

ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH ĐƯỜNG NGẮM CHO ĐÀI QUAN SÁT PAN-TILT TRÊN PHƯƠNG TIỆN MẶT NƯỚC KHÔNG NGƯỜI LÁI BẰNG THUẬT TOÁN ADRC THÍCH NGHI KẾT HỢP SMC

LIGHT OF SIGHT STABILIZATION CONTROL OF PAN-TILT OBSERVATION PLATFORMS ON USV USING AN ADAPTIVE ADRC ALGORITHM COMBINED WITH SMC

Lê Văn Tuấn^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2026.147>

TÓM TẮT

Bài toán ổn định đường ngắm (LOS) cho đài quan sát đặt trên phương tiện cơ động nói chung và phương tiện mặt nước không người lái (USV) nói riêng là một trong những bài toán điều khiển phổ biến. Trong số các kỹ thuật được sử dụng thì điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động (ADRC) và điều khiển trượt (SMC) được ưu tiên vì chúng đều là các giải pháp xử lý nhiễu và bất định mô hình. Trong khi ADRC nổi bật với khả năng ước tính và bù trừ nhiễu chủ động còn SMC thì lại được đánh giá cao về tính bền vững trước nhiễu và bất định. Khi kết hợp ADRC và SMC có thể đảm bảo tận dụng được ưu điểm của cả hai, và giảm bớt những hạn chế của chúng, nghĩa là khi ADRC đã ước tính và bù nhiễu hiệu quả thì nhiệm vụ của SMC là ổn định phần sai lệch còn lại. Khi đó, hệ thống vừa đáp ứng nhanh hơn lại giảm bớt năng lượng dư thừa của điều khiển chuyển mạch và hạn chế sự chattering của hệ thống. Bài báo này xây dựng một bộ điều khiển ADRC thích nghi kết hợp với SMC qua đó nâng cao hiệu suất tổng thể của bài toán ổn định đường ngắm trên USV.

Từ khóa: USV, LOS, ổn định LOS, ADRC, SMC, ADRC kết hợp SMC.

ABSTRACT

The problem of stabilizing the line of sight for observation stations mounted on mobile platforms in general, and on Unmanned Surface Vehicles (USVs) in particular, is a common control problem. Among the techniques used, Active Disturbance Rejection Control (ADRC) and Sliding Mode Control (SMC) are prioritized as they both provide solutions for handling disturbances and model uncertainties. While ADRC stands out for its ability to actively estimate and compensate for disturbances, SMC is highly regarded for its robustness against disturbances and uncertainties. Combining ADRC and SMC can leverage the advantages of both methods and mitigate their respective limitations. This means that once ADRC effectively estimates and compensates for disturbances, the role of SMC is to stabilize the remaining error. Consequently, the system not only responds faster but also reduces the excess energy associated with switching control and minimizes system chattering. This paper develops an adaptive ADRC controller integrated with SMC to enhance the overall performance of the line-of-sight stabilization problem for USVs.

Keywords: USV, LOS, LOS Stabilization, ADRC, SMC, ADRC combined with SMC.

¹Viện Tự động hóa, Viện Khoa học - Công nghệ Quân sự

*Email: visaosang89@gmail.com

Ngày nhận bài: 04/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Bài toán điều khiển ổn định đường ngắm được nhiều tác giả nghiên cứu với tính ứng dụng rộng rãi đặc biệt là trong lĩnh vực quốc phòng an ninh [1, 2]. Trong đó, các

tác giả thông thường sử dụng vector đường ngắm để làm mục tiêu ổn định, theo đó trong nghiên cứu [1], tác giả sử dụng hàm sai lệch là dạng phép trừ giữa đường ngắm mong muốn và đường ngắm hiện tại, mục tiêu là

khiến cho sai lệch này tiến về 0. Trong nghiên cứu [2], tác giả lại dùng tích có hướng của 2 vector này để xác định sai lệch đường ngắm. Khi đó nếu hai vector đường ngắm song song thì tích có hướng của chúng bằng 0. Trong thực tế, việc kéo sai lệch về 0 không phải thông qua một bước duy nhất, đặc biệt trong điều kiện nhiễu động liên tục. Đó là bài toán vòng ngoài động hình học, khi xác định được đầu vào điều khiển (có thể dựa trên sai lệch đường ngắm) đó sẽ trở thành giá trị đặt cho một vòng điều khiển bên trong.

Khi đó để điều khiển vòng trong, một số tác giả ứng dụng điều khiển trượt để điều khiển các cơ cấu 2 bậc pan-tilt trên phương tiện cơ động [3-6] để tận dụng được tính bền vững của phương pháp trước nhiễu và bất định mô hình. Trong đó, các nghiên cứu [4, 6] ứng dụng với các đài quan sát quang điện tử trên các phương tiện cơ động trong quá trình vận động, trong khi nghiên cứu [5] ứng dụng cho cơ cấu điều khiển trực tiếp hỏa lực với những đặc điểm riêng của một hệ thống quán tính lớn và yêu cầu ổn định không nằm trong quá trình vận động mà sau mỗi lần khai hỏa. Đặc điểm chung của những nghiên cứu này là tận dụng được tốt tính bền vững của điều khiển trượt vào các bài toán riêng biệt.

Một số khác lại ứng dụng bộ điều khiển ADRC với khả năng đáp ứng nhanh do sử dụng các bộ ước lượng ESO và bù nhiễu chủ động [7-9]. Trong đó, nghiên cứu [7] đã phân tích các nhiễu ngoại sinh tác động lên hệ thống servo pan-tilt trên xe tự hành. Các tác giả đã sử dụng mô hình độ gồ ghề của đường và mô hình xe bảy bậc tự do để mô tả nhiễu. Để bù trừ nhiễu và nâng cao khả năng nhận biết môi trường của xe tự hành, bộ điều khiển ADRC đã được đề xuất và áp dụng. Trong nghiên cứu [8], Łukasz Rówienicz và cộng sự đã tập trung vào việc ổn định các hệ thống đường ngắm hai trục sử dụng ADRC. Nghiên cứu này trình bày một cách tiếp cận tổng quát hơn về ADRC cho ổn định LOS mà không đi sâu vào chi tiết mô hình nhiễu cụ thể. Nghiên cứu [9] nhấn mạnh việc bù trừ nhiễu dựa trên thông tin IMU về trạng thái của thân xe, cho thấy nhiễu còn lại mà ADRC cần xử lý có thể liên quan đến các yếu tố khác hoặc độ chính xác còn thiếu sau bù trừ cơ bản.

Tuy nhiên nếu như những phương pháp điều khiển trượt sẽ dễ gây ra lãng phí năng lượng hoặc hiện tượng chattering thì ADRC lại tương đối phụ thuộc vào chất lượng của bộ ước lượng ESO và như trong nghiên cứu [8] đã chỉ ra, việc bù trừ tuyệt đối gần như bất khả thi. Từ những điểm này, bài báo đề xuất sử dụng bộ điều khiển kết hợp ADRC và điều khiển trượt để áp dụng cho bài toán

ổn định đường ngắm cho hệ thống quang điện tử đặt trên USV. Giải pháp này có thể tận dụng được những điểm mạnh của cả hai phương pháp, đồng thời hạn chế được những điểm yếu của cả hai khi áp dụng.

2. BÀI TOÁN ỔN ĐỊNH VÒNG NGOÀI CHO ĐƯỜNG NGẮM TRÊN USV

Trong nhiều hệ thống quang điện tử đặt trên phương tiện cơ động nói chung và USV nói riêng vị trí đặt IMU có thể là khác nhau, một số đặt trên sàn tàu, một số đặt trực tiếp trên trục tilt của đài quan sát để đảm bảo khả năng ổn định đường ngắm nhanh nhất. Mô hình được sử dụng trong bài báo này áp dụng cho IMU được đặt trên trục tilt. Khi đó, IMU sẽ đo được vận tốc góc thực của đường ngắm. Giả sử, dựa vào các thông tin đã biết (chủ yếu là IMU) có thể xác định được đường ngắm thực $\mathbf{l}$ và đường ngắm mong muốn $\mathbf{l}_*$, khi đó sai lệch của đường ngắm được xác định bởi:

$$\mathbf{e} = \mathbf{l} \times \mathbf{l}_* \quad (1)$$

Khi đó, mục tiêu của bài toán ổn định là khiến cho $\dot{\mathbf{l}} = 0$ mà với vị trí đặt của IMU thì thực tế IMU trực tiếp đo vận tốc góc của đường ngắm hay:

$$\dot{\mathbf{l}} = \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}} \times \mathbf{l} \quad (2)$$

Phương trình (2) thể hiện rằng nếu thay đổi được $\boldsymbol{\omega}_{\text{imu}}$ thì có thể điều chỉnh được $\dot{\mathbf{l}}$. Khi đó, nếu xác định vòng ngoài với đầu vào điều khiển mong muốn:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}} = k\mathbf{e} \quad \text{với } k > 0 \quad (3)$$

Có thể ổn định được đường ngắm cho hệ pan-tilt trên USV. Thực vậy, chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} \geq 0 \quad (4)$$

Khi đó đạo hàm của V :

$$\dot{V} = \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} \quad (5)$$

Trong đó, giả định $\mathbf{l}_*$ thay đổi chậm, thì theo (2):

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{l}} \times \mathbf{l}_* = (\boldsymbol{\omega}_{\text{imu}} \times \mathbf{l}) \times \mathbf{l}_* \quad (6)$$

Sử dụng đồng nhất thức vector, ta thu được:

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{l}_*^T \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}}) \mathbf{l} - (\mathbf{l}_*^T \mathbf{l}) \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}} \quad (7)$$

Thay vào $\dot{V}$:

$$\dot{V} = \mathbf{e}^T [(\mathbf{l}_*^T \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}}) \mathbf{l} - (\mathbf{l}_*^T \mathbf{l}) \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}}] \quad (8)$$

Trong đó, do phép tích có hướng tạo ra vector vuông góc với vector thành phần nên:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{l} = (\mathbf{l} \times \mathbf{l}_*)^T \mathbf{l} = 0 \quad (9)$$

Khi đó, (8) trở thành:

$$\dot{V} = -(\mathbf{l}_*^T \mathbf{l}) \mathbf{e}^T \boldsymbol{\omega}_{\text{imu}} \quad (10)$$

Trong thực tế góc lệch giữa $\mathbf{l}$ và $\mathbf{l}_*$ thường không lớn, hay:

$$\mathbf{I}_*^T \mathbf{I} = \cos(\theta) > 0 \quad (11)$$

Khi đó, nếu áp dụng luật (3) (khi $\omega_{imu} = \omega_{LOS_*}$) và phương trình (11) vào (10), ta thu được:

$$\dot{V} = -k \cos(\theta) \|\mathbf{e}\|^2 \leq 0 \quad (12)$$

Trong thực tế, cơ cấu pan-tilt chỉ có 2 bậc do vậy để đáp ứng được ω_{LOS_*} ta chiếu lên mặt phẳng vuông góc với đường ngắm để lấy giá trị yêu cầu của vận tốc góc pan-tilt ω_{pt_*} (từ vận tốc góc của đường ngắm yêu cầu ω_{LOS_*}):

$$\omega_{pt_*} = (\mathbf{I} - \mathbf{I}\mathbf{I}^T) \omega_{LOS_*} \quad (13)$$

Trong khi đó, chuyển động của hệ pan-tilt sẽ bao gồm hai thành phần tạo nên:

$$\omega_{pt} = \omega_p + \omega_t = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(q_p) \\ 0 & \cos(q_p) \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_p \\ \dot{q}_t \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\omega(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (14)$$

Với q_p, q_t là các góc quay hiện tại của các trục pan và trục tilt, còn $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_p \\ q_t \end{bmatrix}$.

Như vậy nếu như có được giá trị vận tốc góc pan-tilt mong muốn ω_{pt_*} có thể xác định được vận tốc góc mong muốn của từng trục $\dot{\mathbf{q}}_*$:

$$\dot{\mathbf{q}}_* = \mathbf{J}_\omega^+(\mathbf{q}) \omega_{pt_*} \quad (15)$$

Trong đó, $\mathbf{J}_\omega^+(\mathbf{q})$ là ma trận giả nghịch đảo của $\mathbf{J}_\omega(\mathbf{q})$.

Vòng điều khiển thứ 2 sẽ cần bám theo giá trị yêu cầu $\dot{\mathbf{q}}_*$, đây cũng là trọng tâm của bài báo với việc ứng dụng thuật toán ADRC thích nghi kết hợp SMC.

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN ADRC KẾT HỢP SMC THÍCH NGHI CHO ĐIỀU KHIỂN VÒNG TRONG ỔN ĐỊNH ĐƯỜNG NGẮM

Trong hệ thống điều khiển ổn định đường ngắm của bộ pantilt khi sử dụng bộ điều khiển ADRC thì cấu trúc được thể hiện trong Hình 1, trong đó các thành phần chính cần có sẽ bao gồm có Bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO và Bộ điều khiển cốt lõi (core controller - có thể là PD, SMC).

3.1. Mô hình động lực học hệ thống pan-tilt

Xét mô hình động lực học của bộ pantilt [9]:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (16)$$

$$\text{Với: } \mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} I_{panz} + J_1(q_t) & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(I_{zz} - I_{xx}) \sin(2q_t) \dot{q}_p \\ \frac{1}{2}(I_{zz} - I_{xx}) \sin(2q_t) \dot{q}_p & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ m_{tilt} g l_c \sin q_t \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{Trong đó: } J_1(q_t) = I_{xx} \sin^2 q_t + I_{zz} \cos^2 q_t \quad (20)$$

và I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} là các moment quán tính quanh các trục X, Y và Z. Còn I_{panz} là moment quán tính riêng của đế pan, m_{tilt} là khối lượng của đài quan sát đặt trên trục tilt, l_c là khoảng cách từ trục tilt đến trọng tâm của đài quan sát.

Khi đó có thể chuyển (16) thành:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})(\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q})) \quad (21)$$

3.2. Bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO)

Đặt $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}$; $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$ và $\mathbf{x}_3 = \mathbf{f}_{total}$ là tổng nhiễu tác động lên hệ thống, khi đó $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3]^T$ là vector trạng thái mở rộng của hệ thống.

Khi đó mục tiêu của ESO là ước lượng vector trạng thái $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \hat{\mathbf{x}}_3]^T$.

Phương trình Linear ESO (LESO) cho từng kênh (Pan/Tilt):

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2 + \boldsymbol{\beta}_1(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}_1) \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = \hat{\mathbf{x}}_3 + \mathbf{b}_0 \mathbf{u} + \boldsymbol{\beta}_2(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}_1) \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_3 = \boldsymbol{\beta}_3(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}_1) \end{cases} \quad (22)$$

trong đó, $\mathbf{y}$ là đầu ra đo được từ IMU/Encoder, $\mathbf{u}$ là tín hiệu điều khiển (hoặc như trên (21) là $\boldsymbol{\tau}$).

Thay vì chọn $\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, \boldsymbol{\beta}_3$ ta chuyển sang dùng một biến:

$$\beta_{1i} = 3\omega_{oi}, \beta_{2i} = 3\omega_{oi}^2, \beta_{3i} = \omega_{oi}^3 \quad (23)$$

Khi đó, chỉ cần chỉnh một tham số duy nhất là $\omega_o = [\omega_{op}, \omega_{ot}]^T$ (Observer Bandwidth).

• ω_o càng lớn thì ước lượng càng nhanh nhưng nhiễu càng nhiều.

• ω_o càng nhỏ thì ước lượng chậm (trễ pha) nhưng mượt.

Khi chọn được ω_o phù hợp thì sai số ước lượng $\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i$ sẽ bị chặn.

3.3. Bộ điều khiển ADRC cơ bản

Trong không gian trạng thái mở rộng có thể mô tả riêng từng trục pan-tilt như sau:

$$\ddot{q}_i = f_{total_i}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{w}_{usv}) + b_{0,i} u_i \quad (24)$$

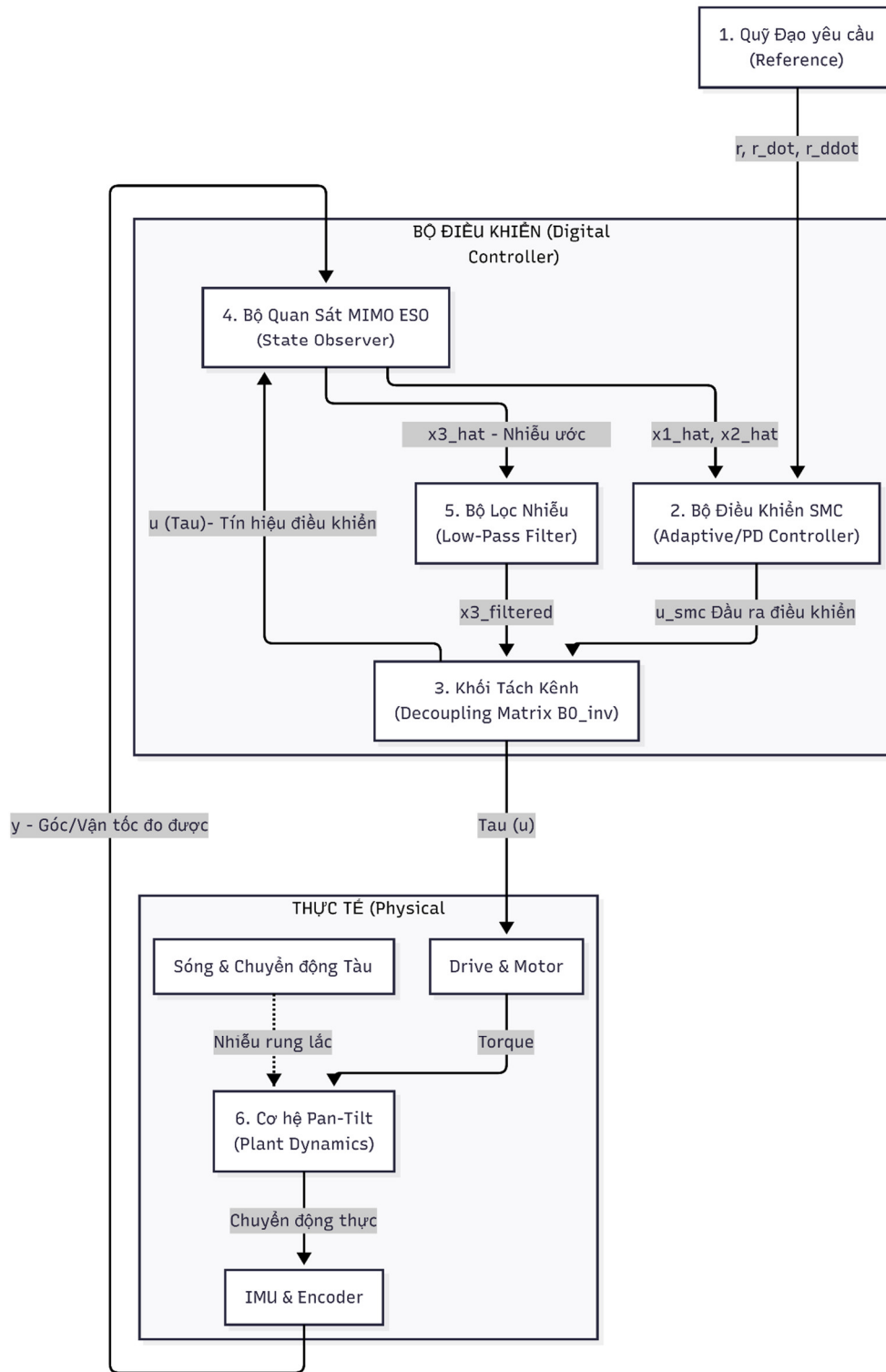
Với i ứng với các chỉ số pan hoặc tilt.

Khi bộ ESO quan sát được trạng thái mở rộng $\hat{\mathbf{x}}_3$ sử dụng luật tách kênh và bù nhiễu chủ động:

$$u_i = \frac{u_{0,i} - \hat{x}_{3,i}}{b_{0,i}} \quad (25)$$

Khi đó, ảnh hưởng của nhiễu được triệt tiêu xấp xỉ, và động học hệ quy về dạng tích phân kép lý tưởng:

$$\ddot{q}_i \approx u_{0,i} \quad (26)$$



Hình 1. Cấu trúc hệ thống với bộ điều khiển ADRC

Tín hiệu điều khiển danh định $u_{0,i}$ được thiết kế theo cấu trúc PD:

$$u_{0,i} = \ddot{q}_d + K_{D_i}(\dot{q}_{d_i} - \hat{x}_{2_i}) + K_{P_i}(q_{d_i} - \hat{x}_{1_i}) \quad (27)$$

Trong đó:

• $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ là trạng thái ước lượng từ ESO,

• K_P, K_D là các hệ số điều chỉnh động học kín.

Nhận xét:

Cấu trúc PD-ADRC hoạt động hiệu quả khi nhiễu có tính hằng hoặc biến thiên chậm. Tuy nhiên, trong điều kiện nhiễu dao động nhanh (như sóng biển), sai số ước lượng của ESO luôn tồn tại:

$$\Delta(t) = f(t) - \hat{f}(t) \neq 0 \quad (28)$$

Khi đó, hệ chỉ đạt ổn định bị chặn (bounded stability), và sai số bám không thể triệt tiêu hoàn toàn. Do vậy cần có giải pháp tốt hơn PD trong việc kết hợp với ADRC, và SMC là một giải pháp tiềm năng.

3.4. Bộ điều khiển ADRC kết hợp SMC

Sau khi bù nhiễu bằng ADRC, động học thực tế của hệ có dạng:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u}_0 + \Delta \quad (29)$$

với Δ là sai số ước lượng còn lại của ESO.

Với điều khiển PD, đây tương đương một hệ lò xo chịu kích thích cưỡng bức $\Delta(t)$, do đó sai số sẽ dao động quanh gốc tọa độ. Để xử lý, bộ điều khiển PD được thay thế bằng điều khiển trượt.

Định nghĩa vector sai số bám:

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \quad (30)$$

Chọn mặt trượt cho hệ hai trục:

$$\mathbf{S} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e} \quad (31)$$

trong đó:

- $\mathbf{S} = [s_1 \ s_2]^T$,
- $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$,
- $\lambda_i > 0$ đảm bảo tính xác định dương.

Lấy đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{\mathbf{S}} = \ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} \quad (32)$$

Vì:

$$\ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} \quad (33)$$

nên:

$$\dot{\mathbf{S}} = (\ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} \quad (34)$$

Do đó:

$$\dot{\mathbf{S}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - (\mathbf{u}_0 + \mathbf{\Delta}) + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} \quad (35)$$

Luật điều khiển Sliding Mode được thiết kế:

$$\mathbf{u}_0 = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) \quad (36)$$

trong đó:

- $\mathbf{K} = \operatorname{diag}(K_1, K_2)$ là ma trận độ lợi,
- $\operatorname{sgn}(\mathbf{S}) = [\operatorname{sgn}(s_1) \operatorname{sgn}(s_2)]^T$.

Thay vào phương trình $\dot{\mathbf{S}}$:

$$\dot{\mathbf{S}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - (\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) + \mathbf{\Delta}) + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}} \quad (37)$$

Rút gọn:

$$\dot{\mathbf{S}} = -\mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{\Delta} \quad (38)$$

Đây chính là động học mặt trượt.

Phân tích ổn định Lyapunov

Chọn hàm Lyapunov ứng viên:

$$V(\mathbf{S}) = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} = \frac{1}{2} (s_1^2 + s_2^2) \geq 0 \quad (39)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} \quad (40)$$

Thay động học mặt trượt:

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T (-\mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{\Delta}) \quad (41)$$

Triển khai theo từng phần tử:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 s_i (-K_i \operatorname{sgn}(s_i) - \Delta_i) \quad (42)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 (-K_i s_i \operatorname{sgn}(s_i) - s_i \Delta_i) \quad (43)$$

Vì:

$$s_i \operatorname{sgn}(s_i) = |s_i| \quad (44)$$

nên:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 (-K_i |s_i| - s_i \Delta_i) \quad (45)$$

Áp dụng bất đẳng thức:

$$-s_i \Delta_i \leq |s_i| |\Delta_i| \quad (46)$$

suy ra chặn trên:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^2 (-K_i |s_i| + |s_i| |\Delta_i|) \quad (47)$$

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^2 -|s_i| (K_i - |\Delta_i|) \quad (48)$$

Để đảm bảo $\dot{V} < 0$ với mọi $\mathbf{S} \neq 0$, cần:

$$K_i > |\Delta_i(t)|, i = 1, 2 \quad (49)$$

Khi điều kiện này được thỏa mãn:

$$\dot{V} \leq -\eta \sum_{i=1}^2 |s_i| = -\eta \|\mathbf{S}\|_1 < 0 \quad (50)$$

với $\eta > 0$.

Do đó hệ đạt ổn định tiệm cận toàn cục theo Lyapunov.

3.5. Bộ điều khiển ADRC kết hợp SMC thích nghi

Bộ điều khiển SMC được cho bởi (36) có một yếu điểm cố hữu đó là điều kiện (49), tức là để ổn định được thì cần xác định các hệ số K_i cố định lớn hơn các sai lệch ước lượng $\Delta_i(t)$ biến thiên theo thời gian và đặc biệt là theo điều kiện của môi trường (nhiều tổng cộng). Như vậy khi sử dụng sẽ cần xác định các hệ số K_i cố định lớn hơn $\max \Delta_i(t)$, khi đó nếu chuyển sang trường hợp $\Delta_i(t)$ nhỏ, các hệ số lớn này sẽ gây ra hiện tượng chattering lớn. Và đó là lý do cần phải điều chỉnh K_i theo độ lớn của $\Delta_i(t)$.

Ngoài ra, trong thực tế sai số ước lượng $\Delta_i(t)$ thường tỉ lệ thuận với nhiễu tổng cộng, tức là khi nhiễu lớn thì ESO khó bám hơn và sẽ gây ra sai số ước lượng lớn, khi nhiễu nhỏ thì ESO sẽ dễ bám hơn và gây ra sai số ước lượng nhỏ.

Do vậy có thể dùng chính $\hat{\mathbf{x}}_3$ làm tham số thích nghi, khi đó luật thích nghi đề xuất:

$$\mathbf{K}_{adapt} = \mathbf{K}_{min} + \alpha \cdot |\operatorname{LPF}(\hat{\mathbf{x}}_3)| \quad (51)$$

Trong đó, $\mathbf{K}_{min}$ đảm bảo ổn định cơ bản; $\operatorname{LPF}(\hat{\mathbf{x}}_3)$ là tín hiệu ước lượng $\hat{\mathbf{x}}_3$ qua bộ lọc thông thấp với mục đích tránh khuếch đại nhiễu đo lường.

Với cách thiết kế hệ số (51) hệ thống sẽ tự động tăng hệ số khuếch đại khi có nhiễu lớn và giảm khi nhiễu nhỏ, ngoài ra việc điều chỉnh đó cũng giảm hiện tượng chattering và tiết kiệm năng lượng.

4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Để đánh giá chất lượng bộ điều khiển ADRC-SMC thích nghi đề xuất (AAS), các bộ điều khiển ADRC-PD (AP) và ADRC-SMC (AS) cũng được xây dựng trên cùng hệ thống để đối chiếu. Các tham số hệ thống được cho bởi bảng 1. Hệ thống được mô phỏng trên môi trường Matlab Simulink.

Quỹ đạo yêu cầu được cho bởi các phương trình sau (với mục tiêu dễ tính toán đạo hàm):

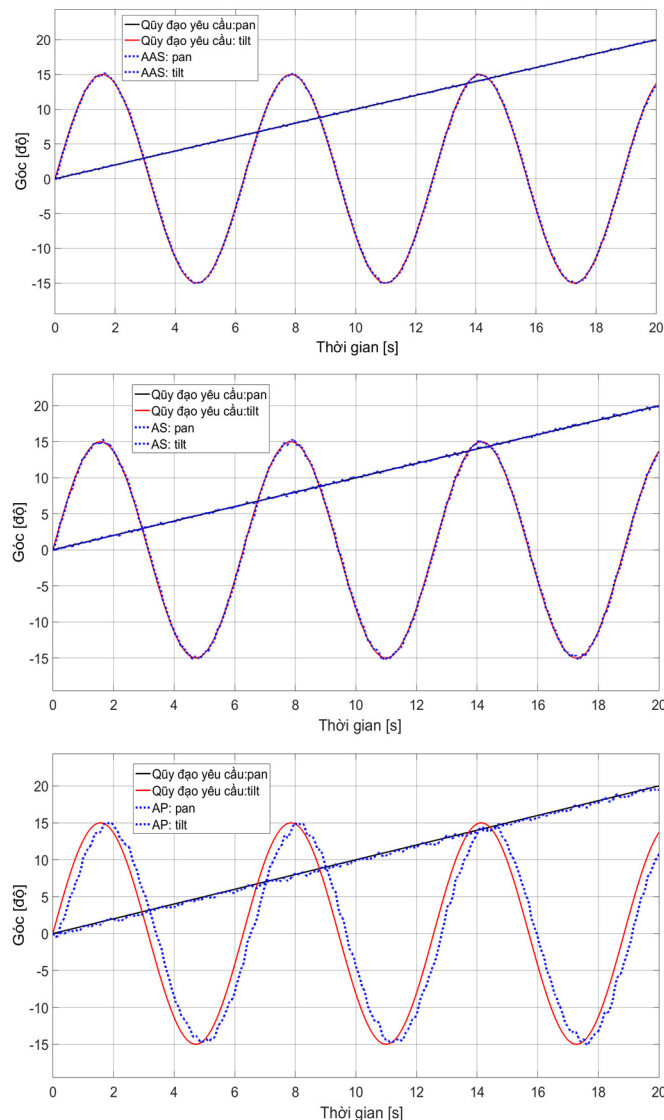
$$\begin{cases} r_p = \frac{\pi}{180} t \\ r_t = 15 * \frac{\pi}{180} \sin t \end{cases} \quad (52)$$

Tham số bộ điều khiển PD với $K_p = 100, K_D = 20$; tham số bộ điều khiển ADRC-SMC: $\mathbf{\Lambda} = 20 * \mathbf{I}$, $\mathbf{K} = [25, 25]^T$; tham số bộ điều khiển ADRC-SMC thích nghi: $\mathbf{\Lambda} = 20 * \mathbf{I}, \mathbf{k}_0 = [15, 15]^T, \alpha = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}$.

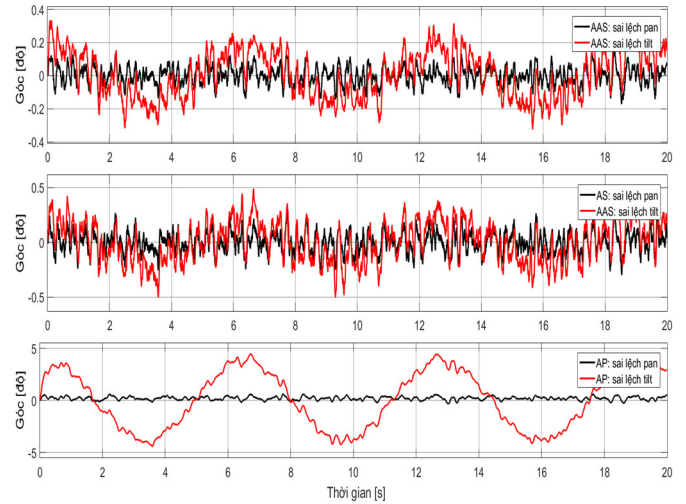
Khi đó, kết quả mô phỏng được cho bởi các hình 2 ÷ 5, trong đó, hình 2 thể hiện giá trị của góc của trục pan, tilt thật và góc của quỹ đạo yêu cầu, hình 3 thể hiện sai lệch bám các góc yêu cầu này.

Bảng 1. Các tham số hệ thống

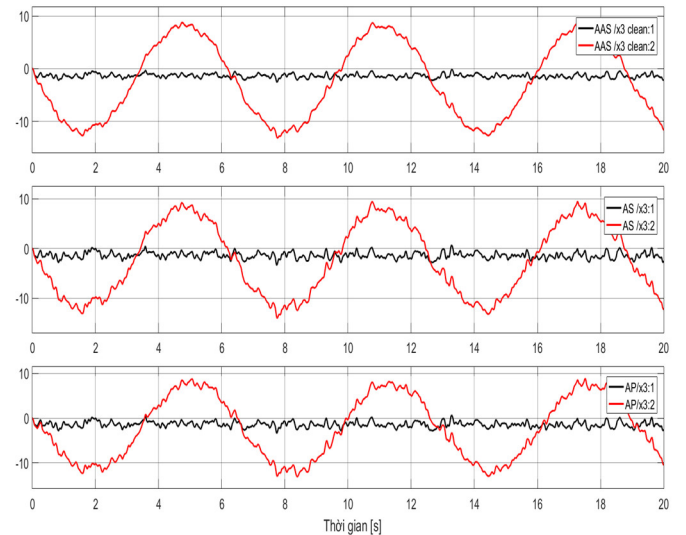
Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng tải	m_{tilt}	30,0	kg
Khoảng lệch trọng tâm	l_c	0,2	m
Quán tính quanh trục X	I_{xx}	0,8	$kg \cdot m^2$
Quán tính quanh trục Y	I_{yy}	1,5	$kg \cdot m^2$
Quán tính quanh trục Z	I_{zz}	1,2	$kg \cdot m^2$
Quán tính trục Pan	I_{pan_z}	1,0	$kg \cdot m^2$
Gia tốc trọng trường	g	9,81	m/s^2
Hệ số ma sát nhớt	b	0,5	$N \cdot m \cdot s/rad$



Hình 2. Góc yêu cầu và các góc thực tế của 3 bộ điều khiển



Hình 3. Sai lệch bám của 3 bộ điều khiển

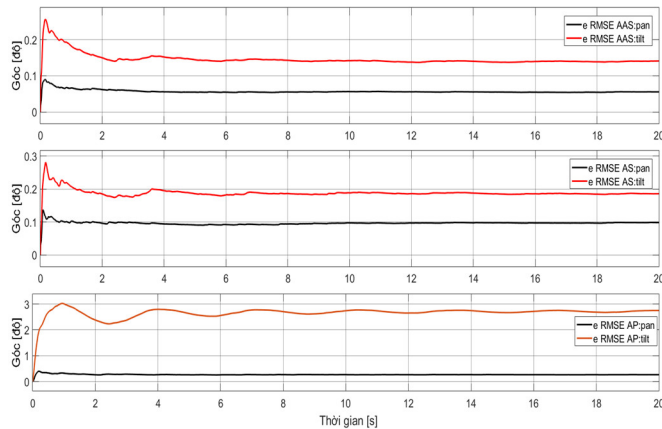


Hình 4. Ước lượng nhiễu của ba bộ điều khiển

Với kết quả cho bởi hình 2 và 3 có thể thấy sai lệch bám của thuật toán ADRC-PD (AP) rất yếu khi so với ADRC-SMC (AS) và ADRC-SMC thích nghi (AAS). Đồng thời sai lệch bám quỹ đạo của AS và AAS gần như tương đương. Để lượng hóa chính xác hơn, Hình 5 sẽ thể hiện RMSE của sai lệch bám.

Trong khi đó, hình 4 thể hiện giá trị của $\hat{x}_3$ của 3 bộ điều khiển, trong đó AAS sử dụng tín hiệu đã được lọc qua bộ lọc thông thấp. Để kiểm chứng một cách chính xác nhất các RMSE của $\hat{x}_3$ và sai lệch bám trong 20s mô phỏng được thể hiện bằng các số liệu trên bảng 2.

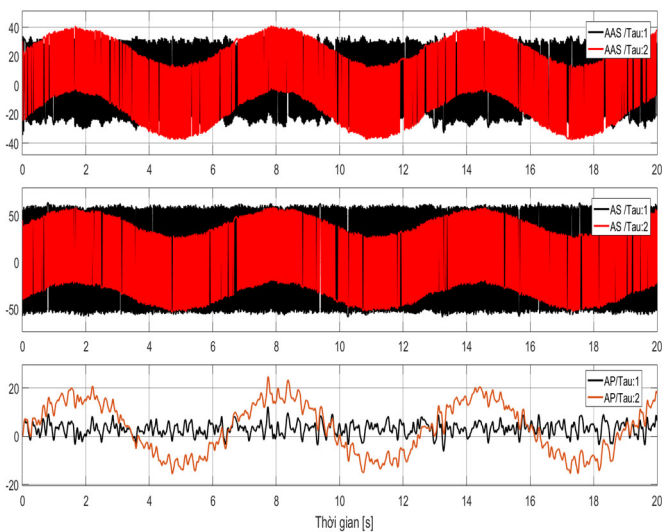
Hình 6 thể hiện giá trị của các đầu vào điều khiển của 3 phương pháp, hình này sẽ đánh giá mức độ tiêu thụ năng lượng của các bộ điều khiển. Trong đó có thể nhận thấy AAS đã giảm được đáng kể mức tiêu thụ năng lượng so với AS mặc dù còn lớn hơn tương đối nhiều so với AP truyền thống.



Hình 5. RMSE sai lệch bám của 3 bộ điều khiển

Bảng 2. RMSE của $\hat{x}_3$ và sai lệch bám

RMSE	ADRC-SMC thích nghi	ADRC-SMC	ADRC-PD
$\hat{x}_3$: pan	1,44	1,54	1,54
$\hat{x}_3$: tilt	7,44	7,46	7,2
Sai lệch pan (độ)	0,056	0,098	0,266
Sai lệch tilt (độ)	0,141	0,186	2,75



Hình 6. Tín hiệu điều khiển của 3 bộ điều khiển

Qua các kết quả mô phỏng có thể rút ra nhận xét sau:

- Các kết quả ước lượng giá trị của $\hat{x}_3$ của 3 bộ điều khiển là hoàn toàn tương đương, sự khác biệt về RMSE là không nhiều với biên độ chỉ 7% (1,44 so với 1,54) với trục pan và 4% (7,2 so với 7,46) với trục tilt.

- Khả năng ổn định đường ngắm khi sử dụng các thuật toán kết hợp ADRC và SMC là tốt hơn rất nhiều so với ADRC-PD truyền thống, trong đó ADRC-SMC thích nghi lại mang đến khả năng ổn định vượt trội. Cụ thể RMSE của ADRC-SMC thích nghi theo trục pan tốt hơn ADRC-SMC 43% (0,056 độ so với 0,098 độ) và tốt hơn

ADRC-PD 79% (0,056 độ so với 0,266 độ). RMSE theo trục tilt của ADRC-SMC thích nghi tốt hơn ADRC-SMC 24% (0,141 độ so với 0,186 độ) và tốt hơn ADRC-PD 95% (0,141 độ so với 2,75 độ).

- Với ba phương pháp điều khiển, ADRC-PD có mức tiêu thụ năng lượng nhỏ nhất với biên độ dưới 10Nm cho trục pan và khoảng 20Nm cho trục tilt. Trong khi đó ADRC-SMC có biên độ rất lớn với 60Nm cho cả trục pan và trục tilt. ADRC-SMC thích nghi đã giảm được 50% biên độ của đầu vào điều khiển trục pan (30Nm so với 60Nm) và giảm được 33% của trục tilt (40Nm so với 60Nm).

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất bộ điều khiển ADRC kết hợp điều khiển trượt thích nghi cho bài toán ổn định đường ngắm của hệ pan-tilt trên USV. Cấu trúc điều khiển tận dụng khả năng ước lượng và bù nhiễu chủ động của ADRC để giảm bất định mô hình, đồng thời sử dụng SMC nhằm triệt tiêu phần sai số dư còn lại. Luật điều chỉnh hệ số trượt dựa trên tín hiệu nhiễu ước lượng giúp hệ thống tự thích nghi theo mức độ nhiễu môi trường, qua đó hạn chế hiện tượng chattering và giảm tiêu thụ năng lượng.

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất vượt trội so với ADRC-PD và cải thiện đáng kể so với ADRC-SMC hệ số cố định cả về sai số bám và biên độ tín hiệu điều khiển. Điều này chứng minh tính bền vững và hiệu quả của cấu trúc điều khiển trong điều kiện nhiễu dao động mạnh đặc trưng môi trường biển.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là triển khai thực nghiệm trên hệ thống thực và mở rộng sang các cấu trúc điều khiển trượt bậc cao nhằm tiếp tục nâng cao chất lượng ổn định.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự trong đề tài mã số ĐTVN.02.25/TĐH.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trương Tất Thuận, "Tổng hợp bộ quan sát vận tốc góc và gia tốc góc trong hệ thống điều khiển ổn định đường ngắm cho bệ pan-tilt," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 61, 7, 2025.
- [2]. Hoàng Quốc Minh, Nguyễn Ngọc Tuấn, "Xây dựng bộ điều khiển ổn định trạm quan sát quang điện tử trên tàu mặt nước dưới tác động của điều kiện sóng biển," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 61, 3, 2025.
- [3]. Kameoka Y., Hayashi N., Takai S., "Cooperative tracking in camera sensor networks with sliding mode Control," *Advanced Robotics*, 37(1-2): 130-140, 2022.

[4]. Nguyễn Ngọc Tuấn, Chaysavanh Inthakham, "Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động kính ngắm quang học trên trực thăng quân sự," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 58, 4, 2022.

[5]. Vũ Quốc Huy, Trần Ngọc Bình, Nguyễn Vũ, "Nâng cao chất lượng ổn định đường ngắm và bám sát mục tiêu cho hệ điều khiển hỏa lực của pháo phòng không Zu23mm-2N cải tiến," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự*, 49, 06-2017.

[6]. Huy Quoc Vu, Binh Ngoc Tran, "Synthesis of an Improved Fast Terminal Sliding Mode Controller for Opto-Electronic Observatory in Mobile Vehicle," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 9, 6, 434-440, 2020.

[7]. C. Sun, J. Leng, S. Wang, L. Qi, "ADRC-based Control of Pan-tilt System for Automated Vehicle Sensors," *2021 China Automation Congress (CAC)*, 6116-6121, 2021. doi: 10.1109/ccdc52312.2021.9601588 1.

[8]. Ł. Równicz, P. Malczyk, M. Pękal, "Stabilization of two-axis line-of-sight system using active disturbance rejection control," *Multibody System Dynamics*, 2025. doi: 10.1007/s11044-025-10110-z 2.

[9]. H. Xia, et al., "Line-of-Sight Stabilization and High-Precision Target Tracking Technology of the Risley Prism System on Motion Platforms," *Actuators*, 14, 5, 240, 2025. doi: 10.3390/act14050240

AUTHOR INFORMATION

Le Van Tuan

Automation Institute, Academy of Military Science and Technology (AMST), Vietnam