

УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ МЕХАНИЗМОМ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА

Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян

Представлены результаты разработки, конструирования и исследования многостепенного механизма с параллельной кинематикой (типа “гексапод”) для обеспечения точного позиционирования и ориентации бортовых приборов и устройств космического назначения. Описаны задачи кинематики, на основе которых реализуется управление гексаподом. Представлены результаты оценки реализации алгоритмов управления гексаподом в реальном времени.

Ключевые слова: гексапод; платформа Стюарта; задачи кинематики; система управления; управление в реальном времени.

REAL-TIME CONTROL OF HEXAPOD BASED PARALLEL KINEMATICS MECHANISM OF SPACE APPLICATION

Y.A. Zhukov, E.B. Korotkov, N.S. Slobodzyan

The paper presents the results of the development, design and study of a multi-stage mechanism with a parallel kinematics (of the “hexapod” type) to provide accurate positioning and orientation of airborne instruments and devices for space applications. The article describes the kinematics problems on the basis of which hexapod control is realized. The results of real time control algorithms implementation estimation are presented.

Keywords: hexapod; Stewart's platform; kinematics problems; control system; real-time control.

Введение. В БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова и АО “ИСС” им. академика М.Ф. Решетнева проводятся работы по созданию ряда многостепенных механизмов с параллельной кинематикой для обеспечения точного позиционирования и стабилизации бортовых приборов и устройств космического назначения.

Объект исследования – цифровая система управления механизмом с параллельной кинематикой [1] (“гексапод”) на основе шести линейных приводов на базе шаговых двигателей, эскиз которого показан на рисунке 1.

Гексапод, реализованный по схеме платформы Стюарта [2, 3], состоит из неподвижного основания 2 и подвижной платформы 1, которые механически связаны посредством шести идентичных звеньев – ног (штанг, стоек). Каждая нога выполняет функцию линейного привода и состоит из двух полуштанг 3 и 4, соединяемых шарнирами с основанием и платформой. Шаговый двигатель в каждой ноге формирует линейное перемещение полуштанги 3 относительно полуштанги 4. Это

движение реализуется за счет механической передачи “редуктор–винт–гайка” в конструкции ноги, преобразующей вращательное движение вала шагового двигателя в линейное (поступательное) движение полуштанги 3.



Рисунок 1 – Эскиз гексапода

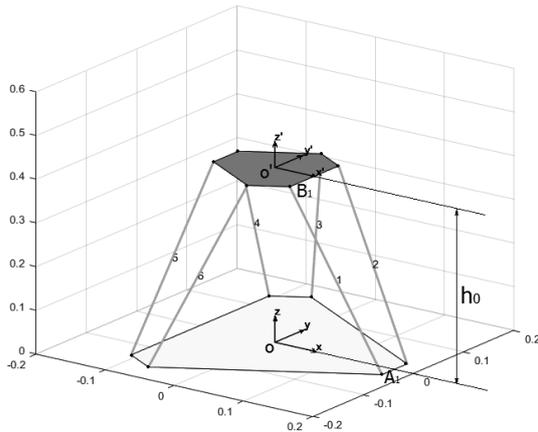


Рисунок 2 – Системы координат гексапода

Для успешной реализации системы управления гексаподом особенно важно получить оценку решения задач кинематики в реальном времени, поскольку на их применении основаны алгоритмы позиционного, контурного (траекторного) управления положением и ориентацией подвижной платформы гексапода.

Кинематика гексапода. Будем рассматривать кинематику механизма с симметричным расположением точек соединения шарниров с основанием и платформой. Пары шарниров основания и платформы на делительных окружностях образуют угол 120° относительно центра. Шарниры платформы сдвинуты на угол 60° относительно шарниров основания.

Для решения задач кинематики введем системы координат, связанные с платформой и основанием. Как показано на рисунке 2, неподвижная система координат $OXYZ$ связана с основанием, подвижная система координат $O'X'Y'Z'$ – с платформой. Определим начальное “нулевое” положение симметричного гексапода, при котором ноги имеют одинаковое удлинение. Таким образом, в этом положении система координат $O'X'Y'Z'$ сдвинута относительно системы координат $OXYZ$ по оси OZ на параметр h_0 (“нулевая” высота гексапода).

Положение центра O' 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 . Таким образом, положение и угловая ориентация платформы задаются вектором $q = [X, Y, Z, \varphi, \theta, \psi]^T$.

Решение задач кинематики гексапода связано с компоновкой ног гексапода. На рисунке 3 показаны две возможные схемы реализации ног гексапода

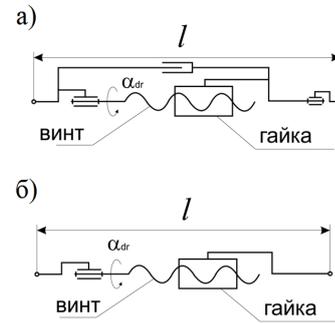


Рисунок 3 – Кинематические схемы пары винт-гайка: а – с шаровым (трёхосевым) шарниром платформы и двухосевым шарниром основания; б – с двухосевыми шарнирами платформы и основания

для прецизионного управления шестью степенями подвижности платформы: вариант *a* – представляет схему гексапода с шаровыми шарнирами платформы, двухосными шарнирами основания и одной линейной степенью свободы в каждой ноге; вариант *b* – с двухосными шарнирами в платформе и основании.

Определим задачи кинематики гексапода. Управление гексаподом с ногами, выполненными по кинематической схеме (а) основано на решении *обратной задачи кинематики* [4], которая заключается в нахождении длин ног l_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) для заданного вектора q – положения и ориентации.

Алгоритм решения обратной задачи относительно прост и основан на вычислении расстояния между центрами шарниров основания и платформы, определяемого из соотношения

$$l_i = \|P_{ai} - P_{bi}\|, \quad (1)$$

где $P_{ai} = [x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}, 1]^T$ и $P_{bi} = [x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}, 1]^T$ – расширенные векторы положений центров шарниров A и B i -ой ноги.

Если известны координаты шарниров платформы и основания относительно центров соответствующих систем координат, то по заданному положению и ориентации платформы, применяя преобразование в однородных координатах, вычисляются абсолютные координаты:

$$P_{bi} = T \cdot P'_{bi}, T = \begin{vmatrix} R & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где T – матрица преобразования в однородных координатах; $P = [X, Y, Z]^T$ – вектор, задающий положение подвижной системы координат (платформы); P'_{bi} – положение i -го шарнира относительно подвижной системы координат, R – матрица поворота, определяемая выражением:

$$R = \begin{vmatrix} \cos\alpha\cos\psi - \sin\alpha\sin\psi\sin\theta & -\cos\alpha\sin\psi & \cos\psi\sin\alpha + \cos\alpha\sin\psi\sin\theta \\ \sin\alpha\cos\psi + \cos\alpha\sin\psi\sin\theta & \cos\alpha\cos\psi & \sin\alpha\sin\psi - \cos\alpha\sin\psi\cos\theta \\ -\cos\alpha\sin\psi & \sin\psi & \cos\alpha\cos\psi \end{vmatrix} \quad (3)$$

Для управления гексаподом удобнее находить удлинение ноги $\Delta l_i = l_i - l_0$, где l_0 – длина ноги в “нулевом” положении гексапода. Тогда для каждого шагового привода легко рассчитать задающий сигнал – требуемый угол поворота винта

$$\alpha_{dri} = 2\pi \frac{\Delta l_i}{h}, i=1...6, \quad (4)$$

где h – шаг винтовой пары.

Для управления шаговыми приводами ног, выполненных по кинематической схеме (б) необходимо решить *расширенную обратную задачу кинематики гексапода* [1]: зная начальную ориентацию двухосевых шарниров А и В, рассчитать углы поворотов универсальных шарниров $\beta_a, \beta_b, \beta_c$, $\beta_d, \beta_e, \beta_f$ и угол осевого поворота полуштанг γ , которые показаны на рисунке 4. В работе [1] приведено решение расширенной обратной задачи кинематики, которое сводится к применению 5 обратных тригонометрических функций к компонентам матриц обратных преобразований.

Тогда для вычисления задающего сигнала системы управления (требуемого полного угла поворота гайки винтовой пары), получим:

$$\alpha_{dri} = 2\pi \frac{l_i - l_0}{h} - \gamma_i, i=1...6, \quad (5)$$

где γ_i – угол осевого поворота i -ой ноги.

Прямая задача кинематики состоит в оценке вектора q – положения и ориентации гексапода, соответствующего заданным длинам ног l_i . Как показано в [4], прямая задача кинематики решается итерационными методами:

- 1) методом Ньютона–Рафсона на основе задания ориентации подвижной платформы углами Эйлера, в соответствии с которым оценка вектора q находится из выражения

$$\tilde{q}_k = \tilde{q}_{k-1} - J^{-1}(\tilde{q}_{k-1}) \times (l(\tilde{q}_{k-1}) - l_r), \quad (6)$$

где \tilde{q}_k – оценка на текущем шаге итерации; \tilde{q}_{k-1} – оценка на предыдущем шаге; $l(\tilde{q}_{k-1})$ – вектор длин ног (решение обратной задачи кинематики для \tilde{q}_{k-1}); l_r – вектор заданных длин ног; $J^{-1}(\tilde{q}_{k-1})$ – обратная матрица Якоби [4], вычисленная для \tilde{q}_{k-1} ;

- 2) методом Ньютона–Рафсона на основе задания ориентации подвижной платформы с помощью кватернионов [4].

В этом варианте положение и ориентация платформы описывается вектором $q = [X, Y, Z, e_p, e_r, e_2, e_3]^T$, в котором параметры $e_p - e_3$ представляют

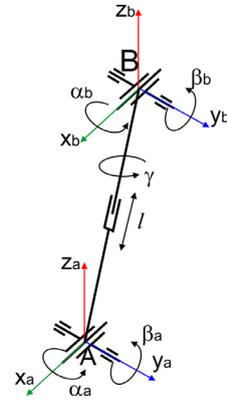


Рисунок 4 – Системы координат ноги гексапода с двухосевыми шарнирами

кватернион. Тогда модификация метода (6) определяется выражением:

$$\tilde{q}_k = \tilde{q}_{k-1} - F^{\dagger}(\tilde{q}_{k-1}) \times (L(\tilde{q}_{k-1}) - L_r), \quad (7)$$

где $F^{\dagger}(\tilde{q}_{k-1})$ – псевдообратная матрица Якоби [4].

Второй подход обеспечивает лучшую сходимость итерационного алгоритма для широкого диапазона входных параметров, но более сложен в реализации, поскольку требует вычисления псевдообратной матрицы.

Система управления гексаподом. В настоящее время на базе научно-исследовательской лаборатории робототехнических и мехатронных систем БГТУ “ВОЕНМЕХ” разработан блок управления гексаподом (БУГ), функциональная схема которого показана на рисунке 5, а.

Блок является аппаратной частью системы управления гексаподом и состоит из двух каналов (основного и резервного). В состав каждого из каналов БУГ входят следующие модули и элементы, электрически объединяемые жгутом БУГ и кросс-платой: преобразователь сигналов датчиков системы измерения положения платформы (СИПП); преобразователь сигналов датчиков углового положения (ПСДУП); контроллер; усилитель; вторичный источник питания; элементы системы обеспечения теплового режима (СОТР).

В экспериментальных образцах системы управления гексаподом предусматривается определение положения платформы с помощью учета информации:

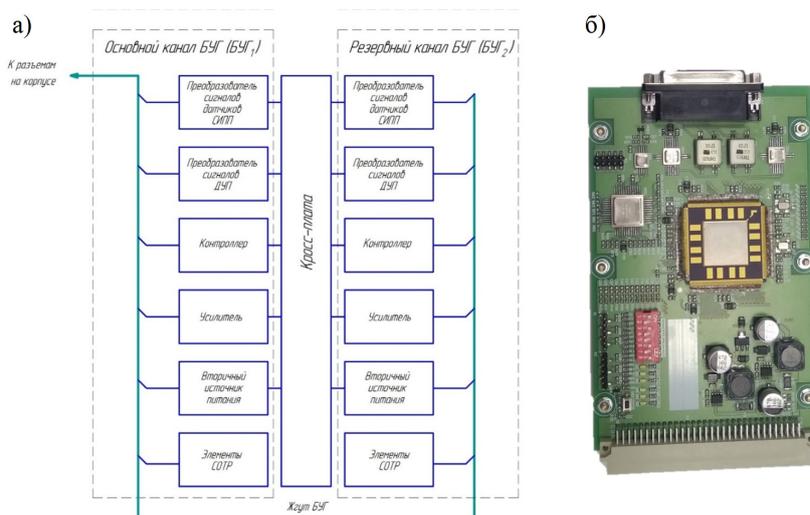


Рисунок 5 – Элементы системы управления гексаподом:
а – схема блока управления гексаподом, б – модуль контроллера

- от датчиков системы измерения положения платформы (“пространственного датчика”);
- от датчиков углового положения вала электродвигателя линейного механизма;
- датчиков температуры, распределенных по линейному приводу и платформам гексапода (путем пересчета определяется температурные деформации конструкции).

К элементам СОТР относятся: элемент Пельтье; датчик температуры корпуса БУГ. Элементы СОТР подключаются физически к контроллеру преобразователя сигналов датчиков системы измерения положения платформы (СИПП) и с его помощью осуществляется терморегулирование.

Все сигналы, предназначенные для внешней коммутации, выводятся на разъемы, устанавливаемые в корпусе БУГ.

Одним из вариантов построения системы управления гексаподом является реализация всех шести каналов управления линейными приводами на одном микроконтроллере. Основным компонентом модуля контроллера является 32-разрядный радиационно-стойкий RISC-микроконтроллер на базе процессорного ядра ARM Cortex-M4F K1986BE8T производства АО “ПКК Миландр” [5]. Микроконтроллер работает на тактовой частоте до 100 МГц. Содержит 128 Кбайт однократно программируемое ПЗУ программ с ECC (SEC-DED) и 32 Кбайт ОЗУ ECC (SEC-DED).

Оценка решения задач кинематики гексапода. Разработан C и C++ код решения задач кинематики гексапода (1), (6) и (7) для системы управления гексаподом, а также алгоритмы управления

шаговыми электроприводами. Разработка выполнена в среде Keil μ Vision 5. Для сборки программ микроконтроллера применен компилятор ARM C/C++ Compiler (armcc). Результаты тестирования представлены для компиляции без использования оптимизации (уровень O0).

Проведено сравнение ресурсов, необходимых для реализации задач кинематики, в двух вариантах представления чисел с плавающей точкой: *float* (одинарной точности) и *double* (двойной точности). Результаты тестирования сведены в таблицу 1.

Количественные временные оценки приведены для процессора, работающего на тактовой частоте 100 МГц. Для операционной системы Keil RTX определен размер программного стека на одну задачу – 1024 байт. Исследования показали, что скорость решения обратной задачи кинематики существенно зависит от размера выбранного стека. Так, например, при значении 200 байт время расчета обратной задачи кинематики увеличивается до 4 раз. При решении остальных задач увеличение стека до предельно допустимого значения (определяемого типом контроллера) не влияет на скорость исполнения.

Измерения времени выполнены средствами аппаратного таймера микроконтроллера. Для решения обратной задачи кинематики приведена погрешность относительно значений решений с двойной точностью (*double*). Для прямой задачи кинематики приведена относительная погрешность итерационного алгоритма на 10 шаге.

Выводы. Полученные оценки (см. таблицу 1) показывают, что отечественный радиационно-

Таблица 1 – Результаты тестирования задач кинематики

Задача кинематики		Время расчета, мс	Погрешность решения, %	Объем программного кода, байт	Объем памяти данных, байт
1. Обратная задача кинематики	float	0,67	$6 \cdot 10^{-7}$	18668	27716
	double	1,05	0	19064	27888
2. Расширенная обратная задача кинематики	float	12,95	$8 \cdot 10^{-6}$	19204	32848
	double	17,7	0	19104	33456
3. Прямая задача кинематики (10 итераций)	float	27,4	$8,6 \cdot 10^{-5}$	25160	34040
	double	61,2	$6 \cdot 10^{-12}$	27784	34088
4. Прямая задача кинематики с использованием кватернионов (10 итераций)	float	41,1	$4 \cdot 10^{-5}$	20088	26016
	double	101,5	$5 \cdot 10^{-11}$	20024	26040

стойкий микроконтроллер ARM-архитектуры 1986VE8T производства компании “ПКК Миландр” подходит для организации цифрового управления в реальном времени системой приводов гексапода космического назначения. При создании алгоритмов управления на основе решения обратной задачи кинематики период дискретизации может быть менее 1 мс, что обеспечит сравнительно высокие скоростные свойства проектируемому изделию, а также возможность реализации контурного (траекторного) режима управления гексаподом – с вычислением обратной задачи кинематики на каждом шаге цифрового управления.

При необходимости решения расширенной обратной задачи кинематики требуются большие временные затраты (13–18 мс), что сужает область реализации – остается возможность создания системы управления позиционного типа, когда однократно вычисляются задающие сигналы для системы управления приводами гексапода или контурного типа, но с худшими скоростными свойствами.

Отметим, что использование чисел с плавающей точкой одинарной точности (*float*) дает выигрыш по скорости операций, но при этом увеличивается погрешность решения. Тем не менее, её малая величина позволяет рекомендовать к применению алгоритмы именно в такой реализации.

Работа выполнена в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 в рамках НИОКТР, при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор от 01.12.2015 № 02.G25.31.0160). Головным ис-

полнителем НИОКТР является ФГБОУ ВО БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова.

Литература

1. Жуков Ю. Система управления механизмом с параллельной кинематикой для перемещения бортовых приборов КЛИА на базе современного отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера с процессорным ядром Cortex-M4F / Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 48–54.
2. Коротков Е.Б. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов / Е.Б. Коротков, С.А. Матвеев, Н.Г. Яковенко // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.
3. Stewart D. A platform with six degrees of freedom / D. Stewart // Proceedings of the Institution of mechanical engineers. 1965. Vol. 180. Part 1. № 15. P. 371–385.
4. Гавриленко В.А. Реализация задач кинематики на микропроцессоре ARM-архитектуры для мехатронных систем управления гексаподом / В.А. Гавриленко, Ю.А. Жуков, А.В. Мороз // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 92–98.
5. Микроконтроллер 1986VE8T [Электронный ресурс] // Сайт АО “ПКК Миландр”. URL: <http://ic.milandr.ru/products> (дата обращения: 28.06.2017).