

Zastosowanie mikroprocesorowych układów pomiaru kąta obrotu w budowie fantomu do generowania programów roboczych robotów FANUC ARCMate 100iB

Daniel Reclik, Paweł Kaczmarczyk

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania,
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Streszczenie: W pracy omówiono projekt i realizację mikroprocesorowego układu do pomiaru absolutnych wartości położenia kątowych 6 przetworników rezystancyjnych. Przeznaczeniem projektowanego układu pomiarowego była instalacja w modelu robota FANUC ARCMate100iB wykonanego metodami szybkiego prototypowania. Założeniem projektu było utworzenie modelu dydaktycznego prezentującego wykorzystywaną we wczesnych latach 90. w USA, technikę programowania robotów przemysłowych metodą „teaching-by-showing”, której głównym założeniem było wykorzystanie fantomu do wyznaczania pożądanych położenia łańcucha kinematycznego programowanego robota poprzez wskazywanie położenia za pomocą poruszanego ręcznie modelu robota. Aby możliwe było programowanie robotów przy wykorzystaniu mechatronicznego układu zadajnika trajektorii typu fantom konieczne było spełnienie dwóch podstawowych kryteriów wpływających na dokładność wyznaczanych położenia. Pierwszym założeniem była pełna skalowalność modelu, czyli zachowanie proporcji wymiarowych względem fizycznego manipulatora, w taki sposób, aby możliwe było precyzyjne odwzwierciedlenie położenia fantomu w rzeczywistym systemie zrobotyzowanym. Drugim warunkiem pozwalającym na wykorzystanie tego typu zadajników trajektorii w procesie programowania metodami nauczania było zastosowanie odpowiedniego układu pomiarowego do pomiaru położenia kątowego kolejnych ogniw łańcucha kinematycznego fantomu. Jak pokazały przeprowadzone badania, dokładność wyznaczania położenia pośrednich trajektorii programowanego robota zależy w większym stopniu od dokładności metod pomiaru kątów obrotu ramion fantomu niż od precyzyjnego zachowania skali samego układu mechanicznego. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że dokładności pomiaru kątów obrotu muszą być o jeden rząd większe niż dokładności wykonania części mechanicznej (odległości punktów mocowania przegubów obrotowych ramion modelu robota), dlatego też postanowiono opublikować uzyskane wyniki, a także wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych eksperymentów z udziałem wykonanego systemu przy programowaniu rzeczywistych robotów ARCMate 100iB, przy uwzględnieniu systemu pomiarowego oraz przyjętej metody pomiarów absolutnych wartości kątów obrotu ramion fantomu.

Słowa kluczowe: fantom, ARCMate100iB, FANUC Robotics, mikrokontroler AVR, mechatronika, szybkie prototypowanie

Aby umożliwić poprawną pracę elastycznego systemu wytwórczego konieczne jest przeprowadzenie procesu TPP, czyli technologicznego przygotowania produkcji. Aby

możliwe było poprawne przygotowanie TPP, w tym programów roboczych manipulatorów przedsiębiorcy, wdrażający systemy zrobotyzowane, muszą ponieść dodatkowe koszty związane z przeszkoleniem pracowników, lub muszą zatrudnić dodatkową kadrę inżynierską. Jeżeli przyszły inżynier chce znaleźć pracę u takiego (współczesnego) przedsiębiorcy powinien posiadać wiedzę i umiejętności związane z obsługą, konserwacją i programowaniem systemów zrobotyzowanych. Dlatego też nauka programowania robotów jest ważnym elementem edukacji przyszłego inżyniera.

Edukacja przyszłych inżynierów wymaga, aby umożliwić im zdobycie możliwie szerokiego spektrum wiedzy zarówno praktycznej, jak i teoretycznej. Uczelnie, chcąc poszerzać możliwości prowadzenia zajęć laboratoryjnych, poszukując coraz to bardziej wyrafinowanych środków wspomagających programowanie robotów przemysłowych. O ile w zakresie nowinek technicznych możliwe jest zakupienie gotowych rozwiązań (głównie bazujących na komputerowych systemach wspomagania programowania robotów metodami off-line), o tyle zakupienie interfejsów pokazujących starsze metody programowania dla współczesnych robotów nie jest możliwe.

1. Geneza projektu

Baza laboratoryjna Instytutu Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania w zakresie robotyzacji procesów technologicznych w znacznej części bazuje na robotach FANUC ARCMate 100iB. Początkowo laboratorium przeznaczone było jedynie do nauki programowania robotów metodami on-line. Aby jednak poszerzać zakres ćwiczeń laboratoryjnych wprowadzany jest stopniowo zakres ćwiczeń związanych z programowaniem tych robotów metodami off-line. W tym celu przygotowany jest obszerny zakres ćwiczeń praktycznych z wykorzystaniem przemysłowego systemu off-line FANUC Roboguide, tak aby możliwe było prowadzenie zajęć laboratoryjnych wspomagających proces dydaktyczny wielu przedmiotów kierunkowych. Aby urozmaicić zajęcia praktyczne konieczne było przygotowanie wielu różnych grup tematycznych zajęć. Niestety, ograniczenie sprzętu do elementów jednego tylko dostawcy skutkuje znaczącym utrudnieniem w urozmaicaniu zajęć.

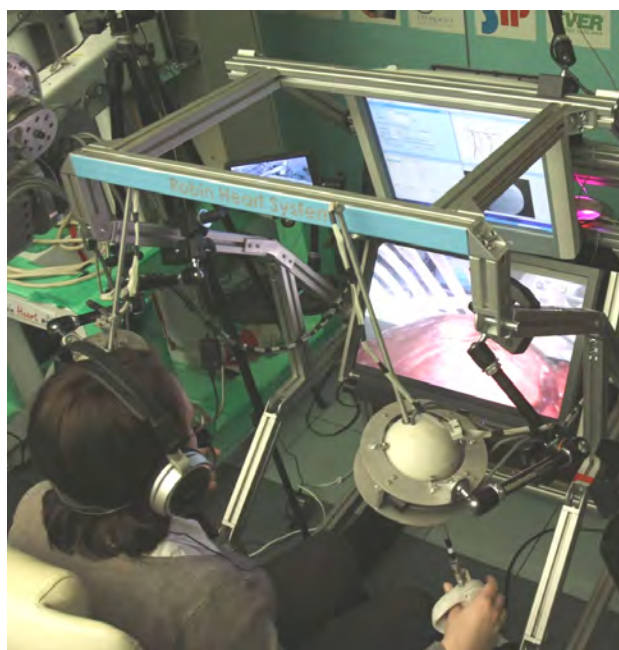
Po przeprowadzonej analizie możliwych kierunków rozwoju laboratoriów robotyki i robotyzacji procesów technologicznych okazało się, że w zakresie praktycznych zajęć

wspomagających przedmioty obejmujące podstawy robotyki brakujące możliwości pokazania wcześniej stosowanych metod wspomagających programowanie robotów. Postanowiono wykonać stanowisko dydaktyczne, które pozwoliłoby zaprogramować już posiadane roboty innymi, już niestosowanymi w praktyce metodami, w tym metodą „teaching-by-showing”. Metoda ta polega na przeprowadzeniu symulatora płynnym ruchem przez wszystkie wymagane punkty trajektorii. Punkty te zapisywane są w pamięci robota, lub też przesyłane do niej w późniejszym czasie, celem wygenerowania programu roboczego [1, 2, 3]. System programowania tego typu

stanowi doskonałe narzędzie do nauki podstaw programowania. Dodatkowym aspektem wprowadzanej do procesu dydaktycznego metody jest jej ponowne stosowanie w systemach teleoperatorów w aplikacjach, w których nie można na stałe zdefiniować modelu geometrycznego otoczenia robota [6]. Przykładem zastosowania fantomów do zadania pozycji i przemieszczeń ramienia robota jest chirurgia precyzyjna. Operator (w tym przypadku chirurg) zadaje przemieszczenia narzędzia chirurgicznego w ciele pacjenta poprzez przemieszczanie identycznego narzędzia nad monitorem, na którym wyświetlany jest obraz z kamery pokazującej pole operacji. Wszystkie przemieszczenia narzędzia są odtwarzane przez manipulator, który wykonuje zabieg, z tą tylko różnicą, że ruchy robota są znacznie bardziej precyzyjne, a zastosowanie odpowiedniej skali pomiędzy fantomem a rzeczywistym narzędziem pozwala na dodatkowe zwiększenie precyzji zabiegu. Na rys.1 pokazano polskie rozwiązania w tej dziedzinie – zdjęcia z próbnej operacji z udziałem robota kardiochirurgicznego „RobInHeart”.

2. Proces projektowo-konstrukcyjny

Przygotowując harmonogram i zakres prac nad mechatonicznym interfejsem programowania robotów FANUC ARC Mate100iB metodą „teaching-by-showing” założono, że podczas wykonywania stanowiska wykorzystane zostaną najnowsze środki techniczne w zakresie szybkiego wytwarzania prototypów metodami drukowania 3D. Aby było możliwe wykorzystanie metody rapid prototyping, konieczne jest przygotowanie modelu wykonywanego obiektu w dowolnym systemie CAD. Zatem pierwszym etapem było utworzenie stosownego modelu 3D (a właściwie zewnętrznego zarysu geometrii). Przy wykorzystaniu zaawansowanych systemów CAD możliwe było odtworzenie geometrii robota ARC Mate100iB. Dokonane pomiary i dokumentacja producenta



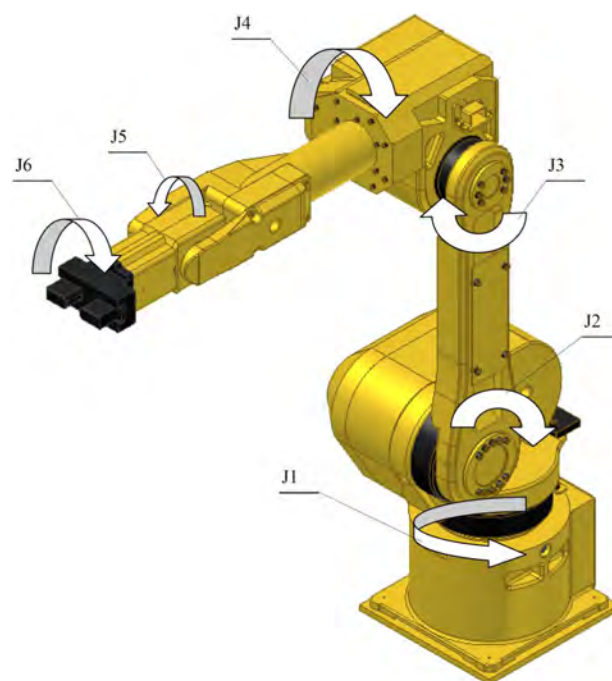
Rys. 1. Pierwsze testy robota kardiochirurgicznego [6, 7]

Fig. 1. First tests of the cardio surgery manipulator [6, 7]

pozwoły na bardzo dokładne odzwierciedlenie ułożenia przegubów łańcucha kinematycznego, co było podstawą poprawności odtwarzania zadawanych przemieszczeń. Widok opracowanego modelu wraz z zaznaczeniem zakresów ruchu kolejnych członów pokazano na rys.2.

Aby możliwe było zaprojektowanie wnętrza modelu konieczne było w pierwszej kolejności przeprowadzenie analizy możliwości pomiaru kątów wzajemnych obrotów ramion robota. Ponieważ zrezygnowano z wykonywania wewnętrznych przekładni, zatem układy pomiarowe muszą zostać umieszczone bezpośrednio w węzłach łańcucha kinematycznego. Warunek ten implikuje konieczność

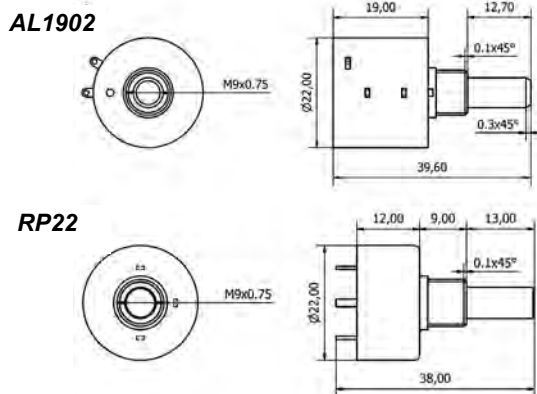
doboru czujników obrotu o możliwie małych gabarytach. Po wykonanej analizie zrezygnowano z enkoderów, gdyż rozmiary korpusu enkodera o odpowiednio dużej dokładności pomiarowej (liczbie działek przypadających na 1 obrót) skutkowałyby koniecznością budowy fantomu w zbyt dużej skali, co z jednej strony utrudniałoby programowanie robotów z jego udziałem, a z drugiej strony wymagałyby bezwzględnie poszukania zewnętrznego wykonawcy wydruku 3D, gdyż uzyskane rozmiary przekraczały możliwości urządzenia STRATASYS FDM360c, jakim dysponuje Wydział. Ostatecznie zdecydowano się na zastosowanie do



Rys. 2. Zewnętrzna geometria robota AM100iB – model CAD

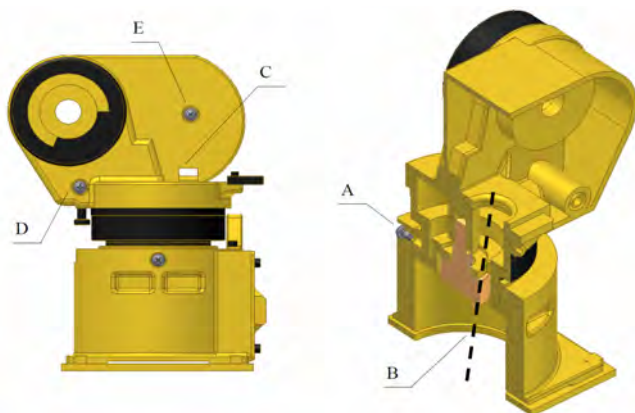
Fig. 2. External geometry of the AM100iB robot – CAD model

pomiaru kątów obrotu rezystancyjnych dzielników napięć w postaci potencjometrów precyzyjnych (o błędach liniowości poniżej 0,1 %). Analizując możliwości zakupu odpowiedniego typu potencjometrów przyjęto, że na potrzeby budowy fantomu zostaną zakupione potencjometry RP22 oraz AL19xx dostępne w ofercie WOBIT. Były to najmniejsze potencjometry posiadające błąd liniowości poniżej 0,1 %. O konieczności zakupu dwóch różnych typów potencjometrów zdecydowały zakresy kątowe, jakie muszą być mierzone. Dla osi, których zakres kąta obrotu w fizycznym robocie jest mniejszy niż 350° zastosowane zostaną potencjometry RP22 [8]. W przypadku konieczności pomiaru większego kąta zastosowane zostaną potencjometry AL1902 z maksymalnym zakresem pomiarowym 720° [8]. Na rys. 3 pokazano wymiary gabarytowe dobranych potencjometrów. Wymiary te są o tyle istotne, że będą podstawą opracowania konstrukcji wnętrza modelu, w taki sposób, aby w każdym z węzłów możliwe było zamontowanie nie tylko łożyska ślizgowego obrotu ramienia, ale także czujnika mierzącego obrót danej pary kinematycznej.

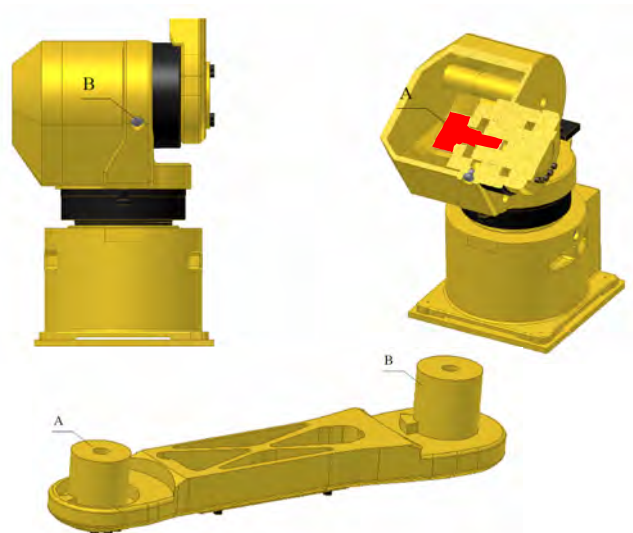


Rys. 3. Wymiary dobranych potencjometrów AL1902 i RP22 [8]
Fig. 3. The AL1902 and RP22 potentiometers' dimensions [8]

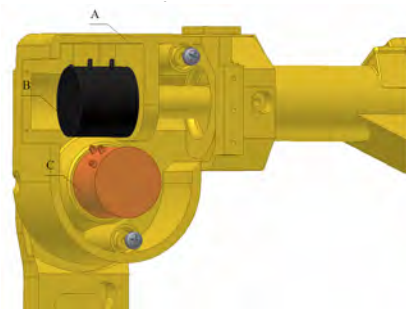
Mając dobrane czujniki do pomiaru wzajemnych obrotów kolejnych członów łańcucha kinematycznego wykonano ich modele CAD, a następnie rozpoczęto modelowanie struktury wewnętrznej odpowiedniej dla każdego z ogniw modelu



Rys. 4. Konstrukcja pierwszej osi fantomu wraz z osadzeniem potencjometru RP22 i kanałem przewodów elektrycznych
Fig. 4. Phantom's first axis with the RP22 potentiometer fasten and the cable duct for others axes potentiometers



Rys. 5. Konstrukcja osi J2 fantomu wraz z potencjometrem RP22
Fig. 5. Phantom's J2 axis fixed with the RP22 potentiometer



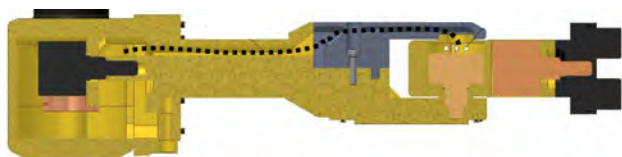
Rys. 6. Węzeł osi J3 i J4 modelu CAD fantomu
Fig. 6. The J3 and J4 node of the phantom's CAD model

robotu ARCMate100iB. Pierwszym analizowanym węzłem łańcucha kinematycznego była ostoja robota (rys. 4), w której – poza zaprojektowaniem panewki ślizgowej i osadzenia potencjometru, konieczne było usytuowanie kanałów doprowadzających przewody elektryczne do wszystkich kolejnych członów łańcucha kinematycznego.

Ponieważ koszt materiału do wydruków 3D metodami FDM jest bardzo duży, zatem kolejne osie fantomu musiały być przygotowane z równie dużą precyzją, tak aby nie nastąpiła konieczność wprowadzenia jakichkolwiek modyfikacji po wykonaniu wydruku. Na rys. 5 pokazano zaprojektowaną postać konstrukcyjną osi J2 z osadzonym w przegubie potencjometrem RP22.

Kolejne osie fantomu, zgodnie z danymi katalogowymi robotów FANUC ARCMate100iB posiadają zakres obrotu większy niż 350°, także kolejne węzły musiały pomieścić większe potencjometry AL1902. Widok zaproponowanego rozwiązania pokazano na rys. 6.

Najtrudniejszym do realizacji był projekt ostatnich dwóch osi, których wymiary gabarytowe wymusiły przeróbkę fabrycznych potencjometrów (skrócenie długości wodzika). To właśnie osie J5 i J6 determinowały skalę całego modelu robota. Ostatecznie przyjęto skalowanie 25 % rozmiaru oryginału, co przy przeprowadzonej modyfikacji fabrycznych potencjometrów pozwoliło na zmieszczenie układu pomiarowego wewnątrz korpusu, jak to pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Węzeł osi J5 i J6 modelu CAD fantomu
Fig. 7. The J5 and J6 node of the phantom's CAD model

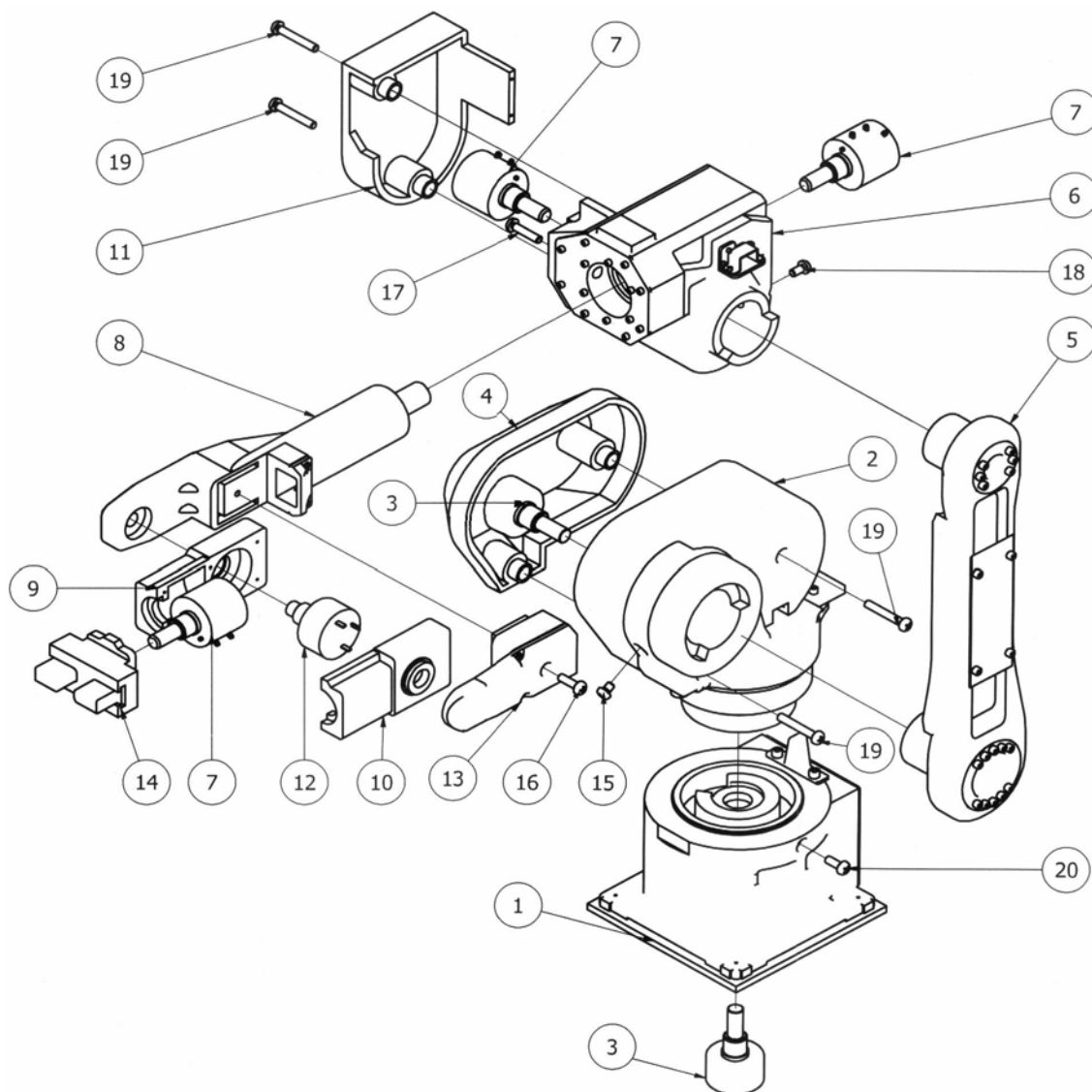
Ostateczną postać konstrukcyjną części mechanicznej projektowanego mechatronicznego interfejsu programowania robotów z wykorzystaniem metody „teaching-by-showing” pokazano na rys. 8. Mając opracowaną dokumentację konstrukcyjną rozpoczęto proces wytwarzania.

3. Wydruk modelu z wykorzystaniem urządzenia FDM-360C STRATASYS

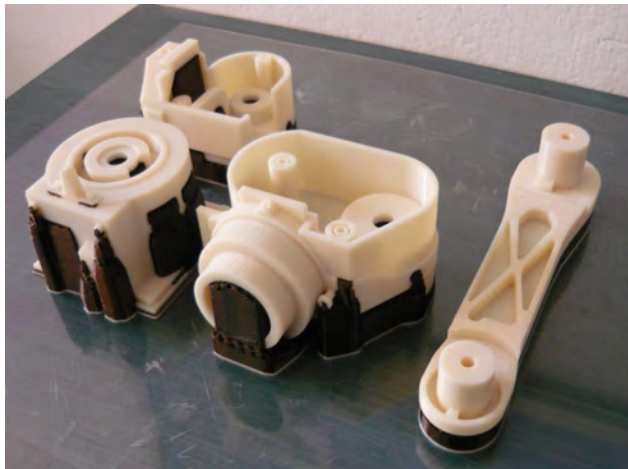
Przygotowując model CAD projektowanego fantomu, przewidziano sposób wytworzenia poszczególnych podzespołów. Ponieważ założeniem projektu było wykorzysta-

nie najnowszych dostępnych metod związanych zarówno z projektowaniem (komputerowe środki wspomaganie projektowania), jak i wytwarzaniem, przy generowaniu modeli CAD należało przygotować odpowiednie uproszczenia kształtu. Chcąc ułatwić wydruk modeli CAD, należy odpowiednio uprościć kształty powierzchni prostopadłych do płaszczyzny wydruku, gdyż ich odwzorowanie będzie znacznie gorsze niż na powierzchniach równoległych do płaszczyzny wydruku, ale może również powodować osłabienie wytrzymałości mechanicznej całego wydruku, co jest spowodowane koniecznością wpasowania trajektorii ruchu głowicy względem danego detalu, tym samym generując zmiany w ściegu wydruku reszty obiektu.

Chcąc przyspieszyć wydruk, jak również polepszyć właściwości mechaniczne, poza uproszczeniem kształtu nieistotnych szczegółów geometrycznych modelu (np. połączeń śrubowych, osłon, uzębienia ramion), należało opracować właściwą orientację modeli względem płaszczyzny wydruku. Dodatkowo, chcąc polepszyć parametry pracy drukarki przyjęto, że wydruk zostanie wykonany w dwóch operacjach. Jako pierwsze będą drukowane węzły przegubów wraz z ra-

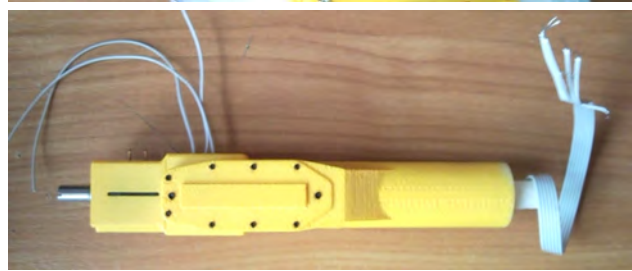


Rys. 8. Kompletny projekt CAD fantomu - widok rozłożonego modelu
Fig. 8. The blow view of the completed phantom's CAD model



Rys. 9. Obszar roboczy urządzenia STRATASYS FDM-360C po wydruku pierwszej części elementów fantomu

Fig. 9. The STRATASYS FDM-360C device workspace after printing the first part of the phantom's elements



Rys. 10. Kolejne etapy procesu montażu fantomu

Fig. 10. The following stages in the phantom's assembly process

mieniem 3 manipulatora. Na rys. 9 pokazano stół roboczy urządzenia STRATASYS FDM-360C po wydruku połowy części mechanicznych fantomu. Oczywiście wykonane elementy nie mogły zostać w sposób bezpośredni wykorzystane do budowy fantomu. Konieczność wykonywania powierzchni równoległych do powierzchni stołu wymagała, aby podczas wydruku powierzchnie te były odpowiednio podpierane. W tym celu drukowany jest układ wsporników wykonanych ze specjalnego tworzywa (kolor czarny), które może zostać usunięte na drodze płukania w myjce ultradźwiękowej.

Po wykonaniu wydruku 3D wszystkich elementów składowych fantomu rozpoczęto proces montażu poszczególnych podzespołów. Aby zachować kolorystykę oryginalnego robo-



Rys. 11. Zakończony proces montażu elementów fantomu

Fig. 11. The phantom after finishing the assembly process

ta, każdy element przed zmontowaniem został pokryty warstwą lakieru w kolorze żółtym, jak to pokazano na rys. 10.

Po zmontowaniu wszystkich podzespołów i połączeniu przewodów sygnałowych uzyskano końcową postać mechatronicznego interfejsu programowania robotów ARCMate100iB metodą „teaching-by-showing”. Widok gotowego fantomu pokazano na rys. 11.

4. Budowa układu elektronicznego do pomiaru kątów obrotu ramion

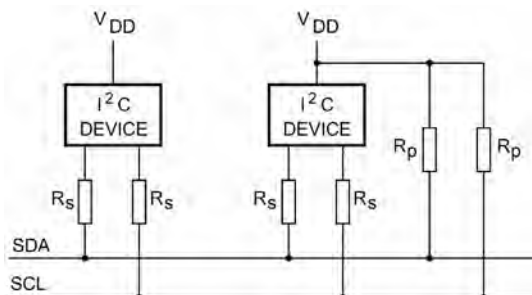
Mając opracowaną koncepcję budowy mechanicznej fantomu, a także wykonane części składowe łańcucha kinematycznego, rozpoczęto prace nad współpracującym z częścią mechaniczną układem pomiarowym. Jak już wcześniej wspomniano, do budowy części mechanicznej fantomu wykorzystano dwa różne typy potencjometrów precyzyjnych. Konieczność stosowania różnych typów czujników pomiarowych wynika z zapewnienia możliwie wysokich dokładności pomiaru kąta obrotu. Im lepiej dopasowany zostanie zakres pomiarowy do maksymalnych wartości obrotu ramienia, tym większą dokładność pomiaru się uzyska, przy założeniu jednakowej dokładności odczytu napięcia wychodzącego z czujnika. Przykładowo, jeżeli zastosowany będzie 8-bitowy przetwornik ADC, to możliwe będzie zmierzenie skoku napięcia nie mniejszego niż $0,004 \cdot U_{ref}$, gdzie U_{ref} , to napięcie referencyjne zasilające dzielnik napięcia. Przyjmując, że czujnik pomiarowy posiada zakres obrotu 350° (potencjometr RP22), czyli zmiana napięcia wyjściowego od 0 V do U_{ref} przebiega na drodze kątowej 350° . Przy 8-bitowym przetworniku ADC uzyskuje się zatem możliwość pomiaru kątów co $1,37^\circ$. Gdyby zastosować potencjometr AL1901 o zakresie pomiarowym równym 360° wartość minimalnego obrotu, jaki można zmierzyć zostanie powiększona do $1,41^\circ$. Dla potencjometrów AL1902 wartość ta wynosi już $2,82^\circ$. Oczywiście dokładność odczytu kąta obrotu można zwiększyć poprzez zastosowanie przetworników ADC o większej dokładności (liczbie bitów). Początkowo zakładano, że zastosowane będą

wbudowane w mikroprocesor przetworniki ADC o rozdzielczości 10 bitów [10]. Po wykonaniu obliczeń okazało się jednak, że dla osi robota, dla których konieczne jest zastosowanie potencjometrów o zakresie obrotu 720°, 10-bitowa konwersja pozwoli na pomiar kąta z dokładnością 0,7°. Gdy przeliczono błąd pomiarowy kąta obrotu na niedokładności liniowe pozycjonowania okazało się, że przy założonym zasięgu robota na poziomie 1300 mm uzyskuje się błąd pozycjonowania większy niż 15 mm, co było wartością nie do zaakceptowania. Chcąc poprawić dokładności pomiarowe zdecydowano się na implementację obsługi zewnętrznych konwerterów ADC o rozdzielczości 16 bitów [9]. Zastosowanie tak dużej rozdzielczości pozwoliło na zmniejszenie zakresu mierzalnych wartości kąta obrotu do 0,006° dla potencjometrów o zakresie obrotu 360°. Po przeliczeniu na błąd pozycjonowania uzyskano niedokładności rzędu 0,5 mm, co z punktu widzenia przeznaczenia układu było całkowicie zadowalającym rezultatem.

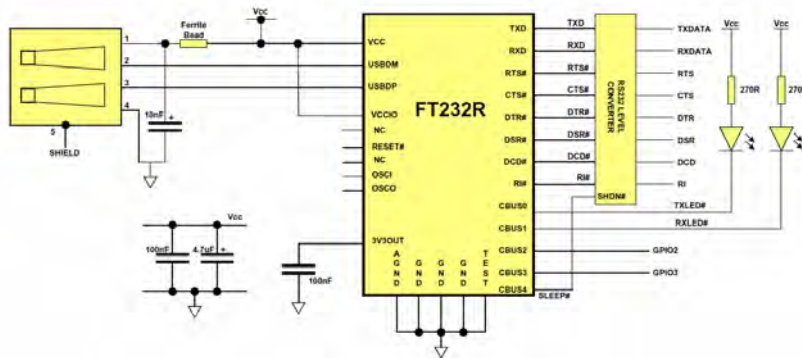
Aby możliwe było rozpoczęcie pracy nad układem pomiarowym platformy fantomu, konieczne było opracowanie zestawu wymagań funkcjonalnych, jakie muszą być przez niego spełnione. Przyjęto, że jednostką centralną układu pomiarowego będzie procesor programowalny AVR. Procesor ten musi mieć możliwość obsługi sprzętowej zewnętrznych przetworników ADC o rozdzielczości 16 bitów. Analizując dostępne na rynku przetworniki z wewnętrzną korekcją szumów przyjęto, że ze względu na dostępność oraz cenę zastosowane zostaną przetworniki ADS1100 Texas Instruments [9]. Przetworniki te charakteryzują się pojedynczym cyklem konwersji napięcia, którego wartość po przeliczeniu przesyłana jest magistralą I²C (rys. 12).

Dane przesyłane przez magistrale mają rozmiar 8 bitów. Każda wymiana danych między układami zaczyna się sekwencją startu i kończy się sekwencją stopu. Prawidłowe przesłanie danych jest sygnalizowane sekwencją potwierdzenia ACK. Kontrolę nad magistralą sprawuje układ master, który generuje sygnał zegarowy SCL, oraz steruje kierunkiem transmisji (kanał SDA). Przetworniki zasilane są z zewnętrznego źródła napięciowego. Aby uniknąć przekłamań transmisji konieczne jest zastosowanie rezystorów podciągających R_p.

Mając opracowany sposób odczytu danych pomiarowych z czujników umieszczonych w modelu robota



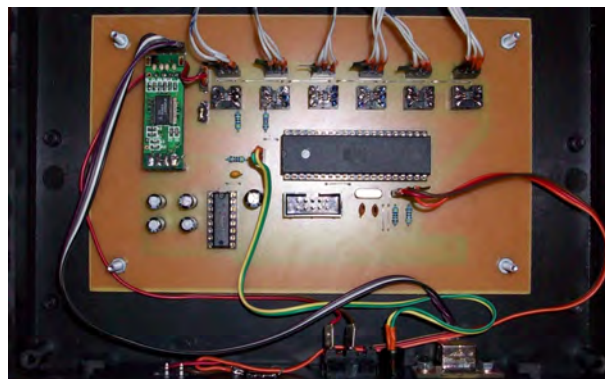
Rys. 12. Schemat podłączenia do magistrali I²C [9]
 Fig. 12. The I²C bus connection diagram [9]



Rys. 13. Schemat podłączenia układu FT232R [11]
 Fig. 13. The FT232R connection diagram [11]

FANUC ARCMate100iB rozpoczęto przygotowanie programu głównego pracy procesora. Ponieważ zadaniem układu pomiarowego jest gromadzenie danych położeniowych oraz ich odpowiednie przetwarzanie konieczne było na tym etapie określenie sposobu współpracy z układem sterowania robota. Pierwotnie przyjęto, że fantom będzie współpracował bezpośrednio z kontrolerem FANUC RJ3iB, jednakże biorąc pod uwagę przeznaczenie układu (dydaktyczny demonstrator technologii) przyjęto ostatecznie, że układ pomiarowy fantomu będzie współpracował z komputerem PC z zainstalowanym oprogramowaniem FANUC Roboguide, dzięki czemu będzie mógł stanowić przenośny system programowania robota zdolny do zabrania na wykład bez konieczności przenoszenia fizycznego robota.

Aby umożliwić podłączenie do komputera PC układu pomiarowego bazującego na procesorze AVR konieczne było zastosowanie konwertera napięciowego MAX232, dzięki któremu możliwe było połączenie szeregowe z dowolnym układem RS-232C [12]. Aby jednak umożliwić podłączanie układu do komputerów przenośnych, któ-



Rys. 14. Gotowy układ elektroniczny do pomiaru położenia kątowych ramion modelu robota ARCMate100iB
 Fig. 14. The electronic device for the ARCMate100iB model kinematic chain rotation measure

re z założenia nie posiadają złącza RS-232, postanowiono zabudować dodatkowy układ konwersji sygnału RS-232 na standard USB. Zastosowano typowy układ FT232R, który z poziomu systemu Windows widziany jest jako wirtualny port COM. Schemat podłączenia konwertera RS-232<->USB pokazano na rys.13. Widok gotowej części elektronicznej fantomu pokazano na rys. 14

5. Przetwarzanie danych pomiarowych na programy zgodne ze specyfikacją FANUC Robotics

Mając opracowaną koncepcję budowy części elektrycznej fantomu konieczne było opracowanie formatu wymiany danych z komputerem PC. Aby możliwe było automatyczne generowanie programu roboczego dla robotów ARCMate100iB, należało dostosować sposób działania układu sterowania fantomu do sposobu tworzenia programów roboczych na fizycznym robocie (programowanie on-line z wykorzystaniem fabrycznego teach-pendanta). Ponieważ program roboczy to nic innego, jak zbiór kolejnych położeń pośrednich wraz z określeniem sposobu osiągnięcia zadanych nimi pozycji, zatem konieczne było umożliwienie, aby operator obsługujący mechatroniczny interfejs programowania metodą „teaching-by-showing” mógł decydować, w którym momencie zapisać pozycję pośrednią. W tym celu na panelu czołowym podstawy fantomu usytuowano przyciski wprowadzania i usuwania danej pozycji pośredniej z programu roboczego (rys. 11).

Aby pokazać, że dane położeniowe są wysyłane w czasie rzeczywistym, w każdym cyklu pracy procesora do komputera PC. Dodatkowo w ramce danych przesyłane są wartości przycisków panelu czołowego, co informuje współpracujące oprogramowanie, czy odczytana z wirtualnego portu COM pozycja (zapisana zestawem kątów skierowanych określających położenia kolejnych członów robota) ma zostać

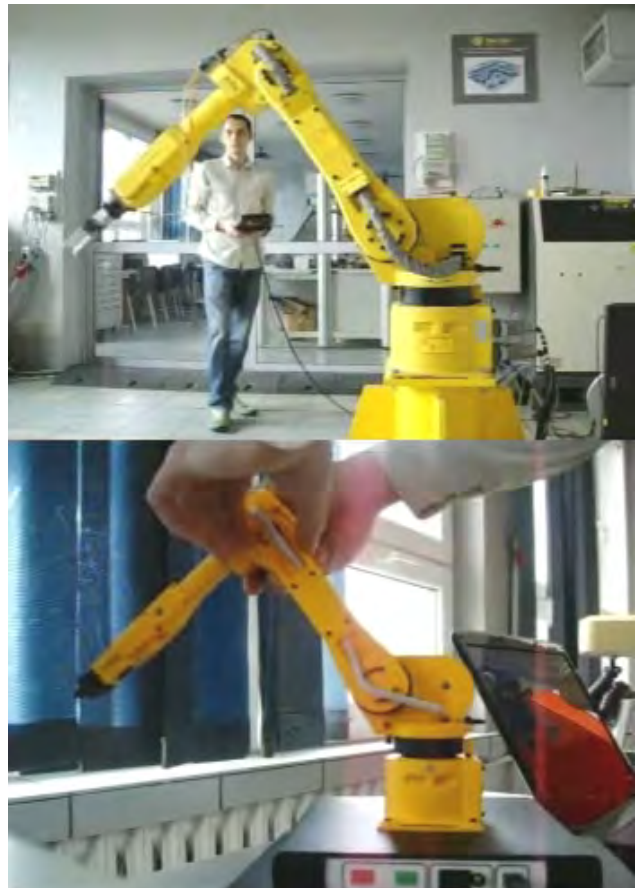
```

/PROG ____
/ATTR
OWNER          = ASCBIN;
COMMENT        = "";
PROG_SIZE      = 649;
CREATE         = DATE 11-06-12 TIME __:__:__;
MODIFIED = DATE 11-06-12 TIME __:__:__;
FILE_NAME      = ;
VERSION        = 0;
LINE_COUNT     = ;
MEMORY_SIZE    = 969;
PROTECT        = READ_WRITE;
TCD: STACK_SIZE = 0,
TASK_PRIORITY = 50,
TIME_SLICE    = 0,
BUSY_LAMP_OFF = 0,
ABORT_REQUEST = 0,
PAUSE_REQUEST = 0;
DEFAULT_GROUP = 1****;
CONTROL_CODE  = 00000000 00000000;
/MN
1:J P[1] __% FINE ;
(...)
n:J P[n] __% FINE ;
/POS
P[1]{
GP1:
UF : 1, UT : 1,
J1= ___ deg, J2= ___ deg, J3= ___ deg,
J4= ___ deg, J5= ___ deg, J6= ___ deg
};
(...)
P[n]{
GP1:
UF : 1, UT : 1,
J1= ___ deg, J2= ___ deg, J3= ___ deg,
J4= ___ deg, J5= ___ deg, J6= ___ deg
};

```

Rys. 15. Przykład generowanych programów roboczych

Fig. 15. The example of generated working program



Rys. 16. Przeprowadzony eksperyment porównania trajektorii ruchu rzeczywistego robota z trajektorią zadawania programu roboczego za pomocą fantomu

Fig. 16. The experimental comparison between the real movement and the phantom's trajectory

tylko wyświetlona na wizualizacji, czy też ma zostać wprowadzona jako kolejna linijka programu roboczego.

Aby możliwe było wykorzystanie wygenerowanego programu roboczego konieczne było opracowanie algorytmu przetwarzania danych na program zgodny ze specyfikacją FANUC Robotics. Schemat generowanych programów roboczych pokazano na rys. 15.

6. Testowanie fantomu podczas programowania fizycznego robota

Chcąc zweryfikować poprawność działania opracowanego interfejsu programowania robotów ARCMate100iB przeprowadzono eksperyment porównawczy, którego przebieg pokazano na rys. 16. Ustawiono 2 niezależne kamery. Jedną na robota, a drugą na jego model (fantom). Podczas testu nagrane zostały zarówno ruchy programujące (przemieszczania fantomu i zapisu kolejnych pozycji), jak również ruch roboczy manipulatora podczas wykonywania wygenerowanego programu. Kamery ustawiono tak, aby możliwie było nałożenie obu obrazów w dowolnie wybranych klatkach filmu celem dokonania oceny wizualnej jakości odwzorowania zadanego za pomocą fantomu programu roboczego.

Uzyskane wyniki porównawcze potwierdziły, że zastosowane wysokorozdzielcze przetworniki ADC wraz z bardzo wiernym modelem CAD samego robota pozwoliły na uzyskanie wyjątkowo dokładnego odtworzenia zadanej trajektorii, co pozwala na wyciągnięcie wniosku, że postawiony cel, czyli opracowanie i wykonanie projektu mechatronicznego interfejsu programowania robotów ARCMate100iB metodą „teaching-by-showing” został osiągnięty.

7. Podsumowanie

Prace nad systemem programowania robotów metodami „teaching-by-showing” zostały ukończone w lipcu 2011 r. Od zakończenia projektu opracowany system został zaprezentowany studentom podczas wykładu z „Podstaw robotyki i budowy robotów”. Porównując zainteresowanie słuchaczy biorących udział w wykładzie, z zainteresowaniem obserwowanym podczas prezentowania tego samego zakresu tematycznego w latach poprzednich można wywnioskować, że stosowanie dodatkowych, mechatronicznych pomocy dydaktycznych pozwala w znacznie większym stopniu na zainteresowanie słuchaczy, co oczywiście w znaczący sposób przekłada się na stopień przyswajalności wiedzy. Ponieważ przeprowadzone analizy porównawcze zachowania robota i jego modelu (fantomu) pokazały pełną zgodność w uzyskiwanych położeniach, zatem możliwe będzie zastosowanie opracowanego interfejsu również do innych zadań, nie tylko związanych z prowadzonym procesem dydaktycznym.

Bibliografia

1. Kost G.: Programowanie robotów przemysłowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1996.
2. Jezierski E.: Dynamika robotów, WNT, Warszawa, 2006.
3. Craig J.J.: *Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie*, WNT, Warszawa, 1995.
4. <http://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/index.html>
5. Kozłowski K., Dudkiewicz P., Wróblewski W.: *Modelowanie i sterowanie robotów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003.
6. Nawrat Z.: *Telemanipulator chirurgiczny RobIn Heart*, „Pomiary – Automatyka – Robotyka”, nr 5, 2011.
7. <http://uzys.tistory.com>
8. <http://www.wobit.pl>
9. <http://www.ti.com>
10. <http://www.atmel.com>
11. <http://www.ftdichip.com>
12. <http://www.maxim-ic.com> ■

Application of microprocessor measurement system for rotation measuring phantom construction for generating programs of FANUC ARCMate 100iB robots

Abstract: The main goal of this work is to present the project and method for realization of microprocessor measurement system for measuring total angle position of rotary potentiometer. The pre-

sented solution is installed in FANUC ARCMate 100iB manufacturing robot, which is created by usage of fast prototyping methods. The main assumption of the presented work was to use phantom for determining the suitable kinematic chain positions of the robot. It is realized by pointing the position by the usage of manually moved robot model. To make robot programming possible, in this case, it was needed to fulfill the two main assumptions. First of all, the full model scaling was necessary, which means to keep the corresponding dimension proportion regarded to normal manufacturing robot. Second of all, we had to applied the suitable measuring system for measuring the angle position of following kinematic chain elements of phantom. The results show that, the precision in determining the indirect positions of robot trajectory mainly depend on accuracy of methods for measuring the angle rotation of phantom arms. Moreover, the calculations carried out that, the precision of angle rotation measurements must be higher than the quality of real mechanical model.

Keywords: phantom, ARCMate100iB, FANUC Robotics, AVR microprocessor, mechatronics, rapid prototyping

dr inż. Daniel Reclik

Ur. 02.09.1981 r., ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach w 2006 r., uzyskując tytuł magistra inżyniera mechanika o specjalności automatyka i robotyka. W 2010 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w specjalności robotyka. Obecnie jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Śląskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się programowaniem i optymalizacją trajektorii ruchu robotów przemysłowych z wykorzystaniem komputerowych systemów wspomagania prac inżynierskich.

e-mail: daniel.reclik@polsl.pl



mgr inż. Paweł Kaczmarczyk

Ur. 28.06.1986 r., ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach w 2011 r., uzyskując tytuł magistra inżyniera w specjalnościach spawalnictwo, technologia maszyn, systemy zarządzania jakością oraz bezpieczeństwem pracy. Obecnie pracuje w firmie UNIDAWELD na stanowisku specjalisty ds. automatyki, gdzie zajmuje się zagadnieniami związanymi z automatyzacją i robotyzacją procesów spawalniczych oraz technologią spawania orbitalnego.

e-mail: pawel.kaczmarczyk@unidaweld.pl

