

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ МЕСТНОСТИ В ИНТЕРЕСАХ УМЕНЬШЕНИЯ ЗОНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АППАРАТОВ

С. Н. Кириллов, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, д.т.н., профессор; kirillov.lab@mail.ru

В. М. Бердников, доцент кафедры РУС РГРТУ, к.т.н.; bvm1986@mail.ru

Э. В. Акопов, инженер кафедры РУС РГРТУ; akop78195@gmail.com

***Цель работы** – разработка алгоритма распознавания характерных объектов местности на изображении в интересах уменьшения зоны неопределенности при позиционировании, использующем цифровую карту и информацию о контурах рельефа местности. Предложенный алгоритм включает выделение областей интереса на снимках путем детектирования границ нескольких видов с последующим уточнением наличия искоемых объектов (промышленных дымовых труб) путем оценки угловых размеров и вычисления соотношений между ними. Проведено экспериментальное исследование предложенного алгоритма, в результате которого значение вероятности ошибки первого рода при обнаружении снимка, содержащего характерный объект, составило 14 %, в то время как величина вероятности ошибки второго рода находилась в пределах 5 %, при этом показано, что распознавание характерных объектов рассматриваемого вида позволит уменьшить зону неопределенности в среднем на 8-22 %.*

***Ключевые слова:** видеопозиционирование, видеонавигация, городская местность, распознавание изображений, промышленные дымовые трубы.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-107-113

Введение

В связи с расширением области использования мобильных роботизированных аппаратов (МРА) наблюдается интерес к различным способам позиционирования в урбанизированной среде. Это связано с наличием большого количества факторов, осложняющих работу глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) в городе (многолучевость, затенение спутников высокими объектами, промышленные и преднамеренные помехи и т. п.).

Существующие способы определения местоположения, основанные на использовании видеoinформации об окружающей обстановке [1, 2, 3, 4], обладают такими преимуществами, как автономность, скрытность (т. к. отсутствует излучение), широкое распространение и невысокая стоимость видеокамер по сравнению с

радиолокационной и лазерной аппаратурой, а также возможность совмещения различных функций видеосистем. При этом в состав большинства МРА входит одна или несколько видеокамер, что обеспечивает интерес к применению видеоданных для позиционирования данных объектов.

Система видеопозиционирования в урбанизированной среде, использующая цифровую карту и информацию о контурах рельефа местности, полученную из изображений окружающей обстановки, представлена в работах [1, 2]. Работа данной системы включает получение на основе изображений информации в виде сигнатур контуров рельефа местности [2, 5], а также построения эталонных сигнатур для множества точек, покрывающих зону неопределенности при использовании цифровой карты на основе перспективной модели объектов местности [6]. При

этом под зоной неопределенности понимается территория, на которой может находиться МРА на основе априорной информации. В последующем координаты МРА определяются путем поиска глобального минимума целевой функции $f(x, y)$, имеющей смысл меры различия между выделенными сигнатурами и эталонами, построенными для точки с координатами (x, y) .

Представленная система обладает следующими преимуществами:

- при работе системы не требуется дополнительная подготовка в виде установки специальных меток [4] или изучения области позиционирования, которое включает предварительную съемку видеоданных на местности [5];

- использование сигнатур контуров рельефа местности при определении позиции МРА позволяет уменьшить вычислительные затраты за счет уменьшения размерности данных [4, 5].

Однако неоднозначность оценки координат МРА путем определения глобального минимума целевой функции, а также вычислительные затраты на реализацию этой процедуры зависят от размеров области неопределенности. Улучшение данных показателей требует внесения мер по предварительному уменьшению зоны неопределенности.

Предлагается использовать для уменьшения зоны неопределенности распознавание характерных объектов местности (ХОМ) на изображениях. Установление факта наличия на снимке объекта определенного класса позволит уменьшить зону неопределенности до размеров территории, с которой виден хотя бы один подобный объект. В то же время идентификация конкретного объекта, а также определение его угловых координат и размеров могут обеспечить более эффективное уменьшение зоны неопределенности при видеопозиционировании.

Цель работы – разработка алгоритма распознавания характерных объектов местности на изображении в интересах уменьшения зоны неопределенности при видеопозиционировании.

Алгоритм распознавания характерных объектов местности

В данной работе в качестве ХОМ рассматриваются промышленные дымовые трубы (ПДТ). Данные объекты обладают рядом преимуществ с точки зрения указанной цели:

- большие вертикальные размеры, что обеспечивает заметность с большой территории;

- нечувствительность изображения к изменениям ракурса по азимуту благодаря округлой форме сечения;

- хорошая заметность ввиду характерной формы и наличия на большинстве ПДТ сиг-

нальной окраски.

При этом распознавание ПДТ предлагается производить на основании следующих свойств отображения пространственной структуры данных объектов на фотоснимках:

- большие вертикальные угловые размеры;
- малые горизонтальные угловые размеры;
- наличие окрестности, представленной светлым фоном без резких перепадов яркости;
- наличие горизонтальных составляющих градиента яркости, соответствующих окраске, верхней

границе или конструктивным элементам ПДТ.

Относительное уменьшение зоны неопределенности δ , достигнутое при правильном распознавании ХОМ в отдельно взятой точке урбанизированной местности, имеет вид:

$$\delta_1 = 1 - S / S_0, \quad (1)$$

где S, S_0 – площадь уменьшенной и начальной зоны неопределенности. В то же время при обнаружении ХОМ $\delta_0 = 0$. При этом, в случае распознавания ХОМ указанного вида, в качестве уменьшенной зоны неопределенности выступает область D , с которой видны какие-либо ПДТ.

При этом среднее относительное уменьшение зоны неопределенности можно вычислить по формуле:

$$m_\delta = \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U \delta_1 \cdot p_1(u) \cdot (1 - P_f) + \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U \delta_0 \cdot (1 - p_1(u)), \quad (2)$$

где U – количество элементов множества Ω , состоящего из точек начальной зоны неопределенности D_0 , $p_1(u)$ – вероятность того, что u -я точка множества Ω принадлежит области D (территории, с которой видны ПДТ), P_f – вероятность ошибки первого рода (ложного обнаружения ХОМ) при распознавании ПДТ.

При равномерном распределении вероятностей координат МРА на начальной зоне неопределенности D_0 справедливо равенство

$$p_1(u) = S / S_0 = 1 - \delta_1, \quad \forall u = \overline{1, U}. \quad (3)$$

Принимая во внимание $\delta_0 = 0$ и выражение (3), формулу (2) запишем как:

$$m_\delta = \delta_1 \cdot (1 - \delta_1) \cdot (1 - P_f) = (1 - S / S_0) \cdot (1 - P_f) \cdot S / S_0. \quad (4)$$

Таким образом, среднее относительное уменьшение зоны неопределенности зависит от отношения площади области, с которой видны ПДТ, к площади начальной зоны неопреде-

ленности, а также от характеристик алгоритма распознавания ХОМ. Предварительное исследование различных городских территорий показало, что отношение площади зон городской местности, с которых видны ПДТ, к общей

площади урбанизированной местности находится в пределах $S / S_0 = 0.1 \dots 0.42$.

На рисунке 1 представлена структурная схема алгоритма распознавания ПДТ.

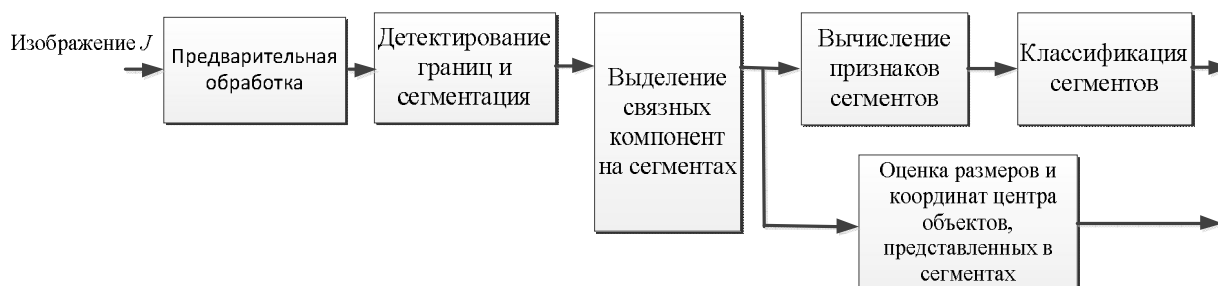


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма распознавания ПДТ на изображениях

Работа данного алгоритма включает следующие этапы:

1) предварительную обработку, содержащую перевод цветного изображения J , включающего $M \times N$ пикселей, в монохромное I с последующей гамма-коррекцией [5];

2) детектирование на монохромном изображении I границ различного вида с последующей сегментацией, в ходе которой выделяются области изображения (сегменты), вид градиента функции яркости которых позволяет предположить наличие в них ПДТ;

3) определение на выделенных бинарных сегментах связанных компонент [5-7], под которыми понимается область бинарного изображения, состоящая из единичных пикселей и содержащая путь между любыми двумя точками, принадлежащими данной области;

4) оценку угловых размеров и координат объектов, предположительно содержащихся в сегментах;

5) вычисление на основе анализа сегментов и оценок параметров, используемых впоследствии при классификации;

6) классификацию сегментов, которая заключается в формировании результирующего решения о наличии ПДТ в той или иной области изображения.

На рисунке 2, а представлена структурная схема алгоритма детектирования границ и сегментации, включающая детектирование границ трех различных видов, морфологическую обработку, а также выделение сегментов областей изображения, форма градиента яркости в которых позволяет предположить наличие в них искомых объектов.

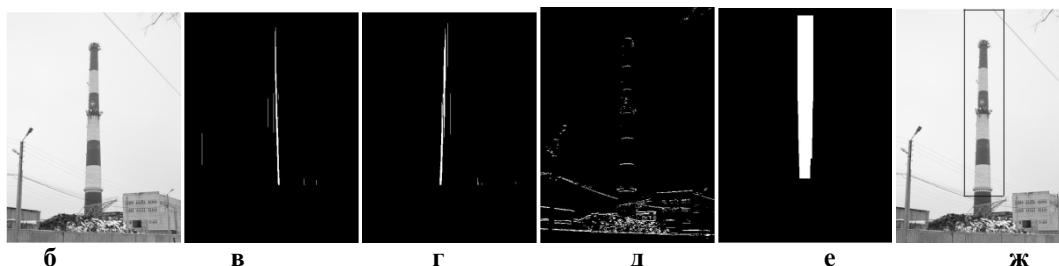
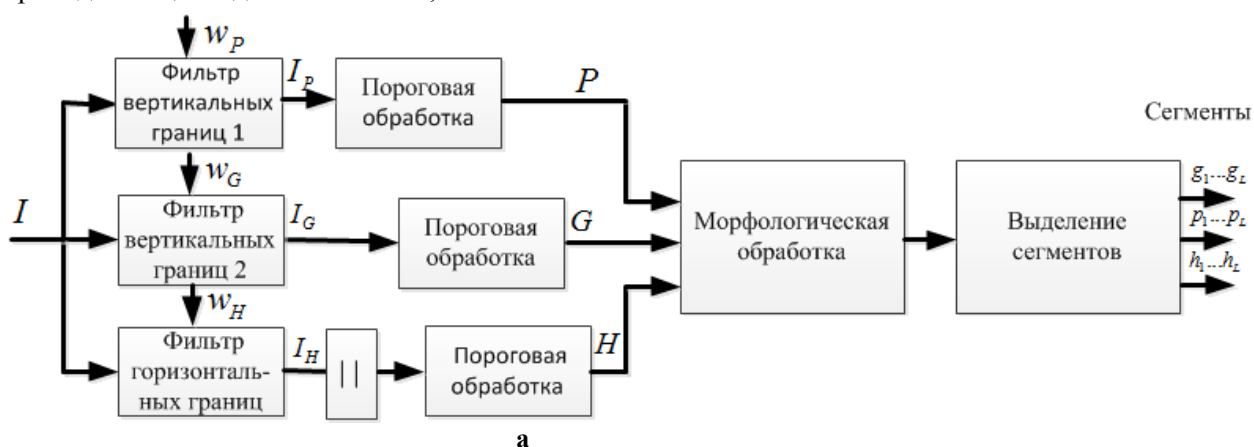


Рисунок 2 – Этапы детектирования границ и сегментации алгоритма распознавания промышленных дымовых труб на изображениях

При детектировании границ определяется наличие вертикальных положительных, вертикальных отрицательных, а также горизонтальных перепадов с формированием бинарных изображений соответственно P , G и H [$P(m,n)=1$, когда в точке изображения с координатами (m,n) присутствует положительный вертикальный перепад, аналогично относительно G и H]. Данная процедура включает фильтрацию [5] изображения с соответствующим ядром и последующую пороговую обработку.

Для детектирования границ предлагается использовать следующий вид ядер фильтрации, структура которых повторяет форму искоемых границ:

$$w_P = \begin{Bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ \dots & \dots \\ 1 & -1 \end{Bmatrix}; \quad w_G = \begin{Bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \\ \dots & \dots \\ -1 & 1 \end{Bmatrix}; \quad (5)$$

$$w_H = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & -1 & \dots & -1 \end{Bmatrix},$$

где w_P, w_G – соответственно ядра фильтрации для вертикальных положительных и вертикальных отрицательных перепадов размерностью $l_T \times 2$, w_H – ядро фильтрации для горизонтальных перепадов размерностью $2 \times s_T$, причем l_T, s_T – соответственно предполагаемая средняя длина и ширина искомого объекта. Таким образом, фильтрация описывается следующим математическим выражением [5]:

$$I_P(m,n) = \sum_{i=-l_T/2}^{l_T/2-1} I(m+i,n) - \sum_{i=-l_T/2}^{l_T/2-1} I(m+i,n-1);$$

$$I_G(m,n) = \sum_{i=-l_T/2}^{l_T/2-1} I(m+i,n-1) - \sum_{i=-l_T/2}^{l_T/2-1} I(m+i,n); \quad (6)$$

$$I_H(m,n) = \sum_{j=-s_T/2}^{s_T/2-1} I(m-1,n+j) - \sum_{j=-s_T/2}^{s_T/2-1} I(m,n+j),$$

где $I_P(m,n)$, $I_G(m,n)$, $I_H(m,n)$ – соответственно изображения, полученные в результате фильтрации вертикальных положительных, вертикальных отрицательных и горизонтальных границ. Опытным путем при изучении изображений городской местности, на которых представлены ПДТ, установлено, что $l_T = 0.2 \cdot M$ и $s_T = 0.05 \cdot N$.

При этом пороговая обработка [5] фильтрованных изображений имеет вид:

$$\begin{aligned} P(m,n) &= 1 \text{ при } (I_P(m,n) > t_1); \\ G(m,n) &= 1 \text{ при } (I_G(m,n) > t_2); \\ H(m,n) &= 1 \text{ при } (|I_H(m,n)| > t_3), \end{aligned} \quad (7)$$

где $m = \overline{1, M}$ и $n = \overline{1, N}$, пороги t_1, t_2 и t_3 определяются экспериментально.

Результаты детектирования границ на исходном монохромном изображении (рисунок 2, б) представлены на рисунке 2, в-д (соответственно для вертикальных положительных, вертикальных отрицательных и горизонтальных границ). Можно увидеть, что в результате детектирования выделяются границы соответствующих видов.

Сегментация изображения включает морфологическую обработку, описываемую следующим выражением:

$$Y = (P \oplus w_M) \cap (G \oplus w_M) \cap (H \oplus w_M), \quad (8)$$

где $P \oplus w_M$ – морфологическая дилатация [5] бинарного изображения P с прямоугольным ядром w_M размерностью $l_T \times s_T$. Смысл данной обработки заключается в выделении областей изображения, на которых представлены границы всех трех видов.

Собственно выделение сегментов заключается в определении на полученном бинарном изображении (рисунок 2, е) связанных компонент, из которых выбираются превышающие по размерам некоторый минимальный порог (опытным путем определено, что значение этой величины следует выбирать из диапазона $S_{\min} = 0.4 \cdot l_T \cdot s_T \dots 0.7 \cdot l_T \cdot s_T$). Впоследствии находятся границы данных областей (рисунок 2, ж) и формируются соответствующие сегменты бинарных изображений P, G, H ($p_1 \dots p_L, g_1 \dots g_L, h_1 \dots h_L$, где $L < 4$ – число выделенных сегментов изображения).

Выделение связанных компонент на каждом из бинарных сегментов производится двухпроходным методом [7] (рассматриваемый вид связности: 8, так как данный вид связности наиболее полно отражает структуру изображения ПДТ) для оценки видимых угловых параметров предполагаемого объекта, содержащегося в сегменте. При этом для p_i, g_i, h_i оценки данных параметров будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \tilde{l}_i &= \max_k (\max(MP_i^k) - \min(MP_i^k)), \\ \tilde{s}_i &= \text{mean}_k (\max(NH_H^i(k)) - \min(NH_H^i(k))), \\ \tilde{c}_i &= \text{mean}_k (\max(NH_k^i(k)) + \min(NH_k^i(k))) / 2, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\tilde{l}_i$ – оценка длины объекта в i -м сегменте, MP_i^k – множество, содержащее вертикальные координаты точек, входящих в k -ю связную компоненту сегмента p_i , $\tilde{s}_i$ – оценка ширины объекта, NH_i^k – множество, содержащее

горизонтальные координаты точек, входящих в k -ю связную компоненту сегмента h_i , $\tilde{c}_i$ – оценка горизонтальных координат центра объекта.

В целях окончательного вынесения решения о наличии на представленном изображении ПДТ и их локализации производится дополнительная классификация сегментов на основе набора признаков, основанных на следующих эмпирических утверждениях:

а) большое количество точек изображения, в которых детектированы горизонтальные составляющие градиента, соответствует застройке, растительности и другим текстурированным областям, но не ПДТ;

б) при наличии в сегменте ПДТ с координатами c и шириной s основная масса точек, в которых детектированы горизонтальные составляющие градиента, должна находиться на участке, соответствующем горизонтальным координатам $c - s / 2 \dots c + s / 2$;

в) отношение ширины ПДТ к длине должно находиться в определенных пределах.

На основании представленных предположений формируются следующие признаки:

1. Количество точек с детектированной горизонтальной составляющей, нормированное к числу пикселей в i -м сегменте размером $M_i \times N_i$:

$$\alpha_1^i = \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{n=1}^{N_i} h_i(m, n). \quad (10)$$

Введение данного признака основано на утверждении «а».

2. Отношение количества точек с детектированной горизонтальной составляющей внутри ширины предполагаемого объекта к числу пикселей вне данного интервала (утверждение «б»). Для i -го сегмента размером $M_i \times N_i$ при оценке ширины и координат центра объекта соответственно $\tilde{s}_i = a$ и $\tilde{c}_i = b$ данный признак равен

$$\alpha_2^i = \frac{\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{n=b-a/2+1}^{a+b/2} h_i(m, n)}{\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{n=1}^{a/2} h_i(m, n) + \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{n=b+a/2+1}^{N_i} h_i(m, n)}. \quad (11)$$

3. Отношение ширины предполагаемого объекта в сегменте к длине (утверждение «в»):

$$\alpha_3^i = \tilde{s}_i / \tilde{l}_i. \quad (12)$$

Окончательное решение о наличии в i -м сегменте изображения ПДТ выносится при выполнении следующих условий:

$$\begin{cases} \theta_{11} < \alpha_1^i < \theta_{12}, \\ \theta_{21} < \alpha_2^i < \theta_{22}, \\ \theta_{31} < \alpha_3^i < \theta_{32}; \end{cases} \quad (13)$$

при этом пороги $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32}$ выбираются экспериментально при обучении.

Исследование эффективности алгоритма распознавания характерных объектов местности

Определение наилучших значений порогов $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32}$ производилась при помощи алгоритма оптимизации методом градиентного спуска при использовании критерия минимизации среднего риска [5]:

$$K = \alpha \cdot P_I + (1 - \alpha) \cdot P_{II}, \quad (14)$$

где α – весовой коэффициент, определяющий соотношения между стоимостью ошибки первого и второго рода (пропуска ПДТ на снимке, ложного распознавания ПДТ), P_{II} – второго рода. При использовании алгоритма распознавания ХОМ в целях уменьшения зоны неопределенности для видеопозиционирования ложное распознавание имеет несколько большие негативные последствия, чем пропуск ПДТ, поэтому принята величина весового коэффициента $\alpha = 0.3$.

Начальное значение порогов задавалось оператором. При этом на каждой итерации алгоритма оптимизации значения вероятностей ошибок получались при использовании маркированной обучающей выборки, содержащей 100 фотоснимков различных участков городской местности, на которых присутствуют ПДТ, и 100 аналогичных изображений, не содержащих данные объекты. При этом рассматривались изображения урбанизированной местности разрешением $M \times N = 240 \times 320$, полученные в светлое время суток в различных погодных условиях. Маркировка выборки производилась оператором, которому предъявлялись немаркированные изображения для определения наличия на них ПДТ.

При этом на обучающей выборке были достигнуты следующие результаты: величина вероятности ошибки первого рода при обнаружении объекта на снимке составила $P_I = 0.04$ при значении вероятности ошибки второго рода, равном $P_{II} = 0.03$, при использовании следующих значений порогов: $\theta_{11} = 0.1$, $\theta_{12} = 0$, $\theta_{21} = 1$, $\theta_{22} = 0$, $\theta_{31} = 0.2$, $\theta_{32} = 0.005$.

Экспериментальное исследование эффектив-

ности алгоритма производилось при использовании тестовой выборки общим объемом 412 изображений городской местности, включающей 206 изображений, на которых присутствуют ПДТ, и такое же количество снимков, на которых данные объекты отсутствуют. В ходе эксперимента изображения из тестовой выборки подавались на вход алгоритма, на выходе формировалось решение о наличии объекта, его угловом положении и ширине, контроль правильности решения производился оператором. В результате величина вероятности ошибки первого рода при обнаружении ПДТ на снимке составила $P_I = 0.14$ при значении вероятности ошибки второго рода, равном $P_{II} = 0.05$. Принимая во внимание формулу (4) и приведенные значения соотношений площадей городской местности, можно сделать вывод, что использование алгоритма распознавания ПДТ на изображениях городской местности обеспечит среднее относительное уменьшение зоны неопределенности на величину $m_\delta = 8 - 22\%$.

Заключение

При экспериментальном исследовании эффективности алгоритмов распознавания ХОМ получены следующие значения вероятности ошибок первого и второго рода, составляющие $P_I = 0.14$ и $P_{II} = 0.05$ соответственно, при этом обеспечивается среднее относительное уменьшение зоны неопределенности в пределах $m_\delta = 8 - 22\%$. Представленные результаты поз-

воляют сделать вывод о целесообразности использования данного алгоритма в целях предварительного уменьшения зоны неопределенности при позиционировании в урбанизированной среде на основе видеоданных.

Библиографический список

1. Кириллов С. Н., Бердников В. М., Акопов Э. В. Алгоритм видеопозиционирования объектов в городской местности на основе цифровой карты // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 3-9.
2. Кириллов С. Н., Бердников В. М., Акопов Э. В. Система видеопозиционирования в условиях урбанизированной среды с использованием цифровой карты местности // Доклады 16-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014». В 2-х томах. Т.1. Москва, 2014. С. 503-507.
3. Bonin-Font F., Ortiz A., Oliver G. Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey Department of Mathematics and Computer Science, University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain, 2006. P. 25.
4. Hayet J. B., Lerasle F., Devy M. A Visual Landmark Framework for Mobile Robot Navigation, Toulouse Cedex (France), 2009. P. 20.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. С. 1070.
6. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. С. 925.
7. Стрежанов М. В. Методики определения связанных компонент на штриховых бинарных изображениях. Минск, 2008, Режим доступа: <http://www.graphicon.ru/html/2010/conference/RU/Se2/12.pdf>.

UDC 621.396.96

ALGORITHM OF TYPICAL OBJECTS RECOGNITION ON URBAN ENVIRONMENT IMAGES AIMING AT UNCERTAINTY ZONES REDUCTION FOR MOBILE ROBOTS POSITIONING

S. N. Kirillov, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; kirillov.lab@mail.ru

V. M. Berdnikov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; bvm1986@mail.ru

E. V. Akopov, engineer, RSREU, Ryazan; akop78195@gmail.com

An algorithm for recognizing typical objects in the area image in order to reduce uncertainty zone in the positioning that uses a digital map and information about the area relief contours is developed. The proposed algorithm includes selecting interest regions in the images by detecting the boundaries of several species followed by the refinement of required objects (industrial chimneys) availability by measuring angular dimensions and calculating the ratio between them. An experimental study of the algorithm resulting in a value of type I error probability in the picture is detected, containing typical object, amounted to 14%, while the value of the probability of type II error is within 5%, and the recognition of typical objects of this kind will 8-22% reduce uncertainty area in average.

Key words: videopositioning, videonavigation, urban area, digital map, area relief contours.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-107-113

References

1. **Kirillov S. N., Berdnikov V. M., Akopov E. V.** Algoritm videopozitsionirovaniya ob"ektov v gorodskoj mestnosti na osnove tsifrovoj karty. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 47, pp. 3-9 (in Russian).

2. **Kirillov S. N., Berdnikov V. M., Akopov E. V.** Sistema videopozitsionirovaniya v usloviyakh urbanizirovannoy sredy s ispol'zovaniem tsifrovoj karty mestnosti // Doklady 16-j MNTK «TSifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye – DSPA-2014», v 2-kh tomakh. T.1, Moskva, 2014, pp. 503-507 (in Russian).

3. **Bonin-Font F., Ortiz A., Oliver G.** Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey Department of Mathematics and Computer Science, University of the

Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain, 2006, p. 25.

4. **Hayet J. B., Lerasle F., Devy M.** A Visual Landmark Framework for Mobile Robot Navigation, Toulouse Cedex (France), 2009, p. 20.

5. **Gonsales R., Woods R.** *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenij* (Digital image processing). Moscow: Tekhnosfera, 2005, p. 1070 (in Russian).

6. **Forsajt D., Pons Z. H.** Komp'yuternoe zreniye. Sovremennyy podkhod (Computer vision. The modern approach). Moscow: Vil'yams, 2004, p. 925 (in Russian).

7. **Strezhanov M. V.** Metodiki opredeleniya svyaznykh komponent na shtrihovykh binarnykh izobrazheniyah – Minsk, 2008, Rezhim dostupa: <http://www.graphicon.ru/html/2010/conference/RU/Se2/12.pdf>.