

System akwizycji skorygowanej siły uogólnionej kontaktu robota manipulacyjnego z otoczeniem

Tomasz Winiarski, Konrad Banachowicz

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska

Streszczenie: W artykule zaprezentowano system akwizycji skorygowanej siły uogólnionej kontaktu narzędzia manipulatora z otoczeniem oparty o nadgarstkowy czujnik sił i momentów sił oraz dodatkową jednostkę inercyjną. Opracowany system z jednej strony eliminuje w znacznym stopniu błędy związane z wpływem ciężaru narzędzia, siły grawitacji a także sił bezwładności, z drugiej przeznaczony jest do współpracy z tanimi i sprawdzonymi manipulatorami przemysłowymi, czyniąc je platformami badawczymi robotyki usługowej.

Słowa kluczowe: robot, manipulator, siła uogólniona, jednostka inercyjna

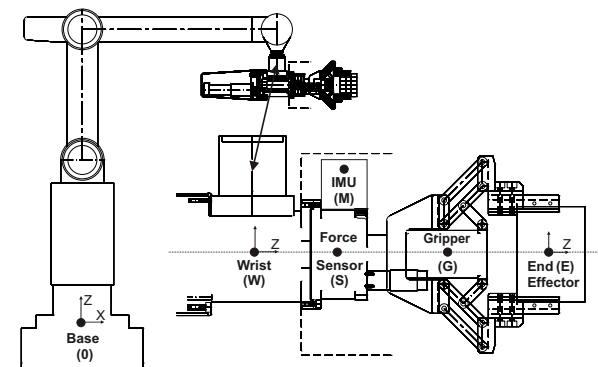
Roboty manipulacyjne są masowo użytkowane w fabrykach, stąd powstała cała gama dopracowanych konstrukcji dobrze dostosowanych do stawianych im zadań. Niestety roboty przemysłowe pracują zwykle w trybie pozycyjnym i nie wykorzystują informacji o sile w kontakcie z otoczeniem. Zadania usługowe bezwzględnie wymagają siłowego trybu sterowania (np. [1, 3]), stąd dla badań nad nimi powstały dedykowane konstrukcje, które pozwalają co najmniej na wywieranie zadanej siły, z wykorzystaniem pomiaru momentu w stawach. Połączenie taniego i niezawodnego robota przemysłowego z możliwościami robota przeznaczonego do badań naukowych jest bardzo atrakcyjne w kontekście możliwości prowadzenia prac z zakresu robotyki usługowej. W znacznej mierze udało się to osiągnąć dzięki zamontowaniu czujnika sił i momentów sił w nadgarstku manipulatora przemysłowego [4, 6, 8].

Pomiar sił i momentów sił jest zakłócany przez ruch manipulatora, gdyż czujnik nadgarstkowy rejestruje m.in. siłę bezwładności. Stąd wskazane jest wykrycie ruchu końcówki i jego uwzględnienie w pomiarze sił. Teoretycznie może do tego wystarczyć pomiar przemieszczeń silników napędzających stawy manipulatora, ale w praktyce ta informacja jest niewystarczająca ze względu na podatność w układzie przeniesienia napędu oraz ograniczoną rozdzielczość enkoderów silników [6]. Człowiek w pierwszej kolejności kontakt z otoczeniem wykrywa receptorami umieszczonymi na skórze, jednakże tzw. sztuczna skóra jest obecnie bardzo droga, a jej zastosowanie na chwytakach manipulatorów problematyczne. Pozostaje badanie przyspieszeń i prędkości kątowych bezpośrednio w końcówce manipulatora, za pomocą zespołu akcelerometrów i żyroskopów [2].

W niniejszym artykule zaprezentowano system akwizycji skorygowanej siły uogólnionej kontaktu narzędzia manipulatora z otoczeniem, który został oparty o nadgarstkowy czujnik sił i momentów sił oraz dodatkową jednostkę

inercyjną przytwierdzoną bezpośrednio do czujnika sił. Stworzony system eliminuje w znacznym stopniu błędy związane z wpływem ciężaru narzędzia, siły grawitacji a także sił bezwładności. Rozwiązanie współpracuje z tanimi i dopracowanymi manipulatorami przemysłowymi, czyniąc je zdatnymi do nowych zastosowań.

Sekcja 1 prezentuje system badawczy, w szczególności użyty sprzęt. W sekcji 2 przedstawiona jest notacja konieczna do opisu algorytmu przetwarzania sił z sekcji 3. W sekcji 4 zawarto przykładowe eksperymenty weryfikujące podejście. Pracę kończy podsumowanie (sekcja 5).



Rys. 1. Struktura manipulatora i związane z nią układy współrzędnych

Fig. 1. Manipulator structure and the coordinate frames

1. System badawczy

System badawczy zbudowano na bazie zmodyfikowanego manipulatora IRp-6 (w tym przypadku wyposażonego w chwytak przeznaczony do podejmowania prostopadłościennych obiektów, np. kostki Rubika). Z manipulatorem (rys. 1) związane są układy współrzędnych: 0 – baza, W – nadgarstek, S – czujnik sił, G – układ o początku w środku ciężkości chwytaka i orientacji zgodnej z układem nadgarstka, E – końcówka manipulatora (układ zadania) – układ ten może być zdefiniowany w trakcie realizacji zadania, M – jednostka inercyjna (IMU). Chwytak manipulatora przytwierdzony jest do jego nadgarstka za pośrednictwem czujnika sił i momentów sił, znajdującego się w obrębie górnej elipsy na rys. 2. Do czujnika sił przytwierdzono jednostkę inercyjną, znajdującą się w obrębie dolnej elipsy na rys. 2.

Odczyty z czujnika sił i jednostki inercyjnej wykonywane są z częstotliwością około 500 Hz, co odpowiada

A close-up photograph of the robot's gripper mechanism. The gripper is orange and has a cylindrical body. The internal components, including the gripper fingers and the force sensing mechanism, are visible. Two green circles are drawn on the image, highlighting the contact points between the gripper fingers and the force sensing mechanism. The text "POLMAT" is visible on the side of the gripper body.

391

są wyznaczane poprzez wykorzystanie odpowiednich elementów macierzy przekształcenia jednorodnego ${}^U_Q\mathcal{T}$ (1), gdzie $S(P)$:

$$S(P) = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

jest macierzą skośnosymetryczną wyznaczoną na podstawie wektora $P = [p_x, p_y, p_z]^T$.

W przypadku wektorów swobodnych (np. przyrostów pozycji i orientacji, prędkości, przyspieszeń lub sił) istnieje też potrzeba wyrażenia ich w odniesieniu do układu o innej orientacji niż ta, w której były pierwotnie wyrażone. W takiej sytuacji (przykładowo dla prędkości) można zastosować notację ${}^C({}^U\dot{r})$, w której prędkość uogólniona układu U w odniesieniu do układu 0 jest wyrażona w układzie C , a do przekształcenia służy tym razem macierz ξ_* :

$${}^C({}^U\dot{r}) = {}^C_U\xi_* {}^U\dot{r} \quad (7)$$

gdzie:

$${}^C_U\xi_* = {}^C_U\xi_V = {}^C_U\xi_F \text{ dla } {}^C_U P = 0_{3 \times 1} \quad (8)$$

Przyjęto, że operacja mnożenia lub dzielenia macierzy przez skalar oznacza odpowiednio mnożenie lub dzielenie poszczególnych składowych tej macierzy dające w wyniku macierz o tym samym rozmiarze. Ponadto d (ang. desired) oznacza wartość zadaną, natomiast m (ang. measured) – wartość zmierzoną, jeżeli oznaczenia te umieszczone są jako prawe dolne indeksy przy symbolu położenia, prędkości, przyspieszenia lub siły uogólnionej. Podobnie prawy indeks dolny w nawiasach kwadratowych będzie określał współrzędną wektora bądź macierzy. W użyciu będzie też konwencja znakowania współrzędnych według osi układu odniesienia: x, y, z (składowe liniowe) i a_x, a_y, a_z (składowe obrotowe).

3. Pomiar sił i momentów sił

Podstawowym celem systemu jest wyznaczenie całkowicie skorygowanej siły uogólnionej. Jej wektor obliczany jest według wzoru:

$${}^W\mathcal{F}_c^\iota = {}^W\mathcal{F}_a^\iota - {}^W\mathcal{F}_b^\iota \quad (9)$$

Prawe indeksy dolne przy symbolu siły uogólnionej odnoszą się odpowiednio do: c – wynikowej siły całkowicie skorygowanej, a – siły z wyeliminowanym wpływem grawitacji (sekcje 3.1, 3.2), b – siły bezwładności (sekcja 3.3). Prawy górny indeks określa dyskretną chwilę czasową. Kolejne chwile ι dzielą 2 ms, co odpowiada krokowi podczas eksperymentów (sekcja 4).

Prezentowana procedura zakłada, że manipulowane będą jedynie relatywnie lekkie obiekty. Jej elementem jest wyeliminowanie niekorzystnego wpływu siły grawitacji, wymagające znajomości położenia środka ciężkości chwytaka ${}^W_G P$ oraz jego ciężaru w .

Parametry te można wyznaczyć eksperymentalnie [7]. Niekiedy te same parametry można zadać na podstawie znanego a priori modelu chwytaka i chwytanego obiektu, rozpoznanych np. przez podsystem wizyjny. Po wprowadzeniu nowych parametrów w i ${}^W_G P$ konieczne jest wyznaczenie

czynnika kompensującego, aby później otrzymywać skorygowane odczyty sił. Realizacja tej procedury jest zlecona, kiedy manipulator stoi bez ruchu i chwytak nie styka się z otoczeniem.

3.1. Obliczenie czynnika kompensującego

Obliczenie czynnika kompensującego wykonywane jest w chwili i_c , po tym jak wprowadzono nowe parametry charakteryzujące ciężar chwytaka: w i położenie środka ciężkości chwytaka: ${}^W_G P$. W obliczeniach tych występują układy związane ze środkiem ciężkości G i nadgarstkiem W , a bieżące odczyty sił nie są wykorzystywane. Wektor uogólnionej siły grawitacji działającej na środek ciężkości chwytaka wyrażony w układzie 0 ma postać:

$${}^0({}^{G^{i_c}}\mathcal{F}_g^{i_c}) = [0, 0, -w, 0, 0, 0]^T \quad (10)$$

Macierz 6×6 ${}^{W^{i_c}}_{G^{i_c}}\xi_F$ transformująca uogólnione siły działające na środek ciężkości chwytaka do układu W związanego z nadgarstkiem jest wyznaczona na podstawie ${}^{W^{i_c}}_{G^{i_c}}\mathcal{T}$ zgodnie ze wzorem (3). Macierz jednorodna ${}^{W^{i_c}}_{G^{i_c}}\mathcal{T}$ wynika z mechanicznej struktury końcówki manipulatora (ściślej relacji geometrycznej pomiędzy chwytakiem i nadgarstkiem) i nie zmienia się podczas wykonywania zadania. Uogólniona siła reakcji, na siłę grawitacji, jest poszukiwanym czynnikiem kompensującym i wyrażona w układzie nadgarstka ma postać:

$${}^{W^{i_c}}\mathcal{F}_r^{i_c} = -{}^{W^{i_c}}_{G^{i_c}}\xi_F {}^{G^{i_c}}\mathcal{F}_g^{i_c} = -{}^{W^{i_c}}_{G^{i_c}}\xi_F {}^{G^{i_c}}_0\xi_* {}^0({}^{G^{i_c}}\mathcal{F}_g^{i_c}) \quad (11)$$

Powyższe obliczenia wykonywane są wówczas kiedy manipulator stoi nieruchomo i chwytak nie styka się z otoczeniem. Bezpośrednio po nich zostaje wydane polecenie BIAS. W związku z tym następujące potem podczas wykonywania ruchu odczyty siły uogólnionej bezpośrednio z czujnika sił $\mathcal{F}_m^\iota$ są zniekształcane ${}^{W^{i_c}}\mathcal{F}_r^{i_c}$ (wartość czynnika kompensującego).

3.2. Przekształcenia pomiarów sił i momentów sił podczas wykonania ruchu

Inny zestaw obliczeń jest wykonywany każdorazowo po akwizycji nowego wektora ${}^{S^\iota}\mathcal{F}_m^\iota$, który jest transformowany do układu W tworząc wektor ${}^{W^\iota}\mathcal{F}_m^\iota$. Model kinematyczny manipulatora, parametry środka ciężkości chwytaka i kalibracja czujnika sił są niedokładne, stąd procedura korygująca odczyty sił jest stosunkowo dokładna jedynie dla orientacji końcówki manipulatora zbliżonej do orientacji, w której ostatnio wyznaczony został czynnik kompensujący.

Układ ${}^W_S\mathcal{T}$ i w konsekwencji macierz ${}^W_S\xi_F$ zależą od geometrycznej struktury końcówki manipulatora (wzajemnego położenia nadgarstka i czujnika). Siła skorygowana wyrażona w układzie W obliczana jest według następującej formuły:

$${}^{W^\iota}\mathcal{F}_a^\iota = -({}^{W^\iota}\mathcal{F}_m^\iota - {}^{W^\iota}\mathcal{F}_g^\iota - {}^{W^{i_c}}\mathcal{F}_r^{i_c}) = -({}^{W^\iota}_{S^\iota}\xi_F {}^{S^\iota}\mathcal{F}_m^\iota - {}^{W^\iota}_{G^\iota}\xi_F {}^{G^\iota}_0\xi_* {}^0({}^{G^\iota}\mathcal{F}_g^\iota) - {}^{W^{i_c}}\mathcal{F}_r^{i_c}) \quad (12)$$

gdzie ${}^{S^\iota}\mathcal{F}_m^\iota$ jest bieżącym odczytem siły uzyskanym bezpośrednio z czujnika sił, ${}^{G^\iota}\mathcal{F}_g^\iota$ jest bieżącym oddziaływaniem siły grawitacji i ${}^{W^{i_c}}\mathcal{F}_r^{i_c}$ jest czynnikiem kompensującym „zapamiętanym” w interfejsie czujnika podczas

kalibracji czujnika w chwili i_c . Wprowadzenie znaku minus służy sprowadzeniu odczytów sił do układu związanego z manipulatorem a nie otoczeniem.

3.3. Wyznaczanie siły bezwładności

Siła bezwładności liczona jest według następującego wzoru:

$${}^W \mathcal{F}_b^t = - {}^W \xi_F^t {}^G \mathcal{F}_b^t = {}^W \xi_F^t {}^G \ddot{r}_a^t I_b \quad (13)$$

gdzie: $\ddot{r}_a^t$ – przyspieszenie z wyeliminowanym przyspieszeniem ziemskim, I_b – diagonalna macierz inercji narzędzia w układzie jego środka ciężkości. Eliminacja wpływu przyspieszenia ziemskiego wykonywana jest w następujący sposób:

$${}^G \ddot{r}_a^t = {}^G \ddot{r}_m^t - {}^G \ddot{r}_g^t \quad (14)$$

gdzie prawy dolny indeks m reprezentuje wartość zmierzona bezpośrednio w czujniku przyspieszeń, natomiast $\ddot{r}_g$ to uogólniony wektor przyspieszenia ziemskiego.

Wartość zmierzona przyspieszania jest transformowana z układu IMU do układu nadgarstka:

$${}^G \ddot{r}_m^t = {}^G \xi_V^W {}^W \ddot{r}_m^t = {}^G \xi_V^W {}^M \xi_V^M {}^M \ddot{r}_m^t \quad (15)$$

Transformacji podlega też uogólnione przyspieszenie ziemskie:

$${}^G \ddot{r}_g^t = {}^G \xi_*^0 ({}^G \ddot{r}_g^t) \quad (16)$$

które wyjściowo ma postać:

$${}^0 ({}^G \ddot{r}_g^t) = [0, 0, -g, 0, 0, 0]^T \quad (17)$$

gdzie g to wartość przyspieszenia ziemskiego w osi pionowej.

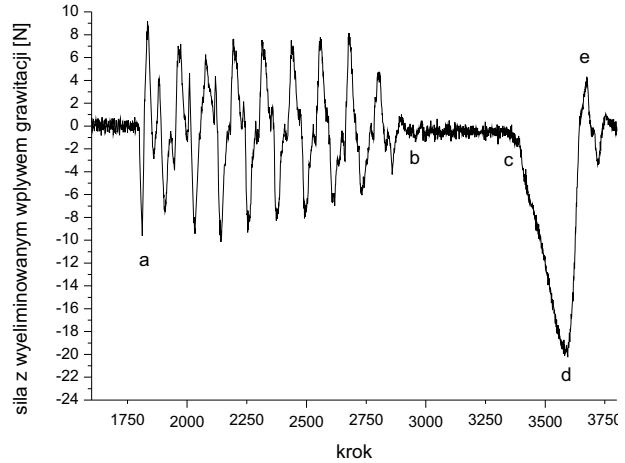
4. Eksperymenty

Weryfikację poprawności działania procedury eliminacji siły bezwładności z odczytów czujnika sił i momentów sił przeprowadzono w serii eksperymentów odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy manipulatora. Działanie procedury zilustrowano dwoma wykresami odczytów pojedynczej składowej liniowej siły w narzędziu dla tego samego, reprezentatywnego eksperymentu. Rys. 4 prezentuje siłę z wyeliminowanym wpływem grawitacji ${}^E \mathcal{F}_a$, natomiast rys. 5 siłę całkowicie skorygowaną ${}^E \mathcal{F}_c$, a więc z dodatkowo ograniczonym wpływem siły bezwładności.

Eksperyment składa się z czterech faz charakterystycznych dla zadań manipulatorów. Fazy te zawierają się w przedziałach ograniczonych chwilami czasowymi etykietowanymi na wykresach literami *a* do *e*. We wszystkich fazach regulatory pozycyjne w stawach manipulatora starały się utrzymywać niezmienną, zadaną pozycję.

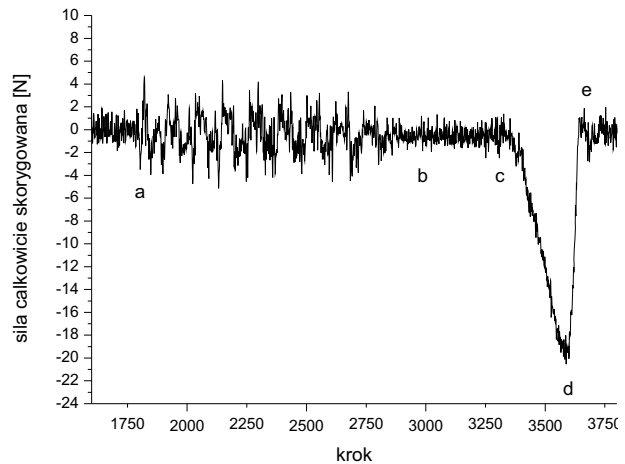
- (*a, b*) – na manipulator wywierana jest zewnętrzna siła (niezależnie od siły grawitacji), wprawiająca jego końcówkę w oscylację. Co istotne wywierano ją w taki sposób, żeby czujnik siły nie mógł jej zarejestrować bezpośrednio jako siły kontaktu (nie znajdował się pomiędzy obszarem przyłożenia siły a bazą manipulatora). Czujnik rejestruje jednak siłę bezwładności wynikającą z przyspieszenia jakiego podlega narzędzie manipulatora. Eksperyment można przeprowadzić w sposób analogiczny wprawiając manipulator w ruch oscylacyjny poprzez trajektorię zadaną regulatorów pozycyjnych, ale dla manipulatora IRp-6 nie jest to konieczne ze względu na jego znaczną podatność mechaniczną [6].

- (*b, c*) – manipulator stoi nieruchomo, nie działa na niego żadna siła zewnętrzna różna od siły grawitacji.
- (*c, d*) – do narzędzia manipulatora przyłożono siłę zewnętrzną. Odpowiada to kontaktowi z otoczeniem.
- (*d, e*) – raptownie utracono kontakt z otoczeniem, a więc przestano wywierać siłę w krótkim czasie.



Rys. 4. Siła z wyeliminowanym wpływem grawitacji wzdłuż osi y układu narzędzia ${}^E \mathcal{F}_a[y]$

Fig. 4. Force with gravitational influence eliminated in end-effector y direction ${}^E \mathcal{F}_a[y]$



Rys. 5. Siła skorygowana wzdłuż osi y układu narzędzia ${}^E \mathcal{F}_c[y]$

Fig. 5. Corrected force in end-effector y direction ${}^E \mathcal{F}_c[y]$

Wykresy potwierdzają poprawne działanie zaproponowanej procedury korekty sił. W fazie (*a, b*) pożądaną jest wyzerowanie siły zmierzonej (całkowicie skorygowanej). W praktyce ograniczono ją do około połowy. Jest to istotna poprawa pozwalająca na znaczną korektę działania regulatorów pozycyjno-siłowych [6], w szczególności zwiększenia ich wzmocnienia. W fazie (*b, c*) powinna być rejestrowana zerowa siła. W praktyce jej średnia wartość jest bliska zeru, natomiast widoczny jest szum pomiarowy o amplitudzie międzyszczytowej około 2 N jaki wprowadza korekta wynikająca z uwzględnienia siły bezwładności. Szum ten ma na tyle wysoką częstotliwość, że nie powinien być przenoszony przez obiekt o stosunkowo wolnej dynamice jakim jest sterowany siłowo robot. W fazie (*c, d*) pożądaną jest jak

najdokładniejszy pomiar siły kontaktu z otoczeniem. Dodatkowa korekta odczytu sił nie wprowadza, oprócz szumu, istotnych niepożądanych zakłóceń tego odczytu, w szczególności wartości zmierzone w punkcie d odpowiadające maksymalnej sile kontaktu są prawie identyczne na obu wykresach. Ciekawa jest faza utraty kontaktu (d, e), gdzie uwzględnienie siły bezwładności pozwala uniknąć rejestracji niepożądanego piku siły zmierzonej po utracie kontaktu, widocznego w punkcie e na rys. 4.

5. Podsumowanie

Korekta odczytu sił z nadgarstkowego czujnika siły uogólnionej wydaje się jednym z niewrażliwych problemów rozwoju tradycyjnego paradygmatu konstrukcji sensoryki manipulatorów przemysłowych w kierunku systemów o charakterze usługowym. Podejście zaproponowane w niniejszym artykule wpisuje się w ten trend. Klasyczny manipulator przemysłowy został pierwotnie wyposażony w nadgarstkowy czujnik siły uogólnionej, by w bieżących pracach zyskać jednostkę inercyjną i odpowiednie algorytmy systemu akwizycji danych sensorycznych, które korygują jego odczyty. Zaproponowane rozwiązania mogą ulec poprawie w aspektach związanych z kalibracją systemu czy też filtracją danych wejściowych. Przede wszystkim jednak będą podstawą do dalszych badań związanych z wykorzystaniem skorygowanego odczytu sił i momentów sił w systemach sterujących robotów manipulacyjnych.

Bibliografia

1. Khatib O. (1987), *A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation*. International Journal of Robotics and Automation RA-3(1), 43–53.
2. Kroger T., Kubus D., Wahl F. M. (2007), *Force and acceleration sensor fusion for compliant manipulation control in 6 degrees of freedom*. Advanced Robotics 21(14), 1603–1616.
3. Meeussen W., Wise M., Glaser S., Chitta, S. McGann C., Mihelich P., Marder-Eppstein E., Muja M., Eruhimov, V., Foote T., et al. (2010): *Autonomous door opening and plugging in with a personal robot*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, 729–736.
4. Tsumugiwa T., Yokogawa R., Hara K. (2002), *Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task*. In: Proceedings of the 2002 IEEE Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, 644–650.
5. Winiarski T., Banachowicz K., Stefańczyk M. (2012), *Bezpieczna strategia otwierania drzwi robotem manipulacyjnym KUKA-LWR*. In: XII Krajowa Konferencja Robotyki – Postępy Robotyki, Vol. 2, 395–404, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (Safe door opening strategy of KUKA-LWR robotic manipulator).
6. Winiarski T., Woźniak A. (2012), *Indirect force control development procedure*. Robotica (Cambridge Journals Online) 1(1), 1–14.
7. Winiarski T., Zieliński C. (2008), *Sterowanie interakcją manipulatora ze środowiskiem – część druga*. In: X Krajowa Konferencja Robotyki – Problemy Robotyki, Vol. 2, 483–492, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
8. Zieliński C., Winiarski T. (2010), *Motion Generation in the MRROC++ Robot Programming Framework*. International Journal of Robotics Research 29(4), 386–413.

The acquisition system of general force of contact between robotic manipulator and the environment

Abstract: The article considers an acquisition system of general force measured between manipulator's end-effector and the environment using six axis force transducer mounted in manipulator wrist and additional inertial measurement unit. The proposed solution significantly improves the initial force measurement by reducing the influence of tool weight, gravitational force and inertial force. It can be used to develop a cheap industrial robot to a service robot test platform.

Keywords: robot, manipulator, inertial measurement unit, general force

dr inż. Tomasz Winiarski

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcje kierownika laboratorium robotyki w macierzystym instytucie, a także opiekuna studenckiego koła naukowego Bionik, które współtworzył. W 2010 r. otrzymał za osiągnięcia naukowe nagrodę indywidualną drugiego stopnia rektora PW, w 2011 r. wyróżnienie w konkursie Innowator Mazowska, a także pierwszą nagrodę w konkursie Młodzi Innowacyjni.

Jego zainteresowania badawcze dotyczą z jednej strony konstrukcji i nawigacji robotów mobilnych, z drugiej strony specyfikacji i implementacji zadań manipulatorów i chwytaków ze szczególnym uwzględnieniem sterowania pozycyjno-siłowego.

e-mail: tmwiniarski@gmail.com



Konrad Banachowicz

Jest studentem Wydziału Elektroniki i Techniki Informacyjnych Politechniki Warszawskiej oraz członkiem koła robotyki "Bionik", w ramach którego zajmuje się konstrukcją układów elektronicznych na potrzeby robotów. Współpracuje przy projektach badawczych prowadzonych przez Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAIS) Politechniki Warszawskiej.

e-mail: konradb3@gmail.com

