

АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В СРЕДЕ С ИЗВЕСТНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПРЕПЯТСТВИЙ ПО ПОКАЗАНИЯМ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ И ОДОМЕТРИИ

Огородников О.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
o.v.ogorodnikov@gmail.com

Аннотация. Предложен метод коррекции положения и курса мобильного робота, перемещающегося в среде с известным положением препятствий, и оснащенного набором лазерных дальномеров и одомером. Преимуществами рассматриваемого алгоритма являются низкие требования к вычислительной мощности бортового компьютера и возможность применения лазерных дальномеров вместо дорогостоящего лидара.

Ключевые слова: мобильный робот, алгоритм навигации, лазерный дальномер, среда с препятствиями, коррекция положения.

Введение

В настоящее время все большее применение получают автономные мобильные роботы различного назначения. Наиболее популярными алгоритмами автономной навигации таких роботов являются SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) алгоритмы [1, 2], которые выполняют одновременное построение карты окружения и определение положения относительно элементов окружения. Такого вида алгоритмы требуют для работы данные от лазерного сканера (лидара), который передает на вход алгоритма массив расстояний до препятствий, находящихся в зоне видимости робота.

Также широкое распространение получили алгоритмы визуальной навигации (vSLAM - visual Simultaneous Localization and Mapping) [3, 4], в которых вместо лазерного сканера применяется камера. Среди преимуществ методов SLAM и vSLAM отсутствие требований к установке специальных маяков или инфраструктуры, гибкость и масштабируемость (может быть применен в различных средах и на различных платформах, включая роботов, автономные транспортные средства, гарнитуры дополненной реальности и т.д.). Основные недостатки: высокие вычислительные требования, восприимчивость к условиям освещения и текстуре поверхности (для vSLAM) и к отражающей способности поверхности (для SLAM). Для функционирования таких алгоритмов на борту робота в режиме реального времени требуются компактные вычислительные устройства с вычислительной мощностью порядка той, которой обладают одноплатные компьютеры Raspberry Pi.

Наряду с лидаром и одомером мобильный робот может быть оснащен магнитометром, барометром (позволяет определять положение по высоте), ультразвуковым датчиком и т.д. Все перечисленные устройства позволяют роботу ориентироваться и строить маршрут в неизвестной среде.

Альтернативным является подход, в котором для определения текущего местоположения применяются различные метки (RFID, NFC), размещенные в виде сетки на поверхности, либо данные о Bluetooth, WiFi и GPS сигналах [5,6,7,8]. Преимущества такого подхода составляют: отсутствие высоких вычислительных требований, высокая точность позиционирования, широкая доступность перечисленных технологий и их дешевизна. К недостаткам можно отнести ограниченность области определения местоположения (при использовании меток, Bluetooth, WiFi), интерференция сигналов и отражение сигнала от препятствий (для Bluetooth, WiFi и GPS).

В данной работе предлагается алгоритм навигации мобильного робота, укомплектованного набором лазерных дальномеров (ЛД), одомером и маломощным контроллером. Так как в ряде случаев (например, офисные помещения) карта окружения известна заранее, а препятствия могут быть заданы набором отрезков (при перемещении на плоскости), то задачу навигации можно решать более простым алгоритмом, требующим меньшие вычислительные мощности и меньший массив показаний от лазерного сканера. В перспективе это дает возможность заменить лазерный сканер и мощный бортовой вычислитель набором более дешевых лазерных дальномеров и менее мощным контроллером без потери быстродействия и точности позиционирования.

1. Постановка задачи

Рассматривается колесный робот, оборудованный одометрическими датчиками и набором лазерных дальномеров, предназначенных для измерения расстояния до препятствий (Рис. 1). Робот перемещается по плоской поверхности в помещении, где известно положение препятствий, таких как стены, предметы мебели, оборудование и др. Препятствия аппроксимируются с использованием

набора отрезков прямых линий и задаются в виде пар точек вида $\{(x_i, y_i); (x_{i+1}, y_{i+1})\}$. Одометрический датчик позволяет определить положение робота. Однако в процессе эксплуатации показания одометрии накапливают значительную ошибку, которую предлагается корректировать, используя данных от лазерных дальнометров.

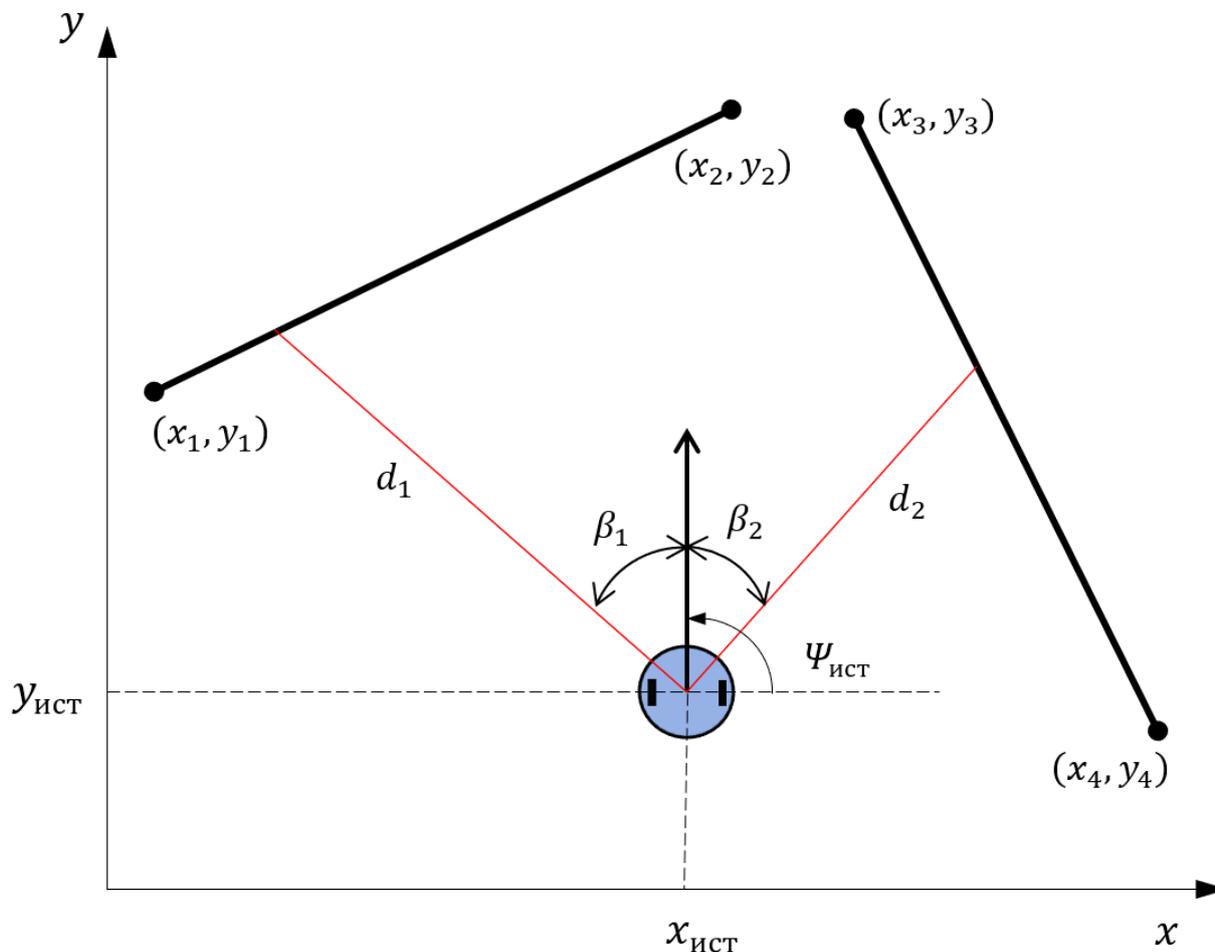


Рис. 1. Пример колесного робота, оснащенного лазерными дальнометрами

На Рис. 1 линиями показаны препятствия, отмечен колесный робот и обозначены лучи лазерных дальнометров длиной d_1 и d_2 , установленные под углами β_1 и β_2 относительно направления взгляда робота. Предполагается, что истинные координаты $(x_{\text{ист}}, y_{\text{ист}})$ и курс $\psi_{\text{ист}}$ робота известны с некоторой погрешностью, т.е. $x_{\text{ист}} \in [x_0 - \Delta x, x_0 + \Delta x]$, $y_{\text{ист}} \in [y_0 - \Delta y, y_0 + \Delta y]$, $\psi_{\text{ист}} \in [\psi_0 - \Delta \psi, \psi_0 + \Delta \psi]$, где x_0 , y_0 , и ψ_0 – оценка координат и курса робота по показаниям одометрических датчиков, Δx , Δy и $\Delta \psi$ – величины погрешности определения положения и курса по одометрическим датчикам.

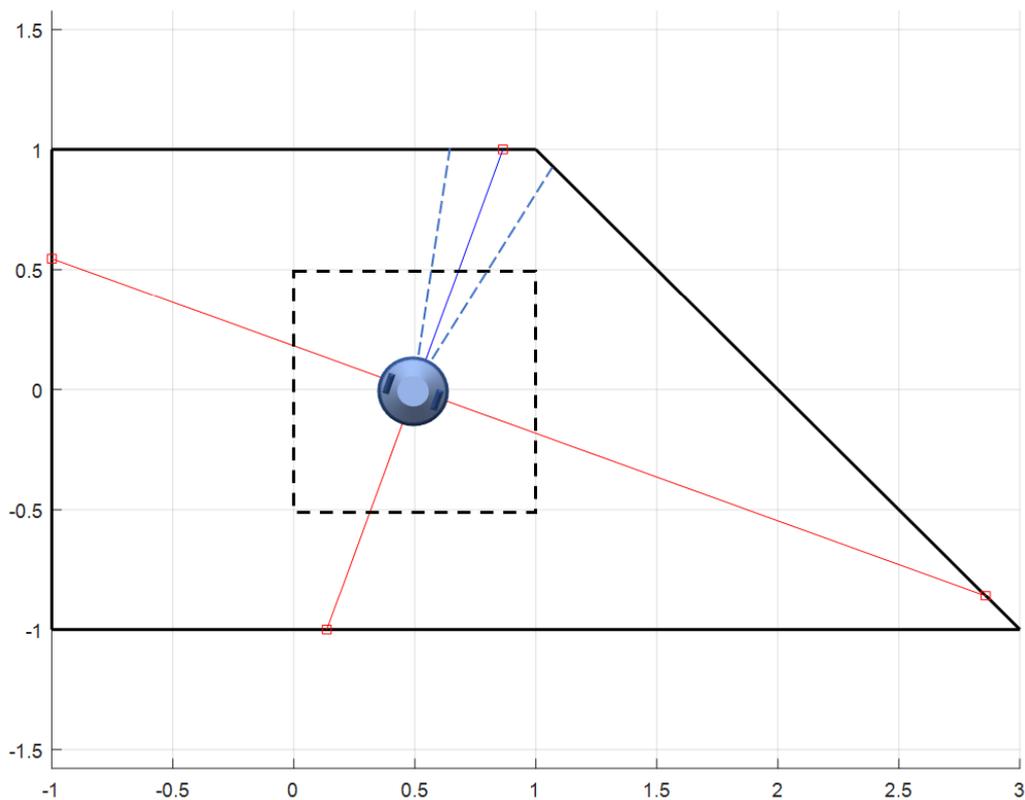


Рис. 2. Геометрическое изображение погрешность координат и курса

На Рис. 2 изображен колесный робот, оснащенный 4 лазерными дальномерами. Синий луч ЛД со направлен с направление движения робота, синим пунктиром показано максимальное отклонение по курсу Ψ . Черным пунктиром отмечена область поиска истинного положения робота. Граница области показывает максимальное отклонение по x и y .

2. Описание алгоритма

2.1. Расстояние до препятствия

Найдем зависимость между расстоянием до препятствия d , углом ориентации луча лазерного дальномера $\alpha = \beta + \Psi_{\text{ист}}$ в глобальной системе координат, положением робота $(x_{\text{ист}}, y_{\text{ист}})$ и коэффициентами A, B, C прямой, описывающей препятствие. Линия, соответствующая лучу лазерного дальномера:

$$\begin{aligned} A_{ray}x + B_{ray}y + C_{ray} &= 0, \\ A_{ray} &= \sin(\alpha), \\ B_{ray} &= -\cos(\alpha), \\ C_{ray} &= y_{\text{ист}} \cos(\alpha) - x_{\text{ист}} \sin(\alpha), \end{aligned}$$

где α - направление луча в глобальной системе координат относительно оси абсцисс.

Если препятствие также описать в виде прямой $Ax + By + C = 0$, то координаты точки пересечения луча с препятствием:

$$\begin{aligned} x &= \frac{B(y_{\text{ист}} \cos(\alpha) - x_{\text{ист}} \sin(\alpha)) + \cos(\alpha)C}{-A \cos(\alpha) - B \sin(\alpha)}, \\ y &= \frac{C \sin(\alpha) - (y_{\text{ист}} \cos(\alpha) - x_{\text{ист}} \sin(\alpha))A}{-A \cos(\alpha) - B \sin(\alpha)}, \end{aligned}$$

где A, B, C – коэффициенты уравнения прямой, соответствующей препятствию.

Расстояние между положением робота и точкой пересечения луча ЛД с препятствием, равно:

$$d = \sqrt{(x - x_{\text{ист}})^2 + (y - y_{\text{ист}})^2} = \sqrt{\frac{(Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C)^2}{(A \cos(\alpha) + B \sin(\alpha))^2}} = \left| \frac{Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C}{A \cos(\alpha) + B \sin(\alpha)} \right| \geq 0$$

где d - длина луча ЛД.

2.2. Вычисление истинного положения и курса

Для более удобного использования перепишем выражение для d в таком виде:

$$Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C = d(A \cos(\alpha) + B \sin(\alpha)) \quad (1)$$

Подставив в (1) $\alpha = \beta + \Psi_{\text{ист}}$ получим:

$$Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C = d(A \cos(\beta + \Psi_{\text{ист}}) + B \sin(\beta + \Psi_{\text{ист}}))$$

где $\Psi_{\text{ист}}$ - угол курса робота, β - угол установки лазера относительно продольной оси робота.

Выразив отдельно $\cos(\Psi_{\text{ист}})$ и $\sin(\Psi_{\text{ист}})$ получим:

$$Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C = d[(A \cos(\beta) + B \sin(\beta)) \cos(\Psi_{\text{ист}}) + (-A \sin(\beta) + B \cos(\beta)) \sin(\Psi_{\text{ист}})]$$

получим

$$\begin{aligned} Ax_{\text{ист}} + By_{\text{ист}} + C &= dP \cos(\Psi_{\text{ист}}) + dQ \sin(\Psi_{\text{ист}}), \\ P &= A \cos(\beta) + B \sin(\beta), \\ Q &= -A \sin(\beta) + B \cos(\beta). \end{aligned} \quad (2)$$

Составив систему уравнений для 4 лучей, появляется возможность вычислить $x_{\text{ист}}$, $y_{\text{ист}}$, $\cos(\Psi_{\text{ист}})$ и $\sin(\Psi_{\text{ист}})$.

Итоговая система:

$$\begin{cases} A_1 x_{\text{ист}} + B_1 y_{\text{ист}} - d_1 P_1 \cos(\Psi_{\text{ист}}) - d_1 Q_1 \sin(\Psi_{\text{ист}}) = -C_1 \\ A_2 x_{\text{ист}} + B_2 y_{\text{ист}} - d_2 P_2 \cos(\Psi_{\text{ист}}) - d_2 Q_2 \sin(\Psi_{\text{ист}}) = -C_2 \\ A_3 x_{\text{ист}} + B_3 y_{\text{ист}} - d_3 P_3 \cos(\Psi_{\text{ист}}) - d_3 Q_3 \sin(\Psi_{\text{ист}}) = -C_3 \\ A_4 x_{\text{ист}} + B_4 y_{\text{ист}} - d_4 P_4 \cos(\Psi_{\text{ист}}) - d_4 Q_4 \sin(\Psi_{\text{ист}}) = -C_4 \end{cases} \quad (3)$$

где A_k, B_k, C_k - коэффициенты прямой, соответствующей препятствию, в которое попадает луч ЛД, d_k - длины лучей ЛД, P_k и Q_k - коэффициенты из выражения (2), $k = 1, 2, 3, 4$ - номер луча и препятствия. Для удобства систему (3) рекомендуется составлять из 4 и более уравнений.

2.3. Метод определения препятствий, в которые попадают лучи ЛД

Систему уравнений (3) возможно решить, когда известны коэффициенты A_k, B_k, C_k , т.е. известно, в какие препятствия попадают лучи лазерных дальномеров. Для этого предлагается определить области, внутри которых коэффициенты A_k, B_k, C_k постоянны у каждого уравнения из системы (3) (каждый луч внутри этой области всегда направлен в одно и тоже препятствие) можно методом параллельного переноса луча ЛД. На Рис. 2 и Рис. 3 показано, на какие области разбивается пространство, при параллельном переносе одного луча ЛД при выполнении условия $\Psi_{\text{ист}} = \text{const}$ и $A_k, B_k, C_k = \text{const}$.

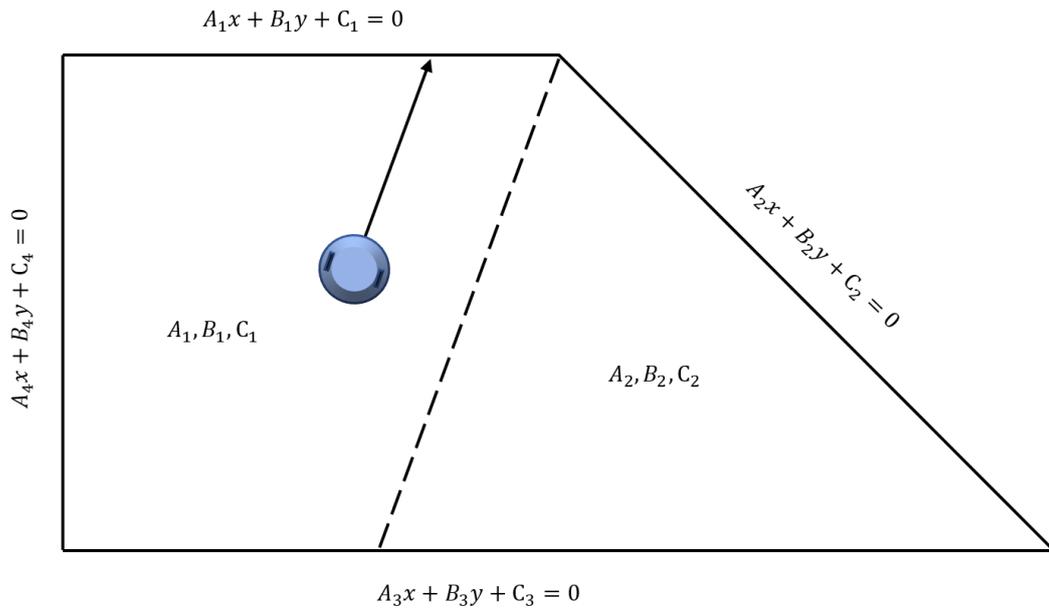


Рис. 3. Области, в которых коэффициенты A_k, B_k, C_k постоянны, при фиксированном направлении луча

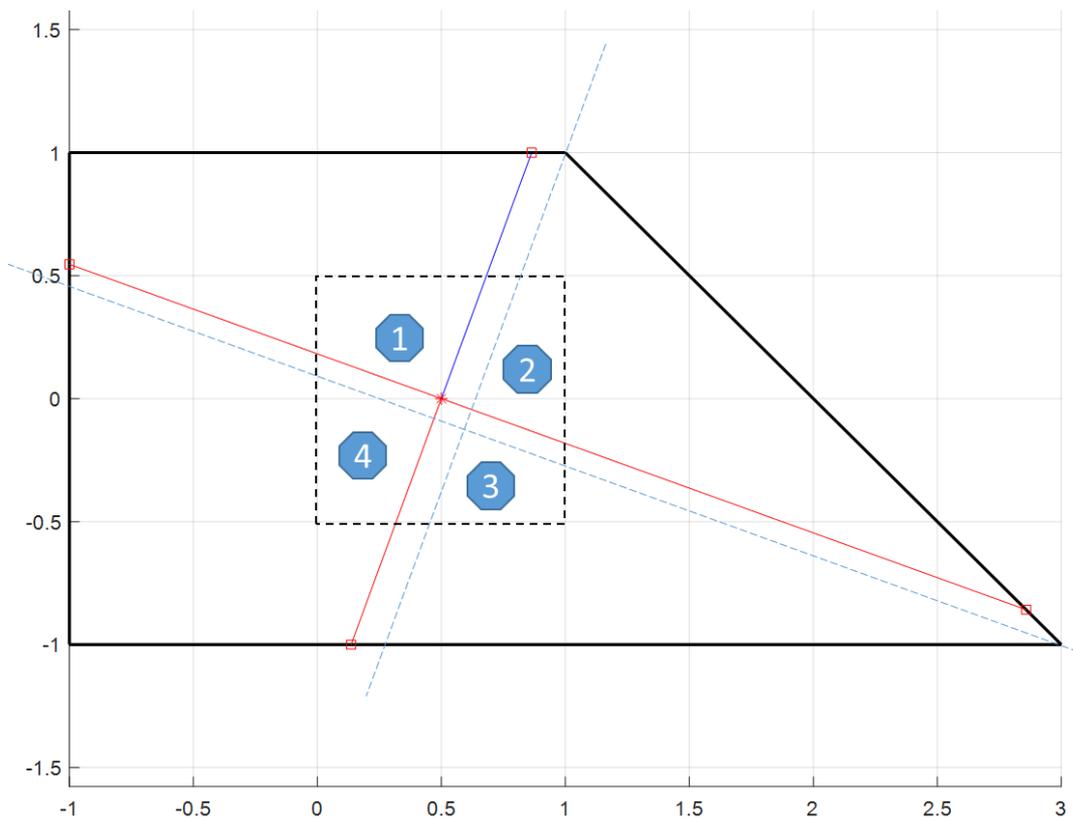


Рис. 4. Иллюстрация применения метода параллельного переноса для поиска областей постоянного значения коэффициентов

На Рис. 4 приведен пример результата определения областей с постоянным значением коэффициентов для робота, оснащенного 4 лазерными дальномерами.

Метод параллельного переноса позволяет создать «карту коэффициентов» на которой каждому положению робота и направлению луча ЛД соответствует набор коэффициентов прямой, описывающей препятствие, в которое попадает луч ЛД. На Рис. 5 показан пример «карты коэффициентов», синим обозначено пространство за пределами области перемещения робота. Для коррекции положения и курса робота необходима трехмерная «карта коэффициентов» (трехмерный

массив), где каждому углу курса соответствует свой срез (Рис. 6). Она позволяет определять коэффициенты A_k, B_k, C_k линии, соответствующей препятствию, в которое попадает луч, выходящий из определенной точки с определенным направлением. Разбиение по x, y и Ψ задается пользователем самостоятельно и не влияет напрямую на точность определения положения. Карта строится и загружается в контроллер робота перед началом работы алгоритма.

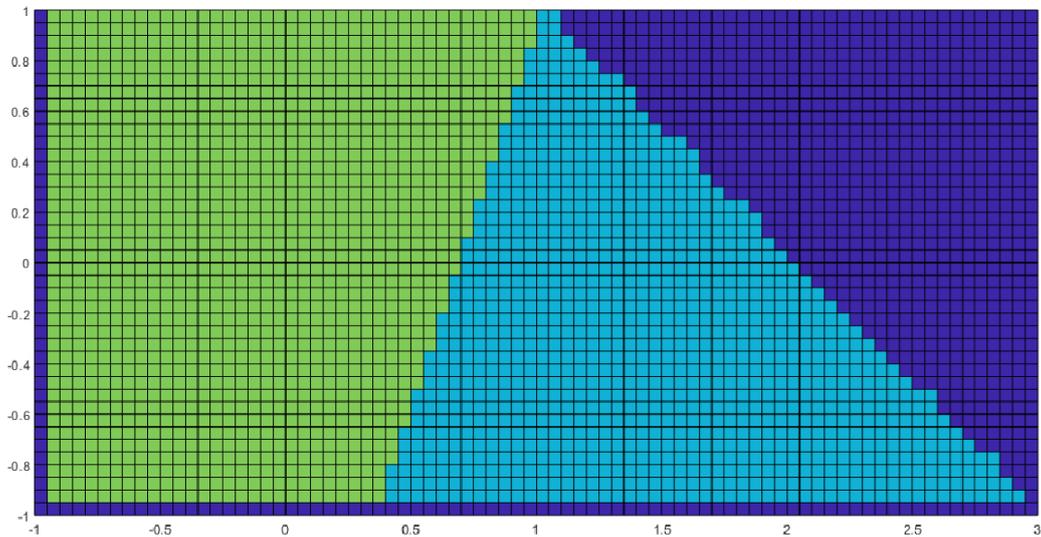


Рис. 5. Двумерный срез «карты коэффициентов»

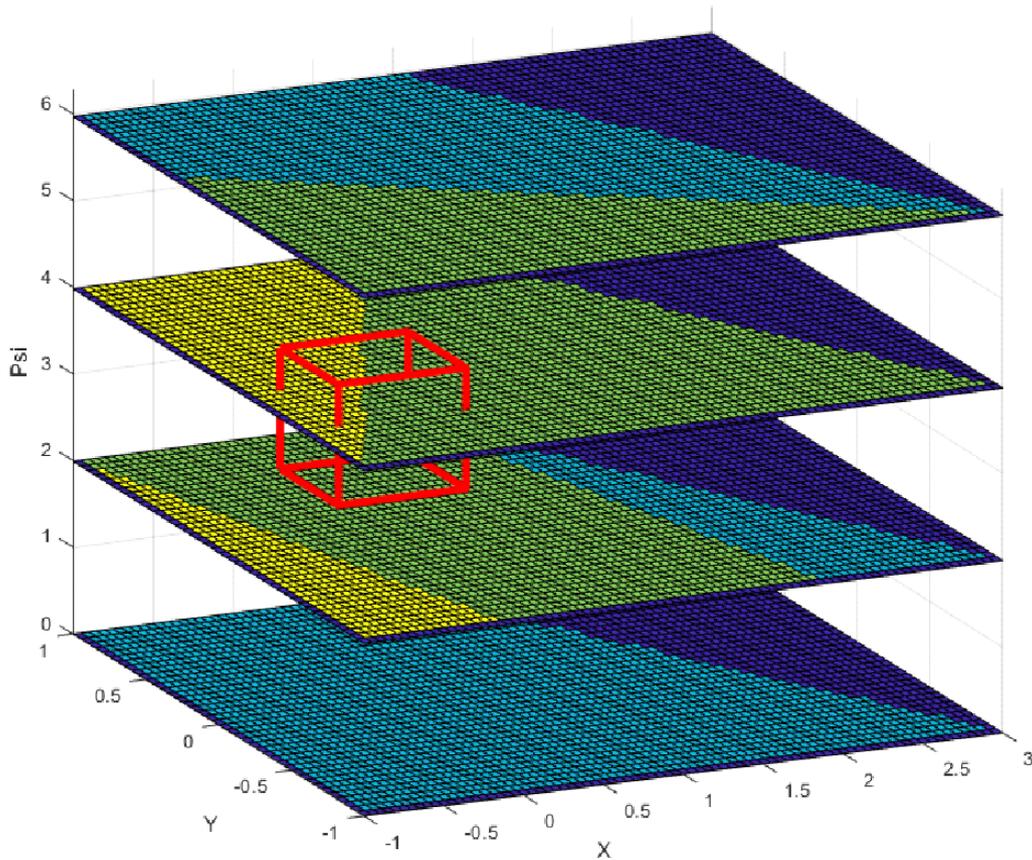


Рис. 6. Зона поиска истинных координат и курса робота (красная), соотнесенная с «картой коэффициентов»

2.4. Алгоритм коррекции положения, с применением «карты коэффициентов»

1. Задать диапазон поиска координат и курса $[x_0 - \Delta x, x_0 + \Delta x]$, $[y_0 - \Delta y, y_0 + \Delta y]$, $[\Psi_0 - \Delta\Psi, \Psi_0 + \Delta\Psi]$ на основе данных одометрии и величины погрешностей.
2. Для всех точек (x, y, Ψ) , попадающих в зону поиска (Рис. 6) найти уникальные сочетания наборов коэффициентов $\{\{A_1, B_1, C_1\}, \dots, \{A_K, B_K, C_K\}\}_1, \dots, \{\{A_1, B_1, C_1\}, \dots, \{A_K, B_K, C_K\}\}_N$, K – количество лучей, N – количество областей, с постоянным значением коэффициентов.
3. Каждое уникальное сочетание наборов коэффициентов подставить в систему (3) и вычислить (x, y, Ψ) .
4. Вычислить значения длин лучей лазерных дальномеров, которые будут соответствовать этому положению и курсу, подставив найденные (x, y, Ψ) в (2).
5. Сравнить их с настоящими показаниями лазерных дальномеров и вычислить разность.
6. Повторить шаги 2-5 и выбрать положение и курс (x, y, Ψ) , при которых разница вычисленных и настоящих показаний ЛД минимальна.

Выбранные таким образом значения (x, y, Ψ) будут наиболее вероятными координатами и курсом робота.

Задача коррекции положения робота эквивалентна оптимизационной задаче следующего вида:

$$\min \sum_k |d_{\text{изм}}^k - d_{\text{выч}}^k(x, y, \Psi)|,$$
$$d_{\text{выч}}^k = \frac{A_k x + B_k y + C_k}{A_k \cos(\beta_k + \Psi) + B_k \sin(\beta_k + \Psi)},$$
$$x_0 - \Delta x \leq x \leq x_0 + \Delta x,$$
$$y_0 - \Delta y \leq y \leq y_0 + \Delta y,$$
$$\Psi_0 - \Delta\Psi \leq \Psi \leq \Psi_0 + \Delta\Psi,$$

где k – номер луча ЛД.

В настоящей работе поиск решения оптимизационной задачи выполнялся прямым перебором уникальных сочетаний наборов $\{\{A_1, B_1, C_1\}, \dots, \{A_K, B_K, C_K\}\}_1, \dots, \{\{A_1, B_1, C_1\}, \dots, \{A_K, B_K, C_K\}\}_N$ на основе «карты коэффициентов».

3. Заключение

Предложен алгоритм определения положения и курса мобильного робота в статичной среде с известным положением препятствий по показаниям лазерных дальномеров и колесной одометрии. Разработанный алгоритм был реализован в среде MatLab. Описанный метод может быть применен для навигации мобильных роботов, используемых для автоматизации работы складских, офисных и медицинских помещений, уборки, транспортировки, наблюдения и т.д. Направления дальнейшей работы: разработка алгоритма построения «карты коэффициентов» автоматически при движении, исследование возможности применения описанного алгоритма при движении в трехмерном пространстве.

Литература

1. Bresson, G., Alsayed, Z., Yu, L., & Glaser, S. Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2017. – Vol. 2(3), P.194–220. DOI:10.1109/tiv.2017.2749181
2. Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко Автономные мобильные роботы - навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016, С. 48–67
3. Першина Ж.С., Каздорф С.Я., Лопота А.В. Методы визуальной навигации мобильного робота и построения картографических моделей внешней среды // Автометрия, Т.55, №2, 2019, С. 92-102
4. Pears, N., Liang, B., Chen, Z. Mobile Robot Visual Navigation Using Multiple Features // EURASIP J. Adv. Signal Process. – 2005, DOI: 10.1155/ASP.2005.2250
5. Gueaieb W., Miah M.S. An Intelligent Mobile Robot Navigation Technique Using RFID Technology // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008, Vol. 57, N. 9, P. 1908-1917, DOI: 10.1109/TIM.2008.919902.
6. Park S., Hashimoto S. Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009, Vol. 56, N. 7, P. 2366-2373, DOI: 10.1109/TIE.2009.2013690.

7. *Wu H.*, Tao B., Gong Z., Yin Z., Ding H. A Standalone RFID-Based Mobile Robot Navigation Method Using Single Passive Tag // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2021, Vol. 18, N. 4, P. 1529-1537, DOI: 10.1109/TASE.2020.3008187.
8. *Hoy M.*, Matveev A., Savkin A. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: A survey // Robotica. – 2015, Volume 33 , Issue 3, P. 463-497. doi:10.1017/S0263574714000289