

# Sensory taktylne - stan i kierunki rozwoju

dr inż. Jan Barczyk  
Instytut Automatyki i Robotyki  
Politechniki Warszawskiej

W prezentowanym przeglądzie zamieszczono aktualny stan badań i zastosowań sensorów taktylnych, należących do grupy sensorów otoczenia robota.

Roboty mogą być wyposażone w urządzenia sensoryczne umożliwiające im podejmowanie różnorodnych zadań i reakcji na zmienne warunki otoczenia. Rodzaj niezbędnych urządzeń sensorycznych zależy od środowiska pracy, rodzaju zadań, dokładności ich wykonania. Na przykład w robotach mobilnych najważniejsze informacje dostarczać będzie system wizyjny, a w robotach montażowych decydującą rolę odgrywać będą systemy sensoryczne dostarczające informacji o rodzaju kontaktu montowanych obiektów i występujących siłach. Jednak współczesne roboty przemysłowe nie są wyposażone w urządzenia sensoryczne umożliwiające im sterowanie siłą chwytu, lokalizowanie, identyfikowanie i badanie obiektów manipulacji, śledzenie ruchomych obiektów, unikanie przeszkód. **Spowodowane jest to z jednej strony tym, że oferowane sensory nie spełniają przemysłowych wymagań niezawodności, dokładności i ceny, a z drugiej strony przemysłowe systemy robotowe nie są przystosowane do współpracy z urządzeniami sensorycznymi, nie są w stanie opracować i wykorzystać informacji sensorycznych.** Na robota, wyposażonego w urządzenia sensoryczne, należy patrzeć z punktu widzenia mechatroniki, bowiem dodanie sensorów ma wielki wpływ na mechanikę, sterowanie i system informatyczny zarówno robota jak i wyposażenia peryferyjnego. Zbędne mogą okazać się urządzenia podająco-orientujące, gdyż pozycja i zorientowanie obiektu będzie określona przez system sensoryczny. Ulegnie zmianie układ sterowania, gdyż informacja z sensorów powinna być opracowywana, a podejmowane decyzje powinny uwzględniać systemy bazy wiedzy i sztucznej inteligencji. Niewątpliwie również konstrukcja robota mogłaby być lżejsza, gdyby urządzenia sensoryczne przejęły funkcje analizy przeciążeń i warunków pracy.

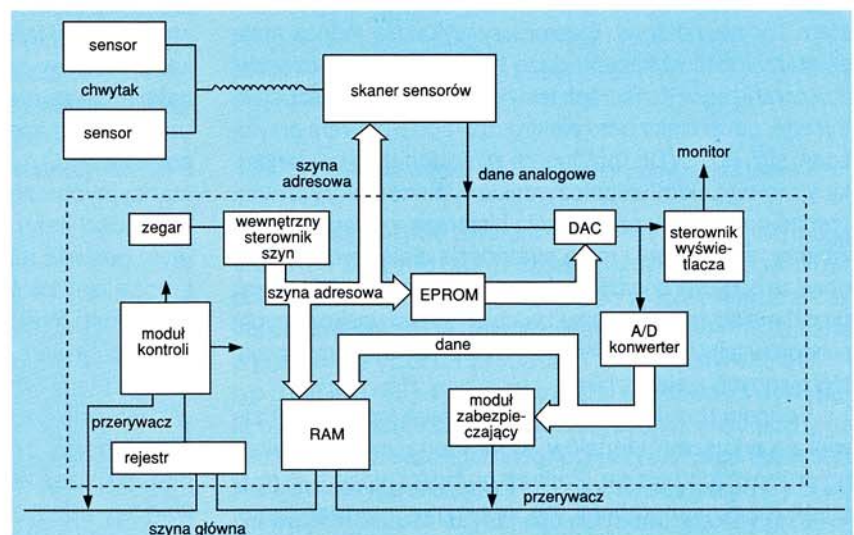
we właściwości użytkowe sensorów taktylnych nie dorównują właściwościom ludzkiego dotyku, ale są wystarczające do spełnienia wymagań zautomatyzowanej produkcji. Dzięki zastosowaniu sensorów taktylnych łatwym staje się określenie struktury, podatności, elastyczności, lepkości, przewodności elektrycznej, temperatury, siły, poślizgu oraz współczynnika tarcia [1].

Matryce urządzeń sensorycznych umieszczane są często w chwytaku, na wewnętrznej stronie końcówek chwytynych. Sensory taktylne umieszczone w chwytaku stwarzają możliwość bezpośredniego sterowania procesem chwytania, zarówno w fazie pobierania obiektu (korekcja położenia) jak i podczas manipulacji (przemieszczanie się obiektu). Sensor taktylny przeznaczony dla chwytaka robota powinien charakteryzować się następującymi cechami [2]: czułe elementy z rozdzielczością przestrzenną około 1 mm, duża wrażliwość na siły od 0,5 N do 10 N dla każdego elementu, duża szorstkość i podatność, szeroki zakres pracy, krótki czas odpowiedzi, częstotliwość pracy od 100 do 1000 Hz, mała histereza. Rzadziej wykorzystuje się sensory taktylne chwytaka do zbierania informacji o kształcie i zorientowaniu obiektu [3], (np. uzyskiwanych w trakcie kolejnych prób chwytania lub obejmowania przedmiotu) albo o położeniu obiektu (czasochłonne jest przeszukiwanie przestrzeni roboczej).

Użycie dwóch sensorów na każdej z końcówek chwytaka umożliwi porównanie dwóch obrazów, zwiększenie zakresu obserwowanych naprężeń, dodawanie i odejmowanie sygnałów, co umożliwi zwiększenie dokładności przeprowadzonego badania i eliminację błędnych informacji. Jeszcze większe możliwości zbierania informacji o obiekcie stwarza przestrzenne ukształtowanie sensora taktylnego na wzór ludzkiego palca [4].

## Przeznaczenie sensorów taktylnych

Czucie taktylne definiowane jest jako zdolność czucia dotyku i możliwość odczuwania stopniowanych wartości siły nacisku. Taktylne urządzenia sensoryczne przeznaczone są do zbierania informacji o bezpośrednim (dotykanym) otoczeniu robota, a w szczególności o położeniu, orientacji i kształcie obiektu manipulacji. Sensory taktylne mogą przekazywać nie tylko informacje o kontakcie z otoczeniem – mogą również mierzyć wartość i kierunek siły w obszarze styku. Przez sensor taktylny rozumie się zespół gęsto upakowanych czujników, tworzących matryce: jedno- (linijka) lub dwuwymiarowe. Standardo-



Rys. 1. Schemat systemu komputerowego do analizy informacji z sensorów taktylnych umieszczonych w końcówkach chwytaka

Ważnym aspektem w praktycznym zastosowaniu sensorów taktylnych jest wyposażenie urządzenia w system przetwarzający i analizujący sygnały wychodzące z czujnika, mający na celu identyfikację kształtu przedmiotu na podstawie pomiaru nacisków na poszczególne fragmenty czujnika. Schemat komputerowego systemu [5], który może być zastosowany do czujnika taktylnego przedstawiony jest na rys. 1.

Typowe zadania urządzeń i układów taktylnych związane są więc z:

- 1) pomiarami i sterowaniem parametrami:
  - a) chwytania, w przypadku wykonywania przez robota zadań transportowych,
  - b) obróbki, w przypadku wykonywania przez robota zadań technologicznych;
- 2) rozpoznawaniem obiektu manipulacji, w tym:
  - a) wykrywaniem obecności obiektu,
  - b) rozpoznawaniem położenia i zorientowania obiektu,
  - c) rozpoznawaniem kształtu;
- 3) pomiarami i sterowaniem umiejscowienia obiektu manipulacji.

Pierwsze informacje o zastosowaniach sensorów taktylnych do rozpoznawania kształtu ukazały się w latach 1974-76 [6, 7]. Były to rozwiązania typowo mechaniczne, w których podparte sprężyną trzpienie przemieszczały się w korpusie (ustawione liniowo albo w płaszczyźnie) i działały jako czujniki przemieszczenia. Na podstawie informacji o wielkości przemieszczeń poszczególnych czujników uzyskiwano wyobrażenie kształtu chwytej powierzchni. Dzięki miniaturyzacji również obecnie [8] prowadzi się eksperymenty z tego typu czujnikami taktylnymi, umożliwiającymi chwytanie z siłą 240 N.

Współczesne rozwiązania sensorów taktylnych dotyczą głównie elastycznych okształceń arkuszy materiałów. **Wyróżnić można dwa typy sensorów: sensory siły (piezorezystywne i piezoelektryczne) i sensory przemieszczenia (pojemnościowe, magnetyczne, optyczne, ultradźwiękowe).**

Sensory taktylne siłowe piezorezystywne zawierają warstwę przewodzącego elastomeru (z zawartością cząstek węgla lub srebra), którego oporność zmienia się ze wzrostem siły zewnętrznej. Elastomery wykazują jednak małą powtarzalność wskazań i dużą histerezę. Coraz częściej stosowane są w sensorach taktylnych materiały piezoelektryczne, generujące prąd elektryczny pod wpływem przyłożonej siły, np. PVDF (polifluorek winylidenu) charakteryzujący się wysokim współczynnikiem piezoelektrycznym, bardzo dobrą liniowością i małą histerezę, odpornością na zmiany temperatury i małą stratnością dielektryczną. Najnowsze badania dotyczą połączeń polimerów z silikonami, umożliwiającymi budowanie zwartych (gęsto upakowanych) sensorów taktylnych, o wysokiej rozróżnialności, często zintegrowanych z elektroniką.

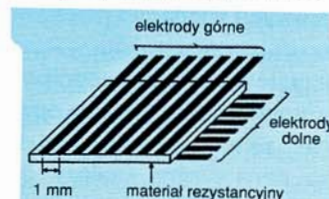
Sensory taktylne przemieszczeniowe (ugięciowe) zawierają arkusze materiałów, które mogą zmieniać lokalną grubość lub ugięcie. Zmiana grubości może być mierzona różnymi metodami, np. optycznie, magnetycznie, pojemnościowo, czujnikami tensometrycznymi, za pomocą fali akustycznej (impulsów ultradźwiękowych), wykorzystując przewodność właściwą materiału.

## Przegląd budowy sensorów taktylnych

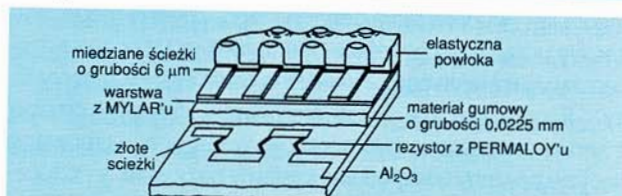
### Sensory taktylne siłowe

Do budowy siłowych sensorów taktylnych wykorzystuje się zarówno materiały o różnych właściwościach, jak i różne metody wykrywania działających sił. Materiał stosowany w czujniku powinien charakteryzować się następującymi cechami: zmiennością oporu wraz ze zmianą naprężeń w poszczególnych punktach całej tablicy, minimalnym oporem, dobrą powtarzalnością, małą histerezę, odpornością na zmęczenie, stałość charakterystyki. Ważnym czynnikiem jest powiązanie siły (reakcja napotkanego przedmiotu na siłę chwytania) jaką napotyka chwytak robota i zmiany rezystancji elementarnego czujnika. Materiał gumowy spełnia istotne funkcje, łatwo zmienia swój kształt, jest łatwy do modelowania; siła działająca na powierzchnię materiału gumowego powoduje wzrost globalnego naprężenia; materiał gumowy może być ściśnięty o więcej niż 1/3 pierwotnej grubości.

Podstawową konfigurację matrycy oporowej [5] stanowią dwie prostopadłe płaszczyzny równoległych elektrod oddzielonych od siebie piezorezystancyjnym materiałem (rys. 2). Punkt tablicy definiowany jest na przecięciu prostopadłych elektrod, znajdujących się na dwóch płaszczyznach.

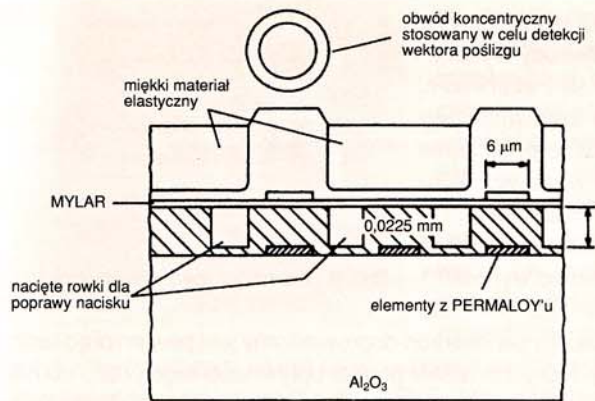


Rys. 2. Schemat matrycy oporowej



Rys. 3. Schemat konstrukcji czujnika magnetyczno-rezystancyjnego

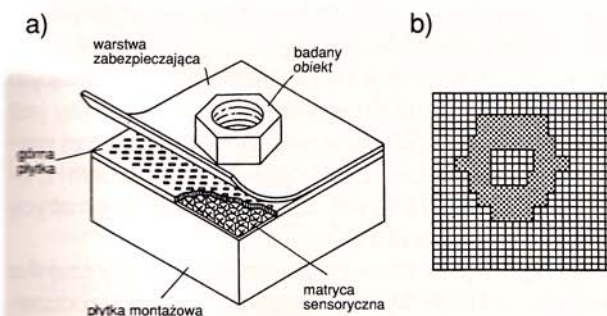
Na rysunku 3 przedstawiono schemat budowy magnetyczno-rezystancyjnego sensora taktylnego [9], w postaci cienkiej folii (matrycy), pokrytego elastyczną powłoką, z której wystają płasko zakończone druty. Grubość całej matrycy nie przekracza 2,5 mm (wymiar ten zawiera warstwę gumową, czujniki magnetorezystancyjne oraz podłoże  $Al_2O_3$ ). Sensor wykonany jest z magnetorezystancyjnych czujników, składających się z elementów o długości boku 2,5 mm (wielkość elementów, a tym samym gęstość tej matrycy zależna jest od klasy czujnika i może być zwiększona). Na powierzchni o wymiarach 25x25 mm mieszczą się 64 elementy. Szczegółową budowę czujnika przedstawiono na rys. 4. Elementy czynne o rezystancji 50  $\Omega$  wykonane są z magnetorezystywnego materiału (jest to stop 81-19 Ni-Fe). Zakres przenoszonych sił oraz czułość sensora taktylnego można zmieniać poprzez zwiększenie sztywności oraz grubości warstwy elastycznej. Wykonanie przewodzących elektrod ze stopu Ni-Fe odbywa się w procesie fotolitografii, w technologii stosowanej przy wytwarzaniu układów scalonych o wielkim stopniu upakowania elementów.



Rys. 4. Szczegółowa budowa czujnika magnetyczno-rezystancyjnego

Najdokładniejsze maski wykonywane są na specjalnym rodzaju szkła, zaś sieć połączeń trawiona jest w srebrze napyłonym na to szkło. W następnej kolejności trawiony materiał pokrywa się emulsją światłoutwardzalną i nasświetla przez określony czas promieniami ultrafioletowymi. Następną operacją jest wyflukanie nieutwardzonej emulsji i pokrycie tych miejsc specjalnym materiałem odpornym na czynnik trawiący podłoże.

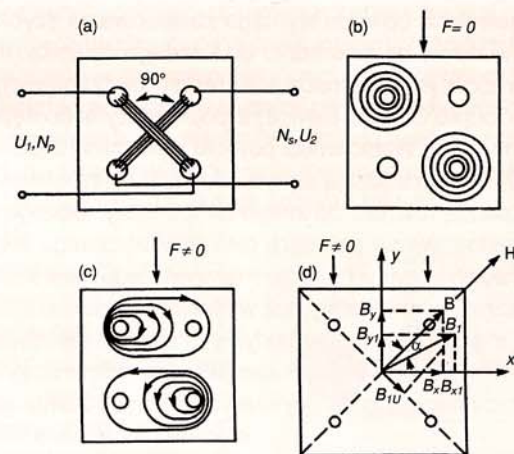
W magnetorezystancyjnym sensorze taktylnym wykorzystano zasadę magnetostrykcji [10], polegającą na występowaniu zjawiska zmiany pola magnetycznego podczas przyłożenia zewnętrznego obciążenia (ściskania lub rozciągania) na ten materiał. W sensorach taktylnych znalazły zastosowanie systemy magnetorezystancyjne, w których upływ przestrzenny zmienia się w zależności od obciążenia i kierunku działania wektora siły. Kierunek indukcji magnetycznej będzie się zmieniał o pewien kąt, a rzut składowej siły będzie prostopadły do drugiego zwoju (obszaru) indukcji magnetycznej. Strumień magnetyczny w drugim zwoju spowoduje powstanie napięcia elektrycznego w najbliższym uzwojeniu magnetycznym; napięcie to będzie proporcjonalne do siły działającej na ten element. Efekt ten może powstać pomiędzy dwoma prostopadłymi zwojami magnetycznymi. Budowa rzeczywistego sensora taktylnego, w którym zastosowano magnetorezystancyjny transkonduktor wykonany z materiału ferromagnetycznego VITROVAC4040, przedstawiono na rys. 5. Materiał ten jest stosowany ze względu na dużą czułość, dużą siłę przyciągania cząsteczkowego i wysoką rezystancję. Dzięki właściwościom magnetycznym czujnik sensoryczny jest mało wrażliwy na zmiany temperatury i przenikalność magnetyczną. Zaś próby eksperymentalne



Rys. 5. Budowa magnetorezystancyjnego sensora taktylnego: a) schemat konstrukcyjny, b) uzyskany obraz badanego obiektu

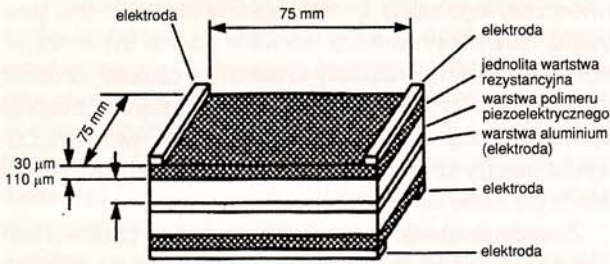
uwidoczniły jego zalety, tj.: mały błąd nieliniowości charakterystyki, niewielką histerezę, szerokie pasmo dynamiczne, niewielki błąd temperaturowy i znakomitą czułość. Grubość pojedynczego czujnika wynosi 3 mm; w czujniku znajduje się dziesięć oddzielnych obwodów pierwotnych i wtórnych. Odległość między czujnikami wynosi 2,5 mm. Matryca sensora składa się z 256 czujników.

Zasadę działania magnetoelastycznego czujnika taktylnego [11] przedstawiono na rys. 6. Uzwojenie pierwotne  $N_p$  i wtórne  $N_s$  nawinięte są na rdzeń pod kątem  $90^\circ$  względem siebie. Jeżeli rdzeń wykonany jest z materiału izotropowego i nie jest poddawany działaniu siły (rys. 6b) oraz uzwojenie wtórne jest otwarte, wówczas wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  jest zgodny z kierunkiem pola magnetycznego  $\vec{H}$  i może być rozłożony na dwie składowe  $\vec{B}_x$  i  $\vec{B}_y$  (rys. 6d). W tym przypadku  $\vec{B}$  jest równoległy do płaszczyzny wtórnego uzwojenia. Teoretycznie napięcie w drugim uzwojeniu  $U_2$  jest równe zero. Jeżeli rdzeń sensora jest obciążony zewnętrzną siłą (rys. 6c), wówczas składowe wektora indukcji nie są sobie równe (rys. 6d). Dla materiałów magnetycznych z dodatnią magnetostrycją przenikalność w kierunku  $y$  zmniejsza się i w związku z tym  $\vec{B}_{x1}$  jest większe od  $\vec{B}_{x2}$ . W konsekwencji indukcja  $\vec{B}_1$  zmienia kierunek o kąt  $\alpha$ . Wektor jest rzutowany w kierunku prostopadłym do płaszczyzny uzwojenia wtórnego.  $\vec{B}_{1u}$  wzbudza strumień magnetyczny w drugim uzwojeniu i generowane jest tam napięcie, które jest proporcjonalne do działającej siły  $F$ . Rdzeń czujnika wykonano z materiału bazującego na niklu.



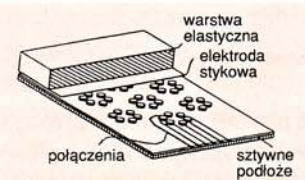
Rys. 6. Zasada działania magnetoelastycznego czujnika taktylnego

Sensory taktylne z warstwą piezoelektryczną [12] mogą zawierać dwa rodzaje piezoelektrycznych materiałów: polimery, które wykazują właściwości piezoelektryczne bez jakichkolwiek modyfikacji oraz polimery sztuczne z piezoelektrycznym proszkiem ceramicznym (PVDF – typ  $\beta$  i VDF/TrFE). Piezoelektryczne właściwości występują w materiałach, które wytwarzają ładunek elektryczny na skutek mechanicznego nacisku. Na rys. 7 przedstawiona jest schematyczna budowa czujnika, składającego się z pięciu warstw piezoelektrycznego polimeru i warstw przewodzących (grubość czujnika w przybliżeniu wynosi  $300 \mu\text{m}$ ). Warstwa aluminium, która jest wspólną elektrodą, umieszczona jest między warstwami polimeru, te zaś pokryte są



Rys. 7. Schemat budowy czujnika z warstwami piezoelektrycznego polimeru

jednostronnie warstwą rezystancyjną. Natomiast oddzielne elektrody umieszczone są na górnej oraz dolnej powierzchni czujnika. Stosowane są bardzo cienkie warstwy (film) polimeru PVDF, wystarczające do pomiaru siły. Główną zaletą piezoelektrycznego filmu jest jego plastyczność i elastyczność, dlatego może być stosowany na powierzchniach o nietypowych kształtach. Natomiast wadą jest niski poziom czułości, który jest dziesięć do pięćdziesięciu razy mniejszy od czułości jaką ma ceramika piezoelektryczna. Wykorzystując efekt piezoelektryczny można w bezpośredni sposób zamienić energię mechaniczną na elektryczną. W sensorach energia elektryczna może być magazynowana i wzmacniana jako ładunek elektryczny. Zastosowanie efektu piezoelektrycznego w czujnikach taktylnych stosowanych w chwytakach ogranicza się do sytuacji, w której części manipulowane szybko są chwytywane, transportowane i pozycjonowane (ze względu na występowanie błędów zmiennych w czasie). Duży upływ prądu w poszczególnych gałęziach obwodu wymaga zastosowania szybkich multiplexerów bezpośrednio do każdego czujnika. Inną możliwością jest zastosowanie rejestrów przesuwnych CCD (Couple Charge Device) z pojedynczymi dostępnymi komórkami. Właściwości powłoki wykonanej z polimeru PVDF nie ograniczają się tylko do efektu piezoelektrycznego, zależą również od zmian temperatury. Dlatego też przy zastosowaniu polimeru piezoelektrycznego PVDF w czujnikach taktylnych problem temperaturowy jest jednym z poważniejszych. Dlatego też w niektórych rozwiązaniach [13] w matrycy sensorów taktylnych stosuje się również termoelementy do pomiaru i kompensacji temperatury. Na rys. 8 przedstawiono dwuwymiarową matrycę zawierającą



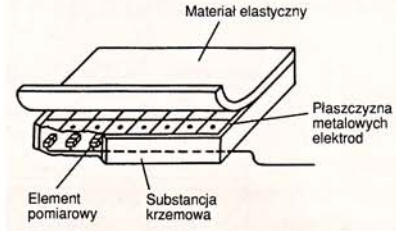
Rys. 8. Schemat budowy sensora taktylnego z czujnikiem temperatury

siedem wieloskładnikowych sensorów (każdy z nich zawiera sześć piezoelektrycznych polimerów oraz położony centralnie między nimi termoelement). Sensor zawiera 42 elementy, o powierzchni czynnej około 2,4 mm<sup>2</sup> każdy.

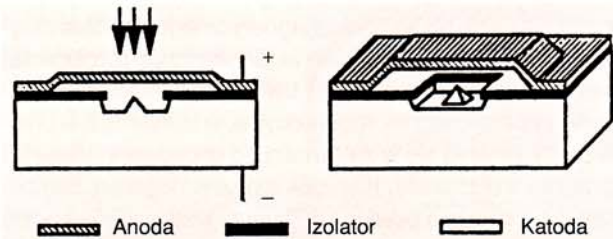
Na rys. 9 przedstawiono fizyczną budowę czujnika taktylnego wykonanego w technologii wysokiej skali integracji - VLSI [14]. Warstwa przewodzącego tworzywa sztucznego styka się bezpośrednio z obwodem wykonanym w technologii VLSI. Duże metalowe elektrody wykonane są na powierzchni układu scalonego metodą metalizacji (analogowe i cyfrowe elementy obliczeniowe wykonane są

bez tej warstwy). Elektrody wykonane są z aluminium, co zapewnia najlepsze połączenie tej warstwy układem scalonym. Typowa szerokość elektrod wynosi 0,1 lub 0,2 mm. Do każdej z par elektrod doprowadzany jest pewien prąd testowy, który umożliwia pomiar upływności tego prądu do najbliższych obszarów przewodzącego tworzywa. Pozwala to na określenie dopuszczalnej wartości deformacji (nacisku) w poszczególnych punktach matrycy. Odczyt siły działającej na czujnik odbywa się przez pomiar zmiany wartości rezystancji przewodzącego tworzywa sztucznego, które jest deformowane przez zewnętrzny nacisk.

Proces wytwarzania monolitycznego pojedynczego czujnika lub matrycy scalonych sensorów taktylnych opisano w pracy [15]. Schemat pojedynczego czujnika przedstawiono na rys. 10. Poszczególne czujniki (lub cała matryca) wykonywane są na podłożu Si, w pokojowej temperaturze poprzez trawienie; maskę wykonuje się w 0,5 μm warstwie



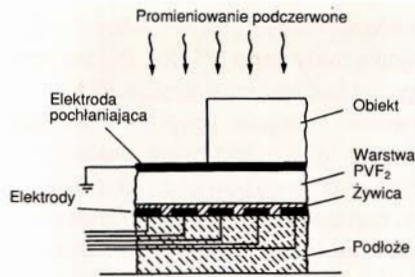
Rys. 9. Budowa czujnika w technologii VLSI



Rys. 10. Schemat budowy czujnika w technologii VLSI

dwutlenku krzemu, poprzez utlenianie w temperaturze 1100 °C. Zastosowanie azotanu kwasu amonowo-fluorowego pozwoliło na uzyskanie ostrzy zbliżonych do piramidalnych oraz umożliwiło kontrolę prędkości trawienia krzemu od 50 do 2000 Å/min. Trawiona powierzchnia jest bardzo gładka bez żadnych nierówności. Po wstępnym ukształtowaniu ostrza jego powierzchnia jest pokrywana naturalnym tlenkiem, którego przyrost uzyskuje się przez nagrzewanie w powietrzu o temperaturze ok. 150 °C. Następnie na ostrze jest nakładana rezystancyjna warstwa ochronna, która jednocześnie służy do odpowiedniego ukształtowania anody czujnika i odizolowania jej od katody. Odległość między anodą a ostrzem nie jest większa niż 1000 Å. Po naporowaniu 2 μm warstwy Al warstwa zabezpieczająca jest wypłukiwana i otwiera się okienko w metalu (aluminium) stanowiącym anodę. Następnie tak wykonany element zamykany jest w próżniowej komorze, gdzie pokrywany jest 3 - 4 mm warstwą SiO<sub>2</sub>. Najmniejsze czujniki z pojedynczym ostrzem i anodą mają rozmiar 20 x 20 μm, zaś największe mają matrycę 9 x 9 ostrzy z anodą 200 x 200 μm.

Na rys. 11 przedstawiono przekrój poprzeczny czujnika taktylnego, w którym wykorzystano promieniowanie podczerwone [16]. Sensor taki jest przeznaczony do detekcji przedmiotu leżącego na warstwie polimeru (fluorku winylidenu PVF<sub>2</sub>) naświetlanego promieniowaniem podczerwonym.

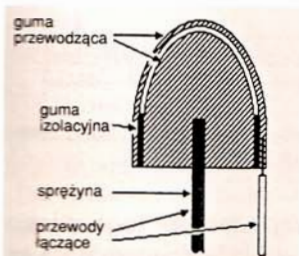


Rys. 11. Budowa czujnika taktylnego

W czujniku tym zastosowano piezoelektryczne i piroelektryczne właściwości polimeru  $PVF_2$  (polegające na wytwarzaniu ładunków elektrycznych przez materiał poddany działaniu temperatury). Pierwsza faza działania czujnika polega na pomiarze ładunków wytwarzanych przez polimer  $PVF_2$ , którego temperatura zmienia się na skutek działania promieniowania podczerwonego. W następnej fazie, gdy czujnik naciska na badany obiekt następuje identyfikacja obiektu przez pomiar zmiany właściwości piezoelektrycznych cienkiej warstwy  $PVF_2$ , proporcjonalne do nacisku wywieranego przez obiekt. Dwa niezależne elektroniczne bloki skanują powierzchnię polimeru  $PVF_2$ . Jeden blok generuje ładunki, które są przetwarzane przez indywidualne wzmacniacze prądowe o wysokiej impedancji na odpowiednią wartość napięcia i docierają do każdego z sensorów. Przez porównanie wartości napięcia z wartością odcięcia możliwe jest rozróżnienie ekranowanych sensorów od innych i w ten sposób zrekonstruowanie „cienia” obiektu na matrycy. Do zdobycia informacji o położeniu i orientacji używane są specjalne algorytmy, które są znacznie szybsze i prostsze od metod wizyjnych. Informacje te mogą być wykorzystane przez blok kontroli do sterowania trajektorią chwytaka. Drugi elektroniczny blok został zaprojektowany w celu dostarczania ciągłego sygnału (niebinarnego) wytwarzanego przez każdy czujnik  $PVF_2$  podczas pomiarów. W bloku tym ładunki wytwarzane przez czujniki  $PVF_2$  przechodzą przez analogowy multiplexer i wysyłane są sekwencyjnie do pojedynczego wzmacniacza. Wynikowy sygnał napięciowy jest przekształcany na cyfrowy (digitalizowany) i przetwarzany przez jednostkę kontrolną (komputer) w celu zidentyfikowania nacisku działającego na czujnik. Jako udoskonalenie płaskiej matrycy sensorycznej możliwe jest zbudowanie czujnika w postaci pojedynczego palca, lub całej sztucznej dłoni.

### Sensory taktylne przemieszczeniowe

Dotknięcie sensorem obiektu i określenie siły nacisku można również realizować przez pomiar odkształceń (deformacji), postępując się czujnikami przemieszczenia. Dokładność pomiaru siły zależna jest od właściwości elastycznych materiału, z którego wykonany jest czujnik i od dokładności wykonania przetworników.

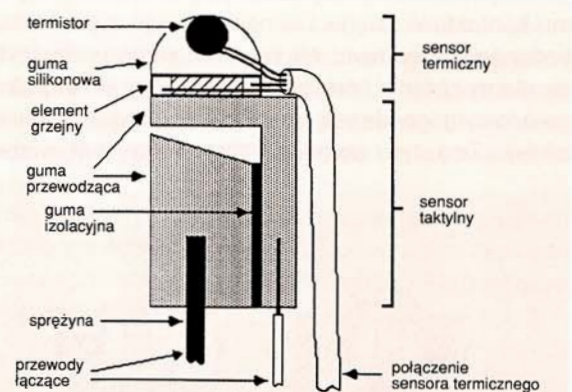


Rys. 12. Schemat sensora taktylnego z warstwami przewodzącej gumy

Do badania trójwymiarowego otoczenia [17] zastosowano miniaturowy sensor taktylny, którego koliste zakończenie składało się z dwóch warstw przewodzącej gumy, oddzielonych warstwą powietrza (rys. 12). Siła pojawiająca się podczas

dotknięcia czujnikiem obiektu powoduje odkształcenie warstwy powierzchniowej i zaistnienie kontaktu obu przewodzących warstw gumy. W tej samej pracy [17] zastosowano czujnik termiczny jako sensor taktylny. Na rys. 13 w dolnej części przedstawiono schemat czujnika taktylnego, zawierającego dwie warstwy przewodzącej gumy, a w górnej części czujnik termiczny, składający się z rezystora (jako źródła ciepła) i termistora. Jeżeli czujnik termiczny dotknie zewnętrznego obiektu, to temperatura czujnika obniży się na skutek transmisji ciepła. Spadek temperatury (albo wzrost przy chwytaniu gorących obiektów) zarejestrowany przez termistor zależnie będzie od charakterystyki termicznej chwytanego obiektu.

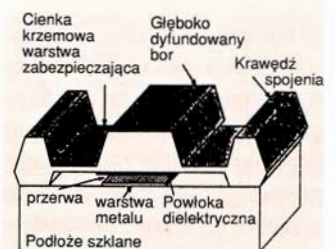
dotknięcia czujnikiem obiektu powoduje odkształcenie warstwy powierzchniowej i zaistnienie kontaktu obu przewodzących warstw gumy. W tej samej pracy [17] zastosowano czujnik termiczny jako sensor taktylny. Na rys. 13 w dolnej części przedstawiono schemat czujnika taktylnego, zawierającego dwie warstwy przewodzącej gumy, a w górnej części czujnik termiczny, składający się z rezystora (jako źródła ciepła) i termistora. Jeżeli czujnik termiczny dotknie zewnętrznego obiektu, to temperatura czujnika obniży się na skutek transmisji ciepła. Spadek temperatury (albo wzrost przy chwytaniu gorących obiektów) zarejestrowany przez termistor zależnie będzie od charakterystyki termicznej chwytanego obiektu.



Rys. 13. Podwójny sensor taktylny

Pojemnościowy czujnik taktylny wykorzystuje jedną z możliwości pomiaru przemieszczenia jaką jest pomiar odległości między dwoma prostopadłymi warstwami kondensatorów – zmianę pojemności. Zastosowanie matrycy elektrod pozwala na rozmieszczenie dużej ilości elektrod na niewielkiej powierzchni. Umieszczenie elastycznej matrycy będącej dielektrykiem pomiędzy płaszczyznami elektrod pozwala na uzyskanie sensora taktylnego.

Na rys. 14 przedstawiono przekrój poprzeczny pojedynczego czujnika taktylnego pojemnościowego o budowie mostkowej [18] (sensor taktylny zawiera matrycę 32 x 32 elementów krzemowych o 8-bitowej rozdzielczości). Każdy z elementów matrycy o grubości 500  $\mu m$  ma strukturę mostkową,

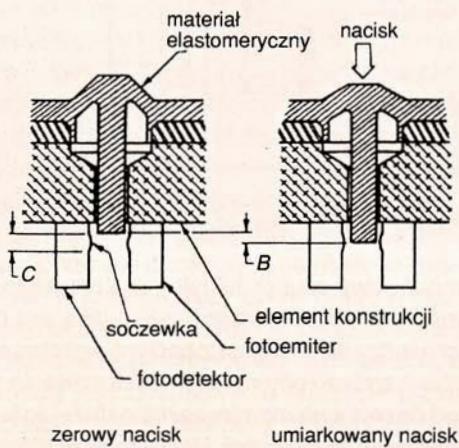


Rys. 14. Przekrój poprzeczny czujnika

zn. po obu jego stronach znajdują się sztywne podpory. Przyłożona siła ugina środkową część mostu proporcjonalnie do wartości siły, co jest powodem zmiany pojemności pomiędzy warstwą krzemu a warstwą metalu znajdującą się na szklanym podłożu. Układy sterujący i odczytujący wykonane są w postaci układów scalonych. Obydwa układy montowane są na tym samym podłożu, co matryca taktylna. Rzeczywista matryca wykonana była przy zastosowaniu specjalnej technologii krzemowo-szklanej, umożliwiającej uzyskanie matrycy 64 x 64 elementów o wymiarze 250  $\mu m$  o 6-bitowej rozdzielczości.

W czujniku pojemnościowym z przemieszczającym się dielektrykiem [19] w szczeliny pomiędzy dwoma współśrodkowo umieszczonymi cylindrami przemieszcza się mechanizm z materiału dielektrycznego o dużej przenikalności elektrycznej względnej (stałej dielektrycznej). Po zbudowaniu matrycy takich czujników można mierzyć przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni matrycy. Pojedynczy czujnik w postaci kondensatora cylindrycznego umieszczony jest na płytce obwodu drukowanego. Pionowo poruszający się element dielektryczny zamocowany jest w elastycznej membranie, która ustala również ostrze czujnika w pozycji wyjściowej po ustąpieniu nacisku.

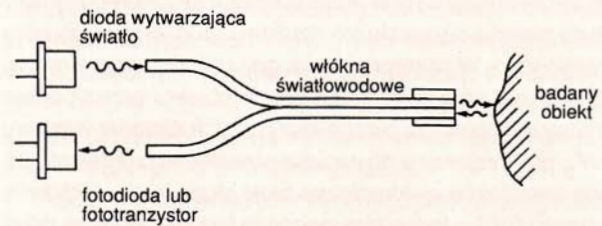
Informacja taktylna jest otrzymywana dzięki fizycznemu kontaktowi czujnika sensorycznego z powierzchnią badanego przedmiotu. Na rys. 15 przedstawiony jest elementarny czujnik przemieszczenia [20] – matryca sensora taktylnego składa się z 64-elementowej siatki czujników. Ten typ czujnika zbudowany jest z dwóch



Rys. 15. Przekrój poprzeczny elementarnego czujnika

integralnych części. Pierwsza część jest mechaniczna i umożliwia wykrycie przemieszczenia zaistniałego na zewnętrznej stronie czujnika (służy jako deflektometr). Druga wykorzystuje zjawiska elektrooptyczne-mechaniczne przemieszczenie zamieniane jest na sygnały elektryczne przekazywane dalej do procesora. Mechaniczna część czujnika (zewnętrzna warstwa) powinna być podatna na nacisk. Integralną częścią elastycznej warstwy jest „nóżka” wykonana z tego samego materiału, który pod wpływem nacisku przesuwają się w dół struktury czujnika. Końcówka nóżki wystaje poza warstwę elastyczną. Wartość o jaką wysunięta jest nóżka zmienia się wraz ze wzrostem nacisku na powierzchnię czujnika. Podstawowym zespołem części elektrooptycznej jest zespół fotoemiter-fotodetektor, przyporządkowany każdemu elementarnej czujnikowi. Emiter i detektor umieszczone są naprzeciw siebie w niewielkiej odległości. Światło wysyłane przez emiter i odbierane przez detektor może być częściowo (lub całkowicie) przesłonięte przez nóżkę warstwy elastycznej przemieszczającej się pod wpływem nacisku na powierzchnię sensora. Jako emiter światła można zastosować diodę LED, zaś jako detektor-fototranzystor.

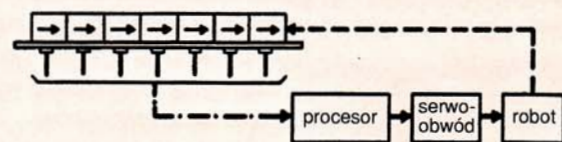
Podstawową zasadą wykorzystaną do budowy optoelektronicznego czujnika taktylnego [21, 22, 23] jest detekcja światła odbitego od badanej powierzchni. W tym rodzaju czujnika światło biegnie poprzez włókna światłowodowe od źródła, którym jest dioda elektroluminescencyjna, w kierunku badanej powierzchni, od której się odbija i powraca poprzez drugie włókno światłowodowe padając na fotodetektor (rys. 16). W sensorach optycznych stosuje się modulację fazy albo modulację amplitudy światła. Jako najważniejsze zalety sensorów elektrooptycznych podaje się [23]: niewrażliwość na im-



Rys. 16. Czujnik taktylny ze światłowodami

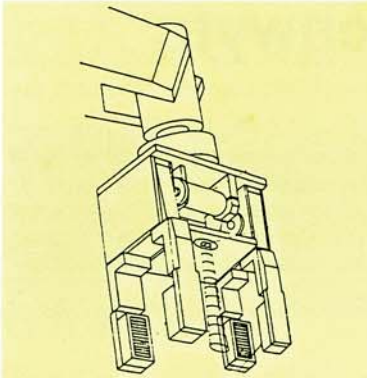
pulsy i pola elektromagnetyczne, wewnętrzne bezpieczeństwo na środowisko wybuchowe, wysoka izolacja elektryczna, bierne działanie (nie jest wymagana energia i elektronika w punkcie styku). Główną niedogodnością stosowania optycznych sensorów taktylnych jest zależność charakterystyki od stanu odbijającej powierzchni (krzywizny, barwa, chropowatość itp.).

Czujnik taktylny wykorzystujący moment dipolowy [24] przedstawiono na rys. 17 (schematyczny przekrój poprzeczny matrycy oraz schemat blokowy układu sterowania). Sensor zawiera matrycę mikroskopijnych transkonduktorów. Każdy element składa się z magnetycznego dipola umieszczonego w elastycznym ośrodku o podłożu zawierającym magnetorezystancyjne detektory. Wysokość tej warstwy nie przekracza 1 mm. Magnetyczny dipol w elastycznym ośrodku i magnetorezystancyjne podłoża znajdują się na równoległych płaszczyznach. Mechanizm działania pojedynczego sensora jest następujący: siła działająca na sensor zniekształca elastyczny ośrodek, w którym są umieszczone transkonduktory, powoduje to przesunięcie magnetycznego dipola względem magnetorezystorów, które wykrywają zmianę pola magnetycznego i wytwarzają sygnał elektryczny, przekazywany do ze-



Rys. 17. Przekrój poprzeczny matrycy oraz schemat blokowy układu sterowania taktylnego sensora dipolowego

wewnętrznej tablicy (pamięci mikroprocesora). Tego rodzaju sensory magnetyczne wykorzystujące zjawisko Halla są często stosowane ze względu na łatwość wykonania i wykrywania przemieszczeń równoległych do podłoża. Konfiguracja magnetorezystancyjnych sensorów jest uzależ-



**Rys. 18.** Widok chwytaka z sensorami taktylnymi, ultradźwiękowymi i siły

niona od siły i kierunku jej działania. Magnetorezystory wykonane są ze stopu ferromagnetycznego o składzie: 19% Fe i 81% Ni. Z powodu niewielkich rozmiarów sensorów możliwe jest zrobienie elektrycznych połączeń z każdym elementem poprzez wykonanie podłoża w technologii układu

scalonego. Dobrym materiałem jest SYLGARD, o podłożu z żywicy krzemowej.

W zastosowaniach chwytaków robotów dużą wagę przywiązuje się do budowy systemów wielosensorycznych. Jakkolwiek informacja taktylna może zawierać również dane o sile chwytu, to projektowane są również rozwiązania z oddzielnym systemem pomiarowym siły [25]. Na rys.18 przedstawiono schemat końcówki chwytnej z matrycą taktylną, podpartą sprężyną – przemieszcze-

nie sensora taktylnego jest proporcjonalne do działającej siły. Widok chwytaka z sensorami taktylnymi, ultradźwiękowymi i siły przedstawiono na rys. 18 [25].

## Konkluzje

Jakkolwiek liczba prac teoretycznych dotyczących sztucznego zmysłu dotyku jest bardzo duża (np. w komputerowej bazie danych INSPEC za lata 1989-1996 zarejestrowano prawie 300 referatów), to rzeczywistych zastosowań w robotyce i maszynowej percepcji jest niewiele. Jest to spowodowane nie tylko brakiem niezawodnych i dokładnych matryc sensorów taktylnych, lecz także trudnościami w pozyskiwaniu, obróbce i komputerowej analizie sygnałów.

**Współczesny postęp w technologii materiałów i miniaturyzacji środków elektroniki, a także nowe generacje komputerów stwarzają szansę stworzenia sztucznego systemu taktylnego do zastosowań w robotyce.**

Niewątpliwie przyszłościowymi rozwiązaniami są sensory taktylne wykonane w technologii wysokiej skali integracji, umożliwiające budowanie matryc z kilkuset czynnych elementów.

## Bibliografia:

- [1] Wang S.S.M., Will P.M.: Sensors for computer controlled mechanical assembly. *The Industrial Robot*, March 1987, pp. 9-18.
- [2] Bao C., van Brussel H.: A sensor controlled gripper system. *Robotics and Autonomous Systems*, 6/1990, pp. 283-295.
- [3] Pugh A.: Robot sensors. v. 2 Tactile and Non-vision. IFS (Publications) Ltd, UK, 1986.
- [4] Fearing R.S.: Tactile sensing mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, v. 9, No. 3, 1990, pp. 3-9.
- [5] Roberston B.E.: Tactile sensor system for robotics. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 89-98.
- [6] Takeda S.: Study of artificial tactile sensors for shape recognition. *Proc. 4th Int. Symp. on Industrial Robots*, Tokyo, 1974, pp. 199-208.
- [7] Page C.J., Pugh A., Heginbotham W.B.: Novel techniques for tactile sensing in a three-dimensional environment. *Proc. 6th Int. Symp. on Industrial Robots*, Nottingham, UK, 1976, pp. C4/33-46.
- [8] Mehdian M., Johns-Rahnejat P.M., Rahnejat H.: Elastostatic contact imaging for a mechanoreceptive tactile device. *Robotica*, 1993, v. 11, pp. 329-337.
- [9] Vranish J.M.: Magnetoresistive skin for robots. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 99-112.
- [10] Ren-Chyuan L., Fuling W.: An imaging tactile sensor with magnetostrictive transduction. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp.113-122.
- [11] Checinski S.S.: Magnetoelastic tactile sensor. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 229-236.
- [12] Nakamura Y., Hanafusa H.: A piezoelectric film sensor for robotic end-effectors. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 247-260.
- [13] Rossi D.D., Canepa G., Magenes G., Germagnoli F., Caiti A., Parisini T.: Skin-like tactile sensor arrays for contact stress field extraction. *Material Science and Engineering*, C1, 1993, pp.23-36.
- [14] Raibert M.H., Tanner J. E.: Design and implementation of a VLSI tactile sensing computer. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 157-178.
- [15] Jiang J.C., Faynberg V., White R.C., Allen P.K.: Fabrication of micromachined silicon tip transducer for tactile sensing. *J. Vac. Sci. Technol. B* 11(6), Nov/Dec 1993, pp. 1962-1967.
- [16] Dario P., Bicchi A., Fiorillo A.: A sensorised scenario for basic investigation on active touch. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 237-247.
- [17] Russell A.: Tactile sensing of 3-dimensional surface features. *Robotica*, 1990, v.8, pp.111-115.
- [18] Kenichiro S.: High - density tactile sensor arrays. *Advanced Robotics*, Vol. 7, No. 3/1993, pp. 283 - 287.
- [19] Jaywant B.V., Onori M.A.: Robot tactile sensing: a new array sensor. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp.199-208.
- [20] Rebman J., Morris K.A.: A tactile sensor with electrooptical transduction. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 145-156.
- [21] Marszalec E., Marszalec J.: Światłowodowy czujnik dotyku/ciśnienia do zastosowań w robotyce i automatyce przemysłowej. *Prace naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej*, nr 77, 1988, str. 145-152.
- [22] Crosnier J. J.: Grasping systems with tactile sense using optical fibres. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp. 209-218.
- [23] Ristic R., Benhabib B., Goldenberg A.A.: Analysis and design of a modular electrooptical tactile sensor. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.5, no.3, June 1989, pp. 362-365.
- [24] Hackwood S., Beni G.: Torque-sensitive tactile array for robotics. Alan Pugh „Robot sensors. Tactile and Non-vision”. IFS Ltd, UK, 1986, pp 123-131.
- [25] Schmid D., Hardter H., Michalak E.: Taktile Sensoren für Adaptive Multisensorielle Greifersysteme. *Robotersysteme*, 1988, no. 4, s.157-160.

# Abstracts

## **Tactile Sensors**

**Jan Barczyk** – p. 5

This paper presents an overview of recent and current research on tactile sensors for robot control. In particular, new developments and trends in tactile sensing matrices are discussed. *Keywords:* tactile sensing, sensory control, sensory gripper, piezoresistive sensors, piezoelectric sensors, electrooptical sensors, force sensors.