

Особенности учета кинематических ограничений при планировании траектории БПЛА

В.А. Костюков, И.Д. Евдокимов, В.Г. Гисцов

АО «НКБ Робототехники и систем управления», г. Таганрог

Аннотация: Построение быстродействующих алгоритмов планирования реализуемых маршрутов движения робототехнических платформ в трехмерной среде является актуальной задачей. Известные методы планирования, как правило, учитывают в лучшем случае ограничения на гладкость целевых траекторий. Отсутствует комплексное рассмотрение и учет при планировании траекторий требований, вызванных наиболее существенными кинематическими ограничениями аппаратов, прежде всего, таких, как БПЛА.

В настоящей статье предлагается методика корректировки промежуточной траектории, полученной одним из методов планирования, с учетом ограничений по линейным скорости и ускорению аппарата, а также по углу его тангажа. Данная методика сочетается с процедурой сглаживания, включающей этап минимизации длины кусочно-ломаной траектории и скругление углов при вершинах с построением гладкого временного параметрического её представления по модифицированному методу Дубинса.

Эффективность разработанных алгоритмов корректировки первоначально-спланированной траектории подтверждается результатами проведенного численного моделирования.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, беспилотный летательный аппарат, устойчивость и управляемость аппарата, планирование движения, локальная корректировка спланированной траектории, снижение энергетических затрат.

Введение

Построение программной траектории робототехнического комплекса, движущегося в трехмерной картографированной среде, может быть осуществлено с использованием широкого спектра алгоритмов планирования перемещений, среди которых можно выделить методы клеточной декомпозиции, прежде всего, алгоритмы Дейкстры, A^* [1, 2], D^* [3]. Алгоритм Дейкстры позволяет получить оптимальный путь с точностью до погрешности квантования сеточной структуры. Методы A^* , D^* не являются оптимальными, но оптимизированы по сравнению с первым алгоритмом по быстродействию построения выходного субоптимального пути.

Общим недостатком алгоритмов метода клеточной декомпозиции

является резкий рост вычислительной сложности с возрастанием числа ячеек разбиения. Также применяются алгоритмы, построенные на основе методов потенциальных полей [4, 5], позволяющие на порядки повысить быстродействие, однако их недостатком является возможность существования локальных минимумов потенциальной функции, что влечет за собой проблему выхода из соответствующих областей заикливания. Известны подходы на основе случайных деревьев [6, 7]. Также известен метод неустойчивых режимов, позволяющий планировать траекторию движения с учетом как кинематических, так и динамических характеристик управляемого объекта. Но этот метод достаточно сложен и реализован только для определенного типа регулятора.

Первой проблемой использования на практике траекторий, получающихся в результате применения указанных выше методов планирования, является возможное наличие участков нерегулярного хода и даже осцилляций. Для решения этой проблемы может быть использована процедура двухэтапного сглаживания, базирующаяся на методе минимизации кусочно-линейной кривой по длине на ее локальных участках и последующем применении модифицированного метода Дубинса [8]. Последний обеспечивает сглаживание траектории в окрестностях вершин первоначальной кусочно-ломаной и последующее построение специального временного параметрического представления этой траектории, учитывающего ограничения на траекторную скорость аппарата при прохождении им участков с большой кривизной. Далее, однако, необходимо перейти от временного параметрического представления траектории вновь к дискретному – путем взятия достаточного количества точек на каждой дуге полученной гладкой траектории.

Второй проблемой, возникающей вследствие применения наиболее распространенных алгоритмов планирования, является отсутствие

достаточного учета кинематических ограничений аппарата по линейным, угловым скоростям его движения, а в случае БПЛА самолетного типа, - также и по углам тангажа и крена.

В настоящей статье рассматривается подход, позволяющий учесть с достаточно хорошей для практики точностью указанные кинематические ограничения и нужным образом перепланировать траекторию движения аппарата. При этом предлагается предварительно провести соответствующее сглаживание ранее спланированной траектории.

Описание процедуры сглаживания первоначально спланированной траектории

Пусть имеется начальная траектория движения РТП, представленная точками $A'_i(x'_i, y'_i)$, $i=1,2,\dots,N$. Заметим, что проблема снижения осцилляций такой кривой, при их наличии, коррелирует с проблемой уменьшения длин соответствующих осциллирующих участков. Поэтому для снижения указанных осцилляций для каждого заранее выделенного участка с осцилляциями может быть поставлена и решена задача оптимизации следующего функционала:

$$G(Tr, p) = \delta_1 \sum_{i=2}^{N-1} [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2] + \dots \\ + \delta_2 \sum_{i=2}^{N-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2] \#(1)$$

где первое слагаемое есть сумма квадратов отклонений координат точек $A_i(x_i, y_i)$ от исходных точек $A'_i(x'_i, y'_i)$, а второе – длина целевой кривой Tr. Коэффициенты $0 \leq \delta_1, \delta_2 \leq 1$ задают степень влияния слагаемых в (1).

На втором этапе сглаживания предлагается использовать процедуру аппроксимации траектории прямолинейными отрезками, гладко сопряженными с дугами окружностей, строящихся в каждой узловой точке исходной кусочно-линейной кривой. Далее производится построение

временного параметрического представления траектории движения с учетом ограничения на траекторную скорость аппарата при прохождении им криволинейных участков пути [8]. Также можно дополнительно ограничить кривизну траектории.

Алгоритм корректировки траектории с учетом кинематических ограничений управляемого аппарата

Предположим, что целевая траектория аппарата должна учитывать его кинематические ограничения: предельный угол тангажа, максимальную кривизну траектории, минимальные и максимальные значения вертикальной и горизонтальной проекций линейных скорости и ускорения.

Пусть в результате применения ранее рассмотренного метода сглаживания получены массивы координат узлов $\{B_k\}, k = 1, 2, \dots, K$ в моменты времени $\{t_k\}, k = 1, 2, \dots, K$, причем момент $t_1 = 0$ – начальный момент движения, когда аппарат должен находиться начальной точке B_1 своей целевой траектории, а момент $t_K = T$ соответствует интервалу времени движения до целевой точки траектории, совпадающей с B_K .

Необходимо так скорректировать массив $\{B_k\}, k = 1, 2, \dots, K$ с получением некоторого нового массива $\{\tilde{B}_k\}, k = 1, 2, \dots, K$, чтобы были выполнены определенные кинематические условия движения аппарата, к определению которых мы приступаем ниже.

Для любого $k = 2, \dots, K$ должны быть выполнены ограничения по горизонтальной $v_{gor,k}$ и вертикальной $v_{ver,k}$ скоростям в дискретные моменты времени $\{t_k\}, k = 2, \dots, K$, что выражается следующим образом:

$$v_{gor,k} \equiv \frac{|(\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{gor}|}{t_k - t_{k-1}} \leq v_{gor,max}, \#(2)$$

$$v_{gor,k} \geq v_{gor,min}, \#(3)$$

$$v_{ver,k} \equiv \frac{(\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{ver}}{t_k - t_{k-1}} : \begin{cases} |v_{ver,k}| \leq v_{ver,l,max}, & \text{если } (\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{ver} \geq 0, \\ |v_{ver,k}| \leq v_{ver,s,max}, & \text{иначе,} \end{cases} \#(4)$$

где $v_{gor,max}$ и $v_{gor,min}$ - максимально и минимально допустимые горизонтальные скорости; $v_{ver,l,max}$, $v_{ver,s,max}$ - максимально допустимые вертикальные скорости подъема и спуска; $(\cdot)_{gor}$, $(\cdot)_{ver}$ - операторы взятия горизонтальной составляющей вектора линейной скорости и вертикальной проекции линейной скорости.

Заметим, что необходимость введения минимальной горизонтальной скорости обусловлена аэродинамической особенностью летательного аппарата самолетного типа.

Далее, для любого линейного участка $\tilde{B}_{k-1}\tilde{B}_k$, положение которого относительно условной плоскости горизонта характеризуется углом тангажа ϑ_k :

$$\vartheta_k \equiv \begin{cases} \vartheta_{0k}, & \text{если } (\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{ver} \geq 0, \\ -\vartheta_{0k}, & \text{иначе,} \end{cases} \#(5)$$

где:

$$\vartheta_{0k} = \arccos\left(\frac{|(\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{gor}|}{|\tilde{B}_{k-1}\tilde{B}_k|}\right), \#(6)$$

жно выполняться условие ограничения по этому углу:

$$\vartheta_k : \begin{cases} \vartheta_k \leq \vartheta_{pr,l}, & \text{если } (\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{ver} \geq 0, \\ |\vartheta_k| \leq \vartheta_{pr,s}, & \text{иначе.} \end{cases} \#(7)$$

В последнем выражении $\vartheta_{pr,l}$ и $\vartheta_{pr,s}$ есть предельно допустимые углы тангажа при подъеме и снижении соответственно.

Для проведения корректировки по формулам (2) – (7) предлагается следующая последовательность действий.

Если в случае $v_{ver,k} > 0$ выполнено $v_{ver,k} > v_{ver,l,max}$, то ограничиваем $v_{ver,k}$ и одновременно производим первичную корректировку угла тангажа:

$$\tilde{v}_{ver,k} = v_{ver,l,max}, \#(8)$$

$$\tilde{\vartheta}_k = \arctg\left(\frac{\tilde{v}_{ver,k}}{v_{gor,k}}\right). \#(9)$$

Если же $|v_{ver,k}| < v_{ver,l,max}$, тогда угол тангажа на данном этапе берется начальным: $\tilde{\vartheta}_k = \vartheta_k$.

Аналогичным образом производится корректировка вертикальной составляющей скорости при выполнении условий: $v_{ver,k} < 0$, $|v_{ver,k}| > v_{ver,s,max}$:

$$\tilde{v}_{ver,k} = \text{sign}(v_{ver,k})v_{ver,s,max}, \#(10)$$

Здесь и ниже в этом пункте знак «тильда» будет означать скорректированную величину.

После этого производим вторичную корректировку угла тангажа, непосредственно основываясь на неравенстве (6). Угол тангажа коррелирует с горизонтальной и вертикальной составляющими скорости. Поэтому если неравенство (6) не выполнено, то корректировку угла тангажа можно произвести либо за счет изменения горизонтальной скорости, либо за счет изменения вертикальной.

Вначале для удовлетворения неравенства (6) попробуем изменить именно горизонтальную скорость, оставив вертикальную, рассчитанную ранее в (9), прежней. В этом случае при $\tilde{\vartheta}_k = \pm\vartheta_{pr}$ потребная горизонтальная скорость должна быть равна:

$$v_{gor0,k} = \frac{|\tilde{v}_{ver,k}|}{\text{tg}(\vartheta_{pr})}, \#(11)$$

где $\vartheta_{pr} = \vartheta_{pr,l}$ – для случая подъема, а $\vartheta_{pr} = \vartheta_{pr,s}$ для случая снижения.

Однако в этом случае может не выполняться неравенство для горизонтальной скорости (2), что вынудит нас перейти к варианту изменения вертикальной скорости для обеспечения нужного угла тангажа, а именно, ее

уменьшения по сравнению со значением в (8). В последнем случае скорректированная на этом этапе вертикальная скорость равна:

$$\tilde{v}_{ver,k} = v_{gor,k} \operatorname{tg}(\tilde{\vartheta}_k) \quad \#(12)$$

при одновременном выполнении $\tilde{\vartheta}_k = \pm \vartheta_{pr}$.

После проведенных корректировок вертикальная составляющая скорости и угол тангажа лежат в допустимых диапазонах.

Однако, как видно, в общем случае остается возможность того, что горизонтальная скорость не принадлежит заданному диапазону в соответствии с неравенствами (2) и (3).

Пусть не выполнено неравенство (3), т.е. выполнено:

$$v_{gor,k} < v_{gor,min}$$

В этом случае производим корректировку:

$$\tilde{v}_{gor,k} = v_{gor,min} \quad \#(13)$$

которая приведет к уменьшению модуля угла тангажа и, следовательно, не приведет к выходу этого угла из своего допустимого диапазона. С другой стороны, если выполнено обратное к (2) неравенство:

$$v_{gor,k} > v_{gor,max} \quad \#(14)$$

то оставив угол тангажа прежним, произведем корректировку горизонтальной скорости:

$$\tilde{v}_{gor,k} = v_{gor,max} \quad \#(15)$$

приводящую к уменьшению соответствующей вертикальной составляющей скорости (изменяем ее в общем случае в третий раз):

$$\tilde{v}_{ver,k} = \tilde{v}_{gor,k} \operatorname{tg}(\tilde{\vartheta}_k) \quad \#(16)$$

Очевидно, что последняя корректировка не приводит к выходу вертикальной составляющей скорости из своего допустимого диапазона, даваемого неравенством (4).

Таким образом, вектор линейной скорости и угол тангажа

скорректированы.

Далее остается определить новое/скорректированное положение второй точки, т.е. получить точку \tilde{B}_k :

$$\tilde{B}_k = \begin{bmatrix} B_{k-1}(1) + \frac{(B_k(1) - B_{k-1}(1))}{|(\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{gor}|} \tilde{v}_{gor,k}(t_k - t_{k-1}) \\ B_{k-1}(2) + \frac{(B_k(2) - B_{k-1}(2))}{|(\tilde{B}_k - \tilde{B}_{k-1})_{gor}|} \tilde{v}_{gor,k}(t_k - t_{k-1}) \\ B_{k-1}(3) + \text{sign}(\tilde{\vartheta}_k) \tilde{v}_{ver,k}(t_k - t_{k-1}) \end{bmatrix}. \#(17)$$

Здесь предположено, что ось OZ базовой земной системы координат направлена по нормали к условному горизонту.

Рассмотрим учет ограничений по линейным горизонтальному a_{gor} и вертикальному a_{ver} ускорениям.

Потребуем на каждом k -м шаге из диапазона $k = 3, \dots, K$ выполнения неравенств:

$$|\bar{a}_{gor,k}| < a_{gor,max}, \#(18)$$

$$|a_{ver,k}| < a_{ver,max}, \#(19)$$

где $\bar{a}_{gor,k}$ представляет собой горизонтальную векторную составляющую линейного ускорения \bar{a}_k , $a_{ver,k}$ есть значащая проекция вертикальной векторной составляющей \bar{a}_k ; $a_{gor,max}$, $a_{ver,max}$ – предельно допустимые абсолютные значения горизонтального и вертикального ускорения.

Для $\bar{a}_{gor,k}$ и $a_{ver,k}$ будем использовать следующие конечно-разностные представления:

$$\bar{a}_{gor,k} = \frac{\bar{v}_{gor,k} - \bar{v}_{gor,k-1}}{t_k - t_{k-1}}, \#(20)$$

$$a_{ver,k} = \frac{v_{ver,k} - v_{ver,k-1}}{t_k - t_{k-1}}, \#(21)$$

где $\bar{v}_{gor,k}$, $\bar{v}_{gor,k-1}$ есть вектора горизонтальной векторной

составляющей линейных скоростей \bar{v}_k и \bar{v}_{k-1} на k -м и $k-1$ -м временных шагах соответственно; $v_{ver,k}$, $v_{ver,k-1}$ - проекции указанных векторов скоростей на вертикальную ось OZ.

Для величин $\bar{v}_{gor,k}$, $\bar{v}_{gor,k-1}$ и $v_{ver,k}$, $v_{ver,k-1}$ используем следующие конечно-разностные представления:

$$\bar{v}_{gor,k} = \frac{\bar{r}_{gor,k} - \bar{r}_{gor,k-1}}{\Delta t_k}, \quad \bar{v}_{gor,k-1} = \frac{\bar{r}_{gor,k-1} - \bar{r}_{gor,k-2}}{\Delta t_{k-1}}, \quad \#(22)$$

$$v_{ver,k} = \frac{z_k - z_{k-1}}{\Delta t_k}, \quad v_{ver,k-1} = \frac{z_{k-1} - z_{k-2}}{\Delta t_{k-1}}, \quad \#(23)$$

где положено:

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}, \quad \Delta t_{k-1} = t_{k-1} - t_{k-2}. \quad \#(24)$$

Здесь рассмотрены три соседних узла кусочно-ломаной с номерами $k-2$, $k-1$ и k ; радиусы-векторы этих узлов в базовой земной системе координат задаются следующим образом:

$$\bar{r}_k = [\bar{r}_{gor,k}, z_k]^T, \quad \bar{r}_{k-1} = [\bar{r}_{gor,k-1}, z_{k-1}]^T, \quad \bar{r}_{k-2} = [\bar{r}_{gor,k-2}, z_{k-2}]^T \quad \#(25)$$

Комбинируя (20) с (22), а (21) с (23), получим выражения для компонент радиуса-вектора \bar{r}_k третьей точки:

$$\bar{r}_{gor,k} = \frac{[\bar{a}_{gor,k}(\Delta t_k)^2 \Delta t_{k-1} - \bar{r}_{gor,k-2} \Delta t_k + \bar{r}_{gor,k-1}(\Delta t_k + \Delta t_{k-1})]}{\Delta t_{k-1}}. \quad \#(26)$$

$$z_k = \frac{[a_{ver,k}(\Delta t_k)^2 \Delta t_{k-1} - z_{k-2} \Delta t_k + z_{k-1}(\Delta t_k + \Delta t_{k-1})]}{\Delta t_{k-1}}. \quad \#(27)$$

Рассмотрим алгоритм корректировки горизонтального и вертикального ускорений.

Пусть неравенство (18) не выполнено. Тогда производим корректировку горизонтального ускорения следующим образом:

$$\tilde{\bar{a}}_{gor,k} = (\bar{a}_{gor,k})_n a_{gor,max}. \quad \#(28)$$

После этого подстановка в (26) вместо $\bar{a}_{gor,k}$ скорректированной величины $\tilde{\bar{a}}_{gor,k}$ позволяет получить соответствующее скорректированное

значение $\tilde{r}_{gor,k}$ радиус-вектора k -го узла.

Точно так же, если условие (19) не выполнено, то корректируем значение вертикальной проекции ускорения следующим образом:

$$\tilde{a}_{ver,k} = sign(a_{ver,k})a_{ver,max}. \#(29)$$

Аналогично, подстановка в (27) вместо $a_{ver,k}$ скорректированной величины $\tilde{a}_{ver,k}$ позволяет получить соответствующее скорректированное значение \tilde{z}_k радиус-вектора k -го узла. В итоге после в общем случае двух корректировок получим уточненное положение k -го узла с учетом требований (18) и (19):

$$\tilde{r}_k = [\tilde{r}_{gor,k}, \tilde{z}_k]^T. \#(30)$$

Точка с радиусом-вектором \tilde{r}_k есть \tilde{B}_k .

Теперь рассмотрим полную методику корректировки положений узлов как с учетом скоростных требований, так и с учетом требований по ускорению.

Организуем перебор исходного множества узлов $\{B_k\}, k = 1, 2, \dots, K$, заданных в моменты времени $\{t_k\}, k = 1, 2, \dots, K$. Положение первого узла корректировать не будем. Вначале по первому узлу находим скорректированное положение второго \tilde{B}_2 , используя ранее рассмотренную методику учета скоростных ограничений и ограничений по углу тангажа (2) – (7) и равенство (17). Далее по второму узлу аналогично находим скорректированное положение третьего \tilde{B}_3 . После этого, используя методику корректировки узлов с учетом ограничений по линейному ускорению, согласно равенствам (26) – (30), находим повторно скорректированное положение третьего узла. Заметим, что при корректном задании границ допустимых диапазонов по скоростям и ускорениям после второй корректировки третьей точки не должно возникнуть противоречие условиям ограничения по скорости: потому что эта вторая корректировка производится

в сторону меньших ускорений, следовательно, в сторону меньших скоростей третьей точки при фиксированных скоростях для первых двух узлов. Это же правило действует и для всех последующих троек точек, перебираемых в цикле.

Далее, переходим к анализу тройки узлов с номерами $k = 2, 3, 4$, скоростей и ускорений в них. Производим вначале первую корректировку скорости в 4-м узле по критериям (2) – (7), корректируем его положение по (17), а далее, - проводим вторую его корректировку уже согласно (26)-(30).

Повторяем указанные действия для всех троек узлов $\tilde{B}_{k-2}, \tilde{B}_{k-1}, \tilde{B}_k$ при $k=3, 4, \dots, K$, каждый раз дважды корректируя положение третьего узла в каждой тройке.

Численные результаты

На рисунке 1 в качестве примера представлена траектория, полученная в результате двух стадий: на первой применяется метод потенциальных полей с получением соответствующей кусочно-линейной кривой, а далее, на втором, - применяется описанная выше двухэтапная процедура сглаживания.

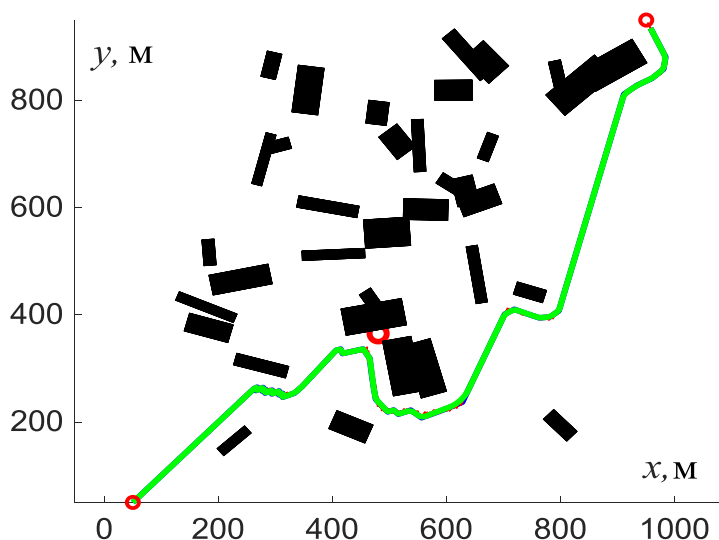
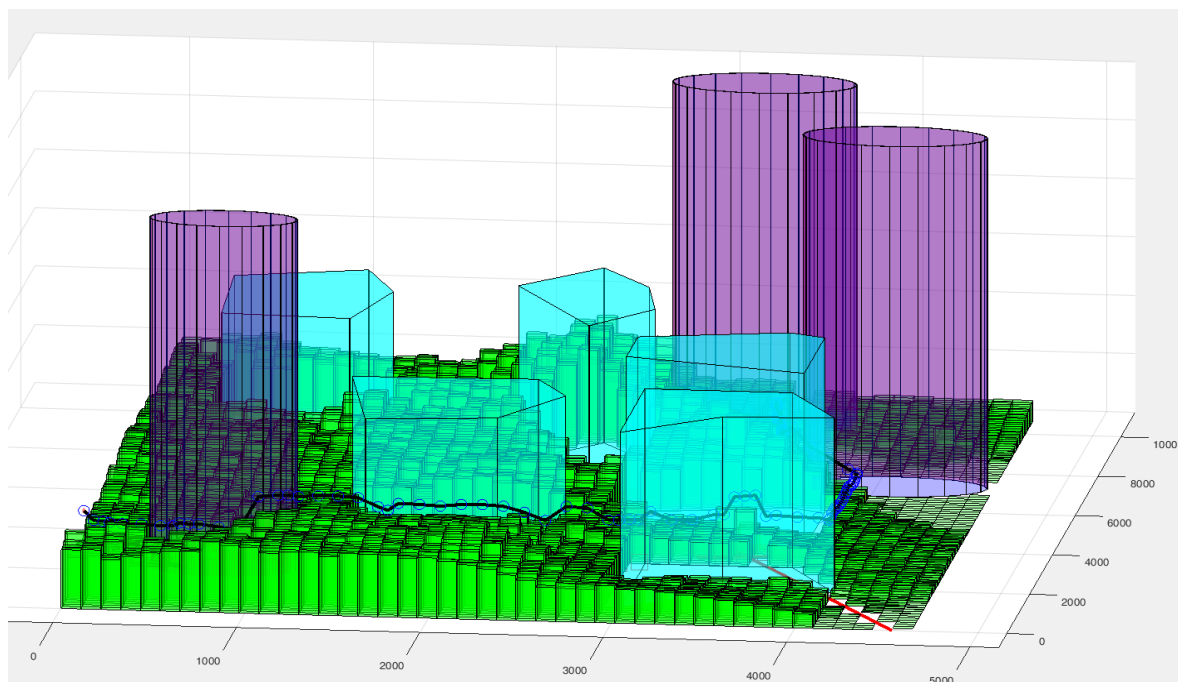
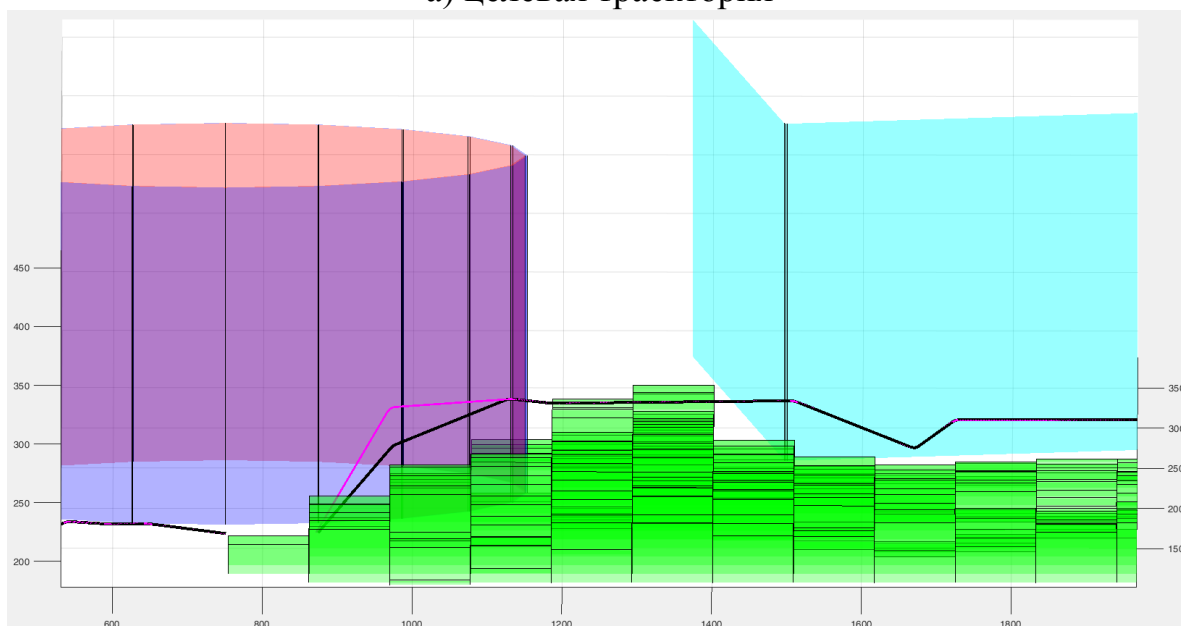


Рис. 1. – Моделирование траектории методом потенциальных полей с последующим двухэтапным сглаживанием



а) целевая траектория



б) один из участков кусочно-ломаной, скорректированный с учетом кинематических ограничений

Рис. 2. – К корректировке первоначально спланированной траектории

На рисунке 2 представлены некоторые результаты моделирования планирования перемещений одного БПЛА в трехмерной среде со сложным рельефом и полигональными препятствиями: на рисунке 2, а показана траектория, полученная в результате последовательной реализации трех

этапов: планирования по алгоритму D^* в проекционной двухмерной среде, восстановления соответствующих высот узлов траектории с учетом рельефа и препятствий, а также рассмотренной выше процедуры корректировки, подразумевающей сглаживание и учет кинематических ограничений аппарата.

При этом в качестве вектора предельных значений горизонтальных и вертикальных составляющих векторов линейных скорости и ускорения, а также угла тангажа, было взято:

$$\begin{aligned} & [v_{gor,min}, v_{gor,max}, v_{ver,l,max}, v_{ver,s,max}, a_{gor,max}, a_{ver,max}, \vartheta_{pr,l}, \vartheta_{pr,s}] = \\ & = \left[15, \frac{m}{c}; 100, \frac{m}{c}; 5, \frac{m}{c}; 10, \frac{m}{c}; 6, \frac{m}{c^2}; 5, \frac{m}{c^2}, 12, \text{град}; 12, \text{град} \right]. \#(31) \end{aligned}$$

На рисунке 2, б представлен один из участков целевой траектории, который был получен в результате существенной корректировки промежуточной траектории по рассмотренной выше методике с учетом ограничений (31). Здесь красным показан указанный участок до корректировки, а черным цветом выделен соответствующий фрагмент траектории, включающий этот участок.

Полученные в ходе проведенного численного моделирования результаты подтверждают адекватность разработанной методики корректировки первоначально спланированной траектории на основании кинематических ограничений аппарата.

Заключение.

Технические характеристики робототехнического комплекса могут существенно ограничивать класс тех траекторий, которые могут быть реализованы в процессе его управления. Прежде всего это относится к БПЛА самолетного типа.

В настоящей статье предложен подход, позволяющий учесть наиболее существенные кинематические ограничения для таких объектов управления и

нужным образом перепланировать целевую траекторию их движения.

Данный подход подразумевает двухэтапную корректировку первоначально-спланированной траектории.

На первом этапе производится сглаживание исходной траектории: вначале производится локальная корректировка ее участков по критерию минимальности длины, что позволяет существенно погасить возможные осцилляции; далее применяется модифицированный метод Дубинса, позволяющий получить гладкое временное параметрическое представление траектории, причем соответствующее представление траекторной скорости также является гладким.

На втором этапе принимаются во внимание ключевые кинематические ограничения аппарата и производится корректировка кривой по горизонтальным и вертикальным составляющим векторов линейных скоростей и ускорений, а также угла тангажа, в соответствии с известными предельными значениями этих переменных.

Предлагаемый метод корректировки предварительно спланированной траектории может быть дополнен подходом, подразумевающим дополнительно локальную оптимизацию этой траектории по энергетическому критерию с учетом известного или/и измеряемого ветрового поля в области движения аппарата [9]. Получающаяся в этом случае итоговая корректировка позволяет существенно улучшить управляемость аппарата.

Перспективным, на наш взгляд, является использование позиционно-траекторного управления на базе нелинейной многосвязной модели твердого тела [10] совместно с планировщиком перемещений, включающим рассмотренную выше корректировку по сглаживанию первоначально спланированной траектории, последующий учет кинематических ограничений аппарата и локальное перепланирование с учетом адекватно оцениваемой на борту меняющейся ветровой обстановки.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00337 «Разработка вероятностных методов оптимизации траекторий группы подвижных робототехнических комплексов в априори неопределенной среде», /rscf.ru/project/22-29-00337/ на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

Литература

1. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. V 2. Pp. 100 – 107.
2. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments. In Intelligent Unmanned Ground Vehicles, Springer, Boston, MA, USA. 1997. Pp. 203–220.
3. Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong Planning A*. Artificial Intelligence. 2004. V. 155(1-2). Pp. 93–146.
4. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. International Journal of Robotics Research. 1986. V. 5(1). Pp. 90–98.
5. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. Отношение потенциального поля в задаче поиска пути. Москва. Институт прикладной математики. Академия наук СССР, 1974. 27 с.
6. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования траектории. Труды ИСП РАН. 2016. Т. 28(4), с. 241-294.
7. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. 2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, 2000, pp. 293–308.



8. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х. Алгоритмы планирования сглаженных индивидуальных траекторий движения наземных роботов. Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т.23 (11). С. 585-595.

9. Костюков В.А., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д. Методика корректировки траектории БПЛА мультикоптерного типа для повышения его эффективности при движении в условиях горизонтальных ветровых потоков. Инженерный вестник Дона, 2020 №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8072.

10. Пшихопов В.Х., Кульченко А.Е., Чуфистов В.М. Инженерный вестник Дона, 2013, №. 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1650.

References

1. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. V 2. Pp. 100 – 107.

2. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments. In Intelligent Unmanned Ground Vehicles, Springer, Boston, MA, USA. 1997. Pp. 203–220.

3. Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong Planning A*. Artificial Intelligence. 2004. V. 155(1-2). Pp. 93–146.

4. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. International Journal of Robotics Research. 1986. V. 5(1). Pp. 90–98.

5. Platonov A.K., Karpov I.I., Kiril`chenko A.A. Otnoshenie potencial`nogo polya v zadache poiska puti [The relation of a potential field in a pathfinding problem]. Moskva. Institut prikladnoj matematiki. Akademiya nauk SSSR, 1974. 27 p.

6. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremenny`x metodov planirovaniya traektorii [Overview of modern trajectory planning methods]. Trudy` ISP RAN. 2016. T. 28(4), pp. 241-294.



7. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. 2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, 2000, pp. 293–308.

8. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshihopov V.H. Algoritmy planirovaniya sglazhennyh individual'nyh traektorij dvizheniya nazemnyh robotov. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie [Algorithms for planning smoothed individual trajectories of ground robots. Mechatronics, automation, control]. V.23 (11), 2022, pp. 585-595.

9. Kostyukov V.A., Giscov V.G., Evdokimov I.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8072.

10. Pshikhopov V.H., Kul`chenko A.E., Chufistov V.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1650.