

Система детектирования отклонений и корректировки маршрута

С.Д. Яскеляйнен, Г.Э. Рего, Е.М. Волкова, И.С. Кириллов, В.А. Красный,

Д.С. Мельников

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

Аннотация: Отклонение лесозаготовительной техники от заданного маршрута приводит к экологическим, правовым и экономическим проблемам, таким, как повреждение почвы, уничтожение деревьев и штрафы. Автономные системы корректировки маршрутов необходимы для решения этих проблем. Целью данного исследования является разработка системы обнаружения отклонений и расчета траектории для возврата на заданный маршрут. Система определяет текущее местоположение техники с использованием датчиков глобального позиционирования и инерциального измерительного устройства. Фильтр Калмана обеспечивает точность позиционирования, а алгоритм A^* и методы сглаживания траектории используются для вычисления эффективных маршрутов с учетом препятствий и радиусов поворота. Предложенное решение эффективно обнаруживает отклонения и вычисляет траекторию для возврата на маршрут.

Ключевые слова: Детектирование отклонений, корректировка маршрута, мобильное приложение, фильтр Калмана, лесосечные работы.

Отклонение техники от заранее заданного маршрута движения является серьезной проблемой, затрагивающей экологические, экономические и технические аспекты. В случае с наземными мобильными роботами отклонение от маршрута является опасной ситуацией [1], требующей вмешательства и приводящей к застреванию робота или даже к выходу его из строя. Если же речь идет о крупной лесной технике, то отклонение от маршрута влечет за собой повреждение верхнего слоя почвы вне волоков и погрузочных площадок, повреждение лесных насаждений за пределами лесосеки [2]. Для снижения количества отклонений техники от маршрута можно использовать систему, которая позволяет распознавать ситуации, когда техника отклонилась от маршрута, и строить траекторию для возвращения на маршрут [3]. Система детектирования отклонений и корректировки маршрута движения должна точно определять текущее местоположение техники, используя системы глобального и локального позиционирования. В случае детектировании отклонения техника должна

сразу сигнализировать об этом водителю и предлагать траекторию для возвращения на заданный маршрут. В случае, когда местность заранее неизвестна, и препятствия не заданы, для построения маршрута могут применяться алгоритмы локального поиска, позволяющие находить оптимальные пути в условиях неопределенности [4]. Однако в рамках данной статьи рассматривается ситуация, когда маршрут и препятствия местности известны заранее, что позволяет использовать другие методы для контроля отклонения от маршрута и корректировки движения.

Проблема отклонения харвестера от заданного маршрута на лесосеке, в первую очередь, связана с нарушением законодательства в сфере лесозаготовок, которое утверждает, что лесозаготовительные работы должны вестись в соответствии с технологической картой лесосечных работ («Лесной кодекс Российской Федерации» от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 04.08.2023)). В технологической карте указываются все сведения о местоположении и характеристике лесосеки, технологические указания по её разработке, лесоводственные требования и другая информация (Приказ Минприроды России от 27.06.2016 N 367 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки»). Нарушение технологии разработки лесосеки влечет за собой предупреждение или наложение штрафа от 50 тыс. до 100 тыс. рублей для юридических лиц («Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях» от 30.12.2001 N 195-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025)). Также можно выделить следующие нарушения, связанные с выездом харвестера за пределы заданного маршрута:

- повреждение лесных насаждений, растительного и почвенного покрова за пределами лесосеки;

- рубка и повреждение деревьев, подлежащих сохранению (подрост, плюсовые деревья, семенники);
- уничтожение верхнего плодородного почвенного слоя вне волоков, ведущее к возникновению эрозии.

Незаконная рубка деревьев, к которой можно отнести рубку деревьев за пределами лесосеки, которая проводится с помощью самоходных машин, наказывается штрафом для юридических лиц в размере 300-500 тыс. рублей с конфискацией продукции и орудия совершения нарушения. Для природной среды съезд харвестера с заданного маршрута может привести к невозможности возобновления леса на данном участке вследствие нарушения почвенного слоя, в том числе приводящее к резким изменениям условий на лесосеке (заболачивание), уничтожения подроста или семенных деревьев. Нарушенный участок подлежит возобновлению только после трудоемких и затратных работ по восстановлению.

Система детектирования отклонений и корректировки маршрута представляет собой мобильное приложение, в котором в виде точек на карте задается заданный маршрут движения лесной техники [3]. Когда водитель начинает движение, то текущее местоположение техники сравнивается с маршрутом. Если расстояние от местоположения до маршрута превышает допустимое отклонение, то система должна сигнализировать об этом водителю и рассчитывать траекторию для возвращения на заданный маршрут.

Определение текущего местоположения происходит за счет систем глобального позиционирования, а также за счет данных с инерциального датчика, который включает в себя акселерометр, гироскоп и магнитометр. Для получения более точных данных о текущем местоположении используется фильтр Калмана.

В данный момент система реализуется в виде мобильного приложения, но в дальнейшем рассматривается возможность внедрения модулей приложения в работу автономного робота, сажающего деревья. В таком случае модули системы позволят определять отклонения при объезде препятствий местности, а также рассчитывать траекторию для возвращения на заданный маршрут.

Системы, аналогичные описанному решению, уже разрабатываются для мобильных роботов, выполняющих движение по пересеченной местности. В работе [5] предложен алгоритм управления движением колесного робота, способного автономно передвигаться по траектории, обнаруживать и объезжать препятствия, а также возвращаться на первоначально заданный маршрут. Данная система отличается от описываемого решения использованием гироскопа и УЗ-датчика для определения угла наклона впереди лежащей местности.

Также решение [5] использует камеру для анализа окружающей среды. Данная система позволяет адаптировать действия робота под условия окружающей среды, в случае обнаружения препятствия (наклонной поверхности) робот снижает скорость, в том числе может полностью остановиться, затем сканирует местность и определяет угол поворота для дальнейшего движения. Также существуют системы для автономных сельскохозяйственных машин, работающих в поле. В работе [6] предложен алгоритм динамического планирования траектории для выполнения разворотов на краевых полосах поля. Преимуществом данного алгоритма является способность адаптировать маршрут при возникновении бокового скольжения или отклонения машины от заданного маршрута в режиме реального времени. Система анализирует текущее положение машины и рассчитывает маршрут, минимизируя длину траектории и время, необходимое для разворота. В отличие от традиционных методов, где

маршрут фиксируется заранее, предложенный алгоритм пересчитывает траекторию до тех пор, пока машина не войдет в следующую рабочую полосу.

В задаче определения местоположения объекта, когда нам известны данные от нескольких источников, позволяющие получить информацию о перемещении и местоположении объекта, широко применяется фильтр Калмана [7]. В данном случае фильтр Калмана применялся для объединения данных о перемещении объекта, полученных от акселерометра, гироскопа и магнитометра и данных о местоположении, полученных от GPS-модуля (Global Positioning System).

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению фильтра Калмана обсудим получение и преобразование данных датчиков с которыми работает системы. Во-первых, данные от GPS получаются в формате широта и долгота, измеренных в градусах. Единственное преобразование, которое необходимо с ними производить - это перевод в метры и обратно. Во-вторых, данные от акселерометра получаются в формате ускорение по трем осям $X (A_X)$, $Y (A_Y)$, $Z (A_Z)$, показанным на рис.1. Данные от магнитометра, акселерометра и гироскопа преобразуются к углам α - рысканье, β - тангаж, γ – крен.

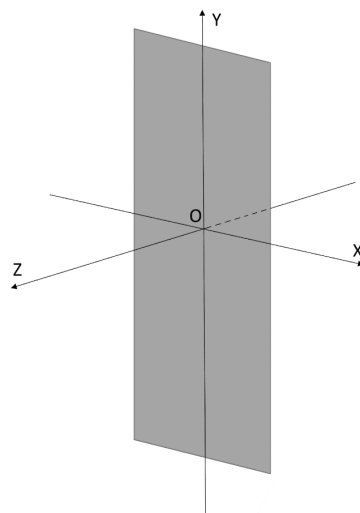


Рис. 1. - Направление осей для телефона

Данные от акселерометра и гироскопа необходимо перевести в глобальную систему координат, для этого использовались углы Эйлера [8]. Затем производился расчет выборочной дисперсий $(\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_Z^2)$ и мат. ожиданий (μ_X, μ_Y, μ_Z) для ошибок ускорений [9]. И в конечном итоге строим фильтр Калмана [10], с учетом того, что движение носит равноускоренный характер (1), где X – координата в предыдущий момент времени, X' – новая координата, l_0 – скорость в предыдущий момент времени, u – время прошедшее между двумя измерениями, A – ускорение.

$$X' = X + l_0 t + \frac{A u^2}{2} \quad (1)$$

В ситуации, когда отклонение техники от маршрута превысило критическое значение, необходимо осуществить возвращение на заданную траекторию движения. Тривиальное решение построения маршрута возвращения от текущей точки до следующей точки маршрута по прямой создает ряд потенциально проблемных ситуаций, таких как: наезд на препятствие, повреждение почвы, крутые повороты, не предусмотренные техническими возможностями транспортного средства. В связи с этим был реализован алгоритм корректировки маршрута самоходной машины.

Обозначим, как $v_i = (v_{i,lat}, v_{i,lon})$ географическую точку под номером i , где $v_{i,lat}$ – координаты широты и $v_{i,lon}$ – координаты долготы этой точки в градусах. Тогда $V = (v_0, v_1, \dots, v_{end})$ это последовательность точек, по которым необходимо осуществлять движение для того, чтобы вернуться на заданный маршрут. В таком случае известны v_0 – местоположение техники на момент обнаружения отклонения и v_{end} – точка заданной траектории, следующая за точкой, после преодоления которой произошло отклонение с заданной траектории. Препятствие – участок местности, который невозможно преодолеть, то есть необходимо построить маршрут, двигаясь по

которому в любой момент времени местоположение транспортного средства не будет находиться на препятствии. Будем считать препятствие многоугольником, имеющим вершины и обозначать его как

$T_i = (t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,n})$, где $t_{i,j}$ – вершины препятствия под номером i , имеющие координаты широты и долготы, и j – номер вершины. Тогда задано множество препятствий $T = \{(t_{1,1}, t_{1,2}, \dots, t_{1,m_1}), \dots, (t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,m_i})\}$.

При построении маршрута движения будем учитывать технические характеристики транспортного средства и строить повороты с радиусом не меньше чем минимальный радиус поворота техники r . Для построения первого поворота будем использовать азимут движения транспортного средства α (угол по часовой стрелке относительно северного полюса от 0° до 360°). Для построения последнего поворота получим точку v_{end+1} , следующую за v_{end} точку заданной траектории, таким образом, определив азимут вектора $\overrightarrow{v_{end}v_{end+1}}$ получим направление, в котором нужно двигаться при возвращении на заданную траекторию.

Для того, чтобы получить радиусы поворота по осям широты и долготы будем использовать формулы перевода метров в градусы широты (2) и долготы (3):

$$r_{lat} = \frac{r}{m_{lat}}, \quad (2)$$

$$r_{lon} = \frac{r}{m_{lon} \cdot \cos P_{lat}}, \quad (3)$$

где $m_{lat} = 111321,377778$ – количество метров в 1 градусе широты, $m_{lon} = 11134,86111116$ – количество метров в 1 градусе долготы на экваторе, r_{lat} – радиус поворота в градусах широты, r_{lon} – радиус поворота в градусах долготы. Количество метров в градусе широты – величина постоянная в любой точке Земли, однако количество метров в градусе

долготы минимально на экваторе и начинает увеличиваться при перемещении от экватора к полюсам, соответственно зависит от широты. Поэтому в формуле (2) присутствует косинус в знаменателе и P_{lat} – координаты широты, для которых производится вычисление. Радиусы поворота по оси широты и долготы не равны, поэтому можно сделать вывод, что поворот будет иметь форму дуги эллипса с полуосями r_{lon} по горизонтали и r_{lat} по вертикали.

Также для вычисления азимута отрезка ограниченного точками a и b будем использовать формулу (4):

$$\delta = \text{atan } 2(b_{lat} - a_{lat}, b_{lon} - a_{lon}) \quad (4)$$

Для определения метрического расстояния между двумя точками нужно учитывать, то что точки располагаются на поверхности сферы, а не на плоскости, следовательно, использование законов планиметрии даст неверные результаты. Поэтому, для вычисления расстояния между двумя точками a и b будем использовать формулу Хаверсина (5):

$$d(a, b) = 2 * R * \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \frac{b_x - a_x}{2} + \cos a_x * \cos b_x * \sin^2 \frac{b_y - a_y}{2}} \quad (5)$$

Для определения направления движения по дуге при построении поворота, а также обнаружения пересечения двух отрезков при проверке пересечения траектории с ребрами препятствия будем использовать функцию для определения ориентации обхода трех точек a , b и c (6):

$$f(a, b, c) = (b_y - a_y) * (c_x - b_x) - (b_x - a_x) * (c_y - b_y) \quad (6)$$

Если $f(a, b, c) = 0$ точки лежат на одной линии (коллинеарны), если > 0 то примем $f(a, b, c) = 1$ – обход по часовой стрелке, если < 0 , то $f(a, b, c) = -1$ – обход против часовой стрелки.

Для построения эффективного маршрута будем использовать алгоритм A^* [11]. Для работы с этим алгоритмом предварительно необходимо разбить карту на многоугольники, каждый из которых имеет 4 вершины, которые

будем называть узлами, а отрезки, соединяющие узлы – ребра. Обозначим произвольный узел как n . Тогда у каждого узла имеются оценки: $g(n)$ – стоимость пути от начального узла, соответствующего v_0 до n , $h(n)$ – эвристическая оценка стоимости пути от узла n до целевого узла v_{end} , $f(n)$ – общая стоимость, равная $g(n) + h(n)$ и родительский узел $p(n)$. Помимо оценок у каждого узла также имеются соседи – ближайшие узлы сетки в одном из 8 направлений (север, юг, запад, восток, северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток). Будем обозначать рассматриваемого соседа как n_{cur} .

По умолчанию создается сетка минимального размера с координатами нижнего левого и верхнего правого углов соответственно $s_1 \left(\min(v_{0,lon}, v_{end,lon}), \min(v_{0,lat}, v_{end,lat}) \right)$ и $s_2 \left(\max(v_{0,lon}, v_{end,lon}), \max(v_{0,lat}, v_{end,lat}) \right)$, но в случае, если решение не найдено (препятствие преграждает траекторию), сетка расширяется на 1 ряд ячеек во всех 4 направлениях. Для этого будем использовать счетчик k , равный 0 и увеличивающийся на 1 при неудачной попытке построить маршрут. В таком случае, для создания сетки запишем координаты каждого узла в список и будем обозначать рассматриваемый узел сетки как s_{cur} .

Для управления размером ячеек сетки доступен параметр w , обозначающий ближайшее целое число метров, к которому будет рассчитан размер ячейки по оси долготы и по оси широты. Тогда размеры ячейки рассчитываются по формулам (7) и (8):

$$e_{lat} = \frac{s_{2lat} - s_{1lat}}{\left\lceil \frac{s_{2lat} - s_{1lat}}{w_{lat}} \right\rceil} \quad (7)$$

$$e_{lon} = \frac{s_{2lon} - s_{1lon}}{\left\lceil \frac{s_{2lon} - s_{1lon}}{w_{lon}} \right\rceil} \quad (8),$$

где w_{lat} и w_{lon} – градусы широты и долготы, переведенные из w по формулам (2) и (3).

Введем обозначение $D = \{(s_1, N_1), (s_2, N_2), \dots, (s_q, N_q)\}$ – множество упорядоченных пар (s_i, N_i) , где s_i – узел сетки такой, что $s_i \neq s_j$ для любых $i \neq j$, и N_i – множество соседей узла s_i .

Алгоритм 1. Определение всех узлов сетки и их оценок

Вход: координаты узлов ячеек сетки, список препятствий T, v_0, v_n, s_1, s_2

Выход: словарь соседей D

1. **ДЛЯ КАЖДОГО** узла сетки s_{cur} :
2. **ЕСЛИ** в словаре нет текущего узла в качестве ключа **ТО**
3. Вычисляем расстояние между соседними узлами
 в градусах широты – $step_{lat}$
4. **ДЛЯ** широты **ОТ** $cur - step_{lat}$ **ДО** $cur + step_{lat}$:
5. Вычисляем расстояние между соседними узлами
 в градусах долготы – $step_{lon}$
6. **ДЛЯ** долготы **ОТ** $cur - step_{lon}$ **ДО** $cur + step_{lon}$:
7. Определяем текущего соседа n_{cur}
8. **ЕСЛИ** $n_{cur} = s_{cur}$ **ТО**
9. Пропуск
10. **ЕСЛИ** n_{cur} лежит на препятствии **ТО**
11. $h(n_{cur}) = \infty$
12. $g(n_{cur}) = \infty$
13. **ИНАЧЕ**
14. $h(n_{cur}) = dist(n_{cur}, v_n)$
15. $g(n_{cur}) = dist(n_{cur}, v_0)$
16. Добавить n_{cur} в N_{cur}
17. Добавить в D пару (s_{cur}, N_{cur}) .

Для проверки того, лежит ли узел внутри препятствия будем пользоваться следующим методом проверки: если горизонтальный луч,

проведенный в направлении возрастания оси долготы пересекает ребра препятствия четное число раз, то узел лежит вне препятствия, иначе – на препятствии. Иллюстрация работы метода изображена на рис.2. Синим цветом обозначены проверяемые точки, красным цветом – пересечение горизонтального луча из этих точек со сторонами препятствия.

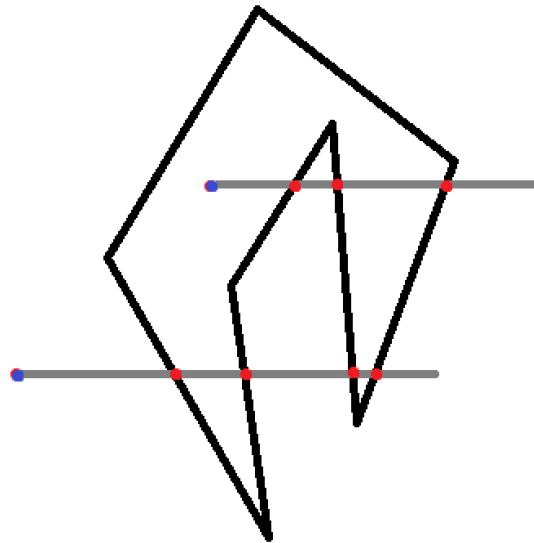


Рис. 2. Метод для определения расположения точки на препятствии

Метод будет удовлетворять условиям проверки для всех ситуаций, кроме тех, в которых точки будут лежать на границах препятствия. В связи с этим введем дополнительную проверку на принадлежность точки любому из ребер препятствия.

Введем обозначения O – конечная последовательность, в которую будем помещать узлы, подходящие для рассмотрения и C – конечная последовательность, содержащая уже рассмотренные узлы [12].

Алгоритм 2. Алгоритм корректировки маршрута

Вход: v_0, v_n, O, C, k .

Выход: Последовательность точек, составляющих ломаную линию, по которой необходимо двигаться для возвращения на маршрут

1. **ЕСЛИ** $h(v_0) = \infty$ **ИЛИ** $h(v_n) = \infty$ **ИЛИ** $g(v_0) = \infty$ **ИЛИ** $g(v_n) = \infty$
ТО
2. **КОНЕЦ** (задача не имеет решения)
3. **ПОКА НЕ** O **пуст:**
4. Вычислим v_{cur} как узел с наименьшей оценкой $f(n)$ из O .
5. **ЕСЛИ** $v_{cur} = v_n$ **ТО**
6. **КОНЕЦ**
7. Переместим v_{cur} из O в C .
8. **ДЛЯ КАЖДОГО** соседа v_{cur} :
9. **ЕСЛИ** сосед в C **ИЛИ** $h(n) = \infty$ **ИЛИ** $g(n) = \infty$ **ТО**
10. **Шаг 8**
11. Вычислим $g_{temp}(n)$ для соседа как $g(v_{cur}) + dist(v_{cur}, n)$
12. **ЕСЛИ** $g_{temp}(n) < g(n)$ **ИЛИ** сосед не в O **ТО**
13. $g(n) = g_{temp}(n)$
14. $h(n) = dist(n, v_n)$
15. $m(n) = v_{cur}$
16. **ЕСЛИ** сосед не в O **ТО**
17. **Добавить** соседа в O .
18. Увеличиваем счетчик неудачных попыток k на 1, пересчитываем сетку и соседей, Шаг 1.

Алгоритм строит маршрут, проходящий через соседние ячейки сетки, каждый шаг совершается в одном из восьми направлений (север, юг, запад, восток, северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток). Данная траектория будет приемлемой в таких случаях, как например движение робота в лабиринте. Однако в условиях реальной местности данная траектория определенно окажется неэффективной, в силу присутствия

избыточных точек (отрезок может быть описан множеством точек, однако, ожидается что он будет описан двумя точками - началом и концом) (рис.3), а также участков повторяющихся однотипных изгибов ломаной (участки в виде «ступенек» на рис.4), что может усложнить построение плавных поворотов в данных местах. В силу этого был реализован алгоритм сглаживания полученной траектории.

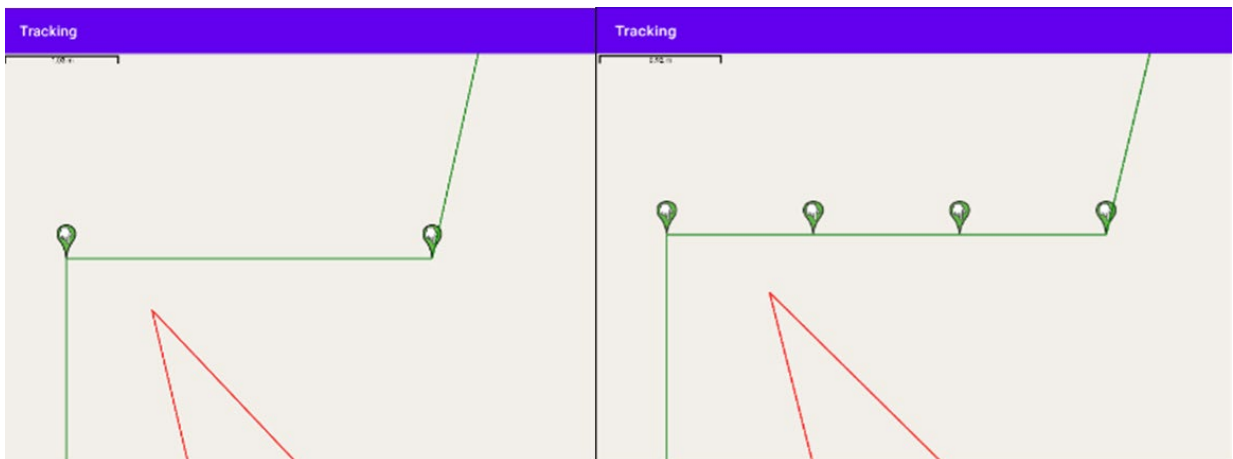


Рис. 3. - Пример сглаживания $p(n) \rightarrow p(p(n))$

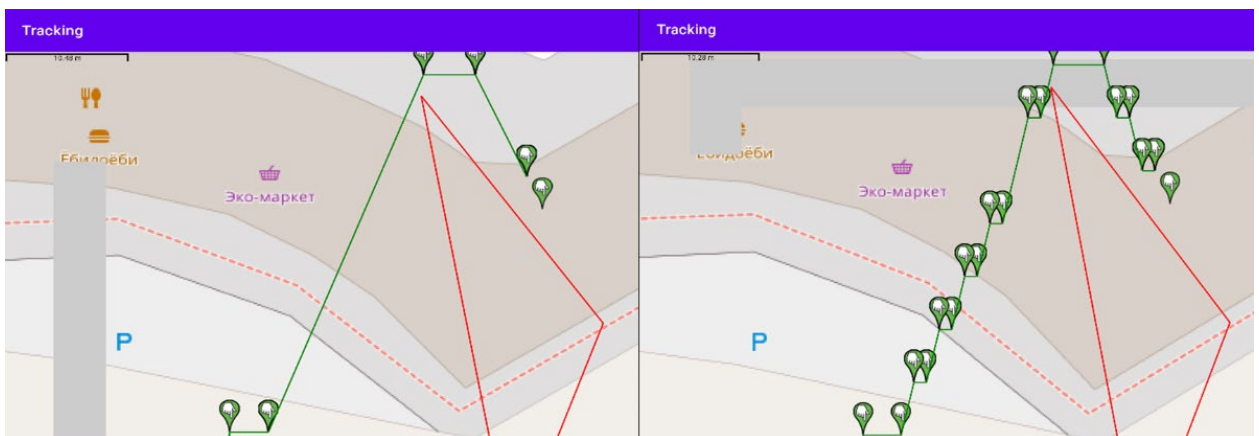


Рис. 4. - Пример сглаживания $p(n) \rightarrow p(p(p(n)))$

Данный алгоритм сравнивает направления движения от текущей точки до родителя с направлением от родителя до родителя 2-го порядка и, в случае совпадения направлений удаляет промежуточное звено – родителя, тем самым делая новым родителем родителя 2-го порядка $p(p(n))$.

алгоритм сглаживания сравнивает направление от точки до родителя с направлением от родителя 2-го порядка до родителя 3-го порядка $p(p(p(n)))$ и, в случае совпадения, удаляет промежуточные точки родителя 1-го и 2-го порядка, тем самым делая родителем текущей точки родителя 3-го порядка. Таким образом из итоговой траектории исключаются лишние точки и повторяющиеся участки однотипных изгибов ломаной, что делает ее эффективнее и приближает ее к целевой. Иллюстрации работы алгоритма сглаживания представлены на рисунках 2, 3.

Далее, после удаления из траектории лишних точек, необходимо осуществить построение плавных поворотов, радиус которых будет не менее чем заданный r [13]. В силу особенностей формы планеты и системы географических координат, повороты на карте будут иметь форму эллипса, тогда как в действительности будут являться окружностью. Каноническое уравнение эллипса (9):

$$\frac{x^2}{r_{lon}^2} + \frac{y^2}{r_{lat}^2} = 1, \quad (9)$$

где r_{lon} – размер полуоси по оси долготы и r_{lat} – размер полуоси по оси широты, рассчитанные по формулам (2) и (3). Поворот строится из большого числа коротких отрезков, количество которых задается параметром q .

Алгоритм 3. Алгоритм построения плавных поворотов

Вход: множество точек траектории, полученное алгоритмом 2, q

Выход: итоговая траектория возвращения на заданный маршрут с плавными поворотами.

1. **ДЛЯ** точек траектории **ОТ** v_1 **ДО** v_{end-1}
2. Определим 3 точки: v_{prev} – предыдущая точка траектории, v_{cur} – текущая точка траектории, v_{next} – следующая точка траектории и добавим точку v_{prev} в

множество точек итоговой траектории

3. Вычислим точки касания отрезков $v_{prev}v_{cur}$ и $v_{cur}v_{next}$ с эллипсом поворота и его центр
4. Построим q точек, лежащих на дуге эллипса, ограниченной двумя точками касания и добавим их в множество точек итоговой траектории

Для проверки работоспособности мобильного приложения было проведено тестирование в черте города. Так как движение лесной техники характеризуется низкой скоростью движения (рабочая скорость не превышает 5 км/ч), тестирование приложение проводилось в пешем режиме. Протяженность маршрута для тестирования составляла 300 метров.

Перед началом движения в приложение была загружена карта местности для визуализации и был размечен маршрут движения. Для проверки работоспособности модуля детектирования отклонений на одном из участков маршрута было специально заложено отклонение: маршрут движения был смещен от фактического движения человека на 32 метра. На данном участке приложение корректно детектировало отклонение и рассчитало величину отклонения в 32.1 метра. После возврата на маршрут система снова определила соответствие текущего местоположения с заданным маршрутом движения. На протяжении всего эксперимента приложение непрерывно выводило информацию о расстоянии от текущего местоположения до ближайшей точки маршрута.



Рис. 5. – Визуализация местности в интерфейсе пользователя

На рис.5 представлен интерфейс пользователя, где отображены заданный маршрут (зеленая линия), реальное местоположение (красная стрелка), указано расстояние до ближайшей точки маршрута (черный квадрат с надписью «32.1м»), а также построена траектория (черная линия) для возврата на маршрут движения.

В процессе тестирования приложение продемонстрировало корректную работу. Модуль детектирования отклонений корректно работал и верно рассчитывал расстояние до ближайшей точки маршрута. Модуль позиционирования также показал корректную работу и позволял определить текущее местоположение с точностью до 2 метров, однако при поворотах и ускорениях точность снижалась до 5-10 метров.

Полученные результаты подтверждают, что разработанное приложение эффективно справляется с задачей детектирования отклонений техники и позволяет определить текущее местоположение с точностью до 2 м. Проведенный эксперимент показал, что разработанное приложение может быть использовано для помощи водителю лесной техники в процессе контроля движения.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц,

имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.

Литература

1. Рего Г. Э., Воронов Р. В., Григорьев И. В. Алгоритм локального поиска для задачи покрытия полигона лесом корневых деревьев // Инженерный вестник Дона, 2022, №.10 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7956/.

2. Rege G. E. Mathematical Modeling Method for Detecting the Fuzzy Occurrence of Dangerous Events, Programmnaaya Ingeneria, 2023, vol. 14, no. 9, pp. 442—451. DOI: 10.17587/prin.14.442-451.

3. Яскеляйнен С.Д., Гурылева Е.М., Красный В.А., Мельников Д.С., Рего Г.Э. О проблеме детектирования отклонения от заданной траектории движения самоходной машины // Материалы I Международного инженерного форума. – Петрозаводск: Изд-во Петропресс, 2024. - С. 254-258.

4. Яскеляйнен С.Д., Рего Г.Э., Гурылева Е.М., Красный В.А., Мельников Д.С. Детектирование отклонений и корректировка движения лесной техники // Сборник тезисов 35-й Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". - Санкт-Петербург, 2024. - С.99-101.

5. Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Чащина М.М. Алгоритм организации движения мобильного робота по пересеченной местности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 393–399. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-393-399.

6. He Z., Bao Y., Yu Q., Lu P., He Y., Liu Y. Dynamic path planning method for headland turning of unmanned agricultural vehicles // Computers and Electronics in Agriculture. - 2023. - Vol. 206. doi: 10.1016/j.compag.2023.107699.

7. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // ASME–Journal of Basic Engineering. - 82. - 1960. – P. 35-45.

8. Буданов А.С., Егунов В.А. Использование углов Эйлера в инерциальных навигационных системах // Инженерный вестник Дона, 2021, № 7 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7072/.

9. Julier S. J., Uhlmann J. K. «A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems» // The 11th International Symposium of Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II. - Orlando. - 20-25 April 1997, P. 182-193.

10. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств с комплексированием дальномерных, угломерных и инерциальных измерений в расширенном фильтре Калмана // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 51–67. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2- 51-673.

11. Вэнь И. Исследование алгоритмов планирование траектории для мобильных роботов // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 8. – С. 1095–1105.

12. Shahzad K., Iqbal S., Bloodsworth P. Points-Based Safe Path Planning of Continuum Robots // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2015. – №12 . – P. 107.

13. Бобруйко П. К., Гданский Н. И., Карпов А. В. Сглаживание траектории движения автоматического транспортного средства // Теоретические знания – в практические дела. Сборник статей XX Международной научно-практической конференции, 2019. - С. 3-11.

References

1. Rego G. E., Voronov R. V., Grigorev I. V. Inzhenernyi vestnik Dona, 2022, №.10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7956/.

2. Rego G. E., Programmная Ingeneria, 2023, Vol. 14, no. 9, pp. 442—451. DOI: 10.17587/prin.14.442-451.



3. Yaskelyainen S.D., Guryleva E.M., Krasnyi V.A., Melnikov D.S., Rego G.E. Materialy I Mezhdunarodnogo inzhenerenogo foruma, Petrozavodsk: Pub. Petropress, 2024, pp. 254-258.
4. Yaskelyainen S.D., Rego G.E., Guryleva E.M., Krasnyi V.A., Melnikov D.S. Sbornik tezisov 35-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Ekstremalnaya robototekhnika». Sankt-Peterburg, 2024, pp.99-101.
5. Evstigneev M.I., Litvinov Yu.V., Mazulina V.V., Chashchina M.M. Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2017, Vol. 17, № 3, pp. 393–399. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-393-399.
6. He Z., Bao Y., Yu Q., Lu P., He Y., Liu Y., Computers and Electronics in Agriculture, 2023, Vol. 206, doi: 10.1016/j.compag.2023.107699.
7. Kalman R.E. ASME–Journal of Basic Engineering, № 82, 1960, p. 35-45.
8. Budanov A.S., Egunov V.A., Inzhenernyi vestnik Dona, 2021, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7072/.
9. Julier S. J., Uhlmann J. K. The 11th International Symposium of Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II, Orlando, 20-25 April 1997, p. 182-193.
10. Fokin G.A., Vladyko A.G. Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. 2021, Vol. 7, № 2. pp. 51–67. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2- 51-673.
11. Ven I. Voprosy ustoichivogo razvitiya obShchestva, 2022, № 8, pp. 1095–1105.
12. Shahzad K., Iqbal S., Bloodsworth P. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, №12, p. 107.
13. Bobruiko P. K., Gdanskii N. I., Karpov A. V. Teoreticheskie znaniya - v prakticheskie dela Sbornik statei XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 2019, pp. 3-11.

Дата поступления: 1.01.2025

Дата публикации: 25.02.2025
