

**Maevsky Andrey Mikhailovich** – Oceanos JSC; e-mail: maevskiy\_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; researcher; head of Marine Department SMTU.

**Pechayko Ivan Aleksandrovich** – Oceanos JSC; e-mail: pechaikojohn@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; robotics engineer.

**Alekseev Michail Aleksandrovich** – Oceanos JSC; e-mail: miho23@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; engineer programmer.

**Burov Nikita Mikhailovich** – SUAI; e-mail: burov.nm@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; student.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-96-108

**В.П. Носков, Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов**

### **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ВИДЕО-ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

*Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации роботов воздушного и наземного применения в наиболее востребованных для проведения специальных операций урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, где применение традиционных средств дистанционного управления ограничено наличием экранированных зон. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовых систем технического зрения в процессе оперативной разведки рабочей зоны беспилотным летательным аппаратом, результаты которой обеспечивают автономные движение и полет, как отдельных гетерогенных робототехнических средств, так и в группе. В основу алгоритмов навигации положены методы выделения из объемного облака точек, формируемого бортовым лидаром, опорной горизонтальной поверхности и горизонтальных сечений внешней среды, позволяющих с высокой точностью и быстродействием определять все шесть координат объекта управления. Рассмотрены случаи, обусловленные возможными характеристиками внешней среды, когда навигационная задача решается не полностью, и предложены методы их исключения путем дополнения дальнометрических данных лидара видеоданными телекамеры. Приведена оценка точности решения задач видеонавигации, полученная путем математического моделирования внешней среды и формирования видеоданных. Предложены методы снижения ошибки видеонавигации, основанные на использовании специально банка опорных изображений с известными координатами их формирования, позволяющие обеспечить безопасные автономные полет и движение робототехнических средств в урбанизированной среде. Эффективность используемых методов и предлагаемых алгоритмов видеонавигации подтверждается результатами экспериментальных исследований соответствующих программно-аппаратных средств в реальных урбанизированных средах.*

*Беспилотный летательный аппарат; наземный транспортный робот; система технического зрения; лидар; телекамера; видео-дальнометрическое изображение; навигационная задача; математическое моделирование; ошибка решения навигационной задачи.*

**V.P. Noskov, Y.S. Barichev, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov**

### **DEVELOPMENT AND ANALYSE VISUAL NAVIGATION SYSTEM FOR AIR AND GROUND-BASED ROBOTS**

*The work is devoted to solving urgent problems of joint autonomous visual navigation for air and ground-based robots in urbanized environments. These environments are highly demanded for special operations, including dense urban areas and buildings, where the use of traditional remote control devices is limited due to the presence of shielded areas. The proposed solution addresses group navigation tasks based on data from onboard vision systems during operational reconnaissance of the working area by an unmanned aerial vehicle (UAV). The results of this reconnaissance enable autonomous movement and flight, both for individual heterogeneous robotic systems and for groups. The navigation algorithms are based on methods for extracting a horizontal reference surface and horizontal sections of the external environment from a volumetric point cloud generated by an onboard lidar. These methods allow for the precise and rapid determination of all six coordinates of the control object. Cases where the navigation task cannot be fully solved due to specific environmental characteristics are also considered. To address*

these challenges, methods are proposed to enhance lidar rangefinding data by integrating video camera data. An accuracy assessment of the video navigation solutions is provided, obtained through mathematical modeling of the external environment and the generation of video data. To ensure safe autonomous flight and movement of robotic systems in urban environments, methods for reducing video navigation errors are proposed. These methods utilize a specially designed bank of reference images with known coordinates of their formation. The effectiveness of the applied methods and the proposed video navigation algorithms is confirmed by experimental studies of the corresponding software and hardware in real urbanized environments.

Unmanned aerial vehicle (UAV); ground transport robot; visual navigation; lidar; TV camera; RGB-D image; navigation; mathematical modeling; navigation errors.

**Введение.** Подавляющее число специальных операций с использованием робототехнических средств проводится в индустриально-городских средах (промышленные предприятия, вокзалы, торгово-развлекательные комплексы, городская застройка, ...). В данных условиях в следствие плотной застройки и наличия экранированных зон, обуславливающих ненадежную работу средств дистанционного управления, остро востребовано согласованное групповое применение автономных воздушных и наземных роботов. При этом вначале работы воздушного применения должны оперативно формировать данные о рабочей зоне, необходимые для автономной навигации как роботов воздушного, так и наземных применения. Поэтому актуальность создания средств согласованной автономной навигации, позволяющих организовать групповое управления гетерогенными роботами воздушного и наземного применения в урбанизированной среде, не вызывает сомнений [1–3].

**Постановка и решение задачи автономной видеонавигации.** Как показывает практика [3–12], для определения текущих координат робототехнических средств воздушного и наземного применения наиболее перспективными являются видеонавигационные системы. Задача видеонавигации в рассматриваемом случае может быть успешно решена в два этапа на основе 3D-дальнометрических данных (облаков точек) бортового лидара на бортовом компьютере с достаточной для обеспечения автономного полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертолетного типа и движения наземных робототехнических комплексов (РТК) точностью и быстродействием [3].

На первом этапе из любого  $k$ -го облака точек

$$w_k = \{v_{ki} = \langle x_{ki}, y_{ki}, z_{ki} \rangle\}, \quad (1)$$

$$k=1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $K$  – число циклов снятия дальнометрических изображений;  $n$  – число точек в облаке; формируемого бортовым лидаром в процессе полета БПЛА, выделяется плоскость [4–6] горизонтальной опорной поверхности

$$x \cdot \cos(\alpha_k) + y \cdot \cos(\beta_k) + z \cdot \cos(\gamma_k) = \rho_k, \quad (2)$$

которая практически всегда имеется в урбанизированной среде (пол, дорога, тротуар, ...). По параметрам горизонтальной плоскости (2) для точки съема  $k$ -го дальнометрического изображения определяются абсолютные координаты высоты полета ( $H_k$ ), крена ( $\Theta_k$ ) и тангажа ( $\gamma_k$ ) БПЛА:

$$\begin{cases} H_k = \rho_k, \\ \Theta_k = -\left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\cos(\alpha_k)}{\sin(\beta_k)}\right)\right), \\ \gamma_k = -\left(\frac{\pi}{2} - \beta_k\right) \end{cases} \quad (3)$$

Затем из исходного облака точек (1) формируется облако точек  $W_k$ , приведенное к местной вертикали:

$$\begin{cases} W_k = \{V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle\}, \\ V_{ki} = A(\Theta_k, \gamma_k) \times v_{ki}, \\ i = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A(\Theta_k, \gamma_k)$  – обобщенная матрица поворотов на углы крена  $\Theta_k$  и тангажа  $\gamma_k$ , вычисленных в соответствии с выражением (3).

Пример выделения горизонтальной плоскости  $P$  опорной поверхности из облака точек и определения координат  $H$ ,  $\Theta$  и  $\gamma$  в здании приведен на рис. 1.

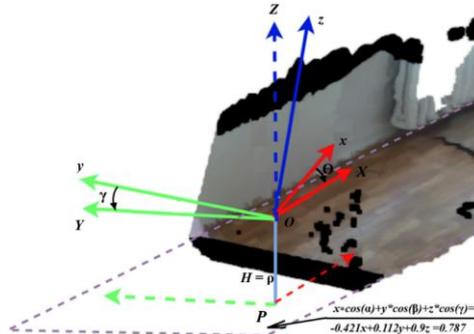


Рис. 1. Выделение опорной горизонтальной плоскости и определение высоты, крена и тангажа БПЛА в точке съема дальнометрического изображения

На втором этапе с учетом данных первого этапа в двух соседних взаимно пересекающихся и приведенных к местной вертикали в соответствии с выражением (4) облаках точек  $W_{(k-1)}$  и  $W_k$  выделяются горизонтальные сечения  $G_{(k-1)}(h)$  и  $G_k(h)$  (горизонтальные 2D-дальнометрические изображения) на одной высоте  $h$  от опорной поверхности:

$$\begin{cases} V_{(k-1)i} \in G_{(k-1)}(h), & \text{если } Z_{(k-1)i} = (h - \rho_{(k-1)}) \pm \delta, \\ V_{ki} \in G_k(h), & \text{если } Z_{ki} = (h - \rho_k) \pm \delta, \end{cases} \quad (5)$$

$i=1, 2, \dots, n,$

где  $n$  – число точек в облаке;  $\delta$  – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

По 2D-дальнометрическим изображениям  $G_{(k-1)}(h)$  и  $G_k(h)$ , выделенным в соответствии с выражением (5), на  $k$ -м цикле видеонавигации находится перемещение БПЛА между  $(k-1)$ -м и  $k$ -м положениями съема изображений в системе координат  $(k-1)$ -го положения на основе решения задачи оптимизации – задачи поиска глобального минимума целевой функции ( $\Gamma_{(k-1)k}$ ) разности этих изображений на множестве возможных значений вектора приращений координат  $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$  [7–10]:

$$\Gamma_{(k-1)k}(\Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k}) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta d_i * c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}, \quad (6)$$

где  $\Delta d_i$  – модуль разницы между  $i$ -м вектором ( $V_{(k)i}$ ) из  $G_k(h)$  и соответствующим ему по направлению вектором из  $G_{(k-1)}(h)$  при условии, что выполнено перемещение  $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$ ;  $c_i \in \{0, 1\}$  ( $c_i = 1$ , если для  $i$ -го измерения из  $G_k(h)$  существует соответствующее по направлению измерение из  $G_{(k-1)}(h)$  при условии, что выполнено перемещение  $\langle \Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}, \Delta \varphi_{(k-1)k} \rangle$ , и  $c_i = 0$  – в противном случае).

Процесс определения приращения координат  $\langle \Delta Y_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$  между двумя точками съема ( $O_1, O_2$ ) изображений в реальной урбанизированной среде с плотной городской застройкой приведен на рис. 2.

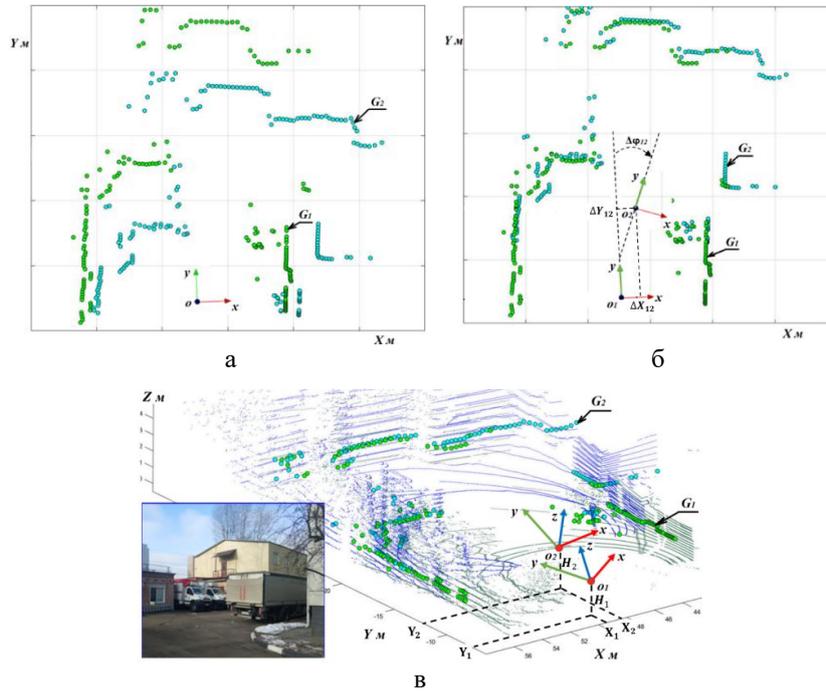


Рис. 2. Процесс определения приращения координат  $\langle \Delta Y_{12}, \Delta X_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ :  
 а – сечения  $G_1$  и  $G_2$  в системе координат бортового лидара; б – совмещение сечений  
 в системе координат первого положения; в – сечения  $G_1$  и  $G_2$  и положения БПЛА  
 в рабочей зоне

На основе найденных на каждом  $k$ -м цикле видеонавигации приращений координат вычисляются остальные три координаты – две линейные координаты горизонтального положения ( $X_k, Y_k$ ) и курсового угла ( $\varphi_k$ ):

$$\begin{cases} X_k \\ Y_k \\ \varphi_k \end{cases} = \begin{cases} X_0 \\ Y_0 \end{cases} + \sum_{m=1}^k \begin{vmatrix} \cos(\varphi_{(m-1)}) & -\sin(\varphi_{(m-1)}) \\ \sin(\varphi_{(m-1)}) & \cos(\varphi_{(m-1)}) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \Delta X_{(m-1)m}^0 \\ \Delta Y_{(m-1)m}^0 \end{vmatrix}, & (7) \\ \varphi_0 + \sum_{m=1}^k \Delta \varphi_{(m-1)m}^0 \end{cases}$$

где  $X_0, Y_0, \varphi_0$  – значения координат в точке старта;  $m$  – номер цикла видеонавигации ( $m = 1, 2, \dots, k$ );  $\langle \Delta X_{(m-1)m}^0, \Delta Y_{(m-1)m}^0, \Delta \varphi_{(m-1)m}^0 \rangle$  – значение вектора приращения координат в точке глобального минимума целевой функции  $\Gamma_{(m-1)m}$ .

Таким образом решается полная задача навигации – определяются все шесть координат  $\langle X_k, Y_k, Z_k, \varphi_k, \theta_k, \gamma_k \rangle$  в каждой точке съема изображений.

В подавляющем числе случаев геометрия горизонтальных 2D-дальнометрических изображений реальных рабочих зон урбанизированной среды (помещения, цеха, вокзалы, плотная городская застройка, ...) такова, что позволяет, используя выражения (3) и (7), корректно решить полную навигационную задачу только по дальнометрическим изображениям, хотя могут быть и исключения. Например, когда в рабочей зоне кроме опорной горизонтальной поверхности есть только одна ровная вертикальная плоскость (рис. 3,а) или только две ровные параллельные вертикальные плоскости (одна стена или две стены коридора).

В этих случаях целевая функция (6) имеет форму типа “оврага” равной глубины и не имеет единственного глобального минимума (рис. 3,в), однако, любой из них однозначно определяет искомое приращение курса, т.к. находится в плоскости трехмерной области определения целевой функции, соответствующей искомому приращению координаты  $\Delta \varphi_{(k-1)k}^0$  (рис. 3,б), а приращения двух оставшихся линейных координат ( $\Delta X_{(k-1)k}, \Delta Y_{(k-1)k}$ ) связываются линейной зависимостью (рис. 3,а,в).

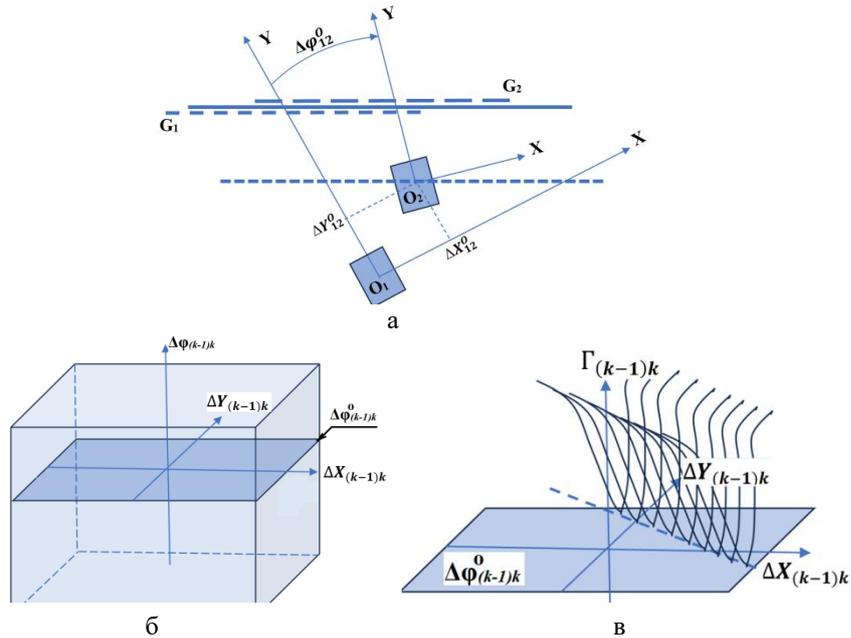


Рис. 3. Случай, когда задача экстремальной навигации не имеет единственного решения: а – формирование горизонтальных 2D-изображений  $G_1$  и  $G_2$  стены; б – область определения целевой функции; в – двухмерное сечение целевой функции в точках решения

Чтобы исключить неоднозначность решения задачи оптимизации в рассмотренном случае, необходимо использовать дополнительные данные о внешней среде, например, видеоданные, получаемые видеокамерой, и формировать комплексированное (видеодальнометрическое) изображение сцены [11]. На рис. 4,а,б приведены два комплексированных 3D-изображения вертикальной стены, полученные из двух разных положений лидара с выделенными на них горизонтальными комплексированными 2D-изображениями  $G_1$  и  $G_2$ .

На рис. 4,в,г приведены соответствующие распределения яркостей на изображениях  $G_1$  и  $G_2$ , которые могут быть использованы при их совмещении также путем решения задачи оптимизации – минимизации целевой функции их цвето-яркостной разности [12].

Более рационально для совмещения  $G_1$  и  $G_2$  использовать не все распределение яркостей, а только отдельные особые точки этих комплексированных 2D-изображений – дескрипторы, представляющие собой особые наиболее контрастные точки с локальным индивидуальным распределением яркости [13–15], выделение которых в рассматриваемом случае не вызывает затруднений. На рис. 5,а,б приведены изображения  $G_1$  и  $G_{12}$  с выделенными на них дескрипторами  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  и  $D_{21}$  (дескрипторы  $D_{11}$  и  $D_{21}$ , выделенные в разных изображениях, соответствуют друг другу).

Если в  $G_1$  и  $G_2$  выделено не менее двух пар соответствующих друг другу дескрипторов, то совмещение  $G_1$  и  $G_2$  достигается автоматически путем совмещения соответствующих друг другу дескрипторов. Если в  $G_1$  и  $G_2$  выделена только одна пара соответствующих друг другу дескрипторов, например,  $D_{11}$  и  $D_{21}$ , как показано на рис. 5,в, то совмещение  $G_1$  и  $G_2$  достаточно просто достигается путем вращения  $G_2$  вокруг дескриптора  $D_{11}$  ( $D_{21}$ ) до совмещения с  $G_1$ .

В случае отсутствия текстуры в горизонтальных 2D-изображениях или отсутствия самих горизонтальных 2D-изображений  $G_1$  и  $G_2$  (такое возможно при однотонной раскраске вертикальных объектов или при их отсутствии, например, при полете в открытом пространстве), можно использовать текстуру выделенной опорной горизонтальной поверхности [12]. В этом случае решение полной навигационной задачи для двух соседних пересекающихся комплексированных изображений будет следующим.

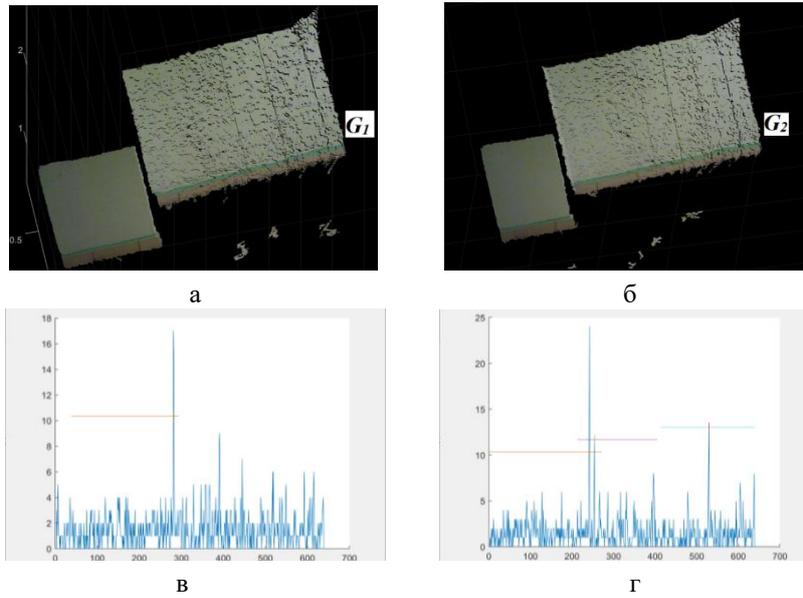


Рис. 4. Два комплексированных изображения: а – 1-е комплексированное 2D-изображение ( $G_1$ ); б – 2-е комплексированное 2D-изображение ( $G_2$ ); в – распределение яркостей на 1-м 2D-изображении; г – распределение яркостей на 2-м 2D-изображении

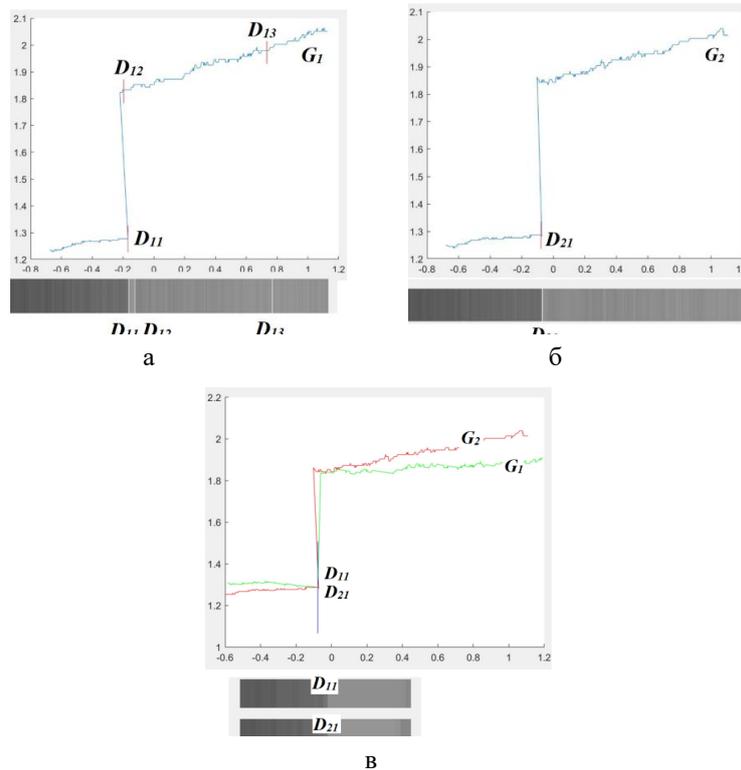


Рис. 5. Использование дескрипторов для совмещения 2D-изображений: а – 1-е 2D-изображение  $G_1$  с выделенными дескрипторами  $D_{11}$ ,  $D_{12}$  и  $D_{13}$ ; б – 2-е 2D-изображение  $G_2$  с выделенным дескриптором  $D_{21}$ ; в – совмещение 2D-изображений по одноименным дескрипторам  $D_{11}$  и  $D_{21}$

Сначала для каждого облака точек  $w_1$  и  $w_2$  (1) определяются уравнения горизонтальной опорной поверхности (2):

$$\begin{cases} P: X \cos(\alpha_1) + Y \cos(\beta_1) + Z \cos(\gamma_1), \\ p: x \cos(\alpha_2) + y \cos(\beta_2) + z \cos(\gamma_2), \end{cases}$$

что позволяет определить высоту, крен и тангаж (3) БПЛА в точках съема изображений ( $O_1, O_2$ ), привести исходные изображения к местной вертикали (4) и совместить плоскость  $p$  с плоскостью  $P$  (рис. 6).

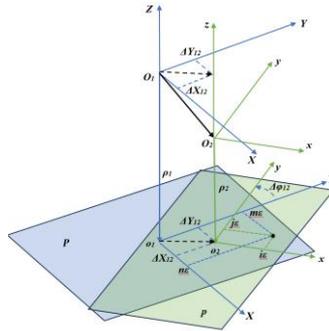


Рис. 6. Совмещение текстур горизонтальной опорной поверхности, снятой из двух разных положений

Приращения остальных трех координат ( $\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12}$ ) можно найти путем совмещения текстур плоскостей  $P$  и  $p$ , решая задачу оптимизации – задачу поиска глобального минимума целевой функции ( $T_{12}$ ) разности текстур плоскостей  $P$  и  $p$  на множестве возможных значений вектора  $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ :

$$T_{12}(\Delta Y_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12}) = \frac{\sum_i \sum_j |e_{ij} - E_{mn}| c_{ij}}{\sum_i \sum_j c_{ij}}, \tag{8}$$

где  $e_{ij}$  – яркость пиксела из текстуры плоскости  $p$ ;  $E_{mn}$  – яркость пиксела из текстуры плоскости  $P$ , индексы которого вычислены в соответствии с выражением (9);  $i, j$  и  $m, n$  – дискретные координаты пикселов из текстур  $p$  и  $P$  соответственно;  $c_{ij} \in \{0, 1\}$  – бинарное число, принимающее значение 1, если для пиксела  $e_{ij}$  из текстуры плоскости  $p$  существует пиксел  $E_{mn}$  из текстуры плоскости  $P$ , и принимающее значение 0 в противном случае.

$$\begin{bmatrix} m * \varepsilon \\ n * \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\Delta \varphi_{12}) & \sin(\Delta \varphi_{12}) \\ -\sin(\Delta \varphi_{12}) & \cos(\Delta \varphi_{12}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i * \varepsilon \\ j * \varepsilon \end{bmatrix}, \tag{9}$$

где  $\varepsilon$  – линейный размер пиксела.

Результат определения приращения координат  $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$  между двумя точками ( $O_1, O_2$ ) съема комплексированных изображений при использовании текстуры опорной поверхности в здании приведен на рис. 7.

В рассматриваемом случае более рационально для совмещения текстур  $P$  и  $p$  также использовать не все распределение яркостей, а только отдельные особые точки текстуры – дескрипторы, например, инвариантные к перемещениям и масштабу SIFT-дескрипторы [13–15]. При выделении из текстуры таких дескрипторов требуется выполнить большой объем вычислений для построения пирамид гауссианов и разностей гауссианов при разных масштабах изображений. Поэтому целесообразно использовать сразу инвариантные к перемещениям и масштабу комплексированные (видео-дальнометрические) дескрипторы, выделяемые из комплексированных изображений [16], в нашем случае – плоские дескрипторы  $\vec{d} \in P$  и  $\vec{d} \in p$ , полученные соответственно из текстур плоской опорной поверхности, выделенных из первого и второго изображений (рис. 8).

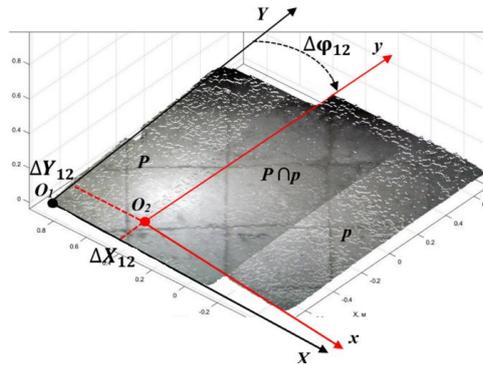


Рис. 7. Определения приращения координат  $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$  с использованием текстуры опорной поверхности

Совмещение одной пары, соответствующих друг другу плоских комплексированных дескрипторов

$$\begin{cases} \vec{D} = \langle X_D, Y_D, \xi_D, N_D \rangle, \\ \vec{d} = \langle x_d, y_d, \xi_d, n_d \rangle, \end{cases}$$

где  $\langle X_D, Y_D \rangle$  и  $\langle x_d, y_d \rangle$  – линейные координаты дескрипторов в соответствующих текстурированных плоскостях;  $\xi_D$  и  $\xi_d$  – ориентация градиентов перепада яркости дескрипторов;  $N_D$  и  $n_d$  – нормали к дескрипторам; однозначно определяет искомые приращения координат  $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$ .

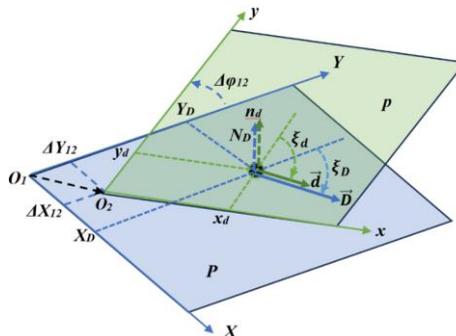


Рис. 8. Совмещение соответствующих друг другу плоских дескрипторов горизонтальной опорной поверхности, снятой из двух разных положений

Нормали  $N_D$  и  $n_d$  плоских дескрипторов совпадают с нормалью к плоскости опорной поверхности и вычислять их в рассматриваемом плоском случае не требуется.

При большем количестве пар соответствующих друг другу дескрипторов точность решения навигационной задачи возрастает, так как достаточно только совместить особые точки соответствующих друг другу дескрипторов и не нужно использовать ориентацию их градиентов перепада яркости, которая обычно вычисляется с меньшей точностью, чем их координаты [16].

Результат определения приращения координат  $\langle \Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \varphi_{12} \rangle$  между двумя точками съема изображений при использовании плоских комплексированных дескрипторов опорной поверхности на улице приведен на рис. 9 (зеленым цветом показаны соответствующие друг другу и совмещенные друг с другом дескрипторы, выделенные в пересечении  $P \cap p$  текстур опорной поверхности).

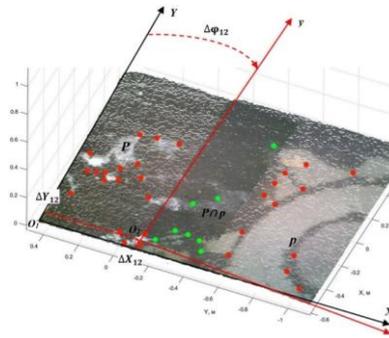


Рис. 9. Определения приращения координат  $\langle \Delta Y_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta \phi_{12} \rangle$  с использованием комплексированных дескрипторов опорной поверхности

**Оценка точности и быстродействия средств видеонавигации.** При выборе алгоритмов и средств видеонавигации необходимо оценить их точность и быстродействие в зависимости от предполагаемого состава и характеристик программно-алгоритмических и аппаратных средств, а также от условий их использования в различных средах. Как показал опыт создания и использования достаточно широкого спектра средств видеонавигации в различных средах [3–12, 16, 17], предварительную оценку их эффективности, отладку и исследование с выбором характеристик видео-сенсоров СТЗ, целесообразно выполнять методами математического моделирования [17]. В настоящее время известны стандартные программы математического моделирования геометрии и текстуры внешней среды и процесса формирования исходных видеоданных (телевизионных и дальнометрических изображений) для произвольного положения и ориентации виртуального сенсора с заданными характеристиками, например, GAZEBO [18] – симулятор для работы в среде ROS [19, 20]. В настоящем исследовании использовались, как стандартные библиотеки программ, так и программные средства собственной разработки, позволяющие формировать модели внешних сред и их видео-дальнометрические изображения.

Для сравнения всех рассмотренных выше алгоритмов и созданных соответствующих программно-аппаратных средств видеонавигации на рис. 10 приведены полученные зависимости линейных  $\delta \Delta l$  ( $\delta \Delta l = \sqrt{\delta \Delta X^2 + \delta \Delta Y^2 + \delta \Delta Z^2}$ ) и угловых  $\delta \Delta \Omega$  ( $\Delta \Omega$  – обобщенное вращение на угол соответствующего кватерниона) ошибок одного цикла решения навигационной задачи от ошибки измерения дальности лидара  $\delta \Delta d$ . На рис. 10 цифрой 1 отмечены зависимости для видеонавигации по 2D-изображениям, 2 – по 3D-изображениям, 3 – с использованием выделяемых плоских объектов и 4 – с использованием комплексированных дескрипторов. При проведении данных исследований получены также оценки быстродействия созданных программно-аппаратных средств.

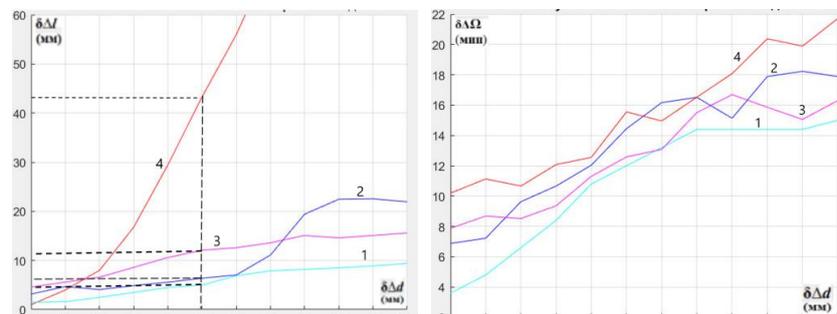


Рис. 10. Зависимости ошибок решения задач навигации от ошибки измерений дальности лидара: а – зависимости ошибок вычисления линейных перемещений; б – зависимости ошибок вычисления угловых перемещений

Полученные зависимости позволяют выбрать комбинацию алгоритмов, обеспечивающую наиболее эффективное решение навигационной задачи. Например, из рис. 10 видно, что при точности измерения дальности 50 мм (соответствует паспортным данным большинства промышленных образцов лидаров) можно быстро решить навигационную с использованием комплексированных дескрипторов (зависимость 4) с точностью не хуже 45 мм. Такой результат гарантирует попадание в интервал унимодальности оптимизируемых целевых функций (6) или (8) при решении задачи экстремальной навигации по 2D- и 3D-изображениям (зависимости 1 и 2) или с использованием текстуры выделяемой опорной поверхности (зависимость 3) и обеспечивает нахождение глобального оптимума прямым спуском соответственно с точностями не хуже 5 и 6 мм или 13 мм. Результаты математического моделирования позволяют также выбрать и такие параметры сенсоров, как углы обзора и плотность сканирования в зависимости от характеристик рабочей зоны.

Суммарная ошибка определения координат растет с ростом числа циклов видеонавигации и может принять неприемлемые значения. Сбрасывание суммарной ошибки обеспечивает метод опорных изображений [6], который применим только для заранее исследованных сред, когда имеется банк изображений внешней среды с известными координатами точек их съема. Для неизвестных заранее сред снижение суммарной ошибки может дать модификация данного метода, если в качестве опорного брать более «старое» изображение, имеющее с текущим изображением непустое пересечение зон обзора. Смещение между положениями сенсора при формировании опорного и текущего изображения может быть значительно больше интервала унимодальности, но выполненное сначала вычисление координат по последовательности соседних изображений гарантирует попадание в интервал унимодальности вокруг точки глобального минимума целевых функций (6) и (8) разности опорного и текущего изображения и обеспечивает тем самым нахождение глобального минимума прямым спуском. Выполнение описанной процедуры позволяет обнулить суммарную ошибку, которая пропорциональна числу снятых изображений между опорным и текущим изображениями, и заменить ее на ошибку одного цикла навигации по опорному и текущему изображениям. Критерием выбора более «старого» изображения в качестве опорного является достаточная площадь пересечения зон обзора (число общих точек двух анализируемых изображений) и значение глобального минимума целевой функции разности изображений, которое растет с уменьшением площади пересечения изображений и косвенно характеризует ошибку данного цикла экстремальной навигации.

**Построение модели рабочей зоны наземного РТК.** Для построения модели внешней среды, в которой можно планировать траектории движения наземных РТК, необходимо построить объединение

$$W_o = \bigcup_{k=0}^K W_{ok},$$

попавших в зону обзора бортовой СТЗ БПЛА фрагментов  $W_{ok}$  горизонтальной опорной поверхности (2), выделяемой на каждом  $k$ -м цикле навигации БПЛА:

$$V_{ki} \in W_{ok}, \text{ если } Z_{ki} = -H_k \pm \delta,$$

где  $V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle$  – вектор из множества облака точек, приведенного к местной вертикали  $W_k$  (4);  $H_k$  – высота полета БПЛА (3);  $\delta$  – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Такая плоская модель рабочей зоны с банком опорных изображений обеспечивает автоматическое планирование и отработку целенаправленных безопасных траекторий движения наземного РТК, оснащенного лидаром [5], в разведанной БПЛА рабочей зоне.

**Результаты экспериментальных исследований и заключение.** Результаты экспериментальных исследований разработанных средств видеонавигации роботов воздушно-го и наземного применения в реальных урбанизированных средах внутри зданий и в условиях плотной городской застройки приведены на рис. 11 и 12.

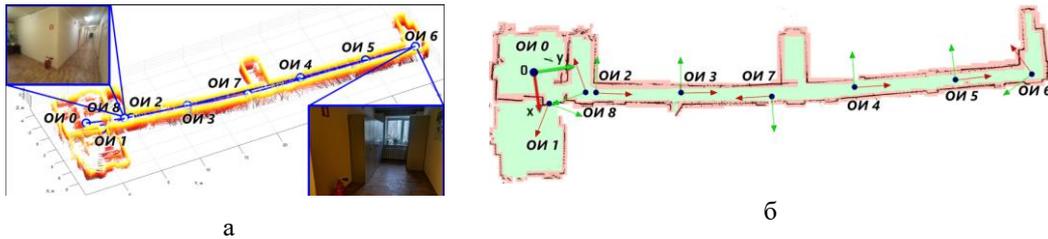


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований внутри здания:  
 а – объемная модель рабочей зоны с опорными изображениями;  
 б – план опорной поверхности с опорными изображениями

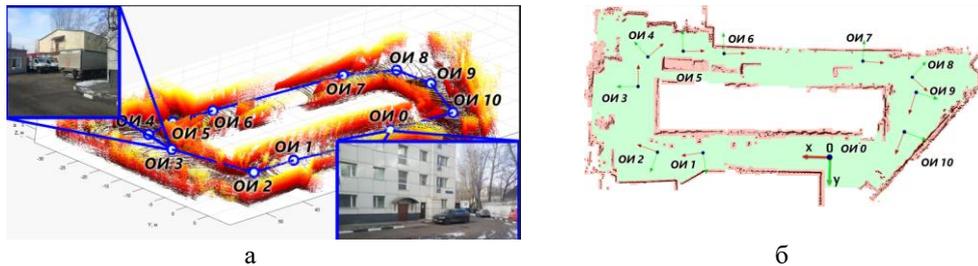


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований в условиях плотной городской застройки: а – объемная модель рабочей зоны с опорными изображениями;  
 б – план опорной поверхности с опорными изображениями

На рис. 11,а и 12,а показаны результаты решения SLAM-задачи по данным бортовой СТЗ в процессе полета БПЛА – сформированы объединенные объемные модели внешней среды с опорными горизонтальными 2D-дальнометрическими изображениями (ОИ1, ОИ2,...), которые позволяют обеспечить полностью автономный полет БПЛА в данных рабочих зонах. На 11,б и 12,б показаны результаты построения карты опорной поверхности, с разрешенными для движения участками (показаны зеленым цветом) с теми же опорными изображениями, которые так же позволяют обеспечить полностью автономное движение наземного РТК в данных рабочих зонах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhehan Li, Rui Mao, Nanhe Chen, Chao Xu, Fei Gao, Yanjun Cao. ColAG: A collaborative Air-Ground Framework for Perception-Limited UGVs' Navigation // arxiv. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.13324> (дата обращения: 15.01.2025).
2. Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S. Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications // IEEE Wireless Commun. – Feb. 2023. – Vol. 30, No. 1. – P. 40-49.
3. Баричев Ю.С., Гойдин О.П., Носков В.П., Собольников С.А. Формирование информационно-навигационного поля роботов воздушного базирования в урбанизированной среде // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 213-225.
4. Казьмин В.Н., Носков В.П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С. 71-83.
5. Носков В.П., Киселев И.О. Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 8. – С. 552-560.
6. Носков В.П., Киселев И.О. Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 31-38.
7. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 8. – С. 62-68.
8. Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // Мехатроника. – 2000. – № 4. – С. 44-47.

9. Носков В.П., Носков А.В. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях // Мобильные роботы и мехатронные системы. – 2001. – С. 179-192.
10. Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 16-21.
11. Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
12. Носков В.П., Киселев И.О. Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – № 8. – С. 490-497.
13. David L. Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – Vol. 2. – P. 1150.
14. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – URL: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
15. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. – URL: <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
16. Носков В.П., Курьянов А.Н. Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 268-278.
17. Носков В.П., Курьянов А.Н., Иванушкин В.И. Анализ средств видео-навигации методами математического моделирования // Тр. 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23-24 ноября 2023 г. – СПб.: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 36-46.
18. <https://classic.gazebosim.org/>.
19. <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>.
20. Pascal Goldschmid, Aamir Ahmad. Integrated Multi-Simulation Environments for Aerial Robotics Research. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.10218>.

#### REFERENCES

1. Zhehan Li, Rui Mao, Nanhe Chen, Chao Xu, Fei Gao, Yanjun Cao. ColAG: A collaborative Air-Ground Framework for Perception-Limited UGVs' Navigation, *arxiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2310.13324> (accessed 15 January 2025).
2. Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S. Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications, *IEEE Wireless Commun*, Feb. 2023, Vol. 30, No. 1, pp. 40-49.
3. Barichev Yu.S., Goydin O.P., Noskov V.P., Sobol'nikov S.A. Formirovanie informatsionno-navigatsionnogo polya robotov vozdušnogo bazirovaniya v urbanizirovannoy srede [Formation of the information and navigation field of air-based robots in an urbanized environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1, pp. 213-225.
4. Kaz'min V.N., Noskov V.P. Vydelenie geometricheskikh i semanticheskikh ob'ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshey srede [Selection of geometric and semantic objects in ranging images for robot navigation and reconstruction of the external environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
5. Noskov V.P., Kiselev I.O. Trekhmernyy variant metoda KHafa v rekonstruktsii vneshey srede i navigatsii [Three-dimensional version of the Hough method in the reconstruction of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, No. 8, pp. 552-560.
6. Noskov V.P., Kiselev I.O. Vydelenie ploskikh ob'ektov v lineyno strukturirovannykh 3D-izobrazheniyakh [Selection of flat objects in linearly structured 3D images], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2018, No. 2 (19), pp. 31-38.
7. Zagoruyko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P. Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshey srede po dannym bortovoy STZ [UAV navigation and 3D reconstruction of the external environment based on onboard vision system data], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2014, No. 8, pp. 62-68.
8. Lakota N.A., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Lundgren Ya.-O., Moor F. Opyt ispol'zovaniya elementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya tsekhovogo transportnogo robota [Experience of using elements of artificial intelligence in the control system of a workshop transport robot], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No. 4, pp. 44-47.
9. Noskov V.P., Noskov A.V. Raspoznavanie orientirov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh [Recognition of landmarks in ranging images], *Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy* [Mobile robots and mechatronic systems], 2001, pp. 179-192.
10. Noskov V.P., Noskov A.V. Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskimi izobrazheniyam [Navigation of mobile robots using rangefinder images], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 12, pp. 16-21.

11. Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu. Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a combined model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
12. Noskov V.P., Kiselev I.O. Ispol'zovanie tekstury lineynykh ob"ektov dlya postroeniya modeli vneshney sredy i navigatsii [Using the texture of linear objects to build a model of the external environment and navigation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2019, No. 8, pp. 490-497.
13. David L. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 1999, Vol. 2, pp. 1150.
14. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. Available at: <http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>.
15. Ke Y., Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors. Available at: <http://www.cs.cmu.edu/~rahuls/pub/cvpr2004-keypoint-rahuls.pdf>.
16. Noskov V.P., Kur'yanov A.N. Ispol'zovanie kompleksirovannykh deskriptorov v reshenii SLAM-zadachi [Using complex descriptors in solving the SLAM problem], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1, pp. 268-278.
17. Noskov V.P., Kur'yanov A.N., Ivanushkin V.I. Analiz sredstv video-navigatsii metodami matematicheskogo modelirovaniya [Analysis of video navigation tools by mathematical modeling methods], *Tr. 34-y Mezhduнародnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023 g.* [Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023]. Saint Petersburg: Izd-vo: TSNII RTK, 2023, pp. 36-46.
18. Available at: <https://classic.gazebosim.org/>.
19. Available at: <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>.
20. Pascal Goldschmid, Amir Ahmad. Integrated Multi-Simulation Environments for Aerial Robotics Research. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.10218>.

**Носков Владимир Петрович** – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057; к.т.н.; зав. сектором НИИСМ.

**Баричев Юрий Сергеевич** – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: ybarichev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79191396529; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

**Гойдин Олег Петрович** – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: crer@vniia.ru; г. Москва, Россия; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

**Курьянов Алексей Николаевич** – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: tigr-kur@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79258248138; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

**Noskov Vladimir Petrovich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; NIISM sector head.

**Barichev Yury Sergeevich** – FSUE "VNIIA"; e-mail: ybarichev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79191396529; research-engineer of the research laboratory.

**Goydin Oleg Petrovich** – FSUE "VNIIA"; e-mail: crer@vniia.ru; Moscow, Russia; head of the Center for Robotics and Emergency Response.

**Kuryanov Alexsei Nikolaevich** – FSUE "VNIIA"; e-mail: tigr-kur@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79258248138; research-engineer of the research laboratory.

УДК 004.81: 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-108-117

**И.А. Пшенокова, К.Ч. Бжихатлов, М.А. Канокова**

## **МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ В ИНФРАСТРУКТУРЕ ГОРОДА**

*В условиях растущего числа автомобилей и ограниченного пространства многие города осознают важность внедрения интеллектуальных парковочных систем для улучшения городской мобильности и удобства для водителей. Уровень внедрения интеллектуальных парковок на основе различных технологических решений растет, однако для достижения максимальной эффективно-*