УДК 531.391.1:532.5.011

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Б.А. Скороход
Севастопольский государственный университет
Россия, 299053, Севастополь, Университетская, 33
E-mail: boris.skorohod@mail.ru

А.Д. Ляшко
Севастопольский государственный университет
Россия, 299053, Севастополь, Университетская, 33
E-mail: lyasko.sasha@mail.ru

Ключевые слова: автономные подводные аппараты, динамическое позиционирование, визуальное сервоуправление.

Аннотация: Рассмотрена задача динамического позиционирования (ДП) автономных подводных аппаратов (АПА) в горизонтальной плоскости (ГП) с использованием монокулярной видеокамеры. Управление АПА формируется по информации, поступающей с камеры о положении центроида заданного объекта или центроида выбранных ключевых точек дна.

1. Введение

Различные подходы к решению задач ДП АПА, работающих вблизи морского дна или стационарных подводных сооружений и использующих в качестве датчиков видеокамеры, широко обсуждаются в литературе [1-3]. Отметим следующие основные проблемы, связанные с разработкой систем управления для их решения: 1. Искажения подводных изображений, обусловленные неравномерностью освещенности, мутностью, пузырьками, быстрым затуханием, рассеиванием и преломлением света, ограничением частотного спектра света. 2. Недостаточная информативность морского дна существенно усложняет выделение на нем робастных ключевых точек. 3. Действие неконтролируемых возмущений подводной среды, приводящих к появлению неопределенностей в задании математических моделей АПА

В настоящей работе предполагается, что АПА с неполным приводом может перемещаться в ГП под действием силы тяги и поворотного момента. В качестве возмущающего воздействия рассматривается постоянное подводное течение. ДП проводится с использованием монокулярной видеокамеры наблюдающей за выделенными объектами. Система управления конструируется на основе IBVS подхода [4], опираясь на методы теории устойчивости. Предложены алгоритмы управления ДП АПА в окрестности заданной точки над морским дном не требующие оценки направления и скорости течения.

2. Постановка задачи

Модель движения АПА, перемещающегося под действием силы тяги и поворотного момента в ГП с учетом морского течения, может быть получена используя инерциальную $\{n\}$ и связанную $\{b\}$ системы координат (рис. 1, а). Кинематические и динамические уравнения такой модели описываются уравнениями [5]

(1) $$\dot{\boldsymbol{\eta}} = R(\boldsymbol{\eta})\mathrm{v},\ M\dot{\mathrm{v}}_r + C(\mathrm{v}_\mathrm{r})\mathrm{v}_\mathrm{r} + D\mathrm{v}_\mathrm{r} = \boldsymbol{\tau},$$

где$\boldsymbol{\eta} = (x, y, \psi)^T$, x, y– координаты центра масс АПА в $\{n\}$, ψ– курсовой угол, $\mathrm{v} = (u, v, r)^T$, u, v, r – продольная, поперечная и угловая скорости АПА в $\{b\}$, $\boldsymbol{\tau} = (\tau_u, 0, \tau_r)^T$– вектор управляющих воздействий, $\mathrm{v}_r = (u - u_c, v - v_c, r)^T = (u_r, v_r, r)^T$– скорость АПА относительно водной среды, u_r, v_r– линейные скорости АПА относительно течения, u_c, v_c– проекции постоянной скорости течения в $\{b\}$,

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}, s\psi = \sin(\psi),\quad c\psi = \cos(\psi),$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}, C(v_r) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_r - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u_r \\ m_{22}v_r + m_{23}r & -m_{11}u_r & 0 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим АПА с монокулярной камерой, наблюдающей морское дно (рис. 1, а) и описываемый моделью заданной системой (1). Требуется выбрать управление $\boldsymbol{\tau}$, так чтобы АПА оставался в окрестности заданной точки в течение произвольного промежутка времени при действии неконтролируемого постоянного течения, наблюдая за положением центроида s_c объекта (рис. 1, б) или центроида выбранных ключевых точек на морском дне (рис. 1, в).

(а) (б) (в)

Рис. 1. (а) АПА с видеокамерой; (б), (в) ДП относительно центроида объекта и ключевых точек, соответственно (Севастопольская бухта, 2023 г.).

3. Кинематический регулятор

На кинематическом уровне скорости u_r, r рассматриваются в качестве управляющих воздействий. Цель управления состоит в регулировании координат x, y, ψ, обеспечивая ДП АПА в окрестности заданного положения.

Пренебрегая поперечной скоростью v_r, уравнения кинематики в (1) в скалярной форме могут быть представлены в виде

(2) $$\dot{x} = c\psi u_r + v_{cx}, \dot{y} = s\psi u_r + v_{cy}, \dot{\psi} = r,$$

где $v_{cx} = u_c c\psi - v_c s\psi, v_{cy} = u_c s\psi + v_c c\psi, u_c = V_c c(\beta_c - \psi), v_c = V_c c(\beta_c - \psi)$, V_c – скорость течения, β_c – угол, определяющий направление течения.

Обозначим координаты центроида в начальном положении камеры $s_\mathrm{c} = (x_\mathrm{c}, y_\mathrm{c})^T$ и $s = (x, y)^T$ – текущем. Тогда $s = R^T(x_c - x, y_c - y)^T = (p, q)^T e = s - s_c = \left(e_x, e_y\right)^T$.

Использование IBVS подхода [4] при управлении продольной и угловой скоростями камеры совместно с пропорционально-интегральным регулятором дает

(3) $$\boldsymbol{\tau} = (u_r, r)^T = -L^{-1}(s, Z_c)(k_p e + k_i \sigma (1,0)^T), \dot{\sigma} = e_x,$$

где $k_p = diag(k_{p1}, k_{p2}) > 0$, $k_i > 0$ – скаляр, Z_c – расстояние от центра изображения до дна, $L(s, Z_c)$, $L^{-1}(s, Z_c)$ – матрица Якоби изображения и ее обратная

$$L(s,Z_c)=\begin{pmatrix}-1/Z_c & q\\ 0 & -p\end{pmatrix}, L^{-1}(s,Z_c)=-\begin{pmatrix}Z_c & Z_c q/p\\ 0 & 1/p\end{pmatrix}.$$

Преобразовывая (2), (3) с помощью замены координат

(4) $x_c-x=\rho c(\psi+\beta), y_c-y=\rho s(\psi+\beta), \rho=((x_c-x)^2+(y_c-y)^2)^{1/2}$,

получим

(5) $\dot\rho=-u_r c\beta-V_c c(\beta+\psi-\beta_c), \dot\beta=-r+u_r s\beta/\rho+V_c s(\beta+\psi-\beta_c)/\rho$, $\dot\psi=r$,

(6) $L^{-1}(s,Z_c)=-\begin{pmatrix}Z_c & Z_c tg\beta\\ 0 & 1/(\rho c\beta)\end{pmatrix}, e=\begin{pmatrix}\rho c\beta-x_c\\ \rho s\beta-y_c\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}e_x\\ e_y\end{pmatrix}.$

Предполагается, что направление течения примерно известно и в момент получения команды на выполнение ДП носовая часть АПА направлена примерно навстречу течению. Управление должно обеспечивать небольшие значения или стремление к нулю отклонений $|\rho-\rho_c|, |\beta-\beta_c|, |\psi-\beta_c+\pi|$ *при* $t\to\infty$..

Используя векторно-матричные обозначения, (5) и (6) получим замкнутую систему

(7) $\dot z=A(z)L^{-1}(s,Z_c)(k_p e+k_i\sigma(1,0)^T)+\xi(z)V_c, \dot\sigma=e_x$.

$$z=(\rho,\beta,\psi)^T, A(z)=\begin{pmatrix}-c\beta & 0\\ \frac{1}{\rho}s\beta & -1\\ 0 & 1\end{pmatrix}, \xi(z)=\begin{pmatrix}-c(\psi+\beta-\beta_c)\\ \frac{1}{\rho}s(\psi+\beta-\beta_c)\\ 0\end{pmatrix}.$$

Из вида правых частей системы (7) и соотношений

(8) $e_x^d=\rho_d c\beta_d-x_c=0, e_y^d=\rho_d s\beta_d-y_c=0, \psi_d=\beta_c+\pi$

следует, что при $V_c=0$, $\sigma=0$ она имеет решение, обеспечивающее ДП АПА

(9) $\rho_d=(x_c^2+y_c^2)^{1/2}, \beta_d=\psi_d+arctg(y_c/x_c), \psi_d=\beta_c-\pi$.

Теорема 1. *Пусть* $\rho>\varepsilon_\rho$, $0<\beta,<\pi/2$, где $\varepsilon_\rho>0$ – произвольно малая постоянная. *Тогда: 1. Если* $\sigma=0$, *то существует диагональная матрица* $k_p>0$ *такая, что решение (9) системы (7) будет устойчиво при постоянно действующем возмущении* V_c и для всех решений начинающихся достаточно близко к (9) $e_y\to 0$, при $t\to\infty$. *2. Существуют диагональная матрица* $k_p>0$ *и скаляр* $k_i>0$ *такие, что для всех решений начинающихся достаточно близко к (9)*$\rho\to\rho_c$, $\beta\to\beta_c$, $\psi\to\beta_c-\pi$, $\mathbf{\tau}=(u_r,r)^T\to(V_c,0)^T$ *при* $t\to\infty$.

Комментарий 1. В *преобразованной системе (7)* ψ *оказывает воздействие на систему только через возмущение* V_c, *которое предполагается достаточно малым.*

Комментарий 2. *Из доказанной теоремы следует, что для компенсации действия двух проекций постоянного течения* v_{cx}, v_{cy} *в (2) достаточно использовать только один интегратор. Роль второго интегратора выполняет третье уравнение.*

Комментарий 3. *В отличие от [6], предложенный закон управления (3) не зависит от скорости и направления течения.*

4. Динамический регулятор

Рассмотрим нелинейную динамическую модель торпедообразного АПА с нос\корма симметрией, движущегося при ДП, полагая в (1) матрицы Mи D диагональными [5]

$\dot z=A(z)q+\xi(z)V_c, \dot u_r=a_u u_r+c_1 r v_r+b_u\tau_u, \dot v_r=a_v v_r+c_2 r u_r+c_3 u_r v_r$,

(10) $\dot r=a_r r+c_4 u_r v_r+b_v\tau_r$, $q=(u_r,v_r,r)^T$

под действием управления

(11) $\mathbf{\tau}=(\tau_u,\tau_r)^T=\frac{1}{\varepsilon}\{L^{-1}(s,Z_c)(k_p e+k_i\sigma(1,0)^T-(u_r,r)^T\}, \dot\sigma=e_x$,

где $\varepsilon > 0$ – малый параметр. Нас интересуют условия устойчивости решения

(12) $$\rho_d = (x_c^2 + y_c^2)^{1/2}, \beta_d = arctg\left(\frac{y_c}{x_c}\right), \psi_d = \beta_c - \pi, u_{rd} = V_c, v_{rd} = 0, r_d = 0$$

замкнутой системы (10).

Теорема 2. *Пусть* $\rho > \varepsilon_\rho$, $0 < \beta, < \pi/2$, $a_r < 0$, где $\varepsilon_\rho > 0$ – произвольно малая постоянная *и параметры* k_p, k_i *выбраны так, что решение (9) системы (7) асимптотически устойчиво и величина*ε*достаточно мала. Тогда для всех решений (10), начинающихся достаточно близко к (12)* $\rho \to \rho_c$, $\beta \to \beta_c$, $\psi \to \beta_c - \pi$, $u_r \to V_c$, $v_r \to 0$, $r \to 0$ *при* $t \to \infty$.

Доказательство теоремы основано на использовании методов разделения движения в сингулярно возмущенных системах на бесконечном интервале времени [7]. Отметим, что комментарии 1-3 к теореме 1 остаются справедливыми.

5. Компьютерное моделирование

На рис. 2 показаны результаты моделирования. Параметры АПА [8], камеры, регулятора и координаты центроида приведены в таблице 1. Видно, что АПА возвращается в исходную точку после переходного процесса, а угол рыскания стремится к 20^o при направлении течения в 200^o. Т.е., продольная ось АПА параллельна течению, а нос направлен навстречу течению. Кроме того, $u_r = V_c, v_r = r = 0$.

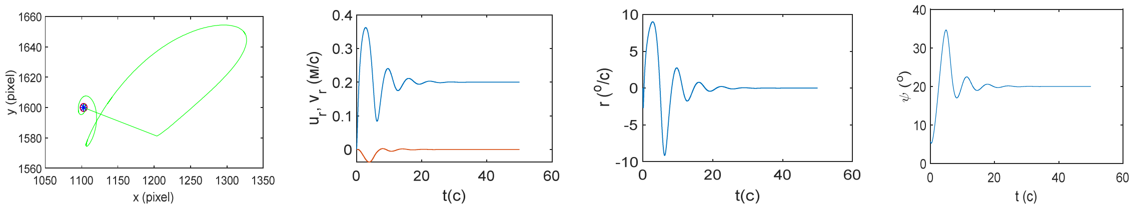

Рис. 2. Траектория движения, линейные и угловые скорости, курсовой угол АПА.

Таблица 1. Параметры для моделирования.

Параметры модели				**Параметры камеры**	**Координаты центроида**	**Параметры регулятора и начальные условия**
m_{11}	47.5	d_{11}	13.5	= 5.6e–6 мм; u_0= 960; v_0= 600; f= 0.008 мм.	(0.1 0.7 1) м.	$k_p = diag(1,1), k_i = 0.4$, V_c =0.2 м/с , $\beta_c = 200^o$, $\psi_0 = 5.3^o$, = 0.0013.
m_{22}	94.1	d_{22}	50.2			
m_{33}	13.6	d_{33}	27.2			
m_{23}, m_{32}	0	d_{23}, d_{32}	0			

6. Заключение

Рассмотрена задача ДП АПА в горизонтальной плоскости с использованием монокулярной видеокамеры. Управление АПА формируется по информации, поступающей с камеры о положении центроида заданного объекта или центроида выбранных ключевых точек дна. Система управления конструируется на основе IBVS подхода, опираясь на методы теории устойчивости. Предложены алгоритмы управления ДП АПА в окрестности заданной точки над морским дном не требующие оценки направления и скорости течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр темы FEFM-2024-0015.

Список литературы

1. Sørensen A.J. A survey of dynamic positioning control systems // Annual Reviews in Control. Trondheim. Norway, 2011. Vol. 35, No. 1. P. 123-136.
2. Chao-Lin K., Long-Yi C., Ying-Che K., Chia-Hung L., Kuei-Mei L. Visual servo control for the underwater robot station-keeping // International Conference on Applied Electronics. Kaohsiung, Taiwan. 2017. P. 1-4.
3. Gao J., Proctor A., Bradley C. Adaptive neural network visual servo control for dynamic positioning of underwater vehicles // Neurocomputing. 2015. Vol. 167. P. 604-613.
4. Chaumette F., Hutchinson S. Visual servo control. I. Basic approaches // IEEE Robotics Automation Magazine. 2006. Vol. 13, No. 4. P. 82-90.
5. Fossen T.I., Marine Control Systems, Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
6. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents // International Journal of Control. 2007. Vol. 80, No. 7. P. 1092-1108.
7. Lobry C., Sari T., Touhami A. On Tykhonov's theorem for convergence of solutions of slow and fast systems // Electronic J. Differential Equat. 1998. No. 19. P. 1-22.
8. Zaopeng D., Wan L., Yueming L.Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. Vol. 12, No. 7.