УДК. 621.855.8.005:681.586

В. Божидарник, М. Карпінський, Ю. Опалко

ТАКТИЛЬНІ ДАТЧИКИ

Аналізується сучасний стан розробок тактильних датчиків, класифікація таких датчиків, розглядаються їх конструктивно-технологічні особливості і області застосування.

Вининення тактильних датчиків, призначених для геометричного розпізнавання предметів навколишнього простору, обумовлена розвитком робототехніки. Тактильні руки людини дозволяють легко визначити дотик, зусилля, форму, відносне переміщення і факт руху предметів. Як тільки зусилля, прикладене до шкіри, перевищує границі чутливості тактильного відчуття, датчики видовження, котрі розміщені в сухожиллях і мускулах долоні, зап'ястя і руки, фіксують це та передають відповідні сигнали мозку людини. Основна тенденція в області створення тактильних датчиків - це відтворення чутливих властивостей людської шкіри. Ці тенденції у найбільшій мірі задовільняють тактильні пристрої матричного типу, оскільки кожна комірка матриці, що становить собою мікроелектронний датчик сили (деформації, моменту), дає конкретну інформацію, а всі разом дозволяють сформувати цілісну уяву про форму предмета. Основні технологічні вимоги до тактильних датчиків наступні: висока чутливість щодо перевантажень і зміни основних характеристик при цьому, висока еластичність, здатність видозмінюватись, управляти і контролювати інформацією.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Способи побудови тактильних датчиків можуть бути різні: на базі різноманітних струмопровідних матеріалів, на основі п'єзоелектричних кристалів, із використанням оптичних та магнітних методів. Чіткого поділу тактильних датчиків на типи не існує. Проте аналізуючи наукові праці можна виділити основні напрямки досліджень в області систем тактильного відчуття:

п'єзоелектричні, оптичні, резистивні, ємнісні, магніторезистивні, термодатчики та тактильні датчики на інтегральних схемах.

П'єзоелектричні тактильні датчики

Результати математичного аналізу і моделювання показують ефективність застосування п'єзоелектричних тактильних датчиків, чутливим елементом котрих є плівка з п'єзоелектричним ефектом [1]. Датчики даного типу мають багатошарову структуру, зокрема, 3-шарову [1], 5-шарову [1]. Плівка при цьому покривається з обох сторін шарами з еластичного матеріалу. Похибки і чутливість п'єзоелектричного тактильного датчика суттєво залежать від товщини полімерної плівки, піддатливості еластичного матеріалу, розмірів комірок, фізичних властивостей плівки - максимально допустимої зовнішньої сили, здатності до релаксації, постійної часу, температурної залежності.

Високочутливими є датчики, котрі створені на основі графітових волокон. Конструктивно такий датчик може бути виконаний у вигляді двох плоских пластин - струмопровідної та ізолюючої, між котрими знаходиться пучок графітових волокон. При навантаженні однієї із пластин пучок волокон звужується, що приводить до зростання потоку електронів за рахунок зменшення опору між пластинами. Залежність зміни опору від прикладеного зусилля показує високу чутливість датчика в діапазоні малих (до 24 Н) зусиль. Описаний в [2] датчик із пучком шириною 5мм і товщиною 0,1мм, котрий містить 10000 графітових волокон, був випробуваний у системі розпізнавання геометричної форми об'єктів. Із цією ж метою можна використати тактильний датчик на базі аморфного кремнію. Дослідження показали, що верхня границя чутливості матричного датчика, що складається із 15x15 електролюмінесцентних діодів на основі Ga-Al-As, розміщених на керамічній підкладці, досягає 5Н /см ^{2} [2].

Ефективними є також матричні п'єзорезистивні тактильні датчики з матричними чутливими елементами, що розробляються різними лабораторіями США (Jet Propulsion Laboratory, Artificial Intelligence Laboratory MJT) і Франції (Laboratoire d'Automatique et d'Analise des Systems).

У Пенсільванському університеті США розроблений тактильний датчик з п'єзорезисторами, ізольованими від оточуючого середовища, що дозволило підвищити стабільність датчика у часі, зменшити дрейф нуля, підвищити стійкість до електростатичної напруги [2].

Матеріалом для чутливих елементів п'єзоелектричних датчиків служать полімери, наприклад, полівініліденфторид-2 (PVF2 або PVDE), що мають хороші механічні та хімічні властивості. Оскільки деформація цих матеріалів під дією тиску незначна, для досягнення просторової роздільної здатності, подібної до чутливості пальців людини, чутливий елемент встановлюється на підкладку з чутливого елемента. Він може монтуватися як на площині, так і на поверхні складної конфігурації. Діапазон вимірювання п'єзоелектричних датчиків достатньо широкий при допустимих для матеріалу чутливих елементів напруженнях стиснення 80 МПа та розтягу 50 МПа [3].

У Пізанському університеті (Італія) розроблений п'єзоелектричний датчик утворений шаром PVF2 на гнучкому шарі резистивної фарби, опір якої стабілізується при 37 ^{0}C [3]. За різницею поглинання тепла обома шарами ідентифікуються різні матеріали, з яких виконані предмети. Лінійність датчика 1%. Слід відзначити, що введення другого шару викликає збільшення гістерезису. Конструктивно датчик становить собою циліндр

діаметром 28 і довжиною 40мм. В середині його проходить тонкий коаксіальний кабель, до якого припаяні 35 електродів, організовані в матрицю 5х7 комірок. Завдяки високій чутливості датчик за декілька мкс визначає зміщення об'єкта на сотні мікрометрів.

Оптичні тактильні датчики

Останнім часом отримали розвиток тактильні датчики, основані на зміні оптичних властивостей матеріалу під дією прикладеної до них сили. Інтерес до таких оптичних датчиків пояснюється їх високою чутливістю, стійкістю до електромагнітного поля, нейтральністю до впливу навколишнього середовища і можливістю урізноманітнити конструктивні рішення. В оптичних сенсорах з волоконною оптикою промінь світла, що проходить по скляному волокну, змінюється в залежності від прикладеного зусилля, тиску, температури, магнітних полів. У даних датчиках може бути використаний принцип модуляції фази, котрий полягає в зміні кута фази променя світла при прикладенні до волокна сили. Другий тип оптичного сенсора - поляриметричний, в котрому при дії аналогічних умов вимірюється зміна поляризації. Вказані типи датчиків дорогі, вимагають складного електронного обладнання. Більш простим є сенсор, в якому застосовуються дешеві світлодіоди і фотодетектори інфрачервоного випромінювання. Для забезпечення високої роздільної здатності в оптичних тактильних датчиках застосовується акрилова пластина, наприклад, розміром 56х117 мм, еластична пластина, фіброоптичний світловод, матриця чутливих фототранзисторів розміром 36х16 елементів [4]. Еластична пластина розміщена на акриловій пластині, котра знаходиться на матриці фототранзисторів. Промінь світла падає в акрилову пластину від джерела світла. При відсутності зовнішнього тиску на еластичну пластину спостерігається явище повного внутрішнього відбивання світла в акриловій пластині і воно попадає на світлочутливі елементи матриці. При наявності тиску на еластичну пластину в місці тиску виникає оптичний контакт даної пластини з акриловою пластиною. У місці контакту змінюються умови відбивання і образ області тиску проектується на фототранзистори, де і формується тактильне зображення. Інформація з фототранзисторної матриці поступає через аналого-цифровий перетворювач в ЕОМ, в якій здійснюється обробка зображення. Певні конструкції оптичних тактильних датчиків дозволяють отримати розділення до 256х256 елементів [5]. Оптичні сенсори мають більші переваги у порівнянні з електронними при використанні у вибухонебезпечних і агресивних середовищах. Однак, вони застосовуються значно рідше за електронні датчики внаслідок високої вартості. До цих пір оптичні сенсори виготовляли за оптоволоконним принципом. Як альтернативний варіант може використовуватися інтегрована оптика, в котрій оптичні хвилеводи і компоненти виготовляються подібно до електричних шарових схем. При використанні для реалізації цього способу широковживаних технологій і матеріалів, наприклад, кремнію на базі шарів з аксинітриду кремнію, можна отримати порівняно дешеві масові вироби.

Резистивні тактильні датчики

Недорогими, гнучкими і технологічними є резистивні тактильні датчики. Їх принцип дії грунтується на зміні опору чутливих елементів при деформації. Конструкції таких датчиків припускають підключення до 16 паралельних масивів, що складаються з 256 тактильних елементів із частотою опитування сенсорів більшою за 60 Гц [6]. Чутлива поверхня має площу $1,03 \times 10^{-2}$ м^2. Тактильні датчики описаного типу використовуються у

мультисенсорних системах керування робототехнічними засобами і забезпечують виконання процедур нижчого рівня. Використовується також електропровідний еластомір на основі силіконових каучуків із наповнювачем (графітом, сажою, металічним дрібнодисперсним порошком). Анізотропна електропровідність еластомірів дає можливість змінювати струмопровідні шляхи і місця розміщення контактів між електродами.

Застосування волокон вуглецю і силіконових еластомірів сприяють мініатюризації резистивних датчиків, технологія виготовлення яких порівнюється із технологією виготовлення інтегральних схем. Ці датчики розраховані на широкий діапазон вимірювань і допускають значні перевантаження.

Для виготовлення резинових мембран із рельєфом складної конфігурації і точним геометричним профілем використовуються кремнієві формочки, виконані методом травлення. Застосування таких фасонних мембран дозволяє значно поліпшити точність тактильних датчиків.

Фірма Barrity Wright Corp. (США) недавно випустила два резистивних датчики із еластомірів розміром 10×20 мм з матрицею 8×16 комірок і розміром 40×40мм з матрицею 16×16 комірок [7]. Разом із Токійським університетом фірмою Yokohama Rubber Co. (Японія) розроблений датчик із електропровідної гуми товщиною менше 1мм. Розміри тришарового чутливого елемента 4×4 або 8×8 мм. Датчик фіксує силу і місце її прикладання. Він змонтований на створеному фірмою роботі, який оперує деталями масою від 30г до декількох кілограм [7].

Ємнісні тактильні датчики

Найбільшою простотою конструкції відрізняються ємнісні тактильні датчики, що мають високу чутливість, просторову роздільну здатність і швидкодію, несприйнятливість до перешкод і можливість встановлення на пальцях робота будь-якої конструкції. Як правило, ємнісний датчик формується у вигляді шарової структури із тонких пластинок міді, котрі розташовані шарами паралельно одна одній і розділені діелектриком.

У конструкціях ємнісних тактильних сенсорних пристроїв використовується принцип зміни ємнісного опору під дією прикладеної сили. В [8] описаний датчик даного типу, котрий характеризується малим гістерезисом, а просторова роздільна здатність досягає теоретичної границі. Пресований силіконовий каучук, який розміщений між верхньою і нижньою паралельними пластинами конденсатора для сприймання зусиль, використовується як пружне і діелектричне середовище. Такий датчик характеризується роздільною здатністю 8×8 точок на площині розміром 1,27x1,27см. При високій структурній гнучкості сенсора пружність дозволяє компенсувати похибки позиціонування робототехнічного засобу, забезпечує стабільне захоплення, запобігає пошкодженню об'єктів маніпулювання. Для цього зовнішня поверхня сенсора виготовляється із силіконового покриття, що покриває поліуританову масу, котра знаходиться в середині сенсора.

У датчику, запропонованому Стенфордським університетом, використані пластини міді шириною 2,5 мм, розташовані на відстані 3,5 мм. Діелектриком служать вулканізовані при кімнатній температурі кремнієво органічні сполуки. Матриця, що містить 4×4 елементи, вимірює тиск до 10^5Па. Частота сканування 100 кГц, вхідний опір 1-5 МОм [9].

Фірмою Bell Laboratories, Inc. (США) розроблений ємнісний тактильний датчик з еластичним діелектриком із нейлонової сітки. Чутливий елемент становить собою тришаровий пакет, що складається із розділених

діелектриком 8-ми рядів мідних пластин (8 пластин шириною 2,5мм у ряді) і покритий гнучкою рукавицею. Датчик монтується на гнучкій друкованій платі. Йому можна надати форму пальця робота. Верхня межа вимірюваного тиску 5 кПа [9].

В Artificial Intelligence Laboratory MJT створений один із наймініатюрніших ємнісних датчиків. Матриця містить 8×8 комірок площею 12,7×12,7мм. Вони розташовані взаємноперпендикулярно на відстані 2мм і розділені діелектриком із силіконової гуми. Датчик закріплений на невеликій друкованій платі. В залежності від еластичності діелектрика він вимірює тиск від 10 кПа. При цьому змінюються ємність операційного підсилювача, амплітуда синусоїдальних сигналів, що підраховуються 6-розрядним перетворювачем [8].

Магніторезистивні тактильні датчики

Останнім часом зріс інтерес до досліджень і розробки тактильних датчиків, принцип дії яких оснований на магніторезистивному ефекті. Магніторезистивний ефект полягає в зміні електричного опору під дією магнітного поля. В [10] описаний тактильний датчик, що базується на використанні феромагнітного матеріалу VITROVAC 4040. Датчик містить елементи, чутливі до тиску, які розміщені на площині у вигляді матриці 7×7 елементів із відстанню між центрами 2,5мм. Матричний тактильний датчик має здатність формувати силуети зображення об'єктів, що знаходяться в площині датчика. Поверхневий шар чутливих елементів покритий чутливою плівкою. Переваги магніторезистивних тактильних датчиків: висока чутливість, широкий динамічний діапазон, хороша лінійність, мале значення гістерезису, малі температурні відхилення.

Термодатчики

Для розпізнавання форми і матеріалу об'єкта можна використати термодатчики, зокрема матричні [11]. В основу функціонування термодатчиків покладений принцип реагування шкіри людини при розпізнаванні фактури об'єкта. Термообігрів поверхні датчика проводиться аналогічно до постачання шкіри кров'ю. У термодатчиках використовується матриця елементів, що реагує на температуру в точці контакту, аналогічно до нервових закінчень пальців людини.

Для виготовлення чутливого до тиску елемента з матричною структурою можна застосувати сплав манганіну і титану. Манганін має чутливість до тиску та нечутливий до температури, тоді як титан є чутливий до температури, але нечутливий до тиску. Використання термодатчиків, як однієї із різновидностей системи надання чутливості, дозволяє значно розширити область застосування робототехнічних засобів в автономному режимі.

Тактильні датчики на інтегральних схемах

У конструкціях вище розглянутих тактильних датчиків для з'єднання окремих чутливих елементів зі схемами обробки інформації необхідно мати або велике число провідників, або розміщувати громіздкі схеми мультиплексорів в обмеженому просторі безпосередньо біля матриці. Крім того, якщо не застосовувати локальні препроцесори, то в основну ЕОМ доводиться передавати значні обсяги інформації.

Перераховані недоліки відсутні в конструкціях тактильних датчиків, що базуються на архітектурі, котра використовується для виготовлення

великих інтегральних схем. Це викликано тим, що такі конструкції використовують притаманну механічним зусиллям паралельну природу перетворюваних сигналів для побудови локальних препроцесорів обробки тактильних образів.

Датчик такої конструкції, зокрема ємнісний, виконується з тонкого шару електропровідної гуми, покладеного зверху на ізолюючий шар натуральної гуми - діелектрика [12]. Останній розміщений на кремнієвій пластині розміром 28×28мм. Пластина вмонтована в керамічну плату розміром 50×50 мм. Розміри одного тактильного елемента 2,5×2,5мм. Кожний чутливий елемент реалізований у вигляді інтегральної схеми і включає в себе алюмінієвий прямокутник, який служить нижньою обкладкою конденсатора і має розмір 2,5×2 мм. Незаповнену частину кристалу розміром 2,5×0,5мм займають логічні елементи адресування і кола нормалізації сигналу. Всього в датчик вмонтовано 81 кристал. На кожен елемент поперемінно подається напруга синусоїдної форми. Товщина ізолюючого шару, а, отже, і ємність конденсатора залежать від локальної деформації гуми, тобто, від прикладеної сили. При обробці інформації, яка поступає від кристалів датчика, використовується алгоритм перетворення Лапласа. Тактильний датчик, реалізований у вигляді однієї надзвичайно великої інтегральної схеми, забезпечує прийом даних, обробку тактильної інформації та зв'язок із пристроєм керування робототехнічного засобу за послідовним каналом. Обробка інформації проводиться паралельно декількома процесорами. Процесори зв'язані між собою локальною шиною даних і глобальною шиною керування. Розроблена чутлива матриця має розмірність 6×3 елемента і складається з комірок площею 1 мм^2. Проведені дослідження показали можливість створення подібних датчиків з чутливими матрицями великої розмірності, що включають до 1000 комірок.

Тактильні датчики на інтегральних схемах [13] із застосуванням кремнію, кварцу і полікристалічної кераміки можуть забезпечити вимірювання в діапазоні від 0,01 - 40 Н (тобто, динамічний діапазон складає 4000 : 1). Особливе розповсюдження отримали кремнієві датчики завдяки високій густині розташування комірок матриці чутливих елементів, надійності, низькому гістерезису, винесливості і невеликій вартості.

Дослідники Стенфордського університету запропонували для формування чутливих елементів тактильних датчиків гнучку стрічку товщиною 200-400мкм [9]. На поліамідній підкладці розташовуються кремнієві кристали, кожний з яких утворює інтегральну схему. Ці кристали з'єднуються золотими провідниками, нанесеними методом фотолітографії. Датчики з чутливими елементами із такої кремнієвої стрічки забезпечують вимірювання в діапазоні 0 - 40000 Па з чутливістю 67 Па. У більш вузькому діапазоні 5000 - 7000 Па чутливість можна підвищити до 13 Па.

Важливою є задача оптимального розміщення чутливих елементів на робочій площині з метою кращого розпізнавання об'єктів. Практикуються симетричний однорідний і асиметричний нерівномірний способи розміщення елементів. Характер розташування елементів в останньому випадку вибирають за аналогією з розміщенням чутливих елементів в біологічних системах.

Висновки

Аналіз результатів дослідження показує, що хоча конструкторські і технологічні розробки тактильних датчиків знаходяться на початкових етапах

розвитку, ще не вироблені технічні вимоги і не визначений перелік їх характеристик, сучасний тактильний датчик робототехнічних систем повинен мати наступні характеристики: масив чутливих елементів розміром 10×10, котрий розміщений на гнучкій поверхні площею 6 $см^2$; більша чутливість бажана, але не суттєва для виконання багатьох задач; постійна часу чутливого елемента повинна знаходитися в межах від 1-10 мс; порогове значення чутливості елемента 1г і верхня границя вимірюваних зусиль 1000г; не обов'язково висока лінійність, але малий гістерезис; підвищена стійкість чутливого матеріалу датчика до навколишнього середовища.

Summary. The up-to-date development conditions of talctile sensors are analysed. The classification of such sensors is given, their design and technological features and application fields are examined.

Література

1. Benes E., Groschl M. Sensors based on piezoelectric resonators.-Sensors and Actuators, 1995.Vol. 48, N1.-P.9-12.
2. Mcalpine G.A. Tactile sesnsing. - Sensors, 1986, №4.-P.8-10.
3. Park K. A PVDF tactile sensor for industrial robots. - Robots 10. Conf.Proc.. Deaborn, Mich.,1986.-P.85-86.
4. Simon H.Optics tactile sensors today and tomorrow.- Physics Today. 1996. Vol. 48.-P.11-14.
5. Tanie K. A high-resolution tactile sensor. - Rob. Sens. Vol.2.-P.13-14.
6. VDI-Nachrichten. 1996. -N27.-48 p.
7. Таланчук П.М. Сенсоры в контрольно-измерительной технике. - К.:Техника,1991.-175с.
8. Middelhoek S. Quo vadis silicon sensors. Sensors and Actuators. 1996. Vol. 41.-P.22-26.
9. Розенблат М.А. Новые достижения и направлния в развитии датчиков. Приборы и системы управлния. 1996.-№9.-С. 8-10.
10. Neale R. Taming the giant magnetoresistance (GMR) effect. Electronic Eng. 1996. Vol. 32. N832.-P.7-9.
11. Jeswiet J., Nshama W. A robot force/temperature sensing gripper for heavy industry. - Proc. 6th Int.Conf.Rob. Vision and Sens. Contr.. Kempston, Berlin, 1996.-P.91-92.
12. Bowen M. Consideration for the design of tactile sensors. Sensors and Actuators, 1995. Vol. 47.-P. 15-17.
13. Sensors and Actuators, 1995. Vol. 46-47.-52 p.