

УДК 621.391.192.5

А. В. Орлов

## НЕЧЕТКО-АССОЦИАТИВНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

*Рассмотрен метод анализа данных, поступающих с датчиков мобильного робота, основанный на сравнении многомерных векторов нечетких чисел, сформированных из сенсорного множества данных. Метод позволяет обрабатывать сенсорные данные различной модальности. В качестве примера приведено сопоставление локализованных областей на изображениях стереокамеры во время движения мобильного робота относительно объектов внешней среды.*

При управлении современными мобильными роботами существует необходимость в разработке алгоритмов автономного движения. Основными задачами, возникающими при движении мобильного робота, являются: навигация — определение и коррекция положения робота относительно объектов внешней среды; классификация — распознавание и сопоставление объектов внешней среды.

Для решения перечисленных задач требуется проводить сравнение следующих наборов сенсорных данных. *Эталонный набор* хранится в базе данных бортового вычислителя мобильного робота и может формироваться как при движении (запись реперных точек), так и перед стартом (загрузка карты местности, обучение образам объектов). *Тестовый набор* — это данные, полученные при измерении сенсорами мобильного робота при движении по траектории, которые требуется сопоставить с данными эталонного набора.

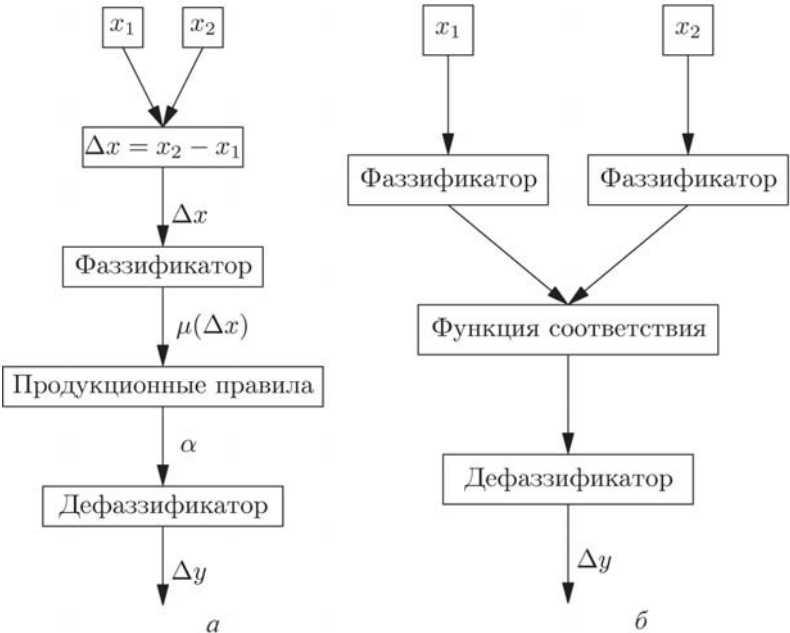
В современных мобильных роботах в качестве сенсоров применяются моно- или стереокамеры, ультразвуковые или лазерные дальномеры. Эти датчики обеспечивают измерения объектов внешней среды с высокой точностью, но, одновременно, генерируют большие потоки данных. Большинство известных алгоритмов обработки данных требует значительных вычислительных ресурсов для их работы в масштабе реального времени.

Трудность в обработке информации, поступающей от сенсоров мобильного робота, заключается в том, что необходимо сопоставлять данные измерений, полученные сенсорами различной модальности, как при наличии предварительной обработки, так и при ее отсутствии.

Неполнота и недостоверность информации об объектах внешней среды, связанная с несовершенством измерительной системы, является дополнительным препятствием при управлении мобильным роботом в автономном режиме. В настоящее время широко применяются методы управления, основанные на теории нечетких множеств [1], позволяющие контролировать мобильный робот в условиях неполноты информации.

В настоящей работе предложен оригинальный нечетко-ассоциативный метод обработки результатов измерений сенсоров мобильного робота, полученных в процессе движения по траектории. Метод позволяет определить соответствие между тестовым и эталонным наборами данных. В качестве примера приведено распознавание объектов, изображения которых получены стереокамерой мобильного робота, для определения их трехмерных координат.

**Структура нечетко-ассоциативного контроллера.** Как правило, фаззификация входных данных предполагает их предобработку — формирование нечетких множеств с последующим объединением в лингвистическую переменную. В классическом нечетком контроллере [2] продукционные правила, определенные разработчиком системы, преобразуют входную лингвистическую переменную в выходную (рис. 1, а). При этом, при сравнении двух четких величин пользуются, как правило, их приращением, из которого формируют входную лингвистическую переменную [3]. Недостаток такого подхода заключается в том, что для получения приращения используется одномерная



**Рис. 1. Нечеткий контроллер:** а — классический; б — нечетко-ассоциативный  
 ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2007. № 1 75

операция, а также большое количество логических правил, которые определяют результат. Кроме того, требуются два набора нечетких множеств — для входных переменных и для выходных.

В настоящей работе предлагается непосредственно фаззифицировать каждую входную переменную и использовать только одну ассоциативную операцию при определении результата. Подобный механизм является более естественным с точки зрения формирования входных фаззифицирующих множеств, характеризующих саму переменную, а не ее приращение. В результате работы ассоциативного механизма будет рассчитан численный критерий соответствия между сравниваемыми величинами (рис. 1, б).

**Формализация задачи.** Пусть мобильный робот, оснащенный сенсорами внешней среды, движется по траектории. Обозначим  $\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$  — вектор параметров, содержащий непосредственные или предобработанные измерения сенсоров  $\xi_i (i = 1 \dots n)$ . Во время движения мобильного робота формируется совокупность векторов  $\Xi(t) = \{\Xi(t_0), \Xi(t_1), \dots, \Xi(t_k)\}$ , которую будем называть *сенсорной траекторией* (рис. 2)

Требуется сопоставить точки сенсорной траектории  $\Xi(t)$ . Допустим, что точки эталонного набора данных формируются непосредственно из точек сенсорной траектории, хотя в общем случае они могут быть также заданы априорно.

Представим компонент  $\xi_i$  вектора параметров как лингвистическую переменную  $L_i$ , которую можно записать в виде кортежа [4]:

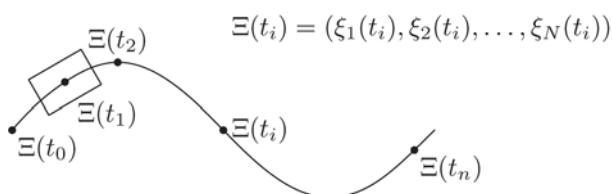
$$L_i = (x_i, T_i, U_i, G_i, M_i), \quad (1)$$

где  $x_i$  — имя переменной;  $T_i$  — множество термов;  $U_i$  — область определения лингвистической переменной;  $G_i$  — синтаксическое правило формирования переменной;  $M_i$  — семантическое правило.

Множество термов лингвистической переменной  $L_i$  можно записать в следующей форме:

$$T_i = \{N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_m\}, \quad (2)$$

где  $N_j, j = (1, 2, \dots, m)$  — нечеткое множество.



**Рис. 2. Сенсорная траектория мобильного робота**

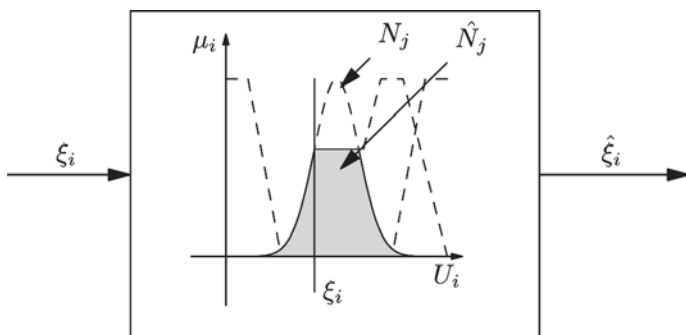


Рис. 3. Фаззификация измерений сенсоров

В процессе движения мобильного робота по траектории производится фаззификация измерений сенсоров (рис. 3) в следующей последовательности:

1. Четкое значение  $\xi_i$  измеренной сенсорной величины поступает на вход фаззификатора;
2. В соответствии с нечеткими множествами  $N_j$  из множества (2), формирующими каждую лингвистическую переменную, определяются значения функций принадлежности  $\mu_j$  в точке  $\xi_i$ ;
3. Из пересечения  $N_j \cap \mu_j$  ( $\alpha$ -срез) [2] находится новое нечеткое множество  $\hat{N}_j$ ;
4. Из всех множеств  $\hat{N}_j$  выбирается максимальное.

Операция фаззификации может быть записана в общем виде:

$$\hat{\xi}_i = \max_{j=1..m} (N_j \cap \mu_j(\xi_i)). \quad (3)$$

В результате операции фаззификации (3) получаем нечеткое множество  $\hat{\xi}_i$ , которое является нечетким представлением измеренной сенсорной величины  $\xi_i$ . Распространив операцию фаззификации на весь вектор параметров  $\Xi$ , получим его нечеткое представление  $\hat{\Xi} = (\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \dots, \hat{\xi}_N)$ , которое назовем *нечетким вектором измерений*.

Пусть момент времени  $t_1$  соответствует моменту формирования эталонного набора точек сенсорной траектории. Как было отмечено ранее, при этом возможны два варианта: эталонное множество формируется в процессе движения мобильного робота; эталонное множество точек задается априорно, перед стартом. Далее будем рассматривать первый вариант, подразумевая, что все выводы справедливы и в другом случае.

Обозначим  $t_2$  — момент времени, соответствующий формированию тестового набора. Тогда для определения соответствия между сенсорными портретами двух точек траектории требуется сравнить нечеткий вектор  $\hat{\Xi}(t_1)$  с нечетким вектором  $\hat{\Xi}(t_2)$ :

$$\hat{\Xi}(t_1) = \{\hat{\xi}_1(t_1), \hat{\xi}_2(t_1), \dots, \hat{\xi}_n(t_1)\}; \quad (4)$$

$$\hat{\Xi}(t_2) = \{\hat{\xi}_1(t_2), \hat{\xi}_2(t_2), \dots, \hat{\xi}_n(t_2)\}. \quad (5)$$

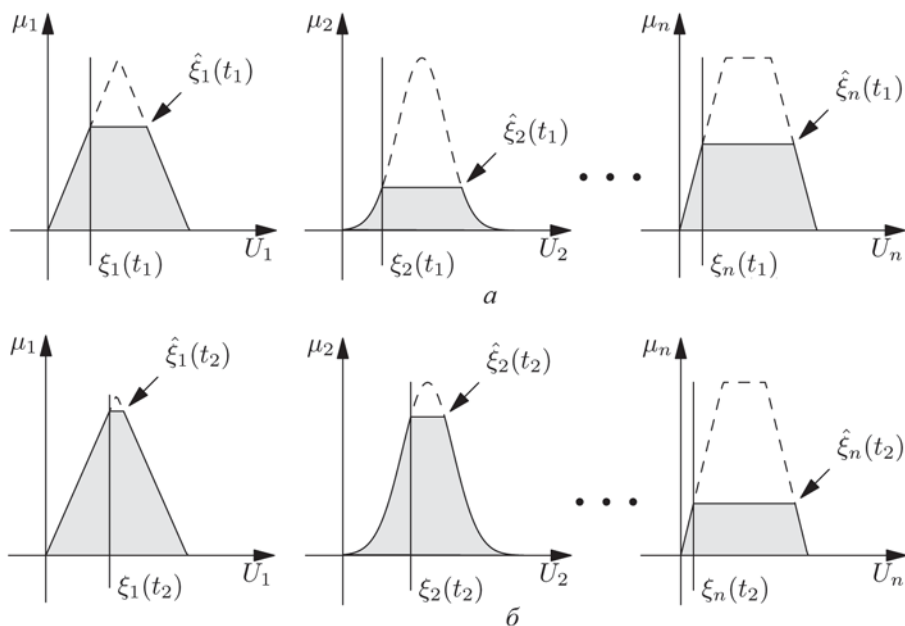
Сопоставление сенсорных образов сводится к сопоставлению их нечетких описаний. При этом необходимо провести сравнение каждого элемента множества (4) с соответствующим элементом из множества (5).

На рис. 4 приведены два нечетких вектора, соответствующие сопоставляемым точкам траектории. Каждый нечеткий вектор состоит из  $n$  компонент, соответствующих измерениям датчиков мобильного робота. На рис. 4 также показана операция фаззификации, проведенная для каждого компонента. Таким образом, процедура сопоставления компонентов сенсорных траекторий сводится к попарному сравнению многомерных векторов нечетких чисел.

**Сравнение нечетких векторов ассоциативным методом.** Для сравнения нечетких чисел предлагаем операцию *нечеткого равенства*:

$$f^+(\mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)), \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2))) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)) = \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2)); \\ 0, & \text{если } \mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)) \neq \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2)). \end{cases} \quad (6)$$

Отсюда следует, что результатом сравнения двух нечетких векторов является нечеткий вектор  $\hat{\Xi}^+$ , функции принадлежности каждого элемента которого будут принимать максимальное значение, если функции принадлежности сравниваемых элементов равны, и минимальное



**Рис. 4. Нечеткие векторы компонентов сенсорной траектории:**

*а* и *б* — первая и вторая точки траектории

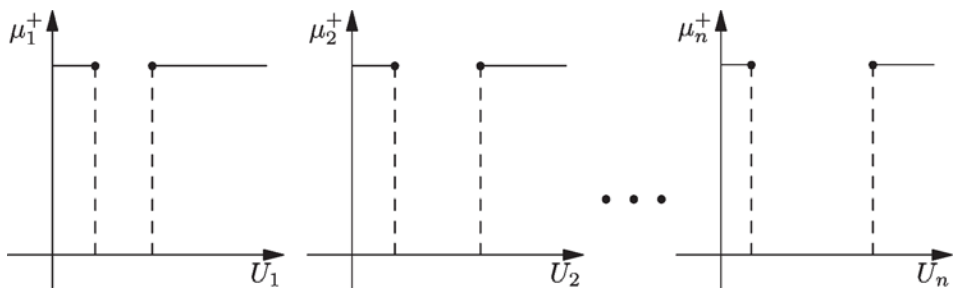


Рис. 5. Результат операции  $f^+(\cdot)$

значение, в случае если они не равны. На рис. 5 можно видеть нечеткий вектор  $\hat{\Xi}^+$ , который представляет собой результат операции  $f^+(\cdot)$ , выполненной над двумя нечеткими векторами (см. рис. 4).

В процессе сравнения сенсорных портретов точек траектории получим набор векторов нечетких чисел, из которых следует выбрать один наилучший. Для этого необходимо провести дефаззификацию результирующего нечеткого вектора.

Проинтегрируем значение каждой функции принадлежности из нечеткого вектора  $\hat{\Xi}^+$  на ее области определения  $U_i$  (1):

$$S(\hat{\xi}_i) = \int_{U_i} \mu_i^+(\hat{\xi}_i) d\hat{\xi}_i. \quad (7)$$

Пронормируем значение (7) по отношению к максимальной площади, которую может ограничивать функция принадлежности на всей области определения:

$$P(\hat{\xi}_i) = \frac{S(\hat{\xi}_i)}{\int_{U_i} d\hat{\xi}_i}. \quad (8)$$

Формула (8) соответствует операции дефаззификации в классическом нечетком контроллере методом поиска центра масс [2–4]. Применим ее ко всем компонентам из нечеткого вектора и вычислим сумму:

$$P(\hat{\Xi}^+) = P(f^+(\hat{\Xi}(t_1), \hat{\Xi}(t_2))) = \sum_{i=1}^n P(\hat{\xi}_i). \quad (9)$$

Полученное значение  $P(\hat{\Xi}^+)$  будет являться критерием соответствия двух векторов нечетких чисел. На рис. 6 показана схема сопоставления двух нечетких векторов. Значения  $\hat{\xi}_i(t_1)$  и  $\hat{\xi}_i(t_2)$  поступают на вход блока сравнения (функция нечеткого равенства). Полученное значение поступает на вход дефаззификатора (8). Далее, результаты дефаззификации для сравниваемых компонентов нечеткого вектора суммируются (9).

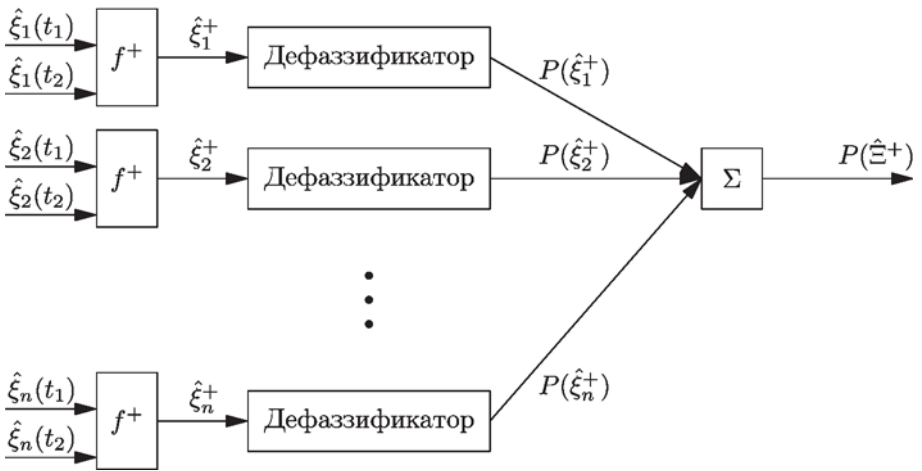


Рис. 6. Схема сопоставления нечетких чисел

Пусть  $\bar{\Psi} = \{\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2, \dots, \bar{\Psi}_l\}$  – множество эталонных точек, а  $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_k\}$  – множество тестовых точек сенсорной траектории робота. Тогда, при сравнении этих двух множеств будет получена *матрица соответствия*  $\Pi$ , составленная из дефаззифицированных значений  $P(f^+(\bar{\Psi}, \Psi))$  для всех комбинаций нечетких чисел (10):

$$\Pi = \begin{pmatrix} P_{11}(f^+(\bar{\Psi}_1, \Psi_1)) & P_{12}(f^+(\bar{\Psi}_1, \Psi_2)) & \dots & P_{1k}(f^+(\bar{\Psi}_1, \Psi_k)) \\ P_{21}(f^+(\bar{\Psi}_2, \Psi_1)) & P_{22}(f^+(\bar{\Psi}_2, \Psi_2)) & \dots & P_{2k}(f^+(\bar{\Psi}_2, \Psi_k)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{l1}(f^+(\bar{\Psi}_l, \Psi_1)) & P_{l2}(f^+(\bar{\Psi}_l, \Psi_2)) & \dots & P_{lk}(f^+(\bar{\Psi}_l, \Psi_k)) \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$M_1 = (\max_{i=1..l} \Pi_{i1}, \max_{i=1..l} \Pi_{i2}, \dots, \max_{i=1..l} \Pi_{ik}). \quad (11)$$

Вектор  $M_1$  максимальных элементов (11) будет характеризовать соответствие точек тестового набора точкам из эталонного набора. Далее приведена итоговая матрица соответствия для двух наборов точек сенсорной траектории мобильного робота, где присутствуют максимальные элементы для каждого столбца матрицы соответствия, характеризующие наличие и степень соответствия точки из тестового набора точке из эталонного набора точек сенсорной траектории:

$P_{11} = 0.4$	$P_{12} = 0.6$	$P_{13} = 0.6$	$P_{14} = 0.4$
$P_{21} = 0.1$	$P_{22} = 0.4$	$P_{23} = 0.9$	$P_{24} = 0.1$
$P_{31} = 0.5$	$P_{32} = 0.3$	$P_{33} = 0.3$	$P_{34} = 0.5$

Для уменьшения вычислительных затрат и оптимизации алгоритма вычисления интегралов функций принадлежности заменим функцию

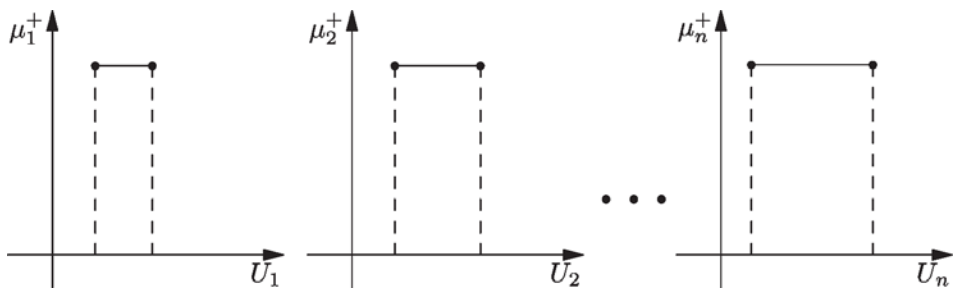


Рис. 7. Результат операции  $f^-(\cdot)$

(6) на функцию нечеткого неравенства:

$$f^-(\mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)), \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2))) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)) \neq \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2)); \\ 0, & \text{если } \mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)) = \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2)). \end{cases} \quad (12)$$

Функции (6) и (12) связаны между собой равенством

$$f^-(\mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)), \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2))) = 1 - f^+(\mu_i(\hat{\xi}_i(t_1)), \mu_i(\hat{\xi}_i(t_2))). \quad (13)$$

Из рис. 7 виден результат сравнения нечетких чисел (см. рис. 4) с функцией (12).

При составлении матрицы соответствия (10) в данном случае следует искать вектор  $M_2$  минимальных элементов, характеризующих совпадение точек траектории:

$$M_2 = (\min_{i=1...l} \Pi_{i1}, \min_{i=1...l} \Pi_{i2}, \dots, \min_{i=1...l} \Pi_{ik}); \quad (14)$$

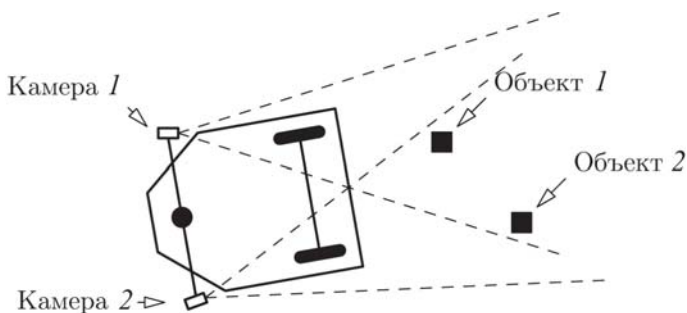
далее приведена матрица соответствия для операции  $f^-(\cdot)$ :

$P_{11} = 0.3$	$P_{12} = 0.3$	$P_{13} = 0.4$	$P_{14} = 0.4$
$P_{21} = 0.4$	$P_{22} = 0.4$	$P_{23} = 0.1$	$P_{24} = 0.9$
$P_{31} = 0.1$	$P_{32} = 0.6$	$P_{33} = 0.3$	$P_{34} = 0.2$

**Задача классификации объектов внешней среды.** Рассмотрим нечетко-ассоциативный метод сопоставления точек сенсорной траектории на примере распознавания объектов внешней среды во время движения мобильного робота.

Одним из этапов в алгоритмах навигации для управления мобильным роботом, оснащенным стереокамерой, является сопоставление двумерных координат объектов, локализованных на изображениях каждой из камер стереосенсора, для итогового восстановления трехмерной координаты [5, 6]. При этом каждый из объектов классифицируется по ряду признаков, по которым удобно сопоставить объекты друг с другом.





**Рис. 8. Мобильный робот и объекты внешней среды**

На рис. 8 приведена схема мобильного робота, оснащенного стереосенсором, состоящим из двух идентичных видеокамер, который может наблюдать объекты внешней среды, расположенные произвольно относительно мобильного робота. В задаче сопоставления объектов на изображениях стереокамеры [5] требуется выделить группу объектов, попадающих в общее поле зрения, и сопоставить их друг с другом (установить связи тождественности).

Выделим для каждого объекта на изображении общий вектор признаков, который возможно локализовать автоматически с помощью алгоритмов обработки изображений [5, 6] (рис. 9). Приведем названия компонентов вектора.

*Вектор признаков объекта на изображении:*

Масса (площадь) объекта —  $\xi_1$ ;

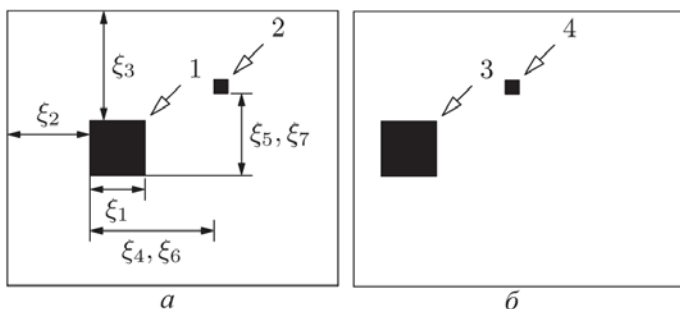
Расстояние по оси  $X$  до левого края изображения —  $\xi_2$ ;

Расстояние по оси  $Y$  до верхнего края изображения —  $\xi_3$ ;

Расстояние до объекта слева по осям  $X$  и  $Y$  —  $\xi_4$  и  $\xi_5$ ;

Расстояние до объекта справа по осям  $X$  и  $Y$  —  $\xi_6$  и  $\xi_7$ .

Рассмотрим произвольный момент времени  $t$ , для которого значе-



**Рис. 9. Изображения объектов для двух камер стереосенсора: камеры 1 (а) и 2 (б)**

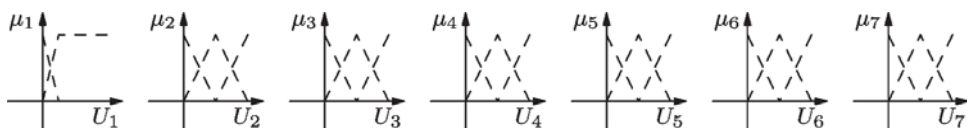


Рис. 10. Общий вектор признаков

ния компонентов вектора признаков каждого объекта на изображении равны соответственно:

$$\begin{aligned}
 \Xi_1(t) &= \{3.33, 25, 40, 0, 0, 25, 15.7\}; \\
 \Xi_2(t) &= \{0.15, 63, 24, 25, 15.7, 0, 0\}; \\
 \Xi_3(t) &= \{3.33, 8.33, 40, 0, 0, 21.4, 15.7\}; \\
 \Xi_4(t) &= \{0.15, 45.2, 24, 21.4, 15.7, 0, 0\}.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Числовые данные (15) были получены при моделировании системы технического зрения в среде Matlab. На рис. 10 приведен набор лингвистических переменных, который характеризует общий вектор признаков объектов, используемый для фаззификации. Количество и форма нечетких множеств для каждой лингвистической переменной были получены экспертным путем.

На рис. 11 показан результат фаззификации векторов признаков (15) по вектору лингвистических переменных (рис. 10) в соответствии с выражением (3).

За множество эталонных точек сенсорной траектории примем множество  $\bar{\Psi} = \{\hat{\Xi}_1(t), \hat{\Xi}_2(t)\}$ , а за множество тестовых точек — множество  $\Psi = \{\hat{\Xi}_3(t), \hat{\Xi}_4(t)\}$ . Тогда результатом сопоставления будет множество результирующих векторов  $\{\hat{\Xi}_{13}^+(t), \hat{\Xi}_{14}^+(t), \hat{\Xi}_{23}^+(t), \hat{\Xi}_{24}^+(t)\}$  (рис. 12).

Матрица соответствия (10) в таком случае будет иметь следующий вид:

$P_{13} = 2.69$	$P_{23} = 0.0015$
$P_{23} = 0.0015$	$P_{24} = 2.87$

Максимальные элементы  $P_{13}$  и  $P_{24}$  будут в данном случае характеризовать совпадение между изображениями объектов 1–3 и 2–4 (см. рис. 9). Таким образом, связь тождественности между изображениями объектов установлена, что позволяет провести дальнейшее восстановление трехмерной координаты объектов [5].

**Заключение.** Рассмотрен нечетко-ассоциативный метод сравнения наборов сенсорных данных, результатом которого является критерий соответствия точек эталонного и тестового наборов. Данный критерий

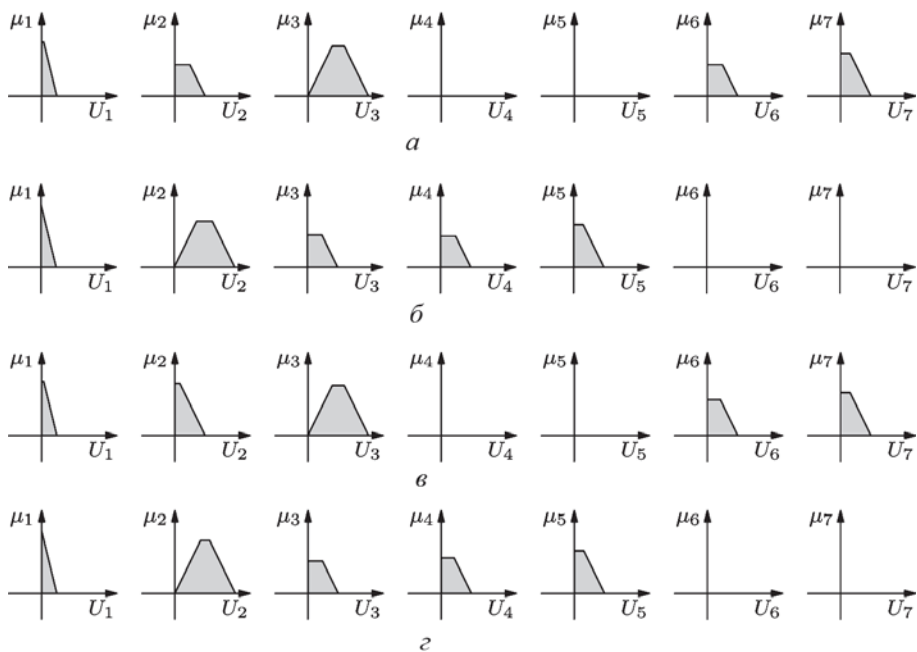


Рис. 11. Векторы признаков  $\hat{\mu}_1(t)$ ,  $\hat{\mu}_2(t)$ ,  $\hat{\mu}_3(t)$ ,  $\hat{\mu}_4(t)$  (а... г соответственно) для каждого из сравниваемых объектов в момент времени  $t$

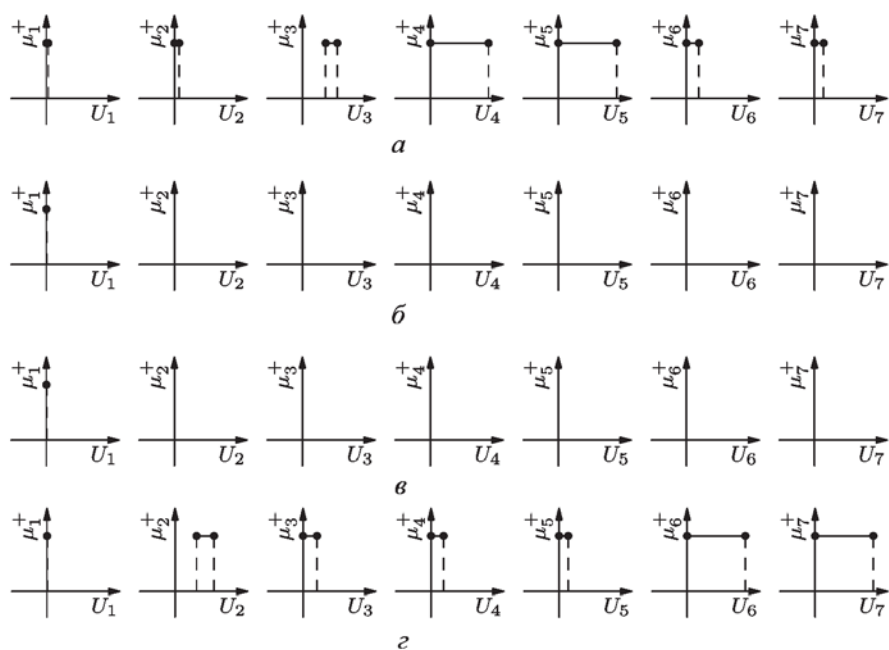


Рис. 12. Результат сравнения объектов  $\hat{\mu}_{13}^+(t)$ ,  $\hat{\mu}_{14}^+(t)$ ,  $\hat{\mu}_{23}^+(t)$ ,  $\hat{\mu}_{24}^+(t)$  (а... г соответственно) в момент времени  $t$

может быть использован на логическом уровне управления мобильным роботом при движении по траектории. Таким образом, нечетко-ассоциативный метод сопоставления применим в задачах распознавания и в задачах навигации относительно объектов внешней среды. Основным различием при рассмотрении данных классов задач будет являться выбор вектора входных признаков. Основа нечетко-ассоциативного метода, которую составляют операции нечеткого сравнения, дефаззификации и выбора результирующего значения, остается неизменной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Z a d e h L. A. Fuzzy Sets // Information and Control, 8:338–353, 1965.
2. Тэ р а н о Т., А с а и К., С у г е н о М. Прикладные нечеткие системы – М.: Мир, 1993. – 368 с.
3. W o l k e n h a u s e r O. Data Engineering: Fuzzy Mathematics in Systems Theory and Data Analysis – John Wiley & Sons, Inc., 2001.
4. J y h - S h i n g , R o g e r J a n g , C h u e n - T s a i S u n , E i j i M i z u t a n i . Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence. – Prentice-Hall, Inc., 1997.
5. Ф о р с а й т Д., П о н с Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2004.
6. В о л о д и н Ю. С., О р л о в А. В. Нечеткое сопоставление стереоизображений для построения карты в условиях недостаточной видимости // Актуальные проблемы защиты и безопасности // Тр. Восьмой Всерос. науч.-практ. конф. (4–7 апреля 2005 г.), Т. 5, СПб, 2005. – С. 322–327.

Статья поступила в редакцию 28.09.2006

Артем Валентинович Орлов родился в 1978 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2002 г. Сотрудник лаборатории “Вычислительные комплексы и системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области нечеткой логики.

A.V. Orlov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Worker of “Computing Complexes and Systems” laboratory of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of fuzzy logic.

