

Polska Akademia Nauk
Instytut Fizyki Molekularnej

Dynamika lin i łańcuchów



mgr inż. Waldemar Tomaszewski

Rozprawa doktorska
wykonana pod kierunkiem
Prof. dr hab. Piotra Pierańskiego

Poznań 2016

Streszczenie

Głównym celem badań przedstawionych w tej pracy była analiza dynamiki lin i łańcuchów na podstawie danych otrzymanych z symulacji komputerowych.

W pierwszym etapie pracy przeanalizowane zostały modele lin opisane w dostępnej literaturze. Na podstawie tej analizy sformowane zostały równania ruchu dynamiki lin. Do dalszych badań wybrany został model dyskretny, opisujący linę lub łańcuch jako układ segmentów połączonych za pomocą złącz elastyczno-dyssypatywnych. Najbardziej rzeczywisty model liny przedstawiał układ połączonych prętów. Najprostszy model uzyskany został po założeniu, że lina reprezentowana będzie jako układ wahadeł matematycznych. Dla tego modelu możliwa jest transformacja równań ruchu do postaci umożliwiającej efektywne obliczenia numeryczne. Dla obu modeli wykonany został szereg testów z zastosowaniem dostępnych algorytmów numerycznego całkowania równań różniczkowych. Na podstawie analizy dokładności i efektywności obliczeń do dalszych badań wybrane zostały dwa algorytmy: *DOPRI8* i *RADAU5* stosowane w zależności od typu zagadnienia (uwarunkowania równań ruchu).

Przedmiotem dalszych badań była analiza spadku łańcucha złożonego. Dla tego zagadnienia przedstawione zostało rozwiązanie analityczne wynikające z zasady zachowania energii. Rozwiązanie to pokazało, że podczas spadku, koniec łańcucha spada z przyspieszeniem większym niż przyspieszenie grawitacyjne. Analiza sił działających w trakcie spadku łańcucha pozwoliła również na wyjaśnienie mechanizmu powodującego wzrost przyspieszenia końca łańcucha. Rezultaty otrzymane analitycznie zostały porównane z danymi eksperymentalnymi i symulacjami. Wykonana została również symulacja odpowiadająca spadkowi rzeczywistego łańcucha.

Dalszy etap badań dotyczył zagadnienia spadku łańcucha, którego początkowa odległość między końcami wzrastała. Przeprowadzone zostały doświadczenia laboratoryjne i szereg eksperymentów numerycznych, które uzupełniały dane laboratoryjne. W wyniku tych badań przedstawiona została zależność prędkości, przyspieszenia oraz czasu spadku końca łańcucha w zależności od początkowej odległości między końcami łańcucha. Analiza wykazała, że

dla łańcuchów, których początkowa odległość między końcami łańcucha jest duża (bliska długości łańcucha), dynamika przebiega inaczej. Ten przypadek został szczegółowo zbadany.

Następnym etapem badań spadku łańcucha była analiza sił działających na punkt zaczepienia łańcucha. Dla łańcucha złożonego wyprowadzone zostało rozwiązanie analityczne pokazujące, że siły działające na podporę mogą być bardzo duże, znacznie większe niż wynika to z ciężaru łańcucha. Wyniki otrzymane z symulacji były zgodne z rozwiązaniem analitycznym. Obliczenia przeprowadzono również dla łańcuchów ze wzrastającą początkową odległością między końcami. Rezultaty obliczeń porównane zostały do wyników otrzymanych eksperymentalnie i opisanych w literaturze. Zastosowanie symulacji komputerowej umożliwiło analizę sił działających na podporę łańcuchów z dużym początkowym rozwarciem końców. W trakcie tych badań wyjaśniona została nieciągłość w wartości siły działającej na punkt wsparcia łańcucha, pojawiająca się w chwili początkowej spadku łańcucha, dla którego początkowa odległość między końcami jest duża (bliska długości łańcucha).

Następny etap badań związany był z analizą zagadnienia strzału z bicia. Przedstawiony został model analityczny strzału z bicia prostego i odpowiadająca mu symulacja komputerowa. Dalsze badania dotyczyły wpływu parametrów występujących w równaniach ruchu na prędkość końca bicia. W wyniku tej analizy przeprowadzona została symulacja strzału z bicia, którego koniec przekracza prędkość dźwięku. Dodatkowo zaprezentowane zostały obliczenia odpowiadające technice strzału z bicia australijskiego opisanej w literaturze. Dla obu technik przedstawione zostało wyjaśnienie przyczyn powstania ogromnych prędkości i przyspieszeń występujących podczas strzału z bicia.

Analiza problemu dynamiki lin i łańcuchów przedstawiona w niniejszej pracy jest uniwersalna i może zostać wykorzystana przy analizie innych zjawisk związanych z tą tematyką. Publikacje, które powstały w trakcie badań, cytowane są w około pięćdziesięciu pracach (wykaz prac zawiera „Lista cytowań”) dotyczących dynamiki lin oraz dziedzin pokrewnych.

Lista cytowań

1. Agarwal, A., Shah, S. V., Bandyopadhyay, S. and Saha, S. K., 2014. Dynamics of serial kinematic chains with large number of degrees-of-freedom. *Multibody System Dynamics*, 32(3), pp.273–298.
2. Andrew, Y., Kearns, F., Mustafa, T., Salih, R., Iorati-Uba, A., Udall, I. and Usama, M., 2015. Non-linear dependence of the height of a chain fountain on drop height. *Physics Education*, 50(5), p.564.
3. Biggins, J. S., 2014. Growth and shape of a chain fountain. *Europhysics Letters*, 106(4), p.44001.
4. Brun, P. T., Audoly, B., Goriely, A. and Vella, D., 2016. The surprising dynamics of a chain on a pulley: Lift-off and snapping. *The Royal Society*, 472(2190).
5. Chadaj, K., Malczyk, P. and Frączek, J., 2015, August. Efficient parallel formulation for dynamics simulation of large articulated robotic systems. *In Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 20th International Conference on (pp. 441–446). IEEE.
6. Ferrari, F. and Pyrka, M., 2012. Dynamical aspects of inextensible chains. *International Journal of Modern Physics B*, 26(02), p.1250009.
7. Ferrari, F., 2012. From constrained stochastic processes to the nonlinear sigma model. Two old problems revisited. *Nuclear Physics B*, 854(2), pp.466–482.
8. Ferrari, F., Paturej, J. and Vilgis, T.vA., 2008. Path-integral approach to the dynamics of a random chain with rigid constraints. *Physical Review E*, 77(2), p.021802.
9. Fritzowski, P. and Kamiński, H., 2008. Dynamics of a rope as a rigid multibody system. *Journal of mechanics of materials and structures*, 3(6), pp.1059–1075.

-
10. Fritzkowski, P. and Kamiński, H., 2011. A discrete model of a rope with bending stiffness or viscous damping. *Acta Mechanica Sinica*, 27(1), pp.108–113.
 11. Fritzkowski, P. and Kamiński, H., 2009. Dynamics of a rope modeled as a discrete system with extensible members. *Computational Mechanics*, 44(4), pp.473–480.
 12. Fritzkowski, P. and Kamiński, H., 2010. Dynamics of a rope modeled as a multi-body system with elastic joints. *Computational Mechanics*, 46(6), pp.901–909.
 13. Gayvallet, H. and Geminard, J. C., 2006. Dynamique de chute libre d’une chaînette, *Licence des Sciences de la Matière*, École Normale Supérieure de Lyon.
 14. Gordo, P. M. and Costa, P., 2012. Falling chains as variable-mass systems: theoretical model and experimental analysis. *European Journal of Physics*, 33(4), p.1007.
 15. Grewal, A., Johnson, P. and Ruina, A., 2011. A chain that speeds up, rather than slows, due to collisions: how compression can cause tension. *American Journal of Physics*, 79(7), pp.723–729.
 16. Gutierrez, G. J., Villa, A. L., Torres, A., Peralta, S. and Vargas, C. A., 2012. Super accelerated flow in diverging conical pipes. *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 110, pp. 880–885). Trans Tech Publications.
 17. Géminard, J. C. and Vanel, L., 2008. The motion of a freely falling chain tip: Force measurements. *American Journal of Physics*, 76(6), pp.541–545.
 18. Hamm, E. and Géminard, J. C., 2010. The weight of a falling chain, revisited. *American Journal of Physics*, 78(8), pp.828–833.
 19. Hanna, J. A. and Santangelo, C. D., 2012. At the end of a moving string. *arXiv preprint arXiv:1209.1332*.
 20. Hanna, J. A., 2015. Jump conditions for strings and sheets from an action principle. *International Journal of Solids and Structures*, 62, pp.239–247.

-
21. Heck, A., Uylings, P. and Kędzierska, E., 2010. Understanding the physics of bungee jumping. *Physics Education*, 45(1), p.63.
 22. Irschik, H. and Humer, A., 2014. A rational treatment of the relations of balance for mechanical systems with a time-variable mass and other non-classical supplies. In *Dynamics of Mechanical Systems with Variable Mass* (pp. 1–50). Springer Vienna.
 23. Irschik, H., 2012. The Cayley variational principle for continuous-impact problems: a continuum mechanics based version in the presence of a singular surface. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 50(3), pp.717–727.
 24. Jegdic, K. and Jovanovic, V., 2016. Dynamic Behavior of Moving Chains. *International Journal of Engineering and Mathematical Modelling*, 3(1).
 25. Jiménez, J. L., Campos, I., Del Valle, G. and Hernández, G., Computer assisted symbolic calculations in university physics courses. *Energy*, 2(1), p.4.
 26. Kaminski, H. and Fritzkowski, P., 2013. Application of the rigid finite element method to modelling ropes. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(1), pp.91–99.
 27. Klein, G., Shiroky, I., Ben-Shushan, Y., Strauss, I., Yoresh, Y. and Force, I. A., 2016. Cable Dynamics under General Excitation Fields, *Israel Air Force*.
 28. Koulakis, J. P., Mitescu, C. D., Brochard-Wyart, F., De Gennes, P. G. and Guyon, E., 2008. The viscous catenary revisited: experiments and theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 609, pp.87–110.
 29. Mallon, N. and van der Weijde, G., 2011, January. Influence of hysteresis on the dynamics of cryogenic LNG composite hoses. In *ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (pp. 199–208). American Society of Mechanical Engineers.

-
30. Medina, A. and Vargas, C.A., 2012. Super Free Fall of Liquids in Conical Containers. *In Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics* (pp. 469–477). Springer Berlin Heidelberg.
 31. Moreno, R., Page, A., Riera, J. and Hueso, J. L., 2015. Video analysis of sliding chains: A dynamic model based on variable-mass systems. *American Journal of Physics*, 83(6), pp.500–505.
 32. Paredes, G. M. and Taveira-Pinto, F., 2016. An experimental technique to track mooring cables in small scale models using image processing. *Ocean Engineering*, 111, pp.439–448.
 33. Peralta López, S., 2011. Súper Caída Libre en Tubos Concéntricos y Placas Planas Divergentes, *Doctoral dissertation*.
 34. Pesce, C. P. and Casetta, L., 2014. Systems with mass explicitly dependent on position. *In Dynamics of Mechanical Systems with Variable Mass* (pp. 51–106). Springer Vienna.
 35. Preston, S. C., 2011. The motion of whips and chains. *Journal of Differential Equations*, 251(3), pp.504–550.
 36. Sarmento, C. V, Ribeiro, P. and Vieira, M., 2013. Análise teórica do problema de uma corrente dobrada em queda livre: Aaplicaçnes a estacas torpedo. *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, CILAMCE.
 37. Silagadze, Z. K., 2011. Test problems in mechanics and special relativity. *VDM Verlag Dr. Müller*.
 38. Silagadze, Z. K., 2010. Sliding rope paradox. *arXiv preprint* arXiv:1002.1586.
 39. Trevino, C., Peralta, S., Torres, A. and Medina, A., 2015. Super free fall of an inviscid liquid through interconnected vertical pipes. *Europhysics Letters*, 112(1), p.14002.

40. Trevino, C., Peralta, S., Vargas, C. A. and Medina, A., 2013. Super Free Fall in Concentric Pipes. *In Fluid Dynamics in Physics, Engineering and Environmental Applications* (pp. 455–463). Springer Berlin Heidelberg.
41. Victoria, T. and Hernando, A., 2011. Súper Caída Libre en Conos, *Doctoral dissertation*.
42. Virga, E. G., 2015, January. Chain paradoxes. *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 471, No. 2173, p. 20140657). The Royal Society.
43. Wong, C. W., Youn, S. H. and Yasui, K., 2007. The falling chain of Hopkins, Tait, Steele and Cayley. *European journal of physics*, 28(3), p.385.
44. Zhao, H., Zhen, S. and Chen, Y. H., 2013. Dynamic modeling and simulation of multi-body systems using the Udwadia–Kalaba theory. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(5), pp.839–850.