

СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕКСАПОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМЫ ПОСАДКИ БПЛА В УСЛОВИЯХ КАЧКИ МОРСКОГО НОСИТЕЛЯ ПО КРИТЕРИЮ ОПТИМИЗАЦИИ СРЕДНЕГО КИНЕТОСТАТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА

Бояркина Ю.В., Жуков Ю.А.

*Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: платформа Стюарта, гексапод, кинематическая оптимизация, показатель глобальной обусловленности, компенсация качки, посадка БПЛА.

Аннотация. Актуальной задачей является обеспечение безопасной посадки БПЛА на палубу судна в условиях волновой качки. Вариантом решения является использование посадочной платформы с активной стабилизацией на базе платформы Стюарта. В работе проведён синтез параметров размещения шарниров по двум схемам: одноокружной и двухокружной, по кинетостатическому показателю качества. Разработана математическая модель кинематики и целевая функция со штрафными ограничениями, учитывающими реализуемость конструкции и предотвращение коллизий приводов. Результаты показали, что двухокружная схема обеспечивает улучшение целевого показателя качества на 10% по сравнению с одноокружной. Предложенная методика может быть использована при проектировании посадочных платформ БПЛА с активной стабилизацией в условиях волновой качки до 4 баллов.

SYNTHESIS OF KINEMATIC PARAMETERS OF THE HEXAPOD FOR STABILIZATION OF THE UAV LANDING PLATFORM UNDER CONDITIONS OF ROLLING OF THE MARINE CARRIER ACCORDING TO THE GLOBAL CONDITIONAL INDEX

Boyarkina J.V., Zhukov Y.A.

*Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

Keywords: Stewart platform, hexapod, kinematic optimization, Global Conditioning Index, pitching compensation, UAV landing.

Abstract. An urgent task is to ensure the safe landing of the UAV on the deck of the vessel in conditions of rolling waves. A possible solution is to use an active stabilization landing platform based on the Stewart platform. The paper synthesizes the parameters of the hinge placement according to two schemes: single circle and concentric circle design, according to the Global Conditioning Index (GCI). A mathematical model of kinematics and an objective function with penalty constraints have been developed, taking into account the feasibility of the design and the prevention of drive collisions. The results showed that the concentric circle design provides a 10% improvement in GCI compared to the single-circle one. The proposed technique can be used in the design of active UAV landing platforms for medium-sized vessels in conditions of a rolling wave of 4 points.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются в морских операциях таких как: мониторинг акваторий, поисково-спасательные работы, доставка небольших грузов на суда. Однако ключевой проблемой остаётся безопасная посадка БПЛА на палубу судна в условиях волновой качки. Для малых судов волнение в 3 балла уже создаёт трудности для точного позиционирования.

Существующие системы посадки – механические захваты, оптические и сенсорные системы наведения имеют следующие недостатки: сложность механики, риск повреждения БПЛА, низкая эффективность в условиях плохой видимости, высокая чувствительность к внешним возмущениям [1].

Перспективным решением является использование системы с активной стабилизацией посадочной платформы, например, на базе платформы Стюарта [2]. К преимуществам данного типа платформы можно отнести: компенсацию по 6 степеням свободы, высокую точность позиционирования при волнении до 4-5 баллов, также совместимость с различными БПЛА. Ключевой задачей при проектировании такой системы является выбор кинематических параметров: радиусов оснований, углов установки шарниров, длин штанг.

Задача исследования: выполнить сравнительный анализ двух типов платформ Стюарта по среднему кинетостатическому показателю качества, разработать методику кинематической оптимизации с учётом конструктивных ограничений и определить схему для задачи компенсации волновой качки.

Теория

Кинематические схемы платформы Стюарта

Платформа Стюарта состоит из неподвижного основания и подвижной платформы, которые механически связаны посредством шести идентичных звеньев – ног (штанг, стоек). Каждая нога выполняет функцию линейного привода и состоит из двух полуштанг, соединённых шарнирами с основанием и платформой.

Для решения задач кинематики введем системы координат. Неподвижная система координат $Oxuz$ связана с центром основания, подвижная система координат $Ox'y'z'$ – с платформой.

Положение центра платформы относительно неподвижной системы координат будем определять с помощью декартовых координат x, y, z . Для определения ориентации платформы будем использовать углы Эйлера φ, θ, ψ [3]. Таким образом, положение и угловая ориентация платформы задаются вектором состояний $q = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$.

Одноокружная схема (Single Circle – SC)

Одноокружная конструкция является наиболее простой и распространённой конфигурацией платформы Стюарта. В такой конструкции все шарниры расположены на одной и той же круговой траектории, как на основании, так и на платформе, показано на рисунке 1. Положение i -го шарнира определяется радиусами основания и платформы – r_b и r_p соответственно, и углами разнесения между точками крепления φ_b и φ_p .

Для создания симметричной конструкции шарниры приводов распределены равномерно по отношению к углам разнесения. Позиционные углы ψ_i и Ψ_i для i -го шарнира привода на основании и платформе соответственно рассчитаны по формулам:

$$\psi_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varphi_b}{2}, \Psi_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varphi_p}{2}, i = 1, 3, 5,$$

$$\psi_i = \psi_{i-1} + \varphi_b, \Psi_i = \Psi_{i-1} + \varphi_p, i = 2, 4, 6.$$

Векторы положения b_i и p_i для i -го привода определяются следующим образом:

$$b_i = [r_b \cos(\psi_i), r_b \sin(\psi_i), 0]^T,$$

$$p_i = [r_p \cos(\Psi_i), r_p \sin(\Psi_i), 0]^T.$$

Таким образом, вектор параметров одноокружной схемы имеет вид: $\lambda_{sc} = [\varphi_b, \varphi_p, r_b, r_p, h]^T$, где h – высота платформы в нейтральном положении.

Двухокружная схема (Concentric Circle - CC)

На рисунке 2 представлена двухокружная схема. При такой схеме точки крепления приводов расположены на двух разных окружностях, что позволяет приводам пересекаться друг с другом, тем самым увеличить рабочую область.

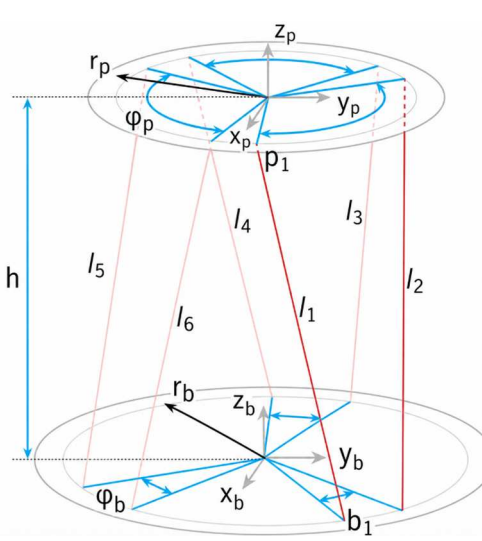


Рис. 1. Одноокружная схема

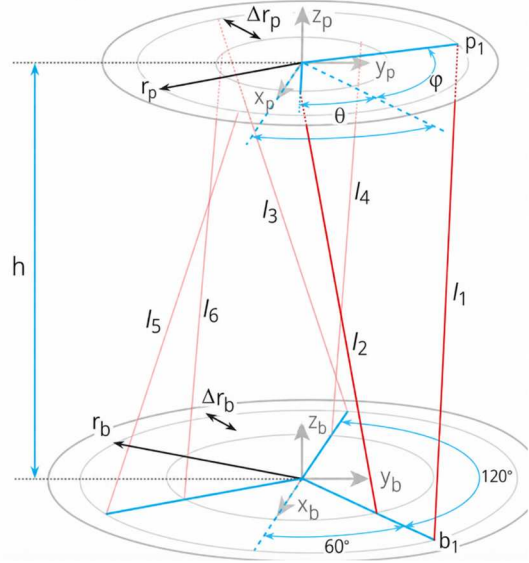


Рис. 2. Двухокружная схема

Точки крепления привода на основании расположены попарно на расстоянии 120° друг от друга, по одной точке крепления на каждой круговой траектории. На подвижной платформе шарниры расположены под разными углами φ и θ . Позиционные углы ψ_i и Ψ_i для i -го шарнира привода на основании и платформе соответственно рассчитаны по формулам:

$$\psi_i = \frac{i\pi}{3} \quad \Psi_i = \frac{i\pi}{3} - \varphi \quad i = 1, 3, 5,$$

$$\psi_i = \psi_{i-1} \quad \Psi_i = \Psi_{i-1} + \theta \quad i = 2, 4, 6.$$

Векторы положения b_i и p_i для приводов определяются следующим образом:

$$b_i = \begin{bmatrix} r_b \cos(\psi_i) \\ r_b \sin(\psi_i) \\ 0 \end{bmatrix}, p_i = \begin{bmatrix} r_p \cos(\Psi_i) \\ r_p \sin(\Psi_i) \\ 0 \end{bmatrix}, i = 1, 3, 5,$$

$$b_i = \begin{bmatrix} (r_b - \Delta r_b) \cos(\psi_i) \\ (r_b - \Delta r_b) \sin(\psi_i) \\ 0 \end{bmatrix}, p_i = \begin{bmatrix} (r_p - \Delta r_p) \cos(\Psi_i) \\ (r_p - \Delta r_p) \sin(\Psi_i) \\ 0 \end{bmatrix}, i = 2, 4, 6.$$

Таким образом, вектор параметров двухокружной схемы имеет вид:

$$\lambda_{cc} = [\varphi, \theta, r_b, \Delta r_b, r_p, \Delta r_p, h]^T.$$

Показатель глобальной обусловленности (Global Conditioning Index – GCI)

Кинематика платформы Стюарта описывается вектором состояний q и вектором длин штанг l . Связь между скоростями длин штанг $\dot{l} = [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6]^T$ и обобщёнными скоростями $\dot{q} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ устанавливает матрица Якоби:

$$\dot{l} = J\dot{q}.$$

Якобиан 6×6 имеет вид:

$$J(q) = \begin{bmatrix} e_1^T & (Rp_1 \times e_1)^T \\ \dots & \dots \\ e_6^T & (Rp_6 \times e_6)^T \end{bmatrix},$$

где e_i – единичный вектор в направлении i -го привода относительно глобальной системы координат; p_i – векторы положений шарниров платформы в системе координат платформы; R – матрица поворота (ZYX).

Число обусловленности нормированной матрицы Якоби определяется, как отношение максимального сингулярного числа к минимальному:

$$\kappa(J) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}.$$

Для оценки качества манипулятора во всём рабочем пространстве w используется глобальный кинетостатический показатель качества (GCI – Global Conditional Index):

$$GCI(q) = \frac{\int_w \frac{1}{\kappa(J)} dw}{\int_w dw}.$$

Чем ближе значение данного коэффициента к единице, тем лучше кинематические свойства по всей рабочей области [4].

Постановка задачи оптимизации

Рабочее пространство задаётся амплитудами качки судна в состоянии волнения моря 4 балла [5]. Вертикальные перемещения ± 1 м, крен $\pm 12^\circ$, тангаж $\pm 4^\circ$. Масса дрона 30 кг.

Конструктивные ограничения: $r_b, r_p \in [1, 0; 2, 5]$ м, $h \in [2; 4]$ м.

Максимальный радиус основания платформы соответствует размерам свободной палубы на судах среднего водоизмещения, минимальный радиус выбран из соображений размера популярных моделей коптеров, использующихся на судах [6]. Диапазон высоты выбран с учётом требуемого вертикального хода платформы и минимального отношения хода к длине цилиндра $L_{ratio} = \frac{l_{min}}{l_{max}} \geq 0,55$.

Целевая функция, которую требуется минимизировать имеет вид:

$$\Phi_{SC} = \frac{1}{GCI} w + P_{cyl} r_{SC} + P_{col} r_{CC},$$

где w – весовой коэффициент, P_{cyl} – функция штрафа за нереализуемые соотношения длин, P_{col} – штраф за соударения приводов, r_{SC}, r_{CC} – коэффициенты корректировки штрафа. Последнее слагаемое только для двухокружной схемы.

Для оценки коллизий рассчитывалось расстояние между осями соседних приводов, как расстояние между скрещивающимися прямыми. Если оно больше наружного диаметра гидроцилиндра, то соударения не произойдёт.

Результаты

Моделирование выполнялось в среде Matlab. Для создания рабочего пространства было сгенерировано 3000 равномерно распределённых случайных точек. В таблице 1 представлены начальные и оптимальные параметры для SC схемы. В таблице 2 начальные и оптимальные параметры для CC схемы.

Табл. 1. Параметры SC схемы

	$\varphi_b, ^\circ$	$\varphi_p, ^\circ$	$r_b, \text{м}$	$r_p, \text{м}$	$h, \text{м}$	GCI
p_0	35	85	1	1	1.2	0.27
p_{SCopt}	5	111	2.5	1.1	2.32	0.5

Табл. 2. Параметры CC схемы

	$\varphi, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$r_b, \text{м}$	$\Delta r_b, \text{м}$	$r_p, \text{м}$	$\Delta r_p, \text{м}$	$h, \text{м}$	GCI
p_0	40	90	1.5	0.3	1.5	0.3	2	0.38
p_{CCopt}	49	88.3	2.5	0.49	1.2	0.21	2.3	0.55

На рисунках 3 и 4 изображены одно- и двухокружная схемы соответственно. Слева при изначальных параметрах, справа при оптимальных.

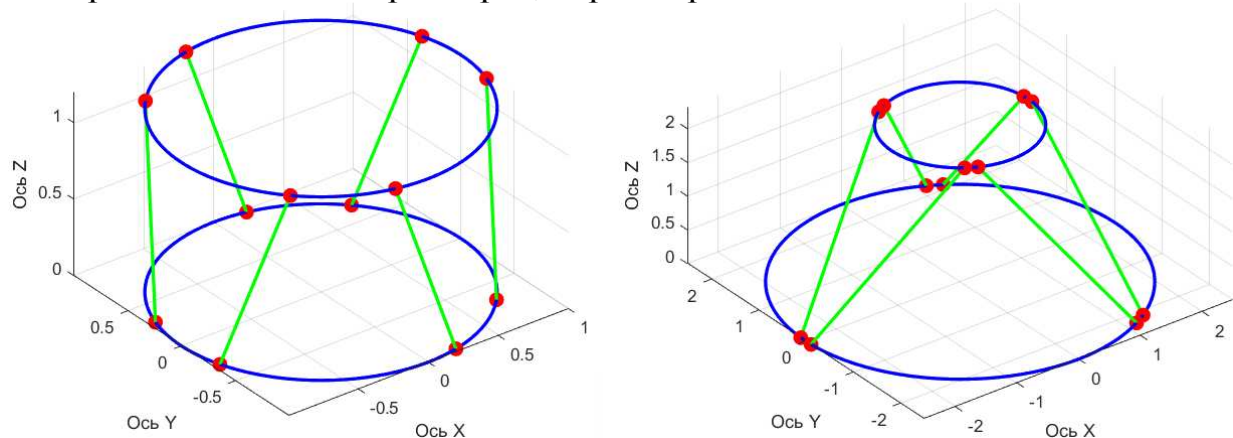


Рис. 3. Одноокружная схема

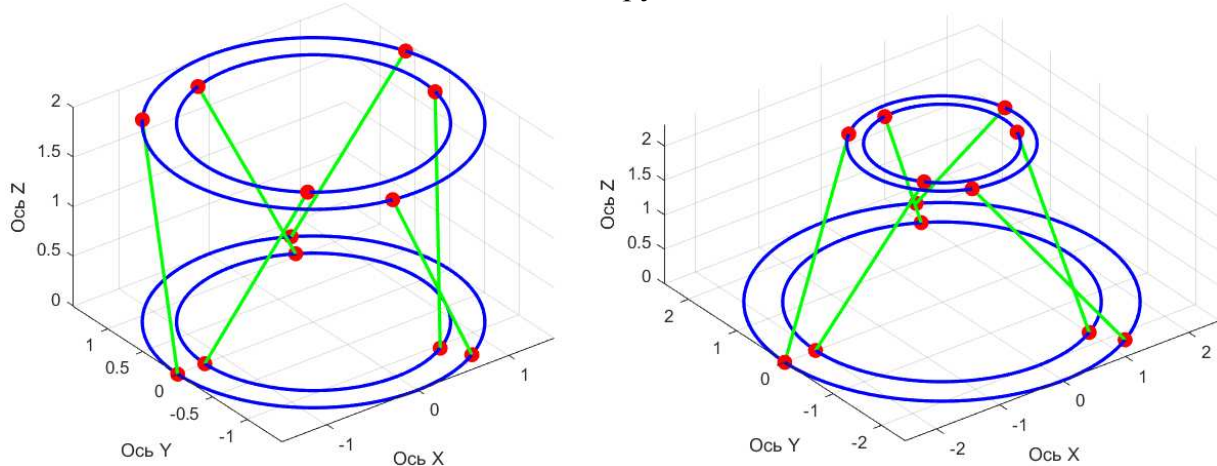


Рис. 4. Двухокружная схема

Оптимизация позволила улучшить GCI примерно в 2 раза для SC схемы и в 1,5 для CC схемы по сравнению с исходными параметрами. Для SC схемы оптимальными параметрами для углов разнесения оказались их граничные значения – максимально возможное сближение на основании и максимальное разнесение на платформе. Радиус основания также достиг максимального значения, что создаёт форму усечённого конуса. Для CC схемы оптимальной конструкцией также является усечённый конус.

GCI характеризует равномерность передаточных свойств платформы. Увеличение GCI на 10% означает, что отношение максимальной силы к минимальной силе в разных направлениях сократилось. Например, в сценарии посадки БПЛА на платформу при максимальном волнении, если в SC схеме максимальное усилие на привод составило 5 кН, то для CC схемы – 4,5 кН.

Выводы и заключение

В ходе работы был выполнен сравнительный анализ одно- и двухокружной кинематических схем платформы Стюарта по кинетостатическому показателю качества. Была разработана математическая модель кинематики и целевая функция со штрафными ограничениями, учитывающими реализуемость конструкции и предотвращение коллизий приводов. Проведённые исследования показали, что двухокружная схема обеспечивает улучшение GCI на 10% по сравнению с одноокружной схемой, при близких габаритах.

Таким образом, данная схема является предпочтительнее для использования в качестве посадочной платформы для БПЛА на среднем судне при волнении до 4 баллов.

Список источников

1. Шаров С.Н. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения. – СПб.: Судостроение, 2014. – 192 с.
2. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1965, vol. 180, no. 1, pp. 371-386.
3. Журавлёв В.Ф. Основы теоретической механики. Изд. 2-е, перераб. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. – 320 с.
4. Merlet J.P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots // Journal of Mechanical Design. 2006, vol. 128, pp. 199-206.
5. Самсонов С.В. Теория судна для судоводителя: учебное пособие. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2021. – 133 с.
6. Бибилов М.Ю., Никитин В.А., Смирнов В.В. Дронная разведка оперативно-ледовой обстановки при движении по северному морскому пути // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – №5-1(80). – С. 43-49.

Сведения об авторах:

Бояркина Юлия Владимировна – магистрант;

Жуков Юрий Александрович – старший преподаватель.