

**В. А. Бимаков**, директор, e-mail: robint@mail.ru,  
**Е. В. Бимаков**, руководитель отдела, e-mail: robint@mail.ru,  
ООО "Воксельная техника", г. Ижевск

## Повышение скорости и качества анализа 3D-сцен, сканируемых датчиками автономного робота

*Рассматриваются вопросы построения и функционирования систем компьютерного зрения (СКЗ), предназначенных для использования в системах управления (СУ) сверхадаптивных автономных роботов (АР). Дается определение качества геометрического анализа сцены, выполняемого в СКЗ АР. Приводится обобщенный алгоритм функционирования СКЗ АР, базирующийся на применении сверхскоростной аппаратно-программной технологии обработки сцен (воксельной АПТОС). На примере реализации отдельных процедур этого алгоритма демонстрируются преимущества применения воксельной АПТОС для построения на ее основе СУ сверхадаптивных АР, предназначенных для функционирования в условиях геометрически сложной и геометрически быстроизменяющейся внешней среды.*

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, адаптивность автономных роботов, вычислительные технологии обработки 3D-сцен, геометрические примитивы, геометрические модели 3D-объектов, распознавание 3D-объектов

### 1. Геометрический анализ 3D-сцен, выполняемый в системе компьютерного зрения автономного робота, критерий качества этого анализа

По скорости и адекватности реагирования автономных роботов (АР) на геометрическую форму, габаритные размеры и местоположение 3D-объектов, окружающих АР и наблюдаемых АР визуально, современные АР до сих пор значительно уступают человеку и животным. Это сильно снижает конкурентоспособность современных АР, ограничивает потенциальные возможности их применения, сдерживает уровень автоматизации и рост производительности труда в различных сферах человеческой деятельности.

В АР анализ геометрии 3D-объектов, визуально наблюдаемых АР, возложен на его бортовую систему компьютерного зрения (СКЗ АР). Геометрические анализы, выполняемые СКЗ АР, всегда являются проблемно-ориентированными и направлены, главным образом, не на максимально точное определение истинных геометрических характеристик исследуемых 3D-объектов, а носят узкий потребительский характер. Целью проведения этих анализов яв-

ляется определение того факта, каким образом указанные геометрические характеристики могут помочь (или помешать) выполнить АР конкретную прикладную робототехническую задачу (ПРЗ), стоящую перед АР в данный момент времени (транспортировка груза, выполнение погрузочно-разгрузочных работ, разведка местности, охрана территории, ведение боевых действий и т.п.).

В СКЗ АР источником исходной информации о геометрии содержимого исследуемой 3D-сцены являются дальнедействующие сканирующие датчики (видеодатчики), установленные на борту АР (видеокамеры, лазерные сканеры, стереокамеры, RGBD-датчики,ToF-датчики и т.п.). В процессе функционирования АР эти видеодатчики (один или несколько) сканируют область  $F_S \subset R^3$  исследуемой сцены (где  $R^3$  — трехмерное евклидово пространство). Область  $F_S$  назовем форматом исследуемой 3D-сцены. Объединение точек, принадлежащих всем 3D-объектам, входящих в исследуемую сцену и расположенных внутри  $F_S$ , образует точечное множество  $E_S \subseteq F_S$ , которое собственно и является объектом геометрического исследования (по-другому: анализируемым содержимым  $F_S$ -форматной сцены или

обобщенным геометрическим объектом исследуемой 3D-сцены). Главной особенностью сцен, исследуемых при решении большинства ПРЗ, является сверхвысокая геометрическая сложность  $E_S$  и изменчивость  $E_S$  во времени.

Система управления АР (СУ АР, в состав которого входит СКЗ АР), опираясь на результаты исследования сцены, а также на текущее состояние исполнительных органов АР, принимает управленческое решение (УР), определяющее будущее поведение АР в ближайший промежуток времени и направленное на решение текущей ПРЗ. В зависимости от типа ПРЗ геометрические характеристики  $E_S$  влияют на выбор УР в следующих случаях:

1) когда УР формируется непосредственно по результатам геометрического исследования сцены, включающего: синтез геометрической модели содержимого сцены  $E_S$  (ГМС) и проблемно-ориентированный анализ синтезированной ГМС;

2) когда УР формируется по результатам семантического исследования сцены, включающего: синтез семантической модели исследуемой сцены (СМС) [1], зависящей от результатов геометрического анализа ГМС, а также проблемно-ориентированный семантический анализ синтезированной СМС.

УР, найденное СУ АР, позже реализуется ею физически: путем подачи (в определенном порядке) необходимых управляющих сигналов на исполнительные органы АР (сервоприводы, реле и т.п.). Все эти этапы (синтез и анализ ГМС, синтез и анализ СМС, принятие и физическая реализация УР) должны выполняться СУ АР в течение временного интервала, так называемого периода управляющего цикла АР (УЦ) [2, 3]. При этом действует соглашение: ГМС и СМС, синтезированные в начале УЦ, считаются СУ АР полностью детерминированными и неизменными во времени вплоть до окончания текущего УЦ. Следовательно, для повышения адаптивности АР к изменениям  $E_S$  период УЦ необходимо сокращать. Это соглашение нарушается лишь при возникновении запросов на прерывание, поступающих от близкодействующих датчиков АР (контактных, бесконтактных) и информирующих СУ АР об уже совершившемся факте недопустимого (т.е. не предусмотренного ранее принятым УР) сближения АР с потенциально опасным внешним объектом.

К ПРЗ *первого типа* относятся наиболее простые навигационные задачи АР: поиск безопасного (т.е. без столкновений) маршрута движения АР; распознавание объекта-ориентира по его форме и габаритным размерам.

К ПРЗ *второго типа* относятся более сложные ПРЗ, когда принятие УР требует помимо учета геометрии объектов исследуемой сцены также и учета их негеометрических свойств: цвета и звуков объектов; сложных проблемно-ориентированных функциональных связей между объектами сцены и т.п.).

Определить истинную геометрию  $E_S$  только по результатам одного видеомониторинга исследуемой 3D-сцены, как правило, не удается. Существует бесконечное множество геометрических моделей-гипотез  $E_S$ , не противоречащих полученным видеоданным, но отличающихся своей геометрией и своей прикладной значимостью. К счастью, для решения большинства ПРЗ полного совпадения между истинной  $E_S$  и ее ГМС, участвующей на этапе проблемно-ориентированного геометрического анализа сцены, обычно не требуется. Качество синтеза ГМС и ее проблемно-ориентированного анализа могут считаться удовлетворительными, если УР, принятое СУ АР на основе анализа этой ГМС, удовлетворяет самым минимальным требованиям решаемой ПРЗ.

В работе [4] в качестве универсального метода геометрического анализа синтезированной ГМС предлагается использовать метод виртуального зондирования сцены (метод ВЗС). Суть метода заключается в последовательном виртуальном зондировании (ощупывании) различных участков исследуемой геометрической модели  $E_S$  с помощью геометрической модели зонда (виртуального щупа)  $E_p \subset R^3$ , имеющего известные габаритные размеры, форму и угловое положение. Перед каждым элементарным актом зондирования (ЭАЗ) геометрическая модель зонда  $E_p$  перемещается относительно неподвижной модели  $E_S$  в заданную точку  $F_S$  (точку зондирования). После этого вычисляется функция зондирования (ФЗ), роль аргументов в которой выполняют геометрическая модель  $E_S$  и геометрическая модель перемещенного зонда  $E_p$ . Конкретный вид ФЗ зависит от цели геометрического зондирования  $E_S$  (определение взаимной пересечения геометрических моделей  $E_S$  и  $E_p$ ; вычисление объема области пересечения этих моделей и т.п.). Изменяя местоположение и порядок выполнения ЭАЗ, а также конкретный вид применяемой ФЗ, можно использовать метод ВЗС для решения самых разных ПРЗ: от задач поиска траекторий движения АР до задач распознавания объектов, обладающих заданными габаритными размерами и геометрической формой [4].

К сожалению, эффективность метода ВЗС чрезвычайно сильно зависит от применяемой

вычислительной технологии обработки сцен (ТОС), основными компонентами которой являются: применяемый метод геометрического моделирования; тип применяемого вычислителя; методы обработки применяемых геометрических моделей, базирующиеся на возможностях используемого вычислителя. От выбора конкретной ТОС сильно зависят: скорость перемещения модели зонда  $E_p$  внутри виртуального пространства, скорость извлечения данных о текущем зондируемом участке модели  $E_S$  из памяти вычислителя, а также скорость вычисления значений выбранной ФЗ.

## 2. Различные виды ТОС и перспективы их применения в СКЗ АР

**2.1. Традиционные виды ТОС.** Множество  $E_S$  может иметь бесконечное число вариаций (от  $E_S = \emptyset$  до  $E_S = F_S$ ). Отобразить в памяти СКЗ АР все это бесконечное разнообразие  $E_S$  с помощью конечного числа двоичных накопителей СКЗ АР не представляется возможным. Спасает положение моделирование  $E_S$  с помощью геометрических примитивов (ГП), что неизбежно приводит к снижению точности представления  $E_S$  в СКЗ АР. Выбор базиса ГП (БГП) и способа описания ГП во многом определяют выбор двух других компонентов ТОС: типа вычислителя и методов обработки геометрических моделей посредством данного вычислителя.

Из известных ТОС, применение которых в СКЗ АР считается научно обоснованным, наибольшими отличиями обладают нейросетевые ТОС и аппаратно-программные ТОС (АПТОС). Из-за технической нереализуемости нейронных систем человека и животных эти системы сейчас не могут быть использованы в СКЗ АР. Опыт применения искусственных нейронных сетей для решения задач видеонавигации АР пока нельзя назвать успешным (в лучшем случае применение их можно назвать эффективным лишь при решении весьма узкого круга вспомогательных подзадач, связанных, в основном, с распознаванием плоских проекций 3D-объектов-ориентиров). В связи с этим основное внимание уделим АПТОС, доказавшим на практике возможность их успешного применения в СКЗ АР. В отличие от нейросетей АПТОС позволяют:

- исключить обязательный предварительный этап обучения СКЗ АР;
- математически обосновать принимаемое УР, опираясь как на результаты текущего видеонаблюдения сцены, так и на богатый математический аппарат (веками наработанный

человечеством), а не просто довериться нейросети (ранее обученной пусть в похожих, но все же других внешних условиях).

Сейчас в СКЗ АР применяются следующие традиционные АПТОС [5]:

- АПТОС, базирующиеся на применении универсальных компьютеров (CPU), содержащих одно или несколько (до десятка) вычислительных ядер;
- АПТОС (называемые еще CUDA-технологиями), базирующиеся на применении графических процессоров (GPU), содержащих сотни процессоров и относящихся к многопроцессорным системам конвейерного типа [6, 7].

Все эти традиционные АПТОС объединяет много общего:

- системы команд их программируемых вычислителей (ПВ) оперируют только адресуемыми двоичными числами (или, по-другому, одномерными адресуемыми бинарными изображениями — 1D-АБИ), т.е. их ПВ предназначены для арифметической или булевой обработки только двоичных чисел (1D-АБИ);
- геометрические модели обрабатываемых 2D- и 3D-объектов описываются с помощью числовых переменных (координат точек, коэффициентов уравнений и т.п.) и представлены в памяти ПВ в виде массивов адресуемых байтов, машинных слов и т.п. (т.е. в виде массивов 1D-АБИ);
- методы обработки геометрических моделей в указанных традиционных АПТОС базируются исключительно на арифметической обработке 1D-АБИ (методы аналитической геометрии, линейной алгебры, числовых матричных преобразований, числовой обработки цифровых изображений и т.п.).

Главным и неоспоримым преимуществом традиционных (т.е. числовых) АПТОС является сверхвысокая точность описания и высокая скорость обработки числовых геометрических моделей, "собранных" из относительно небольшого числа традиционных ГП. Именно эти качества традиционных АПТОС сделали их столь успешными при решении задач САПР и компьютерной графики. По этой же причине использование (хотя бы временное) традиционной АПТОС в СУ АР будет безальтернативным, если геометрическая модель распознаваемого проблемно-значимого 3D-объекта (ПЗО), приведенная в исходных условиях решаемой ПРЗ, построена на базе использования традиционных САПР. В противном случае низкая точность распознавания ПЗО может привести к принятию неверных УР.

**2.2. Недостатки применения традиционных АПТОС в СКЗ АР.** Огромным недостатком традиционных АПТОС, с точки зрения их использования в СКЗ сверхадаптивных АР, является недопустимо низкая скорость синтеза и анализа ГМС, поскольку  $E_S$ , характерные для большинства ПРЗ, обладают сверхвысокой геометрической сложностью и непостоянством во времени. Данный недостаток традиционных АПТОС, по мнению авторов, объясняется низкой степенью распараллеливания операций и процедур обработки, наиболее часто используемых при синтезе и анализе сцен (так называемых основных процедур обработки сцен — ОПОС [8, 9]). К ОПОС относятся:

- теоретико-множественные операции над геометрическими моделями;
- анализ геометрических моделей на пересекимость;
- аффинные геометрические преобразования;
- операции вычисления объема (площади) геометрической модели;
- операции по локализации местоположения 3D-модели в пространстве.

Глубокое распараллеливание процесса выполнения ОПОС, участвующих в геометрическом анализе  $E_S$  (например: поворотов и переносов виртуального зонда; вычисление ФЗ и т.п.), способно на несколько порядков сократить время выполнения такого анализа и тем самым многократно повысить адаптивность АР. Степень предельного распараллеливания процедуры выполнения ОПОС с применением выбранной АПТОС удобно оценить минимальным числом тактов, требующимся для выполнения ОПОС с помощью той или иной АПТОС. Максимальное (абсолютное) распараллеливание достигается, если ОПОС выполняется средствами АПТОС за время, сравнимое с одним тактом ПВ.

В традиционных АПТОС при обработке сцен наибольшее применение нашел метод моделирования произвольных 3D-объектов многогранниками [5]. При данном методе моделирования функцию ГП выполняют полупространства, описываемые неравенствами вида  $f \leq 0$ , где  $f = Ax + By + Cz + D$ . "Сборка" всей модели 3D-объекта выполняется с помощью дизъюнкции систем неравенств данного вида. Выполнение аффинных преобразований над объектом-многогранником состоит в вычислении коэффициентов  $A', B', C', D'$  полупространств-образов по значениям коэффициентов  $A, B, C, D$  их полупространств-преобразов согласно формулам

$$\begin{aligned} A' &= a_A A + b_A B + c_A C + d_A D; \\ B' &= a_B A + b_B B + c_B C + d_B D; \\ C' &= a_C A + b_C B + c_C C + d_C D; \\ D' &= a_D A + b_D B + c_D C + d_D D, \end{aligned}$$

где коэффициенты  $a_A, b_A, c_A, d_A, a_B, b_B, c_B, d_B, a_C, b_C, c_C, d_C, a_D, b_D, c_D, d_D$  — числовые константы. Отсюда следует, что выполнение любого аффинного преобразования не может быть осуществлено за время, меньшее, чем время, необходимое для последовательного выполнения одного арифметического умножения, двух арифметических сложений и двух межпроцессорных передач (т.е. за время, значительно большее, чем один такт ПВ).

Процедуры анализа машинных моделей объектов на пересекимость являются процедурами, наиболее часто используемыми при анализе сцен. Пусть необходимо установить пересекимость произвольных объектов  $E_1, \dots, E_k$  между собой. Предположим, что каждый объект  $E_i$  (где  $1 \leq i \leq k$ ) моделируется в ПВ в виде многогранника, описываемого дизъюнкцией неравенств:

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} \leq 0; \\ \vdots \\ A_{iV(i)}x + B_{iV(i)}y + C_{iV(i)}z + D_{iV(i)} \leq 0; \\ \dots \\ A_{iH(i)}x + B_{iH(i)}y + C_{iH(i)}z + D_{iH(i)} \leq 0; \\ \vdots \\ A_{iW(i)}x + B_{iW(i)}y + C_{iW(i)}z + D_{iW(i)} \leq 0. \end{cases}$$

Вычисление значений левой части указанных неравенств приведет к неизбежной депараллелизации процесса анализа многогранников на пересекимость. Отсюда следует, что анализ на пересекимость точки  $(x', y', z')$  с объектом  $E_i$  не может быть выполнен быстрее времени, необходимого для параллельного вычисления значения  $Ax + By + Cz + D$ , т.е. не быстрее времени, затрачиваемого на последовательное выполнение одного арифметического умножения, двух арифметических сложений, двух межпроцессорных передач.

Проведение анализа на пересекимость двух объектов-многогранников требует еще больших затрат машинного времени, чем описанный выше анализ на пересекимость точки и одного многогранника. Действительно, простейший анализ на пересекимость двух выпуклых многогранников заключается в нахождении хотя бы одной грани анализируемого многогранника, плоскость  $Ax + By + Cz + D = 0$ , которой является для анализируемых много-

гранников разделяющей (т.е. когда координаты вершин одного из многогранников удовлетворяют неравенству  $Ax + By + Cz + D < 0$ , а координаты вершин другого — неравенству  $Ax + By + Cz + D > 0$ ). Поскольку исходными элементами описания моделей-многогранников служат неравенства, описывающие примитивы-полупространства, из которых "собраны" анализируемые многогранники, то алгоритм выполнения анализа на пересеканность должен включать в себя два обязательных последовательно выполняемых этапа:

- 1) этап вычисления координат вершин анализируемых многогранников;
- 2) этап поиска разделяющих плоскостей.

Определение координат вершины многогранника осуществляется путем решения системы из трех уравнений, описывающих плоскости трех граней этого многогранника. Отсюда (по правилу Крамера) вычисление координат анализируемых вершин выпуклых многогранников не может быть проведено быстрее времени, необходимого для последовательного выполнения двух умножений, трех сложений, одного деления, четырех межпроцессорных передач. Анализ на пересеканность двух произвольных невыпуклых многогранников основан на анализе на пересеканность выпуклых многогранников, входящих в состав анализируемых невыпуклых многогранников, поэтому достижимая степень распараллеливания здесь будет еще ниже, чем в ранее рассмотренном случае анализа на пересеканность двух произвольных выпуклых многогранников.

Вычисление объема произвольного многогранника заключается в суммировании значений объемов простейших многогранников, из которых составлен данный произвольный многогранник. Простейшим многогранником, входящим в состав любого многогранника, является треугольная пирамида. Объем треугольной пирамиды  $V_{\text{тп}}$ , ребрами которой служат векторы  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ , равен  $V_{\text{тп}} = |\mathbf{abc}|/6$ , где  $|\mathbf{abc}|$  — смешанное произведение векторов  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ . Пусть в правом ортонормированном базисе заданы векторы  $\mathbf{a} = (x_a, y_a, z_a)$ ,  $\mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b)$ ,  $\mathbf{c} = (x_c, y_c, z_c)$ .

Тогда

$$|\mathbf{abc}| = \begin{vmatrix} x_a & y_a & z_a \\ x_b & y_b & z_b \\ x_c & y_c & z_c \end{vmatrix}; V_{\text{тп}} = (x_a(y_b z_c - z_b y_c) - y_a(x_b z_c - z_b x_c) + z_a(x_b y_c - y_b x_c))/6.$$

Следовательно, вычисление объема произвольного многогранника не может быть выполнено быстрее времени, необходимого для последовательного выполнения двух умножений, трех сложений, двух межпроцессорных передач.

Объединение многогранников, их пересечение или разность предполагают выполнение процедур анализа объектов-многогранников на пересеканность (в целях удаления ложных вершин в результирующем многограннике, синтезированном из нескольких многогранников), поэтому степень максимального распараллеливания указанных операций здесь будет не меньше, чем при анализе объектов на пересеканность.

Тем не менее даже эти теоретически низкие возможности традиционных АПТОС по распараллеливанию ОПОС являются часто недостижимыми для современных бортовых процессоров CPU и GPU, применяемых сейчас в СКЗ АР. Другим фактором, снижающим скоростные возможности традиционных АПТОС, является близость тактовой частоты управления современных процессоров CPU и GPU к ее физическому пределу. Дальнейший рост тактовой частоты требует чрезвычайно громоздких и энергозатратных средств охлаждения ПВ, что крайне отрицательно может сказаться на эксплуатационных характеристиках бортовых СКЗ АР (их стоимости, массе, габаритных размерах, энергопотреблении). По этой же причине применение оптических и квантовых аналогов CPU (считающихся на сегодня самыми высокопроизводительными ПВ) в бортовых СКЗ АР (например, в малогабаритных и дешевых БПЛА) не представляется возможным.

**2.3. Воксельная АПТОС и перспективы ее применения в СКЗ высокоадаптивных АР.** На наш взгляд, наиболее перспективной для использования в СКЗ сверхадаптивных АР, является воксельная АПТОС, подробно описанная в работах [2, 3, 8, 9, 10]. Компонентами воксельной АПТОС являются:

1) воксельный вычислитель (ВВ), система команд которого содержит помимо команд обработки 1D-АБИ, также команды обработки 2D-АБИ (формата  $q^3 \times q^3$ ) и команды обработки 3D-АБИ (формата  $q^2 \times q^2 \times q^2$ ), где  $q = 3, 4, 5, \dots$  — целое число (чем выше  $q$ , тем выше степень распараллеливания ОПОС);

2) дискретные 2D- (пиксельные) и 3D- (воксельные) геометрические модели, описываемые с помощью одного или нескольких 2D-АБИ или 3D-АБИ;

3) методы высокопараллельной обработки 2D- и 3D- бинарных, полутоновых и цветных изображений, базирующиеся на преимуществах ВВ по глубокому распараллеливанию ОПСОС.

Для абсолютного распараллеливания процесса выполнения аффинных геометрических преобразований над одноцветным содержимым 2D-АБИ и 3D-АБИ эти преобразования моделируются в ВВ с помощью так называемых дискретизирующих отображений (ДО) [8, 9]. Рекордно высокая скорость выполнения геометрического анализа  $E_S$  средствами воксельной АПТОС достигается за счет абсолютного распараллеливания базового набора ОПСОС над одноцветным содержимым 2D-АБИ или 3D-АБИ аппаратными средствами. Скорость выполнения ОПСОС над воксельной геометрической моделью  $E_S$ , имеющей фиксированное разрешение, в ВВ не зависит от геометрии  $E_S$  и может быть увеличена не только за счет повышения тактовой частоты управления (как в традиционных АПТОС), но и за счет увеличения разрешающей способности 2D-АБИ и 3D-АБИ (даже без средств принудительного охлаждения ВВ).

При воксельной АПТОС роль ГП выполняют взаимно-непересекающиеся воксели-кубики  $1 \times 1 \times 1$  (не содержащие поверхностных точек). Конечно, при одинаковой точности моделирования  $E_S$  воксельная геометрическая модель  $E_S$  будет содержать значительно большее число таких вокселей, чем число ГП (многогранников, фигур второго порядка и др.), описывающих тот же  $E_S$  путем использования традиционной (числовой) АПТОС. Тем не менее, из-за преимуществ воксельной АПТОС по глубокому распараллеливанию ОПСОС скорость обработки воксельных моделей геометрически сложных  $E_S$  средствами воксельной АПТОС может на несколько порядков превышать скорость обработки традиционных (числовых) моделей-аналогов  $E_S$ .

Помимо повышения скорости обработки 2D- и 3D-сцен использование воксельной АПТОС снижает требования к применяемой элементной базе ВВ, уменьшает стоимость, энергопотребление, массу и габаритные размеры СКЗ АР.

### 3. Алгоритм работы СКЗ АР, использующей воксельную АПТОС

Обобщенный алгоритм работы СКЗ АР, базирующийся на применении воксельной АПТОС и позволяющий обеспечить высокую адаптивность АР, включает в себя следующие последовательно выполняемые процедуры [2]:

- 1) обнуление и запуск таймера УЦ АР;
- 2) ввод видеоданных с выходов видеодатчиков АР в память СКЗ АР;
- 3) цифровая фильтрация и сжатие введенных видеоданных;
- 4) синтез (на основе отфильтрованных и сжатых видеоданных) параметрической псевдовоксельной 3D-модели  $E_S$  (ПМС). Для сканирующего дальномера (рис. 1, а) параметрами ПМС являются (рис. 1, б, в): целочисленная

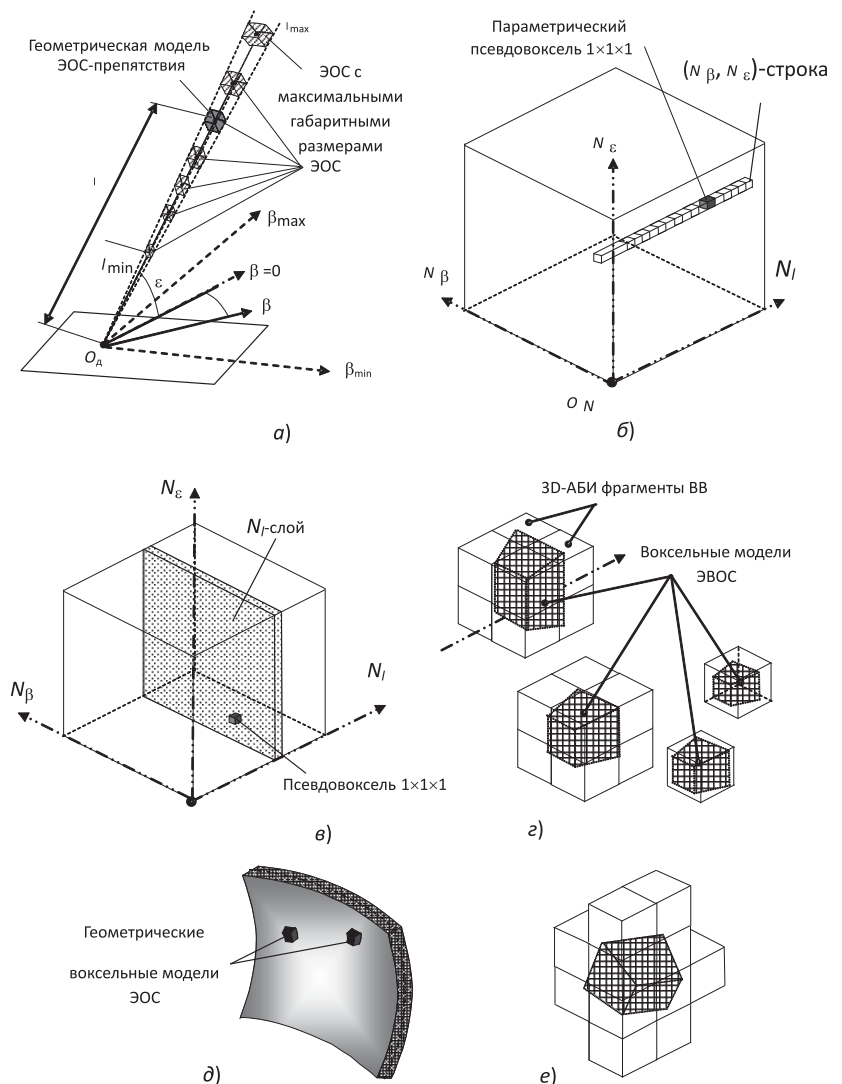


Рис. 1. Синтез воксельной модели сцены по данным сканирующего дальномера

дальность (или номер дальности  $N_\alpha$ ), целочисленный азимут (или номер азимута  $N_\beta$ ), целочисленный угол места (или номер угла места  $N_\gamma$ ). Для стереокамеры (рис. 2, см. вторую сторону обложки) параметрами ПМС являются: номер  $N_3$  эпиполярной строки стереопары; номер  $N_{\text{лев}}$  пикселя в  $N_3$ -й эпиполярной строке левого изображения, номер  $N_{\text{прав}}$  пикселя в  $N_3$ -й эпиполярной строке правого изображения [2];

5) преобразование ПМС в воксельную геометрическую модель  $E_S$  (ВМС);

6) синтез (из ВМС) проблемно-значимых геометрических воксельных моделей-гипотез  $E_S$  (ПЗМГ), не противоречащих видеоданным, но трактующих (интерпретирующих) видимую часть  $E_S$  в особом проблемно-значимом виде. Для каждой такой ( $j$ -й) ПЗМГ вычисляются два ее интегральных параметра:

- точность представления  $E_S$  с помощью  $j$ -й ПЗМГ —  $\Lambda_j$ ;
- прикладная значимость  $j$ -й ПЗМГ с точки зрения решаемой ПРЗ —  $\Psi_j$ ;

7) предварительный отбор самой актуальной ПЗМГ (АМГ), обладающей максимальным значением прикладной значимости  $\Psi$ , из числа ПЗМГ, чьи предварительные значения  $\Lambda$  превысили некоторый порог  $\Lambda_{\text{порог}}$ ;

8) уточнение значения  $\Lambda$  для ранее выбранной АМГ (т.е.  $\Lambda_{\text{АМГ}}$ ) путем:

- увеличения разрешающей способности видеосканирования отдельных проблемно-значимых участков сцены, обнаруженных ранее при анализе АМГ;
- изменения ракурса видеосканирования исследуемой сцены.

При уточнении  $\Lambda_{\text{АМГ}}$  основная решаемая ПРЗ может даже временно заменяться на вспомогательную ПРЗ, выполняемую АР только на момент уточнения  $\Lambda_{\text{АМГ}}$ ;

9) если уточненная  $\Lambda_{\text{АМГ}}$  стала меньше  $\Lambda_{\text{порог}}$ , текущая АМГ исключается из дальнейшего рассмотрения, новым АМГ назначается другая ПЗМГ (из числа ранее найденных), у которой  $\Psi$  имеет наибольшее значение, после чего СКЗ АР переходит к выполнению пункту 8 данного алгоритма;

10) если и уточненная  $\Lambda_{\text{АМГ}}$  не меньше  $\Lambda_{\text{порог}}$  (или у АР отсутствуют средства или время для уточнения  $\Lambda_{\text{АМГ}}$ ), текущая АМГ назначается воксельной геометрической моделью содержимого сцены (ВМС);

11) из ВМС синтезируется геометрическая модель сцены (ГМС), при этом роль ГМС в зависимости от способа (заданного в исходных условиях ПРЗ) автоматического принятия УР (средствами СУ АР) выполняют:

- либо сама ВМС (если период УЦ чрезвычайно короток, а точность ВМС удовлетворяет требованиям решаемой ПРЗ);
- либо традиционная (т.е. числовая) геометрическая модель сцены (ЧМС);

12) из ГМС синтезируется главная анализируемая проблемно-ориентированная модель исследуемой сцены (ГАМС), при этом роль ГАМС выполняют:

- либо сама ГМС (если для принятия УР достаточно проведения геометрического анализа  $E_S$ );
- либо СМС, когда принятие УР помимо геометрического анализа  $E_S$  требует и выполнение семантического анализа содержимого сцены;

13) синтезированная ГАМС анализируется в целях поиска оптимального УР, после чего запускаются программы, физически реализующие найденное УР и действующие до окончания текущего УЦ АР;

14) с окончанием УЦ (по прерыванию от таймера УЦ) СКЗ АР возвращается к пункту 1 данного алгоритма, иницируя новый УЦ АР.

Подробное описание каждой из указанных процедур и описание применяемых в них моделей  $E_S$  приведено в работе [2]. Здесь же отметим лишь главные преимущества данного алгоритма, позволяющие поднять (вплоть до рекордно высоких значений) адаптивность АР и расширить возможности АР.

#### 4. Преимущества СКЗ АР, построенных на базе воксельной АПТОС

**4.1. Возможность сверхскоростного синтеза геометрической модели  $E_S$ .** Исходные данные об исследуемой сцене, получаемые от сканирующих видеодатчиков, уже изначально являются дискретными (из-за природы функционирования этих датчиков). Поэтому ВВ на этапе ввода и фильтрации введенных видеоданных, как минимум, не будут уступать традиционным (числовым) многопроцессорным SIMD-системам (так называемым пре-процессорам), специализирующимся на преобразовании плоских изображений [2]. По той же самой причине вне зависимости от типа применяемого сканирующего датчика (сканирующего дальномера или стереокамеры) скорость синтеза дискретной параметрической модели сцены (ПМС) при использовании воксельной АПТОС тоже, как минимум, не будет уступать традиционным АПТОС [2].

Принципиально важной для СКЗ АР является возможность быстрого преобразования

ПМС в ВМС, когда промежуточная параметрическая модель  $E_S$  преобразуется в геометрическую модель  $E_S$  (представляющую собой, в отличие от ПМС, полноценный геометрический объект, принадлежащий пространству  $R^3$ ). В современных высокоадаптивных СКЗ АР переход от ПМС к ВМС вообще не реализуется из-за чрезвычайно низкой скорости выполнения этого преобразования средствами традиционных АПТОС и из-за крайне высоких требований, предъявляемых к периоду УЦ АР. Поэтому в современных СКЗ АР проблемно-ориентированный геометрический анализ  $E_S$  вынужденно заменяется проблемно-ориентированным параметрическим анализом ПМС, что несомненно приводит к снижению адаптивности АР.

В ПМС каждая элементарная область сканирования (ЭОС) [2, 3] (см. рис. 1, а) представлена в виде псевдовокселя  $v$  (см. рис. 1, б), т.е. трехмерного параметрического дискрета [2, 3]), имеющего яркость:  $\Phi(v) = 1$ , если соответствующая ЭОС объявлена принадлежащей к модели  $E_S$ ;  $\Phi(v) = 0$  — в противном случае. В ВМС каждая ЭОС представлена уже в виде евклидового геометрического 3D-тела (точечного множества), состоящего из объединения одного или нескольких взаимно непересекающихся геометрических вокселей  $1 \times 1 \times 1$  (см. рис. 1, г, д, е). Геометрия воксельной модели каждой ЭОС и ее целочисленные координаты внутри воксельной модели  $F_S$  зависят от многих факторов: от типа применяемого видеодатчика; удаленности данной ЭОС от центра сканирования датчика; углов сканирования этой ЭОС [2, 3]. При использовании воксельной АПТОС сверхвысокая скорость выполнения ОПОС позволяет сверхбыстро преобразовать ПМС в ВМС [2] и выполнять качественный проблемно-ориентированный геометрический анализ  $E_S$  за рекордно малое время (десятые доли секунды и меньше).

**4.2. Возможность сверхскоростного и качественного проблемно-ориентированного анализа геометрической модели  $E_S$ .** Преимущество воксельной АПТОС (по сравнению с традиционными АПТОС) многократно возрастает при проведении проблемно-ориентированного геометрического анализа  $E_S$  благодаря высокой скорости выполнения ОПОС и высокой эффективности многоитерационного метода ВЗС, реализуемого на базе воксельной АПТОС [4]. Поэтому даже несмотря на явные недостатки воксельной АПТОС (низкая точность геометрических воксельных моделей, низкая точность моделирования геометрических преобразований с помощью ДО) для многих ПРЗ

вполне приемлемые УР могут быть получены при использовании только одной воксельной АПТОС.

В то же время существуют ПРЗ, для которых приемлемые УР могут получены только при одновременном использовании и воксельной АПТОС (обладающей высокой степенью распараллеливания ОПОС), и традиционной АПТОС (позволяющей с высокой точностью описывать и обрабатывать простые числовые геометрические 3D-модели-эталон, состоящие из относительно небольшого числа традиционных ГП: полупространств, фигур второго порядка и т.п.). В частности, это относится к ПРЗ, в исходных условиях которых геометрия ПЗО представлена в виде традиционных геометрических 3D-моделей, ранее синтезированных с применением традиционных средств САПР.

**4.3. Возможность высокоскоростного и качественного синтеза семантических моделей исследуемых сцен.** При решении ПРЗ второго типа (см. п. 1) скорость и качество геометрического анализа  $E_S$  влияют на выбор УР не напрямую, а опосредованно: через влияние геометрии на скорость и качество синтезируемой проблемно-ориентированной СМС (проблемно-ориентированный анализ которой, в конечном итоге, и определяет выбор УР). При решении подобных ПРЗ процесс выработки УР очень чувствителен к качеству синтезированной СМС. Из-за этого синтез СМС должен опираться на геометрический анализ не ВМС, непосредственно синтезированной из ПМС, а на анализ ПЗМГ, которые:

- 1) не противоречат данным видеомониторинга сцены (т.е. ПМС и ВМС);
- 2) максимально удовлетворяют требованиям решаемой ПРЗ. Преобразование ВМС в такую ПЗМГ основывается на априорных знаниях о:
  - геометрических характеристиках 3D-объектов (ПЗО), объявленных в условиях ПРЗ проблемно-значимыми и обнаружение которых в  $E_S$  способно кардинально повлиять на выбор будущего поведения АР (через выбор УР);
  - геометрических и физических свойствах среды, окружающей АР;
  - результатах сканирования  $E_S$  видеодатчиками других роботов.

Из-за недостатка у СКЗ АР времени и вычислительных ресурсов число ПЗМГ, автоматически рассматриваемых СКЗ АР при поиске АМГ (самой актуальной из рассматриваемых ПЗМГ), всегда ограничено. Поэтому ПЗМГ, участвующие в отборе АМГ, должны априорно обладать большой прикладной значимостью, учитывающей как число ПЗО, предварительно



обнаруженных СКЗ AP и вошедших в данную ПЗМГ, так и проблемно-значимый вес этих ПЗО (характеризующий степень влияния факта обнаружения данного ПЗО внутри исследуемой ВМС на выбор будущего поведения AP).

Для отбора указанных ПЗМГ исходные условия ПРЗ должны содержать описание всех типов ПЗО решаемой ПРЗ. Описание типа ПЗО должно включать: наименование типа ПЗО; математическое описание геометрической модели ПЗО этого типа; диапазон допустимых координат положения ПЗО в  $F_S$ ; проблемно-значимый вес ПЗО данного типа. Для синтеза каждой ( $j$ -й) ПЗМГ выполняется геометрическое распознавание всех типов ПЗО внутри исследуемой ВМС с одновременным расчетом значений  $\Lambda_j$  и  $\Psi_j$ .

Распознавание ПЗО для повышения его скорости и качества следует осуществлять многоитерационным методом ВЗС, реализуемым на базе воксельной АПТОС [4], например, с применением ракурсных воксельных моделей ПЗО [2, 4] (рис. 3, а, см. третью сторону обложки), выполняющих функцию виртуальных зондов, а роль зондируемой сцены выполняет ВМС (рис. 3, б, в). На нулевой итерации используются предельно грубые воксельные модели всех ПЗО по всему диапазону разрешенных 3D-углов поворота этих ПЗО. Максимальная скорость зондирования достигается в ВВ, когда разрешающая способность воксельной модели зонда совпадает с разрешающей способностью процессорной матрицы  $q^2 \times q^2 \times q^2$  ВВ. В связи с этим на начальном (нулевом) этапе итерации разрешение воксельной модели зонда не должно превышать разрешения  $q^2 \times q^2 \times q^2$ . С каждым последующим этапом зондирования число ПЗО и диапазон возможных их пространственных положений внутри  $F_S$  (допущенных к участию на следующих этапах зондирования) сокращается. Иными словами, целью  $k$ -й итерации является снижение числа ЭАЗ, требующихся для зондирования на ( $k + 1$ )-м этапе итерации с применением воксельных моделей ПЗО более высокого разрешения.

Для каждого ПЗО  $i$ -го типа отмечаются все случаи их обнаружения внутри  $F_S$  (когда вероятность распознавания  $V_{iu} > V_{\text{порог}}$ , где  $u$  — номер обнаруженного ПЗО  $i$ -го типа). Линейные и угловые координаты всех ПЗО  $i$ -го типа внутри воксельной модели  $F_S$  и их значения  $V_{iu}$  запоминаются. Далее строится объектная воксельная геометрическая модель-гипотеза сцены (ОМГ<sub>id</sub>, где  $d$  — номер такой объектной модели-гипотезы), состоящая только из взаимно непересекающихся ПЗО  $i$ -го типа. Затем все

подобные ОМГ, содержащие все опознанные типы ПЗО, характерные для решаемой ПРЗ, накладываются друг на друга и анализируются на пересеканность. По результатам этого наложения отбираются ПЗМГ, обладающие самой высокой проблемной значимостью ( $\Psi$ ) и самой высокой точностью ( $\Lambda$ ) представления видимой части  $E_S$  с помощью каждой из отобранных ПЗМГ. Расчет значений  $\Psi$  и  $\Lambda$  осуществляется средствами ВВ с высокой степенью параллелизации.

## Заключение

Используя в СКЗ AP воксельную АПТОС для выполнения геометрического анализа содержимого 3D-сцен и опираясь на описанный критерий качества такого анализа, можно достичь рекордно высокой адаптивности AP. Это позволит резко поднять уровень автоматизации и производительности труда в различных областях человеческой деятельности за счет расширения функциональных возможностей AP.

## Список литературы

1. 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. С. 72.
2. Бимаков Е. В., Бимаков В. А. Устройство управления высокоадаптивным автономным мобильным роботом/ Патент РФ № 2705049. 2019. Бюл. № 31.
3. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Применение воксельной аппаратно-программной технологии обработки сцен для повышения адаптивности автономных мобильных роботов. Доклад на семинаре "Проблемы управления автономными РК" ИПУ РАН, 19.06.2017. URL: <http://www.ipu.ru/smart>
4. Бимаков Е. В. Метод виртуального зондирования сцены на базе воксельной технологии обработки сцен // Информационные технологии. 2016. № 11. С. 827—835.
5. Kenichi Kanatani, Yasuyuki Sugaya, Yasushi Kanazawa. Guide to 3D Vision Computation: Geometric Analysis and Implementation (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition). 2016. 319 p. URL: <http://www.springer.com/book/9783319484921>.
6. Боресков А. В., Харламов А. А. Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК-Пресс, 2010. 232 с.
7. Hermann A., Drews F. GPU based Voxel-Collision-Detection for Robot Motion Planning // IAS-13. Padova. 2014. URL: <http://www.gpu-voxels.org>.
8. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 12. С. 2—8.
9. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка  $n$ -мерных пиксельных гео-метрических моделей // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 29—36.

## Improving the Speed and Quality of Analysis of 3D-Scenes Scanned by Sensors of an Autonomous Robot

*The issues of construction and functioning of computer vision systems (CVS) intended for use in control systems of super-adaptive autonomous robots (ARCS) are considered. The concept of the quality of the geometric analysis of the scene performed in the CVS of AR is defined. A generalized algorithm for the functioning of the CVS of AR is presented, based on the use of ultra-high-speed hardware-software technology for scene processing (the so-called voxel HSTPS). On the example of the implementation of individual procedures of this algorithm, the advantages of using voxel HSTPS to build super-adaptive ARs based on it based on a geometrically complex and geometrically rapidly changing external environment are demonstrated.*

**Keywords:** computer vision, adaptability of autonomous robots, computing technologies for processing 3D-scenes, geometric primitives, geometric models of 3D-objects, recognition of 3D-objects

DOI: 10.17587/it.26.472-481

### References

1. Kazmin V. N., Noskov V. P. Highlighting geometric and semantic objects in long-range images for navigating robots and reconstructing the external environment, *News of the Southern Federal University. Technical science*, 2015, pp. 71–83 (in Russian).

2. Bimakov E. V., Bimakov V. A. Highly adaptive autonomous mobile robot control device No. 2705049, 2019, Bull. no. 31 (in Russian).

3. Bimakov V. A., Bimakov E. V. Using voxel technology for scene processing to increase the adaptability of autonomous mobile robots, *The report at the seminar "Problems to control the autonomous robotic complexes"*. Institute of Control Sciences RAS, 19.06.2017, available at: <http://www.ipu.ru/smart> (in Russian).

4. Bimakov E. V. Method of virtual probing of scene on base the voxel technology of scene processing, *Informazionnye Tekhnologii*, 2016, no. 11, pp. 827–835 (in Russian).

5. Kenichi Kanatani, Yasuyuki Sugaya, Yasushi Kanazawa. Guide to 3D Vision Computation: Geometric Analysis and Implementation (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition), 2016, 319 p., available at: <http://www.springer.com/book/9783319484921>.

6. Boretkov A. V., Kharlamov A. A. Basics of working with CUDA technology, Moscow, DMK-Press, 2010, 232 p. (in Russian).

7. Hermann A., Drews F. GPU based Voxel-Collision-Detection for Robot Motion Planning, *IAS-13*, Padova, 2014, available at: <http://www.gpu-voxels.org/>.

8. Bimakov V. A. High-speed processing of pixel models for solving tasks of controlling an autonomous robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, Prilozhenie*, 2008, no. 12, pp. 2–8 (in Russian).

9. Bimakov V. A. High-speed processing of geometric models consisting of n-dimensional pixels, *Informazionnye Tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 29–36 (in Russian).

1D-АБИ — Одномерное адресуемое бинарное изображение (двоичное число)

2D-АБИ — Двумерное адресуемое бинарное изображение

3D-АБИ — Трехмерное адресуемое бинарное изображение

АПТОС — Аппаратно-программная технология обработки сцен

АМГ — Актуальная модель-гипотеза содержимого исследуемой сцены

АР — Автономный робот

ВВ — Воксельный вычислитель

ВЗС — Виртуальное зондирование исследуемой сцены

ВМС — Воксельная геометрическая модель содержимого сцены

ГАМС — Главная анализируемая проблемно-ориентированная модель сцены

ГМС — Геометрическая модель содержимого сцены

ГП — Геометрический примитив

ДО — Дискретизирующее отображение, моделирующее геометрическое преобразование

ПВ — Программируемый вычислитель

ПРЗ — Прикладная робототехническая задача, решаемая АР

СКЗ АР — Система компьютерного зрения автономного робота

СМС — Семантическая модель содержимого исследуемой сцены

СУ АР — Система управления автономного робота

ОПОС — Основные операции и процедуры обработки сцен

ПЗМГ — Проблемно-значимая геометрическая модель-гипотеза

ПЗО — Проблемно-значимый объект решаемой ПРЗ

ПМС — Параметрическая модель содержимого исследуемой сцены

ТОС — Технология обработки сцен

УР — Управленческое решение, принимаемое СУ АР и определяющее будущее поведение АР до окончания текущего УЦ АР

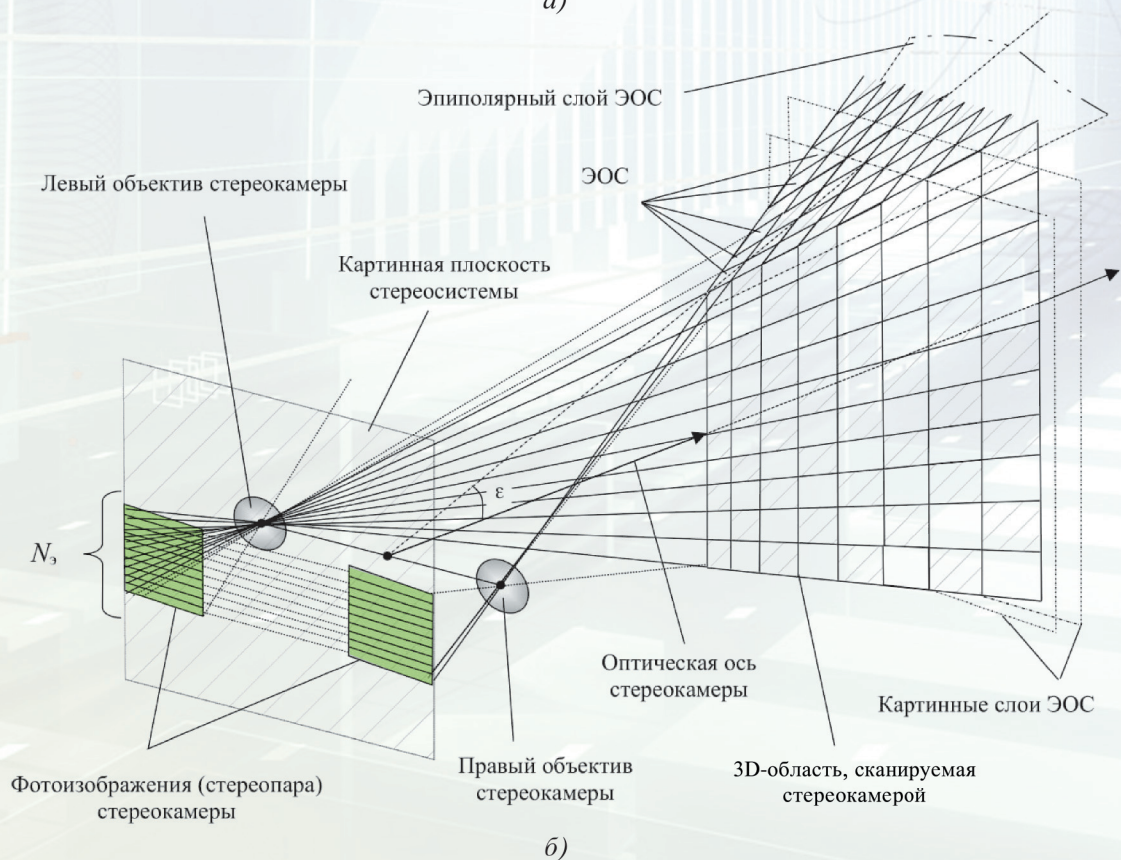
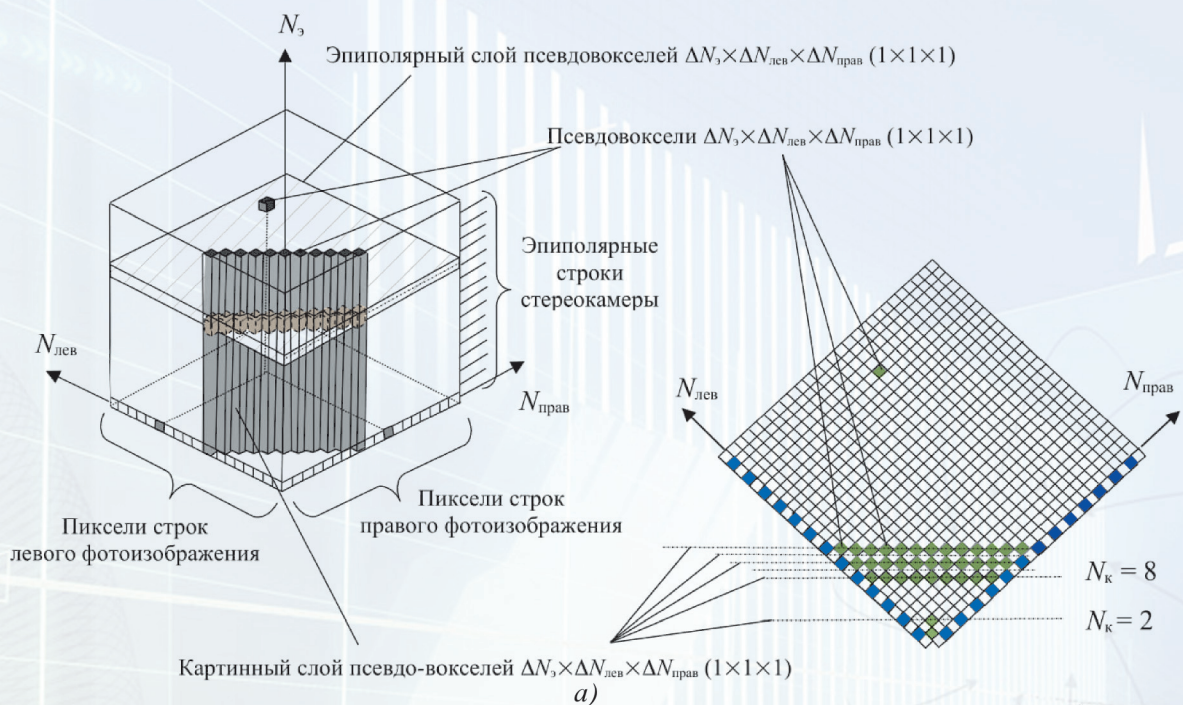
УЦ АР — Управляющий цикл автономного робота

ФЗ — Функция зондирования

ЭАЗ — Элементарный акт зондирования геометрической модели сцены

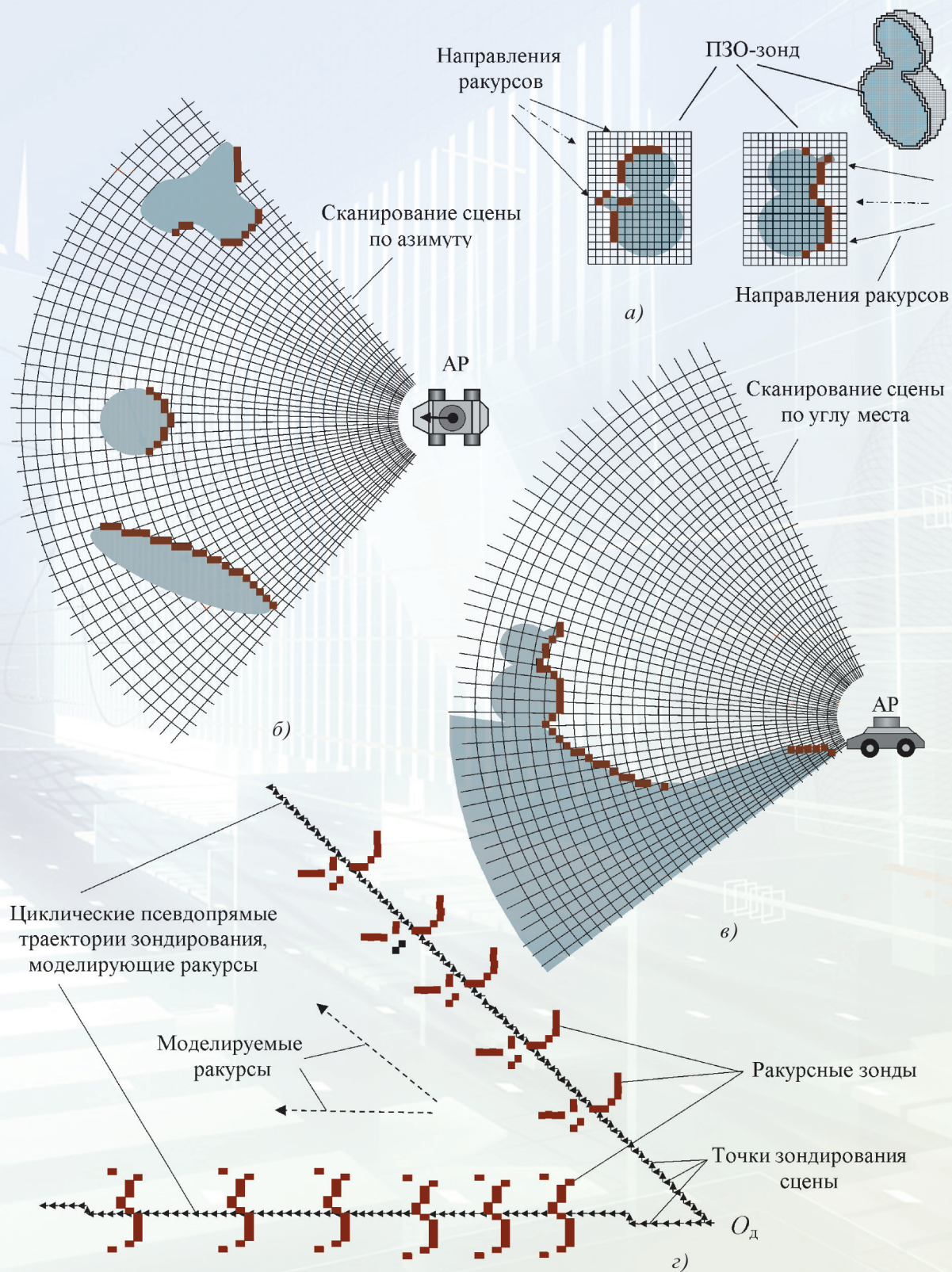
ЭОС — Элементарная область сканирования исследуемой сцены

Рисунок к статье В. А. Бимакова, Е. В. Бимакова  
**«ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ И КАЧЕСТВА АНАЛИЗА 3Д-СЦЕН, СКАНИРУЕМЫХ  
 ДАТЧИКАМИ АВТОНОМНОГО РОБОТА»**



**Рис. 2. Синтез воксельной модели содержимого сцены по данным стереокамеры**

Рисунок к статье В. А. Бимакова, Е. В. Бимакова  
**«ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ И КАЧЕСТВА АНАЛИЗА 3D-СЦЕН, СКАНИРУЕМЫХ ДАТЧИКАМИ АВТОНОМНОГО РОБОТА»**



**Рис. 3. Распознавание ПЗО с применением ракурсных зондов и траекторий зондирования в виде пучка разнонаправленных псевдопрямых**