УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2021.01.037

О. А. ФОКОВ, О. П. САВЧУК

ПРОБЛЕМА КЕРУВАННЯ КУТОВИМ РУХОМ НЕКООПЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА ОРБІТАЛЬНОГО СЕРВІСУ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: oafokov@ukr.net

Реалізація існуючих та розробка нових проєктів орбітального сервісу є стійкою тенденцією розвитку космічної техніки. У якості клієнтів орбітального сервісу часто виступають об'єкти, які мають небажаний обертальний рух, що ускладнює або робить неможливим виконання дій з їх обслуговування. Проблема керування рухом об'єкта орбітального сервісу обумовлює актуальність досліджень, пов'язаних не тільки з вдосконаленням методів і алгоритмів впливу на рух об'єкта, як на поступальний, так і на обертальний, але й пов'язаних з розробкою і вдосконаленням методів бортового визначення параметрів відносного до сервісного космічного апарата руху об'єкта. Метою статті є огляд стану вирішення проблеми визначення параметрів руху об'єкта в задачах виконання орбітального сервісу, огляд існуючих методів погашення кутового руху об'єкта та керування його рухом, визначення напрямків подальших досліджень щодо впливу на кутовий рух некооперованих об'єктів сервісу. На основі аналізу публікацій з даної тематики наведено характеристику застосовності орбітальних засобів визначення параметрів руху об'єкта. Аналіз застосовності методів дистанційного визначення параметрів некооперованого невідомого об'єкта з борта сервісного апарата показує, що вони знаходяться на стадії вивчення. Для підтвердження пропонованих дослідниками методів у якості вихідних даних використовуються їх числова імітація або данні наземних експериментів, або данні з попередніх місій. Розглянуто контактні та безконтактні методи впливу на кутовий рух некооперованих об'єктів орбітального сервісу. З огляду на стан досліджень, пов'язаних з впливом на рух об'єктів орбітального сервісу безконтактними методами, більш просунутою виглядає технологія, заснована на використанні іонного пучка, що спрямовується на об'єкт з боку електрореактивного двигуна сервісного апарата. Запропоновано напрямки подальших досліджень щодо керування кутовим рухом некооперованих об'єктів.

Ключові слова: *некооперований об'єкт орбітального сервісу, орбітальні засоби визначення параметрів руху, методи впливу на кутовий рух об'єктів, огляд стану вирішення проблеми, напрямки досліджень.*

1. *Wei-Jie Li, Da-Yi Cheng, Xi-Gang Liu, Yao-Bing Wang, Wen-Hua Shi, Zi-Xin Tang, Feng Gao, Fu-Ming Zeng, Hong-You Chai, Wen-Bo Luo, Qiang Cong, Zhen-Liang Gao*. On-orbit service (OOS) of spacecraft: A review of engineering developments. Progress in Aerospace Sciences. 2019. Vol. 108. P. 32–120. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.01.004
2. *Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M.* A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations. Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 93. P. 53–72. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.07.001
3. *Fasano G., Accardo D., Grassi M.* A Stereo-vision Based System for Autonomous Navigation of an In-orbit Servicing Platform, 2009. ISBN-10: 1-56347-971-0, AIAA Infotech@Aero-space 2009, Seattle, USA. P. 1–10.
4. *D'Amico S., Benn M. Jørgensen J. L.* Pose estimation of an uncooperative spacecraft from actual space imagery. International Journal of Space Science and Engineering. 2014. Vol. 2, No. 2. P. 171–189. https://doi.org/10.1504/IJSPACESE.2014.060600
5. *Naasz B. J., Burns R. D., Queen S. Z., Eepoel J. V., Hannah J., Skelton E.* The HST SM4 relative navigation sensor system: overview and preliminary testing results from the flight robotics lab. The Journal of the Astronautical Sciences. 2009. Vol. 57, No. 1 & 2. P. 457–483. https://doi.org/10.1007/BF03321512
6. *Naasz B. J., Eepoel J. V., Queen S., Southward C., Hannah J.* Flight results of the HST SM4 relative navigation sensor system. Proceedings in Advances in the Astronautical Sciences. 2010. Vol. 137. P. 723–744.
7. *Liu C., Hu W.* Relative pose estimation for cylinder-shaped spacecrafts using single image. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2014. No. 50. P. 3036–3056. https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120757
8. *Du X., Liang B., Xu W., Qiu Y.* Pose measurement of large non-cooperative satellite based on collaborative cameras. Acta Astronautica. 2011. Vol. 68, No. 11-12. P. 2047–2065. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.10.021
9. *Yu F., He Z., Qiao B., Vu X.* Stereo-vision-based relative pose estimation for the rendezvous and docking of noncooperative satellites. Mathematical Problems in Engineering. 2014. Article ID 461283. 12 p. https://doi.org/10.1155/2014/461283
10. *Blais F.* Review of 20 Years of range sensor development. Journal of electronic imaging. 2004. Vol. 13, No. 1. P. 231–240. https://doi.org/10.1117/1.1631921
11. *Crosby S., Kang S. H.* Object identification in 3D flash lidar images. Pattern Recognition. 2011. Vol. 6, No. 2. P. 193–200. https://doi.org/10.13176/11.315
12. *English C., Zhu S., Smith C., Ruel S., Christie I.* Tridar: a hybrid sensor for exploiting the complementary nature of triangulation and LIDAR technologies. Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. 2008. 9 p.

13. *Ruel S., English C., Anctil M., Church P.* 3DLASSO: real-time pose estimation from 3D data for autonomous satellite servicing. Proceedings of the 2005 International Symposium on Artificial Intelligence for Robotics and Automation in Space. Munich, Germany. 2005. 8 p.
14. *Samson C., English C., Deslauriers A., Christie I., Blais F, Ferrie F.* 3D Laser Camera System: from space mission STS-105 to terrestrial applications. Proceedings of the 2002 ASTRO Conference. Ottawa, Canada. 2002. Nov. 21 p.
15. *Liebe C. C., Abramovici A., Bartman R. K., Bunker R. L., Chapsky J., Chu C. C., Clouse D., Dillon J. W., Hausmann B., Hemmati H., Komfeld R. P., Kwa C., Mobasser S., Newell M., Padgett C., Roberts W. T., Spiers G., Warfield Z., Wright M.* Laser radar for spacecraft guidance applications. Proceedings of 2003 IEEE Aerospace Conference. USA. 2003. Vol. 6. P. 2647–2662. DOI: 10.1109/AERO.2003.1235190
16. *Kornfeld R. P., Bunker R. L, Cucullu G. C., Essmiller J. C., Hadaegh F. Y., Liebe C. C., Padgett C. W., Wong E. C.* New millennium ST6 autonomous rendezvous experiment (ARX). Proceedings of the 2003 IEEE Aerospace Conference. USA. 2003. Vol. 1. P. 369–380. DOI:10.1109/aero.2003.1235067
17. Jenaoptronik. URL: https://www.jena-optronik.de/products/rendezvous-sensors/applications.html (Last accessed: 11.03.2021).
18. *Smithpeter C. L., Nellums R. O., Lebien S. M., Studor G., James G.* LADAR measurements of the international space station. Proceedings of SPIE Laser Radar Technology and Applications VI. 2001. Vol. 4377. P. 65–72. https://doi.org/10.13176/11.315
19. Advanced Scientific Concepts, Inc. URL: http://205.134.226.61/products/older-products/dragoneye.html (Last accessed: 11.03.2021).
20. *Lauretta D. S.* OSIRIS-REx asteroid sample-return mission. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. 2015. P. 543–567. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03952-7_44
21. Advanced Scientific Concepts, Inc. URL: https://asc3d.com/product-overview (Last accessed: 11.03.2021).
22. Miller L. K., Masciarelli J., Rohrschneider R., Gravseth I. Critical advancement in telerobotic servicing vision technology. AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition. 2010. P. 1–9. https://doi.org/10.2514/6.2010-8919
23. *Christian J. A., Patangan M., Hinkel H., Chevray K., Brazzel J.* Comparison of orion vision navigation sensor performance from STD-134 and the space operations simulation center. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. USA. 2012. P. 1–18. https://doi.org/10.2514/6.2012-5035
24. *Савчук А. П., Фоков А. А.* Определение параметров некооперированных объектов в задачах орбитального сервиса. Технічна механіка. 2018. № 4. С. 30–45. https://doi.org/10.15407/itm2018.04.030
25. *Doignon C., Stolkin R.* An introduction to model-based pose estimation and 3-d tracking techniques. Scene Reconstruction, Pose Estimation and Tracking, first ed., InTech. 2007. Ch. 20. P. 359–382. https://doi.org/10.5772/4943
26. *Губарев В. Ф., Боюн В. П., Мельничук С. В., Сальников Н. Н., Симаков В. А., Годунок Л. А., Комисаренко В. И., Добровольский В. Ю., Деркач С. В., Матвиенко С. А.* Использование систем технического зрения для определения параметров относительного движения космических аппаратов. Проблемы управления и информатики. 2016. № 6. С.103–119. https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v48.i11.30
27. *Besl P., McKay N.* A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, No. 2. P. 239–256. https://doi.org/10.1109/34.121791
28. *Chen Y., Medioni G.* Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing. 1992. Vol. 10. P. 145–155. https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C
29. *Lichter M. D., Dubowsky S.* State, Shape, and Parameter Estimation of Space Objects from Range Images. Proceedings of the 2004 IEEE. International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA. 2004. P. 2974–2979. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307513
30. *Pesce V., Lavagna M., Bevilacqua R.* Stereovision-based pose and inertia estimation of unknown and uncooperative space objects. Advances in Space Research. 2017. Vol. 59, No. 1. P. 236–251. https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.002
31. *Clohessy W. H., Wiltshire R. S.* Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous. Journal of the Aerospace Sciences. 1960. Vol. 27, No. 9. P. 653–678. https://doi.org/10.2514/8.8704
32. *Gurfil P., Kholshevnikov K.V.* Manifolds and metrics in the relative spacecraft motion problem. J. Guid. Control Dynamic. 2006. Vol. 29, No. 4. P. 1004–1010. https://doi.org/10.2514/1.15531
33. *Segal S., Gurfil P.* Effect of kinematic rotation-translation coupling on relative spacecraft translational dynamics. J Guid Control Dynamic. 2009. Vol. 32, No. 3. P. 1045–1050. https://doi.org/10.2514/1.39320
34. *Flores-Abad A., Ma O., Pham K., Ulrich S.* A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. Progress in Aerospace Sciences. 2014. Vol. 68. P. 1–26. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.03.002
35. *Nishida S., Kawamoto S.* Strategy for capturing of a tumbling space debris. Acta Astronautica. 2011. Vol. 68, No. 1–2. P. 113–120. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.045
36. CleanSpace One Gripper Report. Phase 0. Swiss Space Center EPFL. Lausanne, Switzerland, 2013. 67 p.
37. *Головко М. Г., Безуглый В. А., Бондаренко С. Г., Рубаха Ю. А., Покровский Р. О.* Технические аспекты борьбы с космическим мусором. Екологія та ноосферологія. 2012. Т. 23, № 1–2. С. 110–120
38. Space Transport Development Using Orbital Debris: Final Report on NIAC Phase I. Tether Applications, Inc.; J.A. Carroll. Research Grant No. 07600-087. 2002. 43 p.
39. *Clerc X., Retat I.* Astrium Vision on Space Debris Removal. 63rd International Astronautical Congress. Naples, Italy. 2012. IAC-12.A6.7.4. 13 p.
40. *Фоков А. А., Савчук А. П.* Алгоритмы функционирования автономной системы замедления вращательного движения некооперированного объекта орбитального сервиса. Технічна механіка. 2019. № 4. С.44–58. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.044

41. *Chang H., Huang P., Lu Z., Meng Z., Liu Z., Zhang Y.* Cellular Space Robot and Its Interactive Model Identification for Spacecraft Takeover Control. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, Korea. 2016. P. 3069–3074. https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759475
42. *Aslanov V. S., Ledkov A. S.* Attitude motion of cylindrical space debris during its removal by ion beam. Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2017. Article ID 1986374. 7 p. doi.org/10.1155/2017/1986374. https://doi.org/10.1155/2017/1986374
43. *Aslanov V. S., Ledkov A. S.* Chaotic motion of a passive space object during its contactless transportation by ion beam. 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russia. 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/ITNT49337.2020.9253185. https://doi.org/10.1109/ITNT49337.2020.9253185
44. *Aslanov V. S., Ledkov A. S.* Space debris attitude control during contactless transportation in planar case. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2020. Vol. 43, No. 3. P.451–461. https://doi.org/10.2514/1.G004686
45. *Aslanov V., Ledkov A., Konstantinov M.* Chaotic motion of a cylindrical body during contactless transportation from MEO to LEO by ion beam. 2020. Nonlinear Dynamics. 2020. V. 101, No. 2. P. 1221–1231. https://doi.org/10.1007/s11071-020-05822-0
46. *Aslanov V. S., Ledkov A. S.* Dynamics and control of space debris during its contactless ion beam assisted removal. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1705. Paper 012006. P. 1–10. doi:10.1088/1742-6596/1705/1/012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1705/1/012006
47. *Alpatov A. P., Khoroshylov S. V., Maslova A. I.* Contactless de-orbiting of space debris by the ion beamю Kyiv: Akademperiodyka, 2019. 70 p.. https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.383.170
48. *Stevenson D., Schaub H.* Multi-Sphere Method for Modeling Electrostatic Forces and Torques. Advances in Space Research. 2013. Vol. 51, No. 1. P. 10–20. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.08.014
49. *Schaub H., Sternovsky Z.* Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers. Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, No. 1. P. 110–118. https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.10.003
50. *Stevenson D.* Remote Spacecraft Attitude Control by Coulomb Charging. Ph.D. Dissertation. Aerospace Engineering Sciences Dept. Univ. of Colorado, Boulder, CO. May 2015. 122 p.
51. *Schaub H., Stevenson D.* Electrostatic spacecraft rate and attitude control–Experimental results and performance considerations. Acta Astronautica. 2016. Vol. 119. P. 22–33. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.023
52. *Bengtson M., Wilson K., Hughes J., Schaub H.* Survey of the electrostatic tractor research for reorbiting passive GEO space objects. Astrodynamics. 2018. Vol. 2, No. 4. P. 291–305. https://doi.org/10.1007/s42064-018-0030-0
53. *Асланов В. С.* Динамика и управление активным спутником при буксировке космического мусора посредством сил кулона. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 19–24 августа 2019 года: Сборник трудов. 2019. Башкирский государственный университет. 2019. С. 38–39.
54. *Aslanov V., Schaub H.* Detumbling attitude control analysis considering an electrostatic pusher configuration. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2019. Vol. 42, No. 4. P.900–909. https://doi.org/10.2514/1.G003966
55. *Хорошилов С. В.* Алгоритм управления относительным движением в плоскости орбиты космического аппарата для бесконтактного удаления космического мусора. Космічна наука і технологія. 2019. Т. 25, № 1. С. 14–26. https://doi.org/10.15407/scine14.04.005
56. *Khoroshylov S.* Out-of-plane relative control of an ion beam shepherd satellite using yaw attitude deviations Acta Astronautica. 2019. Vol. 164. P. 254–261. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.08.016
57. *Alpatov A. P., Fokov A. A., Khoroshylov S. V., Savchuk A. P.* Error Analysis of Method for Calculation of Non-Contact Impact on Space Debris from Ion Thruster. Mechanics, Materials Science & Engineering. 2016. № 5. P. 64–76.

Отримано11.03.2021,
в остаточному варіанті 24.03.2021