

УДК 004.932.2:621.865.8

***МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО  
ВОСПРИЯТИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА  
АПЕРТУРЫ ДВИЖЕНИЕМ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ ОККЛЮЗИЯХ***

***Гринин Д.К.<sup>1</sup>***

*Магистрант*

*Московский технический университет связи и информатики*

*Россия, Москва*

**Аннотация.** Рассмотрена задача повышения информативности визуального восприятия мобильного робота при наблюдении объектов, частично закрытых препятствиями. Предложено использовать латеральное перемещение камеры для накопления контурных фрагментов, получаемых с разных точек наблюдения. Обосновано применение синтеза апертуры движением как способа ослабления влияния окклюдера и уточнения геометрических признаков объекта. Описана схема обработки, включающая выделение контуров, сопоставление фрагментов и формирование контурной аппроксимации формы. Выполнено сопоставление с методами плотной трехмерной реконструкции и нейросетевыми методами анализа структуры сцены. Отдельно выделены условия, при которых метод сохраняет практический смысл.

**Ключевые слова:** мобильный робот; компьютерное зрение; синтез апертуры; окклюзия; контурный анализ; активное восприятие.

***A METHOD FOR IMPROVING THE INFORMATION CONTENT OF MOBILE  
ROBOT VISUAL PERCEPTION BASED ON MOTION-BASED APERTURE  
SYNTHESIS UNDER PARTIAL OCCLUSIONS***

***Grinin D.K.***

*Master's Degree Student*

---

<sup>1</sup> Научный руководитель – к.т.н., доцент Рековец А.В.

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*  
*Russia, Moscow*

**Abstract.** The paper considers the problem of improving the information content of mobile robot visual perception when observing objects partially occluded by obstacles. It is proposed to use lateral camera motion to accumulate contour fragments obtained from different viewpoints. The use of motion-based aperture synthesis is substantiated as a means of reducing the influence of an occluder and refining the geometric features of an object. A processing scheme is described, including contour extraction, fragment matching, and formation of a contour-based shape approximation. The proposed approach is compared with dense three-dimensional reconstruction methods and neural network-based methods for scene structure analysis. The conditions under which the method remains practically meaningful are specified separately.

**Keywords:** mobile robot; computer vision; synthetic aperture; partial occlusion; contour analysis; active perception.

## **Введение**

Мобильные роботы, работающие в слабоструктурированных средах, часто сталкиваются с частичными окклюзиями, когда объект интереса перекрывается препятствиями. При статическом наблюдении это снижает качество сегментации, сопоставления признаков и классификации [1;2;3]. Однако при контролируемом латеральном смещении камеры ближний окклюдер и удаленный объект имеют различный параллакс, за счет чего на разных кадрах становятся видимыми разные фрагменты скрытого контура.

Данный принцип используется в подходах активного восприятия и синтеза апертуры, где изменение точки наблюдения позволяет повысить информативность визуальной сцены [4;5;6]. В отличие от методов, ориентированных на плотную трехмерную реконструкцию, для ряда робототехнических задач достаточно получить не полную модель сцены, а

компактное описание формы объекта, пригодное для классификации и принятия управляющего решения.

Целью работы является разработка метода повышения информативности визуального восприятия мобильного робота на основе синтеза апертуры движением при частичных окклюзиях.

Для достижения цели решаются задачи анализа формирования визуальной информации при латеральном смещении камеры, обоснования контурного анализа, объединения фрагментов формы и сопоставления предложенного подхода с методами трехмерной реконструкции.

Научная новизна заключается в использовании синтеза апертуры движением как основы для накопления контурных фрагментов частично скрытого объекта. Практическая значимость связана с применением метода в системах активного восприятия мобильных роботов без построения полной трехмерной модели сцены.

### **Принцип повышения информативности при латеральном смещении камеры**

Частичная окклюзия возникает в ситуации, когда объект интереса и закрывающий объект проецируются на пересекающиеся области изображения. В этом случае один кадр содержит неполное описание объекта, а часть его границы оказывается недоступной для анализа. Ошибка распознавания при этом связана не только с потерей пиксельной информации, но и с нарушением целостного представления формы.

При боковом смещении камеры структура видимости изменяется. Ближний объект смещается в кадре сильнее, чем более удаленный объект интереса. За счет этого фрагменты, закрытые на одном кадре, могут становиться видимыми на другом. Для робототехнической системы такое движение сенсора приобретает прикладное значение: оно позволяет не просто изменить ракурс, а получить дополнительные данные для анализа формы.

В работах по синтезу апертуры данный эффект используется для формирования изображения, сфокусированного на выбранной глубине. Объекты, расположенные вне этой глубины, размываются, а объект интереса становится более различимым [6]. В рассматриваемой задаче важен не только итоговый фотометрический результат, но и возможность накопления видимых фрагментов контура.

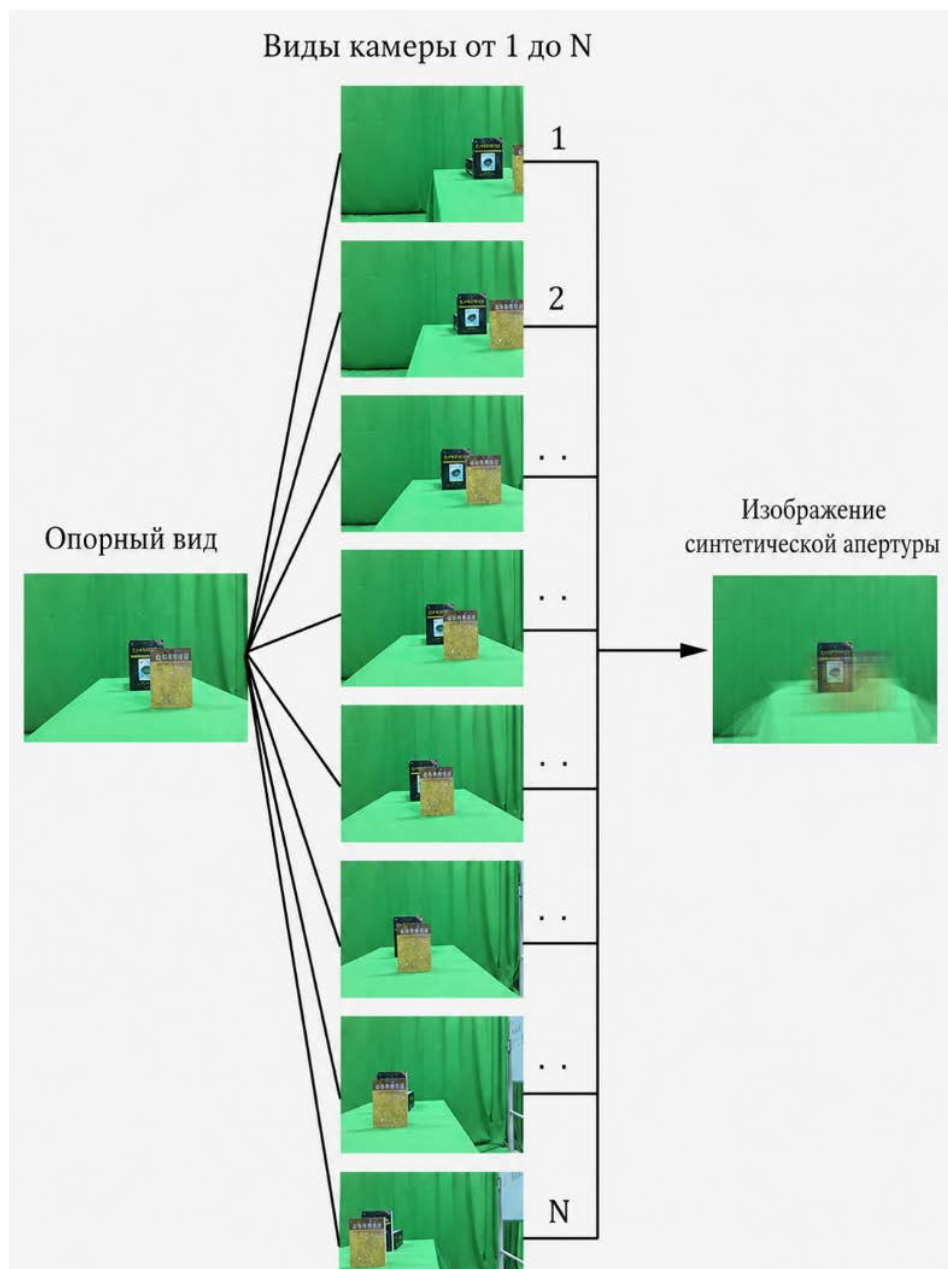


Рис. 1 – Принцип формирования изображения на основе синтезированной апертуры по последовательности наблюдений [6]

Сходная логика применяется в исследованиях активного восприятия, где движение камеры рассматривается как элемент алгоритма анализа сцены, а не как внешнее условие съемки [4;5;7]. Психофизические и робототехнические исследования также показывают, что информация о форме может сохраняться даже при значительном частичном перекрытии объекта, если наблюдатель имеет возможность изменить точку зрения [8;9]. Дополнительно показано, что окклюдирующий контур сам по себе может нести информацию о количественных характеристиках формы объекта [10], а синтез скрытых видов по нескольким наблюдениям может выполняться без обязательного построения полной трехмерной модели сцены [11].

Из этого следует инженерное ограничение: метод применим только тогда, когда перемещение камеры действительно приводит к появлению новых видимых фрагментов объекта. Если объект полностью закрыт на всей траектории наблюдения, синтез апертуры не восстанавливает его форму без привлечения априорной модели.

### **Контурное представление частично скрытого объекта**

После получения последовательности кадров задача может быть сведена не к построению полной трехмерной модели сцены, а к формированию устойчивого контурного описания объекта. Такой выбор обусловлен тем, что границы объекта сохраняют основную информацию о его внешней форме и требуют меньших вычислительных затрат по сравнению с плотной реконструкцией поверхности [2;12].

Обработка выполняется в несколько этапов. Сначала на каждом кадре проводится предварительная фильтрация и выделение границ. Для поиска границ может использоваться детектор Кэнни, а для построения контуров – алгоритмы следования по границе бинарного изображения [2;13]. Далее найденные контуры разбиваются на фрагменты, для которых определяются

локальные признаки: положение, длина, ориентация и характер изменения кривизны.

Следующий этап связан с сопоставлением фрагментов, наблюдаемых на разных кадрах. При небольшом латеральном смещении камеры межкадровое преобразование может быть приближенно описано простой геометрической моделью. Ошибочные соответствия исключаются по величине рассогласования между фрагментами. В результате в общую систему координат объекта переносятся только те участки контура, которые имеют достаточное согласование между несколькими наблюдениями.

Полученное представление не следует трактовать как полное восстановление геометрии объекта. Более корректно говорить о контурной аппроксимации формы. Участки, наблюдавшиеся на нескольких кадрах, обладают большей достоверностью; области, полученные по единичным фрагментам или интерполяции, должны рассматриваться как менее надежные.

Для последующей классификации могут использоваться компактность, эксцентриситет, коэффициент заполнения выпуклой оболочки и инвариантные моментные признаки, позволяющие описывать форму с учетом переноса, масштаба и поворота объекта [14]. Эти признаки сами по себе не устраняют влияние окклюзии. Их информативность возрастает только после того, как фрагменты формы были накоплены с разных положений камеры и приведены к единому представлению. Поэтому устойчивость метода определяется не отдельным дескриптором, а всей процедурой активного наблюдения и объединения контурной информации.

Статистическое распознавание в такой схеме может выполняться стандартными методами классификации образов [15]. При этом для практического применения важно учитывать не только класс объекта, но и степень достоверности восстановленного контура. Если значительная часть формы получена по интерполяции, управляющее решение робота должно рассматриваться как менее надежное.

Для уточнения структуры метода обработку последовательности кадров целесообразно представить как последовательность операций над множеством контурных фрагментов. Пусть  $I_1, I_2, \dots, I_N$  – кадры, полученные при латеральном смещении камеры. Для каждого кадра  $I_i$  после предварительной фильтрации формируется множество контурных фрагментов:

$$G_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}\} \quad (1)$$

где  $g_{ij}$  – отдельный фрагмент границы объекта или фона.

На следующем этапе из этого множества исключаются фрагменты, не удовлетворяющие минимальным требованиям по длине, контрасту и согласованности положения относительно объекта интереса.

Сопоставление фрагментов между кадрами выполняется не по яркостному сходству, а по совокупности геометрических признаков: положению, ориентации, длине и локальной кривизне. Такой выбор обусловлен тем, что при изменении точки наблюдения фотометрические характеристики могут заметно изменяться, тогда как геометрическая структура границы сохраняет более устойчивую связь с формой объекта. Для пары фрагментов вводится величина рассогласования  $E$ , учитывающая различие их положения и ориентации после приведения к общей системе координат. Фрагмент включается в контурную аппроксимацию только в том случае, если величина  $E$  не превышает заданного порога. При этом величина  $E$  может рассматриваться как агрегированная мера, включающая различие координат опорных точек, угла ориентации фрагмента и локальной кривизны после приведения к общей системе координат.

Для описания восстановленной формы могут использоваться компактные дескрипторы. Например, коэффициент компактности определяется как:

$$K = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (2)$$

где  $S$  – площадь области, ограниченной контуром,  $P$  – длина контура.

Данный показатель позволяет отличать компактные формы от вытянутых или фрагментированных. В сочетании с эксцентриситетом, коэффициентом

заполнения выпуклой оболочки и моментными инвариантами он формирует признаковое описание, пригодное для последующей классификации [14]. При этом указанные признаки должны вычисляться не по одному неполному кадру, а по объединенному контурному представлению, иначе влияние окклюзии может привести к искажению результата.

### **Сопоставление с методами трехмерной реконструкции**

Методы трехмерной реконструкции, включая структуру из движения и одновременную локализацию с построением карты, ориентированы на получение пространственной модели сцены. Это делает их полезными для навигации и картографирования, но избыточными в ситуации, когда роботу требуется быстро уточнить форму частично скрытого объекта [16].

Нейросетевые методы анализа структуры сцены, включая современные подходы к восстановлению структуры и движения по видеопоследовательностям, способны обеспечивать высокую точность в сложных условиях [17]. Их ограничение связано с потребностью в вычислительных ресурсах, обучающих данных или предобученных моделях. Для мобильных платформ малого и среднего класса это может быть критичным.

Контурно-апертурный подход занимает более узкую нишу. Он не строит полноценную пространственную модель, но позволяет получить компактное описание формы за счет управляемого изменения точки наблюдения. Его рационально применять тогда, когда задача состоит не в полном восстановлении сцены, а в уточнении признаков частично скрытого объекта.

Таблица 1 – Сопоставление подходов к обработке частично скрытых объектов

<b>Критерий</b>	<b>Плотная трехмерная реконструкция</b>	<b>Нейросетевые методы</b>	<b>Контурно-апертурный подход</b>
Основной результат	Пространственная модель сцены	Оценка структуры сцены, глубины или класса объекта	Контурное описание формы

Вычислительные затраты	Высокие	Средние или высокие	Относительно низкие
Требования к аппаратуре	Производительный процессор или графический ускоритель	Часто требуется графический ускоритель	Возможна реализация на центральном процессоре
Работа с окклюзиями	Окклюзии осложняют сопоставление и триангуляцию	Возможна компенсация при наличии обучающих данных	Используются сменяющиеся видимые фрагменты
Основное ограничение	Избыточность для быстрой классификации	Зависимость от данных и аппаратной базы	Не формирует полную 3D-модель

Из сопоставления следует, что предложенный подход не заменяет трехмерную реконструкцию. Его область применения уже: быстрое получение признаков формы при частичном перекрытии объекта. За счет отказа от построения полной модели сцены снижаются вычислительные затраты, но возрастает зависимость от качества выделения контуров, выбранной траектории камеры и степени фактической видимости объекта.

### **Заключение**

Предложен метод повышения информативности визуального восприятия мобильного робота при частичных окклюзиях. Метод основан на латеральном смещении камеры, при котором различие параллакса между ближним окклюдером и удаленным объектом позволяет наблюдать разные фрагменты скрытого контура.

Описана схема обработки, включающая выделение границ, сопоставление фрагментов на разных кадрах и формирование контурной аппроксимации формы. Такая схема не претендует на полное восстановление геометрии объекта,

но может быть достаточной для задач классификации и уточнения управляющего решения.

Сопоставление с трехмерной реконструкцией и нейросетевыми методами показало, что предложенный подход целесообразен в ограниченной, но практически значимой постановке: когда мобильному роботу требуется быстро уточнить признаки частично скрытого объекта без построения полной модели сцены. Основные ограничения метода связаны с необходимостью контролируемого смещения камеры, выраженности контуров и наличия хотя бы частичной видимости объекта на последовательности кадров.

Предложенный метод следует рассматривать как методическую основу для последующей экспериментальной реализации. Фактическая эффективность метода на следующем этапе должна оцениваться по точности классификации, доле корректно восстановленных контурных фрагментов и времени обработки последовательности кадров.

### **Библиографический список**

1. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — 2nd ed. — Cham : Springer, 2022. — XXII, 925 p. — DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Техносфера, 2012. — 1104 с.
3. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение / пер. с англ.; под ред. С. М. Соколова. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.
4. Bimber O., von Ellenrieder K. D., Haller M. [et al.]. How Robot Dogs See the Unseeable: Improving Visual Interpretability via Peering for Exploratory Robots // arXiv preprint. — 2025. — arXiv:2511.16262. — DOI: 10.48550/arXiv.2511.16262.

5. Hu B., Chang C., Ge J. [et al.]. OA-NBV: Occlusion-Aware Next-Best-View Planning for Human-Centered Active Perception on Mobile Robots // arXiv preprint. — 2026. — arXiv:2603.11072. — DOI: 10.48550/arXiv.2603.11072.
6. Pei Z., Li Y., Ma M., Li J., Leng C., Zhang X., Zhang Y. Occluded-Object 3D Reconstruction Using Camera Array Synthetic Aperture Imaging // Sensors. — 2019. — Vol. 19, No. 3. — Article 607. — DOI: 10.3390/s19030607.
7. Uppal S., Agarwal A., Xiong H., Shaw K., Pathak D. SPIN: Simultaneous Perception, Interaction and Navigation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — Seattle, WA, USA, 2024. — P. 18133–18142. — DOI: 10.1109/CVPR52733.2024.01717.
8. Eby D. W., Loomis J. M. The minimal effect of occlusion on perceived depth from motion parallax // Bulletin of the Psychonomic Society. — 1993. — Vol. 31, No. 4. — P. 253–256. — DOI: 10.3758/BF03334921.
9. Nishikawa A., Maru N., Miyazaki F. Detection of Occluding Contours and Occlusion by Active Binocular Stereo // Experimental Robotics III : The 3rd International Symposium, Kyoto, Japan, October 28–30, 1993 / ed. by T. Yoshikawa, F. Miyazaki. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 1994. — P. 255–266. — Lecture Notes in Control and Information Sciences ; Vol. 200.
10. Qian Y., Elder J. H. What does the Occluding Contour Tell us about Quantitative Shape? // Proceedings of the 20th Conference on Robots and Vision (CRV). — Montreal, QC, Canada, 2023. — P. 55–62. — DOI: 10.1109/CRV60082.2023.00015.
11. Barnum P., Sheikh Y. A., Datta A., Kanade T. Dynamic Seethroughs: Synthesizing Hidden Views of Moving Objects // Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). — Orlando, FL, USA, 2009. — P. 111–114. — DOI: 10.1109/ISMAR.2009.5336483.

12. Steger C., Ulrich M., Wiedemann C. Machine Vision Algorithms and Applications. — 2nd ed. — Weinheim : Wiley-VCH, 2018. — 516 p.
13. Suzuki S., Abe K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. — 1985. — Vol. 30, No. 1. — P. 32–46. — DOI: 10.1016/0734-189X(85)90016-7.
14. Hu M.-K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants // IRE Transactions on Information Theory. — 1962. — Vol. 8, No. 2. — P. 179–187. — DOI: 10.1109/TIT.1962.1057692.
15. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern Classification. — 2nd ed. — New York : Wiley, 2001. — 654 p.
16. Cao M., Zheng L., Jia W., Liu X. Fast incremental structure from motion based on parallel bundle adjustment // Journal of Real-Time Image Processing. — 2021. — Vol. 18. — P. 379–392. — DOI: 10.1007/s11554-020-00970-3.
17. Li Z., Tucker R., Cole F. [et al.]. MegaSaM: Accurate, Fast and Robust Structure and Motion from Casual Dynamic Videos // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — Nashville, TN, USA, 2025. — P. 10486–10496. — DOI: 10.1109/CVPR52734.2025.00981.