

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Е.О. ЧЕРСКИХ, А.И. САВЕЛЬЕВ

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Аннотация. Целью данной работы является выявление наиболее перспективных для разработки сенсорных узлов, используемых типов датчиков сенсорных систем, структур и расположения узлов на корпусах коллаборативных роботов. Для достижения указанной цели были рассмотрены существующие конструктивные решения сенсорных узлов и систем. В работе проведены анализ и классификация узлов распределенных сенсорных систем по составу, способу связи используемых узлов и их расположению на корпусах роботов. Выделены гомогенные или гетерогенные системы, содержащие какой-либо из двух типов узлов: комбинированные и некомбинированные. Выявлено, что комбинированные узлы являются наиболее перспективными для разработки, так как позволяют включать в себя несколько типов датчиков и измерять больше параметров среды посредством одного узла. Определены наиболее используемые типы датчиков, способы их изготовления, конструкции и свойства. Комбинированные узлы содержат следующие типы датчиков: давления, приближения, температуры, влажности, газа, освещенности, теплового потока, коррозии, акселерометр-гироскоп, инфракрасные и лазерные дальнометры, радиолокационные датчики. Среди перечисленных наиболее используемыми являются датчики давления, температуры, влажности, инерциальные измерительные модули, датчики освещения и микрофоны. Рассмотрены структуры сенсорных узлов и выявлены узлы, наиболее перспективные для разработки, а также используемые типы датчиков, способы изготовления и расположения узлов на корпусах коллаборативных роботов. Выделены недостатки рассмотренных систем и предложен способ уменьшения их влияния на энергопотребление системы, вычислительную нагрузку и задержки при передаче данных.

Ключевые слова: сенсорные системы, распределенные системы, датчики, узлы сенсорных систем, коллаборативные роботы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levratti A., Riggio G., Fantuzzi C., De Vuono A., Secchi C.* TIREBOT: A collaborative robot for the tire workshop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. Vol. 57. Pp. 129–137. DOI: 10.1016/j.rcim.2018.11.001.
2. *Byner C., Matthias B., Ding H.* Dynamic speed and separation monitoring for collaborative robot applications – concepts and performance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. Vol. 58. Pp. 239–252. DOI: 10.1016/j.rcim.2018.11.002.
3. *Kanazawa A., Kinugawa J., Kosuge K.* Adaptive motion planning for a collaborative robot based on prediction uncertainty to enhance human safety and work efficiency. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019. Vol. 35. No. 4. Pp. 817–832. DOI: 10.1109/TRO.2019.2911800.
4. *Mainprice J., Berenson D.* Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2013. Pp. 299–306. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696368.
5. *Zanchettin A.M., Ceriani N.M., Rocco P., Ding H., Matthias B.* Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control, 2013 IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015. Vol. 13. No. 2. Pp. 882–893. DOI: 10.1109/TASE.2015.2412256.

6. Dumonteil G., Manfredi G., Devy M., Confetti A., Sidobre D. Reactive planning on a collaborative robot for industrial applications, 2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), IEEE, 2015. Vol. 2. Pp. 450–457.
7. Magrini E., Flacco F., De Luca A. Control of generalized contact motion and force in physical human-robot interaction, 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), IEEE, 2015. Pp. 2298–2304. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139504.
8. Cherubini A., Passama R., Crosnier A., Lasnier A., Fraisse P. Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016. Vol. 40. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.12.007.
9. Tsuji S., Kohama T. Proximity skin sensor using time-of-flight sensor for human collaborative robot. *IEEE Sensors Journal*, 2019. Vol. 19. No. 14. Pp. 5859–5864.
10. Francesco P., Paolo G. G. AURA: An example of collaborative robot for automotive and general industry applications. *Procedia Manufacturing*, 2017. Vol. 11. Pp. 338–345. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2905848.
11. Albini A., Denei S., Cannata G. Human hand recognition from robotic skin measurements in human-robot physical interactions. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017. Pp. 4348–4353. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206300.
12. Cannata G., Maggiali M., Metta G., Sandini G. An embedded artificial skin for humanoid robots. 2008 IEEE International conference on multisensor fusion and integration for intelligent systems, IEEE, 2008. Pp. 434–438. DOI: 10.1109/MFI.2008.4648033.
13. Albini A., Denei S., Cannata G. Enabling natural human-robot physical interaction using a robotic skin feedback and a prioritized tasks robot control architecture. 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), IEEE, 2017. Pp. 99–106. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8239543.
14. Das S.K., Wijayasighe I., Saadatzi M.N., Popa D.O. Whole body human-robot collision detection using base-sensor neuroadaptive interaction. 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, 2018. Pp. 278–283. DOI: 10.1109/COASE.2018.8560360.
15. Yoshikai T., Hayashi M., Ishizaka Y., Fukushima H., Kadowaki A., Sagisaka T., Kobayashi K., Kumagai I., Inaba M. Development of robots with soft sensor flesh for achieving close interaction behavior. *Advances in Artificial Intelligence*, 2012. DOI: 10.1155/2012/157642.
16. Kadowaki A., Yoshikai T., Hayashi M., Inaba M. Development of soft sensor exterior embedded with multi-axis deformable tactile sensor system. *RO-MAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, IEEE, 2009. Pp. 1093–1098. DOI: 10.1109/ROMAN.2009.5326073.
17. Kumagai I., Kobayashi K., Nozawa S., Kakiuchi Y., Yoshikai T., Okada K., Inaba M. Development of a full body multi-axis soft tactile sensor suit for life sized humanoid robot and an algorithm to detect contact states. 2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012), IEEE, 2012. Pp. 526–531. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651570.
18. Hautefeuille M., O’Flynn B., Peters F. H., O’Mahony C. Development of a microelectromechanical system (MEMS)-based multisensor platform for environmental monitoring. *Micromachines*, 2011. Vol. 2. No. 4. Pp. 410–430. DOI: 10.3390/mi2040410.
19. Roozeboom C. L., Sim J. Y., Wickeraad D., Dura B., Smith W. S., Hopcroft, M. A., Hartwell P. G., Williams R. S., Pruitt B. L. Multi-functional integrated sensors for the environment. 2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2012. Pp. 144–147. DOI: 10.1109/MEMSYS.2012.6170114.
20. Roozeboom C. L., Hong V. A., Ahn C. H., Ng E. J., Yang Y., Hill B. E., Hopcroft M. A., Pruitt B. L. Multifunctional integrated sensor in A 2×2 mm epitaxial sealed chip operating in a wireless sensor node. 2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2014. Pp. 773–776. DOI: 10.1109/MEMSYS.2014.6765755.
21. Ni Z., Yang, C., Xu D., Zhou H., Zhou W., Li T., Xiong B., Li X. Monolithic composite-sensors designed and fabricated by a low-cost single-side ‘SiN/poly-Si/Al’ multi-user process-

module for versatile sensing-network nodes. 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2013. Pp. 697–700. DOI: 10.1109/MEMSYS.2013.6474338.

22. Ni Z., Yang, C., Xu D., Zhou H., Zhou W., Li T., Xiong B., Li X. Monolithic Composite “Pressure+ Acceleration+ Temperature+ Infrared” Sensor Using a Versatile Single-Sided “SiN/Poly-Si/Al” Process-Module. *Sensors*, 2013. Vol. 13. No. 1. Pp. 1085–1101. DOI: 10.3390/s130101085.

23. Xu Z., Koltsov, D., Richardson A., Le L., Begbie M. Design and simulation of a multi-function MEMS sensor for health and usage monitoring. 2010 Prognostics and System Health Management Conference, IEEE, 2010. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/PHM.2010.5413415.

24. Shemelya C., Banuelos-Chacon L., Melendez A., Kief C., Espalin D., Wicker R., Krijnen G., MacDonald E. Multi-functional 3D printed and embedded sensors for satellite qualification structures. 2015 IEEE SENSORS, IEEE, 2015. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370541.

25. Harte S., O’Flynn B., Martinez-Catala R. V., Popovici E. M. Design and implementation of a miniaturised, low power wireless sensor node, 2007 18th European Conference on Circuit Theory and Design, IEEE, 2007. Pp. 894–897. DOI: 10.1109/ECCTD.2007.4529741.

26. Paradiso J. A., Lifton J., Broxton M. Sensate media–multimodal electronic skins as dense sensor networks. *BT Technology Journal*, 2004. Vol. 22. No. 4. Pp. 32–44. DOI: 10.1023/B:BTTJ.0000047581.37994.c2.

27. Lifton J., Broxton M., Paradiso J. A. Distributed sensor networks as sensate skin. *SENSORS*, IEEE, 2003. Vol. 2. Pp. 743–747. DOI: 10.1109/ICSENS.2003.1279040.

28. Mittendorfer P., Cheng G. Humanoid multimodal tactile-sensing modules. *IEEE Transactions on robotics*, 2011. Vol. 27. No. 3. Pp. 401–410. DOI: 10.1109/TRO.2011.2106330.

29. Mittendorfer P., Yoshida E., Cheng G. Realizing whole-body tactile interactions with a self-organizing, multi-modal artificial skin on a humanoid robot. *Advanced Robotics*, 2015. Vol. 29. No. 1. Pp. 51–67. DOI: 10.1080/01691864.2014.952493.

30. Mittendorfer P., Cheng G. Integrating discrete force cells into multi-modal artificial skin. 2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012), IEEE, 2012. Pp. 847–852. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651619.

31. Maiolino P., Maggiali M., Cannata G., Metta G., Natale L. A flexible and robust large scale capacitive tactile system for robots. *IEEE Sensors Journal*, 2013. Vol. 13. No. 10. Pp. 3910–3917. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2258149.

32. Schmitz A., Maiolino P., Maggiali M., Natale L., Cannata G., Metta G. Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011. Vol. 27. No. 3. Pp. 389–400. DOI: 10.1109/TRO.2011.2132930.

33. Tuna G., Gungor V. C., Gulez K. An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters. *Ad Hoc Networks*, 2014. Vol. 13. Pp. 54–68. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.06.006.

34. Molina-Pico A., Cuesta-Frau D., Araujo A., Alexandre J., Rozas A. Forest monitoring and wildland early fire detection by a hierarchical wireless sensor network. *Journal of Sensors*, 2016. DOI: 10.1155/2016/8325845.

35. Somov A., Baranov A., Savkin A., Spirjakin D., Spirjakin A., Passerone R. Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. Vol. 171. No. 2. Pp. 398–405.

36. Husein N. A. A., Rahman A. H. A., Dahnil D. P. Evaluation of LoRa-based Air Pollution Monitoring System. *Evaluation*, 2019. Vol. 10. No. 7. DOI: 0.1016/j.sna.2011.07.016.

37. Gu C., Rice J. A., Li C. A wireless smart sensor network based on multi-function interferometric radar sensors for structural health monitoring. 2012 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, IEEE, 2012. Pp. 33–36. DOI: 10.1109/WiSNet.2012.6172140.

38. Schmidt P. A., Maël E., Würtz R. P. A sensor for dynamic tactile information with applications in human–robot interaction and object exploration. *Robotics and Autonomous Systems*. 2006. Vol. 54. No. 12. Pp. 1005–1014. DOI: 10.1016/j.robot.2006.05.013.

Информация об авторах

Черских Екатерина Олеговна, мл. науч. сотр. лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН);

199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39;

cherskikh.e@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4443-2281>

Савельев Антон Игоревич, ст. науч. сотр., руководитель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН);

199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39;

saveliev@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>