

УДК 621.865

doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-24-33

Исследование метода одновременного планирования траектории и последовательности деформаций для тенсегрити-дрона*

Аль-Бадр Амер¹, С.И. Савин¹, Л.Ю. Ворочаева²

¹ Университет Иннополис

² Юго-Западный государственный университет

Study of the Method of Trajectory and Sequential Deformations Simultaneous Planning for a Tensegrity Drone

Al-Badr Amer¹, S.I. Savin¹, L.Yu. Vorochaeva²

¹ Innopolis University

² Southwest State University

Современные воздушные роботы, в частности дроны, развиваются быстрыми темпами. Дроны являются перспективным направлением робототехники при выполнении опасных задач во время поисково-спасательных работ, а также для таких практических приложений, как фото- и кинематография. Актуальной задачей становится обеспечение безопасности (устойчивости к механическим повреждениям) дронов при взаимодействии с внешней средой и людей в случае контакта с дронами. Для решения указанной задачи целесообразно использовать тенсегрити-дроны, обладающие деформируемой конструкцией и способностью адаптироваться к изменяющимся параметрам окружающего пространства с учетом встречающихся на их пути препятствий. Такие дроны могут проводить управляемую деформацию корпуса в процессе перемещения, что делает их более мобильными в сложных средах. Для планирования таких траекторий ранее был предложен метод, основанный на решении оптимизационной задачи с линейными матричными неравенствами. Однако численные свойства метода остались не изученными. Рассмотрена задача планирования траектории тенсегрити-дрона. Проведены численные эксперименты. Установлено, что на выполнимость задачи геометрические характеристики окружающего пространства оказывают незначительное влияние, а на вычислительную сложность и затрачиваемое процессорное время — весьма существенное.

Ключевые слова: тенсегрити-дрон, планирование траектории, линейные матричные неравенства, накрывающий эллипсоид, планирование последовательности деформаций

Modern aerial robots, in particular the drones, are developing at a rapid pace. Drones appear to be a promising area in robotics performing dangerous tasks during search and rescue operations, as well as in practical applications such as photography and cinematography. An urgent task is to ensure the drone safety against their mechanical damage when interacting with the external environment, as well as the safety of people in case of contact with the drones. To solve this problem, it is advisable to use tensegrity drones with the de-

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10246).

formable structure and the ability to adapt to the changing environment parameters taking into account the obstacles encountered in the flight. These drones are able to ensure the controlled deformation of their fuselage in flight making them more mobile in difficult environments. A method was previously proposed to plan such trajectories based on solving the optimization problem with the linear matrix inequalities. However, numerical properties of the method remained unexplored. The problem of planning the tensegrity drone flight was considered. Numerical experiments were carried out. It was established that the surrounding space geometry had insignificant effect on the task implementation, but very significantly affected computational complexity and elapsed processor time.

Keywords: tensegrity drone, flight planning, linear matrix inequalities, covering ellipsoid, deformation sequence planning

Современные воздушные роботы, в частности дроны с возможностью вертикального взлета и зависания, активно развиваются. Эти устройства имеют как уникальные преимущества перед другими летательными аппаратами, так и проблемы их использования.

Наиболее перспективными областями применения дронов являются доставка «последней мили» и «последнего метра», автоматизированное наблюдение за стихийными бедствиями и реагирование на них. К проблемам, требующим решения при эксплуатации дрона, относятся безопасность его взаимодействия с человеком, безопасность столкновения робота с препятствиями и надежность летательного аппарата.

Рассмотрим новый тип дрона с деформируемой структурой, основанной на принципе тенсегрити, что делает его более безопасным при взаимодействии с человеком, а также повышает его долговечность и устойчивость к столкновениям. Одним из основных достоинств тенсегрити-дрона (далее ТД) является способность изменять конфигурацию в процессе полета путем изменения длины упругих элементов (тросов или стоек). Это позволяет адаптировать форму ТД к геометрическим характеристикам окружающего пространства, например, уменьшить его ширину для пролета через узкий коридор.

В работе [1] предложен метод на основе программирования SDP (Semidefinite Programming), предполагающий планирование изменения конфигурации ТД в виде последовательности линейных деформаций так называемого накрывающего эллипсоида (эллипсоида, в который вписан дрон). Этот метод позволяет свести планирование последовательности деформаций к одной или нескольким SDP-задачам.

Решение SDP-задачи, представляющее собой последовательность эллипсоидов, можно соотнести с базой данных, содержащей конфи-

гурации ТД, их аппроксимации накрывающими эллипсоидами, а также собственные числа и векторы матриц этих эллипсоидов. Собственные числа и векторы позволяют быстро определить близость между эллипсоидами — найденным (спланированным) и имеющимся в базе данных.

Однако в работе [1] отсутствует анализ вычислительной сложности метода и его работоспособности в зависимости от условий задачи (геометрических характеристик окружающего пространства, числа дискретных шагов и др.).

Цель статьи — изучение влияния геометрических характеристик пространства, в котором работает ТД, на численные особенности алгоритма генерации желаемых траектории и деформаций ТД. Под численными особенностями будем понимать время, затрачиваемое на вычисления, и число итераций в решении оптимизационной задачи, представляющим собой искомые траектории и деформации.

Современное состояние исследований. Конструкции ТД. Одним из самых распространенных способов обеспечения безопасного взаимодействия человека и дрона является введение дополнительных защитных конструкций, исключающих прямой контакт человека с вращающимися лопастями [2–4].

Так как применение внешних конструкций может значительно увеличить массу и размеры ТД, в качестве защитных механизмов предлагается использовать облегченные конструкции (например, выполненные из современных композитных материалов), складные конструкции [5–7] и трансформируемые рамы [8, 9].

Следует отметить, что жесткие защитные конструкции способны свести к минимуму риск повреждения лопасти ТД, но не позволяют предотвратить травмы человека, вызванные контактом с корпусом летательного аппарата,

а также его повреждение в результате контакта с внешней средой.

Поэтому для повышения безопасности взаимодействия человека с ТД можно использовать гибкие (податливые) защитные конструкции. Например, в работе [10] улучшенную безопасность продемонстрировали ТД с нелинейными пружинами. Тем не менее, исследований в области конструкций дронов проведено мало.

Анализ в указанных работах исследований показал, что одним из перспективных направлений эволюции ТД в части незапланированных столкновений и падений может быть разработка устройств со складными и податливыми защитными конструкциями, которые имеют минимальную массу и отвечают стандартам безопасности. Это позволяет выделить новый конструктивный принцип проектирования дронов, базирующийся на использовании тенсегрити-структуры (далее ТС).

Тенсегрити-структуры. Такие структуры состоят из элементов, испытывающих чистое сжатие (стержней) и растяжение (тросов). В ТС звенья не соприкасаются друг с другом, а вся конфигурация обретает статическое равновесие под действием набора тросов, находящихся в деформированном состоянии [11, 12].

Среди многочисленных достоинств ТС можно выделить хорошее отношение массы к жесткости и способность эффективного распределения нагрузок между элементами, что делает общую конструкцию устойчивой к механическим повреждениям [13, 14]. Указанные свойства позволяют использовать ТС для разработки коллаборативных роботов, так как они легче и устойчивее к столкновениям, чем другие механические конструкции.

Другие достоинства ТС — гибкость и способность легко складываться — послужили основой для разработки NASA тенсегрити-зонда SUPERBall [15–17]. Кроме того, в статье [13] продемонстрировано, что проектирование роботов на основе ТС является эффективным подходом к работе с неизвестными возмущающими воздействиями, когда контактные силы нельзя определить или предсказать с требуемой точностью.

Таким образом, можно заключить, что ТС являются перспективным направлением по созданию воздушных роботов, безопасных зон при столкновении с человеком и препятствиями.

Методы планирования траектории дронов. Методы планирования траектории дрона

можно подразделить на две группы. Методы первой группы базируются на статическом планировании траектории ТД по известным картам препятствий. Это — диаграммы Вороного, алгоритм Дейкстры, алгоритм A*, алгоритм RRT и эволюционный алгоритм [18, 19].

Методы второй группы являются динамическими стратегиями поиска траектории ТД. К ним относятся оптимизация роя частиц (PSO), алгоритм D*, алгоритм гистограммы векторного поля (VFH), метод динамического окна (DWA) и метод искусственных потенциальных полей [20].

В работе [21] приведен алгоритм эллипсоидального отображения (EMA), относящийся к динамическим методам планирования траектории ТД, основанный на эллипсоидах ковариации и методах кластеризации. EMA создает небольшие карты, содержащие достаточно информации для правильного описания внешней среды и используемые в алгоритмах навигации робота.

Этот оригинальный подход к планированию траектории ТД по карте, основанный на генетическом алгоритме, использует эллипсоидные объекты для представления препятствий независимо от их вогнутости и вычисления путей.

В работе [22] предложена процедура быстрого поиска KD-Tree для построения коридора полета ТД, гарантирующего безопасность в трехмерном пространстве. Для этого применяют алгоритм поиска пути на основе выборки, базирующийся на динамически строящейся карте облака точек. Также использован метод генерации траекторий на основе квадратичного программирования с квадратичными ограничениями (QCQP), позволяющий строить траектории, которые полностью ограничены пределами коридора.

Для уменьшения временных затрат на построение траектории ТД предложен метод поиска пути на основе быстрого марша, что позволяет его найти в пространстве скоростей с евклидовой нормой. После этого траектория формируется в виде кусочных кривых Безье, граничных положений и динамики траектории более высокого порядка в пределах безопасных с помощью полиномиального базиса Бернштейна.

В работе [9] продемонстрирована базовая система трансформации квадрокоптера, состоящая из четырех рук, которые могут складываться вокруг основного корпуса. Для обеспе-

чения устойчивого полета этот метод не требует симметрии. Показано, что базовые механизмы изменения конфигурации в сочетании с адаптивным управлением можно использовать для расширения диапазона применения квадрокоптера. При этом требуют дальнейших исследований автоматический выбор конфигурации, ее применение для улучшенного высокоскоростного полета и оптимальный выбор механических конструкций таких устройств.

Нейросетевое решение для изменения конфигурации ТД, обеспечивающее его передвижение между препятствиями, найдено в работе [23]. Здесь рассмотрены задачи, в которых робот должен пройти между двумя параллельными препятствиями в виде пластин, предложен способ формирования обучающей выборки, структуры нейросети и процесса обучения.

При использовании квазистатических траекторий (в каждом узле которых ТД находится в состоянии статического равновесия) в пространстве конфигураций предложенный предиктор способен предсказывать как конфигурацию ТС, так и желаемые длины покоя приводимых в действие эластичных элементов, что можно рассматривать в качестве команд для систем управления низкого уровня.

Описание проблемы. Пусть задана карта Ω , определенная как объединение политопов H_i , описываемых линейными уравнениями $H_i = \{x: A_i x \leq b_i\}$. Пусть ТД определяется набором узлов (точек, в которых тросы ТС прикреплены к стержням), положение которых относительно центра масс ТД обозначим как p_j^q (q — номер конфигурации из ее базы данных), а положение центра масс в момент времени t_k — как x_k ($k = 1, \dots, N$).

Поставим следующую задачу: найти последовательность равномерно распределенных положений центров масс x_k из начальной точки x_s к конечной x_f , таких что $\forall k \exists q(k): x_k + p_j^q \in \Omega$. Ее можно решить как оптимизационную выпуклую задачу с линейными неравенствами, как показано в работе [1]. Рассмотрим, как число шагов в траектории N определяет число итераций и время, затраченное на решение задачи.

Описание метода исследования. Исследуем подход, основанный на описании геометрических характеристик ТС через накрывающие эллипсоиды [1].

Указанный подход заключается в следующем. Установив соответствие между накрывающими эллипсоидами и конфигурациями ТС, планируют последовательность деформаций эллипсоидов на заданной карте и осуществляют переход к плану в конфигурационном пространстве ТС. Для определения соответствия между заданной конфигурацией ТС и эллипсоидом находят соответствующий ей внешний эллипсоид Левнера — Джона (outer Löwner — John ellipsoid) с помощью одной SDP-программы.

Для определения ближайшей к заданному эллипсоиду конфигурации используют табличный метод: формируют базу данных конфигураций ТС без учета таковых с провисанием тросов или с касающимися друг друга стойками. Для каждой конфигурации определяют соответствующий ей внешний эллипсоид. При создании базы данных в нее записывают разложение матрицы эллипсоида по собственному базису и норму вектора изменений управляемых длин упругих элементов структуры, приведших ее к заданной конфигурации.

Изменения отсчитывают от некоторых заданных предпочтительных значений, которые могут соответствовать центру интервалов возможных управляемых длин. Тогда для определения степени соответствия конфигурации ТС заданному эллипсоиду вычисляют произведение обратной матрицы этого эллипсоида, собственного базиса и диагональной матрицы собственных чисел обратной матрицы накрывающего эллипсоида данной конфигурации.

Затем нормы столбцов полученной матрицы подставляют в барьерную функцию, таким образом проверяя вхождение получаемой конфигурации (заданной накрывающим эллипсоидом) в желаемый эллипсоид. После добавления к полученному результату нормы вектора изменений управляемых длин упругих элементов оценивают близость конфигурации к заданному эллипсоиду.

Столь сложная процедура предложена для экономии вычислительных ресурсов, что позволяет не только минимизировать объем расчетов на этапе сопоставления эллипсоидов и конфигураций, но и распараллелить процесс вычислений. Единственной последовательной операцией в процессе является поиск минимума в массиве полученных оценок.

Для планирования последовательности деформаций предложен способ, основанный на

поиске вписанных эллипсоидов Левнера — Джона, что требует решения единственной SDP-задачи и представления свободного от препятствий пространства как объединения выпуклых многогранников. Для этой цели можно использовать многочисленные известные алгоритмы, в частности разработанный в MIT алгоритм IRIS [24] или метод стереографических проекций [25].

Планирование пути ТД на объединении конечного числа выпуклых многогранников сводится к целочисленной выпуклой задаче (Mixed-Integer Convex Programming) с использованием метода Big-M. Такую задачу можно решить с помощью целочисленных решателей (solvers — специализированных программных библиотек для решения задач выпуклого программирования).

Результаты исследований. Для проверки предложенного алгоритма и анализа его численных свойств выполнены численные исследования. В качестве объекта исследования рассмотрена ТС с шестью стержнями, известная как Sixbar-тенсегрити. Будем использовать параметры модели ТС, приведенные в таблице.

Параметры модели ТС

Параметр	Значение
Число узлов ТС	12
Число стержней ТС	6
Число тросов	24
Длина стержня, м	0,5
Длина троса, м	0,25
Число конфигураций в базе данных	1000

Эксперименты состояли из двух частей: в первой рассматривали, имеет ли поставленная задача решение, во второй исследовали влияние геометрических характеристик пространства Ω на числовые свойства метода, решая набор задач с немного различающимися формами Ω .

SDP-планировщик пути ТД. Рассмотрим первый эксперимент: даны две комнаты лабиринта R1 и R2, соединенные тремя узкими наклонными шахтами 1–3 (рис. 1, а), образующими угол $\theta = 30^\circ$ (рис. 1, б).

Задача заключалась в том, чтобы пройти от начальной точки в комнате R1 до конечной

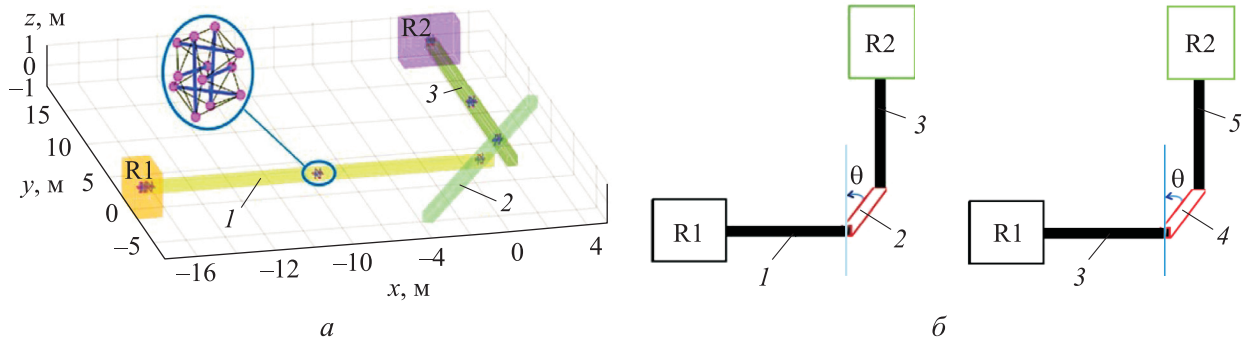


Рис. 1. Схемы пространственного (а) и плоского (б) отображения двухкомнатного лабиринта с тремя шахтами

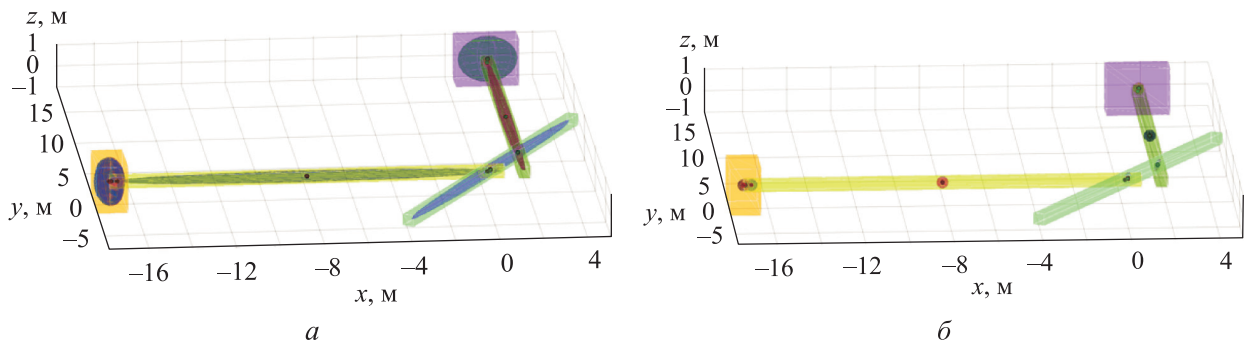


Рис. 2. Результаты решения задачи планирования траектории ТД: а — найденные вписанные эллипсоиды; б — поставленные им в соответствие накрывающие эллипсоиды из базы данных

точки в комнате R2 с использованием функции деформации и SDP-планировщика пути. Для формулировки задачи использован CVX, а для ее решения — SDPT3 4.0. В эксперименте получено 373 ограничения в виде равенств и 1148 переменных.

Результаты решения задачи планирования траектории ТД приведены на рис. 2, где показаны найденные вписанные эллипсоиды и поставленные им в соответствии накрывающие эллипсоиды из базы данных. Полученное решение потребовало 1,27 с с разрывом (relative gap) $9,06 \cdot 10^{-9}$, что указывает на возможность использования метода для планирования пути в реальном времени.

Влияние геометрических свойств пространства, свободного от препятствий, на объем вычислений, необходимых для поиска решения. Во втором эксперименте рассматривали такой же двухкомнатный лабиринт с тремя шахтами (см. рис. 1), для пятнадцати интервалов угла θ , сформированных как $[\theta_c - 2, \theta_c + 2]$, где центры интервалов задавали в виде $\theta_c \in \{-83^\circ, -78^\circ, -73^\circ, \dots, -13^\circ\}$. Угол изгиба выбирался случайно с равномерным распределением $\theta_i \in U(\theta_c - 2, \theta_c + 2)$ со стандартной ошибкой угла, равной 2° .

Для каждого интервала проводили 100 экспериментов и вычисляли средние значения количества переменных $v(\theta)$, числа итераций $n(\theta)$ и процессорного времени $t(\theta)$. Стандартную ошибку определяли по формуле

$$e = \sigma / \sqrt{N},$$

где σ — стандартное отклонение; N — количество выборки.

После проведения экспериментов были исключены результаты, отличающиеся от среднего значения более чем на три стандартных отклонения. Это сделано с целью определения количества переменных v (рис. 3, а), числа итераций n (рис. 3, б) и процессорного времени t (рис. 3, в) как функций угла θ с учетом возникающих погрешностей.

Анализ полученных графиков позволяет сделать следующие выводы:

- решатель достиг решения задачи, т. е. они допустимы;
- количество переменных зависит от угла θ ;
- на сложность, определяемую числом итераций, влияет угол θ ;

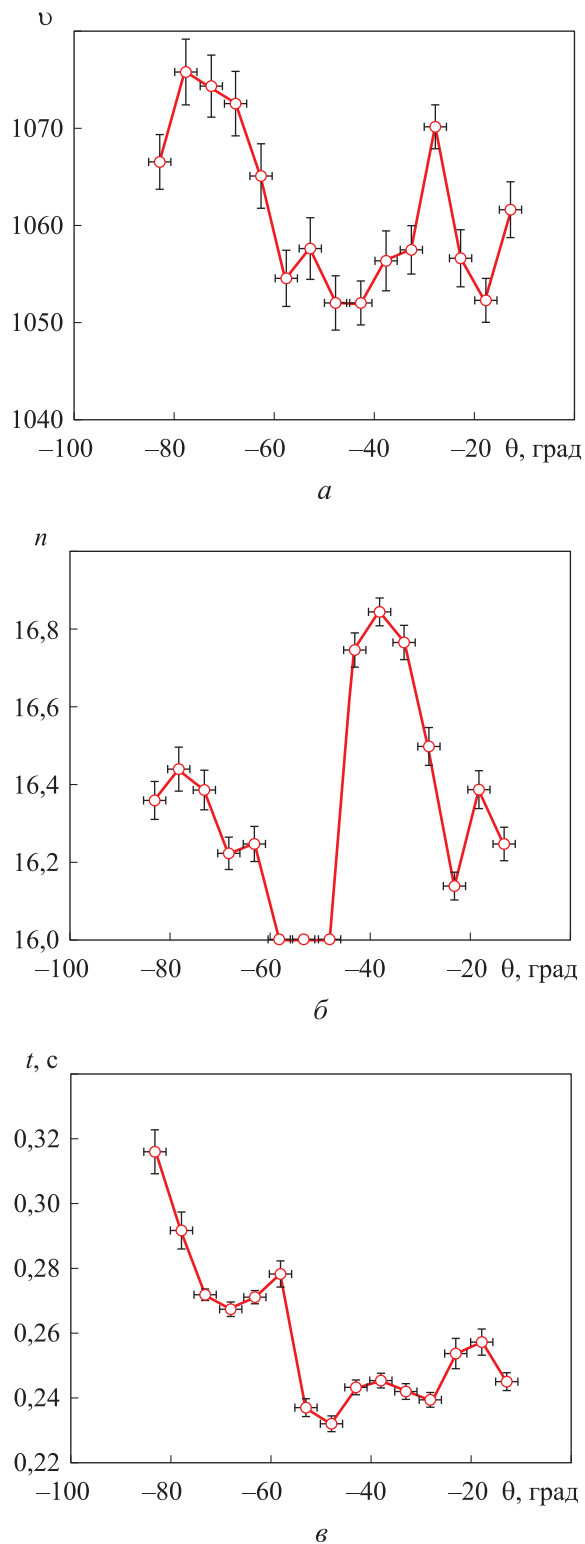


Рис. 3. Зависимости количества переменных v (а), числа итераций n (б) и процессорного времени t (в) от угла θ

- процессорное время практически не зависит от угла θ ;
- при проектировании траектории ТД в лабиринте необходимо искать оптимальный

интервал углов, в котором будут наблюдаться меньшее количество переменных и число итераций, что приведет к вычислительной эффективности алгоритма;

• угол θ не влияет на реализуемость задачи построения траектории ТД в лабиринте, но оказывает существенное влияние на количество переменных и сложность алгоритма.

Выводы

1. Предложен оригинальный подход к планированию траектории ТД, базирующийся на описании геометрических характеристик ТС через накрывающие объемы в форме эллипсоидов.

2. Проведены численные эксперименты, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма. С помощью SDP-программирования решена задача обнаружения последовательности конфигураций деформируемых ТД как последовательности деформаций исходной формы. Эксперименты проведены путем изменения угла θ лабиринта.

3. Анализ результатов экспериментов по влиянию нетопологических воздействий на производительность предложенного алгоритма путем изменения угла θ показал, что последний не влияет на реализуемость задачи планирования траектории ТД, но оказывает существенное влияние на процессорное время, количество переменных и число итераций.

Литература

- [1] Savin S., Klimchik A. Morphing-enabled path planning for flying tensegrity robots as a semidefinite program. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022, vol. 9, art. 812849, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.812849>
- [2] Nitta K., Higuchi K., Rekimoto J. HoverBall: augmented sports with a flying ball. *5th Augmented Human Int. Conf.*, 2014, doi: <https://doi.org/10.1145/2582051.2582064>
- [3] Yamaguchi K., Kato G., Kuroda Y. et al. A non-grounded and encountered-type haptic display using a drone. *Symp. on Spatial User Interaction*, 2016, pp. 43–46, doi: <https://doi.org/10.1145/2983310.2985746>
- [4] Brescianini D., D'Andrea R. Design, modeling and control of an omni-directional aerial vehicle. *IEEE ICRA*, 2016, pp. 3261–3266, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487497>
- [5] Kornatowski P.M., Bhaskaran A., Heitz G.M. et al. Last-centimeter personal drone delivery: field deployment and user interaction. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 3813–3820, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2856282>
- [6] Kornatowski P.M., Mintchev S., Floreano D. An origami-inspired cargo drone. *IEEE/RSJ IROS*, 2017, pp. 6855–6862, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206607>
- [7] Shu J., Chirattananon P. A quadrotor with an origami-inspired protective mechanism. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2019, vol. 4, no. 4, pp. 3820–3827, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2929978>
- [8] Bucki N., Mueller M.W. Design and control of a passively morphing quadcopter. *IEEE ICRA*, 2019, pp. 9116–9122, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794373>
- [9] Falanga D., Kleber K., Mintchev S. et al. The foldable drone: a morphing quadrotor that can squeeze and fly. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2019, vol. 4 no. 2, pp. 209–216, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2885575>
- [10] Klaptocz A., Briod A., Daler L. et al. Euler spring collision protection for flying robots. *IEEE/RSJ IROS*, 2013, pp. 1886–1892, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696606>
- [11] Skelton R.E., de Oliveira M.C. *Tensegrity systems*. Springer. 2009. 216 p.
- [12] Guest S.D. The stiffness of tensegrity structures. *IMA J. of Applied Mathematics*, 2011, vol. 76, no. 1, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.1093/imamat/hxq065>
- [13] Caluwaerts K., Despraz J., Işçen A. et al. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation. *J. R. Soc. Interface*, 2014, vol. 11, no. 98, art. 20140520, doi: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0520>
- [14] Paul C., Valero-Cuevas F.J., Lipson H. Design and control of tensegrity robots for locomotion. *IEEE Trans. Robot.*, 2006, vol. 22, no. 5, pp. 944–957, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.878980>

- [15] Sabelhaus A.P., Bruce J., Caluwaerts K. et al. System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot. *IEEE ICRA*, 2015, pp. 2867–2873, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139590>
- [16] Bruce J., Sabelhaus A.P., Chen Y. et al. SUPERball: exploring tensegrities for planetary probes. *i-SAIRAS*, 2014, vol. ARC-E-DAA-TN15338.
- [17] Sabelhaus A.P., Bruce J., Caluwaerts K. et al. Hardware design and testing of SUPERball, a modular tensegrity robot. *WCSCM*, 2014, doc. 20140011157.
- [18] Park J.K., Chung T.M. Boundary-RRT* algorithm for drone collision avoidance and interleaved path re-planning. *J. of Information Processing Systems*, 2020, vol. 16, no. 6, pp. 1324–1342.
- [19] Jia D., Vagners J. Parallel evolutionary algorithms for UAV path planning. *AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conf.*, 2004, art. 6230, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2004-6230>
- [20] Duchoň F., Babinec A., Kajan M. et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Eng.*, 2014, vol. 96, pp. 59–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
- [21] Villaseñor C., Gallegos A.A., Lopez-Gonzalez G. et al. Ellipsoidal path planning for unmanned aerial vehicles. *Appl. Sci.*, 2021, vol.11, no. 17, art. 7997, doi: <https://doi.org/10.3390/app11177997>
- [22] Gao F., Wu W., Lin Y. et al. Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and Bernstein basis polynomial. *IEEE ICRA*, 2018, pp. 344–351, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8462878>
- [23] Zalyaev E., Savin S. Tensegrity morphing: machine learning-based tensegrity deformation predictor for traversing cluttered environments. *APMS. Springer*, 2021, pp. 473–480, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_50
- [24] Deits R., Tedrake R. Computing large convex regions of obstacle-free space through semidefinite programming. In: *Algorithmic foundations of robotics XI*. Springer, 2015, pp. 109–124.
- [25] Savin S. An algorithm for generating convex obstacle-free regions based on stereographic projection. *IEEE SIBCON*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998590>

References

- [1] Savin S., Klimchik A. Morphing-enabled path planning for flying tensegrity robots as a semidefinite program. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022, vol. 9, art. 812849, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.812849>
- [2] Nitta K., Higuchi K., Rekimoto J. HoverBall: augmented sports with a flying ball. *5th Augmented Human Int. Conf.*, 2014, doi: <https://doi.org/10.1145/2582051.2582064>
- [3] Yamaguchi K., Kato G., Kuroda Y. et al. A non-grounded and encountered-type haptic display using a drone. *Symp. on Spatial User Interaction*, 2016, pp. 43–46, doi: <https://doi.org/10.1145/2983310.2985746>
- [4] Brescianini D., D'Andrea R. Design, modeling and control of an omni-directional aerial vehicle. *IEEE ICRA*, 2016, pp. 3261–3266, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487497>
- [5] Kornatowski P.M., Bhaskaran A., Heitz G.M. et al. Last-centimeter personal drone delivery: field deployment and user interaction. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 3813–3820, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2856282>
- [6] Kornatowski P.M., Mintchev S., Floreano D. An origami-inspired cargo drone. *IEEE/RSJ IROS*, 2017, pp. 6855–6862, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206607>
- [7] Shu J., Chirarattananon P. A quadrotor with an origami-inspired protective mechanism. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2019, vol. 4, no. 4, pp. 3820–3827, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2929978>
- [8] Bucki N., Mueller M.W. Design and control of a passively morphing quadcopter. *IEEE ICRA*, 2019, pp. 9116–9122, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794373>
- [9] Falanga D., Kleber K., Mintchev S. et al. The foldable drone: a morphing quadrotor that can squeeze and fly. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2019, vol. 4 no. 2, pp. 209–216, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2885575>

- [10] Klaptocz A., Briod A., Daler L. et al. Euler spring collision protection for flying robots. *IEEE/RSJ IROS*, 2013, pp. 1886–1892, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696606>
- [11] Skelton R.E., de Oliveira M.C. *Tensegrity systems*. Springer., 2009. 216 p.
- [12] Guest S.D. The stiffness of tensegrity structures. *IMA J. of Applied Mathematics*, 2011, vol. 76, no. 1, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.1093/imamat/hxq065>
- [13] Caluwaerts K., Despraz J., Işcen A. et al. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation. *J. R. Soc. Interface*, 2014, vol. 11, no. 98, art. 20140520, doi: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0520>
- [14] Paul C., Valero-Cuevas F.J., Lipson H. Design and control of tensegrity robots for locomotion. *IEEE Trans. Robot.*, 2006, vol. 22, no. 5, pp. 944–957, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.878980>
- [15] Sabelhaus A.P., Bruce J., Caluwaerts K. et al. System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot. *IEEE ICRA*, 2015, pp. 2867–2873, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139590>
- [16] Bruce J., Sabelhaus A.P., Chen Y. et al. SUPERball: exploring tensegrities for planetary probes. *i-SAIRAS*, 2014, vol. ARC-E-DAA-TN15338.
- [17] Sabelhaus A.P., Bruce J., Caluwaerts K. et al. Hardware design and testing of SUPERball, a modular tensegrity robot. *WCSCM*, 2014, doc. 20140011157.
- [18] Park J.K., Chung T.M. Boundary-RRT* algorithm for drone collision avoidance and interleaved path re-planning. *J. of Information Processing Systems*, 2020, vol. 16, no. 6, pp. 1324–1342.
- [19] Jia D., Vagners J. Parallel evolutionary algorithms for UAV path planning. *AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conf.*, 2004, art. 6230, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2004-6230>
- [20] Duchoň F., Babinec A., Kajan M. et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Eng.*, 2014, vol. 96, pp. 59–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
- [21] Villaseñor C., Gallegos A.A., Lopez-Gonzalez G. et al. Ellipsoidal path planning for unmanned aerial vehicles. *Appl. Sci.*, 2021, vol.11, no. 17, art. 7997, doi: <https://doi.org/10.3390/app11177997>
- [22] Gao F., Wu W., Lin Y. et al. Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and Bernstein basis polynomial. *IEEE ICRA*, 2018, pp. 344–351, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8462878>
- [23] Zalyaev E., Savin S. Tensegrity morphing: machine learning-based tensegrity deformation predictor for traversing cluttered environments. *APMS. Springer*, 2021, pp. 473–480, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_50
- [24] Deits R., Tedrake R. Computing large convex regions of obstacle-free space through semidefinite programming. In: *Algorithmic foundations of robotics XI*. Springer, 2015, pp. 109–124.
- [25] Savin S. An algorithm for generating convex obstacle-free regions based on stereographic projection. *IEEE SIBCON*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998590>

Статья поступила в редакцию 21.06.2022

Информация об авторах

АМЕР Аль-Бадр — аспирант. Университет Иннополис (420500, Иннополис, Татарстан, Российская Федерация, ул. Университетская, д. 1, e-mail: a.albadr@innopolis.university).

САВИН Сергей Игоревич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования. Университет Иннополис (420500, Иннополис, Татарстан, Российская Федерация, ул. Университетская, д. 1, e-mail: s.savin@innopolis.ru).

Information about the authors

AMER Al Badr — Postgraduate. Innopolis University (420500, Innopolis, Tatarstan, Russian Federation, Universitetskaya St., Bldg. 1, e-mail: a.albadr@innopolis.university).

SAVIN Sergei Igorevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Mechatronics, Control and Prototyping. Innopolis University (420500, Innopolis, Tatarstan, Russian Federation, Universitetskaya St., Bldg. 1, e-mail: s.savin@innopolis.ru).

ВОРОЧАЕВА Людмила Юрьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники. Юго-Западный государственный университет (305040, Курск, Российская Федерация, ул. 50 лет Октября, д. 94, e-mail: mila180888@yandex.ru).

VOROCNAEVA Lyudmila Yurievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics. Southwest State University (305040, Kursk, Russian Federation, 50 let Oktyabrya St., Bldg. 94, e-mail: mila180888@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Амер Аль-Бадр, Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Исследование метода одновременного планирования траектории и последовательности деформаций для тенсегрити-дрона. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 12, с. 24–33, doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-24-33

Please cite this article in English as:

Amer Al-Badr, Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Study of the Method of Trajectory and Sequential Deformations Simultaneous Planning for a Tensegrity Drone. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 12, pp. 24–33, doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-24-33



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебник
«Инженерная графика»**

Авторы: Л.С. Сенченкова, Н.В. Палий, А.Ю. Горячкина

Учебник разработан в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение (уровень бакалавриата) и специалитета 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов (уровень специалитета) и полностью соответствует рабочей программе дисциплины «Инженерная графика», читаемой в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Согласно стандартам Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), представлены определения и правила, даны рекомендации по выбору изображений деталей, изложены правила нанесения размеров. Показана последовательность выполнения изображений сборочной единицы с натуры, приведены правила составления спецификации и выполнения чертежей деталей по чертежу сборочной единицы, а также основные правила классификации и обозначения изделий в конструкторских документах. Рассмотрены особенности составления чертежей отдельных видов изделий.

Для студентов, изучающих дисциплину «Инженерная графика» в высших учебных заведениях.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>