

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 004.272.26, 004.932.72'1

Е. В. Бимаков, ведущий инженер, robint@mail.ru,
ООО "Воксельная техника", г. Ижевск

Метод виртуального зондирования сцены на базе воксельной технологии обработки сцен

Описан скоростной метод виртуального зондирования сцены на базе специальной воксельной аппаратно-программной технологии обработки сцен, предназначенный для решения задач навигации автономного мобильного робота (автоматический обход препятствий и распознавание 2D- и 3D-объектов в режиме реального времени). Изложена общая концепция метода, обоснован выбор машинных моделей исследуемой сцены и исследовательского зонда, тип применяемого вычислителя для реализации описываемого метода зондирования с предельной степенью параллелизации.

Ключевые слова: обработка сцен и изображений, навигация, автономный наземный робот, обход препятствий, распознавание объектов, воксельные геометрические модели, воксельные вычислители

Введение

Использование физического тела (исследовательского зонда), обладающего известными геометрическими и физическими свойствами, для исследования 3D-сцен хорошо известно. Переход от реального зондирования сцены к виртуальному зондированию сцены (ВЗС) сопровождается заменой реального зонда и реальной зондируемой сцены их виртуальными аналогами. Уже сейчас ВЗС широко применяется для поиска обхода препятствий в компьютерных играх и для управления мобильными роботами [1, 2]. При этом эффективность машинной реализации этого метода определяется, главным образом, скоростью перемещения зонда (геометрической модели робота) в виртуальном пространстве исследуемой сцены, а также скоростью определения факта столкновения виртуального зонда с виртуальными моделями препятствий (т.е. факта пересечения геометрической модели зонда с геометрическими моделями препятствий сцены).

В безлюдных технологиях будущего время анализа сложных реальных сцен автономным мобильным роботом (АМР) должно быть сопоставимо со временем анализа этих сцен человеком (доли секунды) или даже быть меньше. Таких бортовых навигационных видеоанализаторов сейчас нет. Попытки их создания [3–6] на основе существующих программируемых вычислителей натолкнулись на сильнейшую зависимость времени автоматического анализа сцен от их геометрической сложности.

Попытки применения современных искусственных нейронных сетей (т.е. непрограммируемых самообучающихся устройств) [7, 8] для управления АМР внутри сложных реальных сцен крайне далеки от успеха.

В данной работе предлагается метод ВЗС, основанный на применении нового типа программируемых вычислителей, названных нами воксельными вычислителями (ВВ) [9–14]. Для ВВ характерно сочетание преимуществ как нейронных сетей (высокое распараллеливание процесса обработки), так и традиционных программируемых устройств (возможность использования богатого, наработанного годами математического и алгоритмического аппарата).

К настоящему моменту разработана теория проектирования ВВ, базовое программное обеспечение ВВ, методы и алгоритмы его использования, изготовлен и испытан макет ВВ, начаты работы по созданию макета системы управления роботом на базе ВВ [15], которые вследствие отсутствия финансирования приостановлены.

1. Виртуальное зондирование сцены. Основные определения

Определим ряд терминов, используемых в дальнейшем при изложении предлагаемого метода виртуального зондирования сцены.

Определение 1.1. Назовем n -мерной сценой S формула $F_S^{(n)}$ семейство $S = \{E_q\}_{q \in I}$ (где $I = 1, 2, 3, \dots, q_s$)

точечных множеств E_q евклидового пространства R^n , удовлетворяющее выражению:

$$(\forall E_q \in S) [(E_q \subseteq F_S^{(n)}) \wedge (\mu^{(n)}(E_q) \neq 0)],$$

где $\mu^{(n)}(E_q)$ — n -мерная мера множества E_q . Понятие n -мерной меры (n -мерного объема) $\mu^{(n)}(E^{(n)})$ является естественным обобщением понятий: длины $\mu^{(1)}(E^{(1)})$ отрезка $E^{(1)}$ — для R^1 ; площади $\mu^{(2)}(E^{(2)})$ плоской фигуры $E^{(2)}$ — для R^2 ; объема $\mu^{(3)}(E^{(3)})$ трехмерной фигуры $E^{(3)}$ — для R^3 .

С множеством $F_S^{(n)}$ свяжем систему координат исследуемой сцены S , например, декартову систему координат $O_S X_S Y_S Z_S$ (рис. 1, а).

Определение 1.2. Множество $E_q \in S$ назовем q -м объектом n -мерной сцены S .

Определение 1.3. Обобщенным объектом сцены $S = \{E_q\}_{q \in I}$ назовем объединение всех объектов сцены S , т.е. объект $E_S = \bigcup_{q=1}^{q_S} E_q$.

Определение 1.4. Сцену P формата $F_P^{(n)}$ (рис. 1, б), у которой геометрическая форма обобщенного объекта E_P и положение центра O_P системы координат $O_P X_P Y_P Z_P$ удовлетворяют условиям $f(E_P) \subseteq F_P^{(n)} \subset F_S^{(n)}$; $O_P \equiv T_m \in F_S^{(n)}$, где $f(E_P)$ — образ обобщенного объекта E_P при произвольном пространственном повороте f (т.е. биективном отображении $f: R^n \rightarrow R^n$) множества E_P вокруг O_P , назовем сценой P , зондирующей сцену S в точке T .

Определение 1.5. Зондом исследуемой сцены S назовем обобщенный объект E_P сцены P , зондирующей сцену S .

Определение 1.6. Исследуемым (зондируемым) объектом E_S назовем обобщенный объект исследуемой (зондируемой) сцены S .

Определение 1.7. Виртуальным зондированием n -мерной сцены S назовем вычислительную процедуру, заключающуюся в последовательном выполнении одного или нескольких элементарных актов зондирования (ЭАЗ). Каждый m -й ЭАЗ (где m — номер текущего акта зондирования) состоит в общем случае из трех последовательно выполняемых операций:

- 1) поворота f_m зонда E_P вокруг центра O_P формата $F_P^{(n)}$ зондирующей сцены P (рис. 1, б) на m -й n -мерный пространственный угол ($E_P \rightarrow f_m(E_P)$);
- 2) параллельного переноса c_m зонда $f_m(E_P)$ и F_P (т.е. зондирующей сцены) внутрь зондируемой сцены S ($f_m(E_P) \rightarrow c_m(f_m(E_P))$, $F_P^{(n)} \rightarrow c_m(F_P^{(n)})$) в точку m -го центра зондирования ($T_m \in F_S^{(n)}$) так, чтобы центр $c_m(O_P)$ зонда $c_m(f_m(E_P))$ совпал с точкой T_m формата $F_S^{(n)}$ исследуемой сцены S (рис. 1, з). После выполнения переноса будет установлено взаимнооднозначное соответствие между точками форматов $c_m(F_P^{(n)})$ и $F_S^{(n)}$ (а также между точками $c_m(f_m(E_P))$ и E_S), имеющими одинаковые значения координат в системе $O_S X_S Y_S Z_S$;

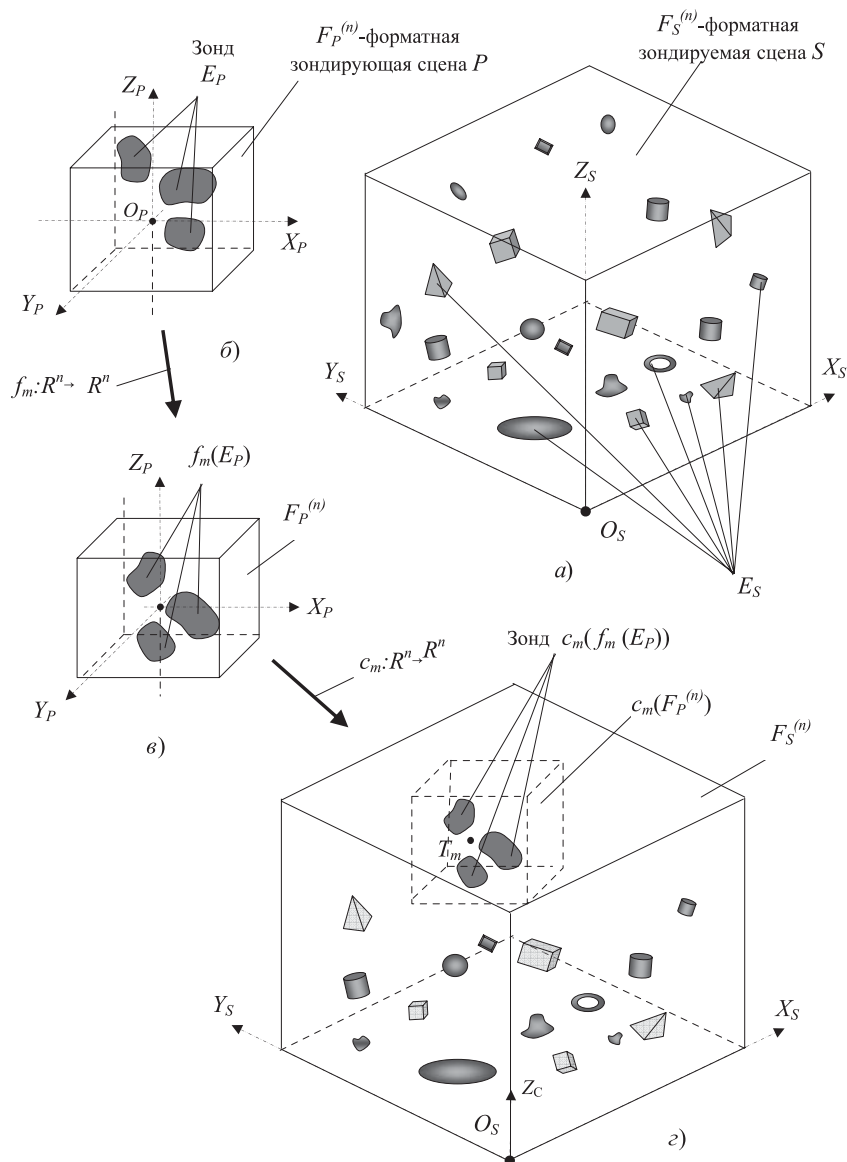


Рис. 1. Виртуальное зондирование сцены S зондирующей сценой P

3) определения значения функции зондирования $F_m(c_m(f_m(E_P)), F_S^{(n)})$ между точками зонда $c_m(f_m(E_P))$ и точками $F_S^{(n)}$ исследуемой сцены S , соответствующими точкам зонда $c_m(f_m(E_P))$.

Физический смысл виртуального зонда E_P , виртуальной сцены S и точечного множества $G \subset F_S^{(n)}$, образованного центрами зондирования сцены S , определяется характером решаемой прикладной задачи. Так, применительно к задачам поиска обхода препятствий E_P может выступать в качестве геометрической модели АМР, а объект E_S — в качестве геометрической модели обобщенного объекта-препятствия сцены S , который предстоит обойти АМР. Множество G (траектория зондирования) в этом случае — непрерывная 3D-линия, воспроизводящая, в частности, траекторию движения АМР, у которой соседние центры зондирования бесконечно близко расположены друг к другу. При решении задач обхода препятствий каждый ЭАЗ служит для выявления факта пересечения (т.е. столкновения) зонда $c_m(f_m(E_P))$ с препятствием E_S . Для этого в каждом m -м ЭАЗ выполняется теоретико-множественная операция $M_m = c_m(f_m(E_P)) \cap E_S$, после чего определяется значение функции зондирования — предиката " $M_m = \emptyset$ ". Если значение предиката равняется лог. 1, зонд $c_m(f_m(E_P))$ и объект-препятствие E_S объявляются виртуально нестолкнувшимися, в противном случае (лог. 0) — зонд $c_m(f_m(E_P))$ и препятствие E_S сцены объявляются виртуально столкнувшимися.

При решении задач распознавания виртуальный зонд E_P выступает уже в качестве n -мерного геометрического эталона распознаваемого объекта. Исследуемая $F_S^{(n)}$ -форматная сцена выступает в роли n -мерного изображения-препарата, внутри которого ищется заданный распознаваемый n -мерный объект. Виртуальное зондирование служит в этом случае для выявления факта наличия (или отсутствия) совпадения определенных геометрических свойств эталона с содержимым анализируемой сцены, а также для определения местоположения обнаруженного совпадения на исследуемой сцене. В идеале область G здесь также состоит из бесконечного числа центров зондирования, хотя порядок зондирования в данном случае несущественен. Функция зондирования, по значению которой определяется факт совпадения геометрических характеристик зонда и сцены, вычисляется здесь более сложно, чем при решении задачи обхода препятствий, и не ограничивается лишь анализом $c_m(f_m(E_P))$ и E_S на их пересекательность (в данной статье этот аспект подробно не рассматривается).

2. Машинная реализация виртуального зондирования сцены

Вышеописанная процедура ВЗС — это всего лишь идеальная версия данной процедуры, оперирующая бесконечными точечными множествами пространства R^n , в которой виртуальный зонд перемещается по непрерывной траектории зондирования, состоящей из бесконечного числа центров зондирования. Эта идеальная версия ВЗС дает самое общее (концептуальное) представление о процедуре виртуального зондирования сцены, но она не предназначена для машинной реализации. Для выполнения ВЗС с помощью программируемого устройства цифровой обработки (УЦО) идеальная версия ВЗС должна быть модифицирована следующим образом:

- точечные множества E_S и E_P должны быть представлены в УЦО в виде упорядоченного массива адресуемых информационных единиц памяти УЦО;
 - бесконечное множество G центров зондирования заменено дискретной траекторией зондирования (ДТЗ), состоящей из конечного числа центров зондирования ($T_0, T_1, T_2, \dots, T_m, T_{m+1}, \dots, T_k$).
- Переход от идеальной версии ВЗС к машинной версии ВЗС неизбежно приведет к потере точности результата зондирования сцены. Существенное влияние на эту погрешность зондирования окажет выбор способа машинного моделирования содержимого исследуемой сцены (E_S).

Предлагаемая машинная версия ВЗС использует новую аппаратно-программную технологию обработки сцен (АПТОС), опирающуюся на применение:

- специальных воксельных вычислителей (ВВ);
- дискретных (пиксельных и воксельных) геометрических моделей, представленных в ВВ в виде адресуемых 2D- и 3D-бинарных изображений низкого разрешения;
- высокопараллельных методов обработки 2D- и 3D-изображений среднего и высокого разрешения, ориентированных на возможности ВВ.

3. Воксельная n -мерная модель содержимого исследуемой сцены

После проведения АМР видеомониторинга сцены, окружающей АМР, форма E_S может иметь бесконечное число вариаций (от совершенно пустого пространства сцены, когда $E_S = \emptyset$, до ее полного заполнения, когда $E_S = F_S^{(n)}$). Отобразить в памяти УЦО робота все это бесконечное разнообразие форм содержимого сцены, окружающей робота, посредством конечного числа двоичных накопителей УЦО можно только за счет снижения точности представления формы E_S в УЦО. Например, когда каждая точка E_S будет представлена в машинной модели E_S не одной точкой, а целым ограничен-

ным односвязным бесконечным множеством точек R^n — nD -дискретом.

Разобьем пространство R^n на классы точечных множеств $v_l^{(n)} \subset R^n$ (где $l \in L, L = 1, 2, \dots, \infty$), для которых одновременно справедливы выражения

$$(\forall l \in L) (\forall a, b \in v_l^{(n)}) [\rho(a, b) \leq \xi_p],$$

где $\rho(a, b)$ — расстояние между точками a и b множества $v_l^{(n)}$, ξ_p — постоянная, и

$$\begin{aligned} & (\forall l \in L) [\mu^{(n)}(v_l^{(n)}) \neq 0]; (\forall i, j \in L) [(i \neq j) \Rightarrow \\ & \Rightarrow (v_i^{(n)} \cap v_j^{(n)} = \emptyset)]; \bigcup_{l \in L} v_l^{(n)} = R^n. \end{aligned}$$

Определение 3.1. Множества $v_l^{(n)} \subset R^n$, одновременно удовлетворяющие всем перечисленным требованиям, назовем *n -мерными вокселями $v^{(n)}$ -воксельного разбиения R^n* (или *$v^{(n)}$ -вокселями*), а ξ_p — постоянной этого разбиения. Двумерные воксели будем называть пикселями.

Определение 3.2. Точечное множество $\bigcup_{l \in L_k} v_l^{(n)}$, составленное из конечного ($L_k \subset L$) числа вокселей $v_l^{(n)}$, назовем *$v^{(n)}$ -воксельным объектом*.

Определение 3.3. $v^{(n)}$ -воксельной моделью множества $\dot{E} \subset R^n$ назовем $v^{(n)}$ -воксельный объект $E = \bigcup_{l \in L_E} v_l^{(n)}$ (где $L_E \subset L$), составленный из всех вокселей $v_l^{(n)}$, для которых выполняется: $(\forall l \in L_E) [\mu^{(n)}(\dot{E} \cap v_l^{(n)}) / \mu^{(n)}(v_l^{(n)}) \geq \delta_l]$, где δ_l — постоянная ($0 < \delta_l \leq 1$). Двумерные воксельные модели будем называть пиксельными моделями.

Наглядно $v^{(n)}$ -воксельную модель E_S исследуемой сцены S можно представить в виде физической "песочной" модели, образованной из отдельных кусков-фрагментов, состоящих либо из одной "песчинки" (аналога $v^{(n)}$ -вокселя), либо из множества таких "песчинок", склеенных между собой и расположенных внутри "песчицы" $F_S^{(n)}$. Максимально возможный "объем песка" в $F_S^{(n)}$, из которого строится $v^{(n)}$ -воксельная модель E_S , характеризуется максимальным объемом памяти УЦО, отведенный для хранения самых геометрически сложных $v^{(n)}$ -воксельных моделей E_S . За критерий степени сложности геометрической формы $v^{(n)}$ -воксельной модели можно принять число *поверхностных* вокселей $v_l^{(n)}$ этой модели (т.е. вокселей, которые сами принадлежат данной модели, а их соседние воксели

в $v^{(n)}$ -воксельной модели $F_S^{(n)}$ не принадлежат). Другими словами, чем более развита внешняя поверхность $v^{(n)}$ -воксельной модели, тем геометрическая форма данной $v^{(n)}$ -воксельной модели E_S будет более сложной. У воксельных моделей E_S со сложной геометрической формой число вокселей равняется примерно половине вокселей $v^{(n)}$ -воксельной модели $F_S^{(n)}$.

Для ускорения машинной реализации процедуры зондирования $v^{(n)}$ -воксельной модели содержимого сцены S примем следующие упрощения:

а) все $v^{(n)}$ -воксели $v^{(n)}$ -воксельных моделей содержимого сцен P и S будут иметь одинаковую геометрическую форму, одинаковую угловую ориентацию в R^n и центр, расположенный внутри каждого $v^{(n)}$ -вокселя одинаковым образом;

б) центры всех $v^{(n)}$ -вокселей воксельных моделей P и S расположим в узлах регулярной n -мерной решетки с шагом d ;

в) переносы зондирующей сцены P и зондируемой сцены S будем выполнять только кратными d ;

г) $v^{(n)}$ -воксель зондирующей сцены P и $v^{(n)}$ -воксель зондируемой сцены S будем считать взаимно пересекающимися, если их центры совпадают;

д) поворот ($f: R^n \rightarrow R^n$) $v^{(n)}$ -вокселя модели E_P на произвольный пространственный угол будем моделировать путем последовательного выполнения: 1) поворота $v_P^{(n)} \rightarrow f(v_P^{(n)})$; 2) выделения на неподвижной сцене $v^{(n)}$ -воксельной модели $F_S^{(n)}$ тех ее $v^{(n)}$ -вокселей, $\mu^{(n)}$ -мерная мера области пересечения которых с $f(v_P^{(n)})$ не меньше некоторого заданного значения σ .

Машинное описание $v^{(n)}$ -воксельной модели E_S (или E_P) будем осуществлять с помощью N_S (N_P) бит памяти УЦО, где N_S (N_P) — число вокселей в $v^{(n)}$ -воксельной модели $F_S^{(n)}$ ($F_P^{(n)}$). При совпадении центра вокселя описываемой модели E_S с i -м центром вокселя $F_S^{(n)}$ i -й бит N_S -разрядного двоичного слова будет равен 1, при несовпадении — 0.

4. Факторы, влияющие на скорость виртуального зондирования сцены

В мобильных робототехнических приложениях время выполнения анализа сцены является чрезвычайно критичным параметром, часто превышающим по своей значимости даже точность выполненного анализа (в отличие, например, от задач САПР).

Скорость выполнения ВЗС в УЦО зависит от многих факторов:

- 1) точности применяемых геометрических моделей E_S и E_P ;
- 2) числа центров зондирования;
- 3) времени машинного выполнения каждого ЭАЗ;
- 4) скорости преобразования модели содержимого сцены из одной системы координат в другую;

5) правильного выбора тактики поиска разведывательных перемещений виртуального зонда внутри зондируемой сцены.

Снижение точности $v^{(n)}$ -воксельных моделей E_S и E_p сокращает время выполнения ВЗС, но увеличивает погрешность найденных решений. Для повышения эффективности зондирования сцены целесообразно использовать многоэтапный алгоритм выполнения ВЗС, когда на начальных этапах ищутся только самые быстрые и грубые решения с использованием $v^{(n)}$ -воксельных моделей низкой точности и небольшим числом центров зондирования. Найденные траектории АМР затем уточняются путем их повторного зондирования с применением уже более точных машинных моделей E_S , E_p и G .

У АМР бортовая система технического зрения (СТЗ) имеет ограниченный видеобзор. Поэтому 3D-сцена, сформированная АМР по результатам одного видеомониторинга, в общем случае не может охватить всю территорию маршрута АМР от старта до финиша. В этой связи 3D-модель области, охватывающей весь маршрут движения АМР, может быть сформирована только путем объединения $v^{(n)}$ -воксельных моделей E_S , синтезированных по результатам нескольких видеомониторингов, выполненных бортовой СТЗ из разных положений АМР на маршруте. Для построения единой 3D-карты всей области маршрута содержимое всех исходных сцен должно быть преобразовано из систем координат отдельных сцен в единую абсолютную систему координат всего маршрута АМР.

Неправильный выбор тактики перемещения виртуального зонда внутри исследуемой сцены может привести не только к неоправданному увеличению времени поиска решения, но даже к невозможности решения задачи в принципе.

5. Распараллеливание процедуры зондирования сцены

Повысить скорость выполнения ВЗС можно следующим путем:

- 1) повышением тактовой частоты управления;
- 2) распараллеливанием процедур обработки, наиболее часто используемых при выполнении ВЗС (геометрических преобразований поворота и переноса, теоретико-множественных операций, анализа объектов на пересекаемость и др.).

Рассмотрим подробно второй путь увеличения скорости выполнения ВЗС.

При обработке сцены функцию операндов выполняют геометрические модели объектов сцены. Описание моделей зонда и сцены, хранящееся в памяти УЦО и участвующее в ВЗС, состоит из отдельных компонентов. Обработка этих компонентов может осуществляться в УЦО одновременно и независимо друг от друга, т.е. параллельным обра-

зом. В устройстве цифровой обработки, использующем двоичную систему счисления, самыми низшими структурными компонентами описания сцены являются биты. Глубина распараллеливания ВЗС определяется числом одновременно обрабатываемых компонентов описания: чем выше их число, тем глубже степень распараллеливания ВЗС. Поскольку число простых компонентов геометрического описания всегда превышает число сложных компонентов, то в УЦО наивысшая степень распараллеливания ВЗС может быть достигнута только на уровне битовых элементов описания геометрических моделей E_S и E_p .

В УЦО $v^{(n)}$ -воксельные модели могут храниться и обрабатываться только в виде отдельных адресуемых двоичных фрагментов (например, адресуемых фрагментов зондируемой сцены (АФС) и адресуемых фрагментов зондирующей сцены (АФЗ)), роль которых могут выполнять:

- адресуемый бит;
- адресуемое двоичное слово (по-другому — одномерное бинарное изображение — 1D-БИ);
- 2D-бинарное изображение (2D-БИ);
- 3D-бинарное изображение (3D-БИ).

Установим между пространственным положением $v^{(n)}$ -вокселя $v^{(n)}$ -воксельной модели формата обрабатываемой сцены и адресом адресуемого фрагмента, где этот $v^{(n)}$ -воксель хранится в памяти УЦО, взаимно однозначное соответствие. Установление такого соответствия упорядочит биты, описывающие $v^{(n)}$ -воксельные модели зонда и исследуемой сцены в RAM-памяти (т.е. памяти с произвольной выборкой) УЦО. Это ускорит алгоритмы ВЗС, поскольку они будут в этом случае напоминать алгоритмы сортировки.

6. Реализация ВЗС в УЦО с различным типом RAM-адресации

При ВЗС наиболее часто выполняемой процедурой является ЭАЗ, поэтому время выполнения ЭАЗ оказывает решающее влияние на скорость выполнения ВЗС. В свою очередь, вследствие хранения $v^{(n)}$ -воксельных моделей зонда и зондируемой сцены в УЦО в виде адресуемых фрагментов каждый ЭАЗ разбивается на множество элементарных актов микрозондирования (ЭАМЗ), где в качестве микрозонда выступает текущий АФЗ $v^{(n)}$ -воксельной модели E_p , а исследуемыми участками микрозондирования являются АФС $v^{(n)}$ -воксельной модели E_S , которые пересекают текущий микрозонд. При этом каждый ЭАМЗ представляет собой последовательность следующих элементарных операций:

- 1) расчет адреса текущего микрозонда в памяти УЦО;
- 2) чтение текущего микрозонда из RAM-памяти УЦО в блок анализа микрозондирования (БАМЗ) УЦО в качестве 1-го операнда;

3) расчет адресов АФС, биты которых пересекают текущий микрозонд, по текущему координатному положению микрозонда внутри сцены;

4) чтения всех АФС, биты которых пересекают текущий микрозонд;

5) сборка 2-го операнда для БАМЗ из всех прочитанных АФС;

6) проведение анализа на пересекаемость 1-го и 2-го операндов в БАМЗ.

Если хотя бы в одном ЭАМЗ будет обнаружено пересечение, то пересечение сцены с зондом объявляется выявленным.

Наибольшая степень распараллеливания ВЗС достигается в случае увеличения разрядности двоичных фрагментов АФС и АФЗ. Кроме того, для повышения скорости выполнения ЭАМЗ желательно, чтобы в УЦО размерность операндов БАМЗ совпадала с размерностью n зондируемых сцен S , а разрядность АБИ была предельно большой, с точки зрения применяемой микроэлектронной технологической нормы.

Важно отметить, что реализация пространственных поворотов $v^{(n)}$ -воксельных моделей E_p и E_S с помощью традиционных УЦО (где адресуемыми фрагментами являются 1D-БИ) уменьшает скорость поворотов и приводит к разупорядочиванию описания $v^{(n)}$ -вокселей в RAM-памяти УЦО, что дополнительно увеличивает затраты машинного времени на выполнение ВЗС. Для предотвращения этого наиболее оптимальным является применение ВВ.

7. Отличительные признаки и особенности функционирования воксельного вычислителя

Дискретный метод геометрического моделирования имеет исключительные преимущества по глубокому распараллеливанию следующих основных процедур обработки сцен (ОПОС) [9]:

— теоретико-множественных операций над геометрическими моделями;

— анализа геометрических моделей на пересекаемость;

— геометрических преобразований (поворот, перенос, сжатие и др.);

— операций вычисления объема (площади) воксельной (пиксельной) модели;

— определения положения геометрической модели в пространстве.

В полной мере реализовать эти преимущества позволяют специализированные вычислительные устройства, так называемые устройства параллельной обработки n -мерных пиксельных моделей [9—12]. Воксельный вычислитель представляет собой частный случай такого устройства и предназначен для параллельной обработки 2D (пиксельных) и 3D (воксельных) дискретных геометрических моделей. В воксельном вычислителе под пикселем понимается квадратик 1×1 , под вокселем —

кубик $1 \times 1 \times 1$. Отличительные признаки воксельного вычислителя:

1) роль адресуемых информационных единиц в них выполняют:

— традиционные двоичные переменные (1D-АБИ);

— двумерные адресуемые бинарные изображения (2D-АБИ) формата $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$;

— трехмерные бинарные изображения (3D-АБИ) формата $A \times A \times A$ (где $A = q^2$, $q \geq 2$ — число целое);

2) в его состав помимо обычного арифметико-логического узла (АЛУ), предназначенного для обработки 1D-АБИ, входят также аппаратные средства, позволяющие выполнять все перечисленные выше ОПОС над 2D-АБИ и 3D-АБИ за время, сравнимое с элементарным тактом управления блока управления ВВ;

3) выполнение геометрических преобразований заменено выполнением так называемых дискретизирующих отображений [9, 10] над пиксельными и воксельными моделями;

4) система команд ВВ помимо традиционных арифметико-логических команд, используемых для обработки 1D-АБИ, содержит набор команд, оперирующих 2D-АБИ и 3D-АБИ, каждая из таких команд реализует одну ОПОС над одноцветным содержимым АБИ, этот набор является *функционально полным*, позволяющим выполнять весь цикл обработки сцены на основе применения только пиксельных и воксельных моделей.

8. Сверхоперативное хранение воксельных и пиксельных моделей в ВВ

Предельно высокая степень распараллеливания процедуры обработки сцены (т.е. выполнение процедуры за время, сравнимое с тактом ВВ) достигается, если разрешение АБИ будет, как минимум, не меньше разрешения обрабатываемой воксельной модели сцены. К сожалению, существующие микроэлектронные технологии не позволяют создавать процессорные матрицы ВВ с разрешением, сопоставимым с разрешением реальных обрабатываемых 2D- и 3D-сцен. В этой связи обработка сцен среднего и высокого разрешения в ВВ может осуществляться только предельно крупными фрагментами формата $A \times A \times A$ или $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$ и выполняемых последовательно — фрагмент за фрагментом. Сама сцена или ее части представляются в ВВ в виде бинарных составных 2D- и 3D-изображений (БСИ), состоящих из 2D-АБИ и 3D-АБИ.

Если форматы АБИ-фрагментов и положение вокселей в них жестко определены еще на этапе проектирования ВВ, то формат БСИ, положение и ориентация АБИ-фрагментов в этом БСИ требуют дополнительного описания в программе обработки содержимого БСИ. При этом пространственное положение каждого АБИ-фрагмента $A \times A \times A$ внутри описываемого БСИ должно быть строго увязано с адресом этого АБИ-фрагмента (СПИ-ад-

ресом) в сверхоперативной памяти изображений ВВ (т.е. RAM-памяти УЦО). На рис. 2 показан вариант пространственной интерпретации содержимого участка СПИ, состоящей из $M_x \cdot M_y \cdot M_z = 729$ АБИ-фрагментов $A \times A \times A$ одного БСИ, размещенных в 729 последовательных адресах СПИ. Как следует из рисунка, одноцветное содержимое всех указанных АБИ-фрагментов образует единую воксельную модель с разрешением, не превышающим $M_x \times M_y \times M_z$, в котором каждый АБИ-фрагмент имеет строго определенное пространственное положение.

9. Анализ на пересекаемость двух БСИ средствами воксельного вычислителя

Рассмотрим способ реализации в ВВ процедуры анализа на пересекаемость содержимого двух БСИ с форматами $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$ и $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ соответственно, где $K_y < M_y$, $K_x < M_x$, $K_z < M_z$ (рис. 3, а).

Единичное содержимое БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ может быть интерпретировано как воксельная модель зонда (ВМЗ). Единичное содержимое БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$ может быть интерпретировано как воксельная модель содержимого исследуемой сцены (ВМС). Повороты и переносы ВМЗ моделируются в ВВ путем выполнения соответствующих дискретизирующих отображений (ДО) над содержимым БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ [9, 10]. Параллельный перенос ВМЗ внутри ВМС моделируется путем переноса БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ относительно БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$ следующим образом.

Каждый i -й АБИ-фрагмент $A \times A \times A$ (АБИ i) переносимого БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ (где $0 \leq i \leq (K_x \cdot K_y \cdot K_z - 1)$) пересекает, в общем случае, восемь соседних АБИ-фрагментов, принадлежащих БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$. Эти восемь АБИ-фрагментов отсекают от АБИ i восемь областей: $Gi0...Gi7$ соответственно (рис. 3, б). Анализ на пересекаемость содержимого БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ и содержимого БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$ состоит в выполнении восьми $\cdot K_x \cdot K_y \cdot K_z$ теоретико-множественных операций "пересечение" над содержимым $Gi0...Gi7$ всех $K_x \cdot K_y \cdot K_z$ АБИ-фрагментов $A \times A \times A$ БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ с содержимым соответствующего АБИ-фрагмента БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$. Если результатом хотя бы одной из этих операций будет не пустое единичное

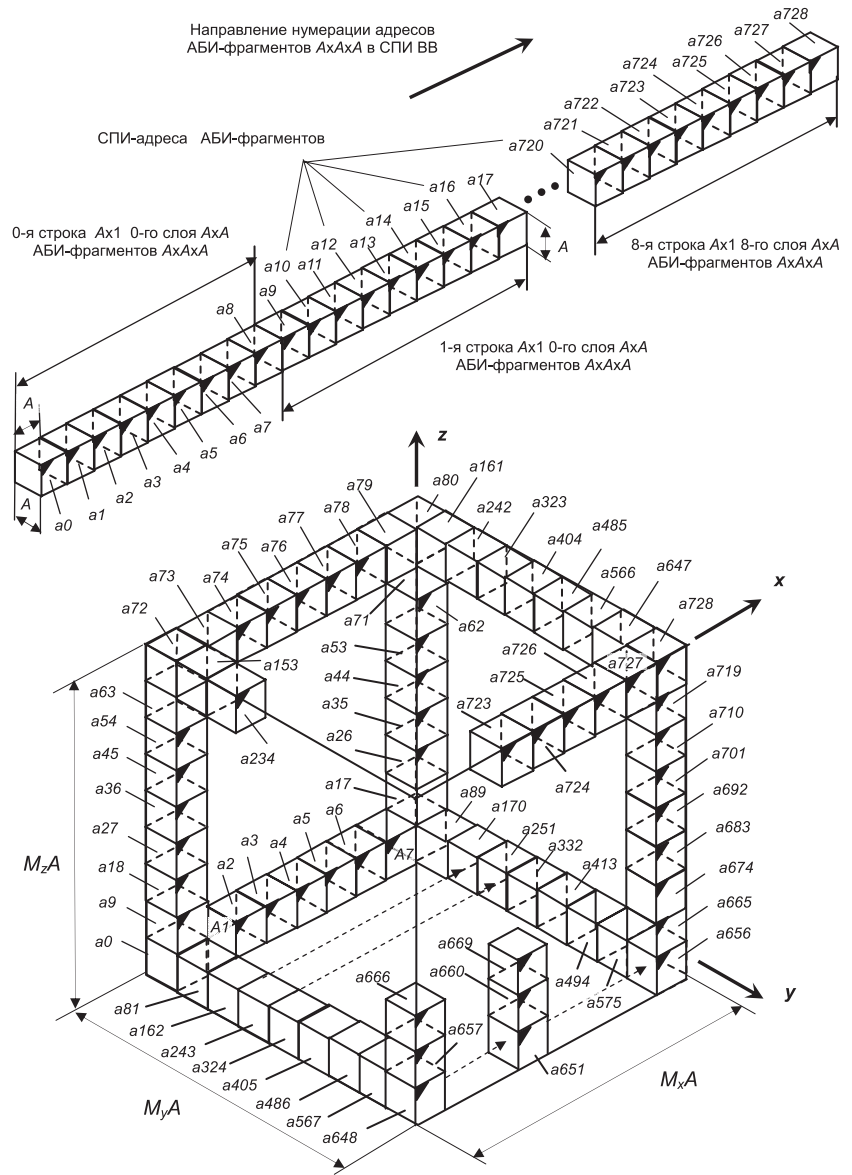


Рис. 2. Вариант пространственной интерпретации содержимого участка памяти ВВ в виде БСИ формата $9A \times 9A \times 9A$, состоящего из 729 АБИ-фрагментов $A \times A \times A$

содержимое результирующего АБИ-фрагмента, то содержимое БСИ $K_x \cdot A \times K_y \cdot A \times K_z \cdot A$ и БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$ объявляются взаимно пересекающимися. ВВ за время, сравнимое с тактом управления, позволяет:

- выделить каждую область $Gi0...Gi7$ в виде отдельного АБИ со СПИ-адресом r ;
- сформировать АБИ со СПИ-адресом d , представляющее собой результат повоксельного пересечения содержимого АБИ (со СПИ-адресом r) с содержимым своего АБИ-фрагмента $A \times A \times A$, принадлежащего БСИ $M_x \cdot A \times M_y \cdot A \times M_z \cdot A$;
- осуществить анализ единичного содержимого АБИ со СПИ-адресом d на "пусто/не пусто".

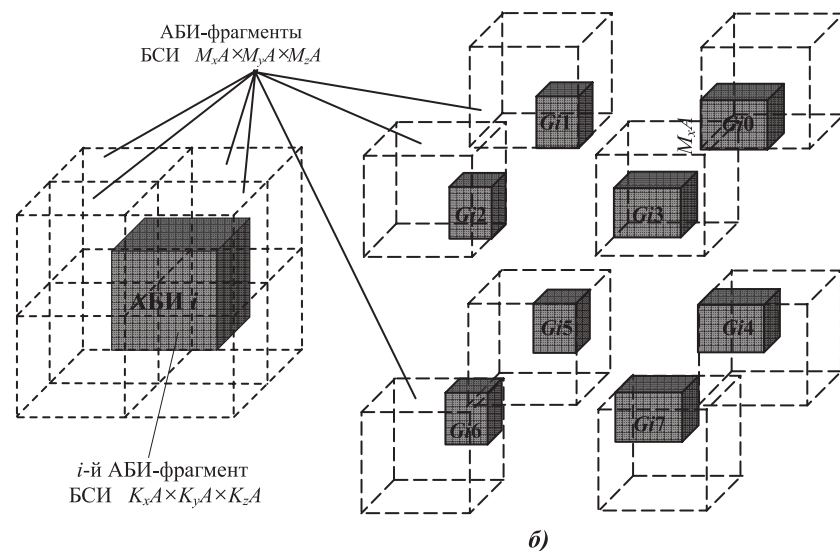
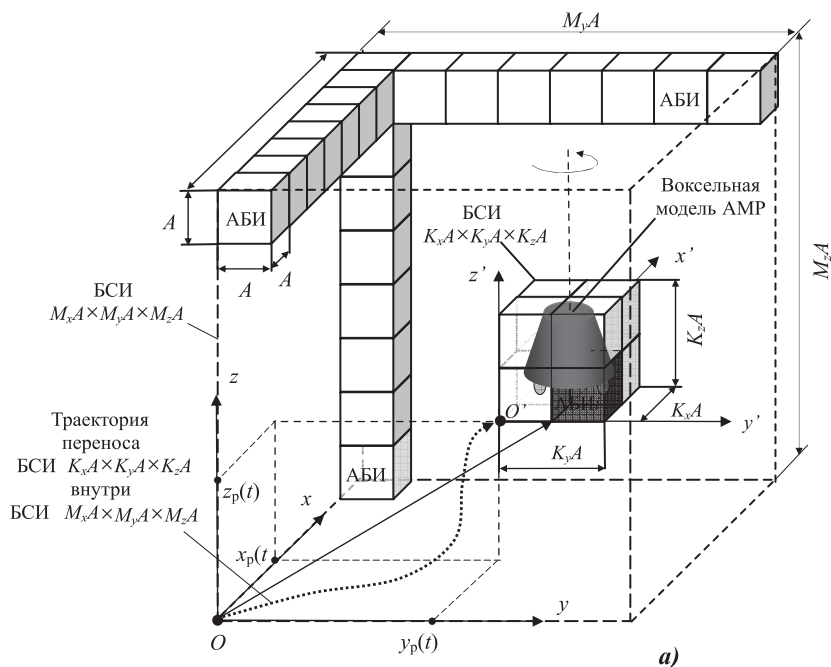


Рис. 3. Зондирование БСИ $M_x A \times M_y A \times M_z A$ с помощью зондирующего БСИ $K_x A \times K_y A \times K_z A$ средствами воксельного вычислителя

10. Преимущества применения воксельной АПТОС для организации виртуального зондирования сцены

Скоростное выполнение ВЗС требует наличия в УЦО специальных аппаратно-программных средств для скоростной обработки $v^{(n)}$ -воксельных моделей. В традиционных компьютерах аппаратно не реализованы многие операции и процедуры, используемые при организации ВЗС, которые необходимо выполнять с высокой степенью параллелизации над пиксельными и воксельными моделями, например, анализ моделей на пересекаемость, теоретико-множественные операции, геометрические преобразования поворота и переноса и другие. В традиционных программируемых компьютерах

скоростное выполнение геометрических преобразований проводится только с применением многоядерных центральных процессоров (CPU) или графических конвейеров (GPU) над полигональными числовыми геометрическими моделями или дискретными точечными моделями, описываемыми с помощью числовых координат.

Наоборот, в системе машинных команд ВВ присутствует целая группа команд (так называемых команд блока обработки БИ), существенно повышающих скорость процедуры зондирования сцены. Поскольку блок управления в ВВ имеет архитектуру традиционного УЦО, возможности обработки числовой информации в ВВ, как минимум, не будут уступать возможностям традиционных компьютеров и микроконтроллеров.

Заключение

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что метод ВЗС на базе воксельной АПТОС позволяет создать сверхскоростные навигационные видеоанализаторы, которые, будучи встроенными в систему управления АМР, могут значительно повысить их адаптивность, маневренность и автономность, что, в свою очередь, расширит области и масштабы применения АМР в военном деле, сельском хозяйстве, промышленности, сфере услуг.

Список литературы

1. Stout B. Smart Moves: Intelligent Path-Finding. URL: http://www.gamasutra.com/view/feature/131724/smart_move_intelligent_php.
2. Плотников В. А. Анализ эффективности существующих методов уклонения от столкновения для мобильного робота. Донецк: Штучный интеллект, 2010.
3. Seder M., Macek K., Petrovic I. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments // Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE. 6 p.
4. Ferguson D., Darms M., Urmson C., Kolski S. Detection, Prediction and Avoidance of Dynamic Obstacles in Urban Environments // Proceedings of the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2008. June. P. 1149–1154.
5. Герасимов В. Н., Михайлов Б. Б. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2012. № 6. С. 83–92.
6. Андрианов О. Г., Королькова М. А., Кочетков С. А., Краснова С. А. Кинематическое управление мобильным роботом при движении по полигону с обходом препятствий // Материалы конференции "Управление в технических системах" (УТС–2010, Санкт-Петербург). СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 356–359.

7. Зозуля Ю. И. Интеллектуальные системы обработки информации на основе нейросетевых технологий: учеб. пособие. Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2000. 138 с.

8. Юдинцев Б. С., Даринцев О. В. Интеллектуальная система планирования траекторий мобильных роботов, построенная на сети Хопфилда // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14131>.

9. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка n -мерных пиксельных геометрических моделей // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 29—36.

10. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Устройство обработки двумерных и трехмерных изображений // Патент РФ № 2376637. 2009. Бюл. № 35.

11. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Устройство управления автономным роботом. Патент РФ № 2424105. 2011. Бюл. № 20.

12. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Принципы построения и функционирования устройств для высокоскоростной обработки n -мерных пиксельных геометрических моделей // Информационные технологии. 2012. № 6. С. 44—49.

13. Бимаков В. А., Касимов Т. Р. Использование воксельных вычислителей для скоростного преобразования 2D- и 3D-изображений высокого разрешения // Информационные технологии. 2013. № 3. С. 42—47.

14. Бимаков В. А., Бимаков Е. В., Касимов Т. Р. О применении воксельных вычислителей для решения задач стереозрения и навигации автономного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 47—54.

15. Бимаков Е. В., Касимов Т. Р. Разработка системы управления автономным мобильным роботом на базе воксельного вычислителя // Электронный научный журнал "Труды МАИ". 2014. № 74. URL: <http://www.mai.ru/publications/index.php?ID=49313>.

E. V. Bimakov, Leading Engineer, LLC "Voxel equipment",
Graduate Student, Izhevsk State Technical University, robint@mail.ru

The Method of Virtual Probing of Scene Based on the Voxel Technology of Scene Processing

The high-speed method of virtual probing of a scene based on voxel technology of scene processing is explained. The method is intended for the solution of tasks of navigation of the autonomous ground mobile robot (obstacle avoidance and object recognition in real time). The general concept of this method, the choice of the type of digital device, the choice of probe model and scene model for the high-speed virtual scene probing are described. High speed of the automatic analysis of scene is reached thanks to deep multisequencing of operations and procedures which are most often used when scene is probing.

Keywords: scene and image processing, navigation, autonomous ground robot, obstacle avoidance, object recognition, voxel geometrical model, voxel computers

References

1. Bryan Stout. *Smart Moves: Intelligent Path-Finding*, URL: http://www.gamasutra.com/view/feature/131724/smart_move_intelligent_.php.

2. Plotnikov V. A. *Analiz jeffektivnosti sushhestvujushhijh metodov uklonenija ot stolknovenija dlja mobil'nogo robota*. Doneck: Shtuchnij intelekt, 2010.

3. Seder M., Macek K., Petrovic I. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments, *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*. 6 p.

4. Ferguson D., Darms M., Urmsion C., Kolski S. Detection, Prediction and Avoidance of Dynamic Obstacles in Urban Environments, *Proceedings of the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2008. June. P. 1149—1154.

5. Gerasimov V. N., Mihajlov B. B. Reshenie zadachi upravlenija dvizheniem mobil'nogo robota pri nalichii dinamicheskijh prepjatstvij, *Vestnik MGTU im. N. Je. Bauman. Ser. Priborostroenie*, 2012, no. 6, pp. 83—92.

6. Andrianova O. G., Korol'kova M. A., Kochetkov S. A., Krasnova S. A. Kinematischeskoe upravlenie mobil'nym robotom pri dvizhenii po poligonu s obhodom prepjatstvij, *Materialy konferencii "Upravlenie v tehnikeskijh sistemah" (UTS—2010, Sankt-Peterburg)*, SPb.: JSC "Koncern "CNII "Jelektropribor". 2010. P. 356—359.

7. Zozulja Ju. I. *Intellektual'nye sistemy obrabotki informacii na osnove nejrosetevykh tehnologij*: Ucheb. Posobie. Ufa: Ufimsk. gos. aviac. tehn. un-t, 2000. 138 p.

8. Judincev B. S., Darincev O. V. Intellektual'naja sistema planirovanija traektorij mobil'nyh robotov, postroennaja na seti Hopfilda, *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2014, no. 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14131>.

9. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка n -мерных пиксельных геометрических моделей, *Информационные технологии*, 2009, no. 3, pp. 29—36.

10. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Устройство обработки двумерных и трехмерных изображений, *Patent RF № 2376637, 2009, Bjul*, no. 35.

11. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Устройство управления автономным роботом, *Patent RF № 2424105. 2011. Bjul*. no. 20.

12. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Принципы построения и функционирования устройств для высокоскоростной обработки n -мерных пиксельных геометрических моделей, *Информационные технологии*, 2012, no. 6, pp. 44—49.

13. Бимаков В. А., Касимов Т. Р. Использование воксельных вычислителей для скоростного преобразования 2D и 3D изображений высокого разрешения, *Информационные технологии*, 2013, no. 3, pp. 42—47.

14. Бимаков В. А., Бимаков Е. В., Касимов Т. Р. О применении воксельных вычислителей для решения задач стереозрения и навигации автономного робота, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2013, no. 2, pp. 47—54.

15. Бимаков Е. В., Касимов Т. Р. Разработка системы управления автономным мобильным роботом на базе воксельного вычислителя, *Электронный научный журнал "Труды МАИ"*, 2014, no. 74. URL: <http://www.mai.ru/publications/index.php?ID=49313>.