

# Rola czujników w planowaniu chwytu

mgr inż. Piotr Szabelak  
Instytut Techniki Lotniczej  
i Mechaniki Stosowanej  
Politechniki Warszawskiej

Omówiono rolę czujników w problemie planowania chwytu. W układach manipulatorów z chwytakiem czujniki są niezbędne do zbierania informacji. Dane te są wykorzystywane w planowaniu chwytu: do określenia trajektorii podejścia chwytaka do przedmiotu, wyznaczenia właściwego chwytu przedmiotu i określenia trajektorii odejścia (ruch transportowy lub montażowy). Omówiono poszczególne rodzaje czujników, sposoby agregacji otrzymywanych z nich danych oraz zastosowanie czujników do aktywnego śledzenia.

Automatyzacja produkcji w przemyśle powinna zwiększać produktywność i uwalniać ludzi od monotonnej, ciężkiej czy niebezpiecznej pracy. Proste, powtarzalne czynności mogą być obecnie względnie łatwo zautomatyzowane, z kolei inne zadania mogą być tak zaprojektowane, aby je dostosować do tej nowej technologii. Jednak do wykonywania zadań w zmieniającym się otoczeniu należy stosować jeszcze bardziej „inteligentne” (autonomiczne) roboty, niż spotykane dotychczas.

Podczas pracy autonomicznego robota (manipulatora) wyróżnić można cztery procesy:

- zbieranie danych przez czujniki,
- interpretację danych,
- wnioskowanie,
- manipulowanie przedmiotami.

W najlepszym przypadku te cztery procesy powinny być wykonywane jednocześnie, w czasie rzeczywistym, i w taki sposób, aby każdy z nich dostarczał informacji pozostałym. Autonomiczny robot powinien stale realizować sprzężenie z otoczeniem i dostosowywać swoje zachowanie do zachodzących w tym otoczeniu nieoczekiwanych, niewielkich zmian.

## Rodzaje czujników

Różnorodność zastosowań robotów i waga wykonywanych przez nie zadań sprawiają, że przy wyposażaniu ich w czujniki korzysta się z różnorodnych rozwiązań. W robotyce spotkać można liczne stosowane w technice czujniki i metody pomiarowe, włącznie z algorytmami do obróbki danych.

Metody pomiaru dzielimy na:

- zdalne: wizja, termowizja, pomiary ultradźwiękowe, pomiary w podczerwieni, pomiary odległości lub skanowanie wiązką laserową,
- kontaktowe (dotykowe): czujniki taktylne (w tym wąsy), wirtualne czujniki dotyku (punkty kontaktu z członami wyznaczane na podstawie momentów w przegubach), poślizgu i zderzeń, sił i momentów.

Ponadto czujniki stosowane w robotyce można podzielić na:

- wewnętrzne – dostarczające informacje o stanie manipulatora, chwytaka,
- zewnętrzne – dostarczające informacje o stanie otoczenia.

Typowe czujniki wewnętrzne to czujniki położenia kątowych (enkodery) stosowane w manipulatorach o parach obrotowych. Przykładami czujników zewnętrznych są wymienione wyżej czujniki zdalne i kontaktowe.

## Wizja, termowizja

Spośród wszystkich metod rozpoznawania otoczenia, najczęściej stosowane i najlepiej opracowane są metody wizyjne. Spotyka się wiele różnorodnych opracowań, w większości z nich obraz z kamery (a w stereowizji – z dwóch kamer) jest analizowany w celu ekstrakcji informacji o otoczeniu, w tym o kształcie, położeniu i orientacji obiektów. Stosuje się także metodę śledzenia obiektów i ocenę ich prędkości ruchu. W wielu przypadkach wizja jest jednym z wielu czujników. Często obliczenia prowadzi się w czasie rzeczywistym. Metody wizyjne są obecnie szeroko rozpowszechnione, są stale obiektem intensywnych badań i znajdują bardzo wiele zastosowań.

## Czujniki ultradźwiękowe

Wśród tego typu czujników spotyka się dwa główne typy: mierzące zmiany propagacji fali akustycznej (do pomiarów natężenia przepływu gazów i cieczy, także temperatur) i (najczęściej stosowane w robotyce) czujniki odległości/obecności, wykrywające odbicia fal od obiektów i oceniające ich czas powrotu i amplitudę. Ta druga grupa czujników umożliwia:

- wykrywanie nieruchomych i poruszających się przedmiotów,
- pomiar odległości od obiektów oraz ich pozycji,
- określanie struktury obiektu – przez częściową separację echa, filtrację, klasyfikację z zastosowaniem logiki rozmytej i/lub sieci neuronowych,
- wyznaczanie faktury powierzchni – z użyciem technik korelacyjnych, holografii,
- rozpoznawanie obiektów trójwymiarowych,
- wykrywanie ruchu, wyznaczanie prędkości ruchu, natężenia przepływu, trajektorii i prędkości ruchu nad ziemią – dzięki wykorzystaniu efektu Dopplera.

Do zalet tych czujników należą: niski pobór mocy, niski koszt oraz (wykorzystywane w czujnikach odległości): kierunkowość wiązki, duża szerokość pasma wykorzystywanych częstotliwości, zdalny pomiar, wykrywanie obiektów z różnych materiałów, odporność na wilgoć, zanieczyszczenia, duża trwałość, dobra stabilność parametrów technicznych w długich okresach czasu.

W robotyce służą one najczęściej do rozpoznawania otoczenia i pomiarów odległości od obiektów. Czasem spotyka się rozwiązania konstrukcyjne, w których czujniki te tworzą listwy lub macierze. W tym drugim przypadku, dane po wstępnej obróbce mogą być dalej przetwa-

rzane przy użyciu algorytmów stosowanych dla obrazów wizyjnych. W tego typu urządzeniach typowym zabiegiem jest ustalenie odpowiedniej sekwencji wyzwalania poszczególnych czujników macierzy, co ma zapobiegać wzajemnemu ich zakłócaniu.

Spotyka się także praktyczne zastosowania tych czujników do inspekcji warstwy powierzchniowej (do kilku milimetrów).

## Czujniki laserowe

Coraz częściej roboty wyposaża się w laserowe czujniki odległości, działające też w układzie skanerów przestrzeni.

Prosty czujnik odległości działa na zasadzie pomiaru czasu powrotu wiązki odbitej od obiektu. W skanerach laserowych instaluje się obrotowe zwierciadło, przez obracanie którego uzyskuje się efekt omiatania przestrzeni wiązką lasera. Można już spotkać takie rozwiązania, w których nie ma zwierciadła, a obracany jest cały generator wiązki – wymaga to jednak użycia precyzyjnych i szybkich silniczków.

Najczęściej spotykanym i najtańszym generatorem wiązki laserowej są laserowe diody półprzewodnikowe emitujące światło widzialne.

## Czujniki podczerwieni

Obecnie nie są stosowane zbyt często, ustępując powoli miejsca czujnikom ultradźwiękowym i laserowym. Służą głównie do pomiaru zbliżenia oraz odległości od obiektów. Można znaleźć ich zastosowanie do skanowania przestrzeni wiązką podczerwoną w pewnym zakresie kątowym. Dane z tych pomiarów czasem łączy się z danymi z innych czujników, np. czujnika ultradźwiękowego.

## Czujniki dotykowe

W miarę jak konstrukcja chwytaków umożliwia manipulację coraz bardziej zbliżoną do manipulacji ręką ludzką i w miarę jak pojawiają się nowe technologie, zmysł dotyku w zastosowaniach robotowych nabiera coraz większej wagi. W ostatnich latach pojawiło się dużo opracowań, dotyczących zarówno projektowania czujników dotykowych (taktylnych), jak i układów interpretujących dane z nich pochodzące.

W uproszczeniu czujnik taktylny składa się z macierzy niewielkich czujników nacisku rozmieszczonych obok siebie na elastycznym podłożu i przykrytych wierzchnią warstwą ochronną. Macierze te mają określoną rozdzielczość np. rzędu 1 mm, po 16x16 lub 64x64 elementów, grubości od 0,5 do kilku milimetrów. Każdy element macierzy ma wyprowadzenia na zewnątrz, więc jego stan może być monitorowany przez układ sterujący macierzy. Elementy działają na zasadzie zmian różnych właściwości pod wpływem nacisku, np. zmiany rezystancji gumy, piezoelektryczny, ciśnienie cieczy lub gazu.

Pojawiają się już prace na temat zagadnień związanych z wykorzystaniem czujników taktylnych w konkretnych zastosowaniach: do montażu elementów chwytaków

z miękkimi palcami, odbierania bodźców dotykowych przez chwytak przy zdalnej manipulacji, rozpoznawania kształtu i twardości obiektów, czy też sterowania siłą nacisku palca w strefie kontaktu z przedmiotem. W tym ostatnim przypadku, jako medium użyto żelu elektreologicznego, którego lepkość zależy od potencjału przykładanego do elektrod (rzędu kilku kV/mm).

W jednej z prac podjęto interesującą próbę klasyfikacji materiałów stosowanych do budowy miękkich palców. Sprawdzano przydatność wybranych materiałów (plastiku, gumy, gąbki, proszku, pasty i żelu jako wypełniaczy do końcówek palców chwytaka. Pod uwagę brano siły powstające przy uderzeniach w pierwszej fazie kontaktu, przyleganie palców do przedmiotów i wytrzymałość końcówek. Jak się okazało najlepszym wypełniaczem jest gąbka, najgorszym zaś – plastik. Jednak użycie gąbki jest mało praktyczne – wielkość palców byłaby zbyt duża do osiągnięcia satysfakcjonujących parametrów. Tak więc, w świetle tych badań, najlepszym następnym po gąbce wyborem jest żel. Guma zajęła na tej liście dopiero czwarte miejsce, po proszku.

Jedną z metod znajdowania obrysu brył może być użycie czujnika-wąsa, ale nie jest ona tak efektywna, jak zaprezentowane wcześniej.

## Czujniki sił i momentów

Obok wirtualnych czujników sił (gdzie siła wyznaczana jest ze znanego momentu napędowego i jej ramienia działania np. długości członu lub odległości do punktu kontaktu) stosuje się oddzielne czujniki, na ogół instalowane w przegubach. Są to najczęściej czujniki tensometryczne, indukcyjne lub optoelektroniczne i działają one zazwyczaj na zasadzie pośredniego pomiaru odkształceń sprężyny skrętnej (kąta obrotu osi) łączącej pierścieni na osi z korpusem. Wartości momentów można również mierzyć bezpośrednio w odpowiednio zaprojektowanych silnikach.

Do pomiaru sił tnących (na płaskiej powierzchni palców chwytaka) można zainstalować dotykowe czujniki o specjalnej konstrukcji: z powierzchni elastycznej, przezroczystej maty polimerowej wystają na wysokość kilku milimetrów odkształcalne stożki ścięte. Pod wpływem działania siły tnącej ścięte powierzchnie stożków przemieszczają się. Przemieszczenia te rejestruje się kamerą od spodniej, oświetlonej strony maty. Są dobrze widoczne, bowiem ścięte powierzchnie stożków są pomalowane na biało, pozostała część – na czarno. Przemieszczenia te pozwalają wyznaczyć wartości sił tnących, możliwe jest także wyznaczenie momentu, który wywołał obrót w płaszczyźnie stożków.

Technologie wykonania miniaturowych czujników sił w palcach chwytaków cały czas są przedmiotem badań.

## Akcelerometry

Używane są do wykrywania drgań w dwóch sytuacjach:

- uderzeń manipulowanym przedmiotem, mogących stanowić źródło informacji o dokładności realizacji ruchu w końcowych fazach montażu,

- poślizgu przedmiotu trzymanego przez chwytak; zanik sił poprzecznych w strefie kontaktu i charakterystyczne drgania samowzbudne, towarzyszące przesuwaniu się przedmiotu, są sygnałem o przesuwaniu się go w palcach chwytaka; na ogół, jeśli poślizg nie jest zamierzony, sygnał taki powinien prowadzić do silniejszego zaciśnięcia palców chwytaka.

## Wirtualne czujniki sił i dotyku

Jedną z metod, pozwalających obniżyć koszt projektowanego manipulatora, jest uniknięcie instalowania wyspecjalizowanych czujników dotykowych i pośrednie pozyskiwanie potrzebnych informacji o sile czy miejscu kontaktu z wartości momentów i współrzędnych wewnętrznych w przegubach manipulatora czy w palcach chwytaka.

Na przykład wstępne wykrycie punktu kontaktu z przedmiotem dokonuje się przez dotykanie bocznymi powierzchniami członów palca, a następnie dokładne - miękką końcówką palca. W innej metodzie do określenia pozycji trzymanego przez chwytak obiektu używa się jedynie informacji o położeniach członów i momentach. Stosuje się tam drzewo przeszukiwań wszystkich możliwych pozycji przedmiotu (wieloboku wypukłego obejmowanego dwoma palcami) i wybiera się najbardziej prawdopodobną.

Znając wartości momentów i położenia punktów kontaktu, łatwo można wyznaczyć siły oddziaływania na obiekt.

Interesujące rozwinięcie tego pomysłu polega na tym, że identyfikuje się kształt obiektu (nawet wklęsłość jego ścian) trzymanego przez pięciopalczysty chwytak. Odbywa się to przez: znalezienie sił w punktach kontaktu palca w przedmiocie (rozwiązanie zadania prostego np. metodą MES), odtworzenie kształtu przedmiotu (zadanie odwrotne, rozwiązywane np. przy użyciu sieci neuronowej).

## Błędy w czujnikach

Czujniki robota mierzą fizyczne właściwości otoczenia robota: elektryczne, magnetyczne, optyczne itd. Jednocześnie, na skutek wprowadzanych przez nie ograniczeń (np. dokładność, szerokość pasma przenoszenia, niezawodność, stany nieustalone), wiedza robota o otoczeniu nie jest w pełni wiarygodna. Właściwe podejście do tego zagadnienia jest bardzo istotne, a jego ranga rośnie ze złożonością zadań wykonywanych przez robota. W spotykanych do niedawna rozwiązaniach konstrukcyjnych wprowadzano czujniki o wysokiej dokładności, a otoczenie robota było maksymalnie uporządkowane. Jednak takie rozwiązania są dość kosztowne, a otoczenie robota nie zawsze daje się uporządkować w zadowalającym stopniu. Bardziej praktyczne podejście, które przyciąga uwagę wielu badaczy, polega na wykorzystaniu informacji z wielu czujników różnego typu – agregacji odczytów.

Przyczyny obniżania wiarygodności pomiarów, dokonywanych przez czujniki, można podzielić na pochodzące od ich ograniczonej dokładności i wieloznaczności informacji. Tak, jak inne urządzenia, działanie czujników robota podlega zakłóceniom. Są to zwykle zakłócenia elektromagnetyczne, termiczne itp., ale również wynika-

jące z zanieczyszczenia. Dla układów wizyjnych dużym problemem stają się zmiany oświetlenia sceny, różna faktura i barwa powierzchni obiektów. Układy wspomagające czujniki mają również swój udział w powstawaniu błędów – przykładem mogą być błędy dyskretyzacji, czy też zużycie mechaniczne elementów czujnika. Każdy z tych błędów obniża wiarygodność wskazań i fałszuje rzeczywisty wynik.

Ważną klasą błędów, które pojawiają się w pomiarach, są błędy systematyczne. W tej klasie zawierają się wszystkie te błędy, które nie mają charakteru losowego. Błędy systematyczne powstają wszędzie tam, gdzie dane są niewłaściwie interpretowane lub są niespójne. Błędy pojawiają się w układach automatycznych lub robotycznych, gdzie dostarczane dane są niewystarczające do poprawnego dopasowania do wzorca mierzonego obiektu lub interpretacji (ekstrakcji wybranych cech), oraz tam, gdzie narusza się początkowe założenia poczynione w stosunku do otoczenia robota. W wielu pracach podkreśla się, że błędy systematyczne są zauważalne i różnią się od losowych, ale zarazem trudno sobie z nimi poradzic i często wymagają stosowania odrębnych metod obróbki.

## Agregacja danych z czujników

Systemy składające się z wielu czujników różnego typu pozwalają uzyskiwać wystarczające informacje o otoczeniu, jak również zmniejszyć niejednoznaczność w postrzeganiu właściwości przestrzennych rzeczywistego otoczenia robota. Zadanie to wymaga zebrania z czujników danych różnego typu, danych czasem częściowo ze sobą sprzecznych. Wyzwaniem staje się wtedy znalezienie algorytmu, pozwalającego na zagregowanie danych, niwelującego wieloznaczność informacji i wpływ błędów. Algorytm nie powinien być zbyt złożony – nie powinien wymagać dużego nakładu obliczeń i powinien być łatwy do wdrożenia.

Przez zagregowanie wskazań z wielu czujników można otrzymać bardziej wiarygodne wyniki. Możliwe jest to dzięki temu, że w znacznym stopniu szumy własne danego czujnika nie są skorelowane z szumami pozostałych czujników. W niektórych pracach podkreśla się, że użycie dodatkowych czujników zawsze poprawia dokładność pomiarów.

Agregacja danych jest możliwa wtedy, gdy czujniki mierzą tę samą cechę (często w tym samym kierunku/stopniu swobody). Na ogół agregacji podlegają obrazy z kamer wizyjnych i obrazy czy też dane z czujników ultradźwiękowych lub podczerwonych.

Najczęściej stosowanym dotąd narzędziem matematycznym była metoda maksymalnej entropii (Janesa). W metodzie tej, przy założeniu, że zakłócenia są losowe i mają rozkład normalny, wykorzystując twierdzenie o prawdopodobieństwie warunkowym (tzw. Bayesa) i zależności Shanona-Janesa na entropię informacji, poszukuje się najlepszego (najbardziej prawdopodobnego, o maksymalnej entropii) oszacowania cech otoczenia. Metoda umożliwia transformację danych z wielu czujników do jednego, wspólnego układu współrzędnych. Jej

zaletą jest włączenie elementu niepewności danych do modelu otoczenia i zminimalizowanie wpływu błędów pomiarów na uzyskane wyniki. Jednocześnie umiarkowana złożoność obliczeniowa umożliwia jej zastosowanie w układach manipulatorów pracujących w czasie rzeczywistym.

Rozwój nowych technologii informatycznych sprawia, że od pewnego czasu do wielu dziedzin wkraczają metody wykorzystujące logikę rozmytą i sieci neuronowe. Także w zakresie agregacji danych zdobywają one coraz większą popularność, zwłaszcza, że pojawiają się specjalizowane układy scalone, które pozwalają na sprężoną implementację tych metod - daje to dużą szybkość przetwarzania i, z upływem czasu, coraz niższy koszt wdrożenia.

### Aktywne śledzenie

Coraz większego znaczenia nabierają obecnie badania nad aktywnym śledzeniem otoczenia. W świetle tych badań wszystkie strategie zbierania danych przez czujniki da się podzielić na bierne i aktywne.

Dla przykładu rozważmy wizję robota. Trójwymiarowy obraz sceny można otrzymać po obróbce danych z dwóch statycznych kamer – jest to przykład strategii

biernej. Z drugiej strony można przemieszczać pojedynczą kamerę i zarejestrować zgodnie z pewnym algorytmem dwa obrazy (ujęcia) danego fragmentu otoczenia. Po rekonstrukcji również otrzymamy obraz trójwymiarowy, ale dane zostały zebrane w sposób aktywny.

Tak więc bierna strategia nie wymaga wykonywania żadnych ruchów czujnikami, w strategii aktywnej albo aktywnie przemieszczamy czujniki (strategia typu A), albo dokonujemy zmian w parametrach otoczenia (typ B). Dla przykładu, jeśli w trakcie rejestrowania kolejnych obrazów sceny zmieniają się warunki oświetlenia (np. przesunięcie źródła światła) lub kierunku padania wiązki laserowej (pozwalającej odtwarzać kolejne przekroje obiektu w danym widoku), to mamy do czynienia z aktywną strategią typu B. Do strategii typu A zaliczyć można wiele metod z wykorzystaniem omawianych wcześniej czujników: aktywną wizję, aktywne skanowanie za pomocą ultradźwięków, wiązki laserowej, podczerwieni, a także aktywne badanie przez dotyk.

(Tekst w pełnej wersji z bibliografią dostępny u autora.)

**Praca wykonana w ramach tematu centralnego Programu Automatyki, Technik Informatycznych i Automatyzacji – PATIA 1997.**

# Abstracts

## **Survey of Modern Sensors**

**Piotr Szabelak** – p. 12

A survey is presented of sensors used in modern technology, a special look being taken at the main groups of the sensors: passive visual, active ultrasonic, electrooptical sensors and optical ones. Discussed in detail are the designing and properties of a types modern sensors. Summarily, the properties of the sensors being discussed are compared with the view of using them in building a model of environment.