

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC, ỔN ĐỊNH VÀ TỐI ƯU HÓA QUỹ ĐẠO CHUYỂN ĐỘNG CỦA CẦN CẦU DI ĐỘNG VÀ CẦN CẦU ỚNG LÒNG: NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

DYNAMIC MODELING, STABILITY ANALYSIS, AND TRAJECTORY OPTIMIZATION OF MOBILE AND TELESCOPIC CRANES: A REVIEW STUDY

Huỳnh Công Lớn*, Lương Văn Tới

Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: huynhconglon@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong ba thập kỷ gần đây về mô hình động lực học, ổn định và tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động của các loại cần cầu di động và cần cầu ống lồng. Dựa trên phân tích tám công trình tiêu biểu từ Ba Lan, Trung Quốc và Nga, nghiên cứu đã tổng hợp các mô hình toán học, phương pháp mô phỏng và tiêu chí ổn định được ứng dụng trong lĩnh vực cơ giới nâng/hạ hiện đại. Các hướng tiếp cận bao gồm mô hình động lực học phi tuyến dựa trên phương trình Lagrange, mô hình khí động học của tải trọng dưới tác động của gió, và phương pháp tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động nhằm giảm năng lượng và dao động tải. Bài viết cũng thảo luận các xu hướng nghiên cứu mới về điều khiển thông minh, mô phỏng số, tiêu chuẩn hóa an toàn và mô hình học máy trong thiết kế cần cầu hiện đại.

Từ khóa: Cần cầu di động; Cần cầu ống lồng; Mô hình động lực học; Ổn định tải trọng; Ảnh hưởng của gió; Tối ưu hóa quỹ đạo; Điều khiển thông minh.

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive synthesis of research conducted over the past three decades on the dynamic modeling, stability analysis, and trajectory optimization of mobile and telescopic cranes. Based on an analysis of eight representative studies from Poland, China, and Russia, the work integrates mathematical models, simulation methodologies, and stability criteria that have been applied in the field of modern lifting machinery. The reviewed approaches include nonlinear dynamic models derived from Lagrange's equations, aerodynamic models of payloads under wind excitation, and trajectory optimization methods aimed at minimizing energy consumption and load oscillations. The paper also discusses emerging research trends in intelligent control, numerical simulation, safety standardization, and machine learning-based design of modern cranes.

Keywords: Mobile crane; Telescopic crane; Dynamic modeling; Load stability; Wind effects; Trajectory optimization; Intelligent control.

1. MỞ ĐẦU

Trong các hệ thống cơ giới xây dựng và công nghiệp nặng, cần cầu di động (mobile crane) và cần cầu ống lồng (telescopic crane) đóng vai trò thiết yếu trong việc nâng/hạ và vận chuyển tải trọng lớn trong không gian ba chiều. Sự phát triển của cần cầu hiện đại hướng đến nâng cao hiệu suất, đảm bảo an toàn và giảm năng lượng tiêu hao, đồng thời vẫn phải vận hành ổn định trong môi trường gió và dao động. Việc điều khiển chuyển động của cần cầu là một bài toán động lực học phi tuyến phức tạp, trong đó các khối lượng chuyển động, dây cáp đàn hồi và tải trọng dao động tương tác chặt chẽ. Do đó, nhiều công trình đã tập trung phát triển mô hình động học, mô hình lực gió, phân tích ổn định và tối ưu hóa điều khiển để nâng cao độ chính xác của mô phỏng và tính an toàn khi vận hành. Bài báo này tổng hợp và phân tích tám công trình nghiên cứu tiêu biểu giai đoạn 1990-2025 nhằm làm rõ:

- 1) Mô hình toán học và phương pháp mô phỏng động lực học của cần cầu;
- 2) Ảnh hưởng của gió đến chuyển động tải trọng;
- 3) Tiêu chí ổn định và thuật toán tối ưu hóa quỹ đạo;
- 4) Các cải tiến trong phương pháp đánh giá an toàn và hướng phát triển trong tương lai.

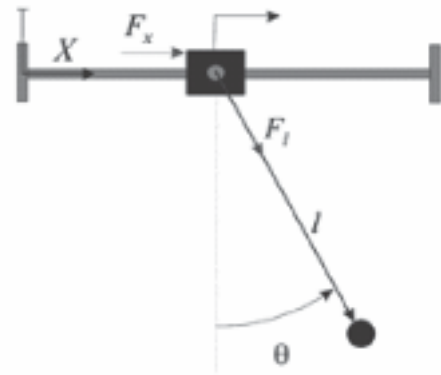
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Mô hình con lắc tải treo đơn giản (Pendulum Model)

Mô hình cổ điển xem tải như một khối chất điểm m treo qua dây dài l , chuyển động theo góc lệch θ . Phương trình chuyển động:

$$ml^2\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mgl\sin\theta = M_d(t)$$

Trong đó, $M_d(t)$ là moment do chuyển động của cần hoặc gió gây ra. Nghiên cứu của Singhose (1999) và Fujioka (2009) chứng minh rằng dao động tải ảnh hưởng trực tiếp đến moment chống lật và khả năng kiểm soát vị trí tải [Fujioka, ACC 2009].



Hình 1. Mô hình con lắc tải treo đơn giản của cần cầu di động (Nguồn: Fujioka et al., 2009)

2.2. Mô hình động lực học đa bậc tự do (Multibody Dynamics)

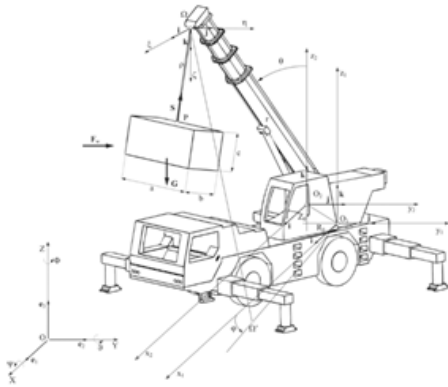
Từ năm 2005, cần cầu được mô tả như hệ đa vật thể có khớp quay và cần ống lồng. Hệ có ba bậc tự do chính:

- Góc quay θ_s (slewing);
- Góc nâng θ_l (luffing);
- Chiều dài ống lồng L .

Phương trình tổng quát:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q(t)$$

với $q = [\theta_s, \theta_l, L]^T$. Kacalak (2017) xây dựng phương pháp CAD/CAE để xác định vùng ổn định làm việc và chỉ số DSF (Dynamic Stability Factor) đánh giá nguy cơ lật [Kacalak, Transport Problems, 2017].



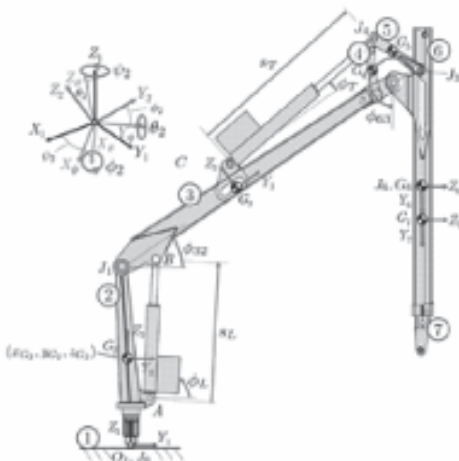
Hình 2. Sơ đồ động lực học cần cẩu ống lồng ba bậc tự do (Nguồn: Kacalak et al., 2017)

2.3. Mô hình linh hoạt và khớp đàn hồi

Khi chiều dài cần lớn hoặc tải trọng nặng, cần được xem như thanh đàn hồi chịu uốn, dao động có dạng mode riêng:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = q(x, t)$$

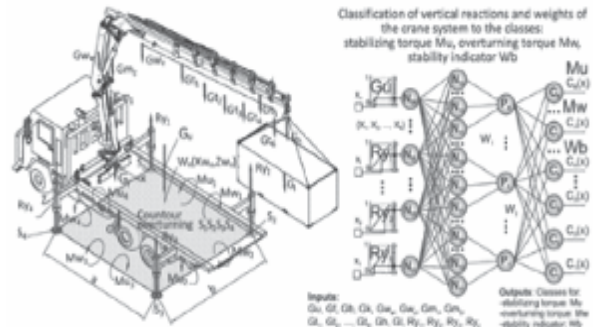
Chalermpong (2020) áp dụng phương pháp “Floating Frame of Reference Formulation (FFRF)” kết hợp “Adaptive Modal Integration” để giảm bậc mô hình linh hoạt [Chalermpong, MoViC, 2020].



Hình 3. Mô hình linh hoạt cần cẩu di động (Nguồn: Chalermpong et al., 2020)

3. ẢNH HƯỞNG CỦA GIÓ VÀ DAO ĐỘNG TẢI

Gió ngang tạo moment lớn tại mỗi quay và gây dao động cộng hưởng. Cękus et al. (2018) sử dụng mô phỏng CFD–PIV để xác định phân bố lực gió theo chiều cao cần cẩu. Nghiên cứu của Urbas & Stadnicki (2022) chỉ ra rằng năng lượng dao động tải có thể tăng hơn 30 % khi có gió rồi, làm giảm đáng kể ổn định hệ thống [Urbas, Materials 2022].



Hình 4. Ảnh hưởng gió ngang đến chuyển động tải treo (Nguồn: Cękus et al., 2018)

4. ỔN ĐỊNH VÀ AN TOÀN KẾT CẤU

Khả năng lật được đánh giá thông qua Moment chống lật (M_s) và Moment lật (M_l). Điều kiện an toàn:

$$M_s > M_l + M_d$$

Trong đó, M_d là moment động do tải chuyển động hoặc gió. Zhou et al. (2022) đề xuất phương pháp ZMP (Zero Moment Point) để tính ổn định chống lật; Jang et al. (2024) phát triển cảm biến đo điện trở nền nhằm dự báo nguy cơ mất ổn định chân chống [Zhou, DYNA 2022; Jang, Appl. Sci. 2024].



Hình 5. Sơ đồ phân bố phản lực chân chống và điểm moment bằng không (Nguồn: Zhou et al., 2022)

5. CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT VÀ MÔ PHỎNG HIỆN ĐẠI

Công nghệ IoT và cảm biến thông minh cho phép giám sát tải, góc nâng, và lún nền theo thời gian thực. Liu et al. (2025) mô phỏng hệ rigid-flexible coupling cho cần cẩu turbine gió, cho thấy phản lực chân chống cực đại 520 kN khi vận hành gió 15 m/s. Công nghệ VR/AR và BIM cũng được sử dụng trong lập kế hoạch nâng/hạ nhằm dự đoán nguy cơ va chạm và lật đổ [Liu, JERR 2025; Arifin, Automation in Construction, 2021].

6. TỒN TẠI VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

1) Chưa có mô hình phi tuyến đầy đủ cho hệ cần – dây – nền – gió có tương tác lẫn nhau.

2) Thiếu dữ liệu thực nghiệm tại vùng nhiệt đới (gió rối mạnh, nền yếu).

3) Cần tiêu chuẩn hóa quy trình đánh giá ổn định động (DSF, ZMP) cho điều kiện Việt Nam.

4) Ứng dụng AI và học máy trong dự báo dao động và điều khiển tối ưu quỹ đạo nâng/hạ.

7. KẾT LUẬN

Trong 30 năm qua, nghiên cứu về cần cẩu di động đã chuyển từ mô hình tuyến tính đơn giản sang mô hình phi tuyến linh hoạt đa tương tác. Sự phát triển của các phương pháp mô phỏng, cảm biến và trí tuệ nhân tạo đang mở ra hướng mới cho việc điều khiển thông minh và đảm bảo an toàn động lực học. Đối với Việt Nam, việc kết hợp mô phỏng động lực học với dữ liệu thực tế từ công trường sẽ là hướng nghiên cứu khả thi và cần thiết trong thập kỷ tới. ❖

Ngày nhận bài: 29/10/2025

Ngày phản biện: 07/11/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Fujioka D., Rauch A., Singhose W.E. (2009), “Tip-Over Stability Analysis of Mobile Boom Cranes with Double-Pendulum Payloads”. American Control Conference.
- [2]. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. (2017), “Crane Stability Assessment Method in the Operating Cycle”. Transport Problems.
- [3]. Chalermpong K., Hara K., Yamaura H. (2020), “Flexible Dynamics Model of a Mobile Crane Using Adaptive Modal Integration”. MoViC 2020.
- [4]. Cękuś L., Kwiatkoń P. (2018), “Influence of Wind on the Movement of the Load Carried by Mobile Crane”. EngMech 2018.
- [5]. Zhou Q., Li S., Wang H. (2022), “Anti-Overturning Stability of Truck Cranes Based on ZMP Theory”. DYNA Journal.
- [6]. Urbas A., Stadnicki J. (2022), “Kinetic Energy Indicators for Mobile Cranes under Wind Loads”. Materials.
- [7]. Jang H., Lee H., Park J. (2024), “Preventing Overturning of Mobile Cranes Using Electrical Resistivity Sensors”. Applied Sciences.
- [8]. Liu H., Zhang J. (2025), “Dynamic Simulation Analysis of Wind Power Crane Multi-Body System”. Journal of Engineering Research and Reports.
- [9]. Arifin A., Chen W. (2021), “Integrating BIM and VR in Mobile Crane Lift Planning”. Automation in Construction.



- [10]. Xu J., Zhuo Y., Qi Z., Wang G., Zhao T., Wang T. (2022), “*Instability Load Analysis of a Telescopic Boom for an All-Terrain Crane*”. Mechanical Systems and Signal Processing, 13(2).
- [11]. Yoon B.-J., Lee K.-S., Lee J.-H. (2021), “*Study on Overturn Proof Monitoring System of Mobile Crane*”. Applied Sciences, 11(15):6819. <https://doi.org/10.3390/app11156819>
- [12]. Alyazidi N.M., Hassanine A.M., Mahmoud M.S., Ma'arif A. (2023), “*Enhanced Trajectory Tracking of 3D Overhead Crane Using Adaptive Sliding-Mode Control and Particle Swarm Optimization*”. Journal of Robotics and Control (JRC).
- [13]. Tong T.L., Ho M.-T., Dao H.H., Pham V.K., Minh D.D., Dao Q.T. (2024), “*Parameter Optimization of Sliding Mode Controller for Tower Crane Using Particle Swarm Optimization Algorithm*”. Journal of Measurement, Control, and Automation.
- [14]. Kang H., Gao J., Wang S., Zhou K., Huang C. (2025), “*Research on Stability of Tower Crane Based on ANSYS Software*”. Frontiers in Computing and Intelligent Systems.
- [15]. Bošnjak S., Zrnić N., Gašić V. et al. (2012), “*Dynamic Responses of Mobile Elevating Work Platform and Mega Container Crane Structures*”. Advanced Materials Research, 562-564.
- [16]. Wu J. (2019), “*Static Modelling and Stability Analysis of Non-Slewing Articulated Mobile Cranes*”. Master's Thesis, University of Western Australia.
- [17]. Qin T., Lu Y., Liu W. (2025), “*Influence of Cable Wind Ropes on Wind-Induced Response and Wind Vibration Coefficient of Tower Crane*”. In ICACMVE 2024, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer.
- [18]. Dutta S., Cai Y., Zheng J. (2023), “*Multi-objective Anti-swing Trajectory Planning of Double-pendulum Tower Crane Operations using Opposition-based Evolutionary Algorithm*”. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2305.18745>
- [19]. Vu M.N., Schwegel M., Hartl-Nesic C., Kugi A. (2022). “*Sampling-Based Trajectory (Re)planning for Differentially Flat Systems: Application to a 3D Gantry Crane*”. arXiv preprint.
- [20]. Musridhoi R.Z., Nugroho M.S. (2025), “*Analysis of Mobile Crane and Crawler Crane Lift Capacity in Steel Box Girder Type Bridge Construction*”. Journal of Applied Civil Engineering and Practices.
- [21]. Khairudin M. (2020), “*Dynamics System Analysis and Modeling on Crane Brand Three Dimensions (3D) with Loading Costs*”. Jurnal Penelitian Saintek.
- [22]. Lee S.W., Han D.S., Han G.J. (2006), “*The Structural Stability Analysis of an Articulation Type Container Crane Using Wind Tunnel Test*”. Key Engineering Materials, 326-328.
- [23]. Yang W., Gu M. (2010), “*A Method of Dynamic Modeling of a Large Floating Crane and its External Excitations*”. Advanced Materials Research, 139-141.
- [24]. Cękuś L., Kwiatkoń P., Gnatowska R. (2019), “*Impact of Wind on the Movement of the Load Carried by Rotary Crane*”. Applied Sciences, 9(18):3842.
- [25]. Shi J., Hu M., Zhang Y., Chen X., Yang S., Hallak T.S., Chen M. (2024), “*Dynamic Analysis of Crane Vessel and Floating Wind Turbine during Temporary Berthing for Offshore On-Site Maintenance Operations*”. Journal of Marine Science and Engineering, 12(8):1393. <https://doi.org/10.3390/jmse12081393>
- [26]. Kwiatkoń P., Cękuś D., Skrobek D., Šofer M., Poruba Z. (2024), “*Path Planning Optimization of the Load Transport Process Using Heuristic Algorithms*”. Applied Sciences, 14(21):9940. <https://doi.org/10.3390/app14219940>
- [27]. Tomasi I., Solazzi L. (2025), “*Dynamic Analysis of an Offshore Knuckle-Boom Crane under Different Load Application Laws*”. Applied Sciences, 15(14):8100. <https://doi.org/10.3390/app15148100>
- [28]. Zhang K., Niu W., Zhang K. (2025), “*Phase Plane Trajectory Planning for Double Pendulum Crane Anti-Sway Control*”. Algorithms, 18(5):246. <https://doi.org/10.3390/a18050246>
- [29]. Fan B. (2023), “*A Novel Trajectory Online Planning and Under-Actuated Control Method on Positioning and Anti-Swing for Bridge Cranes*”. Journal of Vibration and Control. <https://doi.org/10.1177/10775463221132334>
- [30]. Li F., Qian Y., Wu S. (2024), “*Self-Adapting Trajectory Tracking Control for Double-Pendulum Marine Tower Crane Considering Constraint Dead-Zone Against Seawave Disturbances*”. Nonlinear Dynamics.
- [31]. Shi H., Yao F., Yuan Z., Tong Y., Gang H. (2024), “*Nonlinear Coupled Tracking Controllers for Double-Pendulum and Gantry Cranes under Disturbance*”. Automatica.
- [32]. Lu K., Fang B., Sun N. (2022), “*Online Trajectory Planning for Three-Dimensional Offshore Boom Cranes*”. Ocean Engineering.
- [33]. Cękuś L., Kwiatkoń P., Gnatowska R. (2024), “*Wind-Load Visualization and Trajectory Tracking of Mobile Cranes Using Real-Time Sensing*”. Sensors.
- [34]. Zhang Y., Liu J., Wang C. (2025), “*Machine Learning-Based Prediction of Crane Stability under Wind and Dynamic Loads*”. IEEE Access.