

17. Saak A.E. Sravnitel'nyy analiz polinomial'nykh algoritmov dispatcherizatsii v Grid-sistemakh [Comparative analysis of polynomial algorithms for scheduling in Grid systems], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2012, No. 9, pp. 28-32.
18. Korf R. Optimal rectangle packing: New results, *In Proceedings of the fourteenth international conference on automated planning and scheduling (ICAPS 2004)*. Whistler, British Columbia, Canada, June 3-7, 2004, pp. 142-149.
19. Korf R., Moffitt M., Pollack M. Optimal rectangle packing, *Annals of Operations Research*, 2010, Vol. 179, No. 1, pp. 261-295.
20. Caramia M., Giordani S., Iovanella A. Grid scheduling by on-line rectangle packing, *Networks*, 2004, Vol. 44, No. 2, pp. 106-119.
21. Duijvestijn A.J.W. Simple perfect squared square of lowest order, *J. Combin. Theory*, 1978, Ser. B, No. 25, pp. 240-243.
22. Duijvestijn A.J.W., Federico P.J., Leeuw P. Compound perfect squares. *Amer. Math. Monthly*, 1982, No. 89, pp. 15-32.
23. Gambini I. A method for cutting squares into distinct squares, *Discrete Applied Math*, 1999, No. 98, pp. 65-80.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Саак Андрей Эрнестович – Южный федеральный университет; e-mail: saak@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел., факс: 88634393373; кафедра государственного и муниципального управления; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Курейчик Владимир Викторович – e-mail: vkur@tgn.sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Saak Andrey Ernestovich – Southern Federal University; e-mail: saak@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone, fax: +78634393373; the department of state and municipal administration; head of department, dr. of eng.sc.; associate professor.

Kureichik Vladimir Victorovich – e-mail: vkur@tgn.sfedu.ru; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of department, dr. of eng.sc.; professor.

УДК 004.421.2

О.Б. Лебедев, Е.М. Лебедева, В.А. Пестов

АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Представлены волновые алгоритмы, использующиеся при планировании движения подводного аппарата в пространстве, содержащем препятствия. Общеизвестно, что наиболее безопасным и эффективным путем исследования подводной среды является использование технических средств, обеспечивающих косвенное присутствие человека под водой. Важную роль в этом играют подводные аппараты с развитой системой управления. За короткий период они продемонстрировали свою эффективность при выполнении достаточно сложных глубоководных обзорно-поисковых и обследовательских работ и открыли ряд новых важных применений для морской геологической разведки, изучения подводной обстановки и экологического мониторинга водной среды. Современные многоцелевые подводные аппараты представляют собой новый класс подводных робототехнических объектов с присущими им задачами и практическим применением, особенностями технологии, составом систем и функциональными свойствами. В качестве основного алгоритма планирования использовался алгоритм А с применением дополнительных эвристик, который позволяет находить оптимальный, безопасный путь от начальной позиции до целевой с учетом препятствий обнаруженных в пространстве, которое представляет собой со-*

стояние подводной обстановки. Планирование может осуществляться в двумерном и трехмерном пространствах. Проведены эксперименты планирования пути в двумерном и трехмерном пространствах и получены результаты, подтверждающие работоспособность рассмотренных алгоритмов.

Волновые алгоритмы; планирование движения; подводный аппарат; пространство; подводная среда; технические средства; обеспечивающих косвенное присутствие человека под водой; система управления; морская геологическая разведка; изучения подводной обстановки и экологического мониторинга водной среды; робототехнический объект; технологии; двумерное и трехмерное пространство.

O.B. Lebedev, E.M. Lebedeva, V.A. Pestov

ALGORITHMS OF MOTION PLANNING OF UNDERWATER VEHICLES

*The paper presents the wave algorithms used in the planning of underwater vehicle movement in the space containing obstacles. It is recognized that the safest and most effective way to study the underwater environment is the use of technology, providing indirect presence of man in the water. An important role to play underwater vehicles developed control system. Within a short period, they have demonstrated their effectiveness in carrying out fairly complex deepwater surveillance and search and work-finding and discovered a number of important new applications for offshore geological exploration, explore the underwater environment and ecological monitoring the aquatic environment. Modern multipurpose underwater vehicles represent a new class of underwater robotic objects with their inherent problems and practical application of the technology, the composition of systems and functional properties. As the main scheduling algorithm A * algorithm is used with additional heuristics, which lets you find the optimum and safe way from the initial to the target position based on the detected obstacles in the space, which is an underwater environment condition. Scheduling may be carried out in two-dimensional and three-dimensional spaces. Experiments were carried out in the way of planning and three-dimensional spaces and obtained results confirming the efficiency of the considered algorithms.*

Wave algorithms; planning movement; submersible; space; underwater environment; facilities; providing indirect presence of a person under the water management system; marine geological exploration; explore the underwater environment and ecological monitoring the aquatic environment; the robot object technology; two-dimensional and a three-dimensional space.

Введение. К числу наиболее актуальных сфер применения современных подводных аппаратов можно отнести [1]:

- ◆ обзорно-поисковые работы, включая поиск и обследование затонувших объектов, инспекцию подводных сооружений и коммуникаций (трубопроводов, водоводов, кабелей);
- ◆ геологоразведочные работы, включающие топографическую и фотовидеосъемку морского дна, акустическое профилирование и картографирование рельефа;
- ◆ подлёдные работы, в том числе прокладка кабеля на арктическом дне, обслуживание систем наблюдения и освещения подводной обстановки;
- ◆ океанографические исследования, мониторинг водной среды;
- ◆ работы военного назначения, включающие, в частности, противолодочную разведку, патрулирование, обеспечение безопасности объектов военной техники, поиск и обезвреживание мин.

Проблемы, связанные с созданием и конструированием подводных аппаратов, многоплановы и во многих случаях не имеют пока законченных решений. Системы, входящие в состав подводного аппарата и судового оборудования, отличаются большим разнообразием по назначению и физическим принципам работы, что порождает достаточно жёсткие и противоречивые требования к технологии и системной организации. Расширение функциональных возможностей подводного аппарата связано также с решением ряда новых теоретических задач. В первую

очередь это задача управления и навигации, ориентирования в подводном пространстве, сбора и накопления разнообразной целевой информации о среде и, наконец, обеспечения безопасности аппарата в штатных режимах и особых случаях [2–8].

Для выполнения обзорно-поисковых и обследовательских работ на больших глубинах и в условиях сложного рельефа дна, подлёдных работ и т.п. необходима организация на борту подводного аппарата развитой системы управления.

Представление данных. Данные, представляющие собой состояние подводной обстановки можно разложить на два подпространства: пространство таких конфигураций, которые может достигать подводный аппарат, обычно называемое свободным пространством и на пространство недостижимых конфигураций, называемое занятым пространством. Используемый подход к планированию пути применяет метод, называемый декомпозицией ячеек. Планирование в пределах одной ячейки может быть решено с применением простых средств.

Простейший вариант декомпозиции ячеек представляет собой сетку с равномерным шагом, которая накладывается на имеющуюся карту среды. Препятствия добавляются на основе текущей позиции подводного аппарата и положения препятствий относительно него. По мере его перемещения и обнаружения новых препятствий сетка из ячеек также обновляется. В рамках этой сетки мы определяем, какое пространство свободно, а какое занято препятствиями. Для программного представления n -мерного пространства используется n -мерный массив, в котором координаты точек пространства – это индексы элементов массива, а элемент массива хранит состояние среды.

Преимущество декомпозиции ячеек состоит в чрезвычайно простом ее применении при планировании пути. Отметим также общие недостатки, присущие этому методу [2, 6]. Существует проблема так называемой «смешанности» ячеек. А именно, имеются такие ячейки, которые не принадлежат полностью ни занятому, ни свободному пространству. Тем самым путь, который будет включать такую ячейку, может не быть действительным решением, так как не будет существовать способа пересечения ячейки в желаемом направлении по некоторой линии. Это может приводить к ненадежности процедуры планирования пути. В то же время, если прокладывать путь через полностью свободные ячейки, то процедура планирования пути станет неполной, поскольку единственные возможные пути к цели могут лежать только через такие смешанные ячейки. Это имеет место, когда размер ячейки сопоставим с размерами просветов в рассматриваемом пространстве. Таким образом, следует это учитывать при выборе шага сетки, а также следует учитывать величину наименьшего прохода, через который должен быть проложен искомый путь [14–16].

Алгоритм А*. После разбиения пространства конфигураций подводного аппарата на два подпространства: свободное пространство и занятое пространство, задачу нахождения кратчайшего пути можно решить с применением алгоритма А*.

Алгоритм А* пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной ячейки к конечной, пока не найдёт минимальный путь. Как и все информированные алгоритмы поиска, он просматривает сначала те маршруты, которые «кажутся» ведущими к цели.

Порядок обхода ячеек пространства определяется эвристической функцией $f(x)$ «расстояние + стоимость». Эта функция – сумма двух других: функции стоимости достижения рассматриваемой ячейки (x) из начальной (обозначается как $g(x)$) и эвристической оценкой расстояния от рассматриваемой ячейки к конечной (обозначается как $h(x)$). Функция $h(x)$ должна быть допустимой эвристической оценкой, то есть не должна переоценивать расстояния к целевой ячейке. Например, $h(x)$ может представлять собой расстояние до цели по прямой линии, так как это физически наименьшее возможное расстояние между двумя точками [3].

В начале работы к открытому списку добавляется начальная ячейка. После чего ячейка с минимальным значением $f(x)$ выталкивается из открытого списка и добавляется в закрытый список (чтобы не обрабатывать повторно) и расширяется по 8-ми направлениям для двумерного пространства (рис. 1) и по 26-ти направлениям для трехмерного пространства (рис. 2).

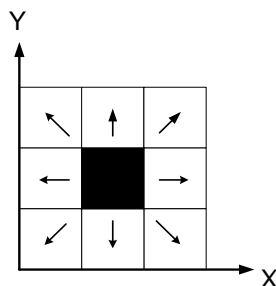


Рис. 1. Расширение ячейки пространства по 8-ми направлениям для двумерного пространства

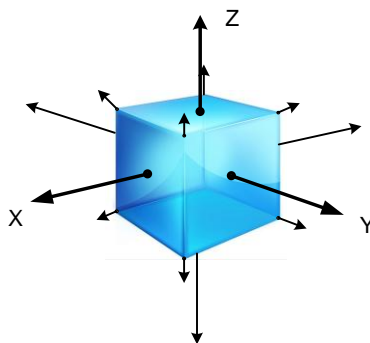
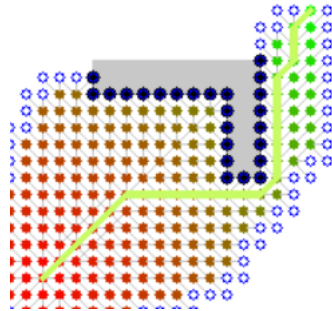


Рис. 2. Расширение ячейки пространства по 26-ти направлениям для трехмерного пространства

Затем каждая расширенная ячейка проверяется на столкновение, и отсекается, если является препятствием. Так же отбрасываются ячейки, находящиеся в закрытом списке. Далее, для каждой из оставшихся ячеек вычисляется эвристическая функция $f(x) = g(x) + h(x)$ и сравнивается с ячейкой в открытом списке. Если уже есть ячейка с таким же расположением в пространстве и с большим значением стоимости пути $g(x)$, то ей присваивается новое значение $g(x)$ и эвристическая функция $f(x)$ пересчитывается заново. А если такой ячейки не оказалось в открытом списке, то она туда добавляется. При этом каждая расширенная ячейка запоминает свою родительскую ячейку. Затем заново ячейка с минимальным значением $f(x)$ выталкивается из открытого списка и добавляется в закрытый список и расширяется. На каждом этапе алгоритм оперирует с множеством путей из начальной ячейки до всех ещё не расширенных ячеек пространства («множеством частных решений»), которые размещаются в открытом списке. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока не достигнет целевой ячейки или пока все ячейки пространства не будут просмотрены. После чего происходит реконструкция пути, следуя обратно из конечной ячейки к целевой. На рис. 3 представлен результат работы алгоритма. Пустые кружки в узлах принадлежат открытому списку, остальные к закрытому списку.

Рис. 3. Результат работы алгоритма A^*

Эвристики. При решении задачи поиска пути применяя алгоритм A^* , в качестве приемлемого решения выбирается эвристика, оценивающая евклидово расстояние до цели. Однако, применение такой эвристики недостаточно в нашем случае. Это связано с тем, что в случае применения такой эвристики, поиск деградирует до алгоритма поиска в ширину, если приближение к цели происходит в неподходящем направлении. Поскольку евклидово расстояние не зависит от того, с какой стороны мы приближаемся к цели [9–13].

Тем самым, приближаясь к цели по такой эвристике в ложном направлении, мы расширяем гораздо большее число узлов, чем нужно при работе алгоритма A^* . Поэтому необходимо решить задачу с меньшим количеством ограничений на действия. Такая задача называется задачей с ослабленными ограничениями. Известно, что стоимость оптимального решения для задачи с ослабленными ограничениями является допустимой эвристикой для решения основной задачи [2, 9–12]. Как известно алгоритм A^* основан на алгоритме Дейкстры. Разница лишь в добавочной эвристике, которая направляет поиск к цели. Отбросив ее, мы тем самым решим задачу нахождения эвристики с помощью алгоритма Дейкстры.

Одной эвристики не достаточно для нахождения безопасного пути. Часто бывают случаи, когда путь проходит слишком близко к препятствию. Эта проблема обычно решается введением потенциального поля [2]. Мы будем использовать потенциальное поле в качестве дополнительного члена стоимости при вычислении кратчайшего пути [14–17].

Рассмотрим две эвристики, одна из которых применяется для сужения перебора при A^* поиске, получаемая из первоначальной задачи ослаблением соответствующих ограничений, другая применяется для построения безопасного пути.

Первая эвристика. Задача с ослабленными ограничениями. Рассмотрим эвристику, применяемую для сужения перебора при A^* поиске (вариант алгоритма Дейкстры). В начале каждой процедуры планирования пути по этому алгоритму находятся все кратчайшие пути от каждой ячейки сетки до целевой ячейки при помощи расширения восьми соседних ячеек узлов.

Преимущество данной эвристики состоит в том, что она находит все U-образные препятствия и тупики, а затем направляет прочь от таких областей пространства. Пути, свободные от препятствий будут иметь меньшую эвристическую оценку, чем пути, ведущие в тупики, что полезно для препятствий лабиринтного типа, поскольку поиск будет тратить меньше времени на обследование тупиков [2, 12–15].

Вторая эвристика. Потенциальное поле. Обобщенная диаграмма Вороного. Потенциальное поле – представляет собой функцию, определенную в пространстве состояний, значение которой возрастает по мере приближения к бли-

жайшему препятствию пропорционально расстоянию до него. Скажем, что каждая ячейка дискретизированного пространства имеет связанную с ней стоимость прохождения по ней. Тем самым мы будем стараться найти компромисс между минимизацией длины пути к цели и, с другой стороны, оставаться в стороне от препятствий, минимизируя значение потенциальной функции. Тем самым ячейки, которые находятся ближе к препятствиям, будут иметь большую стоимость прохождения. Назначив подходящий вес, можно найти путь, который хоть и немного длиннее, но в то же время безопасней.

В этой работе используется не просто потенциальное поле, которое задает стоимость прохождения каждой ячейке в виде функции, обратно пропорциональной расстоянию до ближайшего к ячейке препятствия, а – разновидность потенциального поля, носящую название поле Вороного. Это поле определяет стоимость прохождения ячейки как функцию не только расстояния до ближайшего препятствия, но также и как функцию расстояния до ближайшего края диаграммы Вороного [4, 13]. Диаграмма Вороного – это разбиение пространства на основе расстояния до ближайших объектов пространства. Например, для заданного препятствия область пространства, которая ближе к препятствию по сравнению с другими препятствиями формирует ячейку диаграммы Вороного. Подмножество пространства, которое равноудалено от более чем одного препятствия формирует края диаграммы Вороного [4].

Вариант диаграммы Вороного, применяемый к ячейкам нашей сетки, называется обобщенной диаграммой Вороного. Это множество всех ячеек в сетке, которые содержат точки, равноудаленные от двух и более ячеек препятствий. Для построения обобщенной диаграммы Вороного вычисляется карта расстояний на основе сетки из ячеек. Эта карта хранит для каждой ячейки расстояние до ближайшей ячейки препятствия. Используемый алгоритм для каждой ячейки сетки сохраняет положение ближайшей ячейки препятствия, расстояние до ближайшего препятствия. На рисунке 4 приведена карта расстояний, яркость точек отображает расстояние до ближайших ячеек препятствий, где более светлые – находятся ближе к препятствиям. Далее вычисляется поле Вороного на основе карты расстояний.

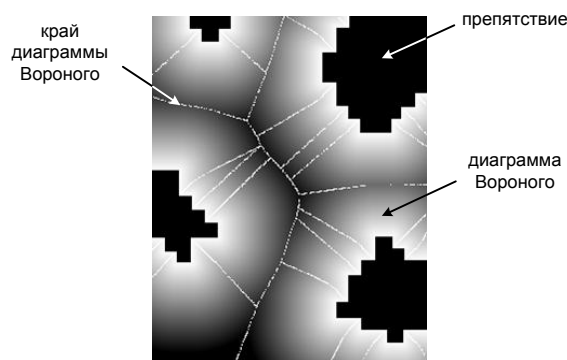


Рис. 4. Пример карты расстояний

Карта расстояний может быть построена с использованием метода пожара (brushfire) [5, 18]. Этот алгоритм аналогичен алгоритму Дейкстры для решения задачи нахождения кратчайшего пути от одного источника. Однако вместо начала поиска в одном узле и нахождения кратчайших путей до всех остальных узлов, алгоритм пожара начинает поиск со всех ячеек препятствий и рекурсивно обновляет расстояния до всех окружающих ячеек.

Поле Вороного для двумерного пространства вычисляется на основе карты расстояний.

$$\rho_v(x, y) = -d_i(x, y) * k,$$

где $\rho_v(x, y)$ – цена прохождения ячейки (x, y) , $d_i(x, y)$ – расстояние от ячейки до ближайшего препятствия, а k – коэффициент для уравнивания весов. Поменяв знак каждой ячейки сетки, мы инвертируем карту расстояний и теперь чем ближе ячейка расположена к препятствию, тем больше у нее стоимость.

Аналогично и для трехмерного пространства.

$$\rho_v(x, y, z) = -d_i(x, y, z) * k,$$

где $\rho_v(x, y, z)$ – цена прохождения ячейки (x, y, z) , $d_i(x, y, z)$ – расстояние от ячейки до ближайшего препятствия.

Таким образом, мы получаем такое планирование пути, которое будет отталкивать поиск прочь от препятствий. Но этого не достаточно для построения безопасного пути. Необходимо расширить сами препятствия, чтобы обезопасить подводный аппарат от узких проходов. Это можно сделать на основании карты расстояний, задав подходящий радиус для расширения препятствий. На рис. 5 представлено двумерное пространство с расширенными препятствиями.

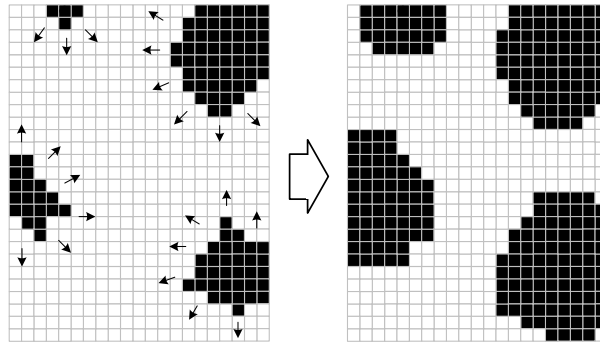


Рис. 5. Двумерное пространство после расширения препятствий

Экспериментальные исследования. Алгоритмы рассмотренные выше были реализованы на языке программирования C++. Было проведено несколько экспериментов поиска пути в двумерном и трехмерном пространствах, чтобы проверить работоспособность и эффективность волновых алгоритмов поиска пути.

В качестве исходных данных была выбрана двумерная карта размером 330x400 ячеек. Результат планирования пути в двумерном пространстве представлен на рис. 6.

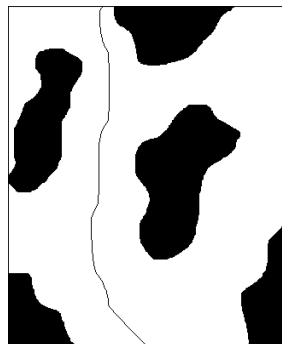


Рис. 6. Планирование пути в двумерном пространстве

Ниже приведена табл. 1, демонстрирующая время выполнения каждого этапа планирования пути. Оценка времен выполнения алгоритмов проводилась на процессоре AMD Athlon II X2 250 Processor с тактовой частотой 3 ГГц.

Таблица 1

Время планирования пути в двумерном пространстве

Этап планирования	Время выполнения, мс
Вычисление поле Вороного	187
Вычисление эвристики Дейкстры	62
Поиск пути при помощи алгоритма A*	47
Суммарное время выполнения планирования	296

Для проверки алгоритмов планирования пути в трехмерном пространстве была выбрана карта размером 50x50x50 ячеек. Результат планирования представлен на рис. 7.

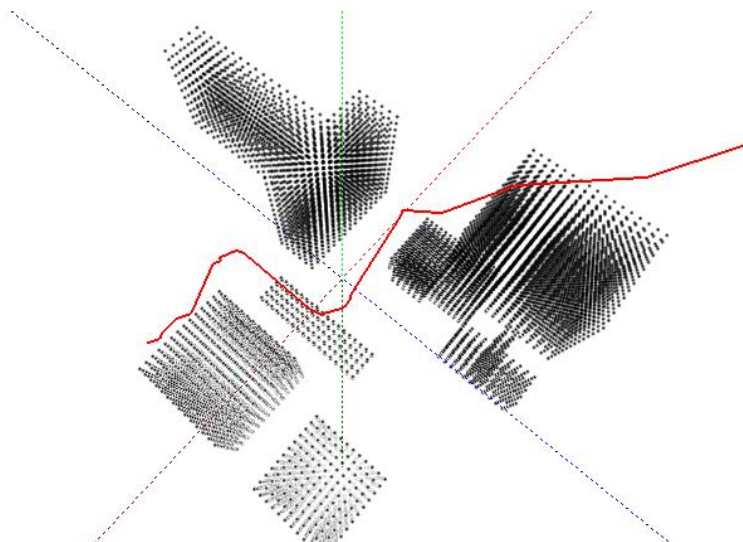


Рис. 7. Поиск пути при помощи алгоритма A* в трехмерном пространстве

Ниже приведена табл. 2, демонстрирующая время выполнения каждого этапа планирования пути.

Таблица 2

Время планирования пути в трехмерном пространстве

Этап планирования	Время выполнения, мс
Вычисление поле Вороного	297
Вычисление эвристики Дейкстры	125
Поиск пути при помощи алгоритма A*	172
Суммарное время выполнения планирования	594

Заключение. Были рассмотрены волновые алгоритмы для планирования движения подводного аппарата, которые обеспечивают поиск пути в двумерном и трехмерном пространствах. Алгоритмы планирования отличаются простотой реализации, переносимостью и взаимодополняемостью. Было проведено несколько экспериментов поиска пути в двумерном и трехмерном пространствах, выполне-

ние которых подтвердило работоспособность и эффективность выбранных алгоритмов поиска пути и разработанной методики их совместного применения. Программа может прокладывать безопасный, оптимальный путь через содержащее препятствия пространство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агеев М.Д., Киселёв Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.* Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Алгоритм поиска A*. / http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_поиска_A*.
3. *Russell S., Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.). – Prentice Hall, 2010. – P. 971-1011.
4. *Lau B., Sprunk C., Burgard W.* Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams // IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Taipei, Taiwan, 2010.
5. *Kalra N., Ferguson D., Stentz A.* Incremental reconstruction of generalized Voronoi diagrams on grids // Robotics and Autonomous Systems. – 2009. – No. 57. – P. 123-128.
6. *Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Polenov M.Yu., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V.* Neural network method of intellectual planning of mobile robotic object movement in the conditions of uncertainty. Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits // Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014). Santorini Island, Greece July 17-21, 2014. – P. 194-200.
7. *Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V.* Principles of structural organization of the intellectual movement planning system for mobile robotic object. Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits. Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014). Santorini Island, Greece July 17-21, 2014. – P. 223-227.
8. *Ioan A. Şucan, Mark Moll, Lydia E. Kavraki.* The Open Motion Planning Library // IEEE Robotics & Automation Magazine. – December 2012. – № 19 (4). – P. 72-82. <http://ompl.kavrakilab.org>.
9. *Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A.* Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // The IPSI BgD Transactions on Internet Research. – 2002. – Vol. 8, № 2. – P. 40-45.
10. *Ferrara A., Rubagotti M.* Sliding Mode Control of a Mobile Robot for Dynamic obstacle Avoidance Based on a Time-Varying Harmonic Potential Field // ICRA 2007 Workshop: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles.
11. *Padilla Castaneda M.A., Savage J., Hernandez A. and Arambula Cosío F.* Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields//Motion Planning, Xing-Jian Jing (Ed.), ISBN: 978-953-7619-01-5, InTech, 2008. http://www.intechopen.com/books/motion_planning/local_autonomous_robot_navigation_using_potential_fields.
12. *Ge S.S., Cui Y.J.* New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2000. – Vol. 16, № 5. – P. 615-620.
13. *Koren Y., Borenstein J.* Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation // In Proc. The IEEE Conference on Robotics and Automation. – 1991. – P. 1398-1404.
14. *Shimoda S., Kuroda Y. and Iagnemma K.* High Speed Navigation of Unmanned Ground Vehicles on Uneven Terrain Using Potential Fields // Robotica. – July 2007. – Vol. 25, № 4. – P. 409-424.
15. *Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G.* Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // In Proc. The 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. – 2013. – P. 1314-1317.
16. *Tang L., Dian S., Gu G., Zhou K., Wang S., Feng X.* A Novel Potential Field Method for Obstacle Avoidance and Path Planning of Mobile Robot // In Proc. 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT). – 2010. – Vol. 9. – P. 633-637.
17. *Macek K., Petrovic I., Ivanjko E.* An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots // In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology. – 2003. – P. 969-973.
18. *Stentz A.* The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning // In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995.

REFERENCES

1. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. *i dr.* Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
2. Algoritm poiska A* [The A*search algorithm]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/The_A*_search_algorithm.
3. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd ed.). Prentice Hall, 2010, pp. 971-1011.
4. Lau B., Sprunk C., Burgard W. Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams, *IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Taipei, Taiwan, 2010.
5. Kalra N., Ferguson D., Stentza A. Incremental reconstruction of generalized Voronoi diagrams on grids, *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, No. 57, pp. 123-128.
6. Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Polenov M.Yu., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V. Neural network method of intellectual planning of mobile robotic object movement in the conditions of uncertainty. Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits. Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014). Santorini Island, Greece July 17-21, 2014, pp. 194-200.
7. Guzik V.Ph., Chernukhin Yu.V., Pyavchenko A.O., Pereverzev V.A. and Saprykin R.V. Principles of structural organization of the intellectual movement planning system for mobile robotic object. Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits. Proceedings of the 18th International Conference on Circuits (part of CSCC '14) and the 2014 International Conference on Mechatronics and Robotics, Structural Analysis (MEROSTA 2014). Santorini Island, Greece July 17-21, 2014, pp. 223-227.
8. Ioan A. Şucan, Mark Moll, Lydia E. Kavraki. The Open Motion Planning Library, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, December 2012, No. 19 (4), pp. 72-82. Available at: <http://ompl.kavrakilab.org>.
9. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A. Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories, *The IPSI BgD Transactions on Internet Research*, 2002, Vol. 8, No. 2, pp. 40-45.
10. Ferrara A., Rubagotti M. Sliding Mode Control of a Mobile Robot for Dynamic obstacle Avoidance Based on a Time-Varying Harmonic Potential Field, *ICRA 2007 Workshop: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*.
11. Padilla Castaneda M.A., Savage J., Hernandez A. and Arambula Cosío F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields, *Motion Planning, Xing-Jian Jing (Ed.)*, ISBN: 978-953-7619-01-5, InTech, 2008. http://www.intechopen.com/books/motion_planning/local_autonomous_robot_navigation_using_potential_fields.
12. Ge S.S., Cui Y.J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, Vol. 16, No. 5, pp. 615-620.
13. Koren Y., Borenstein J. Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation, *In Proc. The IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1991, pp. 1398-1404.
14. Shimoda S., Kuroda Y. and Iagnemma K. High Speed Navigation of Unmanned Ground Vehicles on Uneven Terrain Using Potential Fields, *Robotica*, July 2007, Vol. 25, No. 4, pp. 409-424.
15. Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach, *In Proc. The 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 2013, pp. 1314-1317.
16. Tang L., Dian S., Gu G., Zhou K., Wang S., Feng X. A Novel Potential Field Method for Obstacle Avoidance and Path Planning of Mobile Robot, *In Proc. 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, 2010, Vol. 9, pp. 633-637.
17. Macek K., Petrovic I., Ivanjko E. An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots, *In Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2003, pp. 969-973.
18. Stentz A. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning, *In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

Лебедев Олег Борисович – Южный федеральный университет; e-mail: oblebedev@sfnedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89085135512; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; доцент.

Лебедева Елена Михайловна – кафедра системного анализа и телекоммуникаций; магистрант.

Пестов Владислав Андреевич – кафедра вычислительной техники; магистрант.

Lebedev Oleg Borisovich – Southern Federal University; e-mail: oblebedev@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79085135512; the department of computer-aided design; cand. of eng. sc.; assistant professor.

Lebedeva Elena Mikhailovna – the department of system analysis and telecommunications; master student.

Pestov Vladislav Andreevich – the department of computer science; master student.

УДК 004.421

Н.И. Витиска, Н.А. Гуляев

МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЁХМЕРНЫХ СЦЕН И ОБЪЕКТОВ ВОКСЕЛЬНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ СИСТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Визуализация является важной составной частью широкого круга задач. Системы компьютерного моделирования – одна из областей, в которых требуется визуализация моделируемых процессов и явлений. Современные средства визуализации справляются с большинством задач, однако потребности более новых и высокотехнологичных систем могут быть гораздо выше и требовать иных методов визуализации. Воксельная графика является одним из таких решений в ряде случаев. Однако сама воксельная графика имеет ряд недостатков и проблем в реализации в различных ситуациях. Для эффективного внедрения воксельной графики требуется решить ряд основных проблем, заключающихся в поиске оптимальных алгоритмов и структур данных. Приводится описание метода организации трёхмерных воксельных сцен для решения задач визуализации в системах технической симуляции и моделирования. Рассмотрены проблемы и недостатки существующих подходов к организации сцен и визуализации при помощи воксельной графики. Основное внимание уделено применению октодеревя, широко используемого в настоящее время. Предлагается альтернативный способ организации воксельных данных, ориентированный на специфичный тип сцен, использующихся для визуализации во многих системах моделирования. Предлагаемый способ заключается в разбиении вокселей сцены на классы, разбиении видимых объектов на классы, группировке вокселей по принадлежности к объектам. Описываются структуры данных для организации воксельных данных предлагаемым образом, отдельного хранения и независимой обработки различных групп вокселей. Описываются базовые алгоритмы, необходимые для обработки и визуализации воксельных данных в таком представлении. Рассмотрены преимущества данного метода в ряде случаев. Сделаны выводы о целесообразности использования данного метода в тех или иных случаях.

Трёхмерная графика; компьютерная графика; воксельная графика; разбиение пространства; трёхмерные сцены; организация трёхмерных сцен; структуры данных.

N.I. Vitiska, N.A. Gulyaev

AN APPROACH TO VISUALIZATION OF THREE-DIMENSIONAL SCENES AND OBJECTS VIA VOXEL GRAPHICS FOR SIMULATION SYSTEMS

Visualization is an important part of a wide range of different tasks. Computer modeling is one of the areas, which often require visualization of simulated processes. Modern visualization tools are able to perform visualization in different applications, which covers most cases of use,