

**НАВИГАЦИЯ ГРУППИРОВКИ РОБОТОВ:
НАПРАВЛЕННЫЙ И НЕНАПРАВЛЕННЫЙ МЕТОДЫ
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ**

Ф. Е. Шнайдер, Д. Вильдермут

Research Establishment for Applied Sciences (FGAN), Wachtberg, Germany

E-mail: schneid1@fgan.de

E-mail: dennis@fgan.de

Предложен модифицированный метод потенциального поля для координирования движений роботов внутри группировок мультироботных систем. Приведен краткий сравнительный анализ работ, имеющих отношение к данному методу. Представлено решение задачи управления движением группировки роботов с использованием направленного метода потенциального поля. Для обеспечения движения каждого робота к заданному положению внутри группировки используются силы взаимодействия с другими роботами и препятствиями. Во время движения группировка роботов способна избегать препятствий и двигаться в направлении заданной цели. Приведены результаты экспериментов, иллюстрирующие отличия и преимущества данного метода по сравнению с классическим подходом.

Введение. В последние годы возможность применения активных роботосистем постоянно растет. Очевидно, что для наиболее эффективного выполнения различных задач необходима скоординированная работа группы роботов, например формирование заданного расположения роботов внутри группы, а также сохранение такой структуры во время движения.

В зависимости от задачи требования к управлению группировкой роботов могут варьироваться. В то время как задача, связанная, например, с транспортировкой, требует строгой расстановки роботов внутри группы с целью равномерного распределения нагрузки, другие задачи, такие как поиск и наблюдение, – лишь относительно равномерного распределения роботов по заданному участку. Задачи сопровождения или разминирования требуют построения группировки роботов, но допускают временное искажение или разделение структуры группировки, например, при прохождении препятствий.

В работе описан модернизированный подход к управлению группировкой роботов, основанный на классическом методе потенциального поля. Предложенный направленный метод потенциального поля позволяет управ-

лять группировкой роботов при наличии помех, а также искажений структуры группировки. Метод дает возможность поддерживать необходимую конфигурацию роботов внутри группировки без ограничения характерных свойств метода потенциального поля.

Описанные в литературе различные подходы к формированию и сохранению группировки роботов в основном не рассматривают проблему преодоления препятствий. Примерами таких подходов являются работы [1–3], в которых используются взаимодействие с соседними агентами и математическая модель координирующей стратегии «лидер–ведомый». В [3] проблема формирования группировки рассматривается с точки зрения распределенных алгоритмов, использующих модели роботов с идеальными характеристиками. В [4] и ряде других работ авторы улучшают эти алгоритмы с целью их применения к роботам с реальными физическими параметрами и предлагают метод для обеспечения движения группировки мобильных роботов [5]. В работе [6] определяется потенциальное поле в пространстве между соседними роботами, обеспечивающее движение роботов к заданному положению внутри группировки.

В работе [7] рассматривается баланс между заданной программой движения робота и его реакцией на изменение ситуации во время движения группировки роботов. Сценарий движения, включающий в себя информацию о целях и препятствиях, должен повлиять на поведение робота при обходе препятствий. В [8] предлагается поведенческий подход для сохранения группировки роботов. В [9] подход дополняется введением двигательной схемы на основе метода потенциального поля, которая может использоваться для задания равномерных и структурированных «геометрических» группировок роботов.

Предложенный метод имеет условия, аналогичные рассматриваемым в поведенческой модели из [3], в которой допускается частичное нарушение конфигурации группировки при преодолении препятствий; для роботов определяются заданные относительные положения, и используется виртуальное потенциальное поле для обеспечения движения роботов к заданному положению внутри группировки. Ключевое отличие состоит в том, что в нашем методе для каждого робота определено положение внутри группировки, в то время как в модели [3] роботы могут быть распределены случайным образом внутри группировки. Кроме того, в методе [3] возможно задание только однородной в пространстве группировки, что обусловлено заданием одинаковых для каждого робота относительных положений (называемых местами присоединения) внутри группировки. В нашем методе возможно задание любой конфигурации группировки.

В работе [10] предложен метод потенциального поля, в котором группировка роботов достигает заданной конфигурации в определенной (целевой) точке пространства. В методе не рассматривается движение группировки как единого целого, а предполагаются только неподвижные препятствия. В отличие от нашего метода в работе [10] у робота внутри группировки нет заданного положения.

1. Потенциальное поле. Если нет жестких ограничений на конфигурацию группировки и допускается ее изменение при наличии препятствий, то можно выделить два фактора, влияющих на траекторию движения каждого робота: обход препятствий и поддержание заданного положения в группировке. Очевидно, что эти два требования вступают в противоречие при рассмотрении различных видов препятствий, таких как дверные проемы или уз-

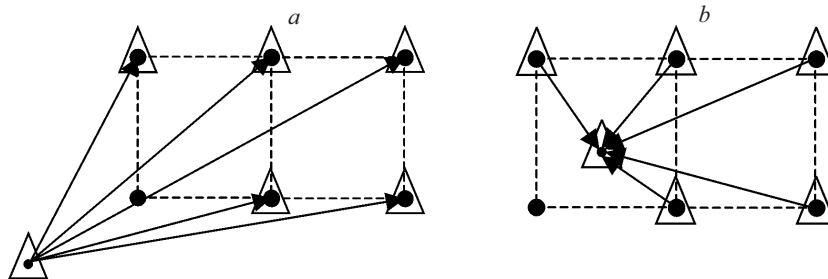


Рис. 1. Расположение робота: вне (a) и внутри (b) прямоугольной группировки

кие коридоры. В этих случаях для продолжения движения без нарушения конфигурации группировки может потребоваться обходная траектория движения. В данной работе используется метод потенциального поля, предложенный в [11], где для каждого робота определяется положение внутри группировки. Как дополнение к методу, описанному в [6], применяются не только силы для формирования конфигурации группировки, но также дополнительные типы сил для получения ее большей функциональности и универсальности.

Метод потенциального поля для управления группировкой роботов основан на утверждении, что источниками сил, воздействующих на робота, могут являться не только препятствия и цели [12]. Ключевая идея метода состоит в том, что каждый робот в группировке может отталкиваться от других роботов или притягиваться к ним. Такие виртуальные силы могут использоваться для сохранения заданной конфигурации группировки роботов.

На рис. 1, a изображен робот, находящийся вне группировки. Силы притяжения к другим роботам будут «тянуть» робота в направлении к группировке. В то же время силы притяжения остальных роботов к данному роботу будут вызывать движение всей группировки к позиции робота. Если он подойдет слишком близко к группировке, то силы отталкивания от других роботов будут его «отталкивать» (рис. 1, b). В обоих случаях силы вызовут движение робота и остальной части группировки в направлении заданной конфигурации. Также необходимо рассмотреть две дополнительные силы, действующие во время формирования группировки и ее движения: отталкивание от препятствий и притяжение к заданному положению.

1.1. *Силы формирования группировки в классическом представлении.* Пусть $p_i \in \mathbb{R}^2$, $i=1, \dots, n$, – координаты n роботов в группировке в произвольной декартовой системе координат T_F . Также пусть $x_i \in \mathbb{R}^2$, $i=1, \dots, n$, – текущие координаты роботов в некоторой абсолютной системе координат T_W . Простой способ определения потенциального поля для заданной конфигурации группировки состоит в задании для каждой пары роботов k и j величины

$$\hat{p}_{j,k} = x_k + (x_k - x_j) \left(1 - \frac{\|p_k - p_j\|}{\|x_k - x_j\|} \right). \quad (1)$$

Согласно такому определению для вычисления сил формирования группировки принимается во внимание только расстояние между роботами j и k в заданной конфигурации. Если положить

$$U_{\text{form}, j}^k(x) = \frac{1}{2} \xi \|x - \hat{p}_{j, k}\|^2, \quad (2)$$

где $U_{\text{form}, j}^k : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $j = 1, \dots, k-1, k+1, \dots, n$, и ξ – постоянный нормирующий коэффициент, то можно определить формирующий потенциал $U_{\text{form}}^k : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ для каждого робота k в виде

$$U_{\text{form}}^k(x) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_{\text{form}, j}^k(x). \quad (3)$$

Таким образом, сила $F_{\text{form}}^k : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, действующая на робота k с координатами x , имеет вид

$$F_{\text{form}}^k(x) = -\nabla U_{\text{form}}^k(x) \quad (4)$$

и может быть вычислена следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{\text{form}}^k(x, y) &= \begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial x} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_{\text{form}, j}^k(x, y) \\ -\frac{\partial}{\partial y} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n U_{\text{form}, j}^k(x, y) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} \xi \|(x, y) - \hat{p}_{j, k}\|^2 \\ -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{2} \xi \|(x, y) - \hat{p}_{j, k}\|^2 \end{pmatrix}^T = \\ &= \begin{pmatrix} -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{2} \xi [(x - \hat{x}_{j, k})^2 + (y - \hat{y}_{j, k})^2] \\ -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{2} \xi [(x - \hat{x}_{j, k})^2 + (y - \hat{y}_{j, k})^2] \end{pmatrix}^T. \end{aligned}$$

Отсюда окончательно приходим к выражению

$$F_{\text{form}}^k(x, y) = \xi \begin{pmatrix} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (\hat{x}_{j, k} - x) \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (\hat{y}_{j, k} - y) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $(\hat{x}_{j, k}, \hat{y}_{j, k}) := \hat{p}_{j, k} \in \mathbb{R}^2$, как дано в (1).

Из определения $\hat{p}_{j, k}$ следует, что при вычислении силы формирования группировки не используется информация об ориентации робота в пространстве. Результирующая формирующая сила зависит от расстояния меж-

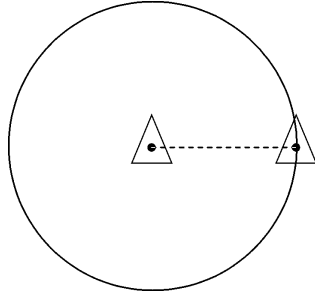


Рис. 2. Возможное расположение в ненаправленной группировке из двух роботов

ду двумя роботами в группировке и при этом является ненаправленной, также как силы притяжения или отталкивания между двумя роботами. Следствием этого является, например, тот факт, что группировка, состоящая из двух роботов, может занимать любое положение в пространстве, как показано на рис. 2.

1.2. *Направленные силы формирования группировки.* В отличие от метода, описанного выше, для вычисления формирующих сил может быть использована информация об ориентации роботов в пространстве (рис. 3).

Независимо от расположения T_F относительно абсолютной системы координат T_W можно рассмотреть положение любого робота относительно робота k . Допустим, что робот j уже достиг заданного положения, тогда ожидаемое целевое положение $\hat{p}_{j,k}$ робота k относительно робота j имеет вид

$$\hat{p}_{j,k} = x_j + \begin{pmatrix} \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix} (p_k - p_j). \quad (6)$$

Угол ω может быть определен различными способами. Если рассматривать «свободно двигающихся» роботов, способных сканировать окружающее пространство в направлении, не совпадающем с направлением собственного движения, то угол ω находится как

$$\omega = \varphi_{\text{act}, k} - \varphi_{\text{form}, k}, \quad (7)$$

где $\varphi_{\text{act}, k} \in [0; 2\pi)$ – угол, определяющий текущую ориентацию робота в пространстве k , и $\varphi_{\text{form}, k}$ – угол, определяющий ориентацию робота в целевой конфигурации. Этот подход может быть использован, когда задачей является только формирование группировки и не требуется сохранение конфигурации группировки во время движения.

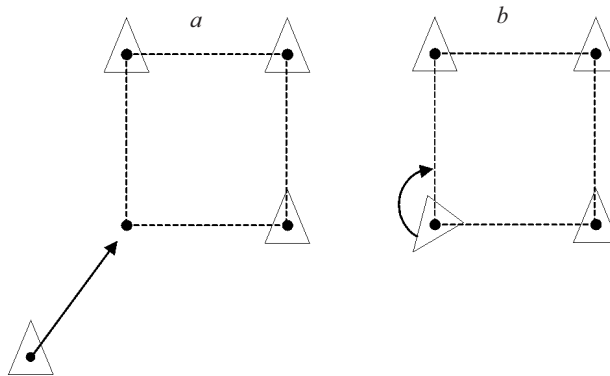


Рис. 3. Силы, действующие на робота в группировке: зависящие от положения (a) и ориентации (b)

Поскольку большинство моделей роботов (например, B21 фирмы “iRobot”), способных двигаться в любом направлении, осуществляют движение вперед или назад вдоль направления, совпадающего с осью области видимости, то угол ω определяется иначе и для существующей реализации нашего метода вычисляется как

$$\omega = \varphi_{\text{act}, k} - \varphi_{\text{goal}, k}, \quad (8)$$

где $\varphi_{\text{act}, k}$ находится так же, как в (7), и $\varphi_{\text{goal}, k}$ – угол, определяющий направление на заданное положение относительно робота k . Такой способ задания угла приводит к весьма устойчивым результатам, что подтверждают результаты экспериментов, приведенные далее.

Значение $\hat{p}_{j, k}$, заданное формулой (6), может быть использовано совместно с выражением (2) для определения потенциала U_{form}^k для каждого робота k . Из выражения (4) можно найти результирующие силы формирования группировки.

Итак, для каждого робота силы притяжения или отталкивания, обеспечивающие формирование группировки, вычисляются с использованием положения и ориентации в пространстве других роботов.

1.3. *Силы взаимодействия с препятствиями и целями.* Рассмотрим силы отталкивания от препятствий (или других роботов) и силы притяжения группировки к заданному положению в пространстве.

Пусть множество $H \subset \mathbb{R}^2$ является набором координат всех препятствий, тогда для всех точек $x \in \mathbb{R}^2 - H$, находящихся вне препятствий, потенциал отталкивания $U_{\text{rep}}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ имеет вид

$$U_{\text{rep}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\delta(x)} - \frac{1}{\delta_0} \right)^2, & \text{если } \delta(x) \leq \delta_0; \\ 0, & \text{если } \delta(x) > \delta_0, \end{cases} \quad (9)$$

где $\delta(x) := \min_{x' \in H} \|x - x'\|$ – минимальное расстояние до препятствия и δ_0 – максимальное расстояние, определяющее область воздействия препятствия. Соответственно для силы отталкивания $F_{\text{rep}}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, действующей на робота k с координатой x , выполняется $F_{\text{rep}}(x) = -\nabla U_{\text{rep}}(x)$, где

$$F_{\text{rep}}(x) = \begin{cases} \left(-\frac{\partial}{\partial x} U_{\text{rep}}(x), -\frac{\partial}{\partial y} U_{\text{rep}}(x) \right), & \delta(x) \leq \delta_0; \\ 0, & \delta(x) > \delta_0, \end{cases} = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\delta(x)} - \frac{1}{\delta_0} \right) \frac{1}{\delta^2(x)} \nabla \delta(x), & \delta(x) \leq \delta_0; \\ 0, & \delta(x) > \delta_0. \end{cases} \quad (10)$$

В нашей реализации использован упрощенный метод вычисления сил отталкивания, который представляет собой модификацию подхода [11]. Данные, полученные от сенсоров, напрямую преобразуются в соответствующие силы

отталкивания, которые масштабируются в зависимости от расстояния и затем суммируются. Этот способ, естественно, является математически некорректным, но дает удобное для использования приближение.

Вычисление силы, обеспечивающей движение к заданному положению, аналогично вычислению силы формирования группировки. Пусть $z := (x_z, y_z) \in \mathbb{R}^2$ является целевым положением. Тогда соответствующее потенциальное поле определяется как преобразование $U_{\text{att}} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$:

$$U_{\text{att}}(x) = \frac{1}{2} \zeta \|x - z\|^2, \quad (11)$$

где $\zeta \in \mathbb{R}$ – положительная масштабирующая константа. Для результирующей силы притяжения $F_{\text{att}} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, влияющей на робота с координатой x , выполняется

$$F_{\text{att}}(x) = -\nabla U_{\text{att}}(x), \quad (12)$$

откуда

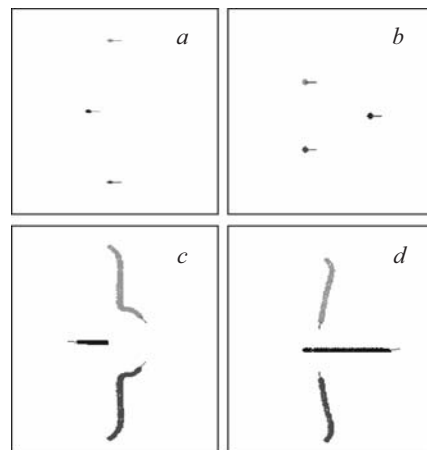
$$F_{\text{att}}(x, y) = \left(-\frac{\partial}{\partial x} U_{\text{att}}(x, y), -\frac{\partial}{\partial y} U_{\text{att}}(x, y) \right) = \zeta(x_z - x, y_z - y). \quad (13)$$

Таким образом, общая результирующая сила $F_k(x) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, действующая на робота k с координатой x , имеет вид

$$F_k(x) = F_{\text{form}}^k(x) + F_{\text{rep}}(x) + F_{\text{att}}(x). \quad (14)$$

2. Экспериментальные результаты. Для проверки применимости предложенных методов на практике проведены эксперименты с помощью программы моделирования [13]. В данной программной среде полностью моделируется группа физических роботов, включая их динамику, одометрическую ошибку и сканирование лазерным сенсором. Промоделирован ряд заданий, выполняемых группировкой, для демонстрации как возможности использования предложенных методов, так и различия между методами.

2.1. *Формирование группировки.* На рис. 4, *a–d* изображена группировка из трех роботов; при движении роботов не учитывается сила притяжения к целевому положению.



Начиная движение с исходных позиций (см. рис. 4, *a*), роботы должны сформировать треугольную конфигурацию (см. рис. 4, *b*). На рис. 4, *c* приведен результат для ненаправленного метода. Так как для формирования заданной конфигурации используются только расстояния между роботами и

Рис. 4. Пример образования группировки из трех роботов

робот, находящийся посередине, начинает движение из позиции, расположенной немного левее, чем позиции двух других роботов, то окончательная конфигурация группировки является зеркальным отражением целевой конфигурации. На рис. 4, *d* изображены результаты для направленного метода: три робота сходятся точно в заданную конфигурацию, так как при вычислении сил формирования используется текущая ориентация в пространстве каждого робота.

2.2. *Движение группировки.* На рис. 5, *a–c* изображен более сложный пример движения роботов. Целевая конфигурация состоит из трех роботов, расположенных на прямой. В начальный момент времени каждый робот ориентирован в направлении первой цели. Группировка движется к этой цели, и непосредственно перед ее достижением задается новая цель. Это повторяется трижды, чтобы дать возможность группировке двигаться вдоль прямоугольной траектории.

На рис. 5, *a* приведены результаты для ненаправленного метода. Линейная группировка не поворачивается при движении по прямоугольной траектории, так как в вычислениях не используется ориентация роботов в пространстве. На рис. 5, *b* изображены результаты для направленного метода. Как утверждалось в разд. 1.2, направление на цель учитывается в вычислении сил формирования группировки. В результате роботы всегда пытаются сохранить начальную конфигурацию, т. е. располагаются на линии, направленной на целевую позицию. Естественно, это приводит к некоторым локальным возмущениям траектории движения роботов, которые можно видеть в каждом углу прямоугольной траектории, при изменении целевой позиции. Первый и последний роботы вынуждены менять свое положение, а робот, находящийся посередине, при этом только поворачивается. Схематический план движения группировки приведен на рис. 5, *c*.

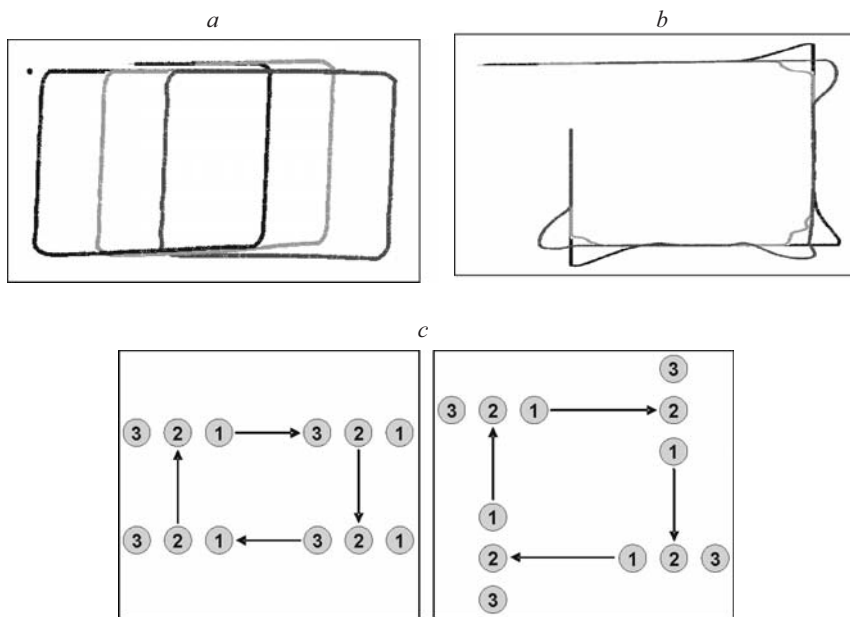


Рис. 5. Движение группировки типа линия, состоящей из трех роботов, по прямоугольному пути

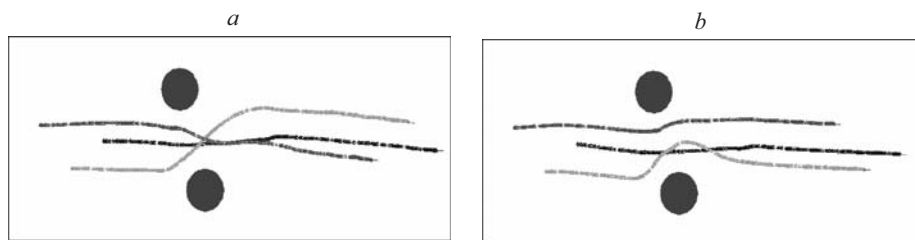


Рис. 6. Движение группировки при наличии препятствий

С одной стороны, очевидно, что от приложения зависит, какой из типов поведения является предпочтительным. Если в группировке роботов есть взаимодействие вида «лидер–ведомый», то на агента-лидера может быть наложено требование оставаться в неизменном положении относительно направления движения. С другой стороны, в задачах транспортировки или в случае симметричной конфигурации (например, окружности) расположение каждого робота в отдельности может быть менее важным.

2.3. *Группировки и препятствия.* На рис. 6, *a, b* изображен пример движения группировки роботов к заданному положению по траектории с двумя препятствиями. Конфигурация группировки задана в виде неправильного треугольника, и целевое положение находится в правой части рисунков.

Использование направленного метода (см. рис. 6, *b*) приводит к ожидаемым результатам: препятствия в виде двух окружностей вызывают локальные отклонения в группировке роботов, которые корректируются формирующими силами вскоре после прохождения препятствий. В большинстве случаев ненаправленный метод дает более или менее похожие результаты. Однако в некоторых случаях влияние одного из препятствий приводит к полному изменению конфигурации группировки.

Пример такого влияния изображен на рис. 6, *a*. Силы взаимодействия с нижним препятствием вызывают отклонение нижнего робота вверх. Поскольку в то же самое время другое препятствие вызывает отклонение верхнего робота в противоположном направлении, то устанавливается конфигурация группировки, отличная от начальной даже в терминах расстояний между роботами. Нижний робот занимает верхнее положение. Так как любая конфигурация группировки с одинаковыми расстояниями между роботами считается корректной, робот, ранее занимавший нижнюю позицию, теперь «перескакивает» на верхнюю. Из рисунка видно, что через некоторое время конфигурация группировки вновь сходится к устойчивой треугольной конфигурации.

На рис. 7 изображены экспериментальные результаты для группировки, состоящей из трех роботов, расположенных в треугольной конфигурации, идвигающейся слева направо.

На траектории движения группировки расположено препятствие в форме ворот. В этом случае используется направленный метод, в результате которого можно выделить две особенности. Во-первых, роботы остаются в позициях, соответствующих целевой конфигурации. При использовании простого ненаправленного подхода они, как правило, меняют свое положение в группировке при прохождении препятствия. Во-вторых, деформация группировки имеет вид только кратковременного сжатия, что хорошо видно

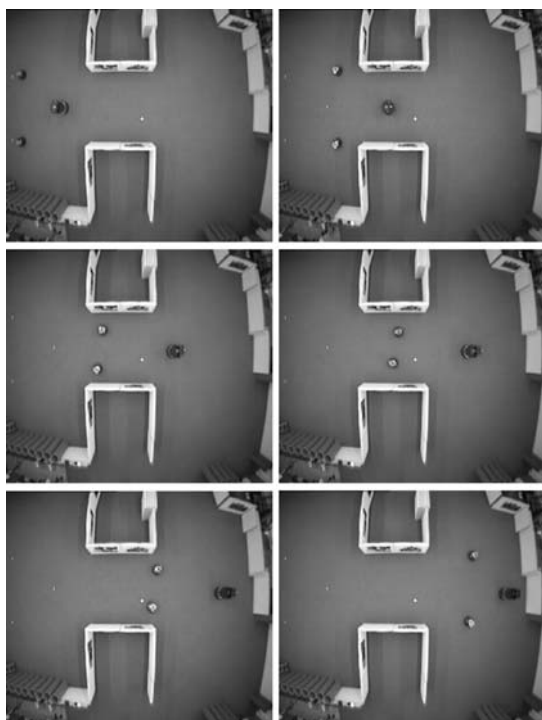


Рис. 7. Движение трех роботов в треугольной конфигурации слева направо через препятствие в виде узких ворот (последовательные фазы движения упорядочены от верхнего левого рисунка к нижнему правому)

на рис. 8. На этом рисунке схематически изображены траектории движения каждого из трех роботов.

При использовании ненаправленного метода изменение конфигурации группировки имеет более неравномерный характер, и в большинстве случаев конфигурация не сходится к заданной.

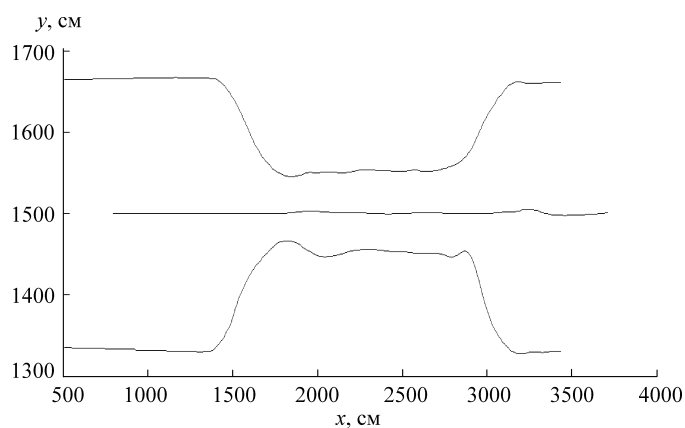


Рис. 8. Диаграмма траекторий, показывающая возмущения в группировке при прохождении препятствия

Заключение. В работе кратко сравниваются классический (ненаправленный) и модифицированный (направленный) методы потенциального поля в задаче управления группировкой роботов. Результаты экспериментов показывают, что применение направленного метода потенциального поля приводит к ожидаемому характеру движения роботов в группировке. Как правило, предполагается наличие некоторого порядка в расположении роботов в группировке. Ненаправленный метод не может гарантировать выполнение этого условия.

Однако следует заметить, что оба подхода применимы в зависимости от условий задачи. Несмотря на то что траектории движения роботов при использовании ненаправленного метода иногда выглядят необычно, применение этого подхода приводит к уменьшению суммарного пройденного расстояния для группировки роботов. Кроме того, усредненное отклонение от целевой конфигурации группировки, как правило, меньше, чем в направленном методе. Точная оценка этих эффектов будет сделана в последующих работах.

Направленный метод потенциального поля работоспособен в моделировании и в натурном эксперименте, что отражено в работах [14, 15]. Получены устойчивые результаты в управлении конфигурацией группировки роботов в присутствии препятствий и без них, для различных конфигураций и различного числа роботов в группировке. Кроме того, простота метода позволяет применять его в режиме реального времени.

В дальнейшем планируется сравнить предложенный в данной работе метод с различными подходами к управлению группировкой роботов, описанными в [8–10].

Наконец, остается открытым вопрос об использовании величины сил формирования группировки для вычисления ускорения и скорости роботов. Это может решить задачу рассеянных группировок, часто имеющих место в условиях помех, и неоднородных групп роботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wang P. K. C.** Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation // *Journ. Robotic Systems*. 1991. **8**, N 2. P. 177.
2. **Ando H., Suzuki I., Yamashita M.** Formation and agreement problems for synchronous mobile robots with limited visibility // *Proc. of Intern. Symp. on Intelligent Control*. Monterey, 1995. P. 453.
3. **Suzuki I., Yamashita M.** A theory of distributed anonymous mobile robots – formation and agreement problems // *Techn. Report TR-94-07-01*. University of Wisconsin, Milwaukee, 1994.
4. **Chen Q., Luh J. Y. S.** Distributed motion coordination of multiple robots // *Proc. of Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Federal Armed Forces University Munich, 1994. P. 1493.
5. **Chen Q., Luh J. Y. S.** Coordination and control of small mobile robots // *Proc. of 11th IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. San Diego, 1994. P. 2315.
6. **Yamaguchi H., Arai T.** Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group // *Proc. of Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Federal Armed Forces University Munich, 1994. P. 800.
7. **Parker L. E.** Designing control laws for cooperative agent teams // *Proc. of 10th IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. Atlanta, 1993. P. 582.

8. **Balch T., Arkin R. C.** Behavior-based formation control for multiagent robot teams // IEEE Trans. Robotics and Automation. 1999.
9. **Balch T., Hybinette M.** Social potentials for scalable multi-robot formations // Proc. of the 2000 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. San Francisco, 2000. P. 73.
10. **Song P., Kumar V.** A potential field based approach to multi-robot manipulation // Proc. of the 2002 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Washington, 2002. P. 870.
11. **Koren Y., Borenstein J.** Potential field method and their inherent limitations for mobile robot navigation // Proc. of 8th IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Sacramento, 1991. P. 1398.
12. **Borenstein J., Koren Y.** Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments // Proc. of 7th IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Cincinnati, Ohio, 1990. P. 572.
13. **Schneider F. E., Wildermuth D.** Simulation von mehrrobotersystemen // 13 Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (AMS). Stuttgart, Germany, 1997.
14. **Schneider F. E., Wildermuth D.** Motion coordination for formations of multiple mobile robots // 3rd Intern. Conf. on Field and Service Robotics (FSR). Helsinki, Finland, 2001.
15. **Schneider F. E., Wildermuth D.** A potential field based approach to multi robot formation navigation // 1st European Conf. on Mobile Robots (ECMR). Warsaw, Poland, 2003.

Поступила в редакцию 30 сентября 2005 г.
