CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-76-83

УДК 004.932+004.896+004.7.055

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСТАНЦИИ ДО ОБЪЕКТА В МНОГОРОБОТНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ СОГЛАСОВАННОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Ц. ГО[1], М. И. ЗОРЬКО[1], Н. ЧЭН[2], В. Ю. ЦВЕТКОВ[1]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)
[2]Сианьский университет электронной науки и техники (Сиань, Китайская Народная Республика)

Аннотация. Рассматривается задача повышения точности определения дистанции до объекта в видеоцентрической самоорганизующейся многороботной системе без одометрии (POM-MRS), функционирующей в квазистационарном режиме. В современных POM-MRS задачи обнаружения опорного агента для измерения дистанции до объекта окружения, сетевой идентификации опорного агента (установления соответствия между изображением агента и его сетевым адресом) и определения его ориентации решаются с помощью комплексного нейросетевого детектирования, что ограничивает распределенный стереобазис и дает относительно малую точность измерений дистанции до объекта в условиях крупномасштабных открытых пространств. Для повышения точности определения дистанции до объекта окружения предлагается модель на основе локальной согласованной триангуляции с аналитической оценкой ошибок измерений и протокольно-геометрической верификацией гипотез о детектировании агентов. Модель позволяет уменьшить эти ошибки по сравнению с моделями однороботных систем на основе одометрии и известными моделями POM-MRS на базе комплексного нейросетевого детектирования агентов.

Ключевые слова: дистанция до объекта, видеоцентрическая многороботная система, локальная согласованная триангуляция, стереобазис, сетевая идентификация агентов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Определение дистанции до объекта в многороботной системе на основе локальной согласованной триангуляции / Ц. Го [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 76–83. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-76-83.

DETERMINING THE DISTANCE TO AN OBJECT IN A MULTI-ROBOT SYSTEM BASED ON LOCAL CONSISTENT TRIANGULATION

QICHENG GUO[1], MIKHAIL ZORKO[1], NAN CHENG[2], VIKTAR TSVIATKOU[1]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
[2]Xidian University (Xi'an, People's Republic of China)

Abstract. This paper considers the problem of increasing the accuracy of object distance determination in a video-centric self-organizing multi-robot system without odometry (POM-MRS) operating in a quasi-stationary mode. In modern POM-MRS, the tasks of detecting a reference agent for measuring the distance to an environmental object, network identification of the reference agent (establishing a correspondence between the agent's image and its network address), and determining its orientation are solved using complex neural network detection. This limits the distributed stereo basis and results in relatively low accuracy of object distance measurements in large-scale open spaces. To improve the accuracy of environmental distance determination, we propose a model based on local consistent triangulation with an analytical assessment of measurement errors and protocol-geometric verification of agent detection hypotheses. The model reduces these errors compared to single-robot system models based on odometry and existing POM-MRS models based on complex neural network agent detection.

Keywords: distance to object, video-centric multirobot system, local consistent triangulation, stereo basis, network identification of agents.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Guo Q., Zorko M., Cheng N., Tsviatkou V. (2026) Determining the Distance to an Object in a Multi-Robot System Based on Local Consistent Triangulation. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 76–83. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-76-83 (in Russian).

Введение

Самоорганизующаяся многороботная система (Self-Organizing Multi-Robot System, SMRS) является эффективным средством решения ряда сложных задач. Функциональность SMRS определяется в первую очередь связностью и сенсорами роботов – интеллектуальных агентов. Каждый агент, как и отдельный (отделившийся от SMRS) робот, преобразует сигналы сенсоров в понимание окружающего пространства с помощью технологии SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [1]. Распределенный интеллект SMRS опирается на технологию MA-SLAM (Multi-Agent SLAM), позволяющую агентам совместно оценивать и синхронизировать понимание окружения. На основе распределенных между агентами стереобазисов с помощью триангуляции в SMRS определяются дистанции до объектов окружения. Для повышения точности определения дистанций до объектов агенты используют качественные сенсоры различного типа, а также их комбинации [2, 3]. Для SMRS на основе малоразмерных агентов возможности применения габаритных высокоточных комбинированных сенсоров сужаются. В [1, 4, 5] описаны варианты видеоцентрических SMRS (V-SMRS), в которых агенты оснащаются одной монокулярной камерой.

V-SMRS без одометрии (Pure Optical Monocular Multi-Robot System, POM-MRS) – отдельный класс SMRS, агенты которых оснащены только монокулярными камерами и поэтому могут иметь компактное исполнение. В современных концепциях POM-MRS преобладают децентрализованная модель и комплексное нейросетевое детектирование агентов (включает обнаружение, трекинг, сетевую идентификацию, распознавание относительной ориентации) при определении распределенного стереобазиса с помощью метода обратной проекции (монокулярной дальнометрии) по их известным линейным размерам или известным размерам маркеров на корпусах агентов [6]. Комплексное нейросетевое детектирование агентов позволяет существенно повысить точность определения стереобазиса, но на малых дистанциях, что не всегда согласуется с дистанциями до объектов окружения и может приводить к большим ошибкам измерений.

Цель исследований – повышение точности определения дистанции до объекта окружения POM-MRS в условиях масштабных открытых пространств.

Постановка задачи

Рассматривается децентрализованная POM-MRS, состоящая из агентов, имеющих одинаковую конструкцию и размеры, функционирующая в квазистационарном режиме, при котором фазы оптимизации стереобазиса для построения 3D-карты окружения сменяются длительными периодами локальных измерительных операций в фиксированных точках, осуществляемых параллельно с основными функциями, соответствующими целевому назначению POM-MRS. В однороботных системах (Single Robot System, SRS) оценка $\widehat{D_{\mathrm{O}}}(t_1)$ дистанции $D_{\mathrm{O}}(t_1)$ от робота до объекта окружения определяется с ошибкой $E_{\mathrm{D}}(t_1)=\left|\widehat{D_{\mathrm{O}}}(t_1)-D_{\mathrm{O}}(t_1)\right|$ на основе триангуляции и сопоставления двух перекрывающихся изображений $\{I_{\mathrm{O}}(t_1),I_{\mathrm{O}}(t_2)\}$ (рис. 1, *а*), полученных в моменты времени t_1 и t_2 в результате перемещения $B(t_1,t_2)$ робота (оценка $\hat{B}(t_1,t_2)$ стереобазиса на основе одометрии), с помощью выражения [7]

$$\widehat{D_{\mathrm{O}}}(t_1)=\hat{B}(t_1,t_2)\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{O}}}(t_2)\right)\Big/\left(\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{O}}}(t_1)+\widehat{\alpha_{\mathrm{O}}}(t_2)\right)\right), \quad (1)$$

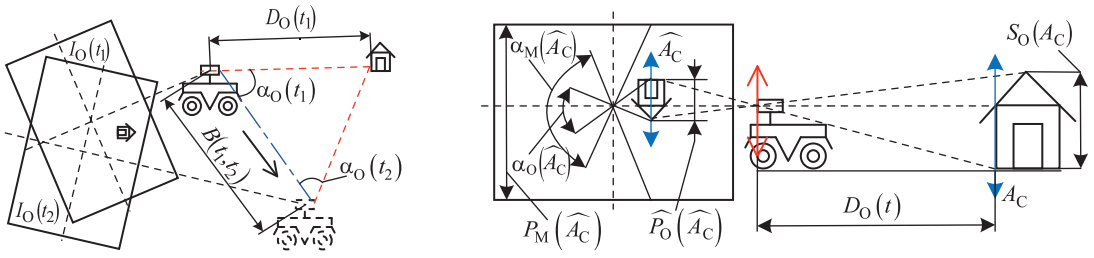
где $\widehat{\alpha_{\mathrm{O}}}(t_1)$, $\widehat{\alpha_{\mathrm{O}}}(t_2)$ – оценки углов $\alpha_{\mathrm{O}}(t_1)$, $\alpha_{\mathrm{O}}(t_2)$ на объект для положений робота в моменты времени t_1 и t_2, определяемые по изображениям $\{I_{\mathrm{O}}(t_1),I_{\mathrm{O}}(t_2)\}$.

Для минимизации ошибки $E_{\mathrm{D}}(t_1)$ необходимо согласовать $B(t_1,t_2)$ с $D_{\mathrm{O}}(t_1)$ за счет перемещения робота. Однако данная возможность имеет ограничение, связанное с быстрым ростом ошибок определения значений углов $\alpha_{\mathrm{O}}(t_1)$, $\alpha_{\mathrm{O}}(t_2)$ при одновременном перемещении робота и объекта окружения. Преодолеть это ограничение позволяет метод обратной проекции (моно-

кулярной дальнометрии), согласно которому дистанция $D_O(t)$ до объекта известного размера $S_O(A_C)$ вдоль оси A_C определяется по размеру его проекции [6] (рис. 1, *b*). В таком случае в любой момент времени *t* оценка $\widehat{D_O}(t)$ дистанции до объекта вычисляется по оценке $\widehat{\alpha_O}\left(\widehat{A_C}\right)$ углового размера $\alpha_O\left(\widehat{A_C}\right)$ объекта вдоль предполагаемого положения $\widehat{A_C}$ (определяется по изображению объекта) оси A_C на основе известного углового разрешения $R_M\left(\widehat{A_C}\right)$ пикселя фотоприемной матрицы вдоль предполагаемого положения $\widehat{A_C}$ оси A_C с помощью выражения

$$\widehat{D_O}(t) = S_O\left(\widehat{A_C}\right) \Big/ \tan\left(\widehat{\alpha_O}\left(\widehat{A_C}\right)\right), \tag{2}$$

где $\widehat{\alpha_O}\left(\widehat{A_C}\right) = \widehat{P_O}\left(\widehat{A_C}\right) R_M\left(\widehat{A_C}\right)$; $R_M\left(\widehat{A_C}\right) = \alpha_M\left(\widehat{A_C}\right) \Big/ P_M\left(\widehat{A_C}\right)$; $\widehat{P_O}\left(\widehat{A_C}\right)$ – оценка пиксельного размера объекта вдоль предполагаемого положения $\widehat{A_C}$ оси A_C на сформированном фотоприемной матрицей изображении; $\alpha_M\left(\widehat{A_C}\right)$, $P_M\left(\widehat{A_C}\right)$ – угловой и пиксельный размеры фотоприемной матрицы вдоль предполагаемого положения $\widehat{A_C}$ оси A_C.



a *b*

Рис. 1. Схема определения дистанции до объекта в SRS на основе:
a – триангуляции; *b* – метода обратной проекции

Fig. 1. Scheme for determining the distance to an object in SRS based on:
a – triangulation; *b* – back projection method

Недостатком данного метода является ограниченный набор классов объектов с априорно известными размерами. Однако в POM-MRS, где размеры агентов известны, используется выражение (2) для определения распределенного стереобазиса, а затем (1) – для определения дистанции до объекта окружения на основе согласованной триангуляции.

В современных POM-MRS задачи обнаружения и выбора опорного агента для измерений дистанции до объекта окружения решаются с помощью комплексного нейросетевого детектирования агентов [1, 4, 5]. Для экономии ресурсов локальная согласованная триангуляция реализуется на основе двух агентов, временно объединившихся для совместного решения задачи. При этом вводится жесткое ограничение на максимальный стереобазис, который с учетом угла обзора видеокамеры не превышает 7 м. Агенты стремятся поддерживать такой стереобазис для повышения точности определения дистанции до объекта окружения. Однако оптимальный стереобазис, обеспечивающий минимум ошибки определения дистанции до объекта окружения, зависит от этой дистанции. В связи с чем актуальными являются задачи разработки общей модели определения дистанции до объекта в POM-MRS, позволяющей преодолеть ограничения комплексного нейросетевого детектирования агентов, и теоретической оценки эффективности этой модели.

Модель определения дистанции до объекта окружения

Предлагается модель DeepGV (Distance Error Estimation and Protocol-Geometric Verification) определения дистанции до объекта окружения в однородной децентрализованной POM-MRS на основе локальной согласованной триангуляции с аналитической оценкой ошибок определения дистанции и протокольно-геометрической верификацией гипотез о детектировании агентов. Модель описывает базовые функции, позволяющие построить общий алгоритм определения дистанции: определение распределенного стереобазиса на основе метода обратной проекции; вычисление дистанции до объекта окружения на основе триангуляции; локальная согласованная

триангуляция, включающая выбор опорного агента (статическая оптимизация распределенного стереобазиса) и управляемое перемещение опорного агента (динамическая оптимизация распределенного стереобазиса) на основе аналитической оценки ошибок определения дистанции; локальная визуально-протокольная идентификация агентов на основе протокольно-геометрической верификации гипотез о детектировании агентов.

Определение распределенного стереобазиса. Для получения оценки $\hat{B}(i,j,t_0)$ распределенного стереобазиса $B(i,j,t_0)$ используется априорная информация о размере $S_{\mathrm{R}}(A_{\mathrm{C}})$ агента вдоль оси A_{C}. Предполагается, что агенты имеют одинаковые форму и размер. В таком случае в момент времени t_0 оценка $\hat{B}(i,j,t_0)$ агентом i вычисляется по оценке $\hat{\beta}(i,j,t_0)$ углового размера $\beta(i,j,t_0)$ опорного агента j по его изображению $I_{\mathrm{R}}(i,j,t_0)$ вдоль предполагаемого положения $\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)$ оси A_{C} на основе известного углового разрешения $R\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right)$ пикселя фотоприемной матрицы вдоль $\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)$ с помощью выражения

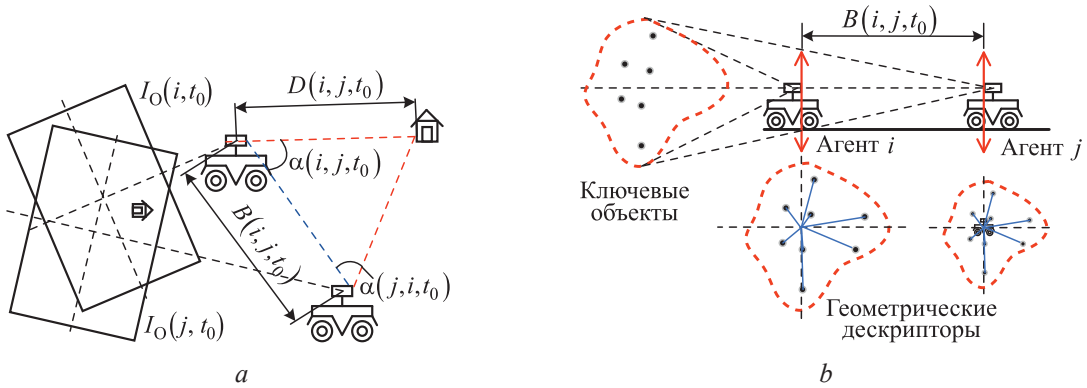
$$\hat{B}(i,j,t_0) = S_{\mathrm{R}}\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right) \Big/ \tan\left(\hat{\beta}(i,j,t_0)\right), \tag{3}$$

где $\hat{\beta}(i,j,t_0) = \widehat{P_{\mathrm{R}}}(i,j,t_0) R\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right)$; $\widehat{P_{\mathrm{R}}}(i,j,t)$ – оценка пиксельного размера опорного агента j вдоль $\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)$; $R\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right) = \alpha_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right) \Big/ P_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)\right)$.

Вычисление дистанции до объекта окружения. Оценка $\hat{D}(i,j,t_0)$ дистанции $D(i,j,t_0)$ от агента i до объекта окружения в момент времени t_0 определяется с ошибкой $E_{\mathrm{D}}(i,j,t_0) = \left|D(i,j,t_0) - \hat{D}(i,j,t_0)\right|$ на основе локальной согласованной триангуляции (рис. 2, *a*) с помощью опорного агента j по оценке $\hat{B}(i,j,t_0)$ распределенного стереобазиса $B(i,j,t_0)$ между агентами i и j и оценкам $\hat{\alpha}(i,j,t_0)$, $\hat{\alpha}(j,i,t_0)$ углов $\alpha(i,j,t_0)$, $\alpha(j,i,t_0)$ на объект относительно распределенного стереобазиса $B(i,j,t_0)$ с помощью выражения

$$\hat{D}(i,j,t_0) = \hat{B}(i,j,t_0) \frac{\sin\left(\hat{\alpha}(j,i,t_0)\right)}{\sin\left(\hat{\alpha}(i,j,t_0) + \hat{\alpha}(j,i,t_0)\right)}, \tag{4}$$

где $\hat{\alpha}(i,j,t_0) = \widehat{P_{\mathrm{A}}}(i,j,t_0) R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$; $\widehat{P_{\mathrm{A}}}(i,j,t_0)$ – оценка пиксельного размера предполагаемой проекции $\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)$ виртуальной линии $A_{\mathrm{O}}(i,j,t_0)$ между предполагаемым центром изображения объекта окружения и предполагаемым центром фотоприемной матрицы опорного агента j; $R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$ – угловое разрешение пикселя фотоприемной матрицы вдоль $\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)$, $R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right) = \alpha_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right) \Big/ P_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$; $\alpha_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$, $P_{\mathrm{M}}\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$ – угловой и пиксельный размеры фотоприемной матрицы вдоль $\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)$; $\hat{\alpha}(j,i,t_0)$ – вычисляется аналогично $\hat{\alpha}(i,j,t_0)$.



a *b*

Рис. 2. Схемы работы POM-MRS при:
a – определении дистанции до объекта окружения; *b* – сетевой идентификации агентов
Fig. 2. POM-MRS operating diagrams for:
a – determining the distance to an object in the environment; *b* – network identification of agents

Локальная согласованная триангуляция (выбор опорного агента). Для оценки дистанции от агента *i* до объекта окружения с наибольшей точностью в момент времени t_0 необходимо выбрать среди K_{R} агентов POM-MRS опорный агент *j*, для которого оценка $\widehat{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_0)$ ошибки $E_{\mathrm{D}}(i,j,t_0)$ определения дистанции минимальна, т. е.

$$j = \arg\min_{k}\left(\widehat{E_{\mathrm{D}}}(i,k,t_0)\right) \text{ при } k=\overline{1,K_{\mathrm{R}}},\ k\neq i. \tag{5}$$

Оценка ошибки $\widehat{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_0)$ определения дистанции до объекта окружения вычисляется с помощью выражения

$$\widehat{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_0) = \max\left(\left|\widehat{D}(i,j,t_0)-\widehat{D_{-}}(i,j,t_0)\right|,\left|\widehat{D_{+}}(i,j,t_0)-\widehat{D}(i,j,t_0)\right|\right), \tag{6}$$

где $\widehat{D_{+}}(i,j,t_0)=\widehat{B_{+}}(i,j,t_0)\max\left(\dfrac{\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{S2}}}(j,i,t_0)\right)}{\left(\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{S1}}}(i,j,t_0)+\widehat{\alpha_{\mathrm{S2}}}(j,i,t_0)\right)\right)}\right)$ при $\mathrm{S1}=\{+,-\},\ \mathrm{S2}=\{+,-\}$;

$\widehat{D_{-}}(i,j,t_0)=\widehat{B_{-}}(i,j,t_0)\min\left(\dfrac{\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{S2}}}(j,i,t_0)\right)}{\left(\sin\left(\widehat{\alpha_{\mathrm{S1}}}(i,j,t_0)+\widehat{\alpha_{\mathrm{S2}}}(j,i,t_0)\right)\right)}\right)$ при $\mathrm{S1}=\{+,-\},\ \mathrm{S2}=\{+,-\}$;

$\widehat{\alpha_{+}}(i,j,t_0)=\left(\widehat{P_A}(i,j,t_0)+1\right)R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$; $\widehat{\alpha_{-}}(i,j,t_0)=\left(\widehat{P_A}(i,j,t_0)-1\right)R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_0)\right)$;

$\widehat{\alpha_{+}}(j,i,t_0)$, $\widehat{\alpha_{-}}(j,i,t_0)$ – вычисляются аналогично $\widehat{\alpha_{+}}(i,j,t_0)$, $\widehat{\alpha_{-}}(i,j,t_0)$.

Локальная согласованная триангуляция (управляемое перемещение опорного агента). Точность определения расстояния от агента *i* до объекта окружения может быть повышена за *N* итераций перемещения опорного агента *j* в новые координаты, обеспечивающие лучшие значения распределенного стереобазиса и углов на объект окружения при условии, что:

$$\Delta t_N = \sum_{n=1}^{N}\Delta t_n \le T, \tag{7}$$

где Δt_n – время, затраченное на перемещение опорного агента *j* на *n*-й итерации; *T* – допустимое время коррекции положения опорного агента.

На каждой итерации *n* в результате изменения значения *p* пиксельного размера опорного агента вдоль предполагаемого положения $\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)$ оси A_{C} на прогнозируемом изображении $\widetilde{I_{\mathrm{R}}}(i,j,t_n)$ подбираются пиксельный размер $\widetilde{P_{\mathrm{R}}}(i,j,t_n)$ и соответствующий ему угловой размер $\tilde{\beta}(i,j,t_n)=\widetilde{P_{\mathrm{R}}}(i,j,t_n)R\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)$ опорного агента *j*, вычисляются новые распределенный стереобазис $\widetilde{B}(i,j,t_n)=S_{\mathrm{R}}\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)\Big/\tan\left(\tilde{\beta}(i,j,t_n)\right)$ и углы на объект окружения $\widetilde{\alpha}(i,j,t_n)=\widetilde{\alpha}(j,i,t_n)=\arccos\left(\widetilde{B}(i,j,t_n)\Big/\left(2\widehat{D}(i,j,t_{n-1})\right)\right)$, обеспечивающие минимальное значение $\widetilde{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_n)=\max\left(\left|\widetilde{D}(i,j,t_n)-\widetilde{D_{-}}(i,j,t_n)\right|,\ \left|\widetilde{D_{+}}(i,j,t_n)-\widetilde{D}(i,j,t_n)\right|\right)$ прогнозируемой ошибки определения дистанции от агента *i* до объекта окружения, с помощью выражения

$$\widetilde{P_{\mathrm{R}}}(i,j,t_n) = \arg\min_{p}\left(\widetilde{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_n)\right) \text{ при } p=\overline{2,P_{\mathrm{M}}\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)-1},\ \widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)=\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_{n-1}), \tag{8}$$

где $\widetilde{D}(i,j,t_n)=\widetilde{B}(i,j,t_n)\Big/\left(2\cos\left(\widetilde{\alpha}(i,j,t_n)\right)\right)$; $\widetilde{D_{+}}(i,j,t_n)=\widetilde{B_{+}}(i,j,t_n)\Big/\left(2\cos\left(\widetilde{\alpha_{+}}(i,j,t_n)\right)\right)$;

$\widetilde{D_{-}}(i,j,t_n)=\widetilde{B_{-}}(i,j,t_n)\Big/\left(2\cos\left(\widetilde{\alpha_{-}}(i,j,t_n)\right)\right)$; $\widetilde{\alpha_{+}}(i,j,t_n)=\left(\widetilde{P_A}(i,j,t_n)+1\right)R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_{n-1})\right)$;

$\widetilde{\alpha_{-}}(i,j,t_n)=\left(\widetilde{P_A}(i,j,t_n)-1\right)R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_{n-1})\right)$; $\widetilde{B_{+}}(i,j,t_n)=S_{\mathrm{R}}\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)\Big/\tan\left(\widetilde{\beta_{-}}(i,j,t_n)\right)$;

$\widetilde{B_{-}}(i,j,t_n)=S_{\mathrm{R}}\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)\Big/\tan\left(\widetilde{\beta_{+}}(i,j,t_n)\right)$; $\widetilde{\beta_{+}}(i,j,t_n)=(p-1)R\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)$;

$\widetilde{\beta_{-}}(i,j,t_n)=(p+1)R\left(\widetilde{A_{\mathrm{C}}}(t_n)\right)$; $\widetilde{P_A}(i,j,t_n)=\left[\widetilde{\alpha}(i,j,t_n)\Big/R\left(\widehat{A_{\mathrm{O}}}(i,j,t_{n-1})\right)\right]$; [ ] – операция округления до целого значения.

К моменту времени $t_n = t_0 + \Delta t_n \left(\Delta t_n = \sum_{m=1}^{n} \Delta t_m \le T \right)$ опорный агент j перемещается относительно агента i по углу $\Delta\alpha(t_n)$ и стереобазису $\Delta B(t_n)$, вычисляемым с помощью выражений $\Delta\alpha(t_n) = \widehat{\alpha}(i,j,t_{n-1}) - \widetilde{\alpha}(i,j,t_n)$, $\Delta B(t_n) = \widehat{B}(i,j,t_{n-1}) - \widetilde{B}(i,j,t_n)$, и определяются новые значения $\widehat{D}(i,j,t_n)$ и $\widehat{B}(i,j,t_0)$ с помощью (3) и (4) при $t_0 = t_n$.

Локальная визуально-протокольная идентификация агентов. В момент времени t_0 возникает необходимость установления соответствия между номерами (сетевыми адресами) агентов в окружении агента i с их относительными положениями и ориентациями, регистрируемыми по изображению $I_{\mathrm{R}}(i,j,t_0)$. Для решения данной задачи предлагается алгоритм PGHV (Protocol-Geometric Hypotheses Verification) локальной визуально-протокольной идентификации агентов, основанный на протокольно-геометрической верификации гипотез о детектировании агентов. Алгоритм PGHV состоит из следующих шагов, реализуемых в виде протокола обмена данными между агентами.

1. Агент i осуществляет поиск другого агента в своем окружении по изображениям с камеры. Относительно объекта изображения, схожего по признакам с агентом, выдвигается гипотеза о детектировании агента x. Для проверки этой гипотезы агент i оценивает дистанцию до наблюдаемого гипотетического агента x с помощью выражения (3), разворачивается на 180° и формирует изображение окружения в плоскости, перпендикулярной оси, соединяющей оптический центр своей камеры и предполагаемый оптический центр камеры наблюдаемого гипотетического агента x (рис. 2, *b*). На сформированном изображении агент i выделяет ключевые объекты, формирует их геометрические дескрипторы в виде нормированных по длине базовых линий от центра изображения до центров объектов и углов между базовыми линиями и передает их широковещательным пакетом вместе с дистанцией до наблюдаемого гипотетического агента x и собственным номером i (сетевым адресом).

2. Если гипотетический агент x существует (является, например, агентом j), он принимает широковещательный пакет, с помощью выражения (3) оценивает дистанцию до наблюдаемого гипотетического агента i в своем окружении и сравнивает дистанцию до него со значением дистанции, указанным в широковещательном пакете. При обнаружении совпадения агент j ориентирует оптическую ось камеры в направлении на предполагаемый оптический центр камеры гипотетического агента i, формирует изображение, выделяет ключевые объекты на этом изображении, формирует их геометрические дескрипторы и сопоставляет эти дескрипторы с дескрипторами, принятыми в широковещательном пакете. При обнаружении сходства дескрипторов подтверждается гипотеза об объекте i. Если агент не является гипотетическим агентом x или не существует, то сетевая идентификация не даст результатов.

3. При положительной идентификации на шаге 2 агент j высылает в адрес агента i ответный пакет, содержащий номер агента j (сетевой адрес). При отрицательной сетевой идентификации пакет не формируется.

4. При положительной сетевой идентификации на шаге 2 агент i принимает пакет от агента j. Из пакета он извлекает номер (сетевой адрес) агента j. При отрицательной сетевой идентификации агент i пакет не принимает и после тайм-аута переходит к поиску следующего гипотетического опорного агента x.

В результате выполнения алгоритма (протокола) PGHV агент i сопоставляет относительные положение и ориентацию наблюдаемого агента с его номером (сетевым адресом), например, j, и может более точно оценить дистанцию до агента j. После успешной сетевой идентификации агенты i и j наблюдают друг друга и ориентированы в пространстве под определенными известными углами, что дает агенту i информацию об относительной ориентации агента j, о положении на изображении этого агента оси $\widehat{A_{\mathrm{C}}}(t_0)$ и позволяет оценить размер агента j вдоль данной оси с минимальной ошибкой для текущего распределенного стереобазиса $B(i,j,t_0)$. Аналогичные результаты алгоритм PGHV дает для агента j.

Оценка эффективности моделей определения дистанции до объекта окружения

С использованием зависимостей $\widehat{E_{\mathrm{D}}}(i,j,t_0)$, $\widehat{E_{\mathrm{D}}}(t_1)$ и $E_{\mathrm{D}}(i,j,t_0)$ от стереобазиса произведена оценка эффективности POM-MRS на основе предложенной модели DeepGV (POM-MRS/DeepGV)

по сравнению с моделями SRS (колесный робот с электронной инерциально-механической одометрией при перемещении по неровному песчаному грунту – SRS/IME [2]; колесный робот с механической одометрией при перемещении по ровному песчаному грунту – SRS/M [3]) и POM-MRS на основе комплексного нейросетевого детектирования агентов (POM-MRS/NND). На рис. 3, *a* приведены зависимости $\widehat{E_D}(i,j,t_0)$, $\widehat{E_D}(t_1)$ и $E_D(i,j,t_0)$ (ось E_D ординат) от стереобазиса (ось B абсцисс) при $S_R(A_C)=0{,}5$ м; $D_O(t_1)=D(i,j,t_0)=500$ м; $\alpha_M\left(\widehat{A_C}\right)=\alpha_M\left(\widehat{A_C}(t_0)\right)=\alpha_M\left(\widehat{A_O}(i,j,t_0)\right)=20°$; $P_M\left(\widehat{A_C}\right)=P_M\left(\widehat{A_C}(t_0)\right)=P_M\left(\widehat{A_O}(i,j,t_0)\right)=8192$ пикселей; $\alpha_O(t_1)=\alpha(i,j,t_0)=60°$ (разрешение высокое, дистанция 500 м). Из рис. 3, *a* следует, что POM-MRS/DeepGV при распределенном стереобазисе 24 м позволяет уменьшить ошибки определения дистанции до объекта в 1,7 и 46,4 раза по сравнению с SRS/IME и SRS/M соответственно и в 1,9 раза – по сравнению с POM-MRS/NND. На рис. 3, *b* приведены зависимости $\widehat{E_D}(i,j,t_0)$, $\widehat{E_D}(t_1)$ и $E_D(i,j,t_0)$ от стереобазиса при $S_R(A_C)=0{,}5$ м; $\alpha_M\left(\widehat{A_C}\right)=\alpha_M\left(\widehat{A_C}(t_0)\right)=\alpha_M\left(\widehat{A_O}(i,j,t_0)\right)=70°$ и матрице с меньшим пиксельным размером $P_M\left(\widehat{A_C}\right)=P_M\left(\widehat{A_C}(t_0)\right)=P_M\left(\widehat{A_O}(i,j,t_0)\right)=2048$ (т. е. снижение разрешения в 14 раз) для $D_O(t_1)=D(i,j,t_0)=1000$ м (при увеличении дистанции до объекта в два раза); $\alpha_O(t_1)=\alpha(i,j,t_0)=60°$ (разрешение низкое, дистанция 1000 м). Из рис. 3, *b* следует, что POM-MRS/DeepGV при стереобазисе 37 м позволяет уменьшить ошибки определения дистанции до объекта в 2,8 раза по сравнению с SRS/M и в 3 раза – по сравнению с POM-MRS/NND.

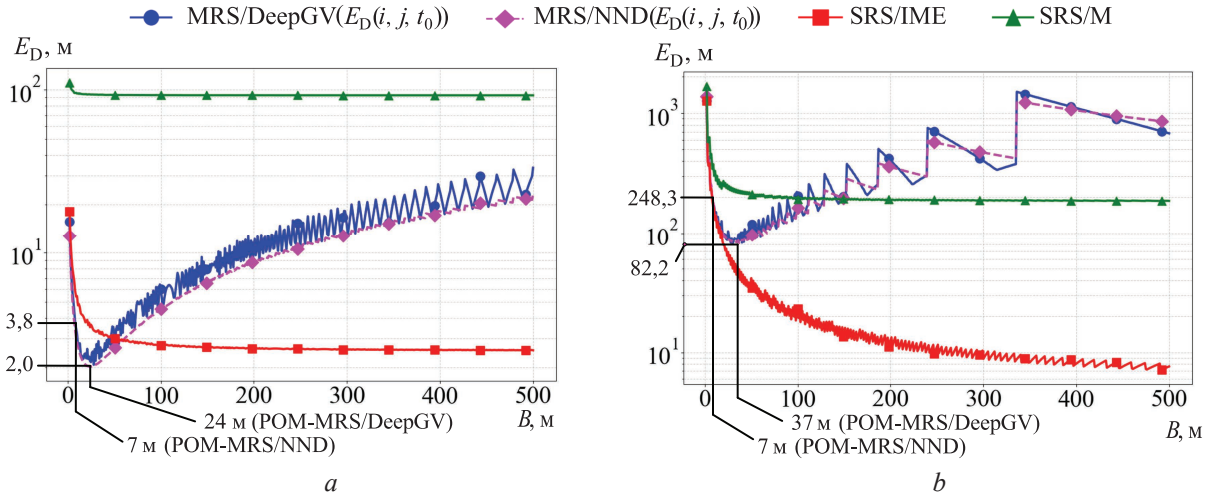


Рис. 3. Зависимости оценки ошибки определения дистанции до объекта от стереобазиса:
a – разрешение высокое, дистанция 500 м; *b* – разрешение низкое, дистанция 1000 м

Fig. 3. Dependences of the error estimate for determining the distance to an object on the stereo basis:
a – high resolution, distance 500 m; *b* – low resolution, distance 1000 m

Заключение

1. Для повышения точности определения дистанции до объекта в децентрализованной однородной POM-MRS, функционирующей в квазистационарном режиме, разработана модель на основе локальной согласованной триангуляции с аналитической оценкой погрешности измерений и протокольно-геометрической верификацией гипотез о детектировании агентов. Модель отличается от моделей SRS на основе одометрии и POM-MRS на основе комплексного нейросетевого детектирования агентов использованием: протокольно-геометрической верификации гипотез о детектировании агентов для их локальной визуально-протокольной идентификации; аналитической оценки ошибок определения дистанции до объекта окружения при выборе опорного агента для статической оптимизации распределенного стереобазиса и при перемещении опорного агента для динамической оптимизации распределенного стереобазиса.

2. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национального фонда естественных наук Китая в рамках проекта Т25КИ-054 «Технология многокамерной локализации и построения карты открытого пространства».

Список литературы / References

1. Jang Y., Oh C., Lee Y., Kim H. J. (2021) Multirobot Collaborative Monocular SLAM Utilizing Rendezvous. *IEEE Transactions on Robotics*. 37 (5), 1469–1486. http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2021.3058502.
2. Ojeda L., Cruz D., Reina G., Borenstein J. (2006) Current-Based Slippage Detection and Odometry Correction for Mobile Robots and Planetary Rovers. *IEEE Transactions on Robotics*. 22 (2), 366–378. http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2005.862480.
3. Reddy B. L. (2019) Evolution & Development of Visual Odometry Systems. *Anveshana's International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. 4 (12).
4. Kang T., Kwon J. W., Bae I., Kim J. H. (2025) Monocular Vision-Based Swarm Robot Localization Using Equilateral Triangular Formations. *Machines*. 13 (8). https://doi.org/10.3390/machines13080667.
5. Si X., Xu G., Ke M., Zhang H., Tong K., Qi F. (2023) Relative Localization within a Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Swarm Based on Airborne Monocular Vision. *Drones*. 7 (10). https://doi.org/10.3390/drones7100612.
6. Chen S., Mei S., Jia G., Li Y., Zhao W. (2021) KFPA Monocular Ranging Algorithm Design and Application in Mobile Edge Computing. *Journal of Internet Technology*. 22 (5), 1131–1142.
7. Alsadik B. (2016) A Modified Method for Image Triangulation Using Inclined Angles. *From Human History to the Future with Spatial Information. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 23rd International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Congress, ISPRS 201*. 453–458.

Поступила 17.04.2026 Принята в печать 27.05.2026
Received: 17 April 2026 Accepted: 27 May 2026

Вклад авторов

Го Ц. разработал модель определения дистанции до объекта и программные средства моделирования, провел эксперименты.

Зорько М. И. принял участие в подборе видеокамер для моделирования.

Чэн Н. участвовал в обсуждении и определении перспектив практического использования результатов.

Цветков В. Ю. определил цель, задачи и методы исследования, интерпретировал и обобщил результаты.

Authors' contribution

Guo Q. developed a model for determining the distance to an object and simulation software, and conducted experiments.

Zorko M. participated in selecting video cameras for the simulation.

Cheng N. participated in the discussion and identified potential practical applications of the results.

Tsviatkou V. defined the goal, objectives, and methods of the study, and interpreted and summarized the results.

Сведения об авторах

Го Ц., асп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Зорько М. И., ассис. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Чэн Н., канд. техн. наук, проф. факультета коммуникационной инженерии, Сианьский университет электронной науки и техники

Цветков В. Ю., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Guo Q., Postgraduate of Infocommunication Technologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Zorko M., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Cheng N., Cand. Sci. (Tech.), Professor of the School of Telecommunications Engineering, Xidian University

Tsviatkou V., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktar