systematic literature review on graphics processing unit accelerated realm of high-performance computing. *IJCE*, 2024, vol. 5, no. 3, pp. 10–21, doi: <https://doi.org/10.47941/ijce.1813>
- [9] Lane D.M., Sahafi A. ADNA: automating application-specific integrated circuit development of neural network accelerators. *Electronics*, 2025, vol. 14, no. 7, art. 1432, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics14071432>
- [10] Dastres R., Soori M. A review in advanced digital signal processing systems. *IJECE*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 122–127, doi: <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.14330879>
- [11] Rostum H.M., Hammami N., Salih O.M. FPGA implementation in mobile robot applications: state of the art review. *Multidisciplinary Sciences*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 232–249, doi: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2023.2.21>
- [12] Gao M., Chen H., Liu D. An ASIP for neural network inference on embedded devices with 99% PE utilization and 100% memory hidden under low silicon cost. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 10, art. 3841, doi: <https://doi.org/10.3390/s22103841>
- [13] Cirstea M., Benkrid K., Dinu A. et al. Digital electronic system-on-chip design: methodologies, tools, evolution, and trends. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 2, art. 247, doi: <https://doi.org/10.3390/mi15020247>
- [14] Hameed Ul Hassan Mohammed. Chiplet-based architectures: redefining the future of System-on-Chip (SoC) design. *IJCNIS*, 2025, vol. 17, no. 7, pp. 15–29.
- [15] Alsadik B., Karam S. The simultaneous localization and mapping (SLAM)-an overview. *JASTT*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 147–158, doi: <https://doi.org/10.38094/jastt204117>
- [16] Placed J.A., Strader J., Carrillo H. et al. A survey on active simultaneous localization and mapping: state of the art and new frontiers. *IEEE Trans. Robot.*, 2023, vol. 39, no. 3, pp. 1686–1705, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3248510>
- [17] Qiao J., Guo J., Li Y. Simultaneous localization and mapping (SLAM)-based robot localization and navigation algorithm. *Appl. Water Sci.*, 2024, vol. 14, no. 7, art. 151, doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02183-6>
- [18] Bezmen P.A. The study of the convergence rate of the algorithm extended Kalman filter — adaptive digital filter system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 9, pp. 11–20. EDN: QZXTMB (In Russ.).
- [19] Soori M., Arezoo B., Dastres R. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *COGR*, 2023, vol. 3, pp. 54–70, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>

- [20] Yeom K. Design of deep neural network based model predictive controller for a car-like mobile robot. *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, 2022, vol. 11, no. 8, pp. 606–613, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.606-613>

Статья поступила в редакцию 10.12.2025

Информация об авторе

БЕЗМЕН Петр Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника». Юго-Западный государственный университет (305040, Курск, Российская Федерация, ул. 50 лет Октября, д. 94, e-mail: pbezmen@yahoo.com).

Information about the author

BEZMEN Petr Anatolievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics. South West State University (305040, Kursk, Russian Federation, 50 let Okt'yabrya St., Bldg. 94, e-mail: pbezmen@yahoo.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Безмен П.А. Метод оценки возможности автономного управления мобильным роботом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 10, с. 16–27.

Please cite this article in English as:

Bezmen P.A. A method to evaluate the autonomic control capability of a mobile robot. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 10, pp. 16–27.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Видеонавигация автономных роботов»

Автор В.П. Носков

Рассмотрены методы и алгоритмы формирования моделей внешних сред и определения координат объекта управления по данным бортовых систем технического зрения, обеспечивающие автоматическое планирование и отработку целенаправленных траекторий движения и являющиеся основой построения автономных средств управления робототехнических и мехатронных систем. Приведены программно-аппаратные средства основных подсистем автономной системы управления движением и результаты их работы в составе наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов в реальных условиях различных сред.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>