# ТАКТИЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Появление тактильных датчиков, предназначенных для геометрического распознавания предметов окружающего пространства, обусловлено развитием робототехники. Основная тенденция в области создания тактильных датчиков – воспроизведение осязательных свойств человеческой кожи. Этой тенденции в наибольшей степени удовлетворяют тактильные устройства матричного типа, так как каждая ячейка матрицы, представляющая собой микроэлектронный датчик силы (или деформации, момента), дает конкретную информацию, а все вместе позволяют сформировать целостное представление о форме предмета. Конструкторские и технологические разработки тактильных датчиков находятся на начальном этапе развития, еще не выработаны технические требования и не определен перечень их характеристик.

Исследователи Кливлендского университета (США) считают, что современный тактильный датчик для робота должен обладать такими свойствами : высокой чувствительностью, способность воспринимать давление (силу), преобразовывать его в электрические сигналы, позволяющие определить форму и материал предмета, т. е. распознавать образы; высоким пространственным разрешением, соответствующим восприимчивости пальцев человека (пространственное разрешение человеческой кожи 2 мм); достаточное для сварочных или сборочных роботов в машиностроении, а также для роботов, применяемых в микрохирургии и микроэлектронике; хорошими линейными характеристиками (допустимы лишь отклонения, компенсируемые при обработке сигнала на ЭВМ); незначительным гистерезисом; устойчивостью к перегрузкам и тяжелым условиям работы; небольшим размерам и массой; невысокой стоимостью.

Это может быть обеспечено при использовании в процессе разработки и производства тактильных датчиков микроэлектронной твердотельной технологии, обладающей широкими возможностями миниатюризации и формирования средств обработки сигнала на одном чипе с чувствительный элемент (ЧЭ) как, например в датчике, созданном специалистами университета Карнеги-Меллон.

Тактильные датчики на интегральных схемах с применением кремния, кварца и поликристаллической керамики могут обеспечить измерения в диапазоне 0.01-40 Н (т.е. динамический диапазон составляет 4000:1). Особенное распространение получили кремниевые датчики благодаря высокой плотности расположения ячеек в матрице ЧЭ, надежности, низкому гистерезису, выносливости и небольшой стоимости.

Исследователи Стенфордского университета предложили для формирования ЧЭ тактильных датчиков гибкую полоску толщиной 200-400 мкм. На полиамидной подложке располагаются кремниевые кристаллы, каждый из которых образует интегральную схему. «Островки» кристаллов соединяются золотыми проводниками, нанесенными методом фотолитографии. Датчики с ЧЭ из такой кремниевой ленты обеспечивают измерение «касания» в диапазоне 0-40 000 Па с чувствительностью 67 Па. В более узком диапазоне 5000-7000 Па чувствительность можно повысить до 13 Па.

Для выполнения ЧЭ пьезорезистивных тактильных датчиков используются различные материалы, например волокна углерода (графита). Пучки из нескольких тысяч волокон характеризуются высокими прочностью на растяжение, электропроводностью и гибкостью. При соответствующем подборе размеров пучка и подложки элементы могут воспринимать давление от 1 Па да десятков мегапаскалей. Они просты в изготовлении и относительно недороги.

Применяется также электропроводный эластомер на основе силиконовых каучуков с наполнителем (графитом, сажей, металлическим мелкодисперсным порошком). Анизотропная электропроводность эластеров дает возможность варьировать токопроводящие пути и места расположения контактов между электродами. Недостатки таких ЧЭ являются восприимчивость к электрическим помехам, нелинейность, значительный гистерезис, низкая чувствительность при существенной погрешности, малое быстродействие, довольно низкий порог усталости.

Применение волокон углерода и силиконовых эластомеров способствует миниатюризации пьезорезистивных датчиков, делает технологию их изготовления сравнимой с технологией изготовления интегральных схем. Эти датчики рассчитаны на широкий диапазон измерения и допускают значительные перегрузки.

Для изготовления резиновых мембран с рельефом сложной конфигурации и точным геометрическим профилем были использованы кремниевые литейные формочки, выполненные методом травления. Применение таких фасонных мембран позволило значительно улучить точность тактильных датчиков.

Пьезорезистивные тактильные датчики с матричными чувствительными элементами разрабатываются различными лабораториями США (Jet Propulsion Laboratory, Artificial Intelligence Laboratory MJT) и Франции (Laboratoire d’Automatique et d’Analyse des System).

Югославские и французские исследователи работают над совместным проектом создания руки робота, на которой будет смонтирован датчик с ЧЭ из электропроводной резины, покрытой тонким слоем краски.

Фирма Barrity Wright Corp. (США) недавно выпустила два резистивных датчика из эластомеров – размером 10х20 мм с матрицей 8х16 ячеек и размером 40х40 мм с матрицей 16х16 мм ячеек.

Совместно с Токийским университетом фирмой Yokohama Rubber Co. (Япония) разработан датчик из электропроводной резины толщиной менее 1 мм. Размеры трехслойного ЧЭ 4х4 или 8х8 мм. Датчик фиксирует силу и место ее приложения. Он смонтирован на созданном фирмой роботе, который оперирует деталями массой от 30 г до нескольких килограммов.

В Варвикском университете (США) сконструирован тактильный датчик на основе ЧЭ из углеродных волокон, нанесенных для эластичности на плоскую гибкую ленту. Произвольное пересечение волокон обеспечивает изменение сопротивления в широких пределах, однако закономерность этого изменения под воздействием давления от нуля до максимума не обнаружена.

В Пенсильванском университете (США) разработан тактильный датчик с пьезорезисторами, изолированными от окружающей среды, что позволило повысить стабильность датчика во времени, уменьшить дрейф нуля, повысить устойчивость к электростатическим напряжениям.

Материалом для ЧЭ пьезоэлектрических датчиков служит полимеры, например поливинилиденфторид-2 (PVF2 или PVDE), обладающие хорошими механическими и химическими свойствами. Поскольку деформация этих материалов под действием давления незначительна, для достижения пространственного разрешения, сравнимого с восприимчивостью пальцев человека, ЧЭ устанавливается на подложку из эластичного полимера. Он может монтироваться как на плоскости, так и на поверхности сложной конфигурации. Диапазон измерения пьезоэлектрических датчиков достаточно широк при допустимых для материалов ЧЭ напряжениях сжатия 80 МПа, растяжения 50 МПа.

В Пизанском университете (Италия) создан пьезоэлектрический датчик, образованный слоем PVF2 на гибком слое резистивной краски, сопротивление которой стабилизируется при 37 С. По разнице поглощения тепла обеими слоями идентифицируются различные материалы, из которых выполнены предметы. Линейность датчика 1 %. Следует отметить, что введение второго слоя вызывает увеличение гистерезиса.

Несмотря на нежелательную во многих случаях температурную чувствительность, исследователи Пизанского университета используют ЧЭ из PVF2 в тактильном датчике, являющимся продолжением пальца робота с четырьмя степенями свободы. Конструктивно датчик представляет собой полый цилиндр диаметром 28 и длиной 40 мм. Внутри его проходит тонкий коаксиальный кабель, к которому припаяны 35 электродов, организованных в матрицу 5х7 ячеек. Благодаря высокой чувствительности датчик за несколько мкс определяет смещение объекта на сотни микрометров.

В последние время получили развитие тактильные датчики, основанные на изменении оптических свойств материала под действием приложенной к ним силы. Интерес к таким оптическим датчикам объясняется их высокой чувствительностью, стойкостью к электромагнитным полям, нейтральностью к воздействиям окружающей среды и возможностью разнообразить конструктивные решения.

В оптическом тактильном датчике фирмы JPL (США) использованы гибкая отражающая мембрана, источник инфракрасного излучения, ЧЭ из 16 ячеек размером 5х5 мм (матрица 4х4 ячеек), два световода между источником и детектором. Интенсивность отраженного света прямо пропорциональна силе, приложенной к гибкой мембране. Однако технология изготовления датчиков такого типа достаточно сложна. Их недостатком являются значительные размеры, особенно при большом числе ячеек в матрице. Тем не менее, разработки в этом направлении продолжаются в Национальном бюро стандартов и на фирме Tictile Robotic System (США), которые сообщили о создании датчика с матрицей 16х16 ячеек.

Этой же фирмой разработан тактильный датчик с матрицей из 256 ячеек (16х16), впрессованных в латунную пластину размером 41х41 мм, что примерно соответствует размеру схвата робота. Датчик, смонтированный на печатной плате 50.8х63.5 мм, содержит источники света, приемники, формирователи сигнала. Он характеризуется хорошим отношением сигнал/шум, отсутствием гистерезиса. Диапазон измерения 0.01-1 Н. Сканирование матрицы производится при частоте 3 кГц, ограничиваемой только возможностями внешнего десятиразрядного аналого-цифрового преобразователя. Предполагается, что в следующей модели будут включены источник света и приемник на интегральных схемах (вместо дискретных), удвоится плотность расположения ячеек, соответственно возрастет пространственное разрешение. Более быстрый аналого-цифровой преобразователь позволяет увеличивать частоту сканирования до 100 кГц.

Исследователи Массачусетского Университета (США), предложили тактильный датчик, построенный по принципу модуляции отраженного света под действием давления. Благодаря размещению 330 ячеек на 1 см кв. ЧЭ пространственное разрешение чрезвычайно велико, причем существует возможность его повышения путем увеличения плотности волокон. Недостатки датчика – недолговечность эластомера, выдерживающего всего несколько сот циклов, и малый динамический диапазон измерений.

Датчик, разработанный в Массачусетском технологическом институте, содержит 1190 волокон сечением 0.027 мм кв., организованных в матрицу 35х34. Волокна покрыты полимерной оболочкой толщиной 0.5 мм и белой кремниевой резиной такой же толщины, выполняющего роль деформирующего отражателя.

Фирма British Robotic System (Великобритания) проводит исследования возможности создания тактильных датчиков с получением визуальной информации методом эндоскопии. Чувствительный элемент формируется из разделенных слоем воздуха прозрачной акрилиновой пластинки и упругой мембраны, воспроизводящей силовое воздействие объекта и в зависимости от этого меняющей коэффициент отражения. Отраженный свет фиксируется преобразователем изображения прибора с зарядовой связью. Из-за необходимости использовать пучок оптических волокон и источник света для каждого волокна датчик громоздок и тяжел. Специалисты фирмы предложили один источник света на каждый ряд матрицы и один детектор на каждую колонку, а для сканирования матрицы – пульсирующий источник излучения.

Многие исследователи предсказывают широкие возможности применения в тактильных датчиках интегральных оптических схем, один слой которых будет содержать светодиоды, а другой фоторезисторы. Это позволит не только уменьшить размеры датчиков, но и упростить технологию их изготовления.

Фирма Lord Corp (США) создала оптический тактильный датчик, в котором при воздействии объекта на гибкую поверхность ЧЭ из эластомера блокируется поток света от него к детектору. Пространственное разрешение 1.88 мм. Подобные датчики определяют составляющие силы контакта и момента.

Наибольшей простотой конструкции отличаются емкостные тактильные датчики, обладающие высокой чувствительностью, пространственным разрешением и быстродействием, невосприимчивостью к помехам и возможностью установки на пальцах робота любой конструкции. Как правило, емкостной датчик формируется в виде сэндвича из тонких пластинок меди, располагаемых слоями перпендикулярно друг другу и разделенных диэлектриком. Под действием давления изменяется его электрическая емкость.

В датчике, предложенном Стенфордским университетом, использованы пластины меди шириной 2.5 мм. Диэлектриком служит вулканизированные при комнатной температуре кремниевоорганические соединения. Матрица, содержащая 4х4 элемента, измеряет давление до 105 Па. Частота сканирования 100 кГц, входное сопротивление 1-5 МОм.

Фирмой Bell Laboratories, Inc. (США) разработан емкостной тактильный датчик с эластичный диэлектриком из нейлоновой сетки. Чувствительный элемент представляет собой трехслойный пакет, состоящий из разделительных диэлектриков восьми рядов медных пластин (8 пластин шириной 2.5 мм в ряду) и покрытый гибкой перчаткой. Датчик в сборе монтируется на гибкой печатной плате. Ему можно придать форму пальца робота. Верхний предел измеряемого давления 5 кПа. Предлагается также пакет из 32 рядов по 32 пластины, при этом пространственное разрешение ограничивается лишь технологией изготовления медных пластин методом литографии.

В Artificial Intelligence MJT создан один из самых миниатюрных емкостных датчиков. Матрица содержит 8х8 ячеек площадью 12.7х12.7 мм. Они расположены взаимно перпендикулярно на расстоянии 2.5 мм и разделены диэлектриком из силиконовой резины. Датчик крепится на небольшой печатной плате. В зависимости от эластичности диэлектрика он измеряет давление до 10 кПа. При этом измеряются емкость операционного усилителя, амплитуда синусоидальных сигналов, подсчитываемых шестиразрядным преобразователем. Такие датчики будут монтироваться на четырех пальцах руки робота, разработанного на MJT и Утахским университетом. Каждый палец обладает четырьмя степенями свободы, запястье – тремя, рука в целом управляется пятью микропроцессорами (один центральный и по одному на каждый палец). В комбинации с другими датчиками, установленными на пальцах и ладони (в частности, пьезоэлектрическими на PVF2), это обеспечивает возможность определения смещения пальцев относительно друг друга.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Сенсоры в контрольно-измерительной технике. Автор: Таланчук П.М., С. П. Голубков, В. П. Маслов и др. Киев. Техника, 1991. –173 стр.

Стр.103-108.