

УДК 621.315.6

Пахомова Ангелина Андреевна, магистрант,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Федченко Владимир Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТАКТИЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. Проанализированы основные типы тактильных датчиков для робототехники, биомедицины и интерфейсов «человек–машина» с обоснованием перспективности гибридных мультимодальных систем для интеллектуальной сенсорики нового поколения.

Ключевые слова: Тактильные датчики, робототехника, системы «человек–машина», протезирование, анализ сенсоров.

Тактильные датчики представляют собой ключевой компонент современных робототехнических систем, обеспечивая восприятие физических стимулов – давления, текстуры и температуры – с последующей реакцией на них. Основываясь на принципах человеческого осязания, данные сенсоры выполняют критически важные функции в различных прикладных областях, в особенности в протезировании, где они расширяют функциональные возможности при выполнении тонких манипуляционных задач, таких как захват объектов и детекция проскальзывания в реальном времени.

Современное развитие технологий тактильной сенсорики обусловило появление широкого спектра датчиков, различающихся по физическим принципам работы, материалам исполнения и областям применения. В таблицах 1, 2 представлена систематизация основных типов тактильных датчиков с указанием их материалов, характеристик и практического применения, а в таблицах 3, 4 приведен сравнительный анализ их преимуществ и ограничений.

Таблица 1

Примеры технологий тактильных датчиков с различными принципами.

| Тип датчика | Материалы | Тактильное применение | Уникальные характеристики |
|------------------------------------|--|--|--|
| Емкостный тактильный датчик | оксид графена и фоторедуцированный оксид графена; нанокристаллы целлюлозы, модифицированные дубильной кислотой и наночастицами серебра; | определение давления, деформации, влажности. | экологичное одноэтапное производство; гибкость и высокая скорость обработки данных; высокая прочность, антибактериальные свойства. |



| | | | |
|---|--|--|--|
| Пьезорезистивный Тактильный Датчик | галинстан (жидкий металл); пьезорезисторы в полимерной упаковке с дисульфидом молибдена; серебряные нити + гибкие жидкостные трубки. | определение давления, температуры, деформации; обнаружение проскальзывания; измерение силы; распознавание голоса. | высокая чувствительность; отсутствие перекрестных помех; широкий линейный диапазон давления. |
| Пьезоэлектрический Тактильный Датчик | цирконат титанат свинца; цирконат-титанат свинца с ультратонким полиэтилентерефталатом; поливинилиден фторидные нановолокна; | определение давления; идентификация текстуры поверхности; обнаружение проскальзывания. | поддержка сигнала постоянного давления; упрощение микроминиатюризации; снижение сложности конструкции; |
| Трибоэлектрический Тактильный Датчик | поливинилиденфторид; органические монокристаллы; полидиметилсилоксан. | определение давления; обнаружение скольжения. | автономное питание; высокая точность распознавания; тройное повышение производительности; гибкость и долговечность. |
| Электрохимический тактильный датчик | ионная жидкость, заключенная в кремнеземе, микроструктуры, встроенные в термопластичный полиуретан; | определение давления; измерение температуры; сохранение тактильной памяти. | высокая чувствительность; механическая гибкость; экологичность; низкое энергопотребление. |
| Магнитный Тактильный датчик | Е-стекловолокно/ эпоксидный композит с магнитом | определение давления; измерение силы. | высокое разрешение; недорогое тактильное восприятие; надежное и экономичное определение нагрузки. |

Таблица 2

Примеры технологий тактильных датчиков с различными принципами (ч.2).

| | | | |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Оптический тактильный датчик | квадрантные фотодиоды в сочетании с силиконом; органические полупроводники (рубреновые/фуллереновые) | определение давления; определение положения; определение | высококачественная виброчувствительность (до 1000 Гц); обратимость; легкая |
|-------------------------------------|---|--|--|



| | | | |
|---|---|---|---|
| | диоды); полидиметилсилоксан в сочетании с эластичной смолой. | скольжения. | масштабируемость. |
| Тактильный датчик на основе зрения | камера | определение давления, вибрации, силы сдвига и скольжения; классификация структуры. | тактильно-визуальная интеграция; оптимизированное воспроизведение крупномасштабных данных; биомиметическая нейрокожа с камерой на основе событий. |

Таблица 3

Сравнение преимуществ и недостатков технологий тактильных датчиков.

| Тип датчика | Преимущества | Недостатки |
|--|--|---|
| Емкостные тактильные датчики | Высокая растяжимость; Высокая чувствительность в широком диапазоне давлений или деформаций; Экономичные методы изготовления; Долговечность при многократных цикла. | Чувствительность к шуму; Насыщенность характеристик при большой деформации; Подверженность воздействию влаги, песка, грязи и т.д. |
| Пьезорезистивные тактильные датчики | Высокая чувствительность в широком диапазоне давлений; Механическая гибкость; Надежность и долговечность в течение повторяющихся циклов; Низкие перекрестные помехи и надежный прием сигнала при использовании датчиков с активной матрицей или структурированной конструкцией. | Температурная чувствительность; Ограниченный диапазон измерений; Подверженность воздействию влаги, песка, грязи и т.д. |
| Пьезоэлектрические тактильные датчики | Высокая чувствительность для обнаружения незначительных изменений давления; Быстрое время отклика, подходящее для динамических измерений; Гибкие и совместимые конструкции. | Чувствительность к электромагнитным помехам; Непригодность для статических измерений; Температурная нестабильность; |



Таблица 4

Сравнение преимуществ и недостатков технологий тактильных датчиков (ч.2).

| | | |
|--|---|--|
| Трибоэлектрические тактильные датчики | Обеспечивает высокую точность распознавания; Высокая энергоэффективность; Поддерживает гибкость и растяжимость конструкций | Непригодность для статических измерений; Высокая зависимость от внешних условий; Деградация поверхности со временем; Ограниченный частотный диапазон. |
| Электрохимические тактильные датчики | Высокая чувствительность в широком диапазоне давлений; Сверхнизкое рабочее напряжение; Быстрое время отклика; Встроенные датчики и память. | Дрейф сигнала; Чувствительность к влажности и температуре; Сложность и дороговизна изготовления. |
| Магнитные тактильные датчики | Высокая чувствительность и разрешение при минимальных усилиях; Силиконовые слои и конструкции на текстильной основе обеспечивают мягкость или гибкость внешнего вида. | Чувствительность к температуре и температурный дрейф; Влияние внешних магнитных полей; Неоднородность магнитных свойств. |
| Оптические Тактильные датчики | Высокая точность и разрешение; Широкие частотные или полосовые возможности; Силиконовые или эластомерные материалы обеспечивают гибкость и совместимость конструкций. | Высокая стоимость и сложность конструкции; Сложность миниатюризации; Температурная нестабильность; Низкая механическая стабильность при загрязнениях. |
| Тактильные датчики на основе зрения | Высокое разрешение и информационная способность (текстура и деформация); Конструкции с открытым исходным кодом и модульные структуры; | Задержка визуальной обратной связи; Чувствительность к загрязнениям и износу; Сложность передачи данных в беспроводных системах; |

Анализ таблицы показывает, что каждый тип тактильных датчиков обладает уникальными преимуществами и фундаментальными ограничениями, что исключает существование универсального решения. Пьезорезистивные датчики отличаются широким диапазоном давлений и надежностью, но страдают от температурной чувствительности и подверженности воздействию влаги. Пьезоэлектрические обеспечивают быстрое время



отклика, идеально подходя для динамических измерений, однако непригодны для статики и чувствительны к электромагнитным помехам. Трибоэлектрические выделяются энергоэффективностью и гибкостью, но не измеряют постоянные нагрузки и деградируют со временем. Электрохимические датчики работают при сверхнизком напряжении и интегрируют память, однако страдают от дрейфа сигнала и сложности изготовления. Оптические системы обеспечивают наивысшее разрешение и широкие частотные возможности, но их применение ограничено высокой стоимостью, сложностью миниатюризации и чувствительностью к загрязнениям. Общими проблемами для большинства типов являются температурная нестабильность и уязвимость к внешним воздействиям. Таким образом, выбор оптимального типа датчика определяется конкретными требованиями задачи, а наиболее перспективным направлением развития является создание гибридных мультимодальных систем, объединяющих преимущества различных принципов для компенсации индивидуальных недостатков.

Список литературы:

1. Ермолов И.Г. Тактильные датчики в робототехнике: принципы построения и применения // Датчики и системы. – 2020. – № 5. – С. 12–21.
2. Самсонов В.А., Поляков А.В. Обзор современных тактильных сенсоров для систем «человек–машина» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 8. – С. 489–496.
3. Григорьев С.Н., Муравьев А.С. Гибкие и растяжимые тактильные датчики на основе наноматериалов // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 178–185.
4. Tiwana M.I., Redmond S.J., Lovell N.H. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering // Sensors and Actuators A: Physical. – 2012. – Vol. 179. – P. 17–31.
5. Zou L., Ge C., Wang Z.J., Cretu E., Li X. Tactile sensing for soft robotic manipulation // Soft Robotics. – 2020. – Vol. 7, No. 6. – P. 689–704.

