

При выполнении последующей итерации происходит уменьшение на порядок (диапазон mn) шага варьирования $Step$ (рис. 2), начальным значениям присваиваются полученные значения малых угловых параметров, и проведение вышеописанных операций осуществляется заново. Таким образом, происходит последовательное уточнение калибровочных значений параметров $\sigma_{1к}$ и $\sigma_{2к}$, приближая их к истинным значениям. При этом после выполнения каждой итерации уменьшаются вариации Δg_{zmin} , и происходит последовательное приближение к выполнению главного критерия $g_{zi} \rightarrow const$.

При этом количество итераций определяется требованиями к точностным показателям аппаратуры и реально полученными значениями минимальных вариаций. На последнем этапе фиксируют оптимизированные численные значения малых и угловых параметров и записывают их в виде констант в выражения обобщенных математических моделей, используемых в общем алгоритме определения углов пространственной ориентации по результатам скважинных измерений.

На втором этапе варьирования задаются калибровочные значения малых угловых параметров $\delta_{хк}$, $\delta_{ук}$, α_k , которые нужно уточнить, используя значения сигналов с акселерометра D_x и D_y (рис. 5). При этом значения параметров $\sigma_{1к}$ и $\sigma_{2к}$ принимаются уже уточненные на первом этапе. Задается грубый шаг варьирования $Step$, например $0,1^\circ$. На данном этапе интерес представляют значения сигналов с акселерометра D_x и D_y и вычисленные значения проекций g_{xi} и g_{yi} . В соответствии с базовыми моделями получаем второй критерий для итерационного варьирования:

$$S = g_x^2 + g_y^2 = \text{Sin}^2\theta \rightarrow \text{const.}$$

Процесс итерационного варьирования на втором этапе аналогичен первому этапу за исключением, что во вложенных циклах варьируются уже три параметра – $\delta_{хк}$, $\delta_{ук}$, α_k .

Данный метод итерационного варьирования малых угловых параметров является автоматизированным и при соответствующем математическом и программном обеспечении не представляет каких-либо трудностей в его практической реализации.

Применение описанной выше методики уточнения констант дает неплохие результаты при экспериментальных исследованиях и метрологической аттестации вновь создаваемой аппаратуры, позволяет повысить в конечном итоге точность определения искомым углов не менее, чем на порядок, и успешно может быть использована в различных вариантах построения трехкомпонентных векторно-измерительных преобразователей с применением датчиков различной физической природы.

Библиографические ссылки

1. *Голдстейн Г.* Классическая механика. – М.: Наука, 1975. – 415 с.
2. *Миловзоров Г. В.* Анализ инструментальных погрешностей инклинометрических устройств. – Уфа: Гилем, 1997. – 184 с.
3. *Миловзоров Г. В., Зигангиров Л. Р., Миловзоров Д. Г.* Векторно-матричный аппарат в моделировании трехкомпонентных инклинометрических систем // Датчики и системы. – 2011. – № 7. – С. 30–34.

* * *

T. A. Redkina, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
D. G. Milovzorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University
R. R. Sadrutdinov, Director General, OJSC "NPF "Geophysics", Ufa
E. S. Morozova, Senior Lecturer, Ufa State Aviation Technical University

Method of iterative variation of constants in three-component vector-measuring transducers

The paper considers three-component vector-measuring transducers and methods of algorithmic correction of their instrumental errors, defined by constants that characterize a particular spatial positioning of the transducers in the unit casing. The technique is offered for refining the numerical values of constants defined at calibration stages by their iterative variation according to scientifically based criteria.

Keywords: vector-measuring transducers, iterative method

Получено: 05.11.14

УДК 62-503.56

В. А. Тенев, доктор физико-математических наук, профессор
Е. В. Ветчанин, кандидат физико-математических наук
Л. Ф. Илалетдинов, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

АППРОКСИМАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ В ЖИДКОСТИ ТЕЛА С ВИНТОВОЙ СИММЕТРИЕЙ С ВНУТРЕННИМИ РОТОРАМИ

Рассматривается задача управления пространственным движением устройства без внешних движителей из одной точки в другую в идеальной жидкости. Устройство представляет собой систему, состоящую из внешней жесткой оболочки, обладающей винтовой симметрией, и трех роторов, установленных внутри оболочки.

Ключевые слова: идеальная жидкость, управление, инерционные роботы.

Все роторы одинаковы, одна ось вращения совпадает с осью винтовой симметрии робота, две оси вращения роторов ортогональны ей (рис. 1).

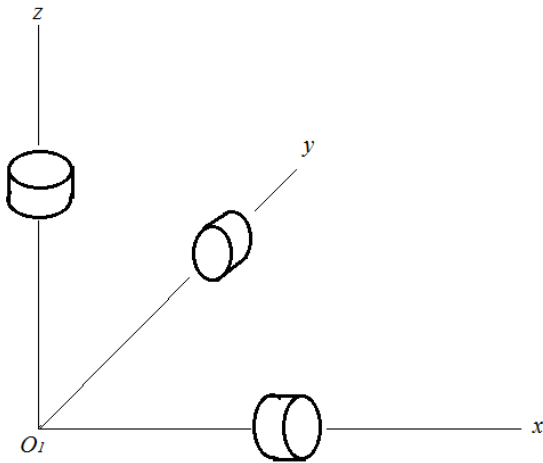


Рис. 1. Схема расположения роторов

Подобный подход связан с применением внутренних роторов. Предполагается, что положение центра масс системы остается неизменным, а перемещение осуществляется за счет изменения кинетического момента отдельных частей устройства, геометрических свойств его внешней оболочки и механики взаимодействия с внешней средой. Роторы могут использоваться как для сухопутных, так и для плавающих роботов. Однако для практического применения требуется определить вращение роторов так, чтобы движение тела осуществлялось вблизи заданной траектории. Такая задача является нетривиальной, и для ее решения могут применяться различные алгоритмы, в том числе интеллектуальные методы [3, 4].

Любой из методов определения управления имеет свои преимущества и недостатки, поэтому целью представленной вашему вниманию статьи является сравнительный анализ различных подходов. Рассматриваются различные аппроксиматоры для расчета траекторного управления винтовым телом с тремя внутренними роторами. Уравнения Кирхгофа, описывающие пространственное движение тела в идеальной жидкости, имеют вид в подвижной системе координат O_1xyz [5]:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\omega},$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \boldsymbol{\omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V},$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\omega}$ – импульс; $\mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{K}(t)$ – кинетический момент; $\mathbf{V} = (v_1, v_2, v_3)^T$ – вектор скорости; $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ – вектор угловой скорости.

Матрицы $\mathbf{C} = m\mathbf{E} + \Lambda_1$, $\mathbf{I} = \mathbf{I}_s + \Lambda_2 + \sum_{i=1}^3 J_i$, \mathbf{B} содержат коэффициенты присоединенных масс $\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \Lambda_2 \end{pmatrix}$, определяемые геометрией движущегося в жидкости тела.

$m = m_s + 3m_R$ – масса оболочки и роторов.

$\mathbf{K}(t) = \sum_{i=1}^3 J_i \Omega_i \mathbf{n}_i$ – вектор гиросtatического момента; Ω_i – угловые скорости вращения роторов с моментами инерции J_i ; \mathbf{n}_i – орты.

Скорости можно выразить через импульс и кинетический момент:

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{P} - \mathbf{B}\boldsymbol{\omega}),$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{K}(t) - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P}).$$

При начальных условиях $\mathbf{P}(0) = 0$, $\mathbf{M}(0) = 0$ импульс и кинетический момент остаются равными нулю для всего времени $\mathbf{P}(t) = 0$, $\mathbf{M}(t) = 0$ и скорости движения тела выражаются через скорости вращения роторов:

$$\boldsymbol{\omega} = -(\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{K}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}\boldsymbol{\omega}. \quad (2)$$

Для тел с винтовой симметрией матрица \mathbf{B} имеет ненулевую диагональ, и возможно собственное продвижение тела под действием вращения внутренних роторов.

Для расчета траектории движения тела в неподвижной системе координат $OXYZ$ решается следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{dt} = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\omega},$$

$$\frac{d\boldsymbol{\beta}}{dt} = \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\omega}, \quad (3)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\gamma}}{dt} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\omega};$$

$$\frac{dX}{dt} = (\mathbf{V}, \boldsymbol{\alpha}),$$

$$\frac{dY}{dt} = (\mathbf{V}, \boldsymbol{\beta}), \quad (4)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (\mathbf{V}, \boldsymbol{\gamma}),$$

при начальных условиях:

$$\alpha_1(0) = 1, \alpha_2(0) = 0, \alpha_3(0) = 0;$$

$$\beta_1(0) = 0, \beta_2(0) = 1, \beta_3(0) = 0;$$

$$\gamma_1(0) = 0, \gamma_2(0) = 0, \gamma_3(0) = 1;$$

$$X(0) = 0, Y(0) = 0, Z(0) = 0.$$

Здесь $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$ – направляющие косинусы, образующие матрицу перехода от системы координат $OXYZ$ к O_1xyz :

$$\mathbf{T} = (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})^T.$$

Рассмотрим вначале движение тела с постоянными скоростями вращения роторов $\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)^T = \boldsymbol{\Omega}_0$. Тогда составляющие угловой скорости вращения тела также постоянны во времени $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T = \boldsymbol{\omega}_0$ в соответствии с (1), (2). Система уравнений (3), (4) в этом случае интегрируется, и решение имеет вид:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + \frac{\omega_2^2 + \omega_3^2}{\omega^2} \cos(\omega t), \\ \alpha_2 &= \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} \cos(\omega t) - \frac{\omega_3}{\omega} \sin(\omega t), \\ \alpha_3 &= \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} \cos(\omega t) + \frac{\omega_2}{\omega} \sin(\omega t), \\ \beta_1 &= \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} \cos(\omega t) + \frac{\omega_3}{\omega} \sin(\omega t), \\ \beta_2 &= \frac{\omega_2^2}{\omega^2} + \frac{\omega_1^2 + \omega_3^2}{\omega^2} \cos(\omega t), \\ \beta_3 &= \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} \cos(\omega t) - \frac{\omega_1}{\omega} \sin(\omega t), \\ \gamma_1 &= \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} \cos(\omega t) - \frac{\omega_2}{\omega} \sin(\omega t), \\ \gamma_2 &= \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} \cos(\omega t) + \frac{\omega_1}{\omega} \sin(\omega t), \\ \gamma_3 &= \frac{\omega_3^2}{\omega^2} + \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega^2} \cos(\omega t), \\ X(t) &= v_1 \left(\frac{\omega_1^2}{\omega^2} t + \frac{\omega_2^2 + \omega_3^2}{\omega^3} \sin(\omega t) \right) + \\ &+ v_2 \left(\frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} t - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^3} \sin(\omega t) - \frac{\omega_3}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right) + \\ &+ v_3 \left(\frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} t - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega t) + \frac{\omega_2}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right), \\ Y(t) &= v_1 \left(\frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} t - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^3} \sin(\omega t) + \frac{\omega_3}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right) + \\ &+ v_2 \left(\frac{\omega_2^2}{\omega^2} t + \frac{\omega_1^2 + \omega_3^2}{\omega^3} \sin(\omega t) \right) + \\ &+ v_3 \left(\frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} t - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega t) - \frac{\omega_1}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right), \\ Z(t) &= v_1 \left(\frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} t - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega t) - \frac{\omega_2}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right) + \\ &+ v_2 \left(\frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} t - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega t) + \frac{\omega_1}{\omega^2} (1 - \cos(\omega t)) \right) + \\ &+ v_3 \left(\frac{\omega_3^2}{\omega^2} t + \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega^3} \sin(\omega t) \right),\end{aligned}$$

где $\omega = |\boldsymbol{\omega}|$.

Если рассмотреть вариант раскручивания и торможения вращения роторов по закону

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega}_0 \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right), \text{ то в этом случае угловая скорость вращения тела также является функцией от синуса}$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right).$$

Система уравнений (3) принимает вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{dt} &= (\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\omega}_0) \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right), \\ \frac{d\boldsymbol{\beta}}{dt} &= (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\omega}_0) \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right), \\ \frac{d\boldsymbol{\gamma}}{dt} &= (\boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\omega}_0) \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right).\end{aligned}\quad (5)$$

Делая замену переменной

$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{t}{T_0}\right) \right), \quad (6)$$

получим систему уравнений такого же вида, как (3):

$$\begin{aligned}\frac{d\boldsymbol{\alpha}}{d\tau} &= (\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\omega}_0), \\ \frac{d\boldsymbol{\beta}}{d\tau} &= (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\omega}_0), \\ \frac{d\boldsymbol{\gamma}}{d\tau} &= (\boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\omega}_0),\end{aligned}\quad (7)$$

где $\boldsymbol{\omega}_0 = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$; T_0 – конечное время. Решение этой системы уравнений полностью совпадает по виду для переменных $\boldsymbol{\alpha}(\tau), \boldsymbol{\beta}(\tau), \boldsymbol{\gamma}(\tau)$ с заменой переменной t на τ в соответствии с (6).

Рассмотрим задачу перемещения тела в точку с заданными координатами $\mathbf{R}^0 = (X^0, Y^0, Z^0)$ за время T_0 . Управление осуществляется скоростями вращения роторов $\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)^T$. Для их нахождения имеем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}X^0 &= v_1 \left(\frac{\omega_1^2}{\omega^2} T_0 + \frac{\omega_2^2 + \omega_3^2}{\omega^3} \sin(\omega T_0) \right) + \\ &+ v_2 \left(\frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^3} \sin(\omega T_0) - \frac{\omega_3}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right) + \\ &+ v_3 \left(\frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega T_0) + \frac{\omega_2}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y^0 &= v_1 \left(\frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega^3} \sin(\omega T_0) + \frac{\omega_3}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right) + \\
&\quad + v_2 \left(\frac{\omega_2^2}{\omega^2} T_0 + \frac{\omega_1^2 + \omega_3^2}{\omega^3} \sin(\omega T_0) \right) + \\
&\quad + v_3 \left(\frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega T_0) - \frac{\omega_1}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right), \quad (8) \\
Z^0 &= v_1 \left(\frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega T_0) - \frac{\omega_2}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right) + \\
&\quad + v_2 \left(\frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^2} T_0 - \frac{\omega_2 \omega_3}{\omega^3} \sin(\omega T_0) + \frac{\omega_1}{\omega^2} (1 - \cos(\omega T_0)) \right) + \\
&\quad + v_3 \left(\frac{\omega_3^2}{\omega^2} T_0 + \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega^3} \sin(\omega T_0) \right)
\end{aligned}$$

с учетом (1). Данная система уравнений имеет несколько корней. Поэтому потребуем, чтобы из возможных траекторий выбиралась траектория с минимальным отклонением от прямолинейного движения в заданную точку:

$$F(\Omega) = \int_0^{T_0} \left| \mathbf{r}(t) - \mathbf{R}^0 \frac{t}{T_0} \right| dt \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для решения данной задачи применяется гибридный генетический алгоритм [6].

Для управления движением тела по заданной траектории $\mathbf{R}_k^0, k = \overline{N_{step}}$, чтобы не решать каждый раз для новой траектории задачу оптимального управления (8), (9), проведем предварительный расчет управлений Ω для различных направлений $\Delta \mathbf{r}$ с $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S_0$. Скорости вращения роторов будут функциями от произвольных направлений $\Omega(\Delta \mathbf{r})$. Вид этих функций определяется выбранным аппроксиматором. На этих данных проведем сравнительный анализ различных аппроксиматоров:

- 1) уравнение множественной регрессии;
- 2) метод опорных векторов;
- 3) многослойная нейронная сеть;
- 4) радиальная сеть;
- 5) метод нечетких деревьев решений.

Уравнение множественной регрессии $z = b + (\mathbf{w}, \mathbf{Y})$, где коэффициенты b, \mathbf{w} находятся методом наименьших квадратов.

В методе опорных векторов

$z(\mathbf{Y}) = \sum_{h=1}^H (\lambda_h^* - \lambda_h) K(\mathbf{Y}, \mathbf{Y}^h) + b$ суммирование проводится для $(\lambda_h^* - \lambda_h) \neq 0$, где

$K(\mathbf{Y}, \mathbf{Y}') = \exp(-0,5(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}')^T \sigma^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}'))$ – функция ядра. Коэффициенты λ_h^*, λ_h , являющиеся множителями Лагранжа в задаче квадратичного программирования, вычисляются итерационно [7] на имеющемся наборе данных, σ – ковариационная матрица.

В многослойной нейронной сети входной сигнал преобразуется по слоям в соответствии с выражениями:

$$u_i^k = \sum_{j=0}^{N_{k-1}} w_{ij}^k q_j^{k-1}, \quad q_i^k = g(u_i^k), \quad i = \overline{N_k}, \quad k = \overline{Kc},$$

$$g(u) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta u)}, \quad \mathbf{q}^0 = \mathbf{Y}, \quad \mathbf{z} = \mathbf{q}^{Kc}.$$

Радиальная сеть осуществляет преобразование

$$z(\mathbf{Y}) = \sum_{h=1}^L w_h \exp \left[-\frac{\|\mathbf{Y} - \mathbf{C}_h\|}{2\sigma_h^2} \right].$$

Коэффициенты w_h, σ_h определяются при обучении.

В методе нечетких деревьев решений на наборе данных строится дерево решений [8]. Построенное дерево решений рассматривается как набор нечетких правил вида:

$$R_r: \text{if } \bigcap Y_j \in A_{jr} \text{ then } z \text{ is } B_r, \quad r = \overline{K_R}.$$

Условие $Y_{jr} \in A_{jr}$ соответствует условию разделения множества точек $Y \leq (\mu), Y > (\mu)$ с заданными функциями принадлежности. При заданном векторе \mathbf{Y} определяются степени истинности каждого правила: $\alpha_r, r = \overline{K_R}$. В результате, агрегированный выходной сигнал определяется по формуле:

$$z(\mathbf{Y}) = \frac{1}{\sum_{r=1}^{K_R} \alpha_r} \sum_{r=1}^{K_R} \alpha_r \left(w_{r0} + \sum_{j=1}^n w_{rj} Y_j \right).$$

Коэффициенты w_{rj} определяются по имеющейся обучающей выборке с применением процедуры псевдоинверсии.

Рассматривалась выборка из 1300 точек, из них 1000 точек содержатся в обучающей выборке и 300 в проверочной (таблица).

Стандартная ошибка

Аппроксиматор	Ω_1	Ω_2	Ω_3
1 – уравнение множественной регрессии	171,6	684,8	724,6
2 – метод опорных векторов	38,8	55,6	49,9
3 – многослойная нейронная сеть	33,8	35,7	32,3
4 – радиальная сеть	24,5	39,0	36,9
5 – метод нечетких деревьев решений	21,9	38,8	45,4

Линейная зависимость дает очень грубое приближение и непригодна для аппроксимации. Остальные аппроксиматоры дают примерно одинаковую точность от 2 до 5 %. Этой точности вполне хватает для обеспечения управления движением по заданной траектории.

Качество аппроксимации иллюстрируется графиками сравнения между рассчитанной скоростью

вращения Ω_c и аппроксимирующей Ω_a . Здесь приведены скорости вращения третьего ротора. Рис. 2 соответствует линейной аппроксимации.

Видно, что линейная зависимость дает очень грубое приближение.

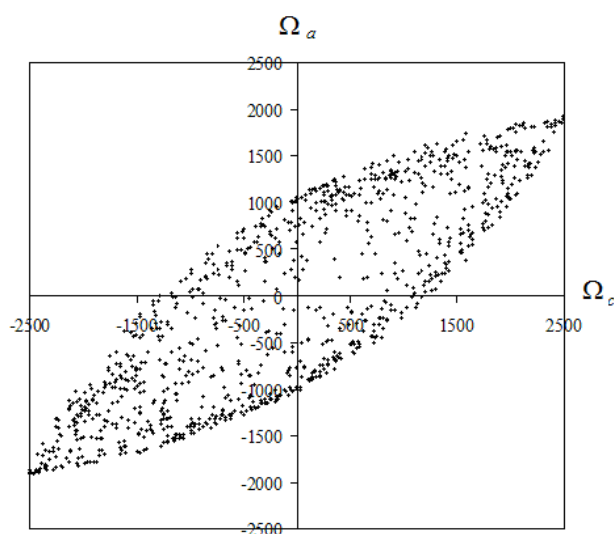


Рис. 2. Сравнение рассчитанной скорости вращения Ω_c и аппроксимированной Ω_a (линейная регрессия)

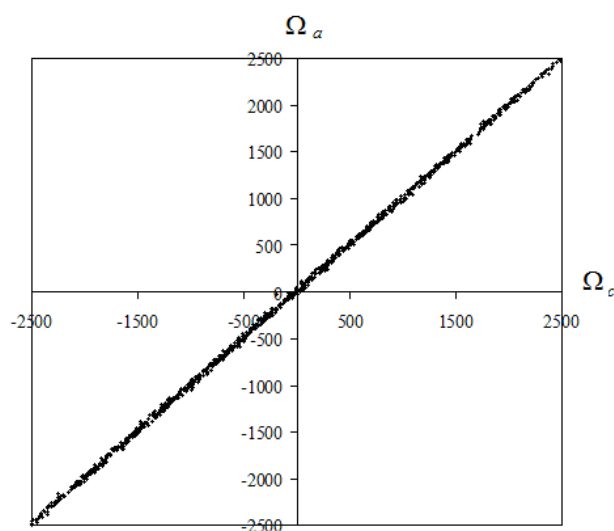


Рис. 3. Сравнение рассчитанной скорости вращения и аппроксимированной методом нечетких деревьев

Наиболее качественная аппроксимация обеспечивается методом нечетких деревьев решений.

Таким образом, в статье получены аналитические выражения, определяющие траекторию движения тела с винтовой симметрией под действием вращения внутренних роторов. Наиболее точная аппроксимация управлений обеспечивается применением метода нечетких деревьев решений.

Библиографические ссылки

1. Киселев Л. В., Медведев А. В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 24–35.
2. Толчин В. Н. Инерциод. Силы инерции как источник поступательного движения. – Пермь: Кн. изд-во, 1977.
3. Черноусько Ф. Л. О перемещении тела в жидкости за счет колебаний присоединенного звена // ДАН. – 2010. – Т. 431, № 1. – С. 46–49.
4. Шаура А. С., Кочурова Д. С. Решение задачи траекторного управления мобильными роботами с помощью параллельного генетического алгоритма // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 58–65.
5. Vetchanin E. V., Kilin A. A., Tenenev V. A., Shaurova A. S. Numerical simulation of motion in the viscous fluid of a three-axial ellipsoid controlled by three rotors // Fourth International Conference "Geometry, Dynamics, Integrable Systems GDIS 2013: Book of abstracts. – Moscow-Izhevsk: Publishing Center "Institute of Computer Science", 2013, p. 54–55.
6. Tenenev V. A., Yakimovich B. A. Practice of genetic Algorithms. Universitas – GYOR Nonprofit Kft., 2012. P. 279.
7. Кецман В. New support vector machines algorithm for huge data sets // Лекции по нейроинформатике. По материалам Школы-семинара «Современные проблемы нейроинформатики». – М., 2007. – С. 97–176.
8. Tenenev V. A., Yakimovich B. A. Op. cit.

V. A. Tenenev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 E. V. Vetchanin, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 L. F. Ilaletdinov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Approximation of controlling the motion through the liquid for the body with helical symmetry and with internal rotors

The problem of controlling the spatial motion of a device through an ideal fluid is considered. The device has no external locomotors and consists of a rigid shell with helical symmetry and three rotors mounted inside the shell.

Keywords: ideal fluid, control, inertia robots.

Получено: 20.11.14