

## 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 дальномеры, 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

Статья поступила в редакцию 02.12.2021

Принята к публикации 12.12.2021

**Для цитирования.** Черских Е.О., Савельев А.И. Анализ и классификация распределенных сенсорных систем коллаборативных робототехнических средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 6 (104). С. 78–94. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-78-94

### ВВЕДЕНИЕ

Использование датчиков в киберфизических системах (КФС) и на робототехнических средствах (РС) позволяет получать представление о статической или динамической среде функционирования робота, находящихся в ней объектах, осуществлять взаимодействие с окружающей средой и объектами в ней. Параметры среды фиксируются РС с помощью

различных датчиков, проводится мониторинг среды, и в случае изменения ее параметров осуществляются определенные реакции. Расположенные на РС датчики обеспечивают получение информации о расстоянии до объектов, форме объектов, силе давления на различные участки тела РС, звуковых колебаниях, температуре и т. д. Используемые в сенсорной системе датчики выбираются исходя из условий работы и выполняемых роботом задач. Целью данной работы является анализ распределенных сенсорных систем, выявление наиболее используемых типов датчиков сенсорных систем коллаборативных роботов, структур и расположения сенсорных узлов на корпусе РС. Для этого требуется рассмотреть существующие конструктивные решения сенсорных узлов и систем. Данная работа организована следующим образом: в первом разделе будут рассмотрены сенсорные системы, используемые на коллаборативных РС, выявлены цели применения сенсорных систем и способы их достижения; во втором разделе внимание уделяется рассмотрению узлов сенсорных систем, а именно анализу их структур, позволяющему выделить конструктивные особенности узлов, типы наиболее используемых датчиков, обнаружить возможные недостатки узлов и сенсорных систем в целом.

### СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РС

Сенсорные системы, используемые коллаборативными роботами, используются для обеспечения безопасного взаимодействия с человеком. Роботу необходимо получать данные об окружающей среде от сенсорной системы для осуществления управления таким образом, чтобы предотвращать ситуации причинения вреда человеку. Так, применяемая для обнаружения человека и отслеживания различных объектов в рабочей области робота сенсорная система [1, 2] включает в себя RGB-D камеру и лазерные сканеры и позволяет адаптировать скорость работы робота в соответствии с движениями оператора. Авторы первой работы разделяют рабочую область робота TIREBOT на 3 зоны: безопасная, взаимодействия, запретная. Если оператор или объект приближается к роботу слишком быстро, активируется запретная зона, и робот изменит местоположение во избежание опасной ситуации. Робот может приближаться к оператору и осуществлять близкое взаимодействие с ним до тех пор, пока человек не движется слишком быстро. Авторы второй работы предлагают два подхода для осуществления непрерывной адаптации скорости движения робота: расчет максимальной скорости на основе измеряемого расстояния между роботом и оператором и подход, учитывающий направление движения робота. Оба подхода подразумевают избегание контакта с человеком, когда он находится достаточно близко к роботу.

Адаптация скорости работы РС также выполняется на основе лазерного дальномера [3, 4]. Предложена адаптивная система планирования траектории движения и адаптации скорости робота для избегания столкновений с человеком. В [3] прогноз положения человека составляется с помощью модели регрессии Гауссовского процесса с использованием данных о предыдущем и текущем его положении. Авторы предложили вычислять степень отклонения от нормы и прекращать работу робота в случае больших отклонений. Проведена экспериментальная оценка предложенных методов, в ходе которой выявлено повышение эффективности работы и безопасности коллаборативного РС. Также прогноз траектории перемещения человека можно составить в соответствии с базой данных траекторий движения [4]. Оба подхода объединяет построение траектории движения робота с минимумом пересечений с прогнозируемой траекторией человека. Однако в [3] если оператор покидает рабочее место, траектория робота не гарантированно сходится к целевой позиции. Также, когда оператор выполняет регулярные перемещения и движения, система может работать некорректно из-за системных ошибок, таких как сбой отслеживания объекта датчиком и сбой прогнозирования системой.

В отличие от предыдущей работы авторы [5] применяют не планирование траекторий и адаптацию движения робота и человека, а отслеживание движений и анализ положения человека, а также угла поворота звеньев РС в целях поддержания минимального безопасного расстояния между роботом и человеком посредством камеры Microsoft Kinect. Предлагается кинематическая стратегия управления скоростью движения робота, обеспечивающая безопасность при работе с человеком, в основе которой лежит задача линейного программирования для вычисления коэффициента масштабирования скорости. Безопасное расстояние между роботом и человеком в рабочем пространстве так же, как и в рассмотренных выше работах [1, 2], разделено на несколько областей: работа на полной скорости при автономном функционировании робота, режим контроля безопасности, уменьшение скорости и остановка робота. Из последнего состояния в случае увеличения дистанции между человеком и роботом происходит автоматический переход в режим работы, соответствующий дистанции на данный момент времени. В результате движение робота основывается на алгоритме, в котором условия безопасности являются жестким ограничением скорости движения. Предложенная стратегия проверена экспериментально на манипуляторе с семью степенями свободы. В первом сценарии проверки работы алгоритма используется одна следящая камера, и при приближении человека к роботу и достижении расстояния менее 400 мм робот останавливается. Как только расстояние между человеком и РС становится более 400 мм, движение возобновляется. Во втором сценарии используются две следящие камеры и две зоны взаимодействия РС и человека. Если человек попадает в первую зону, то движения робота замедляются, если во вторую – останавливаются. Таким образом, робот избегает нежелательного столкновения с человеком, и нормальная работа возобновляется автоматически после того, как человек покидает опасные зоны.

Задачу избегания столкновений манипулятора KUKA LWR с человеком предлагается решить также с помощью реактивного планирования построения траектории в реальном времени [6] и камеры Kinect для контроля рабочего пространства и точки контакта человека с манипулятором [7]. Планирование траектории зависит от расстояния до препятствия или человека. Предложенный подход включает в себя интеграцию планировщика реагирования с ROS и оценку расстояния до статичных и движущихся объектов. Авторы экспериментально показали процесс перепланирования траектории движения манипулятора в случае появления препятствий. При контакте с человеком и перемещении им звеньев робота вручную оценивается контактная сила давления, и система управления регулирует момент на выходе сервоприводов до заданной величины, тем самым обеспечивая безопасность работы для человека.

Контроль рабочей области вышеупомянутого робота KUKA LWR посредством неподвижной камеры, с помощью которой распознается человек и вычисляется расстояние до него, выполняется авторами [8]. В отличие от рассмотренных выше способов в описанном случае предотвращение столкновений не гарантируется минимальным безопасным расстоянием. Возможен прямой физический контакт робота, человека и объектов окружающей среды. Камера используется для обнаружения ситуаций, когда может возникнуть угроза повреждения рук оператора. Возможная ситуация определяется с помощью проверки на пересечение круговых траекторий каждого звена манипулятора с препятствиями или с человеком. В случае пересечения траекторий робот либо останавливается, либо контроллер корректирует траекторию перемещения.

Сенсорные системы робота, рассчитанные на прямой физический контакт или предусматривающие близкое взаимодействие с человеком и иными объектами без и с касанием, вклю-

чают в себя иные типы датчиков, наиболее распространенными среди которых являются датчики давления и приближения. С помощью применения датчиков приближения, расположенных на звеньях промышленного робота, авторы работы [9] предложили определять расстояние до человека при управлении манипулятором. Предложен метод управления роботом, подобный [5], но на основе поступающих данных с датчиков давления и приближения. Робот движется с нормальной скоростью при условии расстояния между человеком и роботом более 270 мм, если расстояние равно или больше 100 мм, то скорость перемещения звеньев робота замедляется, в противном случае он останавливает работу. Тесты прототипа робота с внедренным массивом датчиков приближения, состоящим из 54 узлов, позволили выявить, что с помощью предложенного решения может быть измерено расстояние до человека в пределах 300 мм.

Непосредственный контакт с человеком осуществляет промышленный робот AURA [10], сенсорная система которого включает в себя емкостные датчики приближения, лазерный дальномер и тензорезистивные датчики давления. Разработанная авторами технология обнаружения человека основана на избыточной связи между комбинацией датчиков, размещенных на внешней поверхности тела робота и способных определять приближение человека. С помощью лазерного сканера определяется расстояние до человека, величина которого является основанием для регуляции скорости перемещения робота от стандартной, если человек не обнаружен, до более низкой с возможностью ее автоматического уменьшения в случае обнаружения человека или же полной остановки робота.

Обнаружение прикосновения человека к роботу *Wahter* выполняется с помощью датчиков давления и искусственных нейронных сетей [11]. Предложенный подход заключается в преобразовании полученных данных с датчиков давления, распределенных на роботе, в двумерное представление в виде изображений, которые затем классифицируются с помощью модели нейронной сети. Предложенное решение позволяет определить отталкивание манипулятора робота человеком на основании распознавания ладони человека на изображении. Эксперименты проводились на манипуляторе робота *Wahter*, на звеньях которого расположили датчики давления, как отмечают авторы, аналогичные описанным в [12], в количестве 768 единиц. Также реализовано преобразование физического взаимодействия человека с роботом *Wahter* в задачи движения робота [13]. Взаимодействие осуществляется несколькими способами: с одной точкой контакта, когда человек пытается толкнуть или тянуть конечность робота, и через приложение давления с множеством точек контакта, в которых задействованы большие области тела робота, например, когда человек хочет повернуть определенное звено. Сложные физические контакты обрабатываются алгоритмами, управляющими движением робота в соответствии с заданными целями. Основание установленных на роботе 2082 датчиков давления имеет треугольную форму с расположенными на нем круглыми чувствительными элементами. Реализовано тактильное распознавание команд человека в зависимости от площади контакта и величины прикладываемой силы давления: линейное перемещение манипулятора в сторону действия силы и изменение ориентации.

Для оценки сил взаимодействия человека с манипулятором авторами [14] используется нейроадаптивный контроллер, оценивающий динамические параметры робота в реальном времени на основе выходных сигналов силомоментных датчиков, уставленных в сочленениях манипулятора и применяемых для обнаружения столкновений робота с человеком и препятствиями. Авторами были проведены эксперименты с манипулятором с 6 степенями свободы с неизвестной контроллеру динамикой, результат которых показал верное определение столкновений исходя из выходных сигналов датчиков.

В рассмотренных работах сенсорные системы применяются для отслеживания движений человека в рабочей области робота, планирования траекторий движения робота и для тактильного распознавания команд человека. Для достижения перечисленных целей применяются перечисленные на рисунке 1 способы взаимодействия РТК с различными видами объектов.



**Рис. 1.** Способы безопасного взаимодействия робота с неживыми и живыми объектами

Способы достижения целей реализуются посредством камер, лазерных сканеров и дальномеров, датчиков приближения, давления и силомоментных датчиков. Камеры и лазерные сканеры, а также дальномеры позволяют измерять расстояние до объектов в рабочей области робота. Датчики приближения позволяют определить расстояние до объекта, находящегося в непосредственной близости от робота, а датчики давления – физическое воздействие на робота. Исходя из рассмотренных работ выяснено, что применяемые на коллаборативных РС датчики систем могут быть одиночными или объединенными в сеть. Узлы системы подразделяются на гомогенные или гетерогенные. Для более подробного рассмотрения узлов сенсорных систем требуется провести анализ их структур, который позволит выявлять типы используемых датчиков, способы изготовления узлов и датчиков и расположения узлов на корпусе РС, а также связать используемые узлы с условиями работы РС.

#### СТРУКТУРЫ УЗЛОВ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ РС

При использовании сенсорной системы, узлы которой предназначены непосредственно для контакта с человеком, важно учитывать не только возможность осуществления безопасного взаимодействия, но и удобство использования такой системы человеком. В работе [15] узлы сенсорной системы расположены под внешней обшивкой робота. Узлы упругие и имеют слоистую структуру. Каждый узел содержит пару IMU (блок измерения инерции, состоящий из 3-осевого MEMS акселерометра и 3-осевого гироскопического датчика), размещенную на нижней и верхней платах датчика. Между данными платами расположен слой уретановой пены, деформация которого выявляется исходя из разни-

цы сигналов верхнего и нижнего IMU. Кроме того, под нижней платой IMU расположен MEMS – датчик силы, который обнаруживает деформацию пены по одной оси. Движение нижней платы IMU и прикрепленной платы датчика силы ограничивается в вертикальном направлении пластиковым контейнером. Обнаружение скручивания материала обшивки робота одним блоком датчика выполняется путем оценки вращательной деформации по 3-осевому ускорению и 3-осевой угловой скорости. Размеры представленного прототипа сенсорного узла –  $16 \times 16 \times 25$  мм, вес – 6,7 г.

Подобная слоистая структура узла используется авторами [16, 17]. Но в отличие от датчиков [15] вместо уретановой пены используется полиуретановая, которая значительно мягче. Нижний слой датчика представляет собой армированный лист, на котором размещены инфракрасные светодиоды. Над листом находится слой полиуретановой пены, над которой располагается гибкая печатная плата с небольшой пластиковой коробкой, на каждой стороне которой размещено по одному фототранзистору (всего 5). Такая конструкция обеспечивает обнаружение трехмерной деформации узлов, размещенных на плоских частях тела робота с расстоянием относительно друг друга 20 мм. Размеры сторон квадратного узла – 20 мм. Максимальная величина деформации узла при фактических измерениях составляет 10 мм.

Комбинированный узел [18] имеет пять слоев: кремниевая подложка, слой химического осаждения, металлический слой, полиамидный слой, верхний металлический слой. На подложке размещены датчики влажности, температуры, коррозии, теплопроводности газа и расхода газа. Авторы пишут, что на подложке возможно размещение других типов датчиков. Представленный прототип датчика был интегрирован в беспроводные узлы сенсорной системы для мониторинга окружающей среды. Для связи в системе используется радиоканал. Получаемые с датчиков данные хранятся в последовательной памяти беспроводного узла системы. Каждый узел способен выполнять интеллектуальный анализ, сжатие, хранение, передачу данных и перекрестную калибровку.

Изготовление сенсорного узла на подложке [19] из кремния включает в себя пять технологических этапов фотолитографии: окисление, травление, обжиг, легирование и напыление слоев. Узел имеет семь слоев и способен измерять прикладываемое давление, влажность и температуру окружающей среды, интенсивность освещения, ускорение по трем осям, скорость движения воздуха и магнитное поле. Температура измеряется с помощью пяти отдельных датчиков. Значение влажности получается путем изменения диэлектрической проницаемости полимерного слоя, нанесенного между электродами гребенчатого конденсатора, поскольку он поглощает и десорбирует влагу из окружающего воздуха. Свет измеряется с помощью фотодиода и фоторезистора. Датчик давления состоит из четырех пьезорезистивных тензодатчиков на краях квадратной монокристаллической кремниевой мембраны. Скорость воздуха определяется путем измерения конвективной теплопередачи двух перпендикулярных алюминиевых анемометров с горячей проволокой. Ускорение по трем осям определяется по изменению емкости от движения подвешенных гребенчатых конструкций. Акселерометры по осям  $x$  и  $y$  идентичны по геометрии и ориентированы ортогонально друг другу. Смещение контрольной массы вызывает изменение зазора между электродами гребенчатых конструкций. В емкостном акселерометре по оси  $z$  используется контрольная масса, которая смещается из плоскости чипа датчика, вызывая изменение перекрытия электродов. Сила магнитного поля, нормального к поверхности датчика, определяется датчиком на основе эффекта Холла. Более поздний прототип данного узла, помимо перечисленных выше измеряемых величин, способен обнаруживать наличие различных токсичных газов в воздухе, например, монооксида углерода, аммиака и углеводородных газов [20]. Чувствительные полупроводниковые пленки из оксидов металлов адсорбируют молекулы газа из воздуха, вызывая реакцию восстановления или окисления на поверхности, что приводит к изменению проводимости. Для достижения чувствительности пленки требуемого уровня газовый датчик нагревается змеевиком из

поликремния. Датчик имеет подобную [19] слоистую структуру, также авторы предлагают использовать его в качестве беспроводного узла сенсорной системы. Для реализации данной цели архитектура датчика была модернизирована. На двух нижних слоях датчика размещены солнечная и аккумуляторная батареи. Над аккумуляторной батареей располагаются слой электроники управления питанием и модуль беспроводной связи (Wi-Fi), на верхнем слое располагается комбинированный датчик.

Аналогичную [20] конструкцию имеет комбинированный датчик [21, 22], способный измерять давление, ускорение, температуру и расстояние до измеряемого объекта. Пьезорезистивный датчик давления, термоэлектрический инфракрасный датчик, датчик температуры и акселерометр расположены на одной силиконовой подложке. Датчик содержит шесть слоев, выполняющих функции защиты, изоляции, чувствительных диафрагм и поглощающих мембран.

Изготовленный на силиконовой подложке двухрежимный датчик [23] может быть использован для измерения давления или влажности. Также возможна интеграция функции измерения температуры. Датчик имеет композитную мембранную структуру со встроенными пьезорезистивными элементами и состоит из квадратной силиконовой подложки, над которой расположена мембрана с чувствительными элементами. Между подложкой и данными элементами имеется герметичная полость. Для измерения давления используется мембрана. Для измерения влажности используется полимерный слой, нанесенный на мембрану. Датчик давления имеет два выходных канала, каждый из которых состоит из двух пьезорезисторов, расположенных на противоположных краях мембраны параллельно и перпендикулярно краю. Авторы демонстрируют возможность реализации реконфигурируемой сенсорной сети на основе концепции предлагаемого датчика. Сеть может переключаться между двумя режимами работы: нормальным и резервным. Предварительная обработка данных и диагностика датчиков реализуются в блоке обработки. Если все датчики исправны, алгоритмы объединения данных усредняют выходной сигнал каждого датчика для генерации результирующего значения измеряемого параметра. При возникновении неисправностей функция объединения данных переводит систему в режим резервного копирования, в котором выходные данные вычисляются с использованием коэффициента достоверности с максимально возможной точностью. Полученные данные в таком режиме могут использоваться только как индикатор состояния. В таких случаях для дальнейшей работы система требует техобслуживания.

Изготовление датчиков на кремниевых/силиконовых подложках выполняется послойно. Невозможно создание какого-либо слоя, пока не создан предыдущий слой. В целом процесс изготовления сенсорных узлов таким методом сложен. Для упрощения процесса производства возможно использование технологий трехмерной печати и размещения чувствительных элементов узлов на печатных платах. Авторами [24] описана реализация комбинированной системы для использования в печатных приложениях CubeSat. Предложен печатный сенсорный узел CubeSat, представляющий собой куб из шести панелей из ABS-пластика, в которые интегрированы печатные (медные емкостные сенсорные датчики) и встраиваемые датчики (акселерометры для поверхностного монтажа). Размеры сторон куба – 10 см. Авторами разработаны три версии узла. Все три версии содержат встроенный микроконтроллер MSP430 для сбора данных с датчиков, светодиоды для визуальной демонстрации выходных сигналов датчиков, аккумулятор и разъем microUSB. Первая версия включала встроенный акселерометр. Во второй версии добавлена беспроводная связь Bluetooth. Третья версия содержала печатный емкостный датчик касания, управляемый встроенным MSP430.

Разделение узла беспроводной сенсорной системы на слои и размещение MEMS-датчиков на печатной плате сенсорного слоя используют авторы [25]. Кроме сенсорного слоя, узел имеет интерфейсный слой, на котором располагаются аккумуляторная батарея, USB-порт и пара линейных регуляторов; и слой приема-передачи, содержащий радиопередатчик и EEPROM для хранения программного кода. В данной работе авторами не описано, какие именно датчики установлены в узле. Выбор датчиков зависит от того, для каких целей будет применяться сенсорная система, состоящая из предложенных узлов. В дальнейшем предполагается установка датчика температуры, влажности, освещенности и 2-осевого акселерометра.

Модульную многослойную структуру также имеют узлы одноранговой распределенной сенсорной сети [26]. Авторы реализовали два вида сети: с беспроводной и проводной связью. Узлы состоят из четырех печатных плат (питание, связь, обработка и считывание данных). Узлы произвольно размещены на плоской поверхности. Беспроводная сеть состоит из сотни узлов. Используемые датчики: фототранзистор, ультразвуковой преобразователь и электретный микрофон. Проводная сенсорная сеть [27], реализованная из набора перечисленных датчиков, представляет собой сферу, состоящую из 32 узлов. В центре сферы размещена аккумуляторная батарея. Каждый узел содержит вибродвигатель, светодиод, динамик, датчик температуры, освещения, давления, микрофон и пьезоэлектрический датчик с прикрепленными нитями для определения расстояния до приближающегося объекта.

Сенсорные узлы системы [28] представляют собой шестиугольную печатную плату, на которой размещаются такие датчики, как MEMS-акселерометр BMA150, оптические датчики давления и приближения GP2S60 (4 штуки), резистивные датчики температуры и теплового потока (6 штук) PCS1.1302. Более поздний прототип модуля [29] содержит оптический датчик приближения, акселерометр, датчик температуры и дискретный датчик силы собственной разработки авторов [30]. Емкостный датчик силы состоит из проводящего тонкого деформируемого колпачка ( $\text{CuBe}_2$ ) и жесткой подложки с токопроводящей пластиной и действует как пружина при приложении силы к ней. Каждый модуль локально преобразует аналоговые сигналы в цифровые. Так же локально выполняется часть алгоритмов обработки сигналов (фильтрация нижних частот или пороговая обработка). Связь между узлами системы осуществляется посредством четырех проводов с двуправленной передачей данных и энергии между узлами. Схема маршрутизации данных позволяет изолировать сбой в системе и продолжать работу. Наличие избыточности в системе позволяет обрабатывать сбой простой реорганизацией сети, сохраняя уникальные идентификаторы узлов в локальной памяти, без потери пространственной калибровки. Также присутствуют пять эвристических уровней нормирования тактильных событий для датчиков приближения и силы.

Подобная вышеописанной сенсорная система [31, 32] представляет собой сеть из узлов, основа которых – гибкая печатная плата треугольной формы. Токопроводящая поверхность платы образует первую обкладку конденсатора. Поверх печатной платы находятся деформируемый диэлектрик и проводящий слой, образующий вторую обкладку конденсатора и работающий в качестве защиты от электромагнитных помех. Каждый узел содержит 12 емкостных датчиков давления и АЦП, измеряющий емкость каждого датчика. Узлы системы могут быть соединены между собой, образуя сеть датчиков и используя три порта для связи. Не более четырех узлов могут обмениваться данными по последовательной линии, каждый узел имеет три порта связи. Возможно подключить до 16 узлов (4 последовательные шины с 4 адресами каждая), один из которых должен быть подключен к плате микроконтроллера для передачи данных на РС.



Датчики узлов беспроводной сенсорной сети [33] также размещены на печатной плате. Питание сенсорного узла сети осуществляется от батарей типа АА, беспроводная связь обеспечивается инфракрасными датчиками и технологией ZigBee. Сенсорные узлы размещены на мобильных роботах и включают в себя лазерные дальномеры Hokuuo URG-04LX, ультразвуковые дальномеры Maxbotix EZ1, инфракрасные датчики, акустические датчики и датчики освещенности. Роботы имеют интерфейс IEEE 802.15.4 для связи с беспроводной сенсорной системой. Помимо основной функции распределенного зондирования, беспроводная сенсорная сеть также служит платформой связи между роботами и центром управления.

Сенсорные узлы сети [34] состоят из блока обработки данных (MSP430), блока связи и геолокации (GSM/GPRS, ZigBee, CC1101, работающий в диапазоне ISM), сенсорного модуля (датчики температуры, влажности воздуха, скорости и направления ветра, CO и CO<sub>2</sub>). Питание осуществляется от аккумуляторной батареи 600 мАч. Во время развертывания сети каждый датчик записывает данные о своем местоположении на основе информации GPS. Сеть имеет централизованное управление. Структура сети трехуровневая. Центральные узлы, собирающие и кластеризирующие поступающие с сенсорных узлов данные, управляющие сигналами и командами сети и по требованию получающие данные об окружающей среде, связаны с центром управления. Для связи узлы имеют радиointерфейс. Сенсорные узлы – простые узлы с датчиками без возможности маршрутизации данных, отправляющие полученные данные ближайшему узлу связи. Блок обработки основан на PIC24FJ256GB110. Питание узлов осуществляется от аккумуляторных батарей, подключенных к небольшим солнечным панелям для сбора энергии. Дальность связи составляет несколько километров. Модуль GSM/GPRS установлен на тот случай, если будет доступен сотовый канал передачи данных. Модуль ZigBee используется для связи с узлами датчиков, а модуль геолокации может быть использован для учета точного положения узловых точек сети.

Узлы беспроводной сенсорной сети [35] также представляют собой плату, на которой размещен датчик. Сенсорная сеть создана для обнаружения взрывоопасных газов. Каждый узел сети содержит полупроводниковый гомогенный датчик газа, микроконтроллер, модуль ZigBee и аккумуляторный блок питания (три батареи АА 1,5 В, 3000 мАч). Ток, потребляемый узлом, – 80 мА. В сети программно реализован событийный принцип работы. Непрерывный режим измерения заменен на импульс ШИМ-сигнала, что делает возможным импульсный режим рабочего цикла. Цикл измерения длится около 1 с без учета времени, затрачиваемого на передачу данных, если произошла аварийная ситуация. Чувствительный слой датчика нагревается до температуры около 500°С, когда требуется произвести измерение. Полученное значение сравнивается с двумя предустановленными пороговыми значениями, заданными для сенсорного узла. Если второй порог превышен, соответствующий сигнал тревоги передается по каналу данных.

Для обнаружения газа также применяются сенсорные узлы системы [36] – включают в себя три датчика для измерения оксида углерода, диоксида углерода и оксидов азота (MQ7, MQ2, MQ13). Сенсорный узел выполнен на плате Arduino UNO R3. Связь между узлами осуществляется посредством передатчика LoRa-RFM Shield. Для питания узлов используется литий-ионная аккумуляторная батарея 1200 мА 3,7 В. Каждый узел отправляет данные на шлюз, где они анализируются, и затем представляются пользователю. Количество узлов в представленной системе – три, максимальное расстояние сенсорного узла от шлюза – 900 м.

Датчик сенсорного узла или его часть может располагаться вне управляющей платы [37]. Интерферометрические радарные датчики выполнены для отслеживания смещений строительной конструкции. Сенсорный узел представляет собой плату  $7,8 \times 4,8$  см с перпендикулярно размещенными двумя антеннами (для приема и передачи) и встроенным в верхнюю часть сенсорной платы модулем ZigBee, благодаря которому возможна реализация сенсорной сети. Питание осуществляется либо от внешнего источника питания, либо от аккумуляторной батареи, расположенной под платой датчика. Внешнее расположение чувствительного элемента применяется также авторами [38]. Датчик создан для применения в захвате робота и представляет собой пластину со статическими и размещенными по краям динамическими чувствительными элементами. Статический элемент состоит из пьезорезистивного датчика из фольги, покрытой полупроводящими чернилами и изменяющей свое сопротивление в зависимости от приложенного давления. Динамический элемент представляет собой емкостный датчик для измерения расстояния, приемная часть которого состоит из двух круглых мембран и прикрепленных к мембранам волокон. При контакте с объектом волокна воздействуют на мембраны, измеряя расстояние между ними. Количество, длину и материал волокон можно изменять. Комбинированный датчик состоит из двух статических элементов, окруженных 16 динамическими элементами датчика. Каждый статический элемент измеряет положение и силу. Каждый динамический элемент измеряет скорость и вибрацию. Предлагаемые датчики могут быть использованы для создания плотной сенсорной сети и роботизированной кожи в захватах РТС.

#### КЛАССИФИКАЦИИ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ РС И ИХ КОМПОНЕНТОВ

В рассмотренных сенсорных системах используются гомогенные узлы с одним или несколькими датчиками, позволяющими определять факторы среды, расстояние до находящихся в среде объектов и физическое воздействие на робота. На рисунке 2 приведены четыре основных компонента узла сенсорной системы.

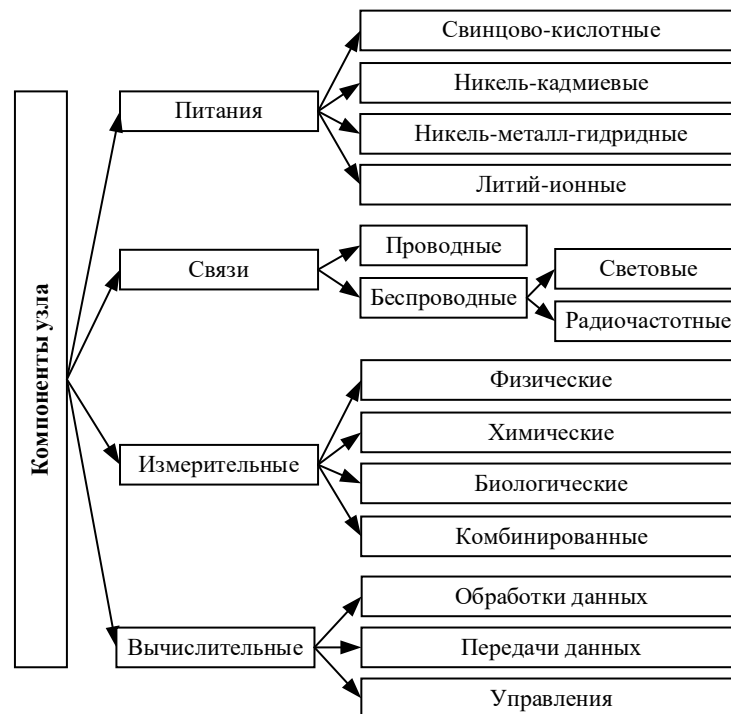


Рис. 2. Основные компоненты узла

В зависимости от области применения сенсорной системы, требуемого вида связи между узлами, измеряемых величин и способа обработки данных подбираются компоненты питания, связи, измерения и вычисления различных типов.

Среди рассмотренных узлов сенсорных систем можно выделить два типа: комбинированные и некомбинированные. На рисунке 3 показаны датчики, применяемые в измерительной компоненте узлов обоих типов.

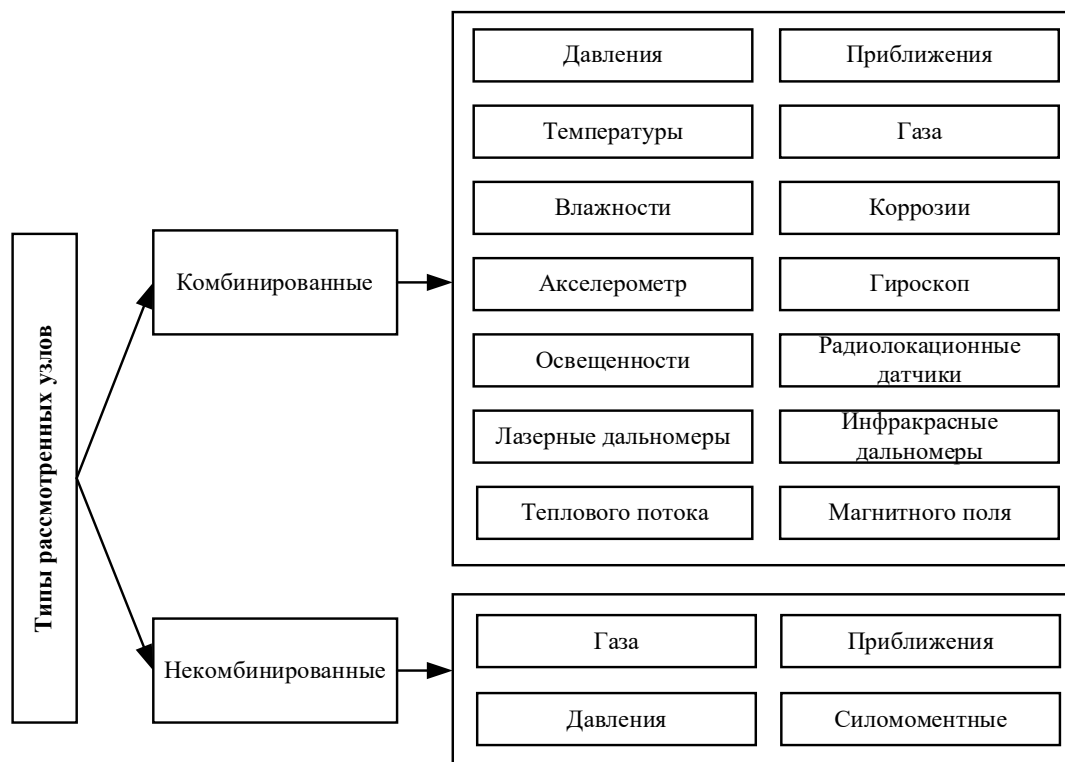


Рис. 3. Датчики комбинированных и некомбинированных узлов

Комбинированные узлы являются наиболее перспективными, так как позволяют включать в себя несколько типов датчиков и измерять больше параметров среды посредством одного узла. Наиболее используемыми являются датчики давления, температуры, влажности, IMU, датчики освещения и микрофоны.

Изготавливаются узлы на кремниевой, силиконовой подложке или на печатных платах. Изготовление узлов на подложках выполняется послойно. Используемые датчики работают по резистивному, пьезорезистивному, емкостному принципу. Из-за небольших размеров датчики узлов расположены близко друг к другу, в связи с чем возникает проблема перекрестной чувствительности, решаемая установкой дополнительных датчиков для компенсации перекрестных эффектов. Процесс изготовления узлов на печатной плате менее сложен, в качестве датчиков используются готовые MEMS-датчики, резистивные и емкостные датчики. Узлы как на подложке, так и на основе печатной платы, могут быть упругими и жесткими. Упругими узлы выполняются с целью безопасного контакта с человеком, жесткими – если контакт с человеком не рассматривается, а рассматривается контакт с неживыми объектами. Недостатками емкостных датчиков являются чувствительность к электромагнитным помехам, к температуре и нелинейный отклик. Но в сравнении с пьезорезистивными датчи-

ками, которые в свою очередь имеют ограничение по температуре, они обладают более высокой чувствительностью. В распределенных сенсорных системах наиболее используемыми являются емкостные и MEMS-датчики. В сенсорных узлах, выполненных на основе печатных плат, в основном используются готовые MEMS-датчики, например, акселерометр BMA150, лазерный дальномер URG-04LX, инфракрасный дальномер EZ1. Процесс изготовления таких узлов более прост, чем датчиков на кремниевых или силиконовых подложках. Рассмотренные узлы жесткие, лишь в [31, 32] используется легко деформируемая печатная плата. Датчики двух рассмотренных узлов размещены вне управляющей платы. В одном из рассмотренных прототипов посредством использования ШИМ реализован событийный принцип работы, позволяющий сократить время на передачу полученных данных. Однако несмотря на то, что авторы пишут, что данный принцип работы позволяет сократить потребление энергии, сенсорные узлы имеют достаточно высокий уровень энергопотребления в сравнении с обычными газочувствительными датчиками.

Гомогенность узлов рассмотренных систем позволяет размещать датчики в зависимости от того, как будет использоваться система и какой способ связи применяется между датчиками. В системах, используемых в качестве роботизированной кожи, применяется проводная связь. Узлы расположены на манипуляторах, туловище, педипуляторах робота и близко друг к другу, таким образом обеспечивается полное покрытие чувствительной зоны. Узлы сенсорных систем, используемых для мониторинга окружающей среды и объектов в ней, расположены на значительном друг от друга расстоянии для охвата большей территории. В этом случае расстояние между узлами ограничивается требованиями к покрытию зоны чувствительности и возможной дальностью используемого способа передачи данных (проводной или беспроводной: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и LoRa).

На рисунке 4 представлена классификация сенсорных систем по типам используемых узлов – гетеро- и гомогенные; по типам расположения в пространстве – локальные и распределенные.



**Рис. 4.** Классификация сенсорных систем по видам узлов и связи между ними

Для распределенных робототехнических комплексов характерно динамическое изменение их пространственного положения и характеристик внешней среды, поэтому для связи между ними, как правило, используются беспроводные средства передачи данных по радиоканалу.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены сенсорные системы коллаборативных РС. Определены способы безопасного взаимодействия РС с неживыми и живыми объектами и используемые в системах типы узлов и датчиков. Комбинированные узлы выделены как наиболее перспективные для разработки, так как включают в себя несколько типов датчиков. Набор датчиков для комбинированных узлов сенсорных систем подбирается в зависимости от того, где будет применяться сенсорная система и какие задачи выполнять. Наиболее используемыми датчиками среди рассмотренных систем, применяемых на РС для осуществления мониторинга окружающей среды, являются: IMU, датчик температуры, влажности, освещенности, давления и приближения, микрофон, камеры. В узлах сенсорной системы, применяемой для навигации в окружающей среде и взаимодействия с находящимися в ней объектами, необходимо устанавливать датчики приближения и давления для работы с близко находящимися объектами; инфракрасные дальномеры для обнаружения объектов, находящихся на большем расстоянии; датчики температуры для измерения температуры среды и исключения взаимодействия с объектами, способными стать причиной неисправности; IMU для ориентации РС в пространстве; микрофон для регистрации звуковых событий, источниками которых могут являться наблюдаемые объекты. Камеры, лазерные дальномеры и сканеры позволяют определять расстояние до объектов или человека и затем проводить прогнозирование их движений для планирования траектории движения робота.

Среди недостатков предложенных решений для осуществления ориентации в окружающей среде и взаимодействия с объектами и человеком можно выделить ограниченность наблюдаемой области, высокие требования к вычислительной мощности системы в целом. Большинство узлов не являются легкозаменяемыми в случае отказа. Также если сенсорная система робота представлена только камерой и дальномерами, взаимодействие, включающее прямой физический контакт, затруднено, и требуется установка дополнительных датчиков. Но при большом количестве узлов сенсорной системы возрастает вычислительная нагрузка, появляются задержки при передаче данных и повышается энергопотребление, что может быть скомпенсировано использованием событийного принципа работы отдельных датчиков или системы в целом. Среди рассмотренных сенсорных систем только в одном из прототипов реализован событийный принцип работы посредством ШИМ, причем в каждом из узлов системы отдельно. Данное решение является заменой непрерывному циклу работы датчика, но осуществление реакции на конкретные виды событий отсутствует. Событийный принцип работы сенсорной системы, реагирующей на тот или иной вид событий, может быть реализован посредством редактируемой онтологии. Данное свойство онтологии позволит системе осуществлять подключение новых видов узлов и изменять правила определения событий при добавлении или удалении узлов. Хотя применение данного принципа работы требует разработки архитектуры сенсорной системы и специализированных алгоритмов для правильной работы, возможность реагировать только на определенные события позволит реализовать более высокое временное разрешение в сравнении с узлами сенсорных систем, передающими данные непрерывно.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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: 10.1016/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.



## ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF DISTRIBUTED SENSOR SYSTEMS OF COLLABORATIVE ROBOTICS

E.O.CHERSKIKH\*, A.I. SAVELIEV

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences  
199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilievsky Island

**Abstract.** The main goal of this analysis is to identify the most promising sensor nodes for the development of types of sensors used in sensor systems of collaborative robots, structures, and arrangement of nodes on the bodies of robots. To achieve this goal, the existing design solutions for sensor assemblies and systems were considered. The paper analyzes and classifies the nodes of distributed sensor systems according to the composition, the method of communication of the nodes used and their location on the robot bodies. Homogeneous or heterogeneous systems containing one of two types of nodes: combined and non-combined, have been identified. It was found that combined nodes are the most promising for development since include several types of sensors and can measure more environmental parameters through a single node. The most used types of sensors, methods of their manufacture, design and properties have been determined. Combined nodes contain the following types of sensors: pressure, proximity, temperature, humidity, gas, illumination, heat flow, corrosion, accelerometer-gyroscope, infrared and laser rangefinders, radar sensors. Among the listed, the most used are pressure, temperature, humidity sensors, inertial measurement units, light sensors, and microphones. The structures of sensor nodes are considered and the nodes most promising for development are identified, as well as the types of sensors used, methods of manufacturing and arrangement of nodes on the bodies of collaborative robots. The disadvantages of the considered systems are highlighted, and a method is proposed to reduce their influence on the power consumption of the system, the computational load, and delays in data transmission.

**Keywords:** sensor systems, distributed systems; sensors, sensor system nodes, collaborative robots

The article was submitted 02.12.2021

Accepted for publication 12.12.2021

**For citation.** Cherskikh E.O., Saveliev A.I. Analysis and Classification of Distributed Sensor Systems of Collaborative Robotics. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2021. No. 6 (104). Pp. 78–94. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-78-94

### Information about the authors

**Cherskikh Ekaterina Olegovna**, junior researcher of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; 199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilievsky Island; cherskikh.e@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4443-2281>

**Saveliev Anton Igorevich**, PhD, senior researcher and head of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; 199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilievsky Island; saveliev@iias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>

---

\* The work was carried out with the financial support of the RSF No. 20-79-10325