

УДК: 519.6

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В ГРУППОВОМ УПРАВЛЕНИИ ЗА СЧЁТ ПОЛИГОНАЛЬНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЁННОГО ПОИСКА ПУТИ



**Т.А. Васяева**

Декан факультета информационных систем и технологий, доцент  
кафедры автоматизированных систем управления ДОННТУ, кандидат технических наук, доцент  
vasyaeva@gmail.com



**П.Г. Мельник**

Аспирант  
кафедры автоматизированных систем управления ДОННТУ  
zizaobycnaa@gmail.com

### **Т.А. Васяева**

Окончила Донецкий национальный технический университет. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов искусственного интеллекта, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

### **П.Г. Мельник**

Окончил Донецкий национальный технический университет. Область научных интересов связана с разработкой методов навигации автономных систем.

**Аннотация.** Разработан механизм полигонального заполнения локального минимума для мульти-агентной системы вместо привычных построений плоскостей или сфероидов Гаусса, что гарантирует целостность группы при выходе из локального минимума.

**Ключевые слова:** потенциальные поля, групповое управление, локальный минимум, архитектура «ведущий-ведомый», полигональное заполнение, распределённый поиск пути, трёхмерная навигация, автономные агенты.

**Введение.** Групповое управление беспилотными устройствами по принципу «ведущий-ведомый» (leader-follower) является одним из наиболее распространенных подходов в мульти-агентной робототехнике благодаря своей простоте, масштабируемости и эффективности [1]. Такие системы находят применение в широком спектре задач: от совместной транспортировки грузов до мониторинга опасных зон и поисково-спасательных операций.

Ключевым требованием к функционированию групп ведущий-ведомый является способность ведомых устройств сохранять заданную пространственную конфигурацию относительно движущегося лидера при движении в среде с препятствиями. Для обеспечения безопасной навигации ведомые роботы должны одновременно решать две задачи: следовать за лидером и избегать столкновений с препятствиями и другими членами группы.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению этой проблемы являются методы искусственных потенциальных полей (Artificial Potential Fields, APF). Однако методы APF имеют фундаментальный недостаток – подверженность локальным минимумам[1,2].

**Проблема.** В текущих реализациях метода потенциальных полей для избегания локальных минимумов зачастую используется метод «заполнения ям». Этот подход подразумевает создание искусственного отталкивающего поля в найденном локальном минимуме для того, чтобы вытолкнуть агента из него. Заполнение обычно происходит либо плоскостью, перпендикулярной вектору притяжения к цели, либо сфероидом Гаусса в области локального минимума. Оба варианта имеют свои недостатки. Для заполнения плоскостью такими можно считать проблему перекрытия других участков препятствия в случае, когда локальный минимум при небольшом размере сильно «глубже» соседних областей, для сфероидов классической проблемой является выходы за пределы минимума, что потенциально может перекрыть оптимальные маршруты[3].

В мульти-агентной системе недостатки предыдущих методов решения становятся на порядок весомее. Ни один из них не способен гарантировать сохранность группы агентов, а также избегание ситуаций, в которых группа покидает локальный минимум, а один из агентов остается либо в новом локальном минимуме, либо отталкивается в другую сторону от группы.

Постановка задачи исследования. Таким образом, задачу можно было сформулировать так: для группы устройств в трёхмерном пространстве нужно было разработать метод обнаружения и выхода из локальных минимумов, лишенный недостатков классических решений. Данный метод не должен был использовать глобальные планировщики пути, и в целом агенты ничего не должны были знать об окружающей среде вне своей зоны видимости.

Как часть работы, необходимо было разработать такой метод заполнения пространства, который:

- Обеспечил бы гарантированный выход всей группы агентов в одном направлении
- Обеспечил бы сохранность группы как единого объекта
- С малым количеством итераций полностью перекрывал бы возможность нового попадания в тот же локальный минимум
- Не перекрывал ничего, кроме локального минимума

Также было принято решение сразу остановиться на архитектуре группы устройств «ведущий-ведомые»[4]. Это обусловлено как большим потенциалом для модификаций поведения системы, так и большей практической направленностью: на практике почти все мульти-агентные системы используют именно её из-за лучшей координации и простоты управления.

**Предлагаемое решение.** Проведя анализ существующих методов, были выявлены следующие недостатки существующих решений:

- Недостаточная скорость заполнения локального минимума
- Фрагментарность заполнения
- Риск «зажать» одного из агентов между полем заполнения и препятствием

Опираясь на тот факт, что мульти-агентная система подразумевает наличие минимум трёх агентов, было принято решение о заполнении локального минимума набором полигональных фигур, образующих замкнутую геометрическую конструкцию.

В тестовой мульти-агентной системе существуют две роли – лидер и ведомые, и два состояния у каждого – покой и поиск выхода из локального минимума. В режиме покоя лидер следует к цели, опираясь на классический метод потенциальных полей, а в режиме поиска выхода – остается на месте в качестве якоря системы. Ведомые в режиме покоя следуют за лидером, имея его как точку притяжения для своих потенциальных полей. В режиме поиска выхода именно ведомые, опираясь на положение лидера, ищут точки, которые позже станут основой для полигонального заполнения.

Таким образом, схематичное изображение принципов работы мульти-агентной системы выглядит следующим образом(рисунок 1):

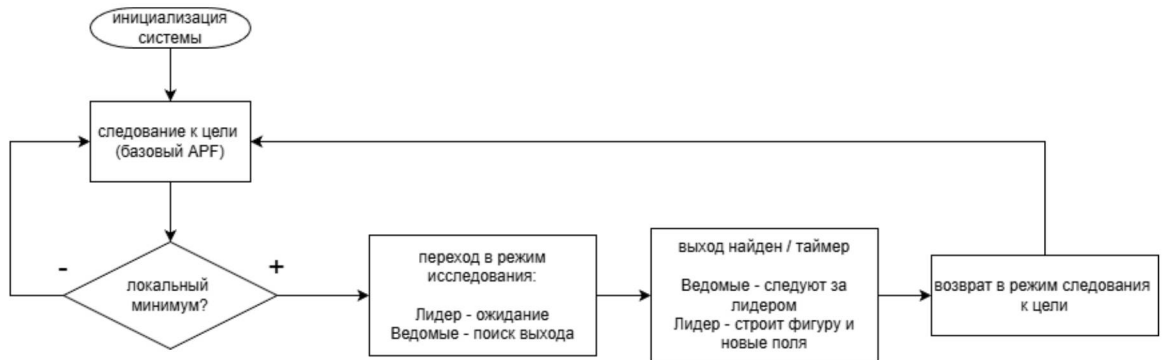


Рисунок 1. Схематичное изображение принципа работы системы

Локальный минимум определяется как падение скорости лидера меньше определённого значения на заданный отрезок времени.

Режим поиска включается после обнаружения лидером локального минимума и длится заданное время, после чего система возвращается в режим следования к цели. В режиме поиска ведомые следуют вдоль стены препятствия в течение заданного количества времени, или до обнаружения потенциального прохода дальше, после чего посылают свои координаты лидеру.

Наиболее важной частью данной работы является поведение группы в момент попадания в локальный минимум.

Общая идея решения заключается в следующем: послать всех агентов-ведомых вдоль стен локального минимума (метод правой руки) в различных направлениях. После истечения определённого срока или нахождения нового потенциального пути, все ведомые посылают свои текущие координаты лидеру. Лидер собирает координаты ведомых, а также добавляет к ним ещё две точки. Первая – точка локального минимума[5], по сути – своё положение. Эта точка нужна для закрытия нижней части формируемой фигуры. Вторая нужна для закрытия верхней части фигуры, и вычисляется так:

Пусть заданы:

- $A$  – точка локального минимума (позиция лидера в момент застревания);
- $B_1, B_2$  – позиции двух ведомых, на основе которых вычисляется точка притяжения.

Тогда единая точка притяжения  $C$  определяется следующим образом:

Находим среднюю точку между двумя ведомыми:

$$M = B_1 + B_2$$

Определяем вектор от точки локального минимума к средней точке:

$$v = M - A$$

Находим перпендикулярный вектор в плоскости  $XZ$ :

$$v = -v_z \cdot 0 \cdot v_x$$

Нормализуем перпендикулярный вектор:

$$\hat{v} = v / |v|$$

Вычисляем точку  $C$ :

$$C = A + v_z + |v| \cdot 2 \cdot \hat{v}$$

Усредняем высоту точки С по высотам точки локального минимума и ведомых:

$$C_y = A_y + M_y^2$$

Таким образом, формируется замкнутая выпуклая фигура, состоящая из двух наборов полигонов, собранных вокруг одной из двух точек. Схематически, данный вариант для двухмерной среды можно представить следующим образом:

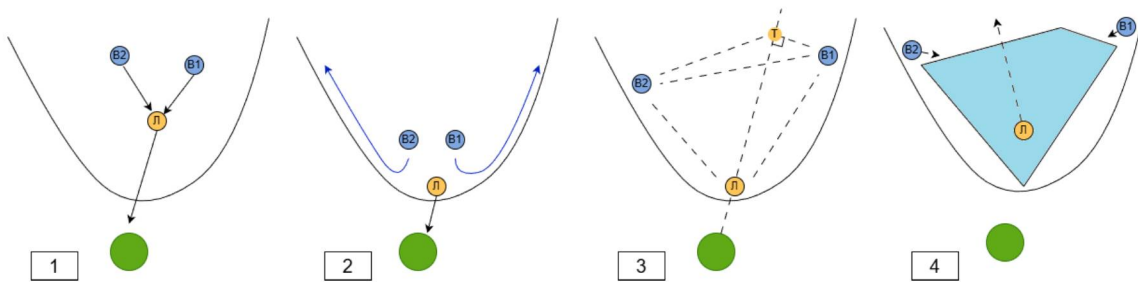


Рисунок 2. Двухмерная реализация метода полигонального заполнения

Эта конструкция обладает отталкивающим полем, и эффективно заполняет локальный минимум любой сложности, т.к опирается не на примитивы, а на замкнутую систему полигонов. Это позволяет избегать проблем, свойственных другим алгоритмам заполнения[6].

Выше на схемах показан максимально схематичный вариант. В действительности же описываемый подход предназначен в первую очередь для трёхмерных сред, где заполнение полигональными фигурами должно быть наиболее эффективным. Для этого была разработана тестовая среда с использованием языка C# (рисунок 3). Далее будет продемонстрирован алгоритм на практике во время одного из тестовых пусков.

На рисунке 2 видны препятствия, конечная точка в виде зелёного куба, и группа агентов: оранжевый – лидер, его пройденный путь, зона видимости, параметры, цель движения и т.д, а также светло-синие – ведомые. Также видны их вектора притяжения к лидеру и отталкивания друг от друга для избежания коллизий.

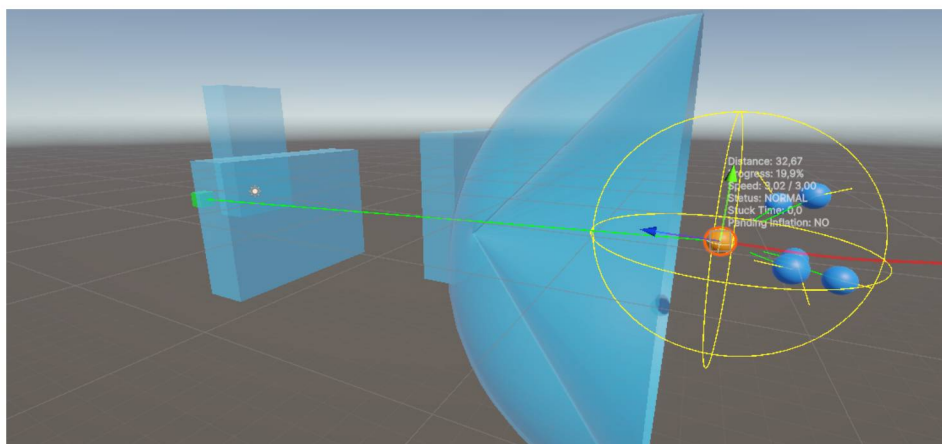


Рисунок 3. Работа трёхмерной среды

Когда лидер сталкивается с локальным минимумом, он переходит в режим ожидания, а все ведомые делят пространство на равные сектора и рассредотачиваются, ища выход, что показано на рисунке 4.

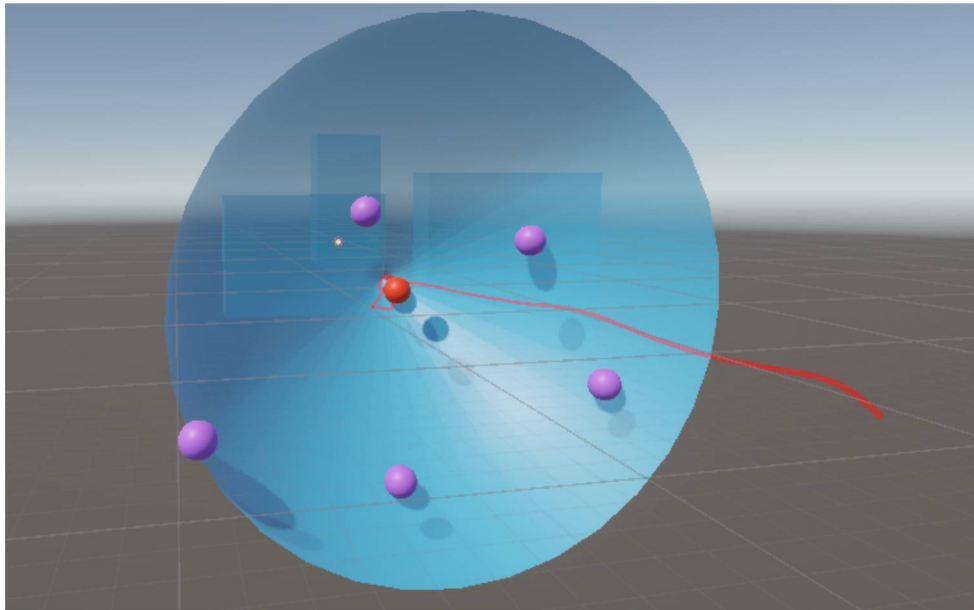


Рисунок 4. Группа в режиме поиска выхода из локального минимума

Как только выход будет найден, произойдёт заполнение пространства полигональной фигурой. Как только она будет создана, все ведомые перейдут обратно к режиму следования за лидером, что обеспечит сохранность группы как единой структуры. Сам же лидер, обретя опору в отталкивающем поле полигонального заполнения, продолжит свой путь к цели.

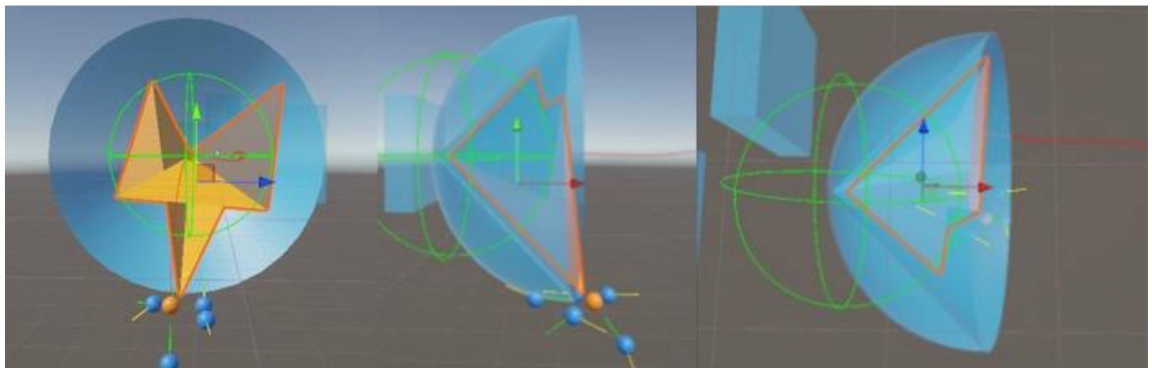


Рисунок 5. Полигональное заполнение в различных проекциях

Как видно на рисунке 5, даже одной итерации алгоритма хватило на то, чтобы практически полностью заполнить собой препятствие. Внешне может показаться, что заполнение недостаточно, и могут возникнуть новые локальные минимумы в местах, где не хватает заполненности, однако учитывая тот факт, что любая реализация метода потенциальных полей предполагает определённую «дальность видимости», то даже при таком заполнении вся группа сконцентрировано покинула локальный минимум. Для сравнения, вот примеры заполнения того же препятствия сфероидом (рисунок 6)

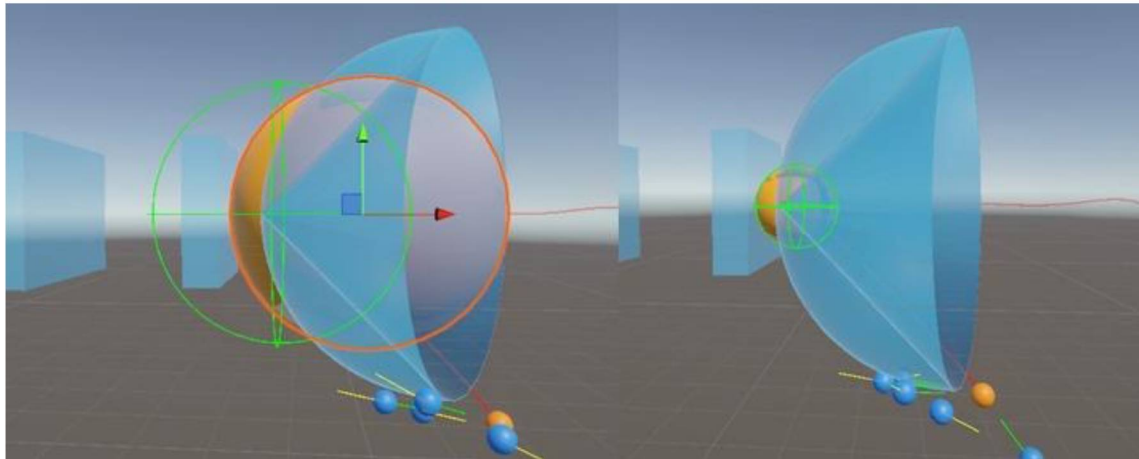


Рисунок 6. Пример заполнения локального минимума сфероидом

Как видно из рисунка, сфероиды, при всей их простоте, для подобного заполнения подходят гораздо меньше. Даже с учётом сдвига центра сферы от точки локального минимума[7], остались зоны, в которых может произойти застревание, а также, в силу особенностей формы, саму группу устройств может разбросать по окружности.

В действительности же заполнение сферами подразумевает куда меньшие диаметры для избежания случайных перекрытий маршрута, что кратно увеличивает время выхода из локального минимума[8,9].

Также демонстрируется ещё один минус.

Сфера перекрыла своим полем и часть пространства за препятствием, что может быть критичным в некоторых моментах.

**Эксперимент.** Реальную эффективность данного метода можно оценить только в сравнении с другими методами в трёхмерном пространстве.

Для этого было создано трёхмерное окружение, в котором были реализованы, помимо предлагаемого алгоритма, также алгоритм заполнения сфероидами со смещением.

Также, в связи с тем, что эффективность метода зависит от количества агентов в системе, было принято решение проводить замеры при разном количестве агентов.

Таким образом, были составлены следующие сценарии тестирования:

Таблица 1. Сценарии тестирования

№	Кол-во ведомых	Тип заполнения
1	3	сфероидный
2	3	полигональный
3	5	сфероидный
4	5	полигональный
5	8	сфероидный
6	8	полигональный

Основным оцениваемым параметром будет время, за которое лидер достигает конечной точки. Однако также будет оцениваться:

- Кол-во переключений в режим поиска выхода – насколько удачно метод позволяет покидать область локального минимума
- Кол-во потерь части группы – если один из агентов группы отдалится от лидера на достаточное расстояние, он будет считаться «утерянным»

Проведя для каждого сценария по пятьсот запусков, удалось получить следующие результаты (таблица 2).

Таблица 2. Результаты тестирования методов полигонального заполнения и заполнения сфероидами

№	Кол-во ведомых	Тип заполнения	среднее время, сек	процент запусков с потерянными агентами	среднее время итерации	итераций до выхода из минимума
1	3	сфероидный	27.21	7.44%	3.21	3.48
2	3	полигональный	19.92	0	4.81	1.32
3	5	сфероидный	27.92	8.68%	3.08	3.29
4	5	полигональный	20.04	0.8%	4.72	1.18
5	8	сфероидный	27.61	10.31%	3.35	3.52
6	8	полигональный	20.61	1.2%	5.01	1.06

**Анализ результатов и выводы.** Как видно из результатов тестирования, разработанный метод заполнения показывает устойчивое преимущество по ряду параметров для данной ситуации. При отсутствии глобального планировщика, адаптивная форма заполнения демонстрирует высокую степень отказоустойчивости, что и было одной из целей разработки данного метода.

Явно видно, что время одной итерации попытки выхода у предложенного метода больше, в первую очередь из-за того, что агентам-ведомым нужно время, чтобы продвинуться вдоль стен препятствия. Однако эффективность данной попытки ощутимо выше, чем у метода заполнения сферами.

Также из результатов тестирования видно, что хотя процент потерь агентов при использовании данного метода очень небольшой, он всё же есть. Отчасти он обусловлен острыми краями одного из элементов окружения, однако это всё ещё одно из направлений для дальнейших улучшений.

Также было замечено, что не смотря на увеличение количества агентов в группе, процент потерь агентов растёт не пропорционально количеству агентов. Это связано с тем, что большее количество агентов увеличивает и качество заполнения локального минимума, что уменьшает риск отсечения агента даже об острые края препятствия.

Перспективным направлением для дальнейшего развития данного метода является работа с положением агентов в пространстве, а не простое следование за лидером и отталкивание от других агентов.

Расположение агентов в заранее известном порядке позволит улучшить зону их покрытия, что должно повысить качество заполнения.

Также важным моментом является тот факт, что хотя данный метод показал высокую эффективность, универсальным он не является, и предназначен строго для систем, в которых количество агентов больше трёх, не считая лидера. В противном случае алгоритму просто не хватит точек для построения достаточного количества полигонов.

### Список литературы

- [1] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1986;5(1):90-98. DOI: 10.1177/027836498600500106.
- [2] Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. Cambridge: MIT Press; 2005. 632 p.
- [3] Baziyad M., Al Shohna M., Rabie T. The Bulldozer Technique: Efficient Elimination of Local Minima Traps for APF-Based Robot Navigation. *arXiv preprint arXiv:2512.23672*. 2025.
- [4] Barraquand J., Latombe J.C. Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach. *The International Journal of Robotics Research*. 1991;10(6):628-649. DOI: 10.1177/027836499101000604.
- [5] Kong H., Yang C., Liu J. A Hybrid Path Planning Method for Mobile Robot Based on Artificial Potential Field Method. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D., eds. *Intelligent Robotics and Applications – ICIRA 2019*. Cham: Springer; 2019. p. 325-331. (Lecture Notes in Computer Science; vol. 11741). DOI: 10.1007/978-3-030-27538-9\_28.
- [6] LaValle S.M. *Planning Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press; 2006. 842 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546877.
- [7] Desai J.P., Ostrowski J.P., Kumar V. Modeling and Control of Formations of Nonholonomic Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2001;17(6):905-908. DOI: 10.1109/70.976023.
- [8] Ge S.S., Cui Y.J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2000;16(5):615-620. DOI: 10.1109/70.880813.
- [9] Zhou Y., Li X., Zhang J. A Review on Local Minimum and Multiple Minimum Avoidance Techniques in Local Path Planning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021;102(1):25. DOI: 10.1007/s10846-021-01368-6.

### Авторский вклад

**Васяева Татьяна Александровна** – руководство исследованием, подбор метрик, участие в проведении анализа полученных данных

**Мельник Пётр Георгиевич** – реализация тестового окружения и алгоритмической базы, разработка метода полигонального заполнения

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE POTENTIAL FIELD METHOD IN GROUP CONTROL THROUGH POLYGONAL FILLING AND DISTRIBUTED PATHFINDING

**T.A. Vasiaeva**

*Dean of the Faculty of Information  
Systems and Technologies,  
Associate Professor of the  
Department of Automated Control  
Systems of DONNTU, PhD of  
Technical Sciences, Associate  
Professor*

**P.G. Melnik**

*Postgraduate student of the department  
automated  
DONNTU control systems  
illuzium1999@gmail.com*

**Abstract:** A mechanism for polygonal filling of local minima for a multi-agent system has been developed, replacing the traditional construction of planes or Gaussian spheroids. This mechanism guarantees the integrity of the group when exiting a local minimum.

**Keywords:** potential fields, group control, local minimum, master-slave architecture, polygonal filling, distributed pathfinding, 3D navigation, autonomous agents.